

Aus dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung II  
- Grünlandwirtschaft und Futterbau -  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

# **Pflanzenbauliche Ansätze zur Selen-Versorgung von Mutterkühen und Fleischrindern in Weidesystemen**

Habilitationsschrift

zur Erlangung der *venia legendi*  
im Fach Pflanzenbau und Grünlandlehre

**HARALD LASER**

Gießen 2004

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>2</b>
2.1	Input-Output-Beziehungen .....	2
2.1.1	Globaler Komplex.....	2
2.1.2	Komplex Boden/Pflanze .....	6
2.1.2.1	Selen-Konzentrationen.....	6
2.1.2.2	Selen-Formen .....	9
2.1.2.3	Redoxsystem .....	11
2.1.2.4	Bodenbestandteile .....	14
2.1.2.5	Verluste.....	16
2.1.2.6	Aufnahme.....	18
2.1.2.7	Selen in Pflanzen .....	22
2.2	Physiologische Bedeutung .....	24
2.2.1	Pflanzen .....	24
2.2.1.1	Nutzen.....	24
2.2.1.2	Toxizität.....	26
2.2.2	Säugetiere.....	27
2.2.2.1	Nutzen.....	27
2.2.2.2	Toxizität.....	30
2.2.2.3	Mangel und Bedarf.....	31
2.3	Selen und Grünland .....	34
2.4	Selen-Supplementierung.....	36
2.4.1	Aufnahme und Absorption.....	36
2.4.2	Direkte Selen-Supplementierung .....	41
2.4.3	Indirekte Selen-Supplementierung .....	44
2.4.3.1	Selenhaltige Dünger.....	44
2.4.3.2	Düngerunabhängige Verfahren.....	47
2.5	Arbeitshypothese .....	50
<b>3</b>	<b>Material und Methoden.....</b>	<b>52</b>
3.1	Standortauswahl .....	52
3.2	Zeitreihenanalyse.....	54
3.3	Selen-Düngung .....	54
3.4	Keimexperiment .....	57
3.5	Silierexperiment .....	59
3.6	Analysemethoden .....	60
3.7	Auswertung .....	62

<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>64</b>
4.1 Standortbedingte Variabilität .....	64
4.1.1 Pflanzenbestand .....	64
4.1.1.1 Pflanzengesellschaft .....	64
4.1.1.2 Futterbauliche Eigenschaften.....	65
4.1.2 Bodenmerkmale .....	66
4.2 Jahresverlauf.....	69
4.2.1 Selen und Ertrag .....	69
4.2.2 Selen- und Schwefel-Konzentrationen .....	73
4.3 Effizienz von Selen-Gaben.....	73
4.4 Selen-Anreicherung von Saatgut .....	82
4.5 Selen-Zusätze zum Siliergut .....	84
<b>5 Diskussion.....</b>	<b>93</b>
5.1 Selen und Schwefel .....	93
5.1.1 Status quo .....	93
5.1.2 Einflussfaktoren.....	96
5.2 Supplementierung .....	107
5.2.1 Selenhaltige Dünger.....	107
5.2.2 Anreicherung von Saatgut.....	114
5.2.3 Zusatz zum Siliergut.....	117
<b>6 Zusammenfassung .....</b>	<b>125</b>
<b>7 Summary .....</b>	<b>128</b>
<b>8 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>131</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>157</b>

## 1 Einleitung

Extensive Weidesysteme mit Mutterkühen und Fleischrindern stellen insbesondere in agrarisch benachteiligten Regionen rentable Landnutzungsformen dar und tragen nachhaltig zur Offenhaltung und zum Erhalt der Kulturlandschaft bei (OPITZ V. BOBERFELD 2003). Die konsequente Limitierung des Kapital- inklusive des Arbeitskraftaufwandes bei gleichzeitiger Optimierung des Outputs ist für die Rentabilität solcher Weidesysteme entscheidend. Eine mangelhafte Versorgung der Weidetiere mit Mengen- und Spurenelementen kann zu Beeinträchtigungen der Tiergesundheit, der Zunahmen, der Reproduktionsleistung sowie der Produktqualität (CORAH 1996, UNDERWOOD & SUTTLE 1999, BANHZAF 2004) und damit zu erheblichen Ertragseinbußen führen. Bezogen auf Selen werden bei Wiederkäuern Immunschwächen, Fruchtbarkeitsstörungen, Komplikationen beim Kalben, Muskeldystrophien und allgemeine Lebensschwäche bei Jungtieren in Zusammenhang mit einer defizitären Versorgung in Verbindung gebracht (BOSTEDT & SCHRAMMEL 1981, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, BOSTEDT et al. 1987, KLAWONN et al. 1996, SCHRAUZER 1998). Unklar ist bislang, unter welchen Bedingungen (= Management, Standort, Jahreszeit) eine adäquate Se-Versorgung durch die Aufnahme mit dem Grundfutter (= Weideaufwuchs und Konserven) erreicht wird bzw. wann eine Se-Supplementierung erforderlich ist. Die optimale Se-Konzentration in der Wiederkäuerration (ANONYMUS 1985, 1996, 2001b) liegt in einem vergleichsweise engen Wertebereich, da Se in Formen mit entsprechender Bioverfügbarkeit schon in kleinen Dosen toxisch wirkt. Das unterstreicht die Notwendigkeit einer bedarfsgerechten, individuenbezogenen Supplementierung. Bei Milchkuhhaltung hat sich die Supplementierung von Se-angereichertem Mineralfutter als Bestandteil des Kraftfutters zur Vermeidung von Se-Mangelsituationen bewährt; bei extensiver Haltung von Weidetieren ist jedoch auf diesem Wege eine gleichmäßige Verteilung der Se-Mengen auf alle Individuen einer Herde nicht praktikabel. Im Bedarfsfall müssen folglich systemkompatible Methoden der Se-Supplementierung eingesetzt werden, die kostengünstig und mit erforderlicher Präzision durchführbar sind.

## 2 Literatur

### 2.1 Input-Output-Beziehungen

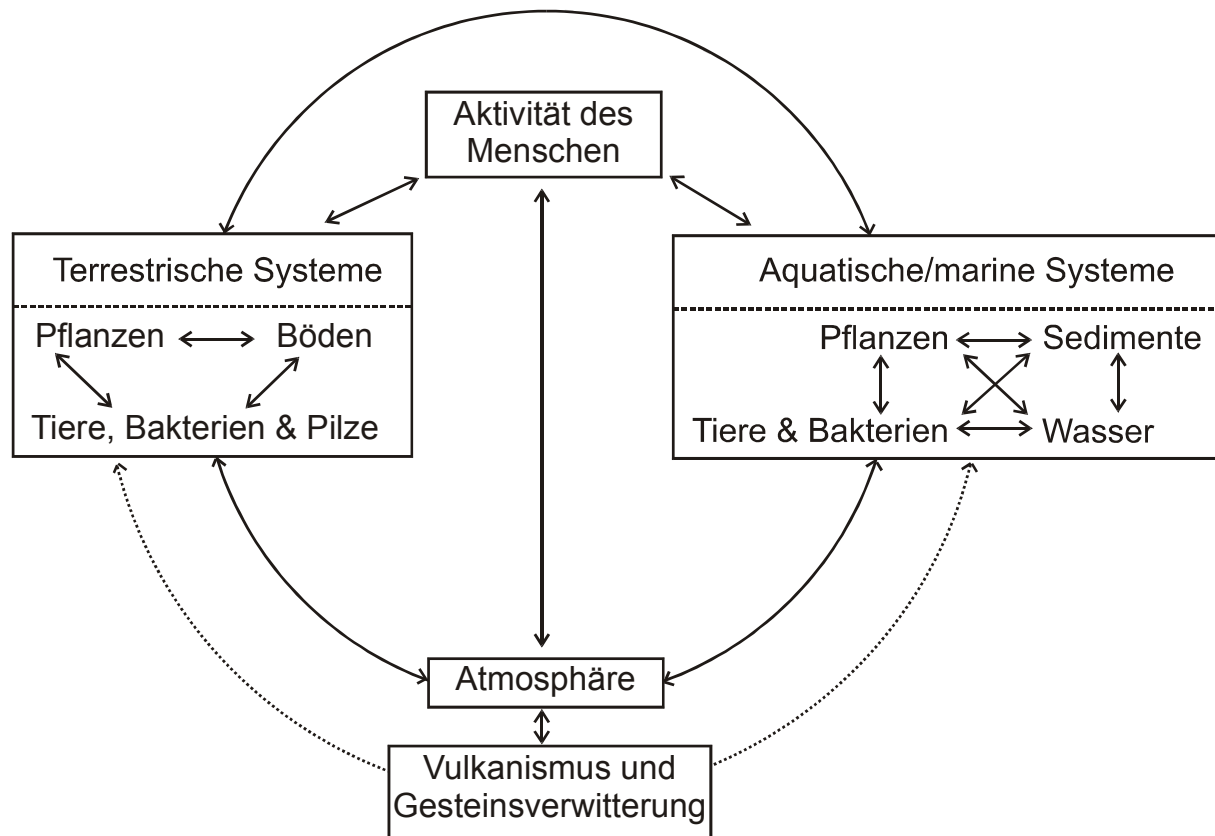
#### 2.1.1 Globaler Komplex

Das Element Se mit der Ordnungszahl 34 gehört zu der Gruppe der Chalkogene und wurde 1817 von Jakob Berzelius entdeckt. Wie S, dessen chemische Eigenschaften denen von Se ähnlich sind (MC NEAL & BALISTRERI 1989), kann Se in Umweltmedien in den Oxidationsstufen -2, 0, +4 oder +6 vorkommen. In welchem Verhältnis die Oxidationsstufen vorherrschen, vgl. 2.1.2.3, ist im hohen Maße vom pH-Wert und den Redox-Bedingungen abhängig (CARY et al. 1967, GEERING et al. 1968), aber auch von der Löslichkeit gebildeter Salze, Stärke der Bindungen bei Komplexreaktionen, dem kinetischen Verhalten und von biologischen Interaktionen (MC NEAL & BALISTRERI 1989). Die Ähnlichkeiten zwischen den in Tab. 1 zusammengefassten Eigenschaften von Se und S - insbesondere bezogen auf den Ionenradius - führen dazu, dass viele Prozesse in Se-Kreisläufen analog zu denen von S verlaufen, wodurch es auch häufig zu antagonistischen Effekten kommt (LEVERESQUE 1974, DOWNES et al. 1979, MILCHUNAS et al. 1983, MACGREGOR 1997, TERRY et al. 2000). Aufgrund des weiten Bereichs an Oxidationsstufen tritt Se wie S in zahlreichen Reaktionen als Donator und Rezeptor auf.

**Tab. 1:** Chemische Eigenschaften von Se und S

<b>Merkmal</b>	<b>Se</b>	<b>S</b>
<b>Ordnungszahl</b>	34	16
<b>Atomgewicht</b>	78,96	32,06
<b>Ionisationspotential [eV]</b>	9,75	10,36
<b>Elektronegativität</b>	2,4	2,5
<b>Ionenradius [Å]</b>	1,98	1,84

MC NEAL & BALISTRERI (1989) gehen davon aus, dass Se in den meisten Umweltmedien der Erde zumindest in Spuren enthalten ist. Ein stark vereinfachtes Schema des globalen Se-Kreislaufs ist in Abb. 1 dargestellt.



**Abb. 1:** Globaler Se-Kreislauf, verändert nach OHLENDORF (1989)

Nach Schätzungen von NRIAGU (1989) ist die Lithosphäre mengenmäßig der bedeutendste Se-Pool. Dem stehen, bezogen auf die oberen 45 km der Erdkruste, die relativ geringen durchschnittlichen Konzentrationen von  $50 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Masse gegenüber. Je nach Gesteinsart können die Konzentrationen jedoch stark variieren, wobei Schiefer und Basalt als am Se-reichsten, Granit, Sandstein und Gesteine aus vulkanischen Aschen als eher Se-arm gelten, Kalksteine nehmen eine Mittelstellung ein (MC NEAL & BALISTRERI 1989, WHITE & ZASOSKI 1999, WHITEHEAD 2000); wobei Schwarzschiefer und Phosphatgestein um mehrere Zehnerpotenzen höhere Se-Konzentrationen aufweisen kann als Sandstein (ANONYMUS 1976, HAYGARTH 1994). Sedimentgesteine weisen unterschiedlich hohe Se-Konzentrationen auf, häufig liegen lokal die Gehalte in Böden, die aus der Verwitterung von Sedimentgestein entstanden sind, über denen der sie umgebenden Böden (MC NEAL & BALISTRERI 1989). Magmatisches Gestein gilt generell als Se-arm, da während der Abkühlung Se unter Bildung von stabilen Metallseleniden abgeschieden worden ist (GIRLING 1984). JOHNSON (1976) stellt fest, dass weltweit etwa 20% der Böden aus Gesteinen magmatischen Ursprungs

entstanden sind, wobei nahezu alle Regionen mit entsprechenden Böden als Se-defizient einzustufen sind. Im globalen Se-Haushalt sind die geologischen Se-Reserven von zentraler Bedeutung, obwohl sie zum großen Teil immobil sind. Die Freisetzung von Se durch Gesteinsverwitterung ist nach MC NEAL & BALISTRERI (1989) weltweit betrachtet die größte Se-Quelle und ist nach GIRLING (1984) auch die zentrale Einflussgröße für die Se-Gehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden. Den zweitgrößten Se-Pool stellen die Ozeane dar. Trotz noch geringerer Se-Konzentrationen sind sie für globale Se-Kreisläufe insofern bedeutsam, da die Meere Se an die Atmosphäre abgeben, das über größere Distanzen verbreitet wird und zum Teil auf Landmassen deponiert wird. NRIAGU (1989) schätzt, dass etwa 15000 t Se a<sup>-1</sup> aus marinen auf terrestrische Ökosysteme übertragen werden, wonach dieser Stoffstrom den mengenmäßig bedeutendsten für den globalen Se-Kreislauf darstellen würde. Aufgrund dessen nehmen die Se-Konzentrationen in Boden und Pflanzen mit abnehmendem Abstand zur Küste zu (BAHNERS 1987). Obwohl die Se-Konzentrationen in der Atmosphäre mit etwa 1 ng m<sup>-3</sup> Luft (HAYGARTH 1994) niedrig sind, spielen sie für den globalen Se-Haushalt eine entscheidende Rolle, da die physikalischen und chemischen Prozesse schnell ablaufen und atmosphärisches gasförmiges oder an Partikel bzw. Meersalz gebundenes Se über große Distanzen rasch transportiert wird. Gasförmig tritt Se überwiegend als Dimethylselenid aber auch als Dimethyldiselenid oder Dimethylselenon auf. Diese flüchtigen Verbindungen werden überwiegend durch die Stoffwechselaktivität von Mikroorganismen aus dem Boden bzw. über Wasseroberflächen oder durch Pflanzen freigesetzt, wobei die Ozeane als Quelle mengenmäßig am bedeutsamsten sind (HAYGARTH 1994). Nach DOWDLE & OREMLAND (1998) werden die meisten natürlichen Transformationen von Se-Formen durch biotische Prozesse verursacht. Weitere Teile des atmosphärischen Se sind vulkanischen (MCNEAL & BALISTRERI 1989) oder anthropogenen Ursprungs (HAYGARTH et al. 1993). Bedeutsam sind hierbei vor allem Emissionen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe, die nach HAYGARTH (1994) zwischen 1930 und 1970 ihren Höhepunkt erreichen, seit über 30 Jahren jedoch deutlich rückläufig sind. In Deutschland sind die atmosphärischen Emissionen von Se zwischen 1985 und 1995 von 87 t auf 12 t in den alten bzw. von 28 t auf 13 t a<sup>-1</sup> in den neuen Bundesländern zurückgegangen (ANONYMUS 1998a). Die mengenmäßig vielleicht wichtigsten Se-Emittenten sind die Kohlekraftwerke (YAN et al. 2001). Die Konzentration in Flugaschen liegt hier im Durchschnitt zwischen 1 und 6 mg Se kg<sup>-1</sup> (ADRIANO 1986), sie

kann aber auch  $16,5 \text{ mg Se kg}^{-1}$  Asche betragen (GUTENMANN et al. 1976). Die Form und Menge der Se-Emissionen ist dabei von der Art und Herkunft der Kohle, Temperatur, Zeit, Se-Form in der Kohle und der Partikelgröße abhängig (YAN et al. 2001). Kohle kann bis zu 10, Heizöl bis zu  $7,5 \text{ mg Se kg}^{-1}$  des jeweiligen Brennstoffs enthalten (OHLENDORF 1989). Die Se-Deposition ist meist in Nähe von Ballungsräumen und Industriezentren höher als im jeweiligen Umland. Im urbanen Raum konnte die Netto-deposition noch vor wenigen Jahren nach LAHMANN (1990)  $> 4 \text{ g Se ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  betragen. HAYGARTH et al. (1993) berechnen für ländliche Regionen Nord-West-Englands eine Depositionsmenge von 260 bis  $490 \text{ mg Se ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Die Depositionsmengen in maritim beeinflussten Lagen oder in der Nähe von Kohlebergbau, Hüttenindustrie bzw. Raffinerien sind mit  $0,9$  bis  $2,7 \text{ g Se ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  höher. Offenbar sind die Depositionen jahreszeitabhängig, wobei für den Zeitraum von Oktober bis Januar weit über 50% der Jahresmengen berechnet werden (HAYGARTH et al. 1994). Untersuchungen von HAYGARTH et al. (1994) lassen vermuten, dass die Höhe der Se-Deposition auch die Se-Konzentration von Pflanzen beeinflusst. Die Se-Konzentrationen von *Lolium perenne*-Beständen, die unter identischen Bedingungen wachsen, verändern sich demzufolge in den Umwelten der Untersuchungsstandorte entsprechend der jeweiligen berechneten atmosphärischen Se-Depositionsmengen. Für den Ort der Deposition von an Partikeln gebundenem Se sind nach HAYGARTH (1994) neben der Entfernung zum Ursprungsort der Emission die Partikelgröße, die lokalen Windverhältnisse und die Oberflächenbeschaffenheit der betroffenen Landschaftsausschnitte maßgebend. Bezogen auf die Oberflächenrauigkeit sind Baumkronen in der Lage, weitaus größere Mengen je Grundflächen- und Zeiteinheit aufzunehmen als Grasnarben. Den atmosphärischen Einträgen aus maritimen Systemen und Se anthropogenen Ursprungs in terrestrische Systeme (= überwiegend nasse Deposition) stehen die gasförmigen Verluste durch mikrobielle Aktivität gegenüber, vgl. 2.1.2.5. Nach HAYGARTH et al. (1994) kann die Se-Verdampfung auf Grünland in peripheren Lagen zwischen 1 und  $2 \text{ g Se ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  betragen.



## 2.1.2 Komplex Boden/Pflanze

### 2.1.2.1 Selen-Konzentrationen

Weltweit variieren die **Se-Konzentrationen von Pflanzen und die Se-Gehalte**<sup>1</sup> im **Boden** in einem ausgesprochen weiten Bereich. Nach SCHRAUZER (1998) gibt es weltweit allerdings weitaus mehr Selenmangelregionen als Regionen mit Se-Überschuss, vgl. Tab. 2. Für die Se-Gehalte im Boden spielen dabei klimatische Einflüsse, der Se-Gehalt des Ausgangsgesteins und das Ausmaß atmosphärischer Depositionen, vgl. 2.1.1, eine zentrale Rolle (GISSEL-NIELSEN et al. 1984, OHLENDORF 1989, HAYGARTH et al. 1994).

**Tab. 2:** Regionen mit potentiellm Se-Mangel und – Überschuss nach SCHRAUZER (1998)

Regional vorkommender Se-Mangel	Regional vorkommender Se-Überschuss
Australien	China
Baltikum	Colorado
China	Idaho
<b><u>Deutschland</u></b>	Irland
England	Israel
Finnland	Kansas
Frankreich	Kolumbien
Japan	Montana
Kanada	Nebraska
Neuseeland	New Mexico
Schottland	Nord- und Süd-Dakota
Skandinavien	Oklahoma
Südamerika	Russland
USA, nordwestliche Staaten	Venezuela
USA, östliche Staaten	Wyoming

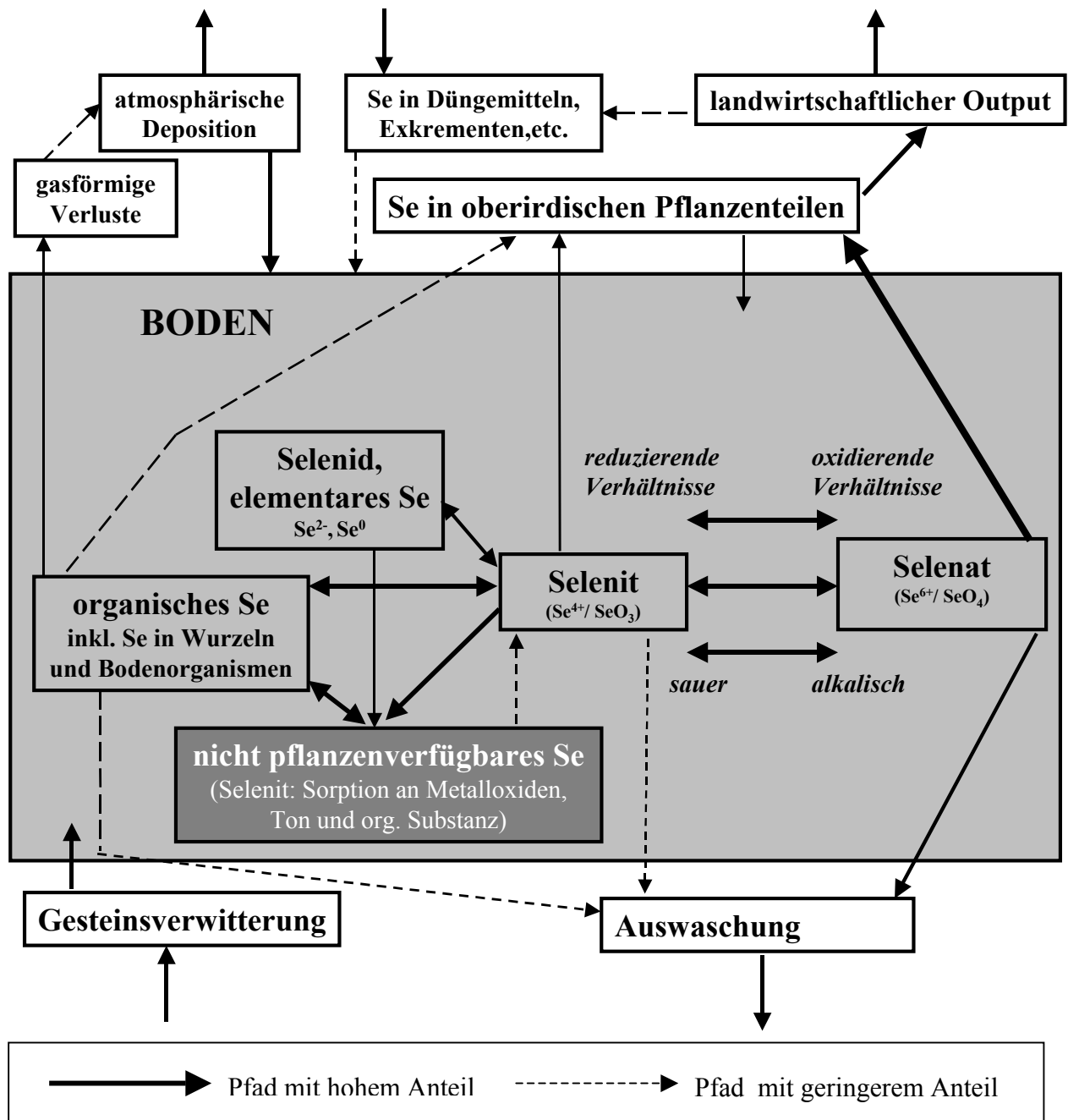
<sup>1</sup> Obwohl der Begriff „Konzentration“ sowohl für Pflanzenmaterial als auch für Boden zutreffend ist, wird dieser im Text nur im Zusammenhang mit Pflanzenanalysen verwendet. Im Zusammenhang mit Boden wird der hierfür gängigere Ausdruck „Gehalt“ eingesetzt.

Das Risiko toxischer Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial ist in der Regel begrenzt auf aride und semiaride Regionen und dabei besonders erhöht auf Böden, die aus kreidezeitlichem Schiefer hervorgehen (ROSENFELD & BEATH 1964). In humiden Regionen werden große Teile des aus Gesteinsverwitterung freigesetzten Se ausgewaschen (OHLENDORF 1989).

**Tab. 3:** Se-Gehalte in  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  Boden von Böden in Deutschland nach BAHNERS (1987)

Bundesland	Nutzung	x	Min. - Max.
<b>Schleswig-Holstein</b>	Grünland (n = 15)	260	150-560
	Ackerland (n = 15)	190	100-380
<b>Hessen</b>	Grünland (n = 24)	200	70-410
	Ackerland (n = 23)	140	60-320
<b>Bayern</b>	Grünland (n = 41)	80	30-210
	Ackerland (n = 31)	70	20-210
<b>Niedersachsen</b>	Grünland (n = 33)	180	50-580
	Ackerland (n = 28)	160	50-410
<b>Nordrhein-Westfalen</b>	Grünland (n = 108)	190	50-650
	Ackerland (n = 64)	120	40-420
<b>Baden-Württemberg</b>	Grünland (n = 24)	110	40-280
	Ackerland (n = 16)	90	30-180
<b>Rheinland-Pfalz</b>	Grünland (n = 59)	120	40-370
	Ackerland (n = 18)	110	60-220
<b>Gesamt</b>	Grünland (n = 304)	160	30-650
	Ackerland (n = 195)	120	20-420

Zu kritisch hohen Konzentrationen kommt es hier nur durch Aktivitäten des Menschen oder, wie in Teilen Irlands, durch die Kombination Se-reicher Gesteine und besonderen bodenhydrologischen Verhältnissen, die eine Auswaschung erschweren. Eine Übersicht der Se-Gehalte in deutschen Böden ist in Tab. 3 dargestellt. In der Regel besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Se-Gehalten im Boden und Se-Konzentrationen in den Aufwüchsen. Zwar sind bei globaler Betrachtung in Gebieten, in denen Se im Überschuss vorhanden ist, auch hohe Konzentrationen im Pflanzenmaterial zu erwarten, die unter Umständen auch toxisch sein können, vor allem in ariden und semi-ariden Regionen, wie z.B. in einigen Gebieten der zentralen Staaten der USA (GISSEL-NIELSEN et al. 1984), andererseits sind Aufwüchse in Regionen mit extrem niedrigen Se-Gehalten im Boden, wie in weiten Teilen Australiens und Neuseelands, in der Regel Se-arm (GISSEL-NIELSEN et al. 1984), doch lässt sich bei der Betrachtung nord- und mitteleuropäischer Verhältnisse häufig keine Korrelation zwischen Se-Gehalt im Boden und Se-Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen feststellen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984, BAHNERS 1987, GISSEL-NIELSEN 1993), obwohl die Se-Konzentrationen in Deutschland in einem relativ weiten Bereich streuen (BAHNERS 1987, BRUß et al. 1997), vgl. Tab. 3. Die Se-Aufnahme durch die Pflanze ist von Translokations-, Transformations- und Sorptionsmechanismen von Se im Boden abhängig, wobei die Aktivität der Bodenorganismen und Pflanzen selbst den Se-Haushalt im System Boden/Pflanze äußerst dynamisch gestaltet (GISSEL-NIELSEN & HAMDY 1978, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, BAHNERS & HARTFIEL 1987, YLÄRANTA 1993). Eine schematische Übersicht der komplexen Wechselbeziehungen ist in Abb. 2 dargestellt.



**Abb. 2:** Schema des Se-Haushalts im System Boden/Pflanze bei landwirtschaftlicher Nutzung

### 2.1.2.2 Selen-Formen

Die **Pflanzenverfügbarkeit von Se im Boden** wird letztlich bestimmt durch die **chemische Form** bzw. die **Wertigkeit des Se**. Einerseits können nicht alle Se-Vorräte von den Pflanzen in gleichem Umfang aufgenommen werden, vgl. 2.1.2.6, andererseits liegen die Se-Formen im Boden unterschiedlich stark gebunden vor, vgl. 2.1.2.3 und 2.1.2.4. Se kann im Boden als **Selenid** (= Oxidationsstufe -2), **Selenit**

(= Oxidationsstufe +4), **Selenat** (= Oxidationsstufe +6) und als **elementares Se** oder als Bestandteil organischer Verbindungen im Boden, wie beispielsweise den Aminosäuren **Selenomethionin** und **Selenocystein**, häufig aber auch in wesentlich komplexeren Verbindungen vorliegen (MIKKELSEN et al. 1989, SÉBY et al. 1997). Darüber hinaus sind im Boden die gasförmigen Verbindungen **Dimethylselenid**, **Dimethyldiselenid** und **Dimethylselenylsulfid** bedeutsam, die in erster Linie durch Bakterien und Pilze, aber auch durch einzelne Pflanzenarten und Bodenfauna durch Reduktion und Biomethylierung von anorganischen Se-Formen gebildet werden (GIRLING 1984, CHASTEEN & BENTLEY 2003). Dimethylselenid kann ferner zu **Dimethylselenoxid** oder **Dimethylselenon** oxidiert werden (ZHANG & FRANKENBERGER 1999).

In Bodensystemen ist das Ausmaß der Adsorption und Immobilisierung von Se stark von der Se-Form abhängig. Dieser Zusammenhang ist am umfangreichsten für Selenit und Selenat beschrieben (YLÄRANTA 1983a, b, 1984, VAN DOORST & PETERSON 1984, BARROW & WHELAN 1989a, FIO et al. 1991, GISSEL-NIELSEN 1993, BRUß et al. 1997). Selenat wird ähnlich wie Sulfat und Nitrat im Boden nur schwach sorbiert, während Selenit zum Großteil an Bodenbestandteile sorbiert vorliegt und gewisse Parallelen zur Sorption von Phosphat an Austauscherelemente aufweist (BARROW & WHELAN 1989b). Selenat wird offenbar aufgrund der höheren Mobilität im Boden in stärkerem Maße als Selenit von der Pflanze aufgenommen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984, BAHNERS 1987, STÜNZI 1988, GISSEL-NIELSEN 1993), unterliegt aber auch einer höheren Auswaschungsgefährdung (FIO et al. 1991, YLÄRANTA 1993). In gut durchlüfteten alkalischen Böden kann wasserlösliches Selenat die mengenmäßig bedeutendste Se-Form sein (LAKIN 1961, ELRASHIDI et al. 1989), was in ariden Regionen zu toxischen Se-Konzentrationen im Aufwuchs führen kann, vgl. 2.2.1.2. SEBY et al. (1997) stellen jedoch fest, dass selbst in einem Boden mit pH 7,25 ( $C_{\text{org}}$ -Gehalt = 4,25%) und überdurchschnittlich hohen Se-Gehalten (= 5920  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  Boden-TS) nur etwa 10% des absoluten Se-Gehaltes wasserlöslich sind. Knapp zwei Drittel des Se in Bodenlösung ist hierbei sechswertiges Se (= Selenat), ca. 30% liegen als vierwertiges Se (= Selenit) vor. Nach ADRIANO (1986) sind üblicherweise sogar nur 0,3 bis 7% des Gesamt-Se im Boden wasserlöslich. In dauerhaft anoxischen Systemen überwiegt häufig elementares Se (STOLZ & OREMLAND 1999) oder Eisenselenid (MASSCHELEYN et al. 1990), beide Formen sind nicht direkt pflanzenverfügbar. Nach NYE & PETERSON (1975) sind die Se-Konzentrationen in der Vegetation korreliert mit den Gehalten an wasserlöslichem Se im Boden. Sicherere Aussagen zur Verfügbar-

keit von Se in Substraten können jedoch eher in abgestuften chemischen Fraktionierungsverfahren mit verschiedenen starken Lösungsmitteln erzielt werden (HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1976b), doch weder die Unterteilung des Gesamt-Se im Boden nach Löslichkeit in unterschiedlichen Lösungsmitteln, noch die Unterteilung nach Se-Formen sind ausreichend genaue Verfahren, die tatsächlichen Se-Konzentrationen von Futterpflanzen zuverlässig zu prognostizieren. Trotz eines breiten Wertebereichs der Se-Konzentrationen zwischen 0 und 60 mg Se kg<sup>-1</sup> TS im Pflanzenmaterial unterschiedlicher Standorte lässt sich in Untersuchungen von MANTGEM et al. (1996) ein Zusammenhang mit den wasserlöslichen Se-Mengen bzw. den Mengen an Selenat, Selenit oder organisch gebundenem Se im Boden kaum erkennen. Daraus wird ersichtlich, dass die Bodeneigenschaften die Se-Aufnahme durch die Pflanze maßgeblich in komplexer Weise beeinflussen.

#### 2.1.2.3 Redoxsystem

Bei niedrigem **pH-Wert des Bodens** ist die Verfügbarkeit von Se im Boden offenbar begrenzt und die Se-Aufnahme durch die Pflanze steigt in der Regel bei zunehmendem pH-Wert an (GEERING et al. 1968, GISSEL-NIELSEN 1971, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, NEAL 1995). Einerseits ist die Anionensorption im Boden generell bei niedrigem pH-Wert höher, weshalb Se zunehmend an Bodenbestandteile adsorbiert wird, vgl. 2.1.2.4, andererseits wird das sechswertige Selenat unterhalb pH 5 verstärkt reduziert, weshalb Se im sauren Milieu zunehmend in Form des vierwertigen Selenits vorliegt (GISSEL-NIELSEN et al. 1984, SPOSITO et al. 1991, GISSEL-NIELSEN 1993). Eine **CaCO<sub>3</sub>**-Applikation und eine damit verbundene Erhöhung des pH-Wertes kann zu einer Erhöhung der gut pflanzenverfügbaren Se-Anteile am Gesamt-Se-Gehalt im Boden führen (CARY et al. 1967, CARY & ALLAWAY 1969, GISSEL-NIELSEN 1971). Ein entsprechender Effekt tritt in Gefäßversuchen von HAMDY & GISSEL-NIELSEN (1976b) bei einem Sandboden am deutlichsten auf, weniger deutlich bei einem tonigen Lehm und bei einem Moorboden ist der geringste Einfluss festzustellen. Nicht immer führen höhere pH-Werte zu höheren Se-Konzentrationen in den Aufwüchsen. So kann die Se-Konzentration in der Pflanze auch abnehmen, wenn der Anstieg der Se-Aufnahme infolge einer pH-Wert-Erhöhung durch eine erhöhte Biomassebildung kompensiert wird (GISSEL-NIELSEN 1971). Im Falle eines solchen Verdünnungseffektes werden bodenreaktionsbedingte Effekte nur im Vergleich der Se-Entzüge deutlich (GISSEL-NIELSEN 1971).

Der Anteil des pflanzenverfügbaren Se am Gesamtanteil des Se im Boden wird aber nicht allein durch die Bodenreaktion beeinflusst. BAHNERS (1987) stellt nach Auswertung von Daten verschiedener Grünlandbestände in Deutschland keine direkte Abhängigkeit der Se-Konzentration der Gras-Aufwüchse vom pH-Wert der Böden fest ( $r = 0,04$ ,  $n = 354$ ). Die Beziehung zwischen Bodenreaktion und Se-Verfügbarkeit wird maßgeblich durch das **Redoxpotential** beeinflusst (GEERING et al. 1968, ELRASHIDI et al. 1989, MASSCHELEYN et al. 1990). Der biogeochemische Redox-Kreislauf von Se ist nach DOWDLE & OREMLAND (1998) noch unzureichend untersucht. Bisherige Ansätze berücksichtigen überwiegend Medien mit hohen Se-Konzentrationen oder basieren auf einer künstlichen Se-Anreicherung der Substrate (ABU-ERREISH et al. 1968, HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1976b, YLÄRANTA 1982, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, MARCY et al. 1989, SPOSITO et al. 1991, GARBISU et al. 1996, DOWDLE & OREMLAND 1998, STOLZ & OREMLAND 1999, LIN & TERRY 2003). Unter reduzierenden Verhältnissen nimmt der Gehalt an leicht verfügbarem Selenat im Boden ab, zugunsten des eingeschränkt verfügbaren Selenits bzw. praktisch nicht verfügbarer organischer Se-Verbindungen, Metallseleniden oder von elementarem Se. Dies führt unter **anaeroben Bedingungen** bzw. bei Sauerstoffmangel zu deutlich geringeren Se-Gehalten im Bodenwasser. In Untersuchungen von SPOSITO et al. (1991) an einem alluvialen Boden zeigt sich, dass dieser Immobilisierungsprozess rasch verläuft. Innerhalb von 100 Stunden nimmt die Konzentration an löslichem Se in der Bodensuspension von  $> 250 \text{ mM m}^{-3}$  nach Zugabe von Selenat auf ein Niveau unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze ab. Obwohl die **Reduktion** von Se-Verbindungen auch abiotisch erfolgen kann (MYNENI et al. 1997), geht die Reduktion von Selenat im Boden überwiegend auf die Aktivität von **Mikroorganismen** zurück (STOLZ & OREMLAND 1999). Viele Bakterien benutzen Se höherer Oxidationsstufen unter anaeroben Bedingungen als Protonenakzeptor (GARBISU et al. 1996, STOLZ & OREMLAND 1999). Einige Bakterien sind offenbar auf die Reduktion von Selenat und Selenit spezialisiert, wie *Thauera selenatis* oder *Bacillus arsenicoselenatis* (DOWDLE & OREMLAND 1998). Aufgrund der ähnlichen chemischen Eigenschaften von S und Se wird Se anscheinend außerdem von Schwefelreduzenten genutzt (STOLZ & OREMLAND 1999). GARBISU et al. (1996) zeigen aber auch, dass in Se-reichen Medien nicht nur Spezialisten, sondern auch weitverbreitete Bodenbakterien Selenit zu elementarem Selen oder Sulfiden reduzieren. Modellhaft für Gram (-) und Gram (+) Bodenbakterien wurden hier *Pseudomonas fluorescens* und *Bacillus subtilis* untersucht, die offenbar zur Detoxifikation von Se-

reichen Substraten beitragen können. Darüber hinaus sind weitere *Pseudomonas*-Arten in der Lage, Selenat zu Selenit zu reduzieren (MARCY et al. 1989). Die Selenat-reduktion im Boden ist abhängig von der **Nitratkonzentration** (SPOSITO et al. 1991). Offenbar kann Nitrat die Reduktion von Selenat zu Selenit verzögern (MARCY et al. 1989, SPOSITO et al. 1991), die Zugabe von Nitrat in einem anaeroben System kann neben der Se-Reduktion auch die Se-Methylierung und somit die gasförmigen Verluste herabsetzen (FRANKENBERGER & KARLSON 1994). Nach GARBISU et al. (1996) besteht dagegen bei der Reduktion von Selenit kein Zusammenhang mit Nitrit- und Sulfitkonzentrationen im Substrat, allerdings wird der Einfluss dieser potentiellen Antagonisten nur im Verhältnis 1:1 (= 1 mM Selenit : 1 mM Nitrit bzw. 1 mM Selenit : 1 mM Sulfit) geprüft, Konzentrationsgradienten sind hier nicht berücksichtigt.

Eine Erhöhung des Anteils leicht pflanzenverfügbarer Fraktionen kann durch Mineralisation organischer Se-Verbindungen bzw. durch **Oxidation** von Selenid bzw. elementarem Se erfolgen. GEERING et al. (1968) weisen nach, dass die Oxidation z.B. bei Zusatz von  $MnO_2$  auch auf abiotischem Weg erfolgen kann, es ist aber davon auszugehen, dass die Oxidation zu Selenit bzw. Selenat ebenfalls zu großen Teilen durch Mikroorganismen erfolgt. DE SOUZA et al. (1999) zeigen, dass die Se-Aufnahme bei verschiedenen Helophyten durch Hemmung der Rhizosphärenbakterienaktivität mittels einer Antibiotikum-Applikation bei hohen Se-Gehalten im Boden um bis zu 40% abnehmen kann. In Versuchen von DOWDLE & OREMLAND (1998) mit Schlamm aus einem Seebett, dass mit markiertem elementarem Se angereichert wird, werden unter aeroben Bedingungen nach einer Inkubationszeit von 25 Tagen 17% des Se in Selenat bzw. in kleineren Anteilen Selenit von Mikroorganismen überführt, wohingegen in der Kontrolle (= Einschränkung der Mikroorganismenaktivität mit Formalin) die Ausgangsmenge an elementarem Se unverändert bleibt.

TENNANT & WU (2000) stellen fest, dass die Se-Konzentration bei *Festuca arundinacea* bei einem **häufigen Wechsel von anaeroben zu aeroben Bedingungen** (= dreitägiger Zyklus) im Vergleich zu gleichbleibender Bodenfeuchte signifikant erhöht ist. Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ein Teil der höheren Se-Konzentrationen mit verminderten Erträgen infolge des Wasserstress zu erklären sind, zeigen Bodenuntersuchungen, dass auch die Anteile leicht verfügbarer Se-Formen - vor allem Selenat - durch die zeitweise oxidierenden Verhältnisse zunehmen (BLAYLOCK & JAMES 1994, TENNANT & WU 2000). Allerdings ist davon auszugehen, dass nach Rückkehr der reduzierenden Verhältnisse Selenat wieder reduziert



wird und Se wieder stärker sorbiert wird (NEAL & SPOSITO 1991). Dem möglichen, zeitlich begrenzten Gewinn an leicht pflanzenverfügbarem Se bei wechselnden Bodenfeuchtezuständen steht jedoch eine Erhöhung der gasförmigen Verluste gegenüber (YLÄRANTA 1982, NEAL & SPOSITO 1991), vgl. 2.1.2.5.

#### 2.1.2.4 Bodenbestandteile

Tonminerale, pedogene Oxide und organische Bodensubstanz können aufgrund ihrer Sorptionseigenschaften die Selenverfügbarkeit für Pflanzen beeinträchtigen (GEERING et al. 1968, GIRLING 1984, GISSEL-NIELSEN et al. 1984), wobei das Ausmaß der Se-Sorption neben den jeweiligen Anteilen dieser Bodenbestandteile von den vorherrschenden Se-Formen, vgl. 2.1.2.2, sowie von der Bodenreaktion und den Redoxbedingungen, vgl. 2.1.2.3, abhängig ist.

Je höher die **Tongehalte**, um so mehr Se - vor allem Selenit - wird im allgemeinen im Boden sorbiert und steht den Pflanzen nicht mehr direkt zur Verfügung (CARY et al. 1967, GISSEL-NIELSEN 1971, HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1977, GISSEL-NIELSEN & HAMDY 1978, BAHNERS & HARTFIEL 1987, SCHWEDER et al. 1996, AJWA et al. 1998). RAJAN & WATKINSON (1976) zeigen, dass bei Tonmineralen ein Austausch von adsorbierten Sulfat-, Silikat- und Hydroxylionen gegen Selenit erfolgen kann. Andererseits kommt es bei einer Phosphatapplikation vermehrt zu einer Desorption von Selenit. Der Anteil des im Boden an Tonminerale adsorbierten Se wird neben dem Tongehalt auch von der **Art der Tonminerale** und dem pH-Wert bestimmt (HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1977). Zumindest innerhalb der Beobachtungsdauer dieses Laborexperiments von 10 Tagen wird Selenit in höherem Maße durch Kaolinit und Vermiculit festgelegt als durch Montmorillonit (= 2 : 1-Schichttyp), wobei bei niedrigem pH-Wert zumeist deutlich größere Se-Mengen fixiert werden als im neutralen und alkalischen Bereich. Nach GISSEL-NIELSEN (1971) ist jedoch, bezogen auf Se-Konzentrationen in *Lolium perenne*-Aufwüchsen, die Interaktion pH-Wert x Tonanteil signifikant, da die Se-Konzentrationen bei Tongehalten < 3% mit zunehmendem pH-Wert abnehmen. Dieser im Vergleich zu höheren Tonanteilen gegensätzliche Effekt der Bodenreaktion ergibt sich im pH-Bereich < 7 auch für die Se-Entzüge.

SCHWEDER et al. (1996) stellen fest, dass zwischen Se-Konzentrationen und den Gehalten **organischer Substanz** im Boden eine enge Abhängigkeit besteht und dass offenbar Se ebenso wie S auf Grünland überwiegend in der organischen Substanz gebunden vorliegt. Auch BRUß (1998) weist auf den engen Zusammenhang

von Gesamt-Se-Gehalt und C-Gehalt im Boden hin. Diese Beziehung lässt sich aber nicht allein durch Anionensorption erklären, vielmehr kann Se bei hohen Gehalten organischer Substanz im Boden auch in hohem Maße in komplexen organischen Verbindungen vorliegen, die nicht direkt über die Wurzeln aufgenommen werden können (LEVERESQUE 1974). Se, das von Bodenorganismen inkorporiert wird, steht ebenfalls den Pflanzen nicht direkt zur Verfügung (HODGSON 1963, GISSEL-NIELSEN et al. 1984). Der Selenumsatz in der organischen Substanz und seine Bedeutung für den Se-Kreislauf im Boden ist bislang noch unzureichend untersucht (HAYGARTH 1994). Nach Zugabe von organischer Substanz zu Bodensubstrat nimmt der Anteil an leicht pflanzenverfügbarem Se im Boden ab (LEVERESQUE 1974, HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1976b). Wird Se in Form einer organischen Quelle appliziert, wie Se-reiches Pflanzenmaterial oder Rindergülle oder als Selenat in Verbindung mit organischen Materialien, so ist die Se-Aufnahme im Vergleich zur mineralischen Se-Gabe deutlich reduziert (BANUELOS et al. 1996). Auch in alkalischen Böden mit hohen Selenatgehalten kann der Anteil des leicht pflanzenverfügbaren Se durch Zugabe einer organischen C-Quelle gesenkt werden. Durch eine Erhöhung der mikrobiellen Stoffwechselaktivität werden offenbar Teile des Selenats zu Selenit reduziert (= schlecht durchlüftete Böden), auf biologischen Wegen gebunden bzw. in flüchtige Se-Verbindungen überführt (NEAL & SPOSITO 1991). Einige Se-haltige Stoffwechselprodukte, vor allem Selenomethionin, sind dagegen gut pflanzenverfügbar (ABRAMS et al. 1990a, b, COBURN WILLIAMS & MAYLAND 1992). Nicht pflanzenverfügbares organisches Se unterliegt **Mineralisationsprozessen**, in denen es in pflanzenverfügbares Selenat oder Selenit überführt wird (ABRAMS et al. 1990a).

Im Zusammenwirken von organischer Substanz und Eisenoxiden wird Selenit noch stärker festgelegt (TAM et al. 1995). Selenit kann in Gegenwart von **Eisen-Hydroxiden** oder **-oxiden** durch Bildung von Adsorptionskomplexen fixiert werden oder in Form schlecht pflanzenverfügbarer eisenhaltiger Selenite ( $\text{Fe}_2(\text{SeO}_3)_3$  bzw.  $\text{Fe}_2(\text{OH})_4\text{SeO}_3$ ) vorliegen (GEERING et al. 1968, RAJAN & WATKINSON 1976, HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1977, ELRASHIDI et al. 1989, SU & SUAREZ 2000). Die Fixierungsprozesse von zugeführtem Selenit an  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  verlaufen nach HAMDY & GISSEL-NIELSEN (1977) im Vergleich zu Tonmineralen wesentlich rascher und vollständiger. Sowohl bei pH 3 als auch bei pH 8 werden unter Laborbedingungen in Anwesenheit von  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  schon nach drei Stunden 90% des zugeführten Selenits festgelegt, in der Praxis ist dieser Prozess aber vor allem in Böden mit niedrigem pH-Wert von Bedeutung

(GEERING et al. 1968). Eine Adsorption von Selenat an Fe- bzw. Al-Oxide und -Hydroxide ist ebenfalls zu erwarten (RIETRA et al. 2001, SCHULTHESS & HU 2001). Das Adsorptionsverhalten von Selenat an Al-Oxide bzw. Goethit ist dabei vergleichbar mit dem von Sulfat (WIJNJA & SCHULTHESS 2000, RIETRA et al. 2001); beide stehen somit bei der Adsorption in einem Konkurrenzverhältnis. Erhöhte Karbonat-Gehalte fördern dagegen im pH-Wert-Bereich von 6 bis 8 sowohl die Adsorption von Selenat als auch von Sulfat, organische Anionen können die Adsorption von Selenat und Sulfat verstärken oder herabsetzen (WIJNJA & SCHULTHESS 2000).

Der Anteil des an Bodenbestandteile gebundenen Se am Gesamt-Se-Gehalt wird offenbar auch von der **Salzkonzentration** in der Bodenlösung bestimmt (BARROW & WHELAN 1989a, SCHULTHESS & HU 2001). Je höher z.B. die NaCl-Konzentrationen sind, um so weniger Se wird fixiert. Stärker als  $\text{CaCl}_2$  unterstützt NaCl die Mobilisierung von Se mit ansteigendem pH-Wert. In einer Region Kaliforniens mit hohen Se-Gehalten im Boden (=  $2 \text{ mg Se kg}^{-1}$  Boden-TS) stellen BANUELOS et al. (1996) hingegen eine verminderte Se-Aufnahme durch Pflanzen mit ansteigenden NaCl- bzw.  $\text{CaCl}_2$ -Konzentrationen fest. Die Adsorption von Selenit an Bodenbestandteile ist überdies offenbar abhängig von der **Bodentemperatur** (BARROW & WHELAN 1989b). Im Unterschied zu Selenat wird Selenit unter sonst gleichen Bedingungen mit zunehmenden Temperaturen in höherem Maße adsorbiert.

#### 2.1.2.5 Verluste

Die **gasförmigen Verluste** nach Methylierung durch Mikroorganismen (CHASTEEN & BENTLEY 2003), überwiegend in Form von Dimethylselenid aber auch als Dimethyldiselenid sowie Dimethylselenylsulfid, können nach HAMDY & GISSEL-NIELSEN (1976a) vier Monate nach einer Selenitapplikation > 8 % der eingesetzten Menge betragen, in den meisten Fällen verdampfen hiernach aber weniger als 1%. Dabei bestehen bodenartabhängige Unterschiede, wobei besonders bei Sandböden mit höheren Se-Verlusten zu rechnen ist. Auf Sandböden nimmt die Verdampfung bei Zugabe von  $\text{CaCO}_3$  sowie organischer Substanz zu; auch auf tonigem Lehm steigen die Verluste durch Zugabe von organischer Substanz an. Auf Grünland in peripheren Lagen Großbritanniens können die Verluste zwischen  $1 \text{ und } 2 \text{ g Se ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  betragen (HAYGARTH et al. 1994), was in etwa 0,07 bis 0,14% des Gesamt-Se-Gehalt des Bodens entspricht (HAYGARTH et al. 1994). Mit zunehmender Feuchtigkeit nimmt der Anteil

von gasförmigem Se zu (NEAL & SPOSITO 1991, ZHANG & FRANKENBERGER 1999). Grundsätzlich wird das Ausmaß der Se-Verdampfung von denselben Faktoren bestimmt, die die mikrobielle Aktivität insgesamt beeinflussen, wie Quantität und Qualität der Kohlenstoffquelle, Temperatur und Redoxbedingungen (HAYGARTH 1994). Neben Mikroorganismen setzen auch Pflanzen methylierte Selenide frei (LÄUCHLI 1993). Offenbar entweicht ein großer Teil des Dimethylselenids in feuchten und nassen Böden nicht, sondern wird in nichtflüchtige Substanzen überführt (ZHANG & FRANKENBERGER 1999).  $MnO_2$  unterstützt Oxidationsprozesse; je höher die Feuchtigkeit im Boden und je größer die  $MnO_2$ -Gehalte, umso weniger des gebildeten Dimethylselenids wird emittiert. Nitrat kann hingegen Reduktionsprozesse sowie die Biomethylierung von Se einschränken (FRANKENBERGER & KARLSON 1994), vgl. 2.1.2.3.

Weitere Se-Verluste im System Boden/Pflanze sind durch **Auswaschungsprozesse** zu erwarten. Selenat wird in wesentlich stärkerem Umfang ausgewaschen als Selenit (YLÄRANTA 1982, FIO et al. 1991). Wie Beregnungsversuche von NEAL & SPOSITO (1991) vermuten lassen, ist die Se-Auswaschung von der Niederschlagsverteilung abhängig; kontinuierliche Beregnung hat höhere Se-Verluste zur Folge als intermittierende. Die Auswaschungsverluste nehmen überdies mit zunehmender organischer Substanz im Boden ab (NEAL & SPOSITO 1991). Bei Moorböden können allerdings Verluste >80% auftreten, wohingegen unter übereinstimmenden Versuchsbedingungen bei Tonböden und Feinsand Verluste <1 % möglich sind (YLÄRANTA 1982). Offenbar nimmt die Se-Auswaschung mit zunehmendem pH-Wert zu, wobei auch eine Kalkung diesen Effekt auslösen kann (HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1977). YLÄRANTA (1982) zeigt anhand von Feinsand- und Tonböden, dass eine Ca-Gabe in Form von  $Ca(OH)_2$  zwar die vertikale Mobilität von Se im Boden nach einer Selenat- bzw. Selenit-Applikation erhöhen kann, jedoch beschränken sich die Verlagerungsprozesse nahezu ausschließlich auf die Schicht 0-15 cm. HAMDY & GISSEL-NIELSEN (1977) und YLÄRANTA (1982) schätzen die Se-Mengen, die aus dem durchwurzelten Bereich ausgewaschen werden, als unbedeutend ein, da mobile Se-Formen im Boden rasch in weniger mobile Formen umgesetzt werden.

#### 2.1.2.6 Aufnahme

Obwohl Pflanzen Se auch über die Blätter aufnehmen können, z.B. in Form gasförmiger Verbindungen wie Dimethylselenid (HAYGARTH et al. 1994), wird wohl der überwiegende Teil über die Wurzeln aufgenommen (TERRY et al. 2000, WHITEHEAD 2000). Zwischen den Se-Formen bestehen dabei Unterschiede bezogen auf die Befähigung der Pflanzen diese aufzunehmen. Selenid, elementares Se und komplexe organische Se-Verbindungen werden offenbar nicht direkt von der Pflanze aufgenommen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984). Organische Se-Verbindungen mit niedrigem Molekulargewicht, besonders Selenomethionin, werden dagegen als gut pflanzenverfügbar beschrieben (ABRAMS et al. 1990a, b, COBURN WILLIAMS & MAYLAND 1992). Selenat ist nach LÄUCHLI (1993) die am besten verfügbare Se-Form für Pflanzen. Einige Wasserlinsenarten können dagegen offenbar Selenit leichter aufnehmen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984); nach TERRY et al. (2000) sind Pflanzen jedoch nicht in der Lage, Selenit aktiv über Transporter über die Plasmamembran der Wurzeln aufzunehmen, im Unterschied zu Selenat und Selenomethionin (ABRAMS et al. 1990b). Somit kann die Selenit-Konzentration in der Pflanze anscheinend nicht größer sein als die Konzentration im Wurzelraum (MIKKELSEN et al. 1989). ASHER et al. (1977) stellen dagegen im Xylem von in Selenatlösung angezogenen Tomatenpflanzen bis zu 18 mal höhere Se-Konzentrationen als in der Umgebung fest.

Die Se-Aufnahme durch die Wurzeln kann durch **antagonistische Beziehungen mit anderen Elementen** beeinflusst werden. Aufgrund von Ähnlichkeiten in der chemischen Struktur, vgl. 2.1.1, sind die Beziehungen zwischen der Aufnahme von **Se und S** am umfangreichsten dokumentiert (ALLAWAY 1970, GISSEL-NIELSEN 1971, SPENCER 1982, MILCHUNAS et al. 1983, YLÄRANTA 1983C, 1993, MIKKELSEN et al. 1989, ARTHUR et al. 1993, FARIÁ-MÁRMOL et al. 1997, KOPSELL & RANDLE 1997, MURPHY & QUIRKE 1997, WU 1998, ZAYED et al. 1998, HOPPER & PARKER 1999, OPITZ v. BOBERFELD 2000, 2002a, TAUBE et al. 2000). Der Se- und der S-Haushalt im System Boden/Pflanze ist eng miteinander verknüpft. Die meisten Stoffwechselforgänge in der Pflanze, an denen Se beteiligt ist, verlaufen analog zum S-Umbau (TERRY et al. 2000). Für die Se-Konzentrationen in der Pflanze ist vor allem der **Selenat/Sulfat-Antagonismus** entscheidend. Die Sulfat- wie die Selenat-Aufnahme erfolgt offenbar aktiv über die Plasmamembran der Wurzeln über denselben Pfad, geregelt durch Sulfatpermease (LÄUCHLI 1993, TERRY et al. 2000). Der Schwefel-Status der Pflanze spielt dabei als regulierende Größe anscheinend eine erhebliche Rolle (TERRY et al.

2000). Eine Weitung des S : Se-Verhältnisses im Boden durch S-Düngung kann zu einem Rückgang der Se-Konzentrationen im Grasaufwuchs führen (ALLAWAY 1970). Relativ sicher belegen lässt sich dieser Effekt vor allem bei vergleichsweise hohen Se-Konzentrationen im Aufwuchs (SPENCER 1982, ARTHUR et al. 1993, MURPHY & QUIRKE 1997, WU 1998, HOPPER & PARKER 1999). YLÄRANTA (1983c) hingegen findet auch in mit Selenat bzw. Selenit gedüngtem *Lolium multiflorum* trotz hoher S-Gaben keine Wirkung auf die Se-Konzentrationen und auf generell niedrigem Se-Niveau lässt sich bisher keine Abhängigkeit der Se-Konzentrationen vom S-Versorgungsstatus in Grünlandsystemen nachweisen (OPITZ v. BOBERFELD 2000, 2002a, TAUBE et al. 2000). Mit zunehmenden Sulfat-Gehalten wird in erster Linie die Selenataufnahme erschwert, in geringerem Maße aber offenbar auch die Selenit und Selenomethionin-Aufnahme (ZAYED et al. 1998).

Umgekehrt können Selenat-Gaben offenbar auch die S-Konzentrationen im Pflanzenmaterial negativ beeinflussen, wobei vermutlich ein indirekter Effekt vorliegt (KOPSELL & RANDLE 1997, OPITZ v. BOBERFELD 2002a). Entscheidend dafür, ob Se die S-Aufnahme beeinflusst oder umgekehrt, ist möglicherweise das Verhältnis von Se zu S (MILCHUNAS et al. 1983). Abgestufte Selenat-Gaben führen bei *Allium cepa* zunächst zu einer Erhöhung der S-Aufnahme, mit steigenden Selenatkonzentrationen im Medium ist jedoch ein Rückgang der Schwefelkonzentration feststellbar (KOPSELL & RANDLE 1997). GISSEL-NIELSEN (1971) stellt fest, dass die Wirkung von ansteigenden Tongehalten und ansteigendem pH-Wert auf die S- und Se-Aufnahme durch Pflanzen im Vergleich der beiden Elemente zum Teil gegensätzlich verläuft. Das führt offenbar dazu, dass sich das S/Se-Verhältnis in der Pflanze mit steigendem pH-Wert verengt, d.h. es wird relativ mehr Se durch die Pflanze aufgenommen, und sich mit steigendem Ton-Gehalt erweitert, d.h. es wird relativ weniger Se aufgenommen. Auch die Redoxbedingungen können das S/Se-Verhältnis beeinflussen, da S leichter oxidierbar ist als Se (NEAL 1995), mit der Folge, dass unter Bedingungen, zu denen Se als Selenit vorliegt und an Bodenbestandteile sorbiert wird, S bereits als Sulfat vorliegt und damit leichter pflanzenverfügbar ist.

Neben Sulfat kann auch **Phosphat** die Se-Aufnahme signifikant beeinflussen (GIRLING 1984, YLÄRANTA 1993, HE et al. 1994, HOPPER & PARKER 1999). HE et al. (1994) weisen bodenartabhängig einen Rückgang der Selenit-Sorption im Boden um 30 bis 70% durch eine Phosphat-Gabe nach und stellen infolgedessen im Gefäßversuch eine erhöhte Se-Aufnahme durch *Lolium perenne* fest. Andererseits beobachten die

Autoren eine verminderte Phosphatsorption im Boden nach einer Selenitapplikation. Übereinstimmend berichten GIRLING (1984) und YLÄRANTA (1993) von erhöhten Se-Konzentrationen in der Pflanze bei höheren Phosphatgehalten im Boden. Als mögliche Ursache für zunehmende Se-Konzentrationen in Pflanzen kommen nach MIKKELSEN et al. (1989) zwei Mechanismen in Betracht: dass an Bodenbestandteile gebundenes Se durch Ersatz von Phosphat mobilisiert und pflanzenverfügbar werden kann bzw. dass durch eine Phosphatdüngung das Pflanzenwurzelwachstum angeregt und die Se-Aufnahmekapazität gesteigert wird. HOPPER & PARKER (1999) stellen hingegen bei *Trifolium fragiferum* und *Lolium perenne* eine negative Beeinflussung der Selenat-Aufnahme der Pflanze durch Phosphat fest, wobei dieser Effekt offenbar aber weitaus weniger bedeutsam als bei Sulfat ist. FARÍA-MÁRMOL et al. (1997) können hingegen keinen Effekt von Phosphat-Gaben auf die Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial feststellen. LEVERESQUE (1974) zeigt, dass der Effekt von Phosphat-Gaben auf die Se-Konzentrationen möglicherweise pflanzenartabhängig ist; während die Se-Konzentrationen in *Zea mays* unverändert bleiben, zeigt sich bei *Lactuca sativa* (= Kopfsalat) eine Abnahme der Se-Konzentrationen. Nach MIKKELSEN et al. (1989) ist die Ursache für eine Abnahme der Se-Konzentration in der Pflanze in erster Linie in einem Verdünnungseffekt durch höhere Zuwachsraten nach einer Phosphat-Applikation zu suchen. Dies könne insbesondere in Weidesystemen mit defizitärer Se-Versorgung relevant sein. Eine Natriumselenatapplikation kann sich, wie im Falle von *Festuca arundinacea* positiv oder wie bei *Trifolium repens* negativ auf die P-Konzentrationen in der Pflanze auswirken (Wu 1998). Die Gehalte an Fe, Mn und Zn in der Leguminose gehen durch die Se-Applikation zurück, bleiben beim Gras aber unverändert, die Ca-, K- und Mg-Konzentrationen werden dagegen bei keiner der Arten beeinflusst (Wu 1998).

Offenbar ist für die Se-Aufnahme durch die Pflanze neben den Bodeneigenschaften und der Se-Form auch die **Pflanzenart** von Bedeutung. So kann unterschieden werden zwischen primären Se-Akkumulatoren, die an extrem hohe Gehalte von löslichem Se im Boden angepasst sind und hier bis zu mehreren  $\text{g kg}^{-1}$  TS festlegen, wie verschiedene *Astragalus*-, *Aster*-, *Atriplex*-, *Castilleja*-, *Comandra*-, *Grayia*-, *Grindelia*-, *Guttierrezia*- und *Machaeranthera*- Arten (HAMILTON & BEATH 1963, ROSENFELD & BEATH 1964, PARKER & PAGE 1994), und sekundären Absorberpflanzen, die auch noch einige  $\text{mg Se kg}^{-1}$  TS enthalten können, wie verschiedene *Aster*- und *Atriplex*-Arten und den Nicht-Akkumulatorpflanzen, zu denen die Mehrzahl der landwirtschaft-

lichen Nutzpflanzen inklusive der auf Grünland vorkommenden Arten zählen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984). Bei hohen Se-Gehalten (= 2 mg Se kg<sup>-1</sup> TS Boden) messen BANUELOS et al. (1996) auch signifikante Unterschiede in der Se-Konzentration von vier Nicht-Akkumulatortpflanzen, wobei *Brassica napus* die höchsten Konzentrationen aufweist, gefolgt von *Lotus tenuis* und *Hibiscus cannibinus*; die Konzentrationen von *Festuca arundinacea* sind im Vergleich am niedrigsten. Offenbar können *Brassicaceae* generell relativ hohe Se-Konzentrationen aufweisen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984). STÜNZI (1988) und OPITZ v. BOBERFELD (2002a) stellen bei geringen Se-Gehalten im Boden keine nennenswerte artbedingte Variabilität der Se-Konzentrationen verbreiteter Grünlandpflanzen fest. Offenbar ergeben sich aber durch eine Erhöhung des Se-Angebotes, vgl. 2.4.3.1, bei einigen Kräutern höhere Se-Konzentrationen als bei Gräsern (STÜNZI 1988). Zwischen *Trifolium pratense*, *Dactylis glomerata* und *Lolium multiflorum* (GUPTA & MACLEOD 1994) lassen sich bei Konzentrationen < 100 µg Se kg<sup>-1</sup> TS im Aufwuchs ebenso wenig Unterschiede feststellen wie zwischen *Lolium multiflorum* und *Medicago sativa* (GUPTA 1995). DAVIES & WATKINSON (1966) finden bei niedrigen Se-Gehalten im Boden zwischen 300 und 380 µg Se kg<sup>-1</sup> Boden-TS hingegen auch ohne Se-Applikation Unterschiede in den Se-Konzentrationen verschiedener Grünlandarten, wobei *Trifolium repens* und *Anthoxanthum odoratum* die niedrigsten (= 49 µg kg<sup>-1</sup> TS) Se-Konzentrationen aufweisen gefolgt von einer nicht näher beschriebenen *Danthonia*-Art. *Holcus lanatus* und *Agrostis capillaris* haben die höchsten Se-Konzentrationen, *Lolium perenne* und *Hypochaeris radicata* erwiesen sich als ähnlich Se-arm wie *Trifolium repens*. Die Se-Konzentrationen der Leguminosen steigen, im Gegensatz zu Gräsern, auch nach unterschiedlich hohen Se-Gaben nur wenig an. Auf Böden mit geringen Gehalten an pflanzenverfügbarem Se weisen EHLIG et al. (1968) in *Medicago sativa* verglichen mit *Trifolium pratense*, *Phleum pratense* und *Bromus inermis* geringfügig höhere Se-Konzentrationen in der Pflanze nach. Nach MIKKELSEN et al. (1989) lassen sich bei einem insgesamt niedrigen Se-Niveau in der Regel nur schwer Unterschiede in verschiedenen Pflanzenarten analytisch nachweisen.

Zum Einfluss des Wachstumsstadiums der Pflanzen liegen unterschiedliche Untersuchungsergebnisse vor (WHITEHEAD 2000). Während bei *Dactylis glomerata* und *Phleum pratense* keine Veränderungen bezogen auf die Se-Konzentrationen festgestellt werden, wird bei *Lolium perenne* eine Abnahme der Se-Konzentration mit zunehmendem Alter beobachtet. Bezogen auf die Se-Konzentrationen der Primärauf-



wüchse von sieben Grünlandflächen unterschiedlicher Pflanzengesellschaften kann OPITZ V. BOBERFELD (2001a) hingegen überwiegend keinen Unterschied zwischen den Ernteterminen Anfang Mai und Anfang Juli feststellen. Sowohl die jungen als auch die überständigen Pflanzen weisen Se-Konzentrationen  $< 50 \mu\text{g Se kg TS}^{-1}$  auf, wobei der Aufwuchs einer *Bromion racemosi*-Fläche noch die höchsten Konzentrationen erreicht. Grundsätzlich dürften die Effekte, die durch den Verlauf der Vegetationsperiode bedingt sind, bedeutsamer sein als das physiologische Alter der Pflanzen. Anhand von 320 Grasproben aus 28 dänischen Praxisbetrieben stellt GISSEL-NIELSEN (1975a) von März bis Juni eine deutliche Abnahme der Se-Konzentrationen fest, gegen Ende der Vegetationsperiode ist hingegen wieder ein geringer Anstieg zu beobachten. Zwischen den Aufwüchsen im Juni, Juli und August sind keine Unterschiede feststellbar. Diese Beobachtung deckt sich mit Ergebnissen von LESSARD et al. (1968) aus Untersuchungen in Kanada. Insbesondere in Monaten mit einer hohen Biomasseproduktion sind relativ niedrige Se-Konzentrationen im Aufwuchs infolge von Verdünnungseffekten zu erwarten (GISSEL-NIELSEN 1993). Relativ hohe Se-Konzentrationen im zeitigen Frühjahr lassen sich mit den geringeren Zuwachsraten aber auch durch den Umstand erklären, dass im Winter fixiertes Se im Boden freigesetzt wird (GISSEL-NIELSEN 1993).

#### 2.1.2.7 Selen in Pflanzen

Der Kenntnisstand zum Se-Metabolismus und Se-Transport in der Pflanze ist bislang noch lückenhaft (TERRY et al. 2000). Bisherige Untersuchungen sind fast ausschließlich vor dem Hintergrund möglicher Schadwirkungen durch hohe Se-Konzentrationen und damit verbundenen Toleranzstrategien der Pflanzen erfolgt (HAMILTON & BEATH 1963, WU et al. 1988, ABRAMS et al. 1990b, AVRY 1993, LÄUCHLI 1993, BANUELOS et al. 1996, AJWA et al. 1998, DE SOUZA et al. 1998, WU et al. 1998, ZAYED et al. 1998). Das Verhältnis zwischen Se-Konzentration in der Wurzel zu Se-Konzentration im Spross ist offenbar variabel und hängt wohl von der Pflanzenart, der aufgenommenen Se-Form und dem Se-Niveau ab. COBURN-WILLIAMS & MAYLAND (1992) zeigen diese Zusammenhänge anhand einer Se-Akkumulatorpflanze (= *Astragalus bisulcatus*) und einer Nicht-Akkumulatorpflanze (= *Pascopyrum smithii*). *Pascopyrum smithii* weist ohne Se-Zusatz niedrigere, nach Zugabe unterschiedlicher Dosen  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  bzw. Selenomethionin höhere Se-Konzentrationen in der Wurzel als im Spross auf, wobei das Verhältnis  $\text{Se}_{\text{Wurzel}} : \text{Se}_{\text{Spross}}$  bei Selenit weiter ist als bei Selenomethionin,

insbesondere in hohen Dosen. Die Akkumulatorpflanze weist in der Regel höhere Konzentrationen im Spross auf, wird Se jedoch als Selenomethionin aufgenommen, reichert es sich hier ebenfalls stärker in der Wurzel an. WU et al. (1988) stellen dagegen in fünf untersuchten Grasarten bei unterschiedlichen Selenat-Gaben in der Regel höhere Se-Konzentrationen im Spross als in der Wurzel fest. ZAYED et al. (1998) weisen in Hydrokulturen bei *Brassica oleracea* var. *botrytis* (= Broccoli), *Brassica juncea* (= Indischer Senf), *Beta vulgaris* und *Oryza sativa* ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Se-Form und Se-Akkumulation im Spross bzw. Wurzel nach. Im Spross werden hier die höchsten Se-Konzentrationen in einer Selenat-Lösung erzielt, etwas geringere in einer Selenomethionin-Lösung. Nur vergleichsweise geringe Se-Konzentrationen finden sich dagegen im Spross von in Selenit-Lösung gewachsenen Pflanzen. Die Se-Konzentrationen in der Wurzel sind dagegen bei einer Selenomethionin-Lösung am höchsten und bei Selenat als Se-Quelle am geringsten. Auch Untersuchungen mit *Phaseolus vulgaris* (AVRY 1993) lassen den Schluss zu, dass von der Wurzel aufgenommenes Selenat in wenigen Stunden in den Spross transportiert wird, während aufgenommenes Selenit nur zu geringeren Teilen in höher gelegene Pflanzenteile gelangt. HOPPER & PARKER (1999) geben für den Anteil des Se im Spross am insgesamt über die Wurzel aufgenommenen Se bei *Lolium perenne* Bereiche von 84-91 % nach Selenat-Applikation und 44-46 % nach Selenit-Applikation an. Bei *Trifolium fragiferum* werden 80-90 % (= Selenat) bzw. 22-47 % (= Selenit) in den Spross verlagert.

In Selenitform aufgenommen, wird Se in der Pflanze bei hohen Gehalten im Substrat offenbar bereits in der Wurzel in organische Verbindungen überführt (= in der Regel in Selenomethionin) und akkumuliert, während Selenat über längere Zeit in der Pflanze stabil sein kann, sich in dieser Form eventuell anreichert und innerhalb der Pflanze verlagert wird (MIKKELSEN et al. 1989, DE SOUZA et al. 1998, TERRY et al. 2000). Selenit wird zum Teil auch in Selenat überführt und in dieser Form verlagert (ASHER et al. 1977). Wahrscheinlich überwiegend in den Blättern findet andererseits eine Reduktion von  $\text{Se}^{6+}$  zu  $\text{Se}^{4+}$  statt (MIKKELSEN et al. 1989), das wiederum rasch in Se-haltige Aminosäuren eingebaut wird, die ihrerseits Baustein pflanzlicher Proteine werden. In Gräsern können zwischen 60 und 80 % des Gesamt-Se in Proteinen vorliegen (PETERSON & BUTLER 1962). Se-Akkumulatorpflanzen, vgl. 2.1.2.6, verfügen hingegen über Mechanismen, die den Einbau von Se in Proteine hemmen (MIKKEL-

SEN et al. 1989) und umgehen damit toxische Wirkungen bei hohem Se-Niveau, vgl. 2.2.1.2.

Bezogen auf die oberirdischen Pflanzenteile können die Se-Konzentrationen im Samen und in Wachstumskegeln höher sein als im Stängel und älteren Blättern (MENGEL 1991, TERRY et al. 2000). Nach DHILLON & DHILLON (2000) sind die Samen aber nicht bei allen Arten Se-reicher als der Stängel; so treten Unterschiede zwar bei *Oryza sativa*, nicht aber bei *Triticum aestivum* auf.

Nach Untersuchungen von WANG et al. (1996) an Sojabohnen liegt Se im Samen offenbar weniger in niedermolekularen Verbindungen wie Selenat oder Selenit vor (= 3-10 %) als vielmehr in Proteinen (= 38-53 %) sowie Chitin und Polysacchariden (= 20-29 %). Nach STADLOBER et al. (2001) liegt Se im Korn verschiedener Getreidearten zu 69-86 % als Selenomethionin vor.

Bei hohen Se-Konzentrationen wird bei Pflanzen auch eine Verdampfung von Se nachgewiesen (LÄUCHLI 1993, DE SOUZA et al. 1998, CHASTEEN & BENTLEY 2003). Die Se-Menge, die die Pflanze auf diesem Wege verlässt, ist dabei unter anderem von der Form des über die Wurzeln aufgenommenen Se abhängig; die Verdampfung von Se bei Selenataufnahme ist von der Selenatreduktion, der Aufnahme und der Translokation in der Pflanze abhängig, bei Selenit von der Aufnahme und der Umsetzung von Selenomethionin zu Dimethylselenid. Für die Aufnahme in die Wurzel, wie auch für das Ausmaß der Se-Verdampfung spielen möglicherweise Rhizosphäre-Bakterien eine entscheidende Rolle (DE SOUZA et al. 1999). Bei *Brassica juncea* wurde offenbar infolge der Aktivität von Rhizosphäre-Bakterien eine erhöhte Se-Akkumulierung in der Pflanze festgestellt.

## 2.2 Physiologische Bedeutung

### 2.2.1 Pflanzen

#### 2.2.1.1 Nutzen

Die Frage der Essentialität von Se für Pflanzen wird noch kontrovers diskutiert. Bislang überwiegt die Auffassung, Se sei nicht essentiell für Pflanzen (SHRIFT 1969, TERRY et al. 2000). Abgesehen von einigen Algenarten, die im Se-freien Medium deutlich eingeschränktes Wachstum zeigen (LÄUCHLI 1993, TERRY et al. 2000), sind lediglich für Se-Akkumulatorpflanzen, vgl. 2.1.2.6, essentielle Funktionen von Se im

Stoffwechsel beschrieben. So steigen die TS-Erträge dieser an selenreiche Standorte besonders angepassten Arten mit zunehmenden Se-Gehalten im Boden an (TRELEASE & TRELEASE 1937, TERRY et al. 2000). Bei Nicht-Akkumulatorpflanzen wird nur vereinzelt von einem positiven Ertragseffekt von Se-Gaben berichtet (HARTIKAINEN et al. 2000, XUE et al. 2001). In der Regel wirkt sich eine Se-Applikation nicht messbar auf den Ertrag aus, bei hohen Se-Gehalten im Boden ist eher ein Ertragsrückgang zu erwarten (LÄUCHLI 1993, TERRY et al. 2000). Eine ausgleichende Wirkung von Se bei übermäßiger Schwermetallzufuhr, eine für menschliche und tierische Organismen nachgewiesene Funktion, vgl. 2.2.2.1, ließ sich bei Pflanzen bislang nicht bestätigen. Bei *Triticum aestivum*, besonders aber bei *Pisum sativum*, wird die Aufnahme und Toxizität von Cu und Cd in einigen Fällen offenbar sogar erhöht (LANDBERG & GREGER 1994). Nach WU (1998) nehmen jedoch die Cu- und Zn-Konzentrationen in *Trifolium repens* infolge von Selenat-Gaben ab und bleiben in *Festuca arundinacea* unverändert.

In jüngerer Literatur wird jedoch auch für Nicht-Akkumulatorpflanzen als positiver Effekt von Se eine mögliche antioxidative Wirkung im Pflanzengewebe angeführt. In vielen Pflanzenarten werden Enzyme nachgewiesen, die der Glutathionperoxidase (= GPX), die in tierischen Organismen eine zentrale Rolle als Antioxidans spielt, vgl. 2.2.2.1, zumindest ähnlich sind. Dass die Se-haltigen Glutathionperoxidasen auch bei Pflanzen Funktionen erfüllen, ist nach TERRY et al. (2000) fraglich. Die antioxidative Aktivität in Teeblättern ist jedoch offenbar nach XU et al. (2003) in Pflanzen nach Natriumselenit-Applikation signifikant höher als in Pflanzen, die in Se-armen Medien gewachsen sind. Ein weiterer Anstieg der Aktivität ist nach einer Applikation in Selenatform feststellbar. Bei seneszentem *Lactuca sativa* (= Kopfsalat) messen XUE et al. (2001) nach einer Selenat-Applikation in Gefäßversuchen eine verringerte Lipidperoxidation, eine erhöhte Glutathionperoxidase- und Superoxiddismutase-Aktivität und einen verringerten Abbau von Tocopherol. Die verminderte Lipidperoxidation gegenüber den Kontrollpflanzen zeigt sich dabei unabhängig vom Alter der Pflanzen. Auch für Grasarten, wie *Lolium perenne*, wird ein antioxidativer Effekt nach einer Se-Applikation beschrieben (HARTIKAINEN et al. 2000), der aber offenbar von der Höhe der Se-Gabe abhängt. Ein Gehalt von  $100 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Boden, der unter den Versuchsbedingungen bereits einen bis zu 170fachen Anstieg der Se-Konzentrationen im Spross bewirkt, führt in den Pflanzenzellen auch hier zu einer Erhöhung der Glutathionperoxidase-Aktivität und einer signifikant reduzierten Lipidperoxidation. Bei

1 mg Se kg<sup>-1</sup> Boden verstärken sich diese Effekte. Bei einer weiteren Erhöhung des Gehaltes im Boden auf 10 bzw. 30 mg Se kg<sup>-1</sup> wird jedoch die Wirkung des Se als pro-oxidativ beschrieben, was offenbar auf den erhöhten oxidativen Stress durch diese toxische Konzentration zurückzuführen ist (HARTIKAINEN et al. 2000).

#### 2.2.1.2 Toxizität

Bei Nicht-Akkumulatorpflanzen sind bei hohen Se-Konzentrationen verschiedene toxische Reaktionen feststellbar (MIKKELSEN et al. 1989, MENGEL 1991, LÄUCHLI 1993, TERRY et al. 2000), in deren Folge Chlorose, Kümmerwuchs, Vertrocknen der Blätter und frühzeitiges Absterben der Pflanze zu beobachten sein kann. Als Ursache sind dabei primär Funktionsstörungen durch übermäßigen Einbau von Seleno-Cystein und vor allem Seleno-Methionin anstelle von Cystein bzw. Methionin in Proteine zu sehen (TERRY et al. 2000). Die Grenzkonzentrationen von Se im Pflanzenmaterial, ab denen Mindererträge zu erwarten sind, variieren auch innerhalb der Nicht-Akkumulatorpflanzen artabhängig. MIKKELSEN et al. (1989) stellt aus mehreren Untersuchungen Se-Konzentrationen in verschiedenen Kulturpflanzen zusammen, die jeweils mit einer zehnpromtigen Reduzierung der TS-Erträge in Verbindung stehen. Demzufolge reagieren *Oryza sativa*, *Triticum aestivum*, *Sinapis alba* und *Pisum sativum* zum Teil ab Konzentrationen von 2 - 3 mg Se kg<sup>-1</sup> TS mit um 10 % verringertem Ertrag, *Medicago sativa* bei 12 - 94 mg Se kg<sup>-1</sup> TS, *Trifolium repens* bei 160 – 330 mg Se kg<sup>-1</sup> TS und *Lolium spec.* bei 48 – 320 mg Se kg<sup>-1</sup> TS. HARTIKAINEN et al. (2000) stellen bei *Lolium perenne* einen deutlichen Ertragsrückgang bei Se-Konzentrationen von 851 mg kg<sup>-1</sup> TS im Pflanzenmaterial fest. Bei Konzentrationen von 156,5 mg kg<sup>-1</sup> TS im Pflanzenmaterial ist in diesen Versuchen hingegen ein positiver Effekt auf den Ertrag von *Lolium perenne* festzustellen. In Versuchen mit *Lactuca sativa* (= Kopfsalat) ist ein Minderertrag von Se bei 1 mg Se kg<sup>-1</sup> Boden bzw. 270 mg Se kg<sup>-1</sup> TS im Gewebe der jungen Pflanzen zu beobachten (XUE et al. 2001). Bei Wu et al. (1988) ergibt sich unter identischen Bedingungen, z.B. bei *Cynodon dactylon*, bei Se-Konzentrationen von 1 mg Se l<sup>-1</sup> (= Selenat) in Hydrokultur ein negativer Effekt auf Wurzel- und Sprosswachstum, bei *Agrostis stolonifera* erst bei 2 mg Se l<sup>-1</sup>; *Festuca arundinacea* toleriert in Hydrokultur auch 2 mg Se l<sup>-1</sup> Se-Konzentrationen. *Festuca arundinacea* reagiert ebenso im Vergleich zu *Trifolium repens* weniger empfindlich auf hohe Se-Gaben. Nach Berechnung mit Natriumselenat-Lösung mit 2 mg

Se l<sup>-1</sup> in mit Sand gefüllten Gefäßen sinken die TS-Erträge von *Festuca arundinacea* auf 91% und von *Trifolium repens* auf 53% des Ertrages der Kontrolle. Bei *Trifolium repens* sind nach MIKKELSEN et al. (1989) bei Se-Konzentrationen von 330 mg Se kg<sup>-1</sup> TS im Pflanzenmaterial um 10% reduzierte Erträge festzustellen. Selenat ist offenbar in höherem Maße phytotoxisch als Selenit (WU et al. 1988).

Offenbar kann auch die Keimfähigkeit von Samen in Se-reichen Medien beeinträchtigt sein. In Untersuchungen von HARTIKAINEN et al. (2000) ist bei einem Gehalt von 10 mg Se kg<sup>-1</sup> Boden und darüber die Keimung von *Lolium perenne*-Samen signifikant reduziert. Auch bei *Brassica oleracea* ist die Keimfähigkeit von Samen in einer Natrium-Selenat-Lösung mit 5 bzw. 7 mg Se l<sup>-1</sup> reduziert; in keinem Fall fällt hierbei aber die Keimfähigkeit unter 94 % (KOPSELL et al. 2003). WU (1998) stellt bei Se-Konzentrationen bis zu 2 mg Se l<sup>-1</sup> keine Beeinträchtigung der Keimung von *Agrostis stolonifera*, *Agropyron desertorum*, *Cynodon dactylon* und *Festuca arundinacea* fest.

## 2.2.2 Säugetiere

### 2.2.2.1 Nutzen

Selen ist aus mehrererlei Hinsicht für die Ernährung von Mensch und Tier von hoher Bedeutung. Die Essentialität von Se wird erstmals 1957 beschrieben (SCHWARZ & FOLTZ 1957). Folgend werden eine Reihe von Se-haltigen Proteinen in Säugetieren identifiziert, vgl. Tab. 4, deren Funktionen bislang nur teilweise bekannt sind. Eine zentrale Funktion nimmt Se in antioxidativ wirkenden Enzymsystemen ein (NAVARRO-ALARCÓN & LÓPEZ-MARTÍNEZ 2000). Als Bestandteil von Glutathionperoxidasen wirkt Selen synergistisch mit Vitamin E einer möglichen Zellzerstörung durch in Stoffwechselfvorgängen frei werdende Peroxide entgegen (ROTRUCK et al. 1973), indem biologische Membranen und Nichtmembranproteine geschützt werden (GÜNSTER & FRÖLKE 1986). Obwohl Se-unabhängige Antioxidantien zum Teil die Funktionen der Glutathionperoxidasen übernehmen können, wirkt sich ein Se-Mangel vor allem in kurzfristigen Stresssituationen negativ aus (BEHNE & KYRIAKOPOULOS 2001). Vitamin E und Vitamin A wirken hauptsächlich in der Zellmembran (SCHRAUZER 1998), Vitamin C, Superoxid-Dismutasen und Katalase in den Gewebeflüssigkeiten, Glutathionperoxidasen sind dagegen sowohl im Zytosol als auch in den Zellmembranen aktiv, vgl. Tab. 4, und sind unter anderem zum Abbau von Lipidhydroperoxiden in der Lage, die beim peroxidativen Fettabbau entstehen (SCHRAUZER 1998). Vitamin E bietet bei Se-

Mangel nach McDOWELL et al. (1996) und SCHRAUZER (1998) keinen uneingeschränkten Schutz vor klinischen und subklinischen Mangelercheinungen beim Wiederkäuer, vgl. 2.2.2.2.

**Tab. 4:** In Säugetieren identifizierte Se-haltige Proteine (SCHRAUZER 1998, UNDERWOOD & SUTTLE 1999, HIMENO & IMURA 2000, BEHNE & KYRIAKOPOULOS 2001, FISCHER 2002)

<b>Selenoprotein</b>	<b>Funktion</b>	<b>Vorkommen</b>
Glutathionperoxidase GPX1	Beseitigung von Hydroperoxiden, Se-Depot	ubiquitär, höchste Konzentration in Leber und Erythrozyten
Glutathionperoxidase GPX2	Beseitigung von Hydroperoxiden	Gastrointestinaltrakt
Glutathionperoxidase GPX3	Beseitigung von Hydroperoxiden	Plasma
Glutathionperoxidase GPX4	Beseitigung von Phospholipid-Hydroperoxiden, Spermienreifung	ubiquitär, Hoden
Typ I 5'-Jodthyronin-Dejodase	Umwandlung von T4 zu T3 bzw. rT3, Abbau von T3 und T4	Schilddrüse, Leber, Niere
Typ II 5'-Jodthyronin-Dejodase	Umwandlung von T4 zu T3	Hirnanhangdrüse, ZNS, braunes Depotfett
Typ III 5'-Jodthyronin-Dejodase	Umwandlung von T4 zu T3, Abbau von T3 und T4	Plazenta, ZNS, Haut
Thioredoxin-Reduktase TRxR1	Reduktion von Thioredoxin	ubiquitär (Cytosomen)
Thioredoxin-Reduktase TRxR2	Reduktion von Thioredoxin	ubiquitär (Mitochondrien)
Thioredoxin-Reduktase TRxR3	unbekannt	Hoden
Selenophosphatsynthase 2	Selenophosphatsynthese (?)	ubiquitär
15-k-Da Selenoprotein	unbekannt	ubiquitär
Selenoprotein N	unbekannt	unbekannt
Selenoprotein P	Schutz vor Peroxynitrit (?)	Plasma
Selenoprotein R/ Selenoprotein X	unbekannt	unbekannt
Selenoprotein T	unbekannt	unbekannt
Selenoprotein W	Unterstützung der Muskelfunktionen (?)	ubiquitär, Muskel

Vitamin E kann zwar wie Se bei entsprechender Versorgung des Muttertieres in hohen Konzentrationen im Kolostrum enthalten sein, im Gegensatz zu Se findet aber offenbar kein wesentlicher Transfer von Vitamin E über die Plazenta zum Fetus statt,

weshalb eine ausreichende pränatale Se-Versorgung des Muttertieres für die Frucht von hoher Relevanz ist (McDOWELL et al. 1996).

Die sogenannte Keshnan-Krankheit, die beim Menschen mit Se-Mangelernährung in Verbindung gebracht wird (GE & YANG 1993), kann trotz ausreichender Vitamin E-Versorgung auftreten. In Futterpflanzen für Wiederkäuer nehmen die Konzentrationen der Vitamin E-wirksamen Substanzen nach der Nutzung unter Umständen rasch ab, so dass je nach Konservierungsverfahren zunächst ausreichende Vitamin E-Konzentrationen auf marginale Werte abfallen können, vgl. 2.3.

Se ist offenbar auch an der Synthese von Thioredoxin beteiligt, das ebenfalls  $H_2O_2$  zu  $H_2O$  umwandelt (MUSTACICH & POWIS 2000). Thioredoxin ist ferner für die DNA-Synthese und die Gentranskription bedeutsam (MUSTACICH & POWIS 2000). Als Baustein wichtiger Dejodinasen katalysiert Se die Umwandlung der inaktiven Vorstufe des Schilddrüsenhormons T4 in die aktive Form T3 und ist somit von entscheidender Bedeutung für den Hormonstoffwechsel und die damit verbundenen Wachstums-, Differenzierungs- und Entwicklungsprozesse (BEHNE et al. 1990, SCHRAUZER 1998, HIMENO & IMURA 2000, NAVARRO-ALARCÓN & LÓPEZ-MARTÍNEZ 2000, BEHNE & KYRIAKOPOULOS 2001). Selen bewirkt offenbar eine Stärkung der Abwehrkräfte von Wiederkäuern, da Se in verschiedenen Immunabwehrmechanismen benötigt wird (KIREMIDJIAN-SCHUMACHER et al. 1994, Mc KENZIE et al. 2002). Aus der humanmedizinischen Forschung liegen zahlreiche Untersuchungen vor, die Se als Schutzfaktor vor schwerwiegenden Krankheiten herausstellen (GÜNSTER & FRÖLEKE 1986, ANGELOW & ANKE 1987, SCHRAUZER 1998, HIMENO & IMURA 2000, NAVARRO-ALARCÓN & LÓPEZ-MARTÍNEZ 2000). Besonders auf die anti-kanzerogenen Effekte im Zusammenhang mit dem Spurenelement, infolge seiner Vitamin E unterstützenden Funktionen im Zusammenhang mit antioxidativ wirksamen Enzymen, wird in zahlreichen Studien hingewiesen (SHAMBERGER & FROST 1969, SCHRAUZER 2000). Seitdem werden signifikante Beziehungen zwischen Se-Konzentrationen im Plasma bzw. Serum der Probanden und dem Auftreten von Krebserkrankungen von Bauchspeicheldrüse, Magen und Darmtrakt, Uterus, Brust, Lunge, der Atemwege und der Haut aufgezeigt (NAVARRO-ALARCÓN & LÓPEZ-MARTÍNEZ 2000). Beim Menschen kann Se möglicherweise den Krankheitsverlauf von Hepatitis B (YU et al. 1997) und HIV (LOOK et al. 1997) abschwächen bzw. das Infektionsrisiko herabsetzen.

Eine wichtige Funktion von Se und Vitamin E ist dabei der Schutz von Leukozyten und Makrophagen während der Phagozytose (McDOWELL et al. 1996). Se ist daher



nicht nur bei der Immunabwehr verschiedener pathogener Viren von Bedeutung (BEHNE & KYRIAKOPOULOS 2001), sondern schützt den Körper im Zusammenwirken mit Vitamin E wahrscheinlich auch vor Eindringen und Ausbreitung von *Candida spec.* (BOYNE & ARTHUR 1979), *Escherichia coli* und *Staphylokokkus aureus* (GYANG et al. 1984, ERSKINE et al. 1989) sowie weiterer pathogener Mikroorganismen (JUKOLA et al. 1996, HEMINGWAY 1999, MCKENZIE et al. 2002), wobei die Wirksamkeit von Se-Gaben gegenüber einer *Staphylokokkus aureus*-Infektion nicht unumstritten ist (ERSKINE et al. 1990). Insgesamt wird Se jedoch eine entzündungshemmende Wirkung zugeschrieben (HEMINGWAY 1999). So wird bei Milchkühen häufig Se-Mangel als eine Ursache für Mastitis angesehen, vgl. 2.2.2.3.

Es gibt ferner Hinweise darauf, dass eine Se-Supplementierung das Risiko von Herzgefäßkrankheiten und Herzinfarkten herabsetzt (SALONEN et al. 1982, SCHRAUZER 1998, NAVARRO-ALARCÓN & LÓPEZ-MARTÍNEZ 2000), extremer Se-Mangel kann zu Herzmuskeldegenerationen führen, vgl. 2.2.2.3. Offenbar hat Selen einen Einfluss auf die weibliche und männliche Fruchtbarkeit (UNDERWOOD & SUTTLE 1999). Se-Supplemente bei defizitärer Se-Versorgungslage können die Anzahl vitaler Spermien und deren Beweglichkeit erhöhen (GÜNSTER & FRÖLEKE 1986, SCHRAUZER 1998, KENDALL et al. 2000, BEHNE & KYRIAKOPOULOS 2001). Se kann auch zur Entgiftung von Schwermetallen im Körper beitragen (GÜNSTER & FRÖLEKE 1986, SCHRAUZER 1998). Vor allem die antagonistische Beziehung von Se zu As, Cu, Cd, Hg, Pb und Zn (GANTHER & BAUMANN 1962, RASTOCCI et al. 1970, HILL 1972, GÜNSTER & FRÖLEKE 1986, LANDBERG & GREGER 1994, WU 1998) ist hierbei von physiologischer Bedeutung.

#### 2.2.2.2 Toxizität

Se ist eines der toxischsten essentiellen Spurenelemente und kann akute und chronische Vergiftungserscheinungen hervorrufen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984, UNDERWOOD & SUTTLE 1999). Eine chronische Se-Überschuss-Krankheit ist die sogenannte Alkali-Krankheit, die zwischen 1860 und 1910 bei US-amerikanischen Militärpferden im mittleren Westen der USA nach kontinuierlicher Aufnahme von Pflanzen mit hohen Se-Konzentrationen aufgetreten ist (COMBS & COMBS 1986). Symptome dieser Krankheit sind struppiges Fell, Haarausfall an Schweif und Mähne, schmerzhaftes Entzündungen an den Hufen und in schweren Fällen Ablösen des Hufes (ROSENFELD

& BEATH 1964). Erkrankte Tiere, zu denen auch Schafe und Rinder zählen können, leiden außerdem an Lustlosigkeit, Steifheit der Beine, magern stark ab und es kommt zu Todesfällen (SCHRAUZER 1998). Zwischen 1907 und 1908 starben in Wyoming auf diese Weise 15000 Schafe (ROSENFELD & BEATH 1964). Akute Selenosis hat Störungen des ZNS zur Folge. In diesem Zusammenhang wird die „Blind-staggers“-Krankheit beschrieben, die sich in Taumeln, eingeschränkter Sehfähigkeit, Lähmungserscheinungen sowie Atemstörungen äußert und letal verlaufen kann (GISSEL-NIELSEN et al. 1984). Die eingeschränkte Bewegungsfähigkeit und der beeinträchtigte Schluckvorgang führen gelegentlich zum Verhungern der Tiere (ROSENFELD & BEATH 1964, SCHRAUZER 1998). In der Diskussion sind außerdem teratogene, mutagene und kanzerogene Effekte hoher Se-Dosen. Selenat und Selenit sind offenbar toxischer als Selenomethionin (SCHRAUZER 1998). Die akute Toxizität anorganischer Verbindungen ist abhängig von der Oxidationsstufe und der Löslichkeit (SHAMBERGER 1983). Eine langfristige Aufnahme  $< 2000 \mu\text{g Se kg}^{-1}\text{d}^{-1}$  ist für ausgewachsene Rinder nach dem NRC (=National Research Council, USA) noch tolerierbar (ANONYMUS 1996). Klinische Anzeichen einer Selenosis ergeben sich offenbar in der Regel erst in Größenordnungen  $> 5000 \mu\text{g Se kg}^{-1}\text{d}^{-1}$  (GISSEL-NIELSEN et al. 1984). Konzentrationen dieser Höhe sind nur in Se-Akkumulatorpflanzen und sekundären Absorberpflanzen zu erwarten, vgl. 2.1.2.6, die außer bei Futtermangel vom Weidetier üblicherweise nicht gefressen werden (SHAMBERGER 1983).

### 2.2.2.3 Mangel und Bedarf

Mangelhafte Versorgung mit dem essentiellen Spurenelement Se kann bei Wiederkäuern zu verschiedenen Beeinträchtigungen, wie Fruchtbarkeits- und Wachstumsstörungen sowie Muskeldystrophien und Komplikationen beim Kalben, führen (BOSTEDT & SCHRAMMEL 1981, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, HARTFIEL & BAHNERS 1986, ANGELOW & ANKE 1987, BOSTEDT et al. 1987, KLAWONN et al. 1996, SCHRAUZER 1998). Das Risiko bakterieller Infektionen, wie Mastitis, ist offenbar erhöht (SMITH et al. 1984, KLAWONN et al. 1996). Die auch als Weißmuskelkrankheit bekannte nutritiv bedingte Muskeldystrophie wird als erste Mangelkrankheit mit unzureichender Se-Versorgung in Verbindung gebracht (MUTH 1956, 1963). Beginnend mit Gehschwierigkeiten und Lähmungserscheinungen, die sich zunächst auf die Hinterbeine begrenzen und sich im Folgenden auf die gesamte Skelettmuskulatur ausbreiten, kann es schon wenige Stunden nach dem Auftreten der ersten Symptome zum Herzstill-

stand kommen (ANKE et al. 1983, SCHRAUZER 1998). Weitere Symptome sind allgemeine Lebensschwäche, eingeschränkter Schluckreflex und Atembeschwerden (BOSTEDT 1980, MCDOWELL et al. 1996). In Oregon hat die Weißmuskelkrankheit (= White Muscle Disease) in Se-armen Regionen zeitweise zu Lämmerverlusten um 50 % geführt (SCHRAUZER 1998). Auch in Deutschland und anderen Ländern Mittel- und Osteuropas tritt die Weißmuskelkrankheit auf (KURSA et al. 1974, BOSTEDT 1980, ŽUST et al. 1996, SCHRAUZER 1998), wobei auch Rinder, Ziegen und Pferde betroffen sein können (KURSA et al. 1974, HARTFIEL & BAHNERS 1986, SCHÖNTHALER 1998, UNDERWOOD & SUTTLE 1999). Offenbar ist das Risiko für Kälber am größten zu Beginn der Weideperiode im Frühjahr (UNDERWOOD & SUTTLE 1999), die Weißmuskelkrankheit tritt dabei sowohl bei neugeborenen Tieren als auch bei älteren Jungtieren auf (BOSTEDT 1980). Bei älteren, bereits in der Mast stehenden Kälbern kann eine Se-Mangelversorgung zu einer Degeneration des Herzmuskels beitragen, die ohne vorausgehende Krankheitsanzeichen unter Stresssituationen, wie beispielsweise Transporte, Umtrieb bzw. Futterumstellung, zum Tod des Tieres führen kann (BOSTEDT 1980, MCDOWELL et al. 1996). Fruchtbarkeitsstörungen durch unzureichende Se-Supplementierung lassen sich nach UNDERWOOD & SUTTLE (1999) bei allen Nutztieren feststellen. HARTLEY (1963) stellt in Neuseeland in Gruppen von je 200 gedeckten Mutterschafen bei ausreichend mit Se versorgten Tieren 80 % weniger unbefruchtete Individuen fest als in der unbehandelten Gruppe. KENDALL et al. (2000) finden bei männlichen Se-defizitären Schafen in Großbritannien verminderte Samenqualität und Vitalität der Spermien. Selenmangel wird ebenso in Verbindung gebracht mit Fehlgeburten bei Mutterschafen, wobei die Embryonen drei bis vier Wochen nach der Konzeption absterben (HARTLEY 1963, WILKINS & KILGOUR 1982). Auch bei Rindern kann es zu Totgeburten bzw. schwachen nicht lebensfähigen Kälbern kommen (MACE et al. 1963, KLAWONN et al. 1996). Die postnatale Entwicklung von Kälbern mit defizitärer Se-Versorgung ist offenbar häufiger von Entwicklungsstörungen begleitet als bei höherem Se-Status. Einzelne oder als Kombination mehrerer Symptome ist mit vermehrtem Auftreten von allgemeinem Kümern, Wachstumsrückstand, Apathie, beeinträchtigter Milchaufnahme in den ersten Lebenstagen, Diarrhöe, Bronchopneumonie und Sideropenie (= Eisenmangelkrankheit) zu rechnen (BOSTEDT et al. 1987). Es wird auch ein Zusammenhang zwischen niedrigem Se-Status und dem Vorkommen von Nachgeburtsverhaltungen (= Retentio secundinarium) beschrieben (JULIEN et al. 1976, BOSTEDT & SCHRAMMEL 1981, HARTFIEL & BAHNERS 1986, UNDER-

WOOD & SUTTLE 1999). In Untersuchungen von EGER et al. (1985) treten nach einer Se-Injektion vor der Geburt signifikant weniger Vorfälle auf; ein ähnlicher Effekt wird jedoch auch mit Vitamin E-Injektionen erreicht. Nicht in allen Untersuchungen wird eine Korrelation zwischen Se-Status und Retentio secundinarium bestätigt (JUKOLA et al. 1996); BOSTEDT & SCHRAMMEL (1981) vermuten, dass Se-Mangel nur eine von mehreren Ursachen ist. Se-Mangel erhöht außerdem das Risiko bakterieller Infektionen (HEMINGWAY 1999). Neben einer allgemeinen Schwächung der Immunabwehr ist von einer verminderten Fähigkeit zur Abwehr pathogener Bakterien auszugehen, vgl. 2.2.2.1. Neben weiteren Faktoren, wie genetischen Eigenschaften, Vitamin E-Status, Melktechnik, Hygiene und anderen Umweltbedingungen, wird Se als eine Ursache für das Auftreten von Mastitis gesehen (SMITH et al. 1984, JUKOLA et al. 1996, HEMINGWAY 1999).

Die Feststellung des Se-Status von Wiederkäuern erfolgt anhand unterschiedlicher Methoden. So werden die Se-Konzentrationen vor allem im Blutplasma, Serum, Gesamtblut oder den Roten Blutkörperchen sowie den Haaren gemessen (SUNDE 1990), wobei nach SUNDE (1990) die Bestimmung der Glutathionperoxidase-Aktivität eine präzisere Methode zur Erhebung des Se-Status und zur Beurteilung der Bioverfügbarkeit von Se-Formen darstellt. GRÜNDER & AUER (1995) stellen fest, dass insgesamt bei 75 % der Rinderherden in Hessen die Se-Versorgung nicht zufriedenstellend ist und weisen darauf hin, dass in ganz Deutschland Ertragseinbußen infolge von Se-Mangel große wirtschaftliche Bedeutung haben. In der tschechischen Republik untersuchen PAVLATA et al. (2002) die Glutathionperoxidase-Aktivität im Gesamtblut von insgesamt 879 Milchkühen, Kälbern, Färsen und Mastbullen. Dabei wurde der Se-Status von 26 % der Kühe, 75 % der Kälber, 83 % der Färsen und 80 % der Bullen als defizitär eingestuft. Werden nur Individuen aus extensiv organisierten Betrieben in die Betrachtung einbezogen, so sind noch höhere Anteile defizitär versorgter Rinder zu erwarten. ŽUST et al. (1996) untersuchen Rinder aus 18 slowakischen Herden ohne bzw. mit marginaler Mineralstoff-Supplementierung und beziffern den Anteil der Rinder mit defizitärem Se-Status mit 94 %, wesentlich weniger kritisch ist dagegen die Situation bei slowakischen Milchkühen. Auch WOLF (1998) stellt bei Untersuchungen in Mecklenburg-Vorpommern fest, dass insbesondere die Se-Versorgung von Mutterkühen auf kritisch niedrigem Niveau ist; die Glutathionperoxidase-Aktivität liegt hier im Mittel nur bei 30 % der bei Milchkühen festgestellten Werte. Bei Milchkuhhaltung hat sich die Se-Supplementierung in Verbindung mit Konzentraten als

kostengünstige und effektive Maßnahme bewährt (WOLFFRAM 1991, KLAWONN et al. 1996, WOLF 1998), bei extensiver Haltung von Weidetieren ist jedoch eine gleichmäßige Verteilung der Se-Mengen auf alle Tiere der Herde kaum möglich (WOLFFRAM 1991, ØVERNES 1993, MCDOWELL 1996, OPITZ v. BOBERFELD 1999, UNDERWOOD & SUTTLE 1999) und alternative Supplementierungs-Methoden werden notwendig, vgl. 2.4.2 und 2.4.3.

Die Bioverfügbarkeit verschiedener Se-Verbindungen in Futtermitteln, vgl. 2.4.1, kann unterschiedlich hoch sein (CANTOR et al. 1981, WOLFFRAM 1991), für Grünlandaufwüchse wird jedoch in der Literatur überwiegend ein Mindestwert von  $100 \mu\text{g kg}^{-1}$  Futter-TS angeführt, um Se-Mangelercheinungen beim Wiederkäuer ausschließen zu können (PATRIAS 1969, GISSEL-NIELSEN 1975a, b, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, BAHNERS 1987, CORAH 1996, UNDERWOOD & SUTTLE 1999). Nach dem National Research Council (= NRC) der USA sollte in der Ration für Fleischrinder (ANONYMUS 1996) und Schafe (ANONYMUS 1985) mindestens  $100 \mu\text{g kg}^{-1}$  Futter-TS enthalten sein, als obere Grenzwerte werden hier 300 bzw.  $200 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Futter-TS genannt. In Deutschland hat die Gesellschaft für Ernährungswissenschaften im Jahr 2001 die Bedarfsnorm für Milchkühe von vormals 150 auf  $200 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Futter-TS heraufgesetzt (ANONYMUS 2001b), die Konzentrationen in Futtermitteln dürfen nach der Futtermittelverordnung jedoch  $500 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS nicht überschreiten (ANONYMUS 1981). Als maximal langfristig tolerierbare Konzentration nennt das NRC für ausgewachsene Rinder (ANONYMUS 1996) und Schafe (ANONYMUS 1985)  $2000 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS. Beim Menschen wird Se-Mangel als eine der Ursachen für die Keshan-Krankheit gesehen, die in der chinesischen Keshan-Provinz bei Kindern und schwangeren Frauen auch zum Tode infolge einer Herzmuskel-Schädigung führt (GE & YANG 1993).

### 2.3 Selen und Grünland

Die durchschnittliche Se-Konzentration von Grünlandaufwüchsen liegt in Deutschland bei  $45 \mu\text{g kg}^{-1}$  TS (BAHNERS 1987); die Streuungen können allerdings schon auf vergleichsweise kleinem Raum erheblich sein. Bei den in Tab. 5 angegebenen Werten werden Aspekte wie Nutzung und Bewirtschaftungsintensität nicht unterschieden. In Weideaufwüchsen und Wiesenheu ostfriesischer Betriebe findet HEIKENS (1992) Se-Konzentrationen zwischen 7 und 114 bzw. 14 und  $82 \mu\text{g kg}^{-1}$  TS. In Untersuchungen von OPITZ v. BOBERFELD (1999, 2001a) werden in Aufwüchsen verschiede-

ner Pflanzengesellschaften aus hessischen und rheinland-pfälzischen Mittelgebirgs-lagen ausnahmslos Konzentrationen  $< 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  festgestellt. OELSCHLÄGER & MENKE (1969) finden in Grünlandaufwüchsen unterschiedlicher Herkunft Se-Konzentrationen im Bereich von 30 bis  $210 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TS}$ . Innerhalb Deutschlands sind somit Se-Gehalte zwischen  $7 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TS}$  (HEIKENS 1992) und  $650 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TS}$  (BAHNERS 1987) gemessen worden, weltweit gesehen ist die Spanne um ein Vielfaches größer (GISSEL-NIELSEN et al. 1984). BRUß (1998) misst Höchstwerte von  $561 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TS}$  und führt diese vor allem auf überdurchschnittliche Schadstoffimmissionen des Standortes zurück. Auch HAYGARTH et al. (1994) weisen auf den Zusammenhang zwischen Se-Konzentration von *Lolium perenne* und der Menge der atmosphärischen Se-Deposition der entsprechenden Umwelt hin, vgl. 2.1.1. In weiten Teilen Nord-, Ost- und Mitteleuropas ist in Grünlandaufwüchsen überwiegend mit Se-Konzentrationen  $< 100 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TS}$  zu rechnen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984). Nach ŽUST et al. (1996) liegen die Se-Konzentrationen in slowakischen Grünlandaufwüchsen nur zu etwa 3 %  $> 100 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TS}$ . In der Schweiz betragen die Se-Konzentrationen im Grundfutter häufig  $< 50$  in bestimmten Gegenden auch  $< 20 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TS}$  (STÜNZI 1988). In Untersuchungen vor der Einführung Se-haltiger Dünger in skandinavischen Ländern werden in Grünlandaufwüchsen in Finnland durchschnittlich 14, in Schweden 27, in Dänemark 40 und in Norwegen  $25 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  gemessen (GISSEL-NIELSEN et al. 1984). Weitere Länder in denen Se-Konzentrationen  $< 100 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TS}$  in Grasaufwüchsen zu erwarten sind, finden sich in Tab. 2. Für Europa ist zu erwarten, dass sich die zurückgehende Se-Nachlieferung auf Grünland durch Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe weiter fortsetzt, vgl. 2.1.1. Auch die S-Emissionen sind in Europa rückläufig, was in Irland (MURPHY & BOGGAN 1988) und Deutschland (PASDA 1998) zu Spekulationen über die Notwendigkeit von S-Gaben auf Grünland führt.

Geringe Se-Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen sind in der Regel offenbar nicht mit Vitamin E-Mangel verbunden. Obwohl Vitamin E bis zu einem gewissen Grad Se-Mangel kompensieren kann, können die Mangel-Symptome, vgl. 2.2.2.3, trotz ausreichender Vitamin E-Versorgung auftreten (MCDOWELL et al. 1996, SCHRAUZER 1998). Nach HUSS (1987) und WEISSBACH (1993) enthalten junge Grünlandaufwüchse hohe Tocopherolgehalte, die aber im Wachstumsverlauf stark abnehmen; einwandfrei gewonnene Silagen behalten bis zu 90% der Ausgangsgehalte, Heu kann hingegen frei von Vitamin E-aktiven Inhaltsstoffen sein. Nach HEMINGWAY (1999) ist

Vitamin E-Mangel bei Weidegang nicht zu erwarten. Die Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen sind aber äußerst heterogen. In schottischen Grasaufwüchsen liegen die Konzentrationen zwischen 12 und 300 mg Vitamin E (HEMINGWAY 1999), in verschiedenen Regionen der USA werden 80 bis 200 mg Vitamin E kg<sup>-1</sup> TS in der Frischmasse, aber um 20-80 % geringere Gehalte im Heu festgestellt (WEISS 1998). JUKOLA et al. (1996) messen in Finnland Vitamin E-Konzentrationen von durchschnittlich 77 mg kg<sup>-1</sup> TS in Grassilagen und 26 mg kg<sup>-1</sup> TS in Heu. Im Vergleich zur Verfütterung von Silage kann es bei hohen Anteilen von Heu in der Ration zu deutlich geringeren Vitamin E-Konzentrationen im Blut kommen (PEHRSON & HAKKARINNEN 1986).

**Tab. 5:** Se-Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen (nach BAHNERS 1987, HARTFIEL & SCHULTE 1988)

Bundesland	x	min-max
Niedersachsen (n=33)	49	19 – 85
Schleswig-Holstein (n=15)	42	20 – 121
Nordrhein-Westfalen (n=108)	49	14 – 123
Hessen (n=24)	47	25 – 93
Rheinland-Pfalz (n=59)	40	20 – 78
Baden-Württemberg (n=24)	49	15 – 115
Bayern (n=41)	41	11 – 92
<b>Deutschland (alte Länder)</b>	<b>45</b>	<b>11 – 121</b>

## 2.4 Selen-Supplementierung

### 2.4.1 Aufnahme und Absorption

Der Se-Gehalt im tierischen Organismus korreliert offenbar mit der aufgenommenen **Se-Menge** im Futter (KU et al. 1972, BACKALL & SCHOLZ 1979, BOSTEDT & SCHRAMMEL 1983, COMBS & COMBS 1984, WOLFFRAM 1991). Die Verteilung des aufgenommenen Se im Körper ist allerdings nicht einheitlich. In Niere, Milz und Leber sind die Konzentrationen offenbar in der Regel höher als in Muskulatur, Blut und Knochen. Nerven- und Fettgewebe gelten als am Se-ärmsten (COMBS & COMBS 1984, ANKE et al. 1983, ANGELOW et al. 1987, WOLFFRAM 1991, PAVLATA et al. 2001), wobei jedoch das

Plazentagewebe höhere Se-Konzentrationen aufweisen kann als das Blutserum (BOSTEDT & SCHRAMMEL 1981, PAVLATA et al. 2001). Bis zu einem gewissen Grad steigt bei Wiederkäuern mit zunehmender Se-Supplementierung die Se-Konzentration im Blutplasma, Serum und Gesamtblut an (GIERUS et al. 2001), wobei der Anstieg mit zunehmenden Se-Konzentrationen im Futter abnimmt und ab einer bestimmten Se-Konzentration im Futter endet. Nach GIERUS et al. (2001) ist im Wertebereich 40-150  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS in verschiedenen Rationen der deutlichste Anstieg der Se-Konzentrationen im Blutplasma festzustellen (= Se-Supplementierung in Form von Na-Selenit), auch im folgenden Wertebereich von bis ca. 400  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS ist der Anstieg deutlich, bei Werten  $> 1000 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS ist jedoch keine weitere Erhöhung der Se-Konzentrationen im Blutplasma zu erwarten. Zwischen Se-Aufnahme und Glutathionperoxidase-Aktivität besteht offenbar ebenfalls ein enger Zusammenhang (ROTRUCK et al. 1972, 1973, BACKALL & SCHOLZ 1979, ULLREY 1987, SUNDE 1990, GIERUS et al. 2001), wobei beim Rind, abhängig von der Rationszusammensetzung, offenbar bei abgestufter Se-Supplementierung der Punkt, an dem kein weiterer Anstieg mehr festzustellen ist, im Vergleich zum Anstieg der Se-Konzentrationen im Blutplasma früher erreicht sein kann (GIERUS et al. 2001).

Gemessen am Anteil des absorbierten Se am oral aufgenommenen Se bestehen bezogen auf die **Bioverfügbarkeit** Unterschiede zwischen den Se-Formen. Tiere können **anorganische Se-Formen** nutzen, wie Selenat und Selenit, aber auch **organisches Se** in Form von Aminosäuren, wie Selenomethionin und Selenocystein (WOLFFRAM 1991). Elementares Se und Metallselenide werden dagegen nur im geringen Maße oder gar nicht aufgenommen (WOLFFRAM 1991). Sowohl bei monogastriischen Tieren als auch bei Wiederkäuern spielt der Dünndarm für die Absorption verschiedener Se-Quellen wahrscheinlich die wichtigste Rolle, jedoch haben die **Se-Metabolisierungsprozesse in den Vormägen** der Wiederkäuer einen erheblichen Einfluss auf die Se-Absorption (WRIGHT & BELL 1966, WOLFFRAM 1991, KOENIG et al. 1997). Die Mechanismen der Selenat- und Selenitaufnahme und der Absorption von Selenoaminosäuren am Dünndarm unterscheiden sich nach WOLFFRAM (1991) grundsätzlich. Selenat wird über aktive bürstensaummembranständige Transportmechanismen absorbiert (=  $\text{Na}^+$ /Selenat-Cotransport bzw. Selenat/OH-Austausch), wobei die Aufnahme von der Konzentration hemmender Anionen, wie Sulfat, Thiosulfat, Molybdat, Chromat, Oxalat und Oxalacetat, abhängt, während offenbar Selenit Na-unabhängig und größtenteils passiv, zum Teil auch in verschiedene Selenoamino-



säuren überführt und dann über Aminosäure-Carrier in das Epithel aufgenommen wird. Am Dünndarm wird Selenat offenbar rascher als Selenit aufgenommen. Da aber Selenat wahrscheinlich im Pansen überwiegend reduziert wird, ist zwischen diesen beiden anorganischen Se-Quellen nicht unbedingt ein Unterschied, bezogen auf die Bioverfügbarkeit für Wiederkäuer, zu erwarten (WOLFFRAM 1991). Die Absorption von Selenocystein verläuft am Dünndarm wahrscheinlich analog zur derjenigen von Cystein (WOLFFRAM 1991) und auch Selenomethionin wird anscheinend über denselben Transportmechanismus absorbiert wie Methionin.

Die Se-Absorption bei Wiederkäuern ist im Vergleich zu monogastrischen Säugetieren offenbar deutlich geringer (WRIGHT & BELL 1966, WOLFFRAM 1991, KOENIG et al. 1997, UNDERWOOD & SUTTLE 1999), was möglicherweise eine Folge der Reduktion von Selenat zu Selenit und von Selenit zu schwer löslichen oder unlöslichen Verbindungen im Rumen (WRIGHT & BELL 1966, WOLFFRAM 1991) bzw. der Einbindung von Se in die mikrobielle Fraktion ist (KOENIG et al. 1997). In beiden Fällen wird Se am Dünndarm wahrscheinlich in geringerem Umfang absorbiert und zu großen Teilen über den Kot ausgeschieden (WRIGHT & BELL 1966, WOLFFRAM 1991). Nach HIDIROGLOU (1968) wird jedoch sowohl Selenat als auch Selenit im Pansen nach 24-stündiger Inkubationszeit zu großen Teilen in Selenomethionin-Form überführt, auch eine Überführung von Selenid zu Selenomethionin durch die Pansenmikroorganismen ist möglich (ANGELOW & ANKE 1987). Bei der Beurteilung der Bioverfügbarkeit verschiedener Se-Quellen für Wiederkäuer ist somit die besondere Bedeutung des komplexen ruminalen Se-Metabolismus zu beachten. Oral aufgenommenes Se liegt nach der Pansenpassage nicht zwingend in der gleichen Form am Dünndarm vor (WOLFFRAM 1991), weshalb sich auch Aussagen zur Bioverfügbarkeit von organischen und anorganischen Se-Formen schwieriger gestalten als bei monogastrischen Säugetieren. In Untersuchungen von PETERSON & SPEDDING (1963) an Schafen wird allerdings, gemessen an dem Anteil des im Faeces ausgeschiedenen markierten Se an der verfütterten Menge, bei Verfütterung von Se-reichem Rotklee eine höhere Se-Verwertung unterstellt (= 46 %) als bei Supplementierung von Selenit (= 31 %). VAN RYSSSEN et al. (1989) vergleichen die Se-Konzentrationen in Leber-, Pankreas-, Herz-, und Skelettmuskelgewebeproben von Schafen, die über einen längeren Zeitraum vergleichbare Se-Mengen entweder in Form von Na-Selenit oder Se-reichem Weizen erhalten haben. Demzufolge werden in Verbindung mit der pflanzlichen Se-Quelle signifikant höhere Se-Konzentrationen gemessen. Da Se in pflanzlichen Futtermitteln

überwiegend in Form selenhaltiger Aminosäuren, vor allem Selenomethionin vorliegt, vgl. 2.1.2.7, lässt sich daraus eine höhere Absorptionsrate von organischem im Vergleich zu anorganischem Se folgern. Hefen mit hohen Se-Konzentrationen werden ebenfalls als organische Quelle zu einer Steigerung des Se-Status von Wiederkäuern eingesetzt. In Untersuchungen von KNOWLES et al. (1999), ORTMAN & PEHRSON (1999) sowie PAVLATA et al. (2001) werden in Muskelgewebe, Blut, Milch und Leber nach Verwendung dieser organischen Se-Quelle höhere Se-Konzentrationen gemessen als nach Supplementierung von Selenat bzw. Selenit. Demgegenüber stellen KOENIG et al. (1997) anhand eines Tracer-Experimentes bei Schafen eine höhere Absorption von Na-Selenit im Vergleich zu organischem Se in Form von Se-Hefen fest. Die Verteilung des am Dünndarm aufgenommenen Se im Körper ist offenbar ebenfalls von der Se-Form abhängig. ORTMAN & PEHRSON (1999) stellen bei Se-Konzentrationen von 240-310  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS in Form von Se-Hefen, Na-Selenat bzw. Na-Selenit in der Ration von Milchkühen im Vergleich zur Kontrollgruppe (= 100-120  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS) sechs bis zwölf Wochen nach Versuchsbeginn unabhängig von der Se-Form einen Anstieg in der Glutathionperoxidase-Aktivität fest. Die Se-Konzentrationen im Plasma nehmen ebenfalls bei allen drei Se-Quellen zu, wobei die Zunahme bei der Verfütterung von Se-Hefen geringfügig stärker als bei Selenit und Selenat ausfällt. Noch deutlicher sind die Unterschiede zwischen den Se-Quellen bezogen auf die Se-Konzentrationen im Gesamtblut. Die Se-Konzentrationen in der Milch lassen sich hingegen nur mit der Se-Hefe und nicht mit Selenat oder Selenit steigern. Für die Se-Versorgung von säugenden Kälbern ist es somit effektiver, der Mutterkuh Se in organischer Form zu verabreichen. Untersuchungen von PEHRSON et al. (1999) belegen einen signifikanten Zusammenhang zwischen Se-Konzentrationen in der Milch bzw. dem Gesamtblut von Mutterkühen mit ganzjährigem Weidegang und den Gesamtblut- und Plasma-Se-Konzentrationen sowie der Erythrozyten-Glutathionperoxidase-Aktivität der Kälber. Der Se-Status der Kälber, deren Mütter Se-Hefen erhalten haben, wird von den Autoren als ausreichend eingestuft, während für Kälber von Kühen mit Selenit-Supplementierung nur eine marginale Se-Versorgung festgestellt werden kann.

Bei monogastren Arten ist im Vergleich zu den anorganischen Se-Formen ebenfalls eine höhere Se-Aufnahme in Form von Selenomethionin zu beobachten (CARY et al. 1973, WHANGER & BUTLER 1988), doch sind diese Unterschiede erst ab Se-Konzentrationen  $> 100 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS evident (CARY et al. 1973).

Neben den Anteilen der oral aufgenommenen Se-Formen ist möglicherweise auch die **Zusammensetzung der Wiederkäuerration** für die Se-Absorption am Dünndarm maßgebend (ANGELOW & ANKE 1987). KOENIG et al. (1997) stellen bei Schafen mit Konzentratzuteilung eine signifikant höhere Se-Absorption (= in % des aufgenommenen Se) fest als bei Tieren, die eine reine Raufutter-Ration erhalten. Als Ursache kommen dabei Unterschiede in den Reaktionsverhältnissen sowie in der **Zusammensetzung der Mikroorganismen im Pansen** in Betracht. Entscheidend könnte dabei nach KOENIG et al. (1997) sein, welche Se-Formen im Pansen vorherrschen und welche Se-Metaboliten aus deren Stoffwechsel hervorgehen. So führen beispielsweise hohe Anteile von *Prevotella ruminicola*, die bei raufutterbetonten Rationen häufiger anzutreffen sind, zu höheren Anteilen von elementarem Se, das praktisch nicht absorbierbar ist, während *Selenomas ruminatum* und weitere Mikroorganismen mit kurzer Generationszeit, die bei konzentratbetonten Rationen häufiger sind, Se in Seleno-Aminosäuren einbauen, die für den Wiederkäuer leichter verfügbar sind. Als mögliche Ursache für die höhere Se-Absorption bei mit Konzentrat gefütterten Tieren in diesem Experiment kommt aber auch die niedrigere absolute Se-Aufnahme im Vergleich zur reinen Raufutter-Variante in Betracht. Für die These spricht die im Vergleich der Varianten gleiche Se-Retentionsmenge. Die Autoren räumen ein, dass bei geringeren Se-Gehalten, die weniger deutlich über den Mindestkonzentrationen liegen, die prozentuale Ausnutzung der Se-Mengen im Grundfutter höher sein könnte. Zwischen den Grundfutterarten Gras bzw. Grassilage und Maissilage (= in Verbindung mit Sojaschrot als Proteinsupplement) können bei vergleichbaren Se-Konzentrationen in der Gesamtration Unterschiede zwischen 38 und 54  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS bezogen auf die Se-Konzentrationen in Blut und Milch auftreten (GIERUS et al. 2001). Insbesondere dann, wenn die Se-Mengen der Maissilage-Ration zu großen Teilen einer zusätzlichen Proteinquelle entstammen, ist mit höheren Se-Konzentrationen in Blut und Milch zu rechnen. Auch beim Menschen soll Se in Verbindung mit proteinreichen Nahrungsmitteln in höherem Maße aufgenommen werden als mit proteinarmen (ANGELOW & ANKE 1987).

Wenn Proteine als Se-Quelle dienen, ist jedoch der unspezifische Einbau von Sehaltigen Aminosäuren anstelle schwefelhaltiger Analoga in körpereigene Proteine zu berücksichtigen (GIERUS et al. 2001). So wird Seleno-Methionin nach der Absorption im Dünndarm offenbar zu großen Teilen unspezifisch anstelle von Methionin eingebunden, wodurch die Verfügbarkeit von Se im Körper für die Synthese Se-

abhängiger Proteine beeinträchtigt sein kann (GIERUS et al. 2001). Auf diese Weise kann eine Erhöhung der Se-Menge durch Futtermittel, in denen Se überwiegend in organischer Form vorliegt, aufgrund der erhöhten Absorption zu einer Erhöhung der Se-Konzentrationen in Milch, Blut und Gewebe führen, ohne dass damit zwingend ein proportionaler Anstieg der Glutathionperoxidase-Aktivität einhergehen muss (NEVÉ 1995, SCHÖNTHALER 1998, GIERUS et al. 2001). NEVÉ (1995) zeigt, dass organisches Se (= Se-Hefen, Selenomethionin und Se in Lebensmitteln) beim Menschen effektiver zu einer Erhöhung der Se-Konzentrationen im Gesamtblut führt als anorganische Se-Formen (= Selenat und Selenit), jedoch erreicht die Glutathionperoxidase-Aktivität bei organischen Se-Quellen im Vergleich zur Selenat- bzw. Selenit-Supplementierung zum Teil erheblich geringere Werte.

#### 2.4.2 Direkte Selen-Supplementierung

Zur Vermeidung möglicher Se-Mangelsituationen bei landwirtschaftlichen Nutztieren, vgl. 2.2.2.2, existieren verschiedene Strategien der Se-Supplementierung. Anders als bei der Haltung von Milchkühen und intensiver Rindermast, bei denen die Mineralstoffe prinzipiell entsprechend dem individuellen Bedarf, z.B. als Ergänzung zum Kraffutter, zugeteilt werden können, müssen in Weidesystemen andere Methoden angewandt werden (HIDIROGLOU et al. 1985, 1987, WOLFFRAM 1991, ØVERNES 1993, McDOWELL 1996). Wie bei anderen Mineralstoffen und Spurenelementen kann auch bezogen auf die Se-Supplementierung zwischen direkten und indirekten Methoden, vgl. 2.4.3, unterschieden werden, wobei die bedarfsgerechte Se-Supplementierung aufgrund der hohen Toxizität eine besonders präzise Vorgehensweise erfordert. Alle Methoden können mit Mineralstoff-Kombinationen oder als Einzelmineralstoffgabe konzipiert sein. Direkte Methoden der Supplementierung sind nach McDOWELL (1996): Anreicherung von Trinkwasser, die orale Verabreichung definierter Mikroelement-Dosen in Form von Lösungen oder Pasten in bestimmten Intervallen, intramuskuläre Injektionen, z.B. in Verbindung mit Vitaminpräparaten, sowie Einsatz von Verweilboli bzw. Rumen-Pellets, die nach oraler Verabreichung aufgrund ihrer geringen Löslichkeit über einen längeren Zeitraum im Rumen verbleiben und die Mikronährstoffe abgeben. Neben diesen Applikationsmethoden mit bedarfsorientierten Mikroelementzuteilungen ist zu den direkten Verfahren auch die ad libitum Supplementierung von Mineralsalzmischungen zu zählen, wobei Lecksteine die weltweit gängigste

Form sind. Bezogen auf das Spurenelement Se ist die Anreicherung des Trinkwassers in Deutschland problematisch. Se darf nach der Trinkwasserverordnung in Konzentrationen von maximal  $10 \mu\text{g l}^{-1}$  enthalten sein (ANONYMUS 2001a) und Erkenntnisse zu möglichen Risiken von Fehldosierungen bei einer nachträglichen Se-Anreicherung in der Praxis fehlen. Darüber hinaus müsste bei dieser Vorgehensweise gesichert sein, dass der Flüssigkeitsbedarf der Weidetiere ausschließlich über die entsprechend präparierte Tränke gedeckt wird (McDOWELL 1996). Da die tägliche Wasseraufnahme der Wiederkäuer aufgrund genetischer, physiologischer und umweltbedingter Faktoren, wie Niederschläge, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung (HALL 2002) ausgesprochen uneinheitlich ist (MEHLHORN 1979), ist davon auszugehen, dass eine bedarfsgerechte Se-Supplementierung über das Trinkwasser nicht zuverlässig dosierbar ist. Die regelmäßige orale Verabreichung von Se-Lösungen oder Pasten sowie Se-Injektionen können den Se-Status von Wiederkäuern effektiv anheben (BOSTEDT & SCHRAMEL 1981), gegen die Verwendung in extensiven Weidesystemen spricht der hohe zusätzliche Arbeitsaufwand und das bei großen Wiederkäuern erschwerte Handling der Tiere (McDOWELL 1996) sowie die kurzfristige Wirkungsweise der Maßnahme (GRÜNDER & AUER 1995). Selenit- oder Selenat-Injektionen sind in ein- bis dreimonatigen Intervallen zu wiederholen (UNDERWOOD & SUTTLE 1999). Bei Kombinationen von Se mit weiteren Mineralstoffen oder Vitaminen ist darüber hinaus problematisch, dass die einzuhaltenden Intervalle, in denen eine wiederholte Anwendung notwendig wird, nicht immer einheitlich sind (McDOWELL 1996). Es gibt unterschiedliche Arten von Rumen-Pellets. Bariumselenat-Pellets sollen nach JUDSON et al. (1991) noch 200 Wochen nach der oralen Einführung zu einer Erhöhung der Se-Konzentration im Blut von Mutterschafen führen. Die sogenannten Heavy Pellets bestehen zu 95% aus zerkleinertem Fe und zu 5% aus elementarem Se und sollen in Se-defizitären Lagen ebenfalls über mehrere Monate (HANDRECK & GODWIN 1970, UNDERWOOD & SUTTLE 1999) bzw. bis zu mehreren Jahren (LANGLANDS et al. 1990a, b) effektiv vor Weißmuskelkrankheit schützen. Se-freisetzende Rumenboli auf Basis eines speziellen Glasmaterials (HIDIROGLOU et al. 1987, LANGLANDS et al. 1990a, b, UNDERWOOD & SUTTLE 1999, KENDALL et al. 2000, MACKENZIE et al. 2001) und eine intraruminale osmotische Pumpe, die aktiv  $3 \text{ mg Se d}^{-1}$  freisetzen soll (CAMPBELL et al. 1990) sind weitere Methoden, die Se-Versorgung über einen längeren Zeitraum zu sichern. Die intraruminal ansetzenden Langzeitmethoden haben jedoch den gemeinsamen Nachteil, dass die Präparate auch nach

dem Schlachten im Körper verbleiben können, dass sie sich durch vergleichsweise hohe Kosten auszeichnen (MCDOWELL 1996), häufig für Jungtiere nicht bedarfsgerecht dosiert sind (UNDERWOOD & SUTTLE 1999) und die Wirkungsdauer starken Schwankungen unterliegt und nur schwer prognostizierbar ist (LANGLANDS et al. 1990a, b). Bei Fleischrindern kommt es häufig innerhalb der ersten Minuten nach der Verabreichung zum Herauswürgen der Pellets (UNDERWOOD & SUTTLE 1999), das sich zum Teil auch nach mehreren Wiederholungen nicht verhindern lässt, so dass nach Untersuchungen von LANGLANDS et al. (1989) in Australien bei bis zu 57 % der behandelten Tiere die Präparate verloren gehen; bei Schafen stellt sich dieses Problem offenbar in weitaus geringerem Umfang (UNDERWOOD & SUTTLE 1999, LANGLANDS et al. 1990a, b). Se-haltige Lecksteine sind auf Weiden eine kostengünstige Methode, das Se-Versorgungsniveau weidender Tiere zu erhöhen (UNDERWOOD & SUTTLE 1999). Nachteilig wirkt sich hierbei allerdings aus, dass die Nutzungshäufigkeit dieses Mineralstoff-Angebotes bei Weidetieren individuell stark variieren kann und dass es nicht möglich ist, die Se-Dosierung so zu erhöhen, um auch bei dem Individuum mit dem geringsten Mineralsalz-Konsum eine ausreichende Se-Versorgung zu gewährleisten (MONEY et al. 1986, MCDOWELL 1996, UNDERWOOD & SUTTLE 1999), ein überdurchschnittlicher Konsum kann bei anderen Individuen der Herde zu einer übermäßigen Se-Aufnahme führen, wobei der Schaden durch die exzessive Se-Aufnahme zum Teil größer sein kann als der Nutzen einer solchen ad libitum Maßnahme (MCDOWELL 1996). Untersuchungen von DUCKER et al. (1981) mit Mutterschafen zeigen, dass ein hoher Anteil der Tiere einer Herde (= 19 %) angebotene Mineralsalzlecksteine nicht frequentieren. Die Akzeptanz bei den restlichen Tieren ist äußerst variabel, wobei die höchste von einem Einzelindividuum aufgenommene Mineralsalzmenge anscheinend  $1,4 \text{ kg d}^{-1}$  beträgt. MORRIS et al. (1980) stellen in einem Akzeptanzversuch mit freier Mineralsalzzuteilung (= Salzblocks) in einer Mutterkuherde individuell variierende Aufnahmen zwischen 0 und  $127 \text{ g d}^{-1}$  fest. Dabei wird zusätzlich auch eine zeitliche Variabilität der Mineralsalzaufnahme im Durchschnitt aller Tiere festgestellt, wobei neben tagesabhängigen Schwankungen in der Akzeptanz, auch eine über mehrere Wochen abnehmende Attraktivität des Mineralstoffangebotes festzustellen ist.

### 2.4.3 Indirekte Selen-Supplementierung

#### 2.4.3.1 Selenhaltige Dünger

Die Verwendung von Se-haltigen Düngern hat in Finnland zu einem deutlichen Anstieg der Se-Konzentrationen des Grundfutters und letztlich des Rindfleisches geführt (VARO 1993). ARO et al. (1995) sehen einen direkten Zusammenhang zwischen der Einführung selenhaltiger Mehrnährstoffdünger im Jahr 1984 und dem Anstieg der Se-Konzentration in pflanzlichen und tierischen Lebensmitteln, demzufolge auch die Se-Konzentrationen im menschlichen Blutserum um 70 % angestiegen sind. Wie in Finnland vor Beginn der gezielten Se-Applikationsmaßnahmen, liegt die Se-Aufnahme der deutschen Bevölkerung häufig unter dem normativen Bedarf. DROBNER (1997) und DROBNER et al. (1997) stellen bei 23 % der weiblichen und bei 39% der männlichen Testpersonen zu geringe Se-Aufnahmen fest.

Mehrnährstoffdünger für Futterpflanzen dürfen in Finnland 6 mg Se kg<sup>-1</sup> enthalten. Seit 1990 gilt dieser Grenzwert auch für Mehrnährstoffdünger, die im Getreideanbau eingesetzt werden (ARO et al. 1995). Versuche in Deutschland zeigen, dass Se-Gaben auf Grünland zu einer verbesserten Se-Versorgung von Weidetieren effizient beitragen können (BOEHNKE et al. 1997, LORENZ & BOEHNKE 1999). In Deutschland werden die Se-Konzentrationen in Düngern seit 2003 in der Düngemittelverordnung (ANONYMUS 2003) neu geregelt, wobei Se-Konzentrationen > 5 mg Se kg Dünger-TS vom Hersteller anzugeben sind. Damit wird die Regelung, dass lediglich durch den Produktionsprozess bedingt enthaltene Se-Gehalte toleriert werden, abgelöst. Ohne gezielten Zusatz ist Se in verschiedenen Mineraldüngern in der Regel nur in Spuren vorhanden (GISSEL-NIELSEN 1971, ADRIANO 1986, WHITEHEAD 2000). Die Se-Konzentrationen in wirtschaftseigenen Düngern sind ausgesprochen variabel (SAGER 2001). Besonders bei Schweinemist bzw. -gülle, Hühnermist sowie Gülle von Milchkühen sind vergleichsweise hohe Se-Konzentrationen festzustellen, geringere Konzentrationen sind offenbar bei Mist von Mastbullen zu erwarten. Problematisch bei einer Se-Applikation in Verbindung mit einem organischen Träger ist die geringe Se-Verfügbarkeit für die Pflanzen (LEVERESQUE 1974, HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1976b, BANUELOS et al. 1996, AJWA et al. 1998, BRUß 1998).

Bei Düngung in Form von Selenat werden bei denselben Mengen höhere Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial erreicht als bei Gaben als Selenit (YLÄRANTA

1983b, 1993, BAHNERS & HARTFIEL 1985, STÜNZI 1988) oder in Form von selenangereicherter organischer Substanz (AJWA et al. 1998, BRUß 1998), wobei sich besonders Natriumselenat bewährt hat (BAHNERS & HARTFIEL 1985, GUPTA & MCLEOD 1994, GUPTA 1995). Zum einen wird Selenat im Boden nur schwach sorbiert und kann somit wesentlich besser über die Wurzeln aufgenommen werden, vgl. 2.1.2.2, während Selenit zum Teil im hohen Maße an feste Bodenbestandteile adsorbiert wird (YLÄRANTA 1983a, b, 1984, VAN DOORST & PETERSON 1984, FIO et al. 1991, GISSELNIELSEN 1993, BRUß et al. 1997), zum anderen ist auch die Translokation von Selenat aus der Wurzel in den Spross im Vergleich zu Selenit deutlich begünstigt (TERRY et al. 2000). Die Nachwirkung sowohl von Selenat als auch von Selenit bei den Folgenutzungen ist grundsätzlich begrenzt, ist aber bei Selenit offenbar etwas stärker ausgeprägt (WATKINSON & DAVIES 1967, YLÄRANTA 1983b, BAHNERS & HARTFIEL 1985, 1987, BAHNERS 1987, OPITZ v. BOBERFELD 1999, 2002a). HORAK & LIEGENFELD (1996) kommen in einem Se-Düngungsversuch mit Weizen zu dem Schluss, dass mehrmaligen kleineren Selenat-Gaben der Vorzug gegenüber einer einmaligen Selenit-Applikation einzuräumen ist, da sich nur so mit ausreichender Sicherheit die angestrebten Se-Konzentrationen realisieren lassen. Aufgrund der schlechteren Pflanzenverfügbarkeit von Selenit ist die Gefahr einer Anreicherung im Boden höher. Offenbar besteht in diesem Fall die Gefahr, dass z.B. durch oxidierende Bedingungen im Boden durch die Pflanze mehr Se aufgenommen wird als gewünscht und die Konzentrationen im Pflanzenmaterial einen kritisch hohen Wert erreichen (HORAK & LIEGENFELD 1996).

Die Se-Gabe muss daher knapp bemessen und dem Standort angepasst sein, da sich bei Gaben zwischen 100 und 500 g Se ha<sup>-1</sup> schon potentiell toxische Se-Konzentrationen im Futter einstellen können (STÜNZI 1988), auch bei einer Menge von 40 g Se ha<sup>-1</sup>, als Natriumselenat appliziert, sind Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial zu erwarten, die den Bedarf der Wiederkäuer bei weitem überschreiten (SPENCER 1982). Bei Se-Mangel sind offenbar schon Gaben in Höhe von 4-10 g Se ha<sup>-1</sup> in Selenatform ausreichend, um die Se-Konzentrationen im Aufwuchs auf > 100 µg Se kg<sup>-1</sup> TS zu steigern (GUPTA & MACLEOD 1994, GUPTA 1995, LORENZ & BOEHNKE 1999, OPITZ v. BOBERFELD 2000, 2002a). Außerdem ist bei unangepassten Se-Gaben und bei langfristiger Se-Düngung die Gefahr einer überhöhten Se-Akkumulation im Boden nicht völlig auszuschließen (YLÄRANTA 1993), weshalb langfristige Se-Applikationen stets durch regelmäßige Se-Analysen von Futter bzw. Ver-



edelungsprodukt begleitet sein sollten (ARO et al. 1995). Die für die Se-Konzentration im Aufwuchs offenbar entscheidenden Kriterien Bodenreaktion und Gehalt organischer Substanz, vgl. 2.1.2, können für die Effizienz von Se-Gaben auf Grünland maßgebend sein. Dabei sind standortbedingte pH-Unterschiede und mögliche Kalk-Gaben in die Betrachtung einzubeziehen. In saurem Milieu wird Selenat rasch reduziert, es ist damit schlechter pflanzenverfügbar. Die Wirkung einer Kalkung auf die Se-Konzentrationen im Aufwuchs auf Böden mit niedrigem pH-Wert wurde bislang nicht eindeutig belegt. BAHNERS & HARTFIEL (1987) ermitteln unabhängig von der Kalkform eine Steigerung der Se-Konzentration in Grasaufwüchsen trotz einer vergleichsweise geringen pH-Wert-Erhöhung im Boden von 5,1 auf durchschnittlich 5,5. Auch YLÄRANTA (1983c) demonstriert anhand von Gefäßversuchen, dass sich nach Se-Gaben bodenartabhängig die Mengen an pflanzenverfügbarem Se im Boden durch Zugabe von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und der damit verbundenen pH-Wert-Erhöhung anheben lassen, wobei der Effekt bei Selenitgaben ausgeprägter ist als bei Selenat. In Einzelfällen werden allerdings nach Selenat-Gaben in Kombination mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  im Vergleich zu ungekalkten Varianten auch geringere Se-Konzentrationen im *Lolium multiflorum*-Aufwuchs festgestellt (YLÄRANTA 1983b, c, 1993).

Bei der Verwendung von Se-haltigen Mehrnährstoffdüngern sind, bezogen auf die Se-Konzentrationen im Aufwuchs, Wechselwirkungen der Se-Gabe mit den applizierten Pflanzennährstoffen möglich. Grundsätzlich kann eine ertragssteigernde Wirkung zu Verdünnungseffekten, also einer relativen Abnahme von Se in der Pflanze führen (GIRLING 1984). Insbesondere sind Interaktionen Se-Aufnahme x Sulfat-Applikation und Se-Aufnahme x Phosphat-Applikation möglich, wobei bisherige Untersuchungen zu unterschiedlichen Resultaten kommen, inwieweit Sulfat und Phosphat die Se-Konzentration der Pflanzen beeinflussen, vgl. 2.1.2.6. Unklar ist auch, wie sich Se-Gaben in Kombination mit einer N-Düngung auf die Se-Konzentration in der Pflanze auswirken. Möglicherweise führen N-Gaben zu verminderten Se-Konzentrationen (GISSEL-NIELSEN 1975a, GIRLING 1984, GISSEL-NIELSEN et al. 1984), wie FARIÁ-MÁRMOL et al. (1997) bei *Andropogon gayanus*, einem Futtergras semi-arider Gebiete, feststellen. Denkbar ist ein indirekter Effekt von N-Gaben, da höhere TS-Erträge niedrigere Se-Konzentrationen (= Verdünnungseffekt) zur Folge haben können (YLÄRANTA 1983b, WHITEHEAD 2000). BAHNERS & HARTFIEL (1987) stellen hingegen keinen Effekt einer N-Düngung auf die Se-Konzentration fest, wobei allerdings in dieser Untersuchung das Niveau der Se-Konzentrationen mit  $39\text{-}48 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  niedrig ist.

### 2.4.3.2 Düngerunabhängige Verfahren

Obwohl die Wirksamkeit von Se-Gaben auf die Se-Konzentrationen von Grünlandaufwüchsen mehrfach nachgewiesen wird, bleibt hierbei bislang in der Literatur ein grundsätzliches Problem unbeachtet: Für eine Se-Applikation in extensiven Weidesystemen - in denen Wiederkäuer besonders von Se-Mangel betroffen sind (WOLF 1998) - muss gewährleistet sein, dass eine solche Maßnahme mit geringem Kapital- und Arbeitsaufwand realisierbar ist. Mit Low-Input-Bedingungen ist darum der Einsatz von Se-haltigen Mehrnährstoffdüngern oder Spurenelement-Düngern kaum vereinbar (OPITZ v. BOBERFELD 2002a). Eine geeignete Methode zur Erhöhung des Se-Niveaus in extensiven Weidesystemen könnte sein, bei der Pflegemaßnahme Nachsaat zuvor mit Selenat angereichertes **Saatgut** zu verwenden. Kosten für einen zusätzlichen Arbeitsgang sowie für Dünger als Se-Träger könnten hierdurch eingespart werden. Versuche mit *Lolium multiflorum*- und *Medicago sativa*-Samen, die mit einem natriumselenithaltigen Überzug versehen werden (GUPTA et al. 1983b), zeigen, dass die Se-Konzentrationen des Aufwuchses signifikant angehoben werden können. Diese Maßnahme kann bei *Medicago sativa* in drei, bei *Lolium multiflorum* in zwei aufeinander folgenden Aufwüchsen Konzentrationen  $> 100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  sicherstellen, wobei jedoch vergleichsweise große Se-Mengen erforderlich sind ( $= 50 \text{ g Se ha}^{-1}$ ). Bei einem Versuch, die Se-Konzentrationen in *Hordeum vulgare* zu steigern, indem das Saatgut zuvor über längere Zeit in Selenit-Lösungen eingeweicht wird (GISSEL-NIELSEN 1975b) erweisen sich Se-Konzentrationen von 0 bis  $750 \mu\text{g Se}^{4+} \text{ kg}^{-1} \text{ TS}$  als unzureichend. Unter Verwendung von Selenat als Se-Quelle kann YLÄRANTA (1983d) die Se-Konzentrationen im Korn von *Hordeum vulgare* durch Anreicherung des Saatgutes mit 5 bzw.  $10 \text{ g Se ha}^{-1}$  signifikant erhöhen. Bei beiden Untersuchungen lassen sich, ausgehend von den verwendeten Se-Mengen, keine negativen Effekte auf den Ertrag erkennen. Bislang fehlen jedoch Untersuchungen zur Keimfähigkeit von mit Se angereichertem Saatgut. Beobachtungen von HARTIKAINEN et al. (2000) und KOPSELL et al. (2003) bestätigen jedoch, dass die Keimung von *Lolium perenne*- bzw. *Brassica oleracea*-Samen in Se-reichen Medien signifikant reduziert ist. Eine weitere Option zur Erhöhung des Se-Angebotes für Wiederkäuer in Weidesystemen besteht im **Aufsprühen einer Selenit- oder Selenatlösung auf den Grünlandbestand** (MORE & COPPENET 1980, GUPTA et al. 1983a, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, YLÄRANTA 1984, MIKKELSEN et al. 1989). Der Vorteil der Blatt-Applikation liegt in der Umgehung der Se-Absorptionsprozesse im Boden (GISSEL-

NIELSEN et al. 1984, MIKKELSEN et al. 1989). Dies kann realisiert werden, wenn die Applikation wenige Tage vor der Nutzung erfolgt (YLÄRANTA 1984). In diesem Fall sind bis zu 70 % des aufgesprühten Se wieder im Futter auffindbar, wobei schon 2 g Se ha<sup>-1</sup> in Form von Selenat oder Selenit als ausreichend anzusehen sind, um Se-Konzentrationen von < 50 µg Se kg<sup>-1</sup> TS auf deutlich > 100 µg Se kg<sup>-1</sup> TS anzuheben. Da es sich bei dieser Maßnahme in erster Linie um eine Benetzung der Blätter handelt, ist die Nachwirkung dieser Maßnahme gering.

Die Erhöhung der Se-Konzentrationen ist offenbar stark von dem Zeitraum zwischen Applikation und Nutzung abhängig. McDOWELL et al. (2002) variieren die auf *Festuca arundinacea*-Bestände aufgesprühten Se-Mengen (= 0, 5, 10, 24 und 120 g Se ha<sup>-1</sup> in Form von 90% Na-Selenat und 10 % Ba-Selenat). Nach zwei Wochen sind bereits bei der Stufe 5 g Se ha<sup>-1</sup> die Konzentrationen von 60 auf 1900 µg kg<sup>-1</sup> TS angestiegen, d.h. dass in diesem Versuch unter den Klimabedingungen Floridas bei zu frühem Nutzungstermin selbst bei vergleichsweise geringen Se-Gaben kritische Konzentrationen, vgl. 2.2.2.2, auftreten können. Im Verlauf der Untersuchungen nimmt die festgestellte Konzentration kontinuierlich ab und beträgt 16 Wochen nach der Applikation lediglich 140 µg Se kg<sup>-1</sup> TS. GUPTA et al. (1983a) applizieren mehrere Wochen vor der Nutzung im Vergleich zu YLÄRANTA (1984) und McDOWELL et al. (2002) eine deutlich höher konzentrierte Se-Lösung in Form von Na-Selenit auf den jungen Bestand, um das Eindringen eines größeren Teils der Se-Mengen in den Boden im Hinblick auf eine mögliche Nachwirkung für folgende Aufwüchse zu gewährleisten. GUPTA et al. (1983a) stellen bei *Phleum pratense* bis zu vier Wachstumsperioden später noch eine Nachwirkung fest, verwenden aber, um dies zu erreichen, Se-Dosen zwischen 1 und 4 kg Se ha<sup>-1</sup>, was zu problematisch hohen Konzentrationen im ersten Aufwuchs nach Applikation (= bis zu 140000 µg Se kg<sup>-1</sup> TS) führt. MORE & COPPENET (1980) stellen auch mit 70 g Se ha<sup>-1</sup> eine mehrere Aufwüchse anhaltende Wirkung (> 100 µg Se kg<sup>-1</sup> TS) fest, wobei auch hier der Primäraufwuchs Se-Konzentrationen von 1600 µg Se kg<sup>-1</sup> TS aufweist. Wird die Se-Lösung in einem gesonderten Arbeitsgang ausgebracht, so ist diese Maßnahme mit zusätzlichen arbeitswirtschaftlichen Aufwendungen verbunden (YLÄRANTA 1984). GISSEL-NIELSEN et al. (1984) schlagen daher vor, die Se-Gaben mit einem Herbizideinsatz zu kombinieren. In extensiv organisierten Grünlandsystemen besteht diese Option jedoch nicht regelmäßig. Die Se-Applikation in den wachsenden Bestand ist nicht zwingend, da offenbar Se für Pflanzen nicht essentiell ist, vgl. 2.2.1.1, so dass die Aufwüchse bei

einer Schnittnutzung auch nach der Ernte mit Se angereichert werden könnten. Eine kostengünstige Alternative zur Se-Applikation auf Grünland könnte hier der **Zusatz von Selenat zum Siliergut** z.B. in Kombination mit anderen Silierhilfsmitteln sein. So lassen sich buttersäurefreie Silagen aus Pflanzenmaterial von extensiv bewirtschaftetem Grünland wesentlich sicherer durch nitrat- oder nitritthaltige Additive herstellen (OPITZ v. BOBERFELD & STERZENBACH 1999, 2001), die mit Selenat oder Selenit angereichert werden könnten. Untersuchungen zur Wirkung von Se auf den Fermentationsprozess fehlen jedoch bislang. Die Herstellung gärbioologisch einwandfreier Silagen ist von der Ernte- und Siliertechnik, der Vergärbarkeit des Substrates und damit von Einflussgrößen wie Trockensubstanzgehalt, Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten und Pufferkapazität sowie der Nitratkonzentration abhängig, aber auch vom Besatz epiphytischer und nicht-epiphytischer Mikroorganismen und dem vorherrschenden Milieu nach Sauerstoffabschluss (WEISSBACH 1993, OPITZ v. BOBERFELD 1994). Die geringsten TS- und Energieverluste sind zu erwarten, wenn der Gärprozess von homofermentativen Milchsäurebakterien, die nahezu ausschließlich Milchsäure bilden (SCHLEGEL 1992), dominiert wird (MCDONALD et al. 1991, OPITZ v. BOBERFELD 1994). Durch eine rasche Absenkung des pH-Wertes können Milchsäurebakterien unter geeigneten Wachstumsbedingungen konkurrierende anaerobe Mikroorganismen, zu denen auch buttersäurebildende Clostridien gehören, in ihrer Entwicklung hemmen und wirken damit einem Silageverderb entgegen (SCHLEGEL 1992, OPITZ v. BOBERFELD 1994). Wie für höhere Organismen auch, ist für die meisten Bakterien Se in Spuren essentiell (DOWNES et al. 1979) und in höheren Konzentrationen toxisch. So ist gerade für eine Art der Gattung *Clostridium*, zu denen Buttersäurebildner gehören, belegt, dass deren Wachstum unbedingt Se erfordert (DÜRRE & ANDREESEN 1982). Die Schwellenwerte für eine Wachstumshemmung infolge hoher Se-Konzentrationen sind jedoch artabhängig verschieden. Einige strenge Anaerobier sind offenbar empfindlicher gegenüber hohen Selenat- bzw. Selenit-Konzentrationen als Aerobier (SCHRAUZER 1998). Auch bei Hefen bestehen, bezogen auf die Empfindlichkeit gegenüber Se-Konzentrationen im Wachstumsmedium, offensichtlich erhebliche Unterschiede (GOLUBEV & GOLUBEV 2002). Während einzelne Stämme noch in einer 0,1 M  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ -Lösung wachsen, kommt bei anderen das Wachstum schon in einer 0,0001 M  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ -Lösung zum Erliegen. Grundsätzlich ist also bei Zusatz von Se zum Siliergut eine Veränderung der Mikroorganismenaktivität und damit eine veränderte Zusammensetzung der Gärprodukte möglich.

## 2.5 Arbeitshypothese

Aus der Literaturübersicht lässt sich folgendes zusammenfassend festhalten:

- Unter den humiden Bedingungen Mitteleuropas werden große Mengen des aus Gesteinsverwitterung hervorgehenden Se im Boden ausgewaschen, hinzu kommen Entzüge durch Erntegut und gasförmige Verluste. Demgegenüber stehen rückläufige anthropogene Se-Immissionen und geringe Se-Konzentrationen in vielen organischen und mineralischen Düngern.
- Die Verfügbarkeit des Se im Boden für Pflanzen hängt von einer Vielzahl von biotischen und abiotischen Faktoren ab, die einander in komplexer Weise beeinflussen können.
- Die chemischen Eigenschaften von S und Se ähneln einander, so dass viele Mechanismen an denen Se im System Boden/Pflanze beteiligt ist, analog zu S verlaufen, weshalb Se und S in einigen Prozessen als Antagonisten agieren.
- Se ist im Gegensatz zu S nach bisherigem Kenntnisstand für Pflanzen nicht essentiell, hat als Spurenelement aber für den Stoffwechsel von Mensch und Tier als Baustein wichtiger Proteine eine herausragende Bedeutung.
- Se-Mangel kann beim Wiederkäuer und sonstigen Tieren unter anderem zu einer Schwächung des Immunsystems, zu verminderter Fertilität bei männlichen und weiblichen Individuen, Geburtsschwierigkeiten, Kälberverlusten, Muskelkrankheiten, Herzfunktionsstörungen, erhöhtem Krebsrisiko sowie verminderter Stresstoleranz mit zum Teil letalem Ausgang führen.
- In hohen Dosen aufgenommen, ist Se sowohl für Pflanzen als auch für Tiere als hochtoxisch einzustufen.
- Um Se-Mangelsituationen ausschließen zu können, sollten in der Ration für Fleischrinder und Schafe mindestens  $100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  aber nicht mehr als  $500 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  enthalten sein.
- Die Se-Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen liegen in Deutschland und anderen europäischen Ländern überwiegend unter dem Mindestwert, meist sogar  $< 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ , so dass Maßnahmen zur Se-Supplementierung erforderlich sind.
- Trotz insgesamt niedriger Mittelwerte sind die Selenkonzentrationen verschiedener Grünlandaufwüchse durch eine erhebliche Variabilität gekennzeichnet. Systematische Analysen der Se-Konzentrationen in Aufwüchsen extensiv bewirtschafteter Grünlandflächen liegen bislang nicht vor.

- Bei der Milchviehhaltung und intensiven Mastverfahren hat sich die Supplementierung von Se-angereichertem Mineralfutter, in Verbindung mit Konzentraten, als effektive Maßnahme gegen Se-Mangel bewährt.
- In extensiven Weidesystemen ist eine bedarfsgerechte individuenbezogene Se-Supplementierung am zuverlässigsten in Verbindung mit der Grundfutteraufnahme zu realisieren. Se-Applikationen in Verbindung mit Düngungsmaßnahmen sind offenbar effektiv, aufgrund des zusätzlich erforderlichen Arbeits- und Mittelaufwandes jedoch nicht mit den Low-Input-Bedingungen extensiv organisierter Weidesysteme zu vereinbaren.

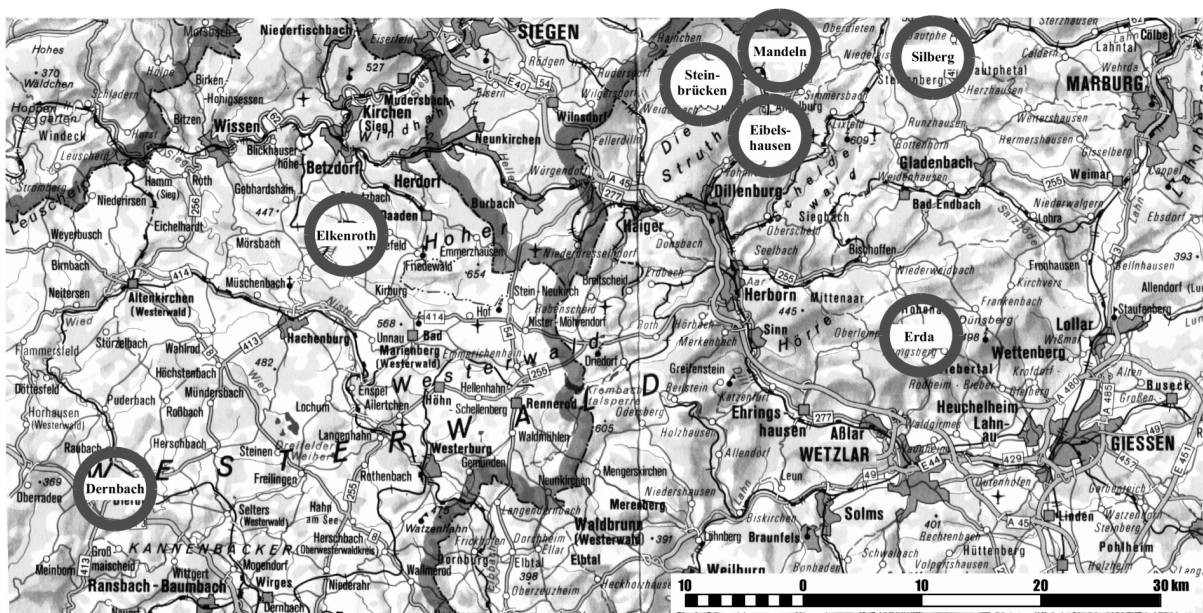
Daraus lassen sich folgende Fragestellungen ableiten:

- Sind die Se-Konzentrationen in Aufwüchsen extensiv organisierter Grünlandssysteme ausreichend, um Mutterkühe, Fleischrinder, Schafe und Jungtiere adäquat mit diesem essentiellen Spurenelement zu versorgen?
- Bestehen Abhängigkeiten zwischen den Se-Konzentrationen im Grünlandaufwuchs und den jeweiligen Umweltbedingungen (= pH-Wert des Bodens, Anteil organischer Substanz, Bodenart, -typ, Lage, Jahreszeit, etc.) sowie den Pflanzenbeständen (= Pflanzengesellschaft, Kennarten, TS-Ertrag) der Standorte?
- Bestehen Abhängigkeiten zwischen Se-Konzentration und anderen Futterqualitätsaspekten (= Energiedichte, Rohprotein-Konzentration, Makro-Nährstoffe)?
- Welche Bedeutung haben Beziehungen zwischen S und Se im System Boden/Pflanze?
- Wie wirken sich pflanzenbauliche Maßnahmen, wie N-Düngung und Kalkung, auf die Se-Verfügbarkeit für Grünlandpflanzen auf unterschiedlichen Standorten aus?
- Stellen Se-Zusätze zum Saatgut für Nachsaatzzwecke eine geeignete Basis für eine gezielte Se-Supplementierung bei Se-Mangel unter den gegebenen Low-Input-Bedingungen (= geringer Arbeits- und Mittelaufwand) in extensiven Weidesystemen mit Mutterkühen und Fleischrindern dar?
- Lassen sich durch Zusatz von Selenat zum Siliergut zuverlässig adäquate Se-Konzentrationen ohne Beeinträchtigung des Fermentationsprozesses einstellen?

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Standortauswahl

Für die Untersuchung der Se-Konzentrationen in Aufwüchsen von Flächen extensiv organisierter Grünlandbetriebe in Abhängigkeit von Standort und Pflanzengesellschaft wurden je 20 *Arrhenatherion elatioris*-, *Festuco-Cynosuretum*-, *Bromion racemosi*- und *Lolio-Cynosuretum*- sowie drei *Polygono-Trisetion*-Bestände mit größtmöglicher Differenzierbarkeit ausgewählt. Als Auswahlkriterien dienten dabei die in Tab. 6 angeführten Charakteristika. Berücksichtigt wurden jeweils Mitte Mai geerntete Primäraufwüchse zweier Jahre. Die Untersuchungsgebiete im Lahn-Dill-Bergland und Westerwald, vgl. Abb. 3, umfassten ein weites Spektrum unterschiedlicher, durch extensive Bewirtschaftungsweise geprägte Grünlandstandorte in Mittelgebirgs-lagen (STERZENBACH 2000). Angaben zu Lage, Witterungsverhältnissen und Bodeneigenschaften der einzelnen Standorte sind der Anhangtab. 1 zu entnehmen, die botanische Zusammensetzung aller Bestände ist getrennt nach Pflanzengesellschaftszugehörigkeit in den Anhangtab. 2 bis 6 aufgelistet. Die Einteilung in pflanzensoziologische Einheiten erfolgte nach BRAUN-BLANQUET (1964). Die Pflanzenproben wurden jeweils auf einer repräsentativen Teilfläche von 1,5 x 4 m bei einer Stoppelhöhe von 7 cm und Bodenproben wurden in der Schicht 0 – 10 cm genommen.

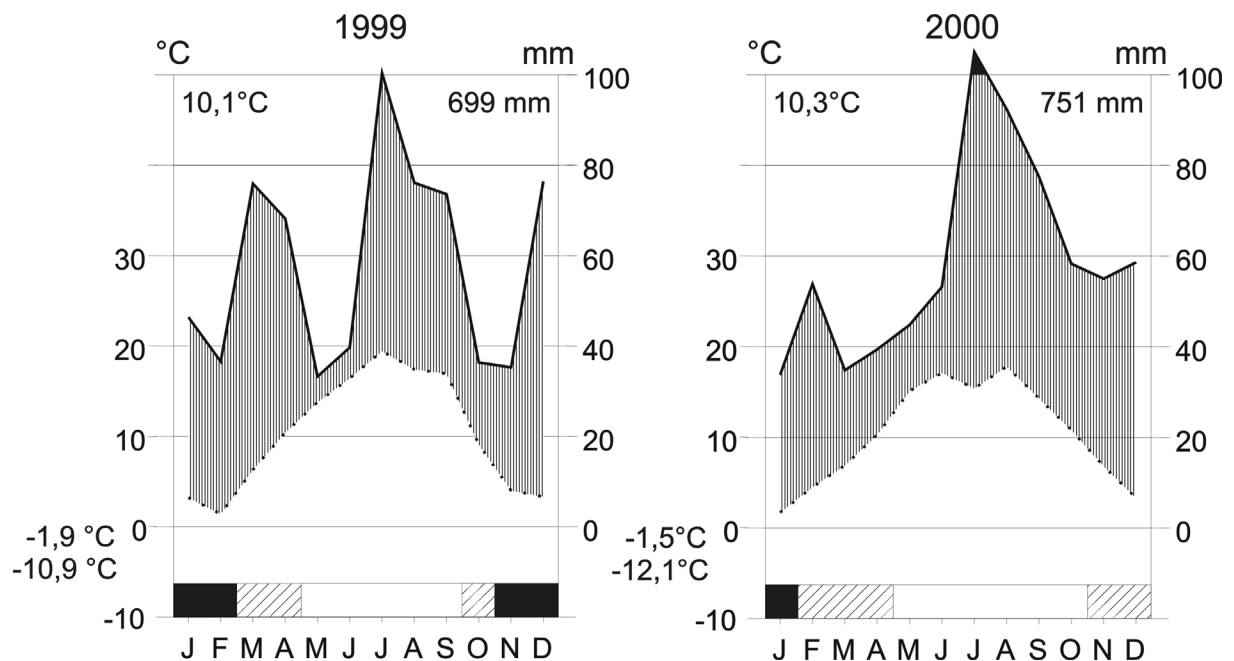


**Abb. 3:** Untersuchungsgebiete der Status quo-Analyse (= standortbedingte Variabilität)

**Tab. 6:** Auswahlkriterien für die Flächenauswahl für den Versuch „Standortbedingte Variabilität der Se-Konzentrationen“

Faktor	Charakteristikum
1. Pflanzengesellschaft	1.1 <i>Arrhenatherion elatioris</i> (n=20) 1.2 <i>Festuco-Cynosuretum</i> (n=20) 1.3 <i>Lolio-Cynosuretum</i> (n=20) 1.4 <i>Bromion racemosi</i> (n=20) 1.5 <i>Polygono-Trisetion</i> (n=3 <sup>*</sup> )
2. Aufwuchs	2.1 Botanische Zusammensetzung 2.2 Futterwert
3. Boden	3.1 Bodenreaktion (Min. = pH 4,4; Max. = pH 6,0) 3.2 Bodenart 3.3 Phosphat-, Kaliumversorgung
4. Lage	4.1 Höhe ü. NN 4.2 Inklination 4.3 Exposition
5. Witterung	5.1 Niederschläge 5.2 Temperatur
6. Zeit	6.1 Erstes Hauptnutzungsjahr 6.2 Zweites Hauptnutzungsjahr

\* geringere Probenzahl, da Gesellschaft im Untersuchungsgebiet flächenmäßig weniger bedeutsam, Ergebnisse dienen als grobe Orientierungswerte bei der Bewertung eines möglichen Pflanzengesellschafts-Effekts

**Abb. 4:** Witterungsdiagramme der Jahre 1999 und 2000 des Standortes Linden-Forst in 160 m ü. NN, zusammengestellt nach WALTER (1957)



### 3.2 Zeitreihenanalyse

Zur Untersuchung der Dynamik der Se-Konzentrationen im Verlauf der Vegetationsperiode wurden in den Jahren 1999 und 2000 jeweils sechs aufeinander folgende Aufwüchse (= Erntetermine in der 20., 24., 28., 32., 38. und 42. Woche) analysiert. Der Bestand (= Hauptbestandsbildner: *Lolium perenne*, *Poa pratensis*, *Phleum pratense*) wurde 1985 etabliert und seit diesem Zeitpunkt einheitlich mit 120 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> gedüngt (= vier Gaben à 30 kg N ha<sup>-1</sup> als Kalkammonsalpeter) und mit konstanter Frequenz genutzt. Es wurden jeweils Proben von drei 4 x 5 m großen Parzellen genommen, wobei es sich zu jedem Erntetermin um dieselben Flächen handelte. Die Schnitthöhe betrug 7 cm. Der Boden (= pH 6,3, 22 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 g<sup>-1</sup> Boden-TS, 11 mg K<sub>2</sub>O 100 g<sup>-1</sup> Boden-TS) des sechs Kilometer südöstlich von Gießen in 160 m über NN gelegenen Versuchsstandorts (= Linden-Forst) ist ein Pseudogley aus periglazialen Fließerden über reliktschem Rotlehm. Der Witterungsverlauf in den Untersuchungs Jahren ist in Abb. 4 dargestellt.

### 3.3 Selen-Düngung

Zur Bewertung der Effizienz von abgestuften Se-Gaben in Abhängigkeit von Standort, Ca- und N-Düngung wurden drei Freilandversuche auf unterschiedlichen Standorten angelegt. Die Standortwahl erfolgte auf Basis der Ergebnisse der Se-Status-Analysen. Dabei waren die Bodenreaktion, der Gehalt organischer Substanz sowie das Verhältnis der Se-Konzentration des Aufwuchses und dem jeweiligen Se-Gehalt des Bodens entscheidende Auswahlkriterien. Aus den untersuchten 83 Flächen wurden drei ausgewählt, die bezogen auf die zu erwartende Se-Verfügbarkeit den Typen A, B und C in Tab. 7 entsprachen. Standorttyp A befand sich bei Steffenberg-Silberg im Lahn-Dill-Bergland, die Standorte vom Typ B und C lagen in der Gemarkung Eikenroth im Westerwald, vgl. Anhangtab. 1. Die Witterungsdaten der Wetterstationen Marburg (= Standorttyp A) bzw. Bad Marienberg (= Standorttyp B und C) sind in Anhangtab. 7 aufgelistet, Angaben zur Lage der Standorte und zu Anlage- Düngungs- sowie Ernteterminen sind Anhangtab. 8 zu entnehmen.

Die Freilandversuche wurden im Februar 2002 in einheitlichem Versuchsdesign als Lateinisches Rechteck mit vier Wiederholungen und einer Parzellengröße von 14 m<sup>2</sup> angelegt. Die Kalkung mit fein vermahlenem (Siebanalyse: 100% < 0,315 mm, 85% < 0,075 mm) kohlensauren (= 95% CaCO<sub>3</sub>) Kalk wurde auf den entsprechenden Flä-

chen ebenfalls zum Anlagetermin durchgeführt, so dass bereits vor dem ersten Probenahmetermin September 2002 die gewünschte Anhebung des pH-Wertes erreicht wurde, vgl. Abb. 5. Die hohe reaktive Oberfläche des verwendeten Kalkes gewährleistete eine rasche pH-Wertsteigerung auch in tieferen Bodenschichten (ANGER 1989, OPITZ V. BOBERFELD & ANGER 1991). Die Kalkung wurde im November 2002 wiederholt, um auch für den zweiten Probetermin ausreichend abgestufte Bodenreaktionsverhältnisse sicherzustellen. Die Se-Applikation erfolgte vier Wochen vor der Ernte, beim Primäraufwuchs zu Vegetationsbeginn bzw. beim Folgeaufwuchs unmittelbar nach der Vornutzung als einmalige Gabe je Jahr mit den in Tab. 8 angegebenen Se-Mengen in Form von  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  (= Hersteller: Adalbert Lomborg GmbH, Mühlheim an der Ruhr) in wässriger Lösung, da nur so eine gleichmäßige Verteilung der geringen Gaben zu gewährleisten war und  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  eine hohe Effizienz erwarten lässt, vgl. 2.4.3.1.

**Tab. 7:** Standorte und Merkmale im Versuch „Effizienz von Selen-Gaben“

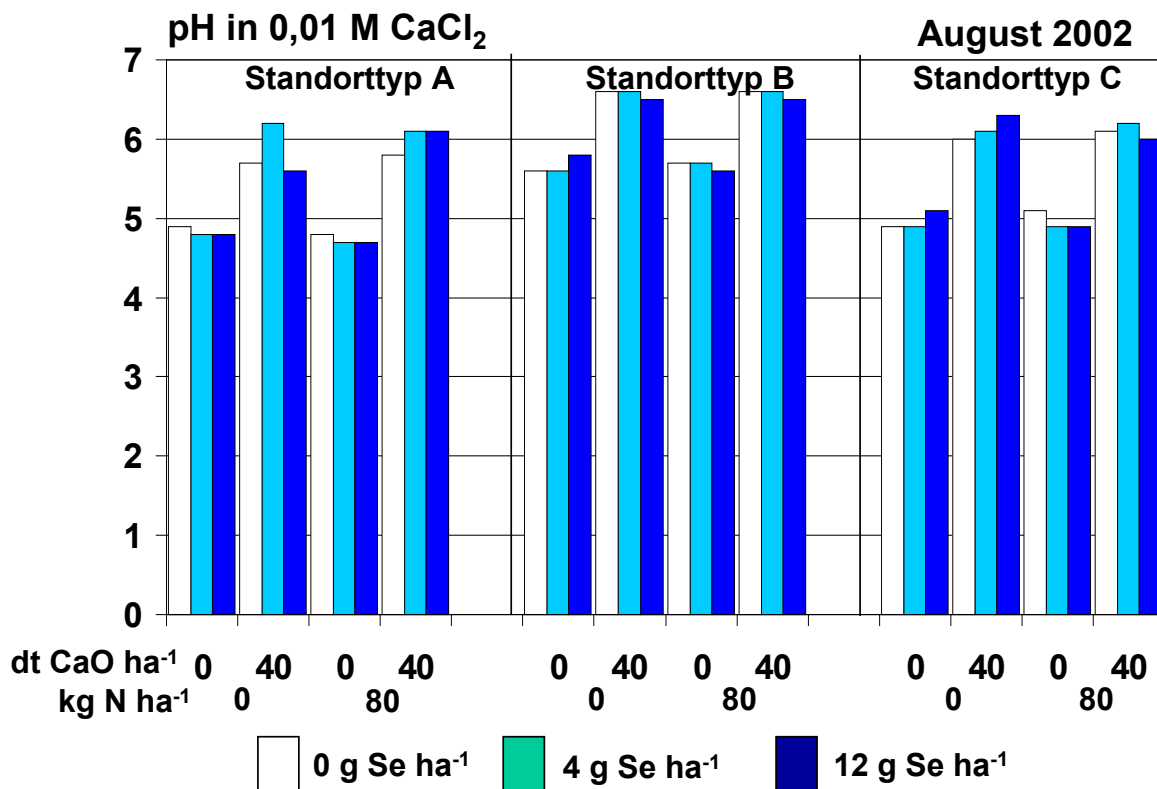
TYP	Bodeneigenschaft			$\mu\text{g Se kg}^{-1}$ Aufwuchs-TS		Aufwuchs  Pflanzengesellschaft / Hauptbestandbildner
	pH	% C	$\mu\text{g Se}$ Boden	Erstes Unter- suchungs- jahr	Zweites Unter- suchungs- jahr	
<b>A</b> <sup>1</sup>	4,7	4,1	<b>450</b>	<b>46</b>	<b>38</b>	<i>Festuco- Cynosuretum/Fest. rubra + Dactylis gl.</i>
<b>B</b> <sup>2</sup>	5,8	2,9	<b>310</b>	<b>10</b>	<b>23</b>	<i>Lolio-Cynosuretum/Lolium perenne</i>
<b>C</b> <sup>3</sup>	4,8	2,6	<b>360</b>	<b>67</b>	<b>67</b>	<i>Festuco- Cynosuretum/Festuca rubra</i>
<b>Mittel</b> <b>(n = 83)</b>		4,2	<b>397</b>	<b>36</b>	<b>35</b>	

<sup>1</sup> **Typ A:** Fläche mit überdurchschnittlichem Se-Gehalt im Boden, aber relativ niedriger Se-Konzentration in den Aufwüchsen (= eingeschränkte Pflanzenverfügbarkeit des Selen im Boden).

<sup>2</sup> **Typ B:** Fläche mit unterdurchschnittlichem Se-Gehalt im Boden und niedrigen Se-Konzentrationen in den Aufwüchsen (Aussagen über Pflanzenverfügbarkeit des Selen im Boden erst nach Se-Applikation möglich).

<sup>3</sup> **Typ C:** Fläche mit unterdurchschnittlichem Se-Gehalt im Boden, aber mit vergleichsweise hoher Se-Konzentration in den Aufwüchsen (= relativ gute Pflanzenverfügbarkeit des Selen im Boden), die aber absolut noch unterhalb der zu fordernden  $100 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS liegt.

Im Gegensatz zur Verwendung von Se-haltigen Mehrnährstoffdüngern wurde hierbei das Risiko möglicher Wechselwirkungen mit anderen Pflanzennährstoffen, vor allem N und S, ausgeschlossen. Die Flüssigapplikation der Selenatlösung und die N-Düngung erfolgte zu den in Anhangtab. 8 angegebenen Terminen mit Hilfe eines mit Parzellenspritze ausgestatteten selbstfahrenden Kleingeräteträger (= Hege 75) mit konstanter Fahrgeschwindigkeit (= 6 km/h) aus sechs Agrotop-Flachstrahl-Düsen 110-10. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine gleichmäßige Verteilung des Selens über die gesamte Parzelle. Die Se-Konzentration der Na-Selenat-Lösungen wurde entsprechend den angestrebten Se-Mengen  $\text{ha}^{-1}$  und der kontrollierten Spritzmenge (=  $700 \text{ l ha}^{-1}$ ) gewählt.



**Abb. 5:** Bodenreaktion der Parzellen sechs Monate nach der ersten Kalkung

Niedriger Druck (= 0,1 MPa) und die vergleichsweise große Öffnung der Düsen gewährleistete eine relativ große Tropfengröße, wodurch Verluste und Verfälschungen durch Sprühnebelbildung minimiert wurden (OPITZ v. BOBERFELD 1981, 1984). Durch die Tropfengröße wurde außerdem sichergestellt, dass die Selenat-Lösung den Boden erreichte und die Narbe nicht nur oberflächlich benetzt wurde. Zusätzlich wurden die Applikationstermine so gewählt, dass die Aufwuchshöhe ca. 7 cm betrug, um die vorhandene Bestandsoberfläche für anhaftende Selenatlösung klein zu halten. In

Anhangtab. 8 sind die Termine für N-, Ca- und Se-Gaben sowie die Erntetermine zusammengestellt.

**Tab. 8:** Varianten im Versuch „Effizienz von Selen-Gaben“ (= Se-Düngung)

FAKTOREN	STUFEN
<b>1 Se-Gabe</b> <sup>1</sup>	1.1 0 g Se ha <sup>-1</sup>
	1.2 4 g Se ha <sup>-1</sup>
	1.3 12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>2 N-Gabe</b> <sup>2</sup>	2.1 0 kg N ha <sup>-1</sup>
	2.2 80 kg N ha <sup>-1</sup>
<b>3 Ca-Gabe</b> <sup>3</sup>	3.1 0 dt CaO ha <sup>-1</sup>
	3.2 40 dt CaO ha <sup>-1</sup>
<b>4 Standorttyp</b>	4.1 Typ A
	4.2 Typ B
	4.3 Typ C
<b>5 Aufwuchs</b>	5.1 Primäraufwuchs
	5.2 Folgeaufwuchs

<sup>1</sup> Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub>-Lösung

<sup>2</sup> als Kalkammonsalpeter

<sup>3</sup> extrafeiner Kohlensaurer Kalk, Ahütte/Eifel, 95 % CaCO<sub>3</sub>

### 3.4 Keimexperiment

Die mögliche Beeinflussung der Keimfähigkeit von Saatgut, das bei Nachsaatmaßnahmen als Träger einer Se-Gabe dient, wurde in Keimexperimenten unter kontrollierten Umweltbedingungen in der Klimakammer untersucht. Die Experimente werden im Folgenden als „Se-Anreicherung von Saatgut“ bezeichnet. Tab. 9 zeigt die getesteten Faktoren und die zugehörigen Stufen. Je Variante wurden 20 *Lolium perenne*-Samen in eine Petrischale (= 9 cm Durchmesser) auf Filterpapier (= Schleicher & Schuell Nr. 595) verteilt und mit 2 ml des jeweiligen Mediums befeuchtet. Die Medien bestanden einheitlich aus deionisiertem Wasser und Nitrat, da Nitrat oft eine keimstimulierende Wirkung zeigt. Es wurde die optimale Nitrat-Konzentration nach MAYER & POLJAKOFF-MAYBER (1982) von 0,2 % KNO<sub>3</sub> gewählt. Je nach Faktorkombination wurden die Medien mit der osmotisch wirksamen Substanz Polyethylenglykol (= PEG

6000) angereichert, um die Wasserspannung nach MICHEL & KAUFMANN (1973) zu variieren, und  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  zugesetzt. Die  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ -Konzentration der höchsten Se-Stufe berechnete sich auf Basis der angenommenen Saatgutmenge von 20 kg Saatgut  $\text{ha}^{-1}$ , der zu prüfenden Se-Gabe von 36 g Se  $\text{ha}^{-1}$  sowie der Flüssigkeitsmenge von 2 ml je 20 Samen. Die Medien der Stufen 4 und 12 g Se  $\text{ha}^{-1}$  wurden entsprechend verdünnt.

**Tab. 9:** Varianten im Versuch „Se-Anreicherung von Saatgut“ (= Keimversuch)

FAKTOREN	STUFEN
<b>1 Se-Gabe</b> (bezogen auf 20 kg $\text{ha}^{-1}$ Saatgut)	1.1 0 g Se $\text{ha}^{-1}$ 1.2 4 g Se $\text{ha}^{-1}$ 1.3 12 g Se $\text{ha}^{-1}$ 1.4 36 g Se $\text{ha}^{-1}$
<b>2 Wasserspannung</b> (nach MICHEL & KAUFMANN 1973)	2.1 $\text{H}_2\text{O}$ 2.2 $-1 \cdot 10^5$ Pa (= pF 3,0) 2.3 $-4 \cdot 10^5$ Pa (= pF 3,6)
<b>3 Licht</b>	3.1 Grünfilter (Simulation eines geschlossenen Blätterdaches) 3.2 Dunkelheit

Jede Variante wurde viermal wiederholt. Der Klimaschrank wurde mit einer Wechseltemperatur von 10/20°C (= 8/16 Stunden) betrieben. Die Lichtverhältnisse wurden durch unterschiedliche Abdeckungen der Keimboxen, in denen die Petrischalen gelagert wurden, variiert. In den Klimakammern selbst wurde eine einheitliche Mischbeleuchtung (= Fluoreszenzleuchten und Glühbirnen) installiert, die eine photosynthetische Photonenflussdichte (= PPF) von 90  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  induzierte und ein Hellrot/Dunkelrot- (= R/FR-) Verhältnis von 1,28 aufwies. Die Belichtung erfolgte in Kombination mit dem Temperaturprogramm über jeweils 16 Stunden Licht und acht Stunden Dunkelheit. Bei der Stufe „Grünfilter“ wurde eine Keimbox mit Glasdeckel verwendet, die mit grüner Folie abgedeckt wurde (PPFD = 8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , R/FR = 0,1). Auf diese Weise wurden die Lichtverhältnisse unter einem beschattenden Pflanzenbestand simuliert, da der Einsatz von grünen Blättern als Lichtfilter durch die Austrocknung im Klimaschrank, raschen Chlorophyllabbau und damit einer Veränderung der Transmissionskurve wenig geeignet war. Bei der Stufe „Dunkelheit“ befanden sich die Petrischalen in einer lichtundurchlässigen Keimbox. Während einer Aufenthaltsdauer der Samen in der Klimakammer von 20 Tagen wurden die Aufgangsraten

sowie Wurzel- und Keimblattlängen erfasst. Um die Ergebnisse des Keimexperimentes abzusichern, wurden für jede Se-Stufe (= 0, 4, 12, 36 g Se ha<sup>-1</sup>) *Lolium perenne*-Saatgut mit Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> in der im Keimversuch eingesetzten Konzentration angereichert und je 24 Samen in Pflanzgefäßen in einem Sand-/Pflanzerde-Substrat zur Keimung gebracht. Nach zwölf Wochen wurden die TS-Erträge gravimetrisch bestimmt.

### 3.5 Silierexperiment

Zur Erfassung einer möglichen Beeinflussung der Epiphytenflora bzw. der Fermentation durch Zusatz von Selenat zum Siliergut wurden unterschiedliche Laborsilagen hergestellt, wobei zuvor das Siliergut mit Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub>-Lösungen in abgestuften Konzentrationen besprüht wurde. Die Faktoren und die zugehörigen Stufen sind in Tab. 10 angegeben. Jede Variante wurde viermal wiederholt.

**Tab. 10:** Varianten im Versuch „Se-Zusätze zum Siliergut“ (= Silierexperiment)

FAKTOREN	STUFEN
<b>1 Vorwelkgrad</b>	1.1 30 % TS 1.2 40 % TS
<b>2 Se-Gabe</b>	2.1 0 µg Se <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> TS (= 0 g Se Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> * t <sup>-1</sup> TS) 2.2 75 µg Se <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> TS (= 0,18 g Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> g* t <sup>-1</sup> TS) 2.3 150 µg Se <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> TS (= 0,36 g Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> g* t <sup>-1</sup> TS) 2.4 300 µg Se <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> TS (= 0,72 g Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> g* t <sup>-1</sup> TS) 2.5 1200 µg Se <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> TS (= 2,88 g Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub> g* t <sup>-1</sup> TS)
<b>3 Aufwuchs</b>	3.1 Primäraufwuchs mit Hauptbestandbildner <i>Festuca arundinacea</i> (= Mai) 3.2 zweiter Aufwuchs <i>Lolium perenne</i> (= Juni)

Die Se-Konzentration der Lösung berechnete sich auf Basis der angestrebten Konzentrationserhöhung in der Silage (= 0, 75, 150, 300, 1200 µg Se kg<sup>-1</sup> TS) und der eingesetzten Flüssigkeitsmenge von 33,3 ml kg<sup>-1</sup> TS, die im Versuchsmaßstab notwendig war, um eine gleichmäßige Verteilung des Selens zu gewährleisten. Die höchste Se-Stufe mit 1200 µg Se kg<sup>-1</sup> TS übertraf dabei bewusst den Zielbereich von 100-300 µg Se kg<sup>-1</sup> TS, um den erforderlichen Wertebereich für eine anschließende Se-Spezies-Analytik zu erreichen und um die Folgen einer in der Praxis möglichen

Überdosierung bei der Siliergutbehandlung abschätzen zu können. Daten zur Futterqualität und Gäreignung des Ausgangsmaterials sind in Tab. 11 zusammengefasst. Zur Erstellung der Silagen wurden beide Aufwüchse auf 3 cm gehäckselt, den Vorwelkgraden entsprechend vorgetrocknet und unter größtmöglichem Luftausschluss in Glasgefäßen mit einem Volumen von zwei Litern verdichtet. Die Silierdauer betrug 120 Tage.

**Tab. 11:** Futterqualität des Siliergutes im Versuch „Se-Zusätze zum Siliergut“

	<b>Primäraufwuchs <i>Festuca arundinacea</i></b>	<b>Sekundäraufwuchs <i>Lolium perenne</i></b>
Energiedichte (MJ ME kg <sup>-1</sup> TS)	6,0	5,5
Rohprotein-Konzentration (%)	18,4	16,5
wIK (%)	10,5	8,7
Pufferkapazität (g MS 100g <sup>-1</sup> )	7,2	6,8
Z/Pk-Quotient	1,36	1,24
NO <sub>3</sub> -Konzentration (%)	0,3	0,2

### 3.6 Analysemethoden

Tab. 12 zeigt die erfassten Merkmale der einzelnen Experimente in einer Übersicht. Alle Pflanzen- und Bodenproben wurden bei 60°C im Trockenschrank getrocknet und anschließend auf eine Partikelgröße  $\leq 1$  mm gemahlen. Der TS-Ertrag wurde jeweils gravimetrisch bestimmt. Für die Se-Analyse wurden die Proben in Hochdruckgefäßen (= Quarz-Gefäße, 25 bar) mit HNO<sub>3</sub> und H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mikrowellenunterstützt aufgeschlossen und mit AAS-Hydrid-Technik (= Varian SpectrAA 220 FS mit Hydridsystem VGA 77) untersucht (ANONYMUS 1997). Zur Kalibrierung der Boden- und Pflanzenanalysen wurde jeweils zertifiziertes Referenzmaterial verwendet (= Soil GBW 07404, Spinach leaves SRM 1570A, Hersteller: LGC Promochem GmbH). Die Nachweisbarkeitsgrenze für die Se-Bestimmung betrug 10 µg Se kg<sup>-1</sup> TS. Zur Klärung der Frage, inwieweit vor dem Fermentationsprozess zugefügtes Selenat in andere Se-Formen überführt wird, wurden im Silierversuch Silagen der höchsten Se-Stufe (= 1200 µg Se kg<sup>-1</sup> TS) einer Se-Spezies-Analyse (PROHASKA et al. 2003) mittels CE-ICP-MS (= Kapillarelektrophorese - induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie) am Institut für Chemie der Universität für Bodenkultur Wien in Zusammenarbeit mit dem ISAS (= Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy) der Universität Dortmund unterzogen.

**Tab. 12:** Erfasste Merkmale von Aufwuchs, Boden und Silagen in den einzelnen Experimenten

Versuch	Standortbedingte Variabilität (= Status quo – Analyse)	Dynamik im Verlauf der Vegetationsperiode (= Zeitreihenanalyse)	Effizienz von Se-Gaben (= Se-Düngung)	Selen-Anreicherung von Saatgut (= Keimexperiment)	Selen-Zusätze zum Siliergut (= Silierexperiment)
Merkmal					
<b>Aufwuchs:</b>					
TS-Ertrag	+	+	+	+	
Se-Konzentration	+	+	+		+
S-Konzentration	+	+	+		+
Rohprotein-Konzentration	+	+	+		+
Energiedichte	+	+	+		+
Ca-, K-, Na-, Mg-, P-Konz.	+				
Z/Pk-Quotient, Nitratkonzentration					+
Keimfähigkeit/ Blatllänge, Wurzellänge				+	
<b>Silage:</b>					
Buttersäure-, Milchsäure-, Ethanol-, Capronsäure-, Valeriansäure-Konz.					+
Milchsäure- Konzentration					+
pH-Wert					+
Aerostabilität					+
Se-Konzentration					+
S-Konzentration					+
N-Konzentration für die Berechnung des N/S Quotienten	+				+
<b>Boden:</b>					
Se-Gehalt	+		+		
C-, N- S-Gehalt	+		+		
pH	+	+	+		
Phosphat, Kalium	+	+			



Die C- und S- Bestimmung (= Boden und Aufwuchs) erfolgte über die Elementaranalyse nach Hochtemperaturverbrennung (ANONYMUS 1995, 1998b, SOON et al. 1996). Die Rohprotein-Konzentrationen in den Aufwüchsen wurden nach KJELDAHL (ANONYMUS 1997) bestimmt. Die Schätzung der Energiedichte erfolgte durch den Hohenheimer-Futterwert-Test über die Variablen Gasbildung, Rohprotein und Rohfett nach der Gleichung 16e (STEINGASS & MENKE 1986, MENKE & STEINGASS 1987). Die Ca-, Mg-, K- und Na- Konzentrationen wurden atomabsorptionsspektrographisch bestimmt (SCHINKEL 1984), P-Konzentrationen wurden kolorimetrisch (GERICKE & KURMIES 1952) aus einem HNO<sub>3</sub>-Auszug ermittelt. Die Bodenreaktion wurde potentiometrisch in einer 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung bestimmt (ANONYMUS 1991), Phosphat und Kalium-Gehalte der Böden wurden quantitativ in einem Ca-Acetat-Lactat-Auszug (ANONYMUS 1991) erfasst.

Für die Charakterisierung der Gäreignung des Ausgangsmaterials wurde im **Silierexperiment** der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten (= wLK) mit Anthron (YEMM & WILLIS 1954), die Pufferkapazität zur Berechnung des Zucker/Pufferkapazitäts-Quotienten (= Z/Pk) nach WEISSBACH (1967) und die Nitratkonzentration über die Maastrichter Xylenol-Methode (ANONYMUS 1997) erfasst. Die Aerostabilität wurde über den Zeitraum charakterisiert, der für die Erhöhung der Temperatur der ausgelagerten Silagen um 1°C notwendig war (HONIG 1990). Dazu wurde die Temperaturentwicklung nach Luftzutritt kontinuierlich in einem konstant klimatisierten Raum mittels an Data-Loggern angeschlossenen Temperaturfühlern erfasst. Die Gärqualität wurde ferner über den pH-Wert (ANONYMUS 1997), den kolorimetrisch erfassten Gehalt an Milchsäure sowie die gaschromatographisch erfassten Gehalte an flüchtigen Fettsäuren und Ethanol (THEUNE 1979) beschrieben. Außerdem wurde der NH<sub>3</sub>-N-Anteil (HONOLD & HONOLD 1991) am Rohprotein-N-Gehalt (ANONYMUS 1997) bestimmt.

### 3.7 Auswertung

Für die Auswertung der Daten im Versuch „standortbedingte Variabilität der Se-Konzentrationen“ (= Status quo-Analyse) musste auf die Durchführung multivariater statistischer Ansätze verzichtet werden, da die Se-Konzentrationen in den Aufwüchsen trotz der Heterogenität der Untersuchungsflächen und der vergleichsweise hohen Stichprobenzahl (= zwei Untersuchungsjahre à 83 Standorte) generell auf niedrigem Niveau waren und damit einen engen Wertebereich

umfassten. Die Darstellung einzelner bivariater Beziehungen in Abbildungen hatten beschreibende Funktionen und wurden durch Korrelationsanalysen ergänzt. Die Ergebnisse des Versuches „Dynamik im Verlauf der Vegetationsperiode“ wurden in einfaktoriellen Varianzanalysen mit dem Faktor Erntetermin verrechnet. Die Auswertung des Datenmaterials aus den Versuchen „Effizienz von Selen-Gaben“, „Se-Anreicherung von Saatgut“, „Se-Zusätze zum Siliergut“, dem Keimexperiment und dem Silierexperiment erfolgte durch mehrfaktorielle Varianzanalyse unter Verwendung des Statistikprogramms SPSS für Windows, Version 10.0 (ANONYMUS 2000). Die Aufteilung der Freiheitsgrade sowie die Zusammensetzung der Restvariablen geht aus den Anhangtab. 18 (= Se-Düngung), 41 (= Keimexperiment), 47 (= Gefäßversuch) und 49 (= Silierexperiment) hervor.

Da Keimungsraten in Form relativer Häufigkeiten ausgedrückt wurden und sich die ermittelten Prozentwerte nicht durch eine Normalverteilung darstellen ließen, wurde im Falle des Keimexperimentes vor der statistischen Verrechnung eine Arcussinus-Wurzeltransformation vorgenommen (GOMEZ & GOMEZ 1984), um eine Annäherung der Binomialverteilung an die Normalverteilung zu erreichen:

$$\text{Rechenformel: } Y = \arcsin (X/100)^{0,5}$$

**mit Y = transformierter Wert und  
X = Keimungsausgangswert in %**

Nicht-transformierte Daten, die den Wert 0 % bzw. 100 % einnahmen, wurden vor der Transformation durch  $0,25/n$  bzw.  $100-0,25/n$  ersetzt, wobei n die Anzahl Samen je Wiederholung betrug (= 20). Zur Überprüfung der Normalverteilung wurde der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest durchgeführt.

Den Tests auf Signifikanz wurden folgende Sicherungsniveaus zu Grunde gelegt :

- F-Test für Varianzanalyse  
Signifikanzniveau 5 %, in den Tabellen gekennzeichnet durch „ \* “  
Signifikanzniveau 1 %, in den Tabellen gekennzeichnet durch „ \*\* “
- multipler t-Test für die Einzelwerte  
Signifikanzniveau 5 %.

In den Abbildungen sind signifikante Differenzen durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet.

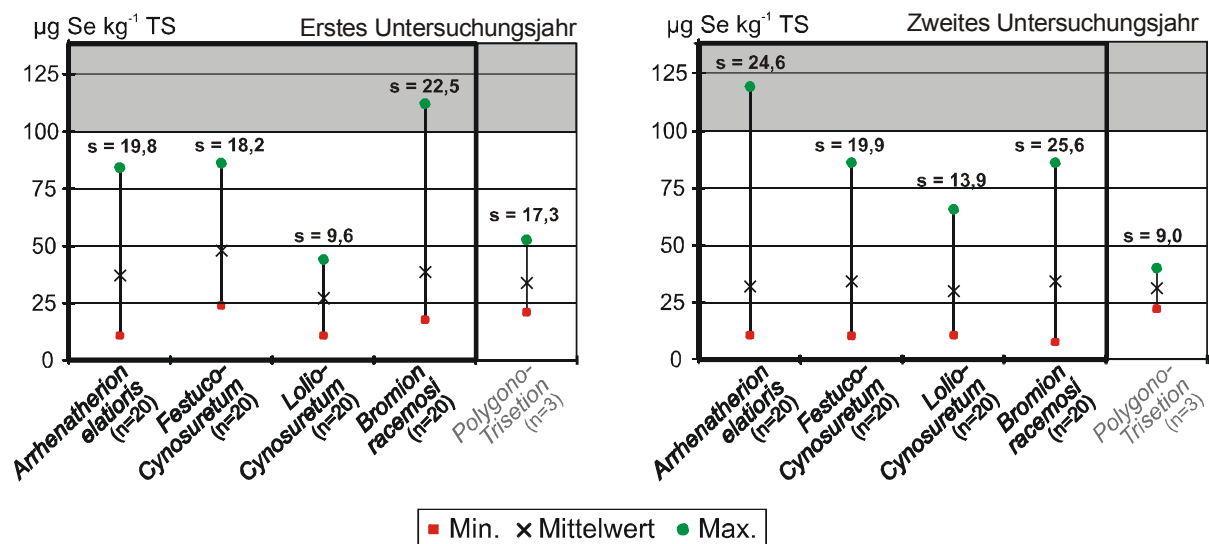
## 4 Ergebnisse

### 4.1 Standortbedingte Variabilität

#### 4.1.1 Pflanzenbestand

##### 4.1.1.1 Pflanzengesellschaft

In Abb. 6 sind das jeweilige Minimum, das Maximum und der Durchschnitt der Se-Konzentrationen von Mitte Mai geernteten Primäraufwüchsen von jeweils 20 *Arrhenatherion elatioris*-, *Festuco-Cynosuretum*-, *Lolio-Cynosuretum*- und *Bromion-racemosi*- sowie drei *Polygono-Trisetion*-Gesellschaften dargestellt. Die Einzelwerte sind, zusammen mit den S-Konzentrationen, in Anhangtab. 9 ersichtlich. Angaben zur botanischen Zusammensetzung der Bestände erfolgen in Anhangtab. 2 bis 6.



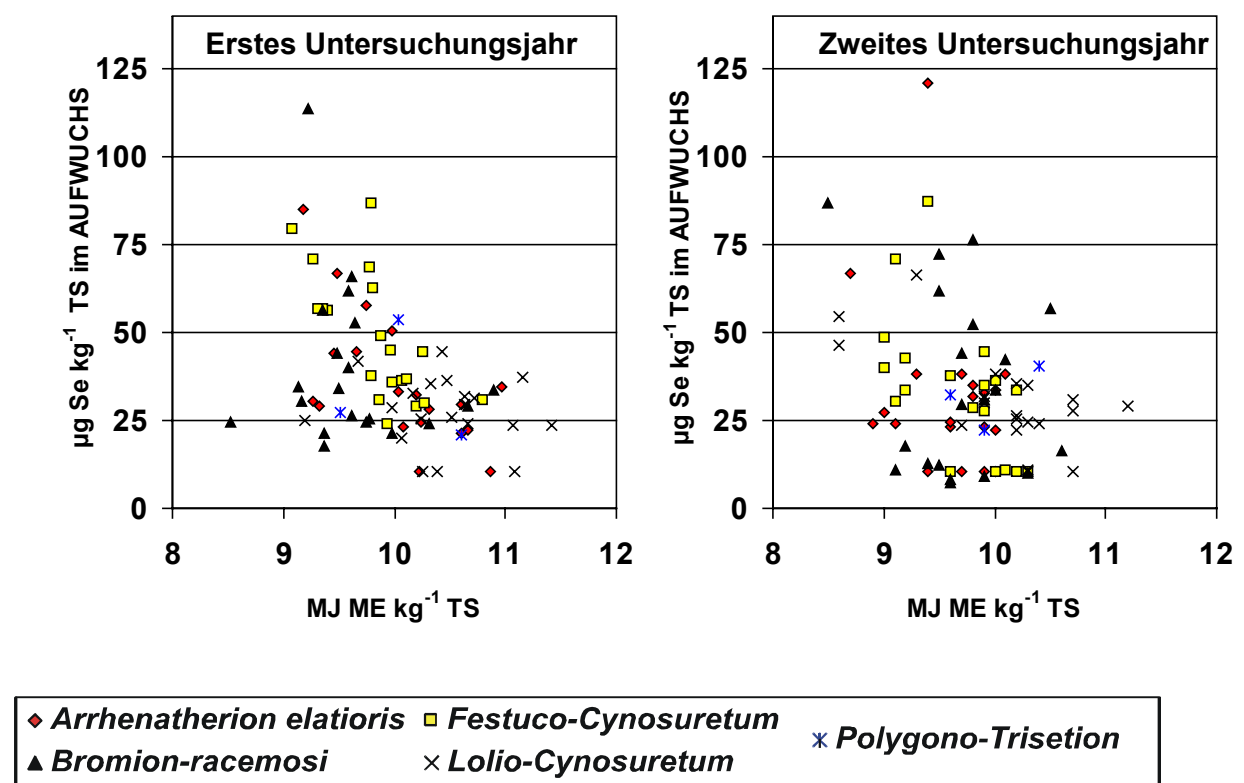
**Abb. 6:** Minimale, maximale und durchschnittliche Se-Konzentrationen (n = 83) im Primäraufwuchs verschiedener Grünlandpflanzengesellschaften im ersten und zweiten Untersuchungsjahr

Die Mittelwerte in den einzelnen Pflanzengesellschaften liegen zwischen 27 und 48  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS im ersten und zwischen 30 und 35  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS im zweiten Untersuchungsjahr. Im Durchschnitt aller Aufwüchse betragen die Se-Konzentrationen 38 bzw. 33  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS. Bezogen auf die Se-Konzentrationen einzelner Aufwüchse bestehen zum Teil wesentlich deutlichere jahresabhängige Unterschiede, vgl. Anhangtab. 9, wobei die Konzentrationen im zweiten Jahr in einigen Fällen auch zunehmen. Die höchsten Einzelwerte werden jahresabhängig im Aufwuchs einer *Arrhenatherion elatioris*- (= 121  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS) bzw. einer *Bromion-racemosi*-

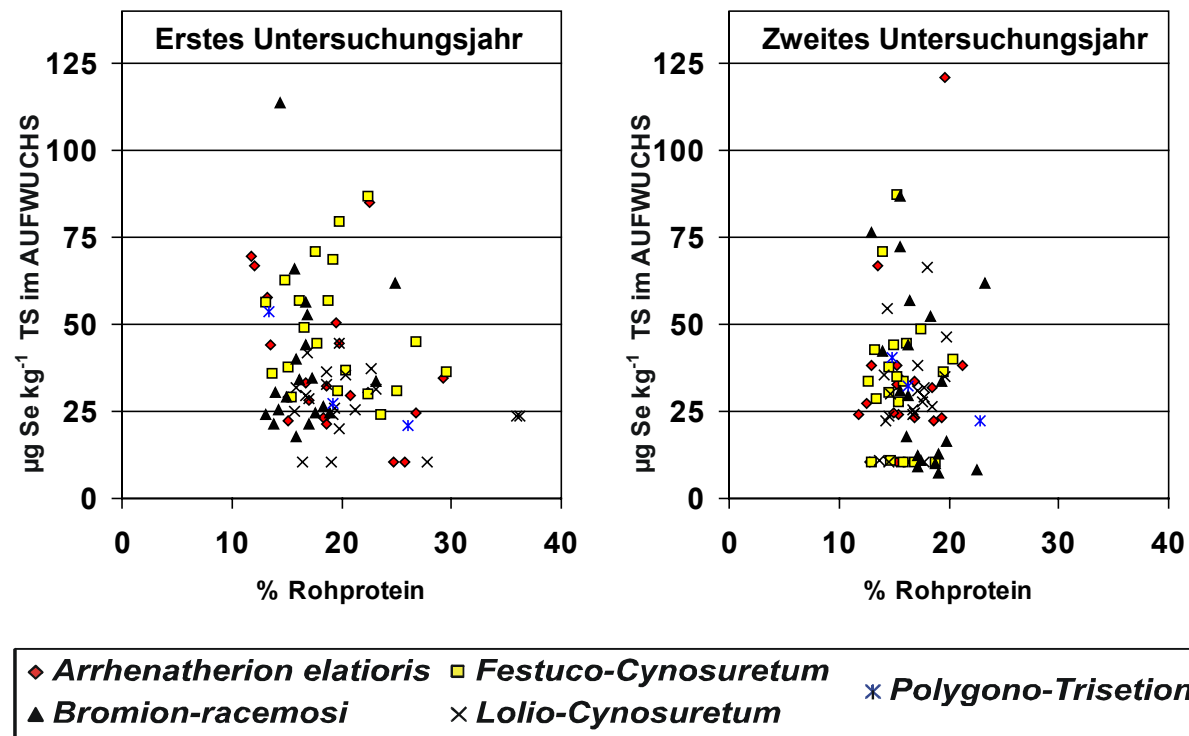
Fläche (=  $113 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ ) gemessen. Alle anderen Werte (= 99%) betragen  $< 100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ . Im ersten Jahr sind 78 % der Se-Konzentrationen  $< 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ , im zweiten Jahr 87 %. Die Se-Konzentrationen in *Lolio-Cynosuretum*-Aufwüchsen sind im ersten Jahr einheitlich  $< 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ .

#### 4.1.1.2 Futterbauliche Eigenschaften

Anhangtab. 10 gibt eine Übersicht über Energiedichten, Rohprotein- und Mineralstoff-Konzentrationen der Aufwüchse in Abhängigkeit von Pflanzengesellschaft und Aufwuchs. Die Energiedichten zum einheitlichen Schnitttermin Mitte Mai liegen insgesamt zwischen  $8,5$  und  $11,0 \text{ MJ ME kg}^{-1} \text{ TS}$ , vgl. Abb. 7, bzw. zwischen  $5,0$  und  $7,0 \text{ MJ NEL kg}^{-1} \text{ TS}$  im zweiten Untersuchungsjahr, vgl. Anhangtab. 10. Abb. 7 verdeutlicht, dass die wenigen Aufwüchse mit Konzentrationen  $> 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  fast ausschließlich Energiedichten  $< 10,0 \text{ MJ ME kg}^{-1} \text{ TS}$  aufweisen, jedoch verfügen auch die meisten Aufwüchse mit niedrigerer Energiedichte über Se-Konzentrationen  $< 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ . In Abb. 8 werden die Se-Konzentrationen den Rohprotein-Konzentrationen gegenübergestellt, die im ersten Jahr zwischen 12 und 36 % und im zweiten Jahr zwischen 12 und 26 % variieren.



**Abb. 7:** Gegenüberstellung von Energiedichte und Se-Konzentration im Primäraufwuchs (n = 83) im ersten und zweiten Untersuchungsjahr

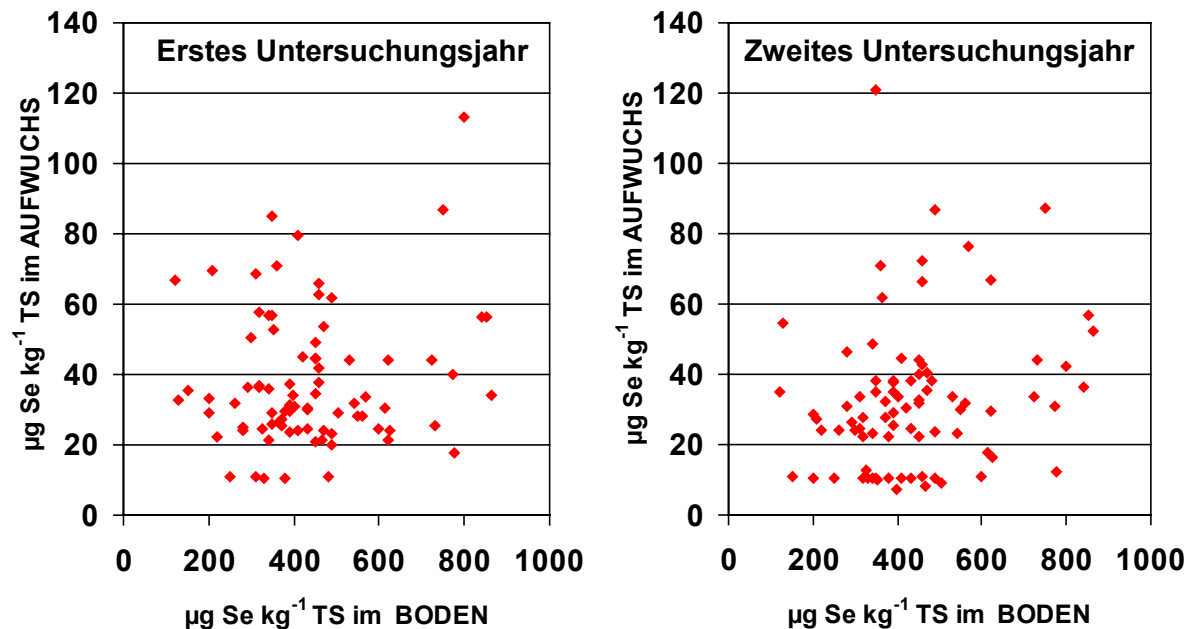


**Abb. 8:** Gegenüberstellung von Rohprotein- und Se-Konzentration im Primäraufwuchs ( $n = 83$ ) im ersten und zweiten Untersuchungsjahr

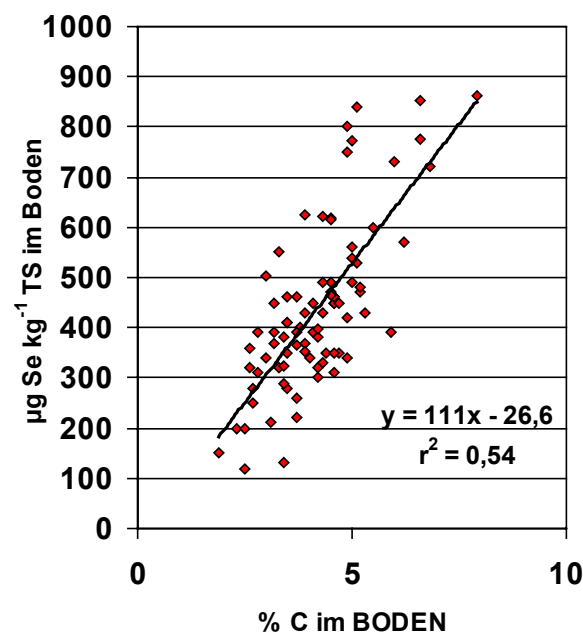
#### 4.1.2 Bodenmerkmale

In Anhangtab. 11 sind die Se-Gehalte des Bodens aller Untersuchungsflächen, vgl. S. 52, sowie C-, N-, S-,  $\text{P}_2\text{O}_5$ -,  $\text{K}_2\text{O}$ -Gehalte, Bodenreaktion und Bodenart in einer Übersicht dargestellt. Abb. 9 zeigt die Se-Gehalte der Böden von 83 extensiv bewirtschafteten Grünlandflächen und die Se-Konzentrationen der Mitte Mai geernteten Primäraufwüchse der Standorte aus zwei Jahren. Im Gegensatz zu den Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial streuen die Se-Gehalte der Böden erheblich und sind mit durchschnittlich  $437 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Boden-TS über zehnmal höher als die durchschnittlichen Se-Konzentrationen im Aufwuchs. Überdurchschnittlich hohe Se-Konzentrationen im Boden sind in der Regel nicht mit höheren Se-Konzentrationen im Aufwuchs verbunden. In Abb. 10 sind die Se-Gehalte im Boden den C-Gehalten im Boden gegenübergestellt. Der durchschnittliche C-Gehalt liegt bei 4,1 % mit einer Standardabweichung von 1,1. Böden mit hohen C-Gehalten weisen überwiegend hohe Se-Gehalte auf. In den Abb. 11 und 12 werden die Se-Konzentrationen im Aufwuchs den Bodeneigenschaften C- und S-Gehalt bzw. Bodenreaktion der Standorte

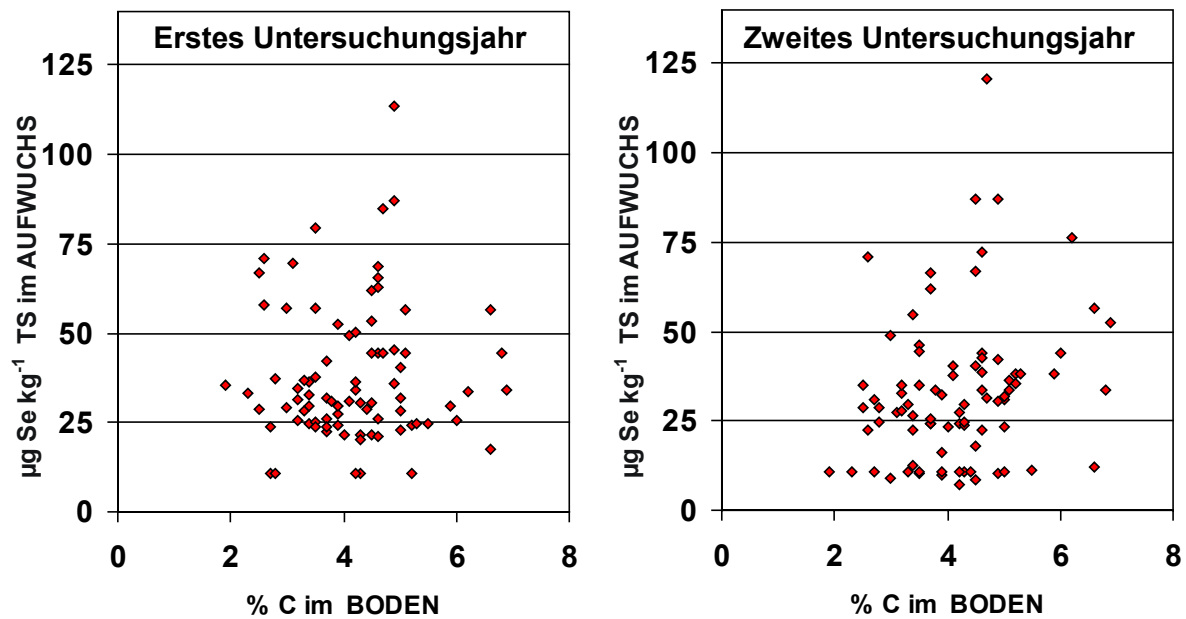
gegenübergestellt. In allen Gegenüberstellungen ergibt sich eine diffuse Punktverteilung. Der S-Gehalt beträgt im Durchschnitt aller Standorte 0,06 % mit einer Standardabweichung von 0,018. Die pH-Werte, vgl. Abb. 13, weisen eine für Grünland relativ hohe Variationsbreite von 4,3 bis 6,0 auf.



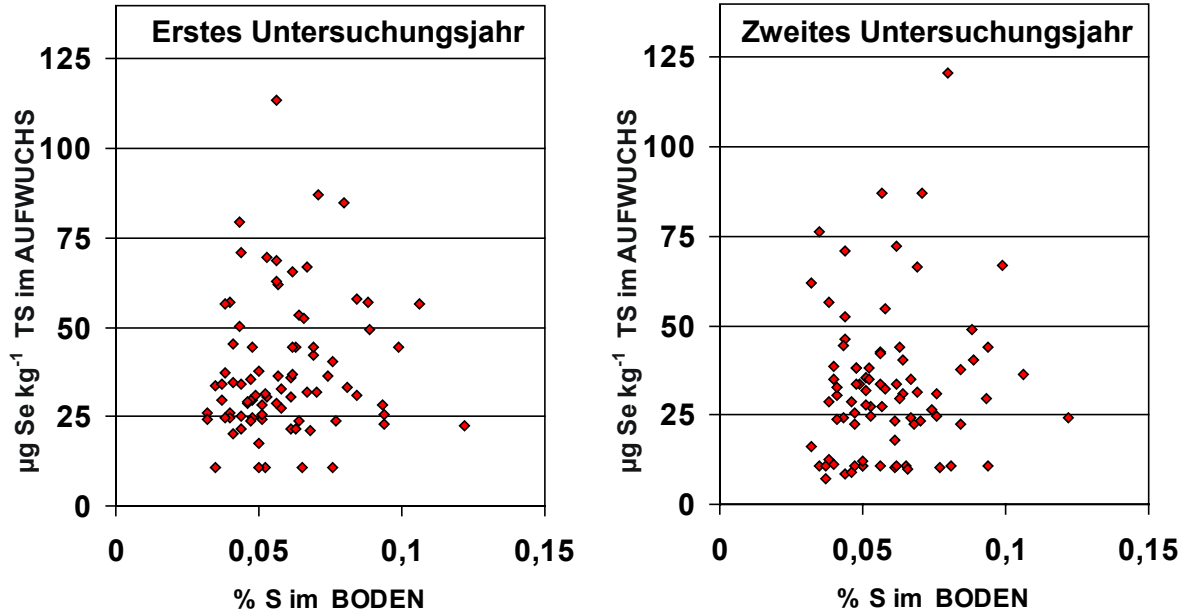
**Abb. 9:** Gegenüberstellung von Se-Gehalt im Boden und Se-Konzentration im Primäraufwuchs (n = 83) im ersten und zweiten Untersuchungsjahr



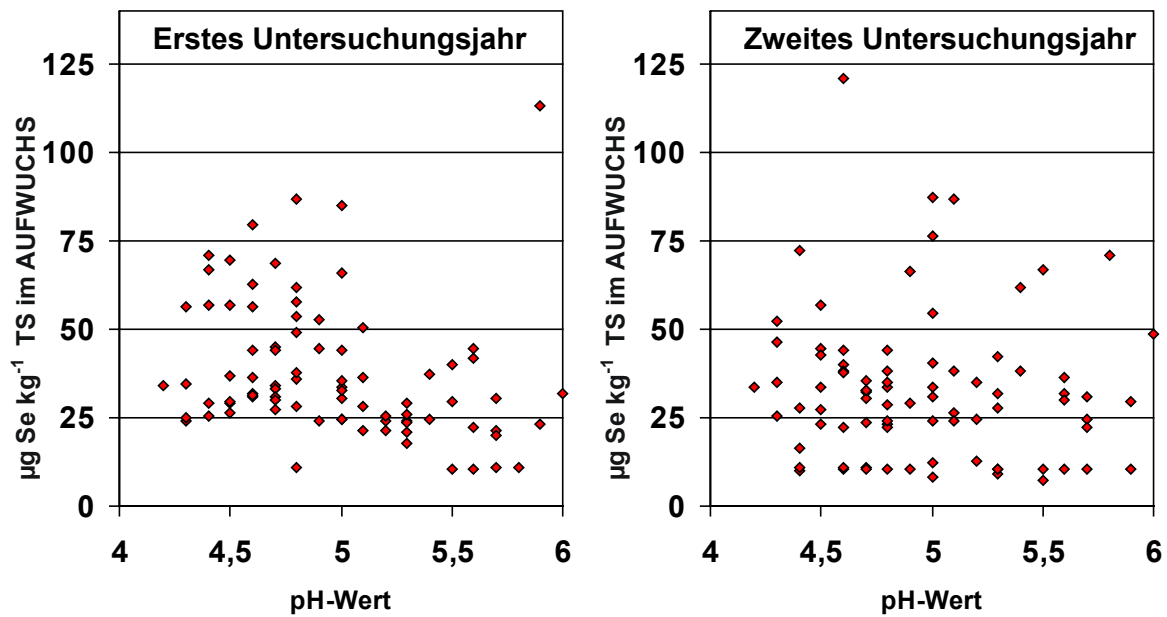
**Abb. 10:** Gegenüberstellung von C-Gehalt und Se-Konzentration im Boden extensiv bewirtschafteter Grünlandstandorte (n = 83) im ersten Untersuchungsjahr



**Abb. 11:** Gegenüberstellung von C-Gehalt des Bodens und Se-Konzentration im Primäraufwuchs (n = 83) im ersten und zweiten Untersuchungsjahr



**Abb. 12:** Gegenüberstellung von S-Konzentration im Boden und Se-Konzentration im Primäraufwuchs (n = 83) im ersten und zweiten Untersuchungsjahr



**Abb. 13:** Gegenüberstellung von Bodenreaktion und Se-Konzentration im Primäraufwuchs (n = 83) im ersten und zweiten Untersuchungsjahr

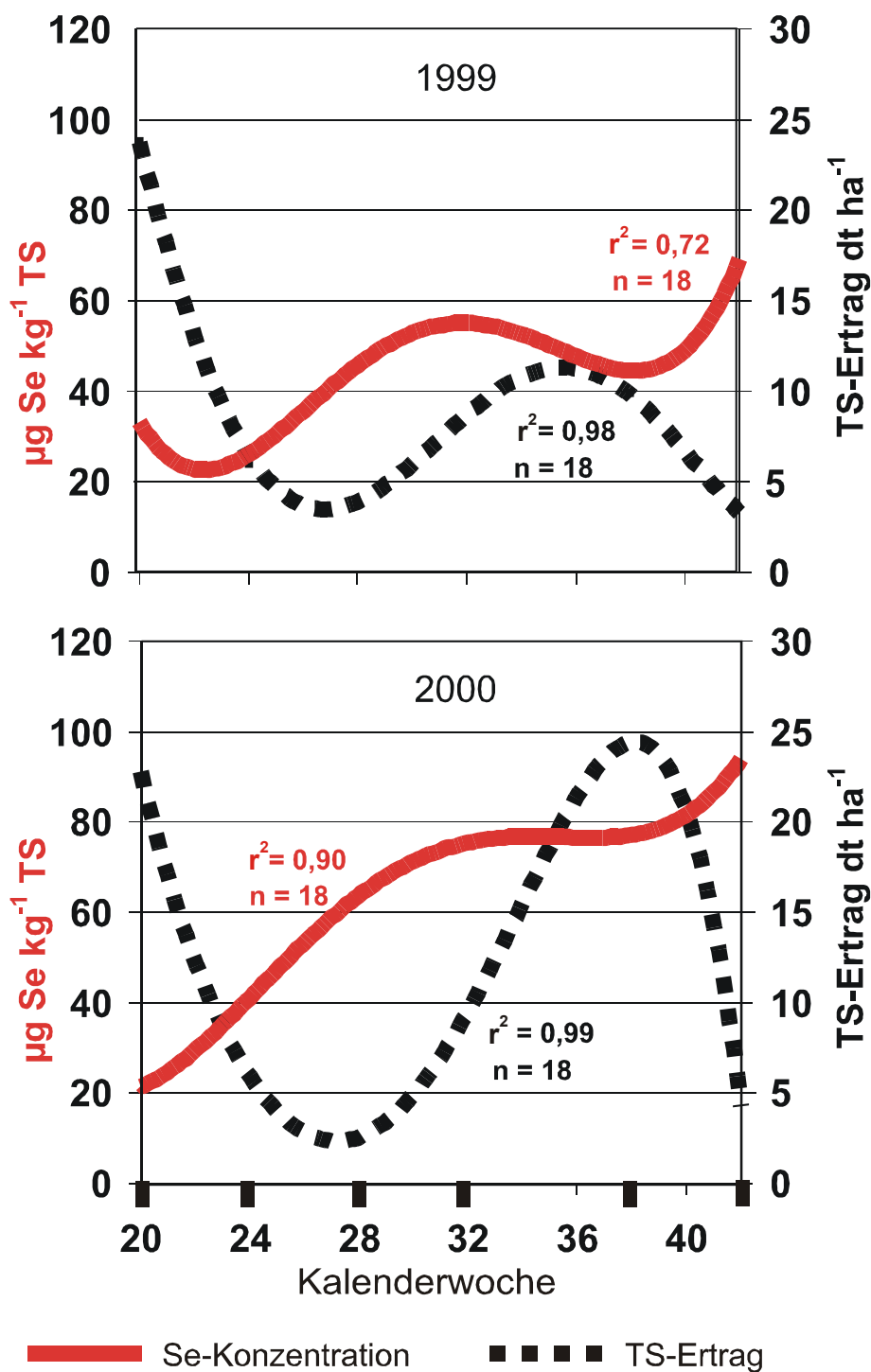
## 4.2 Jahresverlauf

### 4.2.1 Selen und Ertrag

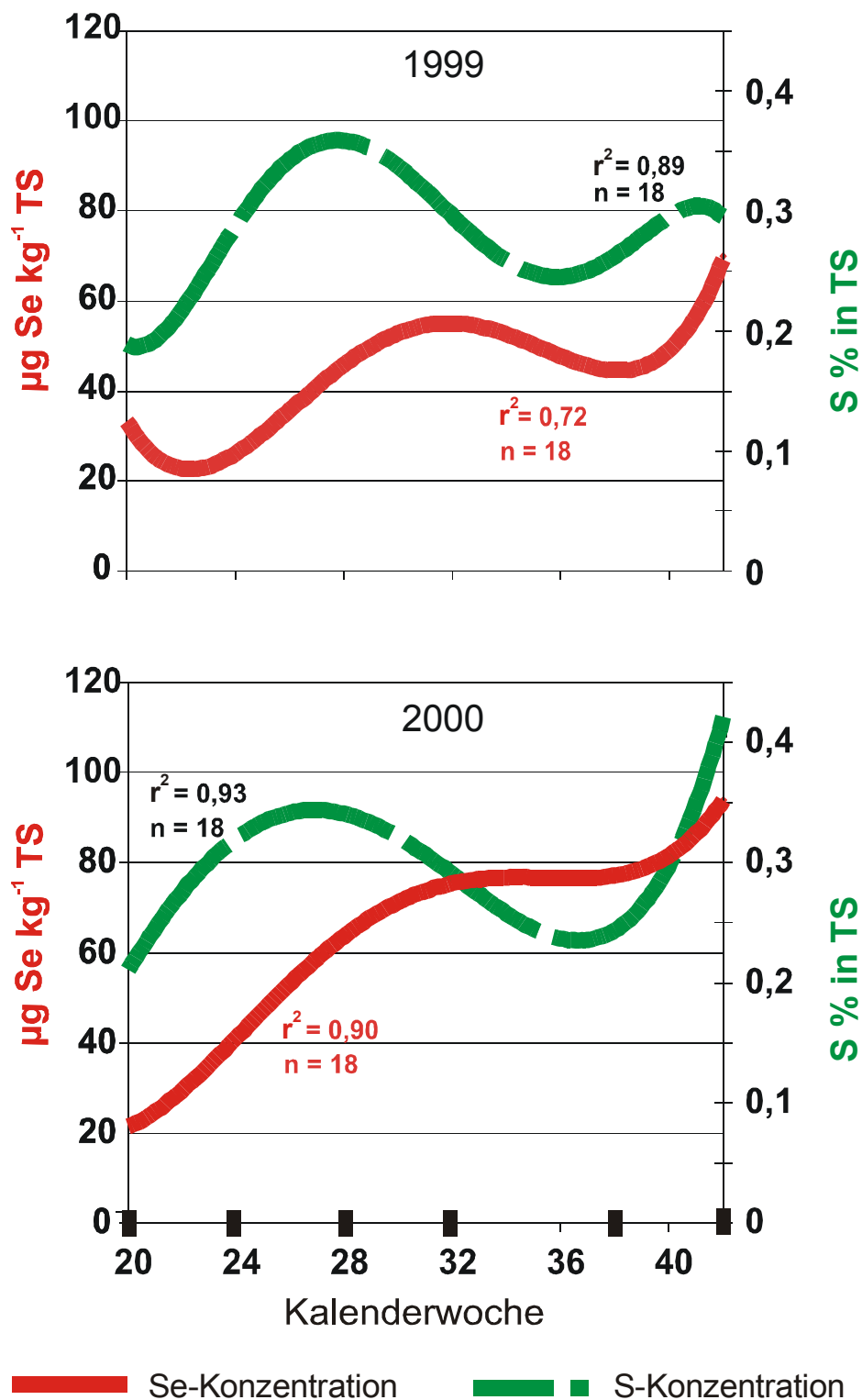
Abb. 14 sowie Anhangtab.14 verdeutlichen den **Verlauf der TS-Erträge und der Se-Konzentrationen** in sechs aufeinanderfolgenden Aufwüchsen zweier Jahre, vgl. Kapitel 3.2, S. 54. Die durchschnittlichen Jahreserträge betragen  $55,9 \text{ dt ha}^{-1}$  im Jahr 1999 bzw.  $69,5 \text{ dt ha}^{-1}$  im Jahr 2000, vgl. Anhangtab. 14. In beiden Jahren nehmen die TS-Erträge ab dem zweiten Nutzungstermin ab und nach dem dritten wieder zu. Im zweiten Versuchsjahr 2000 sind die TS-Erträge in der 38. Woche (= Mitte September) aufgrund der feuchten Witterung in den vorausgehenden sechs Wochen vergleichbar mit den Erträgen des Primäraufwuchses. Die Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial nehmen in beiden Jahren vom ersten bis zum sechsten Schnitt zu. Im ersten Hauptnutzungsjahr 1999 sind im Vergleich der Mittelwerte, vgl. Anhangtab. 14, ab der 32. Woche signifikant höhere Se-Konzentrationen festzustellen als zum ersten Nutzungstermin in der 20. Woche. Ein weiterer signifikanter Anstieg erfolgt zwischen der 38. und 42. Woche. Im Jahr 2000 steigen die Se-Konzentrationen bereits zum zweiten Termin in der 24. Woche an, erhöhen sich nochmals zum dritten Schnitt und erreichen wie 1999 zum letzten Schnitt Mitte Oktober (= 42. Woche) den Höchstwert. Unterschiede zwischen den Se-Konzentrationen des dritten, vierten und



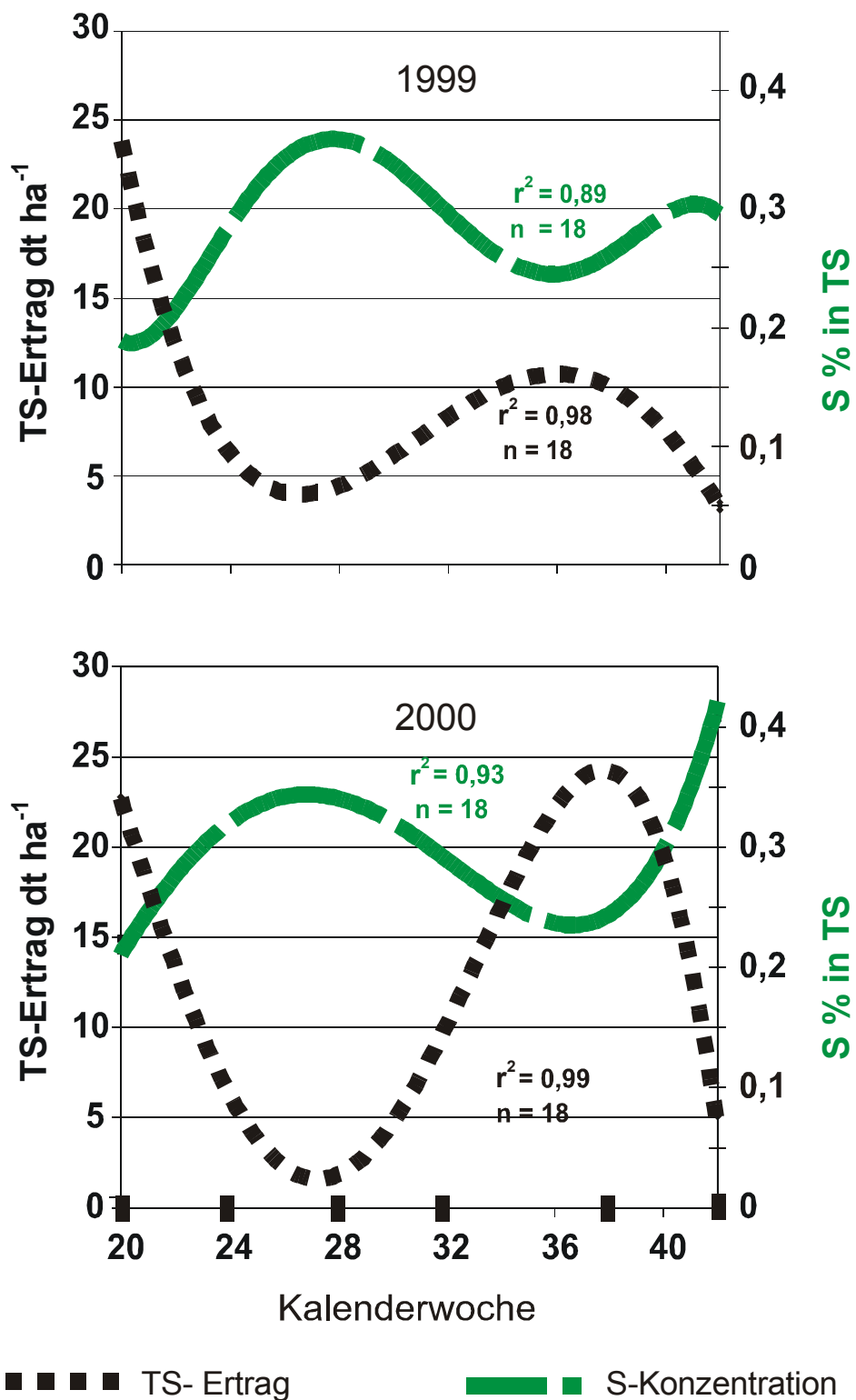
fünftens Aufwuchses, also im Zeitraum von Anfang Juli bis Mitte September, lassen sich hingegen in beiden Jahren nicht nachweisen. In keinem Jahr besteht eine signifikante Beziehung zwischen der TS-Ertragsentwicklung und dem Verlauf der Se-Konzentrationen, vgl. Anhangtab. 15.



**Abb. 14:** Einfluss des Erntetermins auf die Se-Konzentration im Vergleich zum TS-Ertrag (= polynomische Trendlinien)



**Abb. 15:** Einfluss des Erntetermins auf die Se-Konzentration im Vergleich zu den S-Konzentrationen (= polynomische Trendlinien)



**Abb. 16:** Einfluss des Erntetermins auf die S-Konzentration im Vergleich zum TS-Ertrag (= polynomische Trendlinien)

#### 4.2.2 Selen- und Schwefel-Konzentrationen

Abb. 15 zeigt den **Verlauf der S-Konzentration** von der 20. bis zur 42. Woche im Vergleich zu den Se-Konzentrationen, vgl. 3.2. Anhangtab. 14 belegt, dass die S-Konzentration in beiden Jahren von der 20. bis zur 28. Woche zu jedem Termin signifikant ansteigt und bis zur 38. Woche wieder abnimmt. Im Jahr 2000 werden, wie bei den Se-Konzentrationen, die höchsten Werte im Oktober festgestellt. In diesem Jahr ergibt sich eine schwach gesicherte positive Korrelation zwischen den Konzentrationen der beiden Elemente, vgl. Anhangtab. 15. Wesentlich deutlicher fällt allerdings in beiden Jahren die hoch gesicherte Korrelation zwischen S-Konzentration und TS-Ertrag aus. Die Korrelationskoeffizienten betragen  $r = -0,85$  bzw.  $r = -0,81$ , vgl. Anhangtab. 15. Die entgegengesetzte Entwicklung der S-Konzentrationen und der TS-Erträge wird in Abb. 16 deutlich.

#### 4.3 Effizienz von Selen-Gaben

In Abb. 17 wird der Effekt der flüssig applizierten Selenatlösungen, entsprechend einer Aufwandmenge von 0 g, 4 g bzw. 12 g Se ha<sup>-1</sup> auf die **Se-Konzentrationen im Aufwuchs** dreier Standorte gezeigt, wobei der Einfluss einer N-Gabe bzw. einer Ca-Gabe berücksichtigt wird, vgl. Anhangtab. 16 und 17 sowie Kapitel 3.2, S. 54. In beiden Untersuchungsjahren ist der Faktor Se-Gabe die dominierende Varianzursache, vgl. Anhangtab. 18. Das Niveau der Se-Konzentrationen der mit Selenat behandelten Varianten unterscheidet sich im Vergleich der Jahre jedoch erheblich; im Primäraufwuchs, geerntet im Mai 2003, werden bis zu fünfmal höhere Se-Konzentrationen gemessen als in dem Folgeaufwuchs im August 2002. Der Faktor N-Gabe ist in beiden Aufwüchsen hoch gesichert und stellt im Primäraufwuchs die zweitwichtigste Varianzursache dar, da hier bei den mit Selenat behandelten Beständen, vor allem bei dem Standorttyp C, deutlich höhere Se-Konzentrationen gemessen werden, wohingegen ohne Se-Gabe generell keine Unterschiede zwischen den N-Stufen zu belegen sind, was sich in dem hohen Varianzanteil der Interaktion Se-Gabe x N-Gabe widerspiegelt. Für den Primäraufwuchs ist diese Wechselwirkung ebenfalls hoch signifikant, jedoch führt hier die N-Gabe bei dem Standorttyp A und zum Teil bei dem Standorttyp B zu abgeschwächten Effekten der Se-Gaben auf die Se-Konzentrationen in den Aufwüchsen; bei dem Standorttyp C wirkt sich die N-Gabe nicht auf die Se-Konzentrationen aus. Die Interaktionen Se-Gabe x N-Gabe x Standorttyp sowie N-Gabe x Standorttyp sind für beide Aufwüchse hoch signifikant.

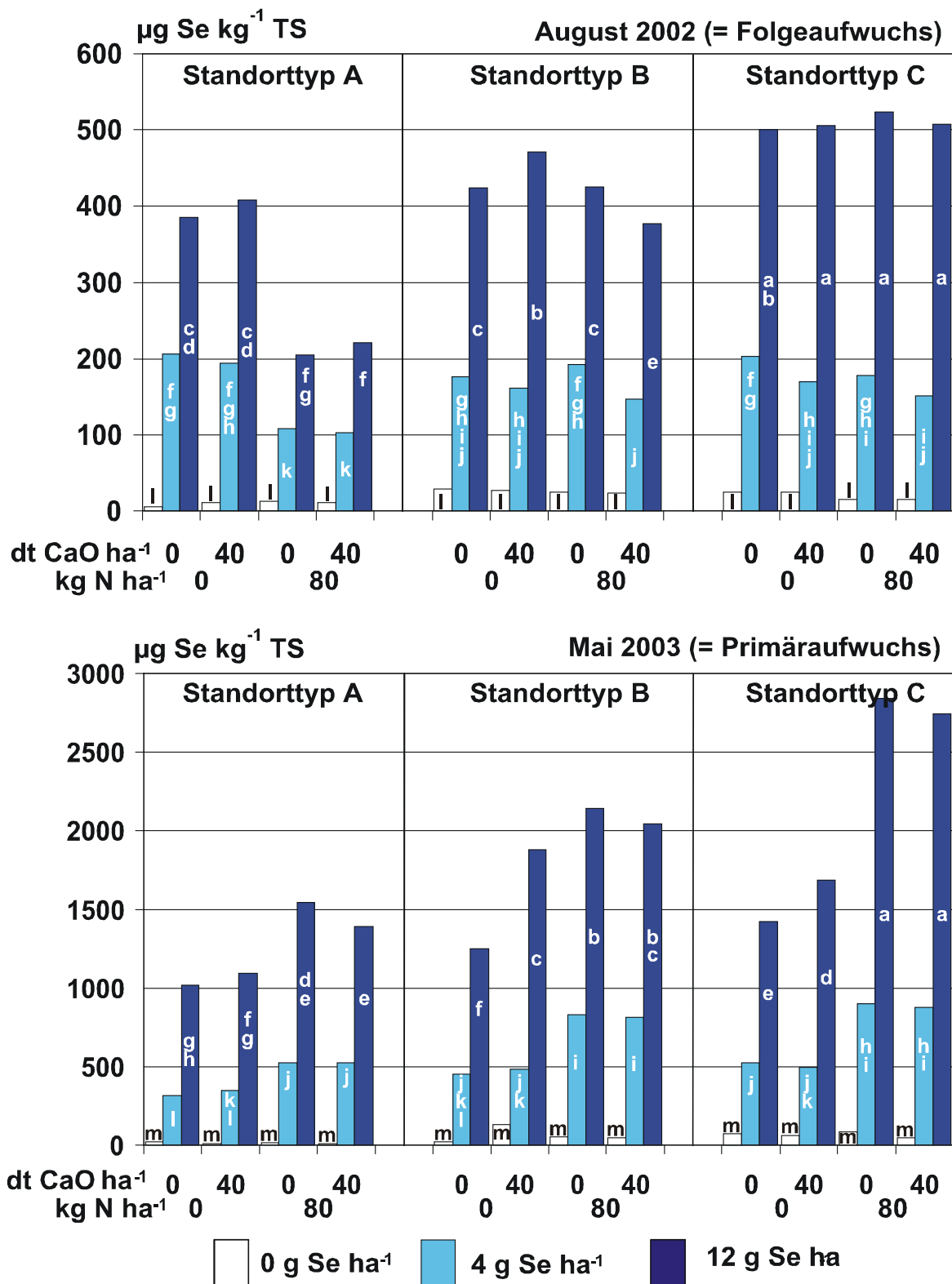


Abb. 17: Se-Konzentration in Abhängigkeit von Se-, N-, Ca-Gabe und Standorttyp

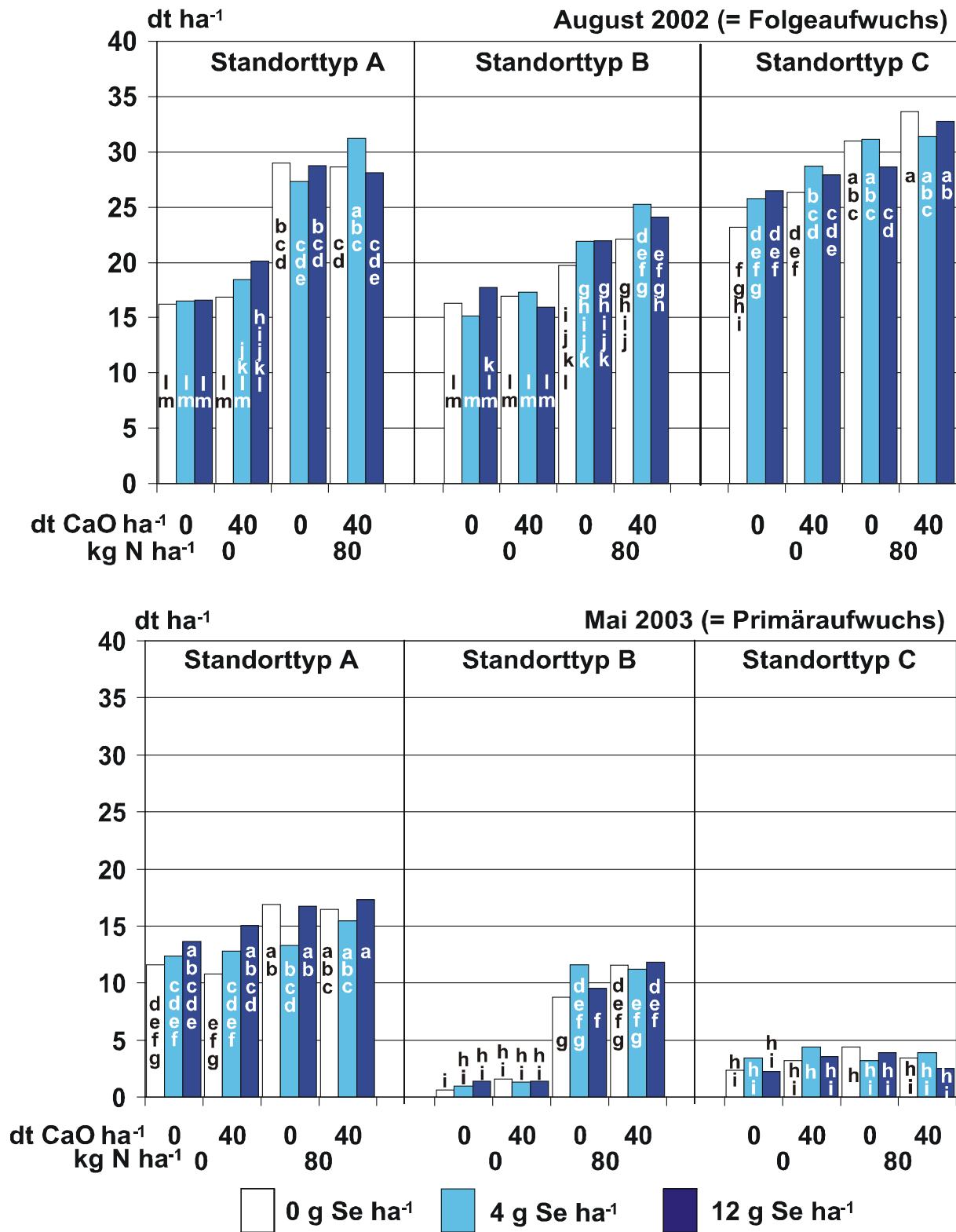


Abb. 18: TS-Ertrag in Abhängigkeit von Se-, N-, Ca-Gabe und Standorttyp

Bezogen auf die Wirkung der Se-Gaben auf die Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial bestehen Unterschiede zwischen den Standorten, weshalb der Faktor Standort und die Interaktion Se-Gabe x Standort als bedeutende Varianzursachen ausgewiesen sind. Unterschiede zwischen gekalkten und ungekalkten Varianten bestehen nur in Einzelfällen, wobei die Ca-Gabe teils höhere, teils niedrigere Se-Konzentrationen im Aufwuchs bewirkt. Zunehmende Se-Konzentrationen werden ausschließlich bei  $12 \text{ g Se ha}^{-1}$  und unterlassener N-Düngung festgestellt. Die für beide Aufwüchse signifikanten Interaktionen N-Gabe x Ca-Gabe und Se-Gabe x N-Gabe x Ca-Gabe sind nur für den Primäraufwuchs relevante Varianzursachen; für den Folgeaufwuchs ist die Wechselwirkung Se-Gabe x Ca-Gabe von größerer Bedeutung, vgl. Anhangtab. 18. Die Selenat-Applikation wirkt sich nicht auf die **TS-Erträge** aus, vgl. Abb. 18 sowie Anhangtab. 19 und 20. Die Varianzanalyse, vgl. Anhangtab. 21, weist die Faktoren Standorttyp und N-Gabe als dominierende Varianzursachen aus, darüber hinaus ist in beiden Jahren die Interaktion N-Gabe x Standorttyp von Bedeutung. Die Ca-Gabe bewirkt nur im ersten Jahr vereinzelt höhere Erträge. Der Folgeaufwuchs zeichnet sich im Vergleich zum Primäraufwuchs vor allem bei den Standorttypen B und C durch ein deutlich höheres Ertragsniveau aus. Auf Basis der TS-Erträge und der Se-Konzentrationen in den jeweiligen Aufwüchsen lassen sich die in Abb.19 sowie Anhangtab. 22 und 23 dargestellten Se-Entzüge schätzen, wobei die unterirdische Biomasse und Ernterückstände unberücksichtigt bleiben. Die hieraus kalkulierte Effizienz der Se-Gaben unter Einbeziehung der eingesetzten Se-Mengen, entsprechend  $4$  bzw.  $12 \text{ g Se ha}^{-1}$ , abzüglich der in der jeweiligen Nullvariante enthaltenen Se-Mengen, wird in Anhangtab. 1 veranschaulicht. Danach sind im Aufwuchs vom August 2002 4,6 bis 13,4 % bzw. im Aufwuchs vom Mai 2003 1,0 bis 23,1 % der applizierten Se-Menge im Erntegut auffindbar, wobei zwischen den Standorttypen im Vergleich der Erntetermine erhebliche Unterschiede bestehen. Die Faktoren Standorttyp, N-Gabe und Se-Gabe sowie die Interaktionen Se x Standorttyp, N x Standorttyp und Se x N x Standorttyp sind bei beiden Aufwüchsen hoch signifikant, vgl. Anhangtab. 24. Dagegen ist der Faktor Ca-Gabe nicht signifikant. Abb. 20 zeigt die **S-Konzentrationen** in Abhängigkeit von der Se-, N- und Ca-Gabe und dem Standorttyp, vgl. Anhangtab. 25 und 26. Für keinen Aufwuchs ergibt sich dabei eine Abhängigkeit von der Se-Gabe. Im Folgeaufwuchs weist die Varianzanalyse den Faktor N-Gabe als dominierenden Faktor aus, vgl. Anhangtab. 27, da die ungedüngten Varianten überwiegend eine höhere S-Konzentration aufweisen.

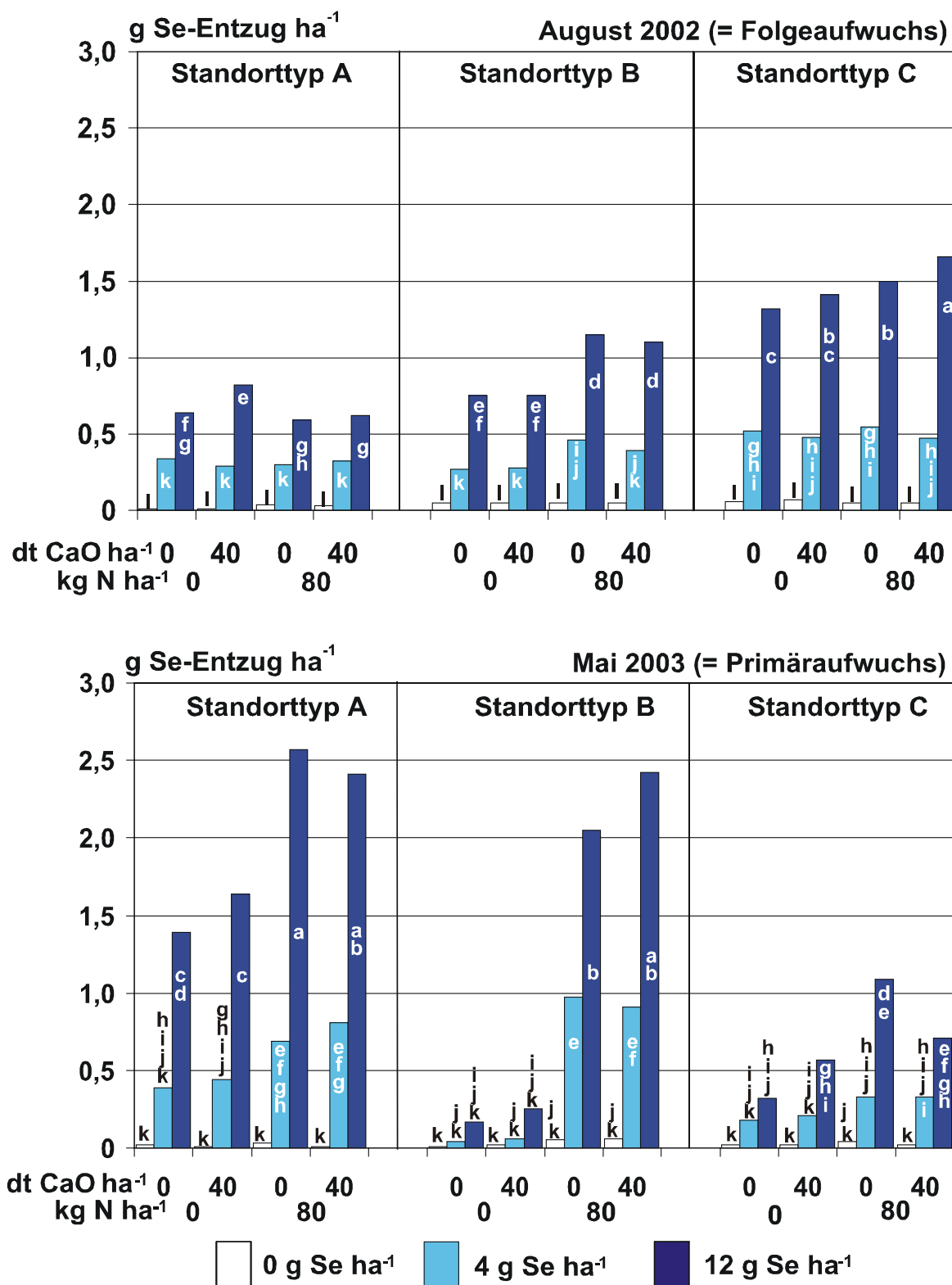
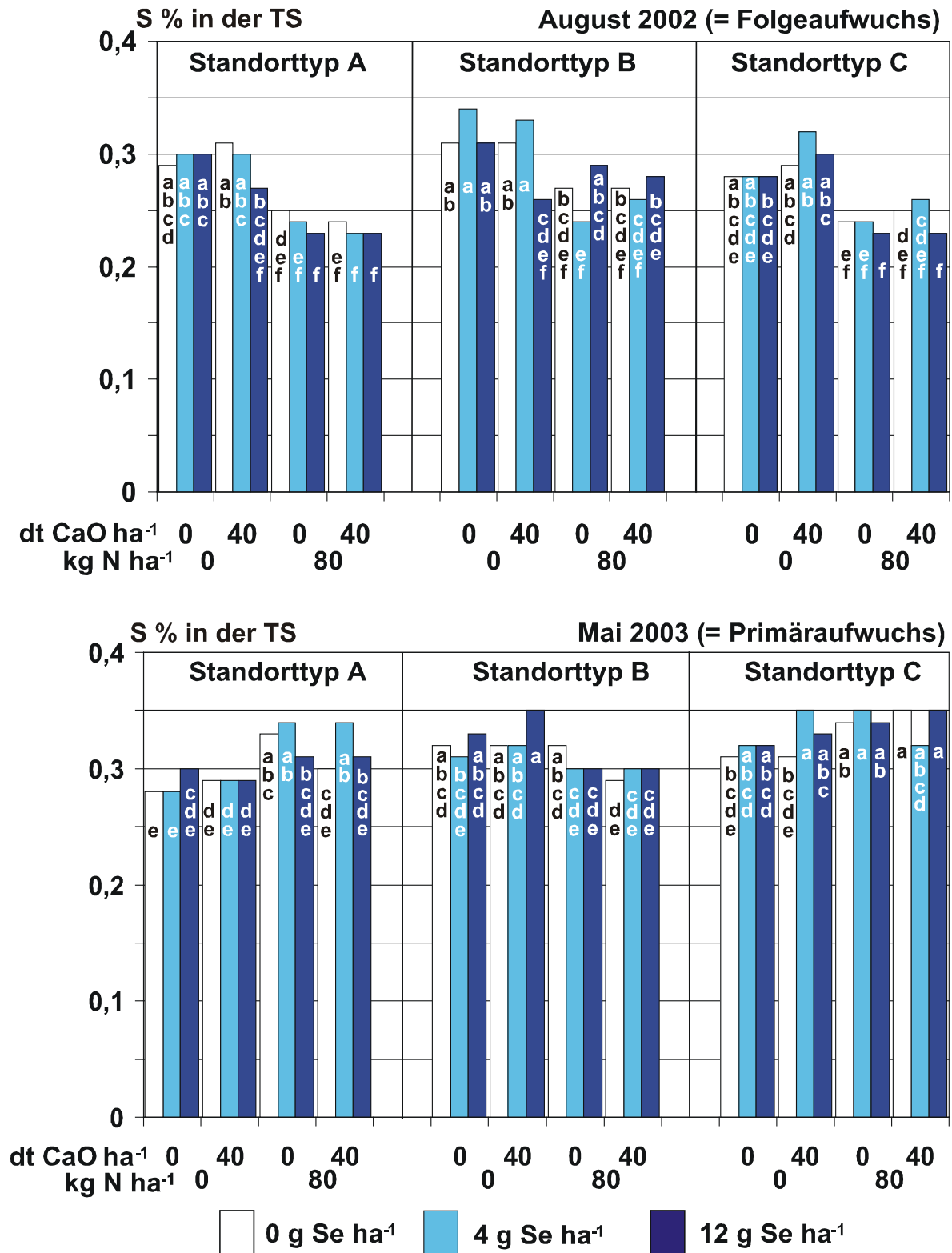


Abb. 19: Se-Entzug in Abhängigkeit von Se-, N-, Ca-Gabe und Standorttyp





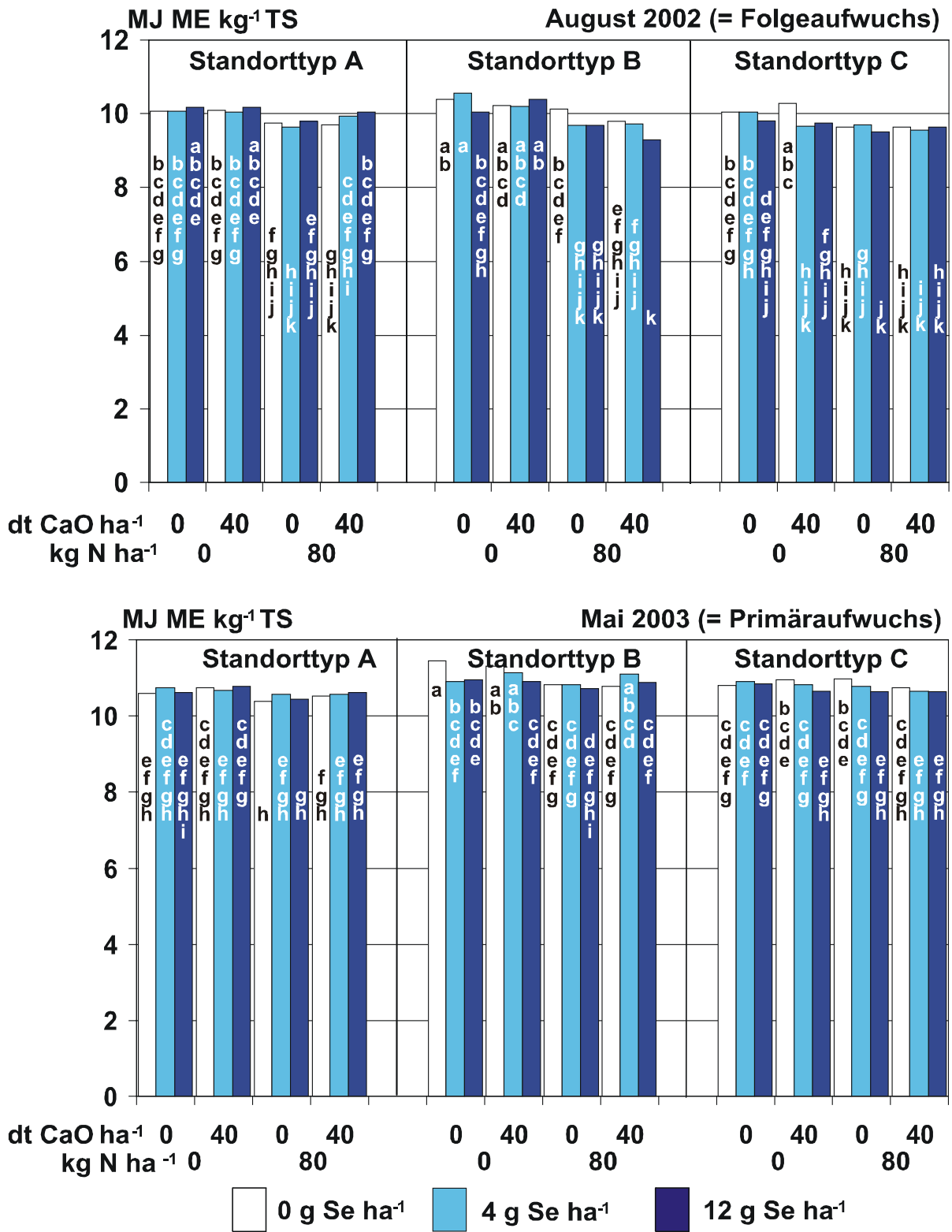
**Abb. 20:** S-Konzentration in Abhängigkeit von Se-, N-, Ca-Gabe und Standorttyp

Für den Folgeaufwuchs lässt sich dieser Effekt nicht bestätigen; einzelne N-gedüngte Varianten der Standorttypen A und C haben höhere S-Konzentrationen als vergleichbare Varianten ohne N-Applikation. Im Primäraufwuchs sind der Faktor Standort und die Interaktion N-Gabe x Standorttyp die wichtigsten Varianzursachen. Die mittlere S-Konzentration liegt sowohl im August 2002 als auch im Mai 2003 bei 0,32 % mit einer Standardabweichung von jeweils  $s = 0,03$ .

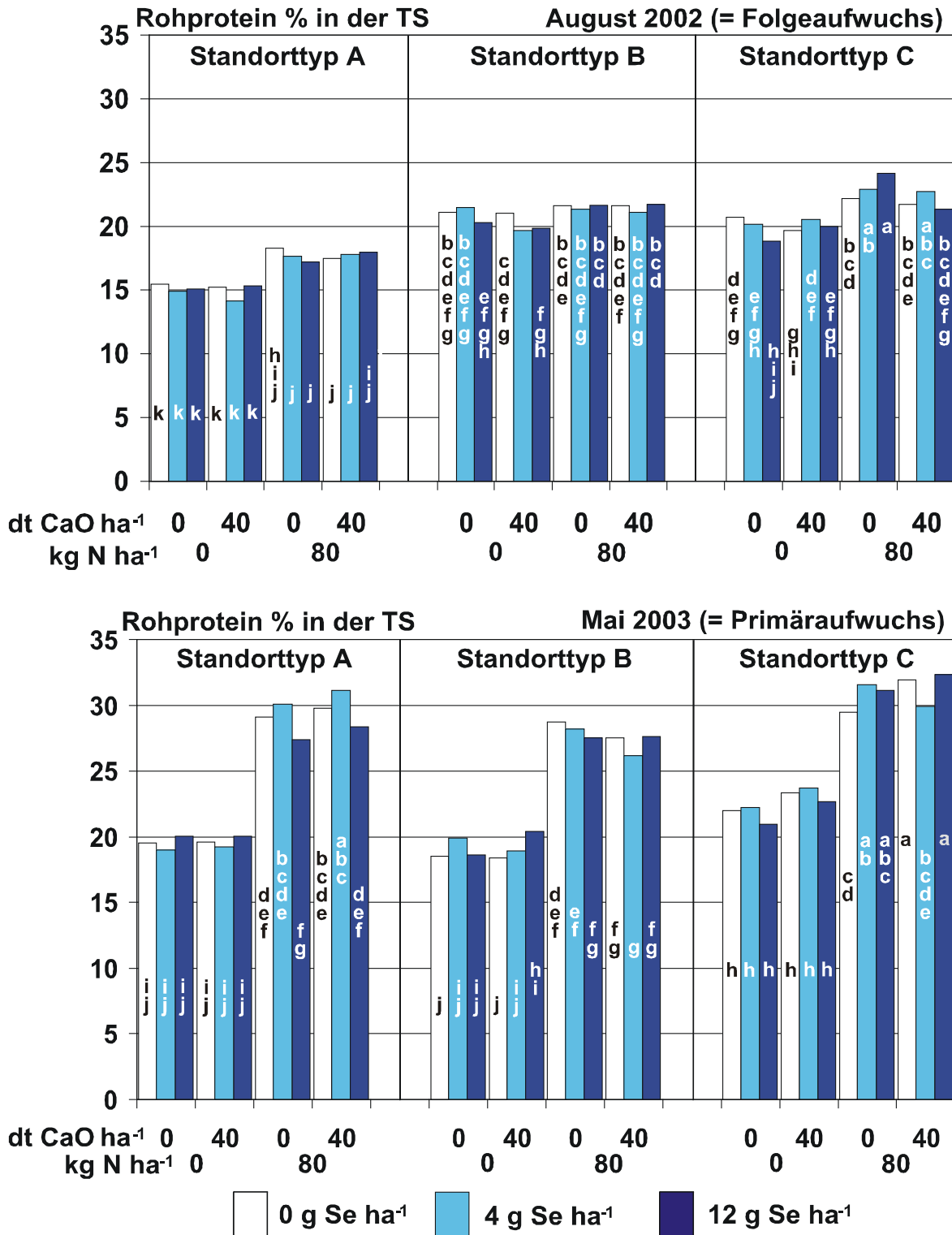
Für die in Abb. 21 dargestellte **Energiedichte** ergibt sich nur eine geringe Varianz. Die Energiedichten liegen 2002 im Mittel bei  $9,9 \text{ MJ ME kg}^{-1} \text{ TS}$  mit einer Standardabweichung von  $s = 0,37$  und 2003 bei  $10,8 \text{ MJ ME kg}^{-1} \text{ TS}$  mit  $s = 0,28$ , vgl. Anhangtab. 28 und 29; Werte in MJ NEL sind Anhangtab. 31 und 32 zu entnehmen. Die vorhandenen Unterschiede sind im Folgeaufwuchs überwiegend durch geringfügig geringere Energiedichten der N-gedüngten Varianten bedingt, vgl. Anhangtab. 30 und 33, im Primäraufwuchs von 2003 tritt dieser Effekt nur vereinzelt auf. Mit wenigen Ausnahmen unterscheiden sich die Energiedichten der Aufwüchse selenatbehandelter Flächen nicht von denen der vergleichbaren unbehandelten Varianten. Die Interaktion Se-Gabe x Standorttyp ist im August 2002 schwach gesichert, vgl. Anhangtab. 31 und 32, hat aber nur einen geringen Anteil an der Gesamtvarianz.

Die **Rohprotein-Konzentration**, vgl. Abb. 22 sowie Anhangtab. 34 und 35, wird im Primäraufwuchs überwiegend vom Faktor N-Gabe beeinflusst, vgl. Anhangtab. 36. Im Folgeaufwuchs aus dem Jahr 2002 ist der Einfluss ebenfalls signifikant, jedoch deutlich geringer; für diesen Aufwuchs ist der Faktor Standorttyp, bedingt durch niedrigere Rohprotein-Konzentrationen im Pflanzenmaterial des Standorttyps A, die bedeutendste Varianzursache. Die Rohprotein-Konzentrationen der Aufwüchse einzelner Bestände des Standorttyps A und C, auf denen sowohl Se als auch N appliziert werden, sind bei einem insgesamt hohen Niveau der Rohprotein-Konzentrationen geringfügig höher bzw. niedriger als die vergleichbaren Aufwüchse der Stufe  $0 \text{ g Se ha}^{-1}$ . Die Interaktion Se-Gabe x N-Gabe x Standorttyp ist für den Primäraufwuchs hoch gesichert, aber insgesamt von vernachlässigbarer Relevanz, vgl. Anhangtab. 36. Der in Abb. 22 dargestellten Rohprotein-Konzentrationen liegen Werte aus der N-Bestimmung nach KJELDAHL zugrunde. Die parallel mittels N-Bestimmung in Elementaranalyse nach DUMAS erhobenen Werte sind in Anhangtab. 37 und 38 aufgeführt. Beide Methoden korrelieren eng, vgl. Anhangabb. 2; im Vergleich zu den Werten der Methode nach KJELDAHL werden jedoch auf Grundlage der Elementaranalyse - insbesondere bei hohem Wertenniveau - höhere Rohprotein-Konzentrationen ermittelt. Für

die Aussage der Varianzanalyse ist das allerdings ohne Relevanz, vgl. Anhangtab. 36 und 39.



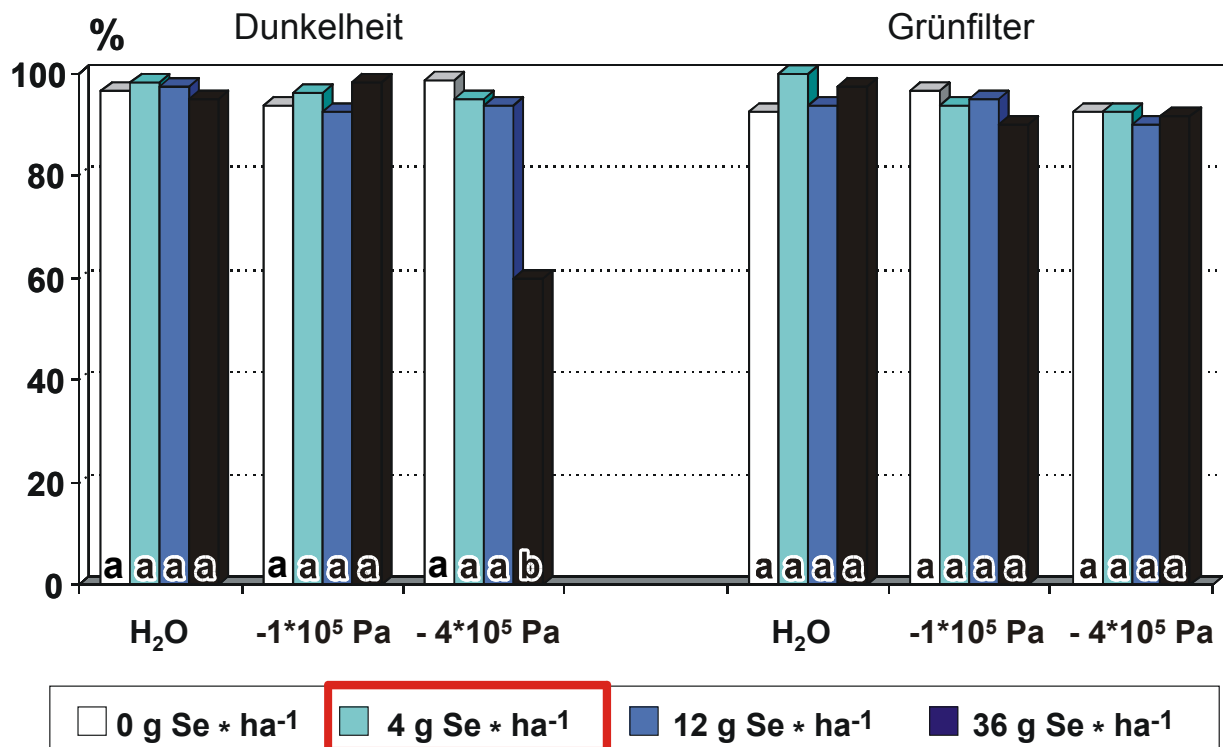
**Abb. 21:** Energiedichte in MJ ME in Abhängigkeit von Se-, N-, Ca-Gabe und Standorttyp



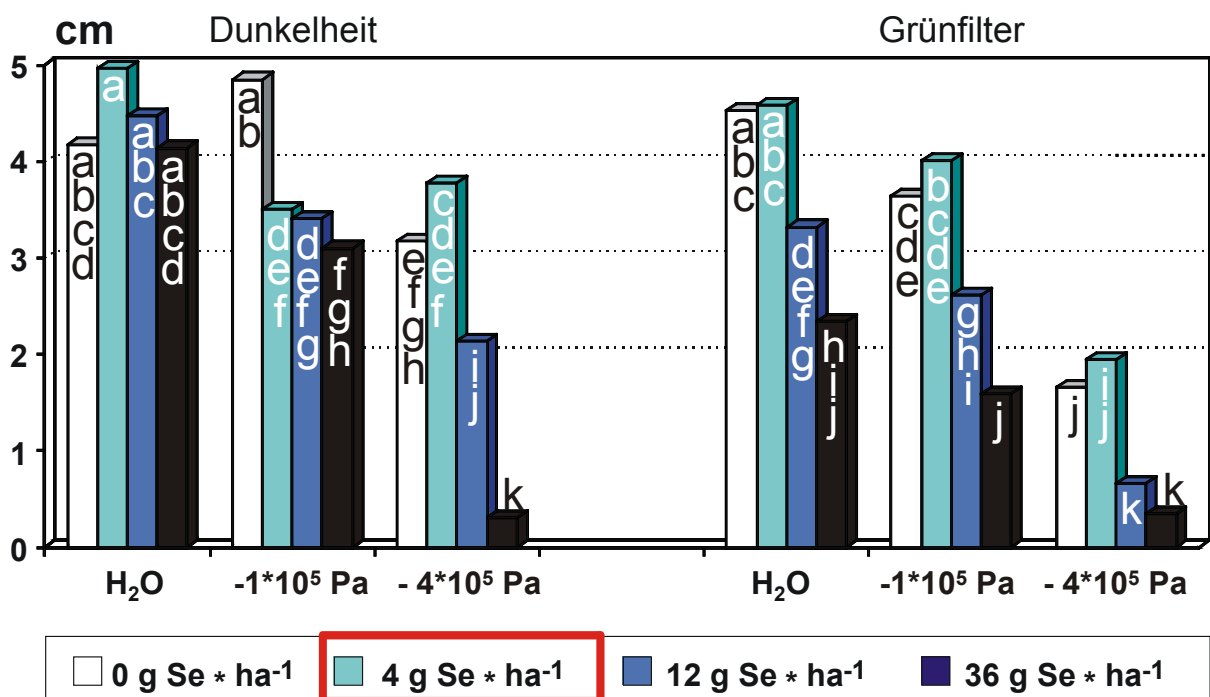
**Abb. 22:** Rohprotein-Konzentration von Se-, N-, Ca-Gabe und Standorttyp

#### 4.4 Selen-Anreicherung von Saatgut

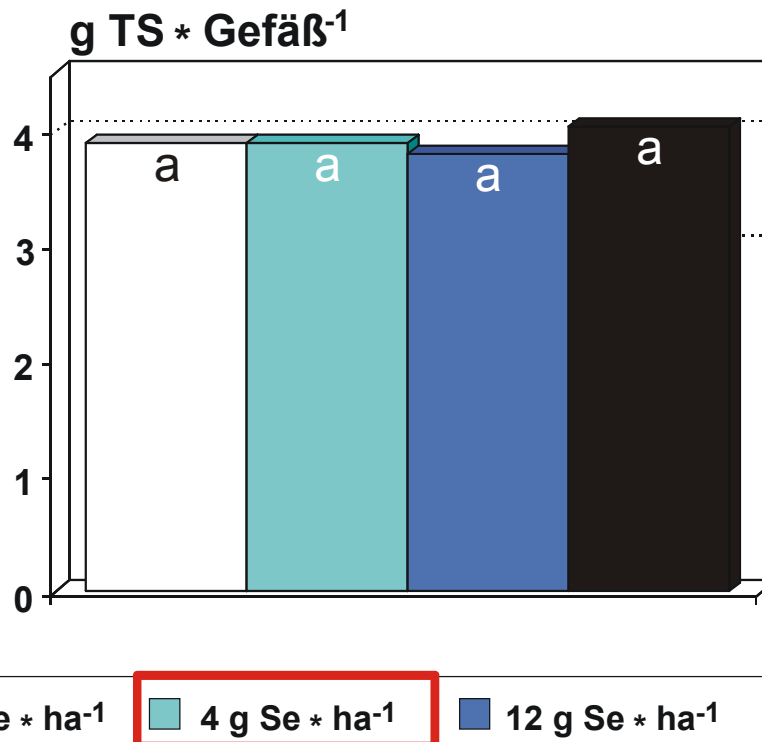
In Abb. 23 und Anhangtab. 40 sind die Keimungsraten von mit Na-Selenat behandeltem Saatgut nach 21 Tagen aufgeführt, vgl. Kapitel 3.4. Nahezu alle Samen keimen unabhängig von der zugeführten Selenatmenge zu 90 bis 100 %. Lediglich in Kombination von Trockenstress ( $= -4 \cdot 10^5$  Pa) und Dunkelheit zeigt sich bei der höchsten Se-Stufe, mit der eine Applikationsmenge von  $36 \text{ g Se ha}^{-1}$  simuliert wird, ein signifikant geringeres Keimergebnis, weshalb die Varianzanalyse, vgl. Anhangtab. 41, den Faktor Wasserspannung sowie die Interaktionen Se-Gabe x Wasserspannung und Se-Gabe x Wasserspannung x Licht als signifikante Varianzursachen ausweist. Ansonsten ist kein Einfluss der Se-Gabe auf die Keimfähigkeit von *Lolium perenne* feststellbar. Im Vergleich zu der Kontrolle (= deionisiertes Wasser) treten in den Petrischalen mit den höher dosierten Selenatlösungen, entsprechend einer auf  $20 \text{ kg Saatgut ha}^{-1}$  bezogenen Se-Applikation von  $12$  bzw.  $36 \text{ g Se ha}^{-1}$ , allerdings verminderte Blattlängen auf, vgl. Abb. 24 sowie Anhangtab. 42. Gleiches gilt auch für die gemessenen Wurzellängen, vgl. Anhangtab. 44, so dass davon auszugehen ist, dass die dauerhaft auf den Keimling einwirkenden Se-Konzentrationen in der Petrischale die Vitalität beeinträchtigen. Sowohl die Keimblattlängen als auch die Wurzellängen werden durch den Faktor Se-Gabe signifikant beeinflusst, bezogen auf die Wurzeln ist die Se-Gabe die bedeutendste Varianzursache, vgl. Anhangtab. 45, bezogen auf die Blattlängen sind die Wasserspannung und die Lichtverhältnisse von höherer Bedeutung, vgl. Anhangtab. 43. Trockenstress und Beschattung verstärken in beiden Fällen den wachstumsreduzierenden Effekt von Se. Ausgehend von einer Se-Gabe von  $4 \text{ g Se ha}^{-1}$ , die offenbar ausreicht, um die angestrebten Konzentrationen im Aufwuchs von  $>100 \mu\text{g Se ha}^{-1}$  zu erreichen, vgl. 4.3, werden mit einer Ausnahme keine negativen Einflüsse auf die Entwicklung und das Wachstum des Keimlings sichtbar. Die in Abb. 25 und Anhangtab. 46 dargestellten TS Erträge aus einem Gefäßversuch belegen, dass die Se-Anreicherung des Saatgutes auf die längerfristige Keimlingsentwicklung (= zwölf Wochen) und den TS-Ertrag der auf Bodensubstrat gewachsenen Pflanzen auch in den höheren Se-Dosierungen keinen messbaren Einfluss hat, vgl. Anhangtab. 47.



**Abb. 23:** Keimungsraten von *Lolium perenne* nach 21 Tagen in Abhängigkeit von Selenat-Behandlung, Wasserspannung und Lichtverhältnissen



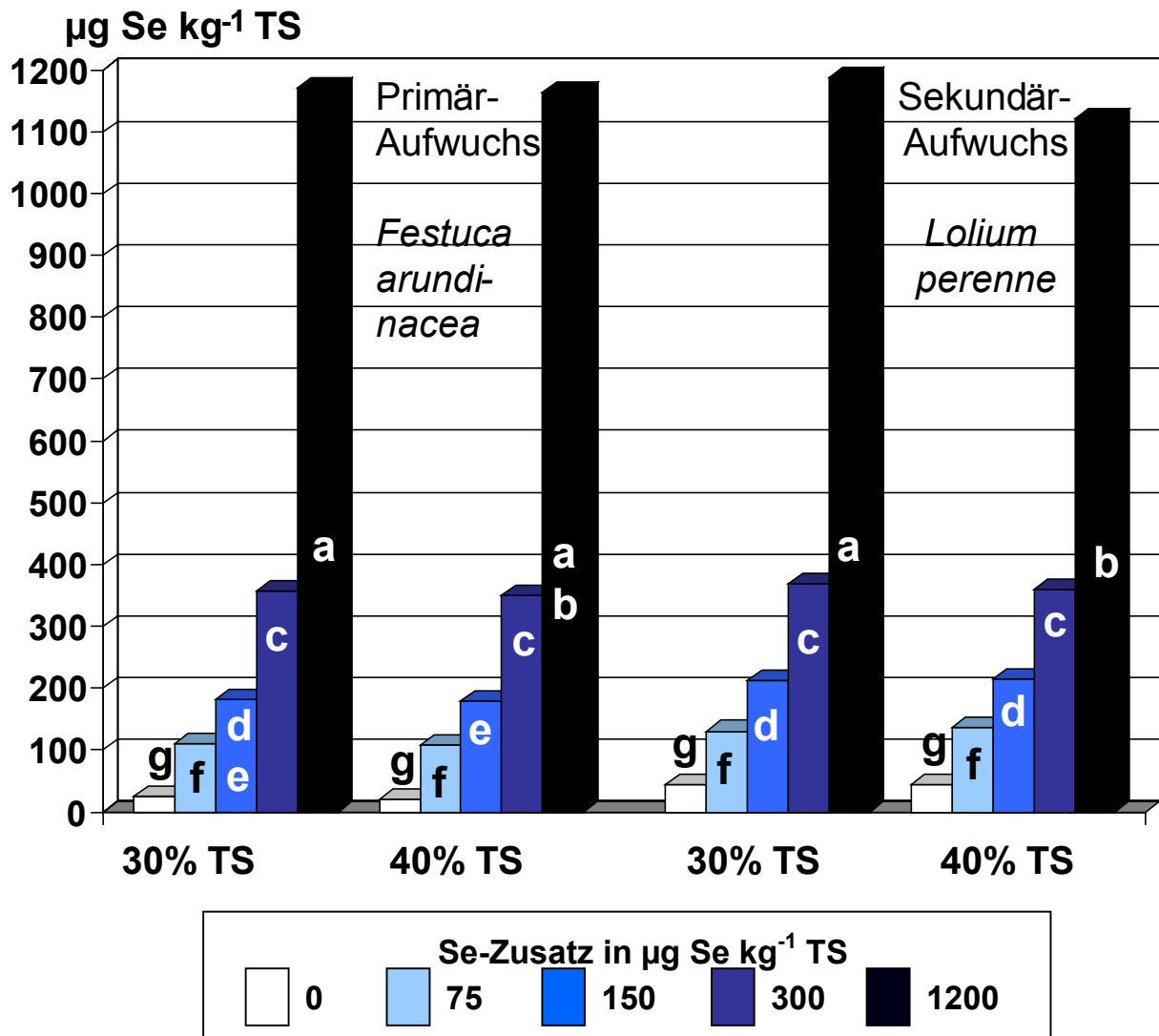
**Abb. 24:** Durchschnittliche Blattlängen von *Lolium perenne* Keimlingen nach 21 Tagen in Abhängigkeit von Selenatbehandlung, Wasserspannung und Lichtverhältnissen



**Abb. 25:** TS-Erträge von *Lolium perenne* nach zwölf Wochen in Abhängigkeit von der Selenatbehandlung

#### 4.5 Selen-Zusätze zum Siliergut

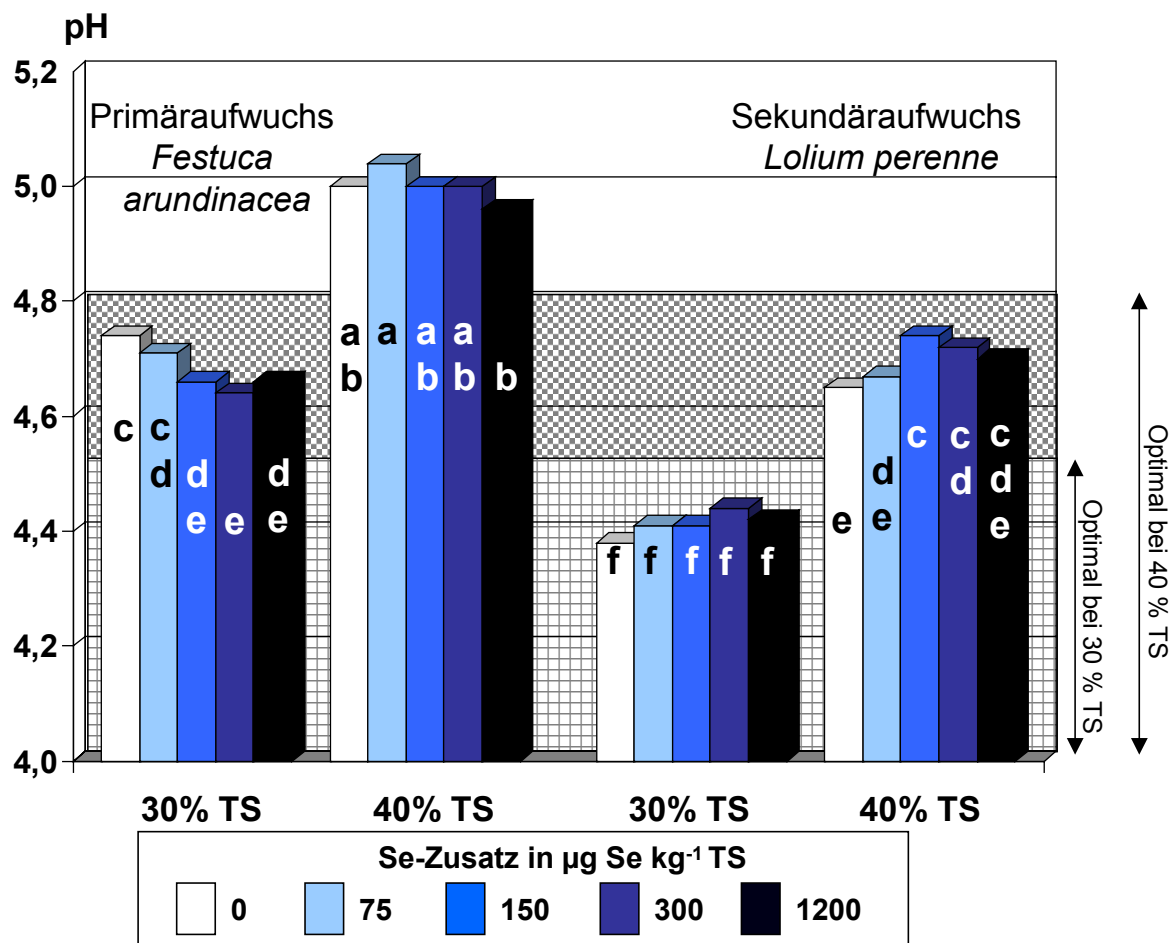
Die in Abb. 26 und Anhangtab. 48 dargestellten Se-Konzentrationen in Silagen ergeben sich aus den im Siliergut vorhandenen und den in Form von Na-Selenat zugesetzten Se-Mengen, vgl. Kapitel 3.5. Erwartungsgemäß stellt der Faktor Selenatzusatz die dominierende Varianzursache dar. Die Varianzanalyse, vgl. Anhangtab. 49, weist darüber hinaus den Einfluss des Faktors Aufwuchs als hoch gesichert aus, jedoch ist der Unterschied zwischen den Aufwüchsen nur bei 40 % TS und dem Se-Zusatz von 150 µg Se kg<sup>-1</sup> TS signifikant. In Anhangtab. 48 sind ferner die S-Konzentration und der N/S-Quotient aufgelistet. Die größte Varianz geht für die S-Konzentration vom Faktor Aufwuchs aus, vgl. Anhangtab. 49. *Lolium perenne*-Silagen (= Sekundäraufwuchs) weisen ohne Se-Gabe geringfügig höhere S-Konzentrationen auf als Varianten mit Se. Die Interaktion Se-Gabe x Aufwuchs ist hoch signifikant.



**Abb. 26:** Se-Konzentrationen der Silagen in Abhängigkeit von Selenatzusatz vor der Fermentation, Vorwelkegrad und Aufwuchs

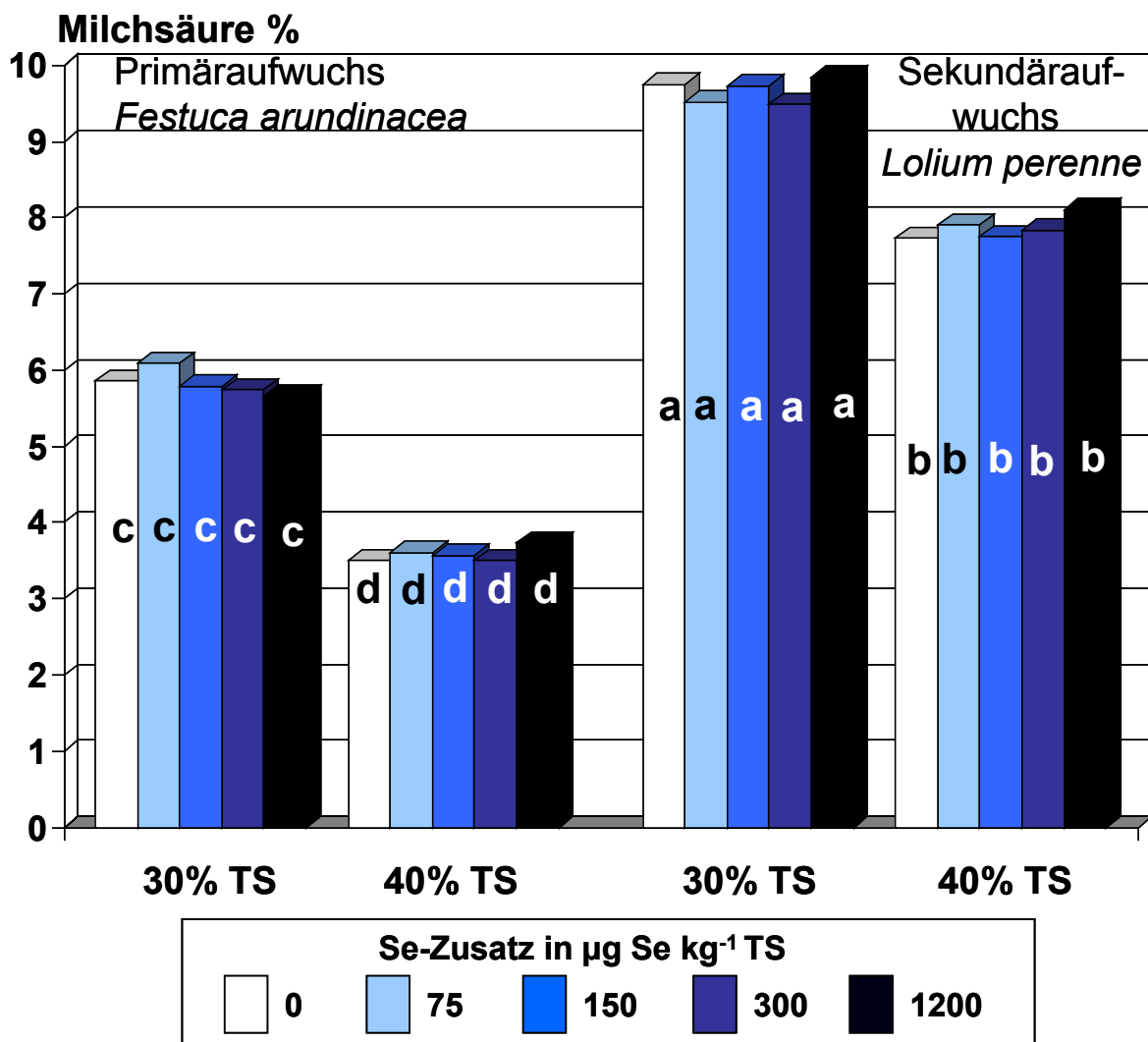
In Abb. 27 sind die pH-Werte der Silagen aus einem Primäraufwuchs mit dem Hauptbestandbildner *Festuca arundinacea* bzw. einem Sekundäraufwuchs mit dem Hauptbestandbildner *Lolium perenne* mit unterschiedlichen Vorwelkegraden und abgestuften Se-Zusätzen dargestellt, vgl. Anhangtab. 50.





**Abb. 27:** pH-Wert der Silagen in Abhängigkeit von Selenatzusatz, Vorwelkegrad und Aufwuchs

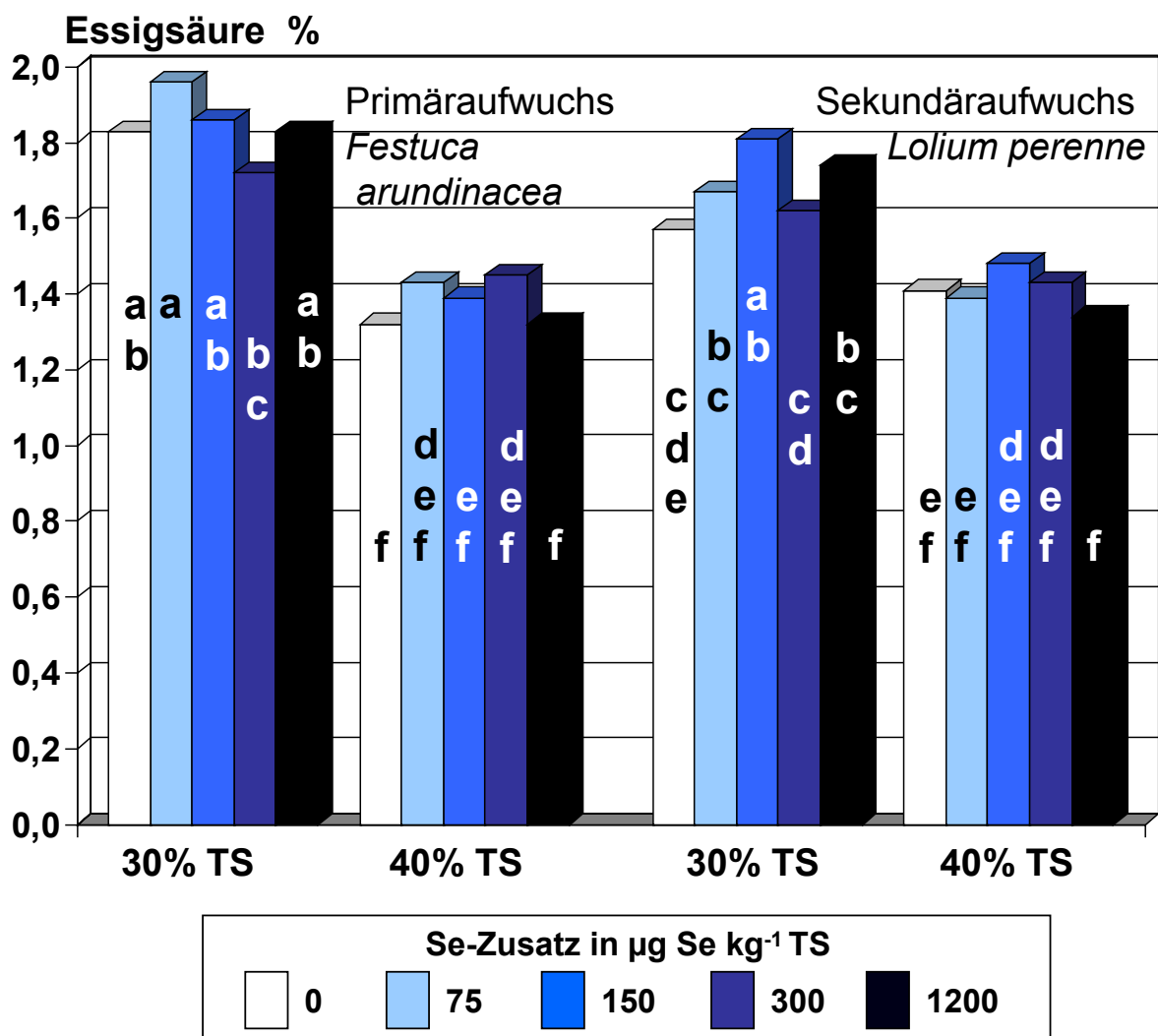
Die Silagen mit *Festuca arundinacea* weisen höhere pH-Werte auf als die von *Lolium perenne* dominierten Silagen. Bei beiden Aufwüchsen nimmt der pH-Wert bei einer Erhöhung der TS-Gehalte des Siliergutes zu. Bezogen auf die TS-Gehalte erreichen nur die Silagen mit *Lolium perenne* den optimalen pH-Wertebereich nach WEISSBACH et al. (1977), die pH-Wert-Absenkung beim von *Festuca arundinacea* dominierten Bestand mit hohen Anteilen von *Taraxacum officinale* ist suboptimal, vgl. schraffierte Bereiche in Abb. 27. Die Varianzanalyse, vgl. Anhangtab. 51, weist die Faktoren Vorwelkegrad und Aufwuchs als dominierende Varianzursachen aus. Die Interaktion Se-Gabe x Aufwuchs ist gesichert, pflanzenbaulich jedoch nicht relevant; einzelne mit Selenat angereicherte Varianten haben höhere oder niedrigere pH-Werte als die jeweilige Kontrollvariante ohne Selenatzusatz, wobei die Differenz stets  $\leq 0,1$  beträgt. Die schwach signifikante Interaktion Vorwelkegrad x Aufwuchs ist ebenfalls nicht von Bedeutung.



**Abb. 28:** Milchsäure-Konzentrationen der Silagen in % der TS in Abhängigkeit von Selenatzusatz, Vorwelkegrad und Aufwuchs

Die in Abb. 28 dargestellten Milchsäure-Konzentrationen, vgl. Anhangtab. 50, werden in keiner Weise von der Se-Gabe beeinflusst. In erster Linie werden die Werte vom Faktor Aufwuchs bestimmt, vgl. Anhangtab. 51, wobei mit dem von *Lolium perenne* dominierten Sekundäraufwuchs deutlich mehr Milchsäure gebildet wird. Den zweitgrößten Anteil an der Varianz hat der Faktor Vorwelkegrad, die gesicherte Interaktion Vorwelkegrad x Aufwuchs ist zu vernachlässigen. Alle Silagen können als buttersäurefrei bezeichnet werden. Capron-, Propion- und Valeriansäure werden ebenfalls nicht nachgewiesen, vgl. Anhangtab. 51.

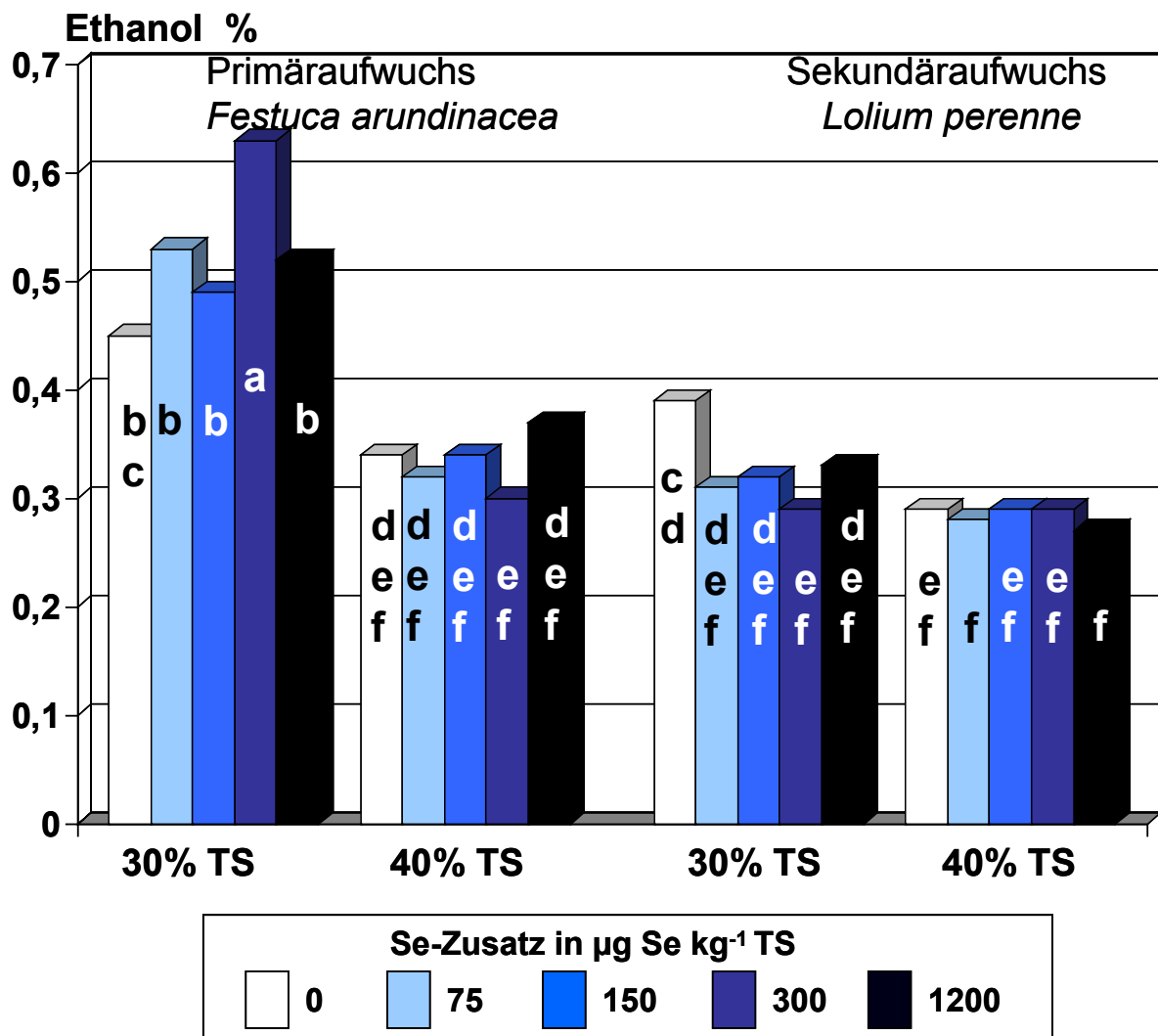
Die Selenzusätze haben keinen Effekt auf die Essigsäure-Konzentration in den verschiedenen Silagen, vgl. Abb. 29 und Anhangtab. 50 und 51. Der Faktor Vorwelkegrad ist die dominierende Varianzursache. Die höchsten Werte werden beim Primäraufwuchs mit 30 % TS erreicht, bei höherem Vorwelkegrad unterscheiden sich die beiden Aufwüchse nicht; demzufolge weist die Varianzanalyse den Faktor Vorwelkegrad und die Interaktion Vorwelkegrad x Aufwuchs als hoch signifikant aus.



**Abb. 29:** Essigsäure-Konzentrationen der Silagen in % der TS in Abhängigkeit von Selenzusatz, Vorwelkegrad und Aufwuchs

Abb. 30 bildet die Ethanol-Konzentrationen in den Silagen ab, vgl. Anhangtab 53. Der Selenzusatz wirkt sich nur bei dem niedrigeren TS-Gehalt bei einzelnen Varianten auf die Werte aus. Im Vergleich zu der Variante ohne Selenzusatz ist jeweils bei der Stufe  $300 \mu\text{g Se kg}^{-1}\text{ TS}$  bei dem Primäraufwuchs eine signifikant höhere, bei

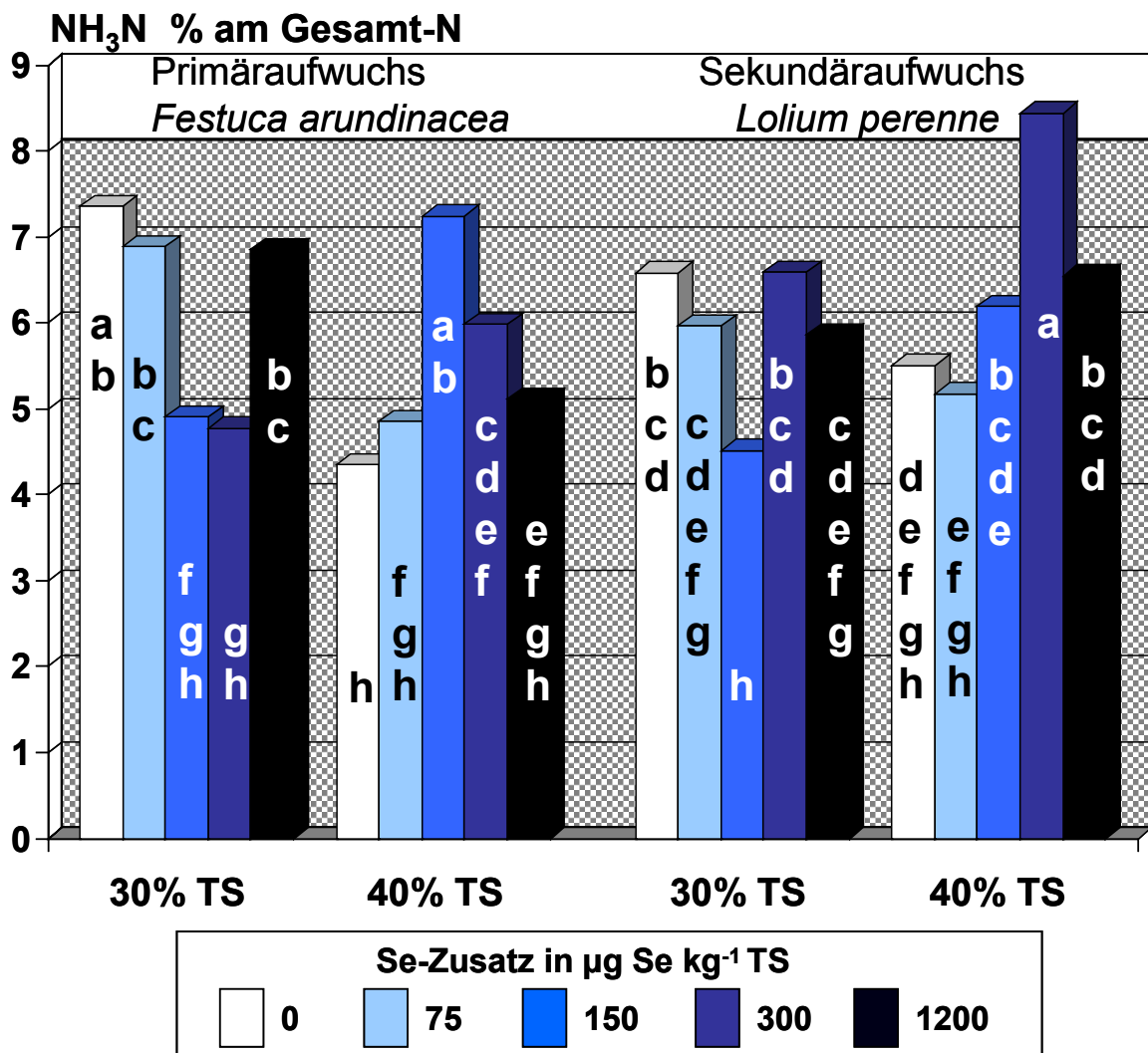
dem Sekundäraufwuchs eine signifikant niedrigere Ethanol-Konzentration festzustellen, weshalb sich die signifikante Wechselwirkung Vorwelkegrad x Se-Gabe x Aufwuchs ergibt, vgl. Anhangtab. 54, die aber im Vergleich zu den signifikanten Faktoren Aufwuchs und Vorwelkegrad sowie der Interaktion Vorwelkegrad x Aufwuchs einen ungleich geringeren Teil der Varianz erklärt.



**Abb. 30:** Ethanol-Konzentrationen der Silagen in % der TS in Abhängigkeit von Se-lenatzusatz, Vorwelkegrad und Aufwuchs

In nur einem Fall überschreitet der NH<sub>3</sub>-Anteil am Gesamt-N-Gehalt den Grenzwert von 8%, vgl. Abb. 31, der nach WIERINGA (1961) einen beginnenden Protein-Verderb anzeigen kann. Die Se-Zusätze wirken sich ungleichartig auf den NH<sub>3</sub>-Anteil aus. Weder die Werte des am niedrigsten dosierten Se-Zusatzes (= 75 µg Se kg<sup>-1</sup> TS), noch die der höchsten Se-Stufe (= 1200 µg Se kg<sup>-1</sup> TS) unterscheiden sich von der

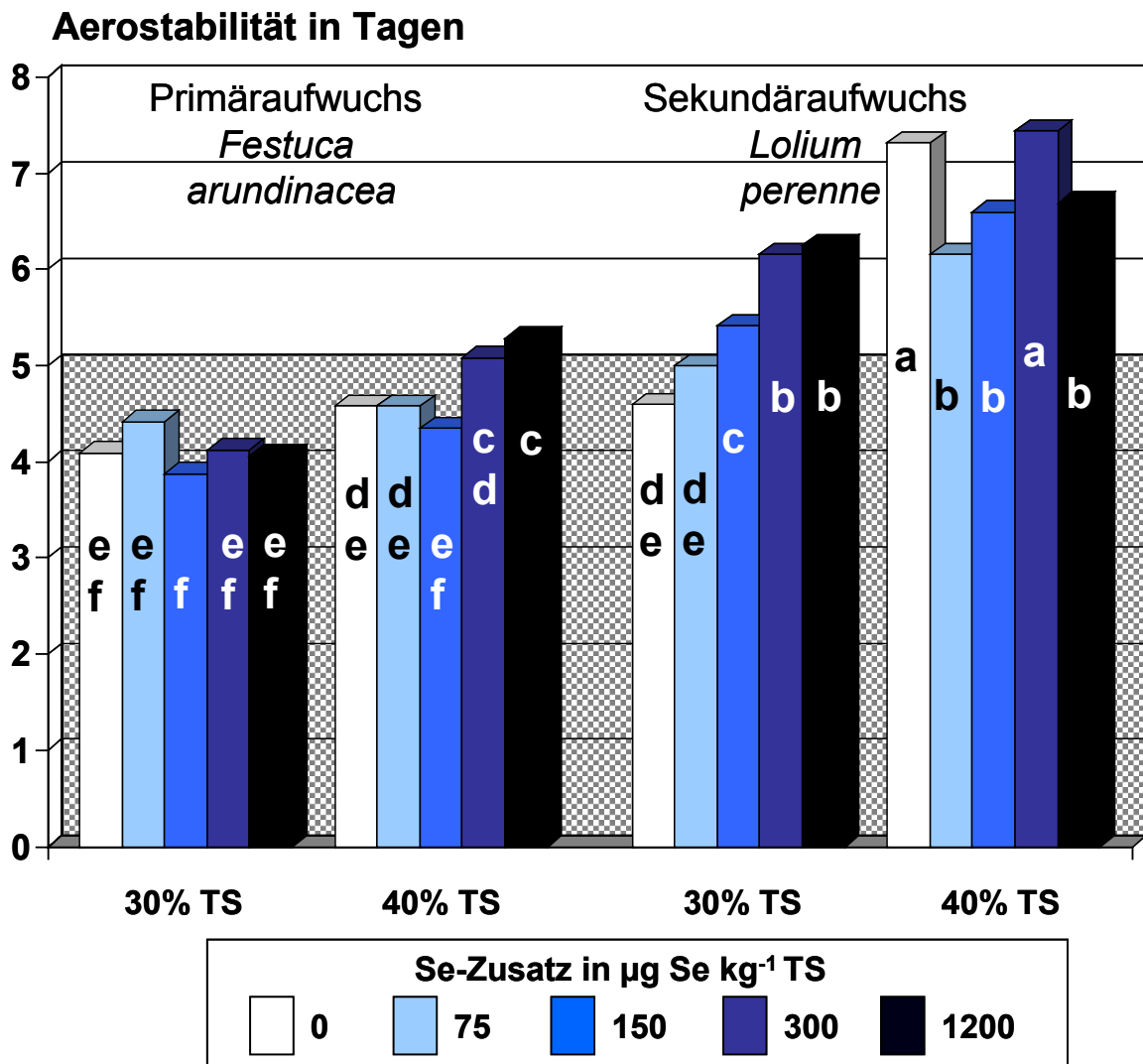
Variante ohne Selenzusatz; bei Zusatz von 150 bzw. 300  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS steigt der  $\text{NH}_3$ -Anteil am Gesamt-N-Gehalt bei 40 % TS-Gehalt zum Teil an, bei einem TS-Gehalt von 30% sind hingegen geringere Prozentwerte festzustellen. Diese Zusammenhänge spiegeln sich im Resultat der Varianzanalyse wider, vgl. Anhangtab. 54, in der nur die Interaktionen Vorwelkegrad x Se-Gabe, Vorwelkegrad x Aufwuchs sowie Se-Gabe x Aufwuchs als signifikant ausgewiesen sind.



**Abb. 31:**  $\text{NH}_3$ -Anteil in % am Rohprotein-N der Silagen in der TS in Abhängigkeit von Selenzusatz, Vorwelkegrad und Aufwuchs

Die Aerostabilität der Silagen ist in Abb. 32 wiedergegeben, vgl. Anhangtab. 53. Die auf der Ordinate verzeichneten Werte geben die Tage nach dem Öffnen des Laborsilos an, an denen die Erwärmung der Silage bei konstanter Umgebungstemperatur  $1^\circ\text{C}$  nicht überschreitet. Nach WYSS (1993) können Silagen als aerostabil bezeichnet

werden, wenn diese Temperaturerhöhung nicht vor dem fünften Tag eintritt. Die meisten Silagen mit dem Hauptbestandbildner *Festuca arundinacea* erreichen diesen Wert nicht, die Silagen aus dem von *Lolium perenne* dominierten Sekundäraufwuchs weisen in der Regel eine höhere Aerostabilität auf.



**Abb. 32:** Aerostabilität der Silagen in Tagen in Abhängigkeit von Selenatzusatz, Vorwelkegrad und Aufwuchs

Ein negativer Effekt auf die Aerostabilität durch die Selenatzusätze ergibt sich nicht. Lediglich bei dem Sekundäraufwuchs mit 40% TS erwärmen sich die Silagen mit Selenatzusätzen variantenabhängig etwas schneller, wobei diese Behandlungen stets über dem Richtwert von fünf Tagen liegen und damit ebenfalls als aerostabil zu bezeichnen sind. In einigen Fällen erwärmen sich mit Selenat angereicherte Silagen langsamer als die nichtbehandelten. Im Vergleich zu den dominierenden Varianzur-

---

sachen, den Faktoren Aufwuchs und Vorwelkegrad, und der weniger bedeutenden Interaktion Vorwelkegrad x Aufwuchs, haben der Faktor Se-Gabe und die Interaktionen Se-Gabe x Aufwuchs, Vorwelkegrad x Se-Gabe x Aufwuchs sowie Vorwelkegrad x Se-Gabe trotz ausgewiesener Signifikanz insgesamt nur einen geringen Anteil an der Gesamtvarianz, vgl. Anhangtab. 54.

## 5 Diskussion

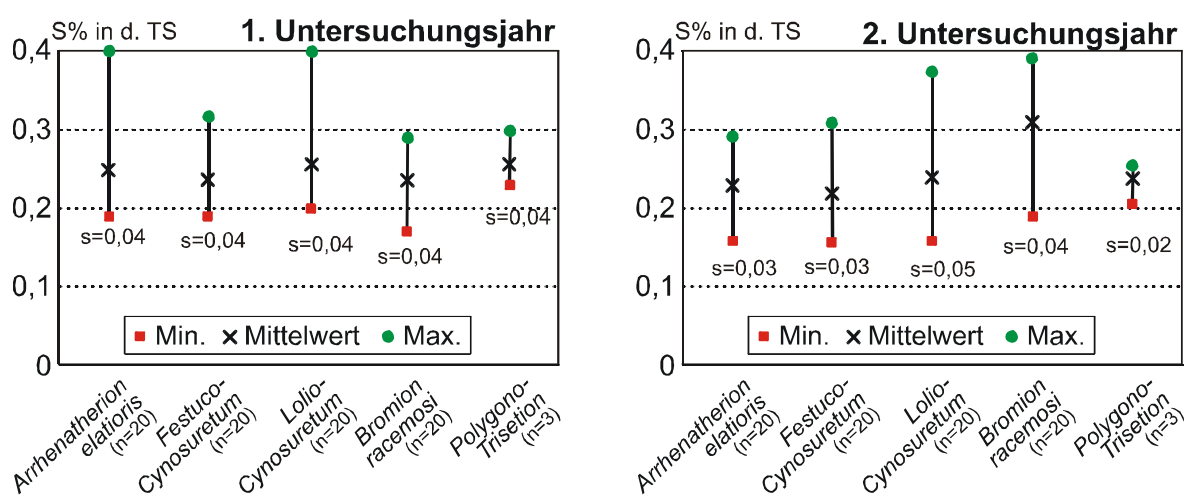
### 5.1 Selen und Schwefel

#### 5.1.1 Status quo

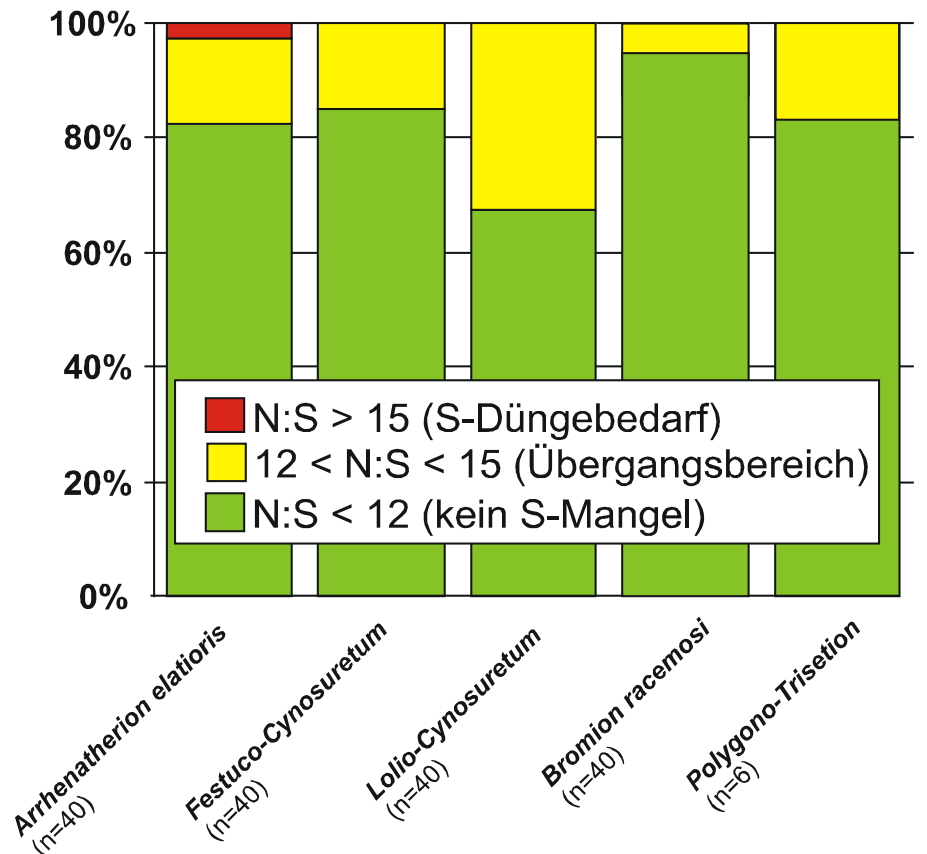
In der Literatur wird übereinstimmend  $100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  als Mindestbedarf für Wiederkäuer genannt (PATRIAS 1969, GISSEL-NIELSEN 1975a, b, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, BAHNERS 1987, CORAH 1996, UNDERWOOD & SUTTLE 1999). Dieser Wert deckt sich mit den Bedarfsnormen des National Research Council der USA für Schafe (ANONYMUS 1985) und Fleischrinder (ANONYMUS 1996). Die Analyse von 166 Pflanzenproben von 83 extensiv bewirtschafteten Grünlandflächen aus zwei Jahren zeigt, dass nahezu alle Werte unter dem Wert von  $100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  liegen, der offenbar eine ausreichende Se-Versorgung für Mutterkühe, Fleischrinder und Schafe gewährleistet (ANONYMUS 1985, 1996). Die Mehrzahl der Werte liegt dagegen  $< 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ , so dass die Gefahr von Mangelsituationen für Tiere, die ausschließlich mit Grünlandaufwüchsen und –konserven ernährt werden, beträchtlich ist. Damit können die Aussagen von HARTFIEL & BAHNERS (1986) bzw. BAHNERS (1987), deren Untersuchungen ohne eine Trennung zwischen intensiv und extensiv bewirtschaftetem Grünland deutschlandweit ausgerichtet sind, spezifisch für extensiv organisierte Grünlandsysteme bestätigt werden. Innerhalb der Untersuchungsregion muss daher von einem flächendeckenden Se-Mangel ausgegangen werden, weshalb sich eine Unterteilung in Se-Gehaltsklassen und eine weitergehende Cluster-Bildung erübrigt. Die Untersuchungsregion im Lahn-Dill-Bergland dient im Sonderforschungsbereich 299 als Modellregion für ein landwirtschaftlich benachteiligtes Gebiet in Mittelgebirgslagen (FREDE & BACH 2002). Die zweite Untersuchungsregion im östlichen Westerwald wurde zusätzlich eingeschlossen, um die Repräsentativität der Untersuchungen zu erhöhen. Die Auswahl der einzelnen Grünlandflächen innerhalb der beiden Regionen, die von verschiedenen Landwirten bewirtschaftet werden, ist unter der Vorgabe einer hohen Differenzierbarkeit erfolgt. Dementsprechend weisen die Untersuchungsflächen, bezogen auf Pflanzenbestand und Standortbedingungen ein hohes Maß an Variabilität auf, so dass ein breites Spektrum verschiedenster extensiv bewirtschafteter Grünlandbestände berücksichtigt wird. Damit ist die Übertragbarkeit der Resultate auf andere Regionen Deutschlands (OELSCHLÄGER & MENKE 1969, HARTFIEL & BAHNERS 1986, BAHNERS 1987, HEIKENS 1992, BRUß 1998) sowie weiterer



Länder, die ebenfalls durch Se-Mangel gekennzeichnet sind, vgl. Tab. 2, gegeben (GISSEL-NIELSEN et al. 1984, STÜNZI 1988, HAYGARTH et al. 1994, ŽUST et al. 1996). In Abb. 33 sind die Mittelwerte, Minima und Maxima der S-Konzentrationen der Aufwüchse von Flächen mit geringer Bewirtschaftungs- und Düngungsintensität nach Pflanzengesellschaften getrennt dargestellt. Es wird deutlich, dass kein eindeutiger Effekt der Pflanzengesellschaft auf die S-Konzentrationen nachweisbar ist. Lediglich die *Bromion racemosi*-Gesellschaften weisen im zweiten Untersuchungsjahr im Durchschnitt höhere S-Konzentrationen als die übrigen Gesellschaften auf. Der niedrigste Wert wird im zweiten Untersuchungsjahr mit 0,15 % in einem *Arrhenatherion elatioris* festgestellt. In keinem Fall wurde damit der Bereich von 0,11 bis 0,12 % S unterschritten, der nach dem National Research Council in den USA als adäquate Menge für die Versorgung heranwachsender Rinder genannt wird (ANONYMUS 1996). Aussagen über den Schwefelversorgungsstatus lassen sich aber besser über den N/S-Quotienten ableiten (SAALBACH 1972), der für die untersuchten Pflanzenproben beider Untersuchungsjahre in Abb. 34 wiedergegeben ist; hier sind die Häufigkeiten des Auftretens kritischer Werte abgebildet. Die Angaben über den Bereich, der die Wirksamkeit zusätzlicher Schwefelgaben anzeigt, variieren in der Literatur. SAALBACH (1972) sieht einen zusätzlichen Schwefelbedarf bei Quotienten > 12-14, WHITEHEAD (2000) nennt in Anlehnung an Untersuchungen von SYERS et al. (1987) Quotienten > 15 als kritischen Bereich für Gräser, weshalb in der Abb. 34 die Werte zwischen 12 und 15 als Übergangsbereich gekennzeichnet sind.



**Abb. 33:** Minimale, maximale und durchschnittliche S-Konzentrationen im Aufwuchs verschiedener Grünlandpflanzengesellschaften



**Abb. 34:** Häufigkeit des Über- und Unterschreitens des kritischen Bereichs für N/S - Quotienten im Aufwuchs zweier Untersuchungsjahre

Die N/S-Quotienten im Übergangsbereich treten am häufigsten auf *Lolio-Cynosuretum*-Beständen auf und sind überwiegend durch überdurchschnittlich hohe Rohprotein-Konzentrationen in den Aufwüchsen bedingt, vgl. Anhangtab. 9 und 10. Ein Wert von  $> 15$ , der eine S-Düngung als wirksame Maßnahme aus pflanzenphysiologischer Sicht empfehlen kann, tritt nur in einem einzigen Fall im zweiten Untersuchungsjahr in einem *Arrhenatherion elatioris* auf ( $N/S=15,6$ ). Bei intensiver Bewirtschaftungsweise mit hohen N-Gaben sind N/S-Quotienten  $> 15$  wesentlich häufiger anzutreffen, die sich auch durch Ertragseinbußen und höhere Nitrat-Gehalte im Gras bemerkbar machen können (TAUBE et al. 2000).

Ein N/S-Quotient von 15 entspricht dem S/N-Quotienten von 0,067 im tierischen Gewebe. Schwefelmangelsituationen beim Wiederkäuer sind offenbar zu erwarten, wenn dieses S/N-Verhältnis in Futtermitteln deutlich unterschritten wird (UNDERWOOD & SUTTLE 1999). Demzufolge ist das Risiko eines Schwefelmangels bei extensiven Tierhaltungsformen auf Dauergrünland weder bezogen auf die Versorgung des Pflanzenbestands noch auf die Versorgung der Weidetiere als hoch einzustufen.

### 5.1.2 Einflussfaktoren

Die Se-Konzentration in Grünlandaufwüchsen wird offenbar maßgeblich durch den **Jahresverlauf** bestimmt. GISSEL-NIELSEN (1975a) stellt anhand 320 Proben von Grünlandaufwüchsen dänischer Betriebe fest, dass die Se-Konzentrationen insgesamt im Zeitraum zwischen März und Juni drastisch abnehmen, im Sommer auf niedrigem Niveau bleiben und erst ab Herbst wieder zunehmen. Besonders in Monaten mit hohen Zuwachsraten sind geringe Se-Konzentrationen zu erwarten (GISSEL-NIELSEN 1993). Entsprechend werden auch im Zeitreihenexperiment, vgl. 4.2, zur Nutzung Mitte Mai in der Regel die niedrigsten Se-Konzentrationen festgestellt. Damit ist das Risiko von Se-Mangelercheinungen gerade in einem futterbaulich bedeutsamen Jahresabschnitt am größten, in dem hohe Zuwachsraten zu verzeichnen sind und große Teile des Frischfutters und der Konserven, vor allem Silage, produziert werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, abweichend von älteren Untersuchungen (GISSEL-NIELSEN 1975a), dass die Se-Konzentrationen in Folgeaufwüchsen bereits im Juni wieder ansteigen können. Hingegen unterscheiden sich die Se-Konzentrationen nicht, wenn lediglich die Nutzung des Primäraufwuchses verschoben wird. OPITZ v. BOBERFELD (2001a) vergleicht die Se-Konzentrationen von sechs unterschiedlichen Primäraufwüchsen zum Nutzungstermin Mitte Mai mit den Mitte Juli geernteten ersten Aufwüchsen derselben Standorte und stellt dabei keine Unterschiede zwischen den physiologisch jüngeren und älteren Aufwüchsen fest. Bezogen auf die Se-Konzentrationen zu verschiedenen Entwicklungsstadien lässt sich daher folgern, dass junge Grünlandbestände vor dem Schossen, also bevor der Großteil der Biomasse gebildet wird, noch vergleichsweise hohe Se-Konzentrationen aufweisen (GISSEL-NIELSEN 1975a), die im Laufe der Pflanzenentwicklung abnehmen und sich mit zunehmender Seneszenz auf gleichbleibendem Niveau halten. Wie stark die Abnahme im Wachstumsverlauf ausfällt, hängt dabei offenbar auch von den Zuwachsraten je Zeiteinheit ab. Dieser Umstand ist eine mögliche Ursache für das unterschiedliche Se-Niveau in den Aufwüchsen zur 20. und 38. Woche des Jahres 2000 trotz vergleichbarer TS-Erträge, vgl. Abb. 14 auf S. 70. Aufgrund des Schosseffekts werden im Mai bis Juni die größten täglichen Zuwachsraten erreicht (OPITZ v. BOBERFELD 1994), so dass davon auszugehen ist, dass große Teile des TS-Ertrages in der 20. Woche innerhalb weniger Tage gebildet werden, während der TS-Ertrag in der 38. Woche ein Produkt eines sechswöchigen Zeitraums ist. Lange Wachstumsphasen mit mäßigen **Zuwachsraten** wirken sich also offenbar günstig auf die Se-

Konzentrationen im Aufwuchs aus. Mit einer Ausnahme im Oktober 2000 liegen aber alle im Zeitreihenexperiment gemessenen Se-Konzentrationen deutlich  $< 100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ , vgl. Anhangtab. 14, und reichen demzufolge zu keiner Jahreszeit zur sicheren Versorgung von Wiederkäuern mit diesem Spurenelement aus.

Eine direkte Beziehung zwischen den jahreszeitbezogenen Verläufen von **TS-Ertrag** und Se-Konzentration im Aufwuchs lässt sich nicht belegen. Dagegen ist eine Beziehung zwischen S-Aufnahme durch die Pflanze und den TS-Erträgen im jahreszeitlichen Verlauf offensichtlich, weshalb ein Verdünnungseffekt zu vermuten ist, vgl. Abb. 16 auf S. 72.

Die ähnlichen chemischen Eigenschaften von Se und S lassen den Schluss zu, dass bei vielen Prozessen eine Beziehung zwischen beiden Elementen existiert, vgl. Kap. 2.1.1. Bezogen auf die gegenseitige Beeinflussung der Elemente bei der Aufnahme durch die Pflanze ist bekannt, dass eine S-Gabe bei vergleichsweise hohen Se-Konzentrationen in der Pflanze einen **antagonistischen Effekt** fördern kann (SPENCER 1982, MILCHUNAS et al. 1983, ARTHUR et al. 1993, MURPHY & QUIRKE 1997, WU 1998, HOPPER & PARKER 1999). In Untersuchungen von MILCHUNAS et al. (1983) an Weidepflanzen in einem Se-Mangelgebiet der Prärie von Montana ergeben sich nur im Vergleich Se-gedüngter Bestände signifikant reduzierte Se-Konzentrationen infolge einer S-Gabe, während ausgehend von den natürlichen Se-Konzentrationen kein negativer Effekt der S-Gabe festzustellen ist. Auch andere Studien belegen, dass anhand von Aufwüchsen mit Se-Konzentrationen  $< 100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  kein Se/S-Antagonismus belegbar ist (OPITZ v. BOBERFELD 2000, 2001a, 2002a, TAUBE et al. 2000). Das bestätigt sich auch in der Gegenüberstellung der Se- und S-Konzentration der Aufwüchse von 83 Standorten aus zwei Jahren. Die Korrelationsanalyse, vgl. Anhangtab. 15, weist keine signifikante Beziehung zwischen den beiden Größen aus. Standortbedingungen, die zu vergleichsweise hohen S-Konzentrationen im Aufwuchs führen, bewirken nicht zwingend unterdurchschnittliche Se-Konzentrationen im Aufwuchs. Bezogen auf die S- und Se-Gehalte des Bodens liegen nur Daten für die Gesamtkonzentrationen vor. Die Verhältnisse der pflanzenverfügbaren Se- und S-Anteile sind nicht bekannt, da eine entsprechende Fraktionierung der Se-Mengen im Boden mit hohem Aufwand verbunden ist (HAMDY & GISSELNIELSEN 1976b, MANTGEM et al. 1996) und die Durchführung einer solchen Maßnahme nur einen begrenzten Informationsgewinn bezogen auf die Se-Aufnahme erwarten lässt (MANTGEM et al. 1996). Allerdings lässt die Gegenüberstellung des Verhält-

nisses von Se-Konzentration in der Pflanze / Se-Gehalt im Boden ( $= \text{Se}_{\text{Pflanze}} / \text{Se}_{\text{Boden}}$ ) und des Verhältnisses S-Konzentration in der Pflanze / S-Gehalt im Boden ( $= \text{S}_{\text{Pflanze}} / \text{S}_{\text{Boden}}$ ) vermuten, dass der S-Pool weitaus effizienter von Pflanzen genutzt wird als der Se-Pool. Die S-Konzentrationen in der Pflanze sind bis zu zehnfach höher als die S-Gehalte im Boden, während die Se-Konzentrationen in der Pflanze zum Teil weniger als 2 % des Se-Gehaltes des Bodens betragen. Wenn auch dabei zu berücksichtigen ist, dass sowohl S als auch Se nicht ausschließlich über die Wurzel aufgenommen wird, sondern auch als  $\text{SO}_2$  (MILCHUNAS et al. 1983, MENGEL 1991) bzw. in gasförmigen Se-Verbindungen (HAYGARTH et al. 1994) über die Stomata, so ist angesichts der auf allen Flächen vorhandenen enormen Größenunterschiede der Quotienten nicht auszuschließen, dass eine flächendeckende Imbalance zwischen verfügbarem S und Se im Boden eine von mehreren möglichen Ursachen für die durchweg niedrigen Se-Konzentrationen im Aufwuchs sein könnte. Die unzureichende Zahl von Aufwüchsen mit Konzentrationen  $> 100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ , die als Referenz dienen könnten, erlaubt weder die Bestätigung noch ein Verwerfen dieser Hypothese.

Eine direkte Beeinträchtigung der Se-Aufnahme zugunsten einer höheren S-Aufnahme lässt sich jedoch auch anhand der Se- und S-Konzentrationen in Aufwüchsen eines einzelnen Standortes im Verlauf der Vegetationsperiode nicht belegen, vgl. Abb. 15 auf S. 71. Im zweiten Jahr deutet sich sogar eine positive Korrelation zwischen S- und Se-Aufnahme an. Für eine einseitige Abhängigkeit der Se-Aufnahme von der S-Konzentration in der Pflanze bei den hier vorliegenden Größenverhältnissen spricht der Umstand, dass sowohl die Sulfat- als auch die Selenataufnahme über die Wurzel durch die Sulfatpermease beeinflusst wird, deren Aktivität von der S-Konzentration in der Pflanze abhängig ist (TERRY et al. 2000). Somit wird bei niedrigen S-Konzentrationen sowohl die Sulfat- als auch die Selenat-Aufnahme angeregt, vorausgesetzt, Selenat ist im durchwurzelten Boden verfügbar. Die Selenat-Gehalte können jahreszeitabhängig variieren, z.B. durch einen Wechsel der hydrologischen Verhältnisse und der damit verbundenen **Redox-Bedingungen** (GEERING et al. 1968, ELRASHIDI et al. 1989, MASSCHELEYN et al. 1990, SPOSITO et al. 1991). Bei dem Boden des Versuchsstandortes, vgl. Kapitel 3.2, handelt sich um einen Pseudogley, der meist noch über weite Teile des Frühjahrs wassergesättigt ist. Unter den zu diesem Zeitpunkt reduzierenden Verhältnissen ist von einer verminderten Verfügbarkeit von Se für Pflanzen auszugehen, da der verfügbare Anteil des Se

im Boden immobilisiert wird (SPOSITO et al. 1991). Dagegen können die anschließenden oxidierenden Verhältnisse zu einer Freisetzung leicht pflanzenverfügbarer Se-Formen, vor allem Selenat führen (BLAYLOCK & JAMES 1994, DOWDLE & OREMLAND 1998, TENNANT & WU 2000). Dieser Prozess ist offenbar auch eine der Ursachen für die ansteigenden Se-Konzentrationen im Verlauf der Vegetationsperiode. Da S aber leichter oxidierbar ist als Se, ist davon auszugehen, dass schon große Teile des S im Boden als Sulfat verfügbar sind, wenn Se noch überwiegend in reduzierter Form vorliegt (NEAL 1995). Im Jahr 1999, in dem keine positive Korrelation zwischen den Se- und S-Konzentrationen messbar ist, deutet sich eine verzögerte Mobilisierung von Se im Vergleich zu S anhand der jeweiligen Element-Konzentrationen im Pflanzenmaterial an, vgl. Abb. 15, S. 71. Der ansonsten durchaus ähnliche Kurvenverlauf unterscheidet sich vor allem dadurch, dass die Minima und Maxima der Se-Kurve jeweils auf der Zeitachse verschoben auftreten. Der Übergang von reduzierenden zu oxidierenden Verhältnissen kann möglicherweise zu einer verstärkten Se-Aufnahme und höheren Se-Konzentrationen in der Pflanze führen (BLAYLOCK & JAMES 1994). Insgesamt ist die Gegenüberstellung der Verlaufskurven der Se- und S-Konzentrationen im Verlauf der Vegetationsperiode durch den Ausschluss der standortbedingten Variabilität ein geeigneter Ansatz, die gegenseitige Beeinflussung von Se und S bei der Aufnahme durch die Pflanze bei niedrigem Se-Niveau zu erfassen. Die Zunahmeraten der Konzentrationen, die im Verlauf der Vegetationsperiode - bezogen auf die erste Nutzung - im Falle von S zeitweise 100 % betragen, werden auch in der Betrachtung der Se-Konzentrationen erreicht und zum Teil überschritten. Daher lässt sich eine Diskriminierung von Se gegenüber der Aufnahme von S bei den gegebenen Relationen verfügbarer Se- und S-Mengen weitestgehend ausschließen. Die Ursachen für die geringe relative Aufnahme von Se ( $= \text{Se}_{\text{Pflanze}} / \text{Se}_{\text{Boden}}$ ) sind somit wahrscheinlich nicht in der bevorzugten Aufnahme von S zu sehen. Dafür spricht auch die Tatsache, dass eine S-Düngung ohne Se-Gabe offenbar keinen Effekt auf die Se-Konzentrationen im Aufwuchs hat (MILCHUNAS et al. 1983, TAUBE et al. 2000). Bei der Verwendung eines S-Düngers mit niedrigem Se-Gehalt muss allerdings davon ausgegangen werden, dass das S/Se-Verhältnis im Aufwuchs geweitet wird, was wiederum nach Aufnahme durch Wiederkäuer eine verringerte Sorption von Se im Verdauungstrakt bewirken könnte. So wird beispielsweise beim Schaf die Selenat-Aufnahme in die Dünndarmmukosa durch Sulfat bzw. Thiosulfat gehemmt (ARDÜSER et al. 1986, WOLFFRAM 1991). Deshalb ist nicht auszuschließen, dass Sulfat-Gaben

Se-Mangelsituationen verschärfen. Um dieses Risiko auszuschließen, sollten S-Düngungsmaßnahmen auf extensiv bewirtschaftetem Grünland nur in begründeten Ausnahmen durchgeführt werden. Obwohl S- wie Se-Emissionen in Europa in den letzten Jahren stark rückläufig sind und damit Depositionen als S-Quelle für Grünland immer mehr an Bedeutung verlieren, vgl. Kapitel 2.3, dürfte die Wirtschaftlichkeit von S-Gaben in Low-Input-Systemen gering sein und pflanzenbaulich besteht hier offenbar bislang in der Regel auch keine Notwendigkeit von S-Gaben, vgl. Kapitel 5.1.1.

Die Bewertung des Einflusses von Bodeneigenschaften auf die Se-Konzentrationen im Aufwuchs anhand der Ergebnisse der Status quo-Analyse erweist sich als problematisch. Die überwiegende Zahl der Erkenntnisse aus bisherigen Untersuchungen zum Einfluss von Bodeneigenschaften auf die Se-Verfügbarkeit, in denen besonders dem pH-Wert, dem Gehalt organischer Substanz, der Bodenart, dem Gehalt an Metalloxiden sowie der Hydrologie besondere Bedeutung zugemessen wird, vgl. Kapitel 2.1.2, basiert auf faktoriellen Versuchen auf einzelnen Standorten oder Gefäß- bzw. Laborexperimenten (ABU-ERREISH et al. 1968, HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1976b, YLÄRANTA 1982, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, MARCY et al. 1989, SPOSITO et al. 1991, GARBISU et al. 1996, DOWDLE & OREMLAND 1998, STOLZ & OREMLAND 1999, LIN & TERRY 2003), die der Komplexität der Zusammenhänge nur eingeschränkt Rechnung tragen. Der multivariate Modellansatz von BARROW & WHELAN (1989a, b) befasst sich ausschließlich mit Transformationsprozessen von Se in Bodensystemen und vernachlässigt von der Vegetation ausgehende Interaktionen. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die experimentellen Arbeiten überwiegend auf Se-reiche Medien beziehen oder abgestufte Se-Gaben beinhalten, so dass sich die Relevanz der Bodeneigenschaften für die Se-Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen in Se-armen Ökosystemen nur bedingt abschätzen lässt. Im hier gewählten Ansatz, die Se-Konzentrationen in Aufwüchsen und Böden extensiv bewirtschafteten Grünlandes den jeweiligen Standortfaktoren gegenüberzustellen, zeigt sich, dass sich die Mehrzahl der Faktoren, die sich nach bisherigen Erkenntnissen positiv auf die Se-Gehalte in den Pflanzen auswirken, letztlich ohne signifikanten Einfluss auf das Se-Niveau sind. In Anhangtab. 12 sind die Koeffizienten der bivariaten Korrelationsanalyse nach Pearson für die Beziehungen zwischen Se-Konzentration im Aufwuchs und verschiedenen Bodeneigenschaften dargestellt. Bisherige Publikationen belegen einen signifikanten Einfluss der Bodenreaktion auf die Pflanzenverfügbarkeit von Se und letztlich auf die Se-Konzentrationen im Aufwuchs (CARY et al. 1967, CARY & ALLAWAY

1969, GISSEL-NIELSEN 1971, HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1976b, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, SPOSITO et al. 1991, GISSEL-NIELSEN 1993) und geben Anlass zu der Vermutung, dass pH-Wert und Se-Konzentration im Aufwuchs positiv korreliert sind. Tatsächlich weist die Korrelationsanalyse in beiden Jahren eine signifikante negative Korrelation aus, der aber aufgrund der Korrelationskoeffizienten von  $r = -0,25$  bzw.  $r = -0,22$  nur geringe Bedeutung beizumessen ist. Die negative Korrelation ergibt sich wahrscheinlich aus der Interaktion weiterer Faktoren, auf die in einem späteren Abschnitt im Zusammenhang mit den niedrigen Se-Konzentrationen der *Lolio-Cynosureten* detailliert eingegangen wird. Aufgrund des generell niedrigen Se-Niveaus sind auch bei vergleichsweise hohem pH-Wert (= bis pH 6,0) in der Regel nur geringe Se-Konzentrationen im Aufwuchs festzustellen, wobei die fehlende Korrelation zwischen Se-Gehalt des Bodens (= weite Variationsbreite) und der Se-Konzentration im Aufwuchs (= geringe Variationsbreite) nicht mit einem grundsätzlichen Se-Mangel im Boden erklärbar ist.

Die **organische Substanz** spielt für den Se-Haushalt im System Boden/Pflanze offenbar eine zentrale Rolle. Der absolute Se-Gehalt des Bodens ist positiv korreliert mit dem C-Gehalt, vgl. Abb. 10 auf S. 67, was auch durch Untersuchungen von BRUß (1998) belegt wird. Es ist davon auszugehen, dass hohe Anteile des Se im Boden Bestandteil der organischen Substanz sind und größtenteils erst in Abbauprozessen pflanzenverfügbar werden. Überwiegend bleibt Se jedoch längerfristig Bestandteil komplexerer organischer Verbindungen, die nicht von der Pflanze aufgenommen werden (HODGSON 1963, LEVERESQUE 1974, GISSEL-NIELSEN et al. 1984). Jedoch zeigt sich, dass es unzulässig ist, im Umkehrschluss aus niedrigen Gehalten organischer Substanz im Boden höhere Se-Konzentrationen im Aufwuchs zu folgern. In Anhangtab. 12 wird deutlich, dass zwischen C-Gehalt im Boden und Se-Konzentration im Aufwuchs keine negative Korrelation besteht, im zweiten Jahr ergibt sich sogar eine schwache positive Korrelation, die jedoch zu vernachlässigen ist. Grundsätzlich stellen auch **Pflanzenbestandsmerkmale** offenbar keine geeigneten Parameter zur Prognose von Se-Konzentrationen im Aufwuchs dar. In neueren Untersuchungen, deren Ergebnisse auf Se-Analysen mit AAS-Hybrid-Methoden basieren, hat sich gezeigt, dass im Vergleich der Se-Konzentrationen einzelner **Grünlandpflanzenarten** bei einem Niveau  $< 100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  zwischen den einzelnen Arten bzw. zwischen den drei **Artengruppen** - Gräser, Leguminosen und sonstigen Kräutern - keine signifikanten Unterschiede auftreten (STÜNZI 1988, GUPTA &



MACLEOD 1994, GUPTA 1995, OPITZ v. BOBERFELD 2002a). Die Ergebnisse von DAVIES & WATKINSON (1966), denen zufolge auch bei niedrigen Se-Gehalten im Boden zwischen 300 und 380  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  Boden-TS Unterschiede in den Se-Konzentrationen verschiedener Grünlandarten messbar sind, müssen angesichts der nachfolgenden Fortschritte in der Analysetechnik und der damit höheren Messgenauigkeit (GISSEL-NIELSEN et al. 1984) in Frage gestellt werden. Bisherige Untersuchungen zu artbedingten Effekten auf die Se-Konzentrationen auf Se-Mangelstandorten beziehen sich jedoch auf die Se-Konzentrationen ausgewählter Arten einzelner Standorte.

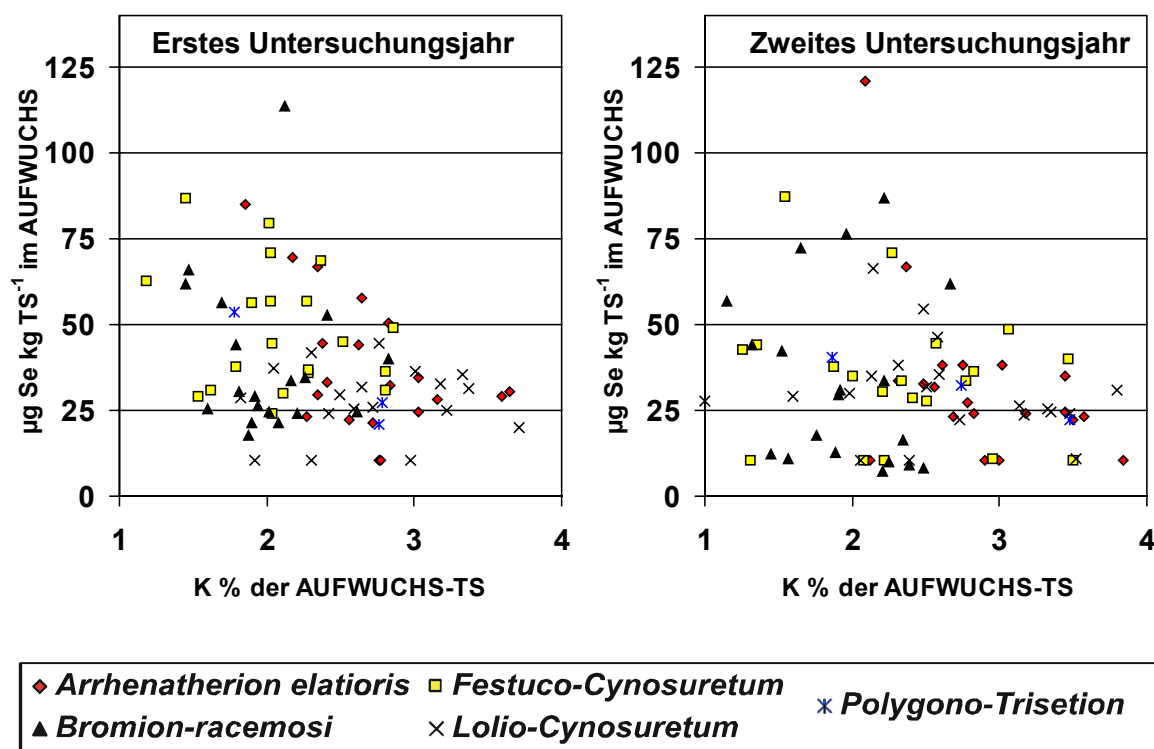
Der Ansatz, die Se-Konzentrationen von **Pflanzengesellschaften** unterschiedlicher Standorte zu vergleichen, lässt eine höhere Differenzierbarkeit erwarten, da mit der Einteilung in pflanzensoziologische Einheiten nicht nur bezogen auf das Arteninventar ansatzweise homogene Gruppen gebildet werden, sondern auch bis zu einem gewissen Grad, bezogen auf Nutzungs- und Bewirtschaftungsintensität sowie Standortbedingungen, voneinander abgrenzbare Einheiten verglichen werden können. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass wenig generalisierbare Aussagen zu den Se-Konzentrationen einzelner Pflanzengesellschaften möglich sind. Im Vergleich der Se-Konzentrationen der Aufwüchse verschiedener Grünland-Pflanzengesellschaften im Lahn-Dill-Bergland und Westerwald heben sich nur wenige Se-Werte von dem insgesamt niedrigen Niveau ab; eine Clusteranalyse erübrigt sich folglich. Die wenigen Konzentrationen  $> 50 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS verteilen sich auf alle Gesellschaften und die Mittelwerte unterscheiden sich in der Regel nicht, mit Ausnahme der Se-Konzentrationen in *Lolio-Cynosureten* im ersten Untersuchungsjahr, die niedriger sind als die Konzentrationen in Aufwüchsen der *Festuco-Cynosuretum*- und der *Bromion racemosi*-Gesellschaften, vgl. Abb. 6 auf S. 64. Das *Lolio-Cynosuretum* kann definiert werden als leistungsfähiger Weidebestand hoher Futterqualität bei guter Wasser- und Nährstoffversorgung unter halbintensiver bis sehr intensiver Nutzung (DIERSCHKE 2002). Die Flächen der Untersuchungsregion werden von extensiv organisierten Betrieben bewirtschaftet, doch *Lolio-Cynosureten* sind überwiegend auf Standorten mit günstigeren Wachstumsbedingungen zu finden und sind entweder in der Vergangenheit intensiver bewirtschaftet worden bzw. werden noch halbintensiv bewirtschaftet. Verglichen mit zeitnah Mitte Mai geernteten Primäraufwüchsen von *Arrhenatherion elatioris*-, *Festuco-Cynosuretum*-, *Polygono-Trisetion*- und *Bromion racemosi*-Beständen, sind hier *Lolio-Cynosuretum*-Bestände durch die höchsten Er-

träge gekennzeichnet (STERZENBACH 2000), was offenbar mit dem unterschiedlichen N-Düngungsniveau zu erklären ist. Bei mehreren Spitzenwerten von  $> 50$  und in einem Fall  $> 100 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS handelt es sich um *Bromion racemosi*-Gesellschaften auf grundwasser- bzw. staunässebeeinflussten Standorten mit Pseudogley- oder Gleyböden. Auch bei den jeweils höchsten Se-Konzentrationen in Aufwüchsen der *Arrhenatherion elatioris*-, *Festuco-Cynosuretum*- oder *Lolio-Cynosuretum*-Bestände handelt es sich um wechselfeuchte Standorte mit hohen Stetigkeiten von Kennarten der Feuchtwiesen. Betrachtet man jedoch die Ergebnisse der Se-Konzentrationen der 20 *Bromion racemosi*-Flächen, die übereinstimmend unter dem Einfluss wechselnder hydrologischer Verhältnisse stehen, wird deutlich, dass derartige Bedingungen nicht zwangsläufig höhere Se-Konzentrationen mit sich bringen. Auch innerhalb dieser Gesellschaft decken die Se-Konzentrationen überwiegend nicht den Bedarf von Wiederkäuern. Dabei kann in einigen Fällen der Erntezeitpunkt Mitte Mai eine Rolle gespielt haben, da die Böden vieler *Bromion racemosi* zu dieser Zeit in manchen Jahren noch wassergesättigt sind. Auf diesen jahrabhängigen Effekt deuten bei einigen Flächen auch die abweichenden Ergebnisse der Se-Analysen des ersten und zweiten Untersuchungsjahres hin, vgl. Anhangtab. 9. In diesem Fall ist zu erwarten, dass die oxidierenden Verhältnisse mit der nachfolgenden Mobilisierung von Se (BLAYLOCK & JAMES 1994) erst zu einem späteren Zeitpunkt wirksam werden und Se aufgrund anhaltender reduzierender Verhältnisse bis zur Nutzung Mitte Mai in nicht pflanzenverfügbaren Formen vorliegt, womit zu erwarten ist, dass im Aufwuchs sogar niedrigere Se-Konzentrationen vorliegen als in Beständen auf drainierten Böden. Bei anderen *Bromion racemosi*-Beständen ist aber auch feststellbar, dass nur vergleichsweise geringe absolute Se-Gehalte im Boden vorhanden sind, so dass auch Bedingungen, welche die Verfügbarkeit von Se prinzipiell begünstigen, nicht zu einer entscheidenden Erhöhung der Se-Konzentration im Aufwuchs führen. Die Se-Konzentrationen in den Böden dieser Gesellschaft variieren zwischen 325 und 864  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  Boden TS, vgl. Anhangtab. 11.

Die hydrologischen Verhältnisse der Gley- bzw. Pseudogleyböden und die damit verbundenen Redox-Bedingungen können also in mehreren Fällen ein Erklärungsansatz für im Vergleich aller Standorte überdurchschnittliche Se-Konzentrationen in Aufwüchsen sein, aber keineswegs eine ausreichende Se-Versorgung von Wiederkäuern mit dem Aufwuchs sicherstellen. Damit eignet sich weder die botanische Bestandsaufnahme von Kennarten der Feuchtwiesen noch die Typisierung des Bodens

als Instrument zur Prognose der Se-Konzentrationen im Aufwuchs. Ohnehin sind wechselfeuchte Grünlandflächen für eine Beweidung nur eingeschränkt geeignet, weil zeitweilige Vernässung zu Narbenschäden und gesundheitlichen Problemen bei den Weidetieren führen können (OPITZ v. BOBERFELD 1994).

Neben der botanischen Zusammensetzung der Aufwüchse kommt prinzipiell auch deren **chemische Zusammensetzung** als Einflussfaktor für die Se-Konzentrationen in Betracht. Die Bedeutung der S-Konzentrationen wird in diesem Zusammenhang im weiteren Verlauf dieses Kapitels diskutiert. Darüber hinaus sind Wechselwirkungen mit anderen Mengenelementen (= Ca, Mg, Na, K, P) nicht grundsätzlich auszuschließen. Insbesondere lässt sich außerdem ein Zusammenhang zwischen Se-Konzentrationen und Rohprotein-Konzentrationen sachlogisch ableiten, da offenbar große Teile des pflanzlichen Se als Bestandteil von Proteinen vorliegen. Für die futterbauliche Bewertung ist es ferner unerlässlich, die Se-Konzentrationen vor dem Hintergrund der Energiedichten zu betrachten. Die Koeffizienten für die Korrelationen zwischen Se-Konzentration im Aufwuchs und ausgewählten futterbaulichen Eigenschaften sind in Anhangtab. 13 angegeben. Hieraus wird für die Se-Konzentration in beiden Jahren eine schwache negative Korrelation zur K-Konzentration sowie zur Energiedichte ersichtlich. Abb. 7 auf S. 65 ist zu entnehmen, dass die Korrelation zum Teil dadurch verursacht wird, dass *Lolio-Cynosuretum*-Aufwüchse überdurchschnittlich hohe Energiedichten, vgl. Anhangtab. 10, aber nur wenige Se-Konzentrationen  $> 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ , vgl. Anhangtab. 9, aufweisen.



**Abb. 35:** Gegenüberstellung von K- und Se-Konzentration im Aufwuchs extensiv bewirtschafteter Grünlandstandorte

Energiedichten  $> 10 \text{ MJ ME kg}^{-1} \text{ TS}$  sind auch bei den übrigen Pflanzengesellschaften bis auf eine Ausnahme mit Se-Konzentrationen  $< 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  verbunden. Es handelt sich oft um Bestände mit hohen Anteilen wertvoller Futtergräser, die auf eine vergleichsweise hohe Bewirtschaftungsintensität hindeuten. Die Gegenüberstellung von Se- und K-Konzentration, vgl. Abb. 35, ergibt eine vergleichbare Punktverteilung mit wahrscheinlich ähnlichen Ursachen. In der Regel handelt es sich bei den Aufwüchsen mit hohen K-Konzentrationen wiederum um intensiver bewirtschaftete und besser mit Nährstoffen (= Rindergülle) versorgte Standorte. Für das erste Jahr wird überdies die Korrelation zwischen Se- und Rohprotein-Konzentration, vgl. Abb. 8 auf S. 66, als schwach gesichert ausgewiesen, die aber zu vernachlässigen ist. Gleiches gilt für die schwache Korrelation zwischen Se- und Mg-Konzentration im zweiten Jahr.

Das insgesamt niedrige Niveau der Se-Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen lässt generell aufgrund der geringen Differenzierbarkeit der Se-Konzentration im Aufwuchs keine multivariaten Analysemethoden zu, die für sichere Schlussfolgerungen zur Relevanz der einzelnen Bodeneigenschaften oder Pflanzenbestands-

merkmale für den Se-Transfer im System Boden/Pflanze notwendig wären. Eine Prognose des Se-Niveaus in einzelnen Grünlandaufwüchsen auf Basis von Pflanzenbestandsaufnahmen oder Bodenanalysen der jeweiligen Standorte ist damit nicht durchführbar. Offensichtlich kann von einem generellen Mangel an pflanzenverfügbarem Se im Boden ausgegangen werden. Faktoren, die die Pflanzenverfügbarkeit von Se im Boden positiv beeinflussen - wie hoher pH, geringe Anteile an organischer Substanz, Ton und Eisenoxiden und oxidierende Verhältnisse - erhöhen in humiden Regionen die Auswaschungsgefährdung, so dass in Mitteleuropa offenbar für Se-Mangel standortabhängig zwei Prozesse relevant sind: die Se-Verarmung der Böden und die Fixierung an Bodenbestandteile. Die Ursachen für die **Se-Verarmung** sind geringe Se-Konzentrationen im Ausgangsgestein und die damit verbundene geringe Se-Nachlieferung (GISSEL-NIELSEN et al. 1984) sowie Se-Verluste durch Auswaschung (YLÄRANTA 1982, FIO et al. 1991) und entweichende Se-haltige Gase (HAMDY & GISSEL-NIELSEN 1976a, 1977, NEAL & SPOSITO 1991, HAYGARTH et al. 1994, ZHANG & FRANKENBERGER 1999). Wie bei vielen anderen Spurenelementen ist jedoch vor allem davon auszugehen, dass Se-Entzüge mit dem Erntegut auf landwirtschaftlich genutzten Flächen von der Se-Rückführung durch Ernterückstände sowie Kot und Harn der Nutztiere nicht ausgeglichen werden. Der Einsatz mineralischer Dünger, die in Europa bislang in der Regel nur geringe Se-Konzentrationen aufweisen (GISSEL-NIELSEN 1971, ADRIANO 1986, WHITEHEAD 2000), kann dabei häufig die negative Se-Bilanz nicht ausgleichen, insbesondere da davon auszugehen ist, dass der damit verbundene Mehrertrag zu höheren Se-Entzügen führt. Auf Basis dieser Hypothese lässt sich folgern, dass die Wahrscheinlichkeit überdurchschnittlicher Se-Konzentrationen im Aufwuchs bei intensiver Grünlandbewirtschaftung ohne begleitende Se-Supplementierung eher noch geringer ist als bei extensiver Bewirtschaftungsweise. Als ein Indiz für diese Schlussfolgerungen kann die im Vergleich zu anderen Pflanzengesellschaften geringe Anzahl von *Lolio-Cynosuretum*-Aufwüchsen bzw. sonstigen Beständen mit wertvollen Futtergräsern mit Konzentrationen  $> 50 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  gelten, vgl. Anhangtab. 9.

Offenbar werden Se-Verluste aus dem Boden zum Teil durch Se-Depositionen von Rückständen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe kompensiert (HAYGARTH et al. 1993, HAYGARTH 1994). Aufgrund steigender Standards der Umwelttechnik sind die Se-Emissionen seit mehreren Jahren jedoch stark rückläufig, vgl. Kapitel 2.2.1. Daher ist zu erwarten, dass sich die Se-Mangelsituation in Zukunft verschärft, wenn

keine Se-Supplementierung im System Boden/Pflanzenbestand/Weidetier durchgeführt wird. Bei der Milchkuhhaltung hat sich die direkte Se-Supplementierung bewährt, indem die Rationsgestaltung üblicherweise Se-angereichertes Mineralfutter beinhaltet. Es besteht in intensiv organisierten Stallsystemen folglich meist kein Bedarf, alternative Methoden der Se-Supplementierung anzuwenden. Unter Low-Input-Bedingungen, die für die Rentabilität von Mutterkuh- und Fleischrinderhaltung in extensiven Weidesystemen Voraussetzung sind, ist eine direkte rationierte Se-Supplementierung auf diesem Wege aus den in Kapitel 2.4.2 angeführten Gründen jedoch nicht praktikabel. Die Applikation von Se-Injektionen und Präparaten, die intraruminal Se freisetzen, sind mit zusätzlichen Material- und Arbeitskosten verbunden. „Free-Choice“-Verfahren (MCDOWELL 1996), zu denen die Se-Anreicherung von Trinkwasser und das Anbieten von Se-haltigen Lecksteinen oder –schalen zählen, sind nicht ausreichend präzise, um eine adäquate Versorgung aller Individuen zu gewährleisten, vgl. Kapitel 2.4.2. Demgegenüber haben indirekte Methoden, die auf der Verbindung der Se-Supplementierung mit der Grundfutteraufnahme basieren, erhebliche Vorteile, vgl. Kapitel 2.4.3.

## 5.2 Supplementierung

### 5.2.1 Selenhaltige Dünger

Se-Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen lassen sich schon durch Se-Gaben von wenigen Gramm je ha signifikant anheben. In Form von Selenat appliziert, gelten 4 bis 10 g Se ha<sup>-1</sup> als ausreichend, um bei defizitärer Se-Versorgung von Weidetieren die Se-Konzentrationen des Weideaufwuchses und der Konserven auf das adäquate Maß von > 100 µg Se kg<sup>-1</sup> TS anzuheben (GUPTA & MACLEOD 1994, GUPTA 1995, LORENZ & BOEHNKE 1999, OPITZ v. BOBERFELD 2000, 2002a). Die eigenen Untersuchungen bestätigen, dass dieser Mindestbedarf bereits mit 4 g Se ha<sup>-1</sup> in Form einer flüssig applizierten Selenatlösung in 100% der Fälle erreicht wird. Selbst bei dem Standorttyp A, bei dem aufgrund eines überdurchschnittlich hohen Se-Gehaltes im Boden, aber relativ niedrigen Se-Konzentrationen in den Aufwüchsen von einer eingeschränkten Pflanzenverfügbarkeit des Selens im Boden ausgegangen werden kann, vgl. Kapitel 3.1.2, werden im Vergleich zu den nicht mit Se behandelten Varianten zwischen acht- und sechshundertfach höhere Se-Konzentrationen im Grünlandaufwuchs festgestellt. Se-Gaben > 10 g Se ha<sup>-1</sup> in Selenatform müssen angesichts

der mehrfach den Zielbereich deutlich überschreitenden Se-Konzentrationen bei der Se-Gabe von hier  $12 \text{ g Se ha}^{-1}$  kritisch betrachtet werden. Die Ergebnisse verdeutlichen die hohe Relevanz von Umwelteinflüssen, insbesondere der Witterung, bei der Betrachtung der Wirkung von Se-Applikationsmaßnahmen. Trotz identischer Konzentrationen der Selenatlösungen und Applikationstechnik erreicht die Se-Konzentration im untersuchten Primäraufwuchs des zweiten Jahres (= 19. Kalenderwoche) wesentlich höhere Werte als im Sekundäraufwuchs des ersten Untersuchungsjahres (= 35. Woche), obwohl die Ergebnisse des Zeitreihenexperimentes, vgl. Kapitel 4.2.1, im Mai geringere Se-Konzentrationen erwarten lassen. Dennoch werden zu diesem Zeitpunkt bei der höheren Se-Gabe zum Teil Konzentrationen von  $> 2000 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  gemessen, dem Wert, der vom NRC als langfristig maximal tolerierbare Konzentration für ausgewachsene Rinder (ANONYMUS 1996) entspricht. Selbst bei moderaten Se-Gaben von  $4 \text{ g Se ha}^{-1}$  wird in der Mehrzahl der Proben der in Deutschland gültige obere Grenzwert für Futtermittel von  $500 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  (ANONYMUS 1981) erreicht bzw. überschritten. McDOWELL et al. (2002) ermitteln auf Grasland in Florida vier Wochen nach einer Flüssigapplikation von  $5 \text{ g Se ha}^{-1}$  in Form von Barium-Selenat, also bei vergleichbarem Zeitraum und Se-Aufwand, ebenfalls überhöhte Se-Konzentrationen von bis zu  $800 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ . Ob es sich dabei überwiegend um anhaftendes Selenat oder um über das Blatt und Wurzel aufgenommenes Se handelt, kann dabei nicht zweifelsfrei geklärt werden. Das Anhaften der Selenatlösung und die mögliche Aufnahme über die Blätter sind hier mögliche, aber mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die einzigen Ursachen für die hohen Se-Konzentrationen im Aufwuchs, da der Benetzungseffekt durch große Tropfen mit der entsprechenden Einstellung des Spritzdruckes, der Wahl der eingesetzten Düsen und niedriger Fahrgeschwindigkeit im Se-Applikationsversuch minimiert wurde, vgl. S. 56. Die geringen Zuwachsraten infolge des verspäteten Beginns der Vegetationsperiode (= niedrige Temperaturen und relativ geringe Niederschläge im zeitigen Frühjahr, vgl. Anhangtab. 7) und infolgedessen niedrige Erträge zum Erntetermin Anfang Mai, vgl. Abb. 18 auf S. 74, dürften die Hauptursache für die hohen Se-Konzentrationen sein. Im Primäraufwuchs 2003 können zum Teil nur 1 % der eingesetzten Se-Menge im Erntegut über eine Differenzmethode nachgewiesen werden, vgl. Anhangabb. 1. Obwohl demzufolge möglicherweise bei einzelnen Varianten bis zu 99 % des Se im Boden fixiert worden oder gasförmig bzw. durch Auswaschung verloren gegangen sind, erreichen diese Aufwüchse Se-Konzentrationen von bis zu  $1700 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ . Da-

nach sind auch bei geringeren Wirkungsgraden, wie beim Einsatz fester Se-haltiger Dünger vorstellbar, übermäßig hohe Se-Konzentrationen zu erwarten, wenn die Zuwachsraten aufgrund eines ungünstigen Witterungsverlaufes unterdurchschnittlich sind und sich damit nicht adäquat zur applizierten Se-Menge entwickeln. Bei der Verwendung von Mehrnährstoffdüngern erfolgt die Se-Gabe in der Regel in Verbindung mit einer N-Gabe. Die N-Gabe verschärft die Problematik übermäßiger Se-Konzentrationen im Frühjahr 2003 zusätzlich. Obwohl z. B. bei dem Standorttyp B infolge ansteigender TS-Erträge niedrigere Se-Konzentrationen zu erwarten wären, sind diese gegenüber den wesentlich ertragsschwächeren, nicht N-gedüngten Varianten signifikant höher. Diese Tatsache ist ein Indiz dafür, dass es sich bei den festgestellten Se-Mengen nicht ausschließlich um äußerlich anhaftendes Selenat handelt, da die Bestände zum Applikationstermin Anfang April gleich entwickelt sind, am Anfang der Vegetationsperiode stehend, mit einer einheitlich geringen Blattfläche. Die vergleichbare zur Verfügung stehende Fläche für anhaftende Selenatlösung müsste angesichts höherer Zuwachsraten und der damit verbundenen Erhöhung der absoluten Oberfläche bei den N-gedüngten Varianten zu einer relativen Abnahme der anhaftenden Se-Mengen führen. Die Vermutung liegt somit nahe, dass Se zumindest zum Teil über die Wurzeln aufgenommen und im Folgenden metabolisiert worden ist. Im Primäraufwuchs 2003 sind die Rohprotein-Konzentrationen der N-gedüngten Varianten abweichend vom Folgeaufwuchs im Jahr 2002, in dem keine oder nur geringe Unterschiede auftreten, wesentlich höher als die nicht gedüngten. Dieser Effekt steht im gewissen Gegensatz zu den von FARÍA-MÁRMOL et al. (1997) bei *Andropogon gayanus* festgestellten verminderten Se-Konzentrationen nach einer N-Gabe, vermutlich als Folge eines Verdünnungseffektes. Ein derartiger Verdünnungseffekt kann auch als Ursache für teilweise verminderte Effekte von Se-Gaben auf die Se-Konzentration in Verbindung mit der N-Gabe zum Folgeaufwuchs im Jahr 2002 vermutet werden, im Primäraufwuchs 2003 kommt dieser Effekt aufgrund der insgesamt geringeren Zuwächse nicht zum Tragen. Ohne N-Düngung ist besonders auf den Standorttypen B und C praktisch kein oberirdischer Ertrag feststellbar und der Stoffwechsel der Pflanzen ist, bedingt durch niedrige Temperaturen und begrenzte Wasservorräte im Boden, offenbar eingeschränkt. Wahrscheinlich ist hier auch die Wurzelentwicklung deutlich herabgesetzt. Möglicherweise bewirkt die N-Gabe eine Förderung des Wurzelwachstums und eine erhöhte Se-Aufnahme. Einen ähnlichen Effekt sehen MIKKELSEN et al. (1989) als Ursache für einen Anstieg der Se-



Konzentrationen in der Pflanze nach einer Phosphat-Applikation. Eventuell stehen die höheren Se-Konzentrationen im Aufwuchs der N-gedüngten Varianten auch in Beziehung zu den höheren Rohprotein-Konzentrationen der entsprechenden Aufwüchse. Bei begrenzten Mengen an verfügbarem Se ist die Se-Konzentration unabhängig von der Rohprotein-Konzentration, wie die Status quo-Analyse der Se-Konzentration von 83 Standorten ebenso belegt wie das Ergebnis des Se-Applikationsexperimentes, in dem sich die Se-Konzentrationen im Aufwuchs der nicht mit Selenat behandelten Varianten trotz erheblich variierender Rohprotein-Konzentrationen nicht unterscheiden. Bei niedrigem Se-Niveau von  $< 100 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS im Aufwuchs lassen sich offenbar generell düngungsbedingte Einflüsse auf die Se-Konzentration kaum nachweisen (BAHNERS & HARTFIEL 1987, TAUBE et al. 2000). Bei für die Se-Versorgung von Wiederkäuern idealen Konzentrationen zwischen 100 und  $400 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS, die bei dem Standorttyp A im Jahr 2002 festzustellen sind, sind die Se-Ressourcen für die Pflanze offenbar noch begrenzt und die Se-Aufnahme kann in Relation zu den steigenden TS-Erträgen infolge von N-Gaben auch unterproportional sein. Bei hohem Se-Niveau werden große Teile des aufgenommenen Se in Seleno-Aminosäuren gebunden und auf diese Weise in der Pflanze akkumuliert (Wu et al. 1997). Aufgrund eines Se/S-Antagonismus werden Se-Aminosäuren im Vergleich zu den S-haltigen Aminosäuren häufig sogar bevorzugt synthetisiert (Wu et al. 1997). Es ist also nicht auszuschließen, dass eine allgemeine Förderung der Aminosäuresynthese nach einer N-Gabe, wie 2003 aus den höheren Rohprotein-Konzentrationen zu folgern, bei großen Mengen von pflanzenverfügbarem Se auch zu einer erhöhten Synthese von Seleno-Aminosäuren in der Pflanze und somit zu einer relativen Anreicherung von Se führt. Das setzt voraus, dass die Se-Verfügbarkeit für die Pflanze im zweiten Jahr trotz der identischen Se-Applikation weit besser sein muss als im ersten. Dabei könnte eine Rolle spielen, dass relativ geringe Niederschlagsmengen zwischen Anfang Februar und Mitte April 2003 zu geringen Bodenwassergehalten führen. Im trockenen, gut durchlüfteten Boden dürften weitaus geringere Anteile des applizierten Na-Selenats reduziert und im Folgenden an Bodenbestandteile absorbiert werden, vgl. Kapitel 2.1.2.3, als im feuchteren Boden vor und nach dem Applikationstermin 2002. Unmittelbar nach der Applikation im Juli 2002 setzen größere Niederschlagsereignisse ein, die eine Verdünnung und Reduzierung von Selenat im Boden offenbar begünstigen. Gleichzeitig sind möglicherweise die gasförmigen Verluste, vgl. Kapitel 2.1.2.5, durch eine höhere Mikroorga-

nismenaktivität – auch infolge der im Vergleich zum Frühjahr höheren Temperaturen – und die Auswaschung von Selenat aus dem Wurzelraum – aufgrund der Niederschläge unmittelbar nach der Applikation – höher. Trotz der Bedingungen im Frühjahr 2003, die die Se-Konzentrationen im Aufwuchs offenbar positiv beeinflussen, liegen die Se-Konzentrationen der Aufwüchse aus nicht mit Selenat behandelten Parzellen meist weit unter dem zu fordernden Wert von  $100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ . Der einzige Aufwuchs, der die Anforderungen bezogen auf die Se-Konzentrationen erfüllt, erreicht nur einen TS-Ertrag von  $< 2 \text{ dt ha}^{-1}$  und ist somit für eine Beweidung ungeeignet. Auch die Ca-Gabe kann ohne Selenatapplikation nicht zu einer Erhöhung der Se-Aufnahme durch die Pflanze führen. Obwohl die Ca-Gaben auf den Standorttypen A und C zu einer Erhöhung des pH-Wertes von  $\text{pH} < 5,0$  auf  $\text{pH } 6,0$  bzw. auf dem Standorttyp B von  $\text{pH } 5,5$  auf  $\text{pH } 6,5$  führen, vgl. Abb. 5 auf S. 56, sind damit keine einheitlichen Effekte auf die Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial verbunden. Damit bestätigt sich das Ergebnis der Status quo-Analyse verschiedener Grünlandbestände, dass die Bedeutung der Bodenreaktionsverhältnisse für die Se-Konzentrationen in der Pflanze (GEERING et al. 1968, GISSEL-NIELSEN 1971, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, NEAL 1995), bezogen auf mitteleuropäische Verhältnisse, bislang überbewertet wird. Es ist also offenbar nicht zu erwarten, dass niedrige Se-Konzentrationen im Aufwuchs durch Kalkung wesentlich zu steigern sind. Auch unter Einbeziehung der mit Na-Selenat applizierten Bestände führt die Ca-Gabe nur in wenigen Einzelfällen zu einer Erhöhung der Se-Konzentrationen bzw. –entzüge. In Einzelfällen fallen die Werte bei den gekalkten Varianten sogar niedriger aus, insgesamt ist die Wirkung der Kalkung jedoch indifferent. Bezogen auf die standortbedingten Unterschiede in der Bodenreaktion zeigt sich im Se-Applikationsversuch ebenfalls kein Effekt auf die Se-Konzentrationen in den Aufwüchsen. Auf dem Standorttyp B, mit dem höchsten pH-Wert, sind die Se-Entzüge in mehreren Fällen signifikant niedriger als bei den Standorttypen A und C. Grundsätzlich ist denkbar, dass der positive Effekt der pH-Wert-Erhöhung auf die Verfügbarkeit zum Teil aufgehoben wird, weil Selenit und Selenat, wie SINGH et al. (1981) bei neutralen bis alkalischen Böden feststellen, in geringem Umfang auch an  $\text{CaCO}_3$  adsorbiert werden; verglichen mit der Adsorption an andere Bodenbestandteile spielt dieser Effekt aber im Allgemeinen jedoch keine Rolle (FRITZ & HALL 1988). Die Ca-Gabe wirkt sich jedoch positiv auf die Mikroorganismenaktivität aus (MENGEL 1991), so dass nicht auszuschließen ist, dass der positive Effekt der pH-Wert-Steigerung auf die Se-Verfügbarkeit teilweise durch

den Anstieg der Gehalte schlecht verfügbarer organischer Se-Formen und möglicher gasförmiger Verluste kompensiert wird. Auch im Vergleich der Standorttypen deutet sich an, dass unterschiedliche Gehalte organischer Substanz die Pflanzenverfügbarkeit von Se bei Se-Applikationen beeinflussen. Die Standorttypen B und C stehen stellvertretend für Böden mit unterdurchschnittlichen C-Gehalten (= 2,9 bzw. 2,6 % C), woraus im Vergleich zum Standorttyp A, mit einem C-Gehalt von 4,1 %, nahe dem Durchschnitt der 83 untersuchten Standorte (= 4,2 % C), geringere Gehalte an organischer Substanz zu folgern sind. Aufwüchse der Standorttypen B und C erfahren in beiden Jahren einen stärkeren Anstieg der Se-Konzentrationen im Aufwuchs nach Selenat-Applikation als Aufwüchse des Standorttyps A. Auf der Stufe 4 g Se ha<sup>-1</sup> wird bei dem Standorttyp A nach einer Gabe von 80 kg N ha<sup>-1</sup> mit Abstand die niedrigste Se-Konzentration festgestellt, die den zu fordernden Wert von 100 µg Se ha<sup>-1</sup> nur knapp erreicht. Auch die Se-Entzüge sind im ersten Jahr am Standorttyp A am geringsten. Im zweiten Jahr sind die Entzüge am Standorttyp A am höchsten, was allerdings eine Folge der geringen TS-Erträge der beiden anderen Standorte ist, so dass Schlussfolgerungen auf die Se-Verfügbarkeit im Standortvergleich in diesem Jahr nicht möglich sind. Im ersten Jahr lässt sich allerdings eine im Vergleich zu den beiden anderen Standorten stärkere Fixierung der applizierten Se-Mengen durch organische Bodenbestandteile vermuten, vgl. Kapitel 2.1.2.4. Es ist daher nicht auszuschließen, dass bei höheren C-Gehalten im Boden – im Untersuchungsgebiet werden C-Gehalte bis 7,5 % gemessen – auch Mengen > 4 g Se ha<sup>-1</sup> aufgewendet werden müssen, um die angestrebten Se-Konzentrationen im Futter zu erhalten. Dabei muss beachtet werden, dass die Zielkonzentrationsbereiche in trockenen Jahren wie 2003 auch bei höheren Gehalten organischer Substanz im Boden bereits mit Gaben von 4g Se ha<sup>-1</sup> deutlich überschritten werden können. Da Standorte mit hohen C-Gehalten offenbar bereits ohne Se-Gaben höhere Se-Konzentrationen im Boden aufweisen, vgl. Kapitel 4.1.1, und Se-Gaben auf entsprechenden Flächen aufgrund der stärkeren Fixierung möglicherweise höher dosiert werden müssen, um die Mindestkonzentrationen im Aufwuchs sicher zu erreichen, so ist gerade hier eine Akkumulation von Se im Boden zu befürchten. Damit erhöht sich das Risiko, dass zeitweilige Bedingungen, die die Mineralisation und die Oxidation zunächst nicht pflanzenverfügbarer Se-Formen fördern, vorübergehend zu Se-Spitzenwerten führen, die über den Zielbereich hinausgehen (YLÄRANTA 1993). Auf Wachstumsbedingungen, die begrenzte Zuwachsraten bewirken und zu Se-Überschussituation führen, wie im

Frühjahr 2003, muss folglich bei Se-Applikationsmaßnahmen flexibel reagiert werden können, um das Risiko toxischer Konzentrationen ausschließen zu können.

McDOWELL et al. (2002) zeigen, dass übermäßig hohe Se-Konzentrationen nur vorübergehend, zwei Wochen nach einer Selenat-Applikation mit  $5 \text{ g Se ha}^{-1}$ , auftreten. Im Folgenden wird eine kontinuierliche Abnahme der Konzentrationen festgestellt. So ist davon auszugehen, dass Se-Spitzen durch eine Verschiebung des Beweidungstermins mit zunehmender Biomasseproduktion abgeschwächt werden. Es ist allerdings unverzichtbar, Se-Applikationsmaßnahmen auf Grünland durch regelmäßige Analysen von Pflanzenproben zu flankieren. Bei langfristiger Se-Anwendung sollten auch die Veränderungen der Se-Konzentrationen im Boden verfolgt werden. Die zusätzlichen Kosten für die Analytik müssen ebenso beachtet werden wie eventuelle Aufwendungen für den zusätzlichen Arbeitsgang für die Se-Applikation sowie die Beschaffungskosten für das Se-Präparat. Der Einsatz eines Se-haltigen Mehrnährstoffdüngers, anstatt einer wie hier praktizierten Spurenelement-Einzelgabe in Form einer Selenat-Lösung, beinhaltet auch finanzielle Aufwendungen für die Pflanzennährstoffe, deren Applikation sich mit den Low-Input-Bedingungen bei Mutterkuhhaltung und extensiver Fleischproduktion nicht vereinbaren lassen. Vor dem Hintergrund, dass direkte Methoden der Se-Supplementierung, vgl. Kapitel 2.4.2, ebenfalls mit einem erheblichen Arbeitsaufwand und zum Teil hohen Kosten für Se-Präparate sowie außerdem mit dem in extensiven Weidesystemen auftretenden Problem der gleichmäßigen Verteilung auf alle Individuen der Herde verbunden sind, müssen indirekte Methoden der Se-Supplementierung mit minimiertem Arbeits- und Kapitalaufwand entwickelt werden. Abgesehen von dem kalkulierbaren Risiko zeitweilig über den Zielbereich hinausgehender Se-Konzentrationen bei extremen Witterungsverläufen lassen sich, wie in anderen Untersuchungen bestätigt, durch Se-Gaben mit  $<10 \text{ g Se ha}^{-1}$  adäquate Se-Konzentrationen im Grünlandaufwuchs relativ sicher herstellen (GUPTA & MACLEOD 1994, GUPTA 1995, LORENZ & BOEHNKE 1999, OPITZ v. BOBERFELD 2000, 2002a). Durch die Bindung der Se-Aufnahme an die Grundfutteraufnahme ist weder ein exzessiver Se-Konsum noch eine Totalverweigerung des Se-Angebotes möglich, wie dies bei „Free-Choice“-Verfahren (McDOWELL 1996) der Mineralstoffsupplementierung, wie z.B. der Verwendung von Lecksteinen oder bei der Se-Anreicherung von Trinkwasser, in Weidesystemen zu erwarten ist, vgl. Kapitel 2.4.2. Eine Beeinträchtigung der Futterqualität ist durch eine Selenat-Applikation von  $\leq 12 \text{ g Se ha}^{-1}$  nicht zu erwarten. Weder lässt sich in dieser Größenordnung eine Beeinflussung der Ener-

giedichte oder der Rohprotein-Konzentration der Aufwüchse feststellen, noch deutet sich eine antagonistische Wirkung zum essentiellen Element S an. Bezogen auf das Verhältnis von Se zu S muss allerdings bemerkt werden, dass S in den untersuchten Pflanzenproben in einer um drei bis fünf Zehnerpotenzen höher liegenden Konzentration vorliegt. Mögliche Interaktionen von Se mit anderen Spurenelementen sind nicht untersucht worden. Bisherige Untersuchungen deuten darauf hin, dass Interaktionen von Se mit anderen Elementen, wie Fe, Mn und Zn (WU 1998), bezogen auf die Aufnahme von Gräsern ohne große Bedeutung sind; bei hohen Se-Niveaus kann bei *Trifolium repens* dagegen ein geringfügiger Rückgang der Fe-, Mn- und Zn-Konzentrationen auftreten. Insgesamt ist angesichts der angestrebten, geringen Se-Konzentrationserhöhung um 100 bis 200  $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS nicht davon auszugehen, dass durch diese Maßnahme andere Spurenelemente in einen Mangelbereich – bezogen auf die Pflanzen und die Wiederkäuer – geraten.

Eine Beeinträchtigung des TS-Ertrags durch Se-Gaben lässt sich auch bei der Stufe 12 g Se  $\text{ha}^{-1}$  nicht feststellen. Relevante Einflüsse auf den TS-Ertrag infolge toxischer Reaktionen sind nach MIKKELSEN et al. (1989) und HARTIKAINEN et al. (2000) bei gräserdominierten Aufwüchsen erst bei deutlich höheren Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial zu erwarten, vgl. Kapitel 2.2.1.2. Für die Praxistauglichkeit eines Se-Applikationsverfahrens ist zwingend erforderlich, dass Fehldosierungen der Se-Mengen durch den Anwender, die zu Se-Gaben führen, die deutlich über 10 g Se  $\text{ha}^{-1}$  liegen, nahezu auszuschließen sind. Durch Einsatz von Se-Salzen, die nicht an einen Trägerstoff – beispielsweise Mehrnährstoffdünger oder Saatgut - gebunden sind bzw. Verwendung innerbetrieblich hergestellter Selenat- oder Selenitlösungen, kann diese Sicherheit zweifellos nicht erreicht werden.

### 5.2.2 Anreicherung von Saatgut

Die Anreicherung von Saatgut mit Selenat bietet sich als Methode an, die Vorteile der Se-Applikation auf Grünland zu nutzen, ohne dass der Nachteil zusätzlicher Arbeitskosten entsteht, wenn Nachsaat als Pflegemaßnahme ohnehin durchgeführt wird. Regelmäßige Nachsaaten zur Regeneration der Narbe sind häufig auch in extensiv organisierten Grünlandsystemen ökonomisch sinnvoll (RICHTER & MILIMONKA 2001). Dies gilt im Besonderen für die Beseitigung von Narbenschäden nach Winterbeweidung (OPITZ v. BOBERFELD 2002b). Untersuchungen von GUPTA et al. (1983b)

an *Lolium multiflorum*- und *Medicago sativa*-Samen zeigen, dass die Se-Anreicherung des Saatgutes zur Erhöhung der Se-Konzentrationen im Aufwuchs effizient beiträgt, ohne dass Ertragseinbußen feststellbar sind. Im Gefäßexperiment wird dies für *Lolium perenne* bestätigt. Die Untersuchungen an *Lolium perenne*-Saatgut zeigen, dass durch Saatgutbehandlung mit Selenat auch keine Beeinträchtigung der Keimfähigkeit zu befürchten ist, wenn angemessene Se-Mengen eingesetzt werden. Ausgehend von dem Befund, dass auf den meisten Grünlandflächen  $4 \text{ g Se ha}^{-1}$  in Form von Selenat als ausreichende Menge für eine Anhebung der Se-Konzentrationen im Aufwuchs auf  $> 100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  gelten kann, sollte Saatgut als Transportmedium für eine Se-Applikation ebenfalls mit dieser Maßgabe vorpräpariert werden. Das heißt, dass  $4 \text{ g Se}$  in der für Nachsaat üblichen Saatgutmenge von  $20\text{--}25 \text{ kg ha}^{-1}$  enthalten sein müssen. Die Keimfähigkeit von *Lolium perenne* ist aber auch bei neunfach höheren Konzentrationen nicht beeinträchtigt, obwohl die Se-Belastung des Saatgutes im Laborversuch gegenüber einer Keimung im Boden unter Freilandbedingungen als verschärft betrachtet werden kann, da an Saatgut anhaftendes Selenat höchstwahrscheinlich im Bodensubstrat zum Teil abgewaschen wird und sich über ein größeres Volumen ausbreiten kann, so dass hier die auf das Saatgut einwirkende Se-Konzentration mit der Zeit abnimmt, während die Se-Konzentration in den Petrischalen durch Verdunstung von Wasser aus der applizierten Lösung eher zunimmt. Selenat ist gut wasserlöslich und zeichnet sich durch eine hohe Mobilität im Boden aus (YLÄRANTA 1983a, b), so dass die tatsächliche Konzentration, die auf Diasporen und Keimlinge einwirkt, infolge der Verdünnung durch Niederschläge und Bodenwasser vermutlich rasch abnimmt. Im Boden verlassen außerdem Teile des zugeführten Selenats gasförmig oder durch Auswaschung die durchwurzelten Bodenschichten, werden reduziert und an Bodenbestandteile sorbiert (GISSEL-NIELSEN et al. 1984, GISSEL-NIELSEN 1993, YLÄRANTA 1993). Die dauerhaft hohen Se-Konzentrationen der Medien im Laborversuch bedingen auch den hemmenden Effekt von Se auf die Spross- und Wurzelentwicklung bei Se-Konzentrationen entsprechend  $12$  bzw.  $36 \text{ g Se ha}^{-1}$ ; im Gefäßversuch sind dagegen gemessen am TS-Ertrag keine negativen Effekte der Selenatanreicherung des Saatgutes auf die Entwicklung der Pflanzen feststellbar, was offensichtlich auf die regelmäßige Bewässerung der Gefäße und der Verringerung der Se-Konzentrationen im Boden zurückzuführen ist.

Es ist davon auszugehen, dass sich Konzentrationen von  $\geq 10000 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Boden-TS, bei denen HARTIKAINEN et al. (2000) eine signifikante Reduzierung der Keimfähigkeit von *Lolium perenne* feststellen, in Mitteleuropa nur selten ergeben. Die Se-Konzentrationen in den oberen 10 cm der Böden auf 83 Untersuchungsstandorten sind ohne Se-Applikation deutlich  $< 1000 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS, in ähnlichen Größenordnungen liegen die Se-Konzentrationen in Böden aus Untersuchungen von BAHNERS (1987) und BRUß et al. (1997). Konzentrationen in der Größenordnung von  $\geq 10000 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Boden-TS sind bei den verwendeten Se-Gaben zwischen 0 und  $36 \text{ g Se ha}^{-1}$  in der Regel nicht zu erwarten. Bezogen auf die oberen 10 cm ergibt sich bei einer Annahme von  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$  Lagerungsdichte eine geschätzte Trockenmasse von  $1200 \text{ t Boden-TS ha}^{-1}$ . Bei einer hypothetischen gleichmäßigen Verteilung der maximal eingesetzten Gabe von  $36 \text{ g Se ha}^{-1}$  auf die Schicht 0 - 10 cm errechnet sich unter Vernachlässigung der Se-Verluste eine durchschnittliche Erhöhung der Se-Konzentration um lediglich  $30 \mu\text{g Se ha}^{-1}$  bzw. um durchschnittlich  $300 \mu\text{g Se ha}^{-1}$  bei einer angenommenen Verteilung der Se-Mengen innerhalb der Schicht 0-1 cm. Wie bei der Applikation einer Selenatlösung wird nach der Aussaat von selenatangereichertem Saatgut beispielsweise bei einer anhaltenden Trockenperiode nach der Anwendung, eine Verteilung der Selenatmengen im Boden (= Verdünnung) möglicherweise stark beeinträchtigt. Punktuell treten unter diesen Umständen auch bei der Applikation mittels Saatgut hohe Se-Konzentrationen auf. Ein Vorteil der Verwendung von selenatangereichertem Saatgut gegenüber der Applikation einer Selenatlösung ist, dass die Blattoberflächen des Bestandes nicht benetzt werden, da das Selenat überwiegend an der Oberfläche des Saatgutes verbleibt und wachsende Pflanzen bei Trockenheit Se weder über die Wurzeln noch über die Blattoberfläche im Überschuss aufnehmen. Da der Großteil des Saatgutes während extremer Trockenheit nicht zur Quellung kommt, dürfte die Gefahr einer Schädigung der Embryonen durch das in der Trockenphase unverdünnte Natriumselenat gering sein. Allerdings müssen angesichts der hohen Toxizität von Selenat technische und rechtliche Voraussetzungen geschaffen werden, die das Sicherheitsrisiko im Saatgutverkehr kalkulierbar gestalten. Voraussetzung ist hierfür, dass das Saatgut vom Hersteller vorbehandelt und eine gleichmäßige Se-Anreicherung gewährleistet wird, so dass die Aufwandmenge in der Praxis durch die eingesetzte Saatgutmenge begrenzt ist, wodurch übermäßige Se-Gaben weitestgehend auszuschließen sind. Auch bei vergleichsweise geringen Se-Aufwendungen von  $4 - 10 \text{ g Se ha}^{-1}$  die entsprechend auf

20 – 25 kg Saatgut zu verteilen sind, werden Se-Konzentrationen erreicht, bei denen Gesundheitsrisiken für beteiligte Personen nicht völlig auszuschließen sind (SCHRAUZER 1998). Besonders für die Lagerung und Anwendung im landwirtschaftlichen Betrieb müssen Maßnahmen erarbeitet werden, die einen missbräuchlichen oder fahrlässigen Umgang mit dem Se-angereicherten Saatgut ausschließen.

Wenn sich in Zukunft die Ergebnisse neuerer Publikationen (HARTIKAINEN et al. 2000, Xu et al. 2003) bestätigen, dass Se auch in Pflanzen zentrale Funktionen in antioxidativen Systemen einnimmt, dann würden auch Se-Applikationen auf Grünland, direkt oder durch Saatgut als Transportmedium, entscheidend an Bedeutung zunehmen. Möglicherweise sind Glutathionperoxidasen bei Pflanzen für den Schutz von Zellmembranen bei oxidativem Angriff infolge von Hitze-, Kälte- und Salzstress von Bedeutung (AVSIAN-KRETCHMER et al. 1999), wobei - anders als bei Tieren - nicht abschließend geklärt ist welche Rolle Se in diesem Zusammenhang zukommt (TERRY et al. 2000). Im Falle eines eindeutigen Nachweises einer Beziehung zwischen Se-Aufnahme und Stresstoleranz von Pflanzen wäre eine Se-Applikation pflanzenbaulich von noch höherer Bedeutung. Erst wenn der Nachweis eines Nutzens für die Pflanze erbracht ist, kann die Se-Applikation als „Se-Düngung“ im eigentlichen Sinne bezeichnet werden. Bei der Klärung der Frage, ob die Stresstoleranz von Kulturpflanzen durch Düngung zu erhöhen ist, besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

### 5.2.3 Zusatz zum Siliergut

Da Se bislang überwiegend als nicht essentiell für Pflanzen angesehen wird (TERRY et al. 2000), ist eine Se-Applikation auf Grünland aus derzeitiger pflanzenphysiologischer Sicht nicht erforderlich. Wenn eine Erhöhung der Se-Konzentrationen im Grundfutter in Hinblick auf eine adäquate Versorgung von Weidetieren mit Se erreicht werden soll, müssen die erforderlichen Mengen folglich nicht zwingend dem wachsenden Pflanzenbestand zugeführt werden; es empfiehlt sich daher die Anreicherung des Erntegutes mit Selenat. Da der Zusatz nach der Ernte erfolgt und die eingesetzten Se-Mengen direkt auf den Bedarf der Tiere ausgerichtet sein sollten, ist auch eine Zuordnung zu den direkten Methoden der Se-Supplementierung, vgl. Kapitel 2.4.2, möglich. Da aber auch die Silagebereitung ein Prozess der Grundfüttererzeugung ist, bei denen biologische Umsetzungen von Selenat vor der Aufnahme durch den Wiederkäuer stattfinden, ist die hier vorgenommene Zuordnung zu den indirekten Verfahren berechtigt. Im Laborversuch zeigt sich, dass der Zusatz



indirekten Verfahren berechtigt. Im Laborversuch zeigt sich, dass der Zusatz von 0,18 bzw. 0,36 g Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> t<sup>-1</sup> TS zum Siliergut (= 75 bzw. 150 µg Se kg<sup>-1</sup> TS) ausreicht, um die Se-Konzentrationen im Aufwuchs auf > 100 µg Se kg<sup>-1</sup> TS Silage anzuheben. Die gemessenen Konzentrationen der Laborsilagen liegen dabei nahe den kalkulierten Werten, die sich aus Addition der Se-Konzentrationen in der Nullvariante und der Zielkonzentration des jeweiligen Selenatzusatzes (= 0, 75, 150, 300 µg Se kg<sup>-1</sup> TS) ergeben. Se-Verluste lassen sich auf dieser Vergleichsbasis nicht feststellen. Lediglich bei der höchsten Selenatstufe von 1200 µg Se kg<sup>-1</sup> TS (= 2,88 g Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> g t<sup>-1</sup> TS) liegen die gemessenen Konzentrationen zum Teil > 100 µg Se kg<sup>-1</sup> TS Silage unter dem Erwartungswert. Nur bei dieser bewusst zu hoch gewählten Dosierung können nennenswerte gasförmige Se-Verluste in Form methylierter Se-Verbindungen durch mikrobielle Aktivität vermutet werden. Eine derartige partielle Reduktion von Selenat und Selenit, ähnlich den Vorgängen im Boden unter anaeroben Verhältnissen, vgl. Kapitel 2.1.2.5, ist auch während des Fermentationsprozesses vorstellbar. Bei adäquater Dosierung spielen Verluste nach Se-Reduktion offenbar eine untergeordnete Rolle. Möglicherweise trägt der Zusatz von KNO<sub>3</sub> zu reduzierten gasförmigen Verlusten bei. Nach FRANKENBERGER & KARLSON (1994) wird in anaeroben Systemen durch Nitrat nicht nur die Reduktion von Se-Verbindungen gehemmt, sondern auch die Biomethylierung und anschließendes Entweichen der gasförmigen Verbindungen. Nitrat sollte, unabhängig von diesem hypothetischen Effekt, im Siliergut in ausreichenden Mengen enthalten sein, um die Clostridienaktivität und damit verbundene Buttersäurefehlgärungen auszuschließen (KAISER & WEISSBACH 1989, WEISSBACH & HONIG 1996, OPITZ v. BOBERFELD & STERZENBACH 2001).

Die Se-Spezies-Analyse von Stichproben der höchsten Se-Stufe (= 1200 µg Se kg<sup>-1</sup> TS) mittels CE-ICP-MS ergibt, dass Selenat nahezu vollständig in nicht näher bestimmte höhermolekulare Verbindungen, offenbar organischen Ursprungs, überführt wird. Dabei kann nicht zweifelsfrei geklärt werden, ob Se von Mikroorganismen assimiliert wird oder ob eine Reaktion mit der pflanzlichen Matrix stattfindet. Neben höhermolekularen Se-Verbindungen sind lediglich geringe Anteile von Seleno-Methionin messbar. Anorganische Se-Verbindungen, wie Selenat, Selenit oder elementares Se sind nicht nachweisbar (JAKUBOWSKI 2004). Abschließende Aussagen zur Verfügbarkeit des Se bei Verfütterung der Se-angereicherten Silagen an Wiederkäuer können nur durch in-vivo-Studien sicher getroffen werden. Entsprechende Untersuchungen mit Hefen - in Se-angereicherten Medien kultiviert - lassen vermuten,

dass von Mikroorganismen in organische höhermolekulare Verbindungen überführtes Se im höheren Maße im Verdauungstrakt von Wiederkäuern absorbiert wird als in Selenit- oder Selenatform (KNOWLES et al. 1999, ORTMAN & PEHRSON 1999, PAVLATA et al. 2001), wobei allerdings organische Se-Verbindungen häufiger unspezifisch in Proteine eingebaut werden, vgl. Kapitel 2.4.1. Organische Se-Formen, zu denen auch in Pflanzen vorliegendes Se überwiegend zählt (PETERSON & BUTLER 1962, TERRY et al. 2000), haben allerdings - bezogen auf Mutterkuhfütterung - gegenüber anorganischen Se-Formen den entscheidenden Vorteil, dass die Se-Konzentrationen in der Milch nach der Supplementierung offenbar effektiver angehoben werden (PEHRSON et al. 1999, ORTMAN & PEHRSON 1999, PAVLATA et al. 2001), was für die Se-Versorgung der Kälber in den kritischen ersten Lebenswochen, vgl. Kapitel 2.2.2.3, entscheidend sein kann.

Die wichtigste Voraussetzung für die Durchführung einer Anreicherung von Siliergut mit einer Selenatlösung ist zunächst, dass der Fermentationsverlauf nicht nachteilig beeinflusst wird. Es muss berücksichtigt werden, dass trotz der geringen erforderlichen Se-Mengen zur Einstellung der Zielkonzentrationen in der Silage, die verwendete Se-Lösung vergleichsweise hoch konzentriert sein muss. Die Verdünnung muss so gewählt werden, dass eine gleichmäßige Verteilung auf das gesamte Siliergut sicherzustellen ist. Gleichzeitig darf aber nicht zuviel Flüssigkeit zugesetzt werden, damit der TS-Gehalt der Silage nicht zu stark abfällt und Sickersaftbildung erfolgt. Im Silierexperiment werden 33,3 ml Selenatlösung  $\text{kg}^{-1}$  TS eingesetzt, d.h. die Se-Konzentration in der Lösung ist etwa um den Faktor 30 höher als die für die Silage gewünschte Konzentrationserhöhung bezogen auf die Silage-TS. Um beispielsweise eine Erhöhung um  $150 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Silage-TS zu erreichen, muss die Konzentration der Selenatlösung  $4500 \mu\text{g Se l}^{-1}$  betragen. In diesen Größenordnungen ist eine Beeinflussung der am Fermentationsprozess beteiligten Mikroorganismen nicht auszuschließen, insbesondere da anaerobe Bakterien offenbar empfindlicher auf hohe Selenit- bzw. Selenat-Dosen reagieren als aerobe (SCHRAUZER 1998). In der Praxis ist bei  $4500 \mu\text{g Se l}^{-1}$  ausgehend von einem TS-Gehalt von 30% eine Aufwandmenge von  $10 \text{ l t}^{-1}$  Siliergut erforderlich, um die Zielkonzentration von  $> 150 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  Silage-TS zu erreichen. Um den Flüssigkeitsbedarf zu reduzieren, muss die Selenatlösung nochmals höher dosiert sein. Für eine Beurteilung möglicher Folgen für den Fermentationsprozess können für diesen Fall die Ergebnisse der Stufe  $1200 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS (=  $36000 \mu\text{g Se l}^{-1}$ ) herangezogen werden. Eine relevante Beeinträchtigung

des Fermentationsprozesses durch die Zugabe von Natriumselenat lässt sich anhand der Fermentationsprodukte nicht belegen. Selbst bei der hier bewusst überhöhten Gabe von  $1200 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS ergeben sich gärbilogisch einwandfreie Silagen. Das trifft auf beide untersuchten Aufwüchse zu, die unterschiedliches Ausgangsmaterial für die Laborsilagen liefern und somit die Verallgemeinerungsfähigkeit der Befunde unterstützen. Bei dem Mitte Mai geernteten Aufwuchs ist *Festuca arundinacea* Hauptbestandbildner. Dabei handelt es sich um ein Obergras, das für hohe Lignin- und  $\text{SiO}_2$ -Gehalte bekannt ist (PRAGER 1983, WILMAN & REZVANI MOGHADDAM 1998). Trotz der durch die Gerüstsubstanz bedingten erschwerten Verdichtung lassen sich bei entsprechender Vorzerkleinerung auch bei relativ später Nutzung des Primäraufwuchses im Juni vergleichbare Qualitäten wie bei *Lolium perenne*-Silagen erreichen (OPITZ v. BOBERFELD et al. 2003). Die pH-Werte der Silagen aus den Mitte Mai geernteten Aufwüchsen, vgl. Abb. 27 auf S. 86, liegen - abweichend von den Ergebnissen von OPITZ v. BOBERFELD et al. (2003), bei denen in *Festuca arundinacea*-Silagen deutlich niedrigere pH-Werte festgestellt werden - mit und ohne Se-Zusatz über dem optimalen Bereich. Als kritischer pH-Wert für Silagen mit 30 % TS gilt nach WEISSBACH et al. (1977) ein Wert von 4,45, bei einem TS-Gehalt von 40 % ein Wert von 4,75. Als Ursache für die suboptimale pH-Wert-Absenkung ist sicherlich die relativ hohe Pufferkapazität (=  $7,2 \text{ g MS } 100 \text{ g}^{-1}$  TS) zu sehen, zum einen offenbar bedingt durch den im Vergleich zur Nutzung im Juni (OPITZ v. BOBERFELD et al. 2003) höheren Blattanteil und einer Rohprotein-Konzentration von 18,4 % in der TS, zum anderen möglicherweise durch einen hohen Ertragsanteil von *Taraxacum officinale* von > 30 % im Aufwuchs. Wie andere Kräuterarten auch, weist *Taraxacum officinale* eine im Vergleich zu Gräsern höhere Pufferkapazität auf (ISSELSTEIN 1994). Der zweite Aufwuchs setzt sich zu über 90% aus *Lolium perenne* zusammen. Trotz der vergleichsweise niedrigen wlk-Gehalte im Siliergut von 8,7 % sind die pH-Werte zum Öffnungstermin wesentlich niedriger als bei den *Festuca arundinacea*-Silagen. Obwohl pH-Werte oberhalb des kritischen Wertes, wie sie bei den *Festuca arundinacea*-Silagen auftreten, der Clostridienaktivität förderlich sind und damit das Risiko von Buttersäurefehlgärungen erhöhen (MCDONALD et al. 1991), ist die Buttersäurekonzentration aller Silagen, unabhängig von Aufwuchs, Se-Gabe und Vorwelkegrad, < 0,3 % und alle Silagen können somit als buttersäurefrei bezeichnet werden (WEISSBACH et al. 1977). Wie die pH-Werte bereits andeuten, sind die Milchsäurekonzentrationen der *Festuca arundinacea*-Silagen deutlich niedriger als die der *Loli-*

*um perenne*-Silagen und auch zwischen den Vorwelkegraden bestehen erhebliche Unterschiede. In keinem Fall jedoch gibt es Hinweise auf eine veränderte Milchsäurebakterienaktivität infolge des Zusatzes von Natriumselenat. Auch für die Bildung von Ethanol, das überwiegend durch Stoffwechselaktivität von Hefen, Enterobakterien und heterofermentativen Milchsäurebakterien entsteht (McDONALD et al. 1991), spielt der Selenatzusatz offenbar keine Rolle, vgl. Anhangtab. 54. Ebenso wenig lässt sich anhand der  $\text{NH}_3$ -N-Anteile am Rohprotein-N-Gehalt auf einen Einfluss des Selenats auf den Proteinabbau schließen. Bezogen auf die untersuchten Stoffwechselprodukte der an der Fermentation beteiligten Mikroorganismen in der Silage wirkt sich die Se-Zugabe in den eingesetzten Selenat-Mengen insgesamt nicht relevant aus. Zu einem vergleichbaren Befund kommt BRÖCKER (1996) mit Mikroorganismen des bovinen Panseninhaltes, wobei bei Zulage von 1 bzw. 2 mg Se  $\text{kg}^{-1}$  TS als Natrium-Selenit zur in vitro-Fermentation in der Regel keine einheitlichen Effekte auf pH-Wert,  $\text{NH}_3$ -Konzentration und Konzentration flüchtiger Fettsäuren feststellbar sind. Die Schwankungen der Gesamtgasproduktion innerhalb des Versuches sind nach BRÖCKER (1996) unregelmäßig und nicht eindeutig auf die Se-Behandlung zurückzuführen, was sich mit den Beobachtungen im Hohenheimer-Futterwerttest im Se-Düngungsversuch deckt, bei dem kein relevanter Einfluss der Se-Konzentration auf die Energiedichte feststellbar ist, vgl. Abb. 21, S. 80.

Die im Falle des Sekundäraufwuchses mit dem Hauptbestandbildner *Lolium perenne* nach Fermentation festgestellten geringeren S-Konzentrationen der Se-behandelten Varianten beeinträchtigen die Futterqualität nicht, da der N/S-Quotient auch mit Se-Gabe weit  $< 13$  liegt. Ein direkter Antagonismus zwischen S und Se kommt als Ursache für die geringfügige Abnahme der S-Konzentrationen aufgrund der Relationen der beiden Elemente nicht in Betracht. Bei dem Sekundäraufwuchs wird die deutlichste Abnahme der S-Konzentration bei der niedrigsten Se-Gabe festgestellt. Der Se-Konzentrationserhöhung von  $75 \mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS steht hier ein Absinken der S-Konzentration um  $700000 \mu\text{g S kg}^{-1}$  TS gegenüber. Bei dem Primäraufwuchs ist hingegen bei keiner Se-Gabe ein Einfluss auf die S-Konzentration festzustellen, so dass die Beziehung zwischen S-Konzentration und Se-Gabe nicht interpretierbar ist.

Der Zusatz von Selenat zum Siliergut beeinträchtigt offenbar nicht die Silagequalität, trägt nicht zu einer Beeinträchtigung der Aerostabilität nach Öffnen des Silos bei und hat gegenüber der Se-Applikation in den wachsenden Bestand den Vorteil, dass

problematisch hohe witterungsbedingte Abweichungen von der Zielkonzentration nicht zu erwarten sind. Die Problematik entstehender Kosten für einen zusätzlichen Arbeitsgang kann umgangen werden, wenn der Se-Zusatz in Kombination mit Silageadditiven - Nitrit oder Nitrat - erfolgt. In extensiv organisierten Grünlandssystemen mit Fleischerzeugung bzw. mit Mutterkuhhaltung kann der Einsatz von Silageadditiven trotz zusätzlicher Kosten für die Präparate sowie den zusätzlichen Arbeitsaufwand aufgrund der höheren Sicherheit bezogen auf den Siliererfolg und damit der Silagequalität (OPITZ v. BOBERFELD 1998, 2001b, 2003, OPITZ v. BOBERFELD & STERZENBACH 2001, STERZENBACH 2000, WEISSBACH 2004) rentabel sein. Das Risiko von Buttersäurefehlgärungen infolge niedriger Nitratkonzentrationen im Siliergut (WEISSBACH & HONIG 1996) ist bei Silierung von Aufwüchsen ungedüngter Grünlandflächen hoch (STERZENBACH 2000, OPITZ v. BOBERFELD & STERZENBACH 2001), kann aber durch  $\text{NO}_3$ -Zusätze erheblich reduziert werden. Auch die Verwendung von Laktobakterienzusätzen kann die Buttersäurebildung bei verschiedenen Silagen von extensiv bewirtschafteten Grünlandflächen vermindern (STERZENBACH 2000). Moderne Häcksler verfügen über eine ausgereifte Dosiertechnik, die eine gleichmäßige Verteilung der Selenatlösung auf das Siliergut gewährleistet. Die Anreicherung von Silierhilfsmitteln mit Selenat bietet für die Hersteller ein zusätzliches Verkaufsargument und hätte den Vorteil, dass durch die Bindung an Silierhilfsmittel übermäßige Se-Gaben im landwirtschaftlichen Betrieb aus ökonomischen Gründen nicht zu erwarten wären. Von einer Beimischung von Se-Verbindungen, wie Selenat, Selenit oder Selenomethionin, innerhalb des tierhaltenden Betriebs muss aus rechtlichen Gründen (ANONYMUS 1981) und nicht abschätzbarer Sicherheitsrisiken bezogen auf Mensch, Tier und Umwelt Abstand genommen werden. Die im Vergleich zu anderen indirekten Methoden hohe Präzision, mit der die Se-Konzentration im Futter durch Selenatzusatz zum Siliergut erreicht wird, ergibt sich durch die Umgehung der Prozesse im Boden, aber auch durch die Unabhängigkeit von Pflanzenwachstum und Witterungseffekten. Da der Zusatz erst nach der Ernte erfolgt, kann die Bemessung der Se-Zugabe unter Berücksichtigung des TS-Gehaltes auf Basis einer konkreten Pflanzenmasse erfolgen. Die Se-Applikation auf Grünland erfolgt in der Regel mehrere Wochen vor der Ernte nach Maßgabe von Erfahrungswerten, ohne dass die eingesetzten Se-Mengen an außergewöhnliche Wachstumsbedingungen, wie anhaltende Trockenheit oder Kälte, im weiteren Verlauf angepasst werden können. Im Vergleich zur Se-Applikation in Form von Se-haltigen Mehrnährstoffdüngern, wässrigen

Selenatlösungen und angereichertem Saatgut hat die Se-Anreicherung von Siliergut den Vorteil, dass aufgrund der offenbar nahezu verlustfreien Wirkung auf die Se-Konzentrationen der Silage, wesentlich geringere Se-Mengen zum Erreichen der Zielkonzentrationen von  $> 100 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  notwendig sind. Anhangabb. 3 zeigt, dass die theoretische Se-Konzentrationserhöhung, die sich aus den zugesetzten Selenatmengen errechnet ( $= 75, 150, 300$  bzw.  $1200 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$ ) weitestgehend mit der tatsächlichen Se-Konzentrationserhöhung ( $=$  gemessene Se-Konzentration der Se-angereicherten Silage – Se-Konzentration der Nullvariante) deckt. Wirkungsgrade  $> 100 \%$  ergeben sich unter anderem aufgrund von Trockensubstanzverlusten während der Fermentation, in der Regel liegen die Überschreitungen des theoretischen Se-Wertes jedoch im Bereich des statistischen Fehlers, vgl. Anhangtab. 48. Ausgehend von einer offenbar ausreichenden Konzentrationserhöhung um  $75 \mu\text{g Se kg}^{-1} \text{ TS}$  und durchschnittlichen TS-Erträgen zwischen  $15$  und  $30 \text{ dt ha}^{-1}$  der Mitte Mai geernteten Primäraufwüchse in der Untersuchungsregion (STERZENBACH 2000) ergeben sich Aufwandmengen von  $0,1$  bis  $0,2 \text{ g Se ha}^{-1}$ . Methoden, die eine Se-Aufnahme durch wachsende Pflanzen voraussetzen, haben, bedingt durch die Prozesse im Boden, einen geringeren Wirkungsgrad, womit sich die notwendigen Aufwandmengen zwischen  $4$  und  $10 \text{ g Se ha}^{-1}$  erklären. Anhangabb. 1 zeigt die Effizienz von vier Wochen vor der Ernte in Form von Na-Selenat applizierten Se-Gaben in Abhängigkeit von Ca-Gabe, N-Gabe, Se-Gabe, Standort und Jahr. Obwohl die Flüssigapplikation von Selenat als effiziente Methode der Se-Konzentrationserhöhung in Grünlandaufwüchsen gilt (MORE & COPPENET 1980, GUPTA et al. 1983a, GISSEL-NIELSEN et al. 1984, YLÄRANTA 1984, MIKKELSEN et al. 1989, MCDOWELL et al. 2002), beträgt die Se-Menge im Aufwuchs nur  $5 - 13 \%$  ( $=$  Folgeaufwuchs) bzw.  $1 - 23 \%$  ( $=$  Primäraufwuchs) der applizierten Se-Menge. Da die Nachwirkung einer Selenat-Gabe - bezogen auf die Se-Konzentrationen folgender Aufwüchse - gering ist (WATKINSON & DAVIES 1967, YLÄRANTA 1983b, BAHNERS & HARTFIEL 1985, 1987, BAHNERS 1987, OPITZ v. BOBERFELD 2002a), muss davon ausgegangen werden, dass der überwiegende Teil der Se-Gabe in oberflächennahen Schichten des Bodens (YLÄRANTA 1982) in nicht pflanzenverfügbaren Formen verbleibt. Grundsätzlich ist angesichts des offensichtlichen Se-Defizits im System Boden/Pflanze in Mitteleuropa ein Anstieg des Se-Pools im Boden zumindest für eine Übergangszeit zu begrüßen. Bei Verfütterung von Se-angereicherter Silage an Wiederkäuer in Weidesystemen wird dem Boden ein Teil des aufgenommenen Se ebenfalls über Harn und Kot zugeführt, jedoch dürften

diese Se-Einträge, die wahrscheinlich in vergleichbarem Umfang auch nach Aufnahme eines mit Se applizierten Weideaufwuchses auftreten, aufgrund der niedrigen Besatzdichten in extensiven Weidesystemen und geringen Se-Mengen im Futter ausgesprochen gering ausfallen. Zudem ist die Pflanzenverfügbarkeit dieser an organische Substanz gebundenen Se-Quelle als gering einzustufen (AJWA et al. 1998). Somit besteht bei Anreicherung des Siliergutes mit Selenat der Nachteil, dass auf diese Weise nur während der Periode mit Konservenverfütterung eine ausreichende Se-Versorgung der Wiederkäuer zu gewährleisten ist. Wird die Se-Anreicherung des Siliergutes mit der Verwendung von selenatbehandeltem Saatgut für die Nachsaat vor Beginn der Beweidung im Frühjahr kombiniert, so lässt sich zumindest über einen Zeitraum von sechs bis neun Monaten die Se-Versorgung der Wiederkäuer beeinflussen.

## 6 Zusammenfassung

Zur Bewertung des Einflusses der Umweltbedingungen und des Pflanzenbestandes auf die Se-Konzentrationen im Futter bei extensiver Bewirtschaftung wurden Se- und ergänzend S- Konzentrationen von im Mai geernteten Primäraufwüchsen zweier Jahre von je 20 *Arrhenatherion elatioris*-, *Festuco-Cynosuretum*-, *Bromion racemosi*- und *Lolio-Cynosuretum*- sowie drei *Polygono-Trisetion*-Beständen mit unterschiedlichen Standorteigenschaften ermittelt; darüber hinaus wurde die jahreszeitliche Dynamik untersucht. Um die Effizienz abgestufter Se-Gaben unter variierenden Bedingungen zu bewerten, wurden an drei unterschiedlichen Standorten Freilandexperimente mit den Faktoren Se-Applikation (= 0, 4, 12 g Se ha<sup>-1</sup> als Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub>-Lösung), Ca-Gabe (= 0, 40 dt CaO ha<sup>-1</sup> als CaCO<sub>3</sub>), N-Düngung (= 0, 80 kg N ha<sup>-1</sup> als Kalkammonsalpeter) und Aufwuchs (= Primär-, Folgeaufwuchs) durchgeführt. Als systemadäquate Applikationswege für extensiv organisierte Weidesysteme wurden Se-Gaben im Zusammenhang mit Nachsaaten und der Gärfutterbereitung untersucht. Die Eignung von Se-Zusätzen zum Saatgut wurde in Experimenten mit den Faktoren Se-Gabe (= 0, 4, 12, 36 g Se ha<sup>-1</sup>, bezogen auf 20 kg Saatgut ha<sup>-1</sup>), Wasserspannung (= pF 0, pF 3,0, pF 3,6) und Licht (= Grünfilter, Dunkelheit) getestet und die Resultate durch einen Gefäßversuch abgesichert. Um die mögliche Beeinträchtigung der Epiphyten – gemessen an ihren Stoffwechselprodukten – und Veränderungen der Se-Form infolge anaerober Umweltbedingungen zu erfassen, wurden in einem mehrfaktoriellen Ansatz Laborsilagen mit den Varianten Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub>-Zusatz (= 0, 75, 150, 300, 1200 µg Se kg<sup>-1</sup> TS), Vorwelkegrade (= 30, 40 % TS) und Hauptbestandbildner (= *Festuca arundinacea*, *Lolium perenne*) getestet. Se wurde mit der AAS-Hydrid-Technik nach mikrowellenunterstütztem Hochdruckaufschluss, S und C über die Elementaranalyse nach Hochtemperaturverbrennung bestimmt. Die Ergebnisse werden wie folgt zusammengefasst:

1. Der **Se-Status** der Aufwüchse war zu 99 % als defizitär zu bezeichnen. *Lolio-Cynosuretum*-Aufwüchse wiesen überdurchschnittlich häufig Konzentrationen < 50 µg Se kg<sup>-1</sup> TS auf. Auf staunässe- bzw. grundwasserbeeinflussten Böden lagen mehrfach Konzentrationen > 50 µg Se kg<sup>-1</sup> TS vor. Die Se-Gehalte im Boden waren positiv mit dem Gehalt organischer Substanz korreliert. Durch das generell niedrige Niveau der Se-Konzentrationen im Pflanzenmaterial waren Beziehungen zu den Merkmalen pH-Wert, Se-, C- oder S-Gehalt der Böden nicht zu belegen.



Die S-Konzentrationen sowie N/S-Quotienten zeigten, dass S-Gaben bezogen auf Pflanzenbestand und Weidetier unter den Bedingungen in der Regel nicht notwendig sind.

2. Im **Zeitreihenexperiment** konnten zunehmende Se-Konzentrationen mit fortschreitender Vegetationsperiode nachgewiesen werden. Die niedrigsten Se-Konzentrationen ergaben sich im futterbaulich wichtigen Monat Mai.
3. Durch **Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub>-Applikation auf Grünlandbestände** wurden bereits mit 4 g Se ha<sup>-1</sup> stets Konzentrationen > 100 µg Se kg<sup>-1</sup> TS erreicht. Die Ca-Gabe führte trotz Anhebung des pH-Wertes von pH 5,0 auf pH 6,0 bzw. von pH 5,5 auf pH 6,5 nur in wenigen Fällen zu einer erhöhten Se-Aufnahme. Ca- und N-Gaben wirkten sich nur in Beständen mit Se-Applikation auf die Se-Konzentration aus. Zwischen den Standorten bestanden Unterschiede in der Effizienz der Se-Gaben; auf dem Standort mit dem höchsten Gehalt an organischer Substanz wurden die geringsten Steigerungen der Se-Konzentration festgestellt. Gemessen an den jeweils zum Primäraufwuchs und Folgeaufwuchs applizierten Se-Mengen wurden 1 - 23 % bzw. 5 -13 % im Erntegut nachgewiesen.
4. Die **Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub>-Zugabe zu Saatgut** in einer Dosierung entsprechend 4 g Se ha<sup>-1</sup> beeinträchtigte die Keimung von *Lolium perenne* nicht. Die Keimfähigkeit blieb überwiegend auch noch bei der 16fachen Dosis unverändert hoch. Die Se-Behandlung von Saatgut führte zu keinen Ertragseinbußen.
5. Durch **Anreicherung des Siliergutes** mit Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> wurden ausreichende Se-Konzentrationen in den Konserven sichergestellt. Gasförmige Se-Verluste während der Fermentation traten offenbar nur begrenzt auf. Selenat wird während des Fermentationsprozesses anscheinend vollständig in höhermolekulare Verbindungen, vermutlich organischer Art, überführt. Auch bei hohen Se-Gaben wurden gärbioologisch einwandfreie Silagen erzeugt.

Da die Se-Konzentrationen in Grünlandaufwüchsen nahezu flächendeckend inadäquat sind, müssen systemkompatible Methoden der Supplementierung zur Anwendung kommen. Indirekte, pflanzenbauliche Ansätze gewährleisten hier - im Unterschied zu direkten Verfahren mit Se-haltigen Lecksteinen oder angereichertem Trinkwasser - eine bedarfsgerechte Se-Versorgung aller Individuen und sind kostengünstiger (= Arbeitsaufwand, Arbeitssicherheit) als Se-Injektionen und intraruminale Verweilboli. Die Verwendung von selenathaltigen Mehrnährstoffdüngern steht im Widerspruch zur Forderung nach niedrigen Produktionskosten für das Grundfutter. In

---

Verbindung mit regelmäßiger Nachsaat eignet sich Saatgut als Transportmedium für Se-Gaben. Da die Gärfutterbereitung extensiver Grünlandssysteme Additive zur Hemmung von Clostridien erfordert, bietet sich hier die Kombination mit Se-Zusätzen an. Eine vorgeschaltete Se-Anreicherung von Silierhilfsmitteln bzw. Saatgut durch die jeweiligen Hersteller begrenzt das Risiko von Fehldosierungen für das Personal und die Weidetiere.

## 7 Summary

### Agronomical Procedures to Provide Grazing Suckler Cows and Beef Cattle with Selenium

For the assessment of possible effects of environmental conditions and botanical characteristics on the selenium concentrations in herbage from low-input grassland systems, the Se content in varied primary growths was analysed. Additionally, the S concentration was determined. Herbage of *Arrhenatherion elatioris*, *Festuco-Cynosuretum*, *Bromion racemosi*, and *Lolio-Cynosuretum* communities from 20 locations each and of three *Polygono-Trisetion* communities was harvested mid May during two subsequent years. In addition, the seasonal dynamics of Se concentrations were analysed. Field experiments were established on three different sites to assess the efficiency of different levels of Se application under varying conditions. The factors of this experiment were: amount of Se (= 0, 4, 12 g Se ha<sup>-1</sup>, by application of Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> solution), liming (= 0, 4 t CaO ha<sup>-1</sup> by CaCO<sub>3</sub>), application of N (= 0, 80 kg N ha<sup>-1</sup> by calcium ammonium nitrate), and growth (= primary growth, secondary growth). Suitable pathways for Se application in low-input systems associated with repair seeding and silage making were tested. The suitability of Se enrichment of seeds was assessed varying the amount of Se (= 0, 4, 12, 36 g Se ha<sup>-1</sup>, related to 20 kg seeds ha<sup>-1</sup>), water tension (= pF 0, pF 3,0, pF 3,6), and light (= green filter, darkness). The results were supported by additional pot trials. To examine possible negative effects on epiphytical micro organisms and changes in Se forms as a result of aerobic conditions, silages were produced in laboratory scale in a multi-factorial experiment with following factors: addition of Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> (= 0, 75, 150, 300, 1200 µg Se kg<sup>-1</sup> DM), pre-wilting (= 30, 40 % DM) and dominant plant species (= *Festuca arundinacea*, *Lolium perenne*). Se was determined by hydride generation AAS with microwave sample preparation in high-pressure vessels. S and C concentrations were measured by CNS analysis after high-temperature combustion. The results are summarised as follows:

1. The **Se status** in herbage was deficient in 99 % of the samples. Concentrations of < 50 µg Se kg<sup>-1</sup> were more frequent in growths of *Lolio-Cynosuretum* than in others. Frequently, herbage grown on soils with changeable hydrological conditions showed concentrations > 50 µg Se kg<sup>-1</sup>. The Se content of soil was

positively correlated with content of organic matter. The generally low Se level in herbage prevented a verification of correlations between Se concentrations in plants and soil characteristics, such as pH, Se, C, or S content of the soil. S concentrations and N/S ratio do not indicate a requirement for supplemental S for plant or ruminant under outlined conditions.

2. The determination of **temporal changes** of Se in herbage showed increasing values in the course of the vegetation period. The concentrations were the lowest in May, which is probably the most important month for forage production.
3. **Application of Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> to grassland swards** resulted steadily in concentrations > 100 µg Se kg<sup>-1</sup> DM already after application of 4 g Se ha<sup>-1</sup>. Generally, liming had a negligible effect on the uptake of Se, although pH increased from pH 5,0 to pH 6,0 or from pH 5,5 to pH 6,5, respectively. Effects of liming and N-fertilization were only significant when Se was applied. Differences in efficiency of Se application were found among different locations. The increase of Se concentrations by Se application was diminished on the location with the highest content of organic matter in soil. In relation to Se applied, 1 – 23 % (= primary growth) and 5 – 13 % (=secondary growth) of Se was detected in herbage.
4. The **addition of Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> to seeds of *Lolium perenne*** corresponding to the application rate of 4 g Se ha<sup>-1</sup> does not affect germination. Even at 16-fold higher dosage, germination rates remained constantly high. The Se-treatment of seeds had no negative effect on dry matter yield.
6. **Enrichment of herbage with Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> before ensiling** enabled sufficient concentrations of Se in preserves. Apparently, volatilisation of Se during fermentation was negligible. In the fermentation process, selenate was apparently completely transformed to undefined compounds of high molecular weight, probably of organic origin. Not even on high levels of Se addition, interferences on the composition of the fermentation products were noticed.

On account of the nearly ubiquitous Se deficiency of herbage, compatible methods of Se supplementation for grazing ruminants are needed. Indirect, agronomical procedures enable a demand-oriented supplementation to all individuals, in contrast to free-choice Se mineral supplements or Se in drinking water, and are less expensive (= amount of work and safety) than Se injections and intraruminal pellets or boluses. The application of selenate containing multi-nutrient fertilizer is

inconsistent with the requirement for low costs. Using seeds as a carrier for Se is suitable in systems with periodical repair seeding. The integration of Se application within the process of silage making is practical, because silage making in low-input systems requires the application of silage additives anyway. The Se enrichment of silage additives or seeds outside the farms by the respective producers of these products may limit the risk of careless use in view of human and animal health.

## 8 Literaturverzeichnis

1. ABRAMS, M.M., R.G. BURAU & R.J. ZASOTZKI, 1990a: Organic selenium distribution in selected California soils. *Soil. Sci. Soc. Amer.* **54**, 979-982.
2. ABRAMS, M.M., C. SHANNAN, R.J. ZASOTZKI & R.G. BURAU, 1990b: Selenomethionine uptake by wheat seedlings. *Agron. J.* **82**, 1127-1130.
3. ABU-ERREISH, E.I., D.C. WHITEHEAD & O.E. OLSON, 1968: Evolution of volatile selenium from soils. *Soil Sci.* **106**, 415-426.
4. ADRIANO, D.C., 1986: Trace elements in the terrestrial environment. Verl. Springer, New York.
5. AJWA, H.A., G.S. BANUELOS & H.F. MAYLAND, 1998: Selenium uptake by plants from soils amended with inorganic and organic materials. *J. Environm. Qual.* **27**, 1218-1227.
6. ALLAWAY, W.H., 1970: Sulphur-selenium relationships in soils and plants. *J. Sulphur Inst.* **6**, 3-5.
7. ANGELOW, L. & M. ANKE, 1987: Selenmangelerscheinungen. Arbeitstagung Mengen und Spurenelemente, Karl-Marx Universität Leipzig, 440-447.
8. ANGELOW, L., M. ANKE & U. KRAUSE, 1987: Die Widerspiegelung des Selenstatus durch verschiedene Körperteile und die Milch der Ziege. Arbeitstagung Mengen und Spurenelemente, Karl-Marx Universität Leipzig, 431-439.
9. ANGER, M., 1989: Zur Applikationstechnik von Nährstoffsuspensionen und -lösungen auf Pflanzenmischbestände. Diss. Gießen.
10. ANKE, M., M. PATSCHEFELD, J. KURSA & V. KROUPOVA, 1983: Die Selenmyopathie. *Wiss. Zeitschr. Friedrich-Schiller-Univ. Jena, Math.-Naturwiss. R.* **4/5**, 809-820.
11. ANONYMUS, 1976: Selenium. *Comm. Med. Biol. Eff. Environ. Pollut., Div. Med. Sci.*, NAS-NRC, Washington, DC.
12. ANONYMUS, 1981: Futtermittelverordnung (FMV 1981), zuletzt geändert durch die 20. ÄVO zur FMV, BGBl. I Nr. 32 vom 29.5.2002, S. 1675.
13. ANONYMUS, 1985: Nutrient requirements for domestic animals. 6<sup>th</sup> ed. – Publ. National Res. Council, National Academy Press, Washington D.C.

14. ANONYMUS, 1991: Die Untersuchung von Böden. Methodenbuch **1**. 4. Aufl., Verl. VDLUFA, Darmstadt.
15. ANONYMUS, 1995: DIN/ISO 10654, Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von organischem Kohlenstoff, Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung. (Elementaranalyse). Verl. Beuth, Berlin u. Köln.
16. ANONYMUS, 1996: Nutrient requirements for beef cattle. 7<sup>th</sup> ed. – Publ. National Res. Council, National Academy Press, Washington D.C.
17. ANONYMUS, 1997: Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Methodenbuch **3**. 4. Ergänzungslieferung. Hrsg. u. Verl. VDLUFA, Darmstadt.
18. ANONYMUS, 1998a: Atmosphärische Emissionen von 9 prioritären Schwermetallen in Deutschland 1985 bis 1995. Umweltbundesamt (Hrsg.), Stand 1998. URL:<http://www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/bericht/aktuelle-daten/schadstoffe/schwermetalle/HM Prio.pdf>.
19. ANONYMUS, 1998b: DIN/ISO 13878, Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von Gesamtstickstoff durch trockene Verbrennung. (Elementaranalyse). Verl. Beuth, Berlin u. Köln.
20. ANONYMUS, 2000: SPSS für Windows. Version 10.0. SPSS Software, München.
21. ANONYMUS, 2001a: Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001), BGBl. I, 21.5.2001. S. 959.
22. ANONYMUS, 2001b: Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchttrinder. Hrsg.: AUSSCHUSS FÜR BEDARFSNORMEN DER GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE. Verl. DLG, Frankfurt am Main.
23. ANONYMUS, 2003: Düngemittelverordnung (DüMV), BGBl. I, 26. November 2003 S. 2373.
24. ARDÜSER, F, S. WOLFFRAM, E. SCHARRER & B. SCHNEIDER, 1986: Transport of selenate and selenite across the brush border membrane of rat and sheep small intestine. Biol. Trace Elem. Res. **9**, 281-290.
25. ARO, A., G. ALPHTAN & P. VARO, 1995: Effects of supplementation of fertilizers on human selenium status in Finland. Analyst **120**, 841-843.
26. ARTHUR, M.A., G. RUBIN, P.B. WOODBURY & L.H. WEINSTEIN, 1993: Gypsum amendment to soil can reduce selenium uptake by alfalfa grown in the presence of coal fly ash. Plant and Soil **148**, 83-90.

27. ASHER, C.J., G.W. BUTLER & P.J. PETERSON, 1977: Selenium transport in root systems of tomato. *J. Exp. Bot.* **28**, 279-291.
28. AVRY, M.P., 1993: Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). *J. Exp. Bot.* **44**, 1083-1087.
29. AVSIAN-KRETCHMER, O., Y. ESHDAT, Y. GUHETA-DAHAN & G. BEN-HAYYIM, 1999: Regulation of stress-induced phospholipid hydroperoxide glutathione peroxidase expression in Citrus. *Planta* **209**, 469-477.
30. BACKALL, K.A. & R.W. SCHOLZ, 1979: Reference values for a feed test to estimate inadequate glutathione peroxidase activity and selenium status in the blood of cattle. *Am. J. Vet. Res.* **40**, 733-738.
31. BAHNERS, N., 1987: Selengehalte von Böden und deren Grasaufwuchs in der Bundesrepublik sowie Möglichkeiten der Selenanreicherung durch verschiedene Selendüngungen. Diss. Bonn.
32. BAHNERS, N. & W. HARTFIEL, 1985: Anreicherung von Selen in Raygras (*Lolium italicum*) durch Düngung verschiedener Selenmengen und Selenverbindungen. Kongreßband 1985, VDLUFA-Schriftenr. **16**, 503-509.
33. BAHNERS, N. & W. HARTFIEL, 1987: Beeinflussung des Selengehaltes von wirtschaftseigenen Futtermitteln durch Selen- bzw. NPK-Düngung. *D. wirtschaftseig. Futter* **33**, 5-12.
34. BANUELOS G.S., A. ZAYED, N. TERRY, L. WU, S. AKOHOUE & S. ZAMBRZUSKI, 1996: Accumulation of selenium by different plant species grown under increasing sodium and calcium chloride salinity. *Plant and Soil* **183**, 49-59.
35. BANZHAF, K., 2004: Einfluss von Pflanzengesellschaft und Bewirtschaftungsintensität auf Muster und Konzentration ausgewählter Mineralstoffe von Winterweidefutter. Diss. Giessen.
36. BARROW, N.J. & B.R. WHELAN, 1989a: Testing a mechanistic model. VII. The effects of pH and electrolyte on the reaction of selenite and selenate with a soil. *J. Soil Sci.* **40**, 17-28.
37. BARROW, N.J. & B.R. WHELAN, 1989b: Testing a mechanistic model. VIII. The effects of time and temperature of incubation on the sorption and subsequent desorption of selenite and selenate by a soil. *J. Soil Sci.* **40**, 29-37.



38. BEHNE, D., A. KYRIAKOPOULOS, H. MEINHOLD & J. KÖHRLE, 1990: Identification of type I iodothyronine 5'-deiodinase as a selenoenzyme. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* **173**, 1143-1149.
39. BEHNE, D. & A. KYRIAKOPOULOS, 2001: Mammalian Selenium-containing proteins. *Annu. Rev. Nutr.* **21**, 453-473.
40. BLAYLOCK, M.J. & B.R. JAMES, 1994: Redox transformations and plant uptake of selenium resulting from root-soil interactions. *Plant and Soil* **158**, 1-12.
41. BOEHNKE, H.J., A. KLASINK & J. EHLERS, 1997: Selengehalte im Blut von Rindern im Weser-Ems-Gebiet sowie Effekt einer Se-Düngung der Weideflächen auf den Se-Gehalt im Aufwuchs und im Blut von Weiderindern auf einem extremen Selenmangelstandort. *Dtsch. Tierärztl. Wschr.* **104**, 534-536.
42. BOSTEDT, H., 1980: Über die ernährungsbedingte Muskeldystrophie bei Jungtieren in den ersten Lebenstagen und -wochen. *Collegium veterinarium* 1979, 45-49.
43. BOSTEDT, H. & H. SCHRAMMEL, 1981: Vergleichende Untersuchungen über die Selenkonzentrationen im Blutserum, in der Plazenta, im Myometrium und in der Milch von Kühen mit oder ohne Retentio secundinarium. *Zbl. Vet. Med. A.* **28**, 529-537.
44. BOSTEDT, H. & H. SCHRAMMEL, 1983: Effekt unterschiedlicher Selensupplementierung auf die Selenkonzentration in Blut und Plazentagewebe bei Kühen. *Dtsch. Tierärztl. Wschr.* **104**, 398-401.
45. BOSTEDT, H., E. JEKEL & H. SCHRAMMEL, 1987: Bestimmungen von Selenkonzentrationen im Blutplasma neugeborener Kälber aus klinischer Sicht. *Tierärztl. Prax.* **15**, 369-372.
46. BOYNE, R. & J.R. ARTHUR, 1979: Alterations of neutrophil function in selenium deficient cattle. *J. Comp. Pathol.* **89**, 151-159.
47. BRAUN-BLANQUET, J., 1964: *Pflanzensoziologie*. 3. Aufl., Verl. Springer, Wien, New York.
48. BRÖCKER, R., 1996: Auswirkungen von Selenzulagen auf Fermentationsvorgänge im Pansensaft des Rindes (in vitro). *Diss. Hannover*.
49. BRUß, A., 1998: Untersuchungen zum Haushalt und zum Transfer von Selen im System Boden/Pflanze an einigen nord- und ostdeutschen Standorten. *Diss. Jena*.

50. BRUß, A., K.-W. BECKER, H. BERGMANN, B. MACHELETT & B. MEYER, 1997: Vorräte und Mobilität von Selen in Böden. Mitt. Deutsche Bodenkundl. Ges. **85**, 221-224.
51. CAMPBELL, D.T., J. MAAS, D.W. WEBER, O.R. HEDSTROM & B.B. NORMAN, 1990: Safety and efficacy of two sustained-release intra-reticular selenium supplements and the associated placental and colostrums transfer of selenium in beef cattle. Am. J. Vet. Res. **51**, 813-817.
52. CANTOR, A.H., P.O. MOOREHEAD & M.A. MUSSER, 1981: Biological availability of selenium in selenium compounds and feed ingredients. In: Selenium in Biology and Medicine. Eds.: J.E. SPALLHOLZ, J.L. MARTIN & H.E. GANTHER. Avi Publ. Company, Inc., Westport, Connecticut, 192-202.
53. CARY, E.E. & W.H. ALLAWAY, 1969: The stability of different forms of selenium applied to low selenium soils. Soil. Sci. Soc. Am. Proc. **33**, 571-574.
54. CARY, E.E., G.A. WIECZOREK & W.H. ALLAWAY, 1967: Reaction of selenite-selenium added to soils that produce low-selenium forages. Soil. Sci. Soc. Am. Proc. **31**, 21-26.
55. CARY, E.E., W.H. ALLAWAY & M. MILLER, 1973: Utilization of different forms of dietary selenium. J. Anim. Sci. **36**, 285-292.
56. CHASTEEN, T.G. & R. BENTLEY, 2003: Biomethylation of selenium and tellurium: Microorganisms and Plants. Chem. Reviews **103**, 1-25.
57. COBURN WILLIAMS, M. & H.F. MAYLAND, 1992: Selenium absorption of two-grooved milkvetch and western wheatgrass from selenomethionine, selenocystein, and selenite. J. Range Manage. **45**, 374-378.
58. CORAH, L., 1996: Trace mineral requirements of grazing cattle. Anim. Feed. Sci. technol. **59**, 61-70.
59. COMBS, G.F. JR. & S.B. COMBS, 1984: The nutritional biochemistry of selenium. Ann. Rev. Nutr. **4**, 257-280.
60. COMBS, G.F. JR. & S.B. COMBS, 1986: The role of selenium in nutrition. Academic Press Inc., Orlando.
61. DAVIES, E.B. & J.H. WATKINSON, 1966: Uptake of native and applied selenium by pasture species. 1. Uptake of selenium by brown top, rye grass, cocksfoot and white clover from Atimuri sand. N. Z. J. Agric. Res. **9**, 317-327.

62. DE SOUZA, M.P., E.A.H. PILON-SMITS, C.M. LYTLE, S. HWANG, J. TAI, T.S.U. HONMA, L. YEH & N. TERRY, 1998: Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard. *Plant Phys.* **117**, 1487-1494.
63. DE SOUZA, M.P., D. CHU, M. ZHAO, A.M. ZAYED, S.E. RUZIN, D. SCHICHNES & N. TERRY, 1999: Rhizosphere bacteria enhance selenium accumulation and volatilization by Indian mustard. *Plant Phys.* **119**, 565-573.
64. DHILLON K.S. & S.K. DHILLON, 2000 : Selenium accumulation by sequentially grown wheat and rice as influenced by gypsum application in a seleniferous soil. *Plant and Soil* **227**, 243-248.
65. DIERSCHKE, H., 2002: Typen von Grünlandökosystemen. In: Pflanzengesellschaften von Grünlandökosystemen. DIERSCHKE, H. & G. BRIEMLE: Kulturgasland. Verl. Eugen Ulmer, Stuttgart, 32-66.
66. DOWDLE, P.R. & R.S. OREMLAND, 1998: Microbial Oxidation of elemental selenium in soil slurries and bacterial cultures. *Environ. Sci. Technol.* **32**, 3749-3755.
67. DOWNES, C.P., C.A. MCAULIFFE & M.R.C. WINTER, 1979: Selenium in biochemistry. *Inorg. Perspectives Biol. Med.* **2**, 241-270.
68. DUCKER, M.J., P.T. KENDALL, R.G. HEMINGWAY & T.H. MCCLELLAND, 1981: An evaluation of feedblocks as means of providing supplementary nutrients to ewes grazing upland/hill pastures. *Anim. Prod.* **33**, 51-58.
69. DROBNER, C., 1997: Die Selenversorgung Erwachsener Deutschlands. Diss. Jena.
70. DROBNER, C., B. RÖHRIG, M. ANKE & G. THOMAS, 1997: Selenium Intake of adults in Germany depending on sex, time living area and type of diet. In: Trace elements in man and animals. Proceedings of the 9<sup>th</sup> international symposium on trace elements in man and animals. NRC, Ottawa, Canada, 158-159.
71. DÜRRE, P. & J.R. ANDREESEN, 1982: Selenium dependent growth and glycine fermentation by *Clostridium purinolyticum*. *J. Gen. Microbiol.* **128**, 1457-1466.
72. EGER, S., D. DRORI, I. KADOORI, K.N. MILLER & H. SCHINDLER, 1985: Effects of selenium and vitamin E on incidence of retained placenta. *J. Dairy Sci.* **68**, 2119-2122.

73. EHLIG, C.F., W.H. ALLAWAY, E.E. CARY & J. KUBOTA, 1968: Differences among plant species in selenium accumulation from soils low in available selenium. *Agron. J.* **60**, 43-47.
74. ELRASHIDI, M.A., D.C. ADRIANO & W.L. LINDSAY, 1989: Solubility, Speciation, and Transformations of selenium in soils. In: JACOBS, L.W. (ed.): Selenium in agriculture and the environment. Proceedings of the symposium of the American Society Agronomy and Soil Science Society of America in New Orleans, LA. SSSA Special Publication **23**, 51-63.
75. ERSKINE, R.J., R.J. EBERHART, P.J. GRASSO & R.W. SCHOLZ, 1989: Introduction of *Escherichia coli* mastitis in cows fed selenium-deficient or selenium-supplemented diets. *Am. J. Vet. Res.* **50**, 2092-2100.
76. ERSKINE, R.J., R.J. EBERHART & R.W. SCHOLZ, 1990: Experimentally induced *Staphylococcus* mastitis in selenium-deficient and selenium supplemented dairy cows. *Am. J. Vet. Res.* **51**, 1107-1111.
77. FARÍA-MÁRMOL, J., D.E. MORILLO, A. CARABALLO & L.R. MCDOWELL, 1997: Effect of defoliation and nitrogen and phosphorus fertilization on *Andropogon gayanus* Kunth. 3. Microelement concentration. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* **28**, 875-883.
78. FIO, J.L., R. FUJII & S.J. DEVEREL, 1991: Selenium mobility and distribution in irrigated and nonirrigated alluvial soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **55**, 1313-1320.
79. FISCHER, A., 2002: Untersuchungen zum Einfluss von Selen und Vitamin E auf differentielle Genexpression, antioxidative Schutzmechanismen und Zellschädigungen bei der Ratte. Diss. Gießen.
80. FRANKENBERGER W.T. & U. KARLSON, 1994: Microbial volatilisation of selenium from soils and sediments In: FRANKENBERGER, W.T. & S. BENSON (eds.): Selenium in the environment. Marcel Dekker, New York.
81. FREDE, H.G. & M. BACH, 2002: Vorwort zum Themenheft „Multifunktionalität der Landnutzung im Rahmen des SFB“. *Berichte über Landwirtschaft* **80** (3), 325-326.
82. FRITZ, S.J. & S.D. HALL, 1988: Efficacy of various sorbic media in attenuation of selenium. *J. Environ. Qual.* **17**, 480-484.
83. GANTHER, H.E. & C.A. BAUMANN, 1962: Selenium metabolism. I. Effects of diet, arsenic and cadmium. *J. Nutr.* **77**, 210-216.

84. GARBISU, C., T. ISHII, T. LEIGHTON & B.B. BUCHANAN, 1996: Bacterial reduction of selenite to elemental selenium. *Chem. Geol.* **132**, 199-204.
85. GE, K. & G. YANG, 1993: The epidemiology of selenium deficiency in the etiological study of endemic diseases in China. *Am. J. Clin. Nutr.* **57**, 259-263.
86. GEERING, H.R., E.E. CARY, L.H.P. JONES & W.H. ALLAWAY, 1968: Solubility and redox criteria for the possible forms of selenium in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **32**, 35-40.
87. GERICKE, S. & B. KURMIES, 1952: Die kolorimetrische Phosphorsäurebestimmung in Ammonium-Vanadat-Molybdat und ihre Anwendung in der Pflanzenanalyse. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.* **59**, 235-247.
88. GIERUS, M., F.J. SCHWARZ & M. KIRCHGESSNER, 2001: Selenium supplementation and selenium status of dairy cows fed diets based on grass, grass silage or maize silage. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.* **86**, 74-82.
89. GIRLING, C.A., 1984: Selenium in agriculture and environment. *Agric. Ecosystems Environ.* **11**, 37-65.
90. GISSEL-NIELSEN, G., 1971: Influence of pH and texture on plant uptake of added selenium. *J. Agric. Food Chem.* **19**, 1165-1167.
91. GISSEL-NIELSEN, G., 1975a: Selenium concentration in Danish forage crops. *Acta Agric. Res. Scand.* **25**, 216-220.
92. GISSEL-NIELSEN, G., 1975b: Foliar application and pre-sowing treatment of cereals with selenite. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **138**, 97-105.
93. GISSEL-NIELSEN, G., 1993: General aspects of selenium fertilization. *Norwegian J. Agric. Sci.* **11**, 135-140.
94. GISSEL-NIELSEN, G. & A.A. HAMDY, 1978: Plant uptake of selenium and  $L_{Se}$ -values in different soils. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **141**, 67-75.
95. GISSEL-NIELSEN, G., U.C. GUPTA, M. LAMAND & T. WESTERMARK, 1984: Selenium in soils and plants and its importance in livestock and human nutrition. *Adv. Agron.* **37**, 397-455.
96. GOLUBEV V.I. & N.V. GOLUBEV, 2002: Selenium tolerance of yeasts. *Microbiol.* **71**, 455-459.
97. GOMEZ, K. A. & A. A. GOMEZ, 1976: Statistical procedures for agricultural research. 2<sup>nd</sup> ed. J. Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto.

98. GRÜNDER, H.-D. & S. AUER 1995: Selenversorgung in hessischen Rinderbeständen und Möglichkeiten der Prophylaxe. Tierärztl. Umschau **50**, 250-255.
99. GÜNSTER, K.-H. & H. FRÖLEKE, 1986: Die physiologisch-toxikologische Wirkung des Selens. Ernährungs-Umschau **33**, 116-120.
100. GUPTA, U.C., 1995: Effects of Selcote ® ultra and sodium selenate (laboratory vs. Commercial grade) on selenium concentration in feed crops. J. Plant Nutr. **18** , 1629-1636.
101. GUPTA, U.C., H.T. KUNELIUS & K.A. WINTER, 1983a: Effect of foliar applied selenium on yields and selenium concentrations of alfalfa, timothy and barley. Can. J. Soil Sci. **63**, 455-459.
102. GUPTA, U.C., K.A. WINTER & H.T. KUNELIUS, 1983b: Effect of treating forage seed with selenium on the selenium concentration of alfalfa and Westerwolds ryegrass. Can. J. Soil Sci. **63**, 641-643.
103. GUPTA, U.C. & J.A. MACLEOD, 1994: Effects of various sources of selenium fertilization on selenium concentration of feed crops. Can. J. Soil Sci. **74** , 285-290.
104. GUTENMANN, W.H., C.A. BACHE, W.D. YOUNGS & D.J. LISK, 1976: Selenium in fly ash. Sci. **191**, 966-967.
105. GYANG, E.O., J.B. STEVENS, W.G. OLSON, S.D. TSIDSAMIS & E.A. USENIK, 1984: Effects of Selenium-vitamin E injection on bovine polymorphonucleated leucocytes, phagocytosis and killing of *Staphylococcus aureus*. Am. J. Vet. Res. **46**, 175-177.
106. HALL, S.J.G., 2002: Behaviour of Cattle. In: JENSEN, P. (ed.): The Ethology of Domestic Animals: An Introductory Text. CABI Publishing, Wallingford, UK.
107. HAMDY, A.A. & G. GISSEL-NIELSEN, 1976a: Volatilization of selenium from soils. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. **139**, 671-678.
108. HAMDY, A.A. & G. GISSEL-NIELSEN, 1976b: Fractionation of soil selenium. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. **139**, 697-703.
109. HAMDY, A.A. & G. GISSEL-NIELSEN, 1977: Fixation of selenium by clay minerals and iron oxides. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. **140**, 63-70.
110. HAMILTON, J.W. & O.A. BEATH, 1963: Selenium uptake and conversion by certain crop plants. Agron. J. **55**, 528-531.

111. HANDRECK, K.A. & K.O. GODWIN, 1970: Distribution in the sheep of selenium <sup>75</sup>Se-labeled ruminal pellets. *Aust. J. Agric. Res.* **71**, 71-84.
112. HARTIKAINEN, H., T. XUE & V. PIIRONEN, 2000: Selenium as an antioxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant and Soil* **225**, 193-200.
113. HARTFIEL, W. & N. BAHNERS, 1986: Zur Selenversorgung von Wiederkäuern. Kongressband 1985, VDLUFA-Schriftenreihe **16**, 511-518.
114. HARTFIEL, W. & W. SCHULTE, 1988: Selenmangel in der Bundesrepublik (II). *Akt. Ernähr.* **13**, 77-82.
115. HARTLEY, W.J., 1963: Selenium and ewe fertility. *N. Z. Soc. Anim.* **23**, 20-27.
116. HAYGARTH, P.M., 1994: Global importance and Global cycling. In: FRANKENBERGER, W.T. & S. BENSON (eds.): *Selenium in the environment*. Marcel Dekker, New York.
117. HAYGARTH, P.M., A.F. HARRISON & K.C. JONES, 1993: Geographical and seasonal variation in deposition of selenium to vegetation. *Environ. Sci. Technol.* **27**, 2878-2884.
118. HAYGARTH, P.M., D. FOWLER, S. STÜRUP, B.M. DAVISION & K.C. JONES, 1994: Determination of gaseous and particulate selenium over rural Grassland in the U.K. *Atmospheric Environment* **28**, 3655-3663.
119. HE, Z.L., X.A. YANG, Z.X. ZHU, Q.Z. ZHANG, W.P. XIA & J.N. TAN, 1994: Effect of phosphate on the sorption, desorption and plant-availability of selenium in Soil. *Fertilizer Res.* **39**, 189-197.
120. HEIKENS, A., 1992: Untersuchungen zum Selengehalt in wirtschaftseigenen Futtermitteln und zur Selenversorgung von Pferden und Wiederkäuern in Ostfriesland. Diss. Hannover.
121. HEMINGWAY, R.G., 1999: The influence of dietary selenium and vitamin E intakes on milk somatic cell counts and mastitis in cows. *Vet Res. Commun.* **23**, 481-499.
122. HIDIROGLOU, M., D.P. HEANEY & K.J. JENKINS, 1968: Metabolism of inorganic selenium in rumen bacteria. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* **46**, 229-232.
123. HIDIROGLOU, M., J. PROULX & J. JOLETTE, 1985 : Intraruminal selenium pellet for control of nutritional muscular dystrophy in cattle. *J. Dairy Sci.* **68**, 57-66.

124. HIDIROGLOU, M., J. JOLETTE & J. PROULX, 1987 : Effect of intraruminally administered selenium soluble-glass boluses on selenium status in cows and their calves. *J. Anim. Sci.* **65**, 815-820.
125. HILL, C.H. 1972: Interaction of mercury and selenium in chicks. *Fed. Proc.* **31**, 692.
126. HIMENO, S. & N. IMURA, 2000: New aspects of physiological and pharmacological roles of selenium. *J. Health Sci.* **46**, 393-398.
127. HODGSON, J.F., 1963: Chemistry of the micronutrient elements in soil. *Adv. Agron.* **15**, 119-159.
128. HONIG, H., 1990: Evaluation of aerobic stability. *Grovfoder - Grass and Forage. Rep. Swed. Univ. Agric. Sc.* **3**, 76-82.
129. HONOLD, F. & B. HONOLD, 1991: Ionensensitive Elektroden, Grundlage und Anwendung in Biologie und Medizin. Verl. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
130. HOPPER, J.L. & D.R. PARKER, 1999: Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulphate. *Plant and Soil* **210**, 199-207.
131. HORAK, O. & R. LIEGENFELD, 1996: Untersuchungen zum Selentransfer Boden-Getreide. *VDLUFA-Schriftenreihe* **44**, 687-690.
132. HUSS, W., 1987: Futtermittel als Nährstoffträger. In: MENKE, K.H. & W. HUSS: *Tierernährung und Futtermittelkunde*. 3. Aufl. Verl. Eugen Ulmer, Stuttgart, 171-391
133. ISSELSTEIN, J., 1994: Zum futterbaulichen Wert verbreiteter Grünlandkräuter. *Habil.-Schr. Gießen*.
134. JAKUBOWSKI, N., 2004: Ergebnisse der Se-Spezies-Analyse von selenatangereicherten Silageproben. Mitteilung vom 23.01.2004.
135. JULIEN, W.E., H.R. CONRAD, J.E. JONES & A.L. MOXON, 1976: Selenium and vitamin E and incidence of retained placenta in parturient dairy cows. *J. Dairy Sci.* **59**, 1954-1959.
136. JOHNSON, C.M., 1976: Selenium in the environment. *Residue Rev.* **62**, 101-130.
137. JUDSON, G.H., N.F. ELLIS, B.R. KEMPE & M. SHALLOW, 1991: Long-acting selenium treatment for sheep. *Aust. Vet. J.* **68**, 263-365.



138. JUKOLA, E., J. HAKKARAINEN, H. SALONIEMI & S. SANKARI, 1996: Effect of selenium fertilization in feedstuffs and Selenium, Vitamin E and  $\beta$ -Carotene concentrations in blood of cattle. *J. Dairy Sci.* **79**, 831-837.
139. KIREMIDJIAN-SCHUMACHER, L., M. ROY, H. WISHE, M.W. COHEN & G. STROTZKY, 1994: Supplementation with selenium and human immune cell functions. *Biol. Trace Elem. Res.* **41**, 115-127.
140. KAISER, E. & F. WEISSBACH, 1989 : Zum Einfluß des Nitratgehaltes im Grünfutter auf den Gärungsverlauf bei der Silierung. *Wiss. Z. Humboldt-Univ. Berlin* **38**, 78-84.
141. KENDALL, N.R., S. McMULLEN, A. GREEN & R.D. RODWAY, 2000: The effect of a zinc, cobalt and selenium soluble glass bolus on trace element status and semen quality of ram lambs. *Anim. Reprod. Sci.* **62**, 277-283.
142. Klawonn, W., K. Landfriedt, C. Müller, J. KühL, A. Salewski & R.G. Heß, 1996: Zum Einfluß von Selen auf Gesundheit und Stoffwechsel von Milchkühen. *Tierärztl. Umschau* **51**, 411-417.
143. Knowles, S.O., N.D. Grace, K. Wurms & J. Lee, 1999: Significance of amount and form of dietary selenium in blood, milk and casein concentrations in grazing cows. *J. Dairy Sci.* **82**, 429-437.
144. KOENIG, K.M., L.M. RODE, R.D.H. COHEN & W.T. BUCKLEY, 1997: Effects of diet and chemical form of selenium on selenium metabolism of sheep. *J. Anim. Sci.* **75**, 817-827.
145. KOPSELL, D.A., D.E. KOPSELL W.M. RANDLE, 2003: Seed germination response of rapid-cycling *Brassica oleracea* grown under increasing sodium selenate. *J. Plant Nutr.* **26**, 1355 - 1366.
146. KOPSELL, D.A. & W.M. RANDLE, 1997: Selenate concentration affects selenium and sulfur uptake and accumulation by 'Granex 33' onions. *J. Am. Soc. Horticultural Sci.* **122**, 721-726.
147. KU, P.K., W.T. ELY, A.W. GROCE & D.C. ULREY, 1972: Natural dietary selenium,  $\alpha$ -tocopherol and effect on tissue selenium. *J. Anim. Sci.* **34**, 208-211.
148. KURSA, J., M. LÁVIČKA & J. VÍTOREK, 1974: Postmortale Befunde bei der enzootischen Muskeldystrophie des Rindes. *Monatshefte für Veterinärmedizin* **9**, 335-340.

149. LAHMANN, E., 1990: Schwermetallniederschläge in der BRD. VDI-Berichte **837**, 75-89.
150. LAKIN, H.W., 1961: Geochemistry of selenium in relation to agriculture. In: M.S. ANDERSON et al. (eds.): Selenium in agriculture. USDA Handb. **200**, 3-12.
151. LANDBERG, T. & M. GREGER, 1994: Influence of selenium on uptake and toxicity of copper and cadmium in pea (*Pisum sativum*) and wheat (*Triticum aestivum*). Physiol. Plant. **90**, 637-644.
152. LANGLANDS, J.P., G.E. DONALD, J.E. BOWLES & A.J. SMITH, 1989: Selenium concentrations in the blood of ruminants grazing in Northern New south Wales. 3. Relations between blood concentration and the response in liveweight of grazing cattle given a selenium supplement. Aust. J. Agric. Res. **40**, 1075-1083
153. LANGLANDS, J.P., G.E. DONALD, J.E. BOWLES & A.J. SMITH, 1990a: Selenium supplements for grazing sheep. 1. A comparison of soluble mineral salts and other forms of supplements. Anim. Feed. Sci. Technol. **28**, 1-13.
154. LANGLANDS, J.P., G.E. DONALD, J.E. BOWLES & A.J. SMITH, 1990b: Selenium supplements for grazing sheep. 2. Effectiveness of intra-ruminal pellets. Anim. Feed. Sci. Technol. **28**, 15-28.
155. LASER, H., 2002: Schwefel-Konzentrationen der Primäraufwüchse verschiedener Pflanzengesellschaften. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **14**, 213-214.
156. LÄUCHLI, A., 1993: Selenium in Plants. Bot. Acta **106**, 455-468.
157. LESSARD, J.R., M. HIDIROGLOU, R.B. CARSON & P. DERMINE, 1968: Intra-seasonal variations in the selenium content of various forage crops at Kapuskasing, Ontario. Can. J. Plant Sci. **48**, 581-585.
158. LEVERESQUE, M., 1974: Some aspects of selenium relationships in eastern Canadian soils and plants. Can. J. Soil. Sci. **54**, 205-214.
159. LIN, Z.-Q. & N. TERRY, 2003: Selenium removal by constructed wetlands: Quantitative importance of biological volatilization in the treatment of selenium laden agricultural drainage water. Environ. Sci. Technol. **37**, 606-615.
160. LOOK, M.P., J.K. ROCKSTROH, G.S. RAO, K.A. KREUZER, U. SPRENGLER & T. SAUERBRUCH, 1997: Serum selenium versus lymphocyte subsets and markers of disease progression and inflammatory response in human immunodeficiency virus infection. Biol. Trace Elem. Res. **56**, 31-41.

161. LORENZ, F. & H.-J. BOEHNKE, 1999: Selenversorgung des Weideviehs mit selenhaltigen Düngern, 43. Jahrestagung Arbeitsgem. Grünl. u. Futterbau, Bremen, Tagungsb. 184-187.
162. MACGREGOR, R.A., 1997: The geochemistry of Selenium in sedimentary environments: examples from the UK and Jordan. PhD thesis, University of Reading, UK.
163. MACKENZIE, A.M., N.R. KENDALL, D.V. ILLINGWORTH, D.W. JACKSON, I.M. GILL & S.B. TELFER, 2001: Selenium. In: FISHER, P.W., M.R. LÁBBÉ, K.A. COCKEL & R.S. GIBSON (eds.): Trace elements in man and animal. Kluwer Academic Publishers, New York.
164. MACE, D.L., J.A. TUCKER, C.B. BILLS & C.J. FERREIRA, 1963: Reduction of incidence of birth of premature, weak, and dead calves following sodium-selenite and  $\alpha$ -tocopherol therapy in pregnant cows. Bulletin, Calif. Dep. Agric. **52**, 21.
165. MANTGEM, P.J., L. WU & G.S. BANUELOS, 1996: Bioextraction of selenium by forage and selected field legume species in selenium laden soils under minimal field management conditions. Ecotoxicol. Environ. Saf. **34**, 228-238.
166. MARCY, J.M., T.A. MICHEL & D.G. KIRSCH, 1989: Selenate reduction by *Pseudomonas* species: a new mode of anaerobic respiration. FEMS Microbiol. **61**, 195-198.
167. MARTENS, D.A. & D.L. SUAREZ, 1999: Transformations of methylated selenium in soil. Soil Biol. Biochem. **31**, 1355-1361.
168. MASSCHELEYN, P.H., R.D. DELAUNE & W.H. PATRICK, JR., 1990: Transformations of selenium as affected by sediment oxidation-reduction potential and pH. Environ. Sci. Technol. **24**, 91-96.
169. MAYER, A.M. & A. POLJAKOFF-MAYBER, 1982: The germination of seeds. 3<sup>rd</sup> ed., Pergamon Press, London.
170. McDONALD, P., A.R. HENDERSON & S.J.E. HERON, 1991: The biochemistry of silage. 2<sup>nd</sup> ed. Publ. Chalcombe, Marlow, Bucks.
171. McDOWELL, L.R., 1996: Feeding minerals to cattle on pasture. Anim. Feed Sci. Technol. **60**, 247-271.

172. McDOWELL, L.R., S.N. WILLIAMS, M. HIDIROGLOU, C.A. NJERU, G.M. HILL, L. OCHOA & N.S. WILKINSON, 1996: Vitamin E supplementation for the ruminant. *Anim. Feed Sci. Technol.* **60**, 273-296.
173. McDOWELL, L.R., G. VALLE, L. CRISTALDI, P.A. DAVIS, O. ROSENDO & N.S. WILKINSON, 2002: Selenium Availability and Methods of Selenium Supplementation for Grazing Ruminants. Proceedings 13th Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium, Gainesville, Florida, 86-102. URL: <http://www.animal.ufl.edu/dairy/2002ruminantconference/mcdowell.htm>.
174. MC KENZIE, R.C., J.R. ARTHUR, S.M. MILLER, T.S. RAFFERTY & G.J. BECKET, 2002: Selenium and the immune system. In: P.C. CALDER, C.J. FIELD & H.S. GILL (eds.): Nutrition and immune function. CABI Publishing, Wallingford, UK.
175. MC NEAL, J.M. & L.S. BALISTRERI, 1989: Geochemistry and occurrence of selenium: An overview. In: JACOBS, L.W. (ed.): Selenium in agriculture and the environment. Proceedings of the symposium of the American Society Agronomy and Soil Science Society of America in New Orleans, LA. SSSA Special Publ. **23**, 1-13.
176. MEHLHORN, T., 1979: Lehrbuch der Tierhygiene, Teil I. Verl. Gustav Fischer, Jena.
177. MENGEL, K., 1991: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 7. Aufl. Verl. Gustav Fischer, Jena.
178. MENKE, K.H. & H. STEINGASS, 1987: Schätzung des energetischen Futterwertes aus der in vitro mit Pansensaft bestimmten Gasbildung und der chemischen Analyse. 2. Mitt. Regressionsgleichungen. *Übers. Tierern.* **15**, 59-94.
179. MICHEL, B.E. & M.R. KAUFMANN, 1973: The osmotic potential of Polyethylene Glycol 6000. *Plant Physiol.* **51**, 914-916.
180. MIKKELSEN, R.L., A.L. PAGE & F.T. BINGHAM, 1989: Factors affecting selenium accumulation by agricultural soils. *Soil. Sci. Soc. Am. Spec. Publ.* **23**, 65-94.
181. MILCHUNAS, D.G., W.K. LAUENROTH & J.L. DODD, 1983: The interaction of atmospheric and soil sulphur on the sulphur and selenium concentration of range plants. *Plant and Soil* **72**, 117-125.
182. MONEY, D.F.L., W.J. MEADS & L. MORRISON, 1986: Selenised compressed salt blocks for selenium deficient sheep. *N. Z. J. Vet.* **34**, 81-84.

183. MORE, É. & M. COPPENET, 1980 : Teneurs et sélénium des plantes fourragères. Influence de la fertilisation et des apports de sélénit. *Ann. Agron.* **31**, 297-317.
184. MORRIS, J.G., R.E. DALMAS & J.L. HALL, 1980: Salt (sodium) supplementation of range beef cows in California. *J. Anim. Sci.* **51**, 145-152.
185. MURPHY, M.D. & J.M. BOGGAN, 1988: Sulphur deficiency in herbage in Ireland - 1. Causes and extend. *Irish J. Agric. Res.* **27**, 83-90.
186. MURPHY, M.D. & T.W.A. QUIRKE, 1997: The effect of sulphur/nitrogen/selenium interactions on herbage yield and quality. *Irish J. Agric. Res.* **36**, 31-38.
187. MUSTACICH, D. & G. POWIS, 2000: Thioredoxin reductase. *Biochem. J.* **346**, 1-8.
188. MUTH, O.H., 1956: White muscle disease in lambs and calves. In: ANONYMUS: *Animal Diseases – Yearbook of Agriculture*, US Department of Agriculture, 429.
189. MUTH, O.H., 1963: White muscle disease, a selenium responsive myopathy. *J. Am. Med. Assoc.* **142**, 272-277.
190. MYNENI, S.C., T.K. TOKUNAGA & G.E. BROWN, JR., 1997: Abiotic selenium redox transformations in the presence of Fe (II, III) oxides. *Sci.* **278**, 1106-1109.
191. NAVARRO-ALARCÓN, M. & M.C. LÓPEZ-MARTÍNEZ, 2000: Essentiality of selenium in the human body: relationship with different diseases. *Sci. Tot. Environm.* **249**, 347-371.
192. NEAL, R.H., 1995: Selenium. In: ALLOWAY, B.J. (ed.): *Heavy Metals in Soils*. Blacky Academic and Professional, London. 260-283.
193. NEAL, R.H. & G. SPOSITO, 1991: Selenium mobility in irrigated soil columns as affected by organic carbon amendment. *J. Environm. Qual.* **20**, 808-814.
194. NELSON D.C., W.H. CASEY, J.D. SISON, E.E. MACK, A. AHMAD & J.S. POLLACK, 1996: Selenium uptake by sulphur-accumulating bacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **60**, 3531-3539.
195. NEVÉ, J., 1995: Human selenium supplementation as assessed by changes in blood selenium concentration and glutathione peroxidase activity. *J. Trace Elem. Med. Biol.* **9**, 65-73.
196. NRIAGU, J.O., 1989: Global cycling of selenium. In: INHAT, M. (ed.): *Occurrence and distribution of selenium*. CRC Press, Boca Raton, Fl., 327-340.

197. NYE, S.M. & P.J. PETERSON, 1975: The content and distribution of selenium in soils and plants from seleniferous areas in Eire and England. In: D.D. HEMPHILL (ed.): Trace substances in environmental health. University of Missouri, Columbia **9**, 113-121.
198. OELSCHLÄGER, W. & K.H. MENKE, 1969: Über die Selengehalte pflanzlicher, tierischer und anderer Stoffe – 1. Mitteilung: Selengehalte in Futtermitteln. Z. Ernährungswiss. **9**, 208-222.
199. OHLENDORF, H.M., 1989: Bioaccumulation and effects of selenium in wildlife. In: JACOBS, L.W. (ed.): Selenium in agriculture and the environment. Proceedings of the symposium of the American Society Agronomy and Soil Science Society of America in New Orleans. Soil. Sci. Soc. Am. Special Publ. **23**, 133-177.
200. OPITZ V. BOBERFELD, W., 1981: Zur Anwendung der Ammon-Nitrat-Harnstofflösung auf Dauergrünland unter variierenden Bedingungen. J. Agron. Crop. Sci. **150**, 193-206.
201. OPITZ V. BOBERFELD, W., 1984: Zur Technik der Applikation von Ammon-Nitrat-Harnstofflösungen unter variierenden Bedingungen. Bodenkultur **35**, 197-205.
202. OPITZ V. BOBERFELD, W., 1994: Grünlandlehre. Verl. Eugen Ulmer, Stuttgart.
203. OPITZ V. BOBERFELD, W., 1998: Zum Effekt von Laktobakterien-Zusätzen bei Grassilagen. German J. Agron. **2**, 135-140.
204. OPITZ V. BOBERFELD, W., 1999: Einfluss von Pflanzengesellschaft und Erntetermin auf die Selen- und Schwefelgehalte der Primäraufwüchse. German J. Agron. **3**, 59-63.
205. OPITZ V. BOBERFELD, W., 2000: Selen- und Schwefel-Konzentrationen verschiedener Grünlandaufwüchse in Abhängigkeit von Pflanzenbestand und Düngung. Trierer Bodenkundl. Schriften **1**, 134-142.
206. OPITZ V. BOBERFELD, W., 2001a: Selenium and sulphur concentrations in primary growths of different plant communities. Proc. 19<sup>th</sup> Int. Grassl. Congr. Sao Pedro/Sao Paulo, Brazil, 363-364.
207. OPITZ V. BOBERFELD, W., 2001b: Zum Effekt homofermentativer Laktobakterien-Zusätze auf die Aerostabilität von Grassilagen. German J. Agron. **5**, 7-14.

208. OPITZ V. BOBERFELD, W., 2002a: Selenathaltige Mehrnährstoff-Düngergaben und ihr Effekt auf die Selen- und Schwefel-Konzentration in Abhängigkeit vom Hauptbestandsbildner, Aufwuchs und Aufwand. German J. Agron. **6**, 84-92.
209. OPITZ V. BOBERFELD, W., 2002b: Winteraußenhaltung und Standort. In: Ganzjährige Freilandhaltung von Fleischrindern. KTBL-Schrift **409**, 30-46.
210. OPITZ V. BOBERFELD, W., 2003: Nachhaltige Landwirtschaft in Grenzertragslagen – Pflanzenbauliche Forschungsansätze. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **15**, 1-4.
211. OPITZ V. BOBERFELD, W. & M. ANGER, 1991: Zur Wirkung von Düngersuspensionen auf Pflanzenmischbestände - Analyse der Nährstoffverfügbarkeit und Kalkwirkung in Abhängigkeit von der Kalkkomponente. - Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd. **35**, 17-22.
212. OPITZ V. BOBERFELD, W. & M. STERZENBACH, 1999: Winteraußenhaltung von Mutterkühen unter den Aspekten Standort, Umwelt und Futterwirtschaft. Zeitsch. Kulturtechn. u. Landentw. **40**, 258-262.
213. OPITZ V. BOBERFELD, W. & H. LASER, 2001: Selenproblematik bei Mutterkühen. Kongressband, VDLUFA-Schriftenreihe **57**, Teil 2, 600-607.
214. OPITZ V. BOBERFELD, W. & M. STERZENBACH, 2001: Specific problems of silage making in low-input conditions. Grassl. Sci. Europe **6**, 129-132.
215. OPITZ V. BOBERFELD, W., P. DANIEL & M. STERZENBACH, 2003: Zu den Gäreigenschaften und der Silagequalität von *Festuca arundinacea* Schreb. verglichen mit anderen Gräsern. Arbeitsgem. Grünland u. Futterbau d. Ges. Pflanzenbauwiss. Bericht 47. Jahrestagung Braunschweig, 197-200.
216. ORTMAN, K. & B. PEHRSON, 1999: Effect of selenate as feed supplement to dairy cows in comparison to selenite and selenium yeast. J. Anim. Sci. **77**, 3365-3370.
217. ØVERNES, G., 1993: Selenium supplementation in ruminants. Norwegian J. Agric. Sci. **11**, 199-203.
218. PARKER, D.R. & A.L. PAGE, 1994: Vegetation management strategies for remediation of selenium-contaminated soils. In: FRANKENBERGER, W.T. & S. BENSON (eds.): Selenium in the environment. Marcel Dekker, New York.

219. PASDA, G., 1998: Muß Grünland in Deutschland mit Schwefel gedüngt werden?. Arbeitsgem. Grünland u. Futterbau d. Ges. Pflanzenbauwiss. Bericht 42. Jahrestagung Gießen, 50-55.
220. PATRIAS, G., 1969: Selenium-A missing link in animal nutrition. *Feedstuffs* **41**, 24-28.
221. PAVLATA, L., J. ILLEK & A. PECHOVÁ, 2001: Blood and tissue selenium concentrations in calves treated with inorganic or organic selenium compounds. *Acta Vet. Brno* **70**, 19-26.
222. PAVLATA, L., J. ILLEK, A. PECHOVÁ & M. MATĚJÍČEK, 2002: Selenium status of cattle in the Czech Republic. *Acta Vet. Brno* **71**, 3-8.
223. PEHRSON, B. & J. HAKKARINEN, 1986: Vitamin E status of healthy Swedish cattle. *Acta Veterinaria scandinavica* **27**, 351-360.
224. PEHRSON, B., K. ORTMAN, M. MADJID, & U. TRAFIKOWSKA, 1999: The influence of dietary selenium yeast or sodium selenite on the concentration of selenium in the milk of suckler cows and on the selenium status of their calves. *J. Anim. Sci.* **77**, 3371-3376.
225. PETERSON, P.J. & G.W. BUTLER, 1962: The uptake and assimilation of selenite by higher plants. *Aust. J. Biol.* **15**, 126-146.
226. PETERSON, P.J. & G.W. BUTLER, 1966: Colloidal Selenium availability of three pasture species in pot culture. *Nature* **212**, 961-962.
227. PETERSON, P.J. & D.J. SPEDDING, 1963: The excretion by sheep of <sup>75</sup>Se incorporated into red clover: The chemical nature of the selenium and its uptake by three plant species. *N.Z.J. Agric. Res.* **6**, 13-19.
228. PRAGER, V., 1983: Untersuchungen über den landwirtschaftlichen Nutzwert des Rohrschwingels (*Festuca arundinacea* Schreb.). Diss. Gießen.
229. PROHASKA, T., G. KÖLLENSPERGER, S. HANN, G. STINGEDER, W. FITZ & W. WENZEL, 2003: Application of ICP-MS in environmental science. In HOLLAND, G. & S.D. TANNER (eds.): *Plasma source mass spectrometry: Applications and emerging technologies*. The Royal Society of Chemistry, UK.
230. RAJAN, S.S. & J.H. WATKINSON, 1976: Adsorption of selenite and phosphate on an allophane clay. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **40**, 51-54.
231. RASTOCCI, S.C., J. CLAUSEN & K.C. SRIVASTAVA, 1970: Selenium and lead: mutual detoxifying effects. *Toxicology* **6**, 377-378.



232. RICHTER, K. & A. MILIMONKA, 2001: Einfluss von Wasser- und Nährstoffversorgung auf die Anfangsentwicklung einer Nachsaat. *Arch. Agron. Soil Sci.* **47**, 263 - 275.
233. RIETRA, R.P.J.J., T. HIEMSTRA & W.H. V. RIEMSDIJK, 2001: Comparison of selenate and sulphate adsorption on goethite. *J. Colloid Interface Sci.* **240**, 384-390.
234. ROSENFELD, I. & O.A. BEATH, 1964: Selenium. *Geobotany, Biochemistry, toxicity, and nutrition.* Academic Press, New York.
235. ROTRUCK, J.T., W.G. HOEKSTRA, A.L. POPE, H. GANTHER, A. SWANSON & D. HAFEMANN, 1972: Relationship of selenium to GSH peroxidase. *Fed. Proc.* **31**, 691.
236. ROTRUCK, J.T., A.L. POPE, H.E. GANTHER, A.B. SWANSON, D.G. HAFEMANN & W.G. HOEKSTRA, 1973: Selenium: Biochemical role as a component of glutathione peroxidase. *Sci.* **179**, 588-590.
237. SAALBACH, E., 1972: Über den Schwefelbedarf landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. *Landw. Forsch., Sonderh.* **27**, 224-228.
238. SAGER, M., 2001: Zur vertikalen Mobilität von Selen, Arsen und Schwefel in Modell-Bodensäulen. Tagungsband 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 24. und 25. April 2001, Bundesanstalt für Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning.
239. SALONEN, J.T., G. ALFTHAN, J. PIKKARAINEN, J.K. HUTTUNEN & P. PUSKA, 1982: Association between cardiovascular death and myocardial infarction and serum selenium in a matched pair longitudinal study. *Lancet* **2**, 175-179.
240. SCHINKEL, H., 1984: Bestimmung von Calcium, Strontium, Kalium, Lithium, Eisen, Mangan, Chrom, Nickel, Kupfer, Kobalt, Zink und Cadmium. – *Anal. Chem.* **317**, 10-26.
241. SCHLEGEL, H.G., 1992: *Allgemeine Mikrobiologie.* 7. Aufl., Verl. Georg Thieme Stuttgart, New York.
242. SCHÖNTHALER, S., 1998: Untersuchungen zur Selenversorgung von Vollblutstuten und deren Fohlen während Trächtigkeit, Laktation und Aufzucht. Diss. FU Berlin.
243. SCHRAUZER, G.N., 1998: Selen. Neue Entwicklungen aus Biologie, Biochemie und Medizin. 3. Aufl., Verl. Johann Ambrosius Barth, Heidelberg, Leipzig.

244. SCHRAUZER, G.N., 2000: Anticarcinogenic effects of selenium. *Cell. Mol. Life Sci.* **57**, 1864-1873.
245. SCHULTHESS, C.W. & Z. HU, 2001: Impact of chloride anions on proton selenium adsorption on aluminium oxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**, 710-718.
246. SCHWARZ, K. & C.L. FOLTZ, 1957: Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration. *J. Am. Chem. Soc.* **79**, 3292-3293.
247. SCHWEDER, P., W. SARICH & K.D. FIBIAN, 1996: Selen im Stoffkreislauf der Landwirtschaft – Ergebnisse aus Mecklenburg-Vorpommern. *VDLUFA-Schriftenr.* **44**, 729-732.
248. SÉBY, F., M. POTIN GAUTIER, G. LESPÉS & M. ASTRUC, 1997: Selenium speciation in soils after alkaline extraction. *Sci. Total Environ.* **207**, 81-90.
249. SHAMBERGER, R.J., 1983: *Biochemistry of Selenium*. Plenum Press, New York.
250. SHAMBERGER, R.J. & D.V. FROST, 1969: Possible inhibitory effect of selenium on human cancer. *CMAJ* **100**, 682.
251. SHRIFT, A., 1969: Aspects of selenium metabolism in higher plants. *Annu. Rev. Plant. Physiol.* **20**, 475-494.
252. SINGH, M., N. SINGH & P.S. RELAN, 1981: Adsorption and desorption of selenate and selenite on different soils. *Soil Sci.* **132**, 134-142.
253. SMITH, K.L., J.H. HARRISON, D.D. HANCOCK, D.H. TODHUNTER & H.R. CONRAD, 1984: Effect of Vitamin E and selenium supplementation on incidence of clinical mastitis and duration of clinical symptoms. *J. Dairy Sci.* **67**, 1293-1300.
254. SOON, Y.K., Y.P. KALRA & S.A. ABOUD, 1996: Comparison of some methods for the determination of total sulphur in plant tissues. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* **27**, 809-818.
255. SPENCER, K., 1982: Effect of sulphur application on selenium content of subterrean clover plants grown at different levels of selenium supply. *Aust. J. Agric. Anim. Husb.* **22**, 420-427.
256. SPOSITO, G., A. YANG, H. NEAL & A. MACKZUM, 1991: Selenate reduction in an alluvial soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55**, 1597-1602.
257. STADLOBER, M., M. SAGER & K.J. IRGOLIC, 2001: Effects of selenate supplemented fertilisation on the selenium level of cereals – identification and

- quantification of selenium compounds by HPLC-ICP-MS. *Food Chem.* **73**, 357-366.
258. STEINGASS, H. & K.H. MENKE, 1986: Schätzung des energetischen Futterwertes aus der in vitro mit Pansensaft bestimmten Gasbildung und der chemischen Analyse. 1. Mitt. Untersuchungen zur Methode. Übers. Tierern. **14**, 251-270.
259. STERZENBACH, M., 2000: Nutzungsmöglichkeiten von Aufwüchsen extensiv bewirtschafteten Grünlandes durch Mutterkühe. Diss. Gießen.
260. STOLZ, J.F. & R.S. OREMLAND, 1999: Bacterial respiration of arsenic and selenium. *FEMS. Microbiol. Rev.* **23**, 615-627.
261. STÜNZI, H., 1988: Applikation von Selen auf Dauerwiesen. 1. Wirkung von Selenit und Selenat auf verschiedene Pflanzenarten im Langzeitversuch. *Schweiz. Landw. Forsch.* **28**, 191-201.
262. SU, C. & D.L. SUAREZ, 2000: Selenate and selenite sorption on iron oxides: an infrared and electrophoretic study. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **64**, 101-111.
263. SUNDE, R.A., 1990: Molecular biology of selenoproteins. *Ann. Rev. Nutr.* **10**, 451-474.
264. SYERS, J.K., R.J. SKINNER & D. CURTIN, 1987: Soil and fertilizer sulphur in UK agriculture. Fertilizer Society, London.
265. TAM, S.-C., A. CHOW & D. HADLEY, 1995: Effects of organic component on the immobilization of selenium on iron oxyhydroxide. *Sci. Total Environ.* **164**, 1-7.
266. TAUBE, F., U. JAHNS, R. WULFES & K.-H. SÜDEKUM, 2000: Einfluss der Schwefelversorgung auf Ertrag und Inhaltsstoffe von Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne* L.). *German J. Agron.* **4**, 42-51.
267. TENNANT, T. & L. WU, 2000: Effects of water stress on selenium accumulation in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) from a selenium-contaminated soil. *Arch. Environm. Contam. Toxicol.* **38**, 32-39.
268. TERRY N., A.M. ZAYED, M.P. DE SOUZA & A.S. TARUN, 2000: Selenium in higher plants. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant Mol. Biol.* **51**, 401-432.
269. THEUNE, H.H., 1979: Gaschromatische Bestimmung der kurzkettigen Fettsäuren einschließlich Äthanol und Milchsäure aus Gärfutter. Ein Methodenvergleich. *Landw. Forsch.* **26**, Kongreßband 1978 Augsburg, Sonderh. 35, 540-547.

270. TRELEASE, S.F. & H.M. TRELEASE, 1937: Physiological differentiation in *Astragalus* with reference to selenium. *Am. J. Bot.* **26**, 530-535.
271. ULLREY, D.J., 1987: Biochemical and physiological indicators of selenium status in animals. *J. Anim. Sci.* **65**, 1712-1726.
272. UNDERWOOD, C.B.E. & N.F. SUTTLE, 1999: The mineral nutrition of livestock. 3<sup>rd</sup> edition, CABI Publishing, Wallingford, UK.
273. VAN DOORST, S.H. & P.J. PETERSON, 1984: Selenium speciation in the soil solution and its relevance to plant uptake. *J. Sci. Food Agric.* **35**, 601-605.
274. VAN RYSSSEN, J.B.J., J.T. DEAGEN, M.A. BEILSTEIN & P.D. WHANGER, 1989: Comparative metabolism of organic and inorganic selenium by sheep. *J. Agric. Food Chem.* **37**, 1358-1363.
275. VARO, P., 1993: Selenium fertilization in Finland: selenium content in feed and Foods. *Norwegian J. Agric. Sci.* **11**, 151-158.
276. WALTER, H., 1957: Wie kann man den Klimatypus anschaulich darstellen? *Umschau* **57**, 751-753.
277. WANG, Z., S. XIE & A. PENG, 1996: Distribution of Se in soybean samples with different Se concentration. *J. Agric. Food Chem.* **44**, 2754-2759.
278. WATKINSON, J.H. & E.B. DAVIES, 1967: Uptake of native and applied selenium by pasture species. 1. Uptake of selenium from various carriers. *N. Z. J. Agric. Res.* **10**, 116-121.
279. WEISS, W.P., 1998: Requirement for fat-soluble vitamins for dairy cows: a Review. *J. Dairy Sci.* **81**, 2493-2501.
280. WEISSBACH, F., 1967: Die Bestimmung der Pufferkapazität der Futterpflanzen und ihre Bedeutung für die Beurteilung der Vergärbarkeit. *Tagungsber. Akad. Landw.-Wiss. DDR, Berlin* **92**, 211-220.
281. WEISSBACH, F., 1993: Grünfütter und Grünfütterkonservate. In: JEROCH, H., G. FLACHOWSKY & F. WEISSBACH: *Futtermittelkunde*. Verl. Gustav Fischer, Jena, Stuttgart.
282. WEISSBACH, F., 2004: Analyse der Ursachen und Möglichkeiten zur Verminderung hoher Clostridien-Last im Grundfutter. *Tierärztl. Umschau* **59**, 32-41.

283. WEISSBACH, F., L. SCHMIDT, G. PETERS, E. HEIN, K. BERG, G. WEISE & O. KNABE, 1977: Methode und Tabellen zur Schätzung der Vergärbarkeit. 3. Aufl., Hrsg.: Akad. Landwirtschaftswiss. DDR, Berlin.
284. WEISSBACH, F. & H. HONIG, 1996: Über die Vorhersage und Steuerung des Gärverlaufs bei der Silierung von Grünfütter aus extensivem Anbau. Landbauforsch. Völkenrode **46**, 10-17.
285. WHANGER, P.D. & J.A. BUTLER, 1988: Effects of various dietary levels of selenium as selenite or selenomethionine on tissue selenium levels and glutathione peroxidase activity in rats. J. Nutr. **118**, 846-852.
286. WHITE, J.G. & R.J. ZASOSKI, 1999: Mapping soil micronutrients. Field Crops Res. **60**, 11-26.
287. WHITEHEAD, D.C., 2000: Nutrient elements in grassland. Soil – plant – animal relationships. CABI Publishing, Wallingford, UK.
288. WIERINGA, G.W., 1961: Über den Einfluss des Grünfutters auf die Gärung. Futtermittelkonservierung **1**, 27-35.
289. WIJNJA, H. & C.W. SCHULTHESS, 2000: Interaction of carbonate and organic anions with sulphate and selenate adsorption on an aluminium oxide. Soil Sci. Soc. Am. J. **64**, 898-908.
290. WILKINS, J.F. & R.J. KILGOUR, 1982: Production responses to selenium in northern New South Wales. 1. Infertility in ewes and associated production. Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb. **22**, 18-23.
291. WILMAN, D. & P. REZVANI MOGHADDAM, 1998: In vitro digestibility and neutral detergent fibre and lignin contents of plant parts of nine forage species. J. Agric. Sci. **131**, 51-58.
292. WOLF, C., 1998: Selenversorgung von Kühen – Mangel oder Überschuss? 2. Mitteilung: Die Entwicklung der Selen-Glutathionperoxidase-Aktivität von Milch- und Mutterkühen in Mecklenburg-Vorpommern von 1993-1996. Prakt. Tierarzt **79**, 755-759.
293. WOLFFRAM, S., 1991: Absorption und Bioverfügbarkeit des Spurenelements Selen. Habil. Schrift, Univ. Zürich.
294. WRIGHT, P.L. & M.C. BELL, 1966: Comparative metabolism of selenium and tellurium in sheep and swine. Am. J. Physiol. **211**, 6-10.

295. WU, L., 1998: Selenium accumulation and uptake by crop and grassland species. Environmental chemistry of selenium. In: FRANKENBERGER, W.T. & R.A. ENGBERG: Environmental Chemistry of selenium. Marcel Dekker INC., New York.
296. WU, L., A. ENBERG & G.R. BURAU, 1988: Selenium accumulation and selenium-salt cotolerance in five grass species. Crop Sci. **28**, 517-522.
297. WU, L., GUO, X. & G.S. BANUELOS, 1997: Accumulation of seleno-amino acids in legume and grass plant species grown in selenium-laden soils. Environ. Toxicol. Chem. **16**, 491-497.
298. WYSS, U., 1993: Einsatz eines Milchsäurebakterien-Impfzusatzes in Grassilage aus Sicht der Konservierung. Landw. Schweiz **6**, 203-207.
299. XU, J., F. YANG, L. CHEN, Y. HU & Q. HU, 2003: Effect of selenium on increasing the antioxidant activity of tea leaves harvested during the early spring tea production season. J. Agric. Food Chem. **51**, 1081-1084.
300. XUE, T., H. HARTIKAINEN & V. PIIRONEN, 2001: Antioxidative and growth promoting effect of selenium on senescing lettuce. Plant and Soil **237**, 55-61.
301. YAN, R., D. GAUTHIER, G. FLAMMANT, G. PARAUDEAU, J. LU & C. ZHENG, 2001: Fate of selenium in coal combustion : Volatilization and speciation in the flue gas. Environ. Sci. Technol. **35**, 1406-1410.
302. YEMM, E.M. & A.J. WILLIS, 1954: The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. Biochem. J. **57**, 85-97.
303. YLÄRANTA, T., 1982: Volatilization and leaching of selenium added to soils. Ann. Agric. Fenn. **21**, 103-114.
304. YLÄRANTA, T., 1983a: Sorption of selenate and selenite in the soil. Ann. Agric. Fenn. **22**, 29-39.
305. YLÄRANTA, T., 1983b: Effect of added selenite and selenate on the selenium content of italian rye grass (*Lolium multiflorum*) in different soils. Ann. Agric. Fenn. **22**, 139-151.
306. YLÄRANTA, T., 1983c: Effect of liming and sulphate on the selenium content of italian rye grass (*Lolium multiflorum*). Ann. Agric. Fenn. **22**, 152-163.
307. YLÄRANTA, T., 1983d: Effect of applied selenite and selenate on the selenium content of barley (*Hordeum vulgare*). Ann. Agric. Fenn. **22**, 164-174.

- 
308. YLÄRANTA, T., 1984: Effect of selenite and selenate fertilization and foliar spraying on the selenium content of timothy grass. *Ann. Agric. Fenn.* **23**, 96-108.
309. YLÄRANTA, T., 1993: Selenium fertilization in Finland: Selenium soil interactions. *Norwegian J. Agric. Sci.* **11**, 141-149.
310. YU, S.Y., Y.J. ZHU & W.G. LI, 1997: Protective role of selenium against hepatitis b virus and primary liver cancer in Qidong. *Biol. Trace Elem. Res.* **56**, 117-124.
311. ZAYED, A., C.M. LYTLE & N. TERRY, 1998: Accumulation and volatilisation of different chemical species of Selenium. *Planta* **206**, 284-292.
312. ZHANG, Y.Q. & W.T. FRANKENBERGER, JR., 1999: Effect of soil moisture on dimethylselenide transport and transformation to nonvolatile selenium. *Environ. Sci. Technol.* **33**, 3415-3420.
313. ŽUST, J., B. HROVATIN & B. ŠIMUNDIĆ, 1996: Assessment of selenium and Vitamin E deficiencies in dairy herds and clinical disease in calves. *Vet. Rec.* **139**, 391-394.

## 9 Anhang

### Anhangabb.

Se-Applikationsexperiment: Effizienz .....	1
Methodenvergleich Rohprotein-Bestimmung.....	2
Silierexperiment: Effizienz der Se-Anreicherung .....	3

### Anhangtab.

Status quo - Analyse: Standortdaten .....	1
Status quo - Analyse: Vegetationstabellen .....	2a-6
Se-Applikationsexperiment: Wetterdaten .....	7
Se-Applikationsexperiment: Termine.....	8
Status quo - Analyse: Se- und S-Konzentrationen .....	9
Status quo -Analyse: Qualitätsmerkmale.....	10
Status quo - Analyse: Bodenchemische Merkmale .....	11
Status quo - Analyse: Korrelationskoeffizienten .....	12 & 13
Zeitreihen-Experiment: Ertrag, Se und S.....	14 & 15
Se-Applikationsexperiment: Se-Konzentrationen .....	16 - 18
Se-Applikationsexperiment: TS-Erträge .....	19 - 21
Se-Applikationsexperiment: Se-Entzüge .....	22 - 24
Se-Applikationsexperiment: S - Konzentration .....	25 - 27
Se-Applikationsexperiment: Energiedichten (ME/NEL) .....	28 - 33
Se-Applikationsexperiment: Rohprotein (Dumas/Kjeldahl).....	34 - 39
Keimexperiment: Keimungsraten .....	40 & 41
Keimexperiment: Keimblatt-/Wurzellängen.....	42 - 45
Keimexperiment: Gefäßversuch .....	46 - 47
Silierexperiment: Se- und S-Konzentrationen.....	48 & 49
Silierexperiment: Silagequalität .....	50 - 54



**Anhangtab. 1:** Pflanzengesellschaftszugehörigkeit, Lage, Witterungsdaten und Bodenart der Untersuchungsstandorte im Versuch „Standortbedingte Variabilität“ (= Status quo – Analyse)

Flächen-Code	Pflanzengesellschaft	Hochwert	Rechtswert	m ü. NN	Inklination	Exposition	Niederschlag	Temperatur Mai	Bodenart
105	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5636384	3464044	450	11	eben	1050	11,0	SL
106	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5634626	3462659	350	5	eben	990	11,8	L
113	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5636923	3467168	350	12	Süd	880	11,8	SL
116	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5633790	3463755	410	11	Nord	1020	11,3	sL
119	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5635393	3464379	340	5	Nord	990	11,8	L
201	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5613720	3467692	330	5	Nord-West	870	12,1	L
202	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5612839	3466557	390	3	eben	890	11,6	sL
303	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5615028	3465893	315	1	eben	810	12,2	sL
401	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5612652	3466270	380	5	Süd	890	11,7	sL
408	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5611639	3465997	390	8	West	920	11,5	sL
504	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5631059	3454349	365	4	eben	1010	11,7	IS
515	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5629685	3453497	295	3	Nord-West	1030	11,5	L
517	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5629275	3453652	330	7	Nord-West	970	12,0	L
606	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5632677	3453383	325	6	eben	1010	12,1	L
610	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5633910	3453363	345	6	Süd-Ost	1050	11,9	SL
708	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5634653	3454326	380	5	Nord-Ost	1120	11,5	L
713	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5636275	3454009	385	4	eben	1110	11,5	L
718	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5634848	3452604	415	9	Süd-Ost	1110	11,3	SL
804	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5602713	3400988	325	4	Süd	840	12,3	IS
1201	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	5629246	3453557	325	6	Nord-West	960	12,2	SL
1	<i>Bromion racemosi</i>	5616123	3467042	290	1	eben	850	12,1	IT
3	<i>Bromion racemosi</i>	5614730	3466306	311	3	eben	850	12,1	sL
4	<i>Bromion racemosi</i>	5614440	3467074	290	1	eben	850	12,1	IT
5	<i>Bromion racemosi</i>	5614376	3466805	270	1	eben	850	12,1	L
6	<i>Bromion racemosi</i>	5636126	3463215	360	3	eben	990	12,2	sL
7	<i>Bromion racemosi</i>	5633451	3453936	335	3	eben	990	12,2	L
8	<i>Bromion racemosi</i>	5634976	3453790	350	1	eben	1110	11,5	IT
9	<i>Bromion racemosi</i>	5634325	3453786	335	1	eben	1110	11,5	IT
11	<i>Bromion racemosi</i>	5630086	3453444	315	1	eben	980	12,1	L
13	<i>Bromion racemosi</i>	5619970	3422344	446	2	eben	1000	11,6	sL
15	<i>Bromion racemosi</i>	5620170	3422135	466	3	eben	1000	11,6	L
16	<i>Bromion racemosi</i>	5621385	3422048	469	1	eben	1000	11,6	L
17	<i>Bromion racemosi</i>	5620610	3422703	478	1	eben	1000	11,6	IT
18	<i>Bromion racemosi</i>	5621222	3423874	468	2	eben	1000	11,6	L
19	<i>Bromion racemosi</i>	5621784	3423190	460	1	eben	1000	11,6	sL
20	<i>Bromion racemosi</i>	5621368	3423480	465	1	eben	1000	11,6	IT
21	<i>Bromion racemosi</i>	5621262	3420730	464	4	eben	1000	11,6	L
501	<i>Bromion racemosi</i>	5627428	3451694	275	1	eben	910	12,4	L
520	<i>Bromion racemosi</i>	5627544	3451698	275	3	eben	910	12,4	L
702	<i>Bromion racemosi</i>	5634337	3453799	337	5	eben	1060	11,9	L
103	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5634270	3462388	370	7	Nord-Ost	1000	11,6	sL
104 *	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5636633	3464959	435	2	Süd-West	1050	11,2	SL
107	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5633750	3462151	365	4	Süd-Ost	1010	11,7	L
114	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5634732	3467204	270	4	eben	850	12,4	L
304	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5616447	3466517	290	3	eben	800	12,5	T
305	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5616703	3466331	310	4	Süd	820	12,3	sL
403	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5613408	3465962	415	11	Nord	929	11,4	L
509	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5631630	3454812	415	8	Süd	1040	11,3	IS
513	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5629991	3454592	335	4	Nord	990	11,9	IS
602	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5632458	3452999	350	14	Süd	1010	11,8	L
603	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5632639	3452866	400	12	Süd	1050	11,4	IS
604	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5632274	3453324	320	1	eben	1000	12,1	L
609	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5632312	3453947	380	7	Süd-Ost	1050	11,5	L
703	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5635012	3453014	405	10	Süd-Ost	1120	11,4	SL
712	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5635922	3453960	365	1	Süd-Ost	1110	11,6	L
715	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5636089	3453873	390	7	eben	1110	11,4	L
717	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5634796	3452867	380	7	Süd-Ost	1100	11,5	SL
905 ***	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5622899	3420744	440	7	Nord-West	1000	11,3	sL
906	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5623135	3420610	410	4	Nord-West	1000	11,3	sL
1001	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	5615478	3465440	315	2	eben	820	12,2	L

- Fortsetzung nächste Seite -

## - Fortsetzung Anhangtab. 1 -

Nr.	Pflanzengesellschaft	Hochwert	Rechtswert	m ü. NN	Inklina- tion	Exposition	Nieder- schlag	Tem- peratur Mai	Bo- denart
101	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5634718	3467224	270	4	eben	850	12,4	L
301	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5616443	3467194	305	4	Süd-West	810	12,3	SL
406	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5613626	3465870	370	9	Nord	890	11,8	L
407	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5613886	3465916	355	4	Nord	860	12,0	L
505	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5630711	3454345	345	9	Süd-Ost	980	11,8	LS
506	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5630895	3454550	350	4	Süd-Ost	980	11,9	L
601	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5632348	3452817	340	10	Süd	1010	11,9	LS
605	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5632494	3453293	325	1	eben	1000	12,1	L
608	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5632860	3453291	325	2	eben	1010	12,0	L
706	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5634805	3453831	345	5	eben	1080	11,8	LS
801	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5603096	3401670	310	4	Ost	840	12,0	sL
808	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5601995	3400958	305	9	Süd-Ost	840	12	sL
901	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5621182	3422736	470	1	Nord	1000	11,5	sL
902	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5620544	3421586	465	1	Süd-Ost	1000	11,7	sL
903	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5621025	3419796	460	0	eben	1000	11,3	IS
904**	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5622840	3420456	430	4	Nord-West	1000	11,5	sL
907	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5621301	3422618	470	1	Nord	1000	11,5	sL
913	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5622049	3420434	440	2	Süd-West	1000	11,5	sL
1101	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5612286	3466162	370	6	Nord	900	11,8	L
1102	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	5612025	3466265	375	3	Süd-West	900	11,6	SL
503	<i>Polygono-Trisetion</i>	5627078	3451537	275	5	eben	920	12,4	L
704	<i>Polygono-Trisetion</i>	5634634	3453686	350	4	Ost	1080	11,8	L
710	<i>Polygono-Trisetion</i>	5635114	3453768	350	6	eben	1090	11,8	L

\* Standorttyp A im Versuch „Effizienz von Selen-Gaben“

\*\* Standorttyp B im Versuch „Effizienz von Selen-Gaben“

\*\*\* Standorttyp C im Versuch „Effizienz von Selen-Gaben“

Anhangtab. 2a: *Arrhenatherion elatioris*-Bestände, Ertragsanteile (= EA) Teil 1

Flächencode	504	804	113	105	116	610	408	303	202	718	201	401
Lückigkeit	45	63	60	45	49	60	51	50	20	50	45	50
Anzahl der Arten	33	39	31	21	45	33	32	24	40	46	48	28
	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA
<b>Kennarten der Glatthaferwiesen (<i>Arrhenatherion elatioris</i> C.A.)</b>												
<i>Anthriscus sylvestris</i>	+		1		4	11	+		1	2	1	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	6	40	32	55	18	36	12	55	25	57	10	11
<i>Campanula patula</i>						+						
<i>Crepis biennis</i>		6					1					
<i>Galium mollugo</i>			1	1	3	6	+			1	+	
<i>Heracleum sphondylium</i>	7	5		+	4	10			2	+	4	1
<i>Knautia arvensis</i>					3	+					1	
<i>Malva moschata</i>							1					
<i>Tragopogon pratensis</i>					+		1				1	1
<i>Vicia sepium</i>		1	+		+	+	+			2		+
<b>Kennarten der Tritt- und Flutrasen (<i>Plantaginetalia majoris</i> C.A., <i>Elymo-Rumicion</i> C.A.)</b>												
<i>Deschampsia cespitosa</i>					1				1			
<i>Leontodon autumnalis</i>			+	+	+		+	2		+		
<i>Ranunculus repens</i>	+	+					+	+	1	+		+
<i>Trifolium hybridum</i>			1									
<b>Kennarten der Trockenrasen (<i>Festuco-Brometea</i> C.A.) als Trennarten trockener und magerer Standorte</b>												
<i>Centaurea scabiosa</i>									+			
<i>Cirsium acaule</i>											1	
<i>Galium verum</i>			1		1						1	
<i>Plantago media</i>								2	+		+	
<i>Ranunculus bulbosus</i>											+	1
<i>Sanguisorba minor</i>											+	
<i>Vicia angustifolia</i>								2				
<b>Kennarten der Borstgrasrasen und Heiden (<i>Nardo-Callunetea</i> C.A.) als Trennarten magerer und saurer St.</b>												
<i>Hieracium aurantiacum</i>										+		
<i>Hypericum maculatum</i>										3	3	
<b>Kennarten der Rotschwingelweiden (<i>Festuco-Cynosuretum</i> C.A.) als Trennarten magerer und beweideter Standorte</b>												
<i>Alchemilla xanthochlora</i>		+				+			+	+		
<i>Hypochaeris radicata</i>	+				+		1					1
<i>Lotus corniculatus</i>								1	+		1	
<i>Luzula campestris</i>					+		+			+	+	+
<i>Pimpinella saxifraga</i>	+		1	1	+		1	+		3	1	
<b>Kennarten der Weißkleeweiden (<i>Cynosurion cristati</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung</b>												
<i>Bellis perennis</i>									+		+	
<i>Cynosurus cristatus</i>	+			+					+			+
<i>Phleum pratense</i>	3	3	1	12		+	26	2		1		2
<i>Senecio jacobaea</i>					+							
<i>Trifolium repens</i>	2	1	1	3	2		2	2	2	9	1	+
<i>Veronica serpyllifolia</i>	+	+	+				+		+	+	+	+
<b>Kennarten der Weidelgrasweiden (<i>Lolio-Cynosuretum</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung</b>												
<i>Cirsium arvense</i>					+	1				+		
<i>Cirsium vulgare</i>			+				+			1		
<i>Elymus repens</i>	+					1						
<i>Lolium perenne</i>	+	+					+					4
<i>Plantago major</i>	+											
<i>Rumex crispus</i>	1											
<i>Rumex obtusifolius</i>								+		+		
<b>Gemeinsame Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.)</b>												
<i>Achillea millefolium</i>	+	+	2		1	+	6	1	2	1	1	+
<i>Ajuga reptans</i>		+									+	
<i>Bromus hordeaceus</i>	+										+	+
<i>Carum carvi</i>					+							
<i>Dactylis glomerata</i>	5	13	10	15	1	8	39	13	25	1	9	32
<i>Helictotrichon pubescens</i>									1		+	
<i>Leontodon hispidus</i>										1		
<i>Leucanthemum vulgare</i>			2	+	2			+	+		2	
<i>Rhinanthus minor</i>											+	
<i>Taraxacum officinale</i>	1	1	+	+	1	+	5	+	1	+	3	1
<i>Trifolium dubium</i>			1					+			+	+
<i>Trisetum flavescens</i>	17		9	14	13	1		1	5		+	
<i>Veronica chamaedrys</i>				+	+	+	+		+	+	+	

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung *Arrhenatherion elatioris*–Bestände, Ertragsanteile Teil 1 -

Flächencode	504	804	113	105	116	610	408	303	202	718	201	401
<b>Allgemeine Kennarten des Wirtschaftsgrünlandes (<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> C.A.)</b>												
<i>Alopecurus pratensis</i>	26	16			1	2			5	+	12	33
<i>Centaurea jacea</i>					2	+		+	1	1	4	
<i>Cerastium holosteoides</i>	+	+	1	+	+	+	+		1	+	+	+
<i>Festuca pratensis</i>	7	+			2	+	+		2		+	
<i>Festuca rubra</i>	3	+	1		11	+			3	+	6	2
<i>Holcus lanatus</i>	5	8	3		10	19		+	3	2	10	
<i>Lathyrus pratensis</i>					+	+			+		1	
<i>Plantago lanceolata</i>	+	1	5	+	1		1	5	+	+	3	
<i>Poa pratensis</i>		+	1		1		3		+		3	9
<i>Poa trivialis</i>	4	3		+		2		+	8	2	+	+
<i>Ranunculus acris</i>	1	+	+	+	+	+		+	+	+	+	
<i>Rumex acetosa</i>	+	1	+	+	+	1	5	+	2	2	3	
<i>Trifolium pratense</i>	5	1	6	+	3			5	3	+	8	+
<i>Vicia cracca</i>	1				+	+			+	3	1	
<b>Begleiter</b>												
<i>Aegopodium podagraria</i>					1							
<i>Agrostis capillaris</i>	9	+	2	+	3	3	2	10	+	1	+	2
<i>Anchusa arvensis</i>		+										
<i>Angelica sylvestris</i>												+
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	+	+	16		12	+			2	6	8	
<i>Campanula glomerata</i>												
<i>Campanula rotundifolia</i>					+				1		+	
<i>Chenopodium album</i>												
<i>Colchicum autumnale</i>					+							
<i>Convolvulus arvensis</i>			+		3				6		1	
<i>Epilobium spec.</i>										1		
<i>Equisetum arvense</i>					+							
<i>Galeopsis ladanum</i>										+		
<i>Galeopsis spec.</i>						+						
<i>Galeopsis tetrahit</i>		+										
<i>Galium aparine</i>		+										
<i>Geum urbanum</i>												
<i>Glechoma hederacea</i>									+			
<i>Hieracium lachenalii</i>										+		
<i>Hypericum perforatum</i>	+					+						
<i>Juncus conglomeratus</i>										+		
<i>Knautia dipsacifolia</i>												+
<i>Lamium album</i>												
<i>Lolium multiflorum</i>		+										
<i>Myosotis arvensis</i>		+						+				
<i>Persicaria maculosa</i>		+										
<i>Polygonum convolvulus</i>		+										
<i>Ranunculus auricomus</i>												
<i>Sanguisorba officinalis</i>				+		1		1	2			
<i>Saxifraga granulata</i>								+			+	
<i>Sinapis arvensis</i>		+										
<i>Sonchus asper</i>												
<i>Stellaria graminea</i>					+	+	1			1		+
<i>Stellaria media</i>												
<i>Trifolium arvense</i>							+					
<i>Trifolium medium</i>					+							
<i>Vicia hirsuta</i>		+	3							+		
<i>Vicia tetrasperma</i>										1		
<i>Viola arvensis</i>		+										

Einmal in Spuren:

*Anchusa arvensis* (804), *Galium aparine* (804), *Galeopsis ladanum* (718), *Knautia dipsacifolia* (401),  
*Sinapis arvensis* (804), *Sonchus asper* (804), *Trifolium arvense* (408), *Persicaria maculosa* (804), *Polygonum convolvulus* (804), *Galeopsis spec.* (610)

**Anhangtab. 2b: Arrhenatherion elatioris–Bestände,  
Teil 2 (= Subass. v. Alopecurus pratensis)**

Flächencode	119	517	515	606	708	106	713	1201
Lückigkeit	56	40	68	50	43	71	60	53
Anzahl der Arten	47	28	34	40	48	39	38	49
	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA
<b>Kennarten der Glatthaferwiesen (Arrhenatherion elatioris C.A.)</b>								
<i>Anthriscus sylvestris</i>	6	1	3	1	7	1	10	1
<i>Arrhenatherum elatius</i>	7	60	+	6	+	1	32	13
<i>Crepis biennis</i>						+		
<i>Galium mollugo</i>	+			+	1	+	1	+
<i>Heracleum sphondylium</i>	5	1	2	3	3	4	7	2
<i>Knautia arvensis</i>					1		+	7
<i>Pimpinella major</i>			+					
<i>Tragopogon pratensis</i>	+						+	
<i>Vicia sepium</i>				+	1	+		
<b>Kennarten der Feuchtwiesen (Molinietalia C.A.) u.a. als Trennarten feuchter Standorte</b>								
<i>Achillea ptarmica</i>					+	1		
<i>Bistorta officinalis</i>	3	+	7	3	2	13		1
<i>Cirsium oleraceum</i>						1		
<i>Colchicum autumnale</i>	+	+	+				1	+
<i>Filipendula ulmaria</i>	2		2	+	+	1	+	
<i>Lotus pedunculatus</i>							+	
<i>Rhinanthus minor</i>								+
<i>Sanguisorba officinalis</i>	7	1	2	1	2		1	6
<i>Silene flos-cuculi</i>	+							
<b>Kennarten der Quecken-Ampfer Rasen (Elymo-Rumicion C.A.) als Trennarten feuchter Standorte und zeitweiliger Beweidung</b>								
<i>Deschampsia cespitosa</i>	1		9	5	+	2	1	
<i>Juncus effusus</i>	1							
<i>Lysimachia nummularia</i>	+				+	+		
<i>Ranunculus repens</i>	4	+	3	1	3	13		
<b>Kennarten der Trockenrasen (Festuco-Brometea C.A.) als Trennarten trockener und magerer Standorte</b>								
<i>Galium verum</i>		1						4
<i>Sanguisorba minor</i>					+			
<b>Kennarten der Borstgrasrasen und Heiden (Nardo-Callunetea C.A.) als Trennarten magerer und saurer Standorte</b>								
<i>Danthonia decumbens</i>								+
<i>Hypericum maculatum</i>			+					1
<b>Kennarten der Rotschwingelweiden (Festuco-Cynosuretum C.A.) als Trennarten magerer und beweideter Standorte</b>								
<i>Alchemilla xanthochlora</i>		+	+	1	1		+	+
<i>Hypochaeris radicata</i>								+
<i>Lotus corniculatus</i>								1
<i>Luzula campestris</i>	+							+
<i>Pimpinella saxifraga</i>		+			+		+	1
<b>Kennarten der Weißklee- (Cynosurion cristati C.A.) und Weidelgrasweiden (Lolio-Cynosuretum C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung</b>								
<i>Bellis perennis</i>	+			+				
<i>Cirsium arvense</i>					+	+		
<i>Cirsium vulgare</i>					1		+	
<i>Cynosurus cristatus</i>	3	+		2				2
<i>Elymus repens</i>	+		1	2			1	
<i>Lolium perenne</i>			+	1				
<i>Phleum pratense</i>				4	+	+	1	
<i>Plantago major</i>					+			
<i>Rumex crispus</i>		1						
<i>Rumex obtusifolius</i>			1		1			
<i>Trifolium repens</i>	+	3	1	1	+			1
<i>Veronica serpyllifolia</i>					+	+	+	+

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung *Arrhenatherion elatioris*–Bestände, Teil 2 -

Flächencode	119	517	515	606	708	106	713	1201
<b>Gemeinsame Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.)</b>								
<i>Achillea millefolium</i>	1	1	+			+	+	+
<i>Ajuga reptans</i>	+					+		+
<i>Bromus hordeaceus</i>			1			+	+	
<i>Dactylis glomerata</i>	12	3	19	18	7	+	1	7
<i>Helictotrichon pubescens</i>	+							
<i>Leontodon hispidus</i>								1
<i>Leucanthemum vulgare</i>	2	+		1				+
<i>Taraxacum officinale</i>	1	3	1	1	5	+	+	+
<i>Trifolium dubium</i>						+	+	+
<i>Trisetum flavescens</i>	3		3	13	2	2	2	3
<i>Veronica chamaedrys</i>	+	+	+	+	+		+	+
<b>Allgemeine Kennarten des Wirtschaftsgrünlandes (<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> C.A.)</b>								
<i>Alopecurus pratensis</i>	2		8	2	4	26	4	1
<i>Cardamine pratensis</i>	+	+		+	+	+		+
<i>Centaurea jacea</i>		+		+				2
<i>Cerastium holosteoides</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Festuca pratensis</i>	4		1	3	4	9		3
<i>Festuca rubra</i>	7		5	2	8		1	10
<i>Holcus lanatus</i>	4	2	3	10	12	15	8	8
<i>Lathyrus pratensis</i>	+	+	+	+	+		+	+
<i>Plantago lanceolata</i>	1			+	1	+		1
<i>Poa trivialis</i>	3	7	12	7	6	11	2	2
<i>Prunella vulgaris</i>				+				
<i>Ranunculus acris</i>	3	+	+	+	2		+	1
<i>Rumex acetosa</i>	3	+	1	+	2	+	+	2
<i>Trifolium pratense</i>	3	+		+	3	+	+	1
<i>Vicia cracca</i>	+		2		1	1	+	2
<b>Begleiter</b>								
<i>Aegopodium podagraria</i>	+				5	+	8	
<i>Agrostis capillaris</i>	6	19	16	14	11	+	3	10
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	5			+	2	+		10
<i>Arctium tomentosum</i>					2			
<i>Campanula glomerata</i>								
<i>Campanula rapunculus</i>								
<i>Campanula rotundifolia</i>								+
<i>Carex parviflora</i>								
<i>Convolvulus arvensis</i>								
<i>Epilobium angustifolium</i>								
<i>Epilobium tetragonum</i>					+			
<i>Equisetum arvense</i>	2							
<i>Galium aparine</i>								
<i>Glechoma hederacea</i>	1			+		+		
<i>Hieracium lachenalii</i>								+
<i>Hypericum perforatum</i>				+				
<i>Knautia dipsacifolia</i>					1			
<i>Leontodon autumnalis</i>	+			+				1
<i>Luzula luzoides</i>								
<i>Matricaria maritima</i>					+			
<i>Mentha arvensis</i>								
<i>Myosotis arvensis</i>	+							
<i>Petasites hybridus</i>				+		+	16	
<i>Silaum silaus</i>								
<i>Stellaria graminea</i>			+	+	+		+	
<i>Triticum aestivum</i>								
<i>Urtica dioica</i>						+		

**Einmal in Spuren:***Hieracium lachenalii* (1201), *Epilobium tetragonum* (708)

Anhangtab. 3a: *Bromion racemosi* –Bestände, Teil 1

Flächencode	1	3	4	5	6	7	8	9	11	13
Lückigkeit	35	30	25	15	20	15	35	25	30	20
Anzahl der Arten	36	36	38	32	39	33	31	36	37	27
	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA
<b>Kennarten der Sumpfdotterblumenwiesen (<i>Bromion racemosi</i> C.A.)</b>										
<i>Achillea ptarmica</i>	2			+	+				2	+
<i>Bistorta officinalis</i>	1	+		1	20	5	4	12	20	15
<i>Bromus racemosus</i>										
<i>Caltha palustris</i>	+	+	1	+	2	2	2	+	1	1
<i>Carex fusca</i>		1	1	5	+	1		3		+
<i>Carex nigra</i>	10	1	2				+			+
<i>Crepis paludosa</i>										
<i>Lotus pedunculatus</i>	1	2	1	1	+	+	4	+		+
<i>Myosotis scorpioides</i>	+	+	+	+		+	+	+		r
<i>Scirpus sylvaticus</i>		5	+	+	2			2		3
<i>Senecio aquaticus</i>										
<b>Kennarten der Riedwiesen (<i>Phragmitetalia</i> C.A.) als Trennarten nasser Standorte</b>										
<i>Epilobium palustre</i>							+			
<i>Iris pseudachoris</i>										
<i>Phalaris arundinacea</i>						3		+	1	
<b>Kennarten der Quecken-Ampfer Rasen (<i>Elymo-Rumicion</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung</b>										
<i>Deschampsia cespitosa</i>	10	2		3		5		5		37
<i>Juncus effusus</i>						4	5	5		1
<i>Lysimachia nummularia</i>				r		+				
<i>Ranunculus repens</i>	1	2	1	5	3	+	2		7	
<b>Kennarten der Weißkleewiden (<i>Cynosurion cristati</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung</b>										
<i>Bellis perennis</i>		+								
<i>Cirsium arvense</i>	+	+	+					2		
<i>Cynosurus cristatus</i>		1	1			1		2		
<i>Lolium perenne</i>			2	5	+					
<i>Rumex crispus</i>		+		1						+
<i>Rumex obtusifolius</i>					1				1	
<i>Trifolium repens</i>			+	+	+		+		r	
<b>Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.) als Trennarten trockener Standorte</b>										
<i>Achillea millefolium</i>										
<i>Ajuga reptans</i>										
<i>Dactylis glomerata</i>		+	1		5	10		10	10	20
<i>Leontodon hispidus</i>										
<i>Phleum pratense</i>	+		5	10	+	3	10	+	2	
<i>Taraxacum officinale</i>		+	+	2	1		+	+	+	
<i>Trifolium dubium</i>										
<i>Veronica chamaedrys</i>					+					
<b>Kennarten der Feuchtwiesen (<i>Molinietalia</i> C.A.) u.a. als Trennarten feuchter Standorte</b>										
<i>Angelica sylvestris</i>	1		+		+		1	3		
<i>Cirsium oleraceum</i>										1
<i>Cirsium palustre</i>					+	+	+	+	1	+
<i>Colchicum autumnale</i>	1	+	+			+				+
<i>Equisetum palustre</i>		+	1	+			1	+		1
<i>Filipendula ulmaria</i>	15	10	6	12	2	8	1	10	5	+
<i>Galium palustre</i>	+			+	+	+		+	1	r
<i>Glyceria fluitans</i>						+				
<i>Juncus acutiflorus</i>										
<i>Juncus conglomeratus</i>										1
<i>Lysimachia vulgaris</i>									+	
<i>Lythrum salicaria</i>	1		r					+		
<i>Petasites hybridus</i>										1
<i>Sanguisorba officinalis</i>	8	6	6	3	11		1		5	4
<i>Silaum silaus</i>		2	5	+					1	
<i>Silene flos-cuculi</i>	1	+	2	+	+		+		+	+

- Fortsetzung nächste Seite -





Anhangtab. 3b: *Bromion racemosi* –Bestände, Teil 2

Flächencode	15	16	17	18	19	20	21	501	702	520
Lückigkeit	25	35	25	15	20	25	25	70	55	68
Anzahl der Arten	33	31	31	37	24	32	27	41	31	34
	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA
<b>Kennarten der Sumpfdotterblumenwiesen (<i>Bromion racemosi</i> C.A.)</b>										
<i>Achillea ptarmica</i>		1	1	+	+	+	+	6	+	1
<i>Bistorta officinalis</i>	8	5	5	3		1		9	1	1
<i>Bromus racemosus</i>				1						
<i>Caltha palustris</i>	+	4	5	5	4	3	5		5	
<i>Carex fusca</i>	2	1	5	5	10	10				
<i>Carex nigra</i>		2							1	
<i>Crepis paludosa</i>							+			
<i>Lotus pedunculatus</i>		2	+	5	5	1	+	6	+	
<i>Myosotis scorpioides</i>	+	+	+	1	+	+		1	1	+
<i>Scirpus sylvaticus</i>						1	10	1	61	3
<i>Senecio aquaticus</i>										+
<b>Kennarten der Riedwiesen (<i>Phragmitetalia</i> C.A.) als Trennarten nasser Standorte</b>										
<i>Epilobium palustre</i>										
<i>Iris pseudachoris</i>										
<i>Phalaris arundinacea</i>						2				
<b>Kennarten der Quecken-Ampfer Rasen (<i>Elymo-Rumicion</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung</b>										
<i>Deschampsia cespitosa</i>	2	30	20		15	20	15	5	+	22
<i>Juncus effusus</i>	3	10	3	15	15	15		8		2
<i>Lysimachia nummularia</i>									+	+
<i>Ranunculus repens</i>	1		5		1	2		17	5	6
<b>Kennarten der Weißkleeweidens (<i>Cynosurion cristati</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung</b>										
<i>Bellis perennis</i>										
<i>Cirsium arvense</i>			+					+		
<i>Cynosurus cristatus</i>	10		5	1						+
<i>Lolium perenne</i>	2							+		
<i>Rumex crispus</i>					+	+				
<i>Rumex obtusifolius</i>						+	+			
<i>Trifolium repens</i>				+				2	+	+
<b>Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.) als Trennarten trockener Standorte</b>										
<i>Achillea millefolium</i>								+		
<i>Ajuga reptans</i>	r							+		
<i>Dactylis glomerata</i>						1	5	+		
<i>Leontodon hispidus</i>								+		
<i>Phleum pratense</i>	5	5	1		10					14
<i>Taraxacum officinale</i>								+		+
<i>Trifolium dubium</i>				r				+		
<i>Veronica chamaedrys</i>	+							+		
<b>Kennarten der Feuchtwiesen (<i>Molinietalia</i> C.A.) u.a. als Trennarten feuchter Standorte</b>										
<i>Angelica sylvestris</i>		1			+	1	1	2		
<i>Cirsium oleraceum</i>				1		+				
<i>Cirsium palustre</i>		+	+	+	+	+			1	
<i>Colchicum autumnale</i>										
<i>Equisetum palustre</i>			+				1	1	+	
<i>Filipendula ulmaria</i>		+					20	3	10	4
<i>Galium palustre</i>		+	+	1	+	1	+		+	
<i>Glyceria fluitans</i>			2						1	
<i>Juncus acutiflorus</i>										2
<i>Juncus conglomeratus</i>		3		2			10		1	
<i>Lysimachia vulgaris</i>								+		
<i>Lythrum salicaria</i>		+	+	+		+	1			
<i>Petasites hybridus</i>										+
<i>Sanguisorba officinalis</i>	10		1	4				+	+	+
<i>Silaum silaus</i>	+									
<i>Silene flos-cuculi</i>	1			+				+	1	+

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung *Bromion racemosi*-Bestände, Teil 2 -

Flächencode	15	16	17	18	19	20	21	501	702	520
<b>Allgemeine Kennarten des Wirtschaftsgrünlandes (<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> C.A.)</b>										
<i>Agrostis stolonifera</i>			5							
<i>Alopecurus pratensis</i>				1	10	10	20	9	4	7
<i>Cardamine pratensis</i>			+					+	+	+
<i>Centaurea jacea</i>	+			+						
<i>Cerastium holosteoides</i>								+	0	+
<i>Festuca pratensis</i>	5			15	15	5		2	1	3
<i>Festuca rubra</i>	10	5	2	5	1	2	+	3		5
<i>Holcus lanatus</i>	20	+		12	1		2	10	6	4
<i>Lathyrus pratensis</i>			+	+	+	+	+	7	+	+
<i>Plantago lanceolata</i>	1			+				+		
<i>Poa pratensis</i>			3	2						
<i>Poa trivialis</i>		5	15	3	5	10	7	1	2	+
<i>Ranunculus acris</i>	1	+		10	2	2				2
<i>Rumex acetosa</i>	+	+		+	+	1	+	+	0	+
<i>Trifolium pratense</i>	+			+				+	+	+
<i>Trisetum flavescens</i>										
<i>Vicia cracca</i>	+		+					5	+	
<b>Kennarten der Glatthaferwiesen (<i>Arrhenatherion elatioris</i> C.A.)</b>										
<i>Anthriscus sylvestris</i>		r	r		+					
<i>Arrhenatherum elatius</i>		+								
<i>Crepis biennis</i>										
<i>Galium mollugo</i>						+	+			
<i>Heracleum sphondylium</i>										
<i>Vicia sepium</i>			+							
<b>Begleiter</b>										
<i>Aegopodium podagraria</i>									+	
<i>Agrostis canina</i>		20	20	1	5	10				
<i>Agrostis capillaris</i>	10		2	1				1		15
<i>Alchemilla xanthochlora</i>	1							+		
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	5			3			+	2	2	9
<i>Arcticum lappa</i>										
<i>Carex ovalis</i>								1		2
<i>Cirsium vulgare</i>									1	
<i>Convolvulus sepium</i>								+		
<i>Dactylorhiza maculata</i>				+						
<i>Epilobium angustifolium</i>										1
<i>Equisetum arvense</i>		+					+			
<i>Festuca arundinacea</i>										
<i>Galeopsis tetrahit</i>		+	+			+	+			
<i>Galium aparine</i>								+		+
<i>Glechoma hederacea</i>										
<i>Hypericum perforatum</i>	+						+			
<i>Lamium album</i>										
<i>Lotus corniculatus</i>	2									
<i>Potentilla erecta</i>	+									
<i>Potentilla palustre</i>	+	+								
<i>Ranunculus flammula</i>	+	+		1		+				
<i>Rhinanthus spec.</i>	+	2		+						
<i>Saxifraga granulata</i>										
<i>Stellaria graminea</i>	+	+	+	+	+	+	+			
<i>Symphytum officinale</i>										
<i>Tanacetum vulgare</i>										
<i>Urtica dioica</i>		+				+				

Anhangtab. 4a: *Festuco-Cynosuretum* –Bestände, Teil 1

Flächencode	103	104	107	114	304	305	403	509	513	602
Lückigkeit	40	60	63	60	30	45	60	50	60	50
Anzahl der Arten	34	38	50	52	39	29	45	29	59	26
	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA
<b>Kennarten der Weißkleeweiden (<i>Cynosurion cristati</i> C.A.)</b>										
<i>Bellis perennis</i>	+				1	+				
<i>Cynosurus cristatus</i>		+		3	1	+	+		+	
<i>Phleum pratense</i>	+	25		12			+		1	
<i>Senecio jacobaea</i>								2		
<i>Trifolium repens</i>	9	7	+		2	6	2	8	1	21
<i>Veronica serpyllifolia</i>		+	+	+				+		
<b>Kennarten der Rotschwingelweiden (<i>Festuco-Cynosuretum</i> C.A.) als Trennarten magerer Standorte</b>										
<i>Alchemilla xanthochlora</i>			+				1		+	
<i>Festuca ovina</i>	7						25			
<i>Festuca rubra</i>	43	13	28	25	21	2	45	44	8	22
<i>Hypochaeris radicata</i>					1	1		1		+
<i>Lotus corniculatus</i>	4				1		3		2	1
<i>Luzula campestris</i>	+		+		1	1	1		+	9
<i>Pimpinella saxifraga</i>	6	1	+	+	+	+	+	1	+	4
<i>Potentilla erecta</i>									+	
<i>Rumex acetosella</i>							2	4		+
<b>Kennarten der Quecken-Ampfer Rasen (<i>Elymo-Rumicion</i> C.A.) als Trennarten feuchter Standorte</b>										
<i>Deschampsia cespitosa</i>			3							5
<i>Elymus repens</i>									+	
<i>Juncus effusus</i>				+						
<i>Lysimachia nummularia</i>		+	+	+					+	
<i>Ranunculus repens</i>				6					+	
<i>Trifolium hybridum</i>										
<b>Kennarten der Tritt- und Flutrasen (<i>Plantaginietalia majoris</i> C.A.) u.a.</b>										
<i>Leontodon autumnalis</i>		2		+	1	4	+	2	+	+
<i>Matricaria discoidea</i>										
<i>Plantago major</i>		+		1					+	
<b>Kennarten der Feuchtwiesen (<i>Molinietalia</i> C.A.) u.a. als Trennarten feuchter Standorte</b>										
<i>Achillea ptarmica</i>			2	1					3	
<i>Angelica sylvestris</i>			4	2					1	
<i>Betonica officinalis</i>					1					
<i>Bistorta officinalis</i>			1	1					2	
<i>Colchicum autumnale</i>			+		+				+	
<i>Equisetum palustre</i>				1						
<i>Filipendula ulmaria</i>			+	3					1	
<i>Genista tinctoria</i>							1			
<i>Lotus pedunculatus</i>			4	+					1	
<i>Myosotis scorpioides</i>				+						
<i>Sanguisorba officinalis</i>		+	11	1	11				9	
<i>Selinum carvifolia</i>										
<i>Silene flos-cuculi</i>			+						+	
<i>Succisa pratensis</i>			+							
<b>Kennarten der Trockenrasen (<i>Festuco-Brometea</i> C.A.) u.a. als Trennarten trockener und magerer Standorte</b>										
<i>Galium verum</i>	3						3			
<i>Plantago media</i>							+			
<i>Ranunculus bulbosus</i>							2	+		
<i>Sanguisorba minor</i>							+			
<i>Trifolium arvense</i>							+			
<i>Vicia angustifolia</i>										
<b>Kennarten der Borstgrasrasen und Heiden (<i>Nardo-Callunetea</i> C.A.) u.a. als Trennarten magerer und saurer Standorte</b>										
<i>Carex pallescens</i>										
<i>Danthonia decumbens</i>										
<i>Hieracium pilosella</i>							1	+		1
<i>Hypericum maculatum</i>			1	+					1	
<i>Viola canina</i>							+			

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung *Festuco-Cynosuretum*-Bestände, Teil 1 -

Flächencode	103	104	107	114	304	305	403	509	513	602
<b>Kennarten der Glatthaferwiesen (<i>Arrhenatherion elatioris</i> C.A.) und Goldhaferwiesen (<i>Polygono-Trisetion</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Schnittnutzung</b>										
<i>Anthriscus sylvestris</i>		+	1	+					+	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	1	12	1	8		9			+	5
<i>Crepis biennis</i>			+	1						1
<i>Galium mollugo</i>	3	1	+	+				+	1	3
<i>Geranium pratense</i>									+	
<i>Heracleum sphondylium</i>	2		1	2			+		1	
<i>Knautia arvensis</i>	+				1		2		+	
<i>Malva moschata</i>										
<i>Pimpinella major</i>		+	4							
<i>Tragopogon pratensis</i>		+								
<i>Vicia sepium</i>									+	+
<b>Gemeinsame Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.)</b>										
<i>Achillea millefolium</i>	2	1	+	+	1	1	1	3	+	10
<i>Ajuga reptans</i>		+	+	+	+				+	
<i>Dactylis glomerata</i>	+		+	2		1		+	+	
<i>Dactylis glomerata</i>		12								
<i>Helictotrichon pubescens</i>					5					
<i>Leontodon hispidus</i>		+			+	1	+	+		
<i>Leucanthemum vulgare</i>	+	+	1	+	+	11	1		+	
<i>Rhinanthus minor</i>										
<i>Taraxacum officinale</i>		+	+	+	3	3	1	+	+	+
<i>Trifolium dubium</i>				+	+	+		+		+
<i>Trisetum flavescens</i>	3	10	2		3	14	+	1	1	2
<i>Veronica chamaedrys</i>		+	+	+					+	
<b>Allgemeine Kennarten des Wirtschaftsgrünlandes (<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> C.A.)</b>										
<i>Alopecurus pratensis</i>		3	1	2	5	4			26	
<i>Cardamine pratensis</i>		+	+	+	+				+	
<i>Centaurea jacea</i>			1		2			1	2	+
<i>Cerastium holosteoides</i>	+	+		+	1	1	+	+	+	
<i>Festuca pratensis</i>		2	4	3					1	
<i>Holcus lanatus</i>	+	+	1	5	10	15		+	5	
<i>Lathyrus pratensis</i>			+	2	+				+	
<i>Plantago lanceolata</i>	+	2	1	+	4	3	+		+	+
<i>Poa pratensis</i>	+				+	+	1	4		+
<i>Poa trivialis</i>		6	+	2	+				6	
<i>Ranunculus acris</i>		1	+	+	+	+			1	+
<i>Rumex acetosa</i>	1		1	1	2		3		1	3
<i>Rumex acetosa</i>		+				2				
<i>Trifolium pratense</i>	3	1	1	+	6	4	+	+	2	
<i>Vicia cracca</i>	1		1		1				+	2
<b>Begleiter</b>										
<i>Acer campestre</i>							+			
<i>Aegopodium podagraria</i>										
<i>Agrostis capillaris</i>	8	3	15	5	2	8	2	24	11	15
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	1	1	4	4	15	13	+		10	
<i>Artemisia vulgare</i>										
<i>Briza media</i>			+		+					
<i>Campanula rapunculoides</i>	1									
<i>Campanula rotundifolia</i>	+						+	3		
<i>Cerastium arvense</i>							1			
<i>Cirsium vulgare</i>			4	12					+	
<i>Convolvulus arvensis</i>				+						
<i>Dactylorhiza fuchsii</i>										
<i>Equisetum arvense</i>									+	
<i>Euphorbia heleoscopia</i>										
<i>Fragaria vesca</i>										
<i>Galium aparine</i>			3							
<i>Genista tinctoria</i>							1			
<i>Glechoma hederacea</i>				+					+	
<i>Gnaphalium sylvaticum</i>										
<i>Tanacetum vulgare</i>	1						1			

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung *Festuco-Cynosuretum*-Bestände, Teil 1 -

Flächencode	103	104	107	114	304	305	403	509	513	602
<b>Begleiter</b>										
<i>Betula spec.</i>							+			
<i>Carex spec.</i>							+		+	
<i>Cirsium arvense</i>										
<i>Cytisus scoparius</i>								2		
<i>Hieracium lachenalii</i>	1		2					2	2	
<i>Hordeum spec.</i>						+				
<i>Hordeum vulgare</i>										
<i>Hypericum perforatum</i>	2			+				+		+
<i>Juncus spec.</i>			+							
<i>Linaria vulgaris</i>							+			
<i>Lolium perenne</i>		1		+		+	1			
<i>Mentha aquatica</i>				+						
<i>Mentha arvensis</i>										
<i>Myosotis arvensis</i>		+								
<i>Polygala vulgaris</i>										
<i>Potentilla tabernaemontani</i>							+			
<i>Rhinanthus spec.</i>										
<i>Saxifraga granulata</i>				1	+	+	+		+	
<i>Silaum silaus</i>					2					
<i>Sinapis arvensis</i>										
<i>Stellaria graminea</i>	1	+					1	+	1	2
<i>Stellaria media</i>										
<i>Trifolium campestre</i>	+							+		
<i>Trifolium medium</i>				+					1	
<i>Verbascum spec.</i>										
<i>Vicia hirsuta</i>	+									
<i>Viola canina</i>										
<i>Viola riviniana</i>										

Anhangtab. 4b: *Festuco-Cynosuretum*-Bestände, Teil 2

Flächencode	603	604	609	703	712	715	717	905	906	1001
<b>Lückigkeit</b>	48	49	40	31	35	30	36	48	56	44
<b>Anzahl der Arten</b>	27	49	38	32	46	43	43	43	55	37
	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA
<b>Kennarten der Weißkleeweiden (<i>Cynosurion cristati</i> C.A.)</b>										
<i>Bellis perennis</i>										
<i>Cynosurus cristatus</i>						+			+	
<i>Phleum pratense</i>			1	1	+	1	+	4	2	
<i>Senecio jacobaea</i>								+	+	
<i>Trifolium repens</i>	7	4	4	13	1	3	2	1	+	+
<i>Veronica serpyllifolia</i>				+	+	+				+
<b>Kennarten der Rotschwingelweiden (<i>Festuco-Cynosuretum</i> C.A.) als Trennarten magerer Standorte</b>										
<i>Alchemilla xanthochlora</i>					+		+	+	2	
<i>Festuca ovina</i>	15									
<i>Festuca rubra</i>	36	28	41	51	25	17	9	35	43	30
<i>Hypochaeris radicata</i>			1	2						
<i>Lotus corniculatus</i>	1		+				2	1	+	+
<i>Luzula campestris</i>	+	+		1	+	+	+	+		1
<i>Pimpinella saxifraga</i>	5	1	6		3	2	1	+		+
<i>Potentilla erecta</i>		+				+	+		+	
<i>Rumex acetosella</i>								+		
<b>Kennarten der Quecken-Ampfer Rasen (<i>Elymo-Rumicion</i> C.A.) als Trennarten feuchter Standorte</b>										
<i>Deschampsia cespitosa</i>		1					1	+		
<i>Elymus repens</i>					+			1	+	
<i>Juncus effusus</i>										
<i>Lysimachia nummularia</i>									+	
<i>Ranunculus repens</i>		+						+	+	+
<i>Trifolium hybridum</i>								5		
<b>Kennarten der Tritt- und Flutrasen (<i>Plantaginetalia majoris</i> C.A.) u.a.</b>										
<i>Leontodon autumnalis</i>	+		2	1					+	
<i>Matricaria discoidea</i>							+			
<i>Plantago major</i>									+	

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung *Festuco-Cynosuretum*-Bestände, Teil 2 -

Flächencode	603	604	609	703	712	715	717	905	906	1001
<b>Kennarten der Feuchtwiesen (<i>Molinietalia</i> C.A.) u.a. als Trennarten feuchter Standorte</b>										
<i>Achillea ptarmica</i>		+				+			+	
<i>Angelica sylvestris</i>										
<i>Betonica officinalis</i>										
<i>Bistorta officinalis</i>		+			+	2	+		+	
<i>Colchicum autumnale</i>		1					+			
<i>Equisetum palustre</i>		+								
<i>Filipendula ulmaria</i>									+	
<i>Genista tinctoria</i>							+			
<i>Lotus pedunculatus</i>		3			1	1				
<i>Myosotis scorpioides</i>										
<i>Sanguisorba officinalis</i>		13			+	9	17			2
<i>Selinum carvifolia</i>			+		2	+			+	
<i>Silene flos-cuculi</i>										+
<i>Succisa pratensis</i>										
<b>Kennarten der Trockenrasen (<i>Festuco-Brometea</i> C.A.) u.a. als Trennarten trockener und magerer Standorte</b>										
<i>Galium verum</i>					+	+				
<i>Ranunculus bulbosus</i>										
<i>Vicia angustifolia</i>	1									
<b>Kennarten der Borstgrasrasen und Heiden (<i>Nardo-Callunetea</i> C.A.) u.a. als Trennarten magerer und saurer Standorte</b>										
<i>Carex pallescens</i>							+			
<i>Danthonia decumbens</i>							+			
<i>Hieracium pilosella</i>										
<i>Hypericum maculatum</i>					1	2	+	2	1	
<i>Viola canina</i>		+								
<b>Kennarten der Glatthaferwiesen (<i>Arrhenatherion elatioris</i> C.A.) und Goldhaferwiesen (<i>Polygono-Trisetion</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Schnittnutzung</b>										
<i>Anthriscus sylvestris</i>	+				1	+		+	+	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	3	4	3		11	1	1		1	1
<i>Crepis biennis</i>									2	
<i>Galium mollugo</i>	1	+	1	+	+	+		1	+	+
<i>Heracleum sphondylium</i>		+	+	+	2	3		1	1	+
<i>Knautia arvensis</i>		3	2		8	7	3		+	
<i>Malva moschata</i>								+		
<i>Pimpinella major</i>		+								
<i>Tragopogon pratensis</i>				1						
<i>Vicia sepium</i>			+		+			1	+	
<b>Gemeinsame Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.)</b>										
<i>Achillea millefolium</i>	7	1	1	1	+	1	1	2	+	2
<i>Ajuga reptans</i>		+					+		+	+
<i>Dactylis glomerata</i>	9	1	+		3	1	2		9	+
<i>Dactylis glomerata</i>								+		
<i>Helictotrichon pubescens</i>		+					1			2
<i>Leontodon hispidus</i>				+						
<i>Leucanthemum vulgare</i>		+	+	1	+	+	5	+	+	2
<i>Rhinanthus minor</i>			+						+	
<i>Taraxacum officinale</i>	+	+	+	1	+	+		+	+	
<i>Trifolium dubium</i>			+	+				+		
<i>Trisetum flavescens</i>		1	4	1	4	2	1	+	+	8
<i>Veronica chamaedrys</i>	+	+	+	+	+	+	+		+	
<b>Allgemeine Kennarten des Wirtschaftsgrünlandes (<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> C.A.)</b>										
<i>Alopecurus pratensis</i>		+	3	2	2	1	+		1	6
<i>Cardamine pratensis</i>					+		+		+	+
<i>Centaurea jacea</i>		+	+	1	3	2	3	4	3	1
<i>Cerastium holosteoides</i>	+	+	+	+	+	1	1	+	+	+
<i>Festuca pratensis</i>						+	+		1	
<i>Holcus lanatus</i>	5	6	6	4	5	13	13	4	+	13
<i>Lathyrus pratensis</i>	+	+	+					1		+
<i>Plantago lanceolata</i>	1	2	2	1	+	1	1	2	3	1
<i>Poa pratensis</i>	2	+	1	+		1			+	1
<i>Poa trivialis</i>		+		1	1	1	1			1
<i>Ranunculus acris</i>		+	+		+	+	1		1	5
<i>Rumex acetosa</i>	2					+		+	+	9
<i>Rumex acetosa</i>		+		1	1		5			
<i>Trifolium pratense</i>	+	3	3	1	+	2	3	4	1	3
<i>Vicia cracca</i>	+	4	+	1	7	2	1	5	1	2

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung *Festuco-Cynosuretum*–Bestände, Teil 2 -

Flächencode	603	604	609	703	712	715	717	905	906	1001
<b>Begleiter</b>										
<i>Acer campestre</i>										
<i>Aegopodium podagraria</i>		+			2			+	2	
<i>Agrostis capillaris</i>	6	11	9	1	17	20	22	24	17	1
<i>Anthoxanthum odoratum</i>		16	8	13	1	8	6	6	11	10
<i>Artemisia vulgare</i>	+		2							
<i>Betula spec.</i>										
<i>Briza media</i>		+								
<i>Campanula rapunculus</i>										
<i>Campanula rotundifolia</i>		+	+						+	
<i>Carex spec.</i>									+	
<i>Cerastium arvense</i>										
<i>Cirsium arvense</i>				+			+	+		
<i>Cirsium vulgare</i>		+			3	+				2
<i>Convolvulus arvensis</i>										
<i>Cytisus scoparius</i>										
<i>Dactylorhiza fuchsii</i>								+		
<i>Equisetum arvense</i>										
<i>Euphorbia heleosopia</i>								+		
<i>Fragaria vesca</i>									+	
<i>Galium aparine</i>					+					
<i>Genista tinctoria</i>										
<i>Glechoma hederacea</i>					+					
<i>Gnaphalium sylvaticum</i>								+		
<i>Hieracium lachenalii</i>		+	+							1
<i>Hordeum spec.</i>										
<i>Hordeum vulgare</i>							+			
<i>Hypericum perforatum</i>		+	+						1	
<i>Juncus spec.</i>										
<i>Linaria vulgaris</i>										
<i>Lolium perenne</i>										
<i>Mentha aquatica</i>										
<i>Mentha arvensis</i>	+									
<i>Myosotis arvensis</i>										
<i>Polygala vulgaris</i>						+				
<i>Potentilla tabernaemontani</i>										
<i>Rhinanthus spec.</i>										+
<i>Saxifraga granulata</i>		+								+
<i>Silaum silaus</i>										
<i>Sinapis arvensis</i>								+		
<i>Stellaria graminea</i>		+	+	1	+	+	1	+	+	1
<i>Stellaria media</i>				+						
<i>Tanacetum vulgare</i>										
<i>Trifolium campestre</i>										
<i>Trifolium medium</i>										
<i>Verbascum spec.</i>	+									
<i>Vicia hirsuta</i>								+		
<i>Viola canina</i>									+	
<i>Viola riviniana</i>					+					

Anhangtab. 5a: *Lolio-Cynosuretum*-Bestände, Teil 1

Flächencode	301	406	407	505	506	601	801	808	901	903	904	907	1101	1102
Lückigkeit	46	41	40	33	49	65	64	55	45	60	74	58	45	41
Anzahl der Arten	39	25	15	34	19	10	30	35	18	40	22	29	22	41
	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA
<b>Kennarten der Weißkleeweiden (<i>Cynosurion cristati</i> C.A.)</b>														
<i>Bellis perennis</i>	+							+		+				+
<i>Cynosurus cristatus</i>	+									+				+
<i>Phleum pratense</i>	11	1	2	1		4	+	4	6	14	75	17	23	1
<i>Senecio jacobaea</i>										+				
<i>Trifolium repens</i>	3	5	+	4	7	17	+	+	5	1	1	2	15	4
<i>Veronica serpyllifolia</i>	+	+		+				+			+		+	+
<b>Kennarten der Weidelgrasweiden (<i>Lolio-Cynosuretum</i> C.A.) als Trennarten der Intensivweiden</b>														
<i>Capsella bursa-pastoris</i>				+	+					+				
<i>Cirsium arvense</i>				2										
<i>Cirsium vulgare</i>					+									
<i>Elymus repens</i>			2				1	+	16	1	2	1		
<i>Lolium perenne</i>	2	10	1	16	63	59	+	5	40	47	12	59	7	5
<i>Plantago major</i>				+	2		+		+	1	+	+	1	+
<i>Rumex crispus</i>	+								2					
<i>Rumex obtusifolius</i>							60		+	1	+	+		
<b>Kennarten der Tritt- und Flutrasen (<i>Plantaginetales majoris</i> C.A., <i>Elymo-Rumicion</i> C.A.) u.a.</b>														
<i>Alopecurus geniculatus</i>					+									
<i>Deschampsia cespitosa</i>	+											+		
<i>Leontodon autumnalis</i>	+	+		+	1			5		6	+	2	1	1
<i>Lysimachia nummularia</i>								+						
<i>Matricaria discoidea</i>					+				+					
<i>Polygonum aviculare</i>					+					+	+			
<i>Ranunculus repens</i>			+	+	1		+	1	+	+		2	+	
<i>Trifolium hybridum</i>										+	1			
<b>Kennarten der Rotschwingelweiden (<i>Festuco-Cynosuretum</i> C.A.) als Trennarten magerer Standorte</b>														
<i>Alchemilla xanthochlora</i>								+						1
<i>Hypochaeris radicata</i>		+						+		+				
<i>Lotus corniculatus</i>		2												
<i>Luzula campestris</i>	+													
<i>Pimpinella saxifraga</i>		+		+										1
<b>Kennarten der Borstgrasrasen und Heiden (<i>Nardo-Callunetea</i> C.A.) u.a. als Trennarten magerer und saurer Standorte</b>														
<i>Hieracium pilosella</i>		+												
<i>Hypericum maculatum</i>										+				
<b>Kennarten der Glatthaferwiesen (<i>Arrhenatherion elatioris</i> C.A.) und Goldhaferwiesen (<i>Polygono-Trisetion</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Schnittnutzung</b>														
<i>Anthriscus sylvestris</i>	1			+		7						+		1
<i>Arrhenatherum elatius</i>				+	1	5	1	8						3
<i>Crepis biennis</i>	+						+					+		+
<i>Heracleum sphondylium</i>	+			+	+		6	3		1		2		+
<i>Pimpinella major</i>				+										
<b>Gemeinsame Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.)</b>														
<i>Achillea millefolium</i>	+	+		2				+		1	1	+	1	2
<i>Ajuga reptans</i>								+		+				
<i>Bromus hordeaceus</i>	1	+	+				+						+	2
<i>Dactylis glomerata</i>	1	7	35	6		+	9	12	2	4		5	4	5
<i>Helictotrichon pubescens</i>							1							
<i>Leontodon hispidus</i>	+	+						1		+		+		+
<i>Leucanthemum vulgare</i>	+							+		+				4
<i>Taraxacum officinale</i>	2	1	+	1	1	16	1	2	2	1	+	1	6	3
<i>Trifolium dubium</i>	+	+		+										+
<i>Trisetum flavescens</i>	2	1	+	+			+	2		+			2	10
<i>Veronica chamaedrys</i>								+		+				+

- Fortsetzung nächste Seite -



- Fortsetzung *Lolio-Cynosuretum*–Bestände, Teil 1 -

Flächencode	301	406	407	505	506	601	801	808	901	903	904	907	1101	1102
<b>Allgemeine Kennarten des Wirtschaftsgrünlandes (<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> C.A.)</b>														
<i>Agrostis gigantea</i>														
<i>Alopecurus pratensis</i>	9	42	32	1	+		7					+	+	3
<i>Cardamine pratensis</i>	+			+				+		+				+
<i>Centaurea jacea</i>										+				2
<i>Cerastium holosteoides</i>	2	+		+	+		+	+	+	+	+	+	2	3
<i>Festuca pratensis</i>	1			+			+	2		1	3	+	15	1
<i>Festuca rubra</i>	14	3		7				2		2			2	13
<i>Holcus lanatus</i>	6						1	4		1		+		3
<i>Plantago lanceolata</i>	1			+			+	3	+	+		+	+	2
<i>Poa pratensis</i>	1	23	2	+		+	+				4	1	18	3
<i>Poa trivialis</i>	+		21	17	11		6	+	2	12		1	5	1
<i>Ranunculus acris</i>	+			+	+			+		+		+		1
<i>Rumex acetosa</i>	4	+					+	1		+		+		1
<i>Trifolium pratense</i>	11			+		+	+	1	+	+		+		8
<i>Vicia cracca</i>				+			+				+			
<b>Begleiter</b>														
<i>Aegopodium podagraria</i>														
<i>Agrostis capillaris</i>	13	3	4	45	14		+	40	26	10	2	10		8
<i>Anagallis arvensis</i>														
<i>Angelica sylvestre</i>							+							
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	16							7						6
<i>Aphanos arvensis</i>														
<i>Campanula rotundifolia</i>														1
<i>Centaurea cyanus</i>														
<i>Centaurea scabiosa</i>														+
<i>Chenopodium album</i>														
<i>Convolvulus arvensis</i>	+			1										
<i>Euphorbia helioscopia</i>										+				
<i>Fragaria vesca</i>														
<i>Galeopsis tetrahit</i>									+					
<i>Galium aparine</i>											+			
<i>Galium verum</i>	+	2												
<i>Geum urbanum</i>														
<i>Glechoma hederacea</i>							+	+						
<i>Gnaphalium sylvaticum</i>														
<i>Hypericum perforatum</i>														
<i>Impatiens glandulifera</i>														
<i>Lolium multiflorum</i>							+							
<i>Matricaria maritima</i>											+	+		
<i>Matricaria recudita</i>													+	
<i>Mentha arvensis</i>										+				
<i>Myosotis arvensis</i>				+						+	+			
<i>Persicaria maculosa</i>														
<i>Polygonum convolvulus</i>										+				
<i>Ranunculus bulbosus</i>		+											+	
<i>Saxifraga granulata</i>	1	+												
<i>Sedum maximum</i>														
<i>Senecio inaequidens</i>														
<i>Silene vulgaris</i>														
<i>Sinapis arvensis</i>														
<i>Sisymbrium officinale</i>														
<i>Sonchus asper</i>										+				
<i>Stellaria graminea</i>	+		+				+	+					+	2
<i>Stellaria media</i>				+	+				+	+		+		
<i>Thlaspi arvense</i>														
<i>Urtica dioica</i>			2											
<i>Vicia hirsuta</i>						+								
<i>Viola arvensis</i>											+			

Einmal in Spuren:

*Viola spec.* (1101), *Farn* (808),  
*Polygonum convolvulus* (903), *Euphorbia helioscopia* (903),  
*Barbarea vulgaris* (903)

**Anhangtab. 5b: Lolio-Cynosuretum–Bestände, Teil 2**  
(= Subass. v. *Lotus pedunculatus*)

Flächencode	101	605	608	706	902	913
Lückigkeit	85	50	45	45	51	55
Anzahl der Arten	47	41	27	44	32	34
	EA	EA	EA	EA	EA	EA
<b>Kennarten der Weißkleewiden (<i>Cynosurion cristati</i> C.A.)</b>						
<i>Bellis perennis</i>	+	+				
<i>Cynosurus cristatus</i>	+	2				2
<i>Phleum pratense</i>	9		6		8	7
<i>Trifolium repens</i>	+	1	+	3	5	+
<i>Veronica serpyllifolia</i>	+	+		+		
<b>Kennarten der Weidelgrasweiden (<i>Lolio-Cynosuretum</i> C.A.) als Trennarten der Intensivweiden</b>						
<i>Capsella bursa-pastoris</i>						+
<i>Cirsium arvense</i>				4	2	
<i>Cirsium vulgare</i>	3			4		
<i>Elymus repens</i>		+	1		1	
<i>Lolium perenne</i>	+	1	8		51	32
<i>Plantago major</i>	+			+	1	+
<i>Poa annua</i>				+		
<i>Rumex obtusifolius</i>	2		2		1	1
<b>Kennarten der Tritt- und Flutrasen (<i>Plantaginetalia majoris</i> C.A., <i>Elymo-Rumicion</i> C.A.) u. a.</b>						
<i>Deschampsia cespitosa</i>	+				+	
<i>Leontodon autumnalis</i>	+	1		+	2	1
<i>Lysimachia nummularia</i>	+	+		+		
<i>Ranunculus repens</i>	2	3	3	8	7	2
<b>Kennarten der Sumpfdotterblumenwiesen (<i>Bromion racemosi</i> C.A.) u.a. als Trennarten feuchter Standorte</b>						
<i>Bistorta officinalis</i>		3	3	9		
<i>Cirsium oleraceum</i>	+					
<b>Kennarten der Feuchtwiesen (<i>Molinietalia</i> C.A.) u.a. als Trennarten feuchter Standorte</b>						
<i>Achillea ptarmica</i>	+	1		1		
<i>Equisetum palustre</i>	+					
<i>Filipendula ulmaria</i>	1	+		9		
<i>Lotus pedunculatus</i>				+		
<i>Myosotis scorpioides</i>	+					
<i>Sanguisorba officinalis</i>	+	1		4		
<i>Silene flos-cuculi</i>	+	+		+		
<b>Kennarten der Riedwiesen (<i>Phragmitetalia</i> C.A.) als Trennarten nasser Standorte</b>						
<i>Iris pseudacorus</i>		1				
<i>Phalaris arundinacea</i>	9	1				
<b>Kennarten der Rotschwengelweiden (<i>Festuco-Cynosuretum</i> C.A.) als Trennarten magerer Standorte</b>						
<i>Alchemilla xanthochlora</i>		+		+	+	+
<i>Hypochaeris radicata</i>						+
<i>Lotus corniculatus</i>						+

Flächencode	101	605	608	706	902	913
<b>Kennarten der Glatthaferwiesen (<i>Arrhenatherion</i> C.A.) und Goldhaferwiesen (<i>Polygono-Trisetion</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Schnittnutzung</b>						
<i>Anthriscus sylvestris</i>	+		1	1	+	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	3		1	1		
<i>Crepis biennis</i>	+					
<i>Galium mollugo</i>				+	+	
<i>Heracleum sphondylium</i>	3	1	5	2	2	
<i>Vicia sepium</i>						+
<b>Gemeinsame Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.)</b>						
<i>Achillea millefolium</i>	+	+	+	+	1	1
<i>Ajuga reptans</i>	+	+				
<i>Bromus hordeaceus</i>	+	1				
<i>Dactylis glomerata</i>		1	17	5	4	1
<i>Leontodon hispidus</i>		+		+	+	
<i>Taraxacum officinale</i>	+	+	+	3	1	+
<i>Trifolium dubium</i>						+
<i>Trisetum flavescens</i>		1	1	+	1	+
<i>Veronica chamaedrys</i>	+	+	+	+		+
<b>Allgemeine Kennarten des Wirtschaftsgrünlandes (<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> C.A.)</b>						
<i>Alopecurus pratensis</i>	+	2	1	6	1	
<i>Cardamine pratensis</i>	+			+		
<i>Centaurea jacea</i>		+				+
<i>Cerastium holosteoides</i>	+	1	+	1	+	+
<i>Festuca pratensis</i>	+	6	1	2	+	1
<i>Festuca rubra</i>	9	2		3	2	4
<i>Holcus lanatus</i>	1	44	41	19		18
<i>Plantago lanceolata</i>	+	1	+	+	2	+
<i>Poa pratensis</i>				+	7	
<i>Poa trivialis</i>	+	3	4	12	2	1
<i>Ranunculus acris</i>	+	2		2		1
<i>Rumex acetosa</i>	+	+	+	+	+	1
<i>Trifolium pratense</i>	+	2	+	2	1	1
<i>Vicia cracca</i>				+		1
<b>Begleiter</b>						
<i>Aegopodium podagraria</i>	1			+		
<i>Agrostis capillaris</i>	9	9	8	2	1	24
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	+	12		+		1
<i>Epilobium angustifolium</i>						
<i>Epilobium palustre</i>	+					
<i>Equisetum arvense</i>				+		
<i>Galium aparine</i>		+	+			
<i>Geum urbanum</i>						
<i>Glechoma hederacea</i>	+		+	+		
<i>Impatiens glandulifera</i>			+			
<i>Matricaria maritima</i>					+	
<i>Matricaria recudita</i>						
<i>Myosotis arvensis</i>		+				
<i>Petasites hybridus</i>	48					
<i>Persicaria amphibia</i>						
<i>Ranunculus auricomus</i>						
<i>Stellaria graminea</i>				+	+	+
<i>Stellaria media</i>					+	+
<i>Urtica dioica</i>	+		+			

Anhangtab. 6: *Polygono-Trisetion*-Bestände

Flächencode	714	704	503	Flächencode	714	704	503
Lückigkeit	50	25	49	<b>Gemeinsame Kennarten der Wiesen und Weiden frischer Standorte (<i>Arrhenatheretalia</i> C.A.)</b>			
Anzahl der Arten	42	43	52	<i>Achillea millefolium</i>	1	2	1
	EA	EA	EA	<i>Ajuga reptans</i>		+	+
<b>Kennarten der Goldhaferwiesen (<i>Polygono-Trisetion</i> C.A.)</b>				<i>Carum carvi</i>		+	
<i>Alchemilla xanthochlora</i>	+	+	+	<i>Dactylis glomerata</i>	3	1	1
<i>Bistorta officinalis</i>	4	2	3	<i>Helictotrichon pubescens</i>		3	
<i>Hypericum maculatum</i>		+	+	<i>Leontodon hispidus</i>			+
<i>Hypochaeris radicata</i>			+	<i>Leucanthemum vulgare</i>		+	+
<i>Luzula campestris</i>		+	+	<i>Trifolium dubium</i>			+
				<i>Trisetum flavescens</i>	1	6	6
<b>Kennarten der Feuchtwiesen (<i>Molinietalia</i> C.A.) u.a. als Trennarten feuchter Standorte</b>				<i>Taraxacum officinale</i>	3		2
<i>Achillea ptarmica</i>	+	+	+	<i>Veronica chamaedrys</i>	+	+	0
<i>Colchicum autumnale</i>			2				
<i>Equisetum palustre</i>	+		+	<b>Kennarten des Wirtschaftsgrünlandes (<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> C.A.)</b>			
<i>Filipendula ulmaria</i>	6	2	+	<i>Alopecurus pratensis</i>	3	7	+
<i>Lotus pedunculatus</i>	+	+	+	<i>Cardamine pratensis</i>	+	1	+
<i>Sanguisorba officinalis</i>	1	4	2	<i>Centaurea jacea</i>		+	7
<i>Selinum carvifolia</i>		1		<i>Cerastium holosteoides</i>	+	1	+
<i>Silene flos-cuculi</i>		1	+	<i>Festuca pratensis</i>	15	3	4
				<i>Festuca rubra</i>	1	7	4
<b>Kennarten der Quecken-Ampfer Rasen (<i>Elymo-Rumicion</i> C.A.) als Trennarten feuchter Standorte</b>				<i>Holcus lanatus</i>	16	14	13
<i>Deschampsia cespitosa</i>			7	<i>Lathyrus pratensis</i>	+	+	+
<i>Lysimachia nummularia</i>	+		+	<i>Plantago lanceolata</i>	1	+	4
<i>Ranunculus repens</i>	5	1	1	<i>Poa trivialis</i>	9	13	2
				<i>Ranunculus acris</i>	1	15	3
<b>Kennarten der Glatthaferwiesen (<i>Arrhenatherion elatioris</i> C.A.) als Trennarten nährstoffreicher und trockener Standorte</b>				<i>Rumex acetosa</i>	2	4	+
<i>Anthriscus sylvestris</i>	3	+		<i>Trifolium pratense</i>	2	2	3
<i>Arrhenatherum elatius</i>		1		<i>Vicia cracca</i>	+	+	
<i>Galium mollugo</i>	+	+					
<i>Heracleum sphondylium</i>	+	+	+	<b>Begleiter</b>			
<i>Knautia arvensis</i>	+	+	1	<i>Aegopodium podagraria</i>	1		
<i>Pimpinella major</i>			+	<i>Agrostis capillaris</i>	16		10
<i>Vicia sepium</i>			+	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	+	5	12
				<i>Campanula rotundifolia</i>			1
<b>Kennarten der Weißkleeweidens (<i>Cynosurion cristati</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung</b>				<i>Galium aparine</i>	+		
<i>Cynosurus cristatus</i>		2	11	<i>Glechoma hederacea</i>	+	+	
<i>Phleum pratense</i>	2		1	<i>Leontodon autumnalis</i>			+
<i>Trifolium repens</i>	4	2	1	<i>Stellaria graminea</i>	+		+
<i>Veronica serpyllifolia</i>	+						
				<b>Kennarten der Weidelgrasweiden (<i>Lolio-Cynosuretum</i> C.A.) als Kennzeichen zeitweiliger Beweidung und Trennarten nährstoffreicher Standorte</b>			
<i>Cirsium vulgare</i>	4	2	+	<i>Cirsium vulgare</i>	4	2	+
<i>Lolium perenne</i>			+	<i>Lolium perenne</i>			+
<i>Plantago major</i>	+		+	<i>Plantago major</i>	+		+

**Anhangtab. 7:** Wetterdaten im Versuch „Effizienz von Selen-Gaben“  
(= Se-Applikationsexperiment)

<b>Marburg / Universität, 220 m ü. NN</b>				
<b>2002</b>		<b>2003</b>		
<b>Monat</b>	<b>Niederschlag</b>	<b>Temperatur</b>	<b>Niederschlag</b>	<b>Temperatur</b>
	mm	°C	mm	°C
<b>1</b>	78,9	1,5	63,6	0,2
<b>2</b>	194,3	6,1	20,2	-2,0
<b>3</b>	79,7	7,0	41,5	5,0
<b>4</b>	62,7	10,0	25,6	9,2
<b>5</b>	75,7	15,4	57,0	14,6
<b>6</b>	30,0	20,6	47,8	20,0
<b>7</b>	123,4	20,1	117,6	19,6
<b>8</b>	109,4	20,8	23,8	21,4
<b>9</b>	40,5	14,0	37,5	14,0
<b>10</b>	128,7	8,7	56,6	6,3
<b>11</b>	98,8	6,7	35,1	5,7
<b>12</b>	111,1	1,1	86,7	1,0
<b>Jahr</b>	1133,2	10,9	613,0	9,6
<b>Bad Marienberg, 547 m ü. NN</b>				
<b>2002</b>		<b>2003</b>		
<b>Monat</b>	<b>Niederschlag</b>	<b>Temperatur</b>	<b>Niederschlag</b>	<b>Temperatur</b>
	mm	°C	mm	°C
<b>1</b>	99,0	-0,2	135,6	-1,5
<b>2</b>	202,2	3,5	34,1	-2,0
<b>3</b>	86,0	4,4	46,7	5,5
<b>4</b>	52,1	6,7	79,7	7,3
<b>5</b>	77,9	11,5	91,7	12,1
<b>6</b>	49,8	15,3	54,2	17,7
<b>7</b>	88,1	15,4	116,3	17,0
<b>8</b>	98,0	16,7	43,3	19,6
<b>9</b>	49,9	11,6	88,1	13,1
<b>10</b>	164,3	6,9	100,3	4,9
<b>11</b>	136,4	5,4	57,3	5,4
<b>12</b>	130,4	0,3	111,7	0,9
<b>Jahr</b>	1234,1	8,1	959,0	8,3

**Anhangtab. 8:** Termine für N-, Ca- und Se-Gaben sowie die Ernte im Versuch „Effizienz von Selen-Gaben“ (= Se-Applikationsexperiment)

Maßnahme	Termin
Versuchsanlage	04./05. 02. 2002
<b>Folgeaufwuchs:</b>	
Ca-Gabe	04./05. 02.2002
Letzte Vornutzung	15.07.2002
N-Gabe	16.07.2002
Se-Gabe	16.07.2002
Hauptnutzung	26./27.08.2002
<b>Primäraufwuchs:</b>	
Ca-Gabe	05.11.2002
N-Gabe	01.04.2003
Se-Gabe	01.04.2003
Hauptnutzung	07./08.05.2003

**Anhangtab. 9:** Se- und S-Konzentrationen im ersten und zweiten Untersuchungsjahr im Versuch (= Status quo – Analyse)

Flächen-Code	Pflanzengesellschaft	Erstes Untersuchungsjahr		Zweites Untersuchungsjahr	
		Se µg kg <sup>-1</sup> TS	S %	Se µg kg <sup>-1</sup> TS	S %
105	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	32	0,24	23	0,23
106	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	85	0,25	121	0,23
113	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	58	0,24	22	0,18
116	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	28	0,40	32	0,21
119	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	30	0,26	38	0,25
201	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	44	0,23	67	0,27
202	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	22	0,22	24	0,16
303	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	33	0,25	11	0,19
401	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	70	0,27	27	0,20
408	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	67	0,22	35	0,23
504	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	50	0,20	24	0,29
515	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	11	0,19	38	0,22
517	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	25	0,22	38	0,23
606	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	11	0,24	11	0,23
610	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	21	0,22	23	0,22
708	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	31	0,25	25	0,23
713	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	23	0,26	11	0,25
718	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	34	0,26	33	0,23
804	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	29	0,24	11	0,26
1201	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	44	0,24	34	0,24
1	<i>Bromion racemosi</i>	30	0,27	18	0,30
3	<i>Bromion racemosi</i>	18	0,24	12	0,33
4	<i>Bromion racemosi</i>	113	0,28	42	0,33
5	<i>Bromion racemosi</i>	21	0,24	29	0,32
6	<i>Bromion racemosi</i>	40	0,24	31	0,29
7	<i>Bromion racemosi</i>	34	0,29	7	0,35
8	<i>Bromion racemosi</i>	25	0,28	11	0,33
9	<i>Bromion racemosi</i>	21	0,23	8	0,39
11	<i>Bromion racemosi</i>	25	0,21	13	0,30
13	<i>Bromion racemosi</i>	26	0,25	62	0,34
15	<i>Bromion racemosi</i>	57	0,23	57	0,31
16	<i>Bromion racemosi</i>	34	0,22	52	0,29
17	<i>Bromion racemosi</i>	44	0,24	33	0,33
18	<i>Bromion racemosi</i>	25	0,26	44	0,31
19	<i>Bromion racemosi</i>	24	0,22	16	0,32
20	<i>Bromion racemosi</i>	29	0,22	9	0,28
21	<i>Bromion racemosi</i>	53	0,26	10	0,30
501	<i>Bromion racemosi</i>	66	0,22	72	0,24
520	<i>Bromion racemosi</i>	34	0,18	76	0,19
702	<i>Bromion racemosi</i>	62	0,23	87	0,26

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung Anhangtab. 9 -

Flächen- code	Pflanzengesellschaft	Erstes Untersuchungsjahr		Zweites Untersuchungsjahr	
		Se $\mu\text{g kg}^{-1}$ TS	S %	Se $\mu\text{g kg}^{-1}$ TS	S %
103	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	56	0,21	36	0,20
104	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	49	0,26	40	0,24
107	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	87	0,23	87	0,31
114	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	44	0,29	44	0,24
304	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	36	0,28	11	0,27
305	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	29	0,32	29	0,16
403	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	69	0,28	34	0,23
509	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	57	0,23	49	0,24
513	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	36	0,25	27	0,24
602	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	57	0,24	35	0,19
603	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	79	0,23	44	0,19
604	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	31	0,25	38	0,23
609	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	37	0,23	11	0,24
703	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	31	0,22	34	0,19
712	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	24	0,19	11	0,22
715	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	30	0,22	11	0,21
717	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	45	0,21	31	0,23
905	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	71	0,31	71	0,18
906	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	38	0,22	11	0,21
1001	<i>Festuco-Cynosuretum</i>	63	0,23	43	0,22
101	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	42	0,40	67	0,38
301	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	28	0,24	30	0,18
406	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	24	0,23	35	0,24
407	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	25	0,24	46	0,21
505	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	36	0,25	27	0,24
506	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	32	0,29	24	0,25
601	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	24	0,25	31	0,24
605	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	11	0,26	11	0,36
608	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	11	0,25	11	0,25
706	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	20	0,24	24	0,24
801	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	24	0,28	26	0,25
808	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	44	0,24	32	0,28
901	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	37	0,26	29	0,21
902	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	26	0,26	38	0,19
903	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	26	0,33	28	0,23
904	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	11	0,20	25	0,19
907	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	31	0,25	35	0,25
913	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	30	0,25	22	0,22
1101	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	35	0,21	11	0,16
1102	<i>Lolio-Cynosuretum</i>	33	0,21	55	0,17
503	<i>Polygono-Trisetion</i>	54	0,27	40	0,26
704	<i>Polygono-Trisetion</i>	27	0,30	32	0,21
710	<i>Polygono-Trisetion</i>	21	0,23	22	0,24
	x	38,0	0,25	32,9	0,25
	Standardabweichung	19,2	0,04	20,8	0,05

**Anhangtab. 10:** Übersicht über Energiedichten, Rohprotein-, und Mineralstoff-Konzentrationen (= Status quo – Analyse)

<b><i>Arrhenatherion elatioris:</i></b>																
Flächencode	Erstes Untersuchungsjahr								Zweites Untersuchungsjahr							
	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %
105	10,2	6,1	18,6	0,41	0,19	2,84	0,01	0,31	9,6	5,7	19,3	0,34	0,18	3,58	0,03	0,36
106	9,2	5,4	22,6	0,66	0,55	1,86	0,11	0,36	9,4	5,5	19,6	0,51	0,45	2,09	0,09	0,35
113	9,8	5,8	13,2	0,59	0,18	2,64	0,02	0,33	10,0	6,0	18,6	0,50	0,20	3,50	0,01	0,35
116	10,3	6,2	17,0	0,71	0,35	3,15	0,01	0,23	9,8	5,8	18,5	0,42	0,24	2,56	0,02	0,40
119	10,6	6,4	20,8	0,55	0,20	2,34	0,00	0,17	9,3	5,5	21,3	0,36	0,19	2,62	0,01	0,17
201	9,5	5,6	13,6	0,55	0,16	2,62	0,01	0,22	8,7	5,1	13,5	0,78	0,21	2,37	0,03	0,21
202	10,7	6,5	15,1	0,55	0,20	2,56	0,02	0,24	8,9	5,3	11,8	0,38	0,19	2,82	0,00	0,20
303	10,0	6,0	16,7	0,64	0,18	2,41	0,01	0,24	9,9	6,0	12,8	0,57	0,19	2,12	0,03	0,20
401	7,9	4,6	11,8	0,30	0,12	2,18	0,01	0,28	9,0	5,3	12,5	0,22	0,12	2,78	0,01	0,33
408	9,5	5,7	12,0	0,32	0,14	2,35	0,02	0,29	9,8	5,8	15,4	0,53	0,18	3,44	0,03	0,38
504	10,0	6,0	19,6	0,34	0,16	2,82	0,03	0,35	9,1	5,4	15,4	0,38	0,20	3,17	0,01	0,41
515	10,2	6,1	24,7	0,45	0,23	2,76	0,02	0,28	9,7	5,8	15,3	0,53	0,29	2,75	0,03	0,33
517	10,2	6,1	26,7	0,56	0,25	3,03	0,02	0,34	10,1	6,1	13,0	0,56	0,22	3,01	0,03	0,35
606	10,9	6,6	25,7	0,57	0,22	2,77	0,04	0,24	9,7	5,8	15,2	0,49	0,20	3,00	0,04	0,26
610	10,6	6,4	18,6	0,63	0,23	2,72	0,00	0,21	9,9	5,9	16,8	0,42	0,19	2,69	0,02	0,18
708	9,3	5,5	22,4	0,65	0,28	3,64	0,01	0,37	9,6	5,7	15,0	0,63	0,21	3,45	0,03	0,29
713	10,1	6,0	18,4	0,86	0,30	2,27	0,02	0,18	10,0	6,0	15,8	0,75	0,21	2,91	0,00	0,19
718	11,0	6,6	29,2	0,41	0,23	3,03	0,01	0,41	9,9	5,9	15,2	0,36	0,19	2,49	0,02	0,37
804	9,3	5,5	15,2	0,36	0,18	3,60	0,06	0,40	9,4	5,6	16,0	0,32	0,15	3,84	0,01	0,35
1201	9,7	6,1	19,7	0,63	0,19	2,37	0,02	0,19	10,0	6,0	16,8	0,43	0,19	2,31	0,01	0,22
Min.	7,9	4,6	11,8	0,30	0,12	1,86	0,00	0,17	8,7	5,1	11,8	0,22	0,12	2,09	0,00	0,17
Max.	11,0	6,6	29,2	0,86	0,55	3,64	0,11	0,41	10,1	6,1	21,3	0,78	0,45	3,84	0,09	0,41
x	9,9	6,0	19,1	0,54	0,23	2,70	0,02	0,28	9,6	5,7	15,9	0,47	0,21	2,87	0,02	0,29
Standardabw.	0,71	0,49	5,0	0,15	0,09	0,45	0,02	0,07	0,41	0,29	2,57	0,14	0,06	0,50	0,02	0,08
<b><i>Bromion racemosi:</i></b>																
Flächencode	Erstes Untersuchungsjahr								Zweites Untersuchungsjahr							
	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %
1	9,2	5,4	13,9	0,43	0,17	1,81	0,03	0,22	9,2	5,4	16,2	0,40	0,19	1,76	0,05	0,23
3	9,4	5,6	15,9	0,38	0,22	1,88	0,04	0,22	9,5	5,6	17,2	0,34	0,20	1,45	0,05	0,21
4	9,2	5,5	14,4	0,53	0,22	2,13	0,07	0,20	10,1	6,0	14,0	0,69	0,26	1,52	0,05	0,21
5	10,0	6,0	13,8	0,65	0,24	1,90	0,23	0,32	9,7	5,8	16,3	0,59	0,23	1,91	0,14	0,27
6	9,6	5,7	15,9	0,54	0,29	2,82	0,04	0,27	9,9	6,0	15,6	0,63	0,34	1,92	0,07	0,28
7	9,1	5,4	17,3	0,55	0,27	2,26	0,09	0,26	9,6	5,7	19,1	0,74	0,28	2,21	0,05	0,26
8	9,7	5,8	19,0	0,39	0,20	2,62	0,08	0,31	9,1	5,4	17,5	0,42	0,20	1,57	0,10	0,29
9	9,4	5,6	17,0	0,44	0,28	2,08	0,02	0,26	9,6	5,7	22,5	0,45	0,31	2,48	0,01	0,33
11	8,5	5,0	17,6	0,65	0,36	2,02	0,06	0,29	9,4	5,6	19,0	0,67	0,42	1,89	0,07	0,29
13	9,6	5,7	18,3	0,33	0,26	1,94	0,03	0,30	9,5	5,6	23,3	0,42	0,33	2,67	0,02	0,33
15	9,3	5,5	16,7	0,52	0,35	1,69	0,03	0,30	10,5	6,4	16,5	0,42	0,25	1,15	0,10	0,25
16	9,5	5,7	16,1	0,20	0,17	0,98	0,02	0,24	9,8	5,8	18,4	0,25	0,21	0,90	0,03	0,19
17	9,5	5,6	16,8	0,41	0,30	1,79	0,02	0,26	10,0	6,0	19,3	0,49	0,25	2,22	0,12	0,25
18	9,8	5,8	14,3	0,40	0,31	1,60	0,28	0,25	9,7	5,8	16,3	0,30	0,23	1,32	0,19	0,26
19	10,3	6,2	13,1	0,43	0,15	2,21	0,01	0,24	10,6	6,4	19,8	0,37	0,17	2,34	0,02	0,28
20	10,7	6,5	15,0	0,48	0,22	1,91	0,09	0,30	9,9	5,9	17,1	0,35	0,20	2,39	0,03	0,25
21	9,6	5,7	16,9	0,38	0,19	2,41	0,04	0,26	10,3	6,2	18,7	0,45	0,22	2,25	0,02	0,28
501	9,6	5,7	15,7	0,58	0,30	1,47	0,11	0,25	9,5	5,6	15,5	0,66	0,27	1,65	0,12	0,26
520	10,9	6,6	23,2	0,57	0,23	2,17	0,03	0,18	9,8	5,8	13,0	0,52	0,24	1,96	0,02	0,20
702	9,6	5,7	24,9	0,43	0,21	1,45	0,10	0,28	8,5	4,9	15,5	0,37	0,20	2,22	0,06	0,30
Min.	8,53	4,96	13,1	0,20	0,15	0,98	0,01	0,18	8,5	4,9	13,0	0,25	0,17	0,90	0,01	0,19
Max.	10,89	6,62	24,9	0,65	0,36	2,82	0,28	0,32	10,6	6,4	23,3	0,74	0,42	2,67	0,19	0,33
x	9,63	5,74	16,8	0,47	0,25	1,96	0,07	0,26	9,7	5,8	17,5	0,48	0,25	1,89	0,07	0,26
Standardabw.	0,53	0,37	2,9	0,11	0,06	0,42	0,07	0,04	0,50	0,3	2,6	0,14	0,06	0,47	0,05	0,04

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung Anhangtab. 10 -

<b>Festuco-Cynosuretum:</b>																
Flächencode	Erstes Untersuchungsjahr								Zweites Untersuchungsjahr							
	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %
103	9,4	5,6	13,1	0,37	0,14	1,90	0,00	0,26	10,0	6,0	19,5	0,37	0,18	2,83	0,01	0,29
104	9,9	5,9	16,6	0,44	0,19	2,86	0,01	0,37	9,0	5,2	20,4	0,36	0,20	3,47	0,02	0,36
107	9,8	5,8	22,4	0,64	0,21	1,45	0,03	0,21	9,4	5,5	15,3	0,59	0,24	1,55	0,03	0,20
114	10,3	6,2	17,8	0,82	0,33	2,04	0,09	0,24	7,6	4,3	15,0	0,60	0,41	1,35	0,12	0,19
304	10,0	6,0	13,7	0,59	0,16	2,28	0,02	0,24	10,0	6,0	12,9	0,66	0,23	1,31	0,09	0,14
305	10,2	6,2	15,5	0,76	0,22	1,53	0,07	0,18	9,8	5,9	13,4	0,64	0,18	2,41	0,02	0,24
403	9,8	5,8	19,2	0,74	0,28	2,37	0,06	0,27	10,2	6,2	15,8	0,61	0,24	2,33	0,04	0,32
509	9,4	5,6	18,8	0,41	0,22	2,27	0,02	0,37	9,0	5,3	17,4	0,37	0,24	3,06	0,01	0,39
513	10,1	6,0	29,5	0,58	0,24	2,80	0,03	0,26	9,9	5,9	15,4	0,49	0,22	2,50	0,01	0,25
602	9,3	5,5	16,2	0,60	0,17	2,02	0,02	0,26	9,9	5,9	15,3	0,41	0,15	2,00	0,01	0,30
603	9,1	5,3	19,8	0,58	0,15	2,02	0,02	0,30	9,9	6,0	16,2	0,61	0,17	2,57	0,00	0,34
604	9,9	5,9	19,6	0,74	0,25	1,62	0,04	0,21	9,6	5,7	14,5	0,63	0,23	1,87	0,04	0,20
609	10,1	6,1	20,3	0,80	0,18	2,28	0,02	0,34	10,2	6,1	18,7	0,54	0,20	3,50	0,03	0,41
703	10,8	6,5	25,0	0,64	0,23	2,81	0,05	0,36	9,2	5,4	12,6	0,35	0,18	2,77	0,02	0,33
712	9,9	5,9	23,6	0,45	0,15	2,04	0,01	0,24	10,3	6,2	16,8	0,53	0,17	2,07	0,02	0,25
715	10,3	6,2	22,4	0,56	0,19	2,11	0,02	0,19	9,6	5,7	15,9	0,61	0,17	2,22	0,01	0,21
717	10,0	6,0	26,8	0,67	0,24	2,51	0,01	0,21	9,1	5,4	14,5	0,60	0,21	2,21	0,01	0,16
905	9,3	5,5	17,6	0,60	0,18	2,02	0,03	0,29	9,1	5,4	14,0	0,40	0,17	2,27	0,02	0,26
906	9,8	5,9	15,2	0,66	0,21	1,79	0,03	0,17	10,1	6,1	14,7	0,70	0,23	2,96	0,07	0,20
1001	9,8	5,9	14,9	0,62	0,14	1,18	0,05	0,20	9,2	5,4	13,3	0,65	0,15	1,25	0,03	0,18
Min.	9,1	5,3	13,1	0,37	0,14	1,18	0,00	0,17	7,6	4,3	12,6	0,35	0,15	1,25	0,00	0,14
Max.	10,8	6,5	29,5	0,82	0,33	2,86	0,09	0,37	10,3	6,2	20,4	0,70	0,41	3,50	0,12	0,41
x	9,8	5,9	19,4	0,61	0,20	2,10	0,03	0,26	9,5	5,7	15,6	0,54	0,21	2,33	0,03	0,26
Standardabw.	0,41	0,28	4,4	0,13	0,05	0,45	0,02	0,06	0,6	0,4	2,1	0,12	0,06	0,66	0,03	0,08

<b>Lolio-Cynosuretum:</b>																
Flächencode	Erstes Untersuchungsjahr								Zweites Untersuchungsjahr							
	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %
101	9,7	5,8	16,9	1,00	0,45	2,30	0,08	0,32	9,3	5,5	18,0	0,92	0,42	2,14	0,06	0,26
301	10,0	6,0	17,1	0,81	0,21	1,82	0,03	0,32	9,9	5,9	14,7	0,68	0,22	1,98	0,06	0,28
406	10,7	6,5	19,2	0,46	0,16	2,42	0,02	0,39	10,2	6,2	14,1	0,35	0,18	2,59	0,00	0,36
407	9,2	5,4	15,8	0,35	0,15	3,22	0,02	0,37	8,6	5,0	19,8	0,22	0,13	2,58	0,00	0,32
505	10,5	6,3	18,6	0,68	0,23	3,01	0,03	0,40	10,2	6,1	18,5	0,49	0,21	3,14	0,01	0,42
506	10,6	6,5	15,9	0,46	0,21	2,65	0,04	0,34	10,4	6,3	16,7	0,46	0,21	3,48	0,02	0,42
601	11,4	7,0	35,9	0,65	0,21	4,27	0,04	0,45	10,7	6,5	17,1	0,44	0,19	3,80	0,02	0,43
605	10,4	6,3	19,0	0,59	0,19	2,30	0,03	0,21	10,3	6,2	14,6	0,58	0,21	2,39	0,06	0,26
608	11,1	6,7	27,8	0,64	0,30	1,92	0,17	0,28	10,7	6,4	17,8	0,59	0,27	2,06	0,22	0,31
706	10,1	6,0	19,7	0,67	0,24	3,71	0,01	0,27	9,7	5,8	14,5	0,76	0,30	3,16	0,03	0,28
801	11,1	6,7	36,2	0,46	0,29	4,33	0,03	0,37	10,2	6,1	16,7	0,47	0,23	3,33	0,04	0,33
808	10,4	6,3	19,8	0,45	0,17	2,76	0,04	0,21	9,9	6,0	17,8	0,44	0,18	2,50	0,13	0,21
901	11,2	6,8	22,7	0,97	0,25	2,05	0,07	0,29	11,2	6,8	17,8	0,99	0,23	1,60	0,08	0,27
902	10,5	6,4	19,4	0,68	0,23	2,72	0,05	0,39	10,0	6,0	17,2	0,63	0,20	2,31	0,10	0,31
903	10,2	6,2	21,2	0,62	0,22	2,59	0,12	0,29	10,7	6,5	17,6	0,82	0,31	1,00	0,17	0,28
904	10,3	6,2	16,4	0,60	0,13	2,97	0,01	0,37	10,3	6,2	16,8	0,68	0,17	3,35	0,04	0,38
907	10,7	6,5	23,1	0,59	0,21	3,37	0,04	0,31	10,3	6,2	19,6	0,39	0,16	2,13	0,02	0,26
913	10,6	6,5	16,8	0,52	0,19	2,49	0,06	0,27	10,2	6,2	14,3	0,43	0,20	2,73	0,02	0,27
1101	10,3	6,2	20,4	0,94	0,23	3,33	0,04	0,38	10,3	6,2	13,6	0,71	0,20	3,52	0,03	0,36
1102	10,2	6,1	18,6	0,60	0,21	3,17	0,05	0,35	8,6	5,1	14,4	0,56	0,17	2,48	0,03	0,29
Min.	9,19	5,43	15,8	0,35	0,13	1,82	0,01	0,21	8,6	5,0	13,6	0,22	0,13	1,00	0,00	0,21
Max.	11,42	6,95	36,2	1,00	0,45	4,33	0,17	0,45	11,2	6,8	19,8	0,99	0,42	3,80	0,22	0,43
x	10,45	6,30	21,0	0,64	0,22	2,87	0,05	0,33	10,1	6,1	16,6	0,58	0,22	2,61	0,06	0,32
Standardabw.	0,52	0,36	5,9	0,18	0,07	0,70	0,04	0,06	0,6	0,5	1,9	0,20	0,07	0,71	0,06	0,06

- Fortsetzung nächste Seite -



- Fortsetzung Anhangtab. 10 -

<b>Polygono-Trisetion:</b>																
Flächencode	Erstes Untersuchungsjahr								Zweites Untersuchungsjahr							
	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %	MJ ME	MJ NEL	XP %	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %
503	9,5	5,6	13,4	0,71	0,24	1,78	0,03	0,20	9,6	5,7	14,9	0,4	0,2	1,9	0,0	0,2
710	10,6	6,4	26,0	0,75	0,29	2,79	0,17	0,25	10,4	6,3	22,8	0,6	0,2	3,5	0,2	0,3
704	10,1	6,0	19,5	0,72	0,26	2,44	0,09	0,23	10,0	6,0	18,0	0,5	0,2	2,7	0,1	0,3
Min.	9,5	5,6	13,4	0,71	0,24	1,78	0,03	0,20	9,6	5,7	14,9	0,43	0,18	1,86	0,02	0,19
Max.	10,6	6,4	26,0	0,75	0,29	2,79	0,17	0,25	10,4	6,3	22,8	0,61	0,24	3,48	0,20	0,29
x	10,1	6,0	19,5	0,72	0,26	2,44	0,09	0,23	10,0	6,0	18,0	0,53	0,22	2,69	0,08	0,25
Standardabw.	0,55	0,38	6,30	0,02	0,03	0,58	0,07	0,03	0,38	0,27	4,17	0,09	0,03	0,81	0,10	0,05

**Anhangtab. 11:** Übersicht über Se-Gehalte des Bodens aller Untersuchungsflächen sowie weiterer bodenchemischer Merkmale (= Status quo – Analyse)

<b>Arrhenatherion elatioris:</b>							
Flächencode	$\mu\text{g Se kg}^{-1}$ in Boden-TS	S % in Boden-TS	N % in Boden-TS	C % in Boden-TS	pH	mg K <sub>2</sub> O 100 g Boden <sup>-1</sup>	mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 100 g Boden <sup>-1</sup>
	105	540	0,07	0,5	5,0	4,6	19,0
106	320	0,04	0,3	2,6	4,8	22,3	8,1
113	560	0,07	0,5	5,0	5,1	16,3	7,1
116	620	0,06	0,4	4,5	5,0	8,7	7,4
119	220	0,05	0,4	3,7	5,6	13,3	7,2
201	200	0,03	0,2	2,3	4,7	15,8	7,2
202	210	0,04	0,3	3,1	4,5	29,1	18,5
303	120	0,04	0,2	2,5	4,4	24,1	11,8
401	300	0,06	0,4	4,2	5,1	16,7	16,7
408	340	0,05	0,4	4,0	5,1	11,8	7,9
504	450	0,05	0,3	3,2	4,3	10,7	16,4
515	350	0,06	0,4	4,4	5,3	31,3	12,5
517	350	0,06	0,4	4,7	5,0	8,1	11,7
606	390	0,09	0,6	5,9	5,5	14,4	8,5
610	480	0,07	0,5	5,2	4,8	18,0	9,8
708	430	0,08	0,5	5,3	5,0	13,2	9,9
713	380	0,07	0,4	4,2	5,5	15,8	7,3
718	430	0,05	0,4	4,3	5,7	23,1	8,3
804	490	0,06	0,5	5,0	5,9	12,3	8,2
1201	530	0,07	0,5	5,1	4,7	9,7	11,9
Min.	120	0,03	0,2	2,3	4,3	8,1	7,1
Max.	620	0,09	0,6	5,9	5,9	31,3	18,5
x	386	0,06	0,4	4,2	5,0	16,7	10,4
Standardabw.	133,3	0,01	0,10	1,02	0,44	6,47	3,45

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung Anhangtab. 11 -

<b>Bromion racemosi:</b>							
Flächencode	$\mu\text{g Se kg}^{-1}$ in Boden-TS	S % in Boden-TS	N % in Boden-TS	C % in Boden-TS	pH	mg K <sub>2</sub> O 100 g Boden <sup>-1</sup>	mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 100 g Boden <sup>-1</sup>
1	614	0,07	0,4	4,5	5,0	10,7	3,8
3	777	0,11	0,6	6,6	5,3	9,6	3,7
4	800	0,09	0,5	4,9	5,9	10,9	1,8
5	621	0,07	0,4	4,3	5,7	10,6	4,8
6	774	0,08	0,5	5,0	5,5	11,0	4,5
7	398	0,07	0,4	4,2	4,7	13,4	1,6
8	600	0,08	0,5	5,5	5,0	9,1	6,7
9	466	0,06	0,5	4,5	5,2	10,6	1,3
11	325	0,05	0,3	3,4	5,4	7,4	1,1
13	365	0,05	0,3	3,7	4,5	14,7	7,7
15	852	0,10	0,6	6,6	4,3	16,1	8,4
16	864	0,12	0,8	6,9	4,2	11,1	3,5
17	722	0,09	0,6	6,8	4,6	15,9	5,2
18	730	0,08	0,6	6,0	4,4	11,4	3,3
19	626	0,06	0,4	3,9	5,3	16,1	1,4
20	505	0,05	0,3	3,0	4,4	18,1	3,0
21	352	0,05	0,3	3,9	4,9	15,5	4,0
501	460	0,06	0,4	4,6	5,0	6,2	6,6
520	570	0,09	0,6	6,2	5,0	8,4	7,3
702	490	0,08	0,5	4,5	4,8	10,0	5,5
Min.	325	0,05	0,3	2,97	4,17	6,17	1,14
Max.	864	0,12	0,8	6,85	5,94	18,10	8,38
x	595	0,08	0,5	4,95	4,96	11,82	4,27
Standardabw.	171,6	0,02	0,1	1,19	0,49	3,26	2,24
<b>Festuco-Cynosuretum:</b>							
Flächencode	$\mu\text{g Se kg}^{-1}$ in Boden-TS	S % in Boden-TS	N % in Boden-TS	C % in Boden-TS	pH	mg K <sub>2</sub> O 100 g Boden <sup>-1</sup>	mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 100 g Boden <sup>-1</sup>
103	840	0,05	0,3	5,1	4,6	17,7	10,9
104	450	0,04	0,3	4,1	4,8	23,1	11,2
107	750	0,06	0,5	4,9	4,8	9,7	8,9
114	450	0,07	0,5	4,6	5,6	6,7	7,3
304	340	0,06	0,5	4,9	4,8	9,6	8,5
305	200	0,04	0,2	2,5	4,5	11,0	8,2
403	310	0,08	0,5	4,6	4,7	13,5	12,6
509	340	0,04	0,3	3,0	4,4	11,6	18,7
513	320	0,05	0,4	4,2	4,6	14,1	8,7
602	350	0,04	0,3	3,5	4,5	9,6	15,3
603	410	0,04	0,3	3,5	4,6	10,6	17,4
604	390	0,05	0,4	4,1	4,6	4,5	6,6
609	320	0,04	0,3	3,3	4,5	12,5	18,2
703	400	0,04	0,4	3,8	4,7	14,7	14,7
712	410	0,05	0,3	3,5	4,9	12,3	8,2
715	430	0,06	0,4	3,9	4,7	9,4	9,3
717	420	0,06	0,5	4,9	4,7	14,1	9,5
905	360	0,03	0,3	2,6	4,4	11,1	11,0
906	460	0,04	0,3	3,5	4,8	7,6	9,8
1001	460	0,09	0,4	4,6	4,6	9,0	11,0
Min.	200	0,03	0,2	2,5	4,4	4,5	6,6
Max.	840	0,09	0,5	5,1	5,6	23,1	18,7
x	421	0,05	0,4	4,0	4,7	11,6	11,3
Standardabw.	143,9	0,02	0,08	0,78	0,26	4,06	3,66

- Fortsetzung nächste Seite -

- Fortsetzung Anhangtab. 11 -

<b><i>Lolio-Cynosuretum:</i></b>							
Flächencode	$\mu\text{g Se kg}^{-1}$ in Boden-TS	S % in Boden-TS	N % in Boden-TS	C % in Boden-TS	pH	mg K <sub>2</sub> O 100 g Boden <sup>-1</sup>	mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 100 g Boden <sup>-1</sup>
101	550	0,05	0,3	3,3	4,8	7,9	8,9
301	470	0,07	0,5	5,2	4,3	20,3	24,5
406	280	0,05	0,4	3,5	4,3	22,1	18,4
407	290	0,05	0,3	3,4	5,1	18,0	22,7
505	260	0,06	0,4	3,7	6,0	39,6	16,7
506	280	0,04	0,3	2,7	5,2	53,8	25,1
601	390	0,06	0,4	3,7	5,3	25,4	10,9
605	450	0,08	0,5	4,7	4,9	9,6	8,1
608	390	0,04	0,3	2,8	5,4	9,1	10,9
706	370	0,04	0,3	3,2	5,2	6,9	10,0
801	310	0,04	0,3	2,8	5,8	13,9	21,8
808	390	0,04	0,3	3,2	4,6	10,9	12,6
901	150	0,03	0,2	1,9	5,0	36,2	12,2
902	130	0,05	0,3	3,4	5,0	13,6	12,1
903	460	0,06	0,4	3,7	5,6	7,0	7,2
904	330	0,06	0,4	4,3	5,6	8,2	6,5
907	250	0,04	0,2	2,7	5,7	4,6	7,0
913	490	0,05	0,4	4,3	5,7	16,8	5,8
1101	350	0,04	0,3	4,6	5,3	7,6	12,4
1102	380	0,05	0,3	3,4	4,5	15,6	10,2
Min.	130	0,03	0,2	1,9	4,3	4,6	5,8
Max.	550	0,08	0,5	5,2	6,0	53,8	25,1
x	349	0,05	0,3	3,5	5,2	17,4	13,2
Standardabw.	108,6	0,01	0,08	0,79	0,49	12,82	6,17
<b><i>Polygono-Trisetion:</i></b>							
Flächencode	$\mu\text{g Se kg}^{-1}$ in Boden-TS	S % in Boden-TS	N % in Boden-TS	C % in Boden-TS	pH	mg K <sub>2</sub> O 100 g Boden <sup>-1</sup>	mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 100 g Boden <sup>-1</sup>
503	470	0,06	0,4	4,5	4,8	6,4	6,2
710	450	0,06	0,4	4,6	5,3	18,5	7,9
704	370	0,05	0,4	3,9	4,7	21,8	7,5
Min.	370	0,05	0,4	3,9	4,7	6,4	6,2
Max.	470	0,06	0,4	4,6	5,3	21,8	7,9
x	430	0,06	0,4	4,3	4,9	15,5	7,2
Standardabw.	52,9	0,01	0,04	0,37	0,31	8,11	0,93

**Anhangtab. 12:** Korrelationen zwischen Se-Konzentration in Primäraufwüchsen zweier Jahre und Bodeneigenschaften in der Status quo-Analyse von 83 Standorten

Bodeneigenschaft	Se-Konzentration erstes Jahr [ $\mu\text{g Se kg}^{-1}$ TS]	Se-Konzentration zweites Jahr [ $\mu\text{g Se kg}^{-1}$ TS]
Se Boden [ $\text{mg kg}^{-1}$ TS]	0,15	0,20
S% in Boden TS	0,08	0,19
N% in Boden TS	-0,02	0,22*
C% in Boden TS	0,02	0,23*
pH	-0,25*	-0,22*
K <sub>2</sub> O Boden [ $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ TS]	-0,09	-0,20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Boden [ $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ TS]	0,07	0,08

**Anhangtab. 13:** Korrelationen zwischen Se-Konzentration und ausgewählten futterbaulichen Eigenschaften in Primäraufwüchsen zweier Jahre in der Status quo-Analyse von 83 Standorten

Futterbauliche Eigenschaft	Se-Konzentration erstes Jahr [ $\mu\text{g Se kg}^{-1}$ TS]	Se-Konzentration zweites Jahr [ $\mu\text{g Se kg}^{-1}$ TS]
MJ ME $\text{kg}^{-1}$ TS	-0,49**	-0,37**
% Rohprotein	-0,23*	-0,03
% Ca in der TS	-0,05	-0,02
% Mg in der TS	0,02	0,29*
% K in der TS	-0,34*	-0,26*
% Na in der TS	-0,01	0,08
% P in der TS	-0,08	-0,03
% S in der TS	0,06	-0,08

**Anhangtab. 14:** TS-Ertrag, Se- und S-Konzentration von Aufwüchsen des Zeitreihenexperiment

Woche	Se-Konzentration $\mu\text{g kg}^{-1}$ TS		Ertrag $\text{dt ha}^{-1}$		S-Konzentration %	
	1999	2000	1999	2000	1999	2000
<b>20</b>	34	22	24	23	0,19	0,21
<b>24</b>	25	40	6	6	0,29	0,31
<b>28</b>	47	67	4	3	0,36	0,37
<b>32</b>	54	73	9	10	0,30	0,27
<b>38</b>	45	78	10	24	0,26	0,25
<b>42</b>	69	94	3	4	0,30	0,42
<b>GD<sub>5%</sub></b>	19,4	16,8	2	1,6	0,039	0,025

**Anhangtab. 15:** Korrelation im Zeitreihenexperiment (n=18)**1999**

	Se-Konzentration	S-Konzentration
S-Konzentration	0,28	-
TS-Ertrag	-0,40	-0,85**

**2000**

	Se-Konzentration	S-Konzentration
S-Konzentration	0,57*	-
TS-Ertrag	-0,32	-0,81**

**Anhangtab. 16:** Se-Konzentration im Aufwuchs von drei unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **ersten Untersuchungsjahr** (= 2002)

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Se-Konzentration im Aufwuchs (µg Se kg <sup>-1</sup> TS)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	10	206	386
	0	40	11	194	408
	80	0	13	108	205
	80	40	10	103	221
<b>B</b>	0	0	29	176	424
	0	40	27	161	471
	80	0	25	193	425
	80	40	24	147	377
<b>C</b>	0	0	25	203	500
	0	40	25	169	505
	80	0	16	179	524
	80	40	15	151	507
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			29,8		

**Anhangtab. 17:** Se-Konzentration im Aufwuchs von drei unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **zweiten Untersuchungsjahr** (= 2003)

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Se-Konzentration im Aufwuchs (µg Se kg <sup>-1</sup> TS)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	20	314	1017
	0	40	12	347	1094
	80	0	14	527	1546
	80	40	10	526	1393
<b>B</b>	0	0	22	454	1252
	0	40	134	484	1883
	80	0	51	829	2144
	80	40	50	815	2042
<b>C</b>	0	0	76	527	1426
	0	40	65	493	1686
	80	0	84	901	2841
	80	40	49	875	2741
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			174,8		

**Anhangtab. 18:** Varianztabelle für die Se-Konzentration ( $\mu\text{g Se kg}^{-1}$  TS) im Se-Applikationsexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		2002	2003
<b>Säule</b>			
Standorttyp A	2	43,09**	512,68**
Standorttyp B	2	942,5**	961,27**
Standorttyp C	2	1142,65**	21821,45**
<b>Block</b>			
Standorttyp A	2	10,05**	3926,91**
Standorttyp B	2	124,83**	5376,72**
Standorttyp C	2	36,34**	28010,44**
<b>Se</b>	2	1427834,36**	27376182,49**
<b>N</b>	1	38636,74**	3131016,60**
<b>Ca</b>	1	1079,88	35633,15
<b>Standorttyp</b>	2	57638,62**	1591335,08**
<b>Se x N</b>	2	10716,93**	1230423,00**
<b>Se x Ca</b>	2	1939,07**	29593,520
<b>N x Ca</b>	1	1832,59*	194078,34**
<b>Se x N x Ca</b>	2	1048,94*	123884,22**
<b>Se x Standorttyp</b>	4	35536,29**	603103,93**
<b>N x Standorttyp</b>	2	19598,25**	274404,38**
<b>Se x N x Standorttyp</b>	4	9242,2**8	175676,29**
<b>Ca x Standorttyp</b>	2	722,81	36648,80*
<b>Se x Ca x Standorttyp</b>	4	149,07	19954,04
<b>N x Ca x Standorttyp</b>	2	1077,61*	27928,44
<b>Se x N x Ca x Standorttyp</b>	4	487,68	13236,14
<b>Fehler</b>	60	332,92	10182,57
<b>Gesamt</b>	107		

Se = Se-Gabe

N = N-Gabe

Ca = Ca-Gabe

**Anhangtab. 19:** TS-Erträge auf drei unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **ersten Untersuchungs**jahr (= 2002)

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	TS-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	16,2	16,5	16,6
	0	40	16,9	18,5	20,1
	80	0	29,0	27,4	28,8
	80	40	28,6	31,2	28,1
<b>B</b>	0	0	16,3	15,2	17,8
	0	40	16,9	17,3	16,0
	80	0	19,7	21,9	22,0
	80	40	22,1	25,2	24,1
<b>C</b>	0	0	23,2	25,7	26,5
	0	40	26,3	28,7	27,9
	80	0	31,0	31,1	28,6
	80	40	33,6	31,4	32,8
GD <sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)			4,15		

**Anhangtab. 20:** TS-Erträge auf drei unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **zweiten Untersuchungs**jahr (= 2003)

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	TS-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	11,6	12,4	13,7
	0	40	10,8	12,9	15,1
	80	0	16,9	13,3	16,7
	80	40	16,5	15,4	17,3
<b>B</b>	0	0	0,7	1,0	1,4
	0	40	1,6	1,3	1,4
	80	0	8,8	11,6	9,6
	80	40	11,5	11,2	11,9
<b>C</b>	0	0	2,4	3,4	2,2
	0	40	3,2	4,4	3,5
	80	0	4,4	3,2	3,9
	80	40	3,5	3,9	2,5
GD <sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)			3,63		



**Anhangtab. 21:** Varianztabelle für die TS-Erträge (dt ha<sup>-1</sup>) im Se-Applikationsexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		2002	2003
<b>Säule</b>			
Standorttyp A	2	5,61**	6,18
Standorttyp B	2	15,06**	**28,50
Standorttyp C	2	20,03**	**26,70
<b>Block</b>			
Standorttyp A	2	0,11	16,13**
Standorttyp B	2	1,92	28,41**
Standorttyp C	2	5,56**	7,41*
<b>Se</b>	2	7,95	3,57
<b>N</b>	1	1496,49**	522,53**
<b>Ca</b>	1	88,23**	9,56
<b>Standorttyp</b>	2	801,58**	1186,02**
<b>Se x N</b>	2	5,11	4,39
<b>Se x Ca</b>	2	2,71	0,27
<b>N x Ca</b>	1	0,89	<0,01
<b>Se x N x Ca</b>	2	0,43	0,26
<b>Se x Standorttyp</b>	4	0,52	7,61
<b>N x Standorttyp</b>	2	106,34**	196,91**
<b>Se x N x Standorttyp</b>	4	10,24	4,78
<b>Ca x Standorttyp</b>	2	2,80	1,29
<b>Se x Ca x Standorttyp</b>	4	4,83	3,27
<b>N x Ca x Standorttyp</b>	2	6,77	4,59
<b>Se x N x Ca x Standorttyp</b>	4	6,64	2,00
<b>Fehler</b>	60	6,46	4,94
<b>Gesamt</b>	107		

Se = Se-Gabe

N = N-Gabe

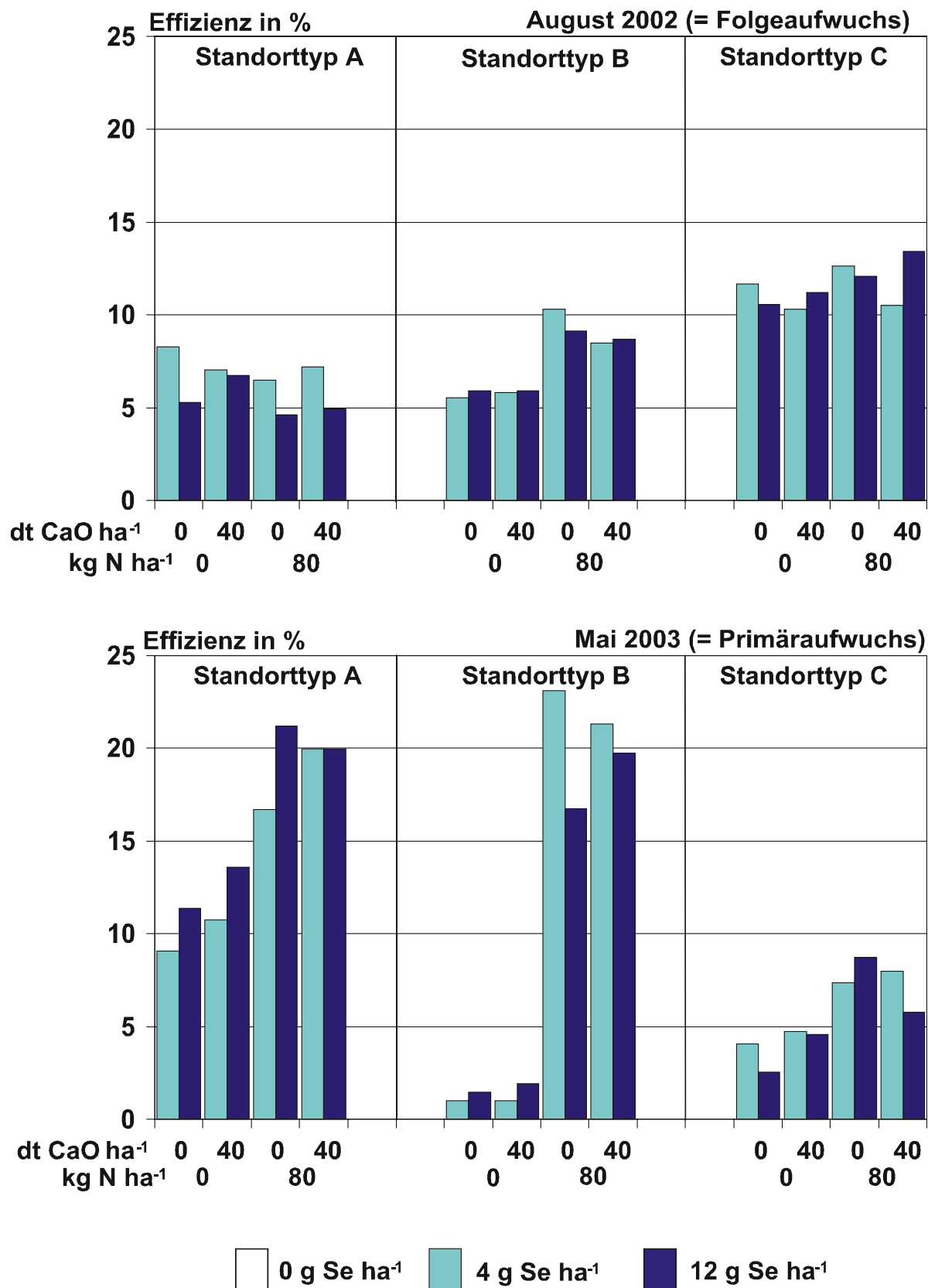
Ca = Ca-Gabe

**Anhangtab. 22:** Se-Entzüge auf drei unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **ersten Untersuchungsjahr** (= 2002)

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Se-Entzug (g Se ha <sup>-1</sup> )		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	<0,1	0,3	0,6
	0	40	<0,1	0,3	0,8
	80	0	<0,1	0,3	0,6
	80	40	<0,1	0,3	0,6
<b>B</b>	0	0	<0,1	0,3	0,8
	0	40	<0,1	0,3	0,8
	80	0	<0,1	0,5	1,1
	80	40	0,1	0,4	1,1
<b>C</b>	0	0	0,1	0,5	1,3
	0	40	0,1	0,5	1,4
	80	0	<0,1	0,6	1,5
	80	40	0,1	0,5	1,7
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			0,11		

**Anhangtab. 23:** Se-Entzüge auf drei unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **zweiten Untersuchungsjahr** (= 2003)

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Se-Entzug (g Se ha <sup>-1</sup> )		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	<0,1	0,4	1,4
	0	40	<0,1	0,4	1,6
	80	0	<0,1	0,7	2,6
	80	40	<0,1	0,8	2,4
<b>B</b>	0	0	<0,1	<0,1	0,2
	0	40	<0,1	0,1	0,3
	80	0	<0,1	1,0	2,1
	80	40	0,1	0,9	2,4
<b>C</b>	0	0	<0,1	0,2	0,3
	0	40	<0,1	0,2	0,6
	80	0	<0,1	0,3	1,1
	80	40	<0,1	0,3	0,7
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			0,40		



Anhangabb. 1 : Effizienz der Se-Gabe in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und Standort

**Anhangtab. 24:** Varianztabelle für die Se-Entzüge (g Se ha<sup>-1</sup>) im Se-Applikationsexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		2002	2003
<b>Säule</b>			
Standorttyp A	2	<0,01	0,03
Standorttyp B	2	<0,01	0,36
Standorttyp C	2	0,03	0,12
<b>Block</b>			
Standorttyp A	2	<0,01	<0,01
Standorttyp B	2	<0,01	0,62
Standorttyp C	2	0,01	0,11
Se	2	8,31**	15,20**
N	1	0,04**	7,85**
Ca	1	0,01	0,03
Standorttyp	2	1,16**	2,71**
Se x N	2	0,01	2,94**
Se x Ca	2	0,02*	0,01
N x Ca	1	<0,01	0,06
Se x N x Ca	2	<0,01	0,04
Se x Standorttyp	4	0,57**	1,49**
N x Standorttyp	2	0,06**	1,46**
Se x N x Standorttyp	4	0,03**	0,46**
Ca x Standorttyp	2	0,01	0,02
Se x Ca x Standorttyp	4	0,01	0,03
N x Ca x Standorttyp	2	<0,01	0,05
Se x N x Ca x Standorttyp	4	<0,01	0,06
Fehler	60	<0,01	0,06
Gesamt	107		

Se = Se-Gabe

N = N-Gabe

Ca = Ca-Gabe

**Anhangtab. 25:** S-Konzentration des Aufwuchses von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **ersten Untersuchungsjahr (= 2002)**

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	S-Konzentration (%)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	0,29	0,30	0,30
	0	40	0,31	0,30	0,27
	80	0	0,25	0,24	0,23
	80	40	0,24	0,23	0,23
<b>B</b>	0	0	0,31	0,34	0,31
	0	40	0,31	0,33	0,26
	80	0	0,27	0,24	0,29
	80	40	0,27	0,26	0,28
<b>C</b>	0	0	0,28	0,28	0,28
	0	40	0,29	0,32	0,30
	80	0	0,24	0,24	0,23
	80	40	0,25	0,26	0,23
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			0,047		

**Anhangtab. 26:** S-Konzentration des Aufwuchses von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **zweiten Untersuchungsjahr (= 2003)**

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	S-Konzentration (%)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	0,28	0,28	0,30
	0	40	0,29	0,29	0,29
	80	0	0,33	0,34	0,31
	80	40	0,30	0,34	0,31
<b>B</b>	0	0	0,32	0,31	0,33
	0	40	0,32	0,32	0,35
	80	0	0,32	0,30	0,30
	80	40	0,29	0,30	0,30
<b>C</b>	0	0	0,31	0,32	0,32
	0	40	0,31	0,35	0,33
	80	0	0,34	0,35	0,34
	80	40	0,35	0,32	0,35
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			0,035		

**Anhangtab. 27:** Varianztabelle für die S-Konzentration (%) im Se-Applikationsexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		2002	2003
<b>Säule</b>			
<b>Standorttyp A</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Standorttyp B</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Standorttyp C</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Block</b>			
<b>Standorttyp A</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Standorttyp B</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Standorttyp C</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Se</b>	2	<0,01	<0,01
<b>N</b>	1	0,06**	0,01*
<b>Ca</b>	1	<0,01	<0,01
<b>Standorttyp</b>	2	0,01**	0,01**
<b>Se x N</b>	2	0,01*	<0,01
<b>Se x Ca</b>	2	<0,01	<0,01
<b>N x Ca</b>	1	<0,01	0,01*
<b>Se x N x Ca</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Se x Standorttyp</b>	4	<0,01	<0,01
<b>N x Standorttyp</b>	2	<0,01	0,01**
<b>Se x N x Standorttyp</b>	4	0,01*	<0,01
<b>Ca x Standorttyp</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Se x Ca x Standorttyp</b>	4	<0,01	<0,01
<b>N x Ca x Standorttyp</b>	2	<0,01	<0,01
<b>Se x N x Ca x Standorttyp</b>	4	<0,01	<0,01
<b>Fehler</b>	60	<0,01	<0,01
<b>Gesamt</b>	107		

Se = Se-Gabe

N = N-Gabe

Ca = Ca-Gabe

**Anhangtab. 28:** Energiedichte des Aufwuchses von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **ersten Untersuchungsjahr** bezogen auf **Umsetzbare Energie (= ME)**

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Energiedichte (MJ ME kg <sup>-1</sup> TS)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
A	0	0	10,1	10,1	10,2
	0	40	10,1	10,0	10,2
	80	0	9,7	9,6	9,8
	80	40	9,7	9,9	10,0
B	0	0	10,4	10,6	10,0
	0	40	10,2	10,2	10,4
	80	0	10,1	9,7	9,7
	80	40	9,8	9,7	9,3
C	0	0	10,0	10,0	9,8
	0	40	10,3	9,7	9,8
	80	0	9,6	9,7	9,5
	80	40	9,6	9,6	9,6
GD <sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)			0,41		

**Anhangtab. 29:** Energiedichte des Aufwuchses von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **zweiten Untersuchungsjahr** bezogen auf **Umsetzbare Energie (= ME)**

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Energiedichte (MJ ME kg <sup>-1</sup> TS)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
A	0	0	10,6	10,7	10,6
	0	40	10,7	10,7	10,8
	80	0	10,4	10,6	10,5
	80	40	10,5	10,6	10,6
B	0	0	11,5	10,9	10,9
	0	40	11,3	11,1	10,9
	80	0	10,8	10,8	10,7
	80	40	10,8	11,1	10,9
C	0	0	10,8	10,9	10,8
	0	40	11,0	10,8	10,7
	80	0	11,0	10,8	10,6
	80	40	10,7	10,7	10,6
GD <sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)			0,40		

**Anhangtab. 30:** Varianztabelle für die Energiedichte (MJ ME kg<sup>-1</sup> TS) im Se-Applikationsexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		2002	2003
<b>Säule</b>			
Standorttyp A	2	0,05	0,03
Standorttyp B	2	0,02	0,04
Standorttyp C	2	0,08	0,02
<b>Block</b>			
Standorttyp A	2	0,03	0,11
Standorttyp B	2	0,02	0,07
Standorttyp C	2	0,06	0,01
Se	2	0,11	0,12
N	1	4,20**	0,83**
Ca	1	0,02	0,03
Standorttyp	2	0,56**	1,27**
Se x N	2	<0,01	0,07
Se x Ca	2	0,04	0,01
N x Ca	1	<0,01	<0,01
Se x N x Ca	2	0,16	0,03
Se x Standorttyp	4	0,20*	0,08
N x Standorttyp	2	0,20*	0,06
Se x N x Standorttyp	4	0,12	0,10
Ca x Standorttyp	2	0,13	0,08
Se x Ca x Standorttyp	4	0,07	0,06
N x Ca x Standorttyp	2	0,05	0,02
Se x N x Ca x Standorttyp	4	0,09	0,02
Fehler	60	0,06	0,06
Gesamt	107		

Se = Se-Gabe

N = N-Gabe

Ca = Ca-Gabe



**Anhangtab. 31:** Energiedichte des Aufwuchses von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **ersten Untersuchungsjahr** bezogen auf **Netto-Energie-Laktation (= NEL)**

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Energiedichte (MJ NEL kg <sup>-1</sup> TS)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
A	0	0	6,0	6,0	6,1
	0	40	6,0	6,0	6,1
	80	0	5,8	5,7	5,8
	80	40	5,8	5,9	6,0
B	0	0	6,2	6,4	6,0
	0	40	6,1	6,1	6,3
	80	0	6,1	5,7	5,8
	80	40	5,8	5,8	5,5
C	0	0	6,0	6,0	5,9
	0	40	6,2	5,7	5,8
	80	0	5,7	5,8	5,6
	80	40	5,7	5,7	5,7
GD <sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)			0,29		

**Anhangtab. 32:** Energiedichte des Aufwuchses von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **zweiten Untersuchungsjahr** bezogen auf **Netto-Energie-Laktation (= NEL)**

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Energiedichte (MJ NEL kg <sup>-1</sup> TS)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
A	0	0	6,4	6,5	6,4
	0	40	6,5	6,5	6,5
	80	0	6,2	6,4	6,3
	80	40	6,3	6,4	6,4
B	0	0	7,0	6,6	6,6
	0	40	6,9	6,8	6,6
	80	0	6,5	6,5	6,4
	80	40	6,5	6,7	6,6
C	0	0	6,5	6,6	6,6
	0	40	6,6	6,5	6,4
	80	0	6,6	6,5	6,4
	80	40	6,5	6,4	6,4
GD <sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)			0,28		

**Anhangtab. 33** : Varianztabelle für die Energiedichte (MJ NEL kg<sup>-1</sup> TS) im Se-Applikationsexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		2002	2003
<b>Säule</b>			
Standorttyp A	2	0,02	0,02
Standorttyp B	2	0,01	0,02
Standorttyp C	2	0,03	0,01
<b>Block</b>			
Standorttyp A	2	0,02	0,05
Standorttyp B	2	0,01	0,04
Standorttyp C	2	0,02	0,01
Se	2	0,06	0,06
N	1	2,11**	0,56**
Ca	1	0,02	0,01
Standorttyp	2	0,24**	0,56**
Se x N	2	<0,01	0,04
Se x Ca	2	0,03	<0,01
N x Ca	1	<0,01	<0,01
Se x N x Ca	2	0,07	0,01
Se x Standorttyp	4	0,09*	0,04
N x Standorttyp	2	0,10*	0,04
Se x N x Standorttyp	4	0,06	0,05
Ca x Standorttyp	2	0,06	0,04
Se x Ca x Standorttyp	4	0,04	0,03
N x Ca x Standorttyp	2	0,03	0,01
Se x N x Ca x Standorttyp	4	0,04	0,01
Fehler	60	0,03	0,03
Gesamt	107		

Se = Se-Gabe

N = N-Gabe

Ca = Ca-Gabe

**Anhangtab. 34:** Rohprotein-Konzentration des Aufwuchses **nach KJELDAHL** von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **ersten Untersuchungsjahr (= 2002)**

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Rohproteinkonzentration (%)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	15,4	14,9	15,1
	0	40	15,2	14,1	15,3
	80	0	18,3	17,7	17,2
	80	40	17,4	17,8	17,9
<b>B</b>	0	0	21,1	21,5	20,3
	0	40	21,1	19,7	19,9
	80	0	21,6	21,3	21,7
	80	40	21,6	21,1	21,7
<b>C</b>	0	0	20,7	20,2	18,9
	0	40	19,6	20,6	20,0
	80	0	22,2	22,9	24,2
	80	40	21,7	22,7	21,4
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			1,81		

**Anhangtab. 35:** Rohprotein-Konzentration des Aufwuchses **nach KJELDAHL** von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **zweiten Untersuchungsjahr (= 2003)**

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Rohproteinkonzentration (%)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	19,5	19,0	20,0
	0	40	19,6	19,2	20,0
	80	0	29,1	30,1	27,4
	80	40	29,8	31,1	28,4
<b>B</b>	0	0	18,5	19,9	18,6
	0	40	18,4	19,0	20,4
	80	0	28,8	28,2	27,5
	80	40	27,5	26,2	27,6
<b>C</b>	0	0	22,0	22,3	21,0
	0	40	23,4	23,7	22,7
	80	0	29,5	31,5	31,1
	80	40	31,9	29,9	32,4
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			1,83		

**Anhangtab. 36** : Varianztabelle für die Rohprotein-Konzentration **nach KJELDAHL** (%) im Se-Applikationsexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		2002	2003
<b>Säule</b>			
<b>Standorttyp A</b>	2	0,03	4,10
<b>Standorttyp B</b>	2	0,12	1,61
<b>Standorttyp C</b>	2	5,09**	19,06**
<b>Block</b>			
<b>Standorttyp A</b>	2	2,95	*7,8
<b>Standorttyp B</b>	2	0,22	1,90
<b>Standorttyp C</b>	2	0,11	0,61
<b>Se</b>	2	0,38	0,63
<b>N</b>	1	114,15**	2155,85**
<b>Ca</b>	1	3,23	4,18
<b>Standorttyp</b>	2	274,22**	109,11**
<b>Se x N</b>	2	1,71	0,77
<b>Se x Ca</b>	2	0,18	3,73
<b>N x Ca</b>	1	0,10	1,20
<b>Se x N x Ca</b>	2	1,48	0,97
<b>Se x Standorttyp</b>	4	1,08	1,10
<b>N x Standorttyp</b>	2	8,59**	4,41*
<b>Se x N x Standorttyp</b>	4	0,99	8,34**
<b>Ca x Standorttyp</b>	2	0,35	5,17*
<b>Se x Ca x Standorttyp</b>	4	1,12	2,07
<b>N x Ca x Standorttyp</b>	2	2,42	2,64
<b>Se x N x Ca x Standorttyp</b>	4	1,84	1,18
<b>Fehler</b>	60	1,23	1,26
<b>Gesamt</b>	107		

Se = Se-Gabe

N = N-Gabe

Ca = Ca-Gabe

**Anhangtab. 37:** Rohprotein-Konzentration des Aufwuchses **nach DUMAS** von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **ersten Untersuchungsjahr** (= 2002)

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Rohproteinkonzentration (%)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	15,6	15,1	15,8
	0	40	15,8	14,9	15,8
	80	0	19,4	18,1	18,5
	80	40	18,0	18,4	19,1
<b>B</b>	0	0	22,1	23,0	21,5
	0	40	22,4	21,3	21,1
	80	0	22,5	22,4	24,2
	80	40	23,1	23,3	23,4
<b>C</b>	0	0	21,6	21,1	19,8
	0	40	20,1	21,5	21,2
	80	0	23,9	24,8	25,9
	80	40	23,7	24,5	22,7
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			2,19		

**Anhangtab. 38:** Rohprotein-Konzentration des Aufwuchses **nach DUMAS** von unterschiedlichen Standorten in Abhängigkeit von N-Gabe, Ca-Gabe und abgestufter Se-Gabe im **zweiten Untersuchungsjahr** (= 2003)

Standorttyp	N-Gabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	Ca-Gabe (dt Ca ha <sup>-1</sup> )	Rohproteinkonzentration (%)		
			0 g Se ha <sup>-1</sup>	4 g Se ha <sup>-1</sup>	12 g Se ha <sup>-1</sup>
<b>A</b>	0	0	20,4	20,2	19,3
	0	40	20,7	20,4	20,9
	80	0	31,2	31,3	28,7
	80	40	32,2	32,5	30,6
<b>B</b>	0	0	19,0	20,4	19,6
	0	40	18,7	19,4	20,8
	80	0	29,3	28,9	28,0
	80	40	28,5	26,7	28,5
<b>C</b>	0	0	22,9	22,9	22,1
	0	40	24,3	24,2	25,1
	80	0	30,7	33,1	32,7
	80	40	33,2	31,5	34,0
<b>GD<sub>5%</sub> (Standorttyp/N- /Ca- /Se-Gabe)</b>			2,06		

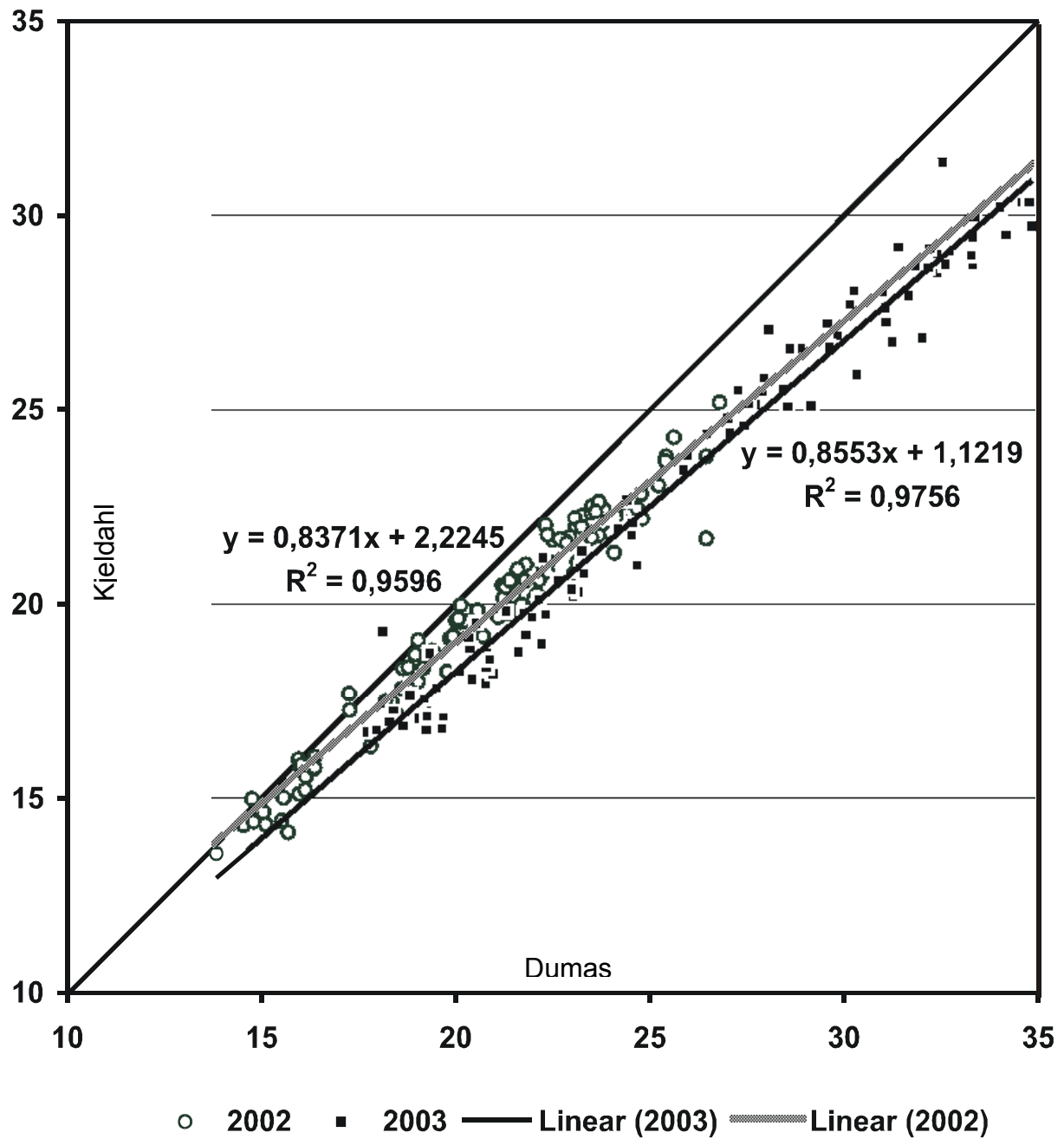
**Anhangtab. 39:** Varianztabelle für die Rohprotein-Konzentration **nach DUMAS (%)** im Se-Applikationsexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		2002	2003
<b>Säule</b>			
<b>Standorttyp A</b>	2	0,05	8,02*
<b>Standorttyp B</b>	2	1,02	0,60
<b>Standorttyp C</b>	2	8,90**	18,48**
<b>Block</b>			
<b>Standorttyp A</b>	2	1,47	9,92*
<b>Standorttyp B</b>	2	0,06	5,41
<b>Standorttyp C</b>	2	0,26	0,75
<b>Se</b>	2	0,06	0,13
<b>N</b>	1	176,24**	2422,81**
<b>Ca</b>	1	2,24	11,43**
<b>Standorttyp</b>	2	363,09**	150,23**
<b>Se x N</b>	2	2,01	1,22
<b>Se x Ca</b>	2	0,21	8,36**
<b>N x Ca</b>	1	0,29	1,24
<b>Se x N x Ca</b>	2	3,08	1,32
<b>Se x Standorttyp</b>	4	1,44	3,91
<b>N x Standorttyp</b>	2	11,53**	11,76**
<b>Se x N x Standorttyp</b>	4	1,12	4,00
<b>Ca x Standorttyp</b>	2	0,66	7,66*
<b>Se x Ca x Standorttyp</b>	4	1,19	1,10
<b>N x Ca x Standorttyp</b>	2	2,75	2,03
<b>Se x N x Ca x Standorttyp</b>	4	3,28	1,03
<b>Fehler</b>	60	1,80	1,59
<b>Gesamt</b>	107		

Se = Se-Gabe

N = N-Gabe

Ca = Ca-Gabe



Anhangabb. 2: Methodenvergleich der Rohprotein-Bestimmung nach DUMAS bzw. nach KJELDAHL

**Anhangtab. 40:** Keimungsraten in % im Versuch „Selen-Anreicherung von Saatgut“

	Grünfilter			Dunkelheit			X
	PF 0	PF 3,0	PF 3,6	PF 0	PF 3,0	PF 3,6	
<b>0 g Se ha<sup>-1</sup></b>	96,7	93,8	98,8	92,5	96,7	92,5	95,1
<b>4 g Se ha<sup>-1</sup></b>	98,3	96,3	95,0	100,0	93,8	92,5	96,0
<b>12 g Se ha<sup>-1</sup></b>	97,5	92,5	93,8	93,8	95,0	90,0	93,8
<b>36 g Se ha<sup>-1</sup></b>	95,0	98,3	60,0	97,5	90,0	91,7	88,8
<b>x</b>	96,88	95,21	86,88	95,94	93,86	91,67	93,4
<b>GD<sub>5%</sub> (Wasserspannung/ Se/ Licht) = 11</b>							

**Anhangtab. 41:** Varianztabelle für die Keimungsraten im Versuch „Selen-Anreicherung von Saatgut“

Varianzursache	FG	MQ/F-Test
Gesamt	96	6248,90
SE-GABE	3	135,64
WASSERSPANNUNG	2	663,58**
LICHT	1	0,47
SE-GABE X WASSERSPANNUNG	6	202,80**
SE-GABE X LICHT	3	167,32
WASSERSPANNUNG X LICHT	2	13,05
SE-GABE X WASSERSPANNUNG X LICHT	6	247,57**
Fehler	72	61,83



**Anhangtab. 42:** Länge des Keimblattes in cm im Versuch „Selen-Anreicherung von Saatgut“

	Grünfilter			Dunkelheit			x
	PF 0	PF 3,0	PF 3,6	PF 0	PF 3,0	PF 3,6	
0 g Se ha <sup>-1</sup>	4,17	4,85	3,18	3,97	3,64	1,66	3,58
4 g Se ha <sup>-1</sup>	4,97	3,56	3,78	4,58	4,01	1,95	3,81
12 g Se ha <sup>-1</sup>	4,48	3,41	2,14	3,32	2,62	0,66	2,77
36 g Se ha <sup>-1</sup>	4,14	3,10	0,31	2,34	1,59	0,35	1,97
x	4,44	3,73	2,35	3,55	2,97	1,16	3,03
<b>GD<sub>5%</sub> (Wasserspannung/ Se/ Licht) = 0,86</b>							

**Anhangtab. 43:** Varianztabelle für die Keimblattlängen in cm im Versuch „Selen-Anreicherung von Saatgut“

Varianzursache	FG	MQ/F-Test
Gesamt	96	11,32
SE-GABE	3	16,74**
WASSERSPANNUNG	2	42,61**
LICHT	1	21,73**
SE-GABE X WASSERSPANNUNG	6	1,15*
SE-GABE X LICHT	3	0,38
WASSERSPANNUNG X LICHT	2	0,41
SE-GABE X WASSERSPANNUNG X LICHT	6	1,81**
Fehler	72	0,38

**Anhangtab. 44:** Länge der Keimwurzel in cm im Versuch „Selen-Anreicherung von Saatgut“

	Grünfilter			Dunkelheit			x
	PF 0	PF 3,0	PF 3,6	PF 0	PF 3,0	PF 3,6	
0g Se ha <sup>-1</sup>	3,92	4,64	3,68	5,26	4,6	3,23	4,22
4g Se ha <sup>-1</sup>	4,47	3,49	3,49	5,72	4,87	2,7	4,12
12g Se ha <sup>-1</sup>	2,89	2,14	1,79	3,29	2,89	1,39	2,4
36g Se ha <sup>-1</sup>	1,27	0,95	0,65	1,65	1,18	0,79	1,08
x	3,14	2,81	2,40	3,98	3,39	2,03	2,96
<b>GD<sub>5%</sub> (Wasserspannung /Se /Licht) = 0,78</b>							

**Anhangtab. 45:** Varianztabelle für die Keimwurzellängen im Versuch „Selen-Anreicherung von Saatgut“

Varianzursache	FG	MQ/F-Test
Gesamt	96	11,18
SE-GABE	3	54,27**
WASSERSPANNUNG	2	14,94**
LICHT	1	2,94**
SE-GABE X WASSERSPANNUNG	6	0,77*
SE-GABE X LICHT	3	0,19
WASSERSPANNUNG X LICHT	2	3,28**
SE-GABE X WASSERSPANNUNG X LICHT	6	0,73*
Fehler	72	0,31

**Anhangtab. 46:** TS-Erträge (g Gefäß<sup>-1</sup>) von *Lolium perenne* im Versuch „Selen-Anreicherung von Saatgut“ – 12 Wochen nach der Selenatbehandlung

Wiederholung	0 g Se ha <sup>-1</sup>	4g Se ha <sup>-1</sup>	12g Se ha <sup>-1</sup>	36g Se ha <sup>-1</sup>	x
1	4,4	4,5	3,2	4,2	4,1
2	3,6	3,9	3,6	4,1	3,8
3	3,8	3,4	4,4	4,0	3,9
x	3,9	3,9	3,7	4,1	3,9

**Anhangtab. 47:** Varianztabelle für die TS-Erträge (g Gefäß<sup>-1</sup>) im Versuch „Selen-Anreicherung von Saatgut“

Varianzursache	FG	MQ/F-Test
Gesamt	11	0,17
Se-Gabe	3	0,07
Fehler	8	0,22

**Anhangtab. 48:** Se- und S- Konzentrationen im Versuch „Selen-Zusätze zum Siliergut“ (= Silierexperiment)

Aufwuchs	TS-Gehalt	Se-Gabe µg Se kg <sup>-1</sup> TS	Se in Silage µg Se kg <sup>-1</sup> TS	S in Silage %	N/S-Quotient
Primäraufwuchs <i>Festuca arundinacea</i>	30 %	0	25	0,34	9,6
		75	110	0,34	9,7
		150	181	0,34	9,7
		300	356	0,34	9,7
		1200	1170	0,35	9,5
	40 %	0	20	0,33	9,9
		75	109	0,34	9,7
		150	178	0,34	9,7
		300	350	0,34	9,6
		1200	1163	0,34	9,9
Sekundäraufwuchs <i>Loium perenne</i>	30 %	0	44	0,34	8,7
		75	130	0,30	9,7
		150	212	0,30	9,7
		300	368	0,29	10,0
		1200	1187	0,29	10,0
	40 %	0	43	0,36	8,4
		75	136	0,29	10,1
		150	214	0,30	9,7
		300	359	0,29	10,1
		1200	1120	0,29	10,1
GD <sub>5</sub> % (Se-Gabe /Vorwelkegr. /Aufw.)			33,4	0,019	

**Anhangtab. 49:** Varianztabelle für die Se- und S- Konzentration im Silierexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test	
		Se $\mu\text{g kg}^{-1}$ TS	S %
Vorwelkegrad	1	1725,62	<0,001
Se-Gabe	4	3320471,96**	0,002**
Aufwuchs	1	4663,08**	0,028**
Vorwelkegrad x Se-Gabe	4	1041,49	<0,001
Vorwelkegrad x Aufwuchs	1	391,66	<0,001
Se-Gabe x Aufwuchs	4	1236,28	0,004**
Vorwelkegrad x Se-Gabe x Aufwuchs	4	818,35	<0,001
Fehler	60	557,84	<0,001
Gesamt	80		

**Anhangtab. 50:** pH-Wert, Milchsäure- und Essigsäure-Konzentration im Versuch „Selen-Zusätze zum Siliergut“ (= Silierexperiment)

Aufwuchs	TS-Gehalt	Se-Gabe $\mu\text{g Se kg}^{-1}$ TS	pH	Milchsäure %	Essigsäure %
Primäraufwuchs <i>Festuca arundinacea</i>	30 %	0	4,7	5,9	1,8
		75	4,7	6,1	2,0
		150	4,7	5,8	1,9
		300	4,6	5,7	1,7
		1200	4,7	5,7	1,8
	40 %	0	5,0	3,5	1,3
		75	5,0	3,6	1,4
		150	5,0	3,6	1,4
		300	5,0	3,5	1,4
		1200	5,0	3,7	1,3
Sekundäraufwuchs <i>Lolium perenne</i>	30 %	0	4,4	9,8	1,6
		75	4,4	9,5	1,7
		150	4,4	9,7	1,8
		300	4,4	9,5	1,6
		1200	4,4	9,9	1,7
	40 %	0	4,6	7,7	1,4
		75	4,7	7,9	1,4
		150	4,7	7,7	1,5
		300	4,7	7,8	1,4
		1200	4,7	8,1	1,3
GD <sub>5</sub> % (Se-Gabe /Vorwelkegr. /Aufw.)			0,1	0,49	0,19

**Anhangtab. 51:** Varianztabelle für die Größen pH-Wert, Milchsäure- und Essigsäure-Konzentration im Silierexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test		
		pH	Milchsäure %	Essigsäure %
Vorwelkegrad	1	1,80**	82,01**	2,64**
Se-Gabe	4	< 0,01	0,09	0,03
Aufwuchs	1	1,65**	329,96**	0,08*
Vorwelkegrad x Se-Gabe	4	< 0,01	0,08	0,03
Vorwelkegrad x Aufwuchs	1	0,01*	0,98**	0,18**
Se-Gabe x Aufwuchs	4	0,01**	0,09	< 0,01
Vorwelkegrad x Se-Gabe x Aufwuchs	4	< 0,01	0,08	< 0,01
Fehler	60	< 0,01	0,12	< 0,01
Gesamt	80			

**Anhangtab. 52:** Buttersäure-Konzentration sowie Capron-, Propion- und Valeriansäurekonzentration im Versuch „Selen-Zusätze zum Siliergut“ (= Silierexperiment)

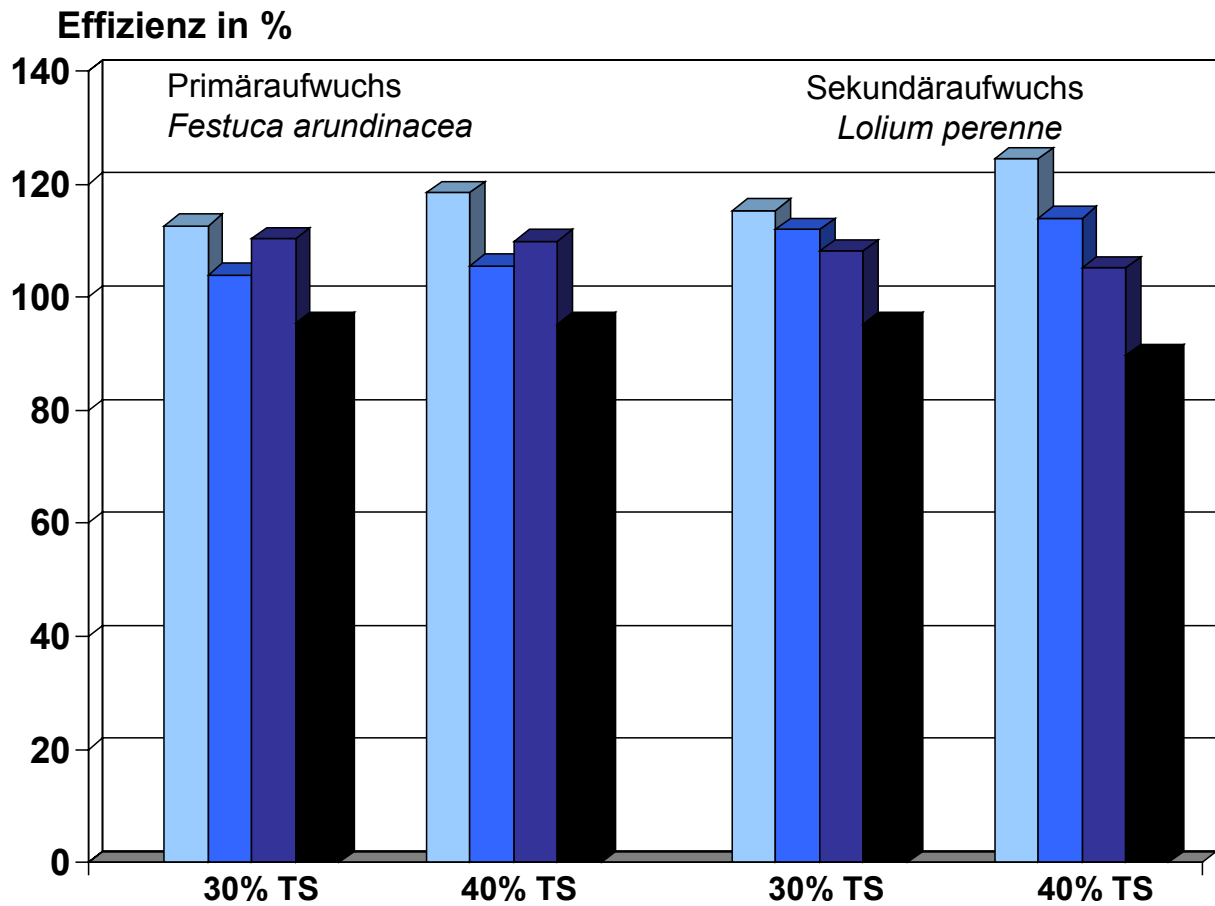
Aufwuchs	TS-Gehalt	Se-Gabe µg Se kg <sup>-1</sup> TS	Buttersäure %	Capronsäure %	Propionsäure %	Valeriansäure %
Primäraufwuchs <i>Festuca arundinacea</i>	30 %	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		75	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		150	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		300	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		1200	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	40 %	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		75	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		150	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		300	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		1200	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Sekundäraufwuchs <i>Lolium perenne</i>	30 %	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		75	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		150	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		300	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		1200	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	40 %	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		75	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		150	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		300	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
		1200	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

**Anhangtab. 53:** Ethanol-Konzentration, NH<sub>3</sub>-N-Anteil am Gesamt-N und Aerostabilität im Versuch „Selen-Zusätze zum Siliergut“ (= Silierexperiment)

Aufwuchs	TS-Gehalt	Se-Gabe µg Se kg <sup>-1</sup> TS	Ethanol %	NH <sub>3</sub> -N am Rohprotein-N %	Aerostabilität Tage
Primäraufwuchs <i>Festuca arundinacea</i>	30 %	0	0,4	7,4	4,1
		75	0,5	6,9	4,4
		150	0,5	4,9	3,9
		300	0,6	4,8	4,1
		1200	0,5	6,9	4,1
	40 %	0	0,3	4,4	4,6
		75	0,3	4,9	4,6
		150	0,3	7,2	4,3
		300	0,3	6,0	5,1
		1200	0,4	5,1	5,3
Sekundäraufwuchs <i>Loium perenne</i>	30 %	0	0,4	6,6	4,6
		75	0,3	6,0	5,0
		150	0,3	4,5	5,4
		300	0,3	6,6	6,2
		1200	0,3	5,9	6,3
	40 %	0	0,3	5,5	7,3
		75	0,3	5,2	6,2
		150	0,3	6,2	6,6
		300	0,3	8,5	7,4
		1200	0,3	6,6	6,7
GD <sub>5</sub> % (Se-Gabe /Vorwelkegr. /Aufw.)			0,08	1,20	0,58

**Anhangtab. 54:** Varianztabelle für die Größen Ethanol-Konzentration, NH<sub>3</sub>-N-Anteil am Rohprotein-N und Aerostabilität im Silierexperiment

Varianzursache	FG	MQ/F-Test		
		Ethanol %	NH <sub>3</sub> -N am Rohprotein-N %	Aerostabilität d
Vorwelkegrad	1	0,28**	0,17	20,72**
Se-Gabe	4	< 0,01	1,49	1,48**
Aufwuchs	1	0,31**	1,88	58,16**
Vorwelkegrad x Se-Gabe	4	< 0,01	12,80**	0,52*
Vorwelkegrad x Aufwuchs	1	0,11**	6,29**	2,26**
Se-Gabe x Aufwuchs	4	< 0,01	4,81**	0,75**
Vorwelkegrad x Se-Gabe x Aufwuchs	4	0,02**	1,43	1,18**
Fehler	60	< 0,01	0,72	0,17
Gesamt	80			



**Anhangabb. 3:** Effizienz der Se-Anreicherung von Siliergut – gemessen am Verhältnis der theoretischen zur gemessenen Se-Konzentrationserhöhung

## **Danksagung**

Mein Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung. Die Übernahme der Kosten für die Se, C-, N- und S-Analysen wurde im DFG-Normalverfahren beantragt und bewilligt. Die Mehrzahl der Boden- und Pflanzenproben der Status quo-Analyse wurden im Rahmen der ersten Phase des Sonderforschungsbereiches 299 – Landnutzungskonzepte für periphere Regionen – im Teilprojekt C 1.1 genommen und standen somit für die hier bearbeiteten weitergehenden Fragestellungen zur Verfügung. Im Rahmen des Teilprojektes (= Bearbeiter Dr. Maik Sterzenbach) im SFB 299 gewonnene Daten zu Lage, Vegetation, Bodenart und Witterung wurden ebenfalls übernommen.

Persönlich sei gedankt:

Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. W. Opitz von Boberfeld für die Impulse bei der Auswahl des Themas, die jederzeit gewährte Unterstützung und Aufmerksamkeit sowie die wertvollen Ratschläge während der Anfertigung der Arbeit;

Herrn Prof. Dr. med. vet. K. Doll und Prof. Dr. K. Richter für die freundliche Übernahme der Begutachtung;

meinen Kollegen und Freunden Dr. Katja Banzhaf, Dr. Silke Echternacht, Katja Elsebach, Dr. Christine Knödler, Markus Kräling, Edwin Mandler, Przemyslaw Mazur, Michaela Neff, Judith Oerlemans, Gerhard Schlimbach, Udo Schnepf, Dr. Maik Sterzenbach, Dr. Peter Theobald, Dr. Daniel Wolf, Dr. Christina Ziron für das konstruktive Arbeitsklima und die Diskussionsbereitschaft; allen Mitarbeitern der Versuchsstation Linden-Forst und des Labors für die tatkräftige Unterstützung, hier im Besonderen Frau A. Langer für das Korrekturlesen und Herrn G. Kraft für die technische Unterstützung; Frau M. Neff für die Durchführung und Bearbeitung der Keimexperimente; Herrn J. Lux als Garant für eine erfolgreiche Se-Analytik; Frau Dr. G. Köllensperger und Herrn Dr. N. Jakubowski für die Realisation der Se-Spezies-Analyse; allen beteiligten Landwirten für die Überlassung der Versuchsflächen, hier vor allem den Herrn Pfeiffer und Velten;

meiner Lebenspartnerin Dr. Katrin Wöhler für die hilfreiche kritische Durchsicht der Arbeit und die bewundernswerte Geduld sowie meiner Tochter Janna Marie.