

Naturbelassene  
biogene  
Festbrennstoffe -  
umweltrelevante Eigenschaften  
und Einflussmöglichkeiten



Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für  
Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)  
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München  
Internet: <http://www.bayern.de/stmlu>  
E-Mail: [poststelle@stmlu.bayern.de](mailto:poststelle@stmlu.bayern.de)  
- September 2000 -

© StMLU, alle Rechte vorbehalten

#### Vorbemerkungen:

In der Reihe "Materialien" des StMLU erscheinen Dokumentationen, Studien, Untersuchungen, Gutachten und sonstige fachliche Ausarbeitungen der Abteilungen des StMLU, die einen breiteren Kreis von Bearbeitern vorwiegend im Geschäftsbereich und außerhalb des Geschäftsbereichs nur in sehr begrenzten Fällen auch direkt vom jeweiligen Thema Betroffenen sowie den an der Erarbeitung Beteiligten als Arbeitsmaterial zur Kenntnis gebracht werden sollen. Die Auflage ist daher sehr gering. Außenstehende Interessierte können in der Bibliothek des StMLU oder bei der fachlich zuständigen Abteilung des StMLU Einsicht nehmen.

Die in den "Materialien" vertretenen Anschauungen und Gesichtspunkte sind Meinungen des oder der Verfasser und werden in der Regel nicht aufgrund ihrer Darstellung in dieser Reihe vom StMLU vertreten.

Die Verteilung der aufgrund finanzieller oder materieller Beteiligung an der Herstellung als Gegenleistung an Personen oder Institutionen abgegebenen Exemplare liegt nicht in der Verantwortung des StMLU.

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier  
Umschlag aus Recyclingkarton



**Institut und Bayerische Landesanstalt für Landtechnik  
der Technischen Universität München - Weihenstephan**  
(Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. (AE) H. Schön)

Abschlussbericht:

**Naturbelassene biogene Festbrennstoffe –  
umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten**

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, im Auftrag des  
Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung  
und Umweltfragen, München

Autoren Dr. Hans Hartmann  
Thorsten Böhm (Dipl.-Ing. agr.)  
Leonhard Maier, Dipl.-Ing. agr. (FH)

Bayerische Landesanstalt für Landtechnik  
Abt. Technologie Nachwachsender Rohstoffe (Dr. A. Strehler)  
Arbeitsgruppe Festbrennstoffe (Dr. Hans Hartmann)  
Vöttinger Straße 36, D-85354 Freising-Weihenstephan, Germany  
Tel. 08161-71-3303, Fax.: 08161-71-4048  
Internet: <http://www.tec.agrar.tu-muenchen.de>

September 2000

## Danksagung

Das Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStLU) finanziell gefördert und im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU) durchgeführt. Für das uns entgegengebrachte Vertrauen möchten wir uns an dieser Stelle bedanken.

Im Projektverlauf wurde die vorliegende Arbeit vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz auch aktiv unterstützt. Diese Unterstützung bezog sich vor allem auf die Datenbank, die unter Mitarbeit von Dr. Stefan Huber, Referat "Energie, Steine/Erden und Metalle" (Leiter Dipl.-Ing. Konrad Mair) konzipiert wurde und vom Referat "Fachanwendungen, Fachsysteme, Datenmanagement" (Leiter Dr. Jürgen Brand) EDV-technisch umgesetzt wurde. Außerdem beteiligte sich das Referat "Zentrallabors" (Leiter Dr. Werner Reifenhäuser) an der Laborvergleichsuntersuchung. Alle gemeinsamen Aktivitäten wurden von Herrn Dipl.-Phys. Hans Frieß (Kordinator Projektgruppe "Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe") koordiniert. Dafür möchten wir an dieser Stelle allen Beteiligten unseren herzlichen Dank aussprechen.

Auch bei der Gewinnung geeigneter Pflanzenproben wurden wir in einem hohen Maß unterstützt. Hier möchten wir uns vor allem beim Institut für Pflanzenbau und Grünland der Universität Hohenheim (Dr. Iris Lewandowski) für die wertvolle Hilfe bei der Gewinnung der Getreide- und Feldgrasproben bedanken. Dank gilt auch der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau in Freising (Dr. Wolfram Münzer und Mitarbeiter) für die Hilfe bei der Gewinnung vieler weiterer Pflanzenproben.

Im Rahmen der Befragung und Recherche nach Analysedaten für die Datenbank haben sich viele Einrichtungen, Firmen und Institutionen mit eigenen Daten bzw. mit sachdienlichen Hinweisen beteiligt. Auch hierfür möchten wir uns bedanken.

Die Autoren

# Inhaltsverzeichnis

Seite:

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und bisheriger Wissensstand</b> .....	<b>4</b>
	2.1 Systematik der biogenen Festbrennstoffe.....	4
	2.2 Qualitätsmerkmale und ihre Bedeutung.....	5
	2.3 Einflussmöglichkeiten .....	14
	2.3.1 Einflüsse während der Wachstumsphase.....	14
	2.3.2 Einflüsse während der Bereitstellungsphase.....	24
<b>3</b>	<b>Eintragungspfade für Schadstoffe</b> .....	<b>31</b>
	3.1 Einträge über Düngemittel .....	31
	3.1.1 Mineraldünger .....	32
	3.1.2 Klärschlamm .....	34
	3.1.3 Kompost.....	35
	3.2 Einträge über Pflanzenschutzmittel.....	36
	3.3 Einträge über trockene und feuchte Depositionen .....	37
	3.4 Quantitativer Vergleich der Einträge .....	38
<b>4</b>	<b>Feldversuche</b> .....	<b>41</b>
	4.1 Vorgehen und Methodik.....	41
	4.1.1 Versuchsplan und Probenherkunft .....	41
	4.1.2 Ringversuch mit Brennstoff- und Ascheproben .....	47
	4.1.3 Analysenmethodik.....	52
	4.1.3.1 Probenahme und Analysenvorbereitung .....	52
	4.1.3.2 Analysendurchführung .....	53
	4.2 Ergebnisse.....	57
	4.2.1 Einfluss des Erntetermins .....	57
	4.2.1.1 Kurzumtriebsplantagen .....	57
	4.2.1.2 Triticale.....	61
	4.2.1.3 Feldgras (Rohrschwengel) .....	68
	4.2.1.4 Landschaftspflegeheu .....	70
	4.2.2 Einfluss der Feldverweilzeit .....	74
	4.2.2.1 Weizenstroh .....	74
	4.2.2.2 Weizenganzpflanzen (Stroh und Körner).....	76
	4.2.2.3 Landschaftspflegeheu .....	81
	4.2.3 Einfluss der Kaliumdüngung .....	82
	4.2.3.1 Triticale.....	82
	4.2.3.2 Feldgras (Rohrschwengel) .....	86
	4.2.4 Analyse weiterer Biomassen (generelle Einordnung).....	88
	4.2.5 Schwermetallgehalte in den ausgewählten Brennstoffproben .....	92
<b>5</b>	<b>Brennstoffdatenbank</b> .....	<b>96</b>

5.1 Errichtung einer Datenbankstruktur .....	96
5.2 Recherche von Eingabedaten.....	98
5.3 Datenbankabfragen .....	99
5.3.1 Durchführung und Auswertung .....	99
5.3.2 Ergebnisse .....	100
<b>6 Bewertung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>114</b>
6.1 Qualitätsverbessernde Maßnahmen .....	114
6.1.1 Erzielbare Effekte.....	114
6.1.2 Mehrkosten für Qualitätsverbesserungen.....	116
6.1.3 Schlussfolgerungen .....	119
6.2 Brennstoffvergleich .....	120
<b>7 Zusammenfassung .....</b>	<b>122</b>
<b>8 Summary .....</b>	<b>126</b>
<b>9 Quellenverzeichnis .....</b>	<b>131</b>
<b>Anhang A</b> Schadstoffe in Dünge- und Pflanzenschutzmitteln und Depositionen .....	137

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Die Technik der Energieumwandlung und die dabei geltenden Umweltstandards befinden sich in ständiger Weiterentwicklung. Um diesen Veränderungen Rechnung zu tragen, ist es erforderlich, dass die verwendeten Brennstoffe in möglichst hoher und einheitlicher Qualität bereitgestellt werden. Auch wenn Holz- und halmgutartige Brennstoffe zu den ressourcenschonenden erneuerbaren Energieträgern mit einem geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf zählen, kann deren Einsatz mit einer Reihe von Risiken verbunden sein, durch die die ökologische Unbedenklichkeit gelegentlich in Frage gestellt wird. Der Sicherstellung und Beeinflussung von Qualitätsmerkmalen kommt daher auch bei den biogenen Festbrennstoffen zukünftig eine steigende Bedeutung zu.

Die Ursachen, die zu Qualitätsveränderungen führen, sind jedoch sehr komplex, so dass quantitative Aussagen über die Wirksamkeit möglicher Maßnahmen bislang nur sehr begrenzt möglich sind. Hinzu kommt, dass eine ganze Reihe externer Einflüsse nicht oder nur langfristig beeinflussbar sind, so dass eine große Schwankungsbreite bei den Qualitätsmerkmalen unvermeidlich scheint. Insbesondere der uneinheitliche Gehalt an emissionsrelevanten Inhaltsstoffen ist dafür verantwortlich, dass die Höhe des Ausstoßes bestimmter Schadstoffe (z. B. Chlor, Schwefel, Asche, Schwermetalle, etc.) nur schwer auf einem einheitlichen Niveau festzuschreiben ist. Dennoch bestehen eine Reihe von Möglichkeiten zur Beeinflussung der kritischen Brennstoffeigenschaften. Zu diesen Einflussgrößen zählen unter anderem:

- Brennstoffart und Sortenwahl (spezifisches Aufnahmevermögen)
- Brennstoffherkunft (pedogene und atmosphärische Schadstoffeinträge)
- Wahl des Erntezeitpunkts und Alter der Kultur
- Art und Höhe der Düngung (inkl. Klärschlamm oder Gülle)
- Art und Höhe des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln
- ackerbauliche und forstbauliche Praktiken

Sie wirken sich vor allem auf primäre Brennstoffmerkmale (Inhaltsstoffe und chemische Eigenschaften) aus. Daneben bestehen auch Möglichkeiten zur Veränderung oder Anpassung der äußerlichen Brennstoffmerkmale wie z. B. die Schüttdichte, Teilchengrößen oder das Hohlraumvolumen. Auch diese „sekundären“ Brennstoffmerkmale können sich auf die Verbrennungsqualität auswirken und sind somit indirekt ebenfalls emissionsrelevant. Der Spielraum für Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung oder zur Einhaltung bestimmter Zielvorgaben ist bei solchen physikalischen Eigenschaften allerdings viel größer, als bei den meisten chemisch-stofflichen Merkmalen, da sich hierbei technologische Verfahren anwenden lassen, deren Wirkung und Funktion kontrollierbar ist. Die physika-

lischen Merkmale werden beispielsweise vom Ernteverfahren und von der Art und Intensität der Aufbereitung geprägt.

Aus Sicht des Immissionsschutzes sind vor allem die Gehalte an Chlor, Stickstoff, Schwefel und Asche interessant, da diese an der Bildung von Schadstoffen wie toxische Chlorverbindungen,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  oder Staub beteiligt sind. Daneben ist der Gehalt an Schwermetallen zu betrachten. Diese führen ebenfalls zu Schadstoffemissionen im Rauchgas, sie sind aber auch im Hinblick auf die Entsorgung bzw. Verwertung der Brennstoffaschen von Bedeutung. Die Chancen für eine landwirtschaftliche Nutzung dieser Aschen werden auch durch den Gehalt an Pflanzennährstoffen beeinflusst. Hierzu zählen vor allem Kalium, Phosphor, Kalzium und Magnesium. Kalium und Kalzium sind jedoch nicht nur wertgebende Inhaltsstoffe. Sie beeinflussen auch in unterschiedlicher Weise die Einbindung von Chlor in die Asche. Diese Einbindung wirkt sich wiederum auf den Schadstoffausstoß im Abgas aus.

Für viele Brennstoffe ist die Schwankungsbreite der wesentlichen kritischen Elementgehalte teilweise bekannt. Unklarheit herrscht allerdings bei den möglichen Ursachen für diese Schwankungen. Das liegt daran, dass die verfügbaren Brennstoffanalysen meist an zufällig ausgewählten Proben durchgeführt wurden. Für eine Beurteilung von Einflussgrößen wäre jedoch ein gezielter methodischer Ansatz erforderlich, der bislang nur selten zugrunde gelegt wurde. Kenntnisdefizite bestehen demzufolge bei der quantitativen Bewertung möglicher Maßnahmen zur Sicherstellung bestimmter Qualitäten.

**Zielsetzung.** Ziel der Arbeiten ist die umfassende Analyse aller wesentlichen Aspekte, die die umweltrelevanten Brennstoffqualitätsmerkmale betreffen. Hierzu zählen im wesentlichen die im Brennstoff enthaltenen kritischen Elemente und Verbindungen, die hier unter den „chemisch-stofflichen“ Brennstoffeigenschaften zusammengefasst werden (vgl. Kap. 2.2). Die Eintragswege und -mengen dieser Inhaltsstoffe sollen dargestellt werden. Daneben sind die möglichen Bandbreiten der Konzentrationen im Brennstoff aufzuzeigen. Durch Analyse einer Vielzahl ausgewählter Brennstoffproben, die unter speziellen Gesichtspunkten in Feldversuchen gewonnen werden, sollen die Ursachen für Qualitätsunterschiede identifiziert werden. Diese Unterschiede sind zu quantifizieren, um geeignete Möglichkeiten zu ihrer Beeinflussung aufzuzeigen. Das betrifft vor allem die Brennstoffe, die speziell in der Landwirtschaft erzeugt werden (z. B. Getreideganzpflanzen, Wiesenheu, Stroh, Kurzumtriebsplantagen), da hier ein gewisser Spielraum bei den pflanzenbaulichen Maßnahmen besteht (z. B. Düngungspraxis, Erntetermin, Feldverweildauer). Die Ergebnisse sind schließlich als Grundlage für Überlegungen über mögliche Maßnahmen zur Sicherstellung bestimmter Qualitätsanforderungen zu diskutieren.

Als weiteres Projektziel soll ein umfassender Katalog der chemisch-stofflichen Brennstoffeigenschaften aus Primärdaten, Literaturangaben und repräsentativen Brennstoffanalysen erstellt und in Form einer Datenbank verfügbar gemacht werden. Diese Daten-



bank kann als Grundlage für die Bewertung möglicher Umweltrisiken dienen, die mit der Verwendung der verschiedenen biogenen Festbrennstoffe verbunden sind. Darüber hinaus kann sie bei der Auslegung, Planung und Optimierung von Energiesystemen für biogene Festbrennstoffe auch in der Praxis von Nutzen sein.

Physikalische Brennstoffeigenschaften (wie z. B. Dichte, Zerkleinerungsgrad, etc.) werden hier nicht in die Untersuchung einbezogen, da ihre emissionsbezogenen Auswirkungen nicht losgelöst von den jeweils verwendeten Verbrennungs- bzw. Vergasungstechniken bewertet werden können. Ebenfalls unbeachtet bleiben die nicht-naturbelassenen biogenen Festbrennstoffe wie Alt- oder Recyclingholz, da diese hinsichtlich ihrer Verwendungsmöglichkeiten besonderen genehmigungsrechtlichen Bedingungen unterliegen.

## 2 Grundlagen und bisheriger Wissensstand

### 2.1 Systematik der biogenen Festbrennstoffe

Bei den biogenen Rohstoffen für die energetische Nutzung wird im wesentlichen zwischen holz- und halmgutartigen Brennstoffen unterschieden. Sie fallen entweder als Rückstände bei der Primärproduktion bzw. bei industriellen Verarbeitungsschritten an oder werden als speziell angebaute Energiepflanzen erzeugt. In Abb. 1 wird eine vereinfachte Systematik der festen biogenen Energieträger dargestellt.

Streng genommen ist der Begriff "Holz" definiert als die entrindeten Stämme, Wurzeln und Äste der Bäume und Sträucher. Zu diesen zählen die Nadelhölzer („Koniferen“), die Laubhölzer (dikotyle Hölzer) sowie die Palmen und Baumgräser (monokotyle Hölzer) [51]. Bei den biogenen Festbrennstoffen ist allerdings die anhaftende Rinde Teil des naturbelassenen Brennstoffs. Eine Unterscheidung ist erst möglich, wenn diese in einem speziellen Verfahrensschritt separat anfällt und als Reststoff verwertet werden kann. Während Holz grundsätzlich aus mehrjährig wachsenden Pflanzenteilen besteht, werden Halmgutbrennstoffe aus dem saisonalen, maximal einjährigen Aufwuchs oder aus Reststoffen bestimmter annueller oder perennierender Feld- und Wiesenkulturen gewonnen.

Neben dieser produktions- und aufkommensorientierten Systematik lassen sich Brennstoffe auch nach ihrer genehmigungsrechtlichen Beurteilung unterscheiden. Im Bundes-Immissionsschutzgesetz werden verschiedene Brennstoffgruppen unterschieden, für die

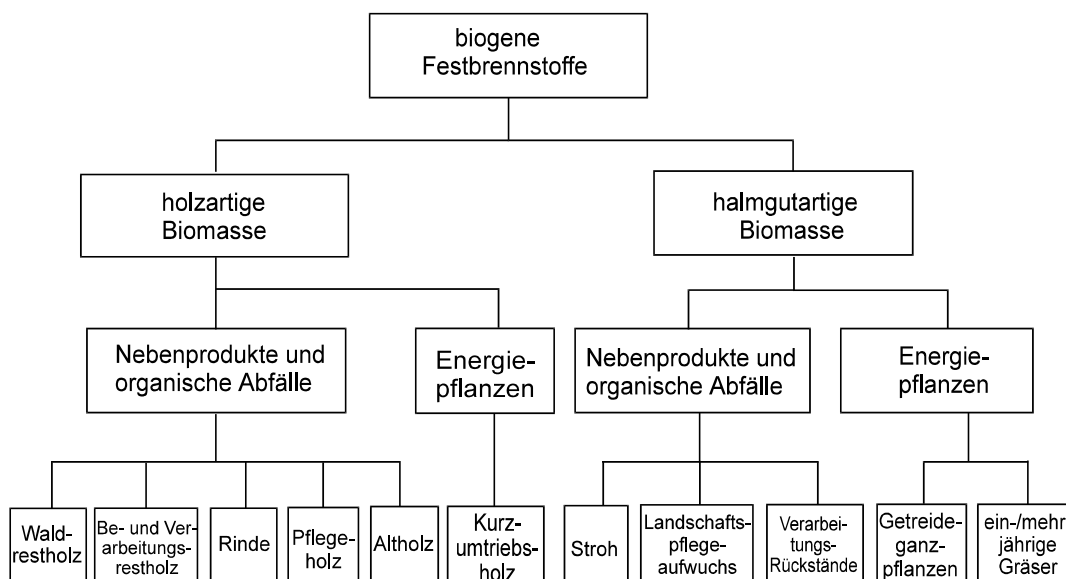


Abb. 1 Systematik der biogenen Festbrennstoffe (nach Kaltschmitt, geändert)

bei der energetischen Nutzung unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten und Beschränkungen gelten. Die biogenen Festbrennstoffe sind in §3 (1) der 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) unter den Ziffern 3 bis 8 zusammengefasst [8]:

*Ziffer 3:* Torfbriketts, Brenntorf,

*Ziffer 3a:* Grillholzkohle, Grillholzkohlebriketts,

*Ziffer 4:* naturbelassenes stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde, beispielsweise in Form von Scheitholz, Hackschnitzel sowie Reisig oder Zapfen,

*Ziffer 5:* naturbelassenes nicht stückiges Holz, beispielsweise in Form von Sägemehl, Spänen, Schleifstaub oder Rinde,

*Ziffer 5a:* Preßlinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts entsprechend DIN 51731 [24], Ausgabe Mai 1993 oder vergleichbare Holzpellets oder andere Preßlinge aus naturbelassenem Holz mit gleichwertiger Qualität,

*Ziffer 6:* gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen,

*Ziffer 7:* Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen,

*Ziffer 8:* Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe.

## 2.2 Qualitätsmerkmale und ihre Bedeutung

Unter den qualitätsbestimmenden Eigenschaften von Festbrennstoffen lassen sich eine Vielzahl von Merkmalen auflisten, denen in der Praxis eine unterschiedlich große Bedeutung beigemessen wird. Im wesentlichen sind zwei Gruppen von Merkmalen zu unterscheiden: die chemisch-stoffliche Zusammensetzung sowie die physikalischen Eigenschaften. Zu den chemisch-stofflichen Merkmalen zählen der Elementgehalt (vor allem Cl, N, S, K und Schwermetalle) sowie der Gehalt an Asche, Wasser und Pilzsporen. Daneben gehören auch der Heizwert und die Ascheerweichungstemperaturen zu dieser Gruppe.

Physikalische Eigenschaften kennzeichnen dagegen die äußerlich sichtbaren Merkmale bzw. die Aufbereitungsform. Sie lassen sich durch Parameter wie Abmessungen, Schüttdichte, Teilchen- oder Presslinsdichte, Feinanteil, Größenverteilung und Abriebfestigkeit beschreiben. Im Unterschied zu den chemisch-stofflichen Merkmalen stehen die physikalischen Eigenschaften in hohem Maße in Wechselwirkung zueinander. Eine Zusammenstellung der Qualitätsmerkmale und ihre wichtigsten Wirkungen gibt Tab. 1. Nachfolgend werden die Wirkungen und die Bedeutung der hier zu betrachtenden che-

**Tab. 1** Qualitätsmerkmale biogener Festbrennstoffe und ihre wichtigsten Auswirkungen

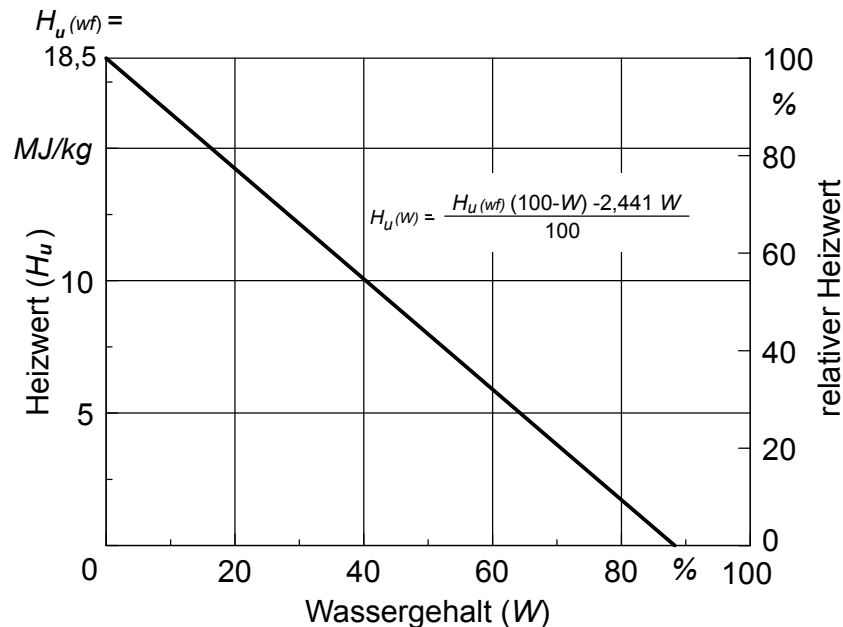
Qualitätsmerkmal	wichtigste Auswirkung
<i>chemisch-stoffliche Merkmale:</i>	
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Verluste, Selbstentzündung
Heizwert	Brennstoffausnutzung, Anlagenauslegung
Elementgehalte:	
Cl	HCl-, PCDD/F-Bildung, Hochtemperaturkorrosion
N	NO <sub>x</sub> -, HCN- und N <sub>2</sub> O-Emissionen
S	SO <sub>x</sub> -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion
K	Hochtemperaturkorrosion, Ascheerweichungsverhalten
Mg, Ca, P	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemission, zum Teil katalytische Wirkung bei PCDD/F-Bildung
Aschegehalt	Partikelemission (Staub), Rückstandsbildung und -verwertung
Ascheerweichungspunkt	Anlagenbetriebssicherheit, Niveau des Schadstoffausstoßes
Pilzsporen	Gesundheitsrisiken
<i>physikalische Merkmale:</i>	
Lagerungsdichte	Transport- und Lageraufwendungen, Logistikplanung
Teilchendichte	Feuerungseigenschaften (spezifische Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate)
Größenverteilung	Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Trocknungseigenschaften, Staubbildung
Feinanteil	Lagerdichte, Lagerfähigkeit, Staubbildung
Abriebfestigkeit	Entmischung, Verluste

misch-stofflichen Qualitätsmerkmale näher erläutert. Die physikalischen Merkmale sind - wie erwähnt - nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

**Wassergehalt.** Der Wassergehalt ist die wesentliche Einflussgröße für den Heizwert. Da wasserfreie Biomasse in der Natur praktisch nicht vorkommt, müssen stets mehr oder weniger große Mengen Feuchtigkeit während der Verbrennung oder Vergasung verdunsten. Die hierfür verwendete Wärme wird dem energetischen Prozess entnommen und mindert die Nettoenergieausbeute, da in der Regel keine Rückkondensation im Rauchgas vorgesehen ist. Aus diesem Grund besteht eine klare Abhängigkeit zwischen dem Heizwert und dem Wassergehalt, die sich - einheitlich für alle Brennstoffe - mathematisch beschreiben lässt. In manchen Feuerungssystemen ist ein zusätzlicher Wärmegewinn durch Abkühlung der Rauchgase unterhalb des Taupunkts möglich. Dabei wird neben der höheren Ausnutzung der Abgaswärme auch ein Teil der Kondensationswärme des Wasserdampfes gewonnen (sogenanntes „Brennwertprinzip“). In diesem Fall kann die Energieausbeute höher sein als in Abb. 2 dargestellt. Der Heizwert der feuchten Gesamtsubstanz lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$H_{u(W)} = \frac{H_{u(wf)} \cdot (100 - W) - 2,44W}{100}$$

wobei  $H_{u(W)}$  der Heizwert des Holzes (in MJ/kg) bei einem Wassergehalt von  $W$  ist.  $H_{u(wf)}$  ist der Heizwert der Holzsubstanz im „wasserfreien“ ( $wf$ ) Zustand, und die Konstante 2,44 ist die Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg, bezogen auf 25 °C.



**Abb. 2** Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Heizwert am Beispiel eines Holzbrennstoffs

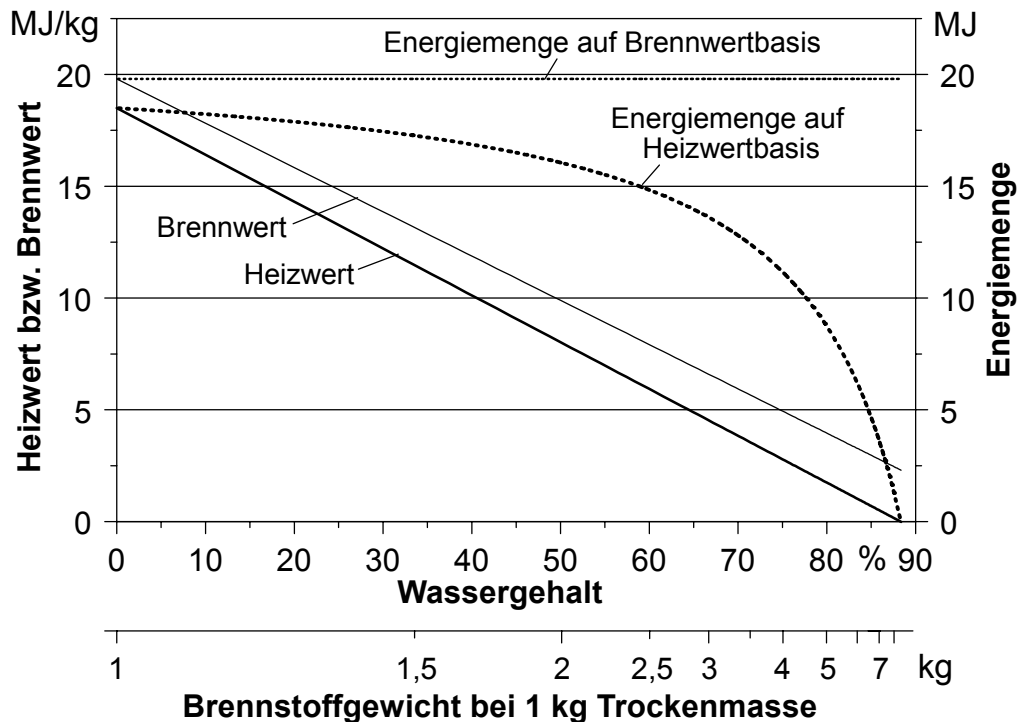
Neben dem Heizwert beeinflusst der Wassergehalt auch die Lagerfähigkeit. Wassergehalte über 16 % führen in der Regel zu biologischen Ab- oder Umbauprozessen, die mit Verlusten verbunden sind. Der Substanzabbau durch Bakterien oder Pilze geht aber auch einher mit Veränderungen in der Zusammensetzung des Brennstoffs. Beispielsweise kommt es infolge pilzlichen Wachstums gelegentlich zu einer Erhöhung des Ligningehalts. Auch der Aschegehalt erhöht sich tendenziell, da die anorganische Masse gleichbleibend ist.

Hinzu kommt die Brandgefahr, die sich bei feuchten Brennstoffen vor allem aus der Selbsterwärmung ergibt. Sie wird zunächst hauptsächlich durch die Respiration der noch lebenden Parenchymzellen verursacht. Ab einer Temperatur von 40 °C kommt diese Respiration weitgehend zum Erliegen, so dass die weitere Wärmefreisetzung bis 60 °C bzw. 75 °C auf den Metabolismus von Pilzen und Bakterien zurückzuführen ist [43]. Die Ursachen für einen weiteren Temperaturanstieg bis 100 °C sind noch nicht vollständig geklärt. Hierfür werden Wasserdampfadsorptions-, Pyrolyse- und Hydrolysevorgänge sowie katalytische Effekte bestimmter Metalle vermutet [90]. Oberhalb von 100 °C setzt schließlich die chemische Oxidation ein, die bis zur Selbstentzündung führen kann. Diese Gefahr besteht vor allem bei der Einlagerung von feuchten Heuballen und bei fein zerkleinertem Holz sowie Sägemehl oder Rinde, da die entstehende Wärme aufgrund

der behinderten natürlichen Konvektion und der geringen Wärmeleitung nicht ausreichend abgeführt werden kann.

**Heizwert.** Der Heizwert (früher "unterer Heizwert",  $H_u$ ) wird in der Praxis wesentlich stärker vom Wassergehalt beeinflusst als von der Art der Biomasse. Bei absolut trockenem Halmgut, beispielsweise, liegt der Heizwert lediglich um ca. 6 % niedriger als beim trockenen Holz. Für den Heizwert (wasserfrei) ist die stoffliche Zusammensetzung entscheidend. Biomasse mit hohem Ligningehalt hat in der Regel einen höheren Heizwert als vorwiegend cellulosehaltiges Material. Der Heizwert von Lignin allein liegt mit ca. 28,8 MJ/kg um ca. zwei Drittel höher als von Cellulose (ca. 17,3 MJ/kg). Noch höhere Heizwerte werden für die Holzextraktstoffe (z. B. Harze) angegeben (35,9 MJ/kg), während Holzpolyosen nur bei ca. 16,2 MJ/kg liegen [57]. Ölhaltige Brennstoffe (z. B. Raps- oder Rapspresskuchen) besitzen je nach Ölgehalt einen erhöhten Heizwert, da der Pflanzenölanteil mit ca. 36 MJ/kg zu Buche schlägt.

**Brennwert.** Der Brennwert (früher "oberer Heizwert",  $H_o$ ) ist die Wärmemenge, die verfügbar wird, wenn auch die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfs zurückgewonnen wird. Dazu müssen die Rauchgase so tief abgekühlt werden, dass der Wasserdampf, der aus den wasserstoffhaltigen Verbindungen des Brennstoffs resultiert bzw. in Form von gebundenem und freiem Wasser im Brennstoff enthalten ist, kondensieren kann. Da die dabei frei werdende Wärme zum Energieertrag beiträgt, liegt der Brennwert stets höher als der Heizwert (vgl. hierzu Kap. 5.3.2, ab S. 101). Das gilt insbesondere bei feuchten Brennstoffen, bei denen mit dem Rauchgas der Verbrennung üblicherweise latente Wärme verloren geht. Erst eine Rekondensation des entstehenden Wasserdampfes erlaubt einen höheren Energiegewinn, bei dem der Brennwert ausgenutzt wird ("Brennwerttechnik"). Dieser Zusammenhang wird in Abb. 3 dargestellt. Bei niedrigen Wassergehalten (< 30 %) wirken sich kleinere Wassergehaltsänderungen in einer gegebenen Brennstoffmenge (z. B. in einem gefüllten Hack- schnitzelsilo) kaum auf die Gesamtenergiemenge aus. Zwar nehmen der Heiz- und Brennwert linear mit zunehmendem Wassergehalt ab, jedoch bleibt die mit dem Brennwert bewertete Energiemenge vom Wassergehalt unabhängig. Das bedeutet, dass bei einer Trocknung des Brennstoffs im unteren Wassergehaltsbereich nicht die Steigerung der Netto-Energiemenge, sondern vielmehr die Vermeidung von Masseverlusten durch biologischen Abbau sowie der Qualitätserhalt im Vordergrund stehen (vgl. Kap. 2.3.2, S. 28).



**Abb. 3** Heizwert, Brennwert, Heizwert und Energiemenge in einem kg Holz trockenmasse bei unterschiedlichem Wassergehalt

**Chlorgehalt.** Die Bedeutung des Chlorgehalts als Qualitätsmerkmal beruht auf dessen Beteiligung an der Bildung von HCl und Dioxinen/Furanen (PCDD/F) bei der Verbrennung. Da es sich bei den letztgenannten um hochtoxische und persistente Verbindungen handelt, kommt dem Chlorgehalt zunehmende Aufmerksamkeit zu. Die quantitativen Zusammenhänge zwischen dem Chlorgehalt im Brennstoff und der PCDD/F-Emission werden bei verschiedenen Autoren beschrieben [52] [67] [40]. Obwohl relativ hohe Chloreinbindungsraten in der Asche von 40 bis 95 % möglich sind [67], ist der in der TA-Luft genannte (jedoch nicht auf Holzfeuerungen anzuwendende) Grenzwert (30 mg HCl/Nm<sup>3</sup> bei einem Cl-Massenstrom ab 300 g/h [8]) bei chlorreichen Brennstoffen (z. B. Halmgut) nicht ohne Sekundärmaßnahmen einzuhalten [31] [96].

Neben diesen Umweltwirkungen ist das Chlor aber auch durch seine korrosive Wirkung schädlich. Diese Wirkung erfolgt im Zusammenspiel mit Alkali- und Erdalkalimetallen und mit SO<sub>2</sub> an der Oberfläche der Wärmetauscher (siehe „Kalium“). Außerdem kann ein erhöhter Chloridgehalt auch zu einer verminderten Ascheerweichungstemperatur führen [63].

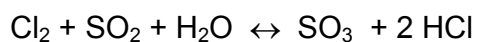
**Stickstoff.** Der Stickstoffgehalt des Brennstoffs wirkt sich direkt auf den Stickoxid ausstoß aus, da dieses Element bei der Verbrennung fast vollständig in die Gasphase übergeht. Eine Ascheeinbindung findet nahezu nicht statt [11]. Die Stickoxidbildung nimmt mit steigendem Brennstoffstickstoffgehalt zu. Eine entsprechende Zusammenstellung von Messergebnissen zu dieser Problematik findet sich bei OBERNBERGER [67].

Die Oxidation der im Brennstoff gebundenen Stickstoffmengen stellt bei der Biomasse-nutzung den mit Abstand wichtigsten  $\text{NO}_x$ -Bildungsmechanismus dar. Für die Entstehung von "thermischem  $\text{NO}_x$ ", bei der der elementare Luftstickstoff oxidiert wird, liegen dagegen bei der Biomasseverbrennung meist nicht die erforderlichen Bedingungen vor (Temperaturen über 1.200 °C bei hoher Gasverweilzeit und Sauerstoffangebot).

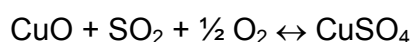
**Schwefel.** Auch für die Schwefeloxidemission ist primär der Elementgehalt im Brennstoff von Bedeutung. Der Schwefel geht während der Verbrennung unter Bildung von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  und Alkalisulfatstufen größtenteils in die gasförmige Phase über [67]. Wie beim Chlorid kommt es während der Abkühlung der Rauchgase im Kessel teilweise zu einer Rückkondensation, bei der sich Alkali- und Erdalkalisulfate entweder an den mitgeführten Flugaschepartikeln oder an den Wärmetauscherflächen niederschlagen bzw. sulfatisch gebunden werden. Das gasförmige  $\text{SO}_2$  und das am nicht abgetrennten Flugstaub gebundene Sulfat gelangt in die Umwelt. Ein großer Teil des Schwefels wird - je nach Abscheidegrad der Entstaubungseinrichtungen - in die Asche eingebunden. Diese Abscheidungen liegen bei Holz- und Rindenfeuerungen mit ca. 40 bis 90 % höher als bei Stroh und Ganzpflanzen (40 bis 55 %) [67]. Generell sind die Schwefeloxidemissionen bei der Biomassefeuerung aufgrund der relativ geringen Schwefelgehalte im Brennstoff meist kein Problem.

Schwefel kann auch indirekt für ein erhöhtes Korrosionsrisiko verantwortlich sein. Das liegt daran, dass bei höheren  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen im Rauchgas eine höhere Sulfatisierung der vorhandenen Alkali- und Erdalkalichloridionen stattfindet. Dadurch wird das korrosionsfördernde  $\text{Cl}_2$  freigesetzt [67].

Neben den genannten Nachteilen kann die Anwesenheit von Schwefel aber auch eine vorteilhafte Wirkung haben. Bei Anwesenheit von Sulfat wird das elementare Chlor in einer Konkurrenzreaktion gebunden, wobei  $\text{SO}_3$  in einer Folgereaktion zu Chlorschwefelsäure reagiert [5]:



Durch Schwefel werden außerdem die bei der Dioxin- und Furanbildung (PCDD/F) katalytisch wirkenden Kupferoxide verändert und inaktiviert [5]:



In verschiedenen Untersuchungen wird eine PCDD/F-mindernde Wirkung schon ab einem Cl/S-Verhältnis im Brennstoff von 1 belegt. Es ist davon auszugehen, dass die Chlorierung von Aromaten erst ab einem Cl/S-Verhältnis von 0,1 unterbunden wird [35] [37].

**Kalium.** Der Kaliumgehalt im Brennstoff besitzt einerseits eine indirekte Wirkung bei den Korrosionsvorgängen an Wärmetauschern und abgasführenden Bestandteilen der Feue-



nung und beeinflusst andererseits auch das Erweichungsverhalten der Asche. Im Gegensatz zu Kalzium, welches den Schmelzpunkt erhöht, wirkt Kalium schmelzpunktniedrigend [72]. Dabei kommt es offenbar auf das Verhältnis von Kalium zu Kalzium an (zum Ascheerweichungsverhalten vgl. auch Kap. 5.3.2, ab S. 102).

Die Mitwirkung an Korrosionsvorgängen geht bei Kalium (und Natrium) auf die Tatsache zurück, dass diese Elemente zwar nicht so leicht flüchtig sind wie Cl und S, jedoch bei der Verbrennung gasförmige Alkalichloride bilden können, die bei Abkühlung entweder an Wärmetauscherflächen oder an Flugstaubpartikeln kondensieren. Auf den Wärmetauschern reagieren diese kondensierten Alkalichloride mit  $\text{SO}_2$  aus dem Rauchgas zu Alkalisulfaten und  $\text{Cl}_2$ . Letzteres diffundiert durch die porösen Zunderschichten an die Rohrwand des Wärmetauschers, auf der es aufgrund der reduzierenden Bedingungen zur Bildung von  $\text{FeCl}_2$  kommt. Aufgrund der großen Temperaturunterschiede innerhalb der Ablagerungsschicht auf dem Wärmetauscher kommt es zu unterschiedlichen  $\text{FeCl}_2$  Partialdrücken, die dazu führen, dass diese gasförmige Verbindung wiederum von der Rohrwand weg diffundiert, wobei es auf seinem Weg wieder unter oxidierende Bedingungen gerät. Dabei wird das Eisen oxidiert, so dass ein Teil des freigesetzten Chlors erneut für den Korrosionsprozess zur Verfügung steht. Dieser Mechanismus, der bei OBERNBERGER [67] ausführlich beschrieben wird, ist in Abb. 4 dargestellt.

$\text{N}_2, \text{CO}_2, \text{O}_2$ $\text{SO}_2, \text{SO}_3, \text{MeCl (g)}$	Rauchgas	$\text{SO}_2$ ↓ $\text{O}_2$ ↓
Sulfate/Chloride Silikate	Aschen- ablagerungen	$\text{Cl}_2 + \text{K}_2\text{SO}_4 \longleftrightarrow \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 2 \text{KCl}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Asche}$	Äußere Oxidschicht	↓ ↓
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeS}$	Innere Oxidschicht	$3 \text{Fe}_2\text{O}_3 \longleftrightarrow 1/2 \text{O}_2 + 2 \text{Fe}_3\text{O}_4$ $3 \text{Cl}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4 \longleftrightarrow 2 \text{O}_2 + 3 \text{FeCl}_2$
$\text{FeCl}_2$	Korrosions- front	$4 \text{Cl}_2 + \text{FeS} + \text{Fe}_3\text{O}_4 \longleftrightarrow \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 4 \text{FeCl}_2$ $\text{Cl}_2 + \text{Fe} \longleftrightarrow \text{FeCl}_2$
Stahlrohr	Rohrwand	$p_{\text{FeCl}_2} = 10^{-5} = 10^{-3} \text{ bar bei } 400 - 530^\circ\text{C}$

**Abb. 4** Mechanismus der Hochtemperatur-Chlorkorrosion an einem Wärmetauscher [67]

Neben diesen ungünstigen Wirkungen wird aber auch ein großer Teil des Kaliums in die Asche eingebunden und steht somit im Falle einer Verwendung als Düngemittel nutzbringend zu Verfügung. Die Kaliumanteile in der Grobasche von Holz und Rindenfeuerungen liegen bei 5,3 % (6,4 %  $\text{K}_2\text{O}$ ). Ähnlich hohe Kaliumgehalte kommen in der Zyklonasche vor, während die Feinstflugasche bei durchschnittlich 11,8 % (14,3 %  $\text{K}_2\text{O}$ ) liegt [67].

**Kalzium, Magnesium, Phosphor.** Ca und P wirken schmelzpunkterhöhend auf die Biomasseasche. Auch Magnesium wird eine solche Wirkung zugeschrieben [72]; allerdings belegen die Datenbankauswertungen der hier vorliegenden Arbeit einen gegenteiligen Effekt (vgl. hierzu Kap. 5.3.2, ab S. 102). Bei Brennstoffen mit ungünstigem Ascheerweichungsverhalten können durch Verwendung von Ca-haltigen Zuschlagsstoffen (z. B. dolomitischer Kalk) Verbesserungen im Ascheschmelzverhalten erzielt werden [87]. Eine weitere positive Wirkung zeigt sich bei der Ascheeinbindung von Problemstoffen. Hohe Gehalte an Alkalimetallen (vor allem Ca) führen beispielsweise dazu, dass große Teile des Schwefels in der Asche verbleiben und somit nicht als Problemstoff im Abgas auftauchen. Die drei genannten Elemente selbst erhöhen außerdem den Düngewert der Asche [32].

**Schwermetalle.** Die Schwermetalle bleiben zum großen Teil in der Asche zurück und beeinflussen dadurch ihre Wiederverwendbarkeit als Düngemittel. Unter den Schwermetallen sind vor allem Cd, Zn und Pb leicht flüchtig. Sie finden sich infolge der Rekondensation an den Flugaschepartikeln vermehrt in der Feinflugasche wieder (z. B. in Gewebe- oder Elektrofiltern). Durch getrennte Verwertung bzw. Entsorgung der Bett-, Zyklon- und Feinstflugaschen („fraktionierte Schwermetallabscheidung“) können die Schadstoffeintragsrisiken bei der landwirtschaftlichen Verwertung der Aschen als Dünger minimiert werden [67].

Einige Schwermetalle besitzen auch eine katalytische Wirkung bei der Bildung von PCDD/F. Kupfer- und Eisenchloride spielen hierbei eine wichtige Rolle. Sie dienen unter anderem als Chlorquelle. Insbesondere die  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen katalysieren aber auch die Bildung von C-Cl-Bindungen und die Oxidation des Kohlenstoffes [1] [5].

**Aschegehalt.** Auch der Aschegehalt zählt zu den Merkmalen, die sowohl emissionsrelevant als auch in technischer Hinsicht von Bedeutung sind. Mit zunehmendem Aschegehalt nimmt auch die Gefahr höherer Staubemission bzw. der Aufwand für eine ggf. notwendige Entstaubung zu. Das gilt insbesondere bei Anlagen, bei denen das Glutbett vermehrt mechanischen Einflüssen ausgesetzt ist. Bei Kleinanlagen werden dagegen auch handbeschickte Feuerungen für stückige Brennstoffe eingesetzt, bei denen sich die Unterschiede im Aschegehalt infolge des weitgehend ungestörten Chargenabbrands weniger stark auswirken.

Daneben stellt sich die Frage nach einer kostengünstigen Entsorgung bzw. Verwendung der Aschen. Bei Holzbrennstoffen ist die Rückstandsmenge aufgrund der niedrigen Aschegehalte meist deutlich geringer als bei Halmgütern, somit ist die Aschehandhabung und Entsorgung mit niedrigeren Kosten verbunden.

**Ascheerweichungsverhalten.** Bei den thermischen Prozessen der Energieumwandlung treten im Glutbett physikalische Veränderungen der Asche auf. Je nach Temperaturniveau kommt es zum Verkleben ("Versintern") bis hin zur völligen Schmelze der A-

scheartikel. Dieses Erweichungsverhalten wird durch die jeweiligen Sinterbeginn-, Erweichungs-, Halbkugel- und Fließtemperaturen charakterisiert (nach DIN 51730 [26]).

Bei Brennstoffen mit niedrigen Ascheerweichungstemperaturen besteht ein hohes Risiko, dass das Überschreiten der kritischen Temperatur zu Anbackungen im Feuerraum, am Rost und an den Wärmetauschern führt. Diese Anbackungen können zu Störungen, Betriebsunterbrechungen und zu Veränderungen bei der Verbrennungsluftzufuhr führen und müssen mechanisch entfernt werden. Die Vermeidung von Anbackungen kann durch aufwendige Zusatzeinrichtungen wie wassergekühlte Rostsysteme oder -Brennmulden, Rauchgasrückführung, Aschebrecher, Brennstoffverwirbelung etc. erfolgen, jedoch ist dies meist mit einer Kostensteigerung verbunden. Parallel dazu muss oft auch die maximale Verbrennungstemperatur begrenzt werden. Da diese Temperaturabsenkung in der Praxis nicht immer durch entsprechende größere Nachbrennzonen zur Erhöhung der Gasverweilzeiten kompensiert wird, besteht eine Tendenz zu nachteiligen Auswirkungen auf das Niveau des Schadstoffausstoßes, denn bei sinkenden Temperaturen verlaufenden die Verbrennungsreaktionen langsamer und benötigen somit eine verlängerte Reaktionszeit, um eine möglichst vollständige Verbrennung der unverbrannten Rauchgasbestandteile (CO, C<sub>org</sub>, Ruß) sicherzustellen.

**Pilzsporen.** Schon vor der eigentlichen energetischen Nutzung der Brennstoffe sind direkte Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit durch die gebildeten Pilzsporen möglich, wenn diese in die Atemluft gelangen. Man unterscheidet drei Arten von Schäden: Mykosen, Mykoallergosen und Mykotoxikosen. Bei den Mykosen kommt es zu einem Pilzwachstum am oder im Wirt (hier: dem Menschen), wobei die inneren Organe oder die Haut befallen sein können. Als besonders pathogen im Organtrakt gilt hierbei *Aspergillus fumigatus* (daher „Aspergillose“).

Mykoallergosen sind dagegen allergische Erkrankungen, die sich in Niesanfällen, Schnupfen, Husten, Durchfall, Erbrechen oder sogar asthmoider Bronchitis äußern. Sie kommen durch Kontakt der Pilzelemente mit feuchten Schleimhäuten (z. B. Atemwege) zustande. In der Reihenfolge der klinischen Wertigkeit von Schimmelpilzsensibilisierungen sind als Verursacher Fusarien, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Alternaria*, *Mucor* und andere zu nennen [71]. Zu den bekanntesten Krankheitsbildern von Mykoallergosen in der Landwirtschaft gehört die sogenannte Farmerlunge, die durch Atemnot, Fieber und Lungenstauung gekennzeichnet ist und häufig von Pilzsporen aus fehlgelagertem Heu verursacht wird. Hierfür werden vor allem Aktinomyceten (Strahlenpilze) verantwortlich gemacht.

Bei den Mykotoxikosen handelt es sich schließlich um eine Vielfalt von Vergiftungsercheinungen durch Giftstoffe (Mykotoxine), die im Stoffwechsel der Pilze entstehen. Diese Vergiftungen können in ihrer Folge zu schweren Krankheitsbildern wie Lungenkrebs, Hepatitis, etc. führen. Die Toxine werden nicht nur über die Nahrungsmittel aufgenom-

men, sondern können auch an Staubpartikeln angelagert sein. Die erforderlichen Bedingungen für Pilzwachstum werden in Kap. 2.3.2 angesprochen.

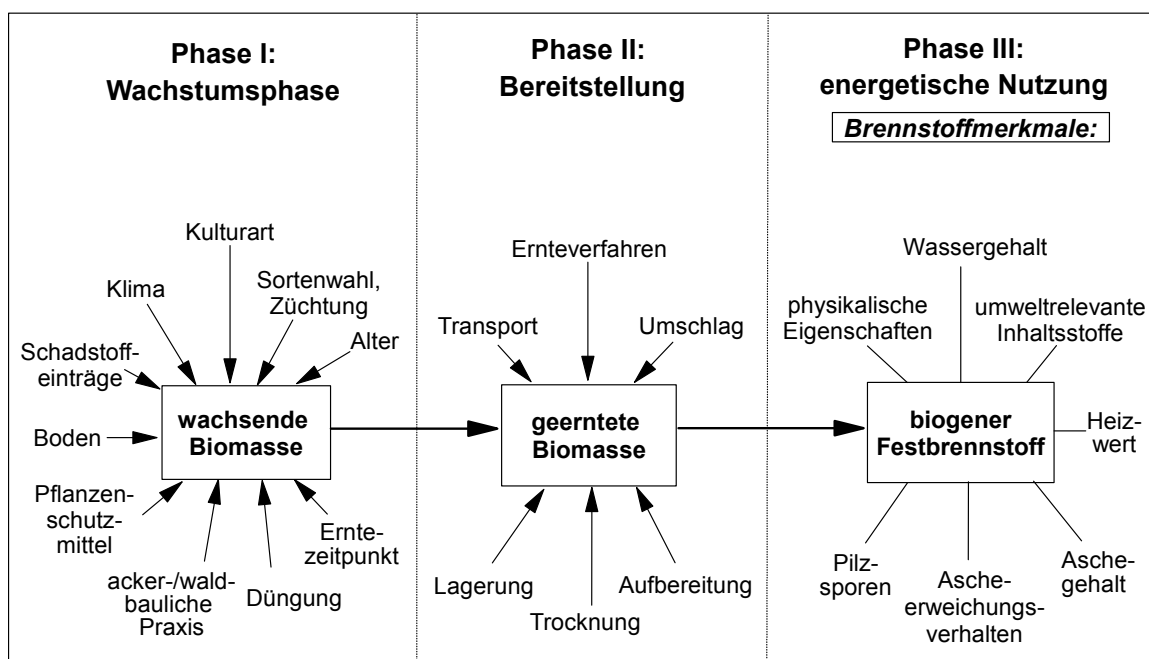
## 2.3 Einflussmöglichkeiten

Im Folgenden sollen einige der heute bekannten Möglichkeiten zur Beeinflussung der Brennstoffmerkmale betrachtet werden. Dazu ist es erforderlich, dass zunächst nach den Ursachen für Qualitätsschwankungen gefragt wird. Diese Ursachen sind generell zwei Phasen der Prozesskette zuzuordnen: der Wachstumsphase, in der hauptsächlich die chemisch-stofflichen Merkmale ausgeprägt werden, und der Bereitstellungsphase, die sich vor allem bei den physikalischen Eigenschaften niederschlägt (Abb. 5). In Phase III (energetische Umwandlung) werden schließlich die Auswirkungen unterschiedlicher Qualitäten sichtbar.

### 2.3.1 Einflüsse während der Wachstumsphase

Die in Kapitel 2.2 genannten Schadelemente sind meist für die Pflanzen selbst unschädlich oder stellen sogar wesentliche Nährelemente dar, ohne die ein Wachstum unmöglich wäre. Die Ziele der Pflanzenernährung stehen daher vielfach im Gegensatz zu den Zielen, die vom Qualitätsmanagement bei der energetischen Verwendung angestrebt werden. Die Elemente, die zu den Pflanzennährstoffen zählen, werden in Tab. 2 zusammengestellt.

N, P und K werden auch als „Haupt- oder Kernnährstoffe“ bezeichnet, da sie in großen Mengen (meist  $>100 \text{ kg/ha a}^{-1}$ ) durch die Düngung bereitgestellt werden müssen. Ein



**Abb. 5** Einflüsse auf die Qualitätseigenschaften biogener Festbrennstoffe

**Tab. 2** Einteilung der Pflanzennährstoffe nach ihren physiologischen und biochemischen Eigenschaften [60]

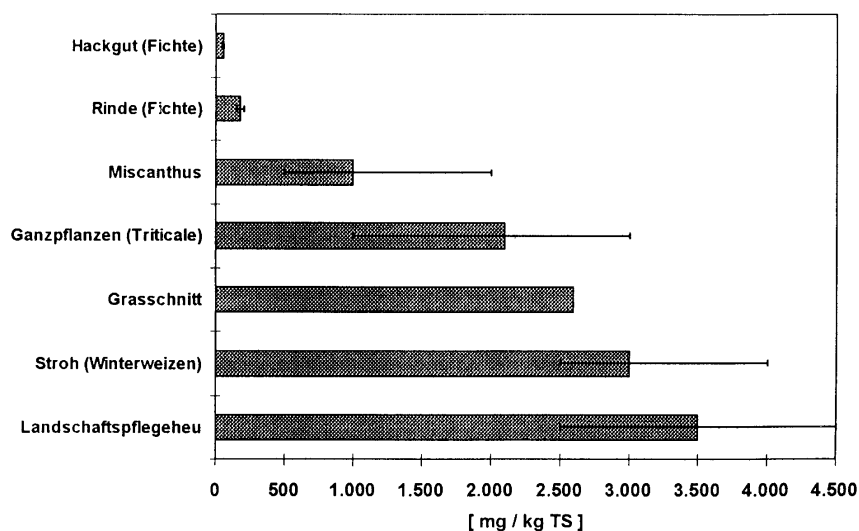
Nährstoff	Nährstoff-Gruppe	Aufnahme und Transport	physiologische und biochemische Eigenschaften
C H O		Aufnahme als Gas ( $\text{CO}_2$ , $\text{O}_2$ ). C-Aufnahme auch als $\text{HCO}_3^-$ , O-Aufnahme teils als $\text{H}_2\text{O}$ , H-Aufnahme als $\text{H}_2\text{O}$	Die wichtigsten Bausteine organischer Moleküle
N S P B Si	Nichtmetalle	Aufnahme in Form des Oxo-komplexes $\text{NO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , Phosphat, bei N auch als $\text{NH}_4^+$ . Transport als organisches Molekül, z. B. als Aminosäure, Amid, Phospholipid oder Ester	Wichtige Bausteine organischer Strukturen. $\text{NO}_3^-$ und $\text{SO}_4^{2-}$ werden nach Reduktion homöopolar an Kohlenstoffskelette gebunden. Die freien Elektronenpaare des S- bzw. N-Atoms ermöglichen Chelatbindungen. Phosphat, Borat und Silicat bilden Ester mit pflanzeigenen alkoholischen Gruppen
K Na Mg Ca	Alkali-Erdalkali	Werden in höheren Mengen als Kation aufgenommen und auch als Kation transportiert	Unspezifische Funktionen wie osmotische Wirksamkeit und elektrischer Ausgleich von Anionen. Mehr spezifische Wirkung bei der Konformation von Enzymen. Brückenbildung bei Reaktionspartnern. Einfluss auf Membranpermeabilität und Membranpotentiale
Mn Fe Cu Zn Mo	Schwermetalle	Mit Ausnahme von Mo Aufnahme als Kation oder als Metallchelate. Mo wird als $\text{MoO}_4^{2-}$ aufgenommen. Transport als Metallchelate oder als anorganisches Ion	Liegen hauptsächlich in Chelatform bei prosthetischen Gruppen vor. Die enzymatische Wirksamkeit beruht häufig auf einem Valenzwechsel. Mn und Zn ähneln in ihren Funktionen teils dem Mg

geringerer Bedarf liegt dagegen bei den Elementen Mg, Ca und S vor, die daher auch als „Sekundärnährstoffe“ bezeichnet werden ( $<100 \text{ kg/ha a}^{-1}$ ). Noch geringere Mengen werden bei den Mikronährstoffen benötigt ( $< 1 \text{ kg/ha a}^{-1}$ ). Hierzu zählen z. B. die Schwermetalle Mn, Fe, Cu, Zn und Mo sowie das Element Bor. Bei einigen weiteren Elementen ist die Nährstoffwirkung entweder nicht durchgängig nachgewiesen oder sie liegt nur pflanzenspezifisch vor. Zu diesen Elementen zählen Natrium, Silizium und Chlor. Trotz der teilweise relativ hohen Konzentration in der Pflanze ordnet AMBERGER [1] das Chlor der Gruppe der Mikronährstoffe zu und bezeichnet es als essentielles Nährelement. Aufgrund des sehr geringen physiologischen Bedarfs ist aber davon auszugehen, dass dieser „Nährstoff“ bei der Düngung der Kulturarten in Mitteleuropa weitgehend verzichtbar ist, zumal geringe Mengen auch aus der atmosphärischen Deposition und aus bodenbürtigen Mineralen stammen können. Zudem waren Cl-Mangelsymptome bisher lediglich in Nährlösungsversuchen im Labor nachzuweisen [1]. Viele Pflanzenarten wie Kartoffeln, Wein, Obst, Tabak, Baumwolle und Zuckerrohr gelten sogar als chlorempfindlich, während andere Kulturen auch chlorliebend (z. B. Öl- und Kokospalme) oder zumindest chlorverträglich (Beta-Rüben, Feldfutter, Wiesen und Weiden) sein können [60].

**Wahl der Kulturart.** Die Kulturart mit ihren speziellen Eigenschaften zählt zu den wichtigsten Bestimmungsgrößen für die Brennstoffqualität. Durch das jeweilige spezifische Aufnahmevermögen für Nähr- und Spurenstoffe kommt es zu Unterschieden bei der Elementarzusammensetzung. Eine noch größere Rolle spielt der stoffliche Aufbau der Kultur oder des Ernteprodukts. Bei Pflanzen oder Pflanzenteilen mit hohem Eiweißgehalt ist die Stickstoffkonzentration grundsätzlich höher als bei Lignocellulose. Das gilt vor allem für Getreidekörner, Ölsaaten und Proteinpflanzen. Über den jeweiligen Proteingehalt lässt sich auch der Stickstoffgehalt abschätzen, indem durch den Quotient 6,25 geteilt wird. Dieser Quotient ergibt sich aus dem mittleren Stickstoffanteil von 16 % im Rohprotein bei einem gängigen Aminosäurespektrum im Futtereiweiß.

Auch Schwefel ist am Aufbau einiger Aminosäuren und Enzyme beteiligt. Er ist außerdem bei manchen Kulturen für die Bildung schwefelhaltiger Inhaltsstoffe, wie z. B. Glucosinolat beim Raps, erforderlich. Neben Raps haben auch Leguminosen und Kohlarten einen erhöhten Schwefelbedarf.

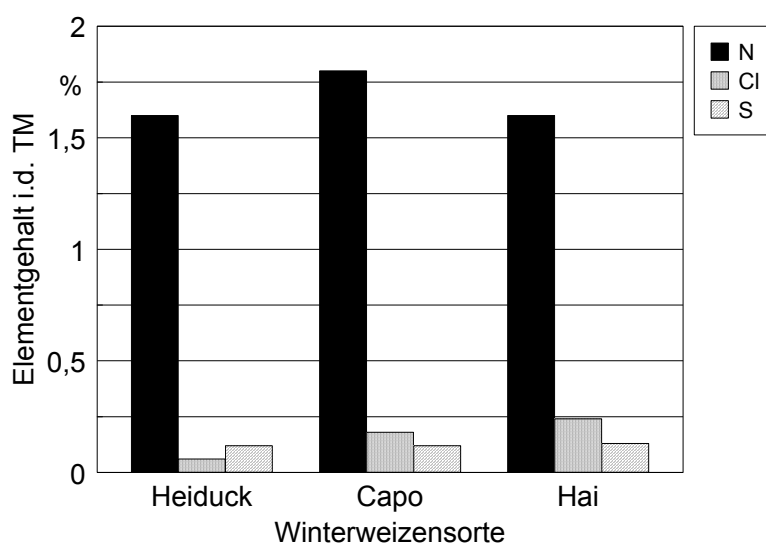
Beim Chlor lässt sich nicht - wie beim Schwefel - allein aus dem Auftreten bestimmter Stoffgruppen in der Pflanze auf einen speziellen Cl-Bedarf bestimmter Kulturarten schließen. Zwar ist bekannt, dass die im ariden Klima wachsenden chlorliebenden Pflanzen (Halophyten) dieses Element in Konzentrationen von bis zu 12 % anreichern können [1], allerdings liegt der Gehalt in Mitteleuropa meist im Bereich von < 0,1 bis 2 % i.d.TM. Offenbar lassen sich jedoch auch hier einzelne Kulturarten identifizieren, bei denen höhere oder niedrige Chlorgehalte häufiger vorkommen. Dies wird am Beispiel des in Abb. 6 dargestellten mittleren Chlorgehalts deutlich. Darin kommt auch die relativ große Schwankungsbreite der Einzelwerte zum Ausdruck. Sie wird bei Berücksichtigung weiterer Datenquellen (vgl. hierzu Kap. 5.3) nochmals größer. Die große Streuung innerhalb der Kulturart ist durch die Vielfalt bei den übrigen Einflussfaktoren wie zum Beispiel der Düngung zu erklären. Diese Streuungsursachen werden nachfolgend angesprochen.



**Abb. 6** Schwankungsbreite beim Chlorgehalt verschiedener Kulturarten [66]

**Sortenwahl und Züchtung.** Die Nutzung von Möglichkeiten, durch Sortenwahl oder gar durch Pflanzenzüchtung einen gezielten Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften auszuüben, befindet sich derzeit noch in einem Frühstadium. Beispielsweise zielen aktuelle Bestrebungen bei der Getreidesortenprüfung auf eine gleichmäßigere Abreife von Korn und Stroh ab. Dadurch soll ein einheitlicher Wassergehalt im Erntegut erreicht werden. Ähnliche Selektionsziele werden auch in der Züchtung von Weiden verfolgt. Hier wird beispielsweise auf eine Absenkung des zum Erntezeitpunkt vorliegenden Wassergehaltes von weniger als 50 % hingearbeitet [86]. Die Prüfung von Getreidearten in Österreich [74] ergab für das spezielle Aneignungsvermögen von kritischen Elementen nur geringe Unterschiede bei Stickstoff und Schwefel, während bei der Chloraufnahme eine ungünstige Sortenwahl im Extremfall zu einer Verdreifachung des möglichen Minimalgehaltes führte (Abb. 7). Bei den Schwermetallen wird in derselben Untersuchung lediglich für das Element Blei ein deutliches sortenspezifisches Aufnahmevermögen festgestellt.

**Klima.** Klimatische Unterschiede wirken sich vor allem um den Erntezeitpunkt herum aus. Das betrifft nicht nur den Wassergehalt, der für den Heizwert und die Lagerstabilität bedeutsam ist, sondern auch den Gehalt an kritischen Elementen. Insbesondere die leicht löslichen und in der Pflanze mobilen Elemente wie Chlor und Kalium werden durch Niederschläge aus abgestorbenen Pflanzenteilen relativ rasch ausgewaschen. Bei Getreide und Miscanthus erfolgt diese Auswaschung schon vor der Ernte. Das Stroh ist allerdings häufig zur Mähdruschreife teilweise noch nicht vollständig abgestorben und daher noch relativ feucht. Das führt dazu, dass Betreiber von Strohfeuerungsanlagen gelegentlich den Brennstofflieferanten eine Mindestwartezeit von drei Tagen zwischen Schnitzeitpunkt und Bergung vorschreiben, um einen günstigeren und gleichmäßigeren Wassergehalt zu erzielen und damit der Schimmelbildung vorzubeugen [56]. Unter Be-

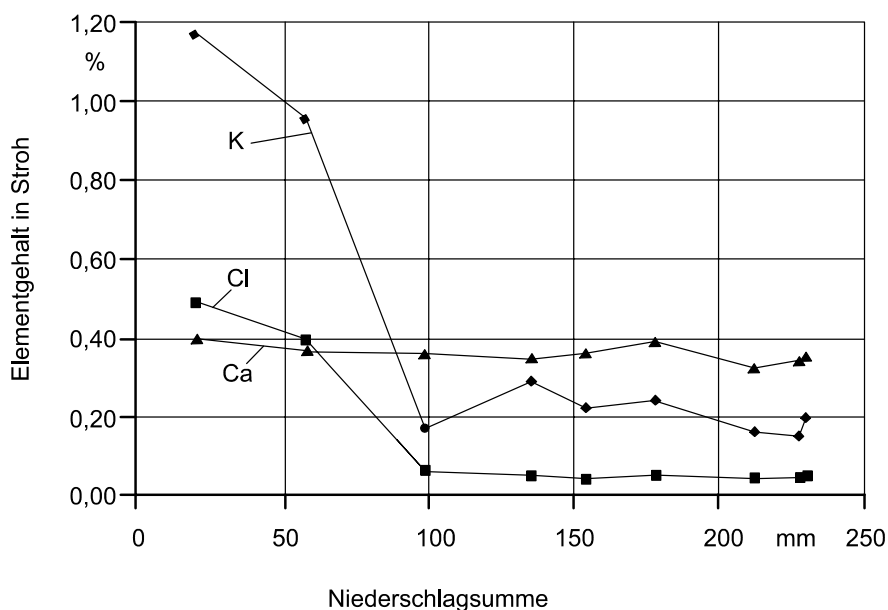


**Abb. 7** Sorteneinfluss auf Elementgehalte in Getreideganzpflanzen (bei N/P/K-Düngung von 100/75/150 kg/ha) (nach [74])

dingungen mit Sommertrockenheit oder auf leichten Böden kann es aber auch zu einer vorzeitigen und damit gleichmäßigeren Abreife kommen, bei der solche Maßnahmen nicht erforderlich sind.

Wenn zwischen Schnittzeitpunkt und der Bergung vom Feld eine Wartezeit eingehalten wird, können eventuelle Niederschläge zu Qualitätsverbesserungen führen, sofern anschließend die Abtrocknung des Halmguts abgewartet wird. In dänischen Feldversuchen [75] wurde die Auswaschung von Kalium, Kalzium und Chlor aus Gerstenstroh bestimmt, welches nach der Ernte auf dem Feld verblieb und dabei mehreren Niederschlagsereignissen ausgesetzt war (Abb. 8). Nach 50 bis 100 mm Regensumme wurden die Chlor- und Kaliumgehalte um bis zu 90 % des Ausgangswertes reduziert. Weitere Regenfälle waren anschließend kaum noch von Bedeutung. Ein ähnlicher Zusammenhang wird auch von BAKKER UND JENKINS [4] berichtet. Nach einer Niederschlagssumme von 106 mm bestimmten die Autoren in Reisstroh eine Absenkung des Kaliumgehaltes in Höhe von 63 %. Parallel dazu wurde ein Anstieg des Ascheerweichungspunktes um ca. 400 °C gemessen.

Auch KASPER [46] stellte erhebliche Auswaschungseffekte bei Heu und Stroh fest. Das geht aus Feldversuchen mit künstlicher Beregnung hervor (Tab. 3). Am deutlichsten sinken dabei die Chlor- und Kaliumgehalte, während die Schwefel- und Stickstoffgehalte weniger reduziert werden. Chlorauswaschungseffekte setzen bei Stroh offenbar schon sehr früh ein (ab 20 mm), während im Heu ähnliche Wirkungen erst nach einer Gesamtberegnungshöhe von 80 mm auftreten. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die physiologische Aktivität bei frisch geschnittenen Gräsern weitaus höher ist als im Stroh, das zum Erntezeitpunkt bereits weitgehend abgestorben ist.



**Abb. 8** Dänische Feldversuche zur Auswaschung von Elementen bei auf dem Feld lagerndem Gersten- und Triticalestroh [75]

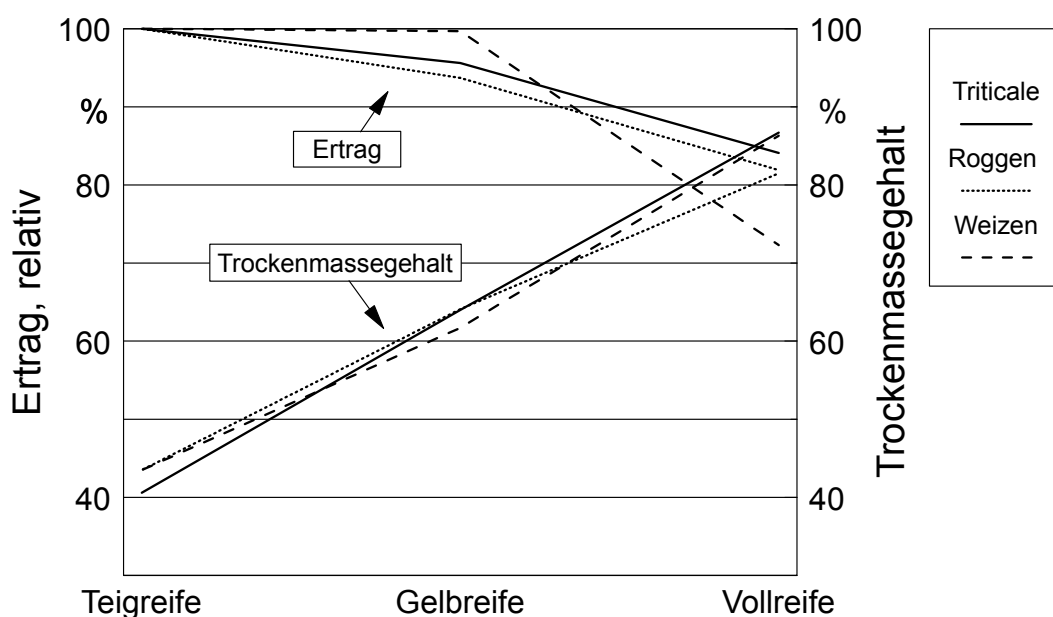


**Tab. 3** Relative Änderung verschiedener Elementkonzentrationen in Heu und Stroh in Abhängigkeit von der Beregnungshöhe gegenüber der unberegneten Variante [46] (Angaben in %)

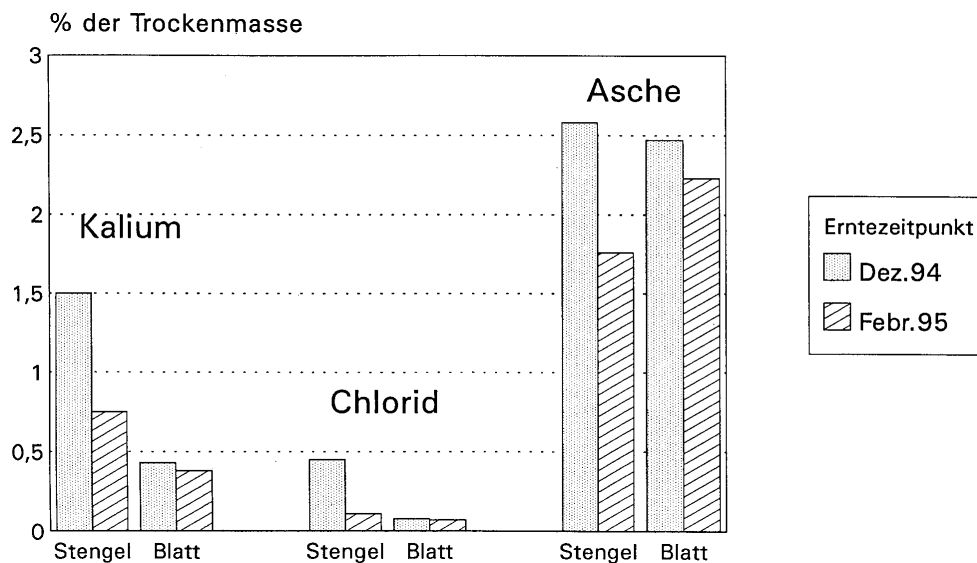
Element	Ausgangs- gehalt (% i.d.TM)	relative Gehaltsänderung (%) bei Beregnungshöhe:					
		unberegnet	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm
<i>Heu:</i>							
N	1,38	0	-8,0	-1,4	-29,7	-10,1	-17,4
S	0,20	0	-10,0	+5,0	-25,0	-10,0	-10,0
Cl	0,81	0	-13,6	-18,5	-32,1	-51,8	-61,7
K	1,53	0	-32,0	-34,6	-15,0	-54,2	-43,7
<i>Stroh:</i>							
N	0,80	0	-18,8	-27,5	-38,8	-35,0	-40,0
S	0,13	0	-15,4	-15,4	-30,8	-23,1	-30,8
Cl	0,18	0	-55,6	-55,6	-72,2	-66,7	-77,8
K	2,41	0	-19,5	-22,0	-37,8	-35,7	-46,1

Um die Feldauswaschung als Instrument des Qualitätsmanagements einzusetzen, ist die genaue Kenntnis über die Wahrscheinlichkeit einer Regensumme zwischen ca. 50 und 100 mm innerhalb der vorgesehenen Feldverweildauer erforderlich.

**Erntezeitpunkt.** Ertragsmaximierung und Qualitätsverbesserung sind oft konkurrierende Ziele. Das gilt in besonderem Maße bei der Wahl des Erntezeitpunkts. Am Beispiel von Getreideganzpflanzen zeigt Abb. 9 wie der Trockenmasseertrag mit zunehmender Abreife zurückgeht. Das liegt im wesentlichen daran, dass mit dem Absterben der Pflanze ein Anstieg des Blatt- und Körnerausfalls verbunden ist, was beim Weizen offenbar in weit-



**Abb. 9** Ertrag und Wassergehalt zu unterschiedlichen Erntezeitpunkten von Getreideganzpflanzen (nach [21])

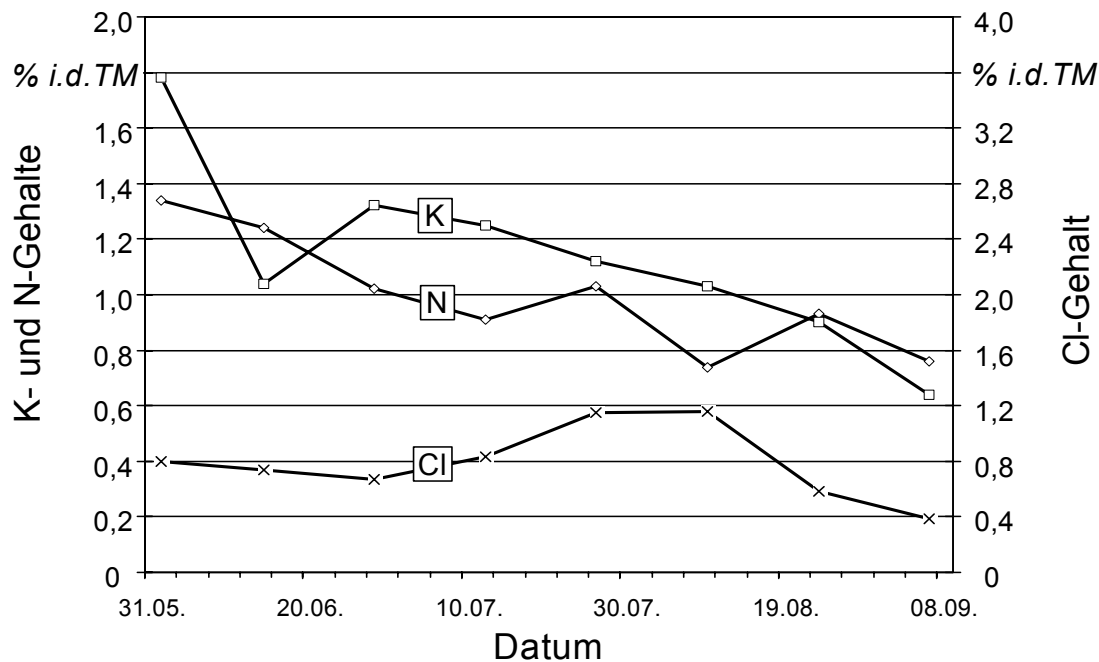


**Abb. 10** Gehalt an Kalium, Chlor und Asche in Stängeln und Blättern von Miscanthus zu unterschiedlichen Ernteterminen [54]

aus stärkerem Maß der Fall ist [21]. Der Ertragsverlust geht allerdings mit einer Senkung des Wassergehaltes einher. Daneben kann es zu weiteren Qualitätsverbesserungen durch Auswaschung von Schadelementen aus bereits abgestorbenen Pflanzenteilen kommen, da in den etwa 20 Tagen zwischen Teigreife und Vollreife auch mit Niederschlägen zu rechnen ist.

Bei Miscanthus ist die Zeitspanne für die Ernte wesentlich größer. Gleichzeitig ist die Erntemasse meist schon zu Beginn des Winters abgestorben. In Versuchen von LEWANDOWSKI [54] wurde eine deutliche Qualitätsverbesserung bei der Wahl eines späteren Erntetermins vor allem auf die Auswaschung durch Winterniederschläge zurückgeführt (Abb. 10). Die Veränderungen sind bei den Blättern zumeist deutlich geringer als bei den Stängeln, da erstere aufgrund der früheren Abreife bereits niedrigere Ausgangsgehalte aufweisen. Eine deutliche Abnahme der Cl- und K-Konzentrationen in der Miscanthusbiomasse während des Winters wird auch von JØRGENSEN [44] bestätigt.

Auch bei Landschaftspflegeheu sind qualitative Auswirkungen unterschiedlicher Erntetermine zu erwarten. KASPER [46] stellte fest, dass die Gehalte an Kalium, Chlor und Stickstoff während der Reife tendenziell abnehmen. Hieran lassen sich aktive biologische Umlagerungsvorgänge ablesen, durch die im Sommer und Herbst eine starke Nährstoffverlagerung in die Überdauerungsorgane der Pflanze stattfinden. Wenig Erklärungsansätze bieten sich allerdings für den zwischenzeitlichen Anstieg im Chlorgehalt (Abb. 11). Bei der Nutzung von Grünland ist die inhaltsstoffliche Zusammensetzung stets auch von der Häufigkeit der Schnitte abhängig. Eine Erhöhung der Schnitthäufigkeit, die z. B. bei der Futterheuproduktion angestrebt wird, führt zu einer Zunahme des Protein-

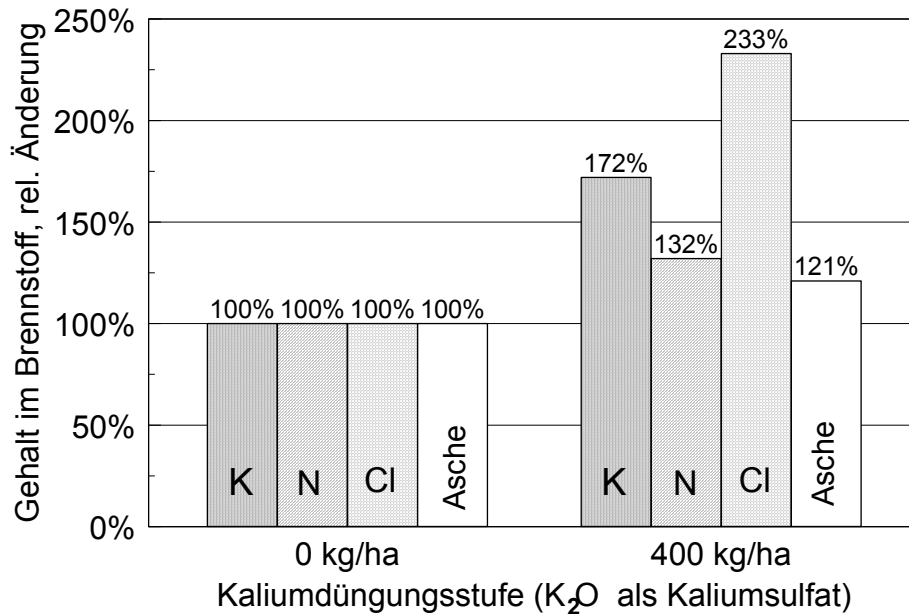


**Abb. 11** Kalium-, Stickstoff- und Chlorgehalte von Landschaftspflegeheu im Jahresverlauf am Standort Spree (nach [46])

und Mineralstoffgehaltes, wobei der Anteil an Gerüstsubstanzen und der Trockenmassegehalt in der Biomasse sinkt und die jährlichen Erträge steigen [68]. Diese Bewirtschaftungsweise steht jedoch im Widerspruch zu den Zielen einer extensiven Landschaftspflege.

**Alter.** Auch das Alter der Kultur besitzt einen Einfluss auf die Brennstoffmerkmale, wobei sich die Möglichkeiten einer Einflussnahme bei jährlich erntbarer Biomasse lediglich auf die Wahl des Erntezeitpunktes beschränken (s.o.). Bei Kurzumtriebsplantagen beträgt der Abstand zwischen zwei Ernten dagegen zum Teil bis zu 10 Jahren, so dass hier ein hohes Maß an Variabilität vorliegt. Allerdings sind die Wirkungen auf Qualitätsmerkmale nur schwer nachzuweisen. CIRIA et al. [20] konnten für den Asche-, Schwefel- und Kaliumgehalt von Pappeln in drei- bis fünfjähriger Rotationsdauer keine signifikanten Veränderungen beobachten. Lediglich beim Stickstoff wurde eine Abnahme im Brennstoff gemessen. Sie wird von den Autoren hauptsächlich auf den geringeren Anteil kleinerer Äste zurückgeführt. Der Stickstoff- und Aschegehalt von Holzbrennstoffen hängt vor allem vom Holz/Rinden-Verhältnis ab, jedoch sind Veränderungen bei diesem Merkmal meist nur innerhalb größerer Zeitabstände feststellbar [34]. Eine gezielte Verlängerung der Rotationsdauer zur Qualitätsverbesserung erscheint daher wenig sinnvoll, zumal das Ausgangsniveau beim Stickstoffgehalt bereits sehr niedrig ist.

**Düngung.** Unter den landbaulich beeinflussbaren Ursachen für Qualitätsunterschiede stellt die Düngung einen der wichtigsten Einflüsse dar. Das betrifft sowohl die Höhe der Düngergabe als auch die Wahl der Düngemittel. Bei den biogenen Festbrennstoffen steht der Chlorgehalt der Pflanzenmasse im Zentrum der Bemühungen um eine düngungsbedingte Qualitätsverbesserung. Das liegt daran, dass das Chlorid ein wesentli-

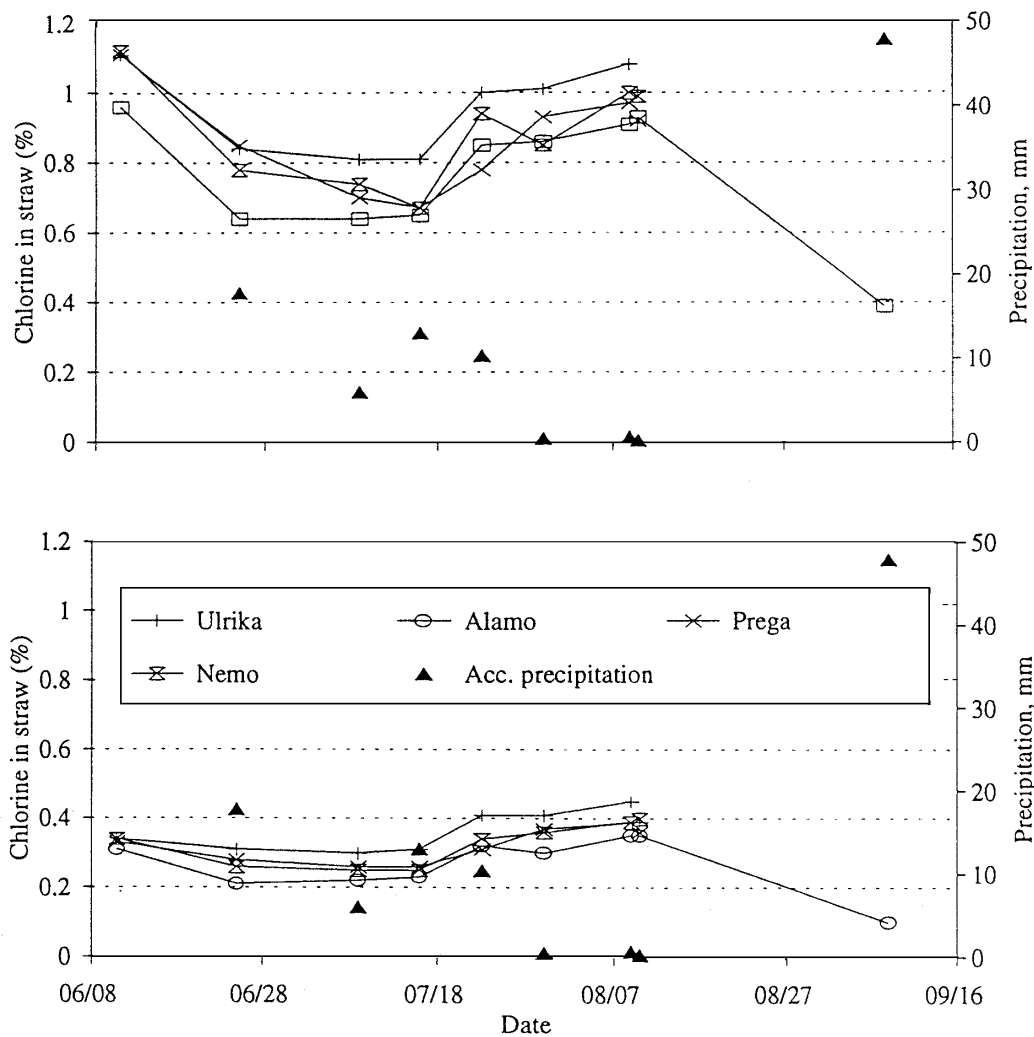


**Abb. 12** Wirkung der Kaliumdüngung (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) auf den Gehalt an qualitätsbestimmenden Elementen und Asche in 2jährigem Miscanthus (nach [54])

cher Begleitstoff bei der Kaliumdüngung ist. Der Verzicht auf chloridhaltige Düngemittel ist meist nur durch den Einsatz teurer sulfathaltiger Düngemittel möglich (vgl. hierzu Kap. 3.1.1, Tab. 5).

Bei der Düngung kann es zu einer Vielzahl von Wechselwirkungen kommen. LEWANDOWSKI [54] berichtet, dass eine chloridfreie Düngergabe von 400 kg K<sub>2</sub>O/ha gegenüber der Nullvariante bei Miscanthus nicht nur zu einem Anstieg der Kaliumkonzentration führt (+76 %), sondern auch beim Stickstoff-, Chlorid- und Aschegehalt einen erhöhten Elementgehalt in der Trockenmasse bewirken kann (Zunahme um 32, 133 bzw. 21 %, vgl. Abb. 12). Allerdings sind diese Wirkungen nicht überall wiederholbar. Vor allem auf trockenen Standorten konnte der o.g. Zusammenhang bei Getreide nicht bestätigt werden [74] [75].

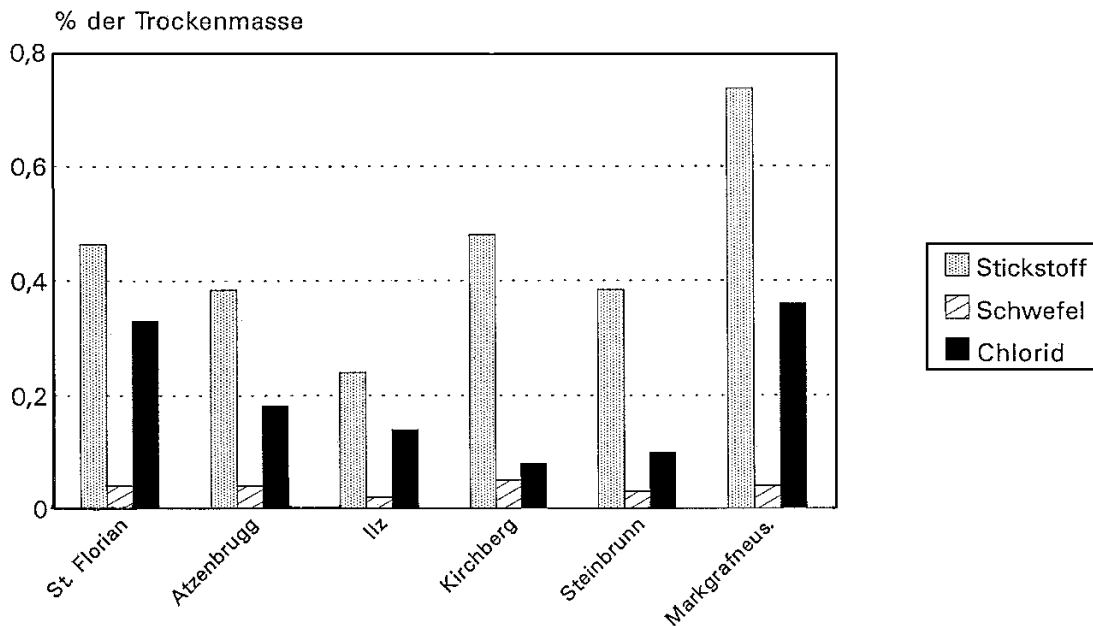
Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass insbesondere die Chlorkonzentration im Brennstoff von der Art und Höhe der Nährstoffversorgung abhängt. Dies geht auch aus Ergebnissen von SANDER [75] hervor, der von der Wirkung chlorhaltiger Kaliumdüngemittel (KCl) berichtet. Beim Wechsel zu einem chlorfreien Dünger (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) wurde bei gleicher Düngungsstufe (100 kg K<sub>2</sub>O) ein um mehr als die Hälfte abgesenkter Chlorgehalt im Stroh gefunden (Abb. 13). Ein ähnlicher Düngungseffekt wird auch von WIEKHANSEN [97] berichtet. Der Wechsel von Kaliumchlorid zum Kaliumsulfatdünger führt dabei offenbar auch nicht zu einem Anstieg der Schwefelkonzentration im Brennstoff [75].



**Abb. 13** Wirkung unterschiedlicher Chlorfrachten auf die Chlorkonzentration in der Trockenmasse von Getreidestroh verschiedener Arten und Sorten nach mehreren Regenereignissen (Precipitation). Abbildung oben: 90 kg Cl/ha; Abbildung unten: 0 kg Cl/ha [75]

**Bodenart und atmosphärische Deposition.** Neben den klimatischen Einflüssen (s.o.) sind eine Reihe weiterer standortlicher Ursachen für Qualitätsunterschiede denkbar, die vor allem mit dem Angebot an Nähr- und Schadelementen für die Pflanzenaufnahme zusammenhängen. In österreichischen Versuchen [83] wurden bei *Miscanthus* an sechs verschiedenen Standorten deutliche Unterschiede beim Chlor- und Stickstoffgehalt gemessen, während der Schwefelgehalt kaum verändert war (Abb. 14). Neben der Düngung sind hierfür vor allem unterschiedliche Bodenvorräte verantwortlich. Generell besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass Luftverunreinigungen und atmosphärische Depositionen die Ursache sind. Insbesondere in küstennahen Gebieten wurde von hohen Chlorfrachten durch Niederschläge berichtet. Auch bei den Schwermetalleinträgen sind beachtliche Standortunterschiede festzustellen (vgl. hierzu Kap. 3.3, ab S. 37).

**Pflanzenschutzmittel.** Der Einfluss von Pflanzenschutz- oder Forstschutzmitteln auf die Brennstoffqualität ist derzeit unklar. Das gilt vor allem für die direkte Wirkung durch



**Abb. 14** Konzentration von Stickstoff, Schwefel und Chlorid in Miscanthustrockenmasse an verschiedenen Standorten in Österreich [83]

Pestizidrückstände im Brennstoff, die je nach Art der Belastung (organisch oder anorganisch) unter Umständen im Verbrennungsprozess wieder unschädlich gemacht werden können. Pflanzenschutzmittel werden jedoch auch im Zusammenhang mit Qualitätsverbesserungen diskutiert. Beispielsweise führt eine Herbizidanwendung in Getreide zu einer geringeren Verunreinigung mit spätreifenden oder ausdauernden Unkräutern, die den Wassergehalt sowie andere Inhaltsstoffe im Gesamtaufwuchs beeinflussen können. Auch zur Beschleunigung der Strohabreife in Getreideganzpflanzen wird gelegentlich die Verwendung von Totalherbiziden diskutiert, allerdings sprechen die negativen ökologischen Auswirkungen eindeutig gegen eine solche Maßnahme.

**Acker- und waldbauliche Praxis.** Auch zu diesen Einflussmöglichkeiten liegen bislang kaum Erkenntnisse vor. Ein direkter Einfluss möglicher Variablen wie Reihenabstand, Bestandsdichte, Aussattiefe, etc. wurde bislang nicht festgestellt. In Versuchen mit verschiedenen Pappelarten, die in unterschiedlicher Bestandesdichte aufwuchsen (1.666 bzw. 10.000 Pflanzen pro ha), konnten keine signifikante Veränderung beim Kalium-, Stickstoff-, Schwefel- und Aschegehalt sowie beim Heizwert festgestellt werden [20]. Einflüsse sind jedoch dennoch denkbar, wenn ein Anbau in Mischkulturen oder mit Untersaaten erfolgt.

### 2.3.2 Einflüsse während der Bereitstellungsphase

Anders als in der Wachstumsphase werden während der Bereitstellung hauptsächlich die physikalischen Eigenschaften der biogenen Festbrennstoffe ausgeprägt. Das liegt

daran, dass durch die Einflüsse in dieser „technologischen“ Phase der Brennstoff in erster Linie mechanisch beansprucht wird. Zur Bereitstellungsphase zählt auch die Ernte sowie alle Maßnahmen, durch die die Entfernung vom Wuchsort bis zum Ort der energetischen Verwertung überbrückt wird. Da es sich sowohl um eine räumliche als auch eine zeitliche Überbrückung handelt, kommt es während der unvermeidlichen Zwischenlagerungsschritte auch zu mikrobiologischen Veränderungen und Abbauprozessen, durch die wiederum auch chemisch-stoffliche Eigenschaften betroffen sein können. Daneben sind im Zuge von Aufbereitungsprozessen wie Pelletierung, Separierung, Trocknung, Additivierung, etc. auch gezielte oder unbeabsichtigte inhaltsstoffliche Veränderungen möglich (z. B. Verunreinigungen, Zuschlagstoffe, etc.), auch wenn es sich ausschließlich um naturbelassene Brennstoffe handelt. Nachfolgend werden die für die chemisch-stofflichen Merkmale relevanten Vorgänge in dieser Phase beschrieben. Über Einflüsse auf die physikalischen Merkmale wird hier nur am Rande berichtet (vgl. hierzu: [39]).

**Ernteverfahren.** Die Art der Ernte und die verwendeten Erntemaschinen wirken sich vor allem auf physikalische Merkmale des Brennstoffs aus. Sie beeinflussen die Struktur und die Dichte aber auch den Grad an Fremdverschmutzung oder die Lagerstabilität des Erntegutes. Generell sind drei Ernteformen zu unterscheiden: Häcksel-/Hackgut, Ballen und Pellets. Innerhalb der Aufbereitungsart sind große Qualitätsunterschiede möglich. Bei Holzhackgut, beispielsweise, ist die Größenverteilung in erster Linie von den verwendeten Hackern und deren Betriebsart abhängig. Schneckenhacker liefern in der Regel ein grobes Hackgut mit fester Kantenlänge, während bei Scheibenrad- oder Trommelhackern die Schnittlänge zwischen 4 und 80 mm einstellbar ist. Analog dazu werden auch mit den Erntemaschinen für Kurzumtriebsplantagen - je nach Art der verwendeten Hackertechnik - unterschiedliche Brennstoffqualitäten hergestellt.

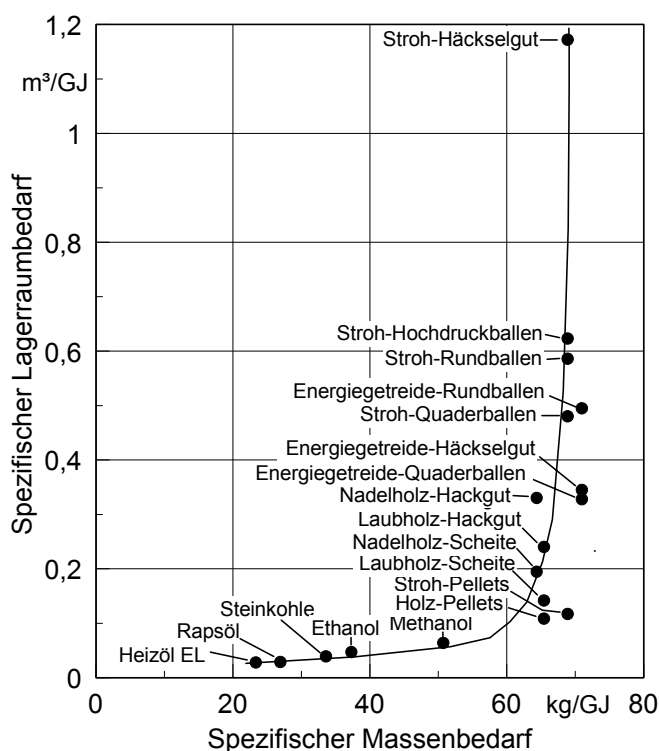
Für die Beurteilung der Qualität kommt allerdings weniger die mittlere Kantenlänge in Frage. Beim Brennstoffaustrag und bei der automatischen Förderung ist vielmehr die Anzahl überlanger Teilchen von Bedeutung. Das geht aus schwedischen Untersuchungen von MATTSSON [59] hervor. Die Versuche mit verschiedenen Holzschüttgütern ergaben hierfür eine starke Abhängigkeit vom Anteil der langen und dünnen Partikel, vor allem wenn diese noch verzweigt sind.

Bei den Halmgütern steht für jede Materialform (Häckselgut, Körner, Ballen, Pellet) eine Vollerntemaschine zur Verfügung. Wenn ein absätziges Ernteverfahren gewählt wird, so besteht die Möglichkeit einer Vor- oder Nachtrocknung im Feld. Das gilt auch für die Waldholz- oder Kurzumtriebsplantagennutzung. Bei Getreide kann außerdem durch getrennte Ernte von Körnern und Stroh mit dem Mähdrescher eine gezielte Qualitätsabstufung im Brennstoff vorgenommen werden, da die Körner in der Regel deutlich geringere Gehalte an Kalium, Chlor und Asche aufweisen (Tab. 4). Beim Stickstoffgehalt ist allerdings das Stroh günstiger zu bewerten.

**Tab. 4** Unterschiedliche Asche- und Elementgehalte von Korn und Stroh bei Getreide [77]. Angaben in % i.d.TM

	Wintergerste		Sommergerste		Weizen		Roggen	
	Stroh	Korn	Stroh	Korn	Stroh	Korn	Stroh	Korn
Asche	4,2	1,9	4,8	2,3	3,5	1,4	3,1	1,5
K	1,19	0,39	1,27	0,52	0,76	0,35	0,98	0,43
Ca	0,43	0,05	0,31	0,06	0,25	0,03	0,33	0,04
Si	--	--	0,64	--	0,65	0,005	--	--
Cl	0,67	0,12	0,69	0,15	0,36	0,07	0,19	0,08
S	--	--	0,1	0,1	0,1	0,1	--	--
N	--	--	0,76	1,72	0,44	2,13	--	--

**Brennstoffaufbereitung.** Eine nachträgliche Sortierung oder Zerkleinerung von Schüttgutbrennstoffen mit ungünstigen Förder- und Rieseigenschaften ist in der Praxis bereits zum Teil üblich. Sie stellt aber meist eine sehr kostenaufwendige Lösung dar. Das Gleiche gilt auch für die nachträgliche Aufbereitung zu Pellets oder Briketts. Hierbei stehen im wesentlichen die verbesserte Lagerfähigkeit, der deutlich geringere Lagerraumbedarf sowie die günstigen Eigenschaften bei Transport, Umschlag und Beschickung im Vordergrund. Durch sie erfolgt eine gewisse Kompensation der Mehrkosten bei der Herstellung [38]. Einen Überblick über die erzielbaren Dichteunterschiede bei biogenen Brennstoffen gibt Abb. 15.



**Abb. 15** Spezifischer Massen- und Lagerraumbedarf verschiedener Brennstoffe bei 15 % Wassergehalt [38]

Die Pelletierung oder Brikettierung kann jedoch nicht nur die physikalischen Eigenschaften der Brennstoffe beeinflussen. Durch thermische Einwirkung und durch Zuschlagstoffe bei der Verarbeitung sind auch chemisch-stoffliche Veränderungen möglich. Bei Verwendung von Pelletierhilfsmitteln kann die Bandbreite, innerhalb der der Wassergehalt schwanken darf, vergrößert werden. Solche Bindemittel sind in der Regel ebenfalls biogenen Ursprungs. In Deutschland sind hierfür laut Bundes-Immissionsschutzgesetz lediglich Mittel aus Stärke, pflanzlichem Paraffin oder Melasse erlaubt (1. BImSchV §3

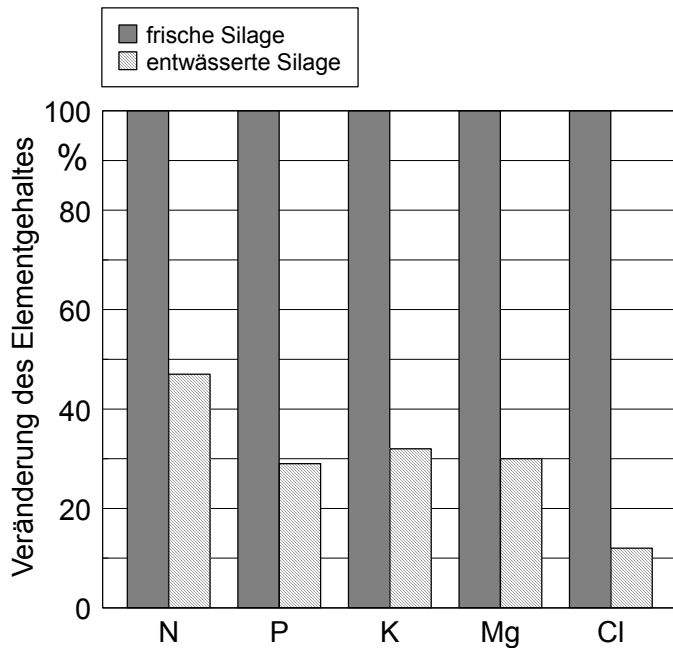


(4)) [8]. Vorbehaltlich einer Zulassung kommen als weitere Zuschlagstoffe auch Ligninsulfonate („Sulfitablauge“ als Reststoff der Papierherstellung) oder Branntkalk in Frage. Ligninsulfonat enthält als Bindemittel ca. 6 bis 9 % Schwefel i.d.TM. Bei praxisüblichen Zuschlagsmengen von ca. 2 Gew% (50 % Wassergehalt) wird der Schwefelgehalt im Stroh um ca. 70 % erhöht. Der Vorteil bei der Verwendung von Bindemitteln liegt in der Verminderung des Feinanteils und in der Verbesserung der Abriebfestigkeit von Presslingen.

Neben der Zugabe von Bindemitteln kommen auch noch weitere Zuschlagstoffe in Frage, die das Ascheerweichungsverhalten günstig beeinflussen sollen. Beispielsweise konnte nachgewiesen werden, dass ein 4 %iger Kaolinzuschlag zu Stroh Brennstoffen eine schmelzpunkterhöhende Wirkung um teilweise mehrere Hundert Grad Celsius besitzt [87]. Das Gleiche gilt auch für Zuschläge von kalzium- und magnesiumhaltigen Oxiden oder Carbonaten [72].

Auf eine ähnliche Verbesserung der feuerungstechnischen Eigenschaften zielt auch die Arbeit von BAKKER UND JENKINS [4] ab. Die Autoren stellen fest, dass eine nachträgliche Reduktion unerwünschter Schadelemente im Brennstoff prinzipiell auch in einer stationären Aufbereitungsanlage erfolgen kann. Auswaschungsversuche wurden mit Reisstroh durchgeführt, wobei sich zeigte, dass die erforderliche Wassermenge für eine 75 %ige Minderung des Gehaltes an anorganischen Elementen bei 17,5 m<sup>3</sup> Wasser je Tonne Stroh liegt [4]. Durch mechanische Entwässerung wird anschließend der Wassergehalt von 77 auf ca. 50 % gesenkt, wodurch eine weitere Absenkung der Elementgehalte erfolgt. Beim Chlor- und Kaliumgehalt führt eine solche Maßnahme zu einer Gehaltsminderung von 95 %. Das Kosten-Nutzenverhältnis solcher Maßnahmen muss allerdings kritisch beurteilt werden. Derartige Konzepte sind allenfalls dann sinnvoll, wenn kostenlose Kraftwerksabwärme für die Trocknung des abgepressten Brennstoffs verfügbar ist. Das Interesse an solchen Aufbereitungsverfahren besteht vor allem bei der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, da hierbei unter anderem auch die Qualität der anfallenden Mischasche günstig beeinflusst werden soll, damit diese auch weiterhin als Zuschlagstoff bei der Zementherstellung Verwendung finden kann. Aus diesem Grund finden derzeit in Dänemark weitergehende Erprobungen dieses Vorbehandlungsverfahrens statt [49].

Neben der Aufbereitung von abgereifter Biomasse (z. B. Stroh) kann auch eine Aufbereitung von grün geerntetem Halmgut in Frage kommen, zumal die Trockenmasseerträge hierbei deutlich höher sind (vgl. hierzu auch Abb. 9, S. 19). Solches Erntegut muss feucht konserviert werden (Silage). Der Wassergehalt von ca. 60 bis 75 % muss kurz vor der energetischen Verwertung durch mechanisches Abpressen auf einen Wert von möglichst unter 50 % gesenkt werden. Als günstiger Nebeneffekt wurde bei entsprechenden Versuchen mit einer Schraubenpresse auch ein deutlicher Verlust an unerwünschten Elementen beobachtet. SCHEFFER [82] berichtet von einer Absenkung des Chlorgehaltes auf nur 12 % des Ausgangswertes von Roggensilage. Bei Kalium und Stickstoff ging der Gehalt auf 32 bzw. 47 % zurück, wobei die Elemente mit dem Press-



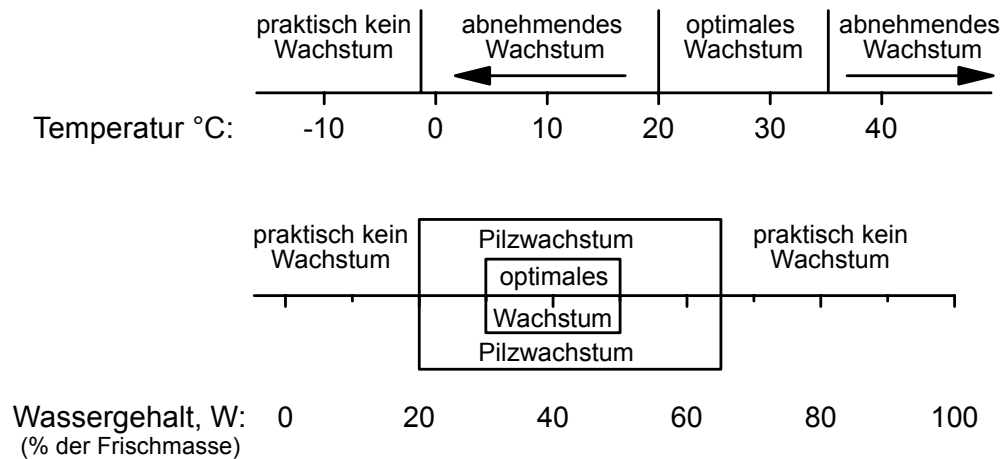
**Abb. 16** Einfluss der mechanischen Entwässerung von Roggensilage auf den Elementgehalt in der Trockenmasse (nach [82])

saft abgeführt werden müssen. Allerdings ist zu vermuten, dass diese Absenkung nicht ganz so hoch ausfällt, wenn als Bezugsgröße das auf dem Feld vollständig abgereifte Getreide gewählt wird, da dieses durch natürliche Niederschläge während der Abreife qualitätsverbessernden Auswaschungseffekten ausgesetzt ist (vgl. Kap. 2.3.1).

**Lagerung.** Die bei der Lagerung veränderlichen chemisch-stofflichen Brennstoffeigenschaften sind hauptsächlich der Wassergehalt und die Pilzsporenbildung. Letztere zählt vor allem aufgrund der direkten Einwirkungen auf die menschliche Gesundheit zu den umweltrelevanten Qualitätsparametern. Die Zusammensetzung der Pilzgemeinschaften variiert und ist abhängig von der Materialart, Teilchengröße, Haufengröße und Klima. Bei Holz wird unterschieden zwischen Pilzen, die die Moderfäule verursachen (Ascomyceten und Deuteromyceten) und den Weiß- und Braunfäulepilzen (Basidiomyceten). Bei längerer Lagerung sind letztere die Hauptverursacher des Holzabbaus [58]. Während Moder- und Braunfäulepilze hauptsächlich Cellulose und Hemicellulose zerstören, sind die Weißfäulepilze auch zum Abbau des Lignins fähig. Dieser Abbau kann auch selektiv erfolgen, so dass mit dem Massenverlust ein überproportionaler Brennstoffwert verloren geht. Lignin besitzt mit ca. 28,8 MJ/kg einen deutlich höheren Heizwert als Cellulose (ca. 17,3 MJ/kg [57]) und ist mit einem Anteil von ca. 25 % in der Holz- und 15 % in der Strohmasse enthalten. Generell ist das Lignin jedoch ein schwer abbaubares Material, so dass sich sein Anteil in den meisten Fällen während der mehrmonatigen Lagerung um ca. 1 bis 3 Prozentpunkte erhöht [15]. Schimmelpilze (*Aspergillus*, *Penicillium*, u.a.) tragen dagegen nur unwesentlich zum Substanzabbau bei, da sie zunächst nur die gelösten Nährstoffe auf der Oberfläche der Biomasse nutzen, so dass es nicht zum Abbau von Zellwandkomponenten kommt. Diese Pilze sind jedoch aufgrund ihrer gesundheitlichen Auswirkungen für den Menschen schädlich.

Das Pilzwachstum setzt ab einem Wassergehalt von ca. 20 % ein. Optimale Bedingungen herrschen zwischen 30 und 50 %, während eine absolute Wassersättigung (ca. 65 %) wieder zum Stillstand führt. Die Wachstumstemperaturen können innerhalb eines relativ weiten Bereiches schwanken. Allerdings finden die meisten Pilze ihr Optimum zwischen 20 und 35 °C (Abb. 17). Holzzerstörende Pilze gedeihen am besten im Bereich

Das Pilzwachstum setzt ab einem Wassergehalt von ca. 20 % ein. Optimale Bedingungen herrschen zwischen 30 und 50 %, während eine absolute Wassersättigung (ca. 65 %) wieder zum Stillstand führt. Die Wachstumstemperaturen können innerhalb eines relativ weiten Bereiches schwanken. Allerdings finden die meisten Pilze ihr Optimum zwischen 20 und 35 °C (Abb. 17). Holzzerstörende Pilze gedeihen am besten im Bereich



**Abb. 17** Allgemeine Temperatur- und Wassergehaltsansprüche holzabbauender Pilze (nach [33])

von pH 4,5 bis 5,5. Das entspricht auch dem natürlichen pH-Bereich im Holz. Die flüchtigen Öle mancher Hölzer oder auch die Gerbsäure der Eiche können sich hemmend auf das Pilzwachstum auswirken. Dagegen wirkt Baumharz lediglich als mechanischer Eindringwiderstand gegen Pilzhyphen.

Auch Halmgut bietet trotz des zum Erntezeitpunkt geringeren Wassergehaltes oft günstige Voraussetzungen für Pilzwachstum. Bei der Ballenpressung, die das vorherrschende Ernteverfahren darstellt, wird das Material höchstmöglich verdichtet, wodurch der Luftaustausch im Material fast vollständig zum Erliegen kommt. Tendenziell ist Wiesenheu aufgrund der größeren Verdichtbarkeit und der höheren Wassergehalte stärker verpilzungsgefährdet als Stroh oder andere Halmgüter, die aus abgestorbenen Pflanzenteilen bestehen. Deshalb kommt es auch bei der Strohernte auf eine möglichst geringe Verunreinigung durch grüne Begleitflora an, da deren erhöhter Wassergehalt zu nesterartiger Schimmelbildung führen kann. Für eine sichere Langzeitlagerung werden Wassergehalte von ca. 15 % gefordert.

Zur Begrenzung von gesundheitlichen Schäden sind eine Reihe von Primärmaßnahmen zu nennen, durch die günstige Bedingungen für die Selbsterwärmung und das Pilzwachstums vermieden werden. Hierzu zählen unter anderem:

- geringstmöglicher Wassergehalt bei der Einlagerung
- geringe Lagerdauer
- Schutz vor Niederschlag
- Luftzutritt zur Kühlung und Feuchtigkeitsabfuhr (ggf. aktive Belüftung und Trocknung)
- optimale Schütthöhe
- möglichst grobe Materialstruktur bei Langzeitlagerung
- Nadeln und Blätter im (feuchten) Brennstoff vermeiden

Prinzipiell kann auch die Verwendung von chemischen Zuschlagstoffen (z. B. Ethanol, Ameisensäure, Essigsäure, etc.) die Umsetzungsprozesse und Schimmelbildung verhindern. Technische Schwierigkeiten bestehen jedoch unter anderem in der gleichmäßigen Applikation des Konservierungsmittels [94]. Ein luftdichter Abschluss zur besseren Nachverteilung über die Gasphase ist wirtschaftlich kaum vertretbar. Da auch die Handhabung der kostspieligen Chemikalien aus Umwelt- und Arbeitsschutzgründen problematisch ist, scheidet die chemische Konservierung in der Praxis aus. Deutlich günstiger ist dagegen das o.g. Verfahren der Silagekonservierung zu beurteilen (vgl. S. 28), da hier ein Pilzwachstum praktisch völlig unterbunden wird und die Kosten niedrig sind.

Neben den Primärmaßnahmen sind eine Reihe von sekundären Schutzmaßnahmen gegen die Verbreitung von Pilzsporen möglich. Hierzu zählen die Vermeidung von Luftbewegungen, die Mechanisierung und Automatisierung von Umschlagprozessen, die Ausrüstung von Fahrzeugkabinen mit Mikrofiltern, die Benutzung von hinterlüfteten Schutzhelmen mit mikrofiltrierter Atemluft und andere.

### 3 Eintragspfade für Schadstoffe

Die Konzentration umweltrelevanter Inhaltsstoffe in biogenen Brennstoffen spiegelt in der Regel auch den Grad der Schadstoffbelastung am Wuchsort wider. Diese Belastung stellt das Ergebnis vieler Ein- und Austragsprozesse dar (Abb. 18). Einmal akkumulierte Schadstoffe können durch Mineralisierungs- und Festlegungsvorgänge in unterschiedlichem Maße pflanzenverfügbar werden. Obwohl auch hier Eingriffe und Steuerungsmaßnahmen denkbar sind (z. B. pH-Wert Regulierung), kommt vor allem der Vermeidung von bewirtschaftungsbedingten (primären) Ein- und Austrägen eine zentrale Bedeutung für die Qualitätssicherung zu. Diese Ein- und Austräge sollen nachfolgend näher betrachtet werden. Zur Einordnung und Bewertung ist aber auch eine Gegenüberstellung mit den natürlichen Einträgen den wichtig. Daher werden auch hierzu nachfolgend einige Angaben gemacht. Aufgrund der Begrenztheit der verfügbaren Daten bleibt die Analyse der Eintragspfade jedoch lückenhaft. Sekundäre Austräge, d. h. die als Folge einer bestimmte Bewirtschaftungsmaßnahme auftretenden oder verstärkten Erosions- und Auswaschungsströme, werden hier vereinfachend nicht betrachtet.

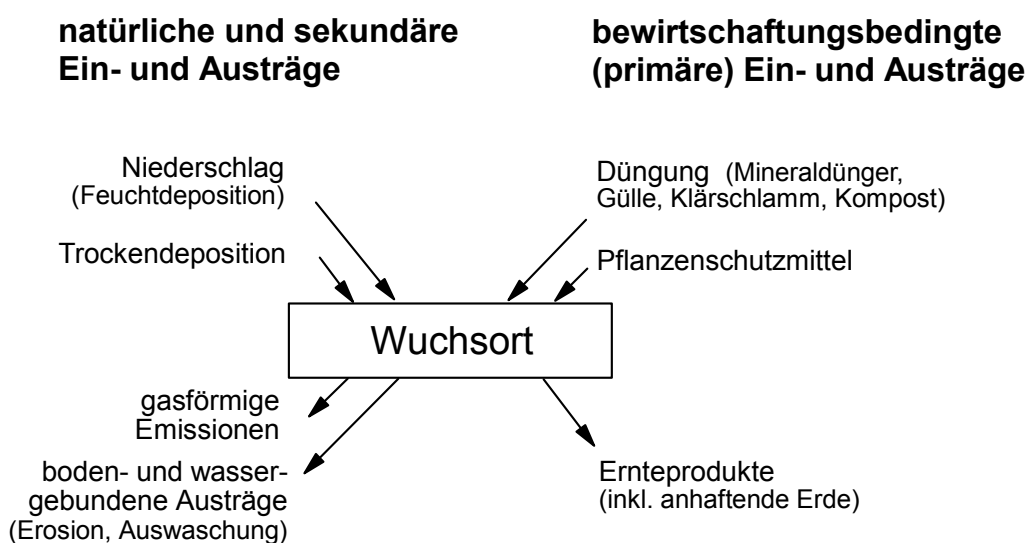


Abb. 18 einaus.preEin- und Austragspfade für Schadstoffe am Wuchsort

#### 3.1 Einträge über Düngemittel

Zur Qualitätsverbesserung und Ertragssteigerung der pflanzlichen Produktion werden in großem Umfang Düngemittel auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgebracht. In Deutschland wurden im Wirtschaftsjahr 1993/94 1,61 Mio. t Stickstoff, 0,18 Mio. t Phosphor und 0,53 Mio. t Kalium abgesetzt [85] (umgerechnet in Rein-Nährelementmengen). Gemäß den statistischen Angaben des Umweltbundesamtes betrug der Handelsdünger-

verbrauch in 1996/97 (umgerechnet in Rein-Nährelementmengen) durchschnittlich etwa 107 kg N, 11 kg P und 33 kg K pro Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche, wobei seit 1988 eine abnehmende Tendenz vorliegt [93]. Entgegen diesem Trend gewinnt die Entsorgung von Reststoffen wie Kompost oder Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzten Flächen immer mehr an Bedeutung, was zu zusätzlichen Nährstoff- aber auch Schadstoffeinträgen führt.

### 3.1.1 Mineraldünger

Düngemittel enthalten neben den Makronährstoffen auch Spurenelemente, welche in kleinen Mengen für die Pflanze lebensnotwendig, in großen Mengen aber ökologisch bedenklich sind und die Qualität von Brennstoffen negativ beeinflussen können. Dies kann zum einen durch die Höhe der Düngergabe oder auch durch die Wahl des Düngemittels geschehen. Die Auswahl der Düngemittel ist vielfältig. Nachfolgend sollen lediglich die mengenmäßig bedeutendsten Dünger betrachtet werden, deren Einsatz auch in einer Modellfallbetrachtung zum Vergleich der Massenströme unterstellt wird (vgl. Kap. 3.4). Die vollständigen Angaben zu den Schadstoffbelastungen auch der übrigen Düngemittel werden in Anhang A zusammengestellt.

**Chlor.** Der Chlorgehalt ist nach dem derzeit gültigen Düngemittelrecht nicht deklarationspflichtig. Es ist aber davon auszugehen, dass in den gängigen Einnährstoffdüngern für Stickstoff und Phosphor nur geringe Chlormengen enthalten sind. Das Chlorid gelangt dagegen hauptsächlich über die Kalium- und Magnesiumdüngung in den Boden. Bei diesen Düngern wird die Düngungsform (chlorid- oder sulfathaltig) in der Regel angegeben (Tab. 5). Da Chlorid im Boden kaum adsorbiert wird, stellt sich in der Regel ein Gleichgewicht zwischen Zufuhr und niederschlagsbedingter Auswaschung ein.

**Tab. 5** Chlor- und Schwefelgehalt in Kaliumdüngemitteln

Düngemittel	K-Gehalt (%)	Mg-Gehalt (%)	S-Gehalt (%)	Cl-Gehalt (%)
40er Kali	33,1	--	--	41,1-48,2 <sup>1)</sup>
50er Kali	41,3	--	--	43,5-46,5 <sup>2)</sup>
60er Kali	49,6	--	--	45,0
Korn Kali	33,1	3,0	4,0	45,1
Kalimagnesia	24,8	3,6	18,0	--
Kalisulfat	41,3	--	18,0	--

<sup>1)</sup> 20 bis 30 % NaCl-Gehalt

<sup>2)</sup> 10 bis 15 % NaCl-Gehalt

**Fluor.** Unter den Halogenen kommt Fluor im Vergleich zu Chlor in der Natur viel seltener vor. Da es zudem in Form von Flussspat ( $\text{CaF}_2$ ) relativ stark in Böden festgelegt wird, ist die Pflanzenverfügbarkeit besonders niedrig. Die Fluorgehalte in Düngemitteln wurden in

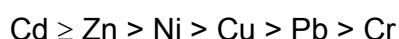
größerem Umfang bislang nur vom Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) untersucht. Einige ausgewählte Ergebnisse aus dieser Untersuchung werden für die mengenmäßig wichtigsten Düngemittel in Tab. 6 dargestellt. Fluor ist vor allem in Phosphatdüngern enthalten.

**Tab. 6** Fluorgehalte in den wichtigsten Düngemitteln [18]

Nährstoff	Düngemittel	n <sup>1)</sup>	mittl. F-Gehalt [mg/kg TS]	Schwankungsbereich (mg/kg TS)		Nährstoffgehalte (N, P bzw. K) [%]
				Min.	Max.	
N	Ammonsalpeter	5	136	19	142	26
P	Triplesuperphosphat	3	17.000	12.400	18.400	19,8
K	Kaliumchlorid	10	7,0	<4	56	32-50
Ca	Kalkdünger	3	1.140	44	3.400	

<sup>1)</sup> n = Probenumfang in der Untersuchung

**Schwermetalle** sind alle Metalle mit einer Dichte über 5 g/cm<sup>3</sup>. Schwermetallgehalte im Erntegut sind abhängig von der Schwermetallkonzentration im Boden, den Bodeneigenschaften sowie den Anbau- und Ertragsverhältnissen. Je niedriger der pH-Wert des Bodens, desto höher ist die Schwermetalllöslichkeit, -mobilität und -pflanzenverfügbarkeit. Durch die Kalkdüngung und die damit verbundene Erhöhung des pH-Werts kann eine Festlegung von Schwermetallen im Boden erreicht werden. Die Mobilität der einzelnen Elemente in der Bodenlösung ist sehr unterschiedlich und steigt gewöhnlich in folgender Reihe [81]:



Der Schwermetallgehalt in Mineraldüngern (Tab. 7) ist stark abhängig vom Aufbereitungsprozess und von den Ausgangsprodukten. Während N- und K-Dünger kaum nennenswerte Belastungen aufweisen, sind die Schwermetallfrachten der anorganischen P-Dünger, vor allem bezüglich der Elemente Cd, Cr und Zn vergleichsweise hoch. Auch bei der gezielten Düngung mit Mikronährstoffen wie Cu, Mn und Zn können ebenfalls erhöhte Schwermetallfrachten in die Kulturböden eingetragen werden. Darüber hinaus sind hohe Cu- und Zn-Gehalte in den Wirtschaftsdüngern (Gülle, Mist) aus der Schweine- und Rinderhaltung festgestellt worden. Das liegt unter anderem daran, dass diese Elemente dem Futter zur Leistungssteigerung zugesetzt werden [98] [99].

**Tab. 7** Schwermetallgehalte in ausgewählten Düngemitteln [12] [84]. Angaben in mg/kg TS

Düngemittel	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Kalkammonsalpeter	0,38	3,95	7,07	2,65	38,18	64,03	
Triple superphosphat	28,10	256	23,8	34,00	2,10	471	
60er Kali (Kaliumchlorid)	<0,10	4,20	2,9	1,10	<1,00	2,9	0,060
kohlensaurer Kalk	0,50	6,90	8,2	4,60	7,30	58,0	

Für eine Vielzahl weiterer Düngemittel liegen ebenfalls Ergebnisse zu den Schwermetallkonzentrationen vor. Die vollständige Recherche dieser Daten wird in Anhang A zusammengestellt. Dort werden auch die spezifischen Schadstoffgehalte je kg Reinnährelement angegeben. Erst durch diese Berechnungen lassen sich die jeweiligen Düngemittel untereinander hinsichtlich ihres Schwermetallgefährdungspotentials vergleichen. Derartige Vergleiche sind vor allem auch für die Bewertung von Feuerraumaschen als Pflanzendünger nützlich. Diese Thematik wird jedoch in der vorliegenden Untersuchung nicht vertieft.

### 3.1.2 Klärschlamm

Die Klärschlammausbringung wird durch die Klärschlammverordnung von 1992 [16] rechtlich geregelt. Darin werden Schadstoff-grenzwerte für den Klärschlamm festgelegt. Für leichte Böden, deren Tongehalt unter 5 % und für Böden, deren pH-Wert zwischen 5 und 6 liegt, gelten bezüglich der Elemente Cadmium und Zink strengere Grenzwerte. Außerdem ist die zulässige Höchstaufbringungsmenge begrenzt (5 t TM/ha in 3 Jahren). Zum Chlor- und Fluorgehalt werden keine Grenzwerte genannt, jedoch gelten Höchstgehalte für polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Dibenzodioxine/Dibenzofurane (PCDD/PCDF) und halogenorganische Verbindungen (als AOX). Die üblichen Schwermetallgehalte werden in Tab. 8 zusammengestellt und mit den Grenzwerten der Klärschlammverordnung verglichen. Die Schwermetallgehalte können regionalen und saisonalen Schwankungen unterliegen. Nach Mittelung aus dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz kommt es in Bayern jedoch lediglich bei 5 % der Klärschlämme zu Grenzwertüberschreitungen.

**Tab. 8** Mittlere Schwermetallgehalte in Klärschlämmen (in mg/kg TS) und deren prozentuale Ausschöpfung der Grenzwerte nach der Klärschlammverordnung (Quellen: [16], [22], [55])

Herkunft bzw. Grenzwert	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
<i>Grenzwert (AbfKlärV 1992)</i>	10	900	800	200	900	2.500	8
Durchschnitt für Deutschland <i>Grenzwertausschöpfung</i>	2,5 25%	91 10,1%	223 27,9%	38 19,0%	159 17,7%	1.318 52,7%	1,4 17,5%
Bayern (1997) <i>Grenzwertausschöpfung</i>	1,5 15,0%	52 5,7%	316 39,5%	30 15,0%	71 7,8%	1.022 40,9%	1,0 12,5%



### 3.1.3 Kompost

Seit dem 1.10.1998 wird die Ausbringung von Komposten durch die Bioabfallverordnung gesetzlich geregelt [9]. Ähnlich wie bei der Klärschlammverordnung werden Schadstoffgrenzwerte für den Bioabfall und Höchstaufbringungsmengen (30 t TM/ha in 3 Jahren) festgelegt. Grenzwerte bezüglich des Chlor- und Fluorgehalts existieren auch in der Bioabfallverordnung nicht. Außerdem ist eine gemeinsame Ausbringung von Klärschlämmen und Bioabfällen auf der selben Fläche innerhalb des Zeitraums von drei Jahren unzulässig.

Wie beim Klärschlamm unterliegen die jeweiligen Komposte starken Qualitätsschwankungen. In Tab. 9 werden die mittleren Elementkonzentrationen in verschiedenen Kompostarten zusammengestellt. Die höchsten Schadstoffgehalte sind demnach bei Komposten aus Straßengrasschnitt anzutreffen (vor allem bei Ni und Pb), wobei allerdings längerfristig Verbesserungen infolge geänderter Kraftstoffqualitäten (vor allem beim Blei) zu erwarten sind. Nochmals höhere Schwermetallwerte kommen lediglich in Klärschlammkomposten vor (hier nicht dargestellt), die jedoch der Klärschlammverordnung unterliegen. Im Vergleich zum eigentlichen Klärschlamm sind die Schwermetallgehalte im Kompost aber erheblich geringer. Das gilt auch gegenüber den phosphathaltigen Düngemitteln. Aufgrund der geringeren Aufwandmengen sind die Gesamtschadstofffrachten bei der Phosphatdüngung jedoch deutlich niedriger. Über den Chlor- und Fluorgehalt in Komposten und Klärschlämmen ist bislang wenig berichtet worden. Lediglich der Cl-Gehalt lässt sich aus einer Weihenstephaner Untersuchung von insgesamt 29 Biokomposten abschätzen [36]. Er liegt im Mittel bei 0,7 % i.d.TM (0,4 bis 1,1 %).

**Tab. 9** Mittlere Schwermetallgehalte in Komposten aus Abfällen (in mg/kg TM) und deren prozentuale Grenzwertausschöpfung nach der Bioabfallverordnung [9]

Kompostart/Grenzwert (Bio-AbfV)	n	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
<i>Grenzwert GW 1 der BioAbfV<sup>1)</sup></i>		1,5	100	100	50	150	400	1
<i>Grenzwert GW 2 der BioAbfV<sup>1)</sup></i>		1	70	70	35	100	300	0,7
Straßenbegleitflächenkompost <sup>2)</sup>	46	1,2	85	92	62	187	283	0,4
<i>Grenzwertausschöpfung*</i>		80%	85%	92%	124%	125%	71%	40%
Pflanzenabfallkompost <sup>3)</sup>	353	0,97	42	32	18	61	163	0,33
<i>Grenzwertausschöpfung*</i>		65%	42%	32%	36%	41%	41%	33%
Bioabfallkompost <sup>3)</sup>	511	0,73	45	38	23	74	222	0,27
<i>Grenzwertausschöpfung*</i>		49%	45%	38%	46%	49%	56%	27%

<sup>1)</sup> Quelle: Bioabfallverordnung [9], Ausbringungsmenge: 20 t TM/(ha·3a) (GW 1) bzw. 30 t TM/(ha·3a) (GW 2)

<sup>2)</sup> Quelle: TABASARAN et al. 1993 [89]

<sup>3)</sup> Quelle: WINTZER et al. 1996 [99]

\* Ausschöpfung nach dem Grenzwert 1  
n = Probenumfang in der Untersuchung

### 3.2 Einträge über Pflanzenschutzmittel

Obgleich ein quantitativ bedeutender Schwermetall- oder Chlorideintrag durch Pflanzenschutzmittelanwendungen (Herbizide, Fungizide und Insektizide) nicht zu erwarten ist, wurden die entsprechenden Basisdaten auch für diesen Bereich zusammengestellt. Schwermetalle können in Pflanzenschutzmitteln als Verunreinigung, als Wirkstoff, als Wirkstoffbestandteil oder als Pflanzennährstoff enthalten sein. Untersuchungen haben gezeigt, dass Schwermetalleinträge über Pflanzenschutzmittel in der Gesamtbilanz vor allem dann zu vernachlässigen sind, wenn die kritischen Elemente lediglich als Verunreinigung im Pflanzenschutzmittel vorliegen [48]. Erfüllen die Schwermetalle jedoch eine funktionelle Wirkung (z. B. Kupfer, Zink und Mangan), liegen meist erhöhte Konzentrationen vor (Tab. 10). Besonders betroffen sind vor allem Flächen im Hopfen- und Weinbau, auf denen die entsprechenden Pflanzenschutzmittel (als Fungizide) eingesetzt werden. Auch schwefelhaltige Präparate werden ausgebracht. Blei-, arsen- und quecksilberhaltige Pflanzenschutzmittel sind dagegen in Deutschland nicht zugelassen.

**Tab. 10** Schwermetallgehalte in Pflanzenschutzmitteln [48]

Element	in Pflanzenschutzmitteln, bei denen das Element eine chemische Funktion erfüllt (in mg je kg Präparat)	als Verunreinigung (mg/kg)
Cu	100.000 - 600.000	5 - 250
Zn	70.000 - 300.000	2 - 300
Mn	2.000 - 200.000	5 - 700
Pb	---	0 - 550
Cd	---	0 - 400

Da eine genauere Differenzierung nach Wirkstoffen oder Handelsnamen nicht vorlag und auch keine Angaben zu den Elementen Chlor und Schwefel gemacht werden, mussten die jeweiligen Elementgehalte anhand der Summenformeln für die Wirkstoffe (nach „Pesticide Manual“ [91]) bestimmt werden. Die Ergebnisse werden für die mengenmäßig bedeutendsten Wirkstoffe in Anhang A zusammengestellt. Allerdings handelt es sich hierbei lediglich um die Chlor-, Schwefel- und Schwermetallgehalte, die mit dem Wirkstoff angeliefert werden. Über die Konzentrationen in den Begleitstoffen (z. B. Tenside, Emulgatoren, Frostschutz- und Lösungsmittel) kann keine Aussage gemacht werden.

Generell gilt, dass Herbizide chlorhaltige Verbindungen enthalten können, während mit Fungiziden und Insektiziden gelegentlich auch Schwermetalle (Zn, Mn) bzw. Schwefel ausgebracht werden. Gegenüber der Nahrungsmittelproduktion besteht im Energiepflanzenanbau jedoch durchweg eine Tendenz zu verringerten Pflanzenschutzmittelaufwendungen, da sich die Produktionsziele (Qualitätsmerkmale, Ertragsbestandteile) zwischen Nahrungs- und Rohstoffanbau deutlich unterscheiden.

### 3.3 Einträge über trockene und feuchte Depositionen

Mit den Niederschlägen werden regelmäßig geringe Stofffrachten in den Boden eingetragen (feuchte Depositionen). Unter trockenen Depositionen werden dagegen die staub- oder gasförmigen Stoffeinträge in Boden und Pflanze verstanden. Neben den Schadstoffen werden durch diese beiden Vorgänge auch Nährelemente zugeführt. Diese sind - je nach Flächennutzungsart - auch als nutzbringend anzusehen. Beispielsweise werden in deutschen Wäldern zur Zeit jährliche Gesamtstickstoffeinträge aus der Luft in Höhe von 8,5 (Baden-Württemberg) bis zu 72 Kilogramm pro Hektar (Nordwestdeutschland) gemessen; allerdings übersteigen diese Mengen den Stickstoffbedarf des Waldes [61]. Die in der Forstwirtschaft in den Jahren 1971 bis 1987 beobachteten 10- bis 40 %igen Steigerungen der Wuchsleistungen von Kiefern und Fichten sind unter anderem auf eine Zunahme solcher atmosphärischer Stickstoffeinträge zurückzuführen [69]

Petr, J.; Cerny, V.; Hruska, L. (1983): Ertragsbildung bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 224 S.

[70].

Um die direkt beeinflussbare Schadstoffzufuhr über Dünge- und Pflanzenschutzmittel mit den ohnehin anfallenden „ubiquitären“ Einträgen aus der Atmosphäre vergleichen zu können, wurden zunächst die Feuchtdepositionen aus dem 'Wet-only-Programm' des Umweltbundesamtes (UBA) deutschlandweit zusammengestellt (vgl. Tab. 35 in Anhang A). Eine separate Auswertung dieser Daten von den insgesamt 5 bayerischen Messstellen des UBA sowie weitere Messwerte zu den Gesamtdepositionen in Bayern (trocken und feucht) zeigt Tab. 11. Da die Messstellen beider Messprogramme nicht einheitlich waren, können die Angaben zu den Gesamtdepositionen auch niedriger sein als die Feuchtdepositionen (vgl. z. B. Cd in Tab. 11).

**Tab. 11** Atmosphärische Depositionen in Bayern. Mittlere Feuchtdepositionen an 5 Bayerischen Messstellen im UBA-Messprogramm [92] und Gesamtdeposition nach [53]

Element/Verbindung	feuchte Depositionen UBA Werte für Bayern				Gesamtdepositionen LBP-Werte, Bayern		
	Mittel 94	Mittel 95	Mittel 96	Mittel 94-96	Min	Max	Mittel
<i>Makroelemente (in kg/ha a<sup>-1</sup>)</i>							
N-ges	11,0	7,5	8,9	9,1	10,8	29,5	17
NO <sub>3</sub> -N					3,8	7,9	5,1
NH <sub>4</sub> -N					7	21,6	11,9
SO <sub>4</sub> -S	7,8	4,6	4,8	5,7	6,7	18,8	9,2
Cl		2,3	2,4	2,3	2,5	8	3,9
K	0,7	0,3	0,4	0,5	1,7	8	3,9
Ca	3,1	1,3	1,5	2,0	3	14,1	6
Mg		0,2	0,2	0,2	0,7	4,4	1,6
<i>Schwermetalle (in g/ha a<sup>-1</sup>)</i>							
Cd	1,4	1,3	1,3	1,3	0,5	1,2	0,7
Cr					4,1	21	7,9
Cu	20,9	31,9	11,8	21,5	12,7	46,1	20,3
Mn	24,5	17,2	14,6	18,8	39,7	306,5	93,4

Ni					4,9	15,8	7,4
Pb	14,7	16,8	12,6	14,7	26,8	87	37,4
Zn <sup>1)</sup>	79,6	96,5	67,6	81,2	74,5	181,3	109,9

<sup>1)</sup> ohne Messstelle in Brotjackriedl (Industriestandortsnahe vermutet)

Bei den Ergebnissen handelt es sich um Freilandmessungen. In Wäldern (besonders in immergrünen Nadelwäldern) ist von erhöhten Depositionsraten auszugehen, da dort wesentlich größere Strömungswiderstände herrschen, wodurch um ein Mehrfaches höhere Trockendepositionen (Gase, Staub) herausgefiltert werden [100]. Die Angaben für die bayerischen Feuchtdositionen von Chlor sind mit  $2,3 \text{ kg/ha a}^{-1}$  als relativ niedrig anzusehen, da der bundesdeutsche Mittelwert der Jahre '94 bis '96 zwischen 7 und  $22 \text{ kg/ha a}^{-1}$  liegt (vgl. Anhang A). Die Unterschiede gegenüber dem Bundesland Bayern lassen sich möglicherweise durch die Einbeziehung auch küstennaher Messstellen erklären.

### 3.4 Quantitativer Vergleich der Einträge

Um die mögliche Schadstoffzufuhr einzelner Eintragspfade vergleichen zu können, müssen die jeweiligen Einträge quantitativ bewertet werden. Um die jährliche Schadstofffracht zu bestimmen, sind somit neben den Schadstoffkonzentrationen im Trägermedium (Dünger, Pflanzenschutzmittel, etc.) auch die jeweils typischen oder möglichen Ausbringungsmengen mit einzubeziehen. Damit die Wirksamkeit möglicher qualitätssteigernder Maßnahmen im Bereich des Nährstoffmanagements abgeschätzt werden kann, sollen hier die wichtigsten Einträge gegenübergestellt werden, wobei verschiedene Annahmen zugrundegelegt werden. Beispielsweise werden für die Mineraldüngung zwei Düngungsszenarien für Getreideganzpflanzen und Kurzumtriebsplantagen im Rahmen einer Modellrechnung definiert. Trotz der in Kap. 3.1.1 aufgezeigten Düngemittelvielfalt wird hierbei vereinfachend lediglich ein Mix aus den derzeit gebräuchlichsten Düngern (nach [85]) betrachtet (Tab. 12).

**Tab. 12** Modellannahmen zur Düngungshöhe bei Getreideganzpflanzen (GGP) und Kurzumtriebsplantagen (KUP). Bei GGP: Düngemenge für Referenzstandort für Winterweizen bei  $11,7 \text{ t TM/ha}$  nach [10], bei KUP: Düngung nach Entzug für Ertrag von  $10 \text{ t TM/ha a}^{-1}$

Nährstoff	Getreideganzpflanzen (kg/ha, Reinnährelement)	Kurzumtriebsplantagen (kg/ha, Reinnährelement)	Düngerform
Stickstoff	170	45	Kalkammonsalpeter
Phosphor	33	10	Triplesuperphosphat
Kalium	113	37	Kaliumchlorid (60er)
Magnesium	30	5	Magnesiumsulfat
Kalzium	27	50	kohlensaurer Kalk

Eine Gegenüberstellung der berechneten jährlichen Schadstofffrachten zeigt Tab. 13. Schwefeleinträge werden hier nicht dargestellt, da diese auch wichtige Pflanzennährstoff-

**Tab. 13** Berechnete jährliche Chlor- und Schwermetallfrachten über verschiedene Eintragspfade unter verschiedenen (Modell-)Annahmen

Eintragspfad	Chlorid- zufuhr- (kg/ha a <sup>-1</sup> )	Schwermetallzufuhr (g/ha a <sup>-1</sup> )						
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Düngung Getreideganz- pflanzenanbau	102,3	5,3	63,6	7,5	10,3	8,1	110,8	0,027
Düngung Kurzumtriebs- plantagen	33,5	1,7	20,6	3,7	3,7	3,2	41,0	0,008
Klärschlamm (bei maximal zulässiger Ausbringungs- menge) <sup>1)</sup>	k.A.	4,2	152	372	63	265	2.197	2,3
Bioabfallkompost <sup>2)</sup>	44,8	4,8	300	252	152	492	1.480	2,0
Pflanzenschutzmittel <sup>3)</sup>	< 1	--	--	--	--	--	--	--
atmosphärische Gesamtde- positionen (Bayern)	3,9	0,7	7,9	20,3	7,4	37,4	109,9	k.A.

<sup>1)</sup> nach Klärschlammverordnung, Gehalte basierend auf Mittelwerten für Deutschland (vgl. Tab. 8 in Kap. 3.1.2)

<sup>2)</sup> bei maximaler Ausbringungsmenge nach Bioabfallverordnung [9] (hier: 20 t TM/ha·3a<sup>-1</sup> = 6,67 t TM/ha a<sup>-1</sup>, Konzentrationen wie in Tab. 9.

<sup>3)</sup> schwermetallhaltige PS-Mittel nur in Kernobst, Wein, Tabak, Kartoffeln

fe sind. Für die quantitative Betrachtung der Fluoreinträge war die Datenbasis zu gering; außerdem liegt dieser Spurenstoff im Boden kaum pflanzenverfügbar vor.

Die hohe Chloridzufuhr lässt alle anderen Eintragspfade neben der Mineraldüngung nahezu bedeutungslos erscheinen. Die Cl-Vermeidung kann somit eine erfolgversprechende Maßnahme zur Chlorgehaltsminderung im Pflanzenmaterial darstellen, insbesondere bei Kulturen mit hohem Kaliumbedarf (Getreideganzpflanzen).

Bei den Schwermetallen können durch Klärschlamm- und Kompostanwendung im Vergleich zur mineralischen Düngung überhöhte Einträge stattfinden. Insbesondere bei Cu, Pb, Zn und Hg sind um mehr als eine Zehnerpotenz höhere Schwermetallfrachten möglich, verglichen mit der mineralischen Düngung (hier am Beispiel Getreideganzpflanzen). Allerdings fiel dieser Unterschied bei Verwendung von Phosphaten aus der Hüttenindustrie (z. B. Thomasphosphat) anstelle des betrachteten Tripelsuperphosphatdüngers weniger deutlich aus (vgl. hierzu Anhang A, Tab. 33).

Schwermetalleinträge über Pflanzenschutzmittel treten bei den im Energiepflanzenanbau verwendeten Pflanzenschutzmitteln nicht auf. Auch atmosphärische Depositionen spielen im Vergleich zu den möglichen Einträgen über Kompost und Klärschlamm nur eine untergeordnete Rolle. Allerdings können diese bei Cu und Pb zum Teil höher liegen als bei der Mineraldüngung.

Beim Vergleich der Eintragsmengen muss unterschieden werden, ob es sich um kumulative Stoffströme handelt (z. B. Mineraldüngung und Depositionen) oder ob die Einträge alternativ sind, das heißt, dass sie - zumindestens teilweise - gegeneinander austausch-

bar sind (z. B. Mineraldüngung und Klärschlamm). Bei alternativen Einträgen wäre zwar ein gezieltes Düngungsmanagement zur Schwermetallvermeidung möglich. Allerdings besteht beim Energiepflanzenanbau eher ein Interesse an der gezielten Verwendung bzw. Entsorgung solcher Problemstoffe, da es sich nicht um die Produktion von Nahrungsmitteln handelt und die anfallenden Problemstoffe in der Asche hier teilweise unverändert in den Kreislauf zurückgeführt werden könnten. Vor diesem Hintergrund muss auch die Verwendung von Biomasseasche aus der Verbrennung bewertet werden.

## 4 Feldversuche

### 4.1 Vorgehen und Methodik

#### 4.1.1 Versuchsplan und Probenherkunft

Im Rahmen von Feldversuchen sollte durch gezielte Probenahme festgestellt werden, in welcher Weise und mit welchen quantitativen Effekten direkte Einflüsse auf die chemisch-stofflichen Qualitätsmerkmale möglich sind. Bei der Auswahl der Biomassearten erfolgte eine Beschränkung auf landwirtschaftliche Kulturen, da hier die größten Einflussmöglichkeiten gesehen werden (vgl. Kap. 2.3). Zu den landwirtschaftlichen Kulturen zählen hier auch Kurzumtriebsplantagen (Pappeln und Weiden).

Neben den gezielten produktions- und erntetechnischen Fragestellungen sollte die Probenahmeserie auch den Zweck erfüllen, Lücken im bisherigen Wissen über Inhaltsstoffe und Eigenschaften von bisher weniger untersuchten Reststoffen oder Rückständen zu schließen. Eine Vielzahl von Proben diene daher weniger der Feststellung systematischer Einflussgrößen als vielmehr der allgemeinen Einordnung dieser Brennstoffe und der Verbreiterung der Datenbasis für die erstellte Brennstoffdatenbank (vgl. hierzu Kap. 5). Einen Überblick über den Versuchs- und Probenahmeplan gibt Tab. 14. Nachfolgend werden die gewählten Standorte und die betrachteten Einflussgrößen und Bedingungen näher beschrieben.

**Kurzumtriebsplantagen.** Die Weiden- und Pappelproben wurden von einer Kurzumtriebsplantagen-Versuchsfläche (Gut Abbachhof bei Regensburg) gewonnen. Das Probenahmematerial für Weide (*Salix x dasyclados*) trägt die Klonbezeichnung „*Salix caprea x Salix cinerea x Salix viminalis*“. Pappelproben (*Populus trichocarpa*) wurden vom Klon „Muhle-Larsen“ gewonnen. Der Standort (10 km nordöstlich von Regensburg in 350 m über NN) wird als lehmig-sandige Braunerde beschrieben [45]. Von November 1996 bis Mai 1997 wurden im zweiwöchigen Rhythmus je zwei unterschiedlich große Triebe geschnitten und als ganzer Baum zerkleinert. Bei Pappeln musste dieser Schnitt zu jedem Termin von einem anderen Stock erfolgen, da die Triebzahl je Stock sehr gering war. Um unterschiedliche Wuchsbedingungen als Streuungsursache möglichst auszuschalten, erfolgte der darauffolgende Schnitt am jeweiligen Nachbarstock. Bei Weiden konnten dagegen mehrere Triebe von einem Stock entnommen werden, bis dieser abgeerntet war. Erst dann erfolgte der Wechsel zum benachbarten Stock.

**Tab. 14** Überblick über die Probenauswahl und die untersuchten Einflüsse

Brennstoffart	Kultur	untersuchter Einfluss	Anzahl Proben	
Kurzumtriebs-plantagen	Pappel	Erntezeitpunkt, Baumdurchmesser	27	
	Weide	Erntezeitpunkt, Baumdurchmesser	27	
	Pappel-/Weidenlaub, frisch	Erntezeitpunkt	2	
Getreide-ganzpflanzen <sup>1)</sup>	Triticale	Erntezeitpunkt, Düngung (Cl, K)	22	
	Winterweizen	Feldverweildauer	6	
Getreidekörner	Triticale	Erntezeitpunkt, Düngung (Cl, K)	22	
	Winterweizen	Feldverweildauer	4	
Getreidestroh	Triticale	Erntezeitpunkt, Düngung (Cl, K)	22	
	Winterweizen	Feldverweildauer	13	
Feldgras	Rohrschwengel	Erntezeitpunkt, Düngung (Cl, K)	12	
Landschafts-pflegeheu	Standort 1	Erntezeitpunkt, Feldverweildauer	7	
	Standort 2	Erntezeitpunkt, Feldverweildauer	7	
Straßen-grasschnitt	verschiedene Gräser und Kräuter	(Stichproben)	11	
	Faserhanf-Ganzpflanzen	(Stichproben)	3	
	Hanfschäben	(Stichprobe)	1	
	Ackerbohnenstroh	(Stichproben)	2	
	Lupinenstroh	(Stichproben)	4	
	Rapsstroh	(Stichprobe)	1	
	Ölleinstroh	(Stichproben)	3	
	Lupinenstroh	(Stichproben)	4	
	Sonnenblumenstroh (m. Körben)	(Stichproben)	2	
	Flachsfaserreste	(Stichprobe)	1	
	Bindemittel	(Stichproben)	2	
	Hopfentreber	(Stichprobe)	1	
	Sisalreste	(Stichprobe)	1	
	Strauchschnitt	(Stichproben)	3	
	unverrottetes Kompostholz	(Stichprobe)	1	
	<i>Summe:</i>			<i>211</i>

<sup>1)</sup> Die Ergebnisse für Getreideganzpflanzen werden teilweise rechnerisch aus den Mengenanteilen für die separate Analyse von Körnern und Stroh bestimmt.

Bei der Probenahme wurden Längen und Durchmesser der Triebe bestimmt. Um nicht nur den klassischen Erntezeitraum im Winter (ca. Dezember bis April) zu betrachten, sondern auch Effekte einer Ernte im belaubten Zustand festzustellen, wurden weitere Triebe im Mai und Juli geschnitten. Zum Julitermin wurden Laub und Holz getrennt gewonnen und mengenmäßig erfasst, damit eine Aussage über die möglichen Auswirkungen einer Holzbergung nach dem Laubabfall im gefällten Zustand getroffen werden kann. Den Abschluss des jahreszeitlichen Zyklusses bildete schließlich eine letztmalige Probenahme im November.

**Landschaftspflegeheu.** 14 Gras- und Heuproben wurden von zwei ungedüngten Landschaftspflegeflächen im Raum Zolling (Hallertau) im Landkreis Freising gewonnen. Während die Wiesenfläche „Thann“ an einem Nordhang lag, war die Fläche am „Wirtsberg“



südlich ausgerichtet. Beide Wiesenflächen waren seit mindestens zehn Jahren ungenutzt (keine Düngung) so dass der jährliche Wiesenschnitt lediglich der Pflege diene. Es handelte sich um Lehmböden ohne Staunässe. Einige Proben wurden zunächst als frisch geschnittener Wiesenaufwuchs gewonnen, um die Effekte des Erntetermins zu bestimmen. Nach dem Schnitt erfolgte die weitere Probenahme jeweils nach einzelnen Niederschlagsereignissen, um eventuelle Auswaschungseffekte feststellen zu können. Damit diese Effekte zu den Regenereignissen in Beziehung gesetzt werden können, wurden die Werte der Wetterstation 8 des Bayerischen Agrarmeteorologischen Messnetzes am Standort der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau in Freising-Weihenstephan herangezogen. Die Entfernung zum Versuchsstandort beträgt etwa 8 km Luftlinie. Zu Überprüfung eventueller kleinräumlicher Abweichungen erfolgte eine gleichzeitige Erfassung der Niederschlagshöhen in unmittelbarer Nähe zum Wiesenstandort (ca. 500 m Luftlinie) mit einem herkömmlichen Regenmesser. Die Werte zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

**Winterweizen.** Zwischen Juli und Oktober 1997 wurden an der Versuchsstation Dürnast der TU-München-Weihenstephan Stroh- und Ganzpflanzenproben von Winterweizen (*Triticum aestivum* L., Sorte „Astron“) gezogen. Auf dem ausgewählten Schlag wurde in 1997 ein Kornertrag von 72 dt/ha erzielt. Während der Vegetationsperiode waren 150 kg Stickstoff pro ha in insgesamt drei Gaben verabreicht worden (12.3.1997: 68 kg/ha als KAS, 6.5.1997: 30 kg/ha als Ammonsulfatsalpeter; 10.6.1997: 51 kg/ha als KAS). Eine Kaliumdüngung war zuletzt am 5.10.1995 mit 220 kg K<sub>2</sub>O/ha als „40er Kali“ erfolgt (entspricht 165 kg Cl/ha). Auf einem Randstreifen des Feldes wurden die von Hand gemähten Ganzpflanzen sowie das vom Mähdrescher fallengelassene Stroh im Schwad liegengelassen. Je nach auftretenden Niederschlägen erfolgte die Probenahme etwa im wöchentlichen Abstand. Außerdem wurden Proben vor und zum Druschtermin gewonnen. Bei den Weizenganzpflanzenproben (n = 6) wurden der Korn- und Strohanteil bestimmt (Korn/Strohverhältnis) und getrennt analysiert. Wie beim Landschaftspflegeheu (s.o.) wurden für die Auswertung die Niederschlagsmessungen der Wetterstation 8 des Bayerischen Agrarmeteorologischen Messnetzes herangezogen. Deren Entfernung zum Versuchsstandort betrug etwa 2 km Luftlinie.

**Triticale.** Als weitere Getreideganzpflanzenkultur wurde Triticale (*Triticum* × *Secale*, Sorte „Trimaran“) in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Auch hier wurden die Korn- und Strohanteile mengenmäßig erfasst und die insgesamt 44 Teilproben getrennt analysiert. Das Pflanzenmaterial wurde von Versuchspartnern der Universität Hohenheim in Zusammenarbeit mit dem Institut für Pflanzenbau und Grünlandlehre gewonnen. An diesem Institut werden Düngungsversuche mit unterschiedlichen Kaliumdüngervarianten durchgeführt; so dass hier eine Zusammenarbeit bei der Durchführung von Pflanzenanalysen erfolgen konnte. Zunächst wurden an insgesamt 3 Terminen vor dem eigentlichen physiologischen Reifezeitpunkt („Totreife“) Proben gewonnen, um Effekte durch die Wahl unterschiedlicher Erntezeitpunkte festzustellen. Anschließend erfolgte

**Tab. 15** Probenahmetermini, Entwicklungsstadium und Düngungsvarianten bei Triticale-ganzpflanzen (je 2 Proben pro Variante)

Datum	Vegetations- stadium	Düngung (Angaben in kg/ha)	Chlorfracht (kg/ha)
02.07.97	Milchreife	140 kg N, 200 kg K als 60er Kali	181
02.07.97	Milchreife	140 kg N, 200 kg K als Kalimagnesia	--
16.07.97	Teigreife	140 kg N, 200 kg K als 60er Kali	181
16.07.97	Teigreife	140 kg N, 200 kg K als Kalimagnesia	--
31.07.97	Totreife	140 kg N, 200 kg K als 60er Kali	181
31.07.97	Totreife	140 kg N, 200 kg K als Kalimagnesia	--
08.08.97	Totreife	140 kg N, 200 kg K als 60er Kali	181
08.08.97	Totreife	140 kg N, 200 kg K als Kalimagnesia	--
08.08.97	Totreife	140 kg N, 100 kg K als 60er Kali	91
08.08.97	Totreife	140 kg N, 100 kg K als Kalimagnesia	--
08.08.97	Totreife	140 kg N, 0 kg K	--

die Probenahme zur Feststellung der Wirkung von Düngungsunterschieden. Tab. 15 fasst die Probenauswahl zusammen. Die Düngung war entweder mit sulfatischem Kalium (Kalimagnesia) oder chloridhaltigem Dünger (60er Kali) erfolgt (vgl. hierzu Tab. 5, S. 32). Der Termin dieser Maßnahme war der 14.10.1996. Auf allen Parzellen lag die Stickstoffgabe bei 140 kg/ha (Kalkammonsalpeter). Als Phosphordüngung waren zuletzt (August 1995) 18 kg/ha (Reinnährstoff) in Form von Superphosphat verabreicht worden.

**Rohrschwengel.** Wie bei Triticale werden auch bei Rohrschwengel (*Festuca arundinacea* SCHREB., Sorte „Elfina“) sowohl Erntetermini als auch Kaliumdüngungsvarianten betrachtet. Die Proben wurden ebenfalls von entsprechenden Feldversuchspartellen in Hohenheim gewonnen. Eine Zusammenstellung bietet Tab. 16. Bei Düngungsart und Terminen gelten die Ausführungen zu Triticale (s.o.).

Neben Pflanzenproben wurden auf den Hohenheimer Versuchsflächen auch Bodenproben entnommen (Bohrstockmethode) und im Bodenlabor der Bayerischen Hauptversuchsanstalt für Landwirtschaft in Freising analysiert. Insgesamt 16 Proben wurden sowohl auf die Chlorid- und Kaliumkonzentrationen als auch auf die Schwermetallgehalte untersucht (jeweils 8 Proben). Schwermetalle wurden für eine Bodentiefe von 0 bis

**Tab. 16** Probenahmetermini und Düngungsvarianten bei Rohrschwengel (*Festuca arundinacea*). Je 2 Proben pro Variante

Datum	Düngungsvariante (Angaben in kg/ha)	Chlorfracht (kg/ha)
17.06.97	70 kg N, 116 kg K als 60er Kali	105
17.06.97	70 kg N, 116 kg K als Kalimagnesia	--
02.07.97	70 kg N, 116 kg K als 60er Kali	105
02.07.97	70 kg N, 116 kg K als Kalimagnesia	--
24.07.97	70 kg N, 116 kg K als 60er Kali	105
24.07.97	70 kg N, 116 kg K als Kalimagnesia	--

30 cm bestimmt (je vier Proben von den Triticale- und den Rohrschwingelparzellen). Für den Chlor- und Kaliumgehalt wurde dagegen eine Bodentiefe von 0 bis 60 cm gewählt, da es sich um relativ mobile Elemente handelt, die nach ihrem Eintrag auch unterhalb der Pflugsohle zu finden sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede zwischen Chlorid- und Sulfatdüngung auch anhand der Bodenkonzentrationen deutlich nachzuweisen sind (Tab. 17). Besonders auffällige Unterschiede ergeben sich bei den Rohrschwingelparzellen, bei denen die chloridhaltige gegenüber der sulfatischen Düngung zu einer 7,5-fachen Cl-Konzentration im Boden führte (Triticale: 2,4-fach). Die Kaliumgehalte zeigen dagegen, dass dieser Nährstoff trotz unterschiedlicher Düngemittel ausgeglichen verabreicht worden war.

**Tab. 17** Ergebnisse der Bodenanalysen zu den Chlorid- und Kaliumgehalten der Triticale- und Rohrschwingel-Versuchsflächen in Hohenheim (0 bis 60 cm Bodentiefe)

	K-Düngung <sup>1)</sup> mit Chlor	K-Düngung <sup>1)</sup> ohne Chlor
<i>Standort Triticale</i> <sup>2)</sup> :		
Chloridgehalt (mg/100 g Boden)	1,62	0,67
Kaliumgehalt (mg/100 g Boden)	9,5	10,0
<i>Standort Rohrschwingel</i> <sup>3)</sup> :		
Chloridgehalt (mg/100 g Boden)	1,53	0,20
Kaliumgehalt (mg/100 g Boden)	19,0	23,0

<sup>1)</sup> Mittelwert aus jeweils zwei Proben, die von verschiedenen Parzellen stammten. Probenname-terminale: 28.05.97 (Triticale) und 12.06.97 (Rohrschwingel)

<sup>2)</sup> Kalidüngung zu Triticale: 200 kg Kalium/ha. Begleitstoffe „mit Chlor“: 181 kg Chlor/ha (als KCl), „ohne Chlor“: 0 kg/ha Chlor (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Düngung)

<sup>3)</sup> Kalidüngung zu Rohrschwingel: 116 kg Kalium/ha. Begleitstoffe „mit Chlor“ 105 kg Chlor/ha (als KCl), „ohne Chlor“: 0 kg/ha Chlor (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Düngung)

Bei den Schwermetallanalysen im Boden kam es auf den Nachweis an, dass es sich um einen durchschnittlichen Standort handelte, bei dem es nicht durch auffällig hohe Gehaltskonzentrationen bei einigen Elementen zu falschen Schlussfolgerungen kommen konnte. Tab. 18 zeigt, dass die zulässigen Richt- bzw. Grenzwerte für Böden in keinem Fall ausgeschöpft wurden.

**Tab. 18** Ergebnisse der Bodenanalysen zu den Schwermetallgehalten der Triticale- und Rohrschwengel-Versuchsflächen in Hohenheim (0 bis 30 cm Bodentiefe) sowie gebräuchliche Grenzwerte für die landwirtschaftliche Nutzung (Angaben in mg/kg TM)

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
<i>Grenzwerte der BBodSchV<sup>1)</sup>:</i>							
1. Bodenart Ton	k.A.	1,5	100	60	1	100	200
2. Bodenart Lehm/Schluff	k.A.	1	60	40	0,5	70	150
3. Bodenart Sand	k.A.	0,4	30	20	0,1	40	60
<i>Standort Triticale:</i>							
Mittelwert <sup>2)</sup>	10,03	0,16	40,9	15,5	0,045	24,9	54,5
Spannweite	8,8-11,3	0,13-0,19	36-45,6	13-17	0,04-0,06	19,9-29,1	36-61
Ausschöpfung v. Grenzwert 2	--	16 %	68 %	39 %	9%	36 %	36 %
<i>Standort Rohrschwengel:</i>							
Mittelwert <sup>2)</sup>	10,00	0,06	49,85	18,25	0,04	25,1	52,5
Spannweite	9,1-11,4	0,05-0,07	43-59	16-21	0,04-0,04	23,5-27,1	45-63
Ausschöpfung v. Grenzwert 2	--	6 %	83 %	46 %	8 %	36 %	35 %

<sup>1)</sup> Quelle: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), 1999 [17].

<sup>2)</sup> Mittelwert für vier Bodenproben von vier verschiedenen Parzellen. Termine: 28.05.97 (Triticale) und 12.06.97 (Rohrschwengel)

**Straßengrasschnitt und kommunale Gehölzschnitte.** Bei diesen Biomassearten standen nicht die qualitätsbeeinflussenden Einflüsse im Vordergrund, sondern es sollte lediglich eine erste Beurteilung der Brennstoffeigenschaften und Schadstoffbelastung erfolgen. Die 11 Proben zum Straßengrasschnitt wurden von der Grüngutsammelstelle der Straßenmeisterei der Ortschaft Marzling (Landkreis Freising) gewonnen. Die Probenahme erfolgte in 1- bis 2wöchigem Abstand, um einen möglichst repräsentativen Überblick über die gesamte Schnittperiode und über verschiedene Herkünfte im Einzugsgebiet zu geben. Das Mähgut stammt von Straßenrändern an Bundes- und Staatsstraßen des Landkreises Freising mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen. Der Grasschnitt erfolgte hauptsächlich in einem Randbereich zwischen einem und maximal 5 Metern neben dem Fahrbahnrand. Hierfür wurde ein Scheibenmäherwerk (MULAG Böschungs-Mähergerät SB 500) mit Saugzuggebläse und einem 18-m<sup>3</sup>-Mähgutanhänger verwendet. Die Geräte waren an ein Mehrzweckfahrzeug (MB Unimog U 1600) angebaut. Die Pflege des direkten Straßenrandbereichs (0 bis 1,25 m) war zuvor mit einem Schlegelmäher erfolgt, der das zerkleinerte Mähgut auf der Randfläche ablegte. Bei dem Mähgut handelt es sich größtenteils um Gräser mit einem nicht näher feststellbaren Artenspektrum.

Neben den Grasschnitten wurden auch Gehölzschnitte vom Autobahnrandstreifen und von privaten Gärten untersucht. Die gewählten Proben und ihre Herkunft werden in Tab. 19 dokumentiert.

**Tab. 19** Herkunft und Zuordnung der kommunalen Straßengras- und Gehölzschnitte

Datum	Wasser- gehalt (%)	Herkunft	Durchschnittl. tägl. Ver- kehrsaufkommen (DTV)
<i>Straßengrasschnitte</i>			
09.07.97	56,59	B 13 Fahrenzhausen-Unterschleißheim	8.500
16.07.97	59,92	B 11 bei Moosburg, Nähe Isarbrücke	15.300
29.07.97	63,26	B 11 Garching-Freising	11.200
07.08.97	64,20	St 2053 Grüneck-Hallbergmoos	9.100
07.08.97	67,54	St 2053 Eching-Neufahrn	16.000
20.08.97	63,92	St 2054 Allershausen-Eglhausen	6.500
20.08.97	62,71	B 11 Marzling-Langenbach	15.500
28.08.97	46,44	B 11 Marzling-Langenbach	15.500
02.09.97	60,26	B 11 Langenbach- Moosburg	9.300
09.09.97	48,75	B 301 Reichertshausen-Au/Hallertau	4.000
09.09.97	60,23	St 2054 Zolling-Haag	3.500
<i>kommunale Gehölzschnitte („Strauchschnitt“)</i>			
24.10.97	34,78	A 8, Mittelstreifen Adelshausen	k.A.
24.10.97	40,33	privater Strauchschnitt aus Gärten (Kom- postwerk Aichach)	--
21.10.97	39,78	kommunaler Strauchschnitt, städt. Garten- bauamt München	--

**Weitere Biomassen.** Ohne Betrachtung bestimmter Einflussgrößen wurde eine Reihe weiterer Proben analysiert, die dazu dienen sollen, bislang eher wenig betrachtete Biomassen in ihren brennstofftechnischen Merkmalen kennenzulernen und in die aufgebaute Datenbank (vgl. Kap. 5) einzufügen. Die Auswahl dieser Proben wurde in Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU) getroffen. Sofern es sich um Pflanzenmaterial von landwirtschaftlichen Flächen handelt, waren die Proben in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau in Freising-Weißenstephan von den dortigen Praxis- und Versuchsflächen gewonnen worden. Eine Zusammenstellung aller untersuchten Materialien bietet Tab. 14 (S. 42).

#### 4.1.2 Ringversuch mit Brennstoff- und Ascheproben

Im Verlauf der Projektbearbeitung wurde festgestellt, dass die in Deutschland und international angewendeten Analyseverfahren zum Teil sehr unterschiedlich sein können. Das betrifft vor allem die Analyse auf den Elementgehalt. Hier liegt sowohl bei den chemischen Aufschlussmöglichkeiten als auch bei den verwendeten Analysetechniken eine breite Vielfalt vor. Da für biogene Festbrennstoffe keine standardisierten Vorgehensweisen existieren, war es erforderlich, die natürliche Streuung, die durch unterschiedliche Analysenverfahren zustandekommen kann, kennenzulernen. Daher wurde eine Laborvergleichsuntersuchung mit zwei biogenen Brennstoffen (Holz und Stroh) durchgeführt, wobei es keinerlei Vorgaben für die zu verwendenden Aufschluss- bzw. Analyseverfahren gab. Die Ergebnisse wurden bei der Auswahl des beauftragten Labors für die Durchführung der weiteren Brennstoffanalysen berücksichtigt und tragen somit zur Qualitätssicherung bei der Gewinnung von Felddaten bei.

Für den Laborvergleich wurden insgesamt 4 Analyseinstitute ausgewählt und mit der Durchführung der darin zusammengestellten Analysen beauftragt. An der Laborvergleichsuntersuchung waren beteiligt:

- Wilhelm-Klauditz-Institut Holzforschung (WKI), Bienroder Weg 54 E, D-38108 Braunschweig
- A.M.U. TÜV GmbH, Westendstraße 199, D-80686 München
- BIOS-Bioenergiesysteme - Ingenieurbüro für Forschung, Entwicklung und Optimierung nachhaltiger Technologien, Sandgasse 47/13, A-8010 Graz, Österreich
- Bayerische Hauptversuchsanstalt für Landwirtschaft, D-85350 Freising-Weihenstephan

Zur besseren Einordnung und gemeinsamen Bewertung der Ergebnisse beteiligte sich auch das Zentrallabor des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (Abt. 9a - Umwelttechnik, Umweltanalytik, Umwelthygiene, Bgm.-Ulrich-Str. 160, D-86179 Augsburg) an dem Laborvergleich, so dass insgesamt 5 Vergleichsergebnisse zu jedem Parameter vorlagen.

Die beiden verwendeten Brennstoffproben waren in einer Labormühle mit 1 mm Siebdurchgang zerkleinert und anschließend homogenisiert worden. Jedem Labor wurde eine Probe von 200 g zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse lagen zum Anfang Mai 1997 vollständig vor. Nach einer Plausibilitätsprüfung wurden auffällige Abweichungen identifiziert. Die Zusammenstellung sämtlicher Einzelergebnisse wurde den Labors zugeschickt, allerdings wurden dabei die Namen der jeweils fremden Beteiligten anonymisiert, so dass lediglich eine Kontrolle und Einordnung der eigenen Ergebnisse möglich war. Mit der Zusendung der Ergebniszusammenstellung (Mai 1997) wurde die Bitte ausgesprochen, dass die jeweils gekennzeichneten besonders auffälligen Abweichungen nochmals einer kritischen Überprüfung unterzogen würden, um so den Analyselabors die Möglichkeit zu geben, Übertragungs- oder Berechnungsfehler zu korrigieren. Sämtliche Einzelwerte sowie die berechneten Mittelwerte und Variationskoeffizienten (VK) und die auffälligen Abweichungen werden in Tab. 20 zusammengestellt. Darin wurden die o.g. Korrekturen bereits eingearbeitet. Neben den beiden Brennstoffen wurde auch je eine Feuerraumasche zu jedem der genannten Brennstoffe analysiert. Zur Vervollständigung des Laborvergleichs werden diese Ergebnisse nachfolgend ebenfalls vorgestellt (Tab. 21).

Die Auswertung zeigt, dass die Nachweisgrenzen der Analyseverfahren sehr unterschiedlich sind. Nachweisgrenzen werden offenbar vorwiegend bei den Schwermetallanalysen unterschritten. Das gilt vor allem für die Brennstoffe, da hier - anders als bei den Aschen - noch keine Aufkonzentration durch Verbrennung stattgefunden hat. Durch die Tatsache, dass die Mehrzahl dieser Elemente (außer Mn, Cu, Zn, Mo) nicht als Pflanzennährstoff benötigt werden (vgl. Tab. 2, S. 15), liegen nur sehr geringe Konzen-

trationen vor. Für die Aufstellung von Bilanzen ist zukünftig besonders bei den Elementen Arsen, Quecksilber und Molybdän auf eine höhere Analysengenauigkeit zu achten. Hier kam es relativ häufig zur Unterschreitung der Nachweisgrenzen. In abgeschwächtem Maße gilt diese Aussage auch für die Ascheanalysen.

Auch bei den übrigen Elementen (hier: N, S, Cl, P, K, Ca, Mg) kann es zur Unterschreitung der Nachweisgrenze kommen. Das betrifft allerdings nur solche Brennstoffe, bei denen von vornherein mit sehr niedrigen Konzentrationen zu rechnen ist. Im Ringversuch war aus diesem Grund Fichtenholz als Probebrennstoff ausgewählt worden.

Zwischen der Holz- und der Strohprobe lassen sich besonders auffällige Konzentrationsunterschiede erkennen. Bei den Hauptelementen (hier: N, S, Cl, P, K, Ca, Mg) weist das Stroh deutliche, zum Teil um das Vielfache höhere Elementgehalte auf. In fast allen Fällen (außer Ca) geht dieser Konzentrationsanstieg im Ringversuch auch mit einer verbesserten Übereinstimmung der Analysen einher. Das ist an den niedrigeren Variationskoeffizienten der Strohwerte abzulesen (Tab. 20). Bei den Schwermetallen ist dieser Zusammenhang nicht festzustellen, allerdings sind die Gehaltsunterschiede hier wesentlich geringer. Die Werte liegen selten um mehr als das Doppelte auseinander (Ausnahme: Mn und Mo).

Bei den Aschenanalysen (Tab. 21) sind die Variationskoeffizienten generell kleiner, als bei den Brennstoffproben. Das gilt besonders für die Holzasche, während bei der Strohasche eine höhere Anzahl von Extremwerten eliminiert werden musste. Diese Ausreißer sollten anschließend nicht mehr in die Berechnungen (Mittelwert und Variationskoeffizient) einbezogen werden. Insgesamt zeigt sich auch hier, dass eine höhere Elementkonzentration generell zu mehr Sicherheit bzgl. des Analysewertes führt.

Bei den Elementen, die aus umwelttechnischer Sicht besonders bedeutsam sind (N, S und Cl), ergibt sich für die Brennstoffe ein differenziertes Bild. Während bei N und Cl noch relativ niedrige Schwankungsbreiten (VK = 7 bis 21 %) bestehen, ist die Schwefelanalyse offenbar mit einiger Unsicherheit belastet. Das ist nicht nur an den hohen Variationskoeffizienten (52 bzw. 26 %) abzulesen, sondern auch an der Tatsache, dass hier bei zwei Labors die Nachweisgrenzen unterschritten werden (Tab. 20).

Die Analysenergebnisse der Brennstoffe bescheinigen der Bayerischen Hauptversuchsanstalt in Weihenstephan (HVA) eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den übrigen Paralleluntersuchungen. Gleichzeitig werden relativ niedrige Nachweisgrenzen erreicht. Aus diesem Grund wurde dieses Institut mit der Bestimmung der Elementgehalte für die weiteren Biomasseproben beauftragt. Analysenaufträge für Brennstoffaschen wurden in der vorliegenden Arbeit nicht vergeben.

Tab. 20 Analysenwerte aus dem Ringversuch: Ergebniszusammenstellung für untersuchte Brennstoffe

			Holz (Fichte)							GETREIDESTROH (Winterweizen)								
			HVA	Lab2	Lab3	Lab4	Lab5	n	Ø	VK (%)	HVA	Lab2	Lab3	Lab	Lab5	n	Ø	VK (%)
I	Gesamtkohlenstoff	Gew.-%									45,4	50,6	n.b.	n.b.	46,83	3	47,61	4,6%
	Wasserstoff	Gew.-%									n.b.	4,3	n.b.	n.b.	6,49	2	5,40	20,3%
II	Gesamtstickstoff	Gew.-%	0,19	0,12	0,16	n.b.	0,1875	4	0,16	17,2%	0,65	0,79	0,68	n.b.	0,69	4	0,72	7,3%
	Gesamtschwefel	mg/kg TS	100	<100	190,5	<200	206	5	159	51,6%	1060	890	890,8	1540	1600	5	1196	26,1%
	Gesamtchlor	mg/kg TS	65	36	51,7	<100	45	4	49	21,4%	1500	1200	1401,5	1300	1870	5	1454	15,9%
IV	Phosphor	Gew.-%	0,02	<0.1	n.b.	0,0034	0,0097	3	0,011	62,0%	0,08	0,1	n.b.	0,0320	0,0822	3	0,087	10,2%
	Kalium	Gew.-%	0,07	0,1	<0.09	0,0470	0,0677	5	0,075	24,7%	0,88	1,0	0,6119	0,7300	0,921	5	0,829	16,8%
	Calcium	Gew.-%	0,20	0,20	0,1528	0,1542	0,1633	5	0,174	12,3%	0,24	0,3	0,1314	0,2400	0,2337	5	0,229	23,8%
	Magnesium	Gew.-%	0,03	0,02	0,025	0,0224	0,0210	5	0,024	15,1%	0,08	0,09	0,00255	0,0916	0,0924	4	0,089	5,6%
V	Arsen	mg/kg TS	0,045	<0.05	<0.15	<0.10	<1	2	0,05	5,3%	0,11	<0.05	<0.15	0,14	<1	4	0,11	34,6%
	Cadmium	mg/kg TS	0,13	0,10	1,1	0,16	0,14	4	0,13	16,3%	0,10	0,10	1,1	0,12	0,08	4	0,10	14,1%
	Kobalt	mg/kg TS	0,3	0,3	<0.2	1,5	0,5	4	0,28	182,6%	0,24	0,3	<0.2	0,32	0,7	5	0,35	50,9%
	Chrom	mg/kg TS	2,3	3,0	0,93	4,1	2,78	5	2,6	39,3%	6,8	1,5	0,64	2,0	1,5	4	1,4	34,7%
	Kupfer	mg/kg TS	2,5	0,9	<1.5	1,7	1,80	5	1,7	30,7%	3	1,8	<1.5	2,6	3,0	5	2,4	26,1%
	Quecksilber	mg/kg TS	<0.001	<0.05	<0.02	<0.02	0,0072	5	0,020	85,9%	0,004	<0.05	<0.02	0,023	0,014	3	0,022	35,0%
	Mangan	mg/kg TS	210	193	258	211	209	5	216	10,1%	26	28	24,3	28	24	5	26,1	6,6%
	Molybdän	mg/kg TS	0,09	<0.1	<3.0	0,12	<5	3	0,10	12,1%	0,4	<0.1	<3.0	0,23	<5	2	0,32	27,0%
	Nickel	mg/kg TS	1,2	1,8	2,5	3,5	3,3	5	2,5	35,5%	4,7	0,8	2,1	1,7	1,2	4	1,5	34,0%
	Blei	mg/kg TS	0,45	0,1	3,2	0,49	0,39	4	0,36	42,8%	0,51	0,3	3,6	0,76	0,4	4	0,49	34,8%
	Zink	mg/kg TS	21,5	19	23,5	21	18,5	5	20,7	8,7%	11	10	10,6	12,8	10,2	5	10,9	9,2%

**Hinweis:** Die grau markierten Felder werden bei der Berechnung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten (VK) nicht berücksichtigt.

Nachweisgrenzen (Vorzeichen "<"), die nicht grau markiert sind, wurden in die Mittelwertberechnung und in die Berechnung des Variationskoeffizienten (VK) mit einbezogen



**Tab. 21** Analysenwerte aus dem Ringversuch: Ergebniszusammenstellung für untersuchte Biomasseaschen

		HOLZASCHE							STROHASCHE								
		HVA	Lab2	Lab3	Lab4	Lab5	n	Ø	VK (%)	HVA	Lab2	Lab3	Lab4	Lab5	n	Ø	VK (%)
Gesamtstickstoff	Gew.-%	0,18	0,15	0,17	n.b.	0,1775	4	0,17	7,0%	0,11	0,02	0,13	n.b.	0,07	4	0,08	51,0%
Gesamtschwefel	mg/kg TS	2835	1600	n.b.	3910	3111	3	3285	13,9%	2309	2100	n.b.	6540	3091	3	2500	17,1%
Gesamtchlor	mg/kg TS	320	299	n.b.	580	260	3	293	8,5%	895	1400	n.b.	2260	1397	2	1399	0,1%
Org. geb. Chlor (EO <sub>x</sub> )	mg/kg TS									n.b.	1	n.b.	n.b.	<0.8	2	0,90	11,1%
Anorg. geb. Chlor (wasserlösliches Chlorid)	mg/kg TS									n.b.	1400	n.b.	n.b.	1397	2	1399	0,1%
Org. geb. Kohlenstoff (TOC)	Gew.-%	30,0	24,3	n.b.	n.b.	26,35	3	26,9	8,8%	3,0	2,90	n.b.	n.b.	2,52	3	2,81	7,4%
Phosphor	Gew.-%	1,1	1,2	n.b.	0,725	0,9613	4	1,0	17,9%	0,76	1,4	n.b.	0,6650	1,2274	2	1,3	6,6%
Kalium	Gew.-%	5,8	5,4	n.b.	5,52	5,3134	4	5,5	3,3%	4,3	11,6	n.b.	8,69	11,1658	3	10,5	12,2%
Calcium	Gew.-%	19,1	21,3	n.b.	19,8	16,8804	4	19,3	8,3%	2,1	4,8	n.b.	3,07	3,9334	3	3,9	18,0%
Magnesium	Gew.-%	2,5	2,6	n.b.	2,86	2,3463	4	2,6	7,3%	0,61	1,7	n.b.	1,06	1,5226	3	1,4	18,9%
Arsen	mg/kg TS	1,3	1	<0.4	1,3	<2	3	1,2	11,8%	1,4	1	<0.4	1,70	<3	3	1,4	21,0%
Cadmium	mg/kg TS	0,73	1,05	<1.8	1,3	1,1	4	1,05	19,6%	0,1	0,15	<1.8	0,17	0,25	4	0,17	32,3%
Kobalt	mg/kg TS	30,5	32	31,9	40	36	5	34	10,2%	1,7	1	<2.0	1,9	<5	3	1,5	25,2%
Chrom	mg/kg TS	8,5	11	11,8	14	21	4	11	17,4%	10,2	22	24,6	15	25	3	24	5,6%
Kupfer	mg/kg TS	105	92	107	102	97	4	84	6,5%	13	32	34,6	12,1	29	3	32	7,2%
Quecksilber	mg/kg TS	<0.001	<0.05	<0.04	<0.02	0,003				<0.001	<0.05	<0.04	<0.02	0,0013			
Mangan	mg/kg TS	23317	24800	25586	19600	22130	5	23087	9,1%	157	496	496	174	475	3	489	2,0%
Molybdän	mg/kg TS	2,1	<1	<10	1,6	<4	2	1,9	13,5%	2,0	<1	<10	2,1	<5	2	2,1	2,4%
Nickel	mg/kg TS	34,7	28	48,0	49	52	5	42	22,0%	3,9	22	13,5	14	20	4	17	21,3%
Blei	mg/kg TS	4,8	2	12,8	4,2	5,5	4	4,1	31,8%	2,6	3	10,3	1,9	3,6	4	2,8	22,3%
Zink	mg/kg TS	334	391	428	394	387	4	387	7,8%	23	120	130	28	116	3	122	4,8%

**Hinweis:** Die    grau markierten Felder werden bei der Berechnung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten (VK) nicht berücksichtigt.  
Nachweisgrenzen (Vorzeichen "<"), die nicht grau markiert sind, wurden in die Mittelwertberechnung und in die Berechnung des Variationskoeffizienten (VK) mit einbezogen  
n.b.: vom Analysenlabor nicht

### 4.1.3 Analysenmethodik

#### 4.1.3.1 Probenahme und Analysenvorbereitung

Bei der Probenahme von bereits geschnittenem Material (Heu, Straßengrasschnitte, Stroh, Weizenganzpflanzen) wurden jeweils mindestens 10 Teilproben gewonnen und zu einer Mischprobe vereinigt. Die gesamte Probenmenge von mindestens 0,5 bis 1,5 kg wurde in Kunststoffsäcke gefüllt, luftdicht verschlossen und nummeriert. Die weitere Verarbeitung erfolgte spätestens am übernächsten Tag. Bei Pappeln und Weiden lag die Probenmenge wegen der Ganzbaumentnahme zum Teil deutlich höher (bis 14 kg).

**Trocknung und Wassergehaltsbestimmung.** Zur Wassergehaltsbestimmung wurde die gesamte Probe im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Holzproben waren zuvor von Hand vorzerkleinert worden, während die trockenen Halmgutproben bereits gehäckselt vorlagen (siehe unten). Frische Proben (z. B. Landschaftspflegeschnitt, Straßengrasschnitt) wurden unzerkleinert getrocknet. Während bei den halmgutartigen Proben eine Trockenzeit von 24 Stunden ausreichte, mussten die Holzproben mindestens 48 h getrocknet werden. Nach Teilung der Einzelproben erfolgte jeweils eine Doppelbestimmung des Wassergehaltes. Nach der Trocknung wurden die beiden Teilproben wieder vereinigt und luftdicht in Kunststoffsäcke bis zur Zerkleinerung aufbewahrt.

**Zerkleinerung.** Die Zerkleinerung erfolgte in zwei Stufen. Für Halmgut wurde zunächst ein Scheibenhäcksler zur Vorzerkleinerung auf 3 bis 20 mm Partikellänge verwendet. Für den zweiten Arbeitsgang wurde eine Laborschneidmühle (Fa. Retsch, Typ SM 2000; 1,5 kW) eingesetzt. Auch hier waren meist zwei Durchgänge mit unterschiedlichen Siebeinsätzen (4,0 mm Quadratlochung bzw. 1,0 mm Conidurlochung) erforderlich. Zur Vermeidung von Probenrückständen wurde die Mühle nach jedem Probendurchlauf mit einem Industriestaubsauger gereinigt. Die Holzproben wurden vor der Feinzerkleinerung (s.o.) zweistufig vorzerkleinert. Hierfür wurde zunächst ein ACKMA-Universal-Abfall-Zerkleinerer (Typ Junior K, 15 kW) mit einem 35-mm-Sieb eingesetzt. Anschließend kam ein Rotor-Zerkleinerer mit Spindelvorschub (Typ HB 700/185, 18,5 kW) und 12 mm Lochsieb zum Einsatz.

### 4.1.3.2 Analysendurchführung

Eine Aufstellung der an den Untersuchungen beteiligten Labors gibt Tab. 22.

**Tab. 22** Zusammenstellung der an der Untersuchung beteiligten Labors

Labor	Parameter
TU München, Bayerische Hauptversuchsanstalt für Landwirtschaft, Alte Akademie 10, D-85350 Freising (Tel. 08161-71-3385)	C, N, Cl, Ca, P, Mg, K, S, Cu, Mn, Zn, Pb, Cd, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, As
TU München, Lehrstuhl für Thermische Kraftanlagen (Prof. Hein), Bolzmannstraße 15, D-85748 Garching, (Tel. 089-289-16270)	Aschegehalt (815 °C) Sinterbeginn, Erweichungs- punkt, Halbkugelpunkt, Fließ- punkt
TU München, Lehrstuhl und Prüfamt für Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Am Coulombwall, D-85748 Garching (Tel. 089-289-13720)	Wasserstoff
TU München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Vöttinger Straße 36, D-85354 Freising-Weißenstephan, (Tel. 08161-71-4199)	Wassergehalt, Aschegehalt (550 °C), flüchtige Bestandtei- le, Heiz- bzw. Brennwert

Die Verfahren, Aufschlüsse, Analysengeräte und die geltenden Nachweisgrenzen bei der Bestimmung der Elementgehalte werden in Tab. 23 zusammengestellt. Bei den Elementanalysen erfolgten die Aufschlüsse nach den „VDLUFA-Methoden“ [64]. Diese Methoden werden üblicherweise bei der Untersuchung von Futtermitteln eingesetzt; ihre Eignung für Biomassebrennstoffe war jedoch zuvor in dem durchgeführten Ringversuch bestätigt worden (vgl. Kap. 4.1.2).

Die Nachweisgrenzen wurden in Einzelfällen lediglich bei den Schwermetallen unterschritten. Jeder Wert wurde doppelt bestimmt (2 Aufschlüsse, zwei Messungen); angegeben wird der Mittelwert. Bei stärkeren Abweichungen wurde noch eine dritte Messung durchgeführt. Die Chemikalien wurden in p.a.-Qualität eingesetzt („pro analysis“: Reagenzien der höchsten Reinheitsstufe). Bei der Quecksilberbestimmung wurde eine spezielle quecksilberarme Salpetersäure verwendet. Zur Bestimmung der Elementgehalte wurden folgende Geräte verwendet:

IC:	DX 100, Fa. Dionex
ICP:	Fa. Perkin Elmer, Optima 3000,
Hydrid-AAS:	Fa. Perkin Elmer, 2380
Flammen-AAS:	Fa. Perkin Elmer, 1100 B
Kaltdampf-AAS:	Fa. Perkin Elmer, FIMS
Graphitrohrföfen-AAS:	Fa. Perkin Elmer, 4100 ZL
CN-Analysator:	Fa. Leco, CN-2000

**Tab. 23** Analysemethoden und Bestimmungsgrenzen bei den Brennstoffuntersuchungen

Parameter	Methode	Bestimmungsgrenze <sup>1)</sup>
Heizwert	DIN 51900 Teil 3 [29] (adiabatisches Verfahren)	
Flüchtige Bestandteile	DIN 51720 [28]	
Aschegehalt	DIN 51719 [25] (bei 550 °C)	
Wassergehalt	DIN 51718 [27] (Trockenschrankverfahren; bei 105 °C)	
C, H, N (N = N <sub>ges</sub> )	Verbrennung im Sauerstoffstrom mit nachgeschalteter gaschromatographischer Trennung mittels Elementaranalysator	
Cl (=Cl <sub>ges</sub> ) <sup>2)</sup>	<i>Aufschluss:</i> 5 g Probe + ca. 10 ml Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (5 %); Trocknung bei 105 °C und anschließende Veraschung (3 h bei 550 °C); Filtration mit Bidestwasser <i>Messung:</i> IC	25 mg/kg
S	<i>Aufschluss:</i> 0,25 g Probe + 5 ml HNO <sub>3</sub> (65 %) + 1 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (30 %); Mikrowellenaufschluss <i>Messung:</i> ICP	
P, K, Ca, Mg	<i>Aufschluss:</i> Veraschung von 5 g Probe (3 h bei 550 °C); Asche + 10 ml HCl (konzentriert); Abrauchen (bei 240 °C) auf Sandbad bis Trockne; Überspülen mit ca. 5 ml HCl (10 %), ca. 20 ml heißem Reinstwasser und 5 ml HCl (konzentriert), 1 min kochen; Auffüllen mit Reinstwasser auf 250 ml und Filtration <i>Messung:</i> ICP	
As	<i>Aufschluss:</i> 1 g Probe + 1,5 g MgO + 20 ml MgNO <sub>3</sub> (10 %); Trocknen auf Sandbad bei 180 °C; Veraschung (8 h bei 550 °C); Lösung in HCl (halbkonzentriert) <i>Messung:</i> Hydrid-AAS	0,1 mg/kg
Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Pb	<i>Aufschluss:</i> 0,25 g Probe + 5 ml HNO <sub>3</sub> (65 %) + 1 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (30 %); Mikrowellenaufschluss <i>Messung:</i> Graphitrohrföfen-AAS	0,1 mg/kg (Cd) 0,5 mg/kg (Pb) 1,0 mg/kg (Rest)
Hg	<i>Aufschluss:</i> 0,25 g Probe + 5 ml HNO <sub>3</sub> (65 %) + 1 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (30 %); Mikrowellenaufschluss <i>Messung:</i> Kaltdampf-AAS	0,05 mg/kg
Cu, Mn, Zn	<i>Aufschluss:</i> 1 g Probe + 30 ml HNO <sub>3</sub> /HClO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Mischungsverhältnis 40 : 5 : 2) <i>Messung:</i> Flammen-AAS	2 mg/kg

<sup>1)</sup> bezogen auf die Trockenmasse

<sup>2)</sup> Analyse des löslichen Chlorids; entspricht dem Gesamtchloridgehalt

*Hinweise:* Angabe der Bestimmungsgrenze nur für Parameter, die in sehr niedrigen Konzentrationen zu erwarten sind; Bestimmungsgrenzen beziehen sich auf eine Einwaage und ein Volumen der Messlösung (Verdünnung) von 2,5 g und 50 ml (As, Cu, Zn, Mn) bzw. 0,25 g und 20 ml (Cd, Cr, Co, Mo, Ni, Hg, Pb); Einwaage bei PCDD/F- und PAK-Analyse: 50-100 g

*Erläuterungen:* IC: Ionenchromatographie; ICP: Plasmaemissionsspektrometrie; AAS: Atomabsorptionsspektrometrie

**Aschegehalt und Ascheschmelzverhalten.** Die Veraschung wurde sowohl bei 815 °C als auch bei 550 °C durchgeführt. Die erstgenannte Temperatur wird bei Kohlebrennstoffen angewendet (DIN 51719 [25]), während die zweitgenannte im Bereich der Biomasse (inkl. Futtermittel) üblich ist. Dabei wird von jeder wasserfreien Analysenprobe etwa 1 g Masse in einen kalten, elektrisch beheizbaren Muffelofen auf 550 bzw. 815°C erhitzt und dann bei dieser Temperatur innerhalb einer Dauer von mindestens einer Stunde vollständig verascht. Aus der Menge des Verbrennungsrückstandes wird der Aschegehalt des Brennstoffs berechnet. Die Veraschung erfolgt stets bei oxidierender Atmosphäre. Für die Ergebnisdarstellung in Kapitel 4.2 wurden ausschließlich die Messwerte aus der Bestimmung bei 550 °C herangezogen.

Für die Bestimmung des Erweichungsverhaltens der Brennstoffasche wird von jeder untersuchten Probe ein aus der Brennstoffasche hergestellter würfelförmiger Probenkörper gepresst und anschließend während eines vorgeschriebenen Temperaturverlaufs erhitzt (DIN 51730 [26]). Die Temperaturen, bei denen sich dieser Probenkörper durch Erweichung der Aschepartikel auffällig verändert, werden vermerkt. Sie gelten als Eckpunkte des Erweichungsverhaltens. In der vorliegenden Untersuchung wurde der Erweichungsverlauf mit Hilfe einer Videokamera aufgezeichnet. An den Veränderungen der Silhouette des Würfels lässt sich die Erweichung beobachten. Verschiedene definierte Grenzzustände kennzeichnen das Erweichungsverhalten. Die dabei auftretenden Grenztemperaturen sind [26]:

- *Sinterbeginn:* Erstmaliges Zusammenkleben einzelner Ascheteilchen an ihren Grenzflächen. Dabei kann der Probekörper zwar seine ursprüngliche Größe verändern, die die Erweichungstemperatur kennzeichnenden Merkmale werden jedoch noch nicht beobachtet.
- *Erweichungstemperatur:* Erste Anzeichen des Erweichens der Asche, z. B. Veränderung der Oberfläche, Abrundung der Kanten, beginnendes Blähen des Probekörpers
- *Halbkugeltemperatur:* Der Probekörper nähert sich der Form einer Halbkugel an, der geschmolzene Probekörper ist halb so hoch wie seine Grundlinie.
- *Fließtemperatur:* Der Probekörper ist auf ein Drittel seiner ursprünglichen Höhe auseinandergeflossen.

Das Prüfgerät besteht aus einem elektrisch beheizten Rohrofen mit Probenhalter, einer Vorrichtung für Videoaufnahmen sowie einer Lichtquelle. Die zerkleinerten Proben werden zunächst bei 815 °C verascht (s.o.) und in einem Achatmörser zerrieben. Ein Teil der Probe wird dann mit destilliertem Wasser etwas angefeuchtet und mit einer Federdruck-Handpresse zu einem Probekörper zusammengepresst (Würfel mit 3 mm Kantenlänge). Das Ascheschmelzverhalten wird anschließend in oxidierender Atmosphäre bestimmt. Der Probekörper wird dabei auf einem Objektträger in den Ofen geschoben. Nach dem Einschalten der Beleuchtung wird das Schattenbild des Probekörpers so auf der Mattscheibe ausgerichtet, dass es in der Mitte des Bildausschnittes erscheint und

seine Kanten mit den Linien einer Koordinaten-Strichplatte parallel verlaufen. Der Ofen wird ungefähr auf die Veraschungstemperatur vorgeheizt. Danach beträgt die fortlaufende Temperaturerhöhung ca. 10 K pro Minute. Das Verhalten des Probekörpers wird nun optisch erfasst und die charakteristischen Temperaturen werden registriert. Die Registrierung erfolgt durch einen Beobachter am gleichen Prüfgerät. Jede Bestimmung wird zwei- bis dreimal wiederholt. Aus den Einzelwerten werden die Mittelwerte errechnet.

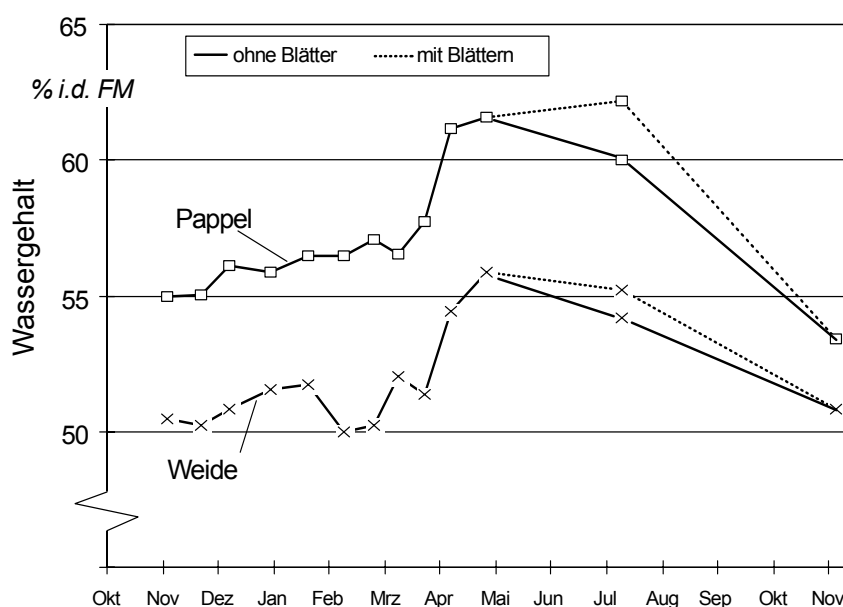
## 4.2 Ergebnisse

Analog zum Versuchsplan (vgl. Kap. 4.1.1, Tab. 14) werden nachfolgend die Auswertungen zu den wichtigsten untersuchten Einflussgrößen (Erntetermin, Feldverweilzeit, Düngung) dargestellt. Dabei werden zunächst nur die wichtigsten Analyseparameter wie die Konzentration der Hauptelemente, der Aschegehalt, das Ascheerweichungsverhalten sowie der Heizwert betrachtet. Schwermetallanalysen werden dagegen in einem zusammenfassenden Kapitel gesondert dargestellt (Kap. 4.2.5). Ebenfalls getrennt dargestellt werden die Ergebnisse zu den „weiteren Brennstoffen“ und für den Straßengrasschnitt, bei denen keine speziellen Einflussgrößen zu betrachten waren (Kap. 4.2.4).

### 4.2.1 Einfluss des Erntetermins

#### 4.2.1.1 Kurzumtriebsplantagen

Die Holzernte wird in der Regel während der Vegetationsruhe im Winter durchgeführt. In diesem Zeitraum sind auch die Wassergehalte relativ niedrig. Mit Beginn der biologischen Aktivität im April/Mai wurde sowohl bei Pappeln als auch bei Weiden eine rasche Zunahme des Wassergehalts um etwa 5 Prozentpunkte festgestellt. Im Laufe des Sommers kommt es offenbar wieder zu einem Rückgang. Der Laubanteil an der Gesamttrockenmasse, der im Juli bei 11 % (Pappeln) bzw. 14 % (Weiden) lag, trägt zu einer weiteren Erhöhung des Gesamtwassergehalts bei. Pappeln haben im Vergleich zu Weiden im Mittel einen um 5 Prozentpunkte höheren Wassergehalt (2,6 bis 6,9 %punkte). Das geht auch aus Abb. 19 hervor.



**Abb. 19** Einfluss des Erntetermins auf den Wassergehalt von 5jährigen Pappeln und Weiden aus Kurzumtriebsplantagen

**Pappeln.** Während der Winterruhe betragen die *Stickstoffgehalte* von Pappeln im Mittel 0,45 % in der Trockenmasse. In der Zeit von November bis April ist die maximale Abweichung vom Mittelwert mit nur 8 % (nach unten) bzw. 12 % (nach oben) sehr gering. Durch Aufnahme und Verlagerung in die photosynthetisch aktiven Pflanzenteile erfolgt während der Sommermonate im Holz eine Abnahme des N-Gehalts um 40 % gegenüber dem Mittelwert des Winters (Abb. 20). Entsprechend hohe Stickstoffgehalte wurden in den Blättern bestimmt. Sie liegen etwa 10-fach höher als beim Holz. Ähnlich wie die N-Konzentrationen verhalten sich auch die *Schwefelgehalte*, die in den Blättern um das 15-fache höher liegen. Auch hier geht der Gehalt im Holz zum Juli hin um 30 % zurück, verglichen mit dem Mittelwert der Wintermonate (Nov.-Apr.).

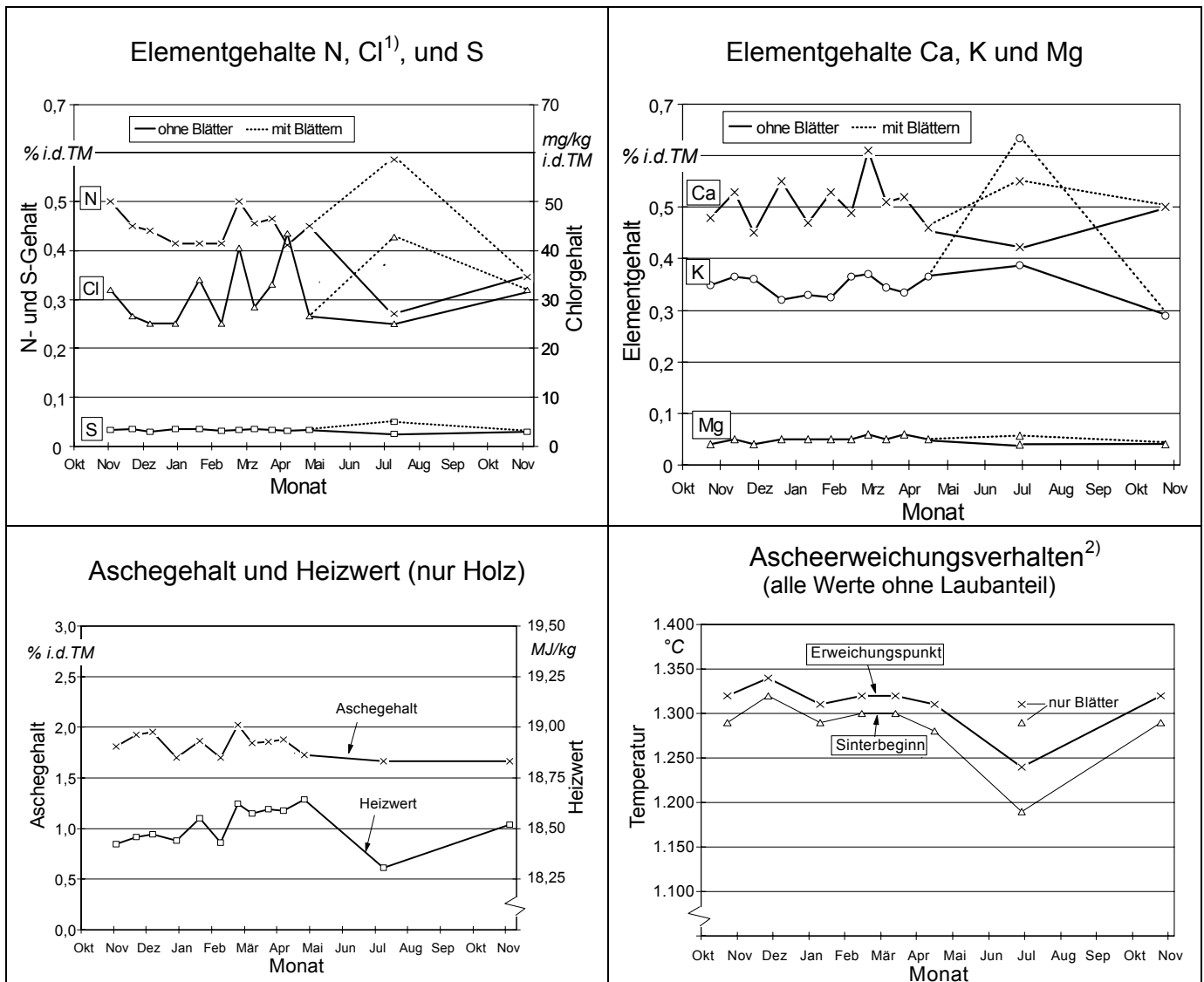
Die *Chlorgehalte* des Holzes schwanken in der Winterruhe weitaus stärker, sie liegen allerdings im Mittel nur bei 31 mg/kg i.d. TM und damit um etwa zwei Zehnerpotenzen niedriger als bei N, K oder Ca. Auf einem solch niedrigen Niveau sind Schwankungen dieser Größenordnung eher durch die Grenzen bei der Homogenisierbarkeit der Probe und durch Unschärfen bei der Mess- und Analysetechnik bedingt (vgl. Ringversuch in Kap. 4.1.2, S. 47). Die Abnahme des Cl-Gehalts zum Sommer hin beträgt nur ca. 20 %. Ähnlich wie beim Stickstoff liegt der Cl-Gehalt im Laub etwa 8mal höher als beim Holz.

Beim *Kaliumgehalt* sind die Schwankungen gering (Abb. 20). Die maximale Abweichung vom Mittelwert der Wintermonate (Nov.-Apr.) liegt bei nur bei 8 % bzw. bei 13 % im Juli. Betrachtet man allerdings den Gehalt der gesamten oberirdischen Biomasse im Sommer (inkl. Blätter), so ergibt sich beim Kalium der auffälligste Anstieg unter allen Elementen. Die Blätter, die im Sommer mit 11 % der gesamten Trockenmasse zu Buche schlagen, enthalten Kalium in der 4,9-fachen Konzentration des (Sommer-)Holzes.

Aufgrund geringer Konzentrationen bei den Elementen K, Mg, Ca liegt der *Aschegehalt* bei Pappeln im Vergleich zu den halmgutartigen Brennstoffen konstant niedrig. Er schwankt während der Beobachtungsperiode zwischen 1,6 und 2,0 % i.d. TM (Mittelwert: 1,77 %). Die maximale Abweichung vom Mittelwert war mit nur 13 % relativ gering. Auch der *Heizwert* (bezogen auf die absolut trockene Masse) bleibt im Jahresablauf konstant. Hier beträgt die maximale Abweichung vom Mittelwert nur 1 %.

Während der Wintermonate bleiben auch der *Ascheerweichungspunkt* und der *Sinterbeginn* relativ konstant. Zum Sommer hin wurde jedoch bei beiden Werten ein Abfall von rund 100 °C gemessen. Diese Beobachtung wird auch durch die parallel durchgeführten Untersuchungen an Weiden gestützt (vgl. Abb. 21, S. 60). Der Abfall geht in beiden Fällen einher mit einem sich verengenden Ca/K-Verhältnis, das für das Ascheerweichungsverhalten eine wesentliche Bestimmungsgröße darstellt (vgl. Kap. 2.2 und Kap. 5.3.2, S. 102). Bei der Zusammenstellung der Ergebnisse (Abb. 20) wird der Ascheschmelzpunkt nicht dargestellt, da dieser durchweg über der Bestimmbarkeitsgrenze von





<sup>1)</sup> Nachweisgrenze von Cl bei 25 mg/kg TM

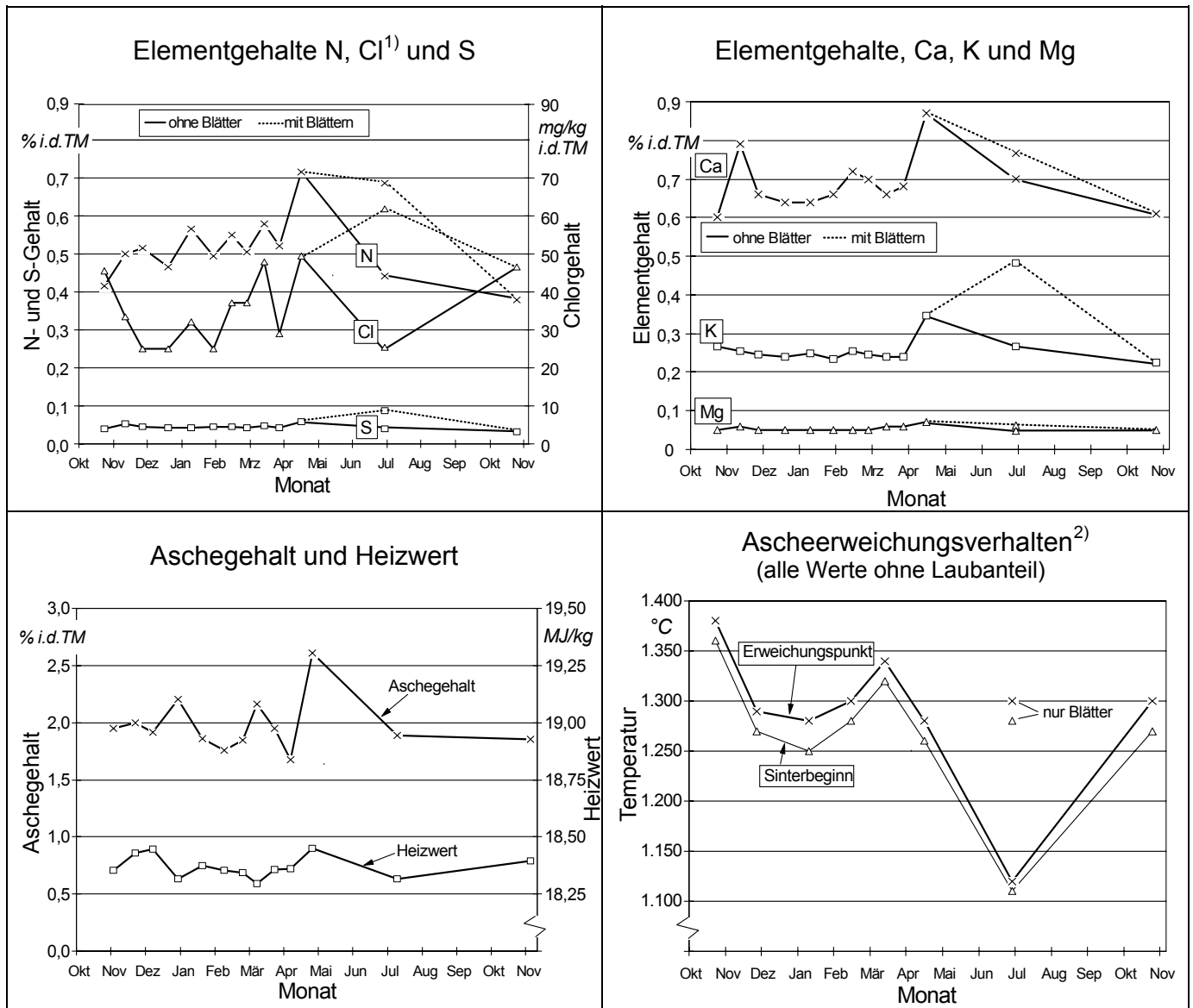
<sup>2)</sup> Halbkugel- und Fließpunkt lagen oberhalb der Nachweisgrenze von 1.500 °C (daher hier nicht dargestellt)

**Abb. 20** Einfluss des Erntetermins auf die Brennstoffqualität von 5jährigen Pappeln aus Kurzumtriebsplantagen

1.500 °C lag. Da sich während der Messung auch kein klar erkennbarer Halbkugelpunkt ausbildete, liegen zu diesem Parameter für Pappelholz ebenfalls keine Angaben vor.

**Weiden.** Die im Jahresablauf beobachteten Qualitätsänderungen (Abb. 21) verlaufen bei Weiden grundsätzlich ähnlich wie bei Pappeln. Der *Stickstoffgehalt* lag mit 0,51 % i.d. TM nur um 13 % (=0,06 %punkte) höher (Vergleich der Wintermonate). Beim *Schwefelgehalt* wurden ebenfalls höhere Werte gemessen (+33 %), während der Anstieg beim *Chlorgehalt* nur 7 % beträgt. In den Blättern lag der Cl-Gehalt um das 14-fache über dem Holz. Der Laubanteil an der Gesamttrockenmasse betrug 14 % (Monat Juli).

Auch der *Kalziumgehalt* war bei Weiden höher als bei Pappeln (+33 %), während lediglich der *Kaliumgehalt* um 29 % niedriger lag (Mittelwerte der Wintermonate). Kaum Un-



<sup>1)</sup> Nachweisgrenze von Cl bei 25 mg/kg i.d. TM

<sup>2)</sup> Halbkugel- und Fließpunkt lagen oberhalb der Nachweisgrenze von 1.500 °C (daher hier nicht dargestellt)

**Abb. 21** Einfluss des Erntetermins auf die Brennstoffqualität von 5-jährigen Weiden aus Kurzumtriebsplantagen

terschiede wurden beim mittleren *Aschegehalt* in den Wintermonaten festgestellt. Er lag mit 1,94 % i.d.TM nur geringfügig über dem Wert für Pappeln. Auch der *Heizwert*, der bei der Weide in der Beobachtungsperiode ebenfalls sehr konstant blieb, weicht kaum von dem Wert für Pappeln ab. Der leichte Abfall um 0,16 MJ/kg korrespondiert mit dem etwas höheren Aschegehalt.

Wie bei Pappeln fallen die *Ascheerweichungstemperaturen* auch beim Weidenholz zum Sommer hin um mehr als 100 °C ab (Abb. 21). Auch hier liegen die absoluten Werte im Jahresablauf etwa gleichauf mit Pappelholz. Die Ascheerweichung ist bei den Blättern weniger kritisch zu bewerten, als beim dazugehörigen „Sommer“-Holz, da der Sinterbe-

ginn und der Erweichungspunkt bei der Laubasche jeweils um mehr als 100 °C höher liegt. Ähnliches ist auch bei Pappeln zu beobachten (vgl. Abb. 20).

Ein Zusammenhang zwischen den Elementgehalten und den Merkmalen der beprobten Triebe (Basisdurchmesser, Triebhöhe, Triebfrischmasse) konnte weder bei Pappeln noch bei Weiden festgestellt werden. Die Ergebnisse der Schwermetallanalysen werden zusammenfassend in 4.2.5 dargestellt.

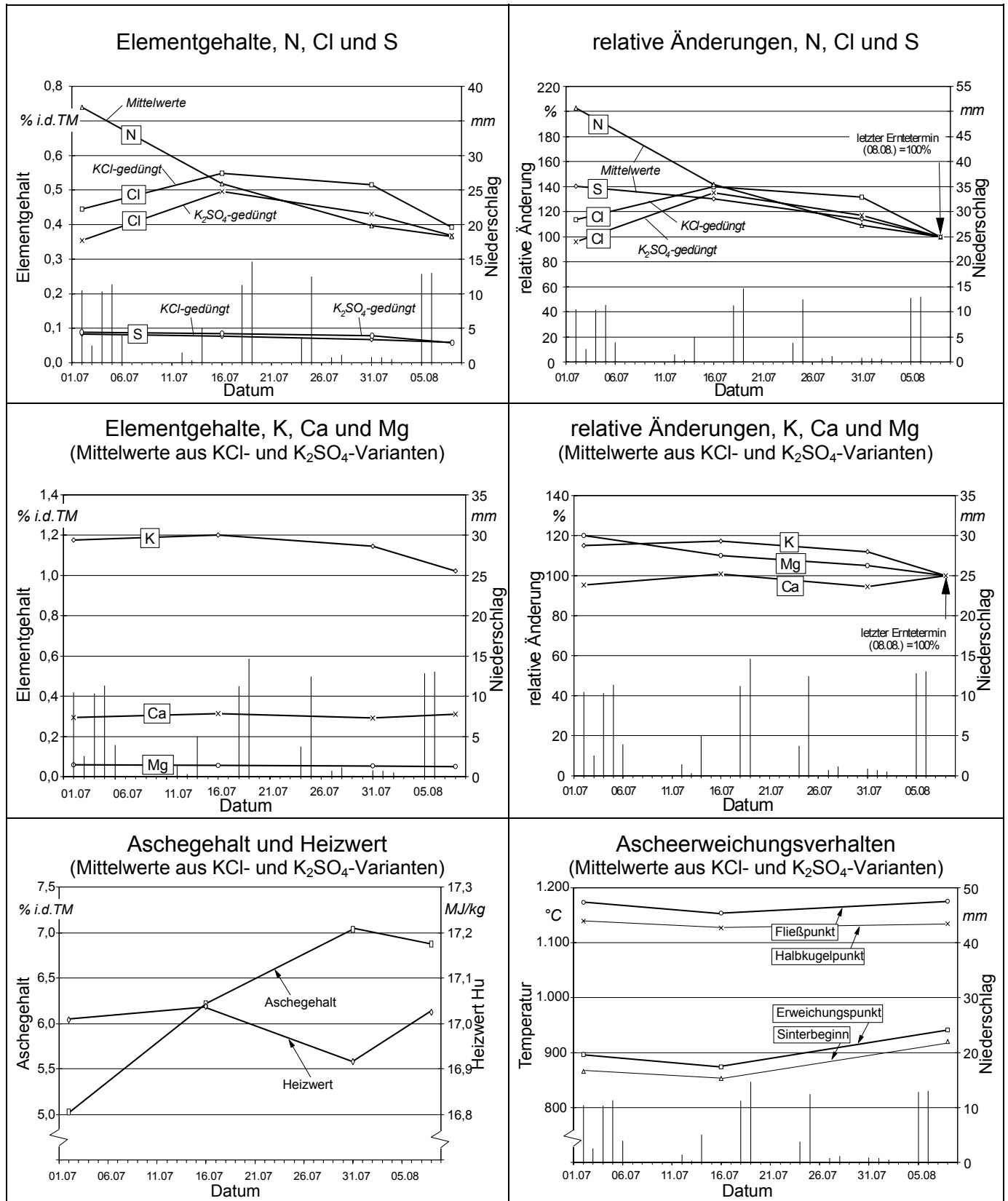
#### 4.2.1.2 Triticale

Anders als bei den Pappeln und Weiden wurde bei Triticale nicht nur die Wirkung unterschiedlicher Erntetermine, sondern auch Düngungseffekte betrachtet. Letztere werden erst in Kapitel 4.2.3.1 vorgestellt, obgleich diese aus den nachfolgenden grafischen Darstellungen (Abb. 22, Abb. 23, Abb. 25) bereits zum Teil ablesbar sind. In diesen Auswertungen werden die Elementgehalte sowohl in ihrer absoluten Höhe als auch in ihrer relativen Abweichung gegenüber dem tatsächlichen Erntetag (in Prozent) dargestellt.

Während des Beobachtungszeitraumes vom 2. Juli bis zum 8. August waren zu 4 Terminen jeweils 4 Ganzpflanzenproben gewonnen und in ihre Korn- und Strohanteile aufgeteilt worden. Bei den Elementen N, K, Ca, Mg wurden beide Proben von der sulfat- und von der chloridgedüngten Fläche gemeinsam ausgewertet (Mittelwertbildung aus vier Wiederholungen), da hier keine düngungsbedingten Unterschiede zu erwarten waren. Lediglich beim Chlor- und Schwefelgehalt erfolgte eine getrennte Auswertung (je 2 Wiederholungen). Die physiologischen Reifezustände waren: Milchreife (02.07.), Teigreife (16.07.), Totreife (31.07.) und eine Ernte erfolgte in der Totreife (08.08.).

**Triticalestroh.** Zu größeren Gehaltsveränderungen im Stroh kam es vor allem beim *Stickstoffgehalt*, der sich während der Abreife (Milchreife bis Totreife) halbierte (Abb. 22). Als Ursache ist die Tatsache anzusehen, dass Aminosäuren nach der Blüte allmählich vom Halm in die Ähre verlagert werden. Dieser Prozess erreicht etwa vier Wochen nach der Blüte - also etwa zur Teigreife - sein Maximum und schwächt sich anschließend bis zur Totreife wieder ab [69]. Hierin ist auch die Erklärung für das Abflachen des Konzentrationsabfalls zum Ende hin zu suchen. Deutlich geringer ist der Abfall des *Schwefelgehalts*, der zur Milchreife noch um 40 % höher als zum Erntetermin liegt. Da im Korn keine Veränderungen feststellbar sind (Abb. 23), kommen Verlagerungsvorgänge wie beim Stickstoff als Ursache kaum in Frage.

Beim *Chlorgehalt* wurde bei beiden Düngungsvarianten zunächst ein Anstieg von der Milchreife bis zur Teigreife festgestellt. Diese Beobachtung erfolgte parallel auf den chloridgedüngten und auf den sulfatgedüngten Flächen. Bis zur Totreife kam es dann wieder zu einem Abfall, durch den das Ausgangsniveau in etwa wieder erreicht wurde. Die dabei auftretenden Schwankungen lagen bei etwa 40 % des Gehaltes zum Totreifezeitpunkt.



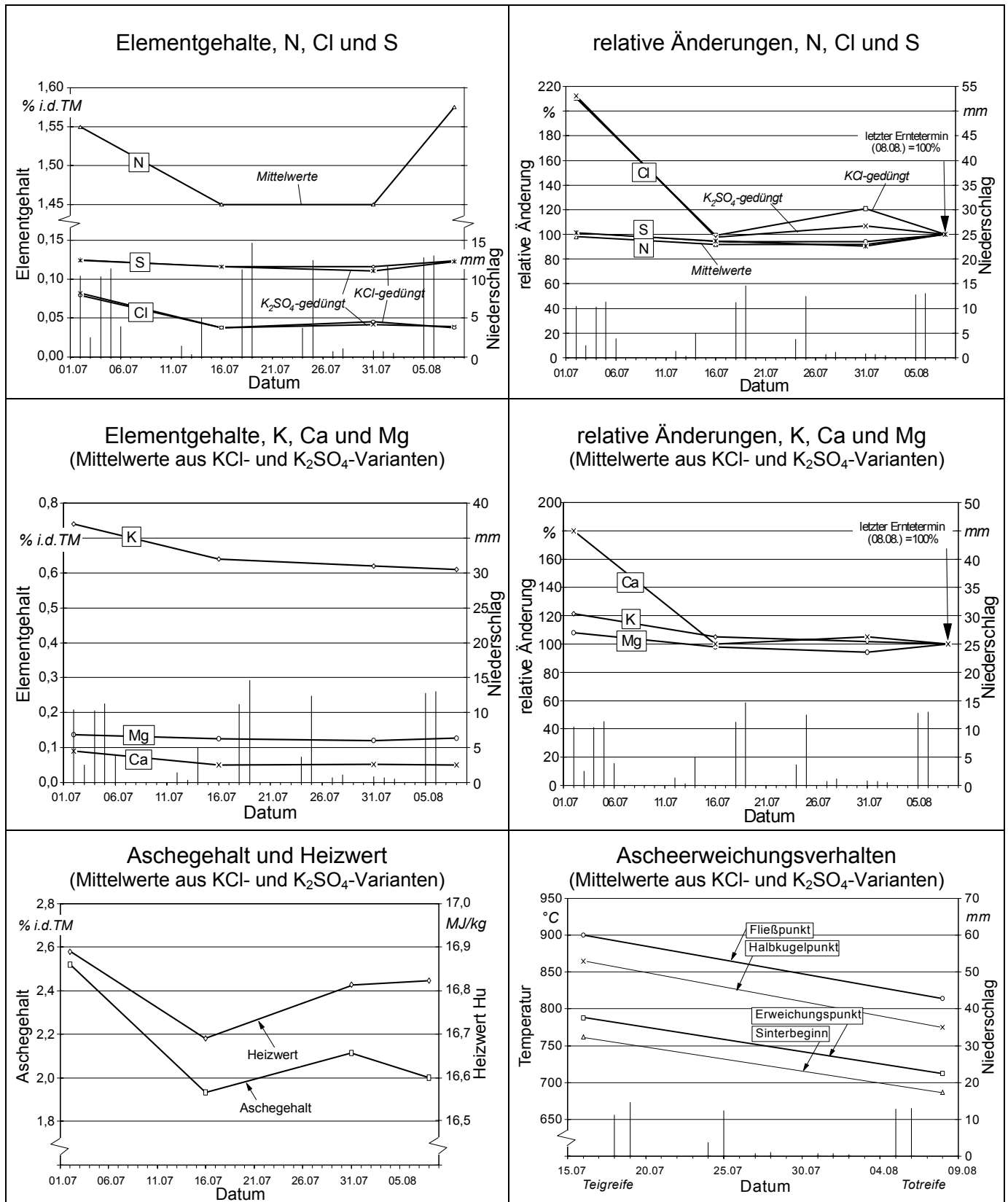
**Abb. 22** Einfluss des Erntetermins auf die Brennstoffqualität von Triticalestroh

Kaum nennenswerte Veränderungen wurden dagegen beim *Kalium- und Magnesiumgehalt* beobachtet, die lediglich um maximal 10 bis 20 % zurückgingen. Obwohl das Kalium in gelöster Form vorliegt, waren die auftretenden Niederschläge von maximal 10 bis 15 mm (Abb. 22) hier offenbar wenig wirksam, zumal die Abreife des Strohs gegenüber den Körnern generell verzögert abläuft, so dass ein Schutz vor Auswaschung noch über einen längeren Zeitraum bestehen bleibt.

Besonders auffällig ist der Verlauf des *Aschegehaltes*, der beim Stroh während der Abreifepériode um ca. 2 %punkte ansteigt. Dieser Anstieg (Abb. 22) wurde sowohl auf der chlorid- als auch auf der sulfatgedüngten Fläche festgestellt. Zwar ist die Variabilität des Aschegehaltes beim Halmgut ohnehin relativ hoch, dennoch können hierfür auch systematische Ursachen in Frage kommen, auch wenn sich beispielsweise für eine Umverteilung von Mineralstoffen in der Pflanze aus der vorliegenden Untersuchung keine direkten Anhaltspunkte ergeben. Ebenso wäre auch ein Fremdeintrag durch Wind, ein Spritzwassereintrag durch Niederschläge oder der Abwurf ascheärmerer Getreideblätter zugunsten eines steigenden Halmanteils im Stroh als Erklärung denkbar. Außerdem kommt eine verstärkte Siliziumeinlagerung in Frage, da dieses Element einen positiven Effekt auf die Halmstabilität besitzt [30]. Silizium gehört zu den mengenmäßig bedeutendsten Aschebestandteilen. In der Asche von Triticale-Ganzpflanzen ist mit Gehalten von ca. 60 % zu rechnen [95]. Zur Ursachenfeststellung des hier beobachteten Aschegehaltsanstiegs in den Pflanzen sind weitere Analysen an verschiedenen Pflanzenteilen erforderlich.

Wie erwartet sind die Schwankungen beim *Heizwert* mit ca.  $\pm 0,1$  MJ/kg sehr gering. Bei separater Auswertung der Chlorid- und Sulfatvarianten (hier nicht dargestellt) kann eine leichte Abhängigkeit zum Aschegehalt festgestellt werden. Beim *Ascheerweichungsverhalten* konnten dagegen keine auffälligen Effekte durch Vorverlegung des Erntetermins festgestellt werden (Abb. 22). Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die N-Gehalte im Stroh stark, die S- und Cl-Gehalte mäßig und die K-, Mg- und Ca-Gehalte kaum reduzieren, während der Aschegehalt mit fortschreitendem Erntetermin ansteigt.

**Triticalekörner.** Der Stickstoffgehalt liegt im Korn etwa um das zwei- bis dreifache höher als im Triticalestroh, er ist jedoch während der Abreife kaum veränderlich. Die oben erwähnte N-Verlagerung vom Stroh zum Korn hat hier offenbar vornehmlich zu einer höheren Kornmasse anstatt zu einer erhöhten Stickstoffkonzentration geführt. Der Kaliumgehalt liegt noch 5 Wochen vor der Totreife um 21 % höher, ebenso der Cl-Gehalt (+110 %). Vorteile für die Praxis lassen sich hieraus jedoch nicht ableiten, da die Kornmasse und -konsistenz zum Zeitpunkt der Milchreife noch zu gering ist, um separat geerntet werden zu können. Daher hat diese Feststellung hier nur theoretischen Wert. Für den späteren Abfall des Chlorgehalts werden als Ursache nicht Auswaschungseffekte, sondern vielmehr die eintretenden Verdünnungseffekte infolge der fortschreitenden Assimilateinlagerung vermutet (vgl. Korn/Stroh-Verhältnis, Abb. 24).



**Abb. 23** Einfluss des Erntetermins auf die Brennstoffqualität von Triticalekörnern

Weitere auffällige Veränderungen während der Abreifeperiode sind bei den Elementgehalten nicht festzustellen (Abb. 23). Der Abfall beim Chlorgehalt ist angesichts der insgesamt etwa um eine Zehnerpotenz niedrigeren absoluten Konzentration unbedeutend. Auch der Kaliumgehalt liegt im Korn um 40 bis 50 % niedriger als im Stroh.

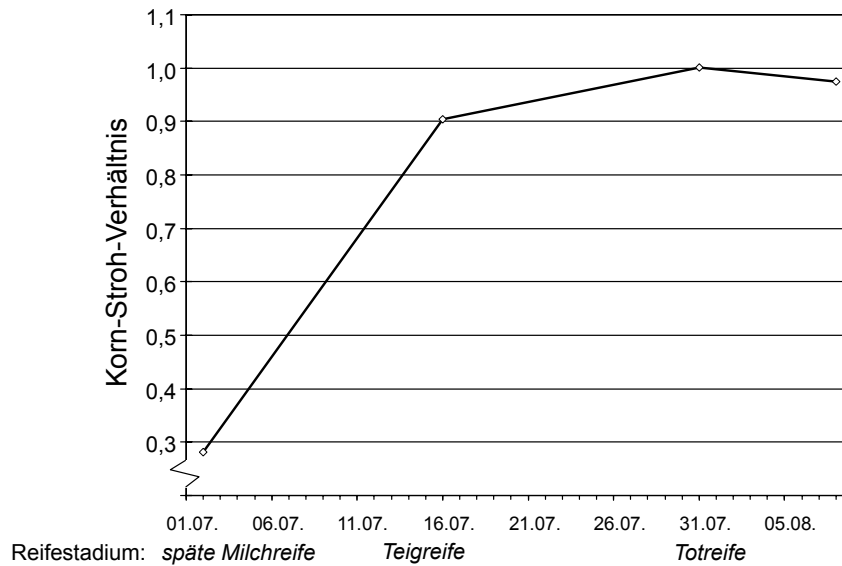
Der *Aschegehalt* der Triticalekörner ist mit nur etwa 2 bis 2,5 % erwartungsgemäß niedriger als im Stroh (ca. 5 bis 7 %). Wie beim Heizwert sind auch hier die dargestellten Schwankungen kaum durch systematische Ursachen erklärbar. Sie sind vielmehr Ausdruck der unvermeidlichen Unschärfe bei der Probenhomogenität und beim Analyseverfahren.

Das *Ascheerweichungsverhalten* wurde für nur zwei Eckpunkte des Abreifezeitraumes (Teig- und Totreife) bestimmt. Die Mittelwerte aus jeweils vier Wiederholungen zeigen eine deutliche Absenkung der jeweiligen Temperaturen um ca. 100 °C. Hier wirkt sich offenbar der sinkende Kalziumgehalt nachteilig aus (vgl. hierzu auch Kap. 2.2, S. 12 und Kap. 5.3.2, S. 102). Da die Ascheerweichungstemperaturen der Körner mit 760 °C (Sinterbeginn) bis 900 °C (Fließpunkt) schon zur Teigreife auf einem besonders niedrigen Niveau liegen, ist der weitere Abfall bis zur Totreife besonders kritisch zu bewerten. Da auch die übrigen Messwerte der Variante mit mittlerer Kaliumdüngungsstufe und 0-Variante (vgl. Kap. 4.2.3.1) auf diesem Niveau liegen (in Abb. 23 nicht dargestellt), muss davon ausgegangen werden, dass es sich bei Triticalekörnern um einen Brennstoff mit besonders ungünstigen Ascheerweichungseigenschaften handelt, die sich durch Düngung kaum beeinflussen lassen (vgl. hierzu Abb. 38, S. 86). Die Betrachtung der nochmals niedrigeren Erweichungstemperaturen von Weizenkörnern (Kap. 4.2.2.1) belegt, dass diese Aussage auf Getreidekörner offenbar generell übertragbar ist.

**Triticaleganzpflanzen.** Die Element- und Aschegehalte sowie der Heizwert von Triticaleganzpflanzen wurden aus den getrennten Analysen für Körner und Stroh unter Berücksichtigung des jeweiligen Korn/Stroh-Verhältnisses errechnet. Die zuvor dargestellten Ergebnisse für diese beiden Fraktionen spiegeln sich demnach anteilig in den Werten für die Ganzpflanzen wider (Abb. 25).

Bedingt durch die oben erwähnte Nährstoffverlagerung vom Halm in die Ähre bleibt der *Stickstoffgehalt* während des Beobachtungszeitraums weitgehend konstant. Der *Gehalt an Schwefel und Magnesium* verändert sich ebenfalls kaum. Ein etwas stärkerer Rückgang ist bei den Elementen *Kalium* und *Kalzium* zu verzeichnen, während der *Chlorgehalt* am deutlichsten zurückgeht. Bei der KCl-gedüngten Variante sind die Gehaltsminderungen, bedingt durch höhere absolute Gehalte, am ausgeprägtesten (70 % weniger als zum Erntetermin). Als Ursache für diesen Rückgang lassen sich Auswaschungseffekte vermuten. Auffällig ist auch, dass bei den Ganzpflanzen im Gegensatz zum Stroh ein gleichmäßiger Abfall des Cl-Gehalts während der Abreife eintritt. Dies ist durch die auffällige Änderung des Korn/Stroh-Verhältnisses zu erklären (Abb. 24), die mit der fortschreitenden Assimilateinlagerung im Korn zusammenhängt. Somit wird der im Stroh

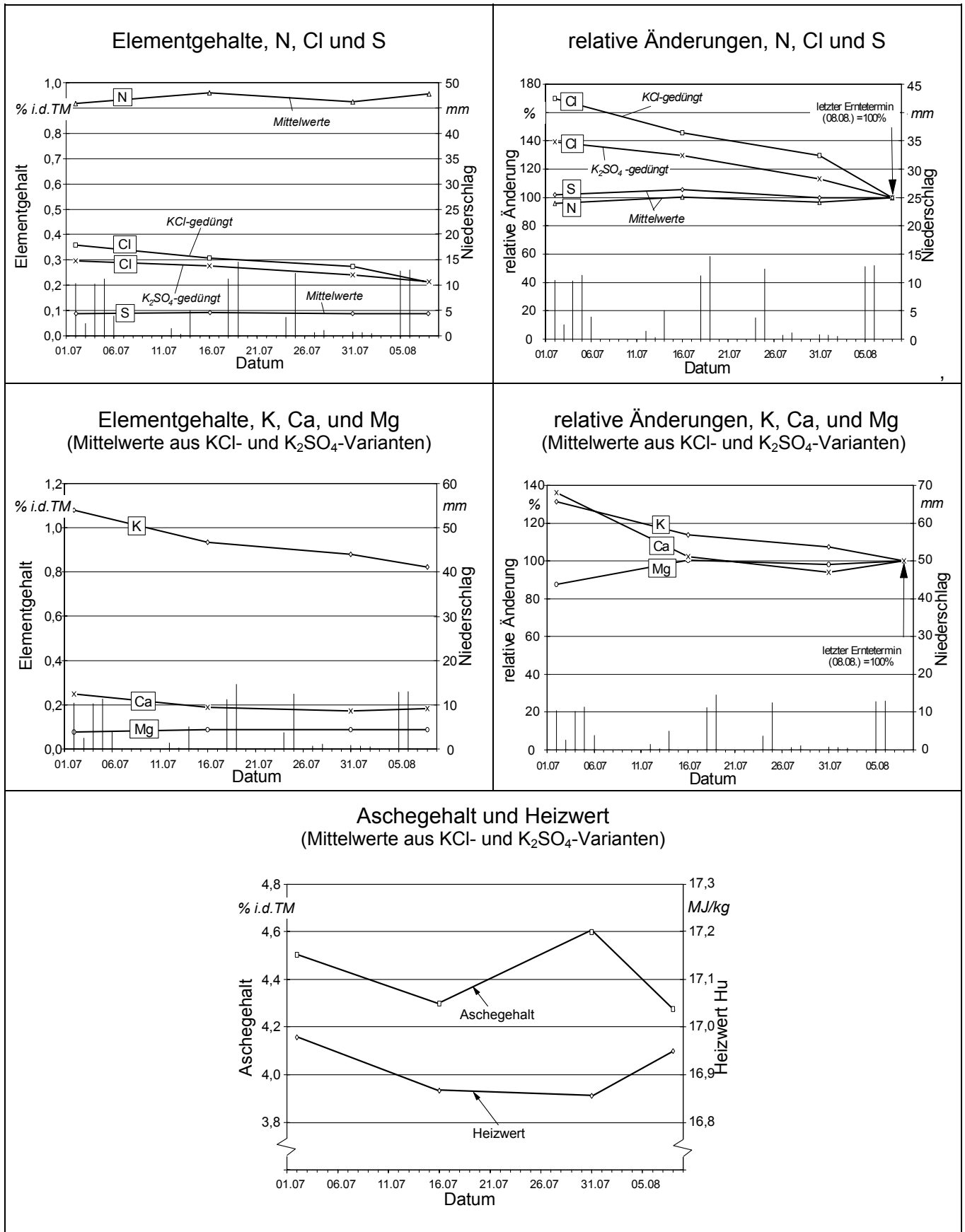
beobachtete Anstieg (zwischen Milch- und Teigreife) durch dessen verminderten Strohanteil in der Gesamtmasse kompensiert. Die Wirkung unterschiedlicher Düngermengen und -qualitäten werden im Kapitel 4.2.3.1 angesprochen.



**Abb. 24** Korn/Stroh-Verhältnis während der Abreife von Triticale

Der *Aschegehalt* und der *Heizwert* sind mit Schwankungen von 0,2 %punkten bzw. 0,1 MJ/kg nahezu unveränderlich. Nicht dargestellt werden die Temperaturen zum Ascheerweichungsverhalten der Ganzpflanzen, da sich diese nicht aus den Korn- und Strohanteilen errechnen lassen.





**Abb. 25** Einfluss des Erntetermins auf die Brennstoffqualität von Triticaleganzpflanzen

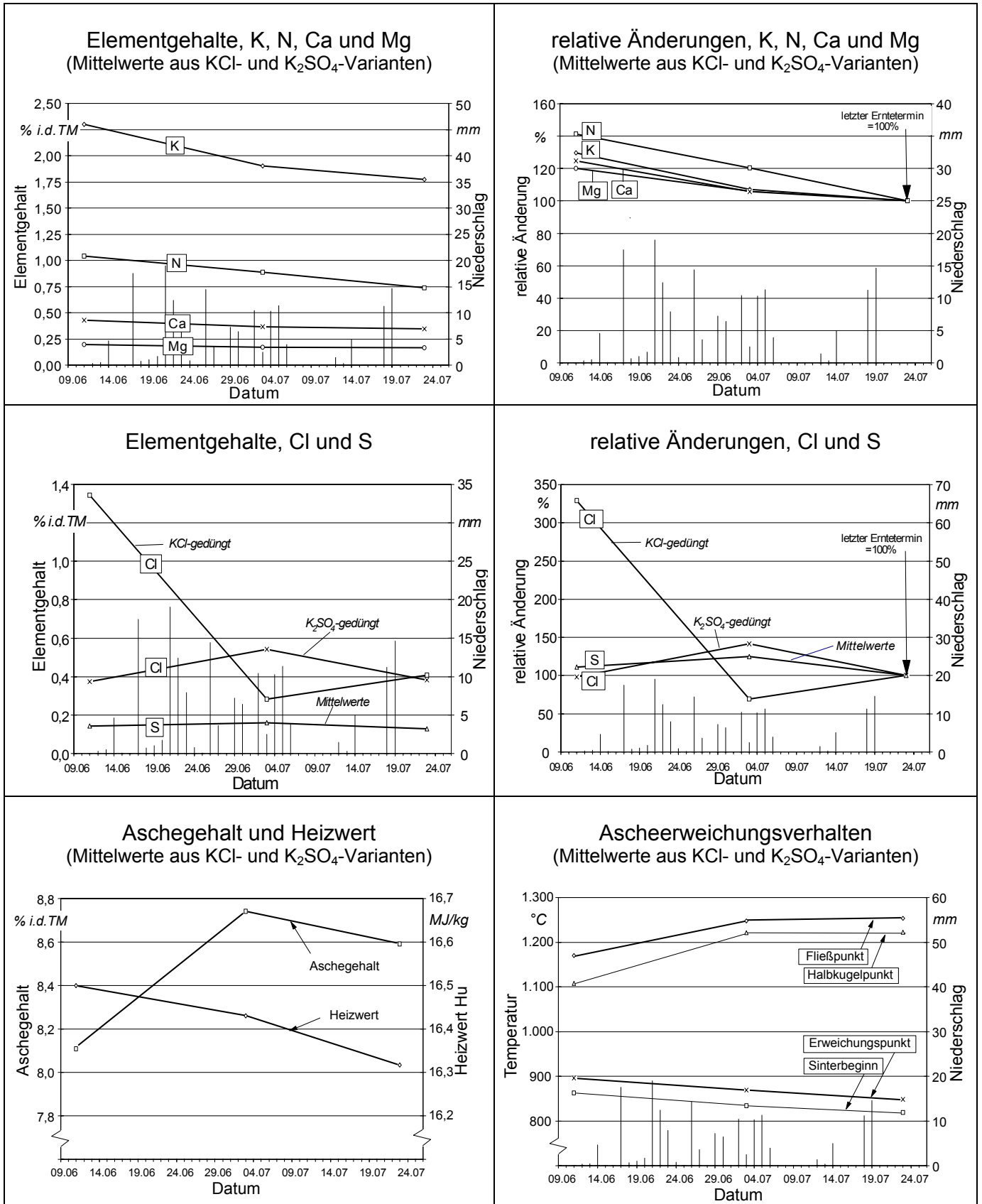
#### 4.2.1.3 Feldgras (Rohrschwengel)

Bei Rohrschwengel (*Festuca arundinacea*) erfolgte die Probenahme hauptsächlich zur Bewertung von Düngungseffekten (vgl. hierzu Kap. 4.2.3.2). Da aber weitere Proben an zwei zusätzlichen Terminen vor dem eigentlichen Erntedatum gewonnen worden waren, wird auch eine Betrachtung der Qualitätseffekte, die durch eine Vorverlegung des Erntetermins hervorgerufen werden können, möglich. In Abb. 26 werden die jeweiligen Mittelwerte aus den Wiederholungspartellen im Zeitverlauf grafisch dargestellt.

Während der Beobachtungsperiode vom 11.06. bis zum 23.07.1997 kam es zu einer Reihe von ergiebigen Niederschlägen, die in ihrer Höhe in Abb. 26 ebenfalls aufgetragen wurden. Der Rückgang beim leicht löslichen Element Kalium und vor allem beim Chlorgehalt lässt sich auf diese Regenfälle zurückführen. Allerdings wird dieser Effekt beim Chlor nur beobachtet, wenn die Ausgangskonzentration besonders hoch ist. Im vorliegenden Fall sind die hohen Chlorgehalte der KCl-Variante (ca. 1,3 % i.d.TM) auf die Verwendung des chloridhaltigen Kaliumdüngers zurückzuführen. Die ergiebigen Niederschläge zwischen dem ersten und dem zweiten Probenahmedatum haben aber offenbar ausgereicht, um die Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten auszugleichen. Da im Beobachtungszeitraum ein Anstieg des Trockenmassegehaltes von 29 auf 37 % festgestellt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Bedingungen für die Auswaschung aufgrund des zunehmenden Anteils abgestorbener Substanz verbesserten.

Die *N-, K-, Mg- und Ca-Gehalte* erniedrigen sich bis zum Erntetermin nur mäßig (Abb. 26). Jedoch kam es - ähnlich wie bei Triticalestroh - während des Probenahmezeitraums zu einer Erhöhung des *Aschegehaltes*. Da dieser Anstieg nicht auf eine Steigerung beim Mg-, Ca- oder K-Gehalt zurückgeführt werden kann, müssen auch hier die Ursachen eher in der vermehrten Aufnahme anderer Elemente wie z. B. Silizium (Kieselsäureaufnahme) oder in einem Eintrag von außen gesucht werden.

Aufgrund der relativ geringen Veränderungen bei den Elementen K, Ca und Mg bleibt auch das *Ascheerweichungsverhalten* relativ unverändert. Mit Werten zwischen 850 und 900 °C beim Erweichungspunkt ist dieser Brennstoff allgemein eher als problematisch einzustufen.



**Abb. 26** Einfluss des Erntetermins auf die Brennstoffqualität von Rohrschwinge (*Festuca arundinacea* SCHREB.)

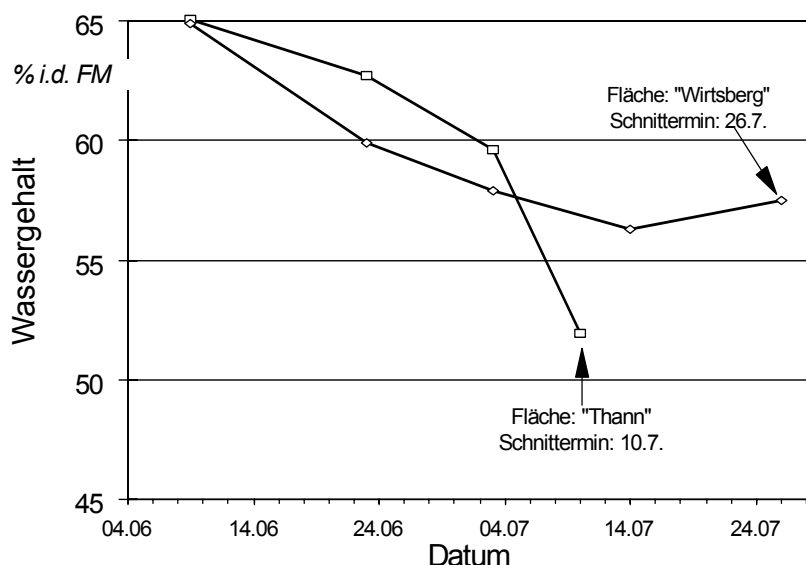
#### 4.2.1.4 Landschaftspflegeheu

Die Qualitätsveränderungen von Landschaftspflegeheu wurde an zwei verschiedenen Standorten untersucht. Nach der Mahd zu unterschiedlichen Terminen wurde das Mähgut wie geschnitten abgelegt (Schnittschwad). Es wurden unterschiedlich lange Untersuchungsperioden gewählt (vgl. Abb. 28 und Abb. 29). Die gemessenen Niederschläge wurden in die Ergebnisdarstellungen integriert.

Da die Wassergehalte des ungeschnittenen Grases mit zunehmender Abreife zurückgehen (Abb. 27), ist damit zu rechnen, dass der Anteil des abgestorbenen Grases sich zunächst erhöht und somit Auswaschungseffekte bereits vor dem eigentlichen Schnitttermin stattfinden können. Ab einem bestimmten Vegetationsstadium kommt es jedoch wieder zu einer Erhöhung durch den Wiederaustrieb nach der Blüte.

Auf beiden Versuchsflächen wurde noch vor dem eigentlichen Schnitttermin ein Rückgang des *Kaliumgehaltes* festgestellt. Am Standort Wirtsberg fällt dieser Rückgang mit 74 % Differenz zum Referenzwert (Schnittdatum) deutlich höher aus als auf der Fläche „Thann“ (28 %). Beim Chlorgehalt ergibt sich dagegen kein einheitliches Bild. Hier kommt es sowohl zu einem Anstieg als auch zu einem Abfall bis zum Schnitttag. Allerdings liegt die absolute Höhe der Cl-Konzentration mit ca. 0,2 bis 0,35 % auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau, so dass Schwankungen in der dargestellten Größenordnung eher durch die Grenzen bei der Homogenisierbarkeit der Probe oder durch Unschärfen bei der Mess- und Analysetechnik bedingt sein können (vgl. Ringversuch in Kap. 4.1.2, S. 47).

Konzentrationsveränderungen vor dem Schnitttermin waren bei *P*-, *Mg*-, *Ca*- und *S* auf beiden Standorten eher unbedeutend bzw. ebenfalls eher auf die niedrigen absoluten Werte zurückzuführen. Der Rückgang des *Stickstoffgehalts* könnte dagegen durch die

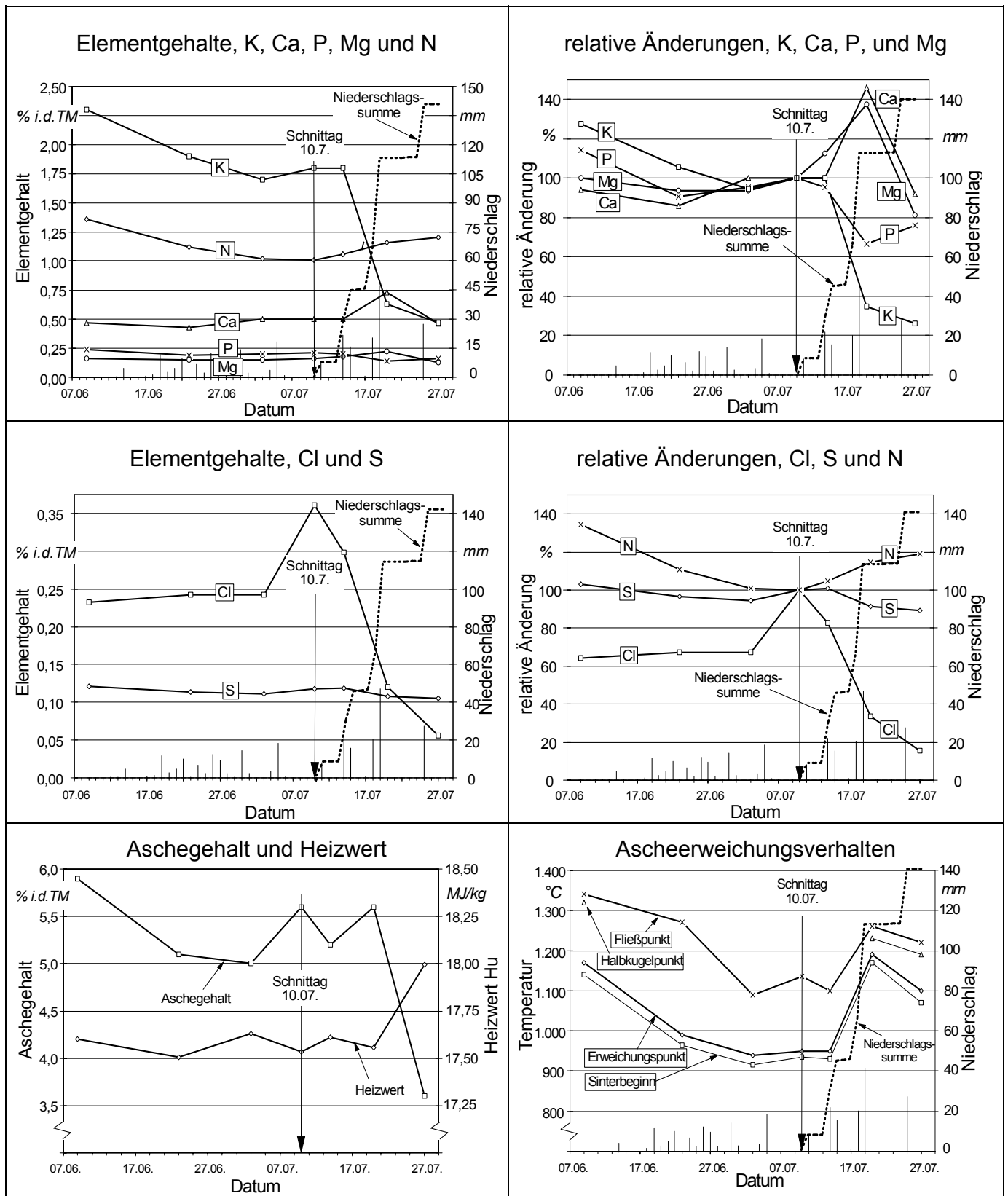


**Abb. 27** Wassergehalt und Schnitttermin beim Landschaftspflegeheu an zwei verschiedenen Standorten

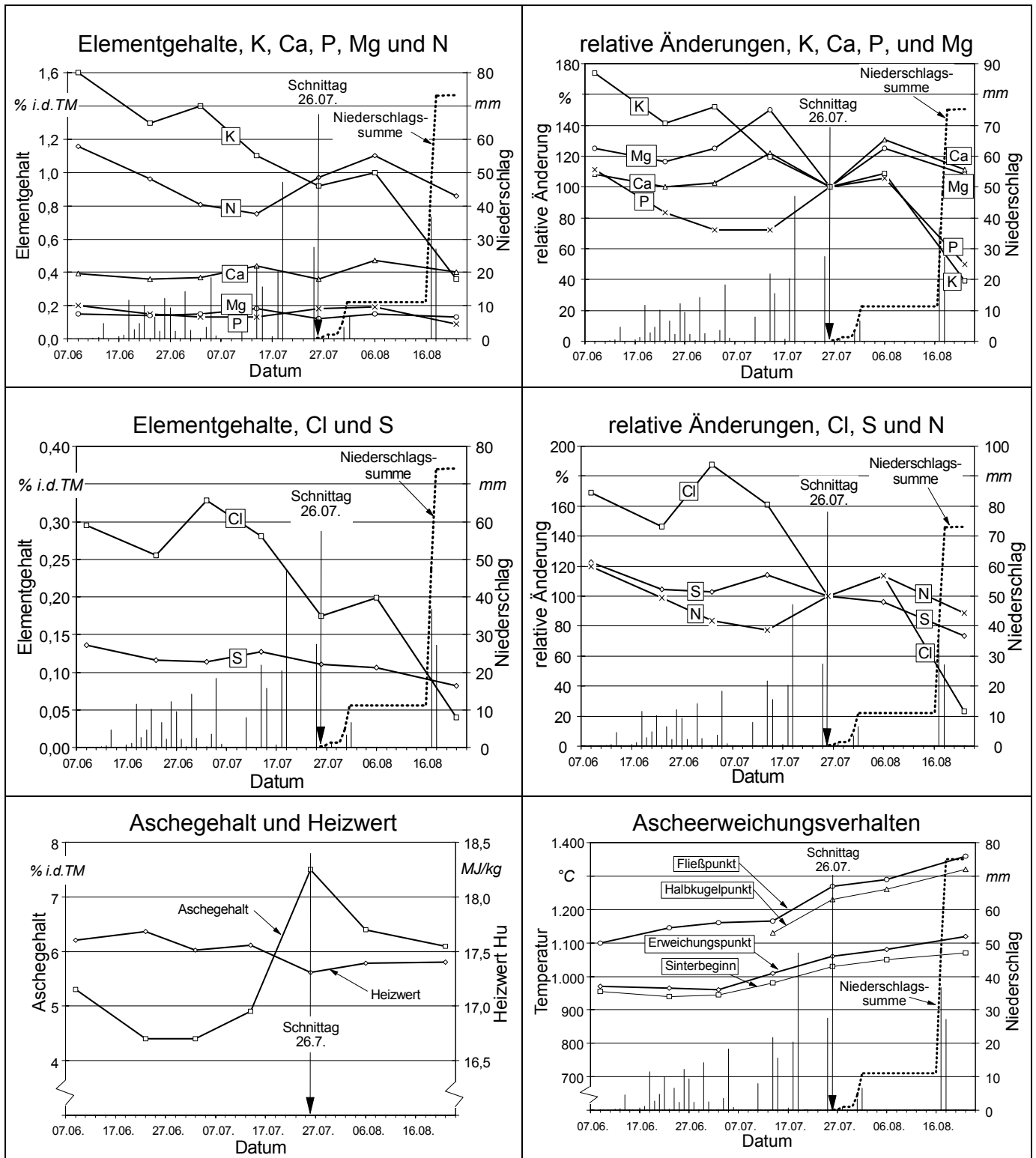
zunehmende Verholzung und durch den abnehmenden Anteil junger Pflanzenteile mit höheren Eiweißanteilen verursacht worden sein. Auch der leichte Wiederanstieg kurz vor dem Schnitttermin (nur Wirtsberg, Abb. 29), ließe sich durch den Neuaustrieb nach der Blüte erklären, der offenbar auch für den o.g. Wiederanstieg beim Wassergehalt verantwortlich ist (vgl. hierzu Abb. 27).

Auf beiden Standorten ist kurz vor dem Schnitttermin ein Anstieg des *Aschegehalts* erkennbar (+0,5 bzw. +2,5 %punkte). Zwar bietet sich hierfür als Erklärung an, dass durch das Mähen mit dem Scheibenmähwerk Staub- und Bodenpartikel in das Schnittgut gelangt sein können (z. B. durch Luftsoog oder eingeebnete Maulwurfshügel, etc.), andererseits jedoch zeigt sich gerade bei den Ascheanalysen eine besonders große Streuung der Einzelwerte, so dass die hier vorgestellten Ergebnisse vorsichtig interpretiert werden müssen. Das wird auch beim Vergleich der unterschiedlichen Werte aus der Aschebestimmung bei 550 °C bzw. bei 815 °C deutlich, die hier zum Teil stärker voneinander abweichen (vgl. hierzu auch Abb. 40, S. 89).

Kaum Interpretationsansätze ergeben sich bei Betrachtung des Ascheerweichungsverhaltens. Zumindest am Standort Thann (Abb. 28) konnte bis zum Schnitttermin keine Erhöhung der Erweichungstemperaturen beobachtet werden. Aufgrund der auswaschungsbedingten Verbesserung des Ca/K-Verhältnisses wäre eine solche Erhöhung jedoch zu erwarten gewesen. Lediglich auf der Fläche „Wirtsberg“ kommt es bei den jeweiligen Ecktemperaturen zu einer Erhöhung um ca. 100 bis 150 °C. Die Niederschlagseffekte nach dem Schnitt führen jedoch durchweg zu deutlichen Verbesserungen. Diese Qualitätseffekte, die durch verlängerte Feldliegezeiten nach dem Schnitt zustandekommen, werden in Kap. 4.2.2.3 (ab. S. 74) angesprochen.



**Abb. 28** Einfluss des Erntetermins und der Feldverweilzeit (Auswaschung) auf die Brennstoffqualität von Landschaftspflegeheu am Standort „Thann“



**Abb. 29** Einfluss des Erntetermins und der Feldverweilzeit (Auswaschung) auf die Brennstoffqualität von Landschaftspflegeheu am Standort "Wirtsberg"

## 4.2.2 Einfluss der Feldverweilzeit

Die Möglichkeiten, durch verlängerte Feldliegezeiten des bereits geschnittenen Halmgutes („Feldverweilzeiten“) qualitätsverbessernde Effekte durch Niederschläge abzuwarten, bieten sich prinzipiell bei allen Halmgutarten. In der vorliegenden Arbeit wurden diese Effekte an Stroh, Getreideganzpflanzen und Landschaftspflegeheu untersucht.

### 4.2.2.1 Weizenstroh

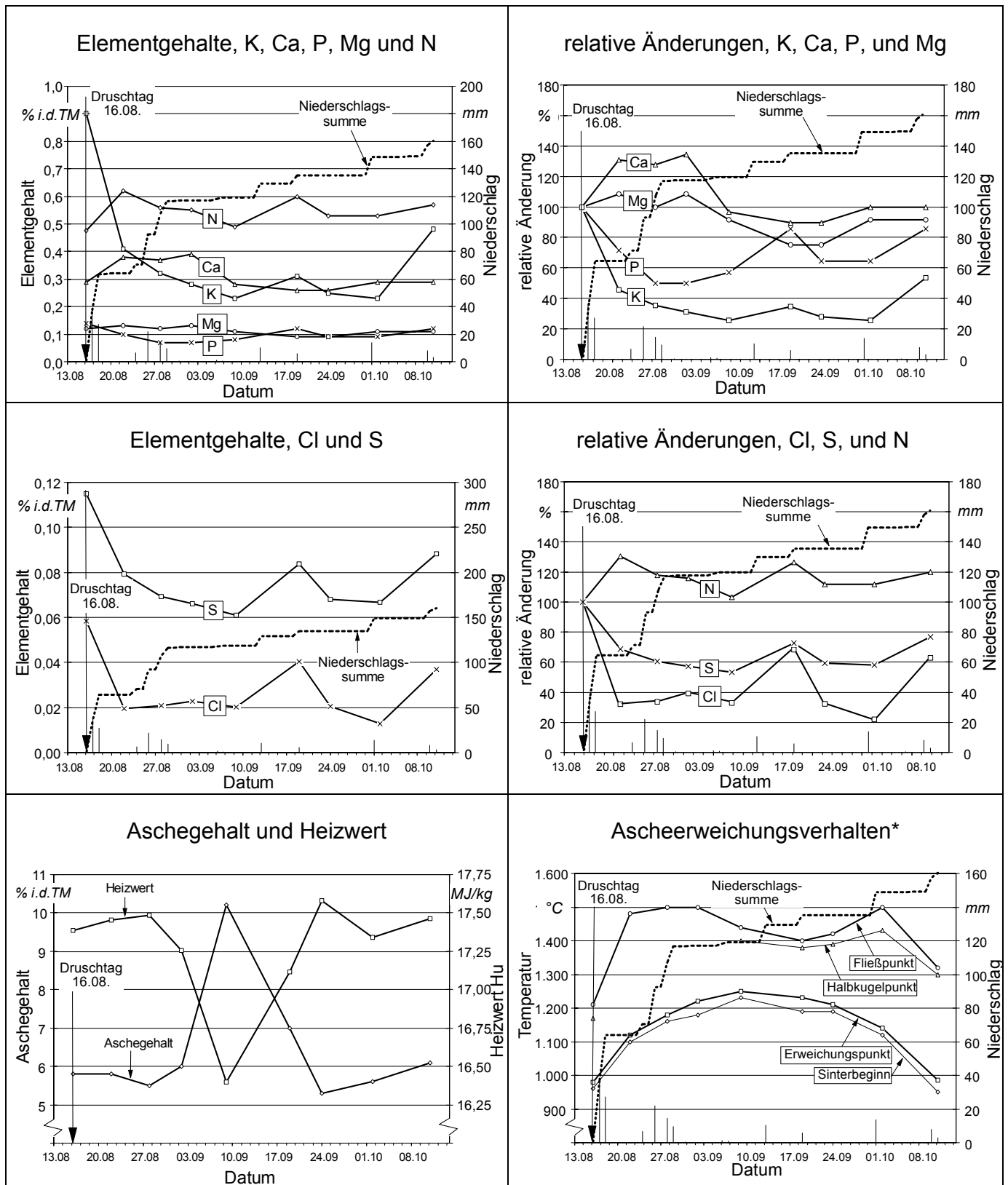
Der Beobachtungszeitraum für Weizenstroh beträgt etwa zwei Monate. Er wurde bewusst über die in der Praxis zumutbare Dauer ausgedehnt, um den jeweiligen Endpunkt einer Entwicklung feststellen zu können. Die in den Ergebnisdiagrammen (Abb. 30) dargestellte Niederschlagssumme wurde ab dem Druschtag aufaddiert. Um auch die relativen Gehaltsänderungen gegenüber dem Druschtag sichtbar zu machen, wurde zusätzlich eine Indexdarstellung erstellt, bei der der Elementgehalt zum Druschtermin als 100 %-Basis festgelegt wurde.

Vor allem für die Elemente *K*, *Cl* und *S* lassen sich relativ hohe Gehaltsminderungen feststellen. Sie wurden offenbar vor allem durch die unmittelbar nach dem Druschtermin stattfindenden Niederschläge verursacht. Da diese Regenereignisse mit mehr als 60 mm in nur drei Tagen sehr ergiebig waren, erfolgt die Auswaschung bereits größtenteils in der Anfangsphase der Schwadliegezeit (Abb. 30). An den weiteren Probenahmeterminen werden beim Chlor keine und bei Kalium und Schwefel nur noch geringe Absenkungen festgestellt, obwohl die Niederschlagssumme auf insgesamt mehr als 120 mm ansteigt. Bei den genannten Elementen wird unter den gegebenen Umständen offenbar sehr rasch eine Konzentration erreicht, die als so gering angesehen werden kann, dass danach Veränderungen kaum noch stattfinden.

Die absolute Höhe des Ausgangs-Chlorgehalts lag beim Weizenstroh mit nur 0,06 % i.d.TM um ein Vielfaches unter dem Wert, der normalerweise bei Getreidestroh zu erwarten ist (vgl. z. B. Triticalestroh, S. 62). Bei entsprechend höheren Ausgangschlorgehalten wäre möglicherweise die hier festgestellte Auswaschungsrate (70 %ige Absenkung nach 60 mm Niederschlag) nochmals größer ausgefallen. Der insgesamt niedrige Ausgangschlorgehalt wird angesichts des bereits länger zurückliegenden Kaliumdüngungstermins (KCl-Düngung) am vorliegenden Standort plausibel (vgl. Kap. 4.1.1).

Wie beim Landschaftspflegeheu wird der Gehalt von *N*, *Ca* und *Mg* im Beobachtungszeitraum nicht nachhaltig reduziert (Abb. 30). Hier sind im Gegenteil sogar Erhöhungen gegenüber dem Referenzwert zu verzeichnen. Sie deuten darauf hin, dass Schwankungen um  $\pm 20\%$  für das untersuchte Material durchaus normal sind. Einträge über die Atmosphäre sind dagegen angesichts der hierfür zu geringen jährlichen Depositionsraten (vgl. Kap. 3.3, S. 37) kaum als Begründung für Konzentrationssteigerungen anzusehen.





\* Fließpunkt bei 1.500 °C an der Nachweisgrenze

**Abb. 30** Einfluss der Feldverweilzeit (Auswaschung) auf die Brennstoffqualität von Weizenstroh

Der *Aschegehalt* lag bis 17 Tage nach dem Drushtag gleichbleibend bei ca. 5,5 bis 6,0 % i.d.TM. Am darauffolgenden Probenahmetermin wurde jedoch ein drastischer Anstieg beobachtet, der sich auch in jener Probe vollzieht, bei der der Aschegehalt mit 815 °C bestimmt wurde. Parallel dazu sinkt der *Heizwert* um nahezu 1 MJ pro kg Trockenmasse. Schwankungen dieser Größenordnung lassen sich kaum anders als durch Fremdeinträge kurz vor dem Probenahmetermin erklären (z. B. Staubentwicklung bei benachbarten Ackerarbeiten). Möglich ist auch der Eintrag von Metallabrieb während der Probenaufbereitung. Darauf deuten die extrem hohen Nickel- und Chromgehalte in der Korn- und Strohfraktion dieser Probe hin (vgl. Kap. 4.2.5).

Eine charakteristische Entwicklung ist beim *Ascheerweichungsverhalten* zu beobachten. Hier kommt es bis zum 24. Tag nach der Schwadablage zu einem Anstieg der Ascheerweichungstemperatur um 270 °C (von 980 auf 1.250 °C). Dies lässt sich auf das von 0,3 auf 1,4 zunehmende Ca/K-Verhältnis zurückführen (vgl. Kap. 2.2, S. 12 und Kap. 5.3.2, S. 102), das vor allem durch den sinkenden Kaliumgehalt zustandekommt. Während der Fließ- und der Halbkugelpunkt zum Ende des Beobachtungszeitraums weitgehend konstant bleiben, sinken der Sinterbeginn und die Erweichungstemperatur wieder auf das Ausgangsniveau zurück. Für diese Beobachtung bietet sich derzeit keine plausible Erklärung. Eine Relevanz für die Praxis ist jedoch kaum gegeben, da eine Ausdehnung der Feldverweilzeit über den Zeitraum von 2 bis 3 Wochen hinaus in der Praxis ohnehin kaum in Frage kommt.

#### **4.2.2.2 Weizenganzpflanzen (Stroh und Körner)**

Bei der Untersuchung von Weizenganzpflanzen wurde ein Betrachtungszeitraum von etwa sieben Wochen gewählt. Er beginnt mit dem Übergang von der Milch- zur Teigreife und endet nach einer Feldverweilzeit von etwa drei Wochen. Neben der Feldverweildauer lässt sich die Brennstoffqualität auch durch die Wahl des Ernteverfahrens beeinflussen. Wird hierbei eine Trennung zwischen Korn und Stroh vorgenommen (Mähdrescher) so ergeben sich deutliche Unterschiede bei den Brennstoffeigenschaften. Aus diesem Grund werden die Auswaschungseffekte nicht nur für die Ganzpflanze (Abb. 33), sondern - zumindest für die wichtigsten Merkmale - auch für das Korn und Stroh getrennt ausgewertet (Abb. 34). Damit die Qualitätsveränderungen mit den Niederschlägen in Verbindung gebracht werden können, werden die Regenereignisse bei der Darstellung in den genannten Grafiken ebenfalls angezeigt.

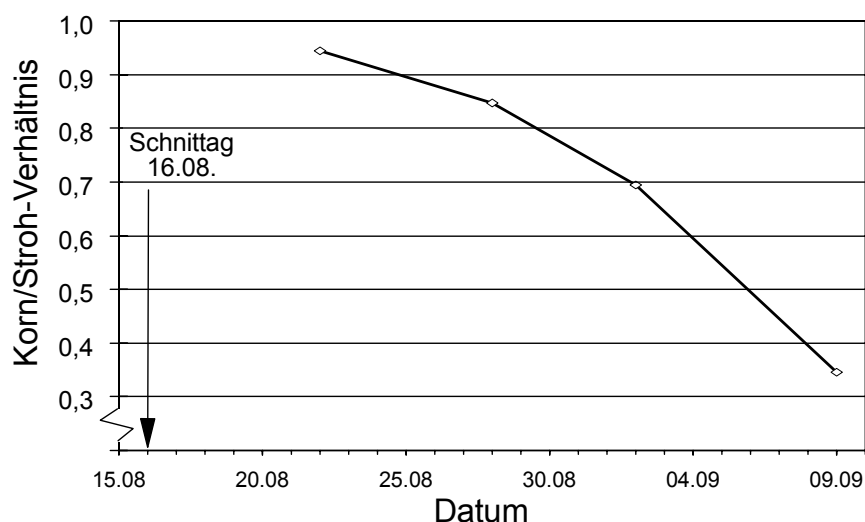
Während der Abreife des Getreides ergeben sich keine auffälligen Veränderungen. Die leichte Absenkung des *Stickstoffgehalts* bis zum Schnitftermin kann angesichts des späteren Wiederanstiegs der üblichen Wertestreuung bei derartigen Versuchen zugeschrieben werden. Nach dem Schnitt kommt es jedoch - wie schon beim Stroh - zu nennenswerten Auswaschungen, vor allem bei den Elementen K und Cl. Erwartungsgemäß fallen die relativen Änderungen in der Ganzpflanze trotz gleicher Niederschlagshöhe (Pa-

rallelbeobachtung zum Stroh!) geringer aus. Im Fall des *Kaliums* ist hierfür vor allem der geringere Gehalt in den Körnern verantwortlich. Diese unterliegen außerdem geringeren Auswaschungseffekten, da hier zum einen ein kleineres Oberflächen/Volumen-Verhältnis vorliegt, und zum anderen ein gewisser Witterungsschutz durch die Spelzen besteht.

Der (Ausgangs-)Chlorgehalt ist verglichen mit dem Stroh geringer und liegt etwa um eine Zehnerpotenz unter dem Gehalt der Triticaleganzpflanzen von den Hohenheimer Versuchsflächen (vgl. Abb. 25, S. 67). Aufgrund dieses sehr niedrigen Niveaus können sich die erwarteten Unterschiede zwischen Körnern und Stroh nicht ausprägen (Abb. 34). Die beobachteten Schwankungen gehen daher eher auf Unschärfen der Probenhomogenität und des Analyseverfahrens zurück.

Bei den übrigen Elementen lassen sich nur wenige Anhaltspunkte für systematische Qualitätsänderungen in Weizenganzpflanzen erkennen. Der Rückgang beim Schwefel, und der (spätere) Abfall beim Stickstoffgehalt sind durch das aufgeweitete Korn/Strohverhältnis erklärbar. Im zeitlichen Verlauf der Feldverweilzeit kommt es zu Kornausfällen und somit zu einem deutlichen Massenverlust. Während das Schwad nach dem Schnitt noch zu gleichen Teilen aus Körnern und Stroh besteht, macht der Körneranteil zum Ende des Beobachtungszeitraums (18 Tage später) nur noch 25 % der Gesamtmasse aus (Korn/Stroh-Verhältnis: 0,34). Dieser Verlauf wird in Abb. 31 dargestellt.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen Korn und Stroh werden sichtbar, wenn die Elementgehalte - wie in Abb. 34 dargestellt - nach dem Korn- und Strohanteil getrennt ausgewertet werden. Besonders auffällig sind die Unterschiede beim Stickstoffanteil, der in den Körnern etwa um das 4-fache höher ist. Aber auch für Schwefel, der auch in einigen Aminosäuren des Körnerproteins enthalten ist, ergibt sich ein doppelt so hoher Gehalt wie beim Stroh. Kalium reichert sich dagegen stärker in den Halmen an. Daher ist

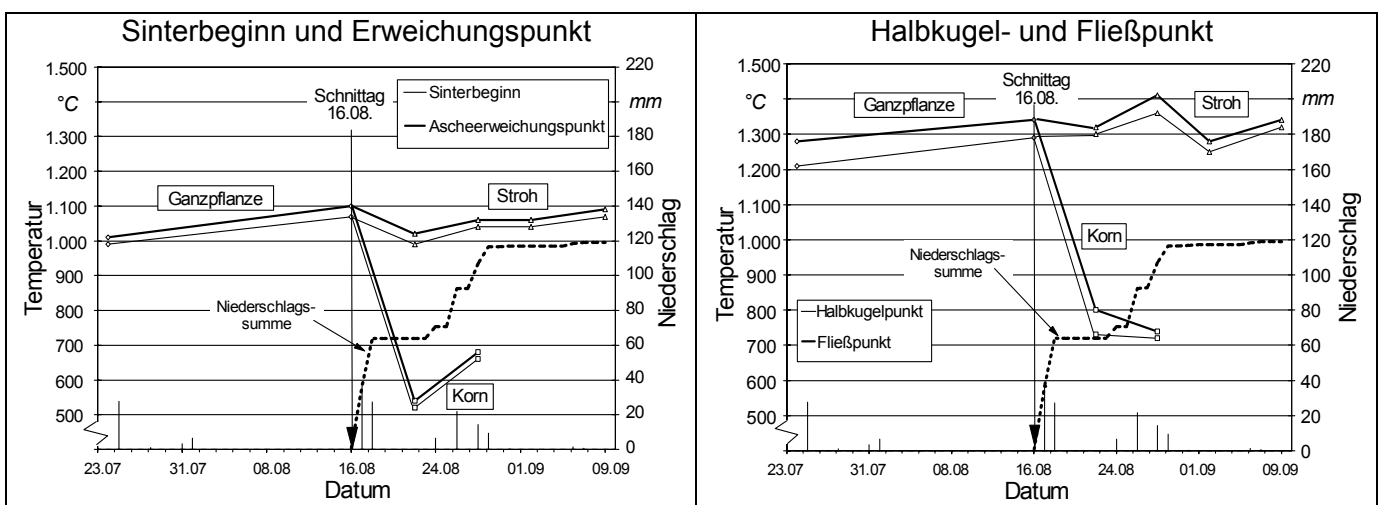


**Abb. 31** Korn/Stroh-Verhältnisse bei Winterweizen nach der Feldablage als Ganzpflanzen im Schwad

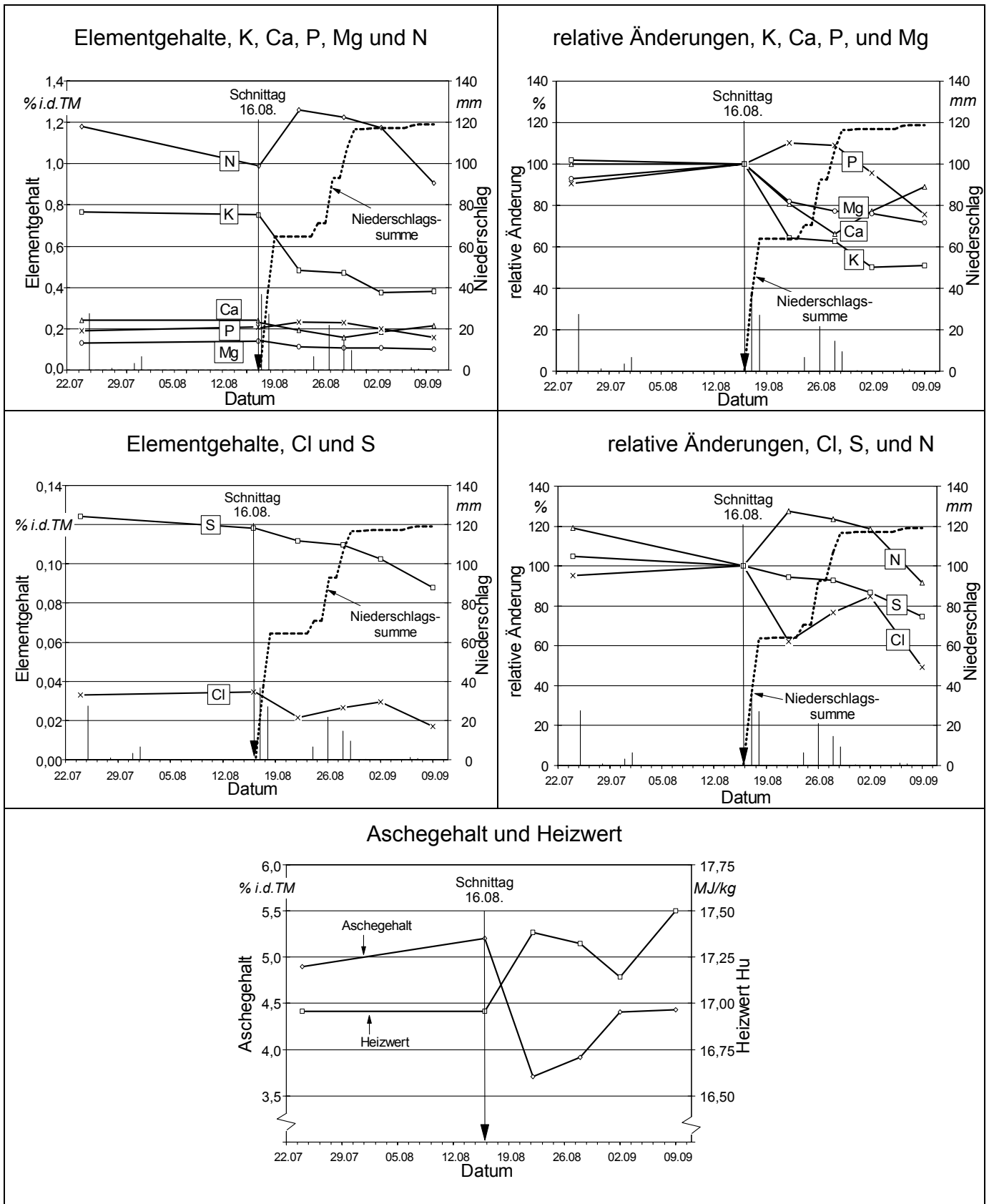
der Gehalt im Stroh zunächst um ca. 50 % höher, nähert sich jedoch im Zuge der Auswaschung an das Niveau der Körner an. Der genaue Anfangspunkt dieser Entwicklung lässt sich jedoch nicht feststellen, da die erste Probenaufteilung in Korn- und Strohanteile aufgrund eines Aufbereitungsfehlers zum Schnittdatum nicht erfolgen konnte. Allerdings besteht hinsichtlich der Unterschiede zwischen Korn und Stroh weitestgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen für Triticaleganzpflanzen (vgl. Abb. 22 und Abb. 23).

*Aschegehalt* und *Heizwert* verhalten sich auch bei den Ganzpflanzen indirekt proportional. Der Aschegehalt schwankt während des Beobachtungszeitraumes zwischen 3,7 und 5,2 % i.d. TM, wobei der höchste Wert am Schnitttag gemessen wurde. Danach fällt der Aschegehalt parallel mit den sinkenden K-, Ca, und Mg-Gehalten ab. Der Aschegehalt im Korn liegt um ca. 3,4 bis 4,1 %punkte niedriger als im Stroh (Abb. 34). Der Heizwert im Stroh ist um etwa 0,3 bis 0,5 MJ/kg höher als im Korn, was sich durch einen höheren Ligningehalt im Halm erklären lässt. Lignin besitzt mit 28,8 MJ/kg einen deutlich größeren Heizwert als Cellulose (17,3 MJ/kg) oder Hemicellulose [57].

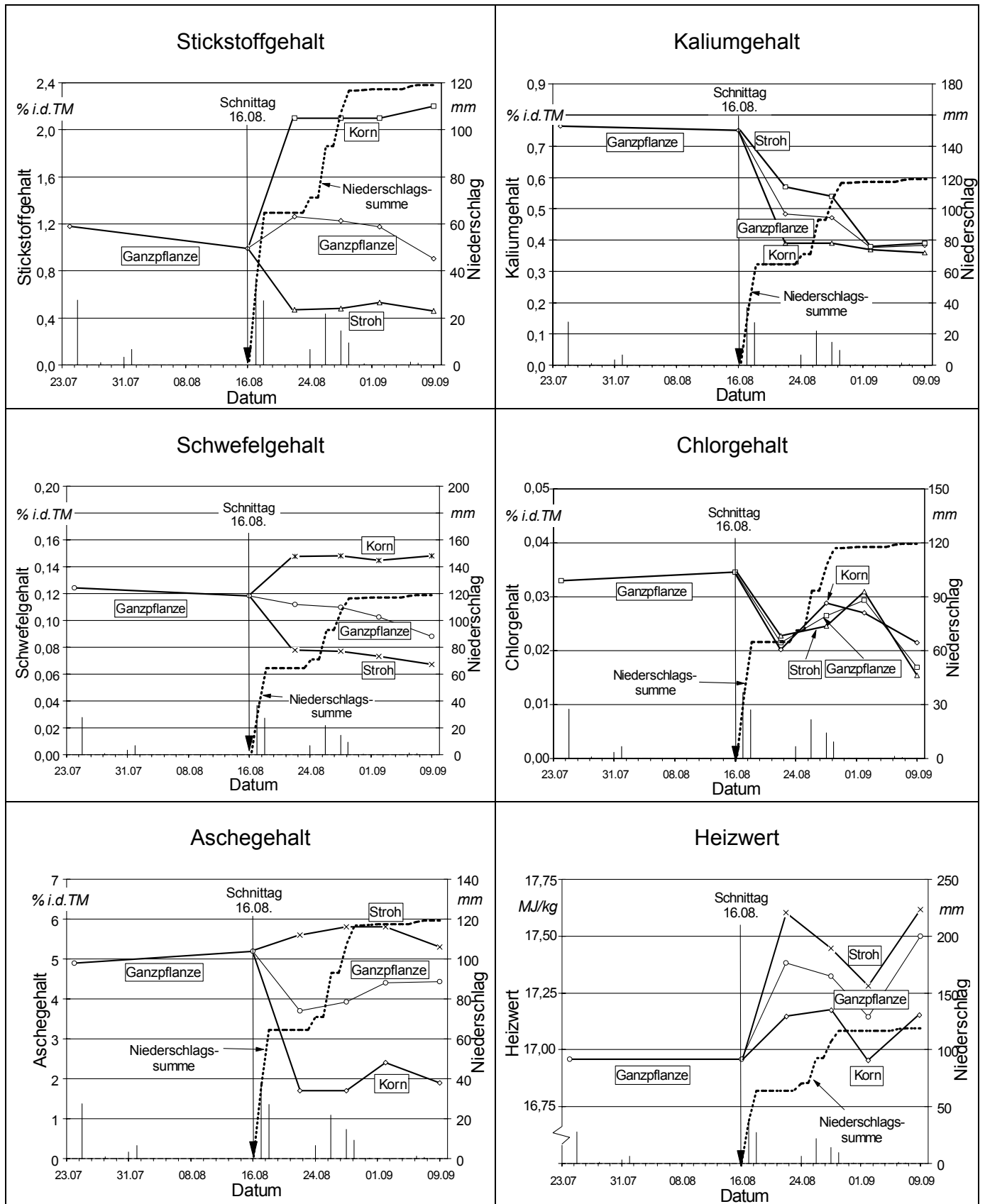
Beim Ascheerweichungsverhalten zeigen sich erneut deutliche Unterschiede zwischen Körnern und Stroh. Wie schon bei Triticale werden auch hier die besonders ungünstigen Ascheigenschaften des Korns sichtbar. Mit 520 und 660 °C (Sinterbeginn) sowie 540 und 680 °C (Erweichungspunkt) werden hier sogar die absoluten Tiefpunkte in der gesamten vorliegenden Messserie erreicht (Abb. 32). Dabei ist allerdings bemerkenswert, dass diese ungünstigen Eigenschaften der Körner offenbar keine nachteiligen Effekte zeigen, wenn die Bestimmung der Erweichungstemperaturen gemeinsam mit dem etwa gleich großen Strohanteil als Ganzpflanzen erfolgt. Hier bestehen keine erkennbaren Unterschiede zum Weizenstroh.



**Abb. 32** Einfluss der Feldverweilzeit (Auswaschung) auf das Ascheerweichungsverhalten von Weizenganzpflanzen (nach Schwadablage: getrennte Darstellung für Körner und Stroh)



**Abb. 33** Einfluss des Erntetermins und der Feldverweilzeit (Auswaschung) auf die Brennstoffqualität von Weizenganzpflanzen, errechnet aus den Ergebnissen für Stroh und Korn



**Abb. 34** Einfluss des Erntetermins und der Feldverweilzeit (Auswaschung) auf die Brennstoffqualität von Weizenganzpflanzen (nach Schwadablage: getrennte Darstellung für Körner und Stroh)

### 4.2.2.3 Landschaftspflegeheu

Beim Landschaftspflegeheu wurde der Einfluss von Niederschlägen nach dem Mäh-schnitt an zwei Standorten und zu unterschiedlichen Terminen überprüft. Auf den gleichen Flächen waren auch die Auswirkungen eines vorhergelegten Gasschnittes beobachtet worden. Um die Zeitreihen (vor- und nach dem Schnitt) in der grafischen Auswertung nicht voneinander trennen zu müssen, werden diese Ergebnisse bereits im Kapitel 4.2.1 („Einfluss des Erntetermins“, S. 57) gemeinsam dargestellt (Abb. 28 und Abb. 29). Sie sollen nachfolgend lediglich interpretiert werden.

Übereinstimmend mit den Ergebnissen bei Weizenstroh (Abb. 30, S. 75) und Weizenganzpflanzen (Abb. 33, S. 79) wird der stärkste auswaschungsbedingte Rückgang bei den Elementen *Kalium* und *Chlor* beobachtet. Auf der Fläche „Thann“ reduzierte sich der K-Gehalt innerhalb von 17 Tagen nach einer Niederschlagsmenge von 142 mm auf nur 26 % und der Cl-Gehalt sogar auf nur noch 15 % (bezogen auf den Schnittzeitpunkt). Am Wirtsberg war dieser Rückgang auf 39 % bei Kalium bzw. 23 % bei Chlor nicht ganz so hoch, da auch die Niederschlagssumme nur bei 75 mm lag. Allerdings stellte sich bei beiden Versuchen eine etwa gleiche Endkonzentration von 0,4 bis 0,5 % (Kalium) bzw. 0,04 bis 0,06 % i.d.TM (Chlor) ein.

Auffällig ist, dass in beiden Versuchen kleinere Regenereignisse mit nur wenigen Millimetern Niederschlag direkt nach dem Mähen noch keine Auswirkung zeigen, da die noch wenig strapazierte und weitgehend unverwitterte Grasmasse einen Teil des Niederschlags abfängt („Interzeption“). Erst ergiebigerer Gewitterniederschläge von ca. 30 mm haben einen positiven Effekt. In geringerem Maße beginnt dieser Auswaschungsprozess schon vor dem Schnitttermin, wenn, wie am Standort „Wirtsberg“ (vgl. Abb. 29), diese Phase in eine ausgedehnte Feuchteperiode fällt (vgl. Kap. 4.2.1.4).

Wie bei Weizenstroh und Weizenganzpflanzen kann bei den Elementen *Stickstoff*, *Kalzium* und *Magnesium* nicht von einer Gehaltsminderung durch Niederschlagseinwirkung ausgegangen werden. Lediglich beim Schwefelgehalt bestehen Anhaltspunkte für eine erhöhte Mobilität. Dies wird auch durch die übrigen Versuchsreihen bestätigt.

Auf beiden Standorten ist ab dem Schnittdatum eine Tendenz zu sinkenden *Aschegehalten* zu erkennen (maximal 2 %punkte). Allerdings sind die Schwankungen innerhalb der Grundgesamtheit naturgemäß hoch. Da in der Praxis der Bodenheugewinnung und -trocknung weitere zum Teil wiederkehrende Mechanisierungsschritte (Wenden, Schwaden, Ballenpressen) durchgeführt werden, besteht ein erhöhtes Risiko von Staubeinträgen, die den hier dargestellten Trend kompensieren könnten. Diese Ergebnisse sind daher nicht ohne weiteres auf die Praxis übertragbar.

Prinzipiell gilt das auch für das Ascheerweichungsverhalten, das bei Fremdeinträgen aufgrund der sich dadurch ändernden Aschezusammensetzung vom hier gefundenen Trend abweichen kann. In beiden Versuchsreihen zeigt sich ab dem Schnittdatum eine

Tendenz zu verbesserten Ascheeigenschaften. Unter den genannten Feldliegebedingungen erscheint daher eine auswaschungsbedingte Erhöhung der kritischen Erweichungstemperatur um 100 bis 150 °C wahrscheinlich. Wie bei den übrigen Versuchsreihen wird diese Erhöhung auch durch einen Anstieg beim Ca/K-Verhältnis begleitet. Zwischen dem Schnitttag und der letzten Probenahme erhöht es sich von 0,4 auf 1,1 (Wirtsberg) bzw. von 0,3 auf 1,0 (Thann).

### 4.2.3 Einfluss der Kaliumdüngung

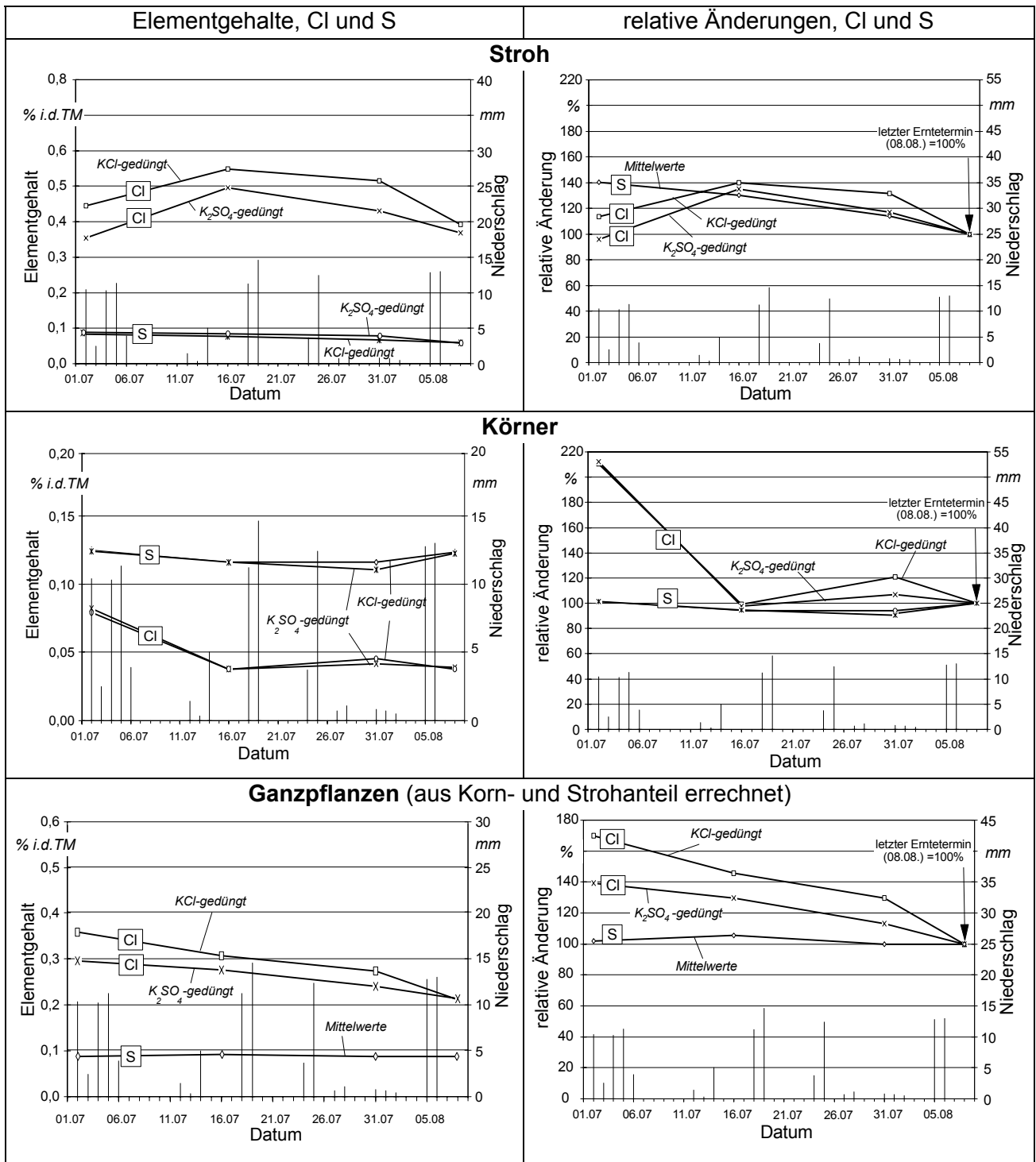
Auf den meisten landwirtschaftlichen Flächen ist die Kaliumdüngung die wichtigste Eintragsquelle für Chlorid in den Boden (vgl. Kap. 3). Folglich sind Qualitätsverbesserungen durch Verzicht auf chloridhaltige Kaliumdüngemittel zu erwarten. Derartige Effekte wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der Universität Hohenheim bei Triticale und Feldgras (hier: Rohrschwengel) untersucht. Neben dem Wechsel vom chlorid- zum sulfathaltigen Kaliumdünger wurden bei Triticale auch verschiedene Kaliumdüngungsstufen betrachtet. Deren Wirkungen werden nachfolgend dargestellt und diskutiert.

#### 4.2.3.1 Triticale

**Wahl des Düngemittels.** Bei den Ergebnissen für Triticalestroh (Abb. 35, oben) zeigt sich, dass die Schwefeldüngung keinen erkennbaren Einfluss auf den *Schwefelgehalt* im Stroh hat. Die sulfatische Kaliumdüngungsvariante, bei der insgesamt eine Schwefelfracht von 82 kg S/ha ausgebracht worden war, hat offenbar nicht zu einer vermehrten Aufnahme durch die Pflanzen geführt. Das wird sichtbar, wenn hierzu auch die S-Gehalte in den Körnern betrachtet werden (Abb. 35, Mitte). Die auftretenden Unterschiede sind offenbar vielmehr auf die natürliche Variabilität im Probenmaterial zurückzuführen, zumal der Schwefelgehalt bei der Sulfatvariante teilweise auch unter der Chloridvariante liegt. Jeder dargestellte Wert stellt einen Mittelwert aus je zwei Wiederholungen dar.

Bei Ganzpflanzen sind die Unterschiede im Schwefelgehalt kaum noch darstellbar, daher werden in Abb. 35 (unten) lediglich die Mittelwerte aller vier Einzelwerte angegeben. Spezielle Wechselwirkungen der Chlorid- oder Sulfatdüngung auf die Gehalte der übrigen Elemente wurden nicht festgestellt. Aus diesem Grund waren auch bei den Auswertungen zum Erntetermin (Kap. 4.2.1.2, S. 61) lediglich die Mittelwerte aus den insgesamt vier Einzelwerten angegeben worden.



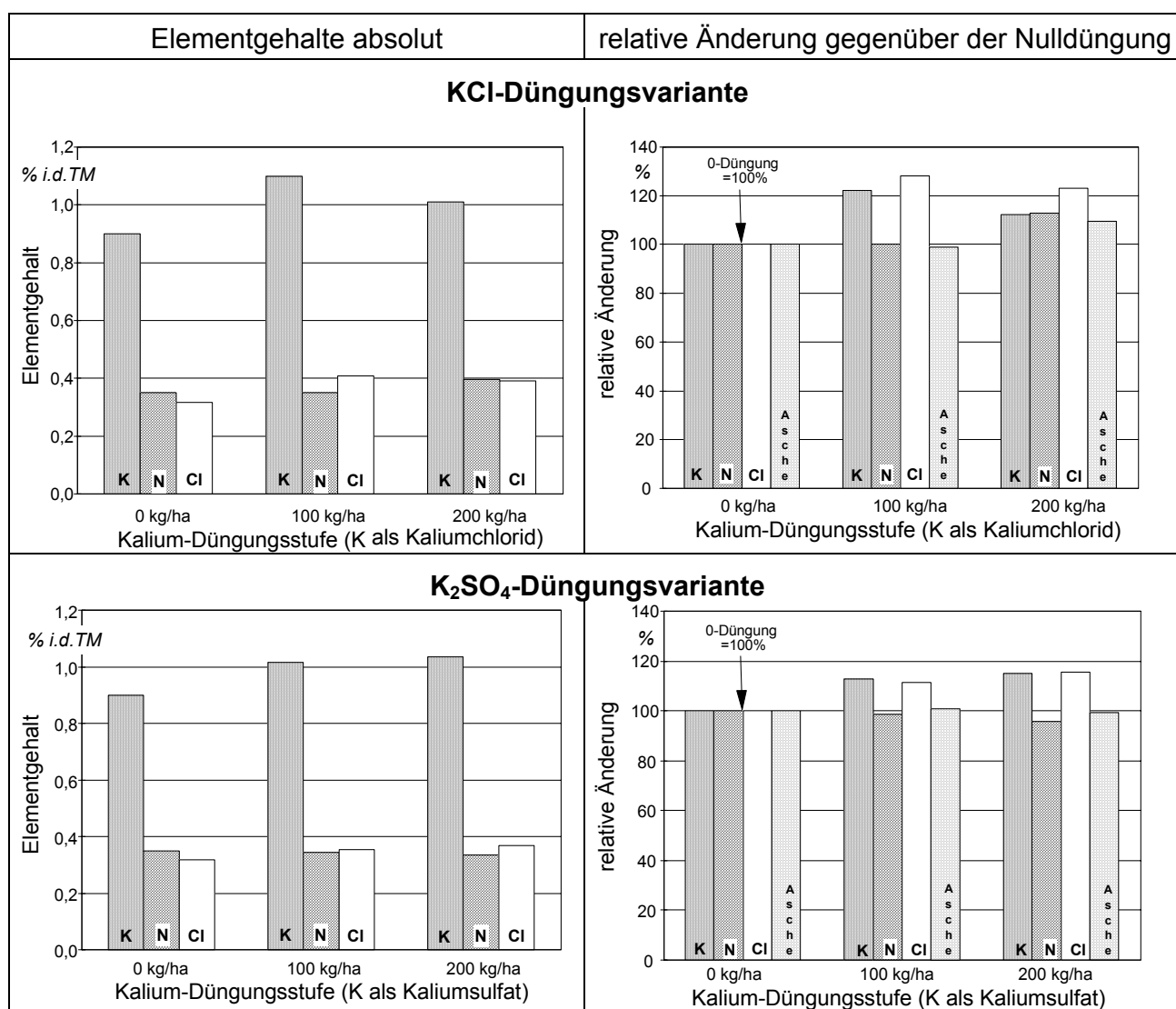


**Abb. 35** Einfluss der Art der Kaliumdüngung auf den Chlor- und Schwefelgehalt von Triticaestroh, -körnern und -ganzpflanzen. Kalidüngung: 200 kg Kalium/ha. Begleitstoffe: bei KCl-Variante: 181 kg Chlor/ha (kein Schwefel); bei K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Variante: 82 kg Schwefel/ha (kein Chlor)

Beim *Chlorgehalt* ergibt sich ein differenzierteres Bild. Während die Körner zu keinem Zeitpunkt nennenswerte Unterschiede aufweisen (Abb. 35, Mitte), liegt der Chlorgehalt der KCl-Variante beim Stroh stets über den Werten der K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Variante (Abb. 35, oben). Durch den Verzicht auf einen chlorhaltigen Dünger wurde die Konzentration im Stroh jedoch nur um 6 bis 21 % ermäßigt, wobei die Unterschiede zum Ende der Abreifeperiode hin abnehmen. Diese - wenn auch geringe - Abnahme lässt sich durch Auswa-

schungseffekte erklären. Bei Ganzpflanzen (Abb. 35, unten) kommt es bis zur Totreife sogar zu einer völligen Aufhebung der Konzentrationsunterschiede. Der dabei eintretende gleichmäßige Abfall des Cl-Gehalts während der Abreife lässt sich durch die deutlichen Änderungen beim Korn/Stroh-Verhältnis erklären (vgl. hierzu Abb. 24, S. 66).

**Höhe der Kaliumdüngung.** Zu dieser Fragestellung wurden drei Düngungsstufen (0, 100 und 200 kg Kalium pro ha) für jede Düngungsform (KCl- und  $K_2SO_4$ -Variante) in jeweils zwei Wiederholungen untersucht. Der Verzicht auf die K-Düngung führte bei *Triticalestroh* zu einer Abnahme im K-Gehalt von 12 bis 22 %, wobei die größte Kaliumanreicherung in der KCl-Variante nicht bei der höchsten, sondern bei der mittleren Düngungsstufe auftrat (Abb. 36). Düngungsbedingte Wirkungen auf die Aschegehalte konnten ebenso wenig festgestellt werden wie auffällige Veränderungen beim Stickstoffgehalt. Lediglich beim Chlorgehalt ist ein geringer Anstieg zu beobachten. Er lässt sich bei

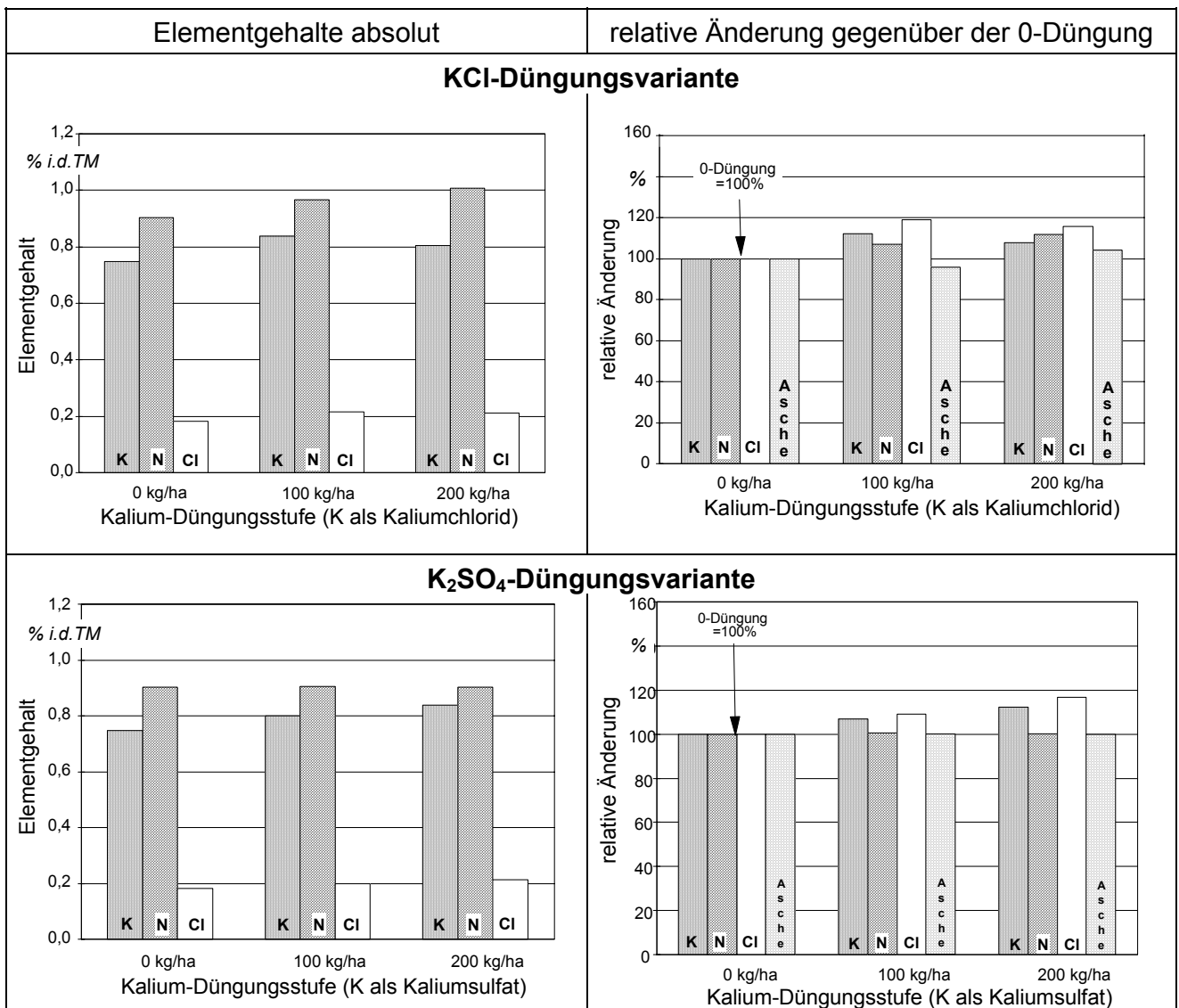


**Abb. 36** Einfluss von Höhe und Form der Kaliumdüngung auf den K-, N-, Cl- und Aschegehalt von Triticalestroh

der KCl-Variante durch die erhöhte Chlorzufuhr erklären (91 bzw. 181 kg Cl/ha). Überraschend kommt es aber auch bei der K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Variante zu Chlorgehaltssteigerungen, wenngleich diese etwas geringer ausfallen. Hierbei ist von Wechselwirkungseffekten durch die Kaliumsteigerung auszugehen. Allerdings reicht die Anzahl der Wiederholungen für eine statistische Absicherung dieser Beobachtung nicht aus.

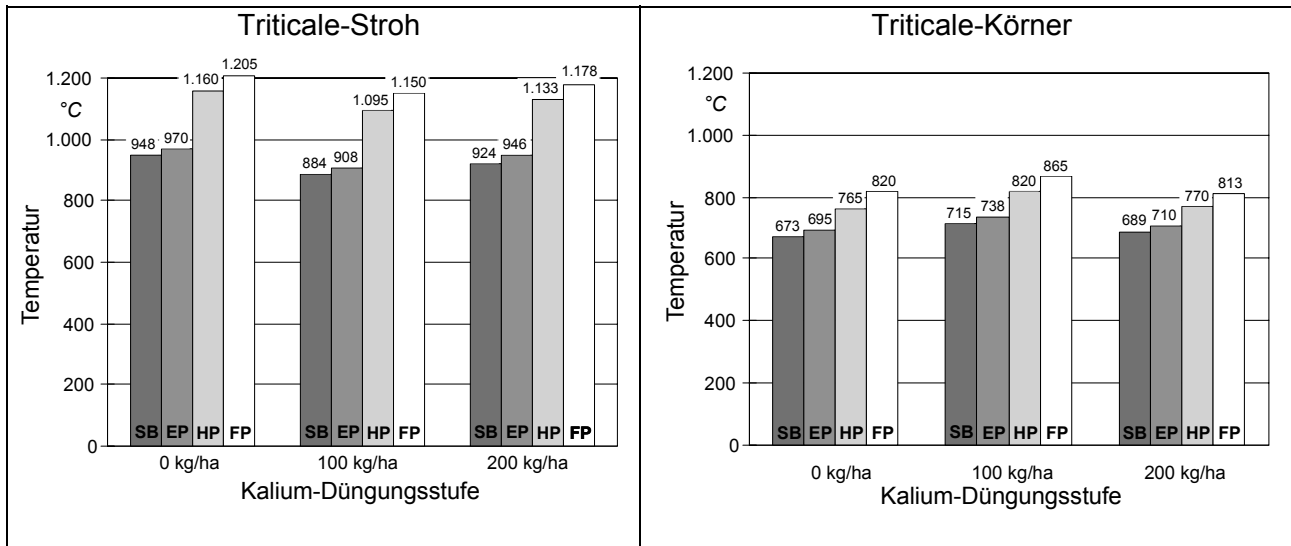
Nochmals geringere Düngungseffekte zeigen sich bei den *Triticale*ganzpflanzen (Abb. 37), deren Element- und Aschegehalte aus den Korn- und Strohanteilen errechnet wurden. Hier werden in keinem Fall Veränderungen um mehr als 20 % gegenüber der 0-Variante erreicht. Daraus lässt sich ablesen, dass die Kaliumsteigerungseffekte bei den (hier nicht dargestellt) Körnern ebenfalls vernachlässigbar sind.

Die unterschiedlichen Ascheerweichungstemperaturen von Triticalestroh und -körnern entsprechen den Werten, die sich bereits bei den Versuchen mit Winterweizenganz-



**Abb. 37** Einfluss von Höhe und Form der Kaliumdüngung auf den K-, N-, Cl- und Aschegehalt von Triticaleganzpflanzen

pflanzen ergeben hatten (vgl. Abb. 32, S. 78). Auch hier sind die Körner als Brennstoff besonders kritisch zu bewerten. Da unterschiedliche Kaliumdüngungshöhen sich nur unwesentlich auf die Kaliumgehalte auswirken (s.o.) kommt es bei den Ascheerweichungstemperaturen ebenfalls nicht zu düngungsbedingten Unterschieden (Abb. 38).



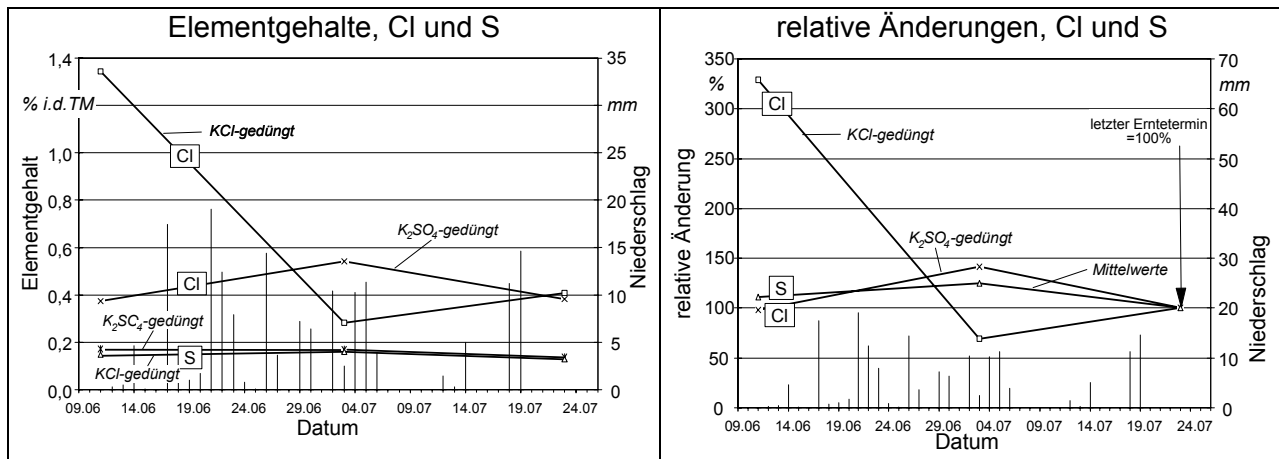
**Abb. 38** Ergebnisse zum Ascheerweichungsverhalten von Triticalestroh und -körnern bei unterschiedlicher Kaliumdüngung. Mittelwerte aus jeweils zwei (0-Variante) bzw. vier Wiederholungen (bei 100- und 200-kg-Variante).

Erläuterung: SB=Sinterbeginn, EP=Erweichungspunkt, HP=Halbkugelpunkt, FP=Fließpunkt

#### 4.2.3.2 Feldgras (Rohrschwengel)

Analog zu Triticale wurde die Wirkung der Kaliumdüngemittelart auch bei Rohrschwengel untersucht. Die Effekte des Wechsels von der KCl- zur  $K_2SO_4$ -gedüngten Variante werden in Abb. 39 dargestellt. Die Verwendung des chlorhaltigen Kaliumdüngers führte offenbar während der Wachstumszeit des Rohrschwengels zunächst zu drastischen Anreicherungen in der Erntemasse. Der Chlor-Mittelwert der Cl-Varianten, der zum frühesten Probenahmetermin (11. Juni) gemessen wurde, markiert mit 1,34 % i.d. TM das höchste Niveau, das in der vorliegenden Untersuchung gefunden wurde. Diese Konzentration übersteigt den Wert der Sulfatvariante um mehr als das 3,5-fache. Für diesen frühen Zeitpunkt liegen auch Ergebnisse zu den Bodenprobenanalysen vor, die ebenfalls auf deutliche Unterschiede beim Cl-Gehalt zwischen den beiden Standorten hinweisen (vgl. hierzu auch Tab. 17, S. 45).

Allerdings kommt es innerhalb von 3 Wochen nach der ersten Probenahme zu einer völligen Umkehrung der Verhältnisse, bis schließlich bei beiden Varianten ein etwa gleiches Niveau im Pflanzenmaterial erreicht ist. Es liegt nur um etwa ein bis zwei Zehntelprozent



**Abb. 39** Einfluß der Kaliumdüngungsart auf den Cl- und S-Gehalt von Rohrschwengel (*Festuca arundinacea* SCHREB.). Kalidüngung: 140 kg Kalium/ha; Begleitstoffe: bei KCl-Variante: 127 kg Chlor/ha (kein Schwefel); bei K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Variante: 57 kg Schwefel/ha (kein Chlor)

über dem Cl-Gehalt von Landschaftspflegeheu, das aber von mehr als 10 Jahre lang nicht gedüngten Flächen stammt (vgl. Abb. 28 und Abb. 29, S. 72). Diese Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die Auswaschungs- bzw. Abgaberaten beim Chlor deutlich größer sind, wenn das Ausgangsniveau des Chlorgehalts insgesamt hoch ist. Für abgesicherte Aussagen zu dieser Fragestellung wären gezielte Versuchsanstellungen zur Verbreiterung der Datenbasis erforderlich.

Wie schon zuvor bei Triticale, erweist sich der *Schwefelgehalt* auch beim Rohrschwengel als weitgehend unabhängig von der Art der Kaliumdüngung bzw. von der Schwefelzufuhr. Der Mehrgehalt der sulfatgedüngten Variante, der zum ersten Probenahmetermi noch 300 ppm (0,03 Prozentpunkte) beträgt, vermindert sich schließlich auf vernachlässigbare 75 ppm.

#### 4.2.4 Analyse weiterer Biomassen (generelle Einordnung)

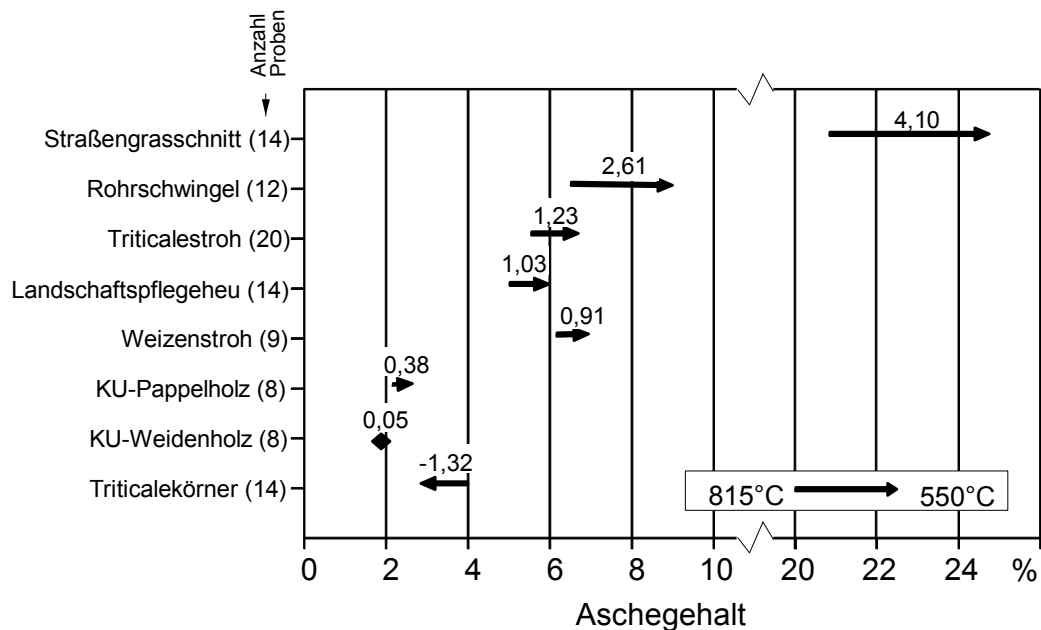
Durch Analyse weiterer Biomassen, die als biogene Brennstoffe oder - wie z. B. Straßengrasschnitt - auch als Biogassubstrate in Frage kommen, sollte eine generelle Einordnung und Bewertung der Brennstoffeigenschaften möglich werden. Da diese Ergebnisse vornehmlich zur Bereicherung der Datenbank (vgl. Kap. 5) verwendet werden, erfolgt hier lediglich eine kurze Ergebniszusammenfassung.

**Straßengrasschnitt.** Im Fall des Straßengrasschnitts war von vorn herein von einer größeren Variabilität der Merkmale auszugehen, da die Eintragsmöglichkeiten für Schadstoffe je nach Herkunft und Verkehrsaufkommen unterschiedlich sein können. Deshalb wurde hierzu eine größere Zahl von Einzelanalysen durchgeführt, um eine zuverlässige Aussage über die Merkmale zu treffen (zur Probenherkunft vgl. Tab. 19, S. 47).

Zum Anlieferungszeitpunkt an der Kompostanlage lag der mittlere Wassergehalt in der Frischmasse bei 59,4 % (46 bis 68 %), wobei hier der Beobachtungszeitraum von Juli bis Oktober gewählt wurde. Aufgrund dieser relativ hohen Wassergehalte ist für den größten Teil des Grasschnittanfalls eine direkte Verbrennung lediglich unter besonderen Einsatzbedingungen (z. B. Anlage mit Rauchgaskondensationseinrichtung) oder im Gemisch mit trockeneren Brennstoffen denkbar.

Auffällig ist der hohe *Aschegehalt*, der im Mittel bei ca. 25 % i.d.TM liegt, wobei ein Mindestwert von 17,8 % im gesamten Probenumfang nicht unterschritten wurde. Hier ist davon auszugehen, dass durch die Art der Grasbergung größere Anteile nicht pflanzenbürtiger Aschebestandteile mit aufgenommen wurden. Bei dem eingesetzten Mähgerät handelte es sich um einen Sichelmäher mit Saugzuggebläse, durch das der Grasschnitt in den Vorratsbehälter eingblasen wird. Je nach Bodenfeuchtigkeit, Bedeckungs- und Verschmutzungsgrad werden dabei auch unterschiedliche Staub- und Schmutzteilchen mitgerissen.

Bei derartig hohen Aschegehalten ist auch der mögliche absolute Fehler, der durch die Wahl des Analyseverfahrens auftreten kann, sehr hoch. Das zeigt ein Vergleich der Messungen zur Aschebestimmung bei 550 °C und bei 815 °C (Abb. 40). Bei Straßengrasschnitt ist der relative Fehler zwar kleiner als beispielsweise bei Rohrschwengel, dennoch muss hier mit analysebedingten Unterschieden von ca. 4 %punkten gerechnet werden. Im Mittel wurde bei allen Halmgutbrennstoffen ein um 13 bis 29 % niedrigerer Gehalt festgestellt, wenn die Veraschung bei 815 °C stattgefunden hatte. Lediglich für Getreidekörner ergibt sich ein umgekehrter Effekt.



**Abb. 40** Differenz der Mittelwerte aus der Aschegehaltsbestimmung bei 550 °C und 815 °C, sortiert nach der Höhe der absoluten Differenz (nur Werte aus Probenserien mit mehr als 8 Wiederholungen berücksichtigt) (KU = Kurzumtriebsplantagen)

Die *Ascheerweichungseigenschaften* sind deutlich weniger kritisch zu bewerten, als beispielsweise beim Landschaftspflegeheu oder Stroh. Trotz der Tatsache, dass Straßenrandgräser meist erst in einem überständigen Stadium geschnitten werden (nach der Blüte, verholzt und teilweise abgestorben), sind die günstigen Erweichungseigenschaften weniger auf qualitätsverbessernde Auswaschungseffekte zurückzuführen. Vielmehr ist hierfür offenbar der hohe *Kalziumgehalt* verantwortlich, der im Mittel mit 2,4 % i.d.TM den höchsten Wert unter sämtlichen hier untersuchten Pflanzenmaterialien markiert (vgl. hierzu Tab. 24). Auch der hier gemessene *Chlormittelwert* nimmt mit 1,0 % i.d.TM eine Spitzenstellung ein. Auffällig sind auch der hohe *Stickstoff- und Kaliumgehalt*. Die Mittelwerte sowie die jeweiligen Spannweiten innerhalb der vorliegenden Untersuchung werden in Tab. 24 zusammengefasst. Zur besseren Vergleichbarkeit sind darin auch die Mittelwerte und Abweichungen der vorgenannten Versuchsserien (Erntezeitpunkt, Düngung und Verweilzeit) dargestellt, obgleich es sich hierbei nicht um zufällige Schwankungen handelt. Über die Schwermetallgehalte wird in Kap. 4.2.5 berichtet.

**Kommunaler Strauchschnitt.** Wie beim Straßengrasschnitt können erhöhte Aschegehalte auch im kommunalen Strauchschnitt auftreten. Dies trifft offenbar vor allem dann zu, wenn dieses Material aus der öffentlichen oder privaten Gartenpflege stammt (Aschegehalt 14 bzw. 19 %). Lediglich beim Strauchschnitt aus der Autobahnrandpflege wurde ein relativ geringer Aschegehalt von 2,5 % gemessen. Allerdings handelt es sich bei diesen Gehölzen lediglich um Stichproben, die keine Verallgemeinerung zulassen.

Die Ascheerweichungstemperaturen lassen dagegen auf ähnlich günstige Eigenschaften wie bei den üblichen Holzbrennstoffen schließen (Tab. 24). Auch beim Gehalt der wich-

tigsten Hauptelemente fallen lediglich der erhöhte Kalzium- und Stickstoffgehalt auf, wobei letzterer vor allem auf das ungünstige (kleine) Holz/Rindenverhältnis infolge des geringen Alters des Materials zurückzuführen ist (vgl. Kap. 2.3.1, S. 21).

**Weitere landwirtschaftliche Reststoffe und Verarbeitungsrückstände.** Wenngleich verallgemeinernde Schlussfolgerungen bei den weiteren Reststoffen aufgrund der geringen Probenzahl kaum zulässig sind, sollen hier einige Auffälligkeiten herausgestellt werden. Beispielsweise weist das Stroh der Ackerbohne erhöhte N-Konzentrationen auf (Tab. 24), was auf ihre Fähigkeit zur symbiontischen Luftstickstofffixierung zurückgeht. Außerdem wurde auch beim Chlorgehalt in einer der Ackerbohnenproben mit 2,6 % i.d.TM ein Spitzenwert erzielt. Während diese Probe von einem konventionell wirtschaftenden Betrieb stammt (125 kg Kalium/ha als KCl) war die zweite Probe auf einem biologisch wirtschaftenden Betrieb in der gleichen Region gewonnen worden. Die Tatsache, dass dort auf eine chloridhaltige Kaliumdüngung verzichtet wurde, erklärt den geringen Chlorgehalt von nur 0,1 %. Ebenfalls hohe Chlorgehalte (1,3 %) kommen offenbar auch beim Sonnenblumenstroh (inkl. Körbe) vor (Düngung: 150 kg K/ha als KCl). Hier zeigen sich auch auffällig hohe Aschegehalte (15,5 %). Die übrigen Stroharten weisen dagegen Aschegehalte auf, die mit Getreidestroh vergleichbar sind.

**Bindemittel.** Neben den o.g. Reststoffen wurden auch zwei für die Pelletierung in Frage kommende Bindemittel analysiert. Hierbei handelt es sich einerseits um die wässrige Lösung eines vergorenen Kalzium-Ligninsulfonats, hergestellt aus überwiegend Fichtenholz (Bindemittel 1) und andererseits um Zuckerrübenmelasse (Bindemittel 2). Beide Mittel werden in der Futtermittelindustrie verwendet. Ihr Einsatz ist aber auch als Pelletierhilfsmittel bei der Herstellung von Halmgutpellets denkbar (für Holzpellets nach DIN 51731 [24] jedoch nicht zulässig). Besonderes Augenmerk gilt hier dem Schwefelgehalt, der mit ca. 3,0 bis 3,3 % i.d.TM relativ hoch ist. Allerdings wird er vom Hersteller für Bindemittel 1 mit 7 % i.d.TM deutlich höher angegeben [13].



Tab. 24 Mittelwerte und Spannweiten wichtiger chemisch-stofflicher Qualitätsmerkmale der untersuchten Biomassen

Brennstoff	Probenanzahl	Heizwert H <sub>u</sub> (wf) [MJ/kg]	Aschegehalt [%]	Ascheerweichungsverhalten				Hauptelemente						
				SB [°C]	EP [°C]	HP [°C]	FP [°C]	N [%]	P [%]	K [%]	Ca [%]	Mg [%]	Cl [mg/kg]	S [mg/kg]
Pappelholz	26 <sup>1)</sup>	18,57 18,31-18,71	1,87 1,54-3,12	1.282 1.190-1.320	1.210 1.240-1.340	nicht erkennbar	1.500 alle > NWG	0,44 0,27-0,61	0,11 0,09-0,14	0,26 0,28-0,71	0,50 0,42-0,61	0,25 0,04-0,06	21 25-62	222 231-360
Weidenholz	26 <sup>1)</sup>	18,37 18,21-18,47	1,99 1,62-2,86	1.265 1.110-1.360	1.286 1.120-1.380	nicht erkennbar	1.500 alle > NWG	0,52 0,34-0,72	0,09 0,08-0,11	0,26 0,21-0,5	0,69 0,6-0,87	0,05 0,05-0,07	36 25-71	439 311-579
Weizenganzpflanzen	6 <sup>2)</sup>	17,21 16,96-17,5	4,43 3,71-5,2	1.030 990-1.070	1.055 1.010-1.100	1.250 1.210-1.290	1.310 1.280-1.340	1,12 0,91-1,26	0,20 0,16-0,23	0,54 0,38-0,77	0,21 0,16-0,24	0,12 0,1-0,14	270 170-346	1.090 880-1.242
Weizenstroh	13	17,24 16,38-17,65	6,14 5,3-10,2	1.094 950-1.230	1.119 980-1.250	1.330 1.170-1.430	1.394 1.210-1.500	0,53 0,46-0,62	0,10 0,07-0,14	0,41 0,23-0,9	0,30 0,26-0,39	0,11 0,09-0,13	266 128-583	764 610-1.150
Weizenkörner	4 <sup>3)</sup>	17,11 16,95-17,18	1,93 1,7-2,4	662 520-805	687 540-840	887 720-1210	933 740-1.260	2,13 2,1-2,2	0,37 0,36-0,37	0,38 0,36-0,39	0,05 0,04-0,06	0,13 0,13-0,13	244 202-288	1.470 1.445-1.480
Triticaleganzpflanzen	22	16,94 16,78-17,07	4,35 3,83-4,8	n.b. n.b.	n.b. n.b.	n.b. n.b.	n.b. n.b.	0,94 0,82-1,01	0,22 0,19-0,25	0,89 0,7-1,16	0,20 0,16-0,28	0,08 0,07-0,09	2.528 1.720-3.592	906 835-990
Triticalestroh	22 <sup>4)</sup>	17,06 16,75-17,32	6,26 4,47-7,5	890 810-965	914 840-980	1.129 1.080-1.190	1.169 1.100-1.240	0,46 0,32-0,8	0,08 0,05-0,16	1,10 0,8-1,3	0,31 0,24-0,35	0,05 0,04-0,07	4.205 2.888-5.490	673 521-910
Triticalekörner	22 <sup>5)</sup>	16,81 16,5-16,95	2,10 1,89-2,71	715 640-840	738 660-860	811 740-990	854 790-1.030	1,51 1,4-1,6	0,38 0,36-0,4	0,63 0,57-0,77	0,06 0,05-0,11	0,13 0,11-0,15	465 353-868	1.190 1.063-1.252
Landschaftspflegeheu	14	17,56 17,31-18	5,36 3,6-7,5	1.007 915-1.170	1.033 940-1.190	1.240 1.130-1.320	1.208 1.090-1.360	1,04 0,75-1,36	0,17 0,09-0,24	1,31 0,36-2,3	0,46 0,36-0,73	0,16 0,12-0,22	2.231 402-3.604	1.134 814-1.362
Rohrschwengel	12	16,42 16,29-16,56	8,48 7,59-9,34	842 785-925	871 810-960	1.197 1.060-1.255	1.228 1.120-1.280	0,89 0,67-1,3	0,17 0,13-0,21	1,99 1,7-2,6	0,38 0,29-0,5	0,18 0,15-0,23	5.549 2.307-14.451	1.433 1.047-1.992
Straßengrasschnitt	11	13,88 10,63-15,34	24,72 17,8-44,12	1.178 1.150-1.210	1.200 1.170-1.230	1.269 1.210-1.380	1.293 1.220-1.450	1,46 1,19-1,8	0,19 0,14-0,24	1,37 1-2,1	2,41 0,77-4,3	0,65 0,26-1,2	9.908 4.840-21.280	1.883 1.487-2.440
kommunaler Strauchschnitt	3	16,85 15,68-18,63	11,77 2,51-19	1.243 1.210-1.280	1.263 1.230-1.290	1.280 1.240-1.320	1.363 1.260-1.500	1,02 0,67-1,3	0,10 0,06-0,16	0,55 0,3-0,76	2,07 0,9-3,1	0,32 0,1-0,44	511 170-896	1.051 835-1.340
Faserhanf (Ganzpfl.)	3	16,96 16,53-17,49	6,22 3,2-9,01	1.323 1.230-1.380	1.353 1.250-1.410	nicht erkennbar	1.440 1.320-1.500	0,93 0,52-1,4	0,20 0,1-0,27	1,26 0,19-2	1,36 0,88-1,8	0,21 0,1-0,32	1.766 244-3.975	811 485-1.127
Ackerbohnenstroh	2	16,56 16,56-16,56	8,21 7,93-8,5	1.240 1.190-1.290	1.275 1.230-1.320	nicht erkennbar	1.435 1.430-1.440	1,20 1,1-1,3	0,09 0,08-0,1	2,80 2,7-2,9	0,96 0,96-0,96	0,12 0,11-0,13	13.579 1.048-26.109	904 793-1.015
Lupinenstroh	4	16,68 16,41-17,09	7,02 5,86-7,62	1.130 1.040-1.330	1.163 1.070-1.370	nicht erkennbar	1.483 1.430-1.500	0,93 0,73-1,31	0,19 0,15-0,24	1,60 0,98-2,7	1,26 0,85-1,6	0,37 0,14-0,55	768 265-1.714	3.484 1.797-5.295
Ölleinstroh	3	17,69 17,58-17,83	4,65 4,3-4,84	1.198 1.180-1.210	1.223 1.210-1.230	1.272 1.260-1.290	1.320 1.290-1.360	0,74 0,56-0,93	0,17 0,13-0,22	1,12 0,97-1,3	0,89 0,76-1	0,13 0,09-0,17	4.016 3.657-4.519	1.169 1.077-1.242
Sonnenblumenstroh	2	14,91 14,88-14,95	15,56 15,19-15,94	973 725-1.220	1.003 765-1.240	nicht erkennbar	1.435 1.370-1.500	1,00 0,99-1	0,20 0,18-0,21	5,00 4,9-5,1	1,90 1,9-1,9	0,21 0,2-0,22	12.660 11.740-13.580	1.923 1.845-2.000
Rapsstroh	1	17,09	5,82	1.320	1.350	n. erk.	1.470	0,87	0,08	0,37	2,00	0,22	804	1.922
Flachsfaserreste	1	17,53	2,09	1.260	1.280	n. erk.	1.380	0,55	0,07	0,22	0,48	0,06	316	577
Hopfentreber	1	17,26	9,30	1.280	1.300	n. erk.	1.430	2,90	0,39	2,30	1,20	0,32	2.065	2.265
Sisalverarbeitungs-unverrott. Kompostholz	1	17,56	0,87	1.250	1.270	n. erk.	1.310	0,13	0,01	0,06	0,25	0,04	182	240
Hanfeschäben	1	17,11	12,65	1.220	1.250	1.270	1.280	0,75	0,07	0,29	2,3	0,32	284	929
Hanfeschäben	1	18,15	3,38	1.200	1.220	n. erk.	1.240	0,49	0,07	0,34	0,53	0,08	557	463
Bindemittel 1	1	7,85	7,35	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,20	0,01	0,07	2,50	0,03	391	32.700
Bindemittel 2	1	8,19	7,02	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,27	0,01	0,37	2,40	0,03	309	30.400

1) Ausnahme: 13 Proben für P, Ca, Mg, S; 8 Proben zum Ascheerweichungsverhalten

3) Ausnahme: 3 Proben zum Ascheerweichungsverhalten

2) Ausnahme: 2 Proben zum Ascheerweichungsverhalten

4) Ausnahme: 18 Proben zum Ascheerweichungsverhalten

5) Ausnahme: 14 Proben zum Ascheerweichungsverhalten

#### 4.2.5 Schwermetallgehalte in den ausgewählten Brennstoffproben

Durch die Analyse auf Schwermetalle sollte ein grober Überblick und eine generelle Einordnung und Bewertung der Schwermetallgehalte ermöglicht und außerdem die Datenbasis für die erstellte Datenbank (vgl. Kap. 5) verbreitert werden. Die Wirkung möglicher Einflussgrößen (Düngung, Erntetermin, Feldverweildauer) stand nicht im Mittelpunkt der Betrachtung, obgleich auch hierzu Auswertungen durchgeführt wurden. Sie zeigen jedoch, dass keine signifikanten Veränderungen nachweisbar sind.

Die Ergebnisse zu den Schwermetallen werden zusammenfassend in Abb. 41 dargestellt. Darin zeigen sich vor allem die deutlichen Unterschiede zwischen der naturbelassenen Feldbiomasse und den aus der kommunalen Abfallwirtschaft stammenden Proben (Straßengrasschnitt und Strauchschnitt). Mit Ausnahme von Mangan und Zink weisen letztere durchweg die höchsten Schwermetallgehalte unter den hier betrachteten Materialien auf. Das gilt vor allem bei jenen Elementen, die nicht als Mikronährstoffe für das Pflanzenwachstum benötigt werden (vgl. hierzu Tab. 2, S. 15), sondern als toxische Schadstoffe eine wesentliche Umweltbelastung darstellen (As, Cd, Hg, Pb, Cr). Auffällig sind beispielsweise die relativ hohen Blei-, Quecksilber-, Arsen- und Kupfergehalte im Straßengrasschnitt. Eine signifikante Abhängigkeit zwischen den Schwermetallgehalten und dem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen (DTV, vgl. Tab. 19, S. 47) konnte nicht festgestellt werden.

An den dargestellten Mittelwerten lassen sich auch bei den naturbelassenen Feldbiomassen einige Auffälligkeiten ablesen. Beispielsweise finden sich in Pappeln und Weiden im Durchschnitt etwa 2- bis 8-fach höhere Cadmium- und Zinkgehalte als in den übrigen (halmgutartigen) Brennstoffen. Das gilt vor allem für die Weide, die aus diesem Grund auch als Kultur für die Melioration cadmiumbelasteter Flächen in Frage kommt. Hierfür sind freilich möglichst lange Umtriebszeiten sinnvoll, da sich viele Schwermetalle mit zunehmendem Baumalter in der Holzmasse anreichern. Schwedische Versuche mit Weiden zeigen, dass es bereits vom zweiten bis zum fünften Aufwuchsjahr bei einigen Elementen (Cu und Ni) zu einer 4- bis 6-fachen Konzentrationssteigerung kommt, während andere Elementgehalte (Mn und Zn) sich immerhin verdoppeln oder - wie beim Cd - noch um 20 % ansteigen [78]. Eine Verkürzung der Rotationszeit könnte somit als qualitätssteigernde Maßnahme angesehen werden, obgleich sie unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht relevant erscheint.

Bei den meisten Schwermetallen (außer Zn und Cd) zeigen sich jedoch bei Pappeln und Weiden keine Erhöhungen gegenüber den untersuchten Halmgutbrennstoffen. Im Gegenteil, bei Ni, Hg und vor allem Cr und Mo wurden deutlich niedrigere Konzentrationen im Holz festgestellt. Allerdings sollte hier darauf hingewiesen werden, dass die Holz- und Halmgutproben nicht von einheitlichen Standorten gewonnen wurden, so dass eine ver-

allgemeinerte Aussage erst aus der Gesamtbetrachtung der im Rahmen einer Datenbankauswertung betrachteten Werte möglich ist (vgl. Kap. 5).

Bei den Chromwerten zeigen sich auffällig hohe Gehalte für Winterweizen (Ganzpflanzen, Stroh, Körner). Auch hier gilt, dass erst eine Gesamtschau vieler weiterer Daten Aufschluss über ein eventuell erhöhtes Risiko geben kann. Die Werte für Körner (und damit auch die rechnerischen Ergebnisse für Getreideganzpflanzen) beruhen lediglich auf vier Einzelproben, die vom gleichen Standort stammen. Beim Nickelgehalt werden keine Ergebnisse für Weizenkörner und -ganzpflanzen angegeben, da zwei von vier Einzelwerten um das 50- bzw. 100-fache über den beiden übrigen Messwerten lagen, so dass von Einträgen durch metallischen Abrieb bei der mechanischen Probenvorzerkleinerung ausgegangen werden musste.

**Schwankungsbreiten.** Die beiden untersuchten Stroharten (Triticale- und Weizenstroh) weisen bei den Schwermetallgehalten fast durchweg die höchsten (absoluten) Schwankungsbreiten unter den naturbelassenen biogenen Brennstoffen auf. Diese Schwankungsbreite kann jedoch nicht durch die hier betrachteten Einflussgrößen erklärt werden. Eine entsprechende Auswertung auf mögliche Düngungs-, Erntezeitpunkts- oder Auswaschungseffekte ergab keine erkennbaren Zusammenhänge. Bei diesen Brennstoffen besteht offenbar ein deutlich höheres Maß an Unsicherheit über die am jeweiligen Standort zu erwartenden Inhaltsstoffe. Darauf sollte bei der Festlegung der Analysenanzahl für eine zuverlässige Beschreibung der Brennstoffzusammensetzung Rücksicht genommen werden.

Auch in den Versuchen mit feldliegendem Weizenstroh und Landschaftspflegeheu lassen sich keine Effekte durch Auswaschung feststellen. Aufgrund der hohen Gesamtstreuung wäre ein solcher Effekt auch erst bei einem deutlich größeren Probenumfang festzustellen gewesen.

Bei den Holzproben aus Kurzumtriebsplantagen wurde vielfach die Nachweisgrenze für einzelne Elemente unterschritten (bei As, Ni, Mo, Hg, Co und Pb). Schwankungen, die sich aus der Wahl unterschiedlicher Erntetermine begründen lassen, waren auch hier nicht festzustellen. Als qualitätssteigernde Maßnahmen (für Cd und Zn) bietet sich somit allenfalls die Verkürzung der Rotationsdauer an (s.o.).

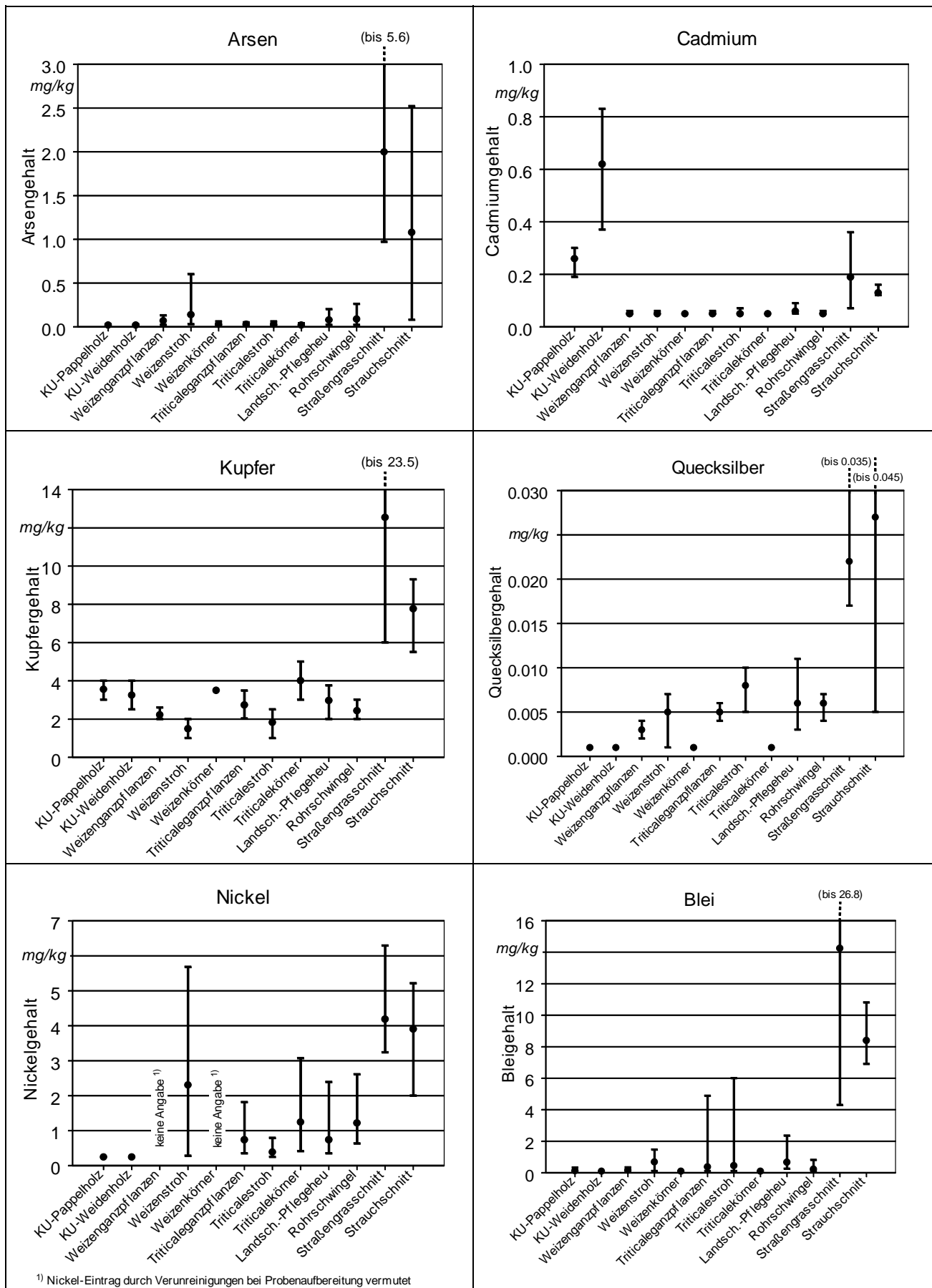


Abb. 41 (1. Teil) Mittelwerte und Spannweiten der gemessenen Schwermetallgehalte

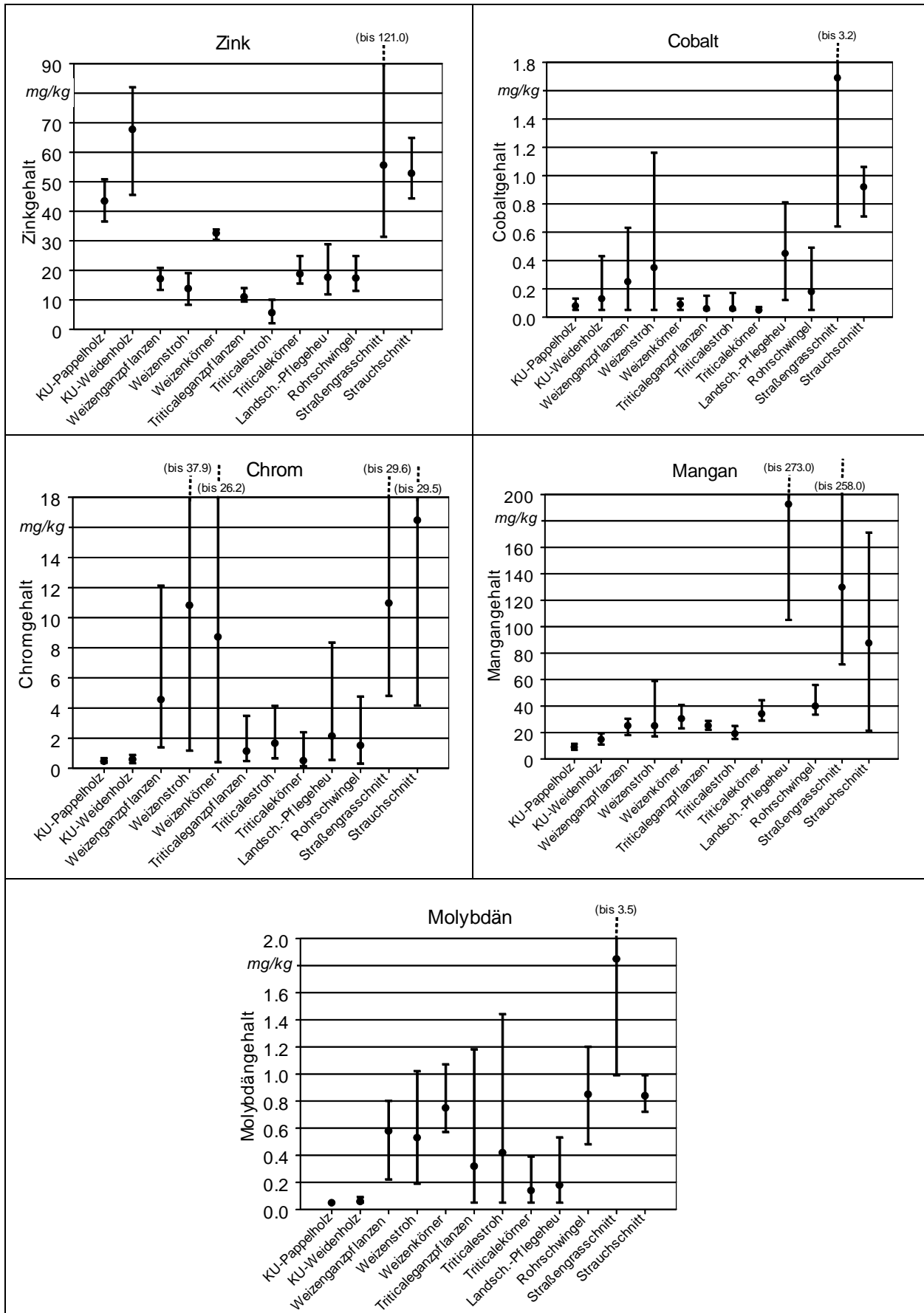


Abb. 41 (Fortsetzung) Mittelwerte und Spannweiten der gemessenen Schwermetallgehalte

## 5 Brennstoffdatenbank

### 5.1 Errichtung einer Datenbankstruktur

In enger Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU) wurde eine Datenbankstruktur entworfen, die für die Eingabe eigener oder fremder Analysedaten geeignet ist. Hierfür wurde ein relationales Datenbankmodell gewählt. Die programmtechnische Umsetzung als SQL-Datenbank (Oracle) erfolgte durch das Landesamt für Umweltschutz. Dadurch wurde sichergestellt, dass die spätere Einbindung in die Datenbankstruktur des LfU problemlos erfolgen kann.

Eine vereinfachte strukturelle Übersicht über die Datenbankelemente und die speziellen Eingabemöglichkeiten gibt Abb. 42. Die Eingabedaten sind vier Teilbereichen zuzuordnen:

- Der Bereich *Brennstoffidentifikation* erlaubt eine genaue Zuordnung der Materialart zu den vordefinierten Brennstoffgruppen. Sie ist das Ergebnis einer vorangegangenen Systematisierung der biogenen Festbrennstoffe.
- Die *Probenherkunft* umfasst alle gegebenenfalls vorliegenden Informationen über den Ursprung bzw. den Ort der Gewinnung bzw. Produktion der Biomasse. Neben den geographischen Ursprungsangaben werden hier auch eventuelle Besonderheiten des Standortes festgehalten.
- In der *Probendokumentation* lässt sich die Quelle für die Information zurückverfolgen. (Autor/Institution, Titel, Quelle/Anschrift, Jahr). Außerdem kann das Probenahmedatum eingegeben werden und eine Bewertung der Datenquelle erfolgen.
- Im Teilbereich *Analysenwerte* werden schließlich die eigentlichen Analysedaten gespeichert. Hier wird unterschieden nach "brenntechnischen Kennwerten", "Elementgehalten" sowie "chemischen Verbindungen". Neben den eigentlichen Analysewerten können hier - sofern vorhanden - auch Informationen über die Analysemethodik und das Analysedatum festgehalten werden. Die Einheiten für die Analysewerte sind fest vorgegeben und müssen - je nach Angabe in der Datenquelle - gegebenenfalls umgerechnet werden.

Neben den im vorliegenden Projekt untersuchten "naturbelassenen Brennstoffen" wurde bei der Strukturierung der Datenbank auch auf zukünftige Anforderungen des LfU Rücksicht genommen indem auch Eingaben zu den nicht-naturbelassenen Biomassen vorgesehen sind. Sämtliche Eingabegrößen sind zugleich auch Suchgrößen, die bei Datenbankabfragen zur Eingrenzung der Ergebnismenge verwendet werden können.

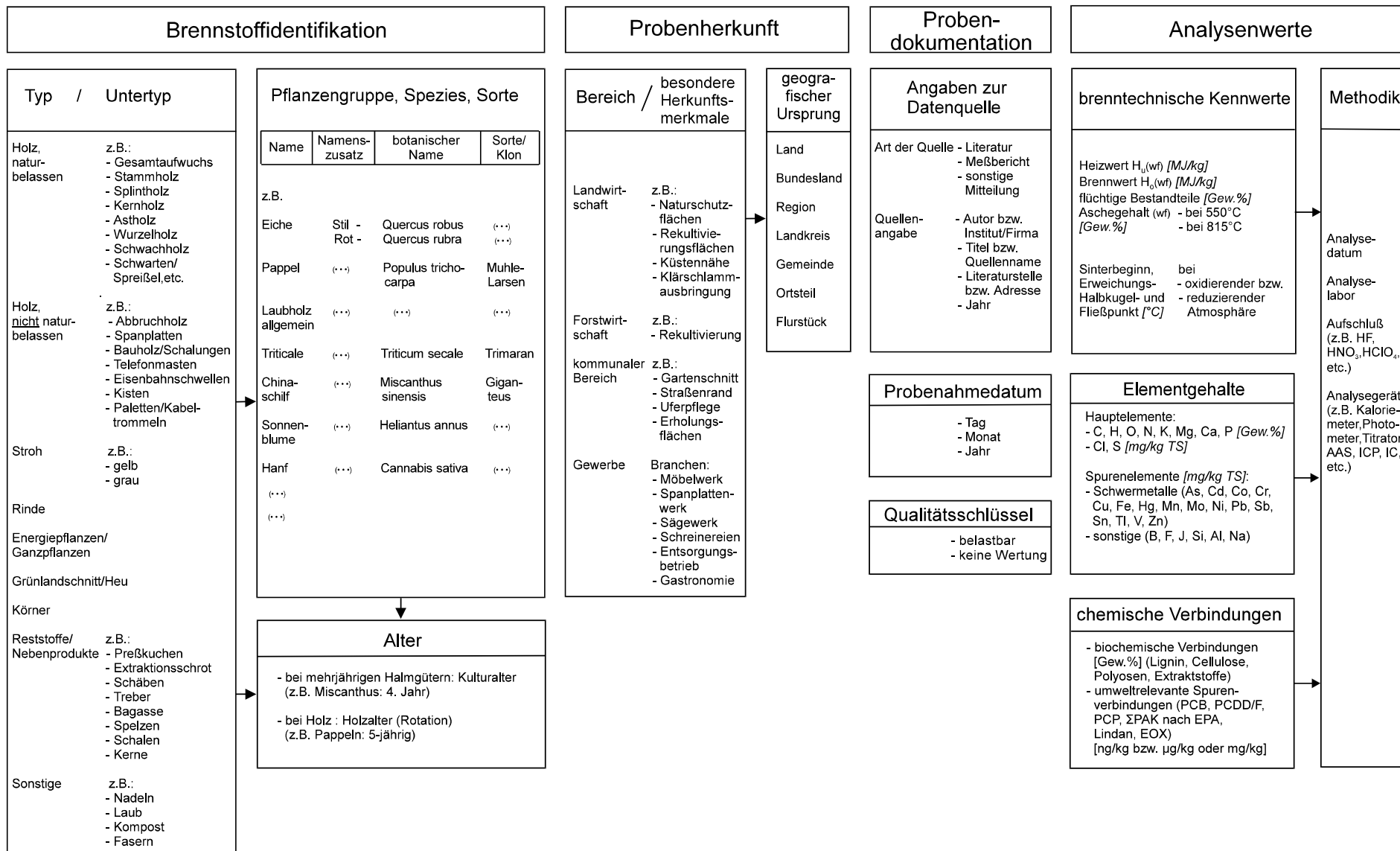


Abb. 42 981N024.cdrÜbersicht über den strukturellen Aufbau der NAWARO-Brennstoffdatenbank sowie die speziellen Eingabemöglichkeiten

## 5.2 Recherche von Eingabedaten

Die verwendeten Analysenwerte für die Datenbank waren aus vielerlei Quellen zusammengetragen worden (Tab. 25). Nach Sichtung und Beurteilung der Datenqualität sowie der Probendokumentation wurden insgesamt 1.238 Datensätze ausgewählt. Bei der Beschaffung der notwendigen Daten wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Durchführung einer Literaturrecherche und Beschaffung der relevanten Quellen
- Durchführung einer Umfrage unter verschiedenen Firmen, Forschungseinrichtungen, Behörden und sonstigen Einrichtungen (insgesamt 195 Befragte).
- Zusammenstellung der eigenen Analyseergebnisse aus ca. 20-jähriger Forschungstätigkeit sowie der im Rahmen des vorliegenden Projektes zustande gekommenen Ergebnisse (insgesamt 560 eigene Datensätze)

**Tab. 25** Herkunft der in die Datenbank aufgenommenen Datensätze

Datenherkunft/Quelle	Ort	Anzahl
eigene Messdaten, Landtechnik Weihenstephan	Freising	560
Agro Vermittlungsdienst GmbH	Aschendorf	3
Fa. Hugo Petersen	Wiesbaden	11
Vølund Energy Systems	Esbjerg/DK	1
Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein	Kiel	9
Energieconsult Heidelberg (ECH)	Heidelberg	2
Fichtner Development Engineering (FDE)	Stuttgart	22
Institut für Technische Trocknung GmbH	Gatersleben	3
VERENUM Ingenieurbüro	Zürich	9
Institut für Verfahrenstechnik der TU Graz	Graz	27
Wilhelm-Klausitz Institut (WKI)	Braunschweig	23
Institut für Apparate- und Umwelttechnik, Universität Magdeburg	Magdeburg	2
Euro Bayernwerk GmbH	München	4
Lehr- u. Versuchsanstalt Emmelshausen-Borler	Emmelshausen	22
Siemens AG, KWU-FITE	Erlangen	4
Rendl Heizkessel und Stahlbau GmbH	München	8
TÜV Rheinland	Köln	1
Standardkessel	Duisburg	1
Ing.-Gemeinschaft f. Energie- und Umwelttechnik	Neuried	6
ETA Energieberatung	Pfaffenhofen	2
Vertrauliche Mitteilungen (firmeneigene Daten)	--	11
Forstl. Forschungsanstalt Eberswalde	Eberswalde	60
Institut für Thermische Kraftanlagen der TU-München	Garching	20
VGU Ing.-Ges. f. Energie- u. Umwelttechnik	Engelskirchen	37
Institut f. Energiewirtschaft, TU-Wien	Wien	94
Institut für Umweltgerechte Landbewirtschaftung	Müllheim	113
Institut für Agrartechnik der Humboldt Universität	Berlin	21
Sächsische Landesanstalt f. Landwirtschaft	Leipzig	147
Bayer. Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau	Freising	4
Stadtwerke Saarbrücken	Saarbrücken	11
	<b>Summe:</b>	<b>1.238</b>



## 5.3 Datenbankabfragen

### 5.3.1 Durchführung und Auswertung

Mit Hilfe von Datenbankabfragen aus dem derzeit verfügbaren Datenumfang (Stand im April 1999: ca. 1.238 Datensätze) sollten die in der Praxis mengenmäßig wichtigsten Brennstoffe oder Brennstoffarten möglichst zutreffend charakterisiert werden. Dazu ist neben einer für jeden Brennstoff möglichst großen Datenbasis auch eine Betrachtung der Werteverteilung sowie der Extremwerte erforderlich. Für die hier durchgeführten (und zukünftigen) Auswertungen wurde eine Exportfunktion der Datenbank genutzt. Dadurch konnte die anschließende Datenauswertung mit Hilfe vorgefertigter Auswerteroutinen in einem Tabellenkalkulationsprogramm (Excel) vorgenommen werden. In diesen Auswerteroutinen wurde der exportierte Rohdatensatz statistisch ausgewertet, indem zu jedem Parameter der vorliegende Werteumfang, der Mittel- und Medianwert, die mittlere Abweichung (absoluter Betrag und prozentualer Wert), Standardabweichung, Variationskoeffizient sowie Minimum- und Maximumwerte bestimmt wurden.

Um Verfälschungen durch Mess- und Eingabefehler sowie zufällige extrem hohe oder niedrige Werte zu reduzieren, wurde zusätzlich eine Extremwerteliminierung vorgenommen. Dadurch sollte die in der Praxis erwartete Schwankungsbreite zuverlässiger beschrieben werden, als das bei Betrachtung des gesamten Werteumfangs zu jedem Parameter möglich gewesen wäre. Bei zu geringem Datenumfang bestand jedoch die Gefahr, dass dadurch die verbliebene Datenmenge nicht mehr aussagefähig war. Daher wurde die Ausreißereliminierung erst ab einer Mindestanzahl von 10 Einzelwerten durchgeführt.

Diese Mindestanzahl wirkte sich auch auf die Festlegung der Kappungsgrenze bei den oberen und unteren Extremwerten aus. Hierfür wurde eine Anzahl von jeweils 9 % des Gesamtdatenumfangs gewählt. Dadurch ließ sich verhindern, dass die verbliebene Datenmenge kleiner als 10 Werte umfassen konnte, selbst wenn die Gesamtwerteanzahl nur knapp über 10 lag.

Bei Über- bzw. Unterschreitung der Bestimmbarkeitsgrenze war in der Datenbank eben dieser Grenzwert eingegeben worden. In den Auswertungen der Datenabfragen wurden diese Werte nicht verworfen, sondern es wurde mit dem Wert der Bestimmbarkeitsgrenze gerechnet.

### 5.3.2 Ergebnisse

Anhand der nachfolgend vorgestellten Datenbankauswertungen sollen die Eigenschaften und Unterschiede der Festbrennstoffarten dargestellt und verglichen werden.

Die grafische Darstellung der Mittelwerte und Spannweiten des bereinigten Datenumfanges erfolgt in Abb. 47-A bis E (ab S. 109).

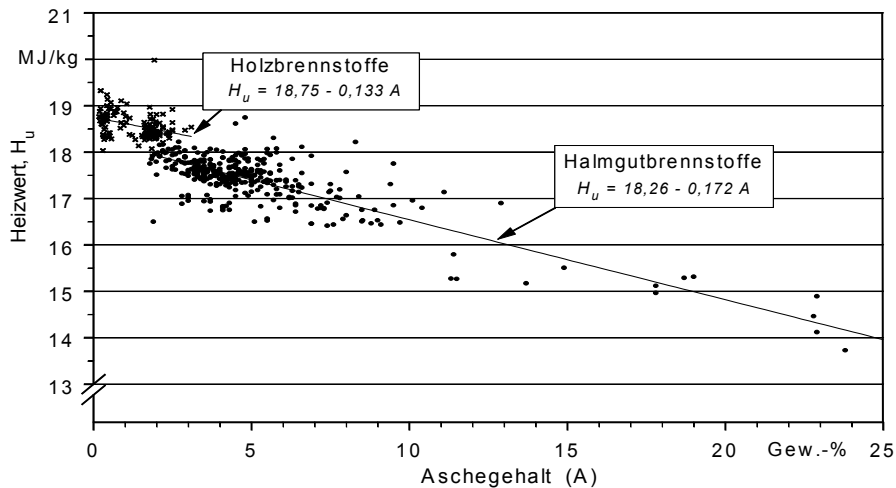
**Heizwert.** Der Heizwert trockener biogener Brennstoffe wird hauptsächlich durch den Gehalt an den oxidierbaren Elementen C, H, S und N bestimmt. Außerdem wirkt sich der Sauerstoffgehalt vermindern auf den Heizwert aus, da die brennbaren Komponenten in sauerstoffhaltigen Verbindungen bereits in einer höheren Oxidationsstufe vorliegen.

Näherungsweise lässt sich der Heizwert durch verschiedene Formeln errechnen, die allerdings meist für sauerstoffarme Brennstoffe wie Kohle bestimmt wurden. Anhand der Datenbankergebnisse wurde ein Vergleich von insgesamt 9 in der Literatur genannten Näherungsformeln durchgeführt ([2] [65]), von denen lediglich drei Formeln auch den Stickstoffgehalt in den Brennstoffen berücksichtigen. Der Vergleich wurde anhand von insgesamt 295 Datensätzen durchgeführt, für die die erforderlichen Parameter vollständig bestimmt worden waren. Aufgrund der Ergebnisse lässt sich feststellen, dass die Vorhersage des Heizwertes allein aufgrund der Elementaranalysenergebnisse mit einigen Unsicherheiten behaftet ist. Im Mittel betragen die Abweichungen vom kalorimetrisch bestimmten Heizwert 0,75 MJ/kg. Bei einem mittleren Heizwert von 18 MJ/kg entspricht das in etwa einem mittleren Fehler von mehr als 4 %. Unter den geprüften Formeln erwies sich eine Gleichung für  $H_u$  (im wasserfreien Zustand, angegeben in MJ/kg) nach BOIE (vgl. [65]) als am genauesten für die hier betrachteten Biomasse-Festbrennstoffe:

$$H_u \text{ (wf)} = 34,8 C + 93,9 H + 10,5 S + 6,3 N - 10,8 O \quad [\text{MJ/kg}]$$

Darin werden die Elementgehalte C, H, S, N und O (in % TS) eingegeben. Eine erhöhte Unsicherheit für den rechnerisch bestimmten Heizwert ergibt sich auch aus der geringen Datenbasis für den Sauerstoffgehalt. Dieser liegt nur selten als eigens bestimmte Messgröße vor, sondern wird meist als Residualgröße errechnet (vgl. "Sauerstoff", S. 103).

Die Ergebnisse der Datenbankrecherchen zeigen für Halmgutbrennstoffe einen relativ einheitlichen Heizwert, der zwischen 16,5 und 17,5 MJ/kg liegt, wobei die Häufigkeitsverteilungskurve relativ symmetrisch verläuft (vgl. hierzu Abb. 45, S. 106). Nennenswerte Unterschiede zwischen Getreidestroh und -körnern sind nicht erkennbar; das gilt auch für Heu und Gräser. Lediglich bei Rapskörnern macht sich der hohe Ölgehalt heizwerterhöhend bemerkbar, während bei Sonnenblumenstroh und Straßengrasschnitt sich der hohe Aschegehalt heizwertmindernd auswirkt. Dieser Zusammenhang zwischen Aschegehalt



**Abb. 43** halm-reg.axg Abhängigkeit des Heizwertes ( $H_u$ ) vom Aschegehalt ( $A$ ) bei Holz brennstoffen (mit und ohne Rinde) und bei Halmgut brennstoffen (hier: Getreide- und Rapsstroh, Getreideganzpflanzen, Miscanthus, Gräser, Lein- und Hanfstroh)

und Heizwert ist generell gegeben (Abb. 43); er wirkt sich jedoch in der Praxis aufgrund der geringen Bandbreiten der üblichen Aschegehalte nur sehr gering aus. Lediglich bei starken Sekundärverunreinigungen (wie z. B. bei Straßengrasschnitt) kann es zu deutlichen Nachteilen kommen.

Holz brennstoffe liegen im Heizwert durchschnittlich ca. 9 % höher als Halmgüter. Für Nadelholz wird ein um ca. 2 % über dem Laubholz liegender Heizwert festgestellt (Abb. 47-A). Diese Erhöhung - wie auch der um weitere 2 % höhere Heizwert der NadelholZRinde - ist auf den höheren Ligningehalt der Nadelhölzer bzw. zum Teil auch auf den erhöhten Gehalt an Extraktstoffen (Harze, Fette) zurückzuführen. Beide Stoffgruppen zeichnen sich durch einen deutlich höheren Teilheizwert (28,8 bzw. 35,9 MJ/kg) aus [57].

**Brennwert.** Der Brennwert biogener Festbrennstoffe liegt durchschnittlich um ca. 7 % (Holz), 7,5 % (Halmgut) beziehungsweise 6 % (Rinde) über dem Heizwert. Das trifft jedoch nur für Festbrennstoffe im absolut trockenen Zustand zu. Bei feuchter Biomasse vergrößert sich dieser relative Abstand, so dass der durch Rekondensation des entstehenden Wasserdampfes erzielbare Energiegewinn steigt. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 2.2 (vgl. hierzu Abb. 3, S. 9) erläutert.

**Flüchtige Bestandteile.** Flüchtige Bestandteile sind die Zersetzungsprodukte der organischen Substanz, die entweichen, wenn feste Brennstoffe unter konventionell festgelegten Bedingungen über eine kurze Zeit (ca. 1 g Probe über 7 min) bei Luftabschluss auf eine Temperatur von 900 °C erhitzt werden [28]. Der hohe Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, die zumeist aus brennbaren Gasen bestehen, ist der Grund, warum biogene Festbrennstoffe im Gegensatz zur Kohle mit sehr langer, leuchtender Flamme verbrennen. Diese flüchtigen Bestandteile liegen bei Lignocellulosebrennstoffen meist in der Größenordnung von 75 bis 83 %, wobei Holz brennstoffe mit durchschnittlich 82 % das

obere Ende dieser Bandbreite markieren und Getreidestroh und Wiesenheu mit 76 bzw. 74 % im unteren Bereich liegen (Abb. 47-A, S. 109). Kohlebrennstoffe weisen mit 6 bis 45 % (verschiedene Steinkohlearten) bzw. 45 bis 63 % (Hart- bzw. Weichbraunkohle) deutlich niedrigere Werte auf. Hierin besteht auch ein wesentlicher Grund für die andersartigen Anforderungen bei den Verfahren für die energetische Umwandlung.

**Aschegehalt.** Unter den biogenen Brennstoffen besitzt Holz (inkl. Rindenanteil) mit ca. 0,5 % den geringsten Aschegehalt. Größere Überschreitungen dieses Wertes sind daher eher auf Sekundärverunreinigungen, wie beispielsweise anhaftende Erde, zurückzuführen. Das lässt sich auch aus der stark linksgeneigten Verteilkurve für die Häufigkeit (sog. "positiven Schiefe") von Fichtenholz schließen (Abb. 46, S. 106), die darauf hinweist, dass Aschegehalte oberhalb von 1 % bei diesem Brennstoff selten sind. Lediglich Kurzumtriebsplantagenkulturen (Pappeln, Weiden) liegen mit ca. 2 % Aschegehalt deutlich darüber. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Anteil der Rinde bei jungem Holz noch relativ hoch ist und die Rinde im Aschegehalt zum Teil deutlich höher liegt, als Holz (z. B. bei Fichtenrinde zwischen 2,5 und 5 %, vgl. Abb. 47-B, S. 110). Nochmals höher liegt der Aschegehalt der meisten Halmgutbrennstoffe. Beim Getreidestroh zeigt die Häufigkeitsverteilung der Messwerte (vgl. Abb. 45, S. 106) ein Dichtemittel zwischen 5 und 5,5 %. Auch hier deutet die positive Schiefe der Verteilkurve auf Einflüsse durch Sekundärverschmutzung hin.

**Ascheerweichungsverhalten.** Die Temperaturen beim Sinterbeginn sowie im Erweichungs-, Halbkugel- und Fließpunkt der Aschen sind von der Zusammensetzung der Aschen abhängig. In bisherigen Untersuchungen waren unterschiedliche Auswirkungen verschiedener Aschebestandteile (vor allem Kalium, Kalzium, Phosphor, Schwefel, Silizium) festgestellt worden [72]. Anhand der aus der vorliegenden Datenbank stammenden Daten wurde nun versucht, ähnliche Effekte auf das Ascheerweichungsverhalten auch aus Elementgehalten der Brennstoffe selbst abzuleiten, zumal sich viele Elemente in den Aschen wiederfinden lassen und die Brennstoffzusammensetzung in der Regel besser bekannt ist, als die Aschezusammensetzung. Für diese Auswertungen wurde eine Datenbankabfrage nach sämtlichen Lignocellulosematerialien (Holz-, und Halmgutbrennstoffe) durchgeführt, für die die Ascheerweichungsparameter sowie die Elementgehalte K, Ca, Mg und P vollständig vorlagen. Mit den gewonnenen 58 (Sinterbeginn) bzw. 67 (Erweichungspunkt, Fließpunkt) Datensätzen wurde eine multivariable Regressionsanalyse durchgeführt, in der sowohl ein linearer als auch quadratischer Regressionsansatz sowie die möglichen Wechselwirkungen betrachtet wurden. Anders als bei den Untersuchungen von REISINGER [72] erwies sich der lineare Ansatz als am geeignetsten. Wechselwirkungen waren nicht signifikant. Das gilt auch für den Einfluß des Phosphorgehaltes. Die gefundenen Regressionsgleichungen werden nachfolgend zusammengestellt, wobei K, Ca und Mg in Prozent der Trockenmasse angegeben werden:

$$\text{Sinterbeginn } T_{\text{SB}} (\text{°C}) = 1159 - 58,7 \text{ K} + 237,9 \text{ Ca} - 743,8 \text{ Mg}$$

$$\text{Erweichungspunkt } T_{EP} (\text{°C}) = 1172 - 53,9 K + 252,7 Ca - 788,4 Mg$$

$$\text{Fließpunkt } T_{FP} (\text{°C}) = 1369 - 43,4 K + 192,7 Ca - 698 Mg$$

Die Regressionsanalyse lässt den Schluss zu, dass der K- und Mg-Gehalt der Brennstoffe vermindern auf die Sinterbeginn-, Erweichungs- und Fließtemperatur wirken, während die Ca-Konzentration hierbei eine Gegenspielerfunktion einnimmt. Dabei wirkt sich eine relative Veränderung des Kalziumgehaltes durchweg stärker aus, als die des Kalium- oder Magnesiumgehaltes. Das ergab eine (hier nicht näher dargestellte) Sensitivitätsanalyse am Beispiel von Holz und Strohreststoffen, in der ausgehend von den jeweiligen Mittelwerten der Elementgehalte eine Parametervariation durchgeführt worden war.

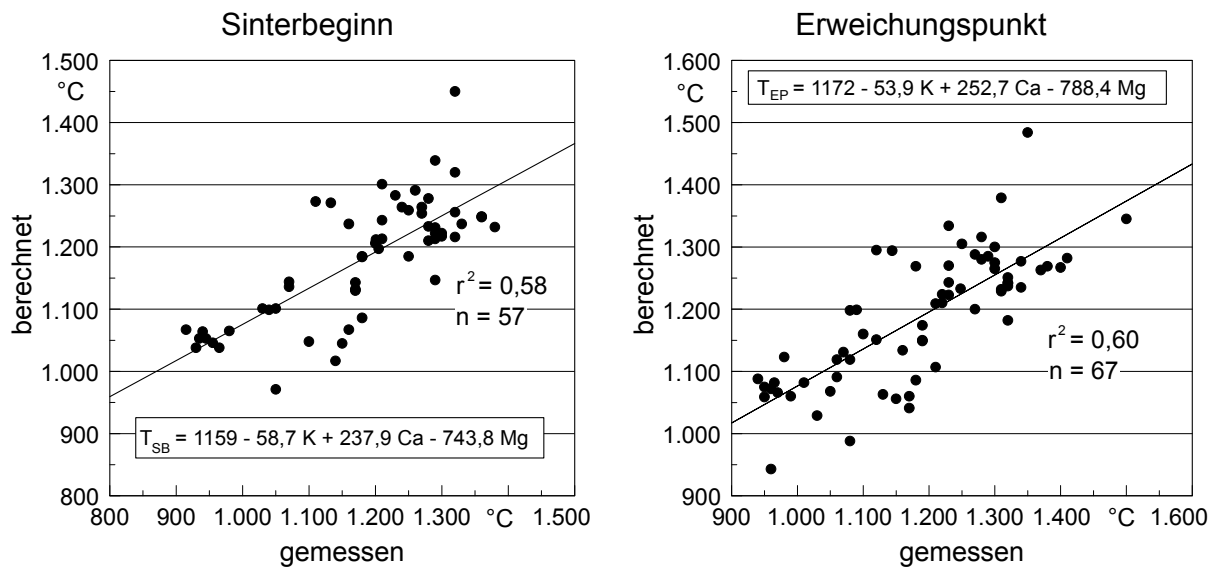
Für den Halbkugelpunkt wurde keine Schätzfunktion bestimmt, da die vorliegenden Datensätze hinsichtlich dieses Parameters stark lückenhaft waren. Die übrigen Kenndaten der Regression werden in Tab. 26 zusammengestellt. Jede der drei Einflussgrößen ist hochsignifikant ( $p \gg 99,9\%$ ), außer Kalium beim Fließpunkt ( $p > 95\%$ ). Abb. 44 zeigt die Übereinstimmung der gemessenen mit den berechneten Werten für den Sinterbeginn und den Erweichungspunkt. Beim Fließpunkt ergibt sich eine relativ niedrige Genauigkeit der Schätzfunktion ( $r^2 = 0,38$ ). Dies lässt sich durch die Tatsache begründen, dass die Bestimmbarkeitsgrenze für den Fließpunkt teilweise schon bei 1.500 °C erreicht war und diese Grenze bei einigen Brennstoffen vielfach überschritten wird.

**Tab. 26** Weitere Kenndaten der Schätzfunktionen für das Ascheerweichungsverhalten

	Anzahl Beobachtungen	Bestimmtheitsmaß $r^2$	Standardfehler (°C)
Sinterbeginn	57	0,58	84,8
Erweichungspunkt	67	0,60	88,2
Fließpunkt	67	0,38	111,0

Beim Ascheerweichungsverhalten werden wesentliche technische Nachteile der Halmgutbrennstoffe sichtbar. Während Holz und Rinde mit ca. 1.200 °C (Sinterbeginn) bzw. 1.300 bis 1.400 °C (Erweichungspunkt) durchweg im unkritischen Bereich liegen (Abb. 47-A, S. 109), sind die entsprechenden Temperaturen bei Halmgütern fast durchweg niedriger als 1.000 °C (Sinterbeginn) bzw. 1.200 °C (Erweichungspunkt), wodurch es bei der Verbrennung zu den in Kapitel 2.2 beschriebenen Anbackungen und Störungen kommen kann. Beim Getreidestroh liegt der häufigste Wert für den Erweichungspunkt zwischen 900 und 950 °C (vgl. Abb. 45, S. 106).

**Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff.** Diejenige Komponente, bei deren Oxidation die Hauptmenge an Energie frei wird, ist der Kohlenstoff. Daneben liefert der Wasserstoffgehalt bei der Verbrennung ebenfalls noch zusätzliche Energiemengen, während der Sauerstoffgehalt lediglich den Oxidationsvorgang unterstützt. Dieser Zusammenhang kommt auch in der Schätzformel für die Heizwertberechnung zum Ausdruck (vgl.



**Abb. 44** Ascheerweichungstemperatur ( $T_{EP}$ ) und Sinterbeginn ( $T_{SB}$ ) in Abhängigkeit vom K-, Ca- und Mg-Gehalt im Brennstoff (in % i.d.TM). erweich.preKorrelation zwischen gemessen und berechneten Werten. Rechenformel: Eingabe der Elementgehalte in % der TM

S. 100). Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt wurden durch Messungen bestimmt, während beim Sauerstoffgehalt nur wenige echte Messwerte vorliegen. Statt dessen stellen die hier angegebenen Sauerstoffwerte zumeist eine Residualgröße aus den übrigen Einzelkomponenten dar (100 % minus Gehalt an Asche, C, H und N).

Analog zum Heizwert werden die höchsten Kohlenstoffgehalte beim Holz mit 47 bis 50 % festgestellt, während die Mehrzahl der übrigen Festbrennstoffe meist nur leicht über 45 % oder knapp darunter liegen (Abb. 47-B, S. 110). Auch beim Wasserstoffgehalt gibt es wenig Auffälligkeiten, abgesehen von den relativ geringen Gehalten beim Mais- und Sonnenblumenstroh sowie der großen Schwankungsbreite bei Rinde. Die drei letztgenannten Brennstoffarten weisen zugleich auch den niedrigsten Sauerstoffgehalt auf.

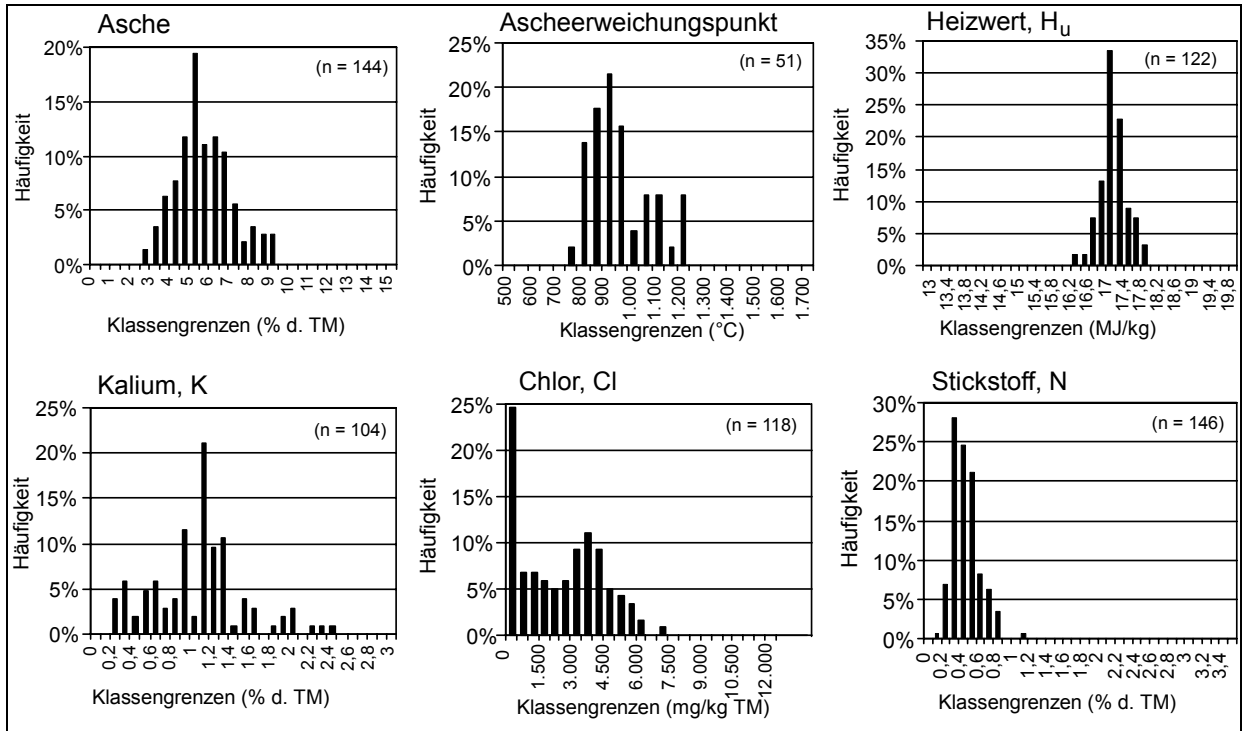
**Stickstoff.** Beim Stickstoffgehalt werden die Unterschiede im stofflichen Aufbau der jeweiligen Biomasse sichtbar. Pflanzen oder Pflanzenteile mit hohem Eiweißgehalt haben grundsätzlich höhere Stickstoffgehalte als die typischen Lignocellulosematerialien wie Holz oder Halmgut. Das gilt vor allem für die generativen Organe bei Getreide, Ölsaaten und Proteinpflanzen oder für die als Futtermittel geeigneten Halmgüter. Entsprechend hoch ist der Stickstoffgehalt bei Getreidekörnern oder Getreideganzpflanzen und auch bei Futtergräsern (Wiesenheu). Fichtenholz weist mit 0,1 bis 0,2 % die geringsten Stickstoffgehalte auf, während Getreidestroh in der Regel bei 0,5 % liegt, wobei die Häufigkeitsverteilung in Abb. 45 (S. 106) nur sehr wenige Werte oberhalb von 0,6 % und unterhalb von 0,3 % erkennen lässt. Deutlich darüber liegen allerdings Raps-, Mais-, Sonnenblumen- und Hanfstroh. Vor allem aufgrund der unterschiedlichen Praktiken bei

der Verwendung von Stickstoffdüngemitteln sind die Schwankungsbreiten bei allen Nicht-Holzbrennstoffen relativ groß (vgl. Abb. 47-B, S. 110).

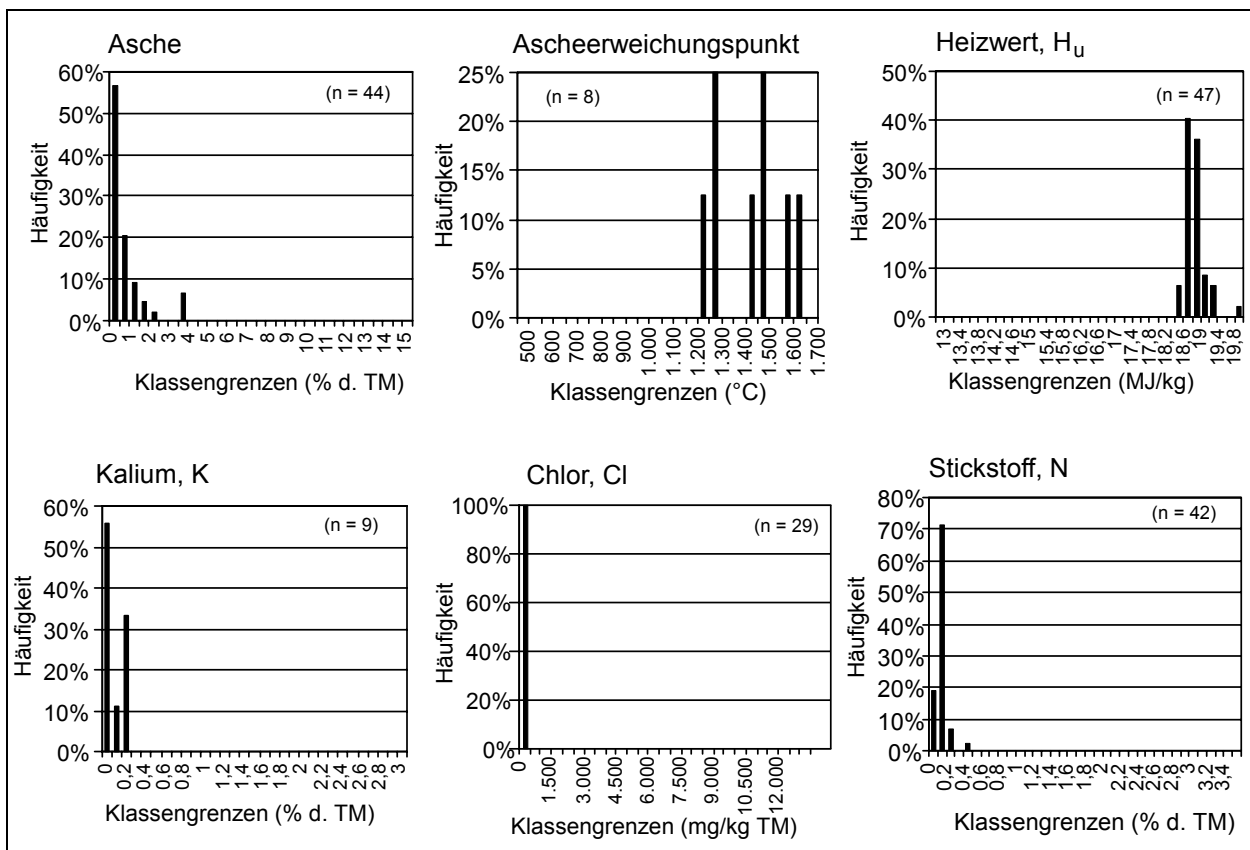
**Kalium.** Ähnlich wie beim Stickstoff kommt es auch beim Kaliumgehalt zu deutlichen Unterschieden zwischen den regelmäßig gedüngten Feldkulturen und den durchweg ungedüngten Holzkulturen (Wald, Kurzumtriebsplantagen). Anders jedoch als beim Stickstoff, befindet sich das Kalium weniger in den generativen Organen, sondern vermehrt in den Stängeln und Blättern. Das zeigen die niedrigen Kaliumgehalte in den Getreidekörnern (ca. 0,5 bis 0,7 %), während die Halmgutbrennstoffe ohne Körner meist bei Gehalten um oder über 1 % liegen. Holzbrennstoffe kommen jedoch kaum über 0,35 % hinaus. Letztere weisen zudem eine sehr geringe Schwankungsbreite auf, während bei Getreidestroh eine große Bandbreite von Werten zwischen 0,2 und 2,5 % möglich ist. Das wird auch anhand der in Abb. 45 und Abb. 46 (S. 106) dargestellten Häufigkeitsverteilungen (Fichtenholz bzw. verschiedene Getreidestrohart) deutlich. Diese hohe Bandbreite ist nicht nur Ausdruck unterschiedlicher Düngungspraktiken, sondern geht vielfach auch auf den auswaschenden Effekt von Niederschlägen nach der Abreife bzw. nach dem Mähdrusch zurück (vgl. hierzu Feldversuche in Kap. 4.2.2).

**Magnesium, Kalzium.** Bei diesen beiden Elementen lassen sich keine gleichlautenden Schlussfolgerungen aus den Datenbankabfragen ziehen. Während der Magnesiumgehalt in den Holzbrennstoffen mit ca. 0,04 bis 0,1 % relativ niedrig ist, sind die Kalziumgehalte im Holz vergleichsweise hoch (0,3 bis ca. 1 %, bei Rinde noch darüber). Kalzium ist dagegen nur sehr wenig in Getreidestroh, -ganzpflanzen und -körnern enthalten, während im Stroh anderer Feldkulturen bei Magnesium und Kalzium deutlich erhöhte Gehalte festgestellt wurden (Abb. 47-C, S. 111). Hier ist die Datenbasis allerdings noch relativ schmal.

**Schwefel.** Wie Stickstoff ist auch Schwefel am Aufbau einiger Aminosäuren und Enzyme beteiligt. Daher ist der Schwefelgehalt in der Biomasse stark vom jeweiligen Pflanzenaufbau abhängig. Gleichzeitig ist Schwefel auch ein häufiger Begleitstoff in Düngemitteln; daher ist die Schwefelzufuhr bei den Feldkulturen deutlich höher als bei ungedüngten Waldkulturen oder schnellwachsenden Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen. Das wird aus der Darstellung in Abb. 47-C (S. 111) deutlich. Rapsstroh besitzt mit durchschnittlich ca. 3.000 mg/kg den höchsten Schwefelgehalt, während die meisten Holzbrennstoffe im Bereich von 200 bis 500 mg/kg und Getreidestroh meist unter 1.000 mg/kg liegen.



**Abb. 45** häufig.preHäufigkeitsverteilung bei ausgewählten Qualitätsparametern für Stroh. Hier: Datenbankanfrage für die relativ ähnlichen Getreidestroharten von Weizen, Roggen und Triticale. Daten ohne Extremwerteliminierung



**Abb. 46** häufig.preHäufigkeitsverteilung bei ausgewählten Qualitätsparametern für Fichtenholz (mit Rinde). Daten ohne Extremwerteliminierung

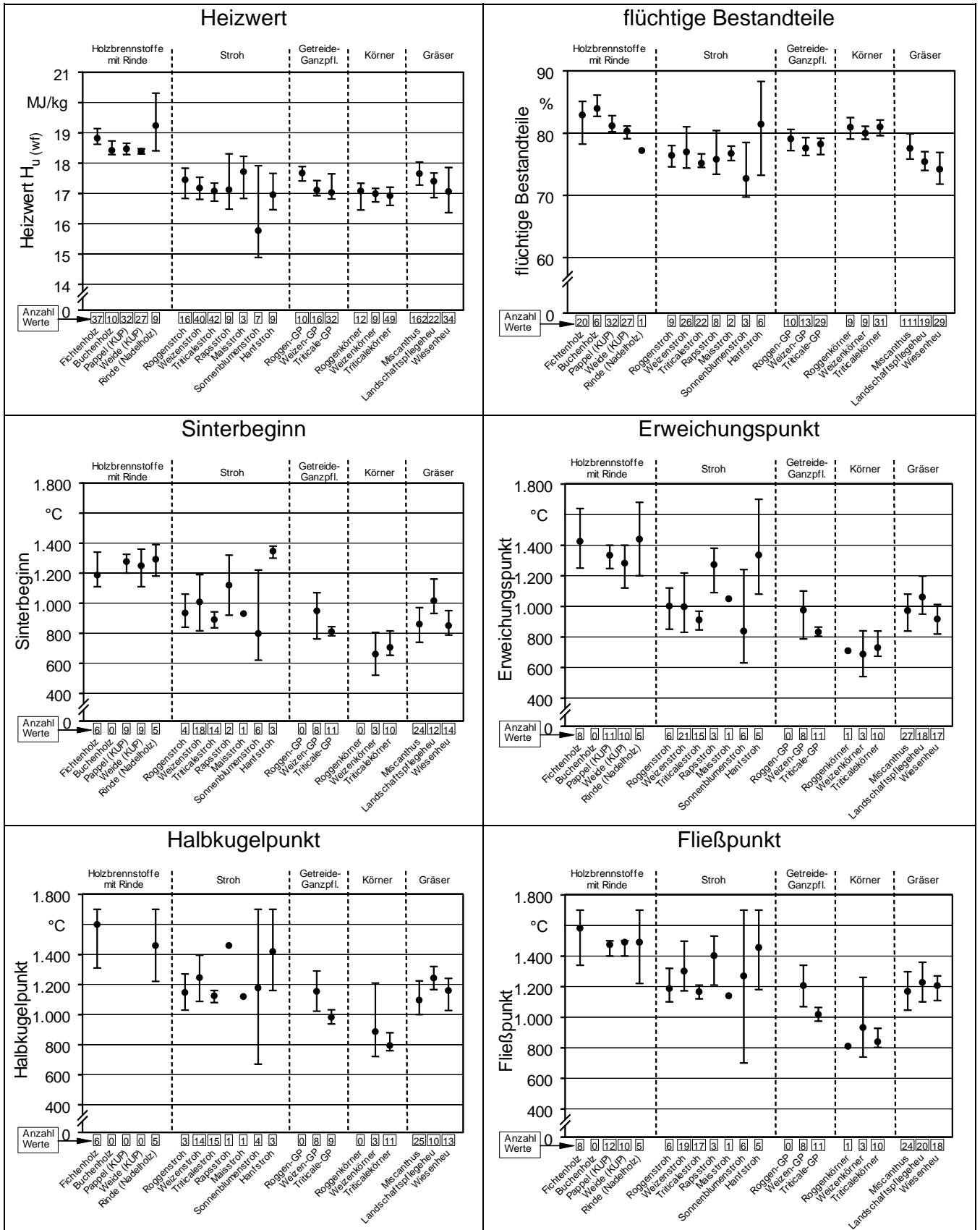


**Chlor.** Auch Chlor ist ein wichtiger Begleitstoff der mineralischen Düngung. Folglich finden sich in den gedüngten Feldkulturen deutlich höhere Chlorgehalte als im Holz (Abb. 47-C, S. 111), da im Waldbau und in Kurzumtriebsplantagen üblicherweise keine Düngemittel eingesetzt werden. Holzbrennstoffe liegen mit ca. 50 bis 200 mg Cl je kg Trockenmasse auf einem so niedrigen Niveau, dass in vielen Messungen die Nachweisgrenze der meisten Bestimmungsverfahren unterschritten wird. Dagegen ist der Chlorgehalt im Getreidestroh mit ca. 2.000 bis 4.000 mg/kg (0,2 bis 0,4 %) um ein Vielfaches höher. Spitzenwerte wurden bei Raps- und Sonnenblumenstroh (durchschnittlich 4.600 bzw. 8.100 mg/kg) beziehungsweise beim Wiesenheu (Futtergräser) festgestellt (7.600 mg/kg). Auffällig sind auch die vergleichsweise hohen Spannweiten, innerhalb der die Chlorgehalte in den Nicht-Holzbrennstoffen streuen. Diese Streuung ist Ausdruck der beiden wichtigsten Einflussgrößen, der Chlorid-Düngungshöhe und der Auswaschung aus dem bereits abgestorbenen Pflanzenmaterial (vgl. hierzu Feldversuche in Kap. 4.2.2). Da bei der Datenbankauswertung auch eine Vielzahl Analysen von altem (ausgewaschenem) Stroh berücksichtigt wurden, kommt bei der in Abb. 45 (S. 106) dargestellten Häufigkeitsverteilung eine extrem linksgipfelige Kurve (sog. "positive Schiefe") zustande.

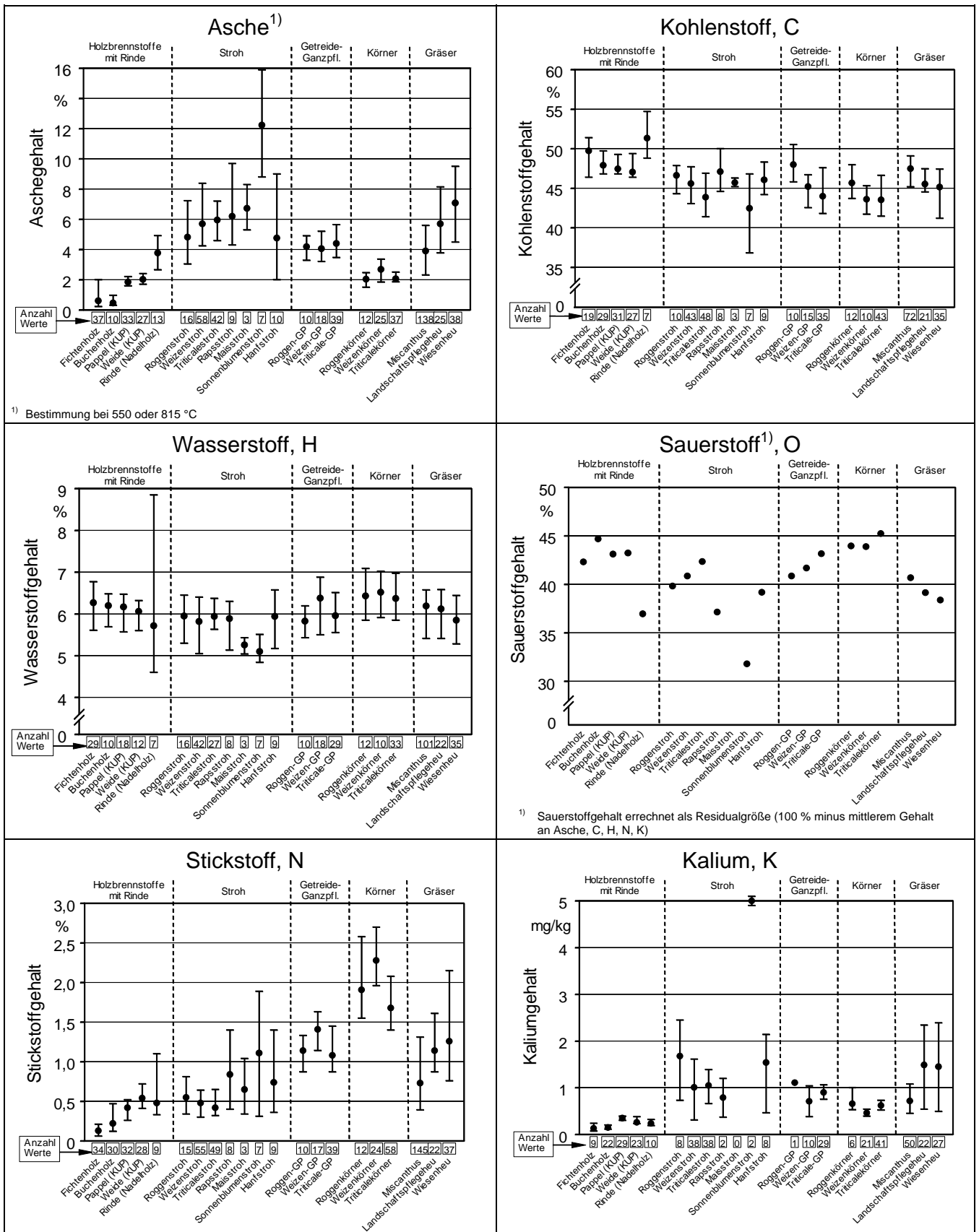
**Schwermetalle.** Die Ergebnisse der Datenbankabfragen zu den Schwermetallgehalten werden zusammenfassend in Abb. 47-D und Abb. 47-E (ab S. 112) dargestellt. Nicht aufgeführt werden darin die aus der kommunalen Abfallwirtschaft stammenden Biomassearten (Straßengrasschnitt und Strauchschnitt), die bereits in Kap. 4.2.5 betrachtet wurden. Straßenbegleitgrün weist bei Blei, Quecksilber, Arsen, Kupfer, Cobalt und Molybdän durchweg die höchsten Schwermetallgehalte unter allen hier betrachteten Materialien auf und zählt auch bei den übrigen Schwermetallen zur am höchsten belasteten Gruppe.

An den Abfrageergebnissen lassen sich aber auch bei den primären naturbelassenen Biomassen einige Auffälligkeiten ablesen. Beispielsweise nimmt die Rinde von Nadelhölzern bei den meisten Schwermetallgehalten eine Spitzenstellung ein (bei Arsen, Cadmium, Cobalt, Eisen, Quecksilber, Mangan, Molybdän, Nickel und Zink, vgl. Abb. 47-D bis E (ab S. 112)). Bei den übrigen Holzbrennstoffen muss jedoch zwischen den langjährig wachsenden Waldhölzern und den Kurzumtriebsplantagenkulturen differenziert werden. Waldhölzer weisen fast durchweg - meist um ein Vielfaches - höhere Schwermetallgehalte auf, als Kurzumtriebsplantagenholz (Pappeln und Weiden). Eine deutliche Ausnahme bildet hier der Cadmiumgehalt, der aufgrund eines offenbar spezifischen Aneignungsvermögens bei Weiden besonders hoch ist, wodurch diese Kulturart auch für die Melioration cadmiumbelasteter Flächen in Frage kommt (vgl. hierzu Kap. 4.2.5). Ansonsten lassen sich bei den Kurzumtriebsplantagen auch gegenüber den Nicht-Holz-Biomassen keine Nachteile erkennen. Im Gegenteil, bei Nickel, Chrom, und vor allem Quecksilber, Blei und Molybdän wurden hierzu die niedrigsten Konzentrationen festgestellt.

Wenngleich die Datenbasis wegen der wenigen Angaben für Harthölzer noch relativ schmal ist, kann allgemein festgestellt werden, dass Holzbrennstoffe aus dem Wald auch gegenüber den jährlich erntbaren Halmgutbrennstoffen bzw. Körnern mit vielen Schwermetallen höher belastet sind. Das betrifft vor allem den Arsen-, Cadmium-, Quecksilber-, Mangan-, Nickel-, Blei- und Zinkgehalt. Der Grund für diese Beobachtung liegt zum einen in der langen Umtriebszeit, in der der Wald die Schwermetalleinträge aus der Atmosphäre akkumulieren kann, und zum anderen in den niedrigen pH-Werten der Waldböden, wodurch sich die Schwermetalllöslichkeit und damit auch die Pflanzenaufnahme erhöhen.



**Abb. 47-A** Mittelwerte und Spannweiten bei chemisch-stofflichen Merkmalen biogener Festbrennstoffe. Recherche in Weihenstephaner Brennstoffdatenbank (bereinigter Datenumfang), Stand: April 1999



**Abb. 47-B** Mittelwerte und Spannweiten bei chemisch-stofflichen Merkmalen biogener Festbrennstoffe. Recherche in Weihenstephaner Brennstoffdatenbank (bereinigter Datenumfang), Stand: April 1999

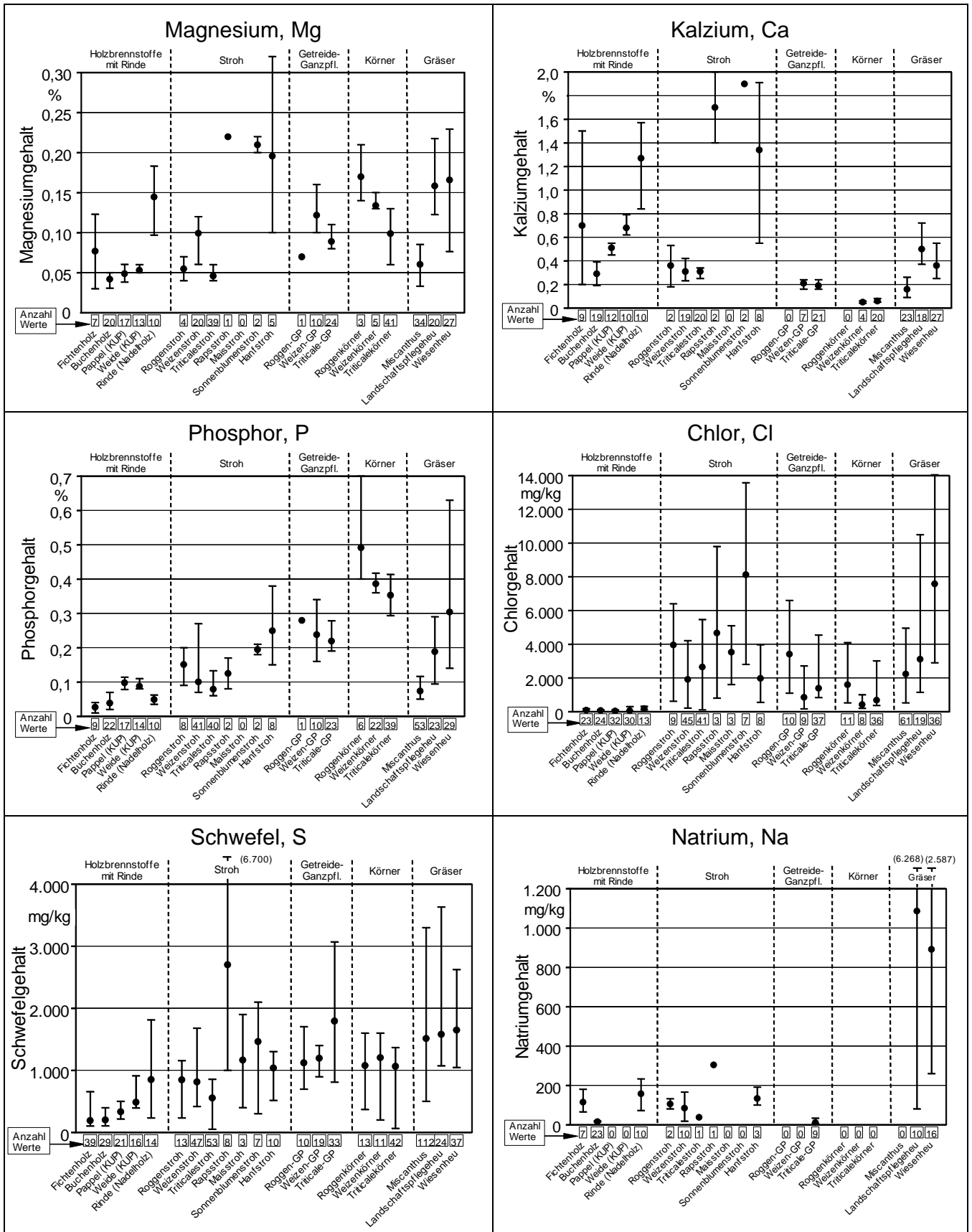
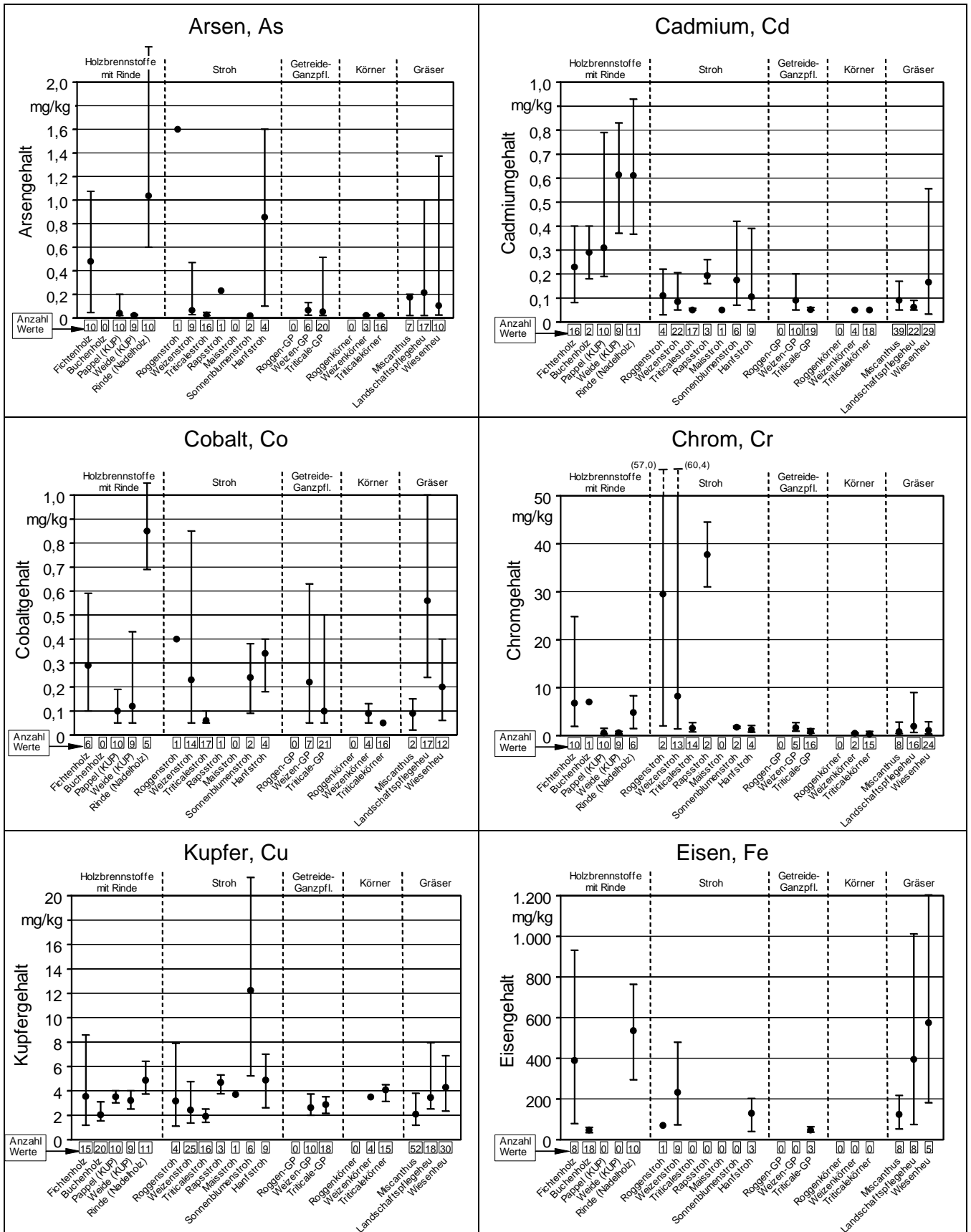
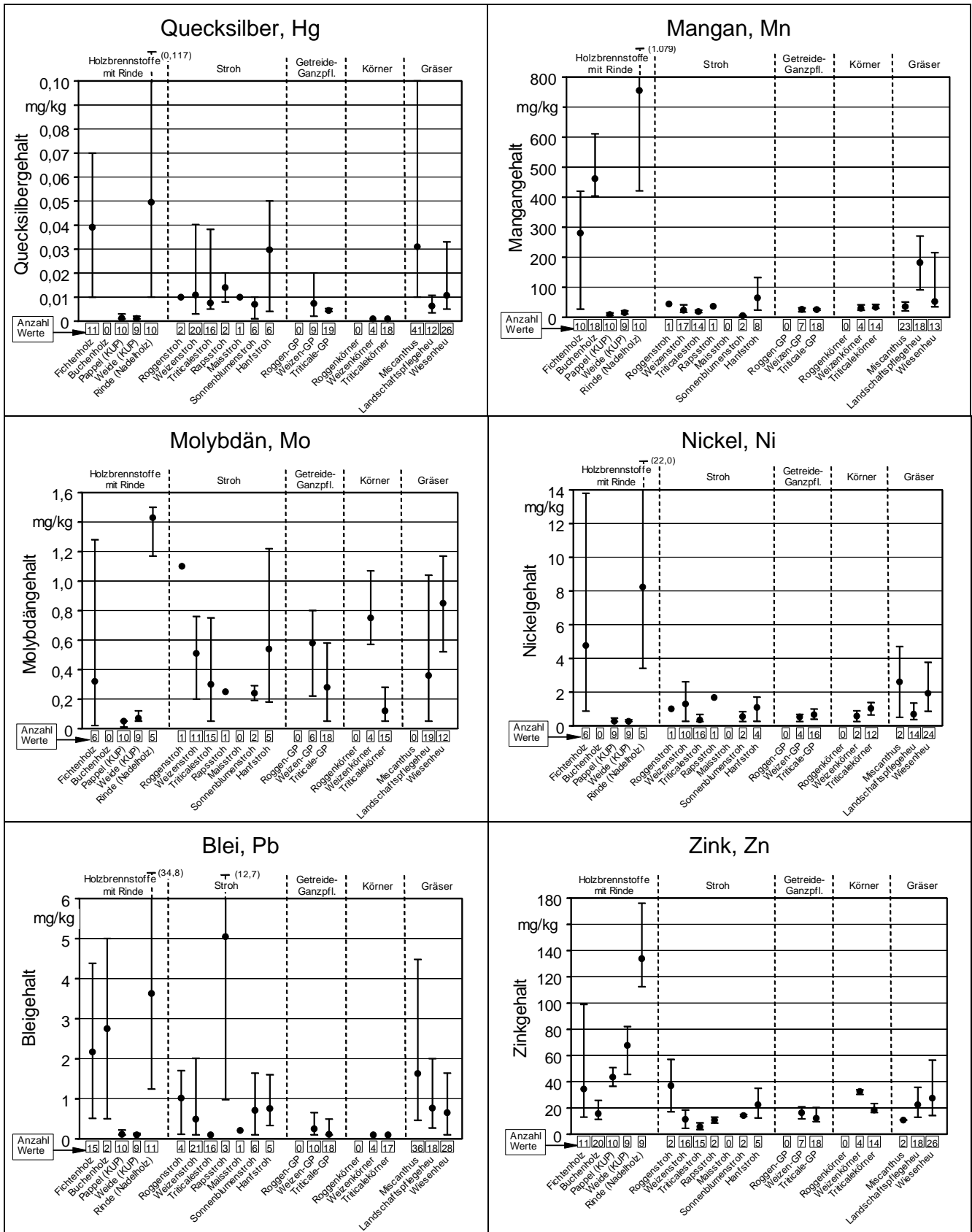


Abb. 47-C Mittelwerte und Spannweiten bei chemisch-stofflichen Merkmalen biogener Festbrennstoffe. Recherche in Weihenstephaner Brennstoffdatenbank (bereinigter Datenumfang), Stand: April 1999



**Abb. 47-D** Mittelwerte und Spannweiten bei chemisch-stofflichen Merkmalen biogener Festbrennstoffe. Recherche in Weihenstephaner Brennstoffdatenbank (bereinigter Datenumfang), Stand: April 1999



**Abb. 47-E** Mittelwerte und Spannweiten bei chemisch-stofflichen Merkmalen biogener Festbrennstoffe. Recherche in Weihenstephaner Brennstoffdatenbank (bereinigter Datenumfang), Stand: April 1999

## **6 Bewertung und Schlussfolgerungen**

Die Qualität biogener Festbrennstoffe wird durch eine breite Vielzahl unterschiedlicher Eigenschaften und Merkmale beschrieben, die entweder direkt oder indirekt umweltrelevant sind. Die jeweilige Bedeutung dieser Qualitätsmerkmale hängt dabei vor allem von dem verwendeten Verfahren für die energetische Umwandlung ab. Für jedes Umwandlungsverfahren gelten wiederum sowohl eigene technische Toleranzschwellen als auch umweltbezogene Grenz- oder Richtwerte. In dem Maß, in dem diese Grenzen erreicht oder gar überschritten werden, gewinnen die einzelnen Qualitätsparameter an spezifischer Bedeutung für den jeweiligen Umwandlungsprozeß. Im einfachsten Fall gilt diese Aussage beispielsweise für den zulässigen Wassergehalt in einer Holzfeuerungsanlage; sie kann sich aber auch z. B. auf den Kaliumgehalt im Brennstoff beziehen, der bei Hochtemperaturwärmetauschern für die Dampferzeugung indirekt an den Korrosionsprozessen beteiligt ist. Indem auch die Aschequalität und ggf. deren Rückführung in den Stoffkreislauf betroffen ist, reicht der Qualitätsbegriff noch über den eigentlichen Verbrennungsprozess hinaus.

Maßnahmen, die auf eine Sicherstellung oder Verbesserung der Qualität abzielen, sind somit stets mit Blick auf die individuellen Anforderungen bei der energetischen Nutzung zu treffen. Aus der vorliegenden Arbeit lassen sich verschiedene Ansatzpunkte für solche qualitätssteigernde Maßnahmen erkennen. Die hier betrachteten Einflussgrößen werden nachfolgend diskutiert und auch vor dem Hintergrund der damit verbundenen Kosten bewertet.

### **6.1 Qualitätsverbessernde Maßnahmen**

#### **6.1.1 Erzielbare Effekte**

Die Qualität biogener Festbrennstoffe wird bereits in der Wachstumsphase ausgeprägt. Darin unterliegt das Pflanzenwachstum im System Boden-Pflanze-Atmosphäre vielfältigen Einflussgrößen. Naturgemäß ist damit auch die Vorhersagbarkeit solcher Maßnahmen begrenzt, da die bewirtschaftungsbedingten „planmäßigen“ Eingriffe, aus denen sich mögliche qualitätssteigernde Maßnahmen ableiten lassen, stets nur einen Teil der wirksamen Größen darstellen.

Auch in der vorliegenden Untersuchung lässt sich die Komplexität des Systems mit seiner Vielzahl von Wechselwirkungen an den nicht immer eindeutigen Ursache-Wirkungs-Beziehungen ablesen. Beispielsweise sind die Veränderungen im Chlorgehalt, die durch unterschiedliche Düngung hervorgerufen werden, hier deutlich geringer als bei anderen



Versuchsanstellern. In dänischen Feldversuchen konnte der Chlorgehalt im Stroh um mehr als die Hälfte abgesenkt werden, wenn ein chlorfreies Düngemittel verwendet wurde [75]. Dagegen kam es in der vorliegenden Untersuchung lediglich zu einer 6 bis 21 %igen Reduzierung. Bemerkenswerterweise lag das dänische Cl-Gehaltsniveau im Triticalestroh trotz einer relativ niedrigen Cl-Zufuhr (91 kg/ha) etwa doppelt so hoch wie in der vorliegenden Untersuchung (bei 181 kg Cl/ha). Offenbar ist eine positive Wirkung eines solchen Düngerwechsels auch dann möglich, wenn bereits eine insgesamt hohe Chlorbelastung vorliegt. Diese Belastung kann in den Küstenregionen beispielsweise durch natürliche Einträge aus der Atmosphäre oder durch Brackwassereinfluß verursacht werden, während in Bayern derartige Einträge als unwahrscheinlich anzusehen sind (vgl. hierzu Kap. 3).

Die Tatsache, dass Chlor leicht auswaschbar ist, lässt vermuten, dass das "Timing" der Düngergabe sowie die klimatische Wasserbilanz und die Niederschlagsverteilung am Standort möglicherweise von weitaus größerer Bedeutung sind, als die Chlordüngermenge selbst. Auch bei der Wahl des Erntetermins kommt es auf das richtige „Timing“ an, wenngleich hier eindeutige Zusammenhänge nicht immer festzustellen sind. Aus den Versuchen mit Rohrschwinger und Landschaftspflegeheu lässt sich jedoch erkennen, dass eine späte Ernte beim Chlor- und Kaliumgehalt eher Vorteile bringt. Bei Getreide kommt eine verspätete Ernte aus technischen Gründen (Kornausfall) dagegen nicht in Frage. Aus Ertrags- und Fruchtfolgegründen ist statt dessen vielmehr eine Vorverlegung des Erntezeitpunktes interessant. Wie bei Feldgräsern führt diese jedoch tendenziell zu Qualitätsminderungen (Wassergehalt, N- und K-Gehalt). In der Feldfutterwirtschaft (Dauergrünland) wird diese Tendenz gezielt ausgenutzt. Durch Erhöhung der Schnitthäufigkeit (= Vorverlegung des Erntetermins) werden Steigerungen beim Proteingehalt erzielt. Dieser Effekt, der bei den biogenen Brennstoffen nachteilig ist, kann auf ca. 2 Prozentpunkte je Schnitanzahlerhöhung beziffert werden [68], was einer Steigerung im N-Gehalt von ca. 0,32 Prozentpunkten entspricht.

Nach dem Grasschnitt oder Mähdrusch entscheidet die Niederschlagssumme und -intensität sowie die Porosität des Halmgutes über den Erfolg einer verlängerten Feldliegezeit. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswaschungs- bzw. Abgaberaten bei Chlor und Kalium immer dann bedeutend sind, wenn das Ausgangsniveau des Chlorgehalts insgesamt hoch ist. Auch hier gilt jedoch, dass eine Berechenbarkeit für den Auswaschungsgrad kaum gegeben ist, da das Eintreten von Niederschlägen in ausreichender Höhe und Intensität kaum kalkulierbar ist. Hinzu kommt, dass der Spielraum für eine Ausdehnung der Feldliegezeiten als qualitätsverbessernde Maßnahme begrenzt und je nach Flächennutzungsart unterschiedlich ist. Landschaftspflegeheu ist beispielsweise wesentlich stärkeren zeitlichen Einschränkungen unterworfen als Getreidestroh. Das liegt daran, dass eine Wiesenfläche ihr Wachstum unmittelbar nach dem Schnitt fortsetzt, so dass das liegende Heu leicht überwachsen werden kann und sich dadurch nach einer bestimmten Verweilzeit nicht mehr bergen lässt. Als maximale Feldliegezeit

kann bei Gräsern daher ein Zeitraum von etwa 2 Wochen angesehen werden. Er verkürzt sich bei auftretenden Niederschlägen, da der Wiederaufwuchs in diesem Fall beschleunigt wird. Eine Praxis, bei der Schnitzeitpunkt bewusst im Hinblick auf eine hohe Regenwahrscheinlichkeit gewählt wird, wäre daher stets mit dem Risiko des Totalverlustes der Ernte verbunden. Außerdem sind vielfach auch arbeitswirtschaftliche Ziele und die Befahrbarkeit der Böden bei Nässe zu berücksichtigen, so dass ein gezieltes Abwarten von Niederschlägen zur Qualitätssteigerung eine völlige Umkehrung der derzeitigen landwirtschaftlichen Praxis bedeuten würde.

### 6.1.2 Mehrkosten für Qualitätsverbesserungen

Zusätzlich zu den Unsicherheiten über die Wirksamkeit einer qualitätssichernden Maßnahme kommt es durch einen Düngemittelwechsel oder durch verspätete Erntetermine bzw. verlängerte Feldverweilzeiten in der Regel zu unvermeidlichen Mehrkosten. Diese werden nachfolgend diskutiert.

**Düngerwechsel.** Die Verwendung von Kaliumsulfat anstelle der meist üblichen Kaliumchloriddüngemittel schlägt sich etwa mit einer Verdoppelung der Kosten für diesen Nährstoff nieder. In Tab. 27 werden die spezifischen Preise zusammengestellt.

**Tab. 27** Spezifische Preise für Kaliumdüngemittel

Düngemittel	K-Gehalt (%)	Mg-Gehalt (%)	Preis, lose, bei Abholung, inkl. MwSt. <sup>1)</sup> (in DM/100 kg)	spezifischer Kaliumpreis (in DM/kg Reinnährstoff)
<i>chloridhaltige Düngemittel:</i>				
Korn Kali	33,1	3,0	29,0	0,88
60er Kali	49,6	--	37,0	0,75
<i>sulfathaltige Düngemittel:</i>				
Kalimagnesia	24,8	3,6	45,0	1,82
Kalisulfat	41,3	--	65,0	1,57

<sup>1)</sup> Preisauskunft BayWa Freising, März 1998

Um die Auswirkungen auf den Brennstoffpreis kennenzulernen, sind Berechnungen unter Zugrundelegung bestimmter Annahmen durchzuführen. Eine solche vereinfachte Modellrechnung wird nachfolgend für Feldgras, Stroh- und Getreideganzpflanzen aufgestellt (Tab. 28). Je nach Brennstoffart ist bei dieser Maßnahme mit Mehrkosten zwischen 11,- und 27,- DM/t (TM) zu rechnen. Dabei wird der höchste Wert für Stroh erzielt, da hier in der Regel davon auszugehen ist, dass keine energetische Körnernutzung erfolgt, so dass die Mehrkosten in voller Höhe dem Stroh angelastet werden müssen.

**Tab. 28** Mehrkosten beim Wechsel von chlorid- zu sulfathaltigen Kaliumdüngemitteln

	Einheit	Feldgras	Stroh	Ganzpflanzen
Ertrag	t/ha (TM)	10	5	12
jährlicher Kaliumbedarf	kg/ha	210	165	165
Preis für Kalium als 60er Kali	DM/kg K	0,75	0,75	0,75
Preis für Kalium als Kalisulfat	DM/kg K	1,57	1,57	1,57
Düngekosten bei 60er Kali	DM/ha a <sup>-1</sup>	156,7	123,3	123,3
Düngekosten bei Kalisulfat	DM/ha a <sup>-1</sup>	330,3	260,0	260,0
Mehrkosten für Sulfatdüngung	DM/ha a <sup>-1</sup>	173,6	136,7	136,7
<i>spez. Mehrkosten</i>	<i>DM/t (TM)</i>	<i>17,36</i>	<i>27,33</i>	<i>11,39</i>

**Verlängerte Feldverweilzeit.** Wenn das geschnittene Halmgut auf dem Feld über eine verlängerte Zeit verbleiben soll, kommt es zu erhöhten Masseverlusten. Das liegt vor allem daran, dass das Halmgut unter dem Einfluß von Sonnenstrahlung, Niederschlägen und pilzlichem Angriff stark strapaziert wird und zum Teil verwittert. Bei der endgültigen Bergung wird es abermals mechanisch beansprucht. Zu diesem Zeitpunkt ist die Biomasse bereits spröde, so dass es zu verstärkten Bröckelverlusten kommt. In Tab. 29 werden einige Literaturangaben über die Verluste bei der Halmgutbergung zusammengefasst. Untersuchungen zum Stroh liegen zwar nicht vor, allerdings ist anzunehmen, dass hier generell weniger Biomasse verloren geht, als bei den in der Tabelle genannten Heuarten. Das liegt an den unterschiedlichen Blattanteilen, die in besonders hohem Maße zu Bröckelverlusten beitragen können. Bei Wiesen mit hohem Kräuteranteil oder bei der blattreichen Luzerne sind schon bei konventioneller Bewirtschaftung (ohne verlängerte Feldliegezeiten) Gesamtverluste von 25 bis 39 % möglich, während bei reinen Hochgräsern (z. B. Knautgras) lediglich ca. 6 % verloren gehen (Tab. 29). Bei gräserreichem überständigem Landschaftspflegeheu sind Gesamtverluste in mindestens derselben Größenordnung zu erwarten. Für die Bewertung der Mehrkosten einer verlängerten

**Tab. 29** Trockenmasseverluste bei der Ernte und Bergung von Heu

Quelle	Pflanzenmaterial	Verluste der Verfahrensschritte			Gesamtverluste
		Mähen und Aufbereiten	Zetten	Schwaden	
Höhn [42]	Heu allgemein				8-20 %
	15 % Kräuteranteil				25,1 %
	100 % Knautgras				6,2 %
Höhn [41]	Gräser <sup>1)</sup>				3-11 %
	Kräuter <sup>1)</sup>				25-35 %
Klinner et. al [47]	Gras				19,1 %
	Luzerne				38,9 %
Savoie [80]	Wiesenlieschgras	1 %	0,5 % <sup>2)</sup>		
	Luzerne	2 %	1-4 % <sup>2)</sup>		
Banthien [6]	Heu	3-5 %			
Beckhoff [1]	Heu <sup>3)</sup>			2-6 %	

<sup>1)</sup> Bestimmung einer Mischung aus 23 % Gräser mit 74 % Kräuter und 3 % Klee

<sup>2)</sup> einmaliger Zettwendeschnitt

<sup>3)</sup> Angabe pro Wendevorgang

Feldverweilzeit kommt es jedoch auf die Quantifizierung der *zusätzlichen* Verluste an, die vor allem durch die o.g. Veränderungen in der Biomassestruktur zustandekommen. Die Verluste durch zusätzliches Zetten und Schwaden dürften im oberen Bereich der in Tab. 29 genannten Spanne liegen. Hinzu kommt, dass mit den erhofften Auswaschungseffekten auch organische Masse herausgelöst wird. Aus Versuchen im Niederschlagssimulator [88] lässt sich diese Verlustgröße auf ca. 1 bis 2 % (TM) beziffern (bei 18 mm Beregnungshöhe). Im Fall des Grünlandschnittes kann es außerdem zu erhöhten Respirationsverlusten kommen, wenn das Pflanzenmaterial aufgrund der erwarteten feuchten Witterung noch über einen längeren Zeitraum physiologisch aktiv bleibt oder durch Pilzwachstum angegriffen wird. Zusammenfassend ist bei Gras- oder Grünlandschnitt davon auszugehen, dass eine verlängerte Feldliegezeit zu Masseverlusten von mindestens ca. 10 bis 15 % (TM) führt.

Bei Stroh ist tendenziell von geringeren Werten auszugehen. Ganzpflanzenmaterial (hier insbesondere Winterweizen) unterliegt dagegen drastisch höheren Verlusten durch Kornausfall. Aus den Ergebnissen zur Bestimmung des Korn-Strohverhältnisses (vgl. Abb. 31, S. 77) lassen sich diese Verluste überschlägig errechnen. In der Zeit zwischen dem 22.8. und dem 2.9. verminderte sich das Korn-Strohverhältnis von 0,94 auf 0,69, woraus sich ein 13 %iger Gesamtverlust errechnet (Winterweizen). Die Strohverluste sind hierbei noch nicht eingerechnet. In der Summe ist daher von mindestens ca. 20 %igen Trockenmasseverlusten über eine etwa 10- bis 14-tägige Feldverweilzeit auszugehen.

Unter Zugrundelegung der vorgenannten Verlustangaben können die Kosten der Maßnahme abgeschätzt werden (Tab. 30). Wenn sie gleichen Ertragsannahmen wie in Tab. 28 (spezifischen Düngungsmehrkosten) unterstellt werden, errechnen sich hierfür Mehrkosten in Höhe von ca. 9,- bis 30,- DM/t.

**Tab. 30** Berechnung der spezifischen Mehrkosten durch verlängerte Feldverweilzeiten unter praxisnahen Annahmen

	Einheit	Feldgras	Stroh	Ganzpflanzen
erntbarer Ertrag (brutto)	t/ha (TM)	10	5	12
relative Verluste durch Feldliegezeiten	%	12	8	20
absolute Höhe der Verluste	t/ha (TM)	1,2	0,4	2,4
angenommener Brennstoffpreis	DM/t	100	100	120
Mindereinnahme	DM/ha	120	40	288
<i>spez. Mehrkosten</i>				
<i>(Mindereinnahme bez. auf Nettoertrag)</i>	<i>DM/t (TM)</i>	<i>13,60</i>	<i>8,70</i>	<i>30,00</i>

**Verzögerung des Erntezeitpunktes.** Mehrkosten durch ein Hinauszögern des Schnittzeitpunktes können vor allem bei Feldgrasflächen (speziell angebauten Energiegräsern) anfallen. Anders als bei Landschaftspflegeflächen, die ohnehin meist nur einmal pro Jahr geschnitten werden, kann der hinausgezögerte Mähzeitpunkt bei Feldgras dazu führen, dass auf einen nachfolgenden Schnitt ganz verzichtet werden muss. Entsprechende Ertragseinbußen führen zu Mehrkosten. Bei Getreide und Stroh ist eine solche Vorverlegung kaum relevant (Kap. 6.1.1), daher soll hier auf einen Vergleich der Mehrkosten verzichtet werden.

Bei der Bewertung kommt es nicht allein auf die Mehrkosten, sondern auch auf die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen an. Obgleich positive Effekte immer dann gegeben sind, wenn die Ausgangsgehalte bei den Schadstoffen insgesamt hoch sind, bleibt der Ausgang der Maßnahme stets ungewiss. Angesichts der hier aufgezeigten Kostensteigerungen erscheint es daher fraglich, ob derartige Primärmaßnahmen durch die Vorteile der Qualitätsverbesserung gerechtfertigt sein können. Diese Fragestellung kann nicht losgelöst von der vorgesehenen Technik der Energieumwandlung betrachtet werden, da je nach Anlagentechnik, Leistung und Sekundärmaßnahmen jeweils unterschiedliche Schwellenwerte gefordert werden. Hierzu sind weitergehende Untersuchungen anzustellen.

Die geringe Vorhersehbarkeit der Wirkung von Primärmaßnahmen hat dazu geführt, dass die Verringerung von Schadelementgehalten inzwischen auch im stationären technologischen Maßstab erprobt wird (vgl. hierzu Kap. 2.3.2, S. 27), da hierbei der Verfahrensablauf gezielt steuerbar ist. BAKKER UND JENKINS [4] schätzen die Kosten für einen solchen stationären Auswaschungsprozess (Zerkleinern, Wässern, Entwässern, Wasseraufbereitung und Qualitätsüberwachung) auf 26 US\$ (44,- DM/t) pro Tonne Stroh, wobei Brennstoffverluste in Höhe von ca. 6 % noch nicht miteingerechnet wurden. Stationäre Auswaschanlagen für Stroh mit anschließender Wasseraufbereitung und Strohtrocknung mittels Kraftwerksabwärme werden im Versuchsmaßstab auch in Dänemark eingesetzt [49]. Ähnliche qualitätsverbessernde Wirkungen können möglicherweise jedoch kostengünstiger erzielt werden, wenn feucht geerntete Halmgutbrennstoffe, die zuvor siliert wurden, mittels Schneckenpressen entwässert werden [82], wobei ein großer Teil der nachteiligen Inhaltsstoffe abgeschieden werden kann (vgl. hierzu Abb. 16, S. 28).

### 6.1.3 Schlussfolgerungen

Aus den vorgestellten Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen zusammenfassen.

- Eine treffsichere Abschätzung der qualitätssteigernden Effekte durch Düngungsmaßnahmen (insbesondere Chloridverzicht) ist derzeit nicht möglich, wenngleich der Zusammenhang an sich unzweifelhaft ist.

- Aufgrund der hohen Mobilität von Chlor bieten sich Chancen für die Chlorvermeidung allein schon durch eine geschickte Terminierung der Grunddüngung in der Fruchtfolge. Die chloridhaltige Kaliumdüngung sollte in der Fruchtfolge mindestens eine volle Vegetationsperiode vor dem Jahr der Strohernte liegen. Bei getreidedominierten Fruchtfolgen mit jährlicher Strohernte sollten zumindest die Frühjahrsgaben vermieden werden.
- Bei Einsatz von chlorhaltigen Düngemitteln im Feldgrasanbau können sehr hohe Cl-Konzentrationen auftreten. Hier empfiehlt sich ein relativ später Schnitt, vor allem wenn mit Niederschlägen gerechnet werden kann.
- Die Verwendung schwefelhaltiger Düngemittel hat offenbar keinen nennenswerten Einfluß auf den Schwefelgehalt der Biomasse. Daher lassen sich auch keine Vermeidungsstrategien für dieses Element ableiten.
- Aufgrund der Tatsache, dass bei den Schadstoffgehalten je nach Herkunft und Standort eine große Variabilität vorliegt, wäre die Entwicklung einer kostengünstigen Schnellbestimmungsmethode für die wichtigsten Elemente sinnvoll.
- Das Abwarten von Niederschlägen zur Chlor- und Kaliumauswaschung lässt sich in der Praxis nur schwer durchsetzen, wengleich eine solche Maßnahme im Vergleich zur Chlordüngung wirksamer und kostengünstiger sein kann, vorausgesetzt, dass entsprechende Niederschläge auftreten. Für Getreideganzpflanzen ist dieses Vorgehen aufgrund der hohen Verluste in keinem Fall praktikabel.
- Vor dem Hintergrund der relativ niedrigen Erlöse für Halmgutbrennstoffe erscheinen die hier genannten Primärmaßnahmen generell nur sinnvoll, wenn die statt dessen erforderlichen Sekundärmaßnahmen bei der energetischen Umwandlung teurer sind. In diesem Fall wäre die unvermeidliche Preissteigerung für die Biomasse vertretbar.
- Für Pappeln und Weiden lassen sich aus den vorliegenden Ergebnissen keine sinnvollen qualitätssteigernden Maßnahmen ableiten, vorausgesetzt, dass eine Ernte bei voller Belaubung vermieden wird.
- Holz aus Kurzumtriebsplantagen weist jedoch im Vergleich zu Halmgütern bei nahezu sämtlichen Qualitätsparametern günstigere Eigenschaften auf. Nachteilig sind lediglich die erhöhten Cadmium- und Nickelgehalte sowie der hohe Wassergehalt. Angesichts dieser drastischen Vorteile bietet sich ein erhebliches Potential zur Verbesserung der Brennstoffqualität indem solche Kulturen bevorzugt angebaut werden.

## 6.2 Brennstoffvergleich

Anhand der Datenbankergebnisse in Kapitel 5.3.2 (ab. S. 100) lassen sich eine Reihe von deutlichen Nachteilen der meisten betrachteten Halmgutarten gegenüber den Holzbrennstoffen feststellen. Diese Nachteile bestehen vor allem in einem durchschnittlich um ca. 9 % niedrigeren Heizwert, einem um ca. 3 bis 5 Prozentpunkte höheren Aschegehalt und dem durchweg ungünstigeren Ascheerweichungsverhalten, abzulesen an den niedrigen Temperaturen des Sinterbeginns und des Erweichungs-, Halbkugel- und Fließpunktes. Vor allem die beiden letztgenannten Nachteile sind als technische Gründe

dafür verantwortlich, dass Halmgutbrennstoffe - auch in entsprechend aufbereiteter Form (pelletiert, brikettiert) - weniger für Kleinfeuerungsanlagen als vielmehr für größere Feuerungen mit höherem Mechanisierungsgrad und entsprechendem Asche- und Schlackemanagement in Frage kommen.

Beim Stickstoff-, Chlor- und Kaliumgehalt setzt sich die relativ ungünstige Beurteilung der meisten Halmgüter gegenüber den Holzbrennstoffen fort. Halmgüter liegen beispielsweise beim Chlorgehalt um den Faktor 10 bis 30 über den Holzbrennstoffen. Zusammenhänge mit der Düngungs- und Erntepraxis sind hier offenkundig, was auch durch die Ergebnisse in Kapitel 4.2 (Feldversuche) belegt wird.

Ein anderes Bild ergibt sich bei den Schwermetallgehalten. Hier sind die Kulturen mit langjähriger Vegetationszeit (Waldbau) gegenüber annualen Kulturen aufgrund der langen Akkumulationsdauer im Nachteil. Vor allem die Nadelholzrinde nimmt bei den meisten Schwermetallgehalten eine Spitzenstellung ein (bei Arsen, Cadmium, Cobalt, Eisen, Quecksilber, Mangan, Molybdän, Nickel und Zink). Bei den übrigen Holzbrennstoffen muss zwischen den Kurzumtriebsplantagenkulturen und den Waldhölzern mit langen Umtriebszeiten differenziert werden. Letztere weisen fast durchweg - meist um ein Vielfaches - höhere Schwermetallgehalte auf, als Kurzumtriebsplantagenholz (Pappeln und Weiden), die auch gegenüber den Halmgütern keine Nachteile erkennen lassen. Im Gegenteil, bei Nickel, Chrom und vor allem bei Quecksilber, Blei und Molybdän weisen sie die niedrigsten Konzentrationen auf.

Auch bei den Nicht-Holzbrennstoffen ist eine differenzierte Betrachtung angebracht. Das betrifft allerdings weniger die Schwermetallgehalte, zumal hier die Spannbreite der vorkommenden Schwankungen besonders hoch und ein deutlich größerer Datenumfang für eine gesicherte Bewertung einzelner Brennstoffarten wünschenswert wäre. Vielmehr sind einige Auffälligkeiten bei den Parametern Chlor-, Kalium-, Aschegehalt sowie Ascheerweichungsverhalten zu beobachten. Herauszustellen sind vor allem das Sonnenblumenstroh und die Wiesengräser, welche sich hierbei - mit Ausnahme des Erweichungsverhaltens - als besonders nachteilig herausstellen. Bei den Körnern stehen dem Vorteil bei den genannten Inhaltsstoffen ein erhöhter Stickstoffgehalt und das besonders ungünstige Ascheerweichungsverhalten gegenüber.

## 7 Zusammenfassung

Einflüsse auf qualitätsbestimmende Eigenschaften lassen sich generell zwei Phasen der Prozesskette zuordnen, der Wachstumsphase, in der hauptsächlich die chemisch-stofflichen Merkmale ausgeprägt werden, und der Bereitstellungsphase, in der vor allem die physikalischen Eigenschaften ausgebildet werden. In der vorliegenden Arbeit werden lediglich die chemisch-stofflichen Eigenschaften betrachtet, da diese zum großen Teil für das Niveau des Schadstoffausstoßes verantwortlich sind.

Um den Qualitätsbegriff zu definieren, wird zunächst die Bedeutung der einzelnen chemisch-stofflichen Qualitätsparameter (z. B. Asche-, Stickstoff-, Kalium-, Chlor-, Schwermetall- und Wassergehalt, Ascheerweichungsverhalten, etc.) für den Prozess der energetischen Umwandlung dargestellt. Anschließend werden die Ursachen für eine unterschiedlich starke Ausprägung der jeweiligen Qualitätsmerkmale analysiert, wobei die bisher bekannten Arbeiten über mögliche Einflussgrößen zusammengefasst und auf Hinweise über quantitative Wirkungen überprüft werden (Literaturstudie).

Im Rahmen dieser Ursachenidentifikation wird auch nach der Herkunft und den Eintragspfaden für Schadelemente im Brennstoff (vor allem Chlor und Schwermetalle) gefragt. Die quantitative Betrachtung der jeweiligen Stoffströme zeigt, dass die mineralische Düngung mit Abstand als Hauptursache für den Chloreintrag anzusehen ist und dass organische Dünger, Pflanzenschutzmittel oder atmosphärische Depositionen hierbei nahezu vernachlässigbar sind. Auch für Schwermetalle lassen sich entsprechende Schlussfolgerungen über wirkungsvolle Vermeidungsstrategien ableiten.

Den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet jedoch die Analyse von Brennstoffen, die unter verschiedenen Gesichtspunkten aus verschiedenen Versuchsserien gewonnen wurden. Hierbei wurden unterschiedliche Einflüsse betrachtet bzw. gezielt abgestuft:

- Art und Höhe der Kaliumdüngung bei Triticale und Feldgras (in Zusammenarbeit mit dem Institut für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der Universität Hohenheim)
- Erntezeitpunkte bei Triticaleganzpflanzen, Rohrschwengel, Landschaftspflegeheu, Pappeln und Weiden
- Niederschlagsbedingte Auswaschung von Schadelementen nach der Ernte bei Landschaftspflegeheu, Weizenstroh und Weizenganzpflanzen

Beim Verzicht auf chlorhaltige Kaliumdünger zeigen sich bei Triticalestroh nur geringfügige Chlorminderungseffekte in Höhe von 6 bis 21 %. Auch bei Feldgras (hier: Rohrschwengel) ergeben sich kaum Unterschiede, wenn nicht der Erntetermin deutlich vorverlegt wird. Der Schwefelgehalt wird durch eine schwefelhaltige Düngung offenbar nicht beeinflusst. In abgeschwächtem Maße gilt das auch für die Kalium- und Aschegehalte,



die im Kaliumsteigerungsversuch kaum nennenswerte Anstiege verzeichneten. Eine gesteigerte Kaliumdüngung führt auch nicht zu Nachteilen beim Ascheerweichungsverhalten.

Deutlich gesichertere Effekte konnten bei der Wirkung des Erntetermins für Halmgüter festgestellt werden. Bei allen untersuchten Halmgutbrennstoffen führt ein verspäteter Schnitt tendenziell zu Steigerungen der Brennstoffqualität. Am stärksten veränderte sich der Stickstoffgehalt im Stroh, der sich von der Teigreife bis zur Totreife halbierte. Auch bei Kalium und Chlor wurde meist eine Abschwächung beobachtet. Großen Schwankungen unterliegt dagegen der Aschegehalt, für den sich keine klare Tendenz herausbildete, während der Heizwert (wasserfrei) in allen Fällen nahezu konstant blieb.

Im Unterschied zu den Halmgütern kommt es bei 5-jährigen Pappeln und Weiden (als Kurzumtriebsplantagenkulturen) im Laufe der üblichen Erntezeitspanne (November bis April) nicht zu nennenswerten Veränderungen. Erst mit dem Wiederaustrieb zeigen sich kleinere qualitative Effekte. Nachteilig sind vor allem der um ca. 5 Prozentpunkte ansteigende Wassergehalt oder der leicht sinkende Ascheerweichungspunkt, während die Elementgehalte von N und Cl eher sinken. Allerdings erfolgt diese Senkung auf einem insgesamt sehr niedrigem Ausgangsniveau. Finden sich auch die Blätter in der Erntemasse, so ergeben sich bei diesen Elementen und auch beim Kalium kleinere Nachteile. Eine besondere Aufnahmefähigkeit für Cadmium und Zink, die den Kurzumtriebsplantagenkulturen gelegentlich attestiert wird, konnte auch in der vorliegenden Untersuchung festgestellt werden (vor allem für Weiden). Bei den übrigen Schwermetallen liegen die Gehalte dagegen besonders niedrig.

In allen Versuchsreihen mit verlängerter Feldliegezeit wurde eine auswaschende Wirkung von Niederschlägen festgestellt. Übereinstimmend wird der stärkste Rückgang bei den Elementen Kalium und Chlor beobachtet. Beispielsweise reduziert sich der K-Gehalt im Landschaftspflegeheu innerhalb von 17 Tagen nach einer Niederschlagsmenge von 142 mm auf nur noch 26 % des Gehaltes zum Schnittzeitpunkt während der Cl-Gehalt sogar auf nur noch 15 % herabsinkt. Dabei waren allerdings kleinere Regenereignisse direkt nach dem Mähen kaum wirksam. Die Elemente Stickstoff, Kalzium und Magnesium sowie die Schwermetalle werden nicht nennenswert ausgewaschen. Ebenso kommt es beim Schwefel nur zu leichten Gehaltsminderungen. Dagegen ergeben sich deutlich positive Effekte beim Ascheerweichungsverhalten, angezeigt durch steigende Sinterbeginn-, Erweichungs-, Halbkugel- und Fließtemperaturen.

Qualitätssteigernde Maßnahmen sind stets mit Mehrkosten verbunden. In Kostenrechnungen wird gezeigt, dass ein Chlorverzicht in der Düngung unter den üblichen Düngegaben und Ertragserwartungen zu Mehrkosten von 11,- bis 27,- DM je Tonne Trockenmasse führt. Ähnliches gilt für die Verlängerung der Feldverweilzeit, durch die eventuelle Niederschläge abgewartet werden sollen. Hierbei kommt es zu Masseverlusten, die den Brennstoff um ca. 9,- (Stroh) bis 30,- DM/t (Getreideganzpflanzen) verteuern. Vor dem

Hintergrund der relativ niedrigen Erlöse für Halmgutbrennstoffe erscheinen solche Primärmaßnahmen generell nur sinnvoll, wenn die statt dessen erforderlichen Sekundärmaßnahmen bei der energetischen Umwandlung teurer sind. In diesem Fall wäre die unvermeidliche Preissteigerung für die Biomasse vertretbar.

Neben den Untersuchungen zur Bewertung von Einflussgrößen wurden weitere 40 Brennstoffproben von bislang wenig untersuchten Biomassearten gewonnen und analysiert (z. B. Straßengrasschnitt, kommunale Pflegeholzschnitte, Lein-, Ackerbohlen-, Sonnenblumen-, Lupinenstroh, etc.). Diese Ergebnisse dienen der generellen Einordnung und Bewertung solcher bisher wenig untersuchten Brennstoffe.

**Datenbankarbeiten.** Eine Datenbank für naturbelassene biogene Festbrennstoffe wurde errichtet. Hierfür wurde ein relationales Datenbankmodell gewählt. Dessen Struktur wurde so angelegt, dass neben den eigentlichen Messgrößen auch eine Vielzahl weiterer Eigenschaften und Informationen zum Brennstoff sowie seine Herkunftsmerkmale und die verwendeten Analyseverfahren festgehalten werden konnten. Die in den eigenen Versuchsserien zustande gekommenen Analyseergebnisse wurden durch weitere Daten aus einer umfangreichen Recherche (Befragung) sowie aus Literaturangaben ergänzt, so dass insgesamt ca. 1.238 Datensätze (Stand April 1999) zusammengetragen werden konnten.

Mit dem angesammelten Datenbestand wurde eine Vielzahl von Auswertungen vorgenommen. Hierfür wurden die aus der Datenbank abgefragten Datensätze exportiert und mit Hilfe speziell hierfür entwickelter Auswerteroutinen in einem Tabellenkalkulationsprogramm (Excel) verarbeitet. Nach der Eliminierung von Extremwerten wurden die Mittelwerte, Spannweiten, Häufigkeitsverteilungen und weitere statistische Daten zu jeder Brennstoffart bestimmt. Damit sollten die in der Praxis mengenmäßig wichtigsten Brennstoffe oder Brennstoffarten möglichst zutreffend charakterisiert werden.

Die Ergebnisse zeigen einige generelle Vorteile der verschiedenen Holzbrennstoffe gegenüber den meisten betrachteten Halmgutarten. Diese Vorteile bestehen vor allem in einem durchschnittlich um ca. 9 % höheren Heizwert, dem um ca. 3 bis 5 Prozentpunkte niedrigeren Aschegehalt und in einem durchweg günstigeren Ascheerweichungsverhalten, abzulesen an den hohen Temperaturen des Sinterbeginns und des Erweichungs-, Halbkugel- und Fließpunktes.

Beim Stickstoff-, Chlor- und Kaliumgehalt setzt sich die günstige Beurteilung der Holzbrennstoffe gegenüber den Halmgütern fort. Letztere liegen beispielsweise beim Chlorgehalt um den Faktor 10 bis 30 über den Holzbrennstoffen. Zusammenhänge mit der Düngungspraxis sind hier offenkundig.

Ein anderes Bild ergibt sich bei den Schwermetallgehalten. Hier sind die annuellen Kulturen aufgrund der geringeren Akkumulationsdauer im Vorteil. Vor allem die Nadelholz-

rinde nimmt bei den meisten Schwermetallgehalten eine Spitzenstellung ein (bei Arsen, Cadmium, Cobalt, Eisen, Quecksilber, Mangan, Molybdän, Nickel und Zink). Bei den übrigen Holzbrennstoffen muss zwischen den Kurzumtriebsplantagenkulturen und den langjährig wachsenden Waldhölzern differenziert werden. Letztere weisen fast durchweg - meist um ein Vielfaches - höhere Schwermetallgehalte auf, als Kurzumtriebsplantagenholz (Pappeln und Weiden), die auch gegenüber den Halmgütern keine Nachteile erkennen lassen, sondern im Gegenteil, bei Nickel, Chrom und vor allem Quecksilber, Blei und Molybdän die niedrigsten Konzentrationen aufweisen.

Neben der generellen Einordnung der Biomassearten wurde das zusammengetragene Datenmaterial auch zur Überprüfung verschiedener Zusammenhänge verwendet. Beispielsweise wird die quantitative Wirkung des Aschegehaltes auf den Heizwert von Holz und Halmgut durch Regressionsbeziehungen beschrieben. Die Differenzen beim Heizwert lassen sich aber auch aus den Unterschieden beim Kohlenstoffgehalt ableiten. Dieser geht - zusammen mit dem Wasserstoff- und dem Sauerstoffgehalt - in die jeweiligen Schätzformeln zur Heizwertberechnung mit ein. In einem Vergleich dieser verschiedenen aus der Literatur bekannten Schätzformeln wurde die für Biomasse am besten geeignete Formel identifiziert. Auch ein Einfluß der Brennstoffinhaltsstoffe Kalium, Kalzium und Magnesium auf das Ascheerweichungsverhalten wird durch eine multivariable Regressionsanalyse nachgewiesen und quantifiziert. Anhand der gefundenen Regressionsgleichungen zeigt sich, dass der Kalium- und Magnesiumgehalt vermindernd auf die Sinterbeginn-, Erweichungs- und Fließtemperatur wirken, während die Kalziumkonzentration hierbei eine Gegenspielerfunktion einnimmt.

## 8 Summary

Biofuel quality criteria basically belong to either of two groups, the *chemical and compository characteristics* and the *physical characteristics*. The first group includes criteria such as the concentration of certain elements (mainly Cl, N, S, K and heavy metals), the ash and water content as well as the calorific value and the ash melting behaviour. The physical characteristics listed in the second group primarily describe the visually detectable parameters and the type of processing which the biomass has undergone. The here presented research focuses on the chemical and compository characteristics only, as they are largely responsible for pollutant emissions.

In order to define the term "biofuel quality", the significance of the individual parameters for the energetic transformation is discussed, followed by an analysis of the possible reasons for quality variations (literature study). In this context the origin and the routes of polluting elements into the fuel (here mainly chlorine and heavy metals) were also researched. In a quantitative evaluation, mineral fertilisation was clearly identified being the by far most important reason for chlorine uptakes, while organic fertilisers, pesticides or atmospheric depositions can mostly be neglected.

The focus of the research, however, lies in the analysis of biofuels which were collected under certain aspects from different field trials. Several influences were regarded:

- the kind and level of potassium fertilisation (in collaboration with the University of Hohenheim)
- the date of harvesting, tested for triticale (whole plants), festuca grass, set aside hay, and short rotation forestry (poplar and willow)
- the rainfall induced leaching of pollutants from the fuel after cutting, tested for set aside hay, wheat straw and grain (whole plants).

By the use of a chlorine free potassium fertiliser, Cl-reductions of only 6 to 21 % were detected in triticale straw, compared to a conventional fertilisation which applied 181 kg chlorine per hectare (200 kg K/ha, applied as KCl). A similar conclusion can also be drawn for festuca-grass. Additionally, the sulphur content in the fuel is obviously not affected by the use of any sulphur containing fertilisers. A stepwise increase of the total potassium application (0, 100 and 200 kg/ha) had no significant effect on the potassium or ash content in the crop. The potassium fertilisation also remained without any effect on the ash melting behaviour.

However, clearly detectable fuel quality effects were found for changes of the harvesting date of herbaceous crops. Here the nitrogen content in triticale straw is subject to the strongest changes; it is reduced by about 50 % within the last four weeks prior to the

conventional harvesting date. Reductions were also found for the potassium and chlorine concentrations, while for the relatively variable ash content no clear tendency could be recorded. The calorific value remains largely constant.

Unlike the herbaceous field crops, short rotation forestry cultures (5 year old poplar and willow) show little quality variations within the regular harvesting period. However, larger disadvantages are observed in spring and summer. This, for example, applies for the water content (+ 5 %points) and for the ash melting behaviour (-100 to -150 °C). For the concentration of critical elements, such as K and N, an enrichment can only be observed when harvesting is done in summer and leaves are considered as harvested mass. The particular uptake affinity for cadmium and zinc, which has sometimes been reported for short rotation forestry crops, can be confirmed, too (mainly for willow). However, other heavy metal concentrations are conspicuously low.

Leaching effects by natural rainfall were investigated in field trials, where the crop was spread out and left on the field after cutting. It was found that potassium and particularly chlorine are highly mobile and they are therefore depleted rapidly. In set aside hay, for example, the Cl- and K-concentration following a total of 142 mm rainfall during 17 days after cutting was reduced to a final level of only 26 and 15 %, respectively. The depletion already begins prior to the actual cutting date. This can be explained by a progressive dying-off of the crop, as indicated by an increase of the dry matter content (8 to 13 percent-points until cutting date). With the increase of the growing or retention time the texture of the died-off crop becomes more and more porous, thus allowing any precipitation to drain away the soluble elements into the ground.

Nevertheless, other elements such as nitrogen and sulphur are largely unaffected by leaching effects. This also applies for magnesium and calcium. Smaller and shorter rainfall events are believed to be less effective than longer rainy periods, due to the interception rate of the exposed crop. Just as little leaching effects were observed for the total ash content.

Ash content variations usually affect the calorific value, but effects were hardly measurable and here the results for this parameter largely remained constant throughout all field leaching trials. This, however, does not apply for the ash softening behaviour, which was generally improved by an increased field retention time, which is indicated by the significant increases of the sinterification-, softening-, hemisphere- and melting temperatures. Comparable results were also achieved in parallel conducted field trials with wheat straw.

Specific measures for an increased fuel quality are always associated with additional costs. When regarding the chlorine content, for example, the use of a chlorine free K-fertiliser roughly doubles the K-fertilising costs, if no beneficial use of the accompanying sulphur is calculated here. In a performed model calculation these cost increases amount to the range of 9 to 14 Euro/t. Higher costs are also unavoidable when agricul-

tural practices aim at a field leaching of Cl or K. The subsequent dry matter losses increase fuel production costs in the order of 4 to 15 Euro/t.

**Database activities.** A structure for an SQL-database was designed, which allows to record a large range of information on each regarded fuel sample. Along with the actual analyses results, many additional characteristics can be regarded, in order to gain a precise specification of the respective biomass type and origin, the analysis method and the data source, including also the geographical location, special treatments and other criteria (Figure 48). An initial series of 1,238 data sets were entered until April 1999. This data were either generated during research projects or they were found in other primary sources from Germany and Austria. Additionally, the data base was broadened by a questioning among 200 relevant institutions or companies. From these sources the most reliable data were selected and applied.

A series of database queries were conducted for different fuel types and species, using specifically designed evaluation routines in a spreadsheet calculation programme (Excel). When the number of data in a data set were higher than 10, outliers were eliminated by a cutting-off of the extreme upper and the lower 10 percent of the data range. Thus, the gained results should better describe the situation as to be expected in practice. All results are compiled in Appendix C. This interpretation reveals the general advantages of wood fuels compared with herbaceous crops. These advantages are mainly the higher calorific value (+9 %), the lower ash content (3 to 5 percent-points) and the consistently favourable ash melting behaviour, as to be read from the temperatures of sinterification-, softening-, hemisphere- and flow point of the ash. Furthermore, the nitrogen, chlorine and potassium content allow a positive judgement as well. Particularly the Cl-concentrations are 10 to 30 times lower than in herbaceous fuels. Correlations to the fertilisation practice are obvious.

A different conclusion is drawn, when heavy metals are considered. Here, the annual crops are favourable due to the shorter time for pollutant accumulations. Particularly wood bark (from coniferous trees) holds a peak position (for arsenic, cadmium, cobalt, iron, mercury, manganese, molybdenum, nickel and zinc). For all other wood fuels a differentiation between short rotation forestry (SRF) and conventional forest wood has to be made. The latter almost constantly shows - sometimes drastically - higher heavy metal concentrations than SRF-wood, which is not on a higher level than herbaceous fuels. On the contrary, for nickel, chromium and particularly mercury, lead and molybdenum the concentrations in SRF-wood are lowest.

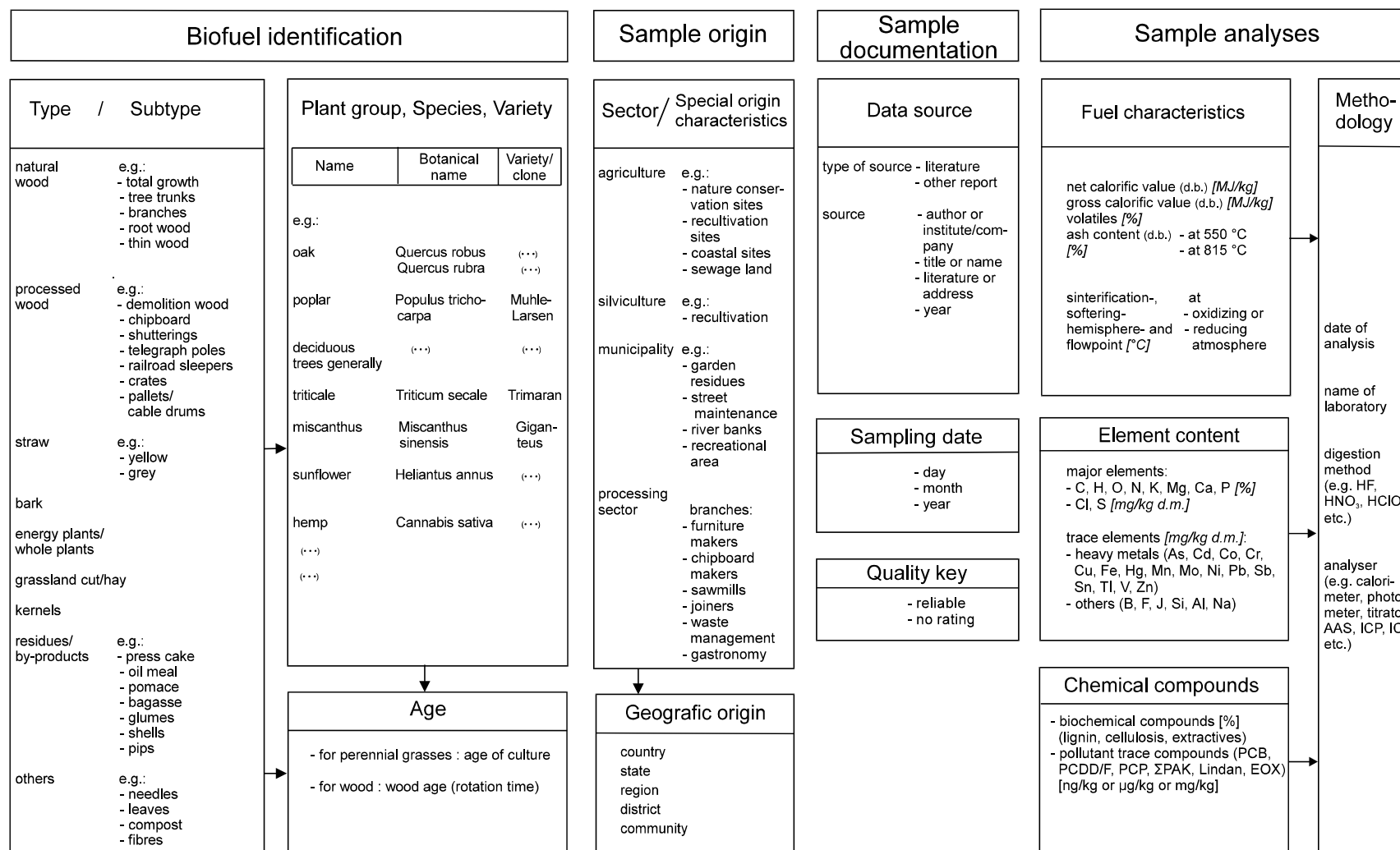


Figure 48 e981N024.cdr Structure of NAWARO-database for solid biofuel characteristics (simplified)

Apart from the general characterisation of biofuel types, the collected data were also applied for the testing of certain correlations. For example, the quantitative effect of the ash content on the calorific value of wood and herbaceous fuels are described by regressions. The variation of the calorific value can also be explained by the different carbon concentrations. Together with hydrogen, oxygen and nitrogen, the carbon content is strongly influencing the calorific value, as indicated by the different estimation formulas from literature. These formulas were screened using the database results in order to identify the best suitable correlation for biomass. Additionally, the impact of the potassium, calcium and magnesium on the ash melting behaviour was evaluated by a multiple regression analysis. The found mathematical functions show, that both, potassium and magnesium lower the temperatures for sinterification-, softening-, hemisphere- and flow point, while calcium acts as an antagonist.



## 9 Quellenverzeichnis

- [1] Addink, R.; K. Olie (1995): Mechanisms of Formation and Destruction of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in Heterogeneous Systems. - In: Environmental Science & Technology, Nr. 6, S. 1425-1435.
- [2] Agst, J. (1982): Die Brennstoffe - Informations- und Studienmappe, Gesamthochschule Duisburg (Hrsg.), Selbstverlag, 227 S.
- [3] Amberger, A. (1983): Pflanzenernährung. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 250 S.
- [4] Bakker, R.; Jenkins, B.M. (1996): Feasibility of Fuel Leaching to Reduce Ash Fouling in Biomass Combustion Systems. In: Biomass for Energy and the Environment, Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Bioenergy in Copenhagen, June 1996. Elsevier Science Ltd., Oxford, England, pp. 980-985.
- [5] Ballschmiter, K.H.; Bacher, R. (1996): Dioxine - Chemie, Analytik, Vorkommen, Umweltverhalten und Toxikologie der halogenierten Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane. VHC-Verlag, Weinheim, 507 S.
- [6] Banthien, P. (1970): Versuche mit verschiedenen neuen Halmfutter-Aufbereitungsmaschinen in der Bodenheutrocknung. KTBL-Berichte über Landtechnik 136, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (Hrsg.), Hellmut-Neureuter-Verlag, Wolfratshausen, 182 S.
- [7] Beckhoff, J. (1965): Trocknungsverlauf, Masse und Nährstoffverluste bei verschiedenen Heuwerbeverfahren. Forschungsstelle für Grünland und Futterbau Kleve-Kellen, Reihe C 10. Zitiert bei: Banthien, P. (1970) (vgl. [6]).
- [8] BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz. Feldhaus, G. und Hansel, H.D. (Bearb.), C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 11. Auflage, 1997, 646 S.
- [9] BioAbfV, Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Stand: 21. September 1998. BGBl. I 1998 S. 2955.
- [10] Biskupek, B.; Patyk, A.; Radtke, J. (1997): Daten zur Pflanzenproduktion. In: Kaltschmitt, M. und Reinhardt, G.A. (Hrsg.): Nachwachsende Energieträger. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, S.167-225.
- [11] Bludau, D.A.; Turowski, P. (1992): Verfahrensrelevante Untersuchungen zu Bereitstellung und Nutzung jährlich erntbarer Biomasse als Festbrennstoff unter besonderer Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und umweltbezogener Aspekte. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Selbstverlag, München, Reihe „Gelbes Heft“ (44), 160 S.
- [12] Boysen, P. (1992): Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln. Umweltbundesamt (Hrsg.), Selbstverlag, Berlin, 54 S.
- [13] Borregaard Deutschland GmbH, Ligno Tec Werk Karlsruhe, Schriftliche Mitteilung.
- [14] Brodersen, K. (1990): Anorganische Nebenbestandteile mit potentieller toxischer Wirkung in mineralischen und organischen Düngemitteln. Diplomarbeit, Fachbereich Pflanzenernährung der CAU Kiel. Zitiert bei: Boysen, P. (vgl. [12]).
- [15] Brusche, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, KTBL (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, KTBL-Schrift 290, 96 S.
- [16] Bundesgesetzblatt (1992): Klärschlammverordnung (AbfKlärV). Bundesgesetzblatt, Teil I, Z 5702 A, Nr. 21, 28.4.1992, Bonn, S. 912-934.
- [17] Bundesgesetzblatt (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Bundesgesetzblatt 1999, Teil I, Nr. 36 (16.7.1999).

- [18] BUWAL (1991): Schwermetalle und Fluor in Mineraldüngern. Schweizerisches Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Schriftenreihe Umwelt, Nr. 162, Selbstverlag Bern, 44 S.
- [19] Candinas, T., Siegenthaler, A. (1992): Grundlagen der Düngung - Klärschlamm und Kompost in der Landwirtschaft. Schriftenreihe der FAC Liebefeld, Nr. 9, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (Hrsg.), Selbstverlag, 141 S.
- [20] Ciria, M.P.; Gonzalez, E.; Mazon, P.; Carrasco, J. (1996): Influence of the Rotation Age and Plant Density on the Composition and Quality of Poplar Biomass. In: Biomass for Energy and the Environment, Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Bioenergy in Copenhagen, June 1996. Elsevier Science Ltd., Oxford, England, pp. 968-973.
- [21] Clemens et al. (1996): Auswertung und Beschreibung des Energiegetreide-Anbauversuchs im Betrieb Franz Schaub. Bericht der Lehr- und Versuchsanstalt Emmenhausen-Borler zum Versuchsjahr 1994/95. Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz (Hrsg.), Selbstverlag, 27 S.
- [22] Diez, T.; Krauss, M.; Wurzinger, A. (1991): Schwermetall- und Nährstoffgehalte von Klärschlämmen bayerischer Kläranlagen, Landwirtschaftliches Jahrbuch 68. Zitiert bei: Wintzer et al. (vgl. [99]).
- [23] Driessen, J.J.M.; Westhoek, E. (1997): Schwermetalle in Düngemitteln. In: VDLUFA-Kongress in Leipzig 1997, Stoff- und Energiebilanzen in der Landwirtschaft, VDLUFA-Verlag, Darmstadt, 320 S.
- [24] DIN 51731 (1996): Prüfung fester Brennstoffe - Preßlinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 3 S.
- [25] DIN 51719 (1978): Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 4 S.
- [26] DIN 51730 (1984): Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 6 S.
- [27] DIN 51718 (1995): Feste Brennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 3 S.
- [28] DIN 51720 (1978): Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an Flüchtigen Bestandteilen. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 5 S.
- [29] DIN 51900, Teil 3 (1977): Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe: Bestimmung des Brennwertes mit dem Bombenkalorimeter und Berechnung des Heizwertes. Verfahren mit adiabatischem Mantel. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 5 S.
- [30] Finck, A. (1991): Düngung. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 174 S.
- [31] Frieß, H.; Huber, S. (1997): Emissionen und Aschequalität bayerischer Biomassefeuerungen. In: Sechstes Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik am 19.-20. Nov. 97. OTTI-Technologie Kolleg, Regensburg, Selbstverlag, S. 103-120.
- [32] Frieß, H. (1999): Aschequalität von Biomasse-Heizwerken - Ausbringung in der Land- und Forstwirtschaft. In Tagungsband zur 2. Euroforum Fachtagung , "Biomasse Energieträger für die Zukunft", 19.-20.4.1999 in München.
- [33] Gislerud, O. (ohne Datum): Storage and Treatment of Wood Fuel. Norwegian Forest Research Institute, Ås-NLH, Norwegen.
- [34] Goel, V.L.; Behl, H.M. (1996): Fuelwood Quality of Promising Tree Species for Alkaline Soil Sites in Relation to Tree Age. Biomass and Bioenergy, 10 (1); pp. 57-61.
- [35] Griffin, R.D. (1986): A New Theory of Dioxin Formation in Municipal Solid Waste Combustion. - In: Chemosphere, Nr. 9-12, pp. 1987-1990
- [36] Gronauer, A.; Claassen, N.; Ebertseder, T.; Fischer, P.; Gutser, R.; Helm, M.; Popp, L.; Schön, H. (1997): Bioabfallkompostierung - Verfahren und Verwertung. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), München, Selbstverlag, Schriftenreihe Heft 139, 375 S.

- [37] Hagenmaier, H.; Beising, R. (1989): Untersuchung von Kraftwerksrauchgasen auf polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane. - In: Kraftwerk und Umwelt, S. 34-37
- [38] Hartmann, H. (1996): Analyse und Bewertung der Systeme zur Hochdruckverdichtung von Halmgut. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Selbstverlag, München, Reihe "Gelbes Heft" Nr. 60, 63 S.
- [39] Hartmann, H. (1997): Brennstoffmerkmale und Möglichkeiten zur Qualitätsbeeinflussung. In: "Thermische Biomassenutzung - Technik und Realisierung". Internationale Tagung der VDI-Gesellschaft Energietechnik (GET) am 23.-24. April 1997 in Salzburg, VDI-Berichte 1319, Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 31-46.
- [40] Huber, S.; Friess, H. (1998): Emissions of Biomass Combustion Plants. In: "Biomass for Energy and Industry", Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference and Technology Exhibition, 8-11 June 1998 in Würzburg, Published by C.A.R.M.E.N in Würzburg-Rimpar, Germany, pp. 1405-1408.
- [41] Höhn, E. (1988): Abtrocknung und Ernteverlust von kräuterreichen Wiesen. Schweizer Landwirtschaftliche Forschung, 27 (2), S. 181-189.
- [42] Höhn, E. (1989): Feldverluste bei der Futterernte - Schicksal oder Nachlässigkeit. Landwirtschaft Schweiz, 2 (5), S. 281-283.
- [43] Jirjis, R. (1996): Storage and Drying of Biomass - New Concepts. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Biomass Summer School, 29 July-2 Aug. 1996, Institut für Verfahrenstechnik der TU-Graz (Hrsg.), Selbstverlag TU-Graz
- [44] Jørgensen, U. (1996): Miscanthus Yields in Denmark. In: Biomass for Energy and the Environment, Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Bioenergy in Copenhagen, June 1996, Elsevier Science Ltd., Oxford, England, pp. 48-53.
- [45] Jug, A.; Rehfuess, K.E.; Makeschin, F. (1997): Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für die Erzeugung von Biomasse mit schnellwachsenden Baumarten - Verbundprojekt Abbachhof, Canstein und Oldenburg - Teilprojekt: Ernährungs- und Standortkundliche Untersuchungen. Schlußbericht des Lehrstuhls für Bodenkunde und Standortlehre der Ludwig-Maximilians-Universität München für das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Modellvorhaben 93NR 035-M-A. Selbstverlag, Freising-Weihenstephan, 232 S.
- [46] Kasper, B. (1997): Stoffwandlungen und Logistik pflanzenbürtiger Festbrennstoffe in einer umweltgerechten Landnutzungsalternative für den Spreewald. Dissertation an der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Selbstverlag, 164 S.
- [47] Klinner, W.E.; G. Shepperson (1975): The state of haymaking technology - A review. Grass and Forage Science, 30, pp. 259-266.
- [48] Kloke, A. (1985): Zufuhr von Schwermetallen zum Boden mit Pflanzenschutzmitteln. Berichte über Landwirtschaft, 198. Sonderheft Pflanzenschutzmittel und Boden, Verlag Paul Parey, Hamburg, S. 117-122.
- [49] Knudsen, N.O.; Jensen, P.A.; Sander, B.; Dam-Johansen, K. (1998): Possibilities and Evaluation of Straw Pretreatment. In: "Biomass for Energy and Industry", Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference and Technology Exhibition, 8-11 June 1998 in Würzburg, Published by C.A.R.M.E.N in Würzburg-Rimpar, Germany, pp. 224-228.
- [50] Könemann, R. (1994): Vermarktung von Kompost in der Landwirtschaft. In: Bodenökologische Arbeitsgemeinschaft Bremen e. V. (Hrsg.): Tagungsband Bodenschutz und Kompost, Jan 1994, Bremen, S. 22-43. Zitiert bei: Wilcke, W.; Döhler, H. (vgl. [98]).
- [51] Kollmann, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Band 1: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. Springer Verlag, Berlin, 1050 S.
- [52] Launhardt, T.; Hurm, R.; Schmid, V.; Link, H. (1998): Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen. Endbericht der Landtechnik Weihenstephan für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStMLU) (Hrsg.), Selbstverlag, München, Reihe "Materialien", Nr. 142, 149 S.

- [53] LBP (1997): Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen (BDF). Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil II, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (Hrsg.), 5/97, Selbstverlag, Freising, 190 S.
- [54] Lewandowski, I. (1996): Einflußmöglichkeiten der Pflanzenproduktion auf die Brennstoffeigenschaften am Beispiel von Gräsern. In: "Eigenschaften fester Bioenergieträger" - Internationale Tagung in Stuttgart im Mai 1996. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" (6), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S. 32-48.
- [55] LfU (1997). Datenauswertungen des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU), München, Schriftliche Mitteilung.
- [56] Lüneburg, E. von (1996): Schriftliche Mitteilung zum Strohliefervertrag der Erzeugergemeinschaft Schköleener Biobrennstoffe w.V.
- [57] Marutzky, R. (1993): Moderne Holzfeuerungsanlagen. Centrale Marketinggesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft mbH (CMA) (Hrsg.), Selbstverlag, Bonn, 73 S.
- [58] Marutzky, R.; Keserü, G. (1981/1982): Herstellung von Spanplatten aus gelagerten Hack-schnitzeln. Sonderdruck aus Holz-Zentralblatt, Bd. 107 (Nr. 107 und 115) und Bd. 108 (Nr. 7 und 20); S.1623-1625; 1779-1780; 81-82; 275-276.
- [59] Mattsson, J.E. (1990): Basic Handling Characteristics of Wood Fuel: Angle of Repose, Friction Against Surfaces and Tendency to Bridge Building for Different Assortments. Scand. J. For. Res. (5); pp. 583-597.
- [60] Mengel, K. (1984): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 6. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 431 S.
- [61] Mohr, H. (1994): Stickstoffeintrag als Ursache neuartiger Waldschäden. Spektrum der Wissenschaft (1), S. 48-53.
- [62] Munk (1990): Persönliche Mitteilung. Versuchsanstalt Kamperhof, Mülheim. Zitiert bei: Boysen, P. (vgl. [12]).
- [63] National Renewable Energy Laboratory, USA (1996): Alkali Deposits Found in Biomass Power Plants. Zitiert bei Obernberger, I. [67].
- [64] Naumann, C.; R. Bassler (1976): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln - Methodenbuch, Band III. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (Hrsg.), VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- [65] Netz, H. (1982): Verbrennung und Gasgewinnung bei Festbrennstoffen. Technischer Verlag Resch, München, 195 S.
- [66] Obernberger, I. (1996): Erforderliche Brennstoffeigenschaften holz- und halmgutartiger Biomasse für den Einsatz in Großanlagen (1 bis 20 MW<sub>th</sub>). In: Eigenschaften fester Bioenergieträger - Internationale Tagung in Stuttgart, Mai 1996. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" (6), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S. 122-154.
- [67] Obernberger, I. (1997): Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente - Habilitation am Institut für Verfahrenstechnik der TU-Graz. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung (1). dbv-Verlag, Graz, 349 S.
- [68] Opitz von Boberfeld, W.; Nösberger, J. (1986): Grundfutterproduktion. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 124 S.
- [69] Petr, J.; Cerny, V.; Hruska, L. (1983): Ertragsbildung bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 224 S.
- [70] Pretzsch H. (1995): Growth Trends of Forests in Germany. International Union of Forestry Research Organisations (IUFRO), Chair of Forest Yield Science, University of Munich, Selbstverlag, Freising, 23 S.
- [71] Reiß, J. (1986): Schimmelpilze - Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. Springer-Verlag, Berlin.

- [72] Reisinger, K. (1993): Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens verschiedener Biomassearten und Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf eine sinnvolle thermische Nutzung. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Verfahrenstechnik, Brennstofftechnik und Umwelttechnik der Technischen Universität Wien, 98 S.
- [73] Rieß, P. (1992): Schriftliche Mitteilung. LUFA, Bonn. Zitiert bei: Wilcke, W. und Döhler, H. (vgl. [98]).
- [74] Ruckenbauer, P.; Reichardt, A. (1996): Einfluß des Standortes und pflanzenbauliche Maßnahmen auf die Brennstoffeigenschaften von Getreidepflanzen. In: "Eigenschaften fester Bioenergieträger" - Internat. Tagung in Stuttgart, Mai 1996, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" (6), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S. 49-61.
- [75] Sander, B. (1996): Fuel Data for Danish Biofuels and Improvement of the Quality of Straw and Whole Crops. In: Biomass for Energy and the Environment (Vol. 3). Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Bioenergy in Copenhagen, June 1996, Elsevier Science Ltd., Oxford, England, pp 490-495.
- [76] Sander, B. (1997): Biofuel Properties and Combustion Experiences. Background paper in: Nieslen, C.: Co-Combustion of Coal and Biomass - Technological Approach, Experiences and Problems. 2<sup>nd</sup> Biomass Summer School organized by Graz University of Technology. Elsam Production (eds), DK-7000 Fredericia, Denmark, pp. 4.1-4.25.
- [77] Sander, B. (1997): Properties of Danish Biofuels and the Requirements for Power Production. Elsevier Science Ltd., Oxford, England, Biomass and Bioenergy Vol.12, No 3, pp. 177-183.
- [78] Sander, M.-L.; Ericsson, T. (1998): Vertical Distributions of Plant Nutrients and Heavy Metals in *Salix Viminalis* Stems and their Implications for Sampling. Biomass and Bioenergy, 14 (1), S. 57-66.
- [79] Sauerbeck, D. (1986): Schadstoffeinträge in den Boden durch Industrie, Besiedlung, Verkehr und Landbewirtschaftung (anorganische Stoffe). VDLUFA-Schriftenreihe 16 (Kongreßband 1985), S. 59-72. Zitiert bei: Wilcke, W. und H. Döhler (vgl. [98]).
- [80] Savoie, P. (1988): Hay tedding losses. Canadian Agricultural Engineering, 30, pp. 39-42.
- [81] Schachtschabel, P.; Blume, H.-P.; Hartge, K.-H.; Schwertmann, U. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde. 11. Aufl., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 442 S.
- [82] Scheffer, K. (1996): Bereitstellung und energetische Nutzung von Biomasse nach dem Konzept der Feuchtgutlinie. In: "Tagungsband Umsichttage '96", Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik e.V. (Hrsg.), Oberhausen, S. 171-176.
- [83] Schwarz, H. (1993): Untersuchungen zu einer bedarfsgerechten Nährstoffversorgung und Optimierung weiter steuerbarer Produktionsfaktoren bei *Miscanthus Sinensis* 'Giganteus'. Dissertation, Universität Wien.
- [84] Severin, K.; Köster, W.; Matter Y. (1991): Zufuhr von anorganischen Schadstoffen in Agrarökosysteme mit mineralischen Düngemitteln, Wirtschaftsdüngern, Klärschlämmen und Komposten. VDLUFA-Schriftenreihe 32 (Kongreßband 1990), S. 387-391. Zitiert bei: Wilcke, W. und Döhler, H. (vgl. [98]).
- [85] Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (1994): Düngemittelversorgung - Wirtschaftsjahr 1993/94. Produzierendes Gewerbe. Zitiert bei: Patyk, A. und Reinhardt, G.A. (1997): Düngemittel - Energie- und Stoffstrombilanzen, Vieweg-Verlags-GmbH, Braunschweig, 223 S.
- [86] Stemman, P. (1996): persönliche Mitteilung der Semundo Saatzucht GmbH, Rellingen.
- [87] Steenari, B.-M.; Lindqvist, O. (1998): High-Temperature Reactions of Straw Ash and the Anti-Sintering Additives Kaolin and Dolomite. Biomass and Bioenergy, 14 (1), pp 67-76.
- [88] Sundberg, M.; Thylen, A. (1994): Leaching Losses due to Rain in Macerated and Conditioned Forage. J. agric. Engng Res., 58; S. 133-143.
- [89] Tabasaran, O.; Sihler, A. (1993): Analysenübersicht von Komposten und deren Ausgangsmaterialien unterschiedlicher Herkunft und Standorte. Verbundvorhaben des BMFT „Neue Techniken zur Kompostierung“, Teilvorhaben 5, Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft. Zitiert bei Wintzer et. al (vgl. [99]).

- [90] Thörnqvist, T. (1988): Wood Fuel Storage in Large Piles - Mechanisms and Risks of Self-Ignition. In: Danielsson, B.O. and Gislérud, O.: Proceedings of IEA/BE Conference, task III/activity 6 and 7, "Production, storage and utilization of wood fuels" in Uppsala, Sweden, Dec. 6-7, 1988, pp.193-197.
- [91] Tomlin, C. (Hrsg.) (1987): The Pesticide Manual: A World Compendium. British Crop Protection Council (Selbstverlag), Thornton Heath, UK, 1080 p.
- [92] UBA (1997): Schriftliche Mitteilung vom 5.12.1997, Umweltbundesamt, Berlin
- [93] UBA (1998): Umweltdaten Deutschland 1998, Umwelt und Landwirtschaft: Düngemittelverbrauch. Umweltbundesamt (UBA), Berlin, Selbstverlag.
- [94] VEBA-OEL (1995): Projekt Miscanthus - Ein integriertes Demonstrationsprojekt zur Erzeugung, energetischen und stofflichen Nutzung von *Miscanthus sinensis Giganteus*. Forschungsvorhaben 0310024A, Laufzeit 1989-1994, unveröffentlichter Abschlußbericht der VEBA-OEL AG, Gelsenkirchen.
- [95] Vetter, A. (1995): Untersuchungen zum Einfluß der Brennstoffart und -qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung am Strohheizwerk Schkölen zur Sicherung der Umweltverträglichkeit. Abschlußbericht 12/1995, Selbstverlag, Jena, 113 S.
- [96] Vetter, A.; Reinhold, G.; Pilz, M.; Wieser, P. (1996): Einfluß von Brennstoffart und -qualität auf den Anlagebetrieb, die Emissionen und Reststoffe in Bioheizwerken - Teil I: Verwertung der Biomasse von extensiven Grünlandflächen. In: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Jena, Selbstverlag, 70 S.
- [97] Wieck-Hansen, K. (1996): Parameters Influencing Straw Quality Important for Burning in Boilers. In: "Eigenschaften fester Bioenergieträger" - Internationale Tagung in Stuttgart im Mai 1996, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" (6), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S. 75-88.
- [98] Wilcke, W.; Döhler, H. (1995): Schwermetalle in der Landwirtschaft. KTBL-Arbeitspapier 217, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 98 S.
- [99] Wintzer, D.; Leible, L.; Rösch, Ch.; Bräutigam, R.; Fürniß, B.; Sardemann, G. (1996): Wege zur umweltverträglichen Verwertung organischer Abfälle. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 97, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 373 S.
- [100] Zimmerling (1998): Institut für Agrarökologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig, Schriftliche Mitteilung vom 29. Sept. 98 über Depositionsmessung im Wald und Freiland.
- [101] Zschetzsche, A.; Hantsch-Linhart, W.; Schmidt, A. (1993): Analyse von festen Brennstoffen. Bericht für das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung (Hrsg.), Wien/Österreich, Selbstverlag, 44 S.

**Anhang A** - Schadstoffe in Dünge- und Pflanzenschutzmitteln und Depositionen**Tab. 31** Fluorgehalte in Düngemitteln [18] und Berechnung der nährstoffbezogenen Elementgehalte

Gruppen	Düngemittel	n <sup>1)</sup>	mittl. F-Gehalt [mg/kg TS]	Gehalte [mg/kg TS]		Nährstoffgehalte <sup>2)</sup> N, P, bzw. K (%)	mittl. F-Gehalte pro Nährelement (mg/kg TS)
				Min.	Max.		
N-Dünger	Ammonsalpeter	5	136	19	142	26	523,1
	Harnstoff	4	4,8	<4	5,6	46	10,4
	Ammonsulfat	3	18	6	50	21	85,7
	Kalkstickstoff	2	1.530	1.500	1.560	20	7.650
	Kalksalpeter	1	2.080			16	13.000
	<i>N-Dünger insgesamt</i>		15	50	<4	2.080	
P-Dünger	Triplephosphat	3	17.000	12.400	18.400	19,80	85.859
	Thomasphosphat	11	250	124	1.760	6,60	3788
	Superphosphat	3	17.000	16.800	19.200	7,92	214.646
	Rohphosphat	5	25.000	1.900	36.500	13,20	189.394
	<i>P-Dünger insgesamt</i>		22	1.830	124	36.500	
K-Dünger	Kaliumchlorid	10	7,0	<4	56		
	Kaliumsulfat	3	10	4	76	41,50	24,1
	Patentkali	1	20			24,90	80,3
	<i>K-Dünger insgesamt</i>		14	9	<4	76	
Kalkdünger		3	1.140	44	3.400		
Diammonphosphat (DAP)		5	19.200	7.990	21.000		
anorgan. Mehrnährstoffdünger	P-Form unbestimmt	10	6.250	403	14.600		
	P als Rohphosphat	4	21.000	14.600	24.200		
	P als Superphosphat	10	6.700	2.040	17.000		
	P als Thomasphosphat	7	900	332	15.200		
	<i>insgesamt</i>		31	5.790	332	24.200	
organ. Mehrnährstoffdünger		10	1.560	250	3.800		

1) n = Probenumfang

2) Quelle: FINCK [30]

**Tab. 32** Schwermetallgehalte in Düngemitteln in mg/kg TS. Zusammenstellung nach den unten angegebenen Quellen

Düngemittel	Quelle	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
<i>N-Dünger</i>								
Kalkammonsalpeter	i	0,38	3,95	7,07	2,65	38,18	64,03	
	a	0,24	17,03	2,90	6,80	11,03	46,0	0,010
Ammonsalpeter	c	<0,05	4,00	7,00	13,00	1,90	50,0	0,023
Ammonnitrat-Harnstoff-Lösung	i	0,03	1,33	6,33	0,30	0,20	2,3	
Harnstoff	i	0,10	1,16	0,56	0,76	0,52	4,0	
	a	<0,10	<1,00	0,8	<1,00	<1,00	0,8	0,010
	h	0,20	0,20	0,2	0,20	0,20	0,8	
	c	<0,05	<2,00	6,0	2,00	1,10	44,0	0,010
Ammonsulfat	a	<0,10	4,00	2,5	5,00	<1,00	2,1	
	c	<0,05	<2,00	4,0	1,80	1,10	30,0	<0,010
Kalkstickstoff	a	<0,10	9,10	7,8	15,80	<1,00	5,9	
	h	0,10	12,00	11,0	31,00	53,00	19,0	
	c	<0,05	2,00	12,0	18,00	1,10	31,0	0,013
<i>P-Dünger</i>								
Triplephosphat	d	28,00	228	31,0	48,00	5,40	567	0,020
Triplephosphat	i	28,10	256	23,8	34,00	2,10	471	
	a	30,60	300	23,0	31,00	<1,00	448	0,040
	c	52,00	261	45,0	44,00	3,50	299	0,022
Thomasphosphat	f	<0,10	1269	13,0	13,00	13,00	6,0	
	b	0,10	2200	45,0		5,0-16,0	60,0	
	a	<0,10	1759	33,0	31,00	<1,00	67,0	0,010
	c	0,25	1953	40,0	20,00	12,00	68,0	0,013
Superphosphat	a	6,00	181	22,5	14,60	<1,00	138	0,040
	h	13,50	48	12,0	43,00	36,00	333	
	c	10,00	65	23,0	20,00	110,00	162	0,037
Hyperphos	i	16,10	110	14,6	15,00	2,70	267	
teilaufgeschlossenes Rohphosphat	a	7,20	170	15,6	15,60	1,20	195	0,070
weicherdiges Rohphosphat	a	11,40	160	15,9	15,50	1,60	214	0,070
diverse Rohphosphate	b	15,00	100	16,0	15,00	3,00	150	
	a	7,80	168	15,6	15,60	1,30	199	
<i>K-Dünger</i>								
Kaliohsalz	i	0,01	4,00	1,0	2,00	1,00	1,0	
	a	<0,10	17,40	3,7	8,80	<1,00	3,5	0,010
Thomaskali	f	<0,30	928	19,0	3,00	4,00	9,0	
Kaliumchlorid, 40er	i	0,09	2,30	3,8	1,40	0,30	5,3	
60er	a	<0,10	4,20	2,9	1,10	<1,00	2,9	0,060
	c	0,06	<2,00	5,0	2,10	5,50	46	<0,010
Kaliumsulfat	b	0,08	2,80	3,3	0,40	0,70	1,5	
	a	<0,10	7,80	3,5	3,40	<1,00	3,1	
	c	<0,05	<2,00	<2,0	0,80	3,20	32,0	0,010

Fortsetzung nächste Seite



## Fortsetzung von Tab. 32

Düngemittel	Quelle	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
<i>K-Dünger</i>								
Kalirohsalz	i	0,01	4,00	1,0	2,00	1,00	1,0	
	a	<0,10	17,40	3,7	8,80	<1,00	3,5	0,010
Thomaskali	f	<0,30	928	19,0	3,00	4,00	9,0	
Kaliumchlorid, 40er	i	0,09	2,30	3,8	1,40	0,30	5,3	
60er	a	<0,10	4,20	2,9	1,10	<1,00	2,9	0,060
	c	0,06	<2,00	5,0	2,10	5,50	46	<0,010
Kaliumsulfat	b	0,08	2,80	3,3	0,40	0,70	1,5	
	a	<0,10	7,80	3,5	3,40	<1,00	3,1	
	c	<0,05	<2,00	<2,0	0,80	3,20	32,0	0,010
Kalimagnesia (40+6)	i	0,14	2,60	4,6	0,10	0,60	26,4	
(40+6)	a	<0,10	7,90	3,2	3,20	<1,00	5,8	
(40+5)	h	0,10	5,00	3,0	9,00	6,00	20,0	
<i>Mehrnährstoffdünger</i>								
Diammonphosphat (DAP)	c	2,10	58	10,0	14	5,00	50	0,020
	d	6,80	119	24,0	22	2,50	141	<0,020
NP-Dünger	b	10-15	50-150	28,0	15	1,90	152	
	a	11,80	141	22,0	25,4	<1,00	202	0,010
	h	7,00	35	44,0	12	6,00	52,0	
	d	1,30	27	10,0	7,10	6,80	39,0	<0,020
	e	9,60	63	5,2	16	1,30	57,0	
PK-Dünger	b	6,00	260	25,0	20	3,00	200	
	a	2,00	15	17,0	4,90	1,80	107	0,020
NPK-Dünger	b	2,00	15	17,0	4,90	1,80	100	
	a	4,90	55	13,4	10,90	2,10	100	
	h	0,20	26	5,0	11	32,00	176	
<i>Kalkdünger</i>								
Branntkalk	a	<0,10	19,20	11,1	6,00	2,80	15,8	
Carbokalk (30 % CaO)	g	0,50	6,00	20,0	1,00	<5,00	80,0	
Hüttenkalk (40 % CaO)	f	<0,10	68	3,0	<0,90	13,00	7,0	
(49 % CaO)	a	<0,10	33,20	5,4	4,00	<1,00	10,6	
kohlensaurer Kalk	a	0,50	6,90	8,2	4,60	7,30	58,0	
Kalkmergel	e	0,30	10,00	5,0	6,00	6,00	23,0	
KZA (45 % CaO)	g	0,40	35	35,0	40,00	75,00	20,0	
Thomaskalk	f	<0,10	1924	18,0	3,00	9,00	17,0	
<i>Andere Dünger</i>								
Kupferdünger 2,7*	a	14,20	172	27000	1276	1460	28700	0,070
Kupferdünger 5*	a	9,20	374	50000	357	3353	11215	0,200
Magnesiumsulfat	a	<0,10	6,90	3,0	<1,00	<1,00	9,5	

a: BOYSEN, 1992 [12]  
b: BRODERSEN, 1992 [14]  
c: BUWAL, 1991 [18]  
d: DRIESSEN, 1997[23]  
e: KÖNEMANN, 1994 [50]

f: MUNK, 1992[62]  
g: RIEB, 1992 [73]  
h: SAUERBECK, 1986 [79]  
i: SEVERIN et al. 1991 [84]

\*mit Cu und Zn als Spurennährstoff

**Tab. 33** Spezifische Schwermetallgehalte in Düngemitteln, angegeben in mg/kg Reinnährstoff (Berechnungen auf der Grundlage der Angaben und Quellen in Tab. 32, ohne Kalk und Mikronährstoffe)

Düngemittel	Nährstoffgehalt <sup>1)</sup> (%)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
<i>N-Dünger</i>								
Kalkammonsalpeter	27	1,4	14,6	26,2	9,8	141,4	237,1	
	27	0,9	63,1	10,7	25,2	40,9	170,4	<0,037
Ammonsalpeter	26	<0,2	15,4	26,9	50,0	7,3	192,3	0,088
Ammonnitrat-Harnstofflösung (AHL)	28	0,1	4,8	22,6	1,1	0,7	8,2	
Harnstoff	46	0,2	2,5	1,2	1,7	1,1	8,7	
	46	<0,2	<2,2	1,7	<2,2	<2,2	1,7	<0,022
	46	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	1,7	
	46	<0,1	<4,3	13,0	4,3	2,4	95,7	0,022
Ammonsulfat	21	<0,5	19,0	11,9	23,8	<4,8	10,0	
	21	<0,2	<9,5	19,0	8,6	5,2	142,9	<0,048
Kalkstickstoff	20	<0,5	45,5	39,0	79,0	<5,0	29,5	
	20	0,5	60,0	55,0	155	265	95,0	
	20	<0,3	10,0	60,0	90	5,5	155,0	0,065
<i>P-Dünger</i>								
Triplephosphat	19,8	141,4	1.151	156,6	242,4	27,3	2.864	
Triplesuperphosphat	19,8	141,9	1.292	120,2	171,7	10,6	2.379	
	19,8	154,5	1.515	116,2	156,6	5,1	2.263	0,202
	19,8	262,6	1.318	227,3	222,2	17,7	1.510	0,111
Thomasphosphat	6,6	<1,5	19.227	197,0	197,0	197,0	91	
	6,6	1,5	33.333	681,8			909	
	6,6	<1,5	26.651	500,0	469,7	<15,2	1.015	<0,152
	6,6	3,8	29.591	606,1	303,0	181,8	1.030	0,197
Superphosphat	7,92	75,8	2.285	284,1	184,3	<12,6	1.742	0,505
	7,92	170,5	606	151,5	542,9	454,5	4.204	
	7,92	126,3	820	290,4	252,5	1.389	2.045	0,467
Hyperphos	13,2	122,0	833	110,6	113,6	20,5	2.023	
teilaufgeschlossenes Rohphosphat	10,12	71,1	1.680	154,2	154,2	11,9	1.927	0,692
weicherdiges Rohphosphat	13,2	86,4	1.212	120,5	117,4	12,1	1.621	0,530
diverse Rohphosphate	13,2	113,6	758	121,2	113,6	22,7	1.136	
	13,2	59,1	1.273	118,2	118,2	9,8	1.507	
<i>K-Dünger</i>								
Kaliohsalz	9,96	0,1	40,2	10,0	20,1	10,0	10,0	
	9,96	<1,0	174,7	37,1	88,4	<10	35,1	<0,100
Thomaskali	16,6	<1,8	5.590	114,5	18,1	24,1	54,2	
Kaliumchlorid, 40er	33,2	0,3	6,9	11,4	4,2	0,9	16,0	
60er	49,8	<0,2	8,4	5,8	2,2	<2,0	5,8	0,120
Kaliumsulfat	41,5	0,2	6,7	8,0	1,0	1,7	3,6	
	41,5	<0,2	18,8	8,4	8,2	<2,4	7,5	
	41,5	<0,1	<4,8	<4,8	1,9	7,7	77,1	0,024
Kalimagnesia	24,9	0,6	10,4	18,5	0,4	2,4	106,0	
	24,9	<0,4	31,7	12,9	12,9	<4,0	23,3	
	24,9	0,4	20,1	12,0	36,1	24,1	80,3	

<sup>1)</sup> Angaben in Rein-Nährelement, bez. auf TM

**Tab. 34a** Kenndaten der bedeutendsten PSM-Wirkstoffe und deren Schadstoffgehalt im Verkaufsprodukt (Berechnungen nach Angaben im „Pesticide Manual“ [91])

Wirkstoff	Summenformel	Handelsnamen (Beispiele)	Molekular- gewicht	häufigster Wirkstoff- gehalt [kg/l]	Schadstoffgehalt im Ver- kaufsprodukt [kg/l]			
					Cl	S	Zn	Mn
<b>Herbizide</b>								
Chlortoluron	C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> ClN <sub>2</sub> O	Lentipur CL 700, Monsun, Hora Curan 700, FALI 700, Dicuran 700	212,7	0,7	0,117			
Chlorpropham	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> ClNO <sub>2</sub>	Mitofog, Pulsfog K, Luxan Gro Stop	213,7	0,32	0,053			
Dichlorprop-P	C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> Cl <sub>2</sub> KO <sub>3</sub>	Marks Optica DP, Duplosan DP, Orbitox DP	273,2	0,6	0,156			
Glyphosat	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> NO <sub>5</sub> P	Cardinal, Egret, Gallup, Roundup, Solstis	169,1	0,356 <sup>1)</sup>				
Isoproturon	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> N <sub>2</sub> O	Arelon, Fenikan, Tolkan Flo, Graminon 500	206,3	0,5				
Metamitron	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> N <sub>4</sub> O	Metron, Tornado, Goltix WG	202,2	0,7				
Metazachlor	C <sub>14</sub> H <sub>16</sub> ClN <sub>3</sub> O	Butisan, Butisan Star, Butisan Star "neu"	277,8	0,5	0,064			
Pendimethalin	C <sub>13</sub> H <sub>19</sub> N <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Stomp SC, Pendiron, Trump, Harpun,	281,3	0,4				
<b>Fungizide</b>								
Fenpropimorph	C <sub>20</sub> H <sub>33</sub> NO	Corbel, Colstar, Brio, Cortil, Opus Top	303,5	0,75				
Mancozeb	Komplexmischung	Penncozeb, Mancofol, Dithane Ultra WG		0,8			0,026	0,2
Metiram	Mischung	Polyram WG, Polyram WG,		0,7			ja	
Prochloraz	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub> Cl <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	Sportak, Abavit UF, RPA 10371 F, Fungi,	376,7	0,4	0,113			
<b>Insektizide</b>								
Dimethoat	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> NO <sub>3</sub> PS <sub>2</sub>	Adimethoat 40 EC, Bi 58, Danadim 400 EC,	229,2	0,4		0,112		
Methamidophos	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> NO <sub>2</sub> PS	Tamaron	141,1	0,605		0,137		
Methiocarb	C <sub>11</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub> S	Mesurool flüssig, Schneckenkorn Mesurool	225,3	0,5		0,071		
Parathion	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> NO <sub>5</sub> PS	E 605 forte, E Combi	291,3	0,405		0,045		
Petroleumöle	k.A.		k.A.	k.A.				

<sup>1)</sup> Wert in kg/kg (nur als Salz erhältlich)

**Tab. 34b** Maximale jährliche Schadstofffrachten der bedeutendsten PSM-Wirkstoffe sowie deren wichtigste Anwendungsbereiche (Berechnungen auf Basis der Daten in Tab. 34a)

Wirkstoff	max. Menge pro Anwend. [kg/ha]	ausgebrachte Schadstoff- menge pro Anwendung [kg/ha]				max. Häufig- keit /Jahr	ausgebrachte Schad- stoffmenge pro Jahr [kg/ha a <sup>-1</sup> ]				Anwendungsbereiche
		Cl	S	Zn	Mn		Cl	S	Zn	Mn	
<b>Herbizide</b>											
Chlortoluron	6,5	0,758				1	0,758				Wintergetreide außer Triticale (Anofex 500 flüssig), restliche Mittel nicht bestandskräftig
Chlorpropham	0,02	0,001				3	0,003				Keimhemmung bei Kartoffeln
Dichlorprop-P	2,5	0,389				1	0,389				Wintergetreide außer Triticale, Sommergetreide außer Sommerroggen und Hartweizen
Glyphosate	5					2					Getreide außer Saatgetreide, Braugerste und -weizen, Wein, Baumschule, Kernobst
Isoproturon	4					k.A.					Winterroggen, -weizen, -gerste Sommergerste und -weizen
Metamitron	6					k.A.					Zucker- u. Futterrüben, Erdbeeren
Metazachlor	2,5	0,16				1	0,160				Winter- und Sommerraps, Kohl
Pendimethalin	5					k.A.					Triticale, Wintergerste, -weizen, -roggen, Sonnenblume, Ackerbohne, Lupine, Mais
<b>Fungizide</b>											
Fenpropimorph	1					2					Weizen, Gerste, Roggen, Triticale
Mancozeb	1,8			0,046	0,36	4			0,184	1,440	Kernobst, Wein, Tabak, Kartoffeln,
Metiram	1,8			ja		4					Kartoffeln, Wein, Hopfen, Zierpflanzen, Kopfsalat, Kernobst
Prochloraz	1,2	0,136				2	0,271				W.-weizen, -gerste, -roggen, Raps
<b>Insektizide</b>											
Dimethoat	0,6		0,067			1		0,067			Roggen, Weizen, Kartoffeln, Kohl, Rüben, Kernobst
Methamidophos	1,2		0,165			7		1,155			Kartoffeln, Futter- und Zuckerrüben, Zierpflanzen, Kohl
Methiocarb	3		0,213			2		0,427			Mais, Futtererbsen, Zierpflanzen
Parathion	0,21		0,009			1		0,009			Getreide, Lupine, Raps, Rüben, Kohl, Erbsen, Klee, Luzerne,

**Tab. 35** Depositionsmesswerte des Umweltbundesamtes für 1996 von Makroelementen und Schwermetallen sowie Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Jahre 1994 bis 1996 (Quelle: Umweltbundesamt [92])

Meßstation	Bundesland	Makroelemente									Schwermetalle				
		SO <sub>4</sub> [kg/ha]	S aus SO <sub>4</sub> [kg/ha]	Cl [kg/ha]	NO <sub>3</sub> [kg/ha]	NH <sub>4</sub> [kg/ha]	N aus NO <sub>3</sub> und NH <sub>4</sub> [kg/ha]	K [kg/ha]	Ca [kg/ha]	Mg [kg/ha]	Cd [g/ha]	Cu [g/ha]	Mn [g/ha]	Pb [g/ha]	Zn [g/ha]
Schauinsland	BWL	21,20	7,08	4,27	21,78	8,11	11,22	0,43	1,68	0,28	2,40	15,60	16,80	20,40	123,90
Ansbach	BYL	12,96	4,33	2,30	14,67	5,72	7,76	0,37	1,42	0,23	1,10	10,60	18,30	11,30	67,60
Brotjackriegel	BYL	16,11	5,38	2,47	18,38	7,54	10,01	0,36	1,64	0,22	1,40	16,90	15,80	14,60	465,00
Eining	BYL	10,93	3,65	1,49	12,94	5,67	7,33	0,23	1,13	0,14	1,00	8,10	10,80	10,20	52,50
Murnau	BYL	17,98	6,00	3,10	24,09	8,40	11,96	0,38	2,21	0,36	2,00	11,80	14,80	17,00	19,10
Regnitzlosau	BYL	13,64	4,55	2,39	12,24	5,74	7,22	0,45	1,06	0,14	0,80	11,50	13,50	9,80	56,90
Angermünde	BBL	12,63	4,22	2,85	11,27	5,26	6,63	0,52	1,21	0,21	2,10	10,30	14,20	14,20	64,30
Doberlug	BBL	14,71	4,91	2,66	12,72	5,67	7,28	0,30	1,16	0,16	0,60	10,50	18,00	12,30	138,70
Lindenberg	BBL	13,00	4,34	2,94	12,29	4,89	6,57	0,36	1,34	0,23	2,40	41,20	19,50	15,70	77,80
Neuglobsow	BBL	10,02	3,34	2,66	12,01	4,58	6,27	0,22	1,08	0,19	0,60	43,20	14,30	7,30	121,10
Wiesenburg	BBL	11,58	3,87	3,02	11,61	5,03	6,53	0,22	1,79	0,34	0,50	7,10	16,80	6,60	102,00
Schwerin	MVL	12,26	4,09	6,14	12,85	5,26	6,99	0,33	2,20	0,54	0,60	9,90	16,10	9,60	82,40
Teterow	MVL	9,48	3,16	4,02	10,69	4,36	5,80	0,33	1,36	0,35	0,50	7,60	13,30	5,70	57,60
Ueckermünde	MVL	11,85	3,96	3,86	11,06	4,51	6,00	0,31	2,04	0,34	0,70	9,60	10,30	8,20	116,00
Zingst	MVL	11,20	3,74	8,23	11,36	4,12	5,77	0,40	0,86	0,57	0,60	19,70	16,30	10,10	46,50
Bassum	NL	15,98	5,33	7,84	15,53	7,59	9,40	0,63	1,62	0,57	0,70	11,60	33,20	7,30	65,20
Solling	NL	17,22	5,75	6,20	19,63	7,29	10,10	0,45	1,14	0,41	1,30	20,30	42,10	16,00	143,60
Twixlum	NL	15,46	5,16	25,98	11,34	5,44	6,79	0,57	1,79	1,66	0,70	12,10	19,40	7,50	50,90
Waldhof	NL	11,24	3,75	3,39	13,76	5,32	7,24	0,22	0,82	0,26	0,70	8,60	12,40	8,30	47,90
Wurmberg	NL	14,86	4,96	4,46	15,53	5,87	8,07	0,56	1,61	0,40	1,00	11,20	25,60	14,20	74,90
Hilchenbach	NRW	20,46	6,83	7,25	22,09	8,11	11,29	0,37	1,09	0,60	2,10	14,00	21,70	20,40	126,60
Deuselbach	RPL	11,16	3,73	3,15	11,13	4,25	5,81	0,21	1,02	0,24	0,80	8,40	17,80	10,20	55,80
Lehnmühle	LSN	24,12	8,05	3,43	19,64	8,84	11,30	0,48	2,27	0,52	1,00	10,70	23,90	15,20	70,30
Lückendorf	LSN	23,70	7,91	2,45	16,51	6,90	9,09	0,54	1,65	0,25	2,70	63,70	32,90	22,00	141,90
Melpitz	LSN	14,35	4,79	1,93	12,28	5,50	7,04	0,42	1,25	0,27	1,10	9,80	13,30	10,60	45,00
Helgoland	SH	18,68	6,24	62,47	14,04	4,22	6,45	2,23	2,78	3,97	0,40	12,90	18,60	6,70	109,30
Hohenwestedt	SH	13,45	4,49	11,72	14,37	6,22	8,08	0,44	1,05	0,81	0,70	6,70	13,90	6,80	40,70
Westerland	SH	16,14	5,39	51,42	11,43	4,20	5,84	1,08	1,69	3,06	0,50	11,20	10,20	7,30	50,20
Leinefelde	THL	13,95	4,66	3,40	15,35	6,46	8,48	0,49	1,98	0,30	1,20	13,40	21,70	19,10	135,80
Schmücke	THL	24,09	8,04	4,66	26,80	10,24	14,01	0,53	1,56	0,32	1,80	13,70	21,10	21,40	108,30
<b>Kleinster Meßwert 1994</b>		14,16	4,73	1,59	11,06	3,35	5,10	0,35	1,55	0,26	0,80	7,10	12,40	6,60	62,90
<b>Größter Meßwert 1994</b>		33,01	11,02	33,74	26,07	8,85	12,76	1,25	6,92	2,11	2,30	86,20	51,20	31,30	700,70
<b>Kleinster Meßwert 1995</b>		6,20	2,07	1,04	8,80	2,89	4,23	0,12	0,84	0,10	0,70	8,70	13,30	8,50	51,10
<b>Größter Meßwert 1995</b>		61,19	20,42	373,70	29,56	10,57	14,89	7,51	13,25	24,41	2,50	58,70	65,70	34,40	717,50
<b>Kleinster Meßwert 1996</b>		9,48	3,16	1,49	10,69	4,12	5,61	0,21	0,82	0,14	0,40	6,70	10,20	5,70	19,10
<b>Größter Meßwert 1996</b>		24,12	8,05	62,47	26,80	10,24	14,01	2,23	2,78	3,97	2,70	63,70	42,10	22,00	465,00
<b>Mittelwert 1994</b>		20,77	6,93	7,66	16,91	5,66	8,22	0,65	3,11	0,68	1,22	19,87	24,98	14,36	142,13
<b>Mittelwert 1995</b>		20,75	6,92	21,66	16,11	6,15	8,42	0,75	2,33	1,45	1,17	19,12	25,89	16,54	142,69
<b>Mittelwert 1996</b>		15,15	5,06	8,41	14,98	6,04	8,08	0,48	1,52	0,60	1,13	15,40	18,55	12,20	95,26