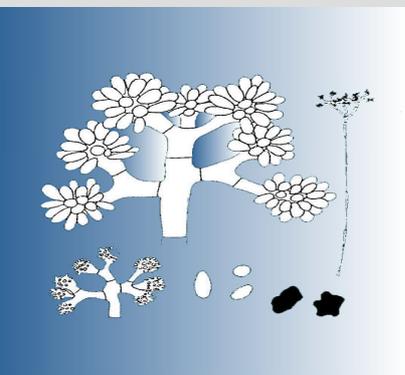


Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 39

Potsdam-Bornim 2005



ATB
Agrartechnik Bornim

Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 39

Potsdam-Bornim 2005

Herausgeber:

Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

☎ 0331 5699-0
Fax 0331 5699-849
E-Mail atb@atb-potsdam.de
Internet www.atb-potsdam.de

Bearbeiter des ATB:

Dr.-Ing. Volkhard Scholz, Abt. Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
Dr. rer. nat. Christine Idler, Abt. Bioverfahrenstechnik
Dipl.-Ing. Werner Daries, Abt. Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
Dr.-Ing. Klaus Gottschalk, Abt. Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
Dipl.-Ing. Veronika Egert, Abt. Bioverfahrenstechnik
Dipl.-Ing. Peter Kaufuss, Abt. Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
Dipl.-Ing. Wolfgang Pfister, Abt. Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
Gundula Carlow, FK für Mikrobiologie, Abt. Bioverfahrenstechnik

Externe Partner:

Dr. rer. nat. Johannes Egert, Büro für Holzschutz und Wohnraumhygiene Potsdam
Dr. Falk Brune, Energieholz Dr. Falk Brune Zempow

Redaktion:

Dr.-Ing. Volkhard Scholz
Dr. rer. nat. Christine Idler

Typografische Gestaltung:

Christine Bronowski
Regina Hager

März 2005

Dieses Forschungsvorhaben wurde zum großen Teil durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) bzw. durch das Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) gefördert.

ISSN 0947-7314

© Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam-Bornim 2005

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1 Problem und Zielstellung	5
2 Stand der Technik und der Forschung	7
2.1 Hackformate und Normen	
2.2 Verluste bei der Holzlagerung	
2.3 Schimmelpilzentwicklung und Sporenemission bei der Holzlagerung	12
3 Material und Methoden	20
3.1 Versuchsprogramm	
3.2 Versuchsmaterial	22
3.2.1 Hackgutbereitstellung	
3.2.2 Hackschnitzelabmessungen	24
3.3 Aufbau der Versuchsstände	29
3.3.1 Laborgefäße	
3.3.2 Lagersilos	30
3.3.3 Lagerboxen	32
3.3.4 Lagerhaufen	34
3.4 Messungen und Analysen	37
3.4.1 Partikelgrößenmessungen	
3.4.2 Temperaturmessungen	38
3.4.3 Masse- und Dichtemessungen	40
3.4.4 Strömungsmessungen	41
3.4.5 Verlustbestimmung	
3.4.6 Schimmelpilzuntersuchungen	44
3.4.7 Pilzsporenmessung	53
3.4.8 Sonstige Messungen und Analysen	56
4 Ergebnisse	57
4.1 Temperatur	
4.1.1 Laborgefäße	
4.1.2 Lagersilos	
4.1.3 Lagerboxen	60
4.1.4 Lagerhaufen	63
4.2 Wassergehalt	68
4.2.1 Laborgefäße	
4.2.2 Lagersilos	69
4.2.3 Lagerboxen	71
4.2.4 Lagerhaufen	75
4.3 Sorptions- und Trocknungsverhalten von Partikeln	77

4.4	Schimmelpilze	81
4.4.1	LaborgefäÙe	
4.4.2	Lagersilos	83
4.4.3	Lagerboxen	86
4.4.4	Lagerhaufen	91
4.4.5	Mykotoxine	96
4.5	Pilzsporen	99
4.5.1	Lagerboxen	
4.5.2	Lagerhaufen	101
4.6	Masse- und Energieverluste	104
4.6.1	LaborgefäÙe	
4.6.2	Lagersilos	105
4.6.3	Lagerboxen	110
4.6.4	Lagerhaufen	112
4.7	Lagerungsdichte	116
4.8	Strömungswiderstand in Schüttungen	117
5	Auswertung und Diskussion	120
5.1	Temperaturverlauf	
5.2	Trocknungsverlauf	123
5.3	Schimmelpilzentwicklung und Sporenemission	127
5.4	Lagerverluste	133
5.5	Zusammenfassung	138
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	140
	Literatur	143
	Symbole und Abkürzungen	151
	In der Reihe Bornimer Agrartechnische Berichte bisher erschienen	152

1 Problem und Zielstellung

Verschiedenen Prognosen zufolge wird sich innerhalb der nächsten 50 bis 100 Jahre die aus Biomasse gewonnene Energie weltweit um mehr als das Fünffache erhöhen. In der Europäischen Gemeinschaft wird eine Steigerung des Anteils biogener Energieträger am Primärenergieverbrauch von derzeit 3 % auf 8,5 % bis zum Jahr 2010 angestrebt (EU-WEISSBUCH, 1997), und in Deutschland sollen bis zum gleichen Zeitpunkt 5,75 % aller Kraftstoffe aus Biomasse bereitgestellt werden.

Diese Ziele sind hoch gesteckt, denn in der Bundesrepublik werden zur Zeit lediglich etwa 1,6 % des Primärenergiebedarfs durch Biomasse gedeckt (FNR, 2003). Der Zuwachs an Bioenergie ist nur realisierbar, wenn neben traditionellen Bioenergieträgern, wie Holz, neue bzw. in dieser Form bisher nicht genutzte biogene Rohstoffe erschlossen werden. Dazu zählen neben Getreidestroh insbesondere auch Energiepflanzen, also ein- und mehrjährige Pflanzen, aus denen feste, flüssige und oder gasförmige Brennstoffe gewonnen werden (EL BASSAM, 1998). In dem genannten EU-WEISSBUCH (1997) wird davon ausgegangen, dass im Jahre 2010 landwirtschaftlich produzierte Energiepflanzen mit 45 Mio t RöE (Rohöleinheiten) ca. 33 % der gesamten Bioenergie liefern. Davon sollen 27 Mio t RöE aus lignozellulosehaltigen Pflanzen erzeugt werden (auf 6,3 Mio ha) und der Rest überwiegend aus Flüssigkraftstoff liefernden Pflanzen. Das heißt, dass Energiepflanzen, die vorzugsweise auf den für die Nahrungsmittelproduktion nicht benötigten landwirtschaftlichen Flächen angebaut werden, mittelfristig etwa ein Drittel der aus Biomasse erzeugten Energie liefern sollen oder können. Damit würden sie immerhin mit etwa 3 % zur Deckung des Primärenergiebedarfs in Europa bzw. in Deutschland beitragen. Der überwiegende Anteil wird aus für Verbrennung und Vergasung geeigneten zellulosehaltigen Pflanzen bestehen, die in Zusammenhang mit der Entwicklung von Btl-Kraftstoffen besonders interessant sind.

Von den etwa sechzig vorzugsweise in Frage kommenden Energiepflanzenarten haben Feldgehölze - häufig auch als Plantagengehölze, Kurzumtriebsgehölze oder schnellwachsende Baumarten bezeichnet - gute Chancen einer breiten Nutzung, weil

1. der Anbau relativ einfach und z.T. mit konventioneller Landtechnik zu realisieren ist, auf Dünger- und Pestizideinsatz häufig verzichtet werden kann und Stilllegungsflächen genutzt werden können, ohne die staatliche Prämie zu verlieren.
2. die Aufwendungen sich in Grenzen halten, da nach einmaliger Pflanzung die Kultur mindestens 20 Jahre genutzt werden kann, die Ernte im Winter, also in einer für die Landwirtschaft arbeitstechnisch günstigen Jahreszeit, erfolgt, und die Ernteintervalle je nach Marktlage oder anderen Erfordernissen zwischen 2 und 10 Jahren frei wählbar sind.
3. trotz Nulldüngung und weitgehendem Verzicht auf Pestizide selbst auf leichten Böden akzeptable Erträge von etwa $10 t_{TM}/(ha \cdot a)$ erreicht werden, und insbesondere weil es sich hierbei um einen nachwachsenden Brennstoff handelt, für den im Gegensatz zu Halmgütern relativ preiswerte, in der Praxis bewährte emissionsarme Feuerungstechnologien vorliegen.

4. die Energie- und Ökobilanz der Gesamtkette der Produktion und Verbrennung von Feldholz deutlich günstiger ist als bei anderen landwirtschaftlich produzierten Brennstoffen und im Gegensatz zu Nahrungsmittel liefernden Kulturpflanzenarten, wie Getreideganzpflanzen, keine ethischen Vorbehalte geltend gemacht werden.

Allerdings ist die Lagerung dieses Brennstoffs problematisch, weil Feldgehölze im Winter mit Wassergehalten zwischen 50 und 60 % geerntet werden und die dabei üblicherweise erzeugten Hackschnitzel nach kurzer Zeit Verderberscheinungen aufweisen. Mikroorganismen, vor allem Schimmelpilze, bewirken einen Abbau der organischen Substanz und damit erhebliche Masse- und Energieverluste. Darüber hinaus können Schimmelpilze und deren Sporen zur gesundheitlichen Gefährdung des Personals führen.

Neben der generellen Zielstellung, Schonung fossiler Rohstoffe, Minderung energiebedingter CO₂-Emissionen und Erschließung neuer Einkommensquellen für die Landwirtschaft, bestehen die Ziele der Untersuchungen in

- Qualitative und quantitative Ermittlung des Schimmelpilzbefalls und der Sporenemissionen bei der Lagerung von Pappelhackgut und Aufzeigen von technischen Möglichkeiten zu deren Reduktion
- Bestimmung und Reduzierung des Trockenmasse- und Energieverlustes bei der Lagerung von Pappelholz
- Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Hacklänge, Schimmelpilzbefall und Trockenmasse- bzw. Energieverlust sowie Identifizierung diesbezüglich geeigneter Hackformate.

Damit soll ein Beitrag zur Entwicklung der verfahrenstechnischen Grundlagen für energieeffiziente, umweltverträgliche und kostengünstige Ernte- und Lagertechnologien für Feldholz geleistet werden.

2 Stand der Technik und der Forschung

2.1 Hackformate und Normen

Die verstärkte Nutzung des Holzes als Energiehackschnitzel erfordert definierte Eigenschaften des Produktes. Vom Verbraucher wird gefordert, dass Hackschnitzel mit hoher, gleichbleibender und einheitlicher Qualität bereitgestellt werden. Mit zunehmendem Einsatz von Energiehackschnitzeln verstärken sich deshalb die Bemühungen, eine Normierung der Hackschnitzel hinsichtlich Geometrie, Wassergehalt und Zusammensetzung (Fremdanteile) zu erreichen.

Da Österreich auf dem Gebiet der Holzverbrennung sowohl in der technologischen Entwicklung, als auch bezüglich der Anzahl der Verbrennungsanlagen zu den führenden Ländern in Europa zählt, wurden dort hinsichtlich der Normierung von Holzbrennstoffen frühzeitig Regelungen getroffen. Die Ö-Norm 7133, die als Vornorm seit 1988 existiert, definiert Klassen nach folgenden Kriterien:

- Wassergehalt: 5 Klassen
- Größe: 3 Klassen
- Schüttdichte: 3 Klassen
- Aschegehalt: 2 Klassen

Da in Deutschland für Hackschnitzel derzeit noch keine verbindlichen Standards definiert sind, wird sich in Folgendem vorzugsweise auf die Ö-Norm 7133 bezogen. Eine Zusammenstellung der gängigen Hackschnitzelnormen und Empfehlungen zeigt **Tabelle 2-1**.

2.2 Verluste bei der Holzlagerung

In der Vergangenheit wurden von verschiedenen Einrichtungen mit unterschiedlichen Ansätzen Trocknungsversuche mit Hackschnitzeln durchgeführt. Leider sind aus den Literaturquellen nicht immer die relevanten Lagerbedingungen erkennbar. Dieses und auch die unterschiedlichen bekannten Parameter führen zu einer breiten Streuung der Ergebnisse (**Tabelle 2-2**).

Zum Substanzabbau des Holzes tragen sowohl biologische als auch chemische Prozesse bei. Zum einen finden in den lebenden Zellen noch Atmungsvorgänge statt, zum anderen vollzieht sich ein intensiver Stoffwechsel der Mikroorganismen. Die Folgen sind Trockensubstanzverluste, Bildung von Kohlendioxid, Wasser und anderen Verbindungen sowie Wärmeentwicklung. Wärmeentwicklung und Feuchtigkeit beeinflussen die biologischen Prozesse maßgeblich. Während bis 30 °C die meisten biologischen Prozesse gefördert werden, kommt es bei 60 °C nur noch zur Entwicklung thermophiler Arten und möglicherweise auch zum Ablauf chemischer Reaktionen z.B. zur Oxidation freier Fettsäuren (Weingartmann, 1991). Der natürliche Holzabbau erfolgt durch Mikroorganismen und deren Enzyme, welche die Holzbestandteile zu löslichen Produkten abbauen.

Tabelle 2-1: Nationale Qualitätsnormen für Holzhackschnitzel

Norm	Land	Bezeichnung	Wasser- gehalt %	Bezugs- größe	Untergrenze		Nenngröße (max.)		Übergrenze		Rinde Anteil %
					Länge mm	Breite mm	Anteil %	Länge mm	Breite mm	Anteil %	
O-Norm M 7133	AU	Feinhackgut G 30	5 Klassen von 20% bis 50%	Siebmaß Abmessung Querschnitt	< 2,8	< 20*	16	> 60	> 16	< 20	
					< 5,6	< 20*	31,5	> 60	> 31,5 < 120 5 cm ²	< 20	
		Mittelhackgut G 50			< 11,2	< 20*	63	> 60	> 63 < 250 10 cm ²	< 20	
VHe- Richtlinie	CH	Trockene Fein-HS Feuchte Fein-HS Feuchte Grob-HS Feuchte Grob-HS***	< 30% < 50% < 50% < 60%	Abmessung Querschnitt	< 3	< 5**	40 20 10	> 94**	> 80	< 1	< 10
					< 3	< 5**	40 20 10	> 94**	> 80	< 1	< 10
					< 3	< 5**	60 20 10	> 94**	> 220	< 1	< 10
					< 3	< 5**	60 20 10	> 94**	> 220	< 1	< 30
Energieholz- klassifikation	SF	P1 P2 P3 P4	4 Klassen von 40% bis 65%	Abmessung			30 45 60 100	> 95 > 95 > 95 > 95			
EU-Norm Solid biofuels prCENTS/TS 14961	EU	P 16 P 45 P 63 P 100	5 Klassen von <20% bis <65%	Siebmaß (Abmessg. für Übergrenze)	< 1	< 5	3,15 - 16	> 80	45 - 85	< 1	
					< 1	< 5	3,15 - 45	> 80	> 63	< 1	
					< 1	< 5	3,15 - 63	> 80	> 100	< 1	
					< 1	< 5	3,15 - 100	> 80	> 200	< 1	
Kessel- anforderung (Haschke, 99)	D AU	Unterschubfeuerung Vorofenfeuerung Rostfeuerung	17-29 35 30-60	Abmessung	ca. < 5	< 10	20-50 20-30 4-20	< 100	< 200	< 1	
					ca. < 5	< 30	30-60 (< 3 cm ²)	< 100	< 100	-	
					-	< 10-25	30-80 30-50 10-30	< 100	ca. < 70	< 3 - 5	

* incl. Feinstanteil < 1 mm von max. 4 %

** zusätzlich Nadelanteil von max. 5 %

*** mit erhöhtem Rindenanteil

Tabelle 2-2: Masseverluste bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln (Literaturlauswertung)

Holzart	Hacklänge mm	Regenschutz	Lagerdauer d	Wassergehalt		Max. Temp. °C	Trockenmasseverlust % p. Mon.	Quelle
				Einlagerg. %	Auslagerg. %			
Pappel	80 -150	-	-	-	-	60	0,45 – 0,8	Kirschbaum, 1998
Pappel	85,4	ja	48	-	-	14	0,4	Rink, 1997
-	-	ja	-	-	-	-	0,5 – 1,0	Marutzky, 1982
-	-	ja	-	20	-	-	0,5	Lauer, 1986
-	-	ja	-	20	-	-	0,5	Mitchel, 1988
-	-	ja	-	30	-	-	0,5 – 1,0	Weingartmann, 1991
Fichte	25	ja	50	41	23,9	35	0,5 - 4	Webenau, 1999
Fichte	25	ja	90	41	20,5	35	0,5 - 4	Webenau, 1999
Nadelholz	94,1	ja	60	-	-	14	0,6	Rink, 1997
Pappel	25	-	-	-	-	60	0,8 - 1	Kirschbaum, 1998
-	-	-	-	-	-	-	1 - 2	Brusche, 1983
-	-	-	-	-	-	-	1 - 5	Stockinger, 1998
Feldholz	-	-	-	-	-	-	1,4 – 3,3	Stockinger, 1998
-	-	ja	-	50	-	-	4 - 6	Weingartmann, 1991
-	-	ja	-	50	-	-	2,8	Lauer, 1986
-	-	ja	-	50	-	-	2	Mitchel, 1988
-	-	nein	-	50	-	-	4	Mitchel, 1988
Rinde	-	nein	183	54	53	-	1,8	Brunner, 1997
-	-	ja	-	55	-	-	1,3	Stockinger, 1997
-	-	nein	-	55	-	-	1,8	Stockinger, 1997
Rinde	-	ja	183	59	36	-	1,3	Brunner, 1997
-	11 - 20	ja	91	-	-	65	10,3	Weingartmann, 1994
Linde	23,8	ja	46	-	-	65	11,5	Rink, 1997
Buche*	-	ja	14- 84	-	-	25	6,5 – 8,8	Wagenführ, 1989
Nadel- und Laubholz*	< 1	ja	8 - 30	-	-	25	2,2 – 4,7	Wagenführ, 1989

* unter Laborbedingungen (Fermentation)

Holzbestandteile

Holz besteht überwiegend aus organischen Verbindungen. Diese Verbindungen sind zu über 50 % aus Kohlenstoff, zu 43 % aus Sauerstoff und zu 6 % aus Wasserstoff aufgebaut. Der Anteil an Stickstoff liegt unter 1 % (N.N., 2004). Aus diesen Elementen werden die Hauptbauelemente des Holzes Lignin, Polyosen (veraltet: Hemicellulosen) und Cellulose aufgebaut. In der Literatur werden unterschiedliche Angaben über die Gehalte gemacht. Holz kann zu 40 - 60 % aus Cellulose, zu 15 - 40 % aus Lignin, zu 15 - 20 % aus Holzpolyosen und zu 2 - 8 % aus Zucker und anderen Produkten bestehen. Die Anteile anderer Kohlenhydrate und Eiweiße sind sehr gering (Gründlinger, 2003). Pappelholz weist mit etwa 50 % Cellulose, 31% Holzpolyosen und 18 % Lignin im Vergleich zum Kiefernholz mit etwa 44 % Cellulose, 26 % Holzpolyosen und 28 % Lignin viel Cellulose bei geringen Ligningehalt auf und ist somit für die Celluloseherstellung besonders gut geeignet (Laube, 2001; Gruber, 2003). Die Gehalte scheinen großen Schwankungen unterworfen zu sein. Experimentelle Daten von Maier et al. (1998) weisen für Pappeln und Weiden Ligningehalte von ca. 28 % und Cellulosegehalte von 78 % bzw. 73 % auf.

Cellulose ist ein in der Pflanzenwelt sehr verbreitetes Grundgerüst, das aus einer großen Anzahl einzelner Glucosemoleküle zusammengesetzt ist und in Fibrillen organisiert ist. Diese farb-

losen Stoffe bilden nicht nur Gerüststrukturen für die Pflanzen, sondern dienen auch als eine bevorzugte Nahrungsquelle für Insekten, Pilze, Bakterien und andere Lebewesen. Ihre Konzentration ist saisonbedingt und kann sich auf die Lagerbeständigkeit des gefällten Holzes außerordentlich stark auswirken.

Der Abbau von Cellulose zu Glucose wird durch das Lignin erschwert und verläuft sehr langsam (Weber, 1993). Der Lignin-Kohlenhydrat-Komplex muss zunächst aufgelöst werden bevor aus den Celluloseketten über Cellobiose die lösliche Glucose gebildet werden kann. An diesen Prozessen sind vor allem Endo- und Exo-Glucanasen und Glucosidasen beteiligt. Einige Schimmelpilze aus den Gruppe der Ascomyceten und der Deuteromyceten bauen durch extracelluläre Cellulasen Cellulose ab und nutzen den frei werdenden Kohlenstoff. Besonders effektive Celluloseabbauer sind Spezies der Gattung *Trichoderma*, *Alternaria*, *Chaetomium*, *Fusarium* und *Penicillium* (Reiß, 1997). Mit dem Abbau der Cellulose geht meist auch der Abbau der Hemicellulosen einher. Diese Gruppe ist leichter zu hydrolysieren als Cellulose.

Lignin stellt den zweitwichtigsten Holzbestandteil dar. Es tritt nicht als selbstständiges Bestandteil auf, sondern immer in Verbindung mit Cellulose. Lignin ist ein mechanisch als auch chemisch und biologisch schwer abbaubares bräunliches Polymer. Das Lignin umschließt die kohlenhydrathaltigen Bestandteile der Zellwand und ist damit für die Langlebigkeit verholzter Pflanzenteile verantwortlich. Durch den Lignineinbau gewinnen Pflanzen an Härte und Widerstandsfähigkeit. Dies ermöglicht es ihnen, im Verhältnis zu ihrer Größe eine enorme statische Stabilität und damit auch große Wachstumshöhen zu erreichen.

Lignin, das in erster Linie von holzerstörenden Weißfäule- und Moderpilzen angegriffen wird, kann aber auch von anderen filamentösen Pilzen und Hefen partiell abgebaut werden (Weber, 1993). Zu den ligninolytischen Pilzen gehören u.a. Arten der Gattungen *Fusarium*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, sowie *Paecilomyces* (Weber, 1993; Reiß, 1997). Insgesamt ist der Mechanismus des Ligninabbau noch nicht vollständig bekannt. Im Boden erfolgt der Abbau von Lignin zu Huminsäuren durch Ligninasen von Bakterien und Pilzen.

Die Holzpolyosen sind neben den Cellulosen in den Zellmembranen zu finden. Sie sind ein heterogenes Gemisch aus Polysacchariden, die zu kurzen, z.T. verzweigten Ketten verknüpft sind. Die Polyosen sind sowohl stützende Stoffe im Zellwandgerüst, als auch als Quellstoffe für die Durchlässigkeit der Membranen verantwortlich. Darüber hinaus sorgen sie als Klebstoff für die Verkittungen der Zellmembranen (N.N., 2004).

Als weitere Bestandteile können im Holz ätherische Öle, Harze, Stärke, Fette und Gerbstoffe vorkommen. Der pH-Wert des Holzes im lebenden Stamm liegt im sauren Bereich zwischen 4,1 und 6,2.

Holzschädlinge

Für einen Teil der Holzverluste sind Holzschädlinge verantwortlich. Holz kann sowohl von tierischen Parasiten (Insekten, Käfer, Wespen, Ameisen, Termiten, Krustentiere und Mollusken) als auch durch pflanzliche Schädlinge (Bakterien, Pilze) befallen werden.

Insekten können das Holz als Lebensraum und Nahrungsquelle nutzen. Einige dieser Insekten befallen ausschließlich trockenes Holz (Holzbockkäfer, Nagekäfer) andere wiederum benötigen frisches Holz, vor allem den Rindenanteil (Holzwespen, Scheibenbock). Den größten wirtschaftlichen Schaden unter den Trockenholz-Insekten kann der Holzbockkäfer anrichten, der allerdings nur Nadelholz befällt.

Bakterien und Pilze, bzw. deren Enzyme sind ebenfalls maßgeblich am Holzabbau beteiligt. Hierbei entstehen die Verluste durch Ab- und Umbaureaktionen an Cellulose, Holzpolyosen und Lignin.

Die Erstbesiedlung des Holzes beginnt meist mit Bakterien und Hefen. Bakterien vermehren sich durch Zellteilung und pflanzen sich im Holz fort, vor allem unter Einwirkung von Feuchtigkeit. Sie nutzen dazu zumeist die enzymatisch leicht zugänglichen Zellinhaltsstoffe. Schimmelpilze, Bläuepilze und schließlich Moder- und Weißfäulepilze können folgen.

Der Anteil der Bakterien an der Holzerstörung wird sehr kontrovers diskutiert. Sicher scheint, dass ihr Anteil durch das Lignin limitiert wird. Natives Lignin kann nur durch wenige Arten abgebaut werden. Genannt werden einige Streptomyceten und Norcardia-Arten. Der Abbau verläuft zudem im Vergleich zu den Pilzen wesentlich langsamer (Deschamps et al, 1980). Die von Schmidt (1978, 1980, 1981 a, b) ermittelten Masseverluste an Holz durch Bakterien beruhen vermutlich nicht nur auf dem Abbau des Lignins, sondern eher auf der Nutzung der Pektine und Holzpolyosen. Andere Autoren berichten über die Verwertung von isoliertem Lignin durch Pseudomonas-, Xanthomonas- und Acinetobacter-Arten (Crawford, 1975; Katayama und Fukumi, 1979 a, b). Ist Holz durch chemische Vorbehandlung, mechanische oder physikalische Zerkleinerung oder biologische Degradation bereits teildelignifiziert worden, so können Bakterien Lignin leichter nutzen. Vor allen Cellomonas- und Bacillus-Arten sind dazu in der Lage (Schmidt, 1978). Insgesamt ist der Verlust durch bakteriellen Eingriff eher selten und begrenzt, während die Pilze imstande sind, entweder Lignin oder Cellulose oder beide Gewebe zugleich abzubauen und Energie zu gewinnen.

Die holzerstörenden Pilze lassen sich grundsätzlich in drei Gruppen einteilen: Braunfäule-, Weißfäule- und Moderfäuleerreger (Kleist, 2000; Madson, 2000). Diese Einteilung der holzabbauenden Pilze nach der Farbe des befallenen Holzes wurde erstmals von HUBER 1924 vorgenommen. Mittlerweile liegen zahlreiche Beschreibungen des Holzabbaus durch Weiß- und Braunfäulepilze vor (Levy, 1987; Blanchette, 1985; Green et al., 1997).

Von Braunfäulepilzen wurde bislang angenommen, dass sie nur Cellulose und Holzpolyose abbauen können. Es mehren sich jedoch die Befunde, nach denen einige Vertreter auch Veränderungen des Ligningerüsts bewirken können (Schmidt, 1994; Haider und Trojanowski, 1980). Das Holz wird rissig und zerbricht würfelartig, im Endstadium zerfällt es zu braunen Staub. Zu dieser Gruppe gehören der Echte Hausschwamm, der Braune Kellerschwamm, die

weißen Porenschwämme und die Blättlinge. Diese Pilze haben eine weite ökologische Potenz bezüglich des Feuchtegehaltes (40 % - 60 %) und der Temperatur (5 °C – 74 °C) (Gründlinger, 2003). Braunfäulepilze bevorzugen im allgemeinen Nadelhölzer.

Die Weißfäulepilze sind in der Lage außer den Kohlenhydraten auch das Lignin vollständig abzubauen. Das kann entweder gleichzeitig oder nacheinander geschehen (simultane oder selektive Weißfäule). Daran sind extrazelluläre Enzyme beteiligt. Das Holz verliert dabei seine dunkle Färbung und erscheint durch die Anhäufung von Cellulose gebleicht. Das Holz wird weich und faserig. Vertreter sind der Schmetterlings- und der Eichensporling, die zu den höheren Basidiomyceten gehören.

Die Moderfäulepilze bauen vorwiegend Cellulose ab. Lignin wird lediglich chemisch modifiziert (Liese, 1981; Levy, 1966). Moderfäulepilze sind in der Lage auch sehr nasses, lebendes Holz zu zersetzen, da sie auch unter sauerstoffarmen Bedingungen agieren können. Zu dieser Gruppe gehören Vertreter der Ascomyceten und der Deuteromyceten, insbesondere Arten der Gattungen *Alternaria*, *Chaetomium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Trichoderma* und *Aureobasidium*. Eine auffällige Holzverfärbung sowie Verluste an Gewicht und Festigkeit des Holzes sind die Folgen des Celluloseabbaus. Die Schimmelpilze wachsen jedoch nicht tiefer als 1 mm in das Holz (Reiß, 1997), da der Wassergehalt im innern des Holzes zu gering ist. Die Moderfäulepilze können, im Gegensatz zu den vorhergenannten, als echte Holzzerstörer angesehen werden, da sie in der Lage sind die Sekundärwand vollständig abzubauen.

Das Holz kann auch durch holzverfärbende Bläuepilze besiedelt werden, die eine unansehnliche Holzoberfläche verursachen, jedoch zu keinem Festigkeitsverlust führen, da sie Cellulose nicht enzymatisch abbauen und als Nährstoff verwenden können. Der optimale Bereich für den Feuchtegehalt liegt zwischen 60 % und 150 %, das Temperaturoptimum zwischen 24°C und 28°C (Gründlinger, 2003). Oft bereiten diese Pilze den Boden für die holzzerstörenden Pilze vor.

Von einigen Hefen wird berichtet, dass sie sowohl Cellulose, als auch Holzpolyose und Lignin abzubauen vermögen (Stern et al., 1974; Sam, 1982; Janshekar et al., 1983). Insgesamt kann ihr Anteil an den Masseverlusten als gering eingeschätzt werden.

2.3 Schimmelpilzentwicklung und Sporenemission bei der Holzlagerung

Ziel der mikrobiologischen Arbeiten zur Lagerung von Holzhackschnitzeln ist die Bestimmung der während der Lagerung auftretenden Schimmelpilze und die Bewertung der Befunde bezüglich ihrer Bedeutung für die menschliche Gesundheit.

Schimmelpilze

Schimmelpilze sind Mikroorganismen, die fast ausnahmslos terrestrisch leben. Bevorzugt besiedeln sie das Erdreich, abgestorbene Pflanzen und gelegentlich Nahrungsmittel. Wasser gehört nicht zu den bevorzugten Substraten, obwohl aus gechlortem Schwimmbadwasser auch Schimmelpilze isoliert worden sind (Reiß, 1997). Zusammen mit anderen Pilzen und Bakterien

tragen Schimmelpilze wesentlich zur Verrottung organischer Materie bei und leisten so einen unerlässlichen Beitrag im Stoffkreislauf der Natur. Neben ihrer saprophytischen Lebensweise ist die Ausbildung von Mycelien ein wesentliches Merkmal der Schimmelpilze. Die Vermehrung erfolgt überwiegend ungeschlechtlich durch Sporen.

Mycelwachstum, Sporenbildung und Sporenkeimung hängen sehr stark und in unterschiedlichem Maße von der Feuchtigkeit des Substrates der Temperatur und dem pH-Wert ab. Ausschlaggebend ist der Gehalt an frei verfügbarem Wasser im Substrat. Als Maß dafür wird die Wasseraktivität (a_w -Wert) verwendet (Weidenbörner, 1998). Sie errechnet sich aus dem Verhältnis des Wasserdampfdruckes über dem Substrat zum Wasserdampfdruck über reinem Wasser. Die Wasseraktivität entspricht der relativen Feuchte, die sich über einem Produkt in einem abgeschlossenen Raum einstellt. Sie wird von der Temperatur, dem pH-Wert, wesentlicher jedoch von der chemischen Zusammensetzung des Substrates beeinflusst. Ionen und niedermolekulare Verbindungen (z.B. Zucker) haben eine hohe Wasserbindungskraft, wohingegen hochmolekulare Stoffe (z.B. Proteine, Hemicellulosen und Cellulosen) ein sehr geringes Wasserbindungsvermögen haben. In **Bild 2-1** ist der Zusammenhang zwischen den wichtigsten Wachstumsfaktoren bei ausgewählten thermophilen Schimmelpilzen dargestellt.

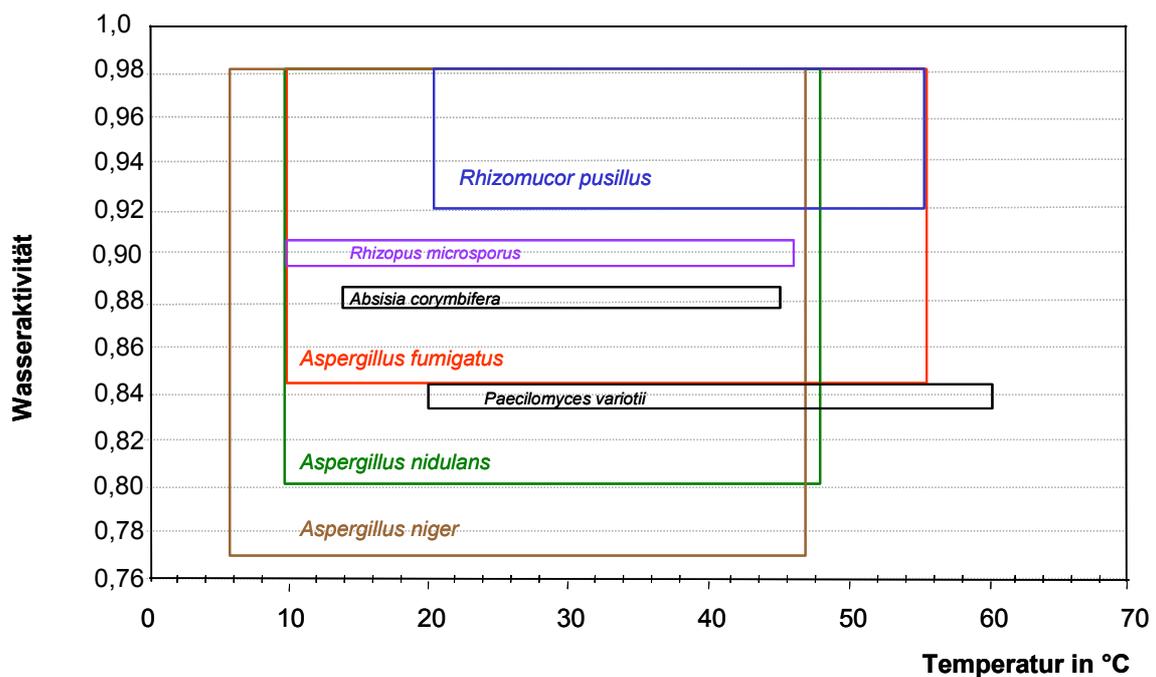


Bild 2-1: Zusammenhang zwischen den Wachstumsfaktoren Wasseraktivität und Temperatur bei ausgewählten thermophilen Schimmelpilzen (mod. nach Reiß, 1997)

Der minimale a_w -Wert für die meisten Schimmelpilze liegt bei 0,80. Xerophile Pilze wachsen dagegen bereits bei Wasseraktivitäten von 0,61 (Reiß, 1997; Weidenbörner, 1998). Bei optimaler Temperatur ist der a_w -Bereich für die Sporenkeimung am größten (Reiß, 1997), in einem geringeren Bereich kann Mycelwachstum erfolgen, während für die Sporenbildung ein noch kleinerer Bereich zur Verfügung steht.

Schimmelpilze bevorzugen ein leicht saures Milieu mit pH-Werten zwischen 4,5 und 6,5. Maximalwerte liegen bei pH 8, Minimalwerte bei pH 2. Schimmelpilze gehören zu den aeroben Organismen. Da sie auch bei sehr geringem Sauerstoffpartialdruck wachsen können, werden sie auch als mikroaerophil bezeichnet. Aus **Bild 2-2** ist ersichtlich, dass Kiefer und Weidenholz bei pH-Werten von 5,1 bzw. 5,0 günstige Bedingungen für Schimmelpilze bieten.

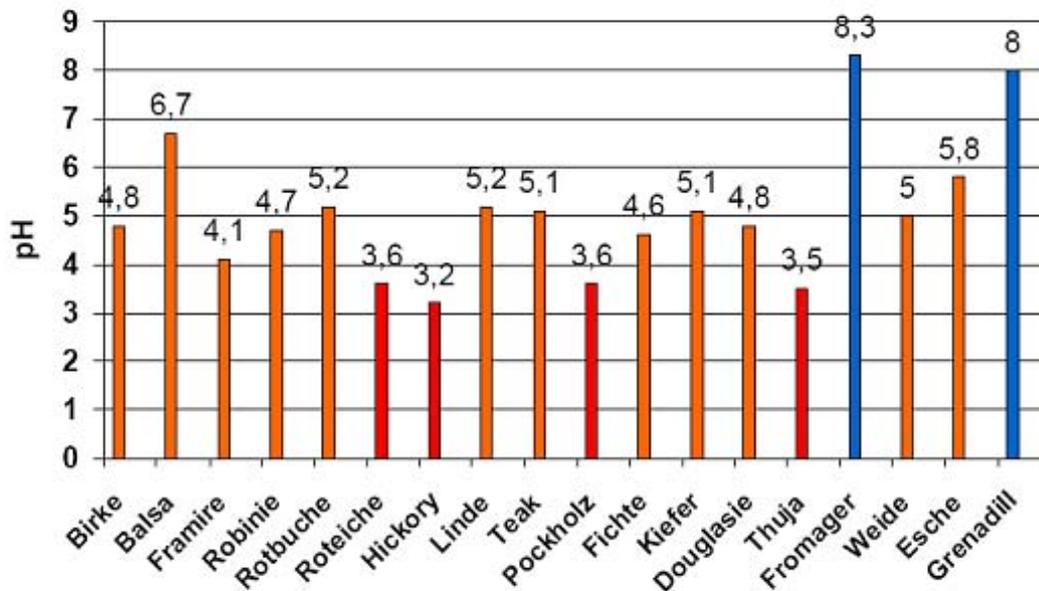


Bild 2-2: pH-Werte verschiedener Hölzer, nach Wagenführ und Scheiber (1985)

Die Stoffwechselleistungen der Schimmelpilze werden auf verschiedenen Gebieten genutzt: Herstellung von Lebensmitteln (Käse, Rohwurst, Tofu, Sojasoße, Sake), Gewinnung von Antibiotika (Penicillin, Griseofulvin) und Erzeugung von Chemikalien (D-Milchsäure, Glucon- und Weinsäure). Zu den Stoffwechselprodukten gehören jedoch auch Metabolite, die bei oraler und inhalativer Aufnahme bei Mensch und Tier erhebliche gesundheitliche Schäden verursachen können und die als Mykotoxine bezeichnet werden. Viele Schimmelpilzarten verfügen darüber hinaus über ein großes allergenes Potenzial.

Aussagekräftige Literaturstellen zur mikrobiologischen Belastung von Holzhackschnitzeln sind nur vereinzelt zu finden. Vor allem in den skandinavischen Ländern, in Österreich und im Bundesland Bayern sind dazu Untersuchungen angestellt und publiziert worden (Tansey, 1971; Thörnqvist et al., 1983; Weingartmann et al., 1991; Bally et al., 2000). Oft liegen jedoch nur Ergebnisse zu Gesamtgehalten von Pilzen bzw. zum Sporengehalt vor. Veröffentlichungen zur Identifikation der isolierten Pilze bzw. der Sporen sind kaum erschienen. Die umfangreichsten Ergebnisse liegen im Bereich der Holzverarbeitung vor (Sägewerke, Papierindustrie) (Bergmann et al., 1979). Hierbei konzentrieren sich die Untersuchungen auf das Einatmen von Stäuben und den damit verbundenen Veränderungen der Lungen (Holzarbeiterlunge, Holzschnitzel-lunge, Holzschnitzelalveolitis, Holzarbeiteralveolitis) (Mücke et al., 1999). Vereinzelt sind auch Befunde über solche Erkrankungen in den Bereichen Wohnen und Freizeit bekannt geworden (Sieber et al., 1996; Guelaud et al., 1993). Auch über die Pilzbelastung von Kompostier- und

Recyclinganlagen gibt es umfangreiche Materialien (Göttlich et al., 1994; Stalder, 1994; Kutzner et al., 1994).

Als Mitverursacher der o.g. Krankheitsbilder werden neben einer geringen Anzahl von Bakterienarten (*Micropolyspore faeni*, *Thermoactinomyces vulgaris*) (Feicht, 2001) vor allem Schimmelpilze genannt. Zu den Wichtigsten gehören Vertreter der Gattungen *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Rhizopus*, *Mucor*, *Botrytis*, *Cladosporium* und *Paecilomyces*. Pilze finden auf den Hackschnitzeln ideale Wachstumsbedingungen, da sie bezüglich Temperatur und Feuchtigkeit eine weite ökologische Toleranz zeigen. Mesophile und thermotolerante Arten können im Bereich von 0 °C bis 40 bzw. 50 °C wachsen, thermophile Organismen wachsen auch noch bei 60°C (Bergmann et al., 1985; Mücke et al., 1999). Hohe Luft- und Substratfeuchtegehalte sind weitere günstige Voraussetzungen für das Pilzwachstum (Weingartmann, 1991).

Als Substrate werden von den Schimmelpilzen vor allem Cellulose und andere Kohlenhydrate und Fette abgebaut. Der Abbau von Lignin ist nur bei einigen wenigen Vertretern der Ascomyceten und Deuteromyceten bekannt. Diese Pilze werden, unabhängig von ihrer systematischen Stellung, zu den Weich- oder Moderfäulepilzen gezählt. Zu den bedeutensten Vertretern gehören Spezies der Gattung *Chaetomium*. Ihre ligninolytische Aktivität ist jedoch im Vergleich zu den holzerstörenden Weißfäulepilzen sehr gering. Weitere Ligninabbauer sind u.a. *Aspergillus fumigatus* und *Paecilomyces sp.* Bei aeroben Abbau entstehen Kohlendioxid und Wasser, bei anaeroben Abbau Alkohole und Säuren. Das Ausmaß des Substanzabbaus liegt zwischen 0,5 % und 10 % pro Monat (**Tabelle 2-2**).

Neben Temperatur und Feuchtegehalt sind pH-Wert und Sauerstoffgehalt zwei weitere wichtige Milieubedingungen für das Wachstum der Pilze. Da die meisten Pilze ein leicht saures Milieu bevorzugen, ist es zunächst nicht zu erklären, dass auf dem neutralen Holz Pilze wachsen. Die Befunde lassen sich jedoch u. a. dadurch erklären, dass Pilze in der Lage sind, durch das Ausscheiden von Stoffwechselprodukten den pH-Wert des Substrates zu verändern. Zudem besitzen sie ein weites Toleranzspektrum gegenüber dem pH-Wert des Mediums. So kann z. B. der als humanpathogen eingestufte Schimmelpilz *Aspergillus fumigatus* im Bereich von 3,0 bis 8,0 existieren, *Penicillium cyclopium* kann sogar im pH-Bereich zwischen 2,0 und 10,0 wachsen (Angaben nach Viitanen et al., 1991). Schimmelpilze sind aerobe Organismen, d. h. sie wachsen in Gegenwart von Sauerstoff. Ausnahmen hiervon bilden einige *Mucor*-Arten und *Rhizopus stolonifer*, deren Sporen auch ohne Sauerstoff auskeimen können. Hohe Kohlendioxidgehalte dagegen können das Pilzwachstum hemmen. Das könnte auch erklären, warum in hochverdichteten, stark erhitzten Hackschnitzeln kaum Pilze nachweisbar sind (Nilsson, 1987).

Art und Anzahl der Schimmelpilze auf Holzhackschnitzeln werden nicht nur von den Milieubedingungen beeinflusst, sondern auch in erheblichem Maße von den Manipulationen zwischen Ernte und Gebrauch im Heizwerk (Jirjis, 1989). Insbesondere sind dies, der Erntezeitpunkt, Hackgutgröße, Zwischenlagerungsbedingungen, Lagerart und -zeit. In Auswertung verschiedener Literaturstellen (vor allem DVG, 1994; Samson et al., 1995; Feicht, 2001) sind die Spezies und Gattungen zusammengestellt, die in gelagerten Holzhackschnitzeln vorkommen können. Die Pilze sind nach ihren Wirkungen und ihrer Bedeutung für die menschliche Gesundheit in drei Gruppen unterteilt: opportunistisch pathogen, toxischen und allergen (vgl. **Tabelle 2-3** bis **Tabelle 2-5**). Dabei ist zu bemerken, dass einige Spezies aufgrund ihres breiten Wirkungsspektrums in mehreren Wirkgruppen genannt werden (DVD, 1994; Pitt et al., 1997; Gravesen et al., 1994; Hoog et al., 2000; Samson et al., 2000).

Tabelle 2-3: Ausgewählte humanpathogene Schimmelpilzarten

Gattung	Spezies	Wirkungen
Absidia	<i>Absidia corymbifera</i>	subkutane Mykosen, invasive Infektionen bei AIDS-Patienten, Infektionen nach Transplantation
Aspergillus	Aspergillus flavus Gruppe	Aspergillose (Infektion von Auge und Ohr)
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Lungen-Aspergillose, typische Inhalations-Mykose,
	Aspergillus glaucus Gruppe	Aspergillose, Otitis, Infektionen von Gehirn, Gefäßen, Herz und inneren Organen
	<i>Aspergillus niger</i>	Aspergillose, Ohrinfektion
Paecilomyces	<i>Aspergillus nidulans</i>	Aspergillose, Lungeninfektionen, Sinusitis
	<i>Paecilomyces variotii</i>	Mykosen, Lungenentzündung, Sinusitis, Mittelohrentzündung,
Rhizomucor	<i>Rhizomucor pusillus</i>	Zygomykosen bei Leukämiepatienten
Rhizopus	<i>Rhizopus microsporus</i> var. <i>rhizopodiformis</i>	Zygomykosen auf der Haut und im Magen-Darm-Bereich

Tabelle 2-4: Ausgewählte toxische Schimmelpilzarten

Gattung	Spezies	Toxische Wirkungen durch
Aspergillus	Aspergillus flavus Gruppe	Aflatoxin B1, B2, G1, G2; Kojisäure
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Fumiclavin, Chanoclavin, Fumitoxin
	<i>Aspergillus nidulans</i>	Sterigmatocystin
	<i>Aspergillus niger</i>	Malformin C und Naphto- γ -quinon
	<i>Aspergillus ochraceus</i>	Ochratoxin A, Penicillinsäure
	<i>Aspergillus parasiticus</i>	Aflatoxine
	<i>Aspergillus versicolor</i>	Sterigmatocystin, Nidulotoxin
Paecilomyces	<i>Paecilomyces variotii</i>	Patulin und Viriditoxin
Penicillium	<i>Penicillium aurantiogriseum</i>	Penicillinsäure, Roquefortine C, Xanthomegnin, Vio-mellein, Verrucosidin
	<i>Penicillium brevicompactum</i>	Botryodiplodin, Mycophenolsäure
	<i>Penicillium cyclopium</i>	Cyclopiasäure, Penicillinsäure, Ochratoxin A
	<i>Penicillium chrysogenum</i>	Ochratoxin A, Penicillinsäure, Patulin, Roquefortin C, Meleagrinen
	<i>Penicillium citrinum</i>	Citrinin
	<i>Penicillium crustosum</i>	Penitrem A - F (starkes Neurotoxin), Roquefortin C
	<i>Penicillium expansum</i>	Patulin, Citrinin
	<i>Penicillium glabrum</i>	Citromycetin
	<i>Penicillium islandicum</i>	Luteoskyrin, Islanditoxin, Cyclochlorotin
	<i>Penicillium patulum</i>	Patulin
	<i>Penicillium roqueforti</i>	Roquefortin C, Isofumigaclavine A&B, PR-Toxin, Mycophenolsäure
	<i>Penicillium verrucosum</i>	Ochratoxin A
Rhizopus	<i>Rhizopus microsporus</i>	Rhizonin A

Tabelle 2-5: Ausgewählte allergene Schimmelpilzarten

Gattung	Spezies	Allergene Wirkungen
Absidia	<i>Absidia corymbifera</i>	Es liegen nur Einzelbefunde vor
Aspergillus	Aspergillus flavus Gruppe	Allergie Typ 1 und Typ 3 auslösend
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Asthma, Rhinitis, Konjunktivitis, Holzarbeiter-Alveolitis, Farmer-Alveolitis
	<i>Aspergillus glaucus</i> Gruppe	Es liegen nur Einzelbefunde vor
	<i>Aspergillus nidulans</i>	Es liegen nur Einzelbefunde vor
Botrytis	<i>Aspergillus niger</i>	Allergie Typ 1 und Typ 3 auslösend
	<i>Aspergillus versicolor</i>	Es liegen nur Einzelbefunde vor
	<i>Botrytis cinerea</i>	allergisches Asthma bei Beschäftigten in Gewächshäusern nachgewiesen
Cladosporium	<i>Cladosporium</i> spp.	Asthma und Heuschnupfen sowie Allergien vom Typ 1
Paecilomyces	<i>Paecilomyces variotii</i>	Auslöser der allergischen Alveolitis
Penicillium	<i>Penicillium aurantiogriseum</i> var. <i>aurantiogriseum</i>	Es liegen nur Einzelbefunde vor
	<i>Penicillium brevicompactum</i>	Es liegen nur Einzelbefunde vor
	<i>Penicillium chrysogenum</i>	Es liegen nur Einzelbefunde vor
	<i>Penicillium glabrum</i>	Allergische Erkrankungen bei Holz- und Korkverarbeitung (Korkarbeiter-Alveolitis)
	<i>Penicillium roqueforti</i>	Allergie Typ 3 auslösend
Rhizopus	<i>Rhizopus microsporus</i> var. <i>rhizopodiformis</i>	Holzarbeiter-Alveolitis
	<i>Rhizopus stolonifer</i>	Allergie Typ 3 bei Arbeitern im Sägewerk nachgewiesen

Nach neueren Einschätzungen des Gefährdungspotenzials der Schimmelpilze werden alle als potentiell allergen angesehen. Die wichtigsten Vertreter, der in den **Tabellen 2-3 bis 2-5** genannten Spezies wurden aus verschiedenen Stammsammlungen als Referenzstämme für die Untersuchung an gelagerten Holzhackschnitzeln erworben.

Mykotoxine

Aus den nachgewiesenen Schimmelpilzarten lassen sich Schlussfolgerungen auf das wahrscheinliche Vorkommen von Mykotoxinen ziehen. Mykotoxine sind Produkte des Sekundärstoffwechsels der Schimmelpilze, deren Vorhandensein zwar an das Erscheinen des Pilzes gebunden ist, dessen Menge jedoch in keinem direkten Verhältnis zum Keimgehalt des Pilzes steht. So können Mykotoxine noch nachgewiesen werden, ohne dass der Pilz noch nachweisbar ist. Andererseits ist das Vorhandensein des Pilzes noch kein sicheres Indiz für Mykotoxine. Entwicklungszustand des Pilzes sowie Feuchtegehalt, Temperatur, pH-Wert und Substrat sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Mykotoxinbildung. Mykotoxine dienen primär bei der Auskeimung von Sporen dem eigenen Schutz vor unerwünschten Mikroorganismen.

Erst seit 1960 beschäftigt sich die Wissenschaft intensiv mit diesen sekundären Stoffwechselprodukten und ihren Wirkungen auf Mensch und Tier. Zu dieser Zeit kam es in England zum Massensterben von Truthähnen, die mit Erdnussmehl versetztes Futter aufgenommen hatten. Zur Zeit sind ca. 400 Pilzmetabolite bekannt, die von rund 200 Schimmelpilzarten produziert werden können (Roth et al., 1990). Je weiter die Analytik auf diesem Gebiet fortschreitet, um so mehr Verbindungen mit toxischen Wirkungen werden beschrieben. Toxine werden hauptsächlich von 5 Pilzgattungen gebildet: Aspergillus, Penicillium, Fusarium, Alternaria und Claviceps. In nahezu 60 Ländern sind für einige Lebens- und Futtermittel für bestimmte Mykotoxine ge-

setzliche Grenzwerte festgelegt bzw. vorgeschlagen worden. An EU-einheitlichen Grenzwerten wird gearbeitet. In **Tabelle 2-6** sind die z.Z. gültigen Grenzwerte für Lebensmittel zusammengestellt. Holz und Holz hackschnitzel sind mykotoxologisch nicht bearbeitet. In der Literatur finden sich keine Hinweise zu Aufarbeitungsmethoden.

Tabelle 2-6: Gegenwärtig geltende Grenzwerte für Mykotoxine in Lebensmitteln (Wolff, 2001/2002)

Mykotoxin	Lebensmittelgruppe	Mykotoxin-VO in Vorbereitung	Diät-VO
Zearalenon	Speisegetreide, Getreideerzeugnisse, Teigwaren Brot- und Backwaren mit Getreideanteilen über 33 %	50 µg/kg 50 µg/kg	20 µg/kg 20 µg/kg
Deoxynivalenol	Speisegetreide, Getreideerzeugnisse, Teigwaren Brot- und Backwaren mit Getreideanteilen über 33 %	0,5 mg/kg 0,35 mg/kg	0,1 mg/kg 0,1 mg/kg
Ochratoxin A	Kindernahrung – Beikost Säuglingsanfangsnahrung Weitere Produktgruppen in Vorbereitung		0,03 µg /kg
Aflatoxin B1, B2, G1, G2	Kindernahrung-Beikost		0,05 µg /kg
Aflatoxin M1	Kindernahrung-Beikost Milch	0,05 µg /kg	0,01 µg /kg

Pilzsporen

Während der Lagerung von Holz sind nicht nur die sich entwickelnden Schimmelpilze und ihre Metaboliten interessant, sondern auch die Sporen der Pilze, die sich in der Luft ausbreiten können. Luftgetragene Partikel sind allgegenwärtig und werden im alltäglichen Sprachgebrauch unter dem Begriff „Staub“ zusammengefasst. Die Konzentration in der Luft ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Während am Nordpol der Luftgehalt nur 300 Partikel pro cm³ beträgt (Seedorf et al, 2002) steigt die Zahl über den Ozeanen bereits um das Doppelte an. In einer Großstadt steigt der Partikelgehalt auf ca. 50.000 Teilchen pro cm³ Luft an (<http://www.quarks.de/schmutz/0.1htm>). Viele Partikel sind anorganischer Natur, industriell-urban geprägt oder natürlichen Ursprungs. Ca. 25 % des partikulären atmosphärischen Gesamtgehaltes werden von sog. primären biologischen Aerosolpartikel gebildet. Matthias-Maser et al., 2000; Fuzzi et al., 1997 schließen dabei nicht aus, dass unter nebeligen Witterungsbedingungen Wassertröpfchen als Kulturmedium für vermehrungsfähige Bakterien oder Hefen dienen und somit auch sekundäre biologische Aerosolpartikel entstehen können.

Die Bioaerosole sind sehr komplex aufgebaut. Sie bestehen aus unbelebten und belebten Bestandteilen, deren Größe zwischen 0,5 und 100 µm variieren kann (Hirst, 1995). Zu den unbelebten Bestandteilen gehören neben Staub (DFG, 2001) auch Nebel und Rauch, zu den belebten Teilen Bakterien, Pilze, Viren, Milben und Protozoen.

Häufig sind belebte und unbelebte Bestandteile zusammengelagert und bilden sog. Cluster (Müller et al., 1977). Die Partikel sind oft Substrat und Verbreitungseinheit in einem. Luftgetragene Mikroorganismen sind zu ca. 80 % an Partikel angelagert und können durch ihre Stoff-

wechselprodukte die Qualität des Bioaerosols verändern. Einem Bioaerosol kann demnach ein Potenzial an Infektiosität, Allergenisierung, Toxizität oder auch pharmakologischer Wirkung besitzen.

Alle Aerosole, also auch die Bioaerosole, unterliegen den gleichen aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten, die ihre Verbreitung und Sedimentation bestimmen. Dazu gehören neben der BROWN'schen Bewegung das Gravitationsgesetz. Ferner beeinflussen elektrische Kräfte, Temperaturgradienten, Strömungsverhältnisse und elektromagnetische Wellen das Verhalten der Bioaerosole. Luftfeuchtigkeit und Temperatur haben darüber hinaus Einfluss auf die hygroscopischen Eigenschaften sowie auf Größe, Masse, Dichte und Form der Partikel.

Madelin et al. (1992) konnten bei luftgetragenen Sporen von *Aspergillus flavus* im Zuge eines Temperatur- und Feuchtigkeitswechsels von 20 °C und 40 % relative Luftfeuchtigkeit auf 38 °C und 95 % relativer Luftfeuchtigkeit eine 15 % -ige Größenzunahme beobachten. Bei Pilzsporen der Gattung *Cladosporium* kam es bei einer Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % auf 100 % zu einer Sporenvergrößerung von 1,8 µm auf 2,3 µm (Reponen et al. 1996). Diese Veränderungen führten bei Schweinen zu einer 20 % bis 30 % -igen Depositionszunahme im Atemtrakt.

Auch Mykotoxine, Sekundärmetabolithe der Schimmelpilze, können an Carrier gebunden durch die Luft übertragen werden, im Innern der Pilzsporen sich verbreiten oder an luftgetragenes Pilzmycel gebunden sein. Die Mykotoxinkonzentrationen in den Sporen und dem Mycel sind sehr unterschiedlich und von der jeweiligen Art abhängig. Bei den Species *Aspergillus niger* und *Aspergillus fumigatus* erwiesen sich vor allem die Sporen als die wichtigsten Toxinträger (Palmgren et al., 1986). Das hat erhebliche inhalationstoxikologische Konsequenzen, da die Sporen in isolierter Form alveolengängig sind.

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsprogramm

Die ersten Lagerversuche wurden bereits im Jahr 1998 durchgeführt (n = 8). Der überwiegende Teil der Versuche erfolgte jedoch im Rahmen des von der FNR geförderten Projektes im Zeitraum 2001 bis 2003 (n = 23, exkl. Laborgefäß-Versuch).

Als Material wurde vorzugsweise Pappel, aber auch Weide und Kiefer aus der Energieplantage des ATB bzw. aus der Region verwendet. Die frisch gefällten Bäume wurden mit verschiedenen Aggregaten auf mittlere Längen von 16 bis 156 mm gehackt. In zwei Versuchen blieben sie unzerkleinert.

Die Lagerung des Versuchsmaterials erfolgte bis auf eine Ausnahme in Behältern oder Haufen von 5 l bis 2.000 m³ Volumen, mit und z.T. ohne Regenschutz, und erstreckte sich in der Regel über einen Zeitraum von einem Jahr.

Je nach Versuchseinstellung wurden in Abhängigkeit von Zeit und Ort folgende Parameter in der Schüttung gemessen bzw. analysiert:

- Temperatur in Material und Umgebung
- Wassergehalt des Materials
- Verlust an Trockenmasse während der Gesamtlagerdauer
- Anzahl und z.T. Spezies der thermophilen Schimmelpilze
- Anzahl und z.T. Spezies der thermophilen Pilzsporen
- Gesamtvolumen und -masse des Lagermaterials

Neben den im Versuchsprogramm (**Tabelle 3-1**) dargestellten Versuchen wurden noch folgende zusätzliche Messungen durchgeführt:

- Ermittlung der Sorptionsisothermen von Pappel
- Messung des zeitlichen Trocknungsverlaufes von Pappel-Astabschnitten unterschiedlichen Durchmessers und Hackschnitzeln unterschiedlicher Länge bei verschiedenen Temperaturen
- Messung des Strömungswiderstandes von Pappel-Hackgut unterschiedlicher Länge, Längenverteilung und Lagerdauer

Tabelle 3-1: Programm der Lagerversuche, inkl. der Vorversuche

Lagerform	Be- ginn	Lager- dauer	Messgrößen*											
			Pappel			Weide			Kiefer					
		Monate	Fein- hackschn. ≤ 30 mm	Mittel- hackschn. 31-50 mm	Grob- hackschn. 51-100 mm	Hack- stücke 101-200 mm	Ganz- bäume ~ 6000 mm	Mittel- hackschn. 31-50 mm	Ganz- bäume ~ 4500 mm	Fein- hackschn. ≤ 30 mm	Mittel- hackschn. 31-50 mm			
Laborgefäß	L ₂	09/02	28x 2 - 5	7x 2 - 5	7x 2 - 5									
5 dm ³	L ₂	03/03	5x 2 - 5	5x 2 - 5	5x 2 - 5	5x 2-5				4x 2 - 5				
Lagersilo	S ₂	09/01	1 - 5	1 - 5		1 - 5								
1,5 m ³	S ₁	01/02	1 - 5	1 - 5	1 - 5	1 - 5		1 - 5						
	S ₂	03/03	1 - 5	1 - 5	1 - 9	1 - 5								
Lagerbox	B ₀	02/98	2x 1 - 4/9			1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	1 - 4	
≥ 14 m ³	B ₂	02/99	2x 1 - 9			1 - 4								
10 m ³	B ₁	01/02	1 - 9	1 - 9	1 - 9	1 - 9								
Lagerhaufen	H ₀	10/00												
≥ 18 m ³	H ₂	10/00												
	H ₀	02/02	1 - 9	1 - 5	1 - 9									
	H ₁	02/02	1 - 9		1 - 9									
	H ₀	01/03												

* Messgröße:

- 1 Temperatur
- 2 Wassergehalt
- 3 Masseverlust
- 4 Gesamt-Pilze und -Hefen
- 5 Pathogene Pilze
- 6 Gesamt-Sporen
- 7 Pathogene Sporen
- 8 Lagervolumen
- 9 Lagermasse

Lager

- Laborgefäß L ... Zylindrischer Placrylbehälter Ø 140 mm, 320 mm hoch bei konst. Umgebungstemp.
 Lagersilo S ... Zylindrischer Behälter Ø 1 m, 2 m hoch mit thermisch isolierten Wänden
 Lagerbox B ... Quaderförmige Lagerbox 2x2 m, 2,5 m hoch mit thermisch isolierten Wänden
 Lagerhaufen H ... Dreiecksmitte 3 m hoch, 4 m breit, 3 m lang (Kiefer jedoch größer)

Index: 0 ... ohne Regenschutz (Ausnahme: H_{0s}, mit Bodenluftkanal)

1 ... mit Regenschutz

2 ... mit Regenschutz und luftdurchlässigem Boden

3.2 Versuchsmaterial

3.2.1 Hackgutbereitstellung

Für die im Institut für Agrartechnik e.V. durchgeführten Untersuchungen gab es zwei Quellen für Frischholz zur Hackschnitzelherstellung. Zum einen wurden aus der turnusmäßigen Ernte auf der institutseigenen Feldholzplantage die dort geernteten Bäume verwendet und zum anderen bestand die Möglichkeit, von Pappelflächen auf den ehemaligen Rieselfeldern zwischen Spuendorf und Güterfelde (im Süden von Berlin) Frischholz zu erhalten. Bei dem aus der institutseigenen Plantage gewonnenem Holz handelt es sich um Weide (Sorte *Salix viminalis* 83/21/12) und Pappel (Sorte Japan 105 und Sorte NE 42) und bei dem Holz aus Güterfelde um Pappel (Sorte UNAL VII, Dänemark). Letztere wurden 1996 von der Firma Umweltforschung GmbH Großbeeren angepflanzt. Sowohl die am ATB, als auch die in Güterfelde geernteten Stämme, hatten in Brusthöhe (120 cm) einen Durchmesser von bis zu 15 cm.

Für die in Zempow (im Norden Brandenburg) durchgeführten Untersuchungen mit Waldholz, wurde das Hackgut aus den Kiefernwäldern vor Ort gewonnen. Hierbei handelte es sich um Baumkronen und Material, das bei der Durchforstung anfiel.

Die zur Hackgutherstellung benötigten Pappeln und Weiden wurden manuell mit der Kettensäge geschnitten und am Standort abgelegt. Nach einer Lagerzeit von maximal 2 Tagen wurden die Stämme mit dem Anbauhacker der Fa. Laimet gehackt (**Bild 3-1**).



Bild 3-1: Hackschnitzelerzeugung mit dem Anbauhacker der Fa. Laimet auf der Energieplantage des ATB

Feinhackschnitzel

Mit dem institutseigenen Scheibenrad-Anbauhacker Typ „Farmi“ wurden Feinhackschnitzel mit einer mittleren Länge von bis zu 23 mm hergestellt (**Bild 3-2**).



Bild 3-2: Scheibenrad Anbauhacker, Typ Farmi

Grob- und Mittelhackschnitzel

Zur Herstellung von Grobhackschnitzel wurde ein Anbauhacker Typ HP 21 der finnischen Fa. Laimet eingesetzt. Die hierfür gewählte austauschbare Schnecke hatte eine Steigung von 110 mm. Damit sollten Hackschnitzel mit einer mittleren Länge von 80 mm hergestellt werden (**Bild 3-3**).



Bild 3-3: Schneckenhacker der Fa. Laimet, Pappelernte 2002 in der Energieplantage des ATB

Zur Herstellung von Mittelhackschnitzel wurde ebenfalls der Anbauhacker der finnischen Fa. Laimet eingesetzt. Die hierfür gewählte Schnecke hatte eine Steigung von 65 mm pro Windung. Damit sollten Hackschnitzel mit einer mittleren Länge von 50 mm hergestellt werden.

(Grob-) Hackstücke

Für die größte Hackgutfraktion wurde eine Hacklänge von 150 mm bis 200 mm gewählt. Diese wurden zunächst von Hand und ab dem Jahr 2001 mit einem stationären Kurzholz-Scherhacker der Fa. Diemer aus Albstadt hergestellt (**Bild 3-4**). Bei einer kontinuierlichen Beschickung des Scherhackers, welche manuell erfolgt, wird eine einheitliche Länge des Hackgutes erreicht.



Bild 3-4: Scherholzhacker der Fa. Diemer

3.2.2 Hackschnitzelabmessungen

Für die Ermittlung der Hackschnitzellänge wurden zwei Verfahren verwendet. Zum einen die Siebmessung und zum anderen die Handmessung. Die dabei erhaltenen Daten wurden aufbereitet und in geeigneten Diagrammen dargestellt. Als statistische Parameter wurden der Modalwert als häufigster Wert und der Medianwert als Zentralwert aller Messwerte berechnet.

Da die Hackschnitzel im allgemeinen keine Würfelform haben, sondern lang und flach sind, sind die Ergebnisse von Sieb- und Handmessung nicht identisch. Bei der Handmessung liegen sowohl Median- als auch Mittelwert über den entsprechenden Siebwerten, weil bei der Siebung die Hackstücke die Siebebene oft senkrecht passieren (**Tabelle 3-2**).

Feinhackschnitzel

Eine Probe, der mit dem Scheibenhacker erzeugten Feinhackschnitzel, wurde mit einem Labor-Plansichter der Firma Retsch gesiebt, und mit einem Maßstab die Länge der Hackschnitzel gemessen, nach Klassen sortiert und ausgewogen. Die erhaltenen Messwerte ergeben die im Diagramm (Bild 3-5) dargestellten Summenhäufigkeitskurven. Als Bezug wurden die Grenzwerte der Ö-Norm M 7133 herangezogen .

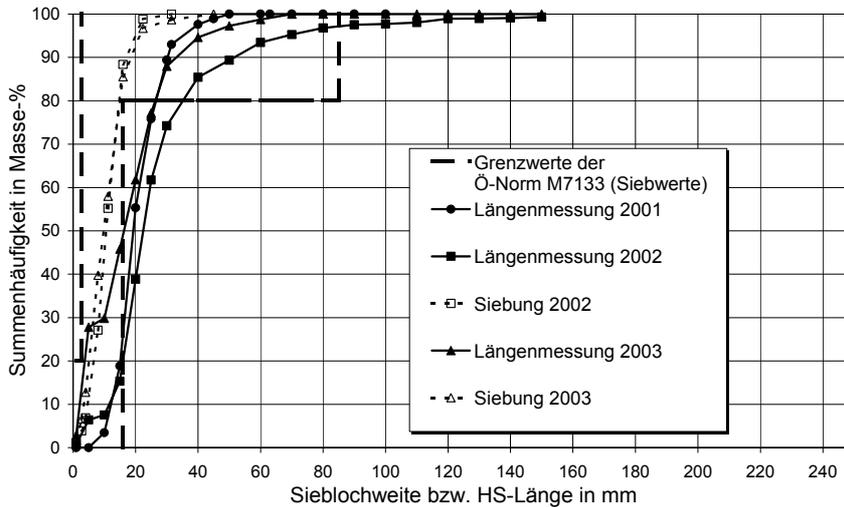


Bild 3-5: Summenhäufigkeit der Pappel-Feinhackschnitzel, Saison 2002, nach Siebung und Handzählung (entspricht Ö-Norm Klasse G 30)

Mittelhackschnitzel

Die Mittelhackschnitzel wurden bis zum Jahr 2002 mit einem stationären Trommelhacker der Firma „Jenz“ hergestellt. Später wurde der Schneckenhacker der Firma Laimet eingesetzt. Bei der Darstellung der Summenhäufigkeiten wurden als Bezug die Grenzwerte der Ö-Norm M 7133 für G 50 herangezogen (Bild 3-6).

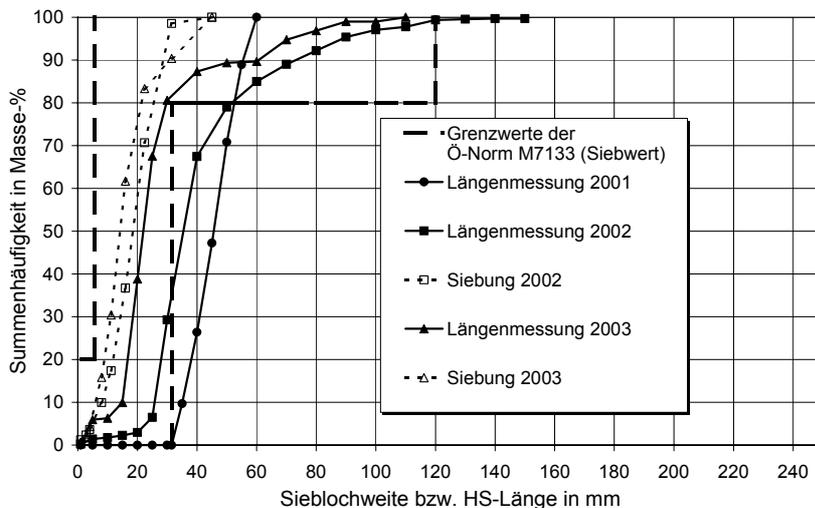


Bild 3-6: Summenhäufigkeit der Pappel-Mittelhackschnitzel, Saison 2002, nach Siebung und Handzählung (entspricht Ö-Norm Klasse G 50)

Grobhackschnitzel

Die Grobhackschnitzel wurden ebenfalls mit dem Schneckenhacker der Firma „Laimet“ hergestellt. Hierfür wurde lediglich eine Schnecke mit einer anderen Steigung eingesetzt (vgl. Kap. 3.2.1) (**Bild 3-7**).

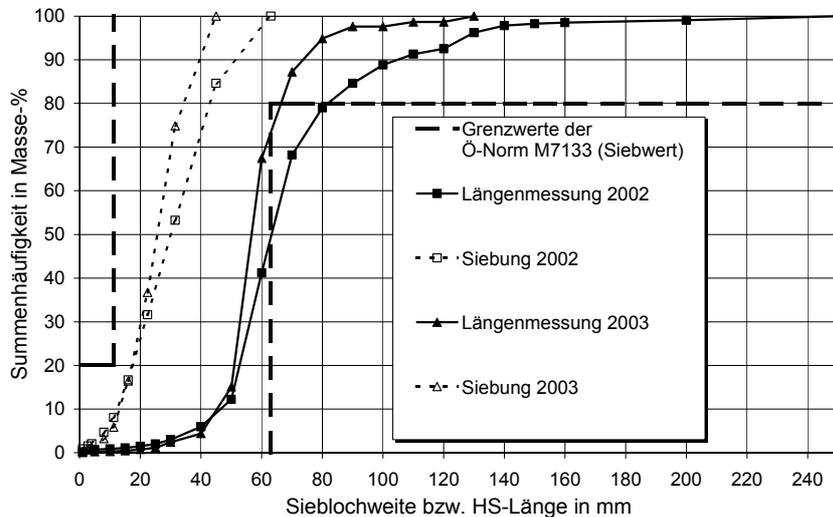


Bild 3-7: Summenhäufigkeit der Pappel-Grobhackschnitzel, Saison 2002, nach Siebung und Handzählung (entspricht Ö-Norm Klasse G100)

Hackstücke

Die Hackstücke wurden bis zum Jahr 2001 per Hand hergestellt. Ab dem Jahr 2001 wurde ein stationärer Kurzholz-Scherhacker der Firma Diemer aus Albstadt eingesetzt. Die Siebung erfolgte bis 63 mm Siebmaß mit einem Plansichter. Für die Hackstücke mit größeren Abmessungen wurde ein Zweiebenen-Rüttelsieb eingesetzt (Kap. 3.4.1). Bei der Darstellung der Summenhäufigkeit wurden als Bezug die Grenzwerte der Ö-Norm 7133 für G 100 herangezogen (**Bild 3-8**).

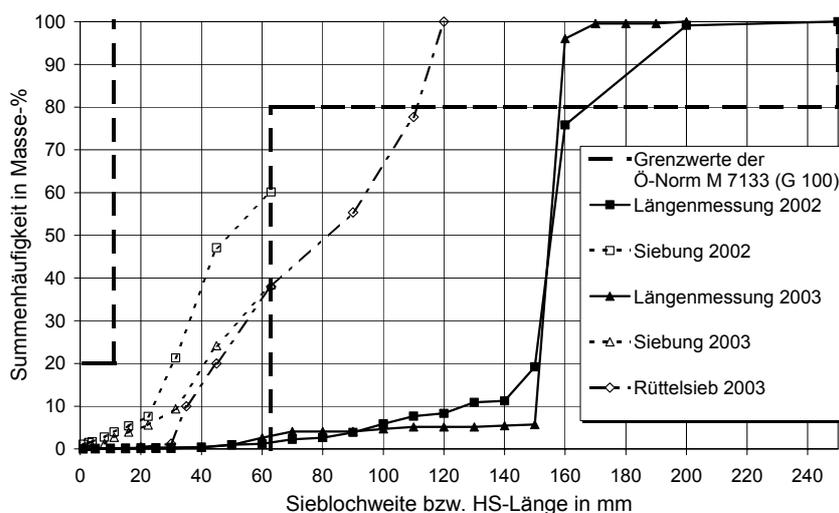


Bild 3-8: Summenhäufigkeit der Pappel-Hackstücke, Saison 2002, nach Siebung und Handzählung

Kiefern hackschnitzel

Parallel zu den Versuchen am ATB wurde 2003 in Zempow ein Lagerhaufen mit Mittelhackschnitzel aus Waldholz (Kiefer) untersucht. Zur Herstellung der Waldholzhackschnitzel wurde wie am ATB der Hacker der Firma Laimet eingesetzt (**Bild 3-3**). Bei der Darstellung der Summenhäufigkeit wurde Bezug auf die Klasse G 50 der Ö-Norm genommen (**Bild 3-9**).

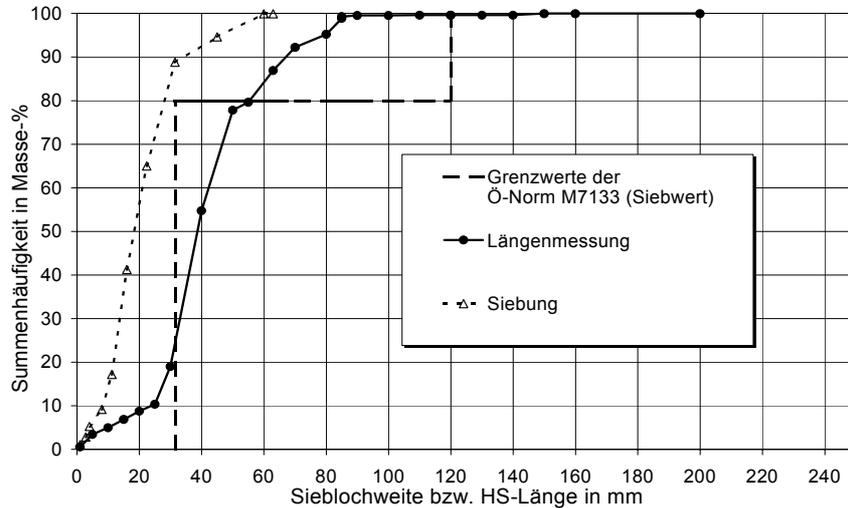


Bild 3-9: Summenhäufigkeit der Mittelhackschnitzel aus Waldholz (Kiefer), Zempow 2003, nach Siebung und Zählung (Ö-Norm Klasse G 50)

Weiden hackschnitzel

Weidenhackschnitzel wurden mit den selben Hackern hergestellt, wie die Pappelhackschnitzel. Aufgrund der unterschiedlichen Stammform des Weidenholzes (Weidenruten) ergab sich besonders bei grobem Hackgut eine etwas andere Geometrie der Hackschnitzel. Bei der Darstellung der Summenhäufigkeit wurden als Bezug die Grenzwerte der Ö-Norm 7133 für G 50 herangezogen (**Bild 3-10**).

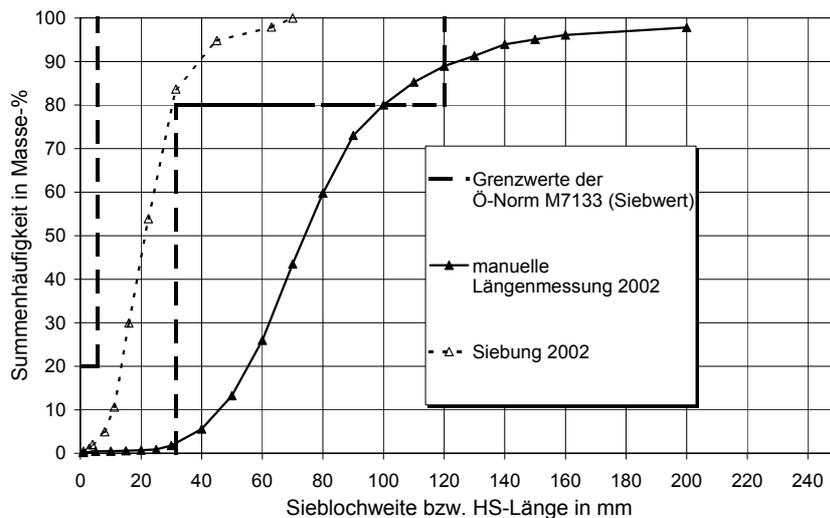


Bild 3-10: Summenhäufigkeit Mittelhackschnitzel aus Weide, Saison 2002, nach Siebung und Handzählung (Ö-Norm Klasse G 50)

Tabelle 3-2: Mittlere Hackschnitzellängen der verwendeten Versuchsmaterialien

Jahr	Fraktion	Hacker-Typ	Siebung		Manuelle Messg.		Verhältnis	
			Lochweite I_s		Länge I_m		I_s / I_m	
			Median in mm	Modal in mm	Median in mm	Modal in mm	Median	Modal
1999	Pappel FHS	Frami CH150	10	-	16	-	0,62	-
	Pappel MHS		-	-	37	-	-	-
	Pappel HST	per Hand	-	-	120	-	-	-
	Pappel GHS		-	-	95	-	-	-
2001	Pappel HS 20	Frami CH150	-	-	19	20	-	-
	Pappel HS 50	Hacker Jenz	-	-	46	50	-	-
	Pappel HS 150	Diemer MSK 25 - 15	-	-	150	150	-	-
2002	Pappel HS 20	Frami CH150	11	16	23	20	0,48	0,8
	Pappel HS 50	Laimet HP 21	19	22	36	40	0,51	0,55
	Pappel HS 80	Laimet HP 21	30	45	63	60	0,47	0,75
	Weide HS 50	Laimet HP 21	22	31,5	63	60	0,29	0,53
	Pappel HS 150	Diemer MSK 25 - 15	50 *	> 63 *	156	160	0,32	0,39
2003	Pappel HS 20	Frami CH150	10	16	16	20	0,59	0,8
	Pappel HS 50	Laimet HP 21	15	16	22	20	0,65	0,8
	Pappel HS 80	Laimet HP 21	26	31,5	56	60	0,46	0,53
	Pappel HS 150	Diemer MSK 25 - 15	82	80	155	160	0,53	0,5

P – Pappel, W – Weide

* Werte nur eingeschränkt gültig (größte Sieblochweite: 63 mm Kantenlänge)

Vergleicht man die Summenhäufigkeiten der unterschiedlichen Hackschnitzelfraktionen aus verschiedenen Jahren, ergeben sich trotz gleicher Technologie geringe Unterschiede in den Verteilungen. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Unterschiede auf die Antriebswellen- und Vorschubdrehzahl des Hackers zurückzuführen sind (**Bild 3-12**).

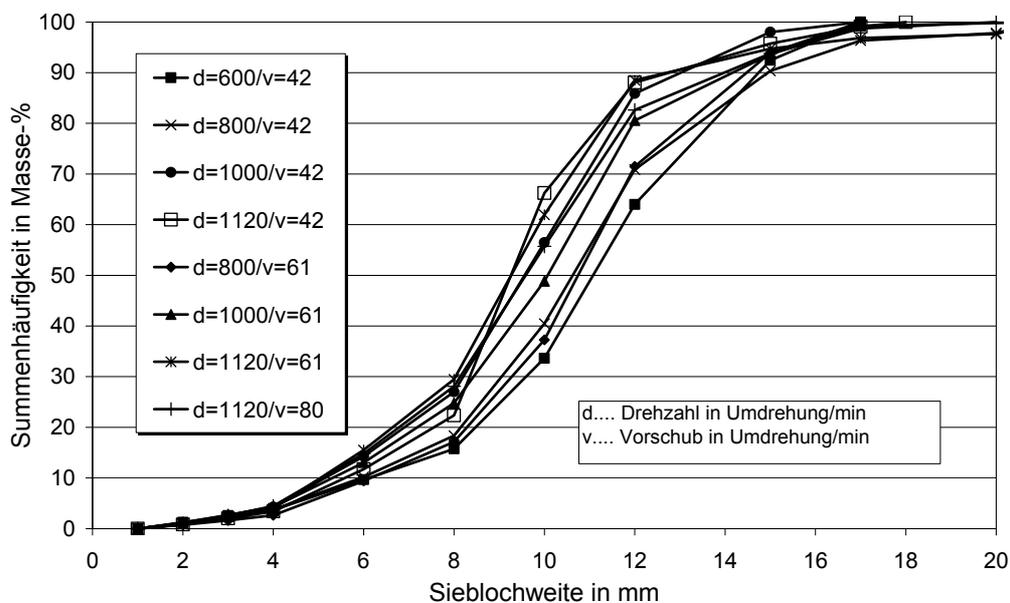


Bild 3-12: Summenhäufigkeit der Hackschnitzellänge in Abhängigkeit von Antriebswellen- und Vorschubdrehzahl des Scheibenradhackers Frami CH 150

Die unterschiedlichen Durchmesser der zu hackenden Stämme führen zu einer wechselnden Belastung der Antriebsmaschine und somit zu einer schwankenden Antriebswellen- und Vorschubdrehzahl des Hackers. Bei steigender Menge des zu verarbeitenden Materials kommt es zu einer Verringerung der Antriebswellendrehzahl. Bei gleichbleibender Vorschubdrehzahl führt dies automatisch zu größeren Hackschnitzeln. Untersucht wurde dieses Verhalten am Scheibenrad-Anbauhacker Farmi CH 150 (**Bild 3-13**).

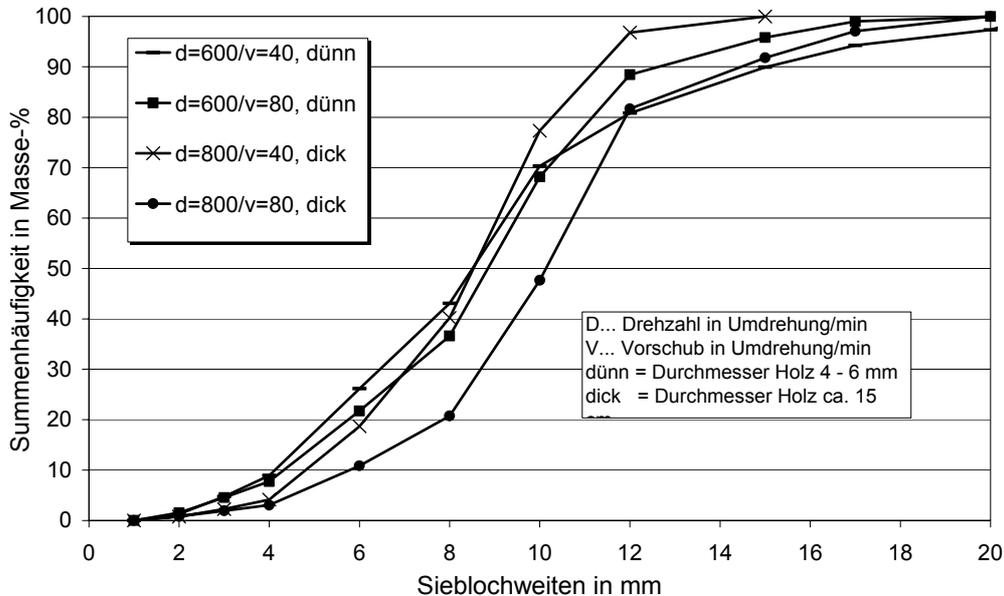


Bild 3-13: Summenhäufigkeit der Hackschnitzzellänge in Abhängigkeit vom Holzdurchmesser bei dem Scheibenradhacker Farmi CH 150

3.3 Aufbau der Versuchsstände

3.3.1 Laborgefäße

Die Laborgefäße sind zylindrische Behälter aus Piacryl, Höhe 320 mm, Durchmesser 140 mm, $V = 5 \text{ dm}^3$). Der untere Teil des Zylinders ist mit einer runden Platte fest verschlossen. Am oberen Teil ist eine Lochplatte, bestehend aus 12 symmetrisch angeordneten Bohrungen, Durchmesser 10 mm, auf das eingebrachte Versuchsmaterial aufgelegt (**Bild 3-14**). Das verwendete Gefäßmaterial hat eine Stärke von 10 mm. Die Befüllung der Laborgefäße erfolgte von oben, wobei das Versuchsmaterial manuell leicht verdichtet wurde. Bei der Auslagerung wurde das gesamte Versuchsmaterial in keimarme Schalen geschüttet, vermischt und anschließend die benötigte Menge abgenommen.

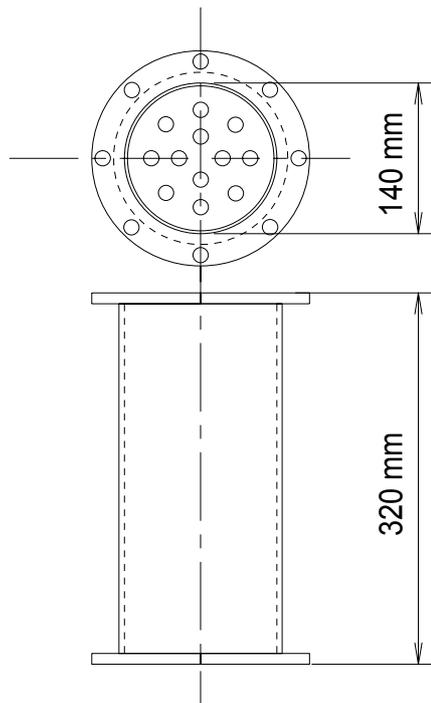


Bild 3-14: Laborgefäß

3.3.2 Lagersilos

Konstruktiver Aufbau

Die Basis für die 5 Lagersilos bilden zwei zylindrische Dämmkörper mit unten und oben angeflanschten Kegelstümpfen. Ein Dämmkörper, Innendurchmesser 102 cm, Länge 100 cm, besteht aus PU-Hartschaum, welcher an der Außenseite mit glasfaserverstärktem Polyester ummantelt ist und an der Innenseite mit Glasvlies ausgekleidet ist. Die Kegelstümpfe bestehen aus verzinktem Stahlblech und verjüngen sich von 102 cm auf 20 cm. Auf dem Boden des Dämmkörpers ist ein Drahtgitter eingelegt, welches den unteren Abschluss für die Schüttung bildet (Lochmaß 20 x 20 mm, Drahtstärke 2 mm; bei der kleinsten Hackgut-Fraktion zusätzlich mit einem PVC-Gitter, 10 x 10 mm unterstützt). Für die Versuche mit unten geschlossenem Silo wurde eine Styroporplatte auf das Drahtgitter gelegt. Am unteren Kegelstumpf besteht durch ein Anschlussstück die Möglichkeit ein flexibles Verbindungsrohr an einen Lüfter anzuschließen. Am oberen Kegelstumpf kann ein Rohr zur Aufnahme von Luftgeschwindigkeitsfühlern und eine Regenhaube montiert werden. Die Lagersilos stehen auf jeweils 4 Stützfüßen, die am unteren Kegelstumpf befestigt sind. Zur besseren Stabilität wurden die Lagersilos mit vier Spannstäben versehen, welche vor dem Entleeren der Behälter gelöst werden. Die Konstruktion wurde so ausgelegt, dass das komplette Lagersilo mit einem Gestellkran angehoben, mittels Kraftmessdose gewogen und auch transportiert werden konnte (**Bilder 3-15** und **3-16**).

Messtechnischer Aufbau

Die Untersuchungen beim Lagerversuch im Modellmaßstab dienten der Erfassung von Einflussgrößen, die bei halbtechnischen- oder bei Großversuchen nicht oder nur mit hohem Aufwand erfasst werden können. Es wurden Temperatur, Feuchtegehalt, Luftwiderstand, Füllstand und Masse der Füllung sowie deren Veränderung über der Zeit gemessen.

Mittels eines Datenloggers wurden ständig die Temperaturen an 5 Positionen in jedem Behälter erfasst. Gleichzeitig erfolgte die Messung des Feuchtegehaltes und der Luftgeschwindigkeit am Ausgang in jedem Lagersilo (oberhalb der Hackschnitzel). Als Eingangswerte wurden die Außenluftfeuchte und Außentemperatur gemessen.

Darüber hinaus wurde in definierten Zeitabständen der Luftströmungswiderstand in der Hackschnitzelschüttung ermittelt. Hierfür wurde ein Gebläse angeschlossen und der Differenzdruck und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft gemessen.

Die Bestimmung der Masse erfolgte durch Anheben des gesamten Behälters mit einem Gestellkran und einer daran befestigten Kraftmessdose. Die Höhe der Schüttung wurde mit einem Bandmaß bestimmt. Die Messwerte wurden manuell erfasst und weiterverarbeitet.

Die von den Silos ausgehenden Messleitungen wurden in einem Schaltkasten zusammengeführt und von einem Datenlogger erfasst. Der eingesetzte Datenlogger, Typ 5990-0, Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, ist ein modulares Gerät, welches mit zusätzlichen Messstellenumschalterkarten bestückt ist und 39 Eingangskanäle besitzt. Die Daten wurden jede Minute erfasst, als Stundenmittelwerte abgespeichert und einmal pro Woche mit einem V24-Kabel vom Datenlogger auf ein Notebook übertragen.

Als Temperaturfühler wurden PT100-Fühler der Genauigkeitsklasse B mit 4-Drahtmessung eingesetzt. Die Fühlerelemente wurden in Edelstahlrohre, Durchmesser 10 mm, Länge 700 mm, eingebaut und durch die Wand des Behälters in einer Tiefe von 50 cm im Inneren des Lagergutes platziert. Zur besseren Wärmeübertragung wurde die Messspitze des Fühlerelementes in der Kappe des Einstechfühlers von Wärmeleitpaste umgeben. Diese Eigenkonstruktion war erforderlich, da es keine den vorhandenen Geometrien entsprechenden Einstechfühler im Fachhandel gab. Für spätere Untersuchungen an größeren Schüttungen können diese Fühler auch verlängert werden.

Luftfeuchte und Lufttemperatur wurden mit kombinierten Fühlern gemessen, wobei die Temperatur mit NTC – Fühlern, Genauigkeit ± 1 °C im Bereich von 0 °C bis 70 °C erfasst wurde. Die relative Luftfeuchte wurde mit einem kapazitiven Feuchtefühler, Genauigkeit ± 2 % (bei Nenn-temperatur 25 °C), erfasst. Das kapazitive Messverfahren wurde gewählt, da dieses auch bei niedrigen Temperaturen einsetzbar ist. Diese kombinierten Fühler wurden in einer Höhe von 195 cm waagrecht durch die Behälterwand eingebaut. Zur Messung der Luftbewegung wurden thermoelektrische Strömungssensoren, Messbereich 0,01 bis 1 m/s in das Abluftrohr der Silos eingebaut.

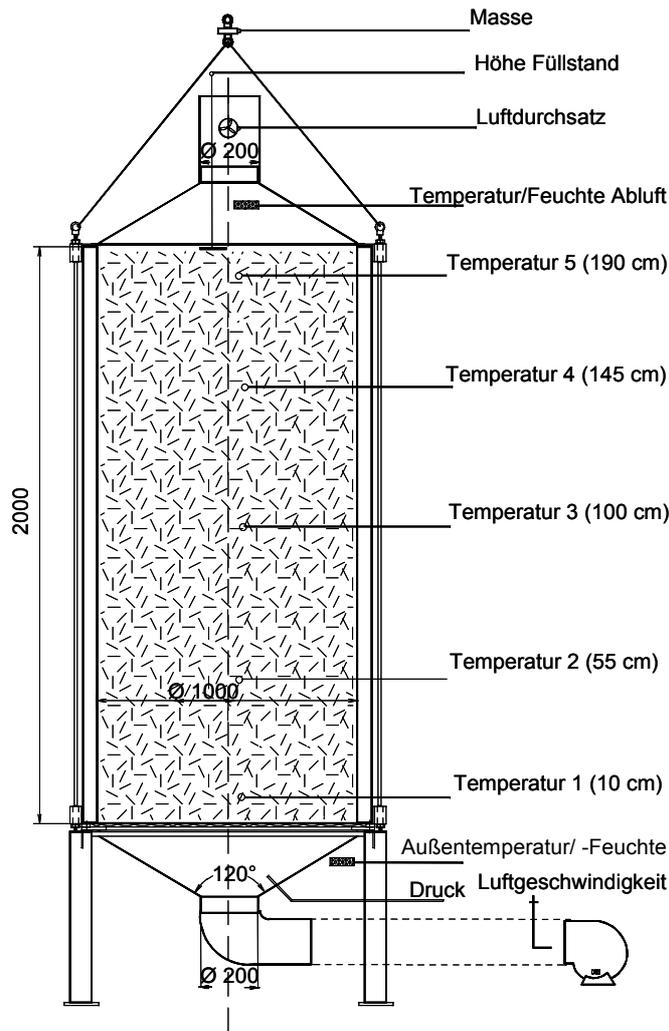


Bild 3-15: Skizze eines Silos mit Messfühlern



Bild 3-16: Silos mit Messfühlern und Kran

3.3.3 Lagerboxen

Die überdachten und zeitweilig nicht überdachten Lagerboxen liegen unmittelbar nebeneinander, sind durch Betonplatten voneinander getrennt und an der Vorderseite teilweise mit Holzbohlen verschlossen. Damit entsteht ein Lagerraum mit einer Grundfläche von 2 x 2 m und einer Füllhöhe von 2,5 m ($V \approx 10 \text{ m}^3$). Da mit dieser Versuchsanordnung die Vorgänge im Inneren eines großen Lagerhaufens simuliert werden sollten, wurden die Lagerboxen an den vier Innenseiten mit 5 cm dicken Styroporhartschaumplatten belegt. Die Überdachung befand sich ca. 0,5 m über der Hackgutoberfläche und wurde mit Trennwänden versehen, um den Austausch von Pilzsporen zwischen den einzelnen Lagerboxen zu verhindern. In die vordere Holzbohlenwand wurden in vier verschiedenen Höhen (10 cm über dem Boden und dann in 60 cm Abständen) jeweils zwei verschließbare Probenentnahmeöffnungen waagrecht in einem Abstand von 60 cm eingefügt. Um laufende Temperaturmessungen mit Einstechtemperaturfühlern zu ermöglichen, wurden in die Holzwand mittig 4 Bohrungen eingebracht (30 cm über den Boden und darüber in 60 cm Abständen) (**Bilder 3-17 bis 3-19**).

3.3.4 Lagerhaufen

Um den realen Bedingungen der Haufenlagerung in der Praxis nahe zu kommen, wurden auf dem Gelände des ATB im Abstand von 30 m vier Dreiecksmieten mit einer Schütthöhe von ca. 3 m, einer Basisbreite von 4 m und einer Länge von 3 m mit verschiedenen Hackformaten aufgeschüttet ($V \approx 18 \text{ m}^3$). Da während der Lagerzeit Messungen im Inneren der Haufen durchgeführt werden sollten, wurden die Haufen an den Stirnseiten durch gedämmte Holzwände begrenzt (Dämmung aus 50 mm Styroporhartschaumplatten). Um den Einfluss der Erdfeuchte zu verringern, wurde unter der Hackschnittelschüttung eine wasser- und diffusionsdichte Baufolie abschüssig zu den Seiten verlegt.

Von den 4 Lagerhaufen wurden zwei überdacht, um den Einfluss von Niederschlägen zu erfassen. Diese Dächer wurden aus einer stabilen Holzkonstruktion errichtet und mit Kunststoffbahnen versehen. Der Abstand zwischen Dachfläche und Haufenoberkante betrug ca. 1 m. Zur Untersuchung der Sporenausbreitung in der Luft konnten die Dachhälften entfernt werden. Zur Probenentnahme wurden in die Stirnwände vierzehn 10 x 10 cm große, verschließbare Öffnungen angebracht. Zum Einsetzen der Temperaturmessfühler wurden mittig 5 Bohrungen angebracht (**Bilder 3-20** und **3-21**).

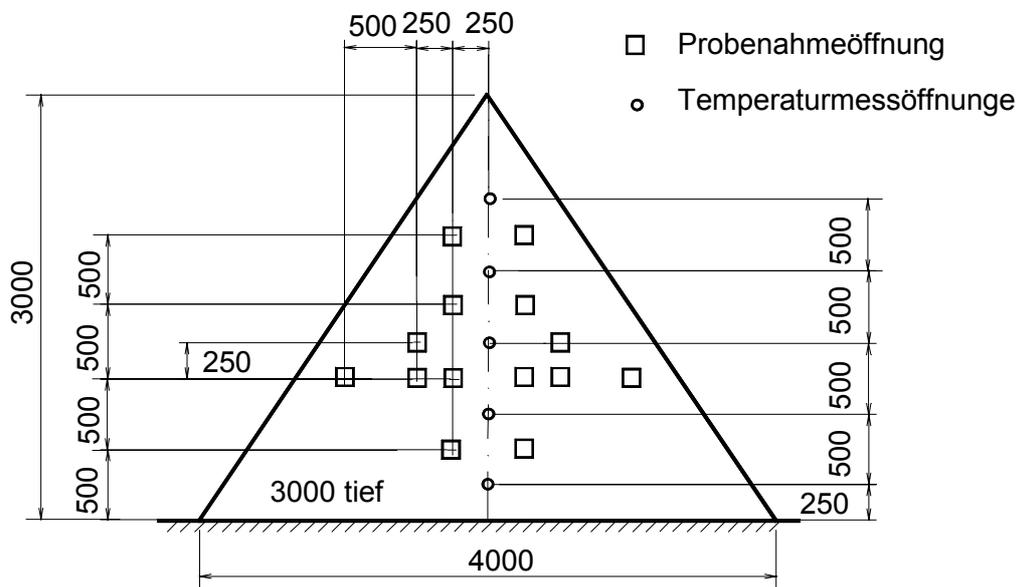


Bild 3-20: Anordnung der Messstellen und Entnahmeöffnungen an der Stirnseite der Lagerhaufen



Bild 3-21: Abgedeckte und nicht abgedeckte Lagerhaufen mit Messstellen und Entnahmeöffnungen an der Stirnseite, Saison 2002

Als weiterer Lagerversuch wurde ein größerer Lagerhaufen von ca. 70 m³ aus Hackschnitzel der Fraktion HS 36 am Feldrand errichtet (im weiteren auch als Zusatzversuch bezeichnet). Die Grundfläche betrug ca. 6 x 8 m bei einer Schütthöhe von 2,5 m. Ein auf dem Boden befindlicher Luftkanal mit dreieckförmigem Querschnitt (Breite 1,0 m; Höhe 0,6 m), der in Längsachse des Haufens angeordnet war, diente der Verbesserung der Durchlüftung der Schüttung. Die Temperaturmessungen wurden über dem Lüftungskanal und seitlich außerhalb des Bereiches des Kanals durchgeführt (**Bild 3-22**).

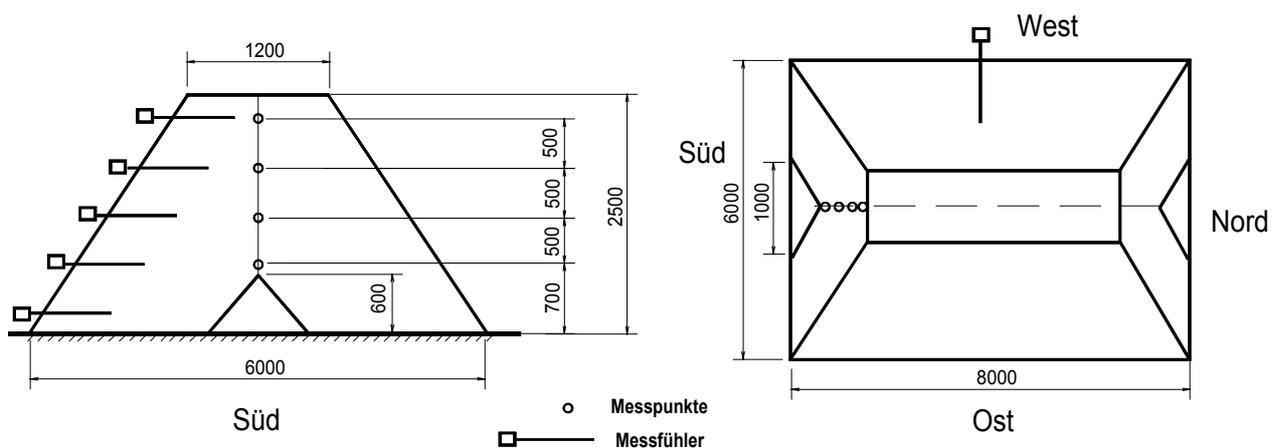


Bild 3-22: Anordnung der Messstellen im Zusatzversuch (70 m³-Haufen)



Bild 3-23:
70 m³-Pappel-
haufen (HS 36) am
Rande der Ener-
gieanlage des
ATB,
Saison 2002

Außerdem wurden umfangreiche Schimmelpilzanalysen an der Oberfläche und im Innern des Haufens durchgeführt (**Bild 3-23**). Dazu wurden am Feldrand gelagerte Pappelhackschnitzel vom Format HS 22 in einem Raster von 1 m x 1 m auf der Süd- und Ostseite auf der Oberfläche in 25 cm und in 50 cm Tiefe untersucht. Die Probenahmen erfolgten vom 29.7. bis 16.8.2002. Zu einem Probenahmezeitpunkt wurden gleichzeitig die Proben in drei verschiedenen Tiefen genommen (Probenahmepunkte in **Bild 3-24**). Von den Proben wurden folgende Parameter erfasst: Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Zahl der mesophilen (20 °C) und thermophilen (37°C) Schimmelpilze, Luft- und Haufentemperatur sowie die Gutfeuchte.

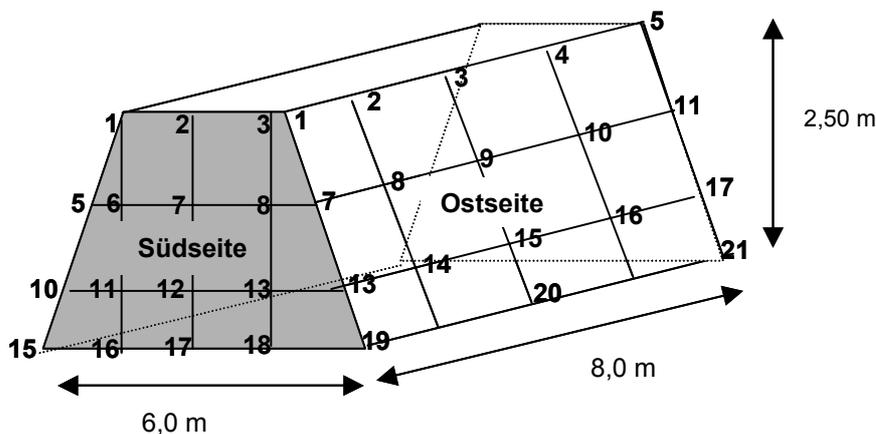


Bild 3-24:
Raster für die
Probenahmen
im 70 m³-Haufen
(1. Messreihe)

In einem zweiten zusätzlichen Versuchsansatz sollte die Wirkung eines Belüftungsschachtes auf verschiedene Parameter betrachtet werden. Dazu wurden in dem 70 m³-Haufen an der Westseite von außen zum Belüftungsschacht im Abstand von ca. 50 cm nach innen in einem Raster von 1 m x 1 m Proben genommen und untersucht (Probenahmepunkte in **Bild 3-25**).

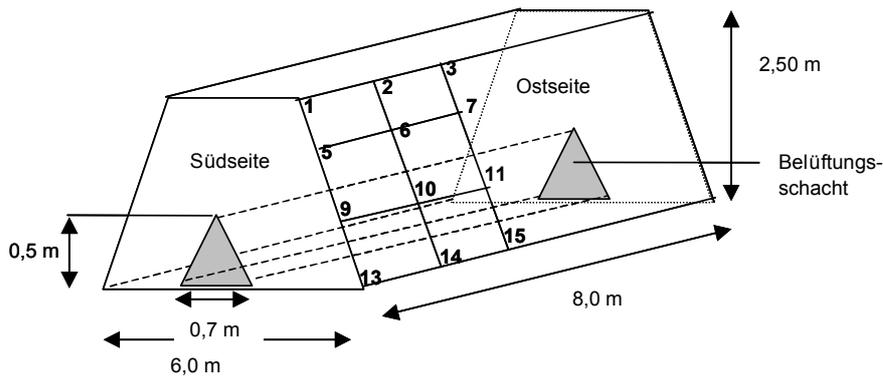


Bild 3-25: Schema zur Probenahme am 70 m³-Haufen (2. Messreihe)

Darüber hinaus wurde im Jahr 2003 ein ca. 2000 m³-Kiefernhackschnittelhaufen in der Nähe von Zempow (Nordbrandenburg) untersucht. Dieser Lagerhaufen hatte eine Länge von ca. 50 m, eine Breite von ca. 15 m und eine Höhe von ca. 6 m (**Bild 3-26**). Während der Einlagerung wurden auf einer senkrechten Linie im Inneren des Lagerhaufens 10 Bilanzbeutel mit eingelagert. Innerhalb dieser Bilanzbeutel wurden Minidatenlogger für laufende Temperaturmessungen untergebracht. In bestimmten Zeitabschnitten wurden Proben zur Bestimmung des Trocknungsverlaufes genommen und Temperaturmessungen an den Seiten und auf der Oberfläche des Haufens mit Einstechtemperaturfühlern durchgeführt.



Bild 3-26: 2000 m³-Lagerhaufen mit Kiefernhackschnittel (HS 38) bei Zempow, Saison 2003

3.4 Messungen und Analysen

3.4.1 Partikelgrößenmessung

Die mit den verschiedenen Hackern hergestellten Hackschnittel und Hackstücke wurden im Trockenschrank getrocknet. Anschließend wurde über eine manuelle Längenmessung mittels Lineal und einer Siebanalyse mit einem handelsüblichen Labor-Plansichter, Typ KS 1000 der Fa. Retsch (Siebdurchmesser 40 cm), die Größenverteilung ermittelt. Bei einer Schwingfre-

quenz von 70 Hz wurden die Proben 10 Minuten lang gesiebt. Die bei der Siebanalyse eingesetzten Siebgrößen sind der **Tabelle 3-3** zu entnehmen.

Tabelle 3-3: Siebgrößen für die Siebanalyse

Lochdurchmesser in mm	1,0	2,8	4,0	8,0	11,2	16,0	22,4	31,5	45,0	63,0	>63
-----------------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	-----

Da die Siebe des Labor-Plansichters nur bis zu einer Lochweite von 63 mm vorhanden waren, wurden die Grobhackstücke zusätzlich mittels eines Zweiebenen-Rüttelsiebes ausgemessen (**Bild 3-27**).



Bild 3-27: Zweiebenen-Rüttelsieb mit austauschbaren Sieben für die Fraktionen > 63 mm

3.4.2 Temperaturmessung

Die Temperatur ist ein wichtiger Indikator für die Prozesse, die innerhalb einer Hackschnitzelschüttung ablaufen. Um diese Prozesse erfassen zu können, wurden bei allen Lagertypen umfangreiche Temperaturmessungen vorgenommen.

In den Lagersilos wurden an 5 Messpunkten im Zentrum des Lagergutes die Temperaturen gemessen und stündlich die Messwerte als Mittelwerte im Datenlogger gespeichert. Die Messwerterfassung erfolgte mittels Vierdraht-PT100-Fühler mit einem Fehler von 0,8 %. In jedem Lagersilo wurden die Messpunkte in einer Höhe von 10 cm, 55 cm, 100 cm, 145 cm und 190 cm angebracht. Zusätzlich wurde die Luftfeuchte und die Außentemperatur gemessen und aufgezeichnet (**Bilder 3-28/rechts** und **3-15**).

Die Temperaturmessungen an den Lagerboxen erfolgten durch Einstechfühler, ebenfalls auf der Basis eines Vierdraht-PT100-Fühlers, mit einer 1,20 m langen Lanze. Bei dieser in zirka einem Meter Tiefe durchgeführten Messung können Randeinflüsse ausgeschlossen werden. Die 4 Messpunkte waren mittig in einem Abstand von 60 cm, beginnend mit 30 cm über dem Erdboden, in einer senkrechten Linie angeordnet. Nach dem Einstechen der Messfühler wurden nach 10 Minuten mit einem Handmessgerät der Firma AHLBORN die Messwerte abgelesen (s. Kapitel 3.3).



Bild 3-28: Temperaturmessung in Lagerhaufen (links) und Silos (rechts) (Saison 2002)

Die Temperaturmessung in den Lagerhaufen (18 m³-Dreiecksmieten) erfolgte in gleicher Weise, wie die Messungen an den Lagerboxen (**Bild 3-28/links**). Erstmals wurden bei den begleitenden Untersuchungen des Lagerhaufens mit Waldholzhackschnitzel in Zempow, Minidatenlogger, Typ Tiny der Firma Gemini Data Loggers Ltd (England) eingesetzt. Diese wurden zur besseren Auffindbarkeit, in die Bilanzbeutel eingelegt und im Lagerhaufen eingelagert. Zum erhöhten Schutz vor Feuchte wurden sie zusätzlich mit Klebeband abgedichtet (**Bild 3-29**). Dennoch gab es zwei Ausfälle.

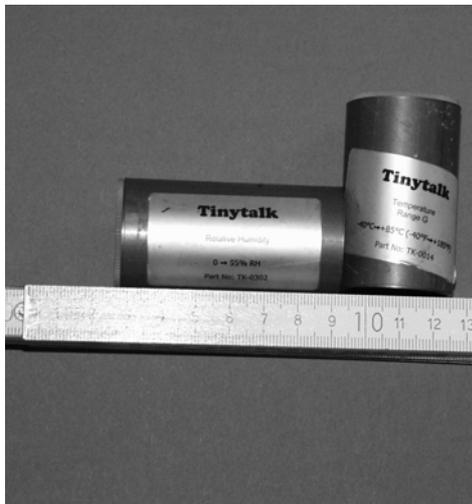


Bild 3-29: Miniaturdatenlogger zur Temperaturmessung im 2000 m³-Lagerhaufen mit Kiefernholzhackschnitzel, rechts im Bilanzbeutel, Saison 2003.

Um die Wirkung der Wärmedämmung und den Einfluss der Außentemperatur auf die Haufentemperatur zu ermitteln, wurde die Temperatur in Abhängigkeit vom Wandabstand in den Lagerhilos und Lagerboxen bestimmt (**Bild 3-30** und **Bild 3-31**).

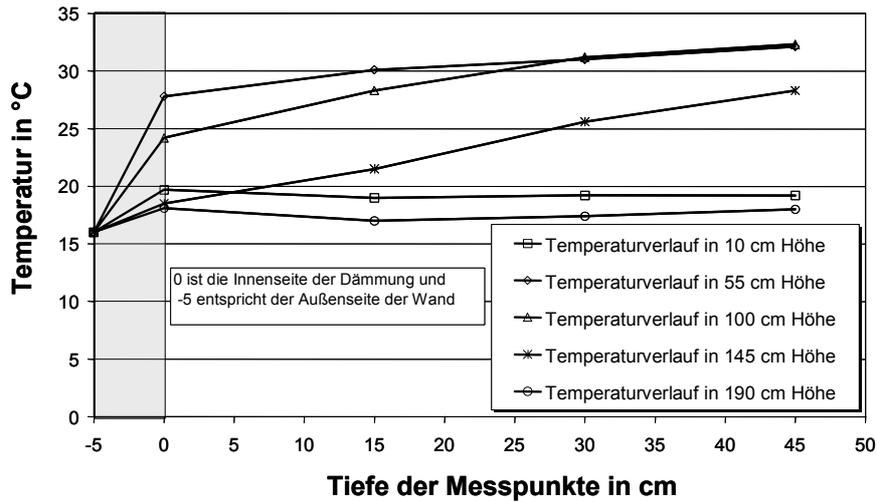


Bild 3-30: Temperatur in Abhängigkeit vom Wandabstand bei der Lagerung von Pappel-Feinhackschnitzel in den 1,5 m³-Lagersilos (Saison 2002)

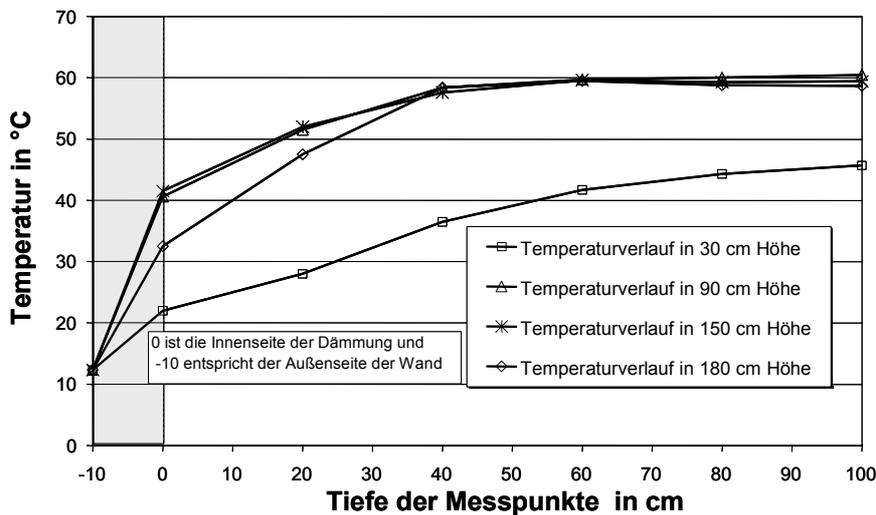


Bild 3-31: Temperatur in Abhängigkeit vom Wandabstand bei der Lagerung von Pappel-Feinhackschnitzel in den 10 m³-Lagerboxen (Saison 2002)

3.4.3 Masse- und Dichtemessungen

Die Dichte der Schüttungen wurde durch Messung von Masse und Volumen ermittelt. Bei den Lagersilos wurde die Gesamtmasse mittels Kran und Kraftmessdose ermittelt (**Bild 3-32**). Der Füllstand wurde mit einem Bandmaß, einer Positionsstange und einem Tellerstempel in Bezug zur Oberkante der Lagersilos gemessen. Nach Wägung der leeren Silos wurde das Nettogewicht bestimmt. An den Lagerboxen wurde der Füllstand der verschiedenen Fraktionen mit Hilfe eines Bandmaßes erfasst.



Bild 3-32: Bestimmung der Gesamtmasse der Lagersilos mittels Kran und Kraftmessdose

3.4.4 Strömungsmessungen

Die Untersuchungen in den Lagersilos zur Durchlüftung erfolgten mit einem hochempfindlichen thermoelektrischen Strömungsmesser, der Luftbewegungen im Bereich von 0,01 bis 1,0 m/s erfassen kann. Angeordnet wurde dieser Sensor im Zuluftrohr des jeweiligen Lagersilos.

Zur Messung des Luftwiderstandes in der Schüttung wurde der untere Trichter der Lagersilos mit einem Gebläse verbunden. Das Gebläse konnte über eine Drehzahlregelung in seiner Leistung verändert werden. Die Erfassung des Luftwiderstandes erfolgte über die Messung des Differenzdruckes unter- und oberhalb des Gutes, und in einem geraden Teil des Zuluftrohres wurde mittels Staurohrmanometer die Luftgeschwindigkeit erfasst.

Der Luftwiderstand wurde einen Tag nach dem Befüllen, einmal während der Lagerzeit und einmal zum Ende der Lagerung gemessen. Messungen in kürzeren Zeitintervallen wurden nicht durchgeführt, da jede Messung die Temperaturverhältnisse im Lagersilo gestört hat.

3.4.5 Verlustbestimmung

Mit Hilfe so genannter Bilanzbeutel wurden die Lagerverluste ermittelt. Ein Bilanzbeutel besteht aus einem Kunststoff-Netz sack (Kartoffelsäcke, ca. 25 g), befüllt mit jeweils ca. 500 bis 1000 g Hackgut. Vor der Einlagerung wurden sie gewogen, nummeriert und aus vergleichbarem Versuchsmaterial die Eingangsfeuchte bestimmt. Anschließend wurden sie in verschiedenen Höhen und Lagen im Hackgut mit eingelagert. Bei der Auslagerung wurde die Gesamtmasse jedes Beutels und der Wassergehalt der Hackschnitzel bestimmt. Die Änderung der Eigenmasse des Beutels (ca. 20,5 g) wurde vernachlässigt.

Lagersilos

In den Lagersilos wurden auf Höhe der Temperaturfühler (10 cm, 55 cm, 100 cm, 145 cm und 190 cm) 20 Bilanzbeutel untergebracht (**Bild 3-33**).



Bild 3-33: Bilanzbeutel bei der Einlagerung in die Lagersilos (links) und bei der Auslagerung in den Lagerboxen (rechts), Saison 2002

Lagerboxen

In den 4 Lagerboxen wurden jeweils insgesamt 30 Bilanzbeutel in 6 Ebenen in Höhe der Probenahmeöffnungen (5 cm, 60 cm, 120 cm, 180 cm und 240 cm) eingelagert (**Bild 3-34**).

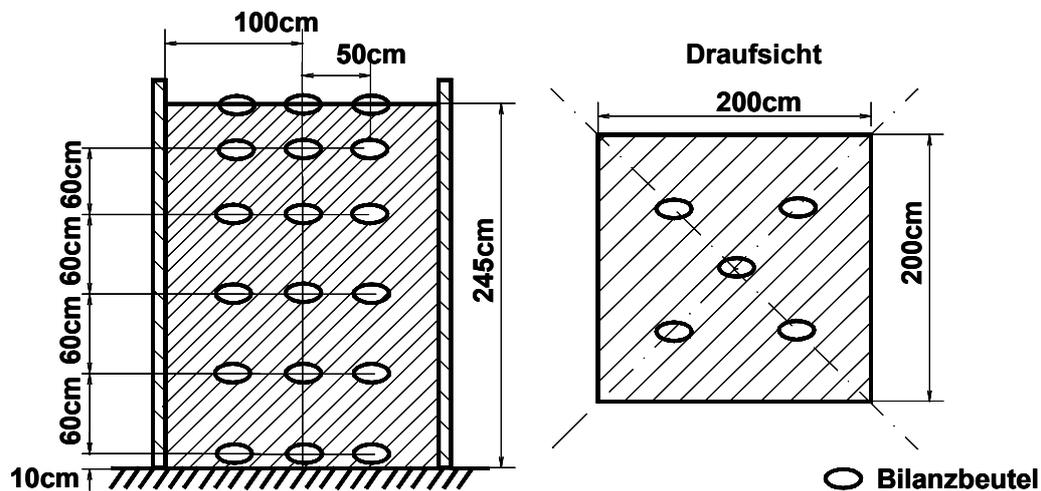


Bild 3-34: Verteilung der Bilanzbeutel in den 10 m³-Lagerboxen (Saison 2002)

Lagerhaufen

In den 18 m³-Haufen wurden beginnend auf Erdbodenniveau insgesamt 66 Bilanzbeutel mit einer Höhendifferenz von jeweils 50 cm und einem Reihenabstand von 75 cm auf sechs Ebenen mit eingelagert. Der Abstand innerhalb einer Reihe betrug 50 cm, so dass entsprechend

der Schüttkegelgeometrie eine Anzahl von 66 Bilanzbeuteln eingelagert wurde (**Bild 3-35**). Zum besseren Verständnis sei hier angeführt, dass sich in der ersten Ebene 21 Bilanzbeutel und in der sechsten Ebene 3 Bilanzbeutel befanden.

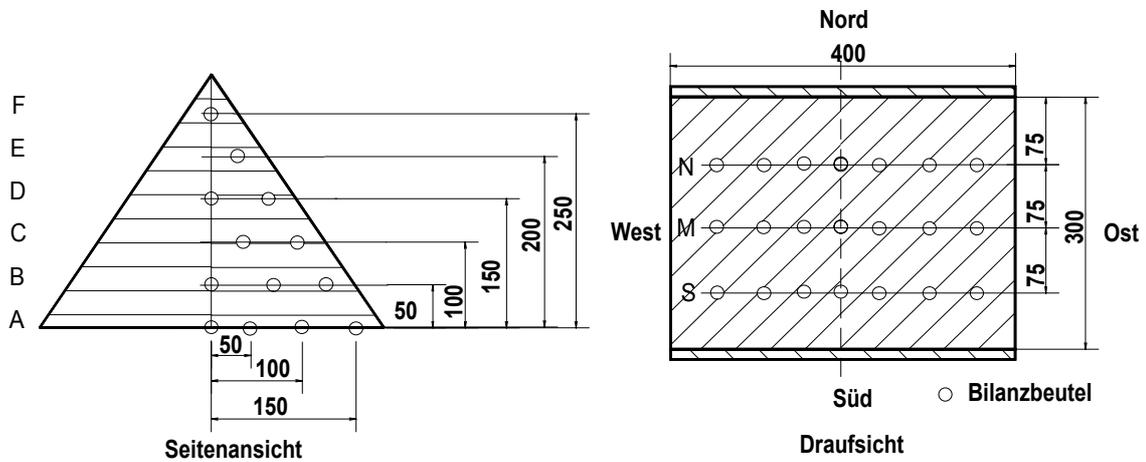


Bild 3-35: Verteilung Bilanzbeutel in den 18 m³-Lagerhaufen 2002 (Maße in cm)

Der 70 m³-Lagerhaufen des Zusatzversuches wurde ebenfalls mit mehreren Bilanzbeutel bestückt. Es wurden 3 Ebenen im Abstand von 70 cm Höhendifferenz (erste Ebene Erdbodenniveau) gewählt. Im rechten Winkel zur längeren Seite des Lagerhaufens wurden 4 Linien im Abstand von 1,5 m zueinander und von einer imaginären Mittellinie gelegt. Der Abstand der Beutel in einer Linie betrug 70 cm, so dass eine Gesamtzahl von 32 Beutel eingelagert wurde (**Bild 3-36**).

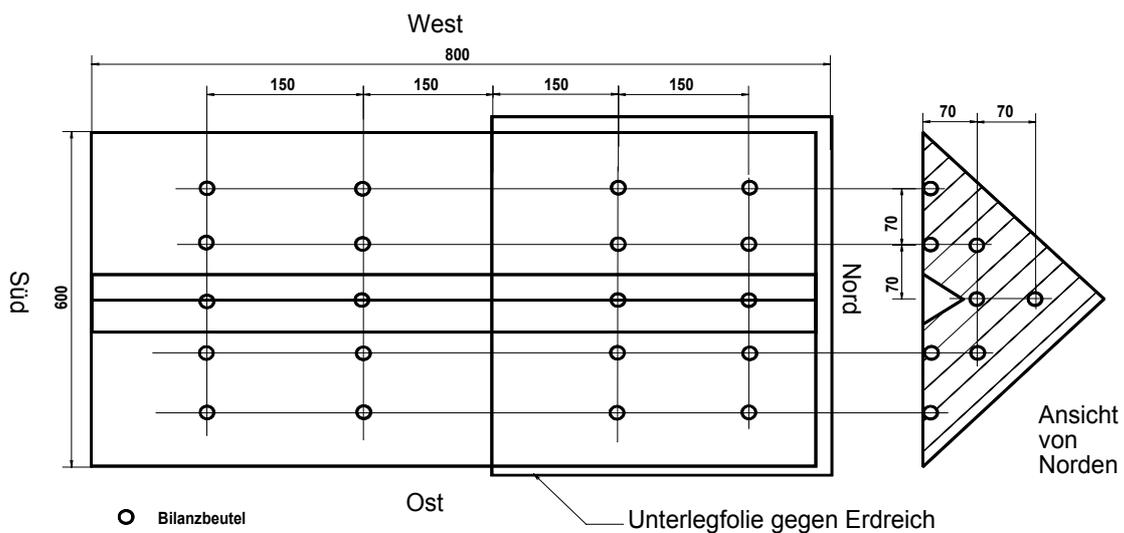


Bild 3-36: Verteilung der Bilanzbeutel im 70 m³-Lagerhaufen des Zusatzversuches 2002 (Maße in cm)

In den 2000 m³-Lagerhaufen mit Kiefernhackschnittel wurden 10 Bilanzbeutel eingelagert. In 5 von diesen Beuteln wurden zusätzlich Minitemperaturlogger untergebracht. Diese Beutel wurden parallel in 5 Ebenen eingelagert. Beginnend bei 1,5 m, wurden jeweils nach 0,5 m zwei weitere Beutel positioniert. Zusätzlich wurde an den Beuteln 2 m Markierungsband befestigt, um das Auffinden bei der Auslagerung zu erleichtern.

Der Trockenmasseverlust Δm_{TM} [kg] und der Verlust an nutzbarer Energie ΔQ [MJ] wurden nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$\Delta m_{TM} = m_{ein} \frac{w_{ein} - 100}{100} - m_{aus} \frac{w_{aus} - 100}{100} \quad (3-1)$$

$$\Delta Q = m_{ein} \cdot H_{u,ein} \frac{w_{ein} - 100}{100} - m_{aus} \cdot H_{u,aus} \frac{w_{aus} - 100}{100} \quad (3-2)$$

mit m_{ein} [kg] Masse des eingelagerten Materials
 m_{aus} [kg] Masse des ausgelagerten Materials
 w_{ein} [%] Wassergehalt des eingelagerten Materials
 w_{aus} [%] Wassergehalt des ausgelagerten Materials

Der hierfür erforderlich untere Heizwert $H_{u,w}$ [MJ/kg] des ein- bzw. ausgelagerten Materials errechnet sich aus dem Heizwert des wasserfreien Materials $H_{u,atro}$ [MJ/kg] und dem jeweiligen Wassergehalt w [%] wie folgt:

$$H_{u,w} = \frac{H_{u,atro}(100 - w) - 2,441 \cdot w}{100} \quad (3-3)$$

mit $H_{u,atro} = 18,5$ MJ/kg für Pappel
 $H_{u,atro} = 18,4$ MJ/kg für Weide
 $H_{u,atro} = 19,5$ MJ/kg für Kiefer

3.4.6 Schimmelpilzuntersuchungen

Beschaffung von Referenzstämmen

Von der Vielzahl der für die Untersuchungen infrage kommenden Schimmelpilzarten wurden aus jeder Gattung besonders potente Spezies ausgewählt und entsprechende Stämme aus verschiedenen Stammsammlungen angefordert (vgl. **Tabelle 3-4**). Die Arbeit mit diesen Stämmen diente auch zur Bestätigung des Untersuchungsganges.

Tabelle 3-4: Übersicht über Referenzstämmen

Referenzstamm	Stammnummer	Herkunft
<i>Absida corymbifera</i>	100.17	Alle Stämme CBS, Niederlande
<i>Aspergillus tamaris</i>	590.68	
<i>Emericella nidulans</i>	112.46	
<i>Aspergillus niger</i>	109.30	
<i>Aspergillus versicolor</i>	111.32	
<i>Botrytis cinerea</i>	144.55	
<i>Cladosporium herbarum</i>	521.68	
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	143.65	
<i>Cladosporium sphaerospermum</i>	191.54	
<i>Eurotium herbariorum</i>	168.63	
<i>Eurotium chevalieri</i>	141.67	
<i>Paecilomyces variotii</i>	295.93	
<i>Penicillium aurantiogriseum</i> var. <i>Aurantiogriseum</i>	573.68	
<i>Penicillium brevicompactum</i>	168.44	
<i>Penicillium chrysogenum</i>	478.84	
<i>Penicillium glabrum</i>	213.28	
<i>Penicillium roqueforti</i>	167.91	
<i>Rhizomucor pusillus</i>	294.63	
<i>Rhizopus microsporus</i> var. <i>Rhizopodiformis</i>	607.73	
<i>Rhizopus stolonifer</i>	263.28	
<i>Aspergillus flavus</i>	1959	DSMZ, Deutschland
<i>Aspergillus fumigatus</i>	819	

Ermittlung des Gehalts an Schimmelpilzen

Der prinzipielle Untersuchungsgang zur Identifizierung der Schimmelpilzgattungen ist in **Bild 3-37** dargestellt und wurde während der ersten Lagerungsperiode zunächst mit den Referenzstämmen getestet und danach an natürlich kontaminiertem Lagerungsmaterial verifiziert. In der ersten Bearbeitungsphase des Projektes wurde vor allem der Nährbodenauswahl große Bedeutung zugemessen.

Bei den ersten Untersuchungen wurden zunächst folgende Gattungen berücksichtigt: *Absidia*, *Aspergillus*, *Botrytis*, *Cladosporium*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Rhizomucor* und *Rhizopus*.

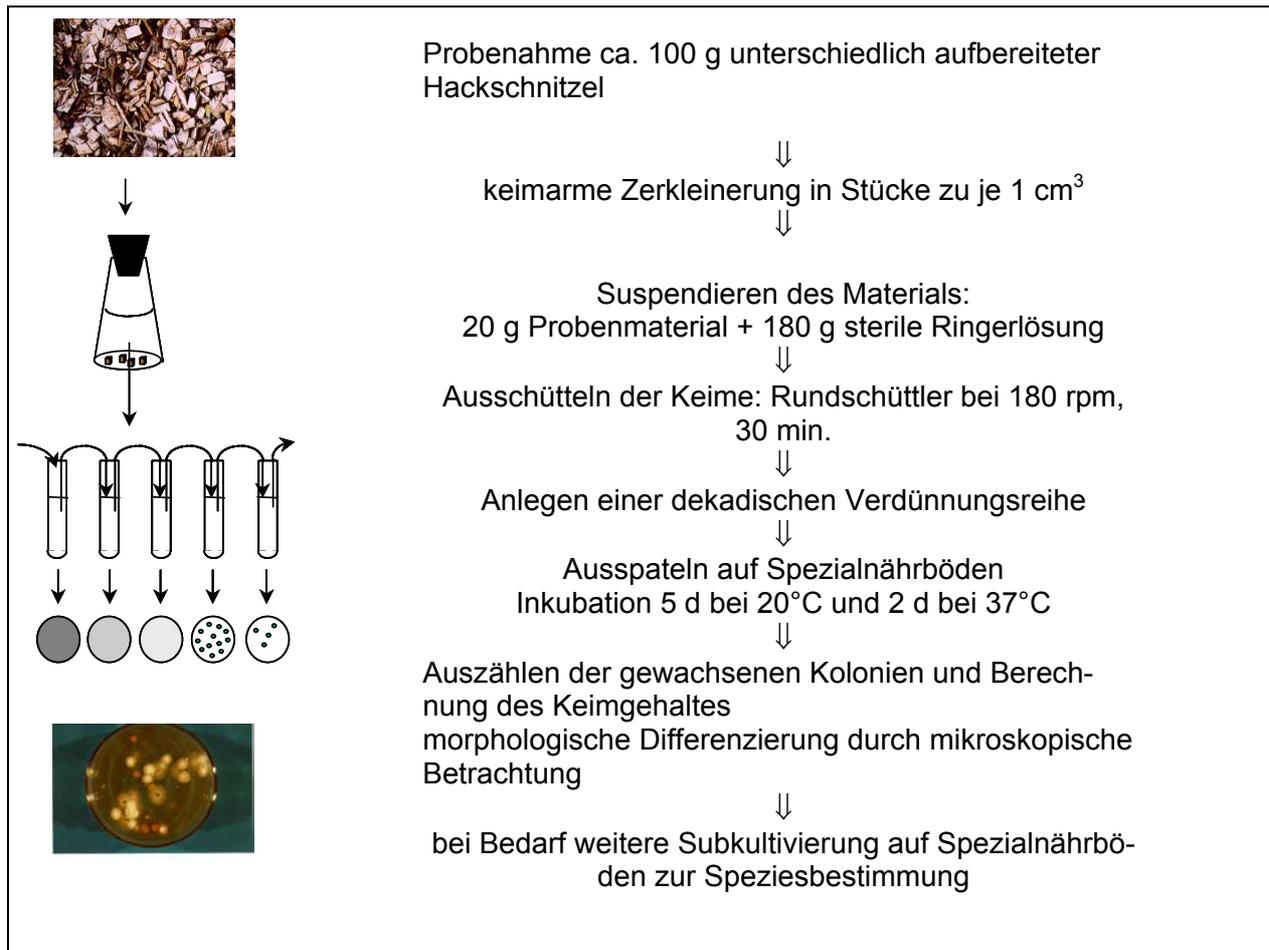


Bild 3-37: Untersuchungsang zur Ermittlung des Keimgehaltes und zur Bestimmung der Schimmelpilzspezies in Holzhacksnitzeln

Nach keimarmen Zerkleinerung des Probenmaterials in Stücke zu 1 cm³, werden 20 g Holzstücke in 180 ml Ringerlösung ausgeschüttelt (Rundschtüttler, 180 rpm), dekadisch verdünnt und auf Malzextraktagar mit 0,01 % Chloramphenicolzusatz sowie auf DG 18 Agar aufgespatelt. Die DG 18 Platten werden nach 7tägiger Inkubation bei 20°C ausgewertet, die Malzextrakt-Platten nach 1 bis 2-tägiger Inkubation bei 37 °C. Die Nährböden haben folgende Zusammensetzung: Malzextraktagar (MERCK): 30 g/l Malzextrakt, 3,0 g/l Pepton aus Sojamehl, 0,1 g/l Chloramphenicol, 15,0 g/l Agar, pH: 5,6, DG 18 (Dichloran-Glycerin Agar, OXOID): 5,0 g/l Pepton, 10,0 g/l Glucose, 1,0 Kaliumdihydrogenphosphat, 0,5 g/l Magnesiumphosphat, 0,002 g/l Dichloran, 15,0 Agar, 50 mg/l Chloramphenicol, pH: 5,6.

Um einen Zusammenhang zwischen dem Keimgehalt an Schimmelpilzen auf den Holzhacksnitzeln und den nachgewiesenen Sporen in der umgebenen Luft nachweisen zu können, wurden beide Untersuchungen bei der gleichen Temperatur durchgeführt. Zur Bestimmung von Schimmelpilzen in der Luft verlangt die TRBA 430 in ihrer Neufassung aus dem Jahr 2001 zur Ermittlung des Gehaltes an mesophilen Schimmelpilzen eine Inkubationstemperatur von 25 °C. In Voruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass sich der thermophile Pilz *A. fumigatus* auf Holzhacksnitzeln bereits nach 2 bis 3 Tagen bei einer Temperatur ab 23 °C auf DG 18 zeigt. Um zu verhindern, dass dieser Schimmelpilz das Ergebnis der Zahl der mesophilen Pilze verfälscht, wurden die Platten nur bei 20 °C inkubiert. Diese Inkubation wurde in einem Kühlbrutschrank der Fa. Binder (KB 400) durchgeführt.

Identifizierung der thermophilen Schimmelpilzarten

Alle bei 37 °C gewachsenen morphologisch unterschiedlichen Kolonien wurden mittels Stereolupe und Mikroskop identifiziert. Hauptsächlich wurden dazu folgende Bestimmungsschlüssel herangezogen: Samson, R. A. et al., 2000 a,b; Pitt, J. I. et al., 1997; Hoog, G.S. et al., 2000; Schipper, M. A. A., 1984.

Es wurden folgende acht Arten auf Malzextraktagar mit Chloramphenicol (MEA-CI) nach 2-tägiger Inkubation bei 37 °C identifiziert: *Absidia corymbifera*, *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus nidulans* (*Emericella nidulans*), *Paecilomyces variotii*, *Rhizomucor pusillus*, *Rhizopus microsporus* und *Rhizopus oryzae*. Darüber hinaus konnten Arten der Gattung *Trichoderma* und *Fusarium* erkannt werden. Eine Artbestimmung erfolgte bei diesen Gattungen nicht.

Absidia corymbifera

makroskopische Identifizierung

Die Kolonien auf MEA-CI überwuchern innerhalb von einer Woche bei 37 °C die ganze Platte. Das Myzel ist flockig, z.T. wie ganz feine Watte und durch die Sporangien lichtgrau bis mittelgrau gefärbt. Die Höhe des Myzels liegt zwischen 5 und 15 mm. Das Substratmyzel ist blass-beige bis farblos.

mikroskopische Identifizierung

Die Sporangioophoren (a) entstehen verzweigt im Myzel und sind meist septiert. Die Columella (b) läuft häufig spitz zu. Ein Drittel von ihr ist vom Träger kragenförmig bedeckt. Die Sporangiosporen (c) sind fast rund und ihre Wände glatt. Im Alter fällt die Columella nach innen von der Spitze her zusammen und eine Trichterform entsteht (**Bild 3-38**).

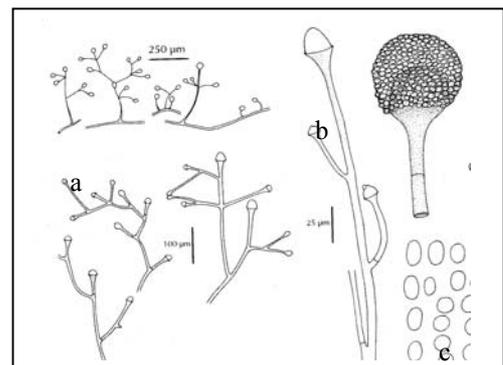


Bild 3-38: *Absidia corymbifera*
(Samson et al., 2000)

Aspergillus fumigatus

makroskopische Identifizierung

Die Kolonien bedecken bei 37 °C auf MEA-CI innerhalb von zwei Tagen oft die gesamte Nährbodenoberfläche. Sie bilden einen dichten türkisfarbenen oder dunkelgrünen, manchmal auch anthrazitfarbenen Filz. Die Kolonien haben einen Durchmesser von 40 - 60 mm. In einigen Fällen bildet sich ein klares Exudat in kleinen Mengen. Die Kolonien sporulieren sehr stark. Manchmal reift nur weißes Myzel, oft mit einem grünen Mittelpunkt, dann sind die Kolonien kleiner als 10 mm im Durchmesser. Das Substratmyzel ist generell farblos bis hellgrau.

mikroskopische Identifizierung

Die Vesikel sind keulenförmig. Die Phialiden (a) entstehen direkt aus dem Vesikel und sind oft grünlich pigmentiert. Die Konidienköpfe (b) sind säulenförmig und die Konidien (c) rau bis feinstachelig (**Bild 3-39**).

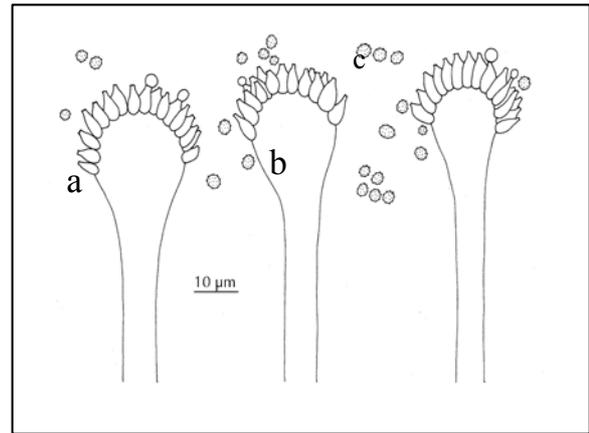


Bild 3-39: *Aspergillus fumigatus*
(Samson et al., 2000)

Aspergillus nigermakroskopische Identifizierung

Auf MEA-CI bei 37 °C wächst *A. niger* sehr schwer, da er von *A. fumigatus* unterdrückt wird. Es wachsen nur winzige Kolonien in der Größe von Stecknadelkuppen zwischen den großen *A. fumigatus* - Kolonien. Da *A. niger* xerophil ist, zeigt er ein besseres Wachstum auf DG18, einem speziellen Nährboden für xerophile Pilze. Bereits bei 20 °C wachsen innerhalb von 7 Tagen auf einer Mischkultur-Platte Kolonien mit einem Durchmesser von 0,1 bis maximal 0,5 cm.

mikroskopische Identifizierung

Die Vesikel (a) sind kugelförmig. An der Metula (b) bilden sich die Phialiden (c). Die Konidienköpfe (b) sind schwarz, strahlenförmig und zerfallen in lockere Säulen mit zunehmendem Alter. Die Konidien (d) haben raue oder gefurchte Wände. Die Stiele der Konidiophoren (e) sind glattwandig und durchsichtig, manchmal braun (**Bild 3-40**).

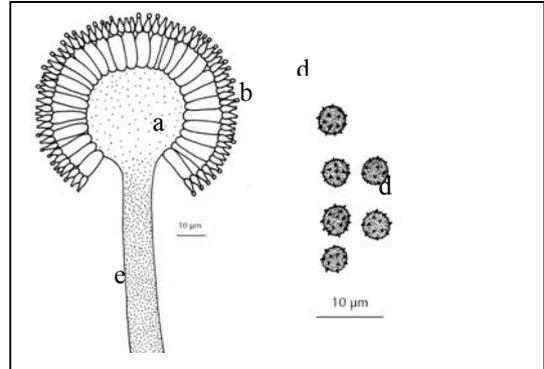


Bild 3-40: *Aspergillus niger*
(Samson et al., 2000)

***Aspergillus nidulans* (*Emericella nidulans*)**makroskopische Identifizierung

Kolonien wachsen bei 37 °C auf MEA-CI innerhalb von 48 Stunden und haben einen Durchmesser von 0,3 - 1,0 cm in der Mischkultur, oft mit *A. fumigatus* zusammen. Sie sind weiß bis cremefarben und im Zentrum grün. Die Oberfläche ist samtig. Das Substratmyzel ist dunkel purpurfarben. *E. nidulans* ist schon makroskopisch relativ einfach zu bestimmen.

mikroskopische Identifizierung

Die Konidienköpfe (a) sind kurz und säulenförmig angeordnet. Die Konidiophoren –Stiele (b) sind bräunlich, die Vesikel (c) sind halbkugelig, durchsichtig. Zusammengeballt erscheinen sie grün. Die Ascomaten (d) sind rund und purpurfarben, umgeben von einer gelblichen Schicht verstreuter Hyphen, die eine Ansammlung von hellgelben, dickwandigen, fast runden Hüllezellen (e) tragen. Die Ascosporen (f) sind purpurrot, glattwandig, und linsenförmig mit zwei äquatorialen „Kämmen“ (**Bild 3-41**).

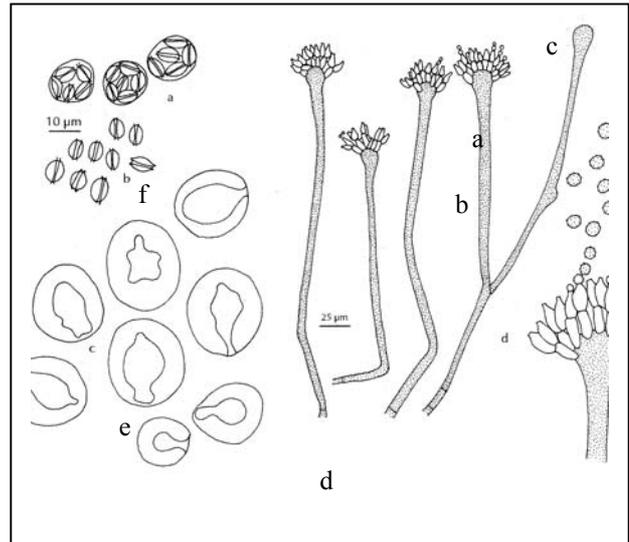


Bild 3-41: *Aspergillus nidulans*
(Samson et al., 2000)

Rhizomucor pusillusmakroskopische Identifizierung

Auf MEA-CI überwuchern die Kolonien bei 37 °C innerhalb von zwei Tagen die ganze Platte mit einem relativ dünnen Myzel, das anfangs weiß ist, später braun, seltener grau. Das Substratmyzel ist blass, gelblich oder grünlich-grau.

mikroskopische Identifizierung

Sporangien (a) sind kugelförmig, braun oder grau. Sporangiosporen (b) sind durchsichtig, rund bis breit elliptisch und glattwandig. Die Columella (c) ist kugelförmig, elliptisch oder birnenförmig. Die Sporangioophoren (d) entstehen aus Oberflächen-Hyphen. Die Stiele (e) sind manchmal unverzweigt, aber meist sehr unregelmäßig verzweigt. *Rhizomucor* hat schwach ausgebildete Rhizoide (f), die nicht an der Basis des Stiels angrenzen. Die Bildung von Zygosporien (g) beginnt häufig erst nach 10 Tagen (**Bild 3-42**).

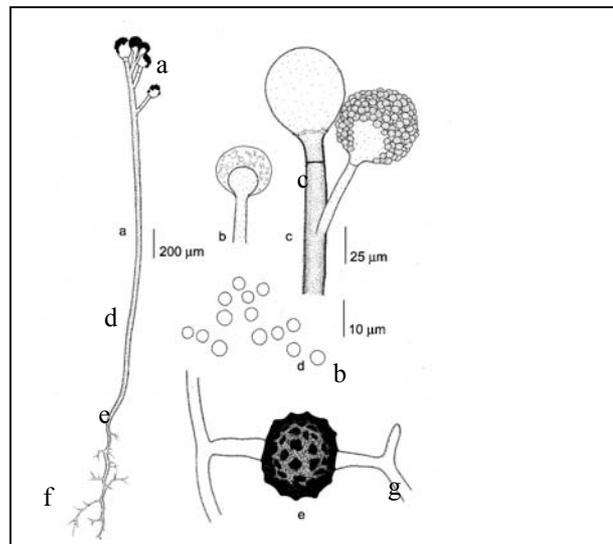


Bild 3-42: *Rhizomucor pusillus*
(Hoog et al., 2000)

Rhizopus microsporusmakroskopische Identifizierung

Auf MEA-CI bei 37 °C überdecken die Kolonien innerhalb von 48 Stunden die ganze Platte mit einem feinen grauen Myzel, das mit der Sporangienreife dunkelgrau wird und einen Millimeter hoch werden kann. Das Substratmyzel ist blass bis matt-gelb.

mikroskopische Identifizierung

Die Sporangioophoren (a) entstehen einzeln oder in 2- bis 3er-Gruppen. Rhizoide (b) sind schwach ausgebildet. Die unverzweigten Stiele (c) sind relativ kurz und haben braune Wände. Die Sporangien (d) sind schwarz und meist kugelig. Die Sporangiosporen (e) sind elliptisch mit dünnen gestreiften Wänden. Die kugelige Columella (f) zerfällt im Alter und es entsteht ein schirmartiges Gebilde. Gelegentlich werden Chlamydosporen (g) gebildet. (Bild 3-44).

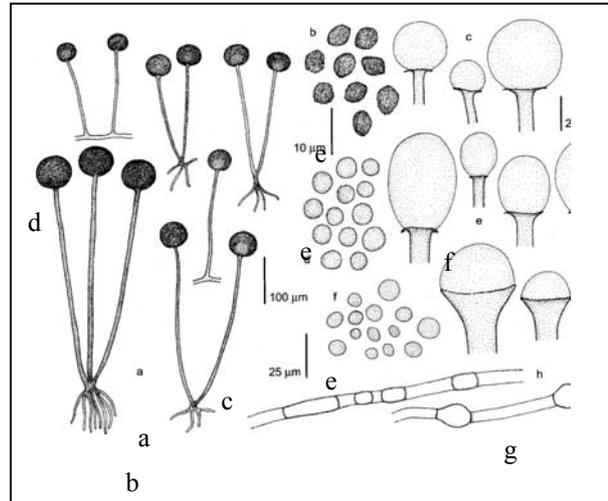


Bild 3-44 : *Rhizopus microsporus*
(Hoog et al., 2000)

Rhizopus oryzaemakroskopische Identifizierung

Die Kolonien wachsen bei 37 °C auf MEA-CI innerhalb von zwei Tagen sehr schnell und überdecken die ganze Agarplatte. Das Myzel kann 10 mm hoch werden. Die zuerst weißlichen Kolonien werden im Alter bräunlich-grau. Das Substratmyzel ist farblos bis hellgelb.

mikroskopische Identifizierung

Die Stolonen (a) sind glatt oder leicht rau, farblos bis gelblich-braun. Die Rhizoide (b) sind bräunlich. Die Sporangioophoren (c) treten einzeln oder in Gruppen bis zu fünf auf. Sie sind manchmal gegabelt und glattwandig. Die Sporangien (d) sind rund mit dünner Wand und werden im Alter dunkelbraun bis schwarz-braun. Die Columella (e) ist oval oder rund, glatt- oder leicht rauwandig. Die Sporangiosporen (f) sind rund, oval oder unregelmäßig geformt und gestreift. Chlamydosporen (g) sind rund, elliptisch oder zylindrisch (Bild 3-45).

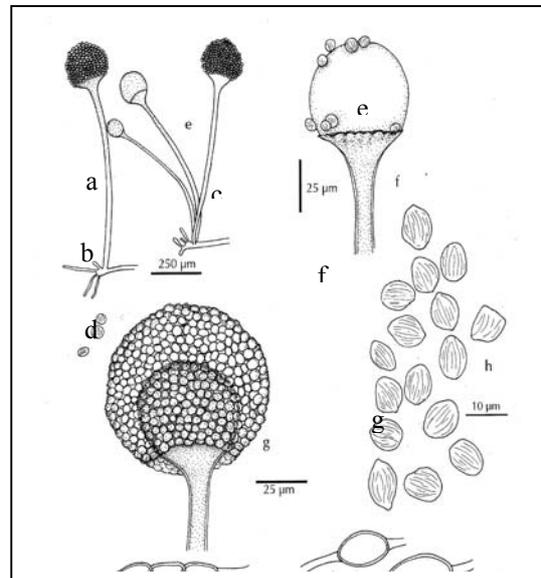


Bild 3-45: *Rhizopus oryzae*
(Samson et al., 2000)

Paecilomyces variotiimakroskopische Identifizierung

Auf MEA-CI wachsen bei 37 °C in der Mischkultur innerhalb von 48 Stunden kleine Kolonien von maximal 0,33 mm Durchmesser, oft zwischen großen Kolonien von *A. fumigatus*. Die Farbe der Kolonien reicht von gelb über beige bis zu braun oder oliv- braun. Das Substratmyzel ist blass bis bräunlich.

mikroskopische Identifizierung

Die Konidien (a) sind elliptisch bis spindelförmig. Sie liegen in langen auseinandergehenden Ketten, sind einzellig und durchsichtig bis gelb. Die Phialiden (b) haben einen langen Hals, sie laufen stufenweise spitz zu. Chlamydosporen (c) werden oft einzeln oder in kurzen Ketten gebildet. Sie sind braun bis dunkelbraun, glatt bis leicht rau (**Bild 3-46**).

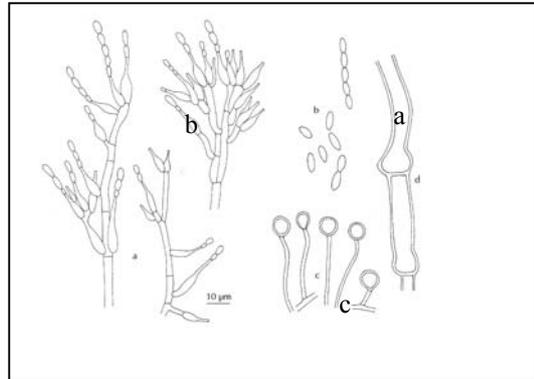


Bild 3-46: *Paecilomyces variotii*
(Samson et al., 2000)

Gattung Fusariummakroskopische Identifizierung

Die Kolonien wachsen bei 37 °C auf MEA-CI sehr schnell. Graues oder lebhaft gefärbtes, sehr lockeres, unregelmäßiges Luftmycel, das mitunter gelbe, rote oder rotbraune Farbstoffe in das Substrat abscheidet.

mikroskopische Identifizierung

Die Konidienträger (a) sind kurz, einzeln oder in Gruppen stehend. Sie bilden zahlreiche große, dünnwandige spindel- oder sichelförmige, mehrzellige Makrokonidien (b), mitunter werden kleine, vorwiegend einzellig, kugel-, ei- oder birnenförmige Mikrokonidien (c) gebildet. Desgleichen können kugelförmige, dickwandige Chlamydosporen (d) gebildet werden. Die Artbestimmung ist jedoch sehr schwierig, weil es eine große Variabilität innerhalb der Merkmale gibt (**Bild 3-47**).

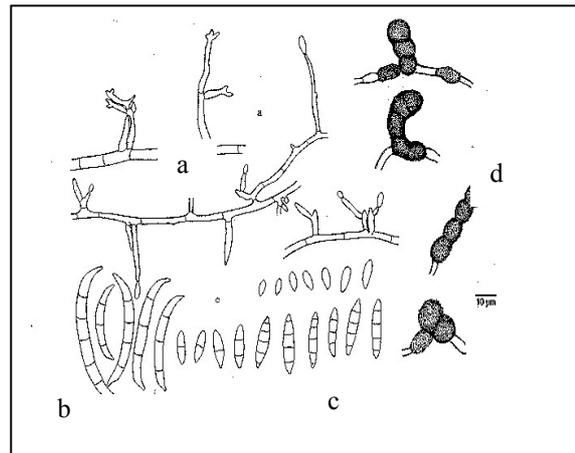


Bild 3-47: Gattung *Fusarium*
(Hoog et al., 2000)

Gattung Trichodermamakroskopische Identifizierung

Kolonien wachsen sehr schnell mehr oder weniger hyalin (durchsichtig). Sind bereits Sporen gebildet worden, so zeigen sich grünelblich gefärbte Bereiche. Die Unterseite ist farblos.

mikroskopische Identifizierung

Die Conidiophoren (a) bilden eine charakteristische zweigähnliche Struktur aus, an denen mehr oder weniger rauwandige Konidien (b) sitzen (**Bild 3-48**).

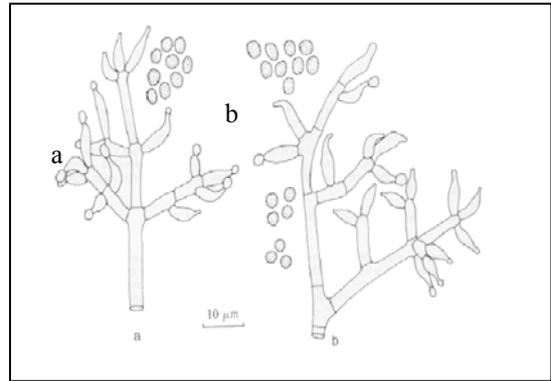


Bild 3-48: Gattung *Trichoderma* (Samson et al., 2000)

Probenahmen

Nach unterschiedlichen Lagerungszeiten wurden die verschiedenen Lagerungsvarianten beprobt. In **Tabelle 3-5** sind die Probenahmezeiten der Lagerungsversuche bis 2000 und in **Tabelle 3-6** von 2001 bis 2004 zusammengestellt.

Tabelle 3-5: Übersicht über Probenahmen von 1998 bis 2000 bei der Lagerung von Hackschnitzeln

Lagerung in Boxen	
Lagersaison 1998-1999	
Probenahmeorte: s. Kap. 3.3.2	
Varianten	Pappel: Bäume, HS 16, HS 36 Weide: Bäume, HS 37 Kiefer: HS 37
Probenahmen	Einlagerung, nach 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 Wochen und nach 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 und 12 Monaten
Untersuchte Parameter	Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Gesamtzahl an Hefen und Schimmelpilzen, Gehalt an <i>A. fumigatus</i>
Lagersaison 1999-2000	
Probenahmeorte: s. Kap. 3.3.2	
Varianten	Pappel HS 16 mit und ohne Unterlüftung und Regenschutz Pappel HS 120 mit Unterlüftung und Regenschutz Kiefer HS 16 mit Unterlüftung und Regenschutz
Probenahmen	Einlagerung, nach 1, 2, 3, 4, 8 Wochen und nach 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 und 12 Monaten
Untersuchte Parameter	Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Gesamtzahl an Hefen und Schimmelpilzen, Gehalt an <i>A. fumigatus</i>

Tabelle 3-6: Übersicht über Probenahmen bei der Lagerung von 2001 bis 2004 in unterschiedlichen Lagerformen

	Lagerart Laborgefäße	Silo	Boxen	Haufen
Probenahmeorte	s. Kap. 3.3.1	s. Kap. 3.3.2	s. Kap. 3.3.2	s. Kap. 3.3.2
Lagersaison 2001-2002				
Varianten	Pappel HS 23, gelagert bei 17°C, 30°C, 60°C Pappel: HS 23, HS 36, HS 63, gelagert bei 30°C	Pappel, HS 19, HS 46, HS 150	-	-
Probenahmen	Einlagerung, nach 4-wöchiger Lagerung	Einlagerung, nach 4 monatiger Lagerung	-	-
Untersuchte Parameter	Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Gesamtzahl an Hefen und Schimmelpilzen, Gehalt an <i>Aspergillus fumigatus</i>			
Lagersaison 2002-2003				
Varianten	Pappel: HS 23, HS 36, HS 63, Kiefer: HS 36/63: jeweils gelagert bei 20°C, 25°C, 30°C, 35°C	Pappel: HS 23, HS 36, HS 63, HS 156, Weide: HS 63	Pappel: HS 23, HS 36, HS 63, HS 156	Pappel: HS 23, HS 63 mit und ohne Regendach, <i>HS 63 mit Unterlüftung</i>
Probenahmen	Einlagerung, nach 4-wöchiger Lagerung	Einlagerung, nach 2, 4 und 8 Wochen, nach einem Jahr	Einlagerung, nach 2 und 4 Wochen, nach 3, 4, 6, 9, 11 und 12 Monaten <i>Einlagerung, nach 6 monatiger Lagerung, nach 1 Jahr</i>	
Untersuchte Parameter	Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Gesamtzahl an Hefen und Schimmelpilzen	Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Gesamtzahl an Hefen und Schimmelpilzen, Identifizierung thermophiler Schimmelpilze Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Gesamtzahl an Hefen und Schimmelpilzen		
Lagersaison 2003-2004				
Varianten	-	Pappel: HS 16, HS 22, HS 56, HS 155	-	Kiefer HS 46
Probenahmen	-	Einlagerung, Auslagerung	-	Einlagerung, nach 5 monatiger Lagerung
Untersuchte Parameter	-	Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Gesamtzahl an Hefen und Schimmelpilzen, Identifizierung thermophiler Schimmelpilze		

3.4.7 Pilzsporenmessung

Die Messung der Sporenkonzentration der Schimmelpilze in der Luft erfolgte in Anlehnung an die Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe TRBA 430 (jetzt Messverfahren 9420 in der Arbeitsmappe des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz - BIA). Die Probenahme erfolgte mit dem Luftkeimsammelgerät MD 8 (Sartorius, Göttingen). Dabei werden die Pilzeinheiten auf einem Gelatinemembranfilter mit einer Porengröße von 3 µm und einem

Durchmesser von 80 mm (Gelatine-Einweeinheiten, Sartorius) abgeschieden. Die Messungen wurden unter Verwendung eines Kunststoffschlauches durchgeführt.

In den meisten Fällen erfolgten die Messungen nach der indirekten Methode. Über Langzeitmessung (2 Messungen pro Messpunkt) wurde bei der indirekten Methode mindestens 1 m³ Luft angesaugt. Die Einstellung am MD 8 lag nicht höher als 5 m³/h. Die Weiterverarbeitung der Filter erfolgte am gleichen Tag oder aus Zeitgründen erst am nächsten Tag (Lagerung der Filter vor der Verarbeitung bei Zimmertemperatur). Der beaufschlagte Filter wurde in 10 ml physiologische Kochsalzlösung (0,9 %iges NaCl mit 0,01 % Tween 80, 35 - 40 °C) verbracht, ca. 30 Minuten bei 30 - 40 °C geschüttelt und vor der Entnahme „gevortext“. Die Suspension wurde dekadisch verdünnt, d.h. in 10er Schritten. 100 µl oder 200 µl der Suspension wurden auf je 3 Kulturplatten ausgestrichen. Als Nährmedien wurden DG 18 Agar mit Chloramphenicol und Malzextrakt- Agar (MEA) verwendet.

Die Kultivierung der DG18 Platten erfolgte bei 20 °C, abweichend von der TRBA 430. Zum Nachweis insbesondere thermophiler Schimmelpilze wurden die MEA Platten bei 37 °C bebrütet. Die Schimmelpilzkolonien wurden mindestens 7 Tage lang ausgezählt.

Bei der direkten Messung (2 Messungen pro Messpunkt) wurde der beaufschlagte Filter nach Kurzzeitmessung (im Mittel 100 l Luft angesaugt) direkt auf die Nährmedien gelegt. Die Kultivierung erfolgte bei 20 °C (DG 18 Platten) und bei 37 °C (MEA Platten). Auch hier wurde mindestens 7 Tage ausgezählt.

Aus dem arithmetischen Mittel der Auszählung der Kolonien (KbE) und dem Probenahmevermögen wurden die KbE/m³ Luft berechnet. Bei der Auswertung der indirekten Methode ist der Verdünnungsgrad und die aufpipettierte Menge zu berücksichtigen.

Die Windgeschwindigkeit wurde mit dem AIRFLOW DVA 30-Anemometer (Rheinbach) ermittelt. Parallel dazu wurden die relative Luftfeuchte und Temperatur ermittelt.

Messung der Sporenkonzentration in der Luft vor 10 m³-Lagerboxen ohne Regenschutz, 1998-1999

Die Messung der Sporenkonzentration wurde direkt (0 m) an der Box von Pappel HS 16 ohne Überdachung und im Abstand von 5 und 10 m in 1 m Höhe durchgeführt (Messkopf stets in Richtung Box). Die Probenahmen erfolgten während der 11-monatigen Lagerung, während der Auslagerung (1999) und nach der Auslagerung. Parallel wurden die Temperatur und relative Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit gemessen

Messung der Sporenkonzentration in der Luft über 10 m³-Lagerboxen mit Regenschutz, 2002- 2003

Zur Messung der Sporenkonzentration wurde der Messkopf 30 cm parallel über die Holzhackschnitzel in der Box angebracht (**Bild 3-49**). Bei einigen Messungen ist der Abstand zusätzlich auf 60 cm verändert worden.



Bild 3-49: Messung der Sporenkonzentration der Schimmelpilze in der Luft über der 10 m³-Lagerbox

Die Messung erfolgte über den Boxen mit HS 23, HS 36, HS 63 und HS 156 zu verschiedenen Zeitpunkten bei Lagerung bis zu 12 Monaten. Parallel wurde die Messung der Umgebungsluft (Kontrollwert, Referenzmessung) in 1,50 m Höhe, gegen den Wind vor den Boxen (Luvseite) durchgeführt. Unmittelbar nach der Einlagerung erfolgte die Messung nach der direkten Methode. Die Messung der relativen Luftfeuchte und Temperatur wurde mit dem „testo 600“ (Fa: testo Lenzkirch) durchgeführt.

Messung der Sporenkonzentration in der Luft vor den 18 m³-Haufen mit und ohne Regenschutz, 2002-2003

Die Messung der Sporenkonzentration der Luft vor den Haufen erfolgte in Windrichtung. Es wurde bei unterschiedlichem Abstand von dem Haufen (0 m, 5 m, 10 m, 20 m) und zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen (**Bild 3-50**).



Bild 3-50: Messung der Sporenkonzentration der Schimmelpilze in der Luft an einem 18 m³-Haufen

Die Messung erfolgte in 1,50 m Höhe. Der Abstand 0 m bedeutet, dass das Messstativ unmittelbar am Fuß des Haufens aufgestellt wurde. Tatsächlich hatte der Messkopf ca. 1,50 m horizontalen Abstand zur Haufenoberfläche.

Die Messung erfolgte bei 4 verschiedenen Varianten (Pappel HS 23 mit Regenschutz, Pappel HS 23 ohne Regenschutz, Pappel HS 63 mit Regenschutz, Pappel HS 63 ohne Regenschutz). Bei den Messungen kam nur die indirekte Methode zum Einsatz. Vor den Messungen bei den Varianten mit Regenschutz wurde die Abdeckung der Haufen abgenommen. Die Messung des Referenzwertes (Kontrollwert, Hintergrundbelastung) erfolgte in 1,50 m Höhe. Gemessen wurde während der 11-monatigen Lagerung und während der Auslagerung (zusätzlich mit Blindprobenahme). Außerdem wurde die Temperatur, relative Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit registriert.

3.4.8 Sonstige Messungen und Analysen

Ermittlung des Trockensubstanzgehaltes

Das Standardverfahren zur Bestimmung der Trockensubstanz ist das Wäge-Trocknungsverfahren. Dabei wird der Masseverlust bei der Trocknung des Materials unter definierten Bedingungen ermittelt. Eine nach Gewicht entnommene Probe wird bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Der dabei entstandene Masseverlust wird als die im Substrat enthaltene Wassermenge angesehen. Der Trockensubstanzgehalt wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$TS = \frac{(AuswaageBrutto - Tara)}{(EinwaageBrutto - Tara)} \cdot 100 \% \quad (3-4)$$

Und der Wassergehalt ergibt sich aus der Differenz zu 100 %:

$$w = 100 \% - TS \quad (3-5)$$

pH-Wert-Bestimmung

10 g frisches Probenmaterial werden mit 100 ml destilliertem Wasser versetzt, 15 min. geschüttelt und in der Suspension elektrometrisch mit einer Elektrode bei automatischer Temperaturkompensation der pH-Wert gemessen.

4 Ergebnisse

4.1 Temperatur

4.1.1 Laborgefäße

Der Temperaturverlauf in den Laborgefäßen wurde mittels Temperaturdatenlogger Tinytalk, Fa. Gemini erfasst und mit der firmeneigenen OTLM-Software ausgelesen. Die Umgebungstemperaturen von 17 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C und 60 °C übertrugen sich rasch auf das Versuchsgut. Es konnten keine Erwärmung registriert werden, die messbar über die Umgebungstemperatur hinausging.

4.1.2 Lagersilos

Im Jahr 2001 wurden zur Untersuchung der Lagerprozesse u. a. die in Kap. 3.3.2 beschriebenen Lagersilos inkl. Messtechnik eingesetzt. Bei einem Zeitraster der Messwertaufzeichnung von einer Stunde ist die Dynamik der kurzzeitigen Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Außentemperatur erkennbar. In **Bild 4-1** sind die Temperaturen der Messpunkte in einer Höhe von 145 cm in den Lagersilos in den ersten Tagen dargestellt.

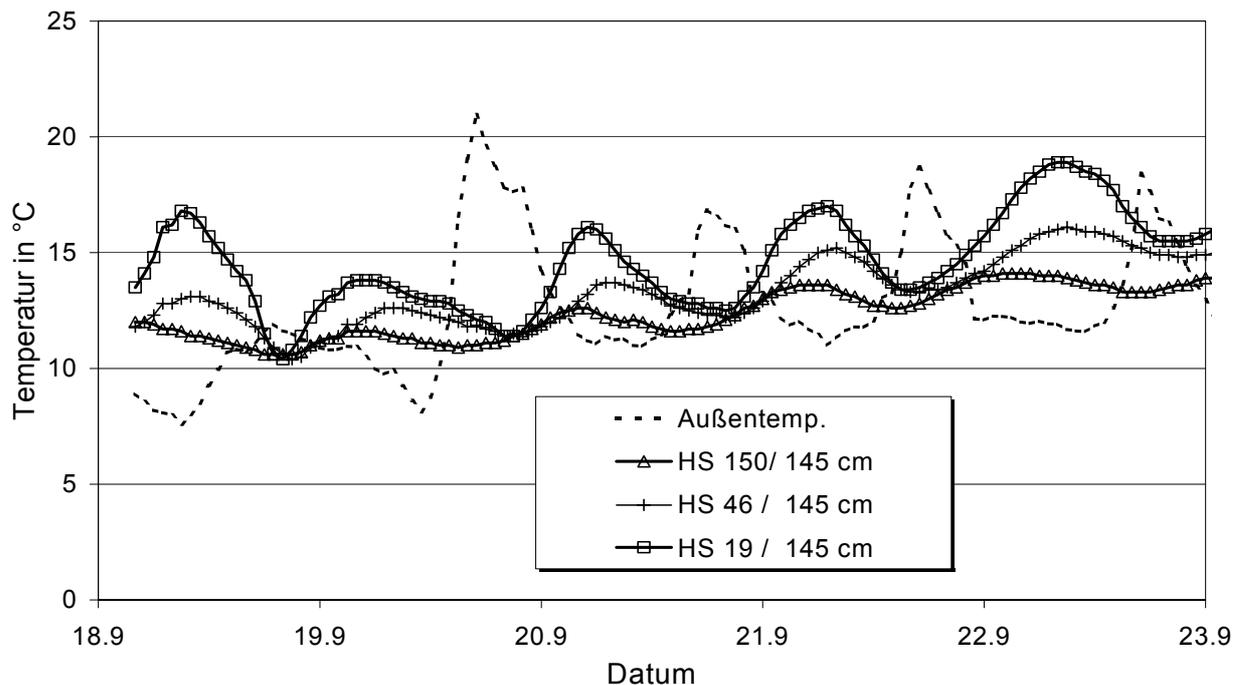


Bild 4-1: Temperaturverlauf der ersten 5 Tage in 145 cm Höhe in den mit Pappelhackgut gefüllten Lagersilos, Saison 2001

Die 5 Messstellen übereinander ermöglichen die Erfassung der Temperaturänderung als Funktion der Höhe und der Zeit (**Bild 4-2**). Die Mittelwerte der verschiedenen Fraktionen über die gesamte Lagerdauer zeigen, dass bei dieser kleinen Lagermasse und der guten Durchlüftung nach einem Monat die Temperaturerhöhung, die besonders bei HS 19 aufgetreten war, abgeklungen ist, und die Temperaturen im Mittel der Tagestemperatur folgen (**Bild 4-3**).

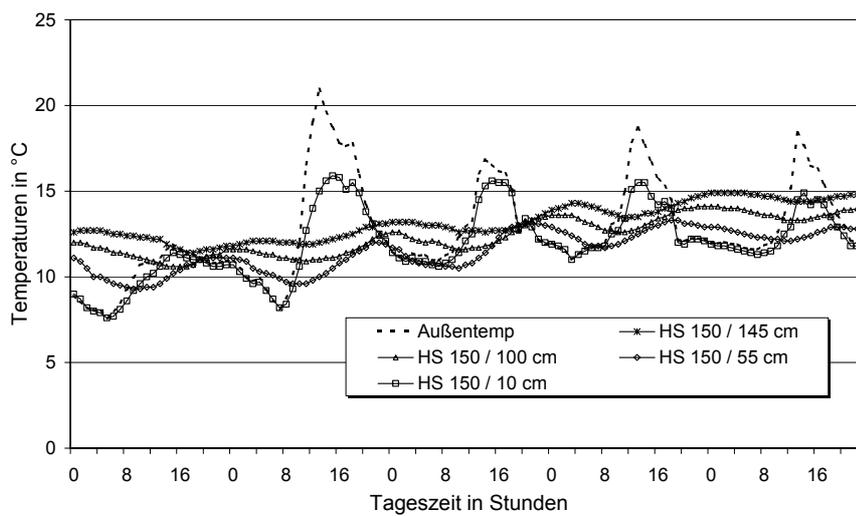
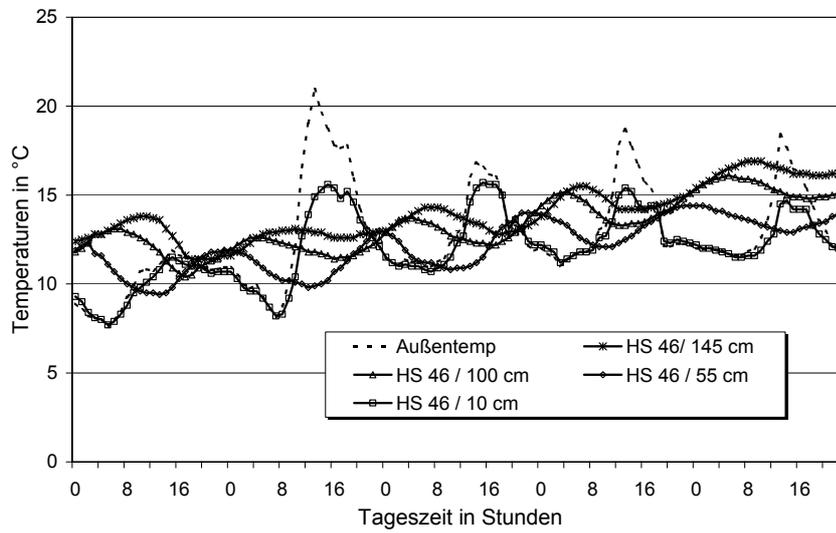
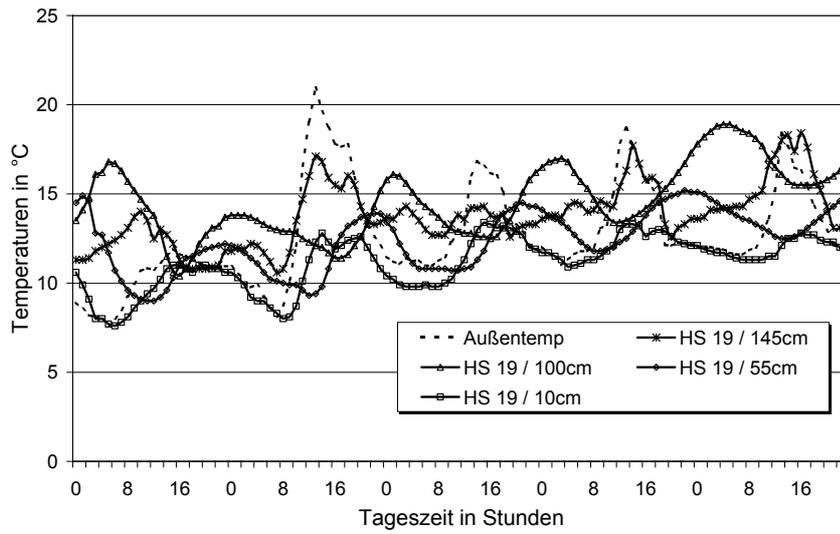


Bild 4-2: Temperaturverlauf in den Tagen 5 bis 10 in Abhängigkeit von Höhe und Zeit im Lagersilo, Saison 2001

Oben: Pappel HS 19

Mitte: Pappel HS 46

Unten: Pappel HS 150

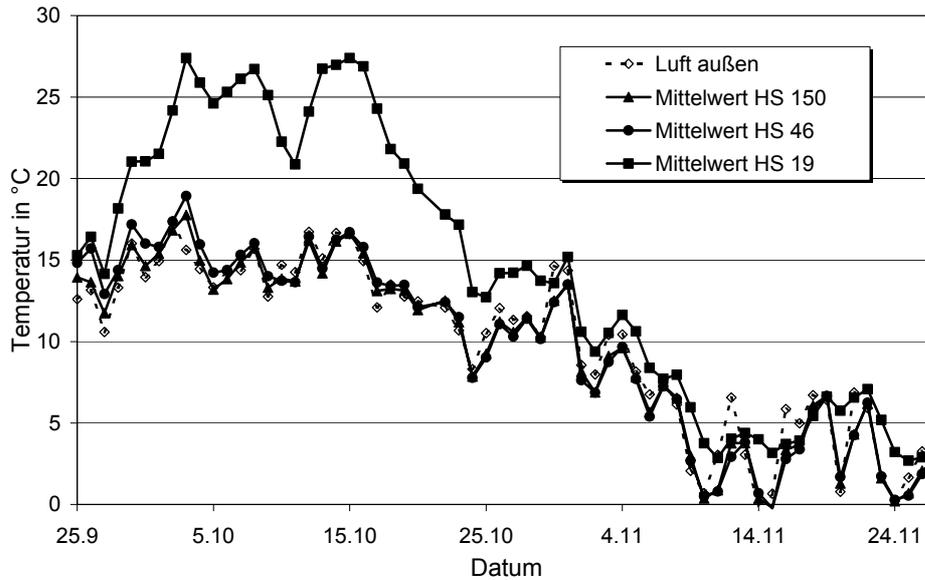


Bild 4-3: Langzeit-Temperaturverlauf in den Lagersilos (Mittelwerte), Saison 2001

Im Jahr 2002 wurden die Lagersilos am unteren und oberen Trichter mit einer Dämmplatte versehen. Trotz verstärkter Dämmung des Deckels wurde bei einer Kontrolle unverhältnismäßig viel Tauwasser festgestellt. Daraufhin wurde der Deckel angehoben und ein 2 cm breiter Luftspalt zwischen Silokörper und Trichter geschaffen. Die Temperaturverläufe der verschiedenen HS-Fractionen weisen daher zum Teil abweichende Kurven auf. Vor dem Anheben der Deckel waren nahezu alle Temperaturverläufe mit abfallender Tendenz. Nach dem Öffnen stiegen die Temperaturen bei Pappel-Mittelhackschnitzel und Weide-Grohackschnitzel sofort wieder an. Pappel-Grohackschnitzel folgte verzögert mit überlagertem Tagesgang (Bild 4-4).

Dieses Verhalten in den Lagersilos ist mit mangelndem Luftwechsel zu erklären. In den topfählichen Behältern ist nach einer Anfangszeit der Sauerstoff zum Teil verbraucht. Kohlendioxid, das schwerer als Luft ist, sammelt sich offenbar in dem Behälter und die Prozesse kommen zum Erliegen. Die schornsteinartigen Öffnungen der Silos lassen nur einen begrenzten Luftaustausch zu. Erst nach dem Anheben des gesamten Deckels ist eine Fortsetzung der biologischen Prozesse möglich. Bei den Pappel-Feinhackschnitzel kam es 2 Monate später, bei ansteigenden Außentemperaturen, noch einmal zu Temperaturen von über 45°C. Nach dem 30.05.2002 folgten die Temperaturen mit Verzögerung, begründet durch das verschiedene Speicherverhalten, leicht überhöht dem Tagesgang der Außentemperatur. Nach ca. 4 Monaten sind in den Lagersilos die biologischen Prozesse weitgehend abgeklungen. In der folgenden Zeit wurden die Temperaturen im wesentlichen durch die Außentemperaturen bestimmt, wobei die Temperaturen im Lagersilo mit Pappel-Feinhackschnitzel oft die höchsten Werte erreichten.

In der Saison 2003 wurden die Lagersilos unter ein Schleppdach gestellt. Es erfolgte keine Abdeckung und durch das untere Sieb konnte Luft eintreten. Trotz der fehlenden Abdeckung entspricht das Temperaturverhalten dem der vergangenen Jahre. Vergleichbar mit den Untersuchungen aus dem Jahr 2001 (ebenfalls Durchlüftung), erreichen die Mittel- und Maximalwerte nicht die Temperatur wie bei unten geschlossenen Lagersilos (Bild 4-5).

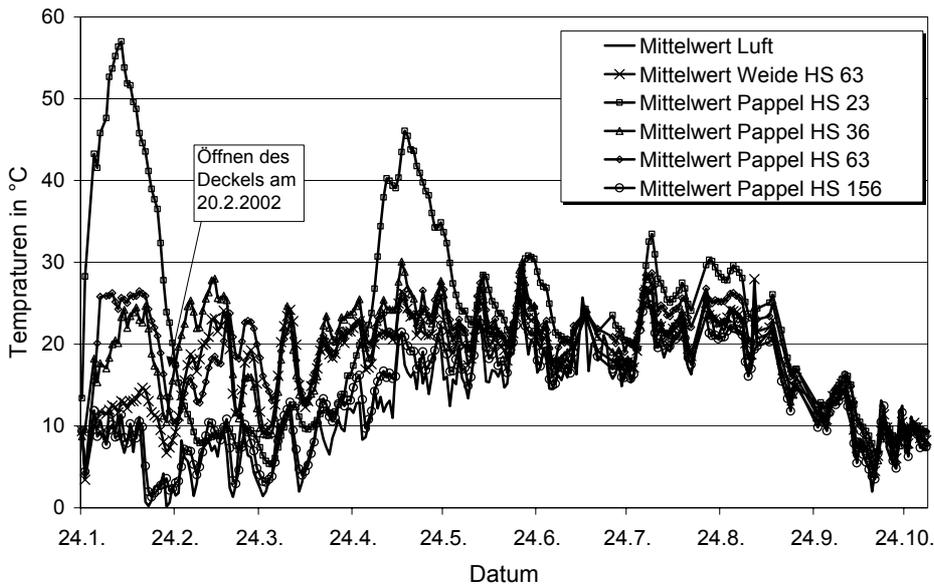


Bild 4-4: Mittelwerte der Temperaturen in den Lagersilos, Saison 2002

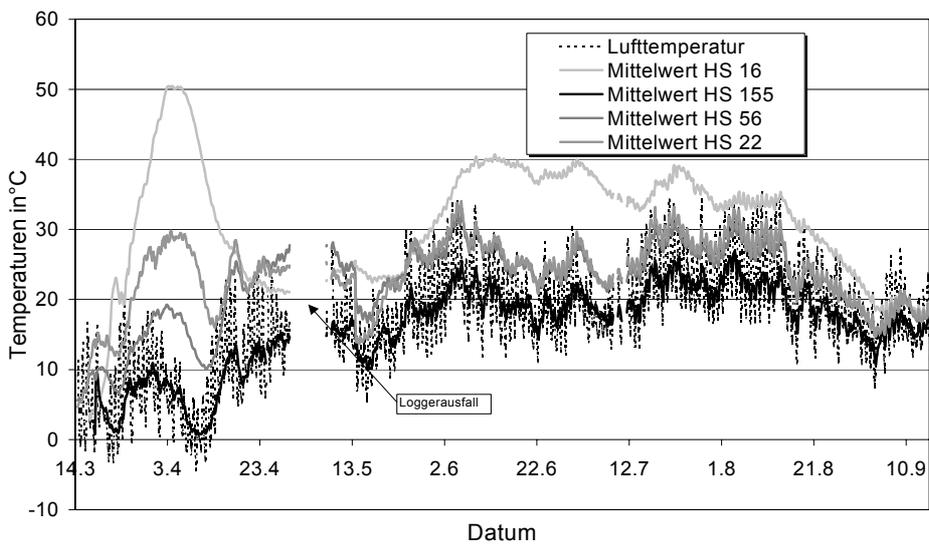


Bild 4-5: Mittelwerte der Temperaturen in den Lagersilos, Saison 2003

4.1.3 Lagerboxen

Die ersten Untersuchungen zur Lagerung und Trocknung von Hackschnitzel in Lagerboxen wurden im Jahr 1998 durchgeführt. Die Lagerboxen waren ohne Dach und frontseitig nicht durch eine Bohlenwand abgegrenzt. Die Temperaturmessung erfolgte in gleicher Weise wie bei den späteren Versuchen auch (**Bild 4-6**).

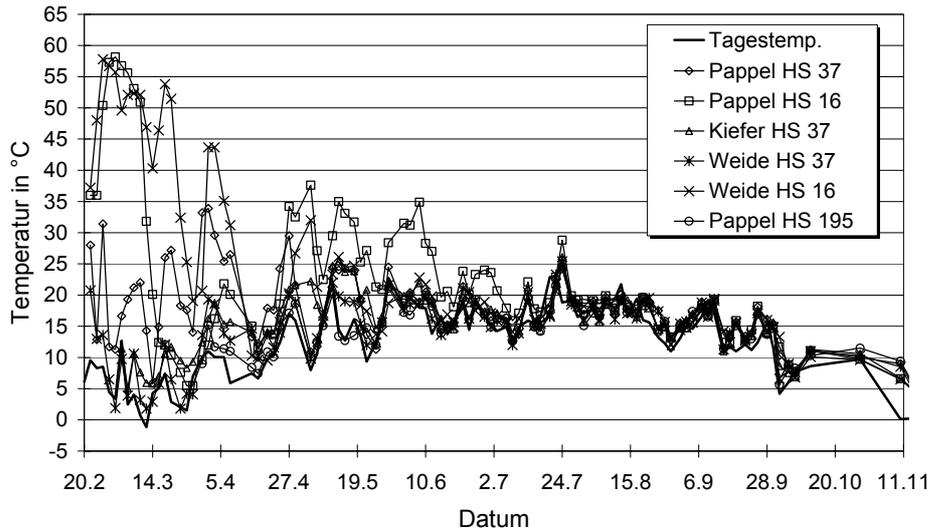


Bild 4-6:
Temperaturverlauf der Mittelwerte der verschiedenen Fraktionen in den Lagerboxen im Jahr 1998

Im Jahr 1999 wurden die Lagerboxen erneut befüllt. Es wurden Feinhackschnitzel und Hackstücke eingelagert. Neben Pappelholz wurde auch Kiefer untersucht. Die Feinhackschnitzel wurden mit und ohne Spaltenboden eingelagert. Die Maximaltemperaturen bei allen Feinhackschnitzelfraktionen lagen ähnlich hoch. Der Spaltboden führte zu keiner signifikanten Abweichung im Temperaturverlauf. In der Lagerbox mit den Hackstücken folgte die Lagertemperatur leicht überhöht zur Außentemperatur (**Bild 4-7**).

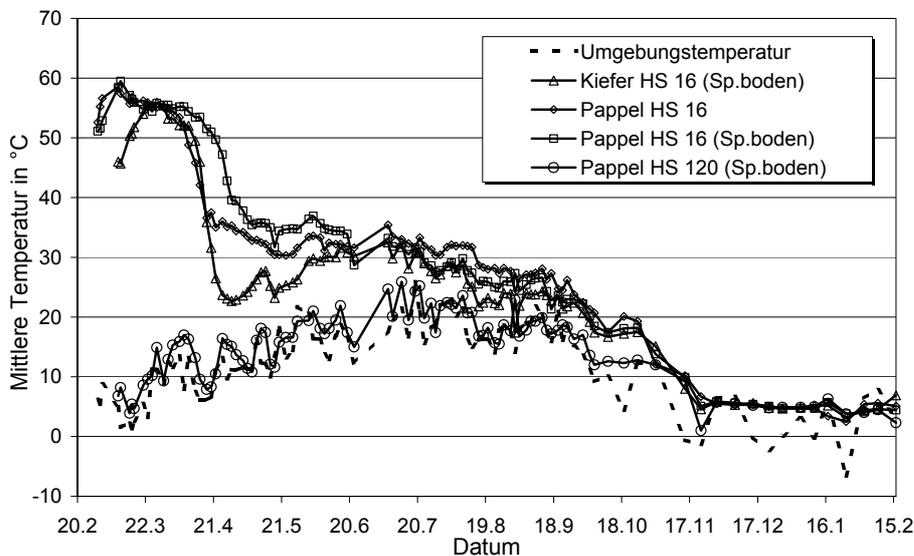


Bild 4-7:
Temperaturverlauf der Mittelwerte der verschiedenen Fraktionen in den Lagerboxen, Saison 1999-2000

Im Jahr 2002 wurde in den zwischenzeitlich überdachten Lagerboxen das Hackgut von vier verschiedenen Pappelfraktionen eingelagert. Die Ergebnisse bestätigen die vorherigen Aussagen. In den Lagerboxen mit Feinhack- und Mittelhackschnitzel kommt es zu einer Temperaturerhöhung auf 60 °C. Die Temperaturen bei Grobhackschnitzel und Hackstücke stiegen hingegen nicht über 30 °C (**Bild 4-8**).

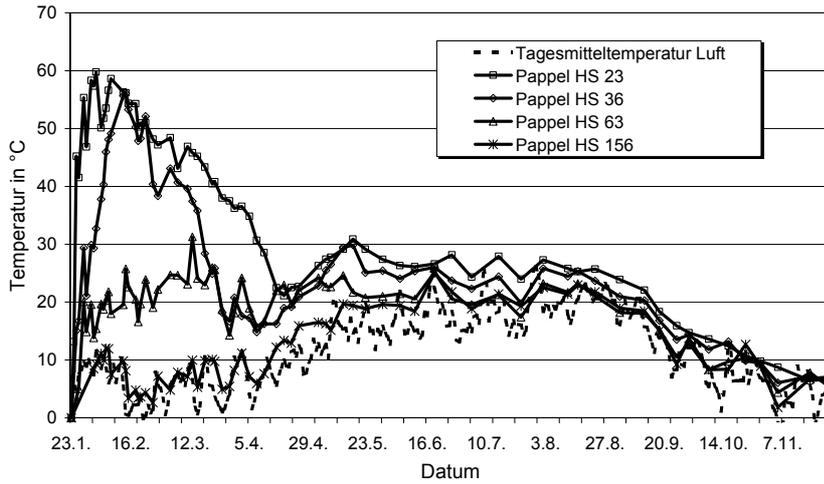


Bild 4-8: Temperatur-Mittelwerte in den Lagerboxen bei der Lagerung verschiedener Fraktionen von Pappel-hackgut, Saison 2002

Die Darstellung der Temperatur als Funktion der Lagerhöhe und der Lagerzeit zeigt den Einfluss der Randschichten und die Entwicklung der Maximaltemperaturen in den unterschiedlichen Fraktionen. Deutliche Unterschiede sind im Vergleich von Feinhackschnitzeln und Hackstücken zu erkennen (**Bild 4-9**).

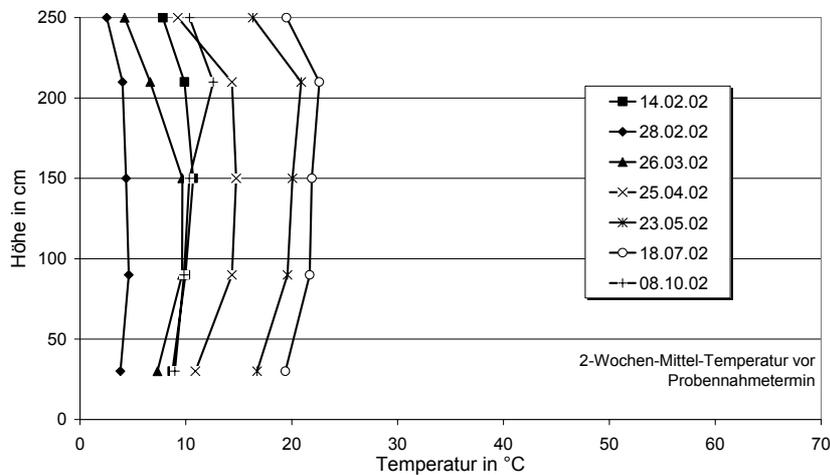
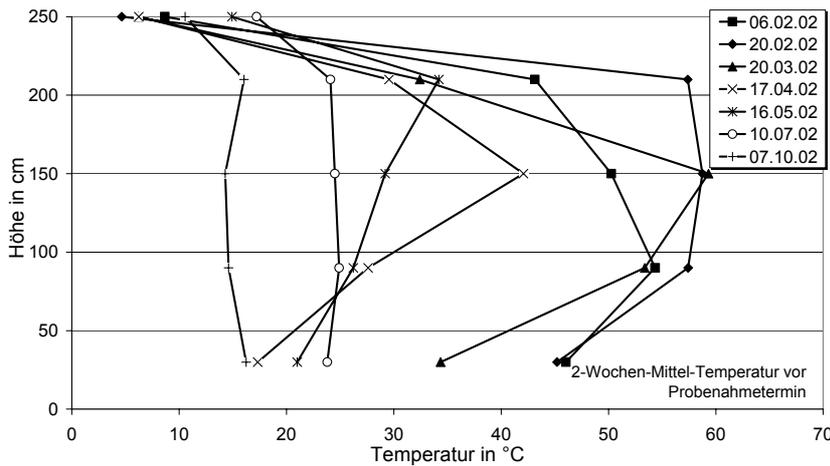


Bild 4-9: Temperatur in Abhängigkeit von Höhe und Zeit bei der Lagerung von Pappel-Hackgut in 10 m³-Boxen, Saison 2002

Oben:
Feinhackschnitzel HS 16
Unten:
Grobhackstücke HS 156

4.1.4 Lagerhaufen

Im Jahr 2002 wurden vier Lagerhaufen aus Fein- und Grobhackschnitzel, mit einem Volumen von jeweils ca. 18 m³ aufgeschüttet. Die mittleren Temperaturen der mit einem Dach geschützten Lagerhaufen lagen etwas höher als bei denen ohne Dach. Durch Niederschlag und stärkere Luftbewegung erfolgte bei den nicht abgedeckten Lagerhaufen eine Abkühlung besonders in den oberen Schichten (**Bild 4-10**).

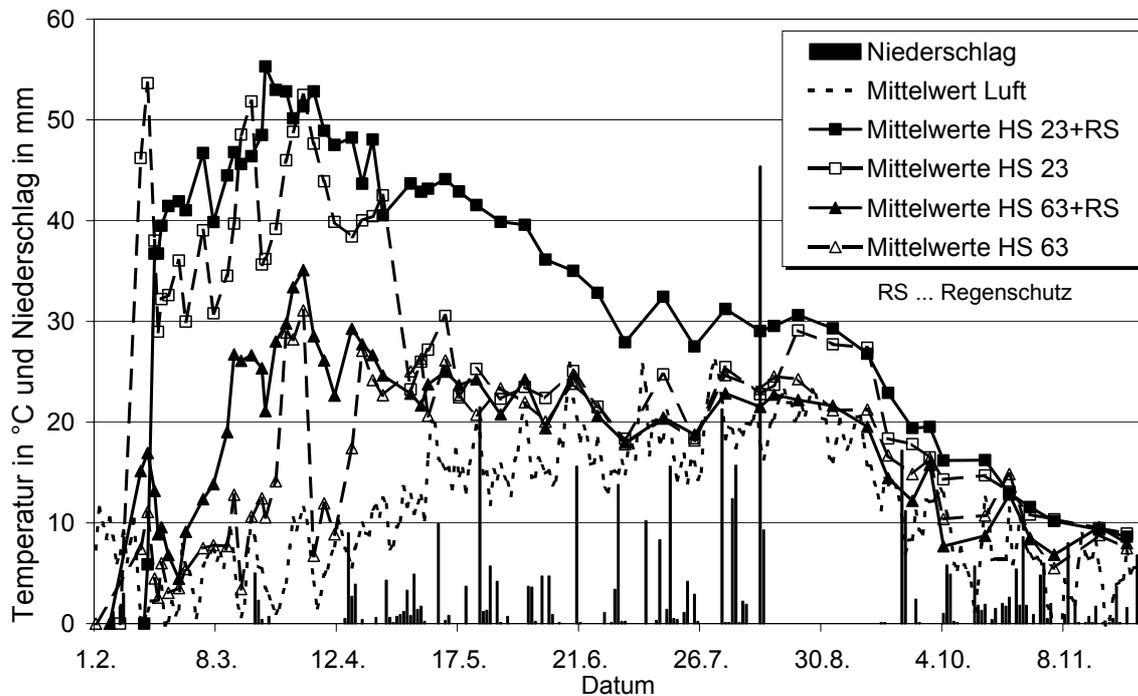


Bild 4-10: Tagesmitteltemperaturen und Niederschlag in den 18 m³-Lagerhaufen mit und ohne Regenschutz (RS), Saison 2002

Ebenso wie bei den 10 m³-Haufen zeigt auch hier der Temperaturverlauf über der Höhe bei Feinhackschnitzeln ein ausgeprägtes Maximum (**Bild 4-11**). Zu berücksichtigen ist, dass durch Verdichtung bei den 18 m³-Dreiecksmieten aus Feinhackschnitzel nach ca. 2 Wochen und bei den Lagerhaufen aus Grobhackschnitzel nach ca. 7 Wochen die oberen Temperaturmesspunkte nicht mehr innerhalb des Hackgutes liegen. Die Maxima der Temperaturen erreichen im Lagerhaufen mit Feinhackgut etwa 60 °C. Im Lagerhaufen mit Grobhackgut werden 38 °C erreicht. (Als Maximalwert aller Messungen in Grobhackguthaufen wurde am 2.4.2002 im abgedeckten Lagerhaufen in der Höhe von 125 cm die Temperatur von 52 °C gemessen.)

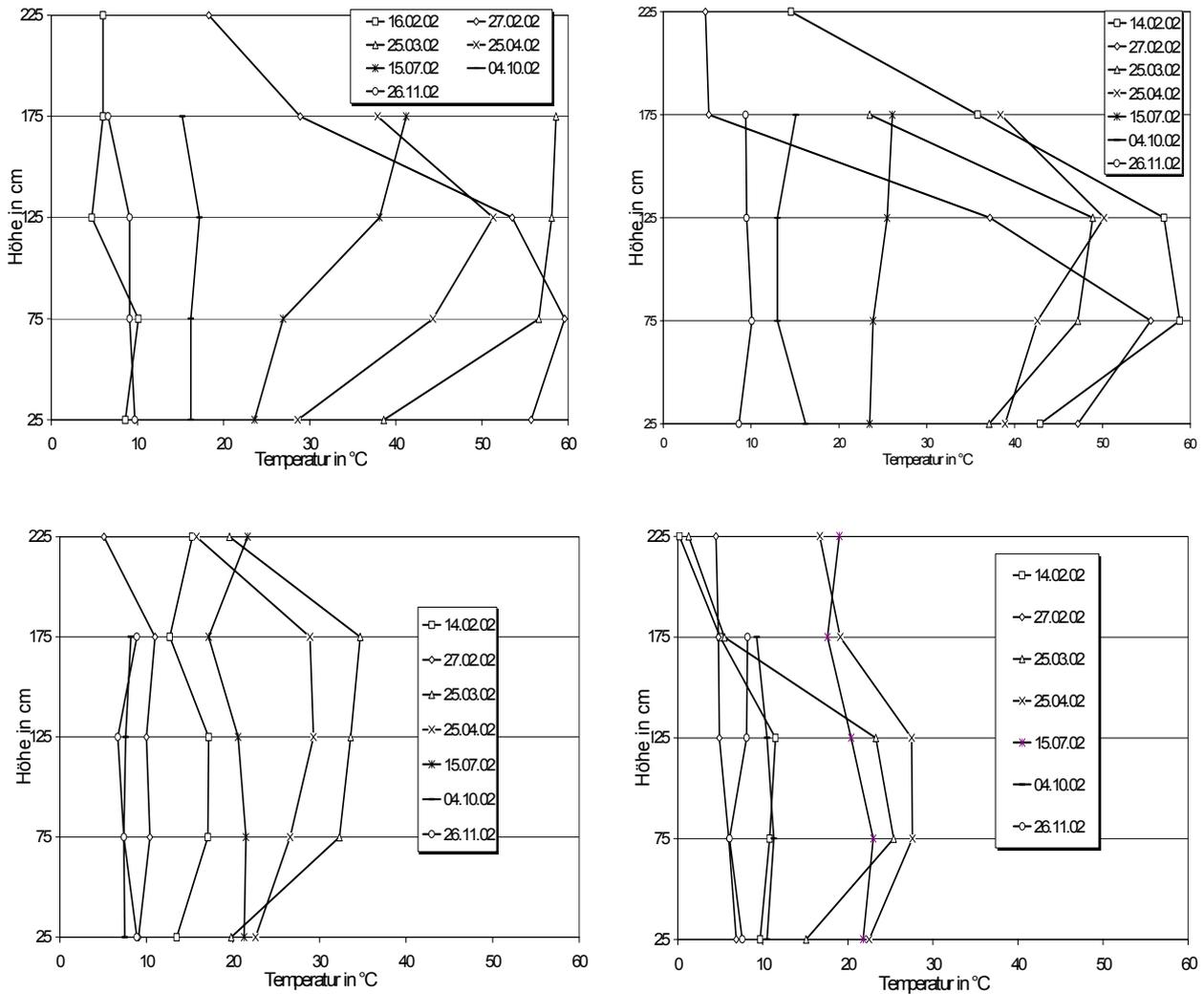


Bild 4-11: Temperatur in Abhängigkeit von der Höhe in 18 m³-Pappelhackschnittelhaufen (Dreiecksmieten) mit und ohne Regenschutz (Saison 2002)

Oben links: HS 23 mit Regenschutz
Unten links: HS 63 mit Regenschutz

Oben rechts: HS 23 ohne Regenschutz
Unten rechts: HS 63 ohne Regenschutz

Die Temperaturmessungen am zusätzlich aufgeschütteten 70 m³-Haufen (Zusatzversuch) sollten u.a. die Wirkung eines Luftkanals aufzeigen. Die Ergebnisse bestätigen, dass eine zusätzliche Unterlüftung mit einem Kanal positiven Einfluss auf die Verhinderung hoher Temperaturen hat. Die Differenz zwischen den Temperaturverläufen ist allerdings nicht so deutlich, wie ursprünglich erwartet. Es ist anzunehmen, dass der errichtete Kanal zu klein im Verhältnis zur aufgeschütteten Menge an Hackschnittel war (**Bild 4-12**).

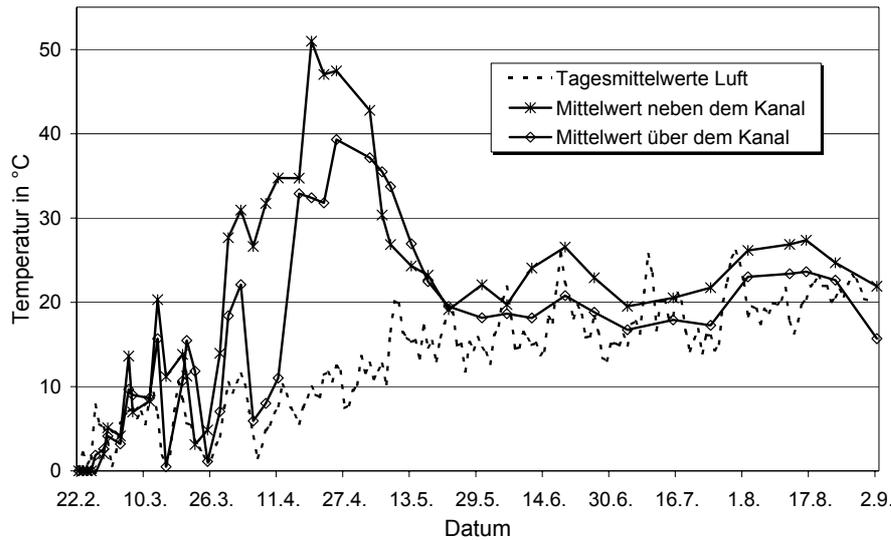


Bild 4-12: Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen im 70 m³-Haufen mit Luftkanal, HS 36, Saison 2002

Lagerhaufen aus Waldholzhackschnitzel

Parallel zu den im ATB durchgeführten Untersuchungen wurde 2003 ein Hackschnitzelhaufen bestehend aus Kiefern-Mittelhackschnitzel in der Nähe von Zempow messtechnisch begleitet. Der Haufen wurde, beginnend am 22.01.2003, innerhalb von 10 Tagen auf eine Länge von 50 Meter mit einer Breite von 15 Meter und einer Höhe von 6 Meter aufgeschüttet. Zur Temperaturmessung wurden Minidatenlogger in die Bilanzbeutel in der Mitte des Haufens eingelagert und zu Zeitpunkten der Probenahmen wurde mit Einstechthermometern die Temperatur in 120 cm Tiefe an definierten Stellen gemessen. Die Werte der an den Flanken mit Einstechthermometern und in der Mitte des Haufens mit Mini-Dataloggern gemessenen Temperaturen stimmen weitgehend überein (**Bild 4-13** und **Bild 4-14**). Im Höhenprofil der Temperatur zeigte sich der Temperaturanstieg besonders in den oberen Schichten (**Bild 4-15**).

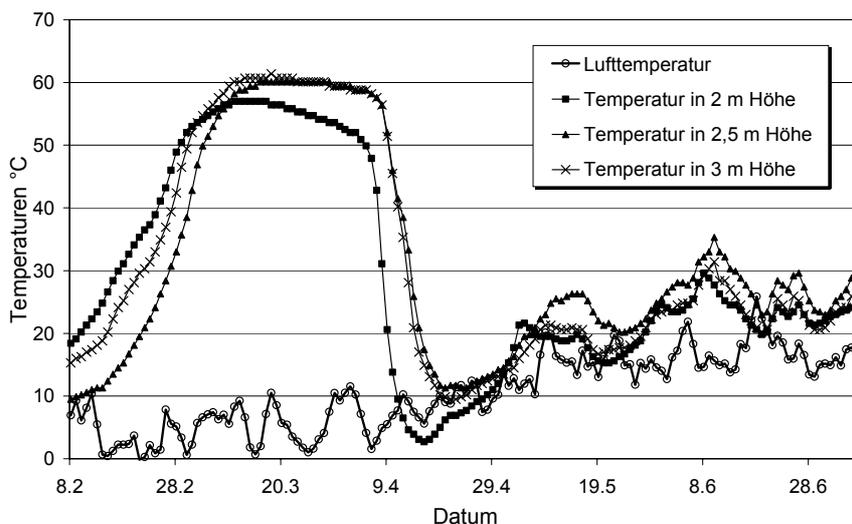


Bild 4-13: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Höhe in dem 2000 m³ Kiefern-Hackschnitzelhaufen (HS 38) mit Mini-Dataloggern in der Haufenmitte gemessen (Zempow, 2003)

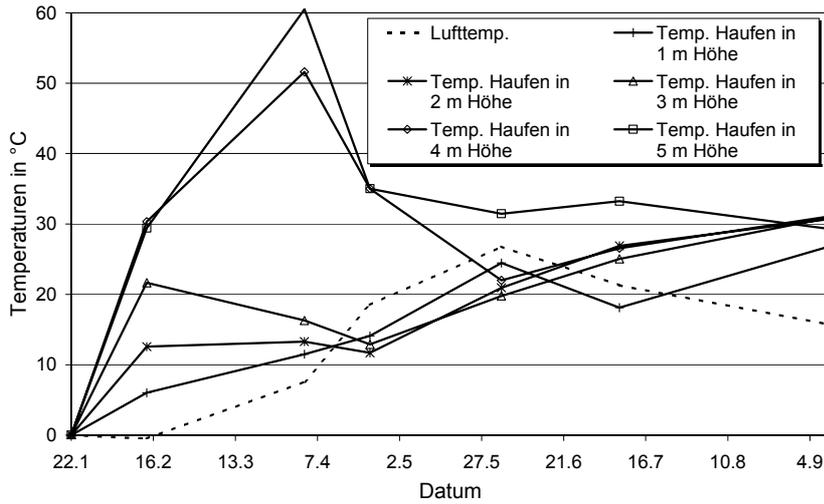


Bild 4-14: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit in dem 2000 m³-Kiefern-Hackschnitzelhaufen (HS 38) mit einem 120 cm-Einstichthermometer an den Flanken gemessen (Zempow, 2003)

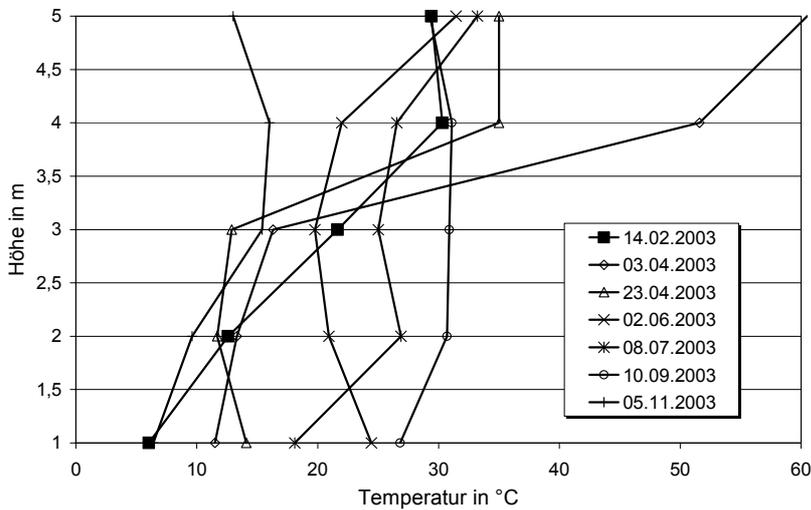


Bild 4-15: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von Höhe in dem 2000 m³-Kiefern-Hackschnitzelhaufen (Höhenprofil der Haufenflanke in 120 cm Tiefe) (Zempow, 2003)

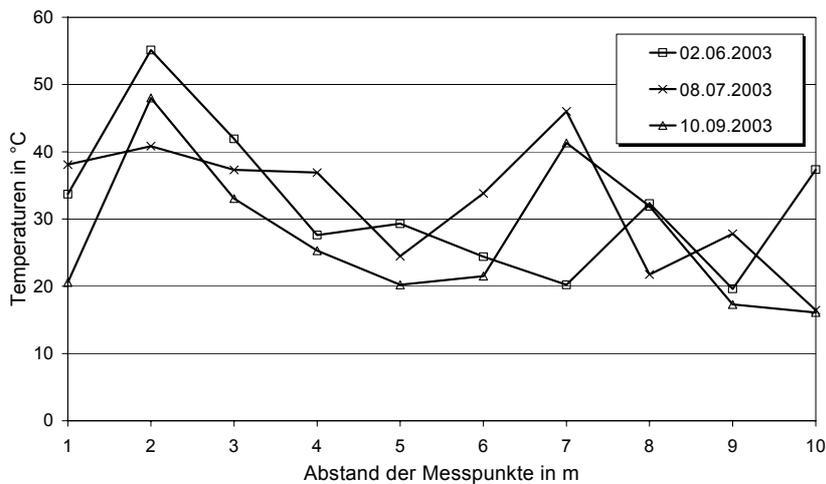


Bild 4-16: Temperaturverlauf entlang der Längsachse des 2000 m³-Kiefern-Hackschnitzelhaufens in 100 cm Tiefe (Zempow, 2003)

Temperaturmessungen oben auf dem Haufen entlang der Längsachse zeigten in Abhängigkeit von der Zeit kein „Durchwandern“ eines Spitzenwertes. Es zeigte sich, dass es abwechselnd

warme und weniger warme Zonen gab. Kontrollmessungen an einem Punkt ergaben Abweichungen von 30 K im Abstand von einem Meter. Dieser Sachverhalt wurde zusätzlich durch Aufnahmen mit einer Thermographiekamera belegt (**Bilder 4-16 bis 4-18**).

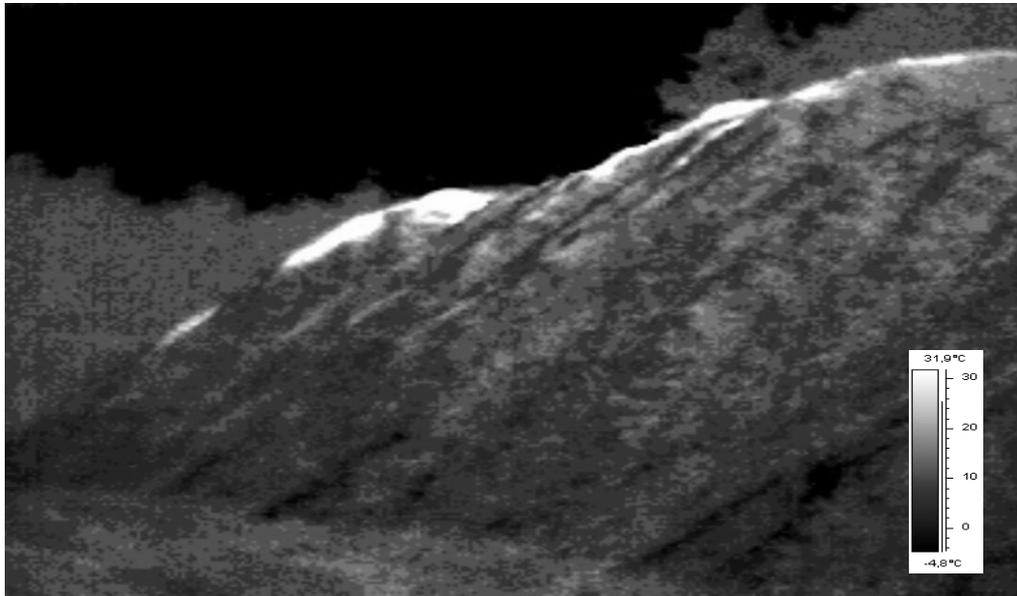


Bild 4-17: Thermografieaufnahme der Seitenansicht des 2000 m³-Kiefer-Hackschnitzelhaufens in Zempow am 02.04.2003 (9.30 Uhr)

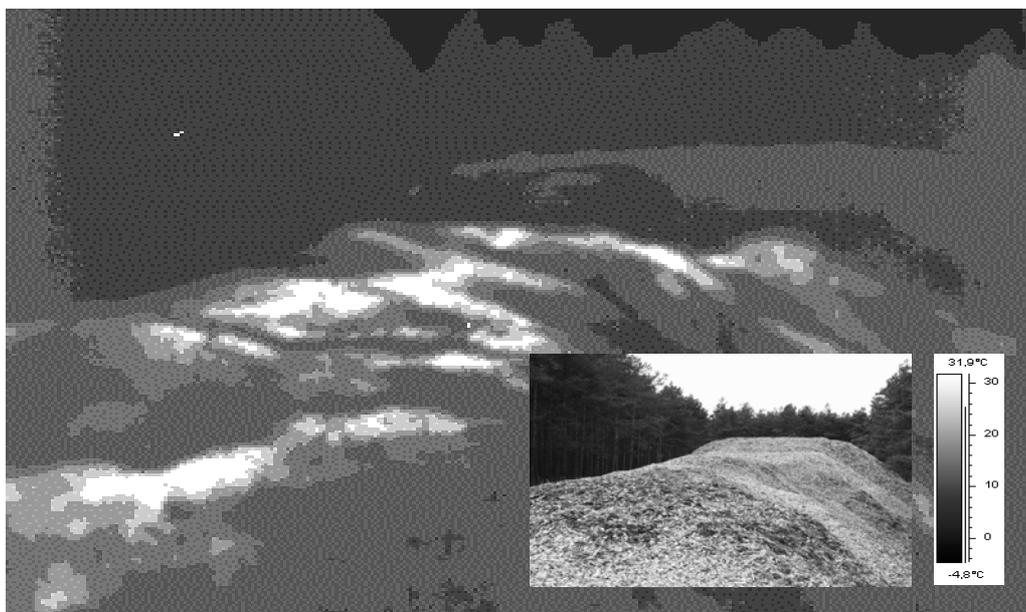


Bild 4-18: Thermografieaufnahme der Flanke des Kiefer-Hackschnitzelhaufens in Zempow am 02.04.2003 (9.30 Uhr)

4.2 Wassergehalt

4.2.1 Laborgefäße

Lagersaison 2002

In einer ersten Versuchsserie wurden Feinhackschnitzel HS 23 (Anfangswassergehalt 56,7 %) zeitgleich bei verschiedenen Temperaturen gelagert. Nach einmonatiger Lagerung der Hackschnitzel bei 17 °C hat das Lagergut noch einen Restwassergehalt von 55 %. Bei 30 °C verringerte sich der Wassergehalt nach 4 Wochen auf 53,4 % und bei 60 °C war das Gut erwartungsgemäß bis auf einen Restwassergehalt von 6,6 % getrocknet.

In einer zweiten Serie wurde Pappelholz unterschiedlicher Aufbereitung bei gleicher Temperatur von 30 °C gelagert. Das Holz trocknete während der einmonatigen Lagerung unterschiedlich ab. Die Mittelhackschnitzel HS 36 trockneten innerhalb von 4 Wochen um 6,1 % ab, die Feinhackschnitzel HS 23 um 5,3 % und die Grobhackstücke HS 63 um 4,8 %.

Lagersaison 2003

Die Ergebnisse zur Temperaturabhängigkeit des Trocknungsverhaltens bei gelagerten Holz hackschnitzeln von Pappel und Kiefer sind in **Bild 4-19** zusammengestellt. Je 5 Gefäße mit Pappelholz HS 16, HS 22, HS 56 und HS 150 sowie mit Kiefern hackschnitzeln HS 46 wurden bei Umgebungstemperaturen von 20 °C, 25 °C, 30 °C und 35 °C aufgestellt und 4 Wochen gelagert.

Die Trocknung der Hackschnitzel ist von der Holzart, der Aufbereitung und der Lagerungstemperatur abhängig. Bei der höchsten Lagerungstemperatur konnten auch die größten Feuchteabnahmen registriert werden. Bei der höchsten Lagerungstemperatur von 35 °C wurden bei den Pappel- Feinhackschnitzelfractionen HS 16 und HS 22 15,6 % bzw. 20,3 % Feuchteabnahme registriert. Die Mittelhackschnitzel HS 56 verloren 15,8 % Wasser und bei den Hackstücken HS 150 betrug die Differenz im Wassergehalt zwischen Ein- und Auslagerung 51,6%.

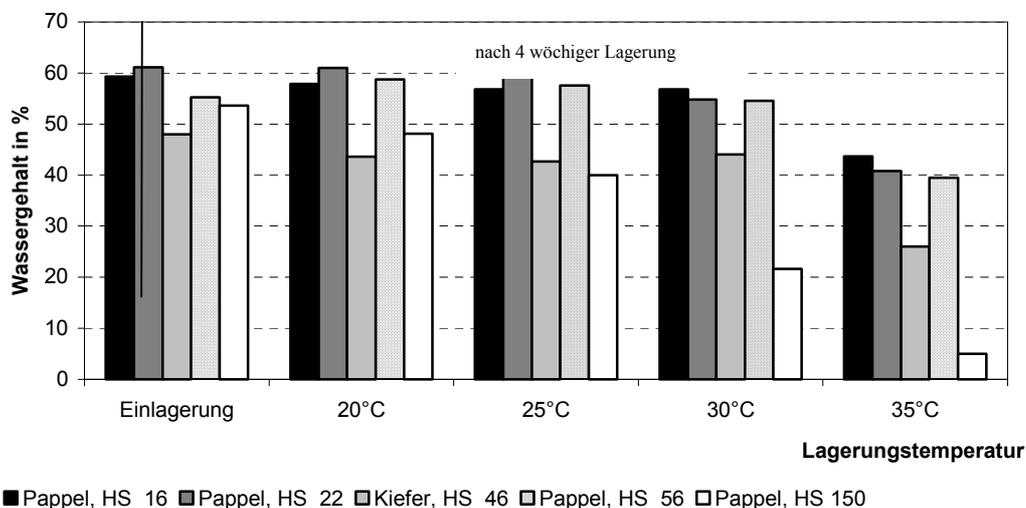


Bild 4-19: Wassergehalt von unterschiedlichen Hackschnitzelfractionen nach 4 wöchiger Lagerung in den Laborgefäßen

4.2.2 Lagersilos

Lagersaison 2001 - 2002

Die Ergebnisse zum Trocknungsverlauf von Pappelholz unterschiedlicher Hackgutfraktionen in den Lagersilos sind in **Tabelle 4-1** zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Wassergehalte von unterschiedlichen Pappel-Hackgutfraktionen nach 4-monatiger Lagerung in den Lagersilos (n = 5)

Aufbereitung	Probenahme		Wassergehalt %
	Zeitpunkt	Ort (vgl. Kap.3.3.2)	
Feinhackschnitzel HS 19	13.9.2001	-	35,1
	11.1.2002	190 cm	73,1
		145 cm	54,1
		100 cm	48,6
		55 cm	49,8
		10 cm	32,9
Mittel bei Auslagerung	-	-	51,7
Mittelhackschnitzel HS 36	13.9.2001	-	38,8
	10.1.2002	190 cm	27,2
		145 cm	33,5
		100 cm	25,2
		55 cm	22,0
		10 cm	19,8
Mittel bei Auslagerung	-	-	25,5
Hackstücke HS 150	13.9.2001	-	43,1
	9.1.2002	190 cm	26,4
		145 cm	28,0
		100 cm	25,0
		55 cm	25,8
		10 cm	21,2
Mittel bei Auslagerung	-	-	25,3

Während der 4-monatigen Lagerung in den thermisch isolierten Lagersilos konnte nur bei den Mittelhackschnitzeln und bei den Hackstücken eine Trocknung des Gutes beobachtet werden. Die Feuchteabnahme betrug 13,6 % bzw. 17,3 %. Bei den eingelagerten Feinhackschnitzeln kam es unter den gewählten Versuchsbedingungen zu keiner Trocknung; im Gegenteil, das Gut nahm 14,7 % Wasser auf. Die Anordnung der Abzugshaube bewirkte, dass der Wasserdampf, der während der Trocknung entstand, an der Haube kondensierte und abtropfte und somit den weiteren Trocknungsvorgang behinderte. Für die folgenden Versuche wurde die Abzugshaube entsprechend geändert.

Die Hackstücke trockneten am gleichmäßigsten ab. Es konnte kein nennenswertes Höhenprofil bei der Auslagerung beobachtet werden. Bei den Mittelhackschnitzeln dagegen ist ein deutliches Gefälle im Wassergehalt von unten bis in eine Höhe von 145 cm zu erkennen. Bei der feinsten Fraktion ist von oben nach unten eine kontinuierliche Abnahme des Wassergehaltes festgestellt worden.

Lagersaison 2002 - 2003

Die Ergebnisse zum Trocknungsverlauf von Pappel- und Weidenholz unterschiedlicher Hackgutfraktionen während der einjährigen Lagerung sind in **Bild 4-20** zusammengefasst. In Abhängigkeit vom Zerkleinerungsgrad trocknen die Hackschnitzel im Lagersilo während der einjährigen Lagerung unterschiedlich ab.

Während Pappel-Feinhackschnitzel und Mittelhackschnitzel HS 23 und HS 36 auf mittlere Wassergehalte von 39 % bzw. 23 % abtrockneten, wurde bei Pappelgrobhackschnitzeln HS 63 ein Wassergehalt von 52 % gemessen, der offenbar durch eindringendes Regenwasser verursacht wurde. Die Pappelstücke HS 156 wiesen am Ende der Lagersaison nur noch 20 % Wasser auf. Der geringste Wassergehalt wurde am Ende der Lagerzeit bei Weidengrobhackschnitzel HS 63 mit 18 % ermittelt.

In Abhängigkeit von der Höhe bildeten sich typische Feuchteprofile aus. Feinhackschnitzel weisen sowohl im unteren als auch im oberen Bereich auf Grund von Kondensationserscheinungen ausgeprägte Maxima auf. Während bei groben Hackschnitzeln das Profil recht ausgeglichen ist (**Bild 4-20**).

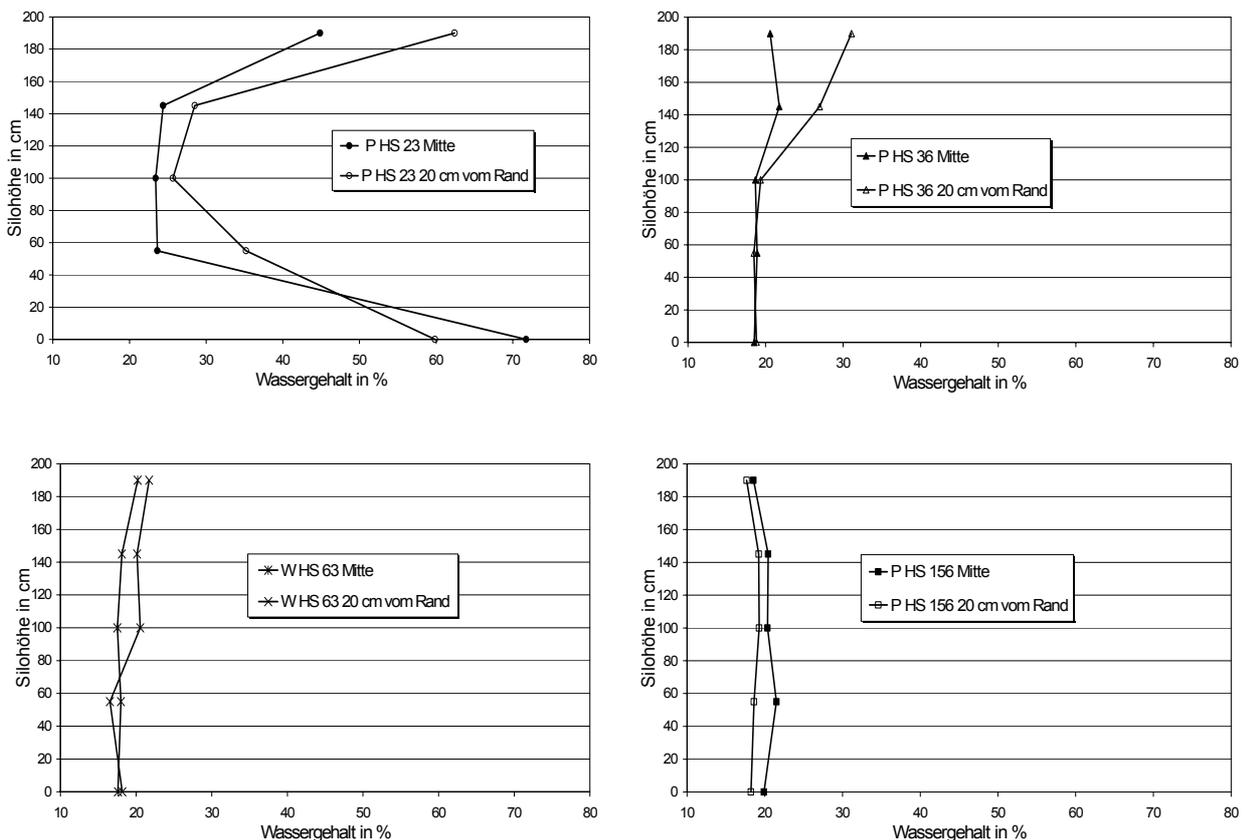


Bild 4-20: Höhenprofil des Wassergehaltes nach einjähriger Lagerung von Hackgut in 1,5 m³-Silos (Saison 2002)

Oben links: Pappel HS 23
Unten links: Weide HS 63

Oben rechts: Pappel HS 36
Unten rechts: Pappel HS 156

Lagersaison 2003 - 2004

Zwischen dem 13.03.2003 und 17.03.2003 wurden 4 Lagersilos mit unterschiedlichen Pappelholzfraktionen befüllt. Die Wassergehalte bei Ein- und Auslagerung sind in **Tabelle 4-2** zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Änderung des Wassergehaltes während der achtmonatigen Lagerung unterschiedlicher Pappelfraktionen in den Lagersilos in Abhängigkeit von der Höhe (n=10)

Probenahmezeitpunkt und -ort	Wassergehalt von unterschiedlich zerkleinertem Pappelholz %			
	HS 16	HS 22	HS 56	HS 155
Einlagerung: 03/03	59,5	60,6	61,0	61,5
Auslagerung: 11/03				
190 cm	33,7	63,5	17,2	11,7
	40,8	54,0	27,5	11,5
145 cm	38,9	51,4	38,2	13,3
	50,4	56,4	46,0	12,7
100 cm	56,5	37,8	42,8	30,0
	58,5	49,0	47,2	27,1
55 cm	54,4	39,2	46,6	24,5
	57,8	39,2	39,2	26,4
10 cm	78,5	18,3	19,8	20,4
	78,4	18,7	19,8	17,7
Mittelwert	54,8	42,8	34,4	19,5

Während der achtmonatigen Lagerung in den Lagersilos mit luftdurchlässigem Boden trockneten die Holzhackschnitzel in Abhängigkeit von der Aufbereitung unterschiedlich ab. Die geringste Wasserabnahme ist bei den Feinhackschnitzeln HS 16 zu verzeichnen. Die höchsten Wasserabnahme konnte bei den Hackstücken HS 155 ermittelt werden.

Ähnlich wie bei den vorangegangenen Untersuchungen wird auch hier eine Abhängigkeit von der Höhe festgestellt. Auf Grund des luftdurchlässigen (Sieb-) Bodens bildet sich bei Feinhackschnitzeln HS 22 das Feuchtemaximum, wie erwartet, nur in der oberen Schicht aus. Warum bei den sehr feinen Hackschnitzeln HS 16 der Wassergehalt im unteren Bereich Extremwerte annimmt, ist nicht erklärbar. Die gröberen Fraktionen HS 56 und HS 155 weisen ein gewisses Maximum im mittleren Höhenbereich aus (**Tabelle 4-2**).

4.2.3 Lagerboxen

Lagersaison 1998 – 1999

Bei der Lagerung in offenen Boxen trockneten ganze Bäume relativ gleichmäßig ab. Sie wiesen am Ende der einjährigen Lagerung Wassergehalte um ca. 30 % auf (Pappel und Weide). Mittelhackschnitzel und Feinhackschnitzel der beiden Holzarten dagegen trocknen langsamer ab. Am Ende der Lagerung waren bei diesen Aufbereitungen noch mittlere Wassergehalte zwischen 33 % und 50 % ermittelt worden. Die im Herbst einsetzenden Niederschläge führen teilweise zu einer Wiederbefeuchtung des Lagergutes, wobei der hier dargestellte zeitliche Verlauf des Wassergehaltes nicht repräsentativ ist, da (im 1. Versuchsjahr) die Proben vorwiegend aus der oberen, extrem feuchten Schicht gezogen wurden (**Bild 4-21**).

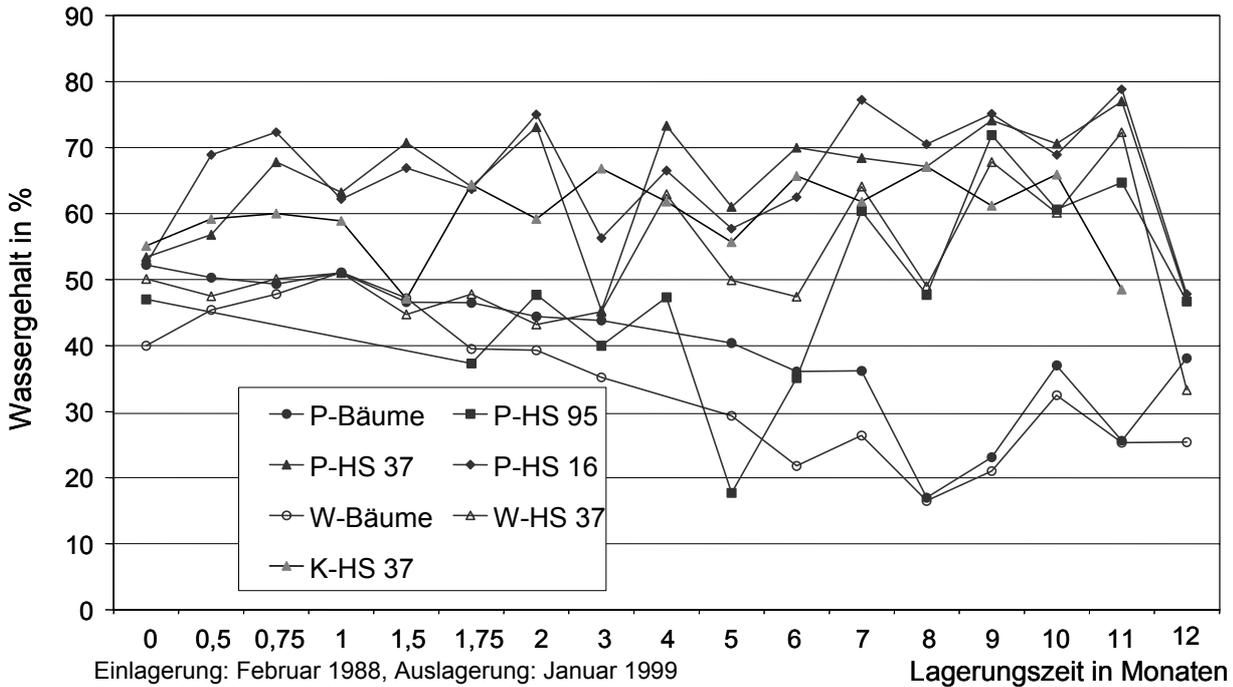


Bild 4-21: Trocknungsverlauf von Pappel, Weide und Kiefer bei der Lagerung in nicht abgedeckten Boxen (Saison 1998)

Die Veränderungen des Wassergehaltes des Holzes während der Lagerung in offenen Boxen wurde auch von den Niederschlägen beeinflusst (**Bild 4-22**). Die hohen Niederschlagsmengen im Oktober 1998 haben den Trocknungsverlauf ab dem 9. Lagerungsmonat beeinflusst und das weitere Abtrocknen des Holzes verzögert.

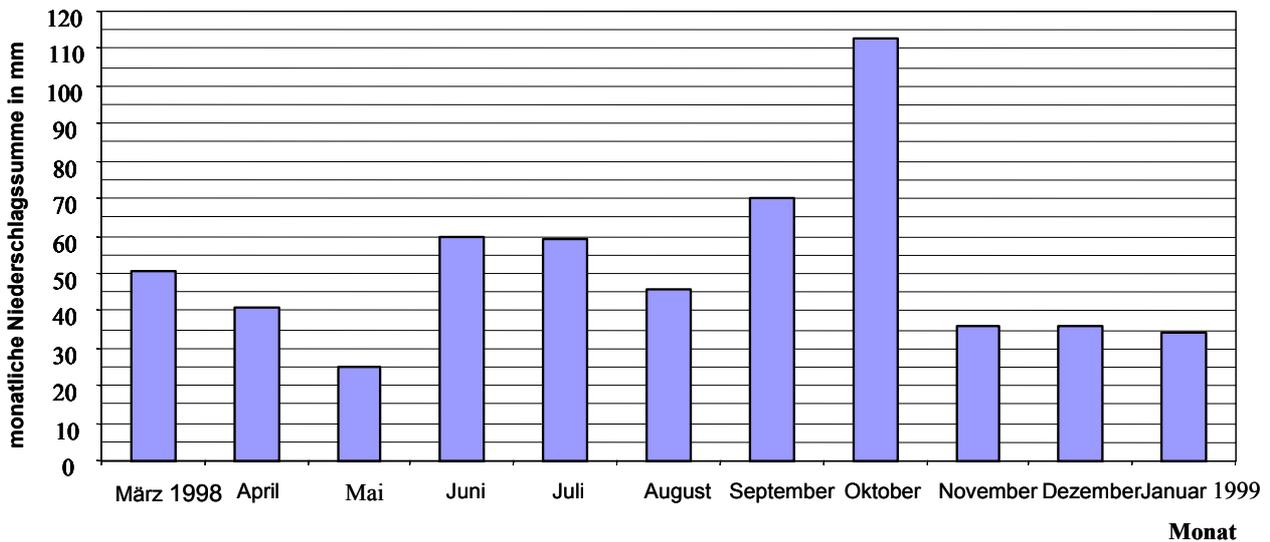


Bild 4-22: Monatlicher Niederschlag während der Lagersaison 1998 – 1999 (Daten: DWD)

Lagersaison 1999 - 2000

Die Lagerung von Hackgut in abgedeckten Lagerboxen mit luftdurchlässigen Spaltenboden führte bei Pappelhackstücken HS 120 zu einer kontinuierlichen Abtrocknung bis auf mittlere Wassergehalte von 21 %. Die Feinhackschnitzel HS 16 trockneten langsamer ab und erreichten

nach einjähriger Lagerung Wassergehalte von 38 % bei Pappel und 32 % bei Kiefer. Werden die Feinhackschnitzel ohne Unterlüftung gelagert, liegen die Wassergehalte am Ende der Lagerung mit 43 % etwas höher (**Bild 4-23**).

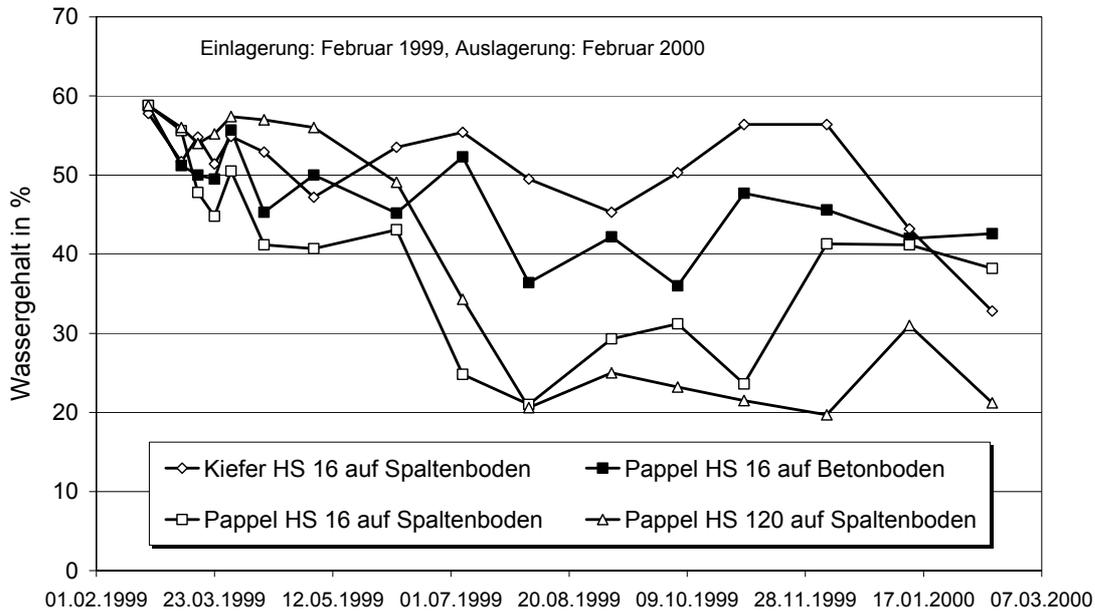


Bild 4-23: Trocknungsverlauf von Pappel- und Kiefern-Hackschnitzel während der Lagerung in abgedeckten 10 m³-Lagerboxen, Saison 1999

Über der Höhe bilden sich auch hier typische Profile aus. Das heißt, bei Grobhackgut HS 120 liegt ein relativ ausgeglichener Verlauf vor, während bei Feinhackschnitzeln HS 16 die Boden- und die Deckschicht ausgesprochen feucht sind. Im unteren Bereich begünstigt der luftdurchlässige Spaltenboden den Trocknungsprozess ein wenig (**Bild 4-24**).

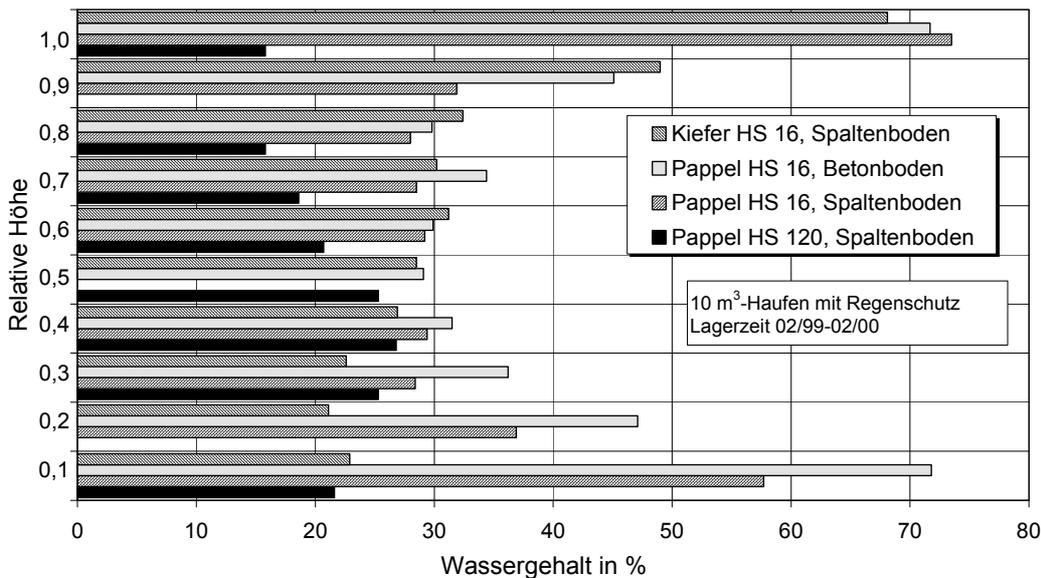


Bild 4-24: Feuchteprofil nach einjähriger Lagerung von Pappel- und Kiefern-Hackgut in 10 m³-Boxen mit und ohne Spaltenboden

Lagersaison 2002 - 2003

Die Lagerung von unterschiedlichen Pappelholzfraktionen in abgedeckten Lagerboxen zeigten bei den Hackstücken HS 156 und den Grobhackschnitzeln HS 63 einen nahezu gleichartigen Trocknungsverlauf. Am Ende der Lagerung wiesen Hackstücke und Grobhackschnitzel Wassergehalte von 20 bis 25 % auf. Die Mittel- und Feinhackschnitzel zeigten hingegen einen verlangsamteten Trocknungsverlauf und wiesen nach einem Jahr Wassergehalte von 33 bis 36 % auf.

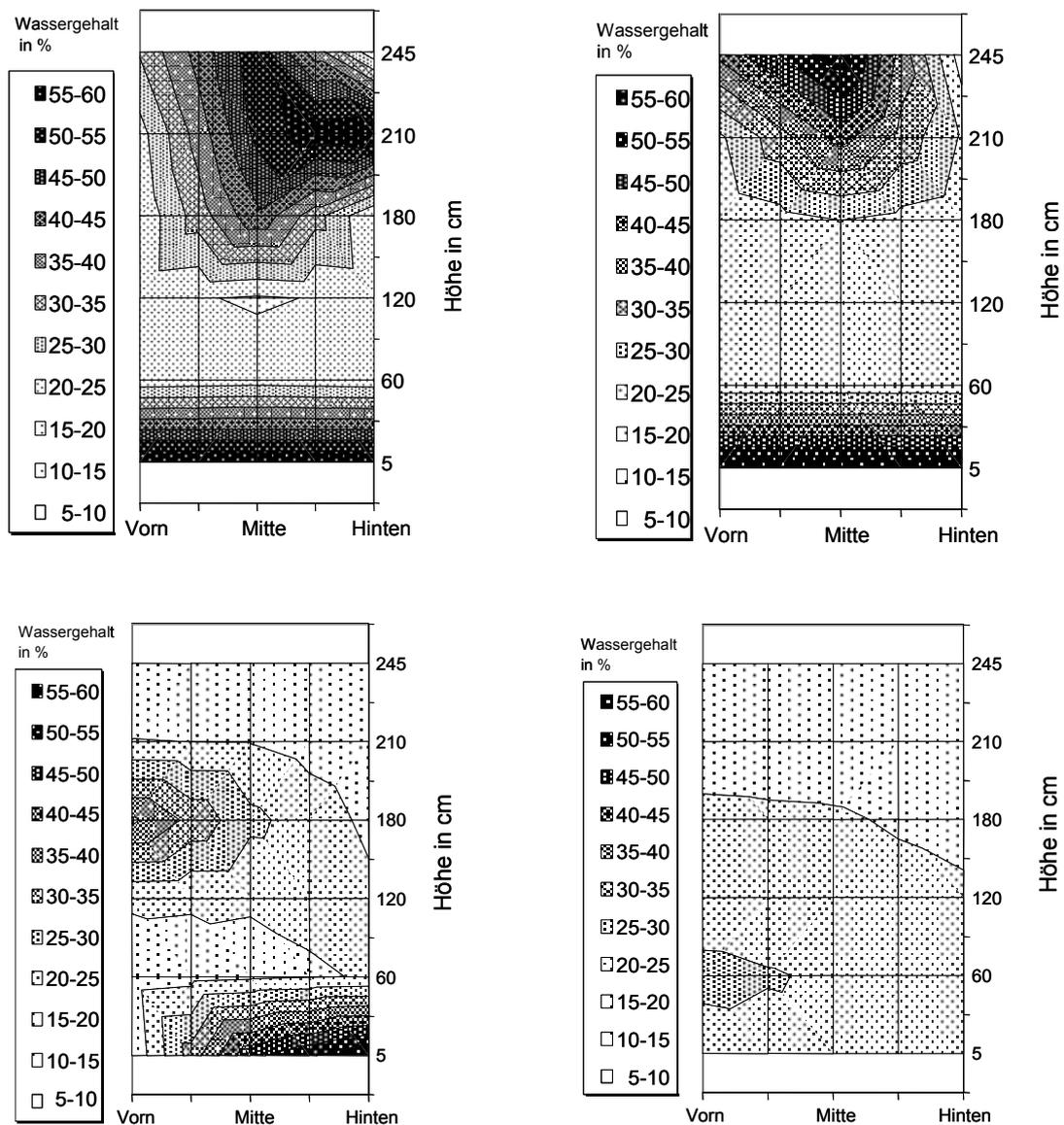


Bild 4-25: Höhenprofil des Wassergehaltes nach einjähriger Lagerung von Pappelhackgut in 10 m³-Lagerboxen (Saison 2002 – 2003)

Oben links: HS 23
Unten links: HS 63

Oben rechts: HS 36
Unten rechts: HS 156

Auch hier bilden sich die bereits erläuterten Feuchteprofile aus. Das Flächendiagramm veranschaulicht sehr bildhaft die Ausbildung von feuchten horizontalen Schichten und auch von trocknen vertikalen Zonen, Schloten u.ä., die auch in größeren Schüttungen beobachtet werden und nicht zwangsläufig Randeinflüssen zuzuordnen sind (**Bild 4-25**).

4.2.4 Lagerhaufen

Lagerungssaison 2002 - 2003

Bei der Lagerung von Fein- und Grobhackschnitzeln der Pappel in 18 m³-Dreiecksmieten mit und ohne Regenschutz ist beim Trocknungsverlauf eher eine Abhängigkeit vom Regenschutz als von der Hackschnitzelgröße festzustellen. Beide Hackschnitzelfraktionen trockneten mit Regenschutz auf Wassergehalte um 20 % ab, wogegen bei der Lagerung ohne Regenschutz Wassergehalte um 35 % ermittelt wurden (**Bild 4-26**). Die extrem geringen Wassergehalte mit Regenschutz sind u.U. auf den Einfluss der Abdeckplane zurückzuführen, die im Abstand von ca. 1 m über den Haufen gespannt war und möglicherweise wie ein Solartrockner gewirkt hat (**Bild 4-27**). Die bei der Auslagerung aus 66 Bilanzbeuteln gemittelten Wassergehalte weisen in beiden Fällen allerdings etwas höhere Werte aus (vgl. **Tabelle 5-23**).

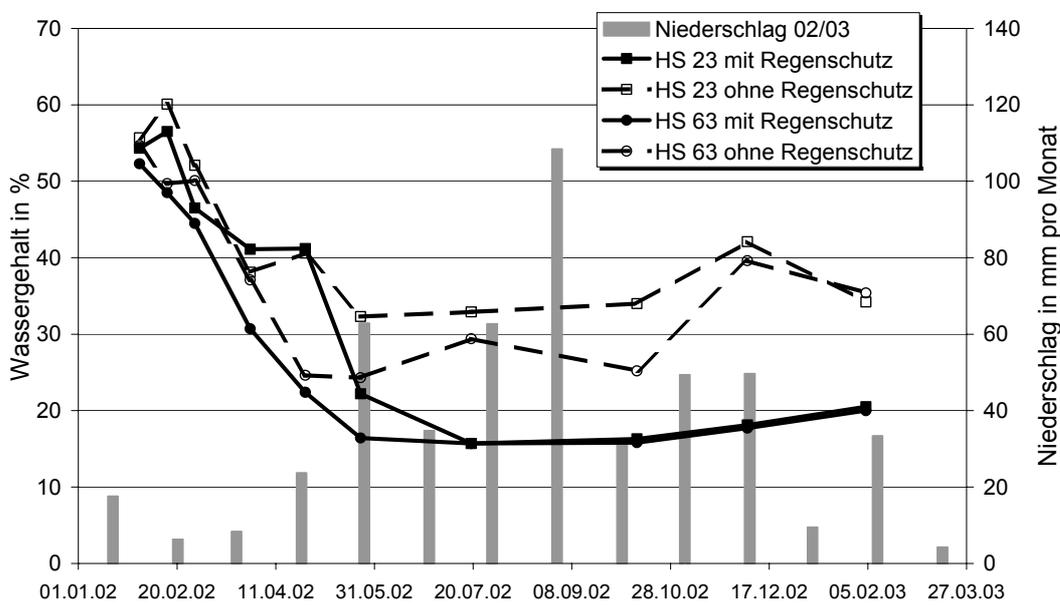


Bild 4-26: Mittlerer Wassergehalt von Pappelhackschnitzeln bei der Lagerung in 18 m³-Haufen

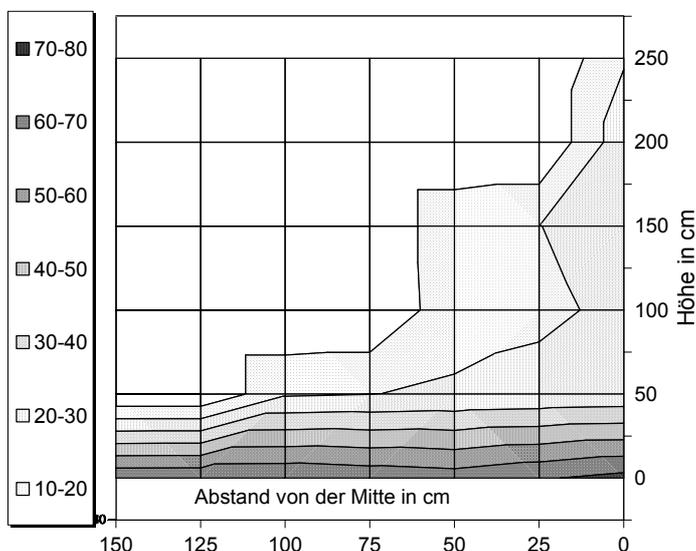


Bild 4-27: Profil des Wassergehaltes nach einjähriger Lagerung von Pappelhackschnitzeln (HS 63) in einer regengeschützten 18 m³-Dreiecksmiete

Im Jahr 2002 wurde auch ein ca. 70 m³ großer Lagerhaufen am Feldrand mit Pappel-Mittelhackschnitzeln HS 36 angelegt. Dieser Haufen zeichnete sich durch einen Luftkanal am Boden aus. Insgesamt treten sowohl auf der Oberfläche als auch in den tiefergelegenen Schichten große Unterschiede in den Wassergehalten und den Temperaturen auf, die für ein heterogenes Entwicklungsgeschehen von Mikroorganismen von Bedeutung sind. Das Feuchteprofil ist ähnlich wie in den Schüttungen über Spaltenboden. Während die Oberfläche sehr gut abtrocknet, sind die Wassergehalte infolge Kondensation in der unmittelbar darunter liegenden Schicht deutlich höher. Danach nehmen sie zum Belüftungskanal hin wieder ab. Auch hier sind vertikale Zonen mit unterschiedlichen Wassergehalten erkennbar (**Bild 4-28**).

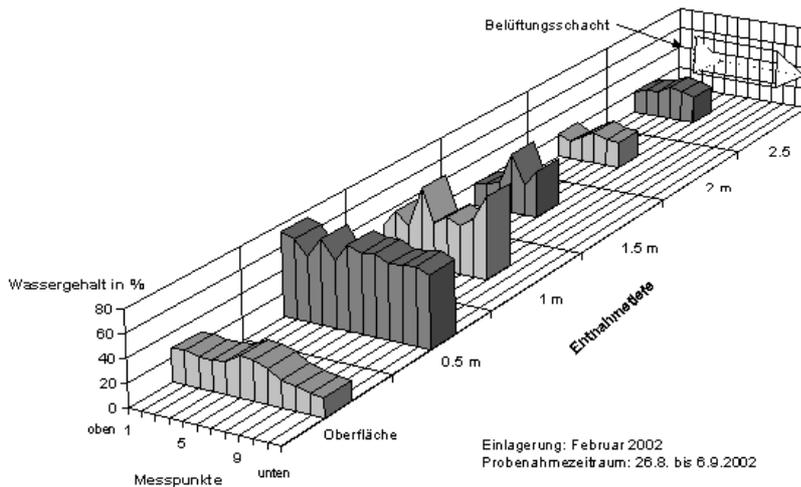


Bild 4-28: Wassergehalt in einem 70 m³-Pappelhackschnitzel-Haufen (HS 36) mit Luftkanal in Abhängigkeit von den Ortskoordinaten (Lage der Messpunkte s. Bild 3-25)

Lagersaison 2003 - 2004

Im Februar 2003 wurde im Wald ein sehr großer Kiefernhackschnitzelhaufen HS 38 errichtet. Die Wassergehalte nach 9-monatiger Lagerung sind in Abhängigkeit von der Tiefe in **Tabelle 4-3** zusammengestellt.

Tabelle 4-3: Wassergehalte von Kiefernhackschnitzeln HS 38 nach 9-monatiger Lagerung in 2000 m³-Haufen in Abhängigkeit von der Schichttiefe

Probenahmezeit und -ort	Wassergehalt in %
Einlagerung am 22.2.2003	55 ... 57
Auslagerung am 7.11.2003	
Oberfläche	64,3
5 cm unter der Oberfläche	67,4
10 cm unter der Oberfläche	69,6
35 cm unter der Oberfläche	22,2
100 cm unter der Oberfläche	20,7

Wie bei den Versuchen im halbtechnischen Maßstab hat sich auch hier eine feuchte Deckschicht ausgebildet. Sie ist hier allerdings nur 10 bis 30 cm dick. Die extremen Unterschiede des Wassergehaltes über der Höhe sind nicht repräsentativ für diesen Haufen. An anderen Einstichstellen treten auch geringere Abweichungen auf (**vgl. Bild 4-62**).

4.3 Sorptions- und Trocknungsverhalten von Partikeln

Neben Trocknungsverläufen in Schüttungen wurden auch Trocknungsverläufe einzelner Holzpartikel unter verschiedenen Lagerbedingungen untersucht. Zur Ermittlung der Sorptionsisothermen von Pappelholz unterschiedlicher Größe wurden diese in einem Klimaschrank bei 20 °C gelagert und unterschiedlichen Luftfeuchten ausgesetzt. Zuvor durchgeführte Messungen ergaben, dass sich in einem Zeitraum von ≥ 20 Tagen die Gleichgewichtsfeuchte einstellt. Die Sorptionsisothermen zeigen einen typischen Verlauf, wobei die Partikelgröße offenbar keinen Einfluss hat, sondern lediglich auf die Zeitdauer zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte (**Bild 4-29**).

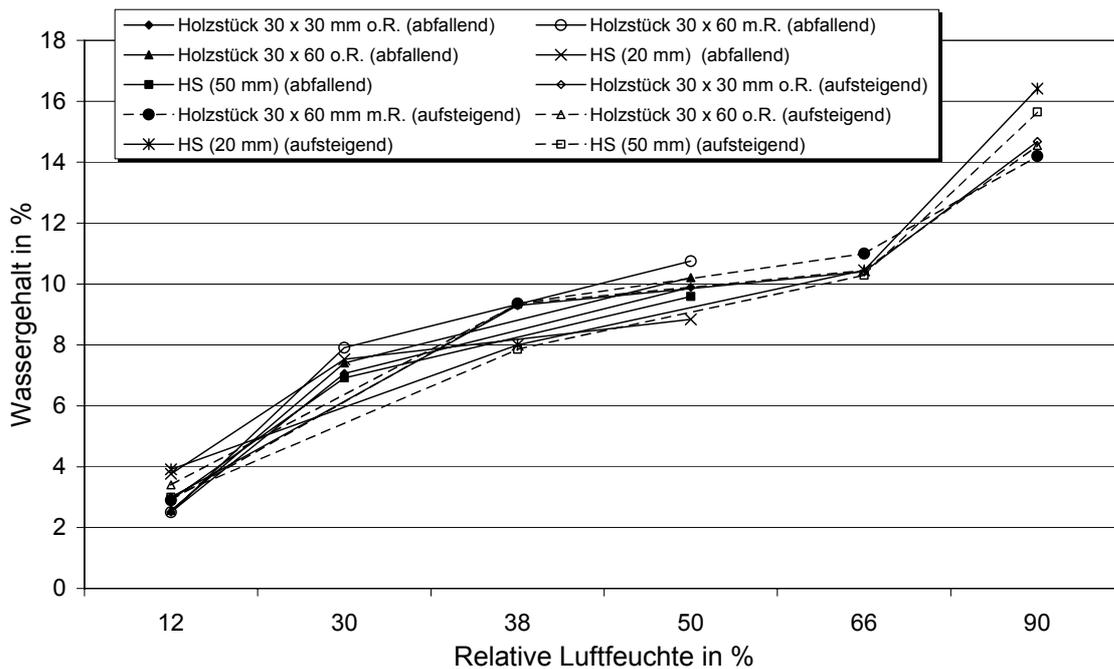


Bild 4-29: Sorptionsisothermen von Pappelholz in Abhängigkeit von der Partikelgröße

Außerdem wurden einzeln lagernde Astabschnitte und Hackschnitzel aus Pappelholz fünf verschiedenen Umgebungstemperaturen (Lufttemperatur, 20 °C, 40 °C, 60 °C und 105 °C) ausgesetzt und der Gesamtmasseverlust in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt. Daraus kann unter Berücksichtigung des Trockenmasseverlustes der Trocknungsverlauf in Abhängigkeit von Partikelgröße, Temperatur und Zeit ermittelt werden (**Bilder 4-30 und 4-31**).

Die Trocknungsdauer wird maßgeblich von der Temperatur bestimmt. Die Ermittlung der Verweildauer der Proben im Trockenschrank bei 105 °C ergab u.a., dass Astabschnitte mit einem Durchmesser von > 60 mm mindestens 48 Stunden getrocknet werden müssen. Bei kleineren Hackschnitzeln wird das Darrgewicht bereits nach 24 Stunden erreicht.

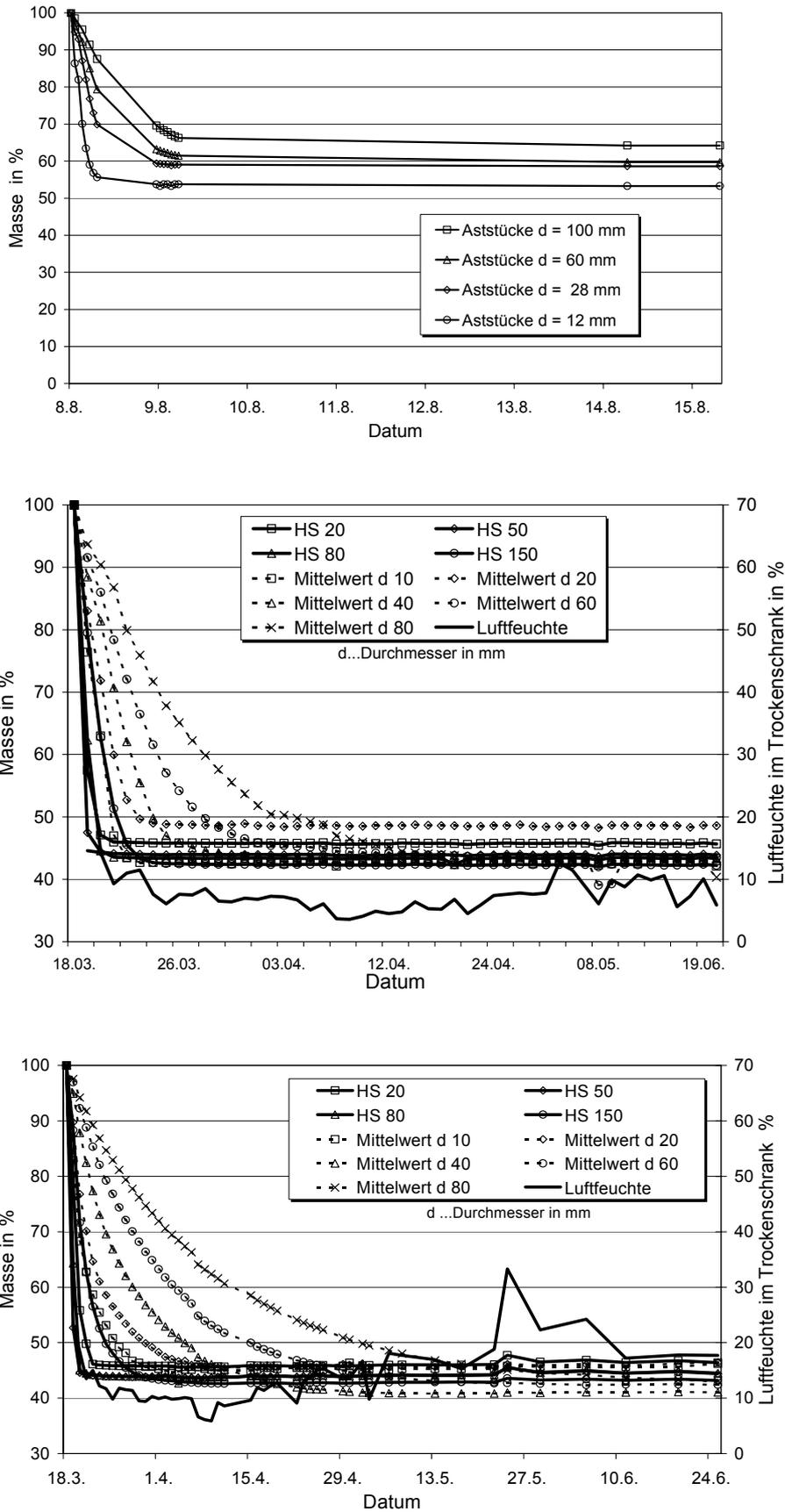


Bild 4-30: Relative Masseänderung von einzeln lagernden Pappel-Astabschnitten und Hackschnitzeln in Abhängigkeit von Umgebungstemperatur und Zeit (Saison 2002)

Oben: 105 °C

Mitte: 60 °C

Unten: 40 °C

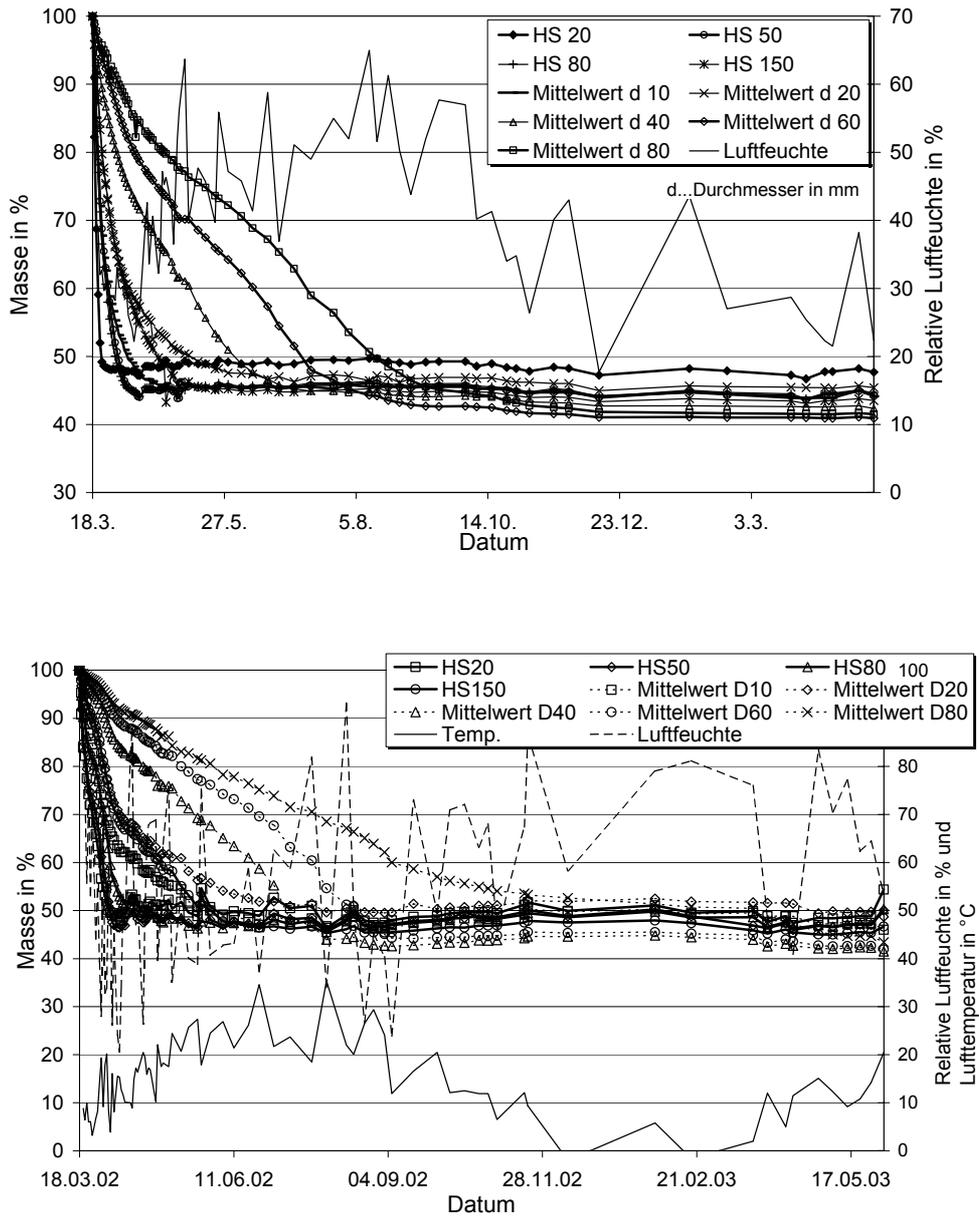


Bild 4-31: Relative Masseänderung von einzeln lagernden Pappel-Astabschnitten und Hackschnitzeln in Abhängigkeit von Umgebungstemperatur und Zeit (Saison 2002 - 2003)

Oben: 20 °C

Unten: Außentemperatur

Nach Abschluss der Trocknungsversuche wiesen die unter konstanter Umgebungstemperatur und Luftfeuchte gelagerten Holzpartikel Wassergehalte zwischen 2 und 6 % auf, die im wesentlichen der jeweiligen Ausgleichsfeuchte entsprechen (**Bild 4-29**). Die hohen Wassergehalte bei den unter Außentemperatur gelagerten Holzhackschnitzeln, die unabhängig von der Größe zwischen 16 und 23 % liegen, können nicht zweifelsfrei erklärt werden. Sie liegen deutlich über der Ausgleichsfeuchte von etwa 10 bis 13 % für die mehrere Wochen vor der Auslagerung herrschende relative mittlere Luftfeuchte von ca. 50 bis 80 % (**Bild 4-32**).

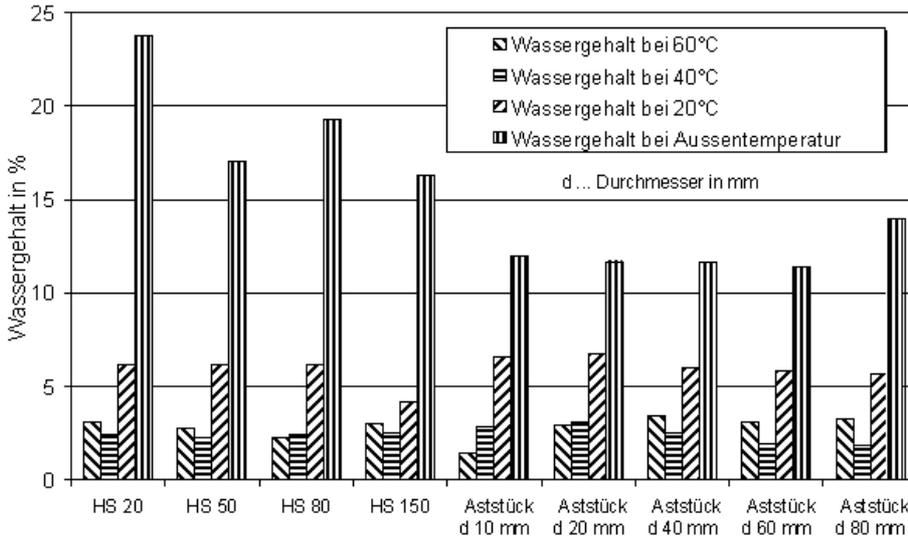


Bild 4-32: Endwassergehalte der Pappel-Astab-schnitte und Hackschnitzel nach der Trocknung bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen (Saison 2002 - 2003)

Zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Wassergehaltes auf Basis des gemessenen Gesamtmasseverlustes ist die Kenntnis des Trockenmasseverlustes erforderlich. In vorliegendem Trocknungsversuch wurde der Trockenmasseverlust nur am Ende der Lagerung bestimmt, so dass Zwischenzeiten interpoliert werden müssen. Bei Temperaturen > 40 °C überschreiten aufgrund der raschen Trocknung der Partikel die Trockenmasseverluste ohnehin nicht 3 % (**Bild 4-33**). Die hohen Verluste bei mittleren Temperaturen ≤ 20 °C sind auf lange Lagerzeiten und hohe Wassergehalte zurückzuführen (vgl. Kap. 4.6).

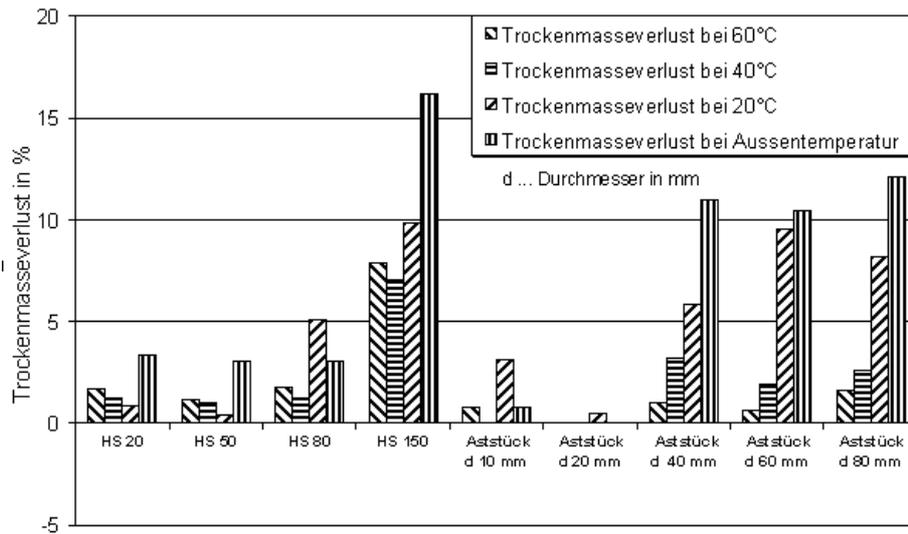


Bild 4-33: Trockenmasseverluste von einzeln lagernden Pappelhack-schnitzeln und Astabschnitten nach Beendi-gung des jeweiligen Trocknungsversuchs bei unterschiedlichen Umge-bungstemperaturen (Saison 2002 - 2003)

4.4 Schimmelpilze

4.4.1 Laborgefäße

Lagersaison 2002

Die Ergebnisse zur Temperaturabhängigkeit des Schimmelpilzgehaltes an gelagerten Holzhackschnitzeln der Pappel sind in **Tabelle 4-4** zusammengestellt. Je 7 Gefäße mit Pappelholz HS 23 wurden bei 17 °C, 30 °C und 60 °C aufgestellt und 4 Wochen gelagert.

Tabelle 4-4: Schimmelpilzentwicklung in Feinhackschnitzeln HS 23 in Abhängigkeit von der Lagertemperatur nach 4-wöchiger Lagerung (n = 7)

Parameter	pH-Wert	Schimmelpilze (KbE/g FM)	
		mesophil	thermophil
Lagertemperatur 17°C			
Mittelwert	7,12	$2,7 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^4$
Median	7,09	$2,4 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^4$
Lagertemperatur 30°C			
Mittelwert	7,71	$4,7 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^8$
Median	7,42	$4,9 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^7$
Lagertemperatur 60°C			
Mittelwert	5,12	$7,0 \cdot 10^2$	$1,9 \cdot 10^4$
Median	5,05	$1,0 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^3$

Eine Erhöhung der Lagertemperatur von 17 °C auf 30 °C bewirkt in Feinhackschnitzeln erwartungsgemäß eine Erhöhung der Zahl der mesophilen und thermophilen Schimmelpilze, wobei die Zahl der thermophilen Pilze wesentlich stärker zunimmt (vgl. **Tabelle 4-4**). Bei einer Lagertemperatur von 60 °C, realisiert in einem Brutschrank, trocknet das Gut sehr rasch ab und die Zahl der Schimmelpilze ist deutlich niedriger.

In einer zweiten Serie wurde die Abhängigkeit der Schimmelpilzentwicklung vom Hackschnitzelformat untersucht. Je 7 Gefäße wurden mit Pappelholz HS 23, HS 36 und HS 63 gefüllt und bei 30 °C vier Wochen gelagert. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 4-5** zusammengestellt.

Tabelle 4-5: Schimmelpilzentwicklung in Abhängigkeit vom Hackformat bei einer Lagertemperatur von 30 °C nach 4-wöchiger Lagerung (n = 7)

Parameter	pH-Wert	Schimmelpilze (KbE/g FM)	
		mesophil	thermophil
Pappel HS 23			
Mittelwert	7,22	$5,9 \cdot 10^6$	$7,6 \cdot 10^7$
Median	7,11	$3,0 \cdot 10^6$	$6,0 \cdot 10^7$
Pappel HS 36			
Mittelwert	7,31	$9,0 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^7$
Median	7,33	$7,0 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^7$
Pappel HS 63			
Mittelwert	7,23	$3,6 \cdot 10^6$	$7,1 \cdot 10^5$
Median	7,26	$1,3 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^5$

Bei einer Lagertemperatur von 30 °C nimmt die Zahl der thermophilen Schimmelpilze mit zunehmendem Hackformat ab. Bei den mesophilen Pilzen ist diese Tendenz nicht eindeutig feststellbar.

Lagersaison 2003

Die Ergebnisse zur Temperaturabhängigkeit des Schimmelpilzgehaltes an gelagerten Holzhackschnitzeln der Pappel und Kiefer sind in **Bild 4-34** dargestellt. Je 5 Gefäße mit Pappelmaterial HS 16, HS 22, HS 56 und HS 155 sowie mit Kiefernholzhackschnitzeln HS 46 wurden bei 20°C, 25 °C, 30 °C und 35 °C aufgestellt und 4 Wochen gelagert.

Unabhängig vom Hackschnitzelformat und der Holzart steigt die Zahl der thermophilen Schimmelpilze erwartungsgemäß mit zunehmender Lagertemperatur an. Bei den mesophilen Pilzen ist diese Tendenz nicht festzustellen. Damit konnten die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Versuchsjahr in der Tendenz bestätigt werden (vgl. **Tabelle 4-5**).

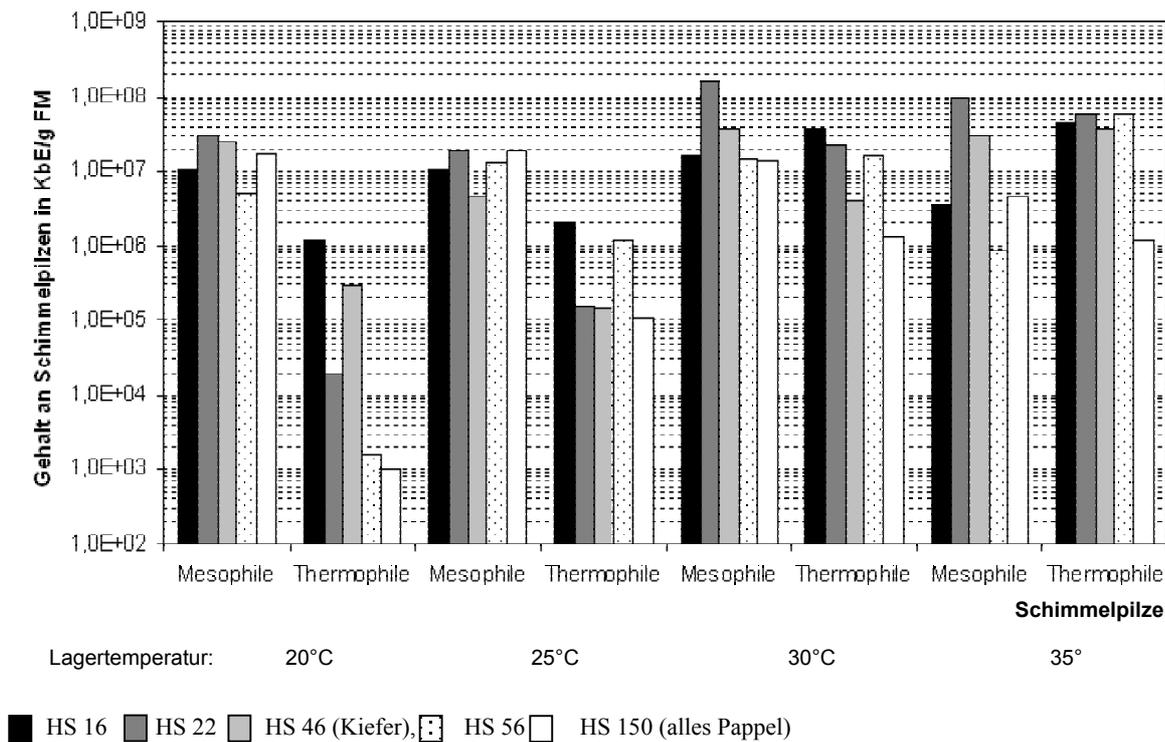


Bild 4-34: Gehalt an Schimmelpilzen nach 4-wöchiger Lagerung in Laborgefäßen in Abhängigkeit von Hackformat und Lagertemperatur

4.4.2 Lagersilos

Lagersaison 2001 - 2002

Die Modellsilos wurden angelegt, um Einflussgrößen, die bei anderen Lagerformen nur mit großem Aufwand untersucht werden können, zu erfassen. Neben Temperatur -und Feuchtemessungen wurden Luftwiderstand, Füllstand und Masseänderungen des Füllgutes gemessen. Die Betrachtung der Schimmelpilze ist hierbei zweitrangig. Die Messwerte sind in **Tabelle 4-6** zusammengestellt.

Tabelle 4-6: Schimmelpilzentwicklung während der Lagerung verschiedener Hackschnitzel im Silo, n = 2

Aufbereitung	Probenahme		Schimmelpilze in KbE/g FM	
	Zeitpunkt	Ort (vgl. Kap. 3.3.2)	mesophil	thermophil
Feinhackschnitzel HS 19	13.9.2001	-	$2,0 \cdot 10^6$	$<10^2$
	11.1.2002	190 cm	$1,0 \cdot 10^5$	$<10^5$
		145 cm	n.a.	$4,2 \cdot 10^5$
		100 cm	$3,0 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^5$
		55 cm	$6,5 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^3$
10 cm	$1,0 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^3$		
Mittelhackschnitzel HS 36	13.9.2001	-	$1,0 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^5$
	10.1.2002	190 cm	$1,5 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^4$
		145 cm	$9,5 \cdot 10^6$	$<10^3$
		100 cm	$1,6 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^4$
		55 cm	$6,0 \cdot 10^6$	$<10^3$
10 cm	$3,5 \cdot 10^7$	$<10^3$		
Hackstücke HS 150	13.9.2001	-	$7,0 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^4$
	9.1.2002	190 cm	$3,8 \cdot 10^7$	$<10^3$
		145 cm	$1,8 \cdot 10^7$	$<10^3$
		100 cm	$4,4 \cdot 10^7$	$<10^3$
		55 cm	$1,0 \cdot 10^7$	$<10^3$
10 cm	$2,5 \cdot 10^7$	$<10^3$		

n.a. ... nicht auswertbar

Bei der Bewertung der Ausgangskeimgehalte muss berücksichtigt werden, dass das Material, das im September eingelagert wurde, bereits im März geerntet und ungeschützt im Freien gelagert worden war. In den Feinhackschnitzeln ist nach einjähriger Lagerung bei den mesophilen Schimmelpilzen eine Zunahme des Keimgehaltes von oben nach unten im Silo zu erkennen. Bei den anderen Hackformaten ist das weniger deutlich ausgeprägt. Die thermophilen Schimmelpilze lagen bei allen Hackvarianten deutlich unter dem Gehalt der mesophilen Pilze. Die geringsten Keimzahlen konnten bei den Hackstücken ermittelt werden.

Lagersaison 2002 - 2003

Das Auftreten mesophiler und thermophiler Schimmelpilze während der Lagerung verschiedener Hackformate und Holzarten in Lagersilos ist in **Bild 4-35** dargestellt.

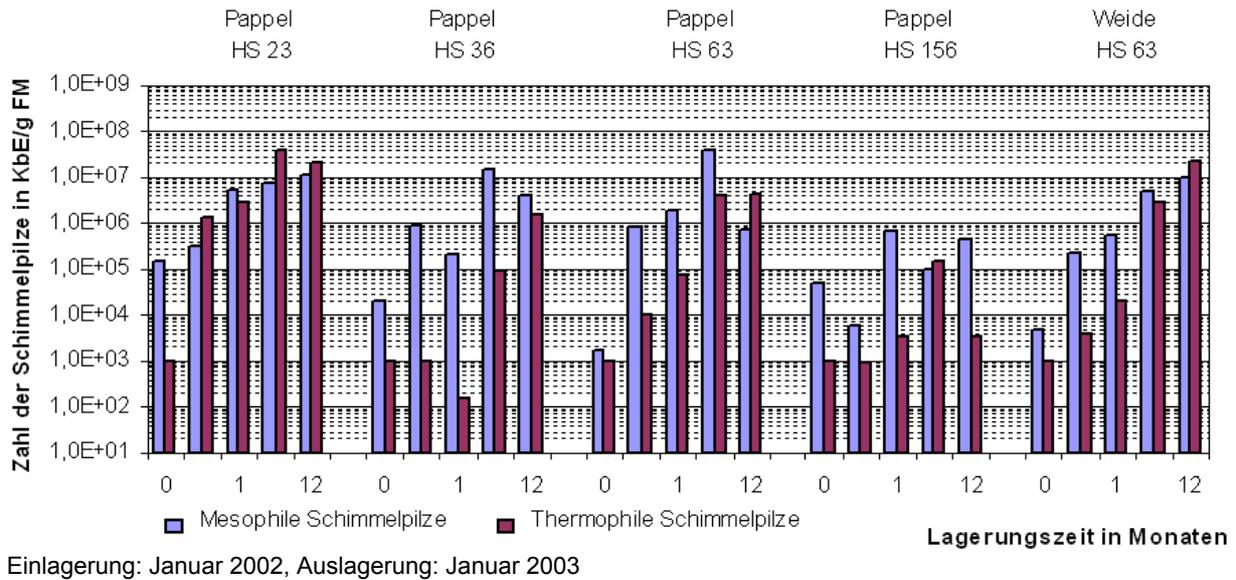


Bild 4-35: Entwicklung der Schimmelpilze während der Lagerung verschiedener Holzarten in Lagersilos

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Hackformat und Schimmelpilzbefall ist in den Modellversuchen nicht zu erkennen. Zwar konnten bei den Feinhackschnitzeln HS 23 die höchsten Schimmelpilzgehalte ermittelt werden und bei HS 156 die geringsten Keimgehalte, jedoch liegen die Keimgehalte der HS 63 wegen des Eindringens von Regenwasser in das Silo deutlich über denen der HS 36. Innerhalb der ersten zwei Wochen bauen sich in allen Fraktionen Schimmelpilzpopulationen auf. Sowohl im kleinsten Hackformat HS 23, als auch bei den Stücken HS 156 konnten hohe Keimgehalte bis 10^5 KbE/g FM ermittelt werden. Die Entwicklung ist jedoch sehr unterschiedlich. In den kleinsten Hackformaten geht der Anstieg wesentlich rascher vor sich.

Für die Beurteilung von Schimmelpilzen ist nicht nur die Anzahl, sondern auch die Spezies von Interesse. Die nachgewiesenen thermophilen Schimmelpilzarten sind in **Tabelle 4-7** zusammengestellt. Auffällig ist, dass in allen Proben *Aspergillus fumigatus* nachgewiesen werden konnte. Bei dem kleinsten Hackformat sind auch Rhizomucor und Rhizopus-Arten aufgetreten. Die Untersuchung der Schimmelpilze erfolgte in den Modellsilos jedoch nur während der ersten zwei Monate und nach einjähriger Lagerung.

Tabelle 4-7: Auftreten thermophiler Schimmelpilze während der Lagerung von Holzhackschnitzeln in Lagersilos und ihre Wirkungseinstufung.

Wirkungsspektrum der Pilzarten		Thermophile Schimmelpilzspezies					
		<i>Absidia corymbifera</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Paecilomyces variotii</i>	<i>Rhizomucor pusillus</i>	<i>Rhizopus microsporus</i>
humanpathogen		X	X	X	X	X	X
toxigen		-	X	X	X	X	X
allergen		X	X	X	X	-	X
Holzart, Hackformat	Lagerdauer						
Pappel, HS 23	2 Wochen		■			■	
	1 Monat		■			■	■
	2 Monate		■	■		■	
	1 Jahr		■				
Pappel, HS 36	2 Wochen		■				
	1 Monat		■				
	2 Monate		■				
	1 Jahr		■				
Pappel, HS 63	2 Wochen		■				
	1 Monat		■				
	2 Monate	■	■		■		
	1 Jahr	■	■				■
Pappel, HS 156	2 Wochen		■				
	1 Monat		■				
	2 Monate		■				
	1 Jahr	■	■				
Weide, HS 63	2 Wochen		■	■			
	1 Monat		■				
	2 Monate		■				
	1 Jahr		■				

Alle nachgewiesenen Arten gehören zur Gruppe der humanpathogenen Schimmelpilze, die meisten zeigen darüber hinaus toxische und allergene Wirkungen.

Lagersaison 2003 - 2004

Vom 13. bis 18. März 2003 wurden Modellsilos mit zwei Feinhackschnitzelvarianten HS 16 und HS 22, Grobhackschnitzeln HS 56 und Hackstücken HS 155 befüllt und acht Monate gelagert. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 4-8** zusammengestellt.

Die kleinsten Hackformate (HS 16 und HS 22) wiesen einen um eine Zehnerpotenz höheren Ausgangsgehalt an mesophilen Schimmelpilzen auf als die anderen Aufbereitungen. Im Gehalt der thermophilen Pilze konnten nur geringe Unterschiede ermittelt werden. Die Gehalte lagen erwartungsgemäß insgesamt sehr niedrig. Nur bei zwei Hackformaten HS 22 und HS 56 konnten Arten der in die Diagnostik einbezogenen Schimmelpilze (vgl. Kap. 3.4.6) identifiziert werden. Der Gehalt der mesophilen Schimmelpilze lag mit 10^6 KBE/g FM im Bereich der Erwar-

tungen. Eine Ausnahme hiervon betreffen die Werte der kleinsten Fraktion HS 16. Hier wurden Werte um lediglich 10^4 KbE/g FM ermittelt, was zunächst nicht erklärbar ist. Die thermophilen Schimmelpilze der Grob- und Feinhackschnitzel lagen im Bereich von 10^6 KbE/g FM, die Gehalte der Hackstücke mit $1,5 \cdot 10^3$ KbE/g FM sehr niedrig.

Tabelle 4-8: Schimmelpilzgehalte bei Ein- und Auslagerung verschiedener Pappel-Hackformate in Lagersilos (n = 2)

Aufbereitung	Probenahme		Schimmelpilze in KbE/g FM	
	Zeitpunkt	Ort (vgl. Kap. 3.3.2)	mesophil	thermophil
Feinhackschnitzel HS 16	17.03.2003	-	$3,6 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^2$
	17.11.2003	190 cm	$7,0 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^6$
		145 cm	$3,6 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^6$
		100 cm	$6,5 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^6$
		55 cm	$1,7 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^6$
		10 cm	$1,1 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^6$
Median der Auslagerungen	-	$3,6 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^6$	
Feinhackschnitzel HS 22	13.03.2003	-	$1,6 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^3$
	14.11.2003	190 cm	$2,5 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^7$
		145 cm	$2,5 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$
		100 cm	$4,5 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^6$
		55 cm	$1,4 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^6$
		10 cm	$3,5 \cdot 10^6$	$5,5 \cdot 10^3$
Median der Auslagerungen	-	$2,5 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^6$	
Grobhackschnitzel HS 56	17.03.2003	-	$1,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$
	13.11.2003	190 cm	$1,1 \cdot 10^6$	$9,9 \cdot 10^6$
		145 cm	$1,3 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^7$
		100 cm	$6,5 \cdot 10^6$	$5,5 \cdot 10^3$
		55 cm	$3,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^7$
		10 cm	$2,5 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^3$
Median der Auslagerungen	-	$2,5 \cdot 10^6$	$9,9 \cdot 10^6$	
Hackstücke HS 155	18.03.2003	-	$1,4 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^2$
	12.11.2003	190 cm	$1,5 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^3$
		145 cm	$3,0 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^3$
		100 cm	$3,0 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^3$
		55 cm	$2,2 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^3$
		10 cm	$1,9 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^3$
Median der Auslagerungen	-	$2,0 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^3$	

4.4.3 Lagerboxen

Lagersaison 1998 – 1999

Zwischen 19. Februar und 26. März 1998 wurden Boxen mit Pappel-, Weiden- und Kiefernholz in unterschiedlichen Aufbereitungen gefüllt und ungeschützt bzw. unter Dach ein Jahr gelagert. In **Bild 4-36** und **4-37** sind die Ergebnisse zur Entwicklung mesophiler Schimmelpilze während der Lagerung von Pappel- und Weidenholz in offenen Boxen dargestellt. Bei diesen ersten Untersuchungen wurden zunächst alle Organismen betrachtet, die sich auf Malzextraktagar entwickelten. Darunter waren auch Hefen. Ihr Anteil an der Gesamtzahl war unterschiedlich, jedoch

überwogen stets die Schimmelpilze. Bei späteren Untersuchungen wurde durch einen Zusatz von Chloramphenicol das Wachstum der Hefen unterdrückt (vgl. 3.4.6).

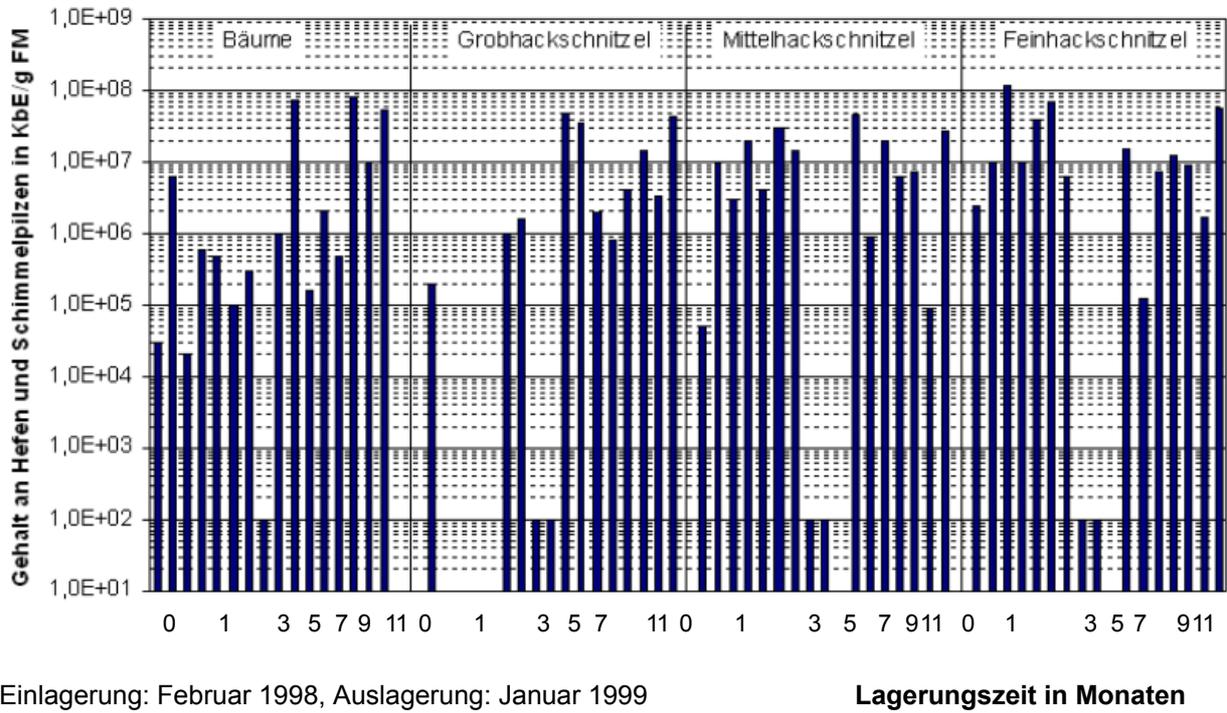


Bild 4-36: Schimmelpilzentwicklung während der Lagerung von Pappelholz in offenen Boxen

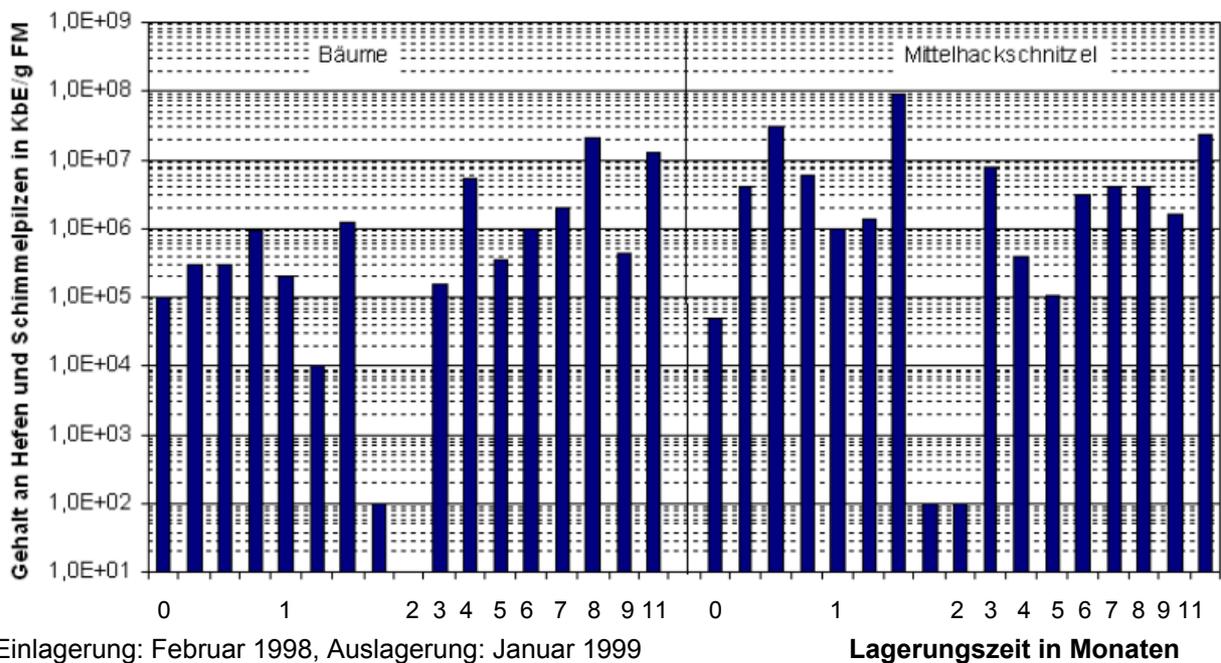
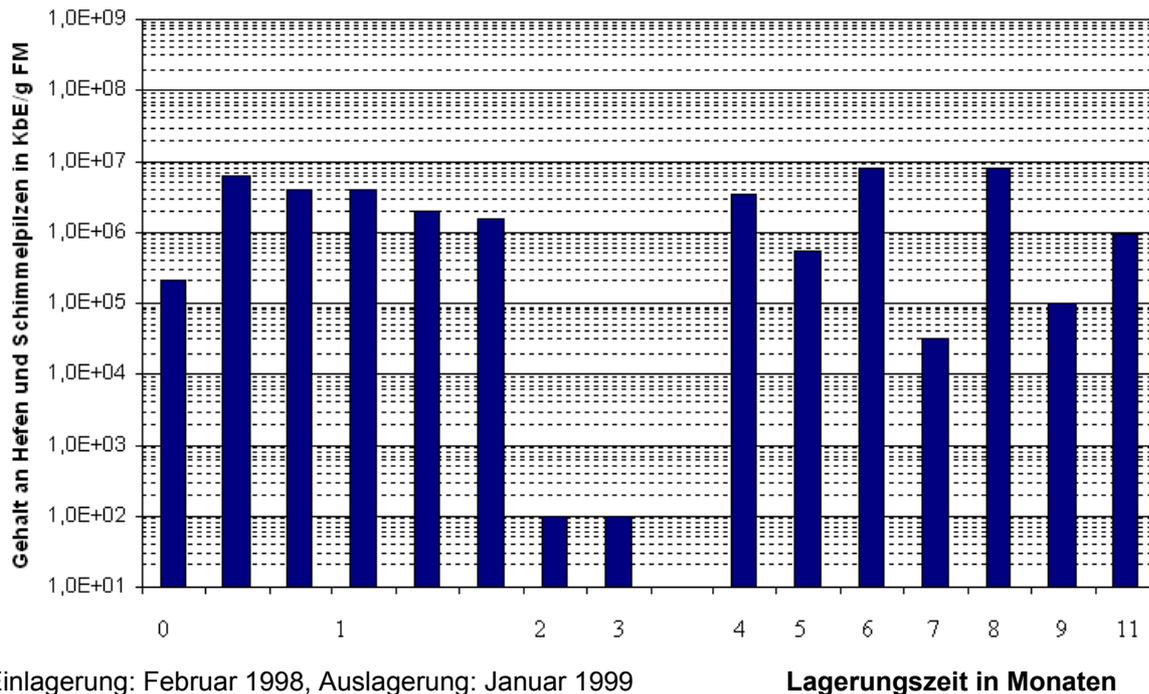


Bild 4-37: Schimmelpilzentwicklung während der Lagerung von Weidenholz in offenen Boxen

Die Entwicklung der Schimmelpilze ist durch ein rasches Ansteigen der Gehalte in den ersten vier Wochen gekennzeichnet. Danach verändern sich die Gehalte nur noch unwesentlich. Ver-

gleicht man die Gehalte der mesophilen Schimmelpilze während der Lagerung von unterschiedlichen Pappel- und Weidenholzformaten, so liegen sie abgesehen von einigen Ausreißern im Bereich 10^4 bis 10^8 KbE/g FM und zeigen mit größer werdenden Formaten (bis zu ganzen Bäumen) eine abnehmende Tendenz.

Die Lagerung von Kiefernholz erwies sich bezüglich der Entwicklung von mesophilen Schimmelpilzen als günstiger im Vergleich zur Lagerung von Mittelhackschnitzeln von Pappeln und Weiden (**Bild 4-38**). Der Medianwert der in ungeschützten Boxen gelagerten Kiefern- Mittelhackschnitzel liegt mit $5,5 \cdot 10^5$ KbE/g FM um zwei Zehnerpotenzen niedriger.



Einlagerung: Februar 1998, Auslagerung: Januar 1999

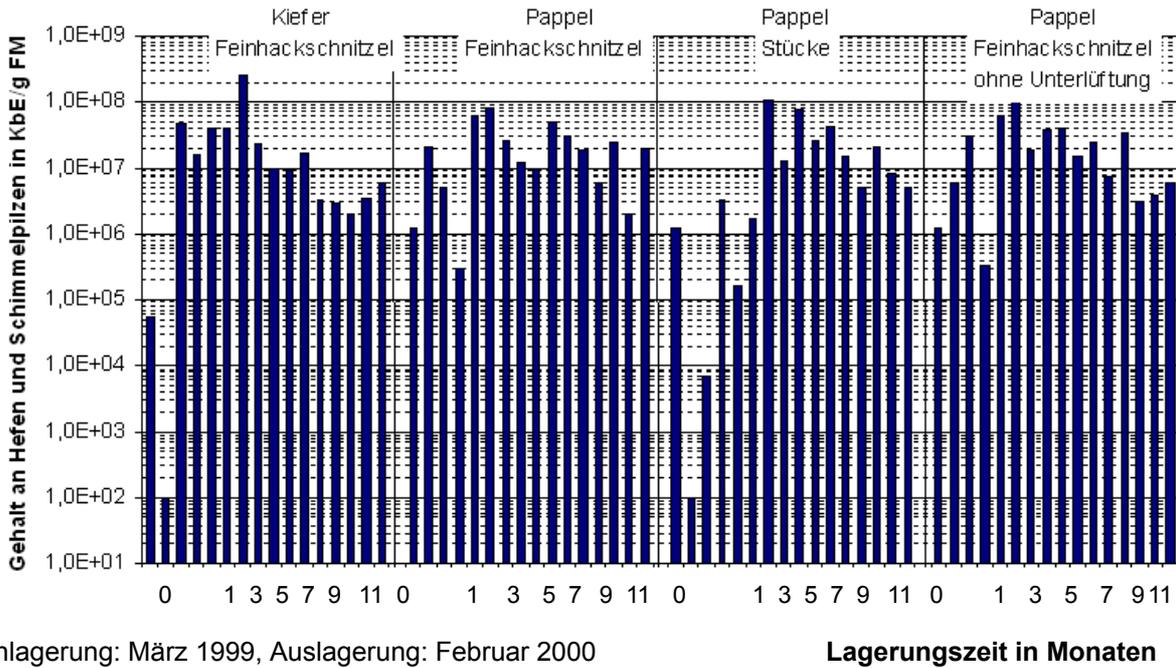
Lagerungszeit in Monaten

Bild 4-38: Schimmelpilzentwicklung während der Lagerung von Kiefer-Mittelhackschnitzeln

Lagersaison 1999 – 2000

Die Entwicklung der mesophilen Schimmelpilze während der einjährigen Lagerung in abgedeckten Boxen ist in **Bild 4-39** dargestellt.

Bei allen gelagerten Feinhackschnitzelvarianten ist zu Beginn der Lagerung ein rasches Ansteigen der mesophilen Schimmelpilzgehalte zu erkennen. Die höchsten Gehalte sind bei der Lagerung ohne Unterlüftung zu beobachten (Medianwert $6,0 \cdot 10^6$ KbE/g FM), gefolgt von den Kiefernfeinhackschnitzeln mit $4,0 \cdot 10^6$ KbE/g FM und den Pappelfeinhackschnitzeln mit $3,0 \cdot 10^6$ KbE/g FM. Bei den Pappel-Hackstücken konnten die geringsten Gehalte mit $2,0 \cdot 10^6$ KbE/g FM ermittelt werden.



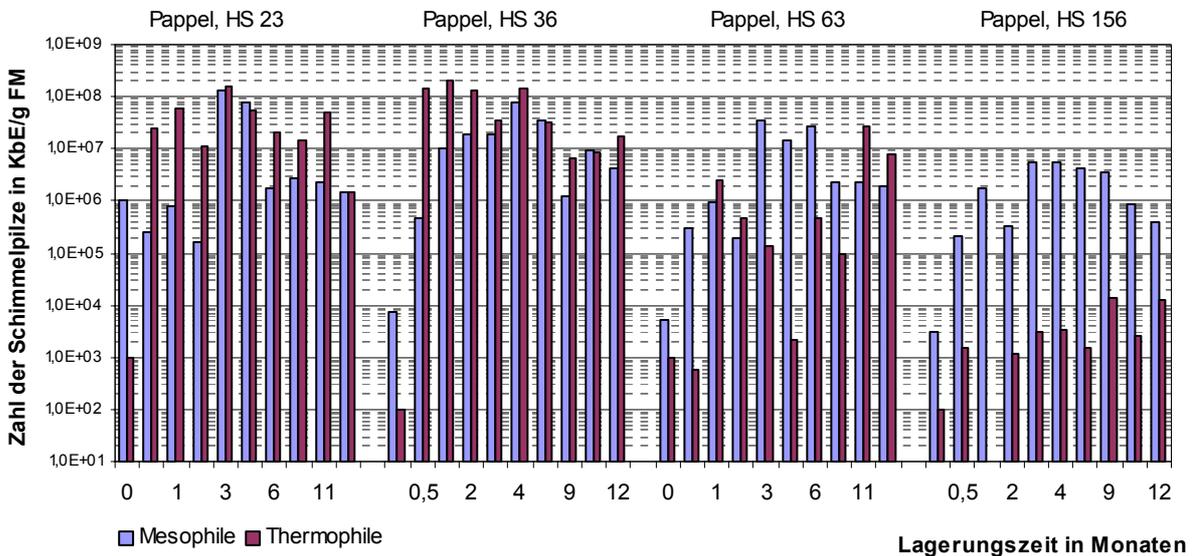
Einlagerung: März 1999, Auslagerung: Februar 2000

Lagerungszeit in Monaten

Bild 4-39: Schimmelpilzentwicklung während der Lagerung in abgedeckten Boxen

Lagersaison 2002 - 2003

Die während der Lagerung in abgedeckten Boxen ermittelten Schimmelpilze in Abhängigkeit vom Hackformat sind im **Bild 4-40** dargestellt.



Einlagerung: Januar 2002, Auslagerung: Januar

Bild 4-40: Veränderung der Zahl der Schimmelpilze während der Lagerung von Pappelholz unterschiedlicher Hackformate in Boxen

Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass bei kleinen Hackformaten (HS 23 und HS 36) sehr hohe Schimmelpilzgehalte bis $1,3 \cdot 10^8$ KbE/g FM nachgewiesen werden konnten. Bei Pappelholz des Formates HS 63 konnte bereits eine um zwei Zehnerpotenzen verminderte Anzahl

besonders an thermophilen Pilzen (maximal $3,4 \cdot 10^6$ KbE/g FM) ermittelt werden. Beim Hackformat HS 156 sind mit maximal $1,4 \cdot 10^4$ KbE/g FM die geringsten thermophilen Pilzgehalte registriert worden. Für die Bewertung dieser Befunde ist nicht nur die Anzahl der Pilze, sondern auch das Artenspektrum von Bedeutung (**Tabelle 4-9**).

Tabelle 4-9: Auftreten thermophiler Schimmelpilzspecies während der Lagerung unterschiedlicher Hackformate von Pappel in Boxen und ihre Wirkungseinstufung

Wirkungsspektrum der Pilzarten		Thermophile Schimmelpilzspecies						
		<i>Absidia corymbifera</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Emicella nidulans</i>	<i>Paecilomyces variotii</i>	<i>Rhizomucor pusillus</i>	<i>Rhizopus microsporus</i>
humanpathogen		X	X	X	X	X	X	X
toxigen		-	X	X	-	X	X	X
allergen		X	X	X	X	X	-	X
Hackformat	Lagerdauer							
HS 23	2 Wochen		■				■	
	1 Monat		■			■	■	■
	2 Monate	■	■	■			■	■
	3 Monate	■	■					
	4 Monate		■			■	■	■
	6 Monate	■	■					■
	9 Monate		■					
	1 Jahr	■	■					
HS 36	2 Wochen		■		■			
	1 Monat	■	■			■		■
	2 Monate		■	■			■	
	3 Monate	■	■					
	4 Monate		■				■	■
	6 Monate		■	■	■		■	■
	9 Monate		■					
	1 Jahr		■					
HS 63	2 Wochen		■					
	1 Monat		■					
	2 Monate		■					
	3 Monate		■		■	■	■	■
	4 Monate		■					
	6 Monate	■	■		■		■	
	9 Monate	■	■				■	
	1 Jahr		■				■	
HS 155	2 Wochen		■			■		
	1 Monat		■					
	2 Monate		■					
	3 Monate		■					
	4 Monate		■		■			
	6 Monate		■		■			
	9 Monate		■	■				
	1 Jahr		■					

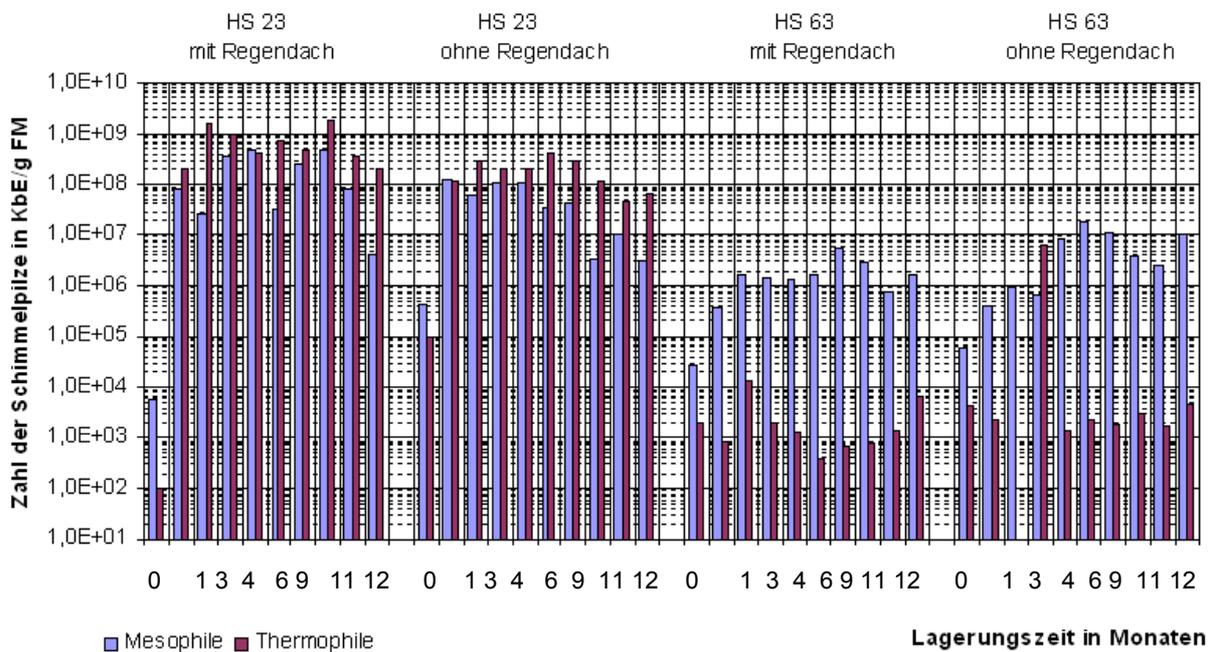
Aus der **Tabelle 4-9** ist ersichtlich, dass mit zunehmender Größe des Hackformates die thermophile Schimmelpilzvielfalt abnimmt. *Aspergillus fumigatus* findet man jedoch in allen Proben zu allen Probenahmezeiten und allen Hackformaten. *A. fumigatus* ist auch die Spezies, die eine sehr große ökologische Potenz bezüglich ihrer Wachstumsfaktoren Temperatur und Wasseraktivität aufweist. Das Temperaturminimum liegt zwischen 10 °C und 12 °C, das Optimum im Bereich von 37 °C bis 43 °C und das Maximum zwischen 52 °C und 55 °C. Bezüglich der Wasseraktivität kann Wachstum zwischen 0,85 und 0,98 erfolgen (Reiß, 1990).

Alle nachgewiesenen thermophilen Arten gehören zur Gruppe der humanpathogenen Pilze, fast alle sind allergen, einige auch toxisch.

4.4.4 Lagerhaufen

Lagersaison 2002 - 2003

Die während der einjährigen Lagerung in Haufen ermittelten Schimmelpilzgehalte in Abhängigkeit vom Hackformat und vom Regenschutz sind im **Bild 4-41** und **Tabelle 4-10** dargestellt. Bei den Proben dieser Lagersaison wurden erstmals zwischen der Entwicklung mesophiler und thermophiler Schimmelpilze unterschieden. Die Berücksichtigung der potenziell humanpathogenen Pilze soll das Lagergeschehen weiter charakterisieren und Unterschiede während der Lagerung aufzeigen.



Einlagerung: Januar 2002, Auslagerung: Januar

Bild 4-41: Entwicklung von Schimmelpilzen während der Lagerung von unterschiedlich aufbereitetem Pappelholz in Haufen

Deutlich erkennbar sind die Unterschiede zwischen den Keimgehalten der unterschiedlichen Hackformate. Bei den kleinstückigen Holzhackschnitzeln HS 23 sind deutlich mehr Schimmelpilze ermittelt worden als bei dem Format HS 63. Der Effekt des Regenschutzes bleibt bei dieser Versuchsserie offen, da bei Feinhackschnitzeln HS 23 mit Regenschutz eine außergewöhnlich hohe Anzahl mesophiler und thermophiler Pilze gemessen wurde, deren Ursache noch unklar ist.

Tabelle 4-10: Medianwert des Schimmelpilzgehalts unterschiedlicher Pappel-Hackformate während neunmonatiger Lagerung in Haufen (n = 114)

Parameter	HS 23 mit RS	HS 23 ohne RS	HS 63 mit RS	HS 63 ohne RS
Mesophile Schimmelpilze (KbE/g FM)	$7,7 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^7$
Thermophile Schimmelpilze (KbE/g FM)	$4,3 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^8$	$5,2 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^3$
Anzahl der thermophilen Arten	7	8	6	6

RS ... Regenschutz

Für eine Bewertung der thermophilen Schimmelpilzbefunde ist nicht nur die Anzahl, sondern auch das Artenspektrum von Bedeutung. In **Tabelle 4-11** sind die identifizierten thermophilen Arten, die während der Lagerung der Hackschnitzel in den Haufen nachgewiesen werden konnten, zusammengestellt.

Wie bereits bei der Lagerung der Hackschnitzel in Modellsilos und in den Boxen festgestellt wurde, konnte auch bei der Lagerung des Holzes in Haufen in allen Proben *Aspergillus fumigatus* nachgewiesen werden. Erwartungsgemäß wurde bei dem Hackformat HS 23 ein vielfältigeres Spektrum als bei HS 63 ermittelt, unabhängig vom Vorhandensein eines Regenschutzes. Obwohl bei der Lagerung mit Regenschutz bei HS 23 höhere Keimzahlen ermittelt worden waren, ist das Artenspektrum nicht so vielfältig wie bei der Lagerung ohne Regenschutz. Sieben verschiedene thermophile Arten wurden bei der Lagerung mit Regenschutz, acht dagegen bei der Lagerung ohne Regenschutz identifiziert. Bei der Lagerung der groben Holzhackschnitzel konnten jeweils sechs verschiedene Spezies ermittelt werden (**Tabelle 4-10**). Mit Ausnahme von *Rhizopus oryzae* gehören alle nachgewiesenen thermophilen Arten zur Gruppe der humanpathogenen Pilze, fast alle sind allergen, einige zeigen auch toxische Wirkungen.

Tabelle 4-11: Auftreten thermophiler Schimmelpilze während der Lagerung von Pappelhackgut in Haufen und ihr Wirkungsspektrum

Wirkungsspektrum der Pilzarten	Thermophile humanpathogene Schimmelpilzspezies								
	<i>Absidia corymbifera</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Emicella nidulans</i>	<i>Paecilomyces variotii</i>	<i>Rhizomucor pusillus</i>	<i>Rhizopus microsporus</i>	<i>Rhizopus oryzae</i>	
humanpathogen	X	X	X	X	X	X	X		-
toxigen	-	X	X	-	X	X	X		-
allergen	X	X	X	X	X	-	X		-

Hackformat, Lagerart, Lagerdauer									
HS 23, Haufen mit Regenschutz									
2 Wochen	■	■	■			■	■		
1 Monat	■	■	■			■	■		
2 Monate	■	■	■			■	■		
3 Monate	■	■	■			■	■		
4 Monate		■				■	■		
6 Monate	■	■	■	■		■	■		■
9 Monate	■	■	■	■		■	■		■
11 Monate	■	■	■	■	■	■	■		
12 Monate	■	■				■	■		
HS 23, Haufen ohne Regenschutz									
2 Wochen		■	■	■	■	■	■		
1 Monat	■	■	■	■	■	■	■		
2 Monate	■	■	■	■					■
3 Monate	■	■							
4 Monate	■	■	■			■	■		
6 Monate	■	■	■	■		■	■		■
9 Monate		■		■			■		
11 Monate		■	■	■			■		
12 Monate	■	■		■	■	■	■		■
HS 63, Haufen mit Regenschutz									
2 Wochen		■							
1 Monat		■	■						
2 Monate		■							
3 Monate		■				■			
4 Monate		■				■			
6 Monate		■		■			■		
9 Monate	■	■	■			■	■		
11 Monate		■			■				
12 Monate		■		■	■		■		
HS 63, Haufen ohne Regenschutz									
2 Wochen		■				■			
1 Monat		■							
2 Monate		■				■			
3 Monate		■							
4 Monate		■		■					
6 Monate		■		■			■		■
9 Monate		■		■	■				
11 Monate		■							
12 Monate		■		■					

Schimmelpilzentwicklung im Haufen mit Unterlüftung

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Tiefe und der Ausrichtung der Untersuchungsfläche auf den Gehalt der Schimmelpilze ist in **Tabelle 4-12** zusammengefasst.

Süd- und Ostseite weisen keine deutlichen Unterschiede in den untersuchten Parametern auf. In den unteren Schichten sind die Temperaturen erwartungsgemäß etwas höher, das Holz feuchter und mit einer höheren Zahl an Schimmelpilzen belastet. Die biometrischen Daten wurden nach Bärloch (1999) berechnet.

Tabelle 4-12: Veränderung verschiedener Parameter von gelagerten Feinhackschnitzeln (Pappel HS 36) in Abhängigkeit von der Tiefe und Lage der Proben bei Haufenlagerung (n= 18).

Parameter	Südseite/ Probenahmetiefe (n = 15)			Ostseite/ Probenahmetiefe (n= 18)		
	0 cm	25 cm	50 cm	0	25 cm	50 cm
Temperatur im Haufen (°C)	18,4	22,1	22,3	21,4	22,0	24,8
Feuchtegehalt im Haufen (%)	78,7	96,6	n.u.	98,9	98,9	n.u.
pH-Wert	7,18	7,61	7,18	7,10	6,84	6,85
Wassergehalt des Holzes (%)	48,6	69,1	68,8	42,1	53,5	50,5
Anzahl der mesophilen Schimmelpilze (KbE/g FM)						
Arithmetisches Mittel	$1,3 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$
Median	$8,0 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^6$	$8,6 \cdot 10^6$
Minimum	$2,1 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$9,9 \cdot 10^2$	$9,9 \cdot 10^2$	$9,9 \cdot 10^2$	$9,9 \cdot 10^2$
Maximum	$2,0 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^7$	$7,0 \cdot 10^7$	$9,5 \cdot 10^7$
Anzahl der thermophilen Schimmelpilze (KbE/g FM)						
Arithmetisches Mittel	$1,3 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$
Median	$4,0 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^7$
Minimum	$9,9 \cdot 10^2$	$9,9 \cdot 10^2$	$9,9 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^3$
Maximum	$1,0 \cdot 10^6$	$5,8 \cdot 10^6$	$9,0 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$	$8,0 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^8$

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wirkung eines Belüftungskanals auf den Gehalt an Schimmelpilzen ist in **Tabelle 4-13** zusammengestellt. Der Einfluss des Luftkanals auf Gutfeuchte und Schimmelpilzbefall ist nicht eindeutig zu erkennen. Zwar nimmt die Temperatur im Haufen nach einem Anstieg zum Lüftungskanal hin wieder ab, aber die ermittelten Wassergehalte des Holzes und der Gehalt an Schimmelpilzen zeigen eine andere Tendenz. Allen Ergebnissen ist jedoch eine Verminderung der Werte nahe am Luftkanal gemeinsam.

Tabelle 4-13: Einfluss eines Luftkanals auf verschiedene Parameter von gelagerten Holzhackschnitzeln in Abhängigkeit von der Probenahmetiefe bei Haufenlagerung (n = 12)

Parameter	Westseite des Haufens/ Probenahmetiefe					
	0 cm	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm
Temperatur im Haufen (°C)	18,1	24,4	22,1	16,5	18,2	17,9
Feuchtegehalt im Haufen (%)	88,4	94,5	98,5	87,1	86,5	83,1
pH-Wert	6,88	7,72	7,33	7,42	6,75	6,90
Wassergehalt des Holzes (%)	25,8	67,4	48,4	32,0	23,4	25,8
Anzahl der mesophilen Schimmelpilze (KbE/g FM)						
Arithmetisches Mittel	$1,6 \cdot 10^6$	$7,0 \cdot 10^5$	$9,9 \cdot 10^6$	$8,0 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^7$
Median	$1,7 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$
Minimum	$5,4 \cdot 10^5$	$9,9 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^7$
Maximum	$2,8 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^8$	$8,2 \cdot 10^7$
Anzahl der thermophilen Schimmelpilze (KbE/g FM)						
Arithmetisches Mittel	$3,1 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^8$	$9,3 \cdot 10^6$
Median	$9,6 \cdot 10^5$	$4,1 \cdot 10^4$	$4,1 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^8$	$7,0 \cdot 10^6$
Minimum	$7,0 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^4$	$9,0 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^6$
Maximum	$1,7 \cdot 10^5$	$6,0 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^7$	$6,0 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^8$	$7,0 \cdot 10^7$

Lagersaison 2003 - 2004

Am 22. Februar wurde in Zempow Kiefernholz gehackt und ein Freilager errichtet. Die Mittelhackschnitzel hatten eine durchschnittliche Länge von 38 mm. Die Werte der Einlagerung und nach 10-monatiger Lagerung sind in **Tabelle 4-14** zusammengestellt.

Tabelle 4-14: Lagerung von Kiefernholzhackschnitzeln HS 38 im Freilager

Probenahmezeiten und -orte	pH-Wert	Schimmelpilze (KbE/g FM)	
		mesophil	thermophil
Einlagerung: 22.1.2003	5,61	$2,3 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$
Auslagerung am 7.11.2003			
Oberfläche	5,9	$3,0 \cdot 10^4$	$< 10^3$
5 cm unter der Oberfläche	6,3	$2,0 \cdot 10^4$	$< 10^3$
10 cm unter der Oberfläche	5,5	$2,0 \cdot 10^5$	$< 10^3$
35 cm unter der Oberfläche	3,8	$1,0 \cdot 10^5$	$8,0 \cdot 10^4$
1 m unter der Oberfläche	4,1	$5,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^4$
Mittelwert der Auslagerungswerte	5,1	$1,3 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^4$

Die Zahl der Schimmelpilze nimmt von der Haufenoberfläche nach innen zu, der pH-Wert dagegen ab. In den oberen, feuchteren Schichten konnten keine thermophilen Pilze nachgewiesen werden, offensichtlich kam es in den obersten Schichten nicht zu den Temperaturen, bei denen sich diese Pilzgruppe entwickeln konnten.

4.4.5 Mykotoxine

In **Tabelle 4-15** sind die wichtigsten thermophilen Pilzspezies, die auf Holzhackschnitzeln während der Lagerung nachgewiesen wurden und die wichtigsten von ihnen produzierten Mykotoxine, zusammengestellt.

Tabelle 4-15: Mykotoxine identifizierter thermophiler Schimmelpilze auf Holzhackschnitzeln während der Lagerperiode 2002/2003

Identifizierte	Vorkommen in	Mykotoxine	Literatur
Pilzspecies	allen Proben in %		
<i>Aspergillus fumigatus</i>	80,2	Emodin, Fumigacin, Gliotoxin, Penicillinsäure, Terreussäure, Tryptoquivalin, Xanthogmagnin und Verrucologen	2, 3
<i>Rhizomucor pusillus</i>	11,3	Keine Toxine bekannt	2
<i>Rhizopus microsporus</i>	8,2	Rhizonin A	3
<i>Absidia corymbifera</i>	6,6	Keine Toxine bekannt	2
<i>Aspergillus nidulans</i> (<i>Emericella nidulans</i>)	5,9	Aspertoxin, Gliotoxin, Penicillinsäure, Sterigmatocystin, Xanthogmagnin, Nidulotoxin, Penicillin	2, 3
<i>Aspergillus niger</i>	5,6	Gliotoxin, Malformin A, Penicillinsäure, Naphtoy-Pyrone, Xanthogmagnin, Ochratoxin A, Kojisäure	2, 3
Gattung Trichoderma	4,7	T-2-Toxin, Viridin, Gliovirin, Chrysophanol, Trichotoxin A, Emodin, Trichorzianin A + B	2, 3
Gattung Fusarium	4,6	Zearalenon, Moniliformin, Fumonisine, Fusarin C, Trichothecene, Neosolaniol, T-2-Toxin, T-2-Tetraol	1,2, 4
<i>Paecilomyces variotii</i>	2,5	Byssochlaminsäure, Patulin, Viriditoxin	2, 3
<i>Rhizopus oryzae</i>	1,3		

Zitierte Literatur:

- 1 Mücke & Lemmen (1999)
- 2 Roth, Frank & Kormann (1990)
- 3 Samson, Hoekstra, Frisvad & Filtenborg (2000)
- 4 Reiß (1997)

Unabhängig von Lagerart, Holzart oder Aufbereitung, wurden in 80,2 % aller untersuchten Proben *Aspergillus fumigatus* identifiziert. *A. fumigatus* ist ein thermotoleranter, weltweit verbreiteter Schimmelpilz, der sein Wachstumsoptimum bei 37 °C - 43 °C hat und daher häufig in/auf Substraten zu finden ist, in denen es zu einer Erwärmung kommen kann (Heu, Kompost, Müll, Silofutter, Vogelnester). In **Tabelle 4-16** sind die Wachstumsbedingungen für diesen Schimmelpilz zusammengestellt.

Tabelle 4-16: Wachstumsbedingungen von *Aspergillus fumigatus* (Roth, 1990)

Parameter	Minimum	Optimum	Maximum
Temperatur in °C	10 - 12	37 - 43	52 - 55
Wasseraktivität	0,85	0,98	Keine Angabe
pH-Wert	3,0	Keine Angaben	8,0

A. fumigatus ist der Schimmelpilz mit der stärksten pathogenen Potenz (Mücke et al., 1999). Zu den bedeutendsten Mykotoxinen, die von *A. fumigatus* gebildet werden können, gehören Emodin, Fumigacin, Gliotoxin, Penicillinsäure, Tryptoquivalin, Xanthogmagnin und Verrucologen (Mücke et al., 1999 Roth, 1990). Darüber hinaus werden noch verschiedene Clavin-Alkaloide

gebildet. Der Pilz kann tiefe Organmycosen und Allergien auslösen. In **Tabelle 4-17** sind die wichtigsten Wirkungen der von *A. fumigatus* gebildeten Mykotoxine zusammengestellt.

Tabelle 4-17: Wirkungen der von *Aspergillus fumigatus* produzierten Mykotoxine (Domsch et al., 1980; Gedeck, 1980)

Toxin	Wirkung
Emodin	hämorrhagisch
Fumigacin	antibiotische
Gliotoxin	immunsuppressiv.
Penicillinsäure	kanzerogen
Tryptoquivalin	keine Angabe
Xanthogmegin	hepatoxisch

Für die aufgelisteten Mykotoxine gibt es gegenwärtig noch keine validierten analytische Bestimmungsmethoden. Es können deshalb keine Aussagen über das Vorkommen von Mykotoxinen in gelagerten Holzhackschnitzeln, die von *A. fumigatus* produziert werden könnten, getroffen werden.

Trotz des insgesamt hohen Aufkommen an Proben, in denen *Aspergillus fumigatus* nachgewiesen worden ist, gibt es Unterschiede zwischen den Aufarbeitungsvarianten und Holzarten. Aus **Tabelle 4-18** wird deutlich, dass in Weidenhackschnitzeln der geringste Anteil *A. fumigatus*-haltiger Proben zu finden ist.

Tabelle 4-18: Anteil der *Aspergillus fumigatus*-haltigen Proben bei der Lagerung von Hackschnitzeln während der Lagerperiode 2002/2003

Lagerart: Holzart, Aufbereitung	Anzahl aller Proben der Lagerperiode 2002/2003		
	in denen bei 37°C Pilze identifiziert wurden	in denen <i>Aspergillus fumigatus</i> nachgewiesen wurden	%
Silo: Pappel, Weide	-	-	
HS 23	15	15	100,0
HS 36	12	9	75,0
HS 63	12	11	91,7
HS 156	10	9	90,0
Weide, HS 63	13	7	53,8
Boxen: Pappel			
HS 23	51	46	90,2
HS 36	51	50	98,0
HS 63	50	49	80,0
HS 156	45	32	71,1
Haufen: Pappel			
HS 23 + Regenschutz	118	118	100,0
HS 23 ohne RS	128	112	87,5
HS 63+ Regenschutz	131	86	95,6
HS 63 ohne RS	120	96	80,0

Bei der Lagerung in Boxen ist zu erkennen, dass mit zunehmender Hackschnitzelgröße der Anteil von *A. fumigatus*-haltigen Proben abnimmt. Auch bei der Lagerung in Haufen lässt sich diese Tendenz erkennen. Bei HS 63 konnte ein geringerer Gehalt ermittelt werden als bei HS 23. Dies gilt unabhängig vom Vorhandensein eines Regenschutzes.

Von den möglichen vorkommenden Mykotoxinen (vgl. **Tab. 4-15**), sind die Fumonisine analytisch am besten untersucht. Fumonisine sind Pilzgifte, die von Schimmelpilzen der Gattung Fu-

sarium gebildet werden. Seit 1988 sind sechs Fumonisine chemisch aufgeklärt worden: Fumonisin A₁, A₂, B₁, B₂, B₃, B₄. Sie werden heute zu den wichtigsten Mykotoxinen gerechnet, da sie weltweit mit großer Häufigkeit auf Getreide vorkommen. Darüber hinaus sind Fumonisine in verschimmelten Lebens- bzw. Futtermitteln zu finden (Mücke et al., 1999). Die Kontamination mit Fumonisin B₁ kommt dabei sowohl am häufigsten als auch in der höchsten Konzentration vor. Fumonisin B₁ und B₂ weisen eine extreme Stabilität gegenüber hohen Temperaturen (bis zu 100 °C) auf und bleiben auch bei der Lagerung beispielsweise in kontaminiertem Futter bis zu fünf Jahren lang aktiv. Auf Nutztiere sind folgende Wirkungen beschrieben worden: beim Pferd wirken Fumonisin B₁ und B₂ hauptsächlich neurotoxisch und können auch hepatotoxische Effekte auslösen. Beim Schwein induzieren die Fumonisine Lungenödeme. Chronische Wirkungen treten beim Schwein ab 25 ppm Fumonisin B₁ im Futter auf. Allerdings treten auch bei niedrigeren Konzentrationen von Fumonisin bei normaler Futtermittelfütterung und Gewichtszunahme, leichtgradiges Lungenödem und Leberveränderungen auf. Ein „No Effect Level“ konnte noch nicht bestimmt werden.

Tabelle 4-19: Prozentualer Anteil potenziell fumonisinhaltiger Holzhackschnittelproben

Lagerart Holzart, Aufbereitung	Anzahl der Proben			% aller Proben
	Gesamtzahl	Identifizierbare Pilze bei 37°C	mit Fusarienbefall	
Silo				
Pappel, HS 23	16	15	2	12,5
Pappel, HS 36	12	12	0	0
Pappel, HS 63	12	12	0	0
Pappel, HS 155	12	10	0	0
Weide, HS 63	13	13	0	0
Boxen				
Pappel, HS 23	51	51	4	7,8
Pappel, HS 36	51	51	3	5,9
Pappel, HS 63	51	50	1	1,9
Pappel, HS 155	51	45	0	0
Haufen				
Pappel, HS 23 + Regenschutz	119	117	5	4,2
Pappel, HS 23	128	128	13	10,2
Pappel, HS 63 + Regenschutz	139	131	4	2,9
Pappel, HS 63	121	120	2	1,6

In Deutschland gibt es keinen Grenzwert für Fumonisine in Lebensmitteln. Die EU hat einen Wert für die tolerierbare tägliche Aufnahmemenge von Mykotoxinen von 1 µg pro kg Körpergewicht festgelegt. Zur Quantifizierung stehen als Screeningverfahren immunchemische Tests (ELISA) neben den chromatographischen Verfahren Dünnschichtchromatographie (DC) und verschiedene Ausführungsarten der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) mit Fluoreszenzdetektion zur Verfügung. Werden alle untersuchten Proben, bei denen Pilze, die bei 37°C gewachsen und identifiziert worden sind, auf Fusarienbefall hin betrachtet, so ist nur ein sehr geringer Prozentsatz fumonisinverdächtig (**Tabelle 4-19**).

Für die Matrix Holz gibt es gegenwärtig keine Aufarbeitungsvorschrift für Fumonisin. Deshalb konnten diese theoretischen Befunde bisher nicht verifiziert werden.

4.5 Pilzsporen

4.5.1 Lagerboxen

Lagersaison 1998 - 1999

Die folgende Abbildung gibt die Sporenkonzentration in der Luft bei der Lagerung von Pappel HS 16 in einer Lagerbox ohne Regenschutz wieder.

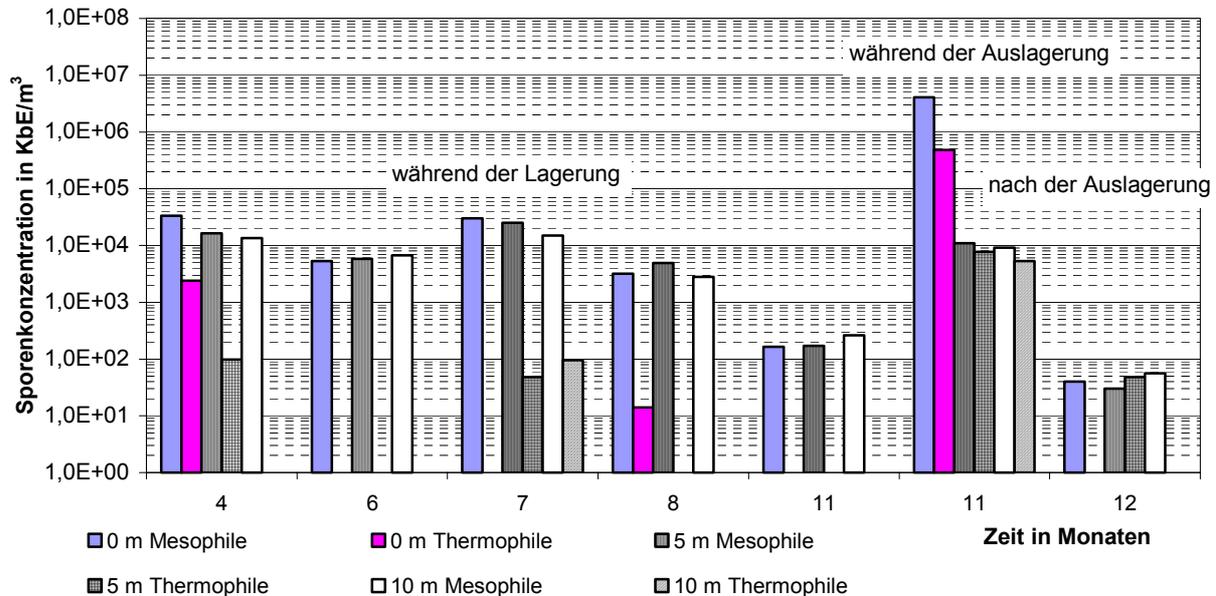


Bild 4-42: Sporenkonzentration in der Luft bei der Lagerung von Pappel HS 16 in einer Lagerbox ohne Regenschutz in Abhängigkeit von der Entfernung

Allgemein nimmt die Sporenkonzentration sowohl der mesophilen als auch der thermophilen Schimmelpilze mit der Entfernung von der Schimmelpilzquelle ab. Die Ergebnisse weisen auch auf eine Verringerung der Sporenemission mit der Dauer der Lagerung hin. Sehr hoch ist die Sporenkonzentration während der Auslagerung z.B. unmittelbar an der Box (mesophil: $4,1 \cdot 10^6$ KbE/ m³, thermophil: $4,8 \cdot 10^5$ KbE/ m³). Bei der Messung 1 Monat nach der Boxenentleerung liegt der Wert in der Größenordnung des Kontrollwertes.

Lagersaison 2002 - 2003

Bei der Lagerung von Pappelholz in Boxen mit Regenschutz zeigten sich folgende Ergebnisse: Mit der Hackschnitzelgröße nimmt die Emission an mesophilen und thermophilen Schimmelpilzsporen ab. Ebenso verringert sich auch die Sporenkonzentration mit der Dauer der Lagerung (**Bild 4-43**).

Das thermophile Artenspektrum ist nicht sehr vielgestaltig. Es dominiert *Aspergillus fumigatus* neben *Emericella nidulans*, *Paecilomyces variotii* und *Rhizomucor pusillus*. Das Artenspektrum und die Menge anderer Arten scheint mit der Lagerungsdauer zuzunehmen (**Tabelle 4-20**).

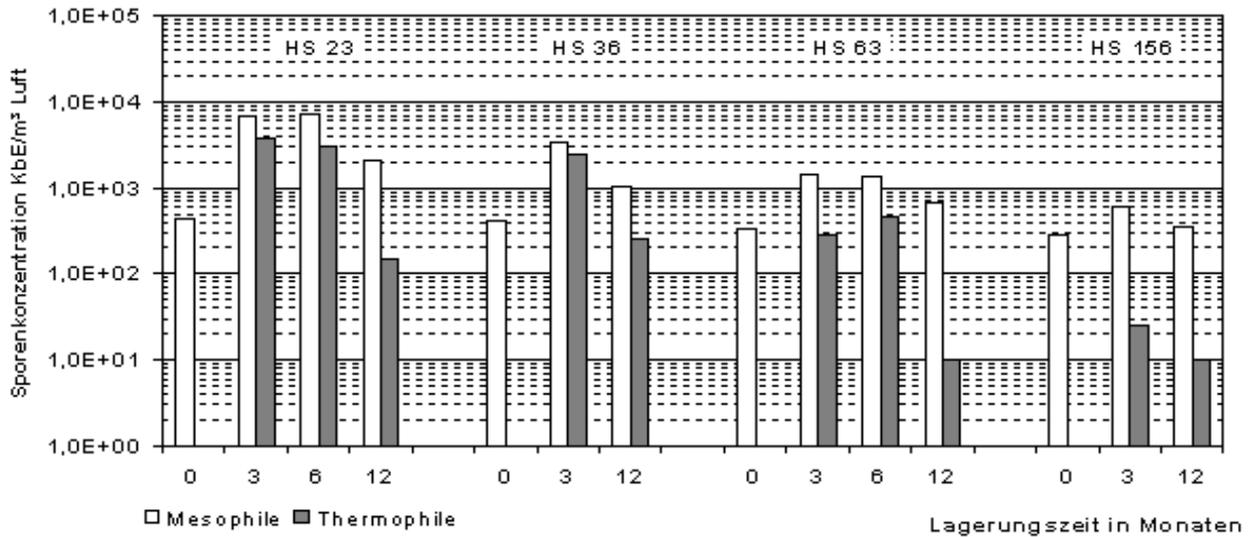


Bild 4-43: Sporenkonzentration in der Luft 30 cm über den 10 m³-Lagerboxen mit Pappelhackgut während der Lagerung (2002 – 2003)

Tabelle 4-20: Artenspektrum thermophiler Schimmelpilze bei der Boxenlagerung von unterschiedlich aufbereitetem Pappelholz

Lagerzeit Monate	Hacklänge	Thermophile Pilzsporen KbE/m ³ Luft	Gehalt an <i>Aspergillus fumigatus</i> Sporen KbE/m ³ Luft	Anzahl und Spezies thermophiler Arten KbE/m ³ Luft
0	HS 23	0	0	0
	HS 36	0	0	0
	HS 63	0	0	0
	HS 156	0	0	0
3	HS 23	3,8·10 ³	3,7·10 ³	6,0·10 ¹ <i>Aspergillus flavus</i> Gruppe 6,0·10 ¹ <i>Emericella nidulans</i>
	HS 36	2,8·10 ³	2,8·10 ³	4,0·10 ¹ <i>Aspergillus flavus</i> Gruppe 4,0·10 ¹ <i>Emericella nidulans</i>
	HS 63	2,8·10 ²	2,8·10 ²	0
	HS 156	2,5·10 ¹	2,5·10 ¹	0
6	HS 23	3,1·10 ³	2,6·10 ³	3,6·10 ² <i>Emericella nidulans</i> 1,1·10 ² <i>Paecilomyces variotii</i> 1,1·10 ² <i>Rhizomucor pusillus</i>
	HS 63	4,5·10 ²	3,4·10 ²	1,1·10 ² <i>Emericella nidulans</i>
12	HS 23	1,4·10 ²	6,5·10 ¹	2,0·10 ¹ <i>Paecilomyces variotii</i> 1,0·10 ¹ <i>Aspergillus flavus</i> Gruppe 3,0·10 ¹ <i>Rhizomucor pusillus</i> 2,0·10 ¹ sonst. therm. Zygotmycten
	HS 36	2,6·10 ²	2,4·10 ²	2,0·10 ¹ <i>Paecilomyces variotii</i>
	HS 63	1,0·10 ¹	1,0·10 ¹	0
	HS 156	1,0·10 ¹	1,0·10 ¹	0

4.5.2 Lagerhaufen

Lagersaison 2002 - 2003

Die Sporenkonzentration in der Luft wurde bei Lagerhaufen mit und ohne Regenschutz bei Pappelhackschnitzel HS 23 und HS 63 gemessen. Die Probenahmen erfolgten direkt am Lagerhaufen (0 m) und in 10 m Abstand. Die Messungen wurden während der Lagerungszeit von 11 Monaten und bei Auslagerung der Hackschnitzel durchgeführt. Die Ergebnisse sind im **Bild 4-44** dargestellt.

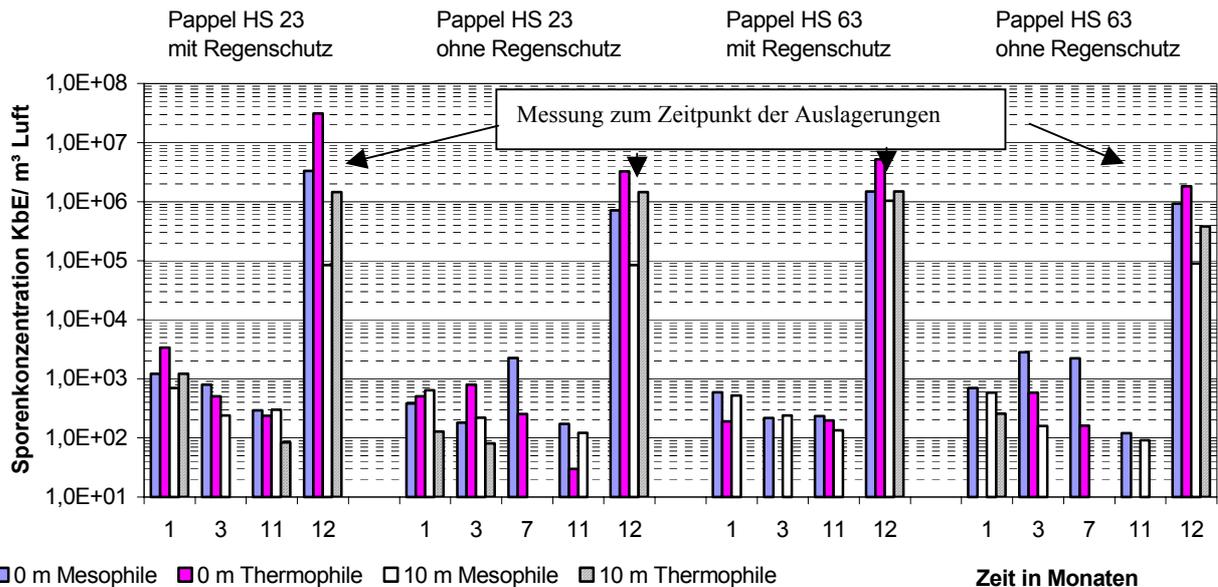


Bild 4-44: Sporenkonzentration in der Luft bei der Lagerung von Pappelholz in 18 m³-Haufen mit und ohne Regenschutz

Bei HS 23 dominieren die thermophilen Schimmelpilze insbesondere zu Beginn der Lagerung. Die Ergebnisse weisen weiter darauf hin, dass HS 23 mit Regenschutz eine höhere Emission an Schimmelpilzsporen verursacht als HS 23 ohne Regenschutz.

Die Sporenkonzentration in der Luft ist bei Feinhackschnitzeln HS 23 im allgemeinen höher als bei Grobhackschnitzeln HS 63. Im Gegensatz zu HS 23 dominieren bei HS 63 die mesophilen Schimmelpilze während der Lagerung. Unterschiede in der Emission von Schimmelpilzsporen bei HS 63 mit oder ohne Regenschutz lassen sich nicht ableiten.

Sehr hoch wird die Sporenkonzentration bei der Auslagerung. Hier dominieren bei allen 4 Varianten die thermophilen Schimmelpilze. Der höchste Wert der Emission thermophiler Schimmelpilze wird bei Feinhackschnitzeln HS 23 mit Regenschutz ($3,1 \cdot 10^7$ KbE/m³) der niedrigste bei Grobhackschnitzeln HS 63 ohne Regenschutz ($1,8 \cdot 10^6$ KbE/m³) erreicht.

Das folgende Bild zeigt die Sporenkonzentration bei HS 23 mit Regenschutz 3 Monate nach Einlagerung vor und nach Abnahme des Daches bei verschiedenen Messabständen.

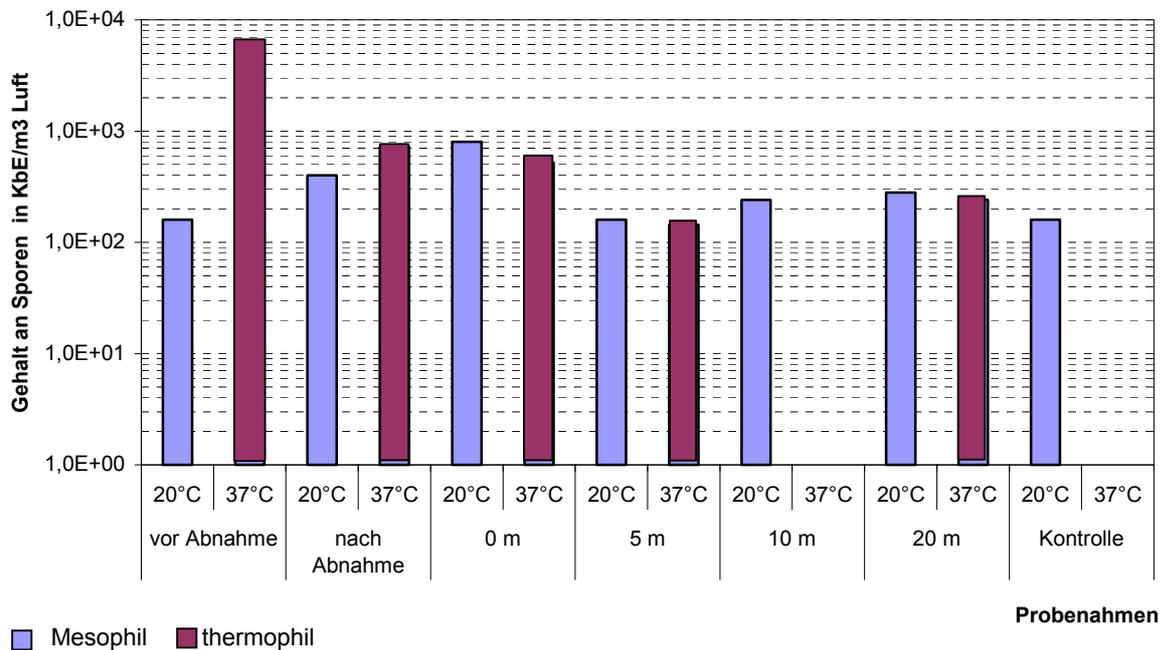


Bild 4-45: Sporenkonzentration in der Luft in unterschiedlichen Entfernungen von Pappelhackschnittzel-Haufen (HS 23) mit Regenschutz, gemessen 3 Monate nach Einlagerung sowie vor und nach Abnahme des Regenschutzes

Unter dem Regenschutzdach lässt sich eine hohe Konzentration von thermophilen Schimmelpilzen im Vergleich zu den mesophilen nachweisen. Nach Abnahme des Regenschutzes verringert sich der Anteil an thermophilen Schimmelpilzen deutlich. Die Sporenkonzentrationen unmittelbar nach Abnahme des Dachs und 1 Stunde später sind ähnlich (**Bild 4-45**).

Das Artenspektrum und die Menge an thermophilen Schimmelpilzsporen in der Luft während der Lagerung und Auslagerung zeigt die **Tabelle 4-21**. Bei der Haufenlagerung mit und ohne Regendach dominiert unter den thermophilen Schimmelpilzen *Aspergillus fumigatus*. Das Schimmelpilzspektrum nimmt bei der Auslagerung zu. Die Konzentration der anderen Arten ist im Vergleich zu *Aspergillus fumigatus* gering.

Tabelle 4-21: Artenspektrum thermophiler Schimmelpilzsporen bei der Haufenlagerung mit und ohne Regenschutz (RS) direkt am Haufen (0 m) und in 5 m, 10 m und 20 m Entfernung

Lagerdauer	Hacklänge (mm) Entfernung (m) Bedingung (RS)	Thermophile Sporen	Sporen von <i>Aspergillus fumigatus</i>	Sporen sonstiger thermophiler Arten
Monate	-	KbE/m ³	KbE/m ³	KbE/m ³
1	HS 23/0-RS	3,4·10 ³	3,4·10 ³	
1	HS 23/10-RS	1,2·10 ³	1,2·10 ³	
1	HS 23/0	5,1·10 ²	3,2·10 ²	1,3·10 ² <i>Rhizomucor pusillus</i> 6,4·10 ² <i>Emericella nidulans</i>
1	HS 23/10	1,3·10 ²	1,3·10 ²	
1	HS 63/0-RS	1,9·10 ²	1,9·10 ²	
1	HS 63/10-RS	0	0	
1	HS 63/0	0	0	
1	HS 63/10	2,6·10 ²	2,6·10 ²	
3	HS 23/0-RS	5,1·10 ²	5,1·10 ²	
3	HS 23/5-RS	1,4·10 ²	1,4·10 ²	
3	HS 23/10-RS	0	0	
3	HS 23/20-RS	2,4·10 ²	2,4·10 ²	
3	HS 23/0	8,0·10 ²	8,0·10 ²	
3	HS 23/10	8,0·10 ¹	8,0·10 ¹	
3	HS 63/-RS	0	0	
3	HS 63/10-RS	0	0	
3	HS 63/0	5,8·10 ²	5,8·10 ²	
3	HS 63/5+10 HS 63/10+20	0	0	
7	HS 23/0	2,5·10 ²	1,0·10 ²	6,0·10 ¹ <i>Aspergillus niger</i> 6,0·10 ¹ <i>Emericella nidulans</i> 3,0·10 ¹ div. Zygomyceten
7	HS 63/0	1,6·10 ²	101	3,0·10 ¹ <i>Aspergillus niger</i> 3,0·10 ¹ div. Zygomyceten
11	HS 23/0-RS	2,4·10 ²	1,8·10 ²	5,4·10 ¹ <i>Paecilomyces variotii</i>
11	HS 23/10-RS	8,4·10 ¹	8,4·10 ¹	
11	HS 23/0	3,0·10 ¹	3,0·10 ¹	
11	HS 23/10	0	0	
11	HS 63/0-RS	2,0·10 ²	2,0·10 ²	
11	HS 63/10-RS	0	0	
11	HS 63/0	0	0	
11	HS 63/10	0	0	
12	HS 23/0-RS	30,9·10 ⁶	30,7·10 ⁶	9,0·10 ⁴ <i>Emericella nidulans</i> 9,0·10 ⁴ div. Zygomyceten
12	HS 23/10-RS	1,5·10 ⁶	1,4·10 ⁶	3,6·10 ⁴ <i>Fusarium spp.</i> 1,8·10 ⁴ <i>Rhizopus microsporus</i> var. <i>rhizopodiformis</i> 1,8·10 ⁴ <i>Rhizomucor pusillus</i>
12	HS 23/0	3,2·10 ⁶	2,6·10 ⁶	2,4·10 ⁵ <i>Fusarium spp.</i> 4,0·10 ⁵ <i>Emericella nidulans</i> 7,5·10 ⁴ <i>Fusarium spp.</i>
12	HS 23/10	0,2·10 ⁶	0,4·10 ⁶	
12	HS 63/0-RS	5,2·10 ⁶	5,4·10 ⁶	
	HS 63/10-RS	1,5·10 ⁶	1,4·10 ⁶	1,8·10 ⁴ <i>Paecilomyces variotii</i> 1,8·10 ⁴ <i>Rhizomucor pusillus</i> 1,8·10 ⁴ <i>Emericella nidulans</i>
12	HS 63/0	1,8·10 ⁶	1,4·10 ⁶	8,0·10 ⁴ <i>Emericella nidulans</i>
12	HS 63/3	0,4·10 ⁶	0,4·10 ⁶	0,2·10 ⁴ <i>Emericella nidulans</i>

4.6 Masse- und Energieverluste

4.6.1 Laborgefäße

Lagersaison 2002

Die Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Pappelholz in Laborgefäßen sind in **Tabelle 4-22** zusammengestellt. In der Serie 1 wurden Pappelfeinhackschnitzel bei unterschiedlichen Temperaturen gelagert. Mit zunehmender Lagertemperatur steigt der Trockenmasseverlust von 17 °C auf 30 °C etwas an. Der Energieverlust zeigt die gleiche Tendenz. Bei einer Lagertemperaturen von 60 °C sind auf Grund der raschen Trocknung des Materials deutlich geringere Trockenmasseverluste zu verzeichnen.

In einer zweiten Serie wurde Pappelholz unterschiedlich zerkleinert und bei konstanter Temperatur (30 °C) gelagert. Die Trockenmasseverluste von HS 23 und HS 36 sind ähnlich. Grobhackschnitzel HS 63 weisen demgegenüber etwas geringere Verluste auf. Die erheblichen Unterschiede in den Trockenmasseverlusten zwischen den beiden Versuchsserien bei HS 23 und 30 °C sind möglicherweise auf unterschiedliche Standorte und Erntezeitpunkte des jeweiligen Materials zurückzuführen.

Tabelle 4-22: Trockenmasse- und Energieverluste bei 4-wöchiger Lagerung von Pappelhackgut in 5 l-Laborgefäßen (n = 7)

Holzaufbereitung	Einlagerung		Auslagerung		Verlust Trocken- masse %
	Gutmasse kg	Wasser- gehalt %	Gutmasse kg	Wasser- gehalt %	
Serie 1					
HS 23, 17°C	1,97	54,8	1,73	56,6	16,3
HS 23, 30°C	1,94	54,8	1,54	53,7	17,6
HS 23, 60°C	1,89	54,8	0,81	3,9	9,9
Serie 2					
HS 23, 30°C	1,54	56,3	1,32	53,9	8,3
HS 36, 30°C	1,48	55,6	1,52	52,2	9,0
HS 63, 30°C	1,45	58,8	1,30	56,9	7,3

Lagersaison 2003

Für die Versuche dieser Lagersaison wurde das Temperaturn raster etwas enger gewählt als bei den Untersuchungen des vorangegangenen Jahres. In **Tabelle 4-23** sind die Trockenmasseverluste dieser Untersuchungen zusammengestellt. Trotz der breiten Streuung der Ergebnisse, die durch den zufälligen Befall der jeweiligen Probe mit Schimmelpilzsporen verursacht werden, lassen sich gewisse Aussagen ableiten.

In dem untersuchten Temperaturbereich von 20 bis 35 °C nehmen die Trockenmasseverluste mit steigender Temperatur überwiegend zu, und mit wachsender Hacklänge überwiegend ab. Eine Ausnahme bildet jedoch die extrem feine Fraktion HS 16, die bei niedrigen Temperaturen ebenfalls relativ geringe Trockenmasseverluste aufweist. Deren Ursache könnte die durch den

hohen Strömungswiderstand bedingte unzureichende Sauerstoffversorgung bestimmter Mikroorganismen sein.

Tabelle 4-23: Trockenmasseverluste von unterschiedlich zerkleinertem Pappel- und Kiefernholz nach 4-wöchiger Lagerung in 5 l-Laborgefäßen (n = 5)

Holzaufbereitung Lagertemperatur	Einlagerung		Auslagerung		Verlust Trocken- masse %
	Gut- masse kg	Wasser- gehalt %	Gut- masse kg	Wasser- gehalt %	
Pappel					
HS 16, 20°C	1,55	59,3	1,45	57,9	3,2
HS 16, 25°C	1,60	59,3	1,46	57,2	3,9
HS 16, 30°C	1,64	59,3	1,46	57,1	6,1
HS 16, 35°C	1,49	59,3	0,96	43,7	10,9
HS 22, 20°C	1,37	58,1	1,31	59,0	6,3
HS 22, 25°C	1,39	58,1	1,28	57,7	7,0
HS 22, 30°C	1,40	58,1	1,23	52,7	0,8
HS 22, 35°C	1,38	58,1	0,96	43,3	5,7
HS 56, 20°C	1,68	60,3	1,60	60,9	6,2
HS 56, 25°C	1,75	60,3	1,60	60,7	9,5
HS 56, 30°C	1,72	60,3	1,50	54,7	0,5
HS 56, 35°C	1,65	60,3	-	39,9	-
HS 155, 20°C	1,65	52,1	1,52	48,0	0,8
HS 155, 25°C	1,63	52,1	1,27	39,9	3,1
HS 155, 30°C	2,00	52,1	1,22	20,9	0,1
HS 155, 35°C	1,72	52,1	0,82	5,0	6,2
HS 20, 30°C	1,54	48,8	1,31	48,1	13,7
HS 50, 30°C	1,40	49,1	1,16	42,4	6,3
HS 80, 30°C	1,35	49,4	1,02	37,8	7,2
HS 150, 30°C	1,92	50,0	1,21	26,4	7,2
Kiefer					
HS 46, 20°C	1,45	46,2	1,38	43,9	0,7
HS 46, 25°C	1,49	46,2	1,37	42,7	2,0
HS 46, 30°C	1,51	46,2	1,35	43,2	5,6
HS 46, 35°C	1,50	46,2	1,00	25,8	8,0

4.6.2 Lagersilos

Lagersaison 2001 - 2002

Die Masseverluste wurden in der Saison 2001 - 2002 durch Wägen der Gesamtmasse der einzelnen Lagersilos zu bestimmten Zeitpunkten erfasst (**Bild 4-46**). Bei Annahme einer zeit- oder wärme proportionalen Zunahme des Trockenmasseverlustes lässt sich hieraus näherungsweise der Trocknungsverlauf ermitteln.

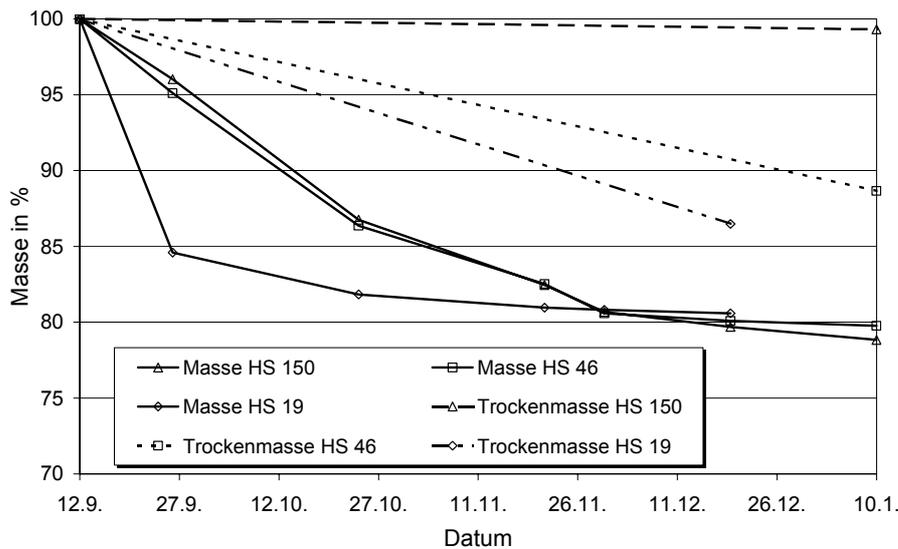


Bild 4-46: Änderung der Gesamt- und der Trockenmasse bei der Lagerung von Pappel-hackschnitzeln in 1,5 m³-Silos, Saison 2001

Lagersaison 2002 - 2003

In der Saison 2002 – 2003 wurde jeweils die Gesamtmasse des Lagergutes der einzelnen Silos erfasst. Die Veränderung der Masse über der Zeit ist bei den feinen Fraktionen zu Beginn am größten. Nach einer Lagerzeit von 7 Monaten treten keine wesentlichen Masseänderungen mehr auf (**Bild 4-47**). Bei den Pappel-Grobhackschnitzel HS 63 kam es nach dem 20.06.2002 zu einem Anstieg der Masse. Dies ist durch einen Regenwassereintritt zu erklären, da nach einer Messung im Lagersilo der Deckel nicht korrekt montiert wurde. Zum Ende der Lagerzeit steigen die Werte mitunter wieder etwas an. Das getrocknete Holz verändert in Abhängigkeit von der Luftfeuchte je nach Fraktion seine Gesamtmasse.

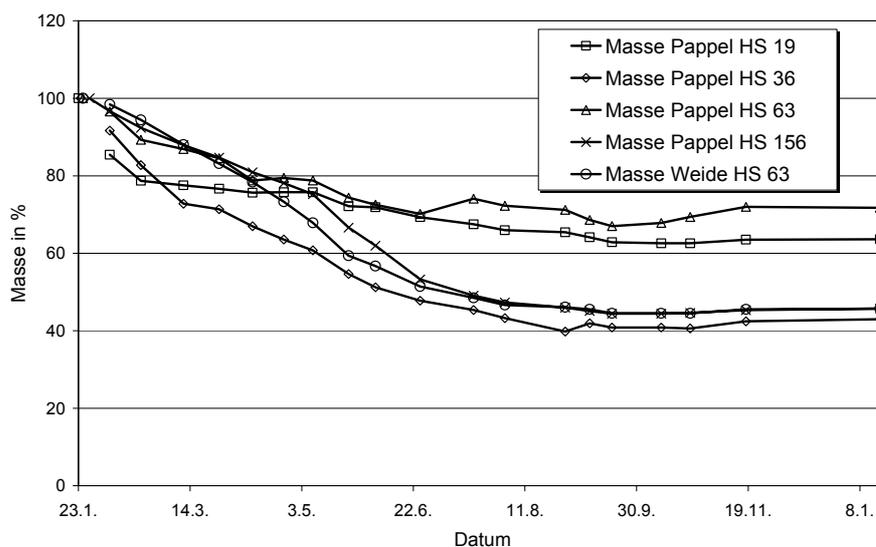


Bild 4-47: Änderung der Gesamtmasse bei der Lagerung von Pappel- und Weidenhackschnitzeln in 1,5 m³-Silos, Saison 2002 - 2003

Die mit Hilfe von Bilanzbeuteln ermittelten Höhenprofile der Trockenmasseverluste gestatten differenzierte örtliche Betrachtungen. Bei Hackstücken blieben die Trockenmasseverluste unter 25 %. Im Lagersilo gab es zwischen Rand und Mitte keine wesentlichen Unterschiede. Bei den

Feinhackschnitzel wurden dagegen Verluste von 40 % erreicht, und es trat eine starke Differenzierung zwischen den Schichten und zwischen Mitte und Rand auf. Große Verluste wurden insbesondere im unteren und oberen Bereich der Schüttung (Kondensatzonen) gemessen (**Bild 4-48**).

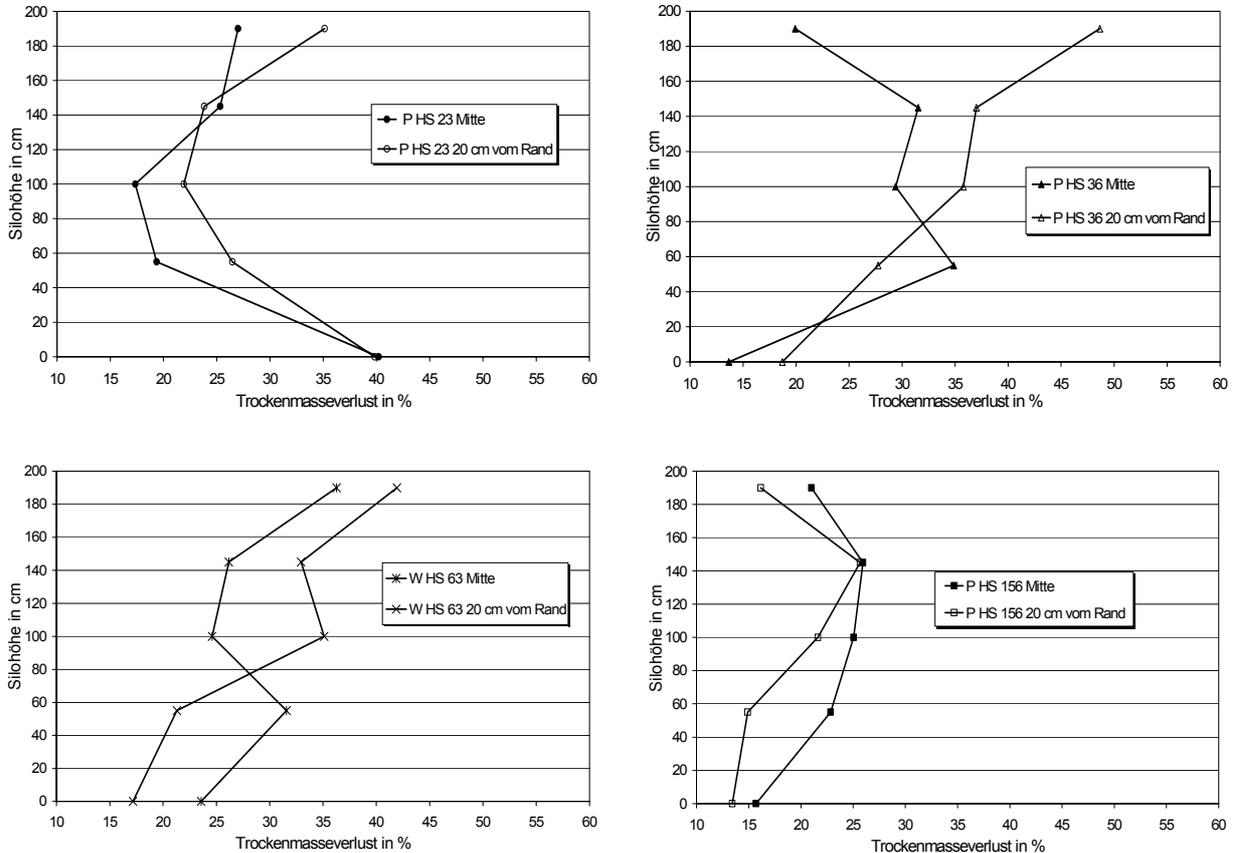


Bild 4-48: Höhenprofil des Trockenmasseverlustes nach einjähriger Lagerung von Pappel- und Weidenhackgut in 1,5 m³-Silos (Saison 2002 - 2003)

Oben links: Pappel HS 23
Unten links: Weide HS 63

Oben rechts: Pappel HS 36
Unten rechts: Pappel HS 156

Die Mittelwerte der Trockenmasseverluste, der Energieverluste und des Endwassergehaltes zeigen ähnliche Tendenzen wie die Einzelwerte. Sie verringern sich mit zunehmender Hackschnitzellänge. Aufgrund des Wassereintruchs weichen die Pappel-Grobhackschnitzel HS 63 allerdings davon ab (**Bild 4-49**).

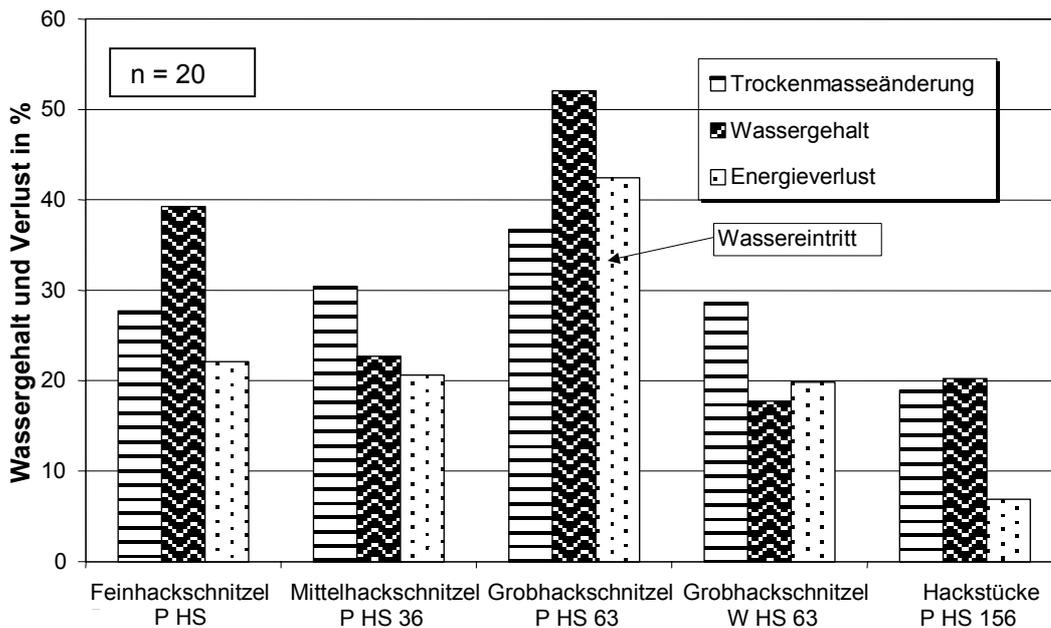


Bild 4-49: Mittlerer Wassergehalt, Trockenmasse- und Energieverlust nach einjähriger Lagerung unterschiedlicher Pappel (P)- und Weiden (W)-Hackschnitzel in 1,5 m³-Lagersilos, Saison 2002 - 2003

Saison 2003

In der Saison 2003 wurden die Lagersilos unter einem Schleppdach aufgestellt (vgl. Kap. 4.1.2). Das untere Sieb war nicht abgedeckt, wodurch eine Durchlüftung von unten her möglich war. Während der Lagerzeit von insgesamt 8 Monaten traten deutliche Randeffekte auf (**Bilder 4-50 und 4-51**).

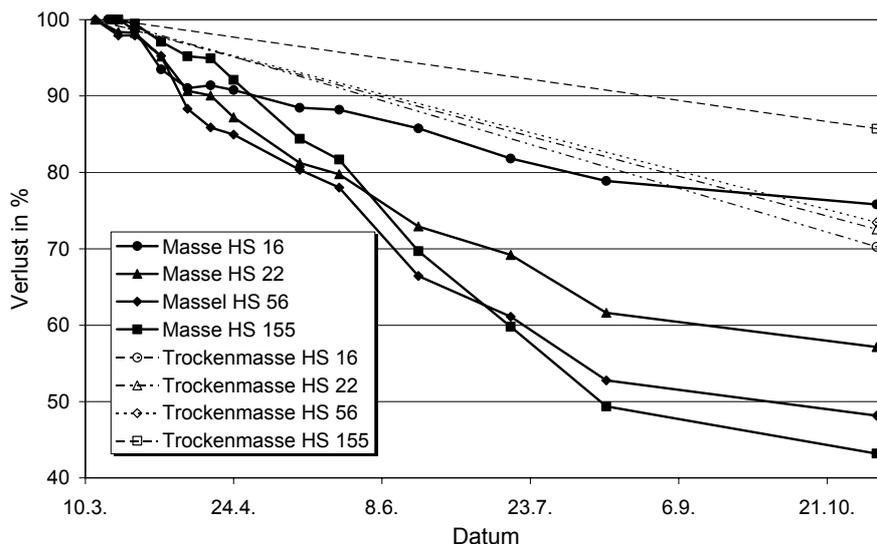


Bild 4-50: Gesamtmasse- und Trockenmasseverluste von Pappelhackgut in den 1,5 m³-Lagersilos, Saison 2003

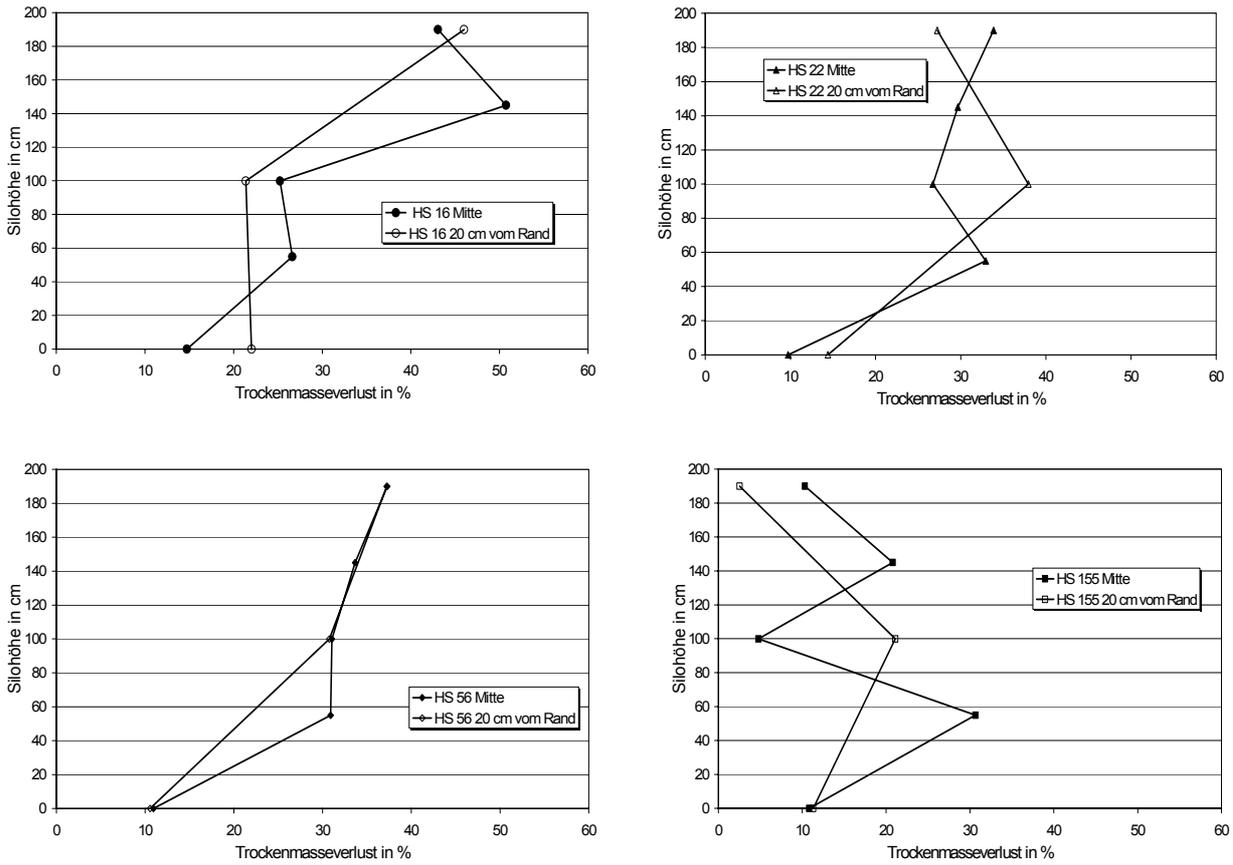


Bild 4-51: Höhenprofil des Trockenmasseverlustes bei der Lagerung von Pappelhackgut in 1,5 m³-Silos (Saison 2003, 8 Monate)

Links oben: HS 16
Links unten: HS 56

Rechts oben: HS 22
Rechts unten: HS 155

Bei dieser Lagerform bestätigt sich, dass zwar der Wassergehalt mit zunehmender Hacklänge von ca. 50 % auf 20 % abnimmt, dass aber die Trockenmasseverluste bis zu Hacklängen von zumindest 56 mm mit ca. 27 % etwa gleich bleiben und erst bei den extrem großen Hackstücken HS 155 auf die Hälfte absinken (**Bild 4-52**).

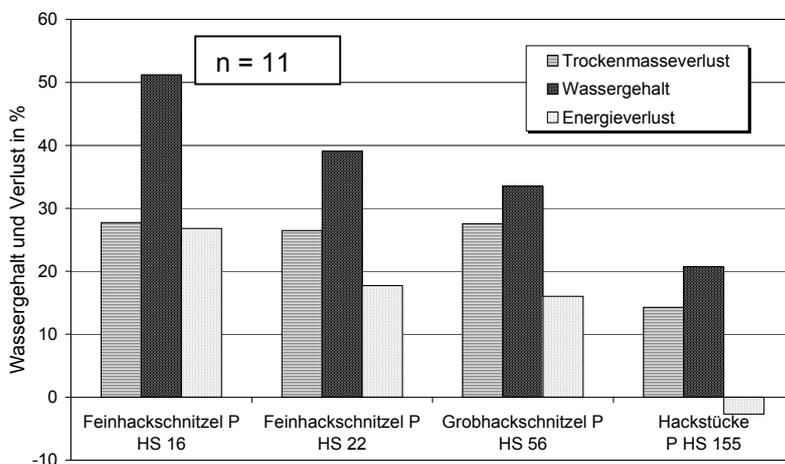


Bild 4-52: Mittlere Endwasserhalte und Verluste bei der Lagerung von Pappelhackgut in 1,5 m³-Silos, Saison 2003 (Lagerzeit 8 Monate)

4.6.3 Lagerboxen

Lagersaison 1998 - 1999

Im Jahr 1998 wurden Lagerboxen errichtet und ohne Schutzdach mit Holz verschiedener Fraktionen gefüllt (vgl. Kap. 4.1.3). Der Lagerzeitraum war von Februar 1998 bis Februar 1999. Es wurden Pappel-Feinhackschnitzel HS 16, Pappel-, Weiden- und Kiefern-Grohackschnitzel HS 37, Pappel-Hackstücke HS 120 und ganze Bäume in offenen Boxen von 2 Meter Breite (bei Hackgut mit Schüttkegel) eingelagert. Mit Hilfe von Bilanzbeutel konnten Trockenmasseverlust, Wassergehalt und Energieverlust bestimmt werden (**Bild 4-53**).

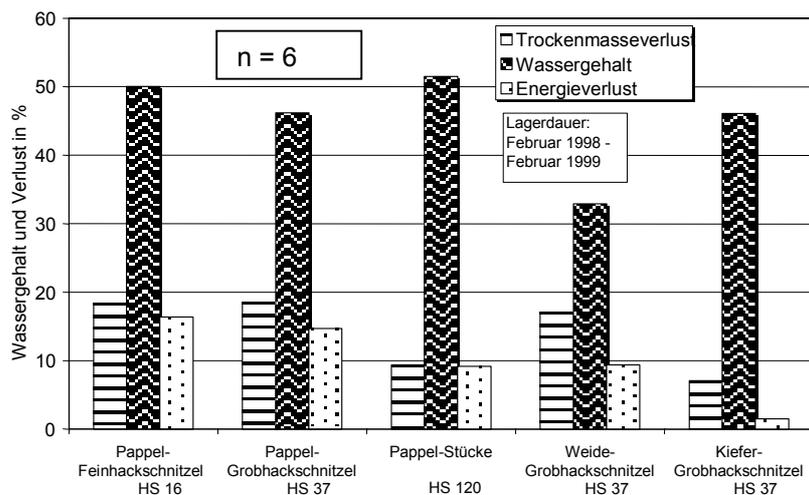


Bild 4-53: Mittlerer Wassergehalt und Verluste nach einjähriger Lagerung von Holzhackgut in Lagerboxen (Saison 1998 - 1999)

Lagersaison 1999 - 2000

Im Februar 1999 wurden die Lagerboxen erneut mit Holzhackschnitzel verschiedener Fraktionen befüllt und bis Februar 2000 gelagert. Teilweise wurden Holzpaletten zur Unterlüftung in die Lagerboxen eingebaut und eine Abdeckung, bestehend aus Holzpaletten und Planen, angebracht. Die Verluste und der Wassergehalt wurden wieder mittels Bilanzbeutel ermittelt (**Bild 4-54**).

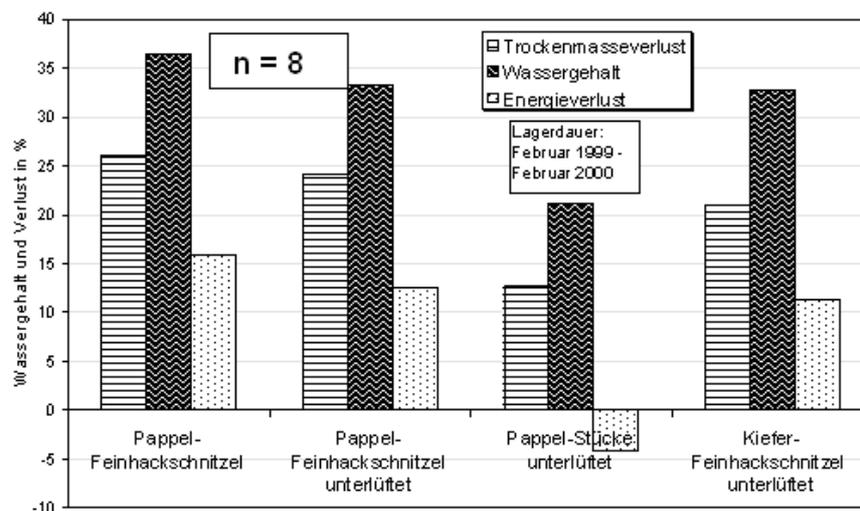


Bild 4-54: Mittlerer Wassergehalt und Verluste nach einjähriger Lagerung von Holzhackgut in 10 m³-Lagerboxen (Saison 1999 - 2000)

Lagersaison 2002 – 2003

In dieser Saison wurden die Lagerboxen überdacht, gedämmt, nicht unterlüftet und vorderseitig mit einer Holzbohlenwand verschlossen. Die Höhenprofile der Trockenmasseverluste zeigen eine ausgeglichene Trocknung bei den Hackstücken und eine starke Differenzierung bei den Feinhackschnitzel. Dort ergeben sich geringe Verluste im Zentrum und große Verluste in den Randbereichen. Es zeigt sich eine Analogie zwischen der Verteilung der Trockenmasseverluste und der Verteilung der Wassergehalte in den verschiedenen Fraktionen (**Bilder 4-25 und 4-55**). Die Mittelwerte der Verluste bestätigen die Ergebnisse der Vorjahre. Der Energieverlust reduziert sich bei Hackstücken im Vergleich zu Feinhackstücken auf ein Viertel (**Bild 4-56**).

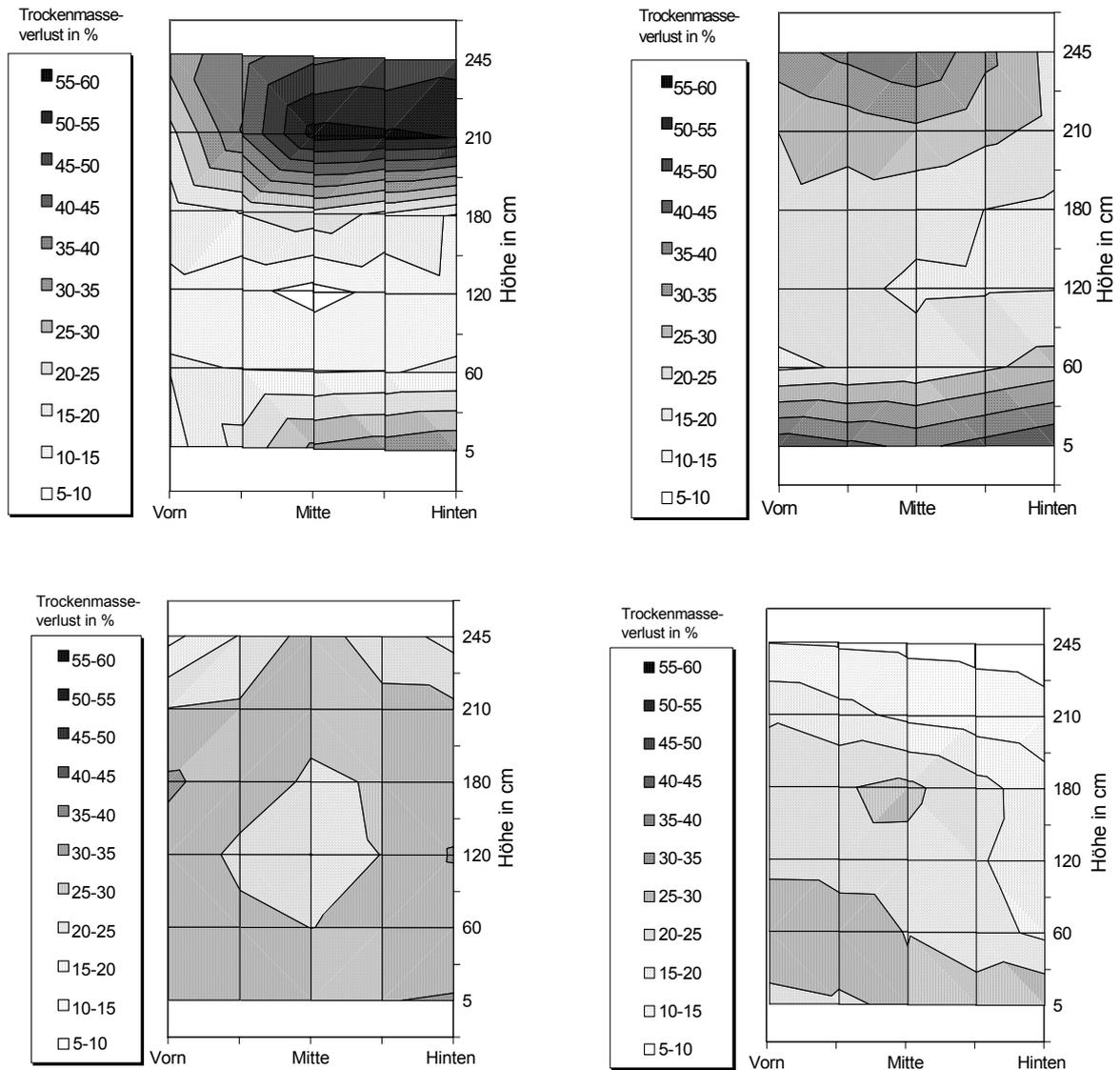


Bild 4-55: Profil der Trockenmasseverluste von Pappelhackgut nach einjähriger Lagerung in 10 m³-Lagerboxen (Saison 2002 – 2003)

Links oben: HS 23
Links unten: HS 63

Rechts oben: HS 36
Rechts unten: HS 156

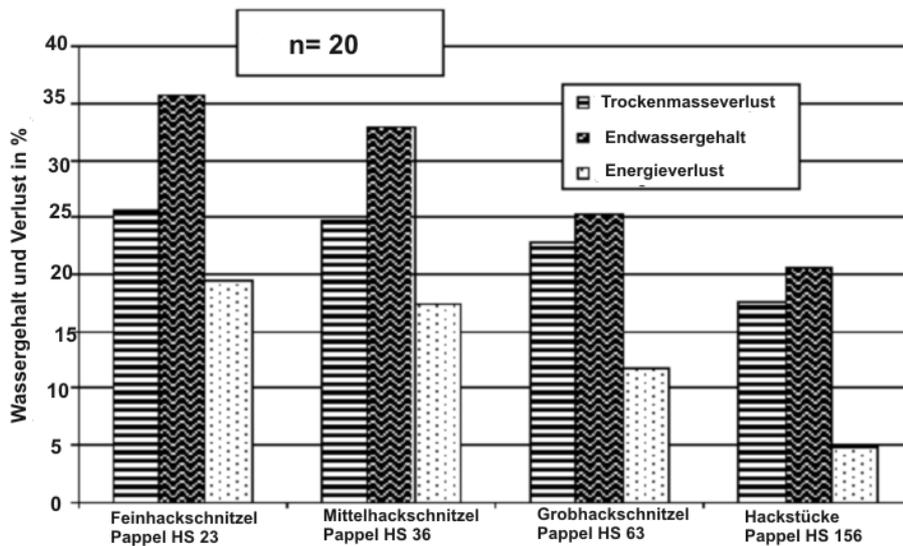


Bild 4-56: Mittlerer Endwassergehalt und Verluste nach einjähriger Lagerung von Pappelhackgut in 10 m³-Lagerboxen (Saison 2002 - 2003)

4.6.4 Lagerhaufen

Neben den Lagerboxen wurden auch Lagerhaufen (Dreiecksmieten) mit und ohne Regenschutz von zwei verschiedenen Fraktionen (HS 23 und HS 63) untersucht. Die Ergebnisse sind vergleichbar. Bei Feinhackschnitzeln entstanden im Randbereich Kondensationszonen, wogegen im Innern der Lagerhaufen eine gute Trocknung erreicht wurde. Bei Grobhackschnitzeln erfolgte im allgemeinen eine gleichmäßigere Trocknung (**Bild 4-57**). Der Schutz gegen Niederschlag führte besonders im mittleren Bereich und an den Flanken zu geringeren Verlusten (**Bilder 4-57 und 4-58**).

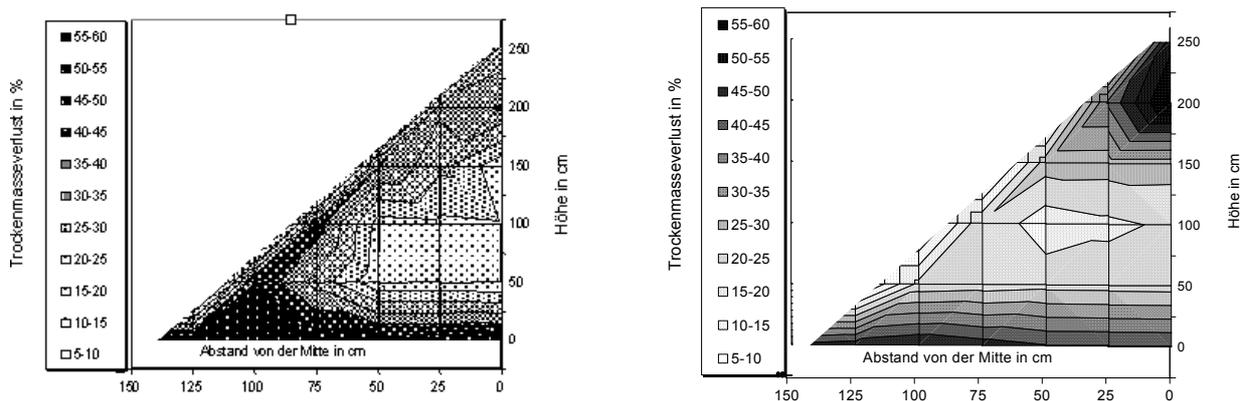


Bild 4-57a: Profil der Trockenmasseverluste von Pappelhackschnitzeln nach einjähriger Lagerung in 18 m³-Dreiecksmieten (Saison 2002 – 2003)

Links: HS 23 ohne Regenschutz

Rechts: HS 23 mit Regenschutz

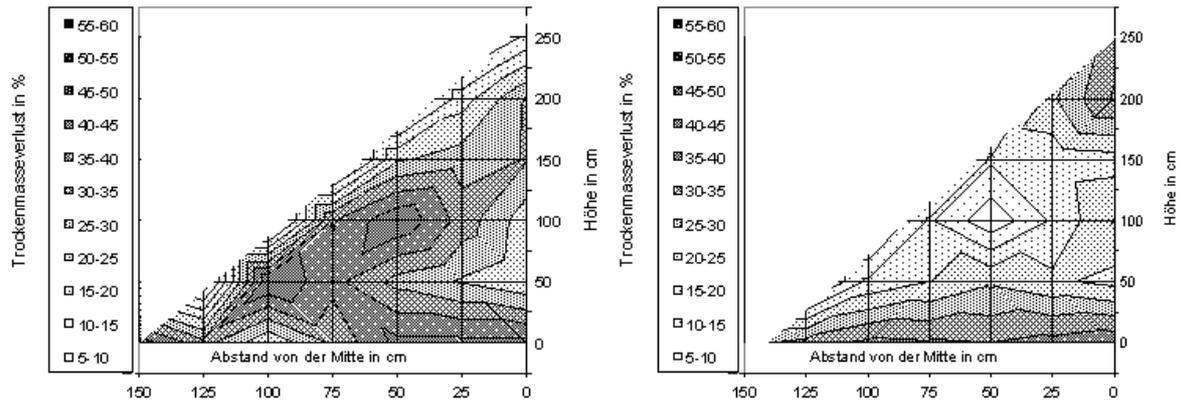


Bild 4-57b: Profil der Trockenmasseverluste von Pappelhackschnitzeln nach einjähriger Lagerung in 18 m³-Dreiecksmieten (Saison 2002 – 2003)

Links: HS 63 ohne Regenschutz

Rechts: HS 63 mit Regenschutz

Die während der Auslagerung gemachten Fotos verdeutlichen optisch die Bereiche hoher Trockenmasseverluste und Wassergehalte in den Hackschnitzelhaufen (**Bild 4-58**).



Bild 4-58: Querschnitt der 18 m³-Dreiecksmieten bei Auslagerung der Pappelhackschnitzel nach einem Jahr (Saison 2002 – 2003)

Links oben: HS 23 ohne Regenschutz

Rechts oben: HS 23 mit Regenschutz

Links unten: HS 63 ohne Regenschutz

Rechts unten: HS 63 mit Regenschutz

Während die Trockenmasseverluste mit 22 % bis 28 % relativ geringe Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten aufweisen, halbieren sich bei einer Abdeckung etwa der Endwassergehalt und die Energieverluste. Wobei, wie bereits erwähnt, das Regenschutzdach den Trocknungsprozess möglicherweise zusätzlich beschleunigt hat. In beiden Lagervarianten zeigen Grobhackschnitzel HS 63 günstigere Werte als Feinhackschnitzel HS 23 (**Bild 4-59**).

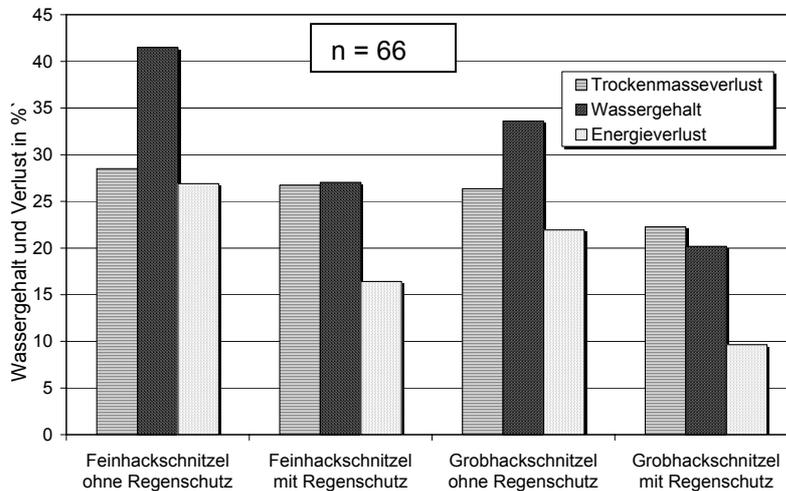


Bild 4-59: Mittelwerte der Verluste und des Wassergehaltes in den Pappel-Lagerhaufen (Saison 2002 – 2003)

Die Ergebnisse des Feldrandlagerhaufens (zusätzlicher Haufen) zeigen die positive Wirkung eines Luftkanals. Der Kanal begünstigt die Trocknung im Innern des Haufens, was sich nicht nur in geringeren Wassergehalten, sondern auch in geringeren Trockenmasse- und Energieverlusten zeigt (**Bilder 4-60 und 4-61**).

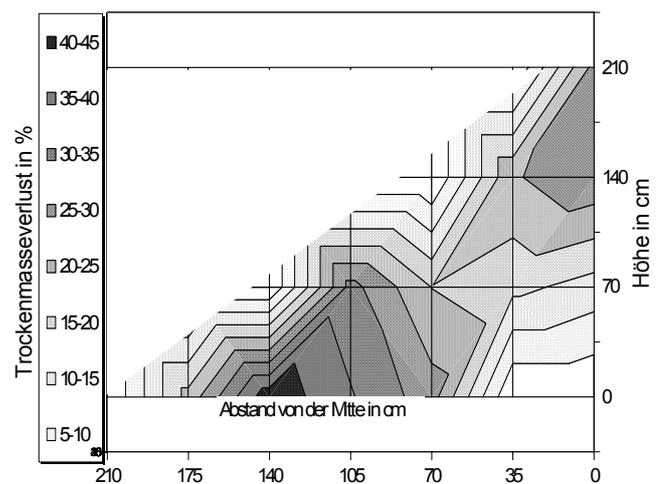


Bild 4-60: Querschnitt des 70 m³-Feldrandlagerhaufens mit Luftkanal bei der Auslagerung der Pappel-Mittelhackschnitzel HS 36 (Saison 2002)

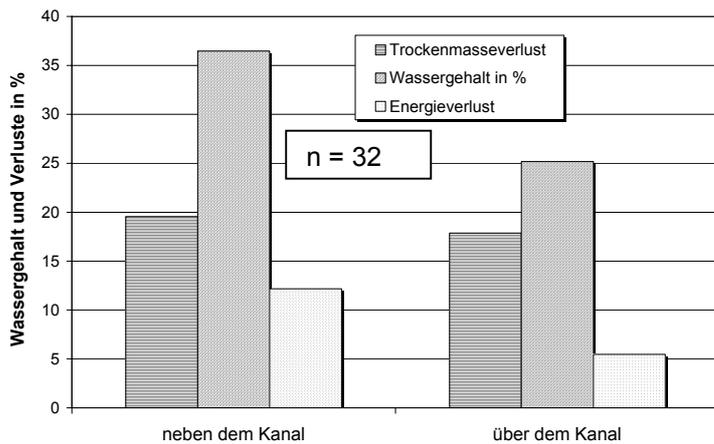


Bild 4-61: Mittelwerte der Verluste und des Wassergehaltes nach einjähriger Lagerung von Pappel-Mittel-Hackschnitzeln HS 36 im 70 m³-Feldrand-lagerhaufen mit Luftkanal (Saison 2002)

Bei dem Lagerhaufen mit Kiefern hackschnitzeln in der Nähe von Zempow wurde bereits nach 169 Tagen begonnen, den Haufen abzutragen. Die mit Bilanzbeuteln ermittelten Messwerte, insbesondere der Wassergehalt, weichen teilweise von den an anderen Stellen gemessenen Werten ab. So ergaben z.B. Vergleichsmessungen in 70 cm Tiefe Wassergehalte von minimal 22 %. Wie die Temperatur so ist auch der Wassergehalt in großen Lagerhaufen relativ heterogen (**Bild 4-62**).

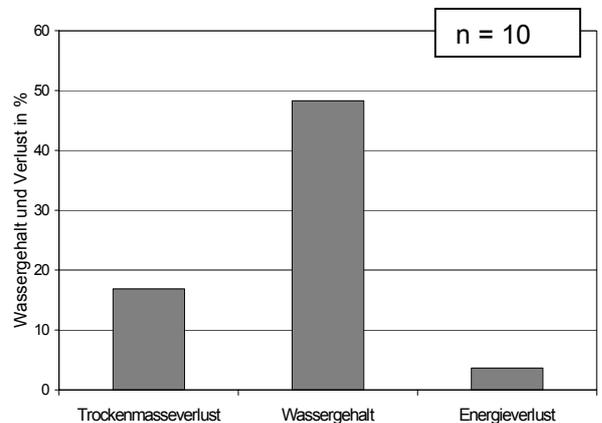
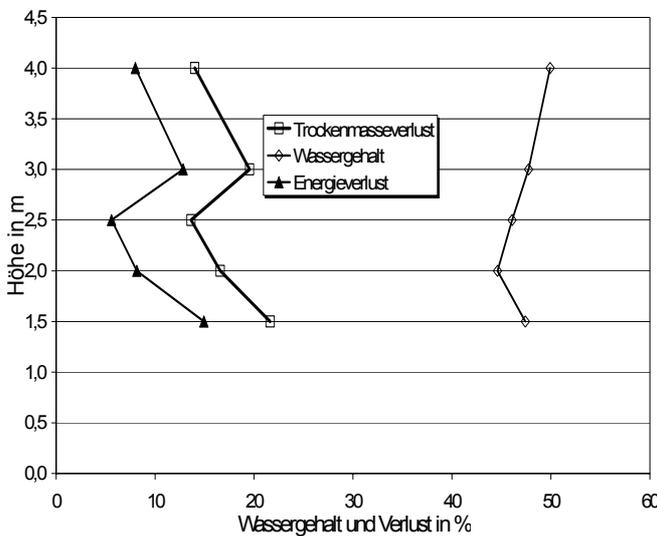


Bild 4-62: Wassergehalt und Verluste nach etwa halbjähriger Lagerung von Kiefern-Mittelhackschnitzeln HS 38 in einem 2000 m³-Haufen (Januar bis Juli 2003)

Links: Höhenprofil

Rechts: Mittelwerte

4.7 Lagerungsdichte

Messungen der Schüttdichte in Behältern und Lagerboxen mit Volumina von 21 l bis 10 m³ zeigen, dass die Lagerungsdichte mit wachsendem Volumen bzw. wachsender Höhe erwartungsgemäß zunimmt und dass diese Zunahme bei Feinhackschnitzeln (20 %) deutlich größer als bei Grobhackstücken (2 %) ist. Die mittlere Hacklänge hat im Bereich von 23 bis 63 mm offenbar nur geringen Einfluss auf die Lagerungsdichte. Allerdings weisen Grobhackstücke mit Längen von 155 bis 156 mm höhere Dichten auf, was sicherlich auf den höheren Volumenanteil kompakter Stücke zurückzuführen ist, deren Rohdichte bei erntefrischer Pappel etwa 800 bis 900 kg/m³ (59 % Wassergehalt) beträgt (**Tabelle 4-24**).

Tabelle 4-24: Schüttdichte von Holzhackgut in unterschiedlich großen Behältern unmittelbar nach der Einlagerung gemessen (Saison 2001)

	Schüttdichte in kg/m ³				
	Pappel				Weide
	HS 16...23	HS 36	HS 63	HS 156	HS 63
Messbehälter (21 l)	265	255	260	338	254
Modellsilo (1,5 m ³)	293	288	290	339	286
Lagerbox (10 m ³)	317	324	333	345	-

Die in 1,5 m³-Lagersilos in späteren Jahren gemessenen Lagerungsdichten weisen ähnliche Tendenzen auf, allerdings sind hier die Dichteunterschiede zu den Grobhackstücken noch deutlicher ausgeprägt. Wobei kleine Messvolumina (Hacklänge : Silodurchmesser = 1 : 6,4) zwangsläufig zu größeren Unterschieden führen. Die im Jahre 2003 gemessene extrem hohe Anfangsdichte der Hackstücke HS 155 ist nicht erklärbar. Trocknungs- und Verdichtungs- bzw. Setzungsprozesse führen im Laufe der Zeit zu einer Verringerung der Lagerungsdichte, die nicht unerheblich ist (**Bilder 4-63** und **4-64**) (vgl. auch Kap. 4.6.2).

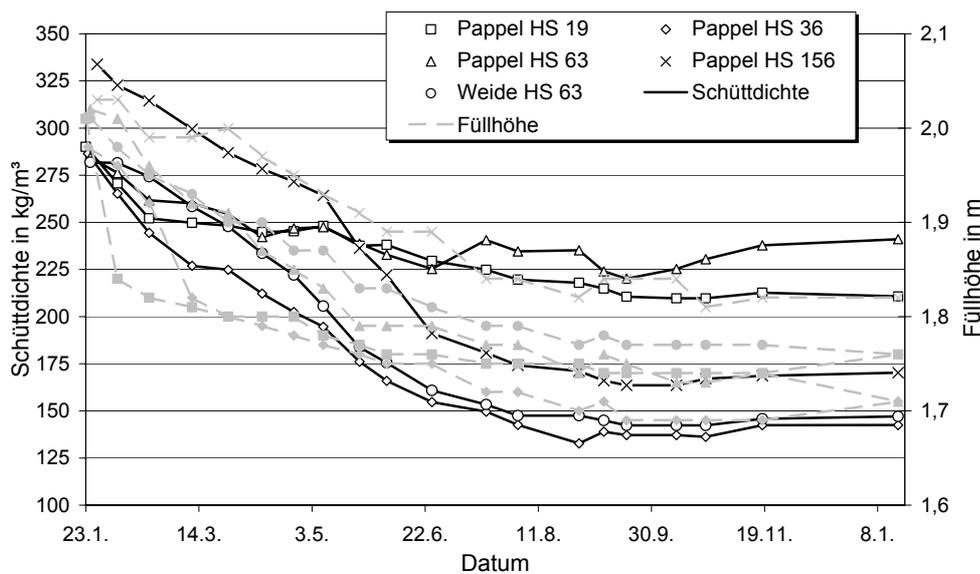


Bild 4-63: Änderung der Schüttdichte und der Füllhöhe während der Lagerung von Pappel- und Weidenhackgut in 1,5 m³-Lagersilos (Saison 2002 - 2003)

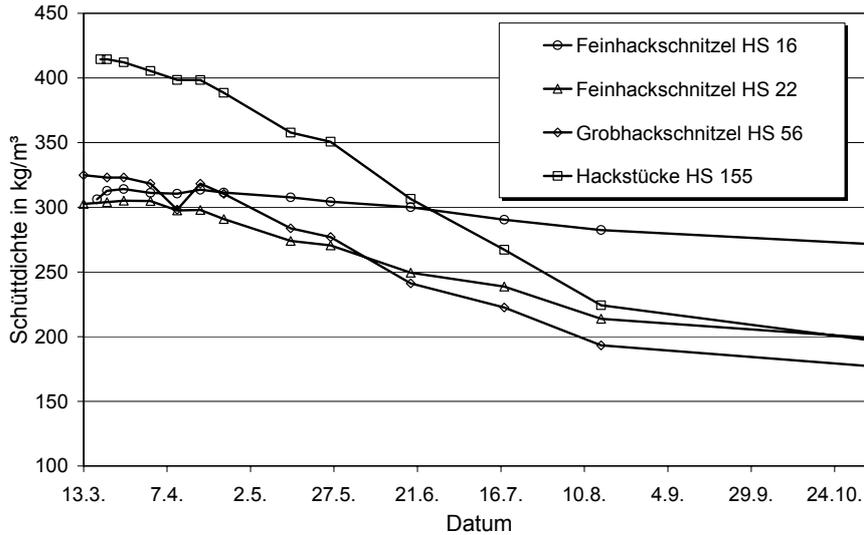


Bild 4-64: Änderung der Schüttdichte von Pappelhackgut in 1,5 m³-Lagersilos (Saison 2003)

4.8 Strömungswiderstand in Schüttungen

In den 1,5 m³-Lagersilos wurden auch Strömungsuntersuchungen durchgeführt. In der Saison 2001 wurden in den Abluftröhren hochempfindliche thermoelektrische Strömungssensoren eingesetzt und die Daten mittels Datenlogger aufgezeichnet. Bei diesen hochempfindlichen Messungen mit einem Messbereich von 0,01 bis 1 m/s wurden die Strömungsverhältnisse im Silo leider durch Windeinflüsse überlagert. Die Größenordnung der Luftgeschwindigkeit im Abluftröhr liegt bei freier Konvektion im Bereich von 0,1 bis 0,3 m/s, wobei Hackstücke offenbar höhere Luftgeschwindigkeiten verursachen als Feinhackschnitzel. Gesicherte Aussagen sind aus den ersten, im Jahre 2001 durchgeführten Messungen allerdings nicht ableitbar (**Bild 4-65**).

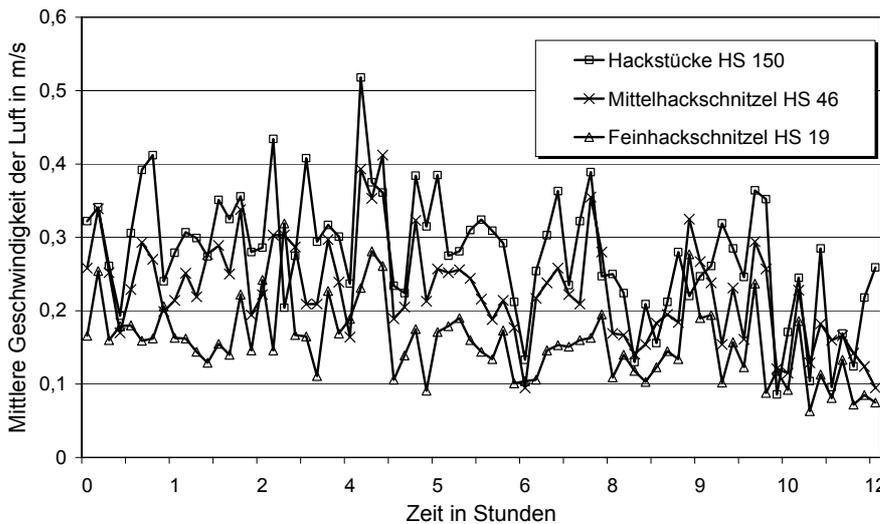


Bild 4-65: Luftgeschwindigkeit im Abluftröhr (Ø 20 cm) der Lagersilos (Ø 100 cm) (Saison 2001)

Um den Windeinfluss zu eliminieren, wurden im Jahre 2003 die Silos in eine windgeschützte, einseitig offene Halle gestellt, und mit Hilfe eines Gebläses der Strömungswiderstand der Schüttungen zu Beginn, während und am Ende der 8-monatigen Lagerung bestimmt. Es zeigen

sich erhebliche Unterschiede zwischen den Hackgutfraktionen HS 16 bis HS 155. Mit kleiner werdender Hackschnitzzellänge nimmt der Strömungswiderstand progressiv zu und weist bei Feinhackschnitzeln bei einer Luftgeschwindigkeit von z.B. 0,15 m/s einen Druckverlust von immerhin ca. 300 Pa pro Meter durchströmter Schüttung auf (**Bild 4-66**).

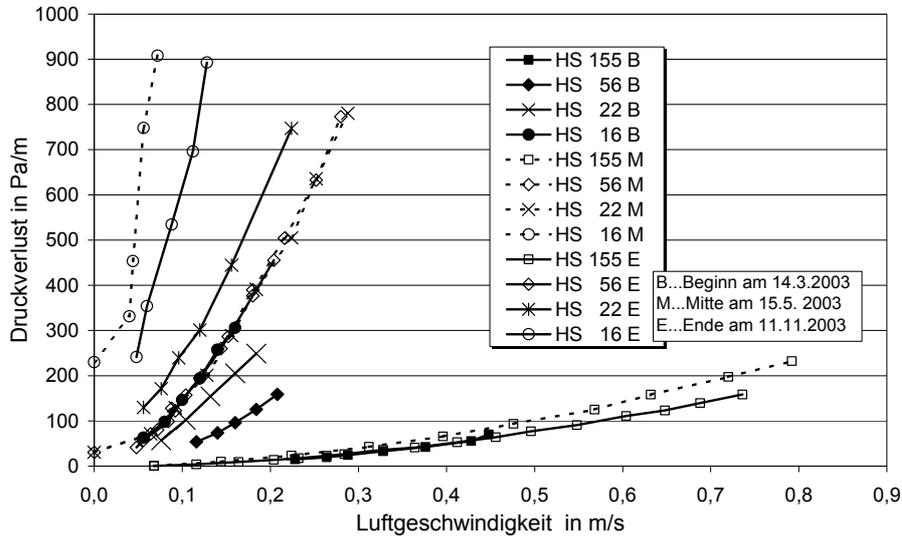


Bild 4-66:
Strömungswiderstand von Pappel-Hackgut in Abhängigkeit von Hacklänge und Lagerdauer (Messung in 1,5 m³-Lagersilos, Saison 2003)

Außerdem wurde festgestellt, dass infolge von Verdichtungsprozessen und möglicherweise auch infolge der Verpilzung der Strömungswiderstand während der Lagerung zunimmt, und zwar bei Feinhackschnitzeln HS 16 um mindestens 400 % und bei Grobhackstücken HS 155 um höchstens 20 % nach 8 Monaten ungestörter Lagerung.

Zur Ermittlung des Einflusses der Verteilungsfunktion der Hacklänge auf den Strömungswiderstand wurden in einem Sonderversuch Hackschnitzel aus Pappel (Japan 105) mittels des Scheibenrad-Anbauhackers (Typ „Farmi“, **Bild 3-2**) durch unterschiedliche Maschineneinstellungen in zwei verschiedenen Hacklängen erzeugt. Dabei wurden unfraktionierte Mittel- und Feinhackschnitzel (19,5 mm und 9,3 mm) hergestellt. Von einem Teil der Proben wurden durch Siebklassierung zusätzlich drei weitere Proben unterschiedlicher Hacklänge erzeugt, und zwar fraktionierte Mittelhackschnitzel (23,7 mm) und Feinhackschnitzel (13,6 mm und 8,5 mm). Bei diesen Größenangaben handelt es sich nicht um den hier überwiegend verwendeten Medianwert der wahren, also durch manuelle Längenmessung ermittelten Länge HS x_{50} , sondern um den der Sieblochweite. Die Fraktionierung der Proben, d.h. die Eliminierung von Über- und Untergrößen, diente zur Herstellung von annähernd homogenen Hackschnitzellängen-Verteilungen.

Mit den auf diese Weise hergestellten fünf Proben wurde ähnlich wie oben vergleichende Untersuchungen zum Einfluss der Hackschnitzzellänge auf das Durchströmungsverhalten durchgeführt. Für diese Sondermessungen wurden allerdings kleinere Behälter (Durchmesser 0,19 m; Schütthöhe 1,0 m) verwendet. Die Röhren wurden mit Luft bei variablen Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,01 m/s bis 1,2 m/s durchströmt. Der Druckverlust wurde wie üblich als Diffe-

renz aus dem Staudruck unmittelbar an der Eintrittsstelle der Strömung in die Schüttung und dem statischen Außendruck, dividiert durch die Schütthöhe, errechnet.

Tabelle 4-25: Eigenschaften der Hackschnitzel und Bedingungen der Sondermessung

	Pappel unfraktioniert		Pappel fraktioniert		
	Mittel-HS	Fein-HS	Mittel-HS	Fein-HS	Fein-HS
Mittlere Länge (Siebmaß) (mm)	19,5	9,3	23,7	13,6	8,5
Schütthöhe (m)	1,1	1,25	1,05	1,18	1,25
Frischmasse FM (kg)	58,05	68,4	56,09	58,37	55,31
Volumen FM (m ³)	0,34	0,39	0,33	0,37	0,39
Schüttdichte FM (kg/m ³)	241	248	205	226	241
Wassergehalt (%)	51,5	53,3	49,1	49,0	52,3
Luftrate (10 ⁻⁶ m ³ /(s kg))	115	51,5	650	700	210
Luftgeschwindigkeit in Schüttg. (m/s)	0,01...0,02	0,005...0,010	0,07...0,10	0,09...0,10	0,02...0,03

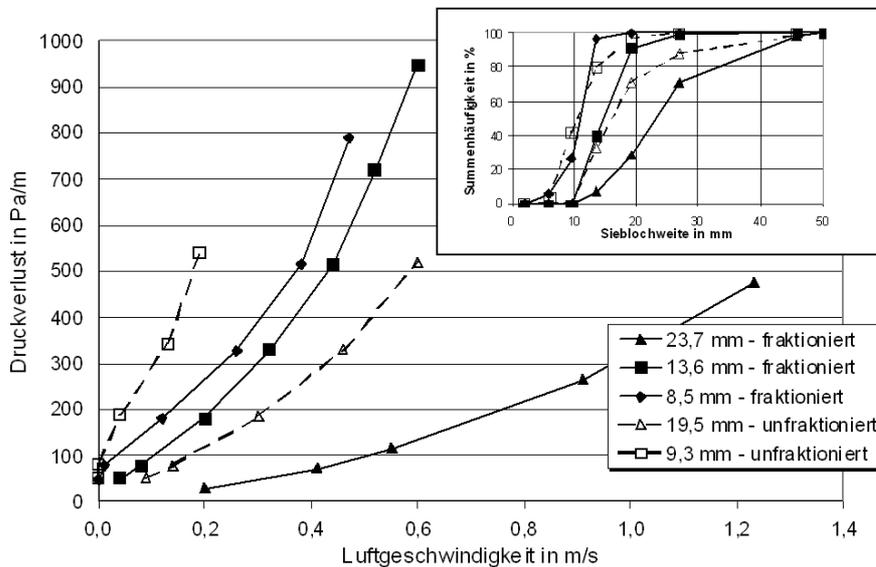


Bild 4-67: Strömungswiderstand von Pappel-hackschnitzeln in Abhängigkeit von Median und Verteilung der Länge (Siebmaße) (Messung in Ø 0,19 m-Röhre)

Wie zu erwarten, weist der Strömungswiderstand der unfraktionierten Hackschnitzel, ausgedrückt als Druckverlust pro Meter Schütthöhe, einen ähnlichen Verlauf wie in den 1,5 m³-Silos auf (Bilder 4-66 und 4-67). Auch die Größenordnung ist ähnlich, wenn davon ausgegangen wird, dass der Sieblochweiten-Median etwa halb so groß wie der wahre Längen-Median ist (vgl. Tab. 3-2), und demzufolge die hier verwendeten Mittelhackschnitzel (19,5 mm) in sehr grober Näherung den in den Silos verwendeten Hackschnitzeln HS 56 (26 mm) und die Feinhackschnitzel (9,3 mm) den HS 16 (10 mm) entsprechen. Eine Vergleichmäßigung der Hackschnitzellängen durch Fraktionierung bewirkt eine deutliche Verringerung des Strömungswiderstandes.

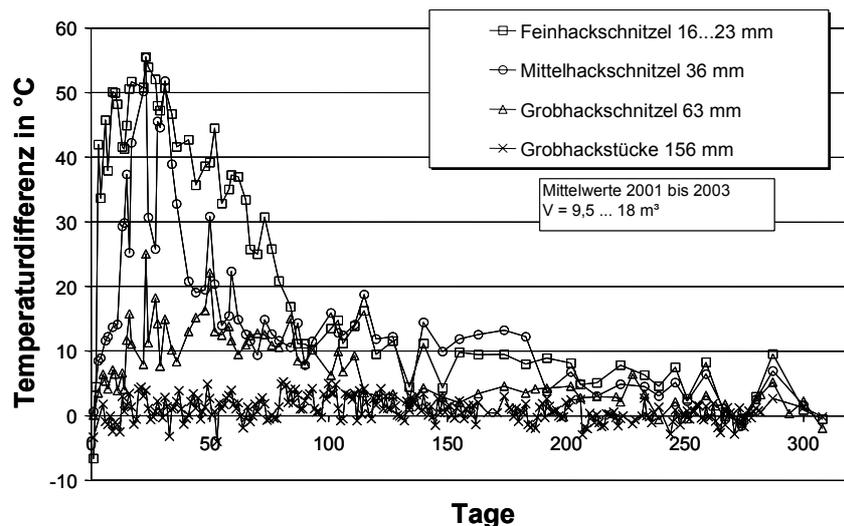


Bild 5-3: Gemittelter Verlauf der Differenz zwischen Haufen- und Außentemperatur bei der Lagerung von Pappelhackgut für unterschiedliche Hackgutfraktionen

Die über längere Zeiträume (> 230 Tage) gemessene mittlere Haufentemperatur fällt mit zunehmender Hackschnitzzellänge von über 35 °C (HS 16) auf etwa 12 °C (HS 156) ab und die maximale Temperatur von über 60 °C auf ca. 25 °C. Wobei die mittleren Temperaturen der nicht regengeschützten Schüttungen in der Regel 5 bis 10 °C darunter liegen. Mittel- und Maximaltemperatur weisen überwiegend eine gute Korrelation auf, was u.U. für Prozesskontrolle und -prognose genutzt werden kann. Bei der Lagerung von Grobhackgut mit einer (realen) Länge von > 60 mm bleiben unter den üblichen Bedingungen (Einlagerung im Winter; Jahresmitteltemperatur ca. 10 °C) die Mittel- und die Maximaltemperatur in der Schüttung unter 20 °C bzw. 40 °C (**Bilder 5-4 und 5-5**).

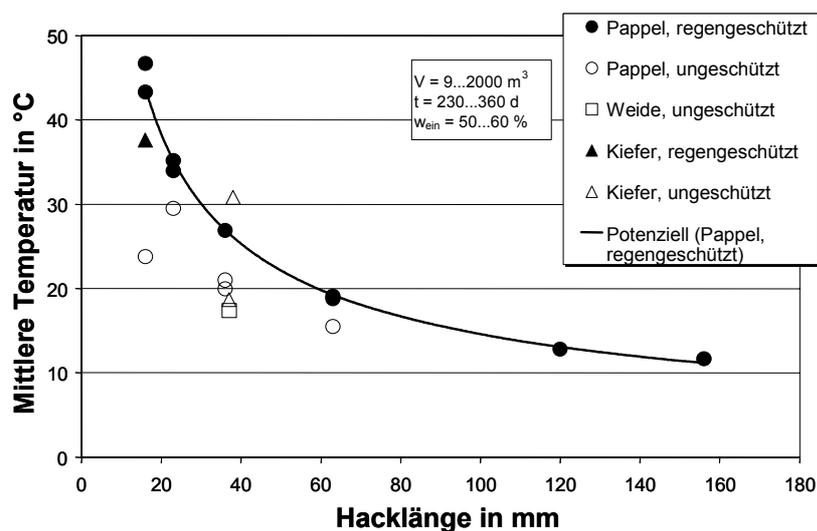


Bild 5-4: Mittlere Temperatur im Lagerhaufen in Abhängigkeit von der Hackschnitzzellänge

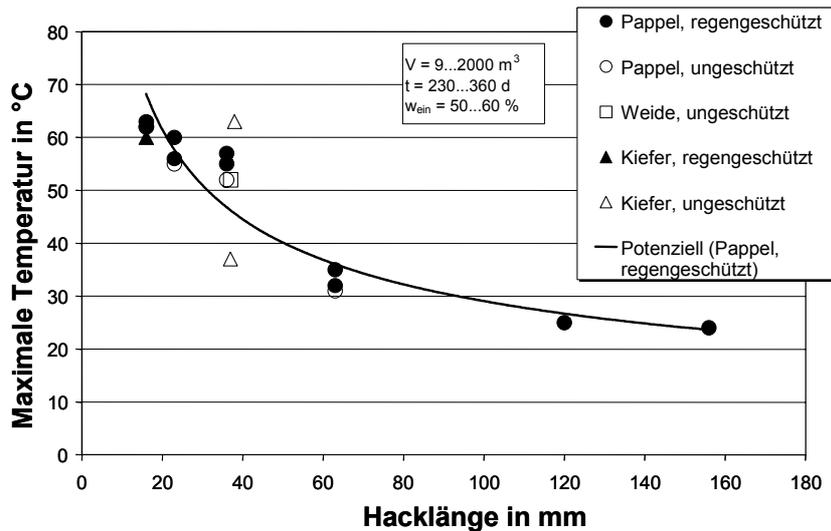


Bild 5-5: Maximaltemperatur im Lagerhaufen in Abhängigkeit von der Hackschnitzellänge

Innerhalb der Schüttung bildet sich insbesondere bei Feinhackschnitzeln ein ausgeprägter Temperaturgradient über der Höhe aus. Die höchsten Temperaturen treten meist in den mittleren Schichten auf und können um mehr als 30 K über denen der Deckschicht liegen (**Bilder 4-9, 4-11 und 4-15**).

Wie Messungen mit Einstichthermometern und mit einer Thermografie-Kamera belegen, können die Temperaturen in großvolumigen Schüttungen in gleicher Höhe bzw. Tiefe örtlich um mehr als 25 K differieren (**Bilder 4-16 bis 4-19**). Dies ist offenbar auf die Ausbildung von so genannten Schloten zurückzuführen, also vertikalen Zonen, in denen eine Wärmekonvektion erfolgt.

5.2 Trocknungsverlauf

Die Trocknung von Holzhackschnitzeln ist im wesentlichen von Anfangswassergehalt, Temperaturentwicklung im Haufen und Hackschnitzelgröße abhängig. Mit zunehmender Größe der Hackschnitzel verbessern sich einerseits die Strömungsbedingungen und damit der Wasserentzug, andererseits verringert sich die Haufentemperatur und verlängert sich die Trocknungsdauer des einzelnen Holzstückes. Daraus folgt, dass die Hackschnitzelgröße ein diesbezügliches Optimum aufweisen muss. Dieses Optimum liegt offenbar außerhalb des untersuchten Bereichs der Hackformate. Selbst große Hackstücke von ca. 150 mm Länge trocknen bei Außentemperatur etwa innerhalb eines Jahres auf die Ausgleichfeuchte ab, da die für die Trocknung maßgebende kleinste Dimension, der Durchmesser des Stamm- bzw. Astabschnitts, in der Regel unter $\varnothing 80 \text{ mm}$ liegt. Bei Umtriebszeiten von bis zu 5 Jahren überschreiten Pappeln und Weiden nur selten diesen Durchmesser. Wassergehalte von $< 20 \%$ werden bei einzelnen, regengeschützt lagernden $\varnothing 80 \text{ mm}$ -Abschnitten bereits nach einem halben Jahr (März bis September) erreicht (**Bilder 4-30 bis 4-32 und 5-6**). Damit trocknen Pappelastabschnitte offenbar schneller als die Faustregel besagt, die von 20 mm Holzdicke pro Jahr bis zum Erreichen des lufttrockenen Zustandes ausgeht (Eichler, 1987).

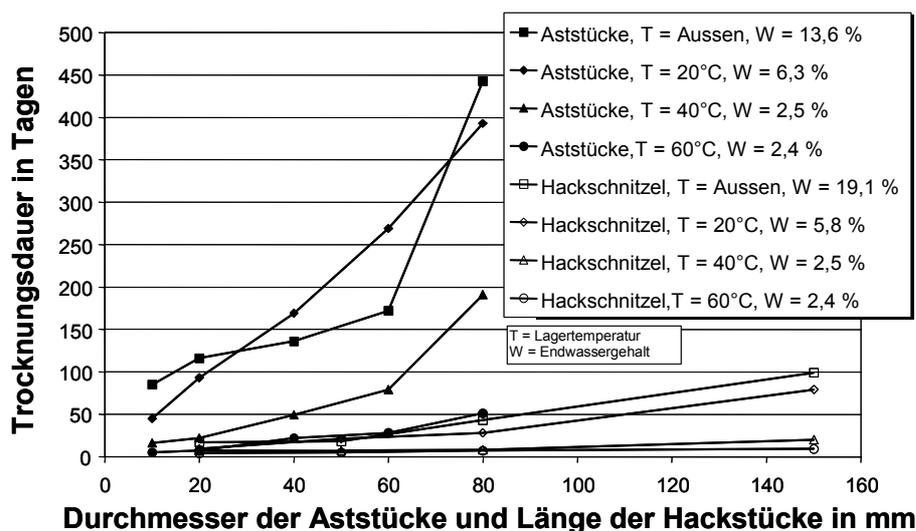


Bild 5-6:
Trocknungsdauer bis zur Ausgleichsfeuchte von vereinzelt lagernden Pappel-Hackschnitzeln und Astabschnitten bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen in Abhängigkeit von Hackschnitzellänge und Astdurchmesser

Auf Grund des hohen Strömungswiderstandes der Schüttung (**Bild 4-66**) sowie auf Grund der hohen Temperatur (**Bild 5-4**) und der dadurch verursachten Kondensation unter der Haufenoberfläche trocknen Feinhackschnitzel innerhalb eines Jahres kaum unter 30 % ab. Selbst Mittelhackschnitzel (31...50 mm) unterschreiten nur selten diesen Wert. Erst ab Hackschnitzellängen über 60 mm werden in der Regel Wassergehalte unter 30 % erreicht, und ab etwa 100 mm bis zu ganzen Bäumen ($\varnothing < 80$ mm) überwiegend Werte unter 25 % (**Bild 5-7**).

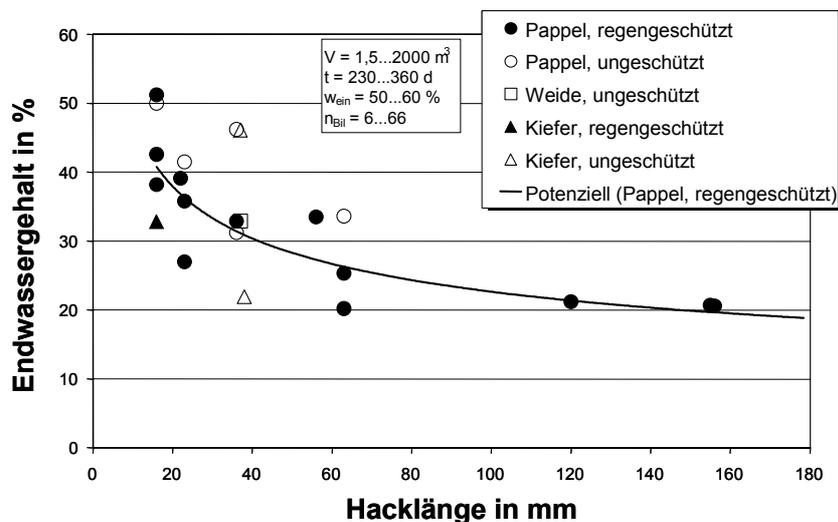


Bild 5-7:
Wassergehalt des Hackgutes nach der Lagerung in Haufen in Abhängigkeit von der Hackschnitzellänge

Niederschläge bewirken eine Erhöhung des Wassergehaltes, die von Form und Größe der Hackschnitzel und des Haufens abhängig ist sowie von der Temperatur im Haufen. In der Hochtemperaturphase wird eindringendes Niederschlagswasser schneller verdunstet als in der kühlen Phase. Bei groben Hackschnitzeln und unzerkleinerten Ästen und Bäumen erschwert das kleinere Oberflächen-Volumen-Verhältnis der Holzstücke und die z.T. anhaftende Rinde das Eindringen des Wassers und begünstigt infolge der besseren Durchlüftung dessen Verdunstung. Der Vergleichsversuch mit Fein- und Grobhackschnitzeln in 18 m³-Dreiecksmieten mit und ohne Regenschutz erbrachte deutliche Vorteile für die Abdeckung sowohl bei Feinhackschnitzeln HS 23 (w = 27 % mit und w = 42 % ohne Regenschutz) als auch bei Grobhackschnitzeln HS 63 (w = 20 % mit und w = 34 % ohne Regenschutz), allerdings hat

hier die Abdeckplane, die im Abstand von ca. 1 m über den Haufen gespannt war, möglicherweise wie ein Solarlufttrockner gewirkt und in den Sommermonaten den Trocknungsprozess künstlich beschleunigt (**Bilder 3-21** und **4-26** sowie **Tabelle 5-3**). Die Ergebnisse der Lagerversuche in den ca. 10 m³-Boxen sind diesbezüglich zweifelsfrei. Demnach weisen Feinhackschnitzel HS 16 bzw. HS 23 nach einem Jahr Lagerung ohne Regendach einen Wassergehalt von 50 % auf, während er mit Regendach im Bereich von 38 bis 43 % liegt. Bei Mittelhackschnitzeln HS 46 betragen die entsprechenden Werte 46 % und 33 %. Unter den genannten Bedingungen bewirkt also ein Regenschutz eine Verringerung des Wassergehaltes des Hackgutes (**Tabelle 5-1**).

Sowohl bei Fein- als auch bei Grobhackschnitzeln und ganzen Bäumen ist die Trocknung nach 100 bis 150 Tagen im wesentlichen abgeschlossen, also mit dem Ende der Hochtemperaturphase in den Schüttungen (s. Kap. 5.1). Der weitere Verlauf des Wassergehaltes wird insbesondere vom Niederschlag und möglicherweise auch von der Luftfeuchtigkeit bestimmt, wobei das Niveau von der Hackschnitzelgröße abhängt (**Bild 5-8**).

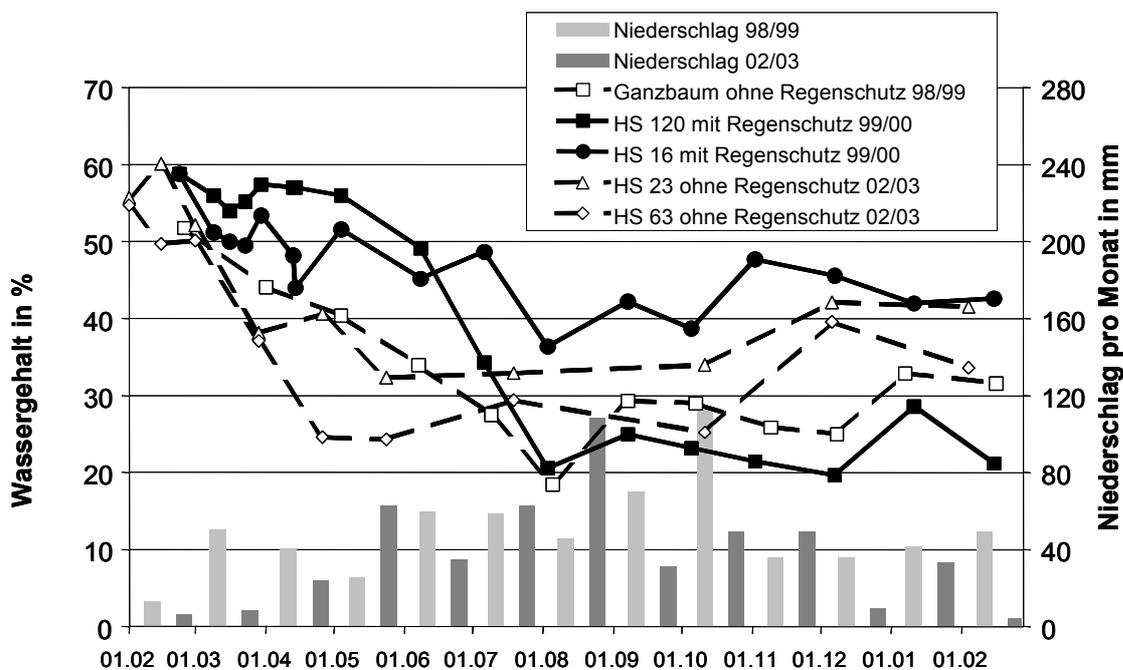


Bild 5-8: Typische Trocknungsverläufe in ca. 10 m³-Schüttungen aus unterschiedlich zerkleinertem Pappelholz mit und ohne Regenschutz

Innerhalb der Schüttung bilden sich in Abhängigkeit von der Hackschnitzellänge typische Feuchteprofile aus. Während bei groben Hackschnitzeln der Wassergehalt über der Höhe relativ gleichmäßig verteilt ist und ein geringes Maximum im unteren Bereich aufweist, nimmt mit kleiner werdenden Hackschnitzeln der Wert des Maximums zu und wandert nach oben. Gleichzeitig bildet sich am Boden ein zweites Feuchtemaximum aus (**Bilder 4-24** und **4-25**). Bei Feinhackschnitzeln sind diese beiden Feuchtemaxima besonders ausgeprägt und erreichen Werte, die deutlich über dem Einlagerungswassergehalt liegen. Diese extrem feuchten Schichten, die durch Kondensation verursacht werden, sind zwar nur 20 bis 50 cm dick, doch beeinflussen sie den mittleren Wassergehalt einer 2 bis 3 m hohen Schüttung nicht unerheblich (**Bild 5-9**).

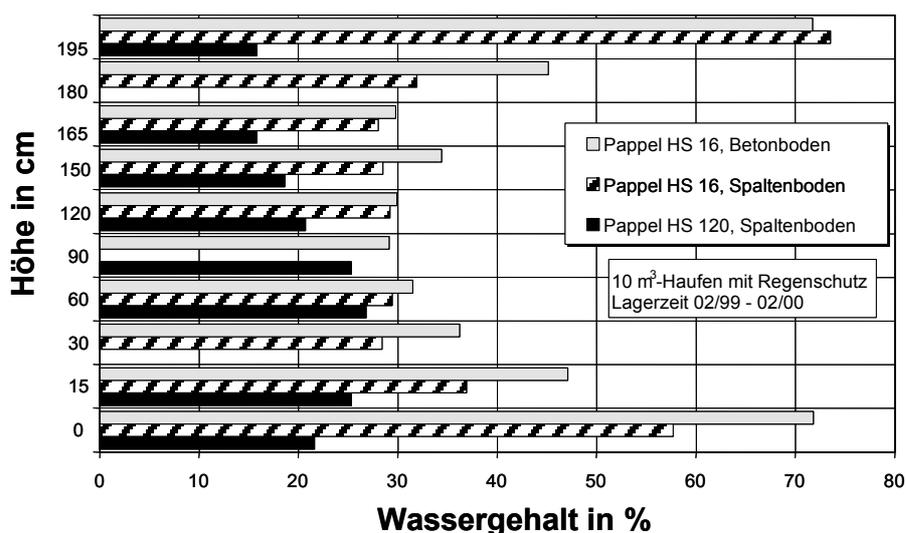


Bild 5-9: Feuchteprofil in 10 m³-Schüttungen aus Pappelhackgut nach einjähriger Lagerung

Tabelle 5-1: Mittlerer Wassergehalt von Holzhackgut nach einjähriger Lagerung unter unterschiedlichen Bedingungen ($V > 9 \text{ m}^3$; $n = 6 \dots 66$)

Holzart	Hacklänge mm	Lager- volumen m ³	Mittlerer Wassergehalt			
			ohne Regenschutz		mit Regenschutz	
-	mm	m ³	ohne Sp-Boden ¹⁾ %	mit Sp-Boden ¹⁾ %	ohne Sp-Boden ¹⁾ %	mit Sp-Boden ¹⁾ %
Pappel	16	9,3...10	50,0	-	42,6	38,2
	23	10	-	-	-	35,8
	23	18	41,5	-	27,0	-
	36	9,3...10	46,2	-	32,9	-
	36	70	-	31,2	-	-
	63	10	-	-	25,3	-
	63	18	33,6	-	20,2	-
	120	10	21,2	-	-	-
Weide	156	10	-	-	20,6	-
	∞ ²⁾	23	31,6	-	-	-
Kiefer	37	9,3	32,9	-	-	-
	∞ ²⁾	11,5	25,5	-	-	-
Kiefer	16	10	-	-	-	-
	37	9,3	46,1	-	-	-
	38	2000 ³⁾	48,3	-	-	-

1) Spaltenboden, luftdurchlässig

2) Ganzbäume, liegend im Stapel

3) Kürzere Lagerdauer, 169 Tage

Ein luftdurchlässiger Spaltenboden oder Luftkanal kann zumindest im unteren Bereich zu verbesserten Trocknungsbedingungen führen, der Effekt auf den Wassergehalt der Gesamtschüttung scheint sich jedoch in Grenzen zu halten (**Bilder 4-28** und **4-54** sowie **4-60** und **4-61**). Bei 2 m hohen Schüttungen aus Feinhackschnitzeln bewirkt ein hölzerner Spaltenboden bei Feinhackschnitzeln HS 16 eine Verringerung des mittleren Wassergehaltes nach einjähriger Lagerung von 43 % auf lediglich 38 % (**Tabelle 5-1**).

Dessen ungeachtet, könnte ein mit geringem Überdruck beaufschlagter Luftkanal bzw. -boden einen erheblichen Trocknungseffekt bewirken, insbesondere während der Hochtemperaturphase und wenn die Lüftung (Kühlung) temperatur- und luftfeuchteabhängig

gesteuert wird. Allerdings würde dies zusätzliche technische und finanzielle Aufwendungen erfordern.

5.3 Schimmelpilzentwicklung und Sporenemission

Schimmelpilze gelten als die Hauptverursacher für Trockenmasseverluste (s. Kap. 2.4). Außerdem werden die luftgetragenen Sporen einiger, vorwiegend thermophiler Arten als gesundheitsgefährdend eingestuft (s. Kap. 2.5). Ihre Entwicklung weist enge Wechselwirkungen zur Temperatur im Holzhackschnittelhaufen auf. Daher steigt die Anzahl der Pilze, gemessen in koloniebildenden Einheiten pro Gramm Frischmasse (KbE/g FM), analog der Temperatur in den ersten 10 bis 30 (100) Tagen auf den jeweiligen Maximalwert von etwa 10^3 bis 10^8 KbE/g FM, bleibt danach jedoch im Gegensatz zur Temperatur mehr oder weniger konstant und fällt meist nur geringfügig ab (s. Kap. 4.4) (**Bild 5-10**). Die Ursache dieser Diskrepanz liegt offenbar in der Eigenart der vermehrungsfähigen Pilzkeime, unter ungünstigen Wachstumsbedingungen nicht abzusterben, sondern über längere Zeiträume bei verminderter Aktivität in einer Art Ruhezustand zu verharren und zahlenmäßig sich kaum zu verändern (Dauersporen).

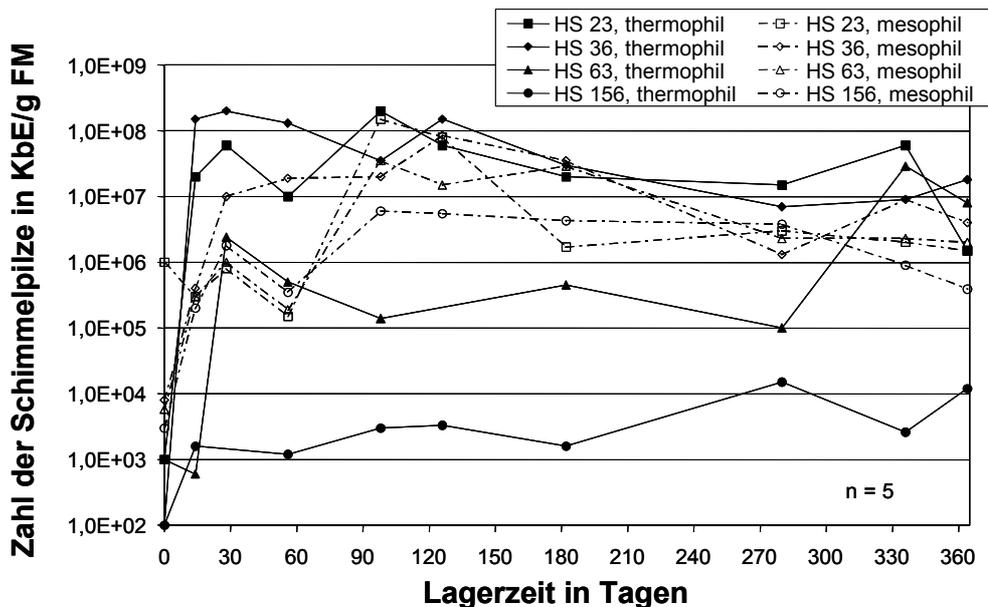


Bild 5-10: Entwicklung von Schimmelpilzen in 10 m³-Schüttungen aus Pappelhackgut unterschiedlicher Hacklänge

Die Ergebnisse der Pilzanalysen weisen eine relativ breite Streuung auf, die insbesondere der Stochastik des Pilzbefalls zuzuschreiben ist. Trotz dieser Streuung lassen sich aus den durchgeführten Langzeit-Untersuchungen einige verallgemeinerungsfähige Aussagen ableiten. Die Anzahl mesophiler Schimmelpilze ist im Bereich von 10 bis 50 °C nicht oder nur geringfügig von der mittleren Haufentemperatur abhängig. Im Gegensatz dazu nehmen thermophile Pilze mit steigender Temperatur signifikant zu und erreichen zwischen 20 und 35 °C eine ähnliche Größenordnung wie die mesophilen Pilze, nämlich 10^5 bis 10^9 KbE/g FM. Das heißt, bei der Lagerung von Holzhackgut sind die Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Bildung mesophiler Schimmelpilze begrenzt, das erhöhte Auftreten der thermophilen, also der überwiegend potenziell humanpathogenen Arten kann jedoch durch Vermeidung von

Temperaturen über im Mittel 20 °C bzw. maximal 35 °C verhindert werden, z.B. durch Erzeugung von Hackschnitzeln > 60 mm (**Bilder 5-11 und 5-12**).

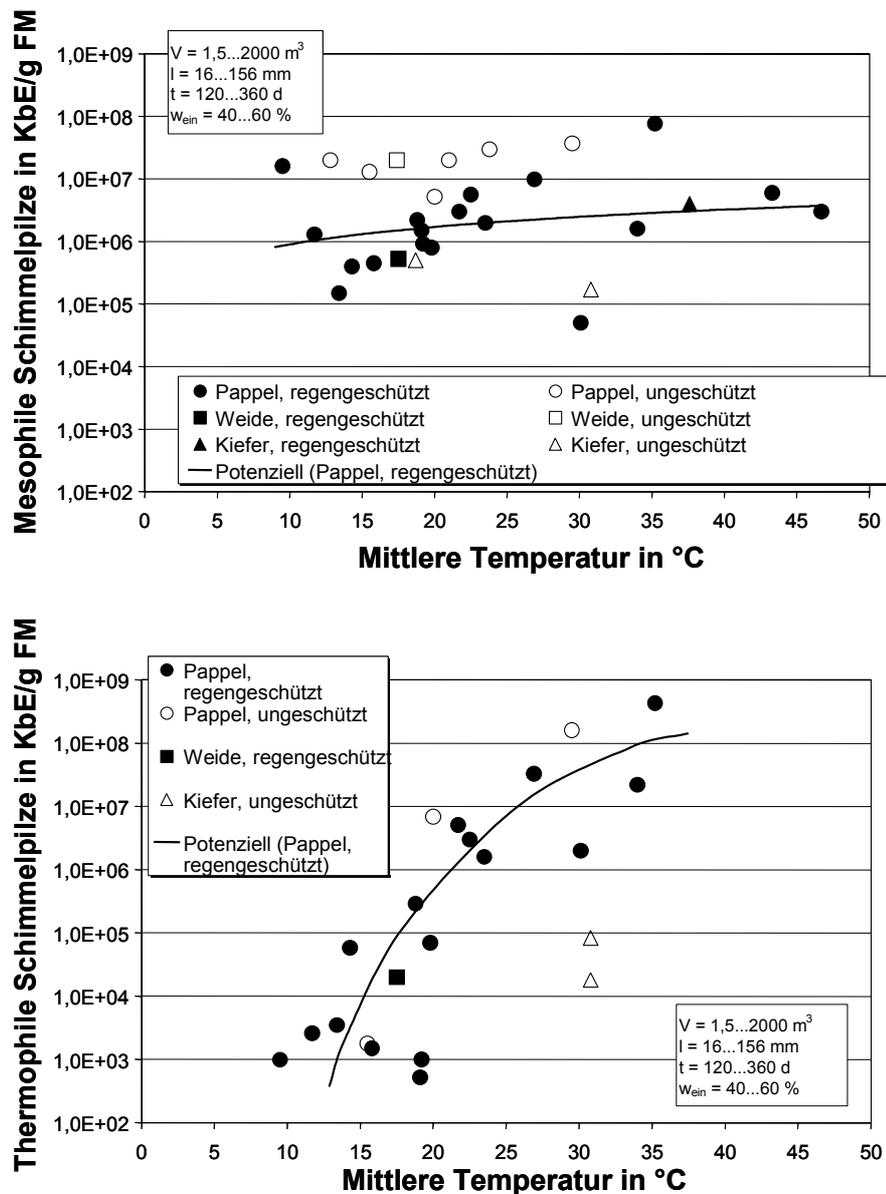


Bild 5-11: Mittlerer Schimmelpilzbesatz bei der Lagerung von Hackgut in Haufen in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur (Medianwerte über der Zeit)

Oben: Mesophile Pilze

Unten: Thermophile Pilze

Eine Addition der Anzahl beider Gruppen ist nicht zulässig, da bei der Analyse unter mesophilen Wachstumsbedingungen (20 °C) auch verschiedene thermophile Pilzarten mitgezählt werden, und umgekehrt werden unter thermophilen Bedingungen (37 °C) auch mesophile Arten mit erfasst. Auffällig ist, dass - mit Ausnahme von Kiefer - die nicht regengeschützten Schüttungen sowohl bei den mesophilen als überwiegend auch bei den thermophilen Arten eine etwa um eine Zehnerpotenz höhere Zahl an Schimmelpilzen aufweisen, deren Ursache zweifelsohne der höhere Wassergehalt dieser Schüttungen ist.

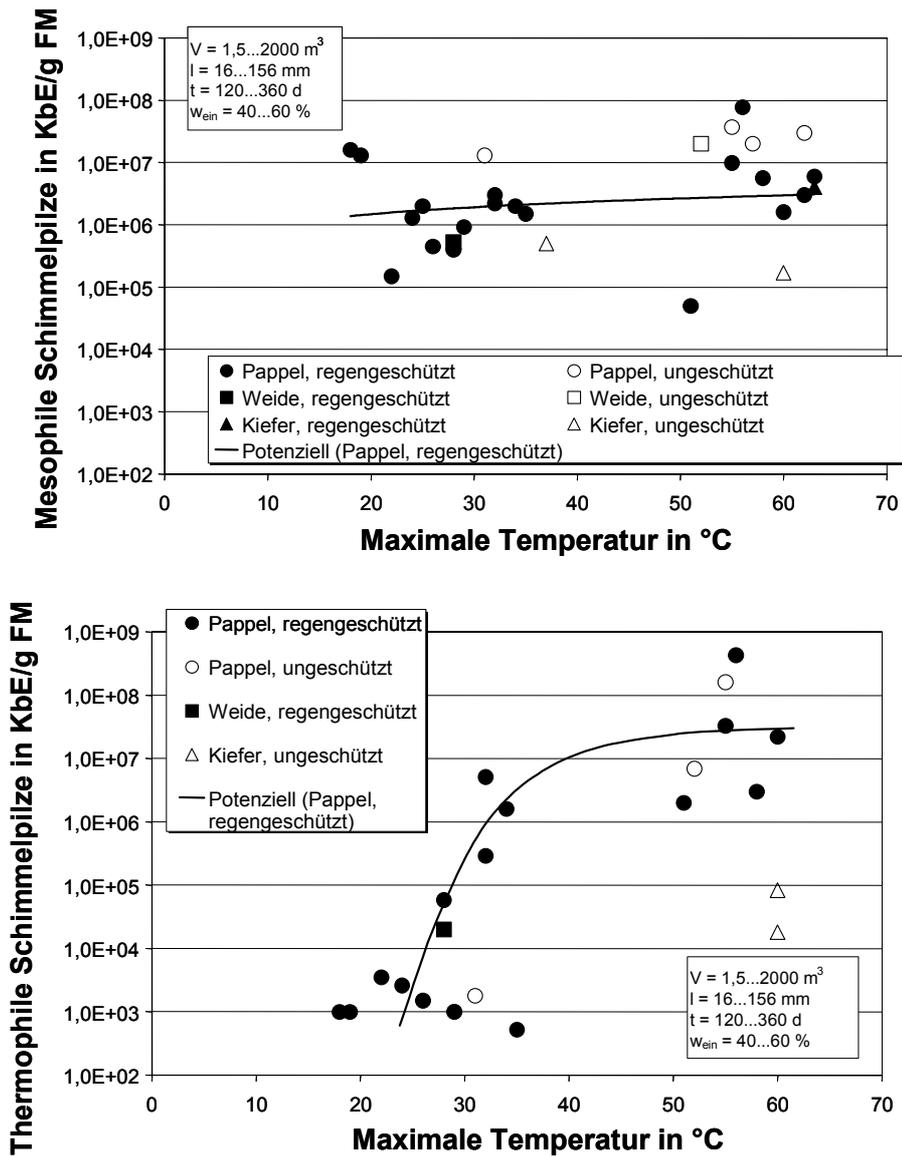


Bild 5-12: Mittlerer Schimmelpilzbesatz bei der Lagerung von Hackgut in Haufen in Abhängigkeit von der maximalen Temperatur (Medianwerte)

Oben: Mesophile Pilze

Unten: Thermophile Pilze

Die Größe der Hackschnitzel bzw. -stücke hat offenbar ebenfalls Einfluss auf den Schimmelpilzbesatz. Mit zunehmender Hacklänge nimmt die über längere Zeiträume gemessene Zahl der Schimmelpilze tendenziell ab, wobei die Abnahme bei thermophilen Pilzen weitaus deutlicher ausgeprägt ist, als bei mesophilen Pilzen. Dieser Einfluss ist überwiegend auf die Temperaturabhängigkeit der Pilze zurückzuführen, denn grobe Hackstücke (150 - 156 mm) weisen bei mittleren Haufentemperaturen von 12 °C einen Besatz thermophiler Schimmelpilze von etwa 10³ kbE/gFM auf, während Feinhackschnitzel (16 - 23 mm) bei 35 bis 45 °C etwa 10⁸ kbE/gFM erreichen (vgl. **Bild 5-5** und **Bild 5-11**). Diese Zusammenhänge finden sich in der funktionalen Darstellung der Abhängigkeit des Schimmelpilzbefalls von der Hacklänge wieder (**Bild 5-13**).

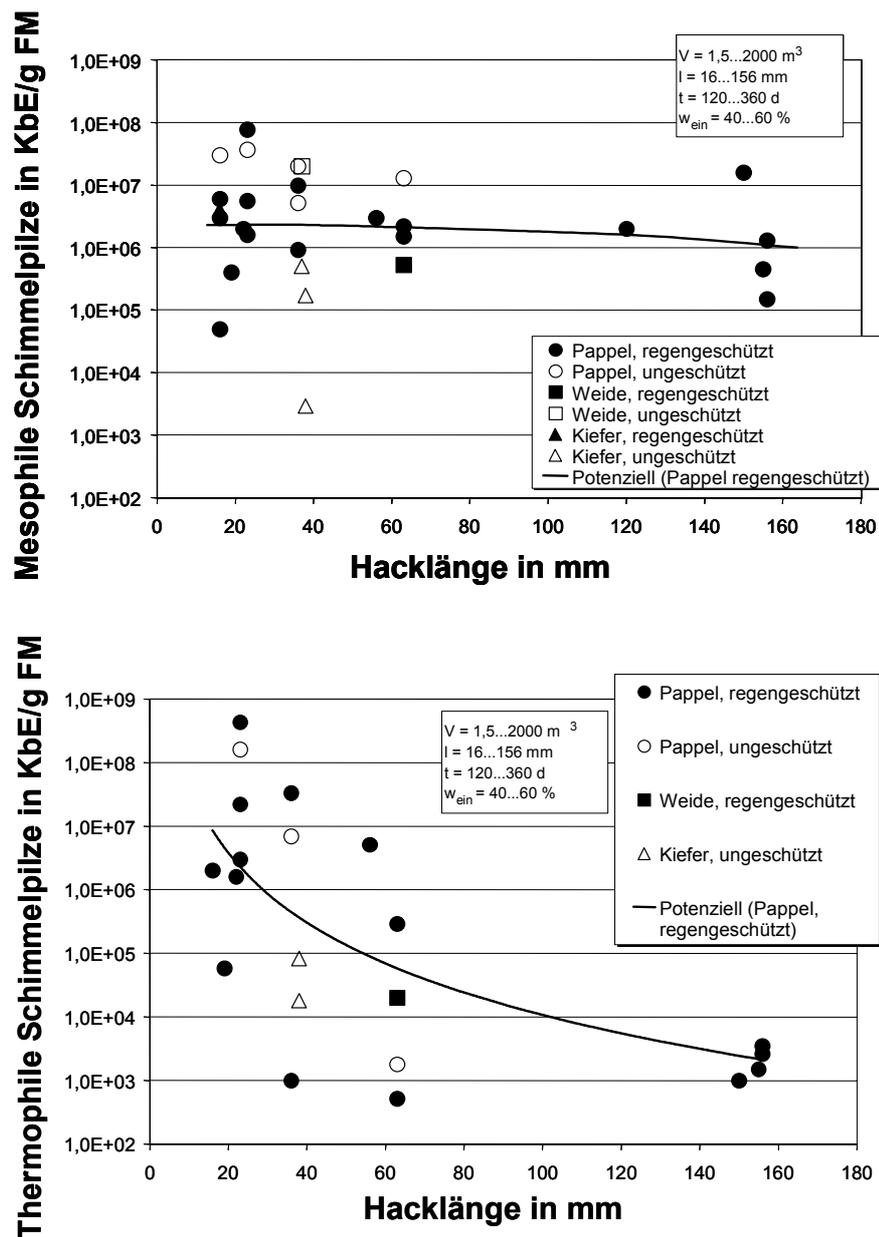


Bild 5-13: Mittlere Anzahl Schimmelpilze bei der Lagerung in Hackgut-Schüttungen in Abhängigkeit von der Hacklänge (Medianwert über der Zeit)

Oben: Mesophile Pilze

Unten: Thermophile Pilze

Dass die Temperatur der dominierenden Einflussparameter ist, geht auch aus den 4-wöchigen Laboruntersuchungen mit 5 l-Gefäßen hervor (**Bild 4-34**). Die Größe der Hackschnitzel hat zumindest bei Temperaturen um 30 °C vergleichsweise geringen Einfluss auf die Anzahl der Schimmelpilze. Grobhackstücke (HS 150 bis HS 156) weisen bei gleicher Haufentemperatur reichlich eine Zehnerpotenz weniger thermophile Pilze auf als Feinhackschnitzel (HS 16 bis HS 23). Die Ursachen sind unklar. Da Pilze sich überwiegend an der Oberfläche ansiedeln, müssten die geringeren Oberflächen-Masse-Verhältnisse der großen Holzpartikel zwangsläufig zu geringeren Pilzzahlen führen. Allerdings müsste sich dies auch bei den mesophilen Schimmelpilzen widerspiegeln, was jedoch offensichtlich nicht der Fall ist (**Tabelle 5-2**).

Tabelle 5-2: Anzahl der Schimmelpilze nach 4-wöchiger Lagerung unterschiedlicher Pappel-Hackgutfraktionen bei ausgewählten Temperaturen unter Laborbedingungen (Medianwert von n = 5...7) (Auszug aus **Tabelle 4-5** und **Bild 4-34**)

Hackformat	20 °C			30 °C		
	Mesophile Pilze	Thermoph. Pilze	Wassergehalt	Mesophile Pilze	Thermoph. Pilze	Wassergehalt
	KbE/g FM	KbE/g FM	%	KbE/g FM	KbE/g FM	%
HS 16 (2003)	$3,0 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^{6*}$	58	$1,6 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^7$	57
HS 22 (2003)	$2,1 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^3$	61	$1,6 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^7$	55
HS 23 (2002)	-	-	-	$3,0 \cdot 10^6$	$6,0 \cdot 10^7$	53
HS 36 (2002)	-	-	-	$7,0 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^7$	52
HS 56 (2003)	$5,0 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^4$	59	$1,5 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$	55
HS 63 (2002)	-	-	-	$1,3 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^5$	56
HS 150 (2003)	$1,8 \cdot 10^7$	$< 10^3$	48	$1,4 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^6$	22

* ungewöhnlich hoher Wert

Für die Beurteilung der Wirkung von Schimmelpilzen ist nicht nur die Anzahl, sondern auch die Spezies von Interesse. Von insgesamt 6 bis 7 in 1,5 m³-Silos bzw. 10 m³-Boxen analysierten thermophilen Pilzarten, wurden bei Feinhackschnitzeln (Pappel HS 23) 4 bzw. 6 und bei Grobhackstücken (HS 156, HS 155) 2 bzw. 4 potenziell humanpathogene, toxische und/oder allergene Arten festgestellt, die während der einjährigen Lagerung zeitweilig auftraten (**Tabellen 4-7** und **4-9**). In den 18 m³-Dreiecksmieten wurden von insgesamt 8 untersuchten Spezies 8 in Feinhackschnitzeln HS 23 und 6 bzw. 7 in Grobhackschnitzeln HS 63 gefunden (**Tabelle 4-11**). Der Pilz mit der höchsten humanpathogenen Potenz, *Aspergillus fumigatus*, trat während des gesamten Lagerzeitraums auf. Bei Fein- und Mittelhackschnitzeln (HS 16 bis HS 36) wurde er in 93 % und bei Grobhackschnitzeln und -stücken (HS 63 bis HS 156) in 76 % der insgesamt 756 analysierten Proben nachgewiesen (**Tabelle 4-18**). Sein Gefährdungspotenzial hält sich bei der Holzlagerung allerdings in Grenzen, da die besonders gesundheitsgefährdenden Gifte, die Mykotoxine (vgl. Kap. 4.4.5) weder von Mensch noch von Tier direkt aufgenommen werden, sondern lediglich durch Sporen verbreitet werden können. Außerdem betrug der Anteil von z.B. potenziell fumonisinhaltigen Proben mit Fusarienbefall nur 7 % bei Fein- und Mittelhackschnitzeln und 2 % bei Grobhackschnitzeln und -stücken.

Die Verbreitung der Sporen, also der luftgetragenen vermehrungsfähigen Keimzellen der Pilze, ist von zahlreichen Faktoren abhängig, insbesondere jedoch von Pilzbesatz und Luftgeschwindigkeit. Die überwiegend bei Windstille zu verschiedenen Zeitpunkten unmittelbar über den vier 10 m³-Pappelhackgut-Boxen gemessene Sporenkonzentration in der Luft zeigt, dass mit wachsender Anzahl der Schimmelpilze auf dem Holz die mittlere Anzahl der Sporen in der Luft progressiv zunimmt und bei $> 10^7$ KbE/g FM Werte von über 10^4 KbE/m³ erreichen kann (**Bild 5-14**).

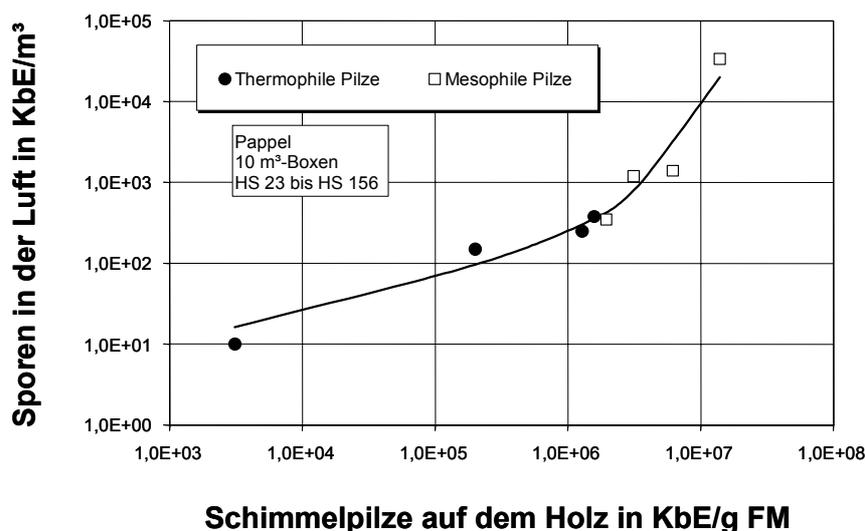


Bild 5-14: Zusammenhang zwischen der Anzahl der Schimmelpilze auf dem Pappelhackgut und der ca. 30 cm über 10 m³-Boxen gemessenen Sporenzahl in der Luft (Medianwerte über der Zeit)

Die bei ungestörten Hackgut-Schüttungen in unterschiedlichen Entfernungen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelte mittlere Sporenkonzentration in der Luft, liegt im Bereich von 10 bis 10⁴ KbE/m³. Damit werden die in der ortsüblichen Umgebungsluft gemessenen Werte von 5·10¹ bis 5·10² KbE/m³ für mesophile und von 0 KbE/m³ für thermophile Pilzsporen meist deutlich überschritten (**Bilder 4-43, 4-44 und 5-15**). Wie auf dem Holz dominiert auch in der Luft die als besonders gesundheitsgefährdend geltende thermophile Pilzspezies, *Aspergillus fumigatus*. Über Schüttungen aus Grobhackschnitzeln und -stücken HS 63 und HS 156 ist seine Sporenkonzentration in Abhängigkeit von der Lagerzeit etwa 0 bis 3 Zehnerpotenzen geringer als über Feinhackschnitzeln HS 23 (**Tabellen 4-20 und 4-21**).

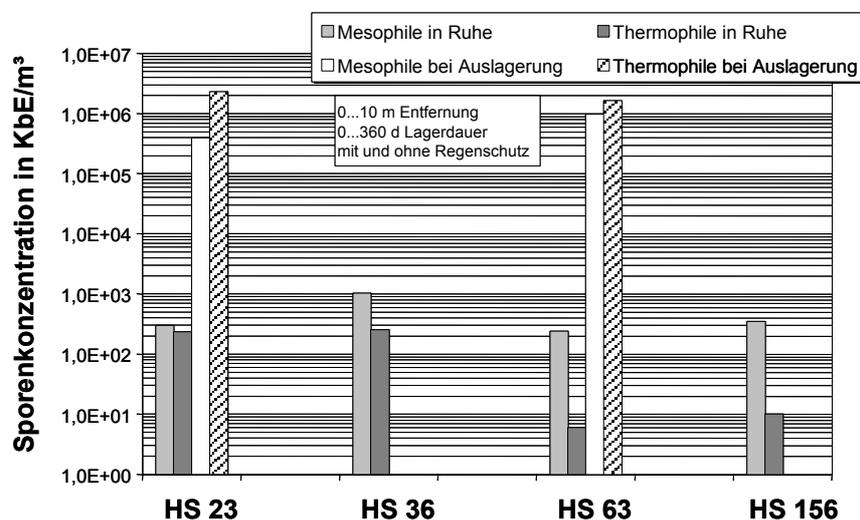


Bild 5-15: Mittlere Sporenkonzentration in der Luft bei einjähriger Lagerung von Pappelhackgut in 10 m³- und 18 m³-Schüttungen (Medianwerte über der Zeit, n = 3...7)

Wird die Haufenstruktur gestört, wie es z.B. bei der mechanischen Aus- und Umlagerung des Hackgutes erforderlich ist, kann die Sporenkonzentration in der Luft in Abhängigkeit von der Entfernung kurzzeitig auf Werte von 10⁵ bis 10⁸ KbE/m³ ansteigen (**Bild 4-44**). Damit wird beispielsweise der technische Kontrollwert (TKW) für biologische Abfallbehandlungsanlagen von 5·10⁴ KbE/m³ für mesophile Schimmelpilze überschritten (TRBA 211, 2001). Dieser Kontrollwert, der für Holzlager keine gesetzliche Verbindlichkeit hat, gilt für die Kontrolle von Schutzmaßnahmen für das Personal in Kabinen, Steuerständen u.ä. in o.g. Anlagen. Der Arbeitgeber ist zur Ermittlung und Einhaltung dieses Wertes verpflichtet.

5.4 Lagerverluste

Bei der Lagerung von Holzhackgut treten Verluste auf, deren Ursache überwiegend den Pilzen zugeschrieben wird. Wie die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigen, liegen die mittleren Trockenmasseverluste von unbelüfteten Schüttungen aus erntefrischem Hackgut zwischen 10 % und 30 % pro Jahr (**Bild 5-16**). Örtlich, insbesondere in den Randzonen, können sogar Höchstwerte von über 40 % p.a. auftreten.

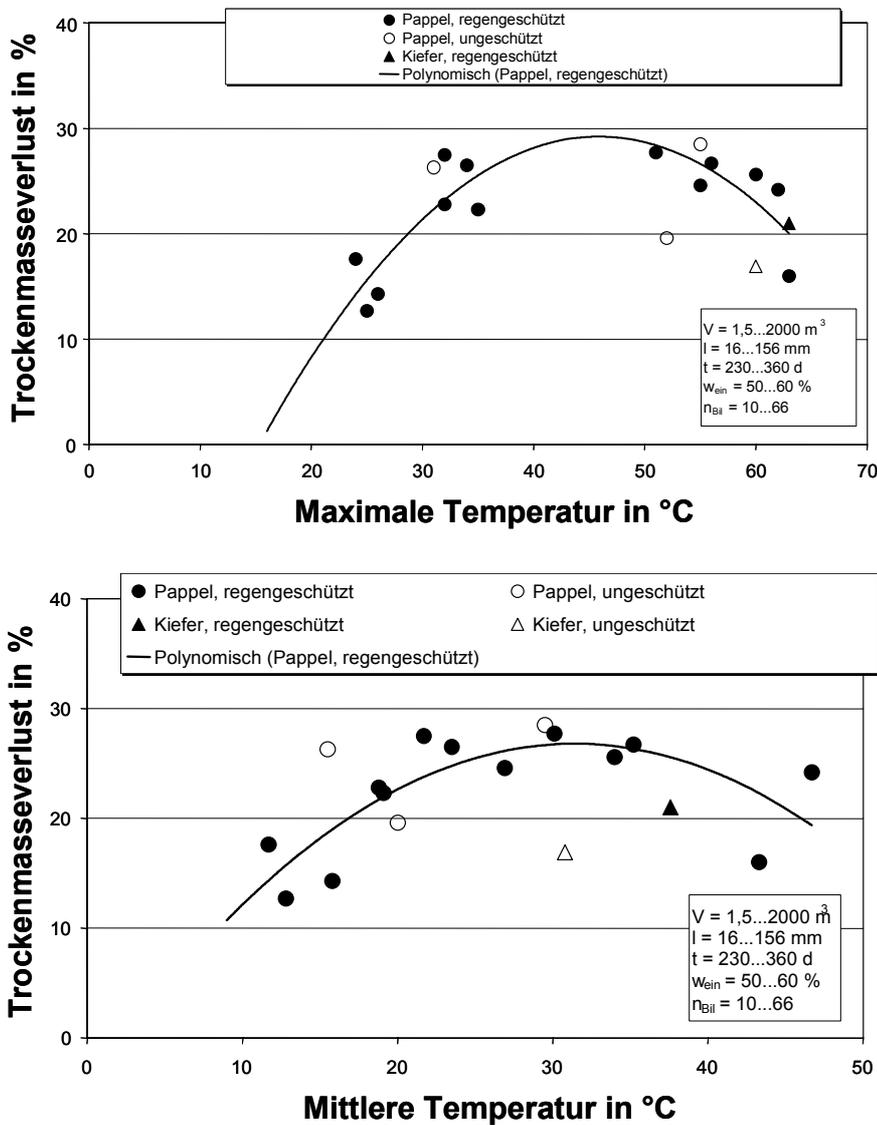


Bild 5-16: Mittlere Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Holzhackgut in Abhängigkeit von der mittleren Haufentemperatur

Oben: Maximaltemperatur

Unten: Mitteltemperatur

Unter der Annahme, dass der Trockenmasseverlust proportional der gebildeten Wärme ist ($\Delta m = \Delta Q / H_v$) und diese wiederum proportional der Temperatur in der Schüttung ($\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$), müssten der Trockenmasseverlust und die Differenz zwischen Haufen- und Umgebungstemperatur ebenfalls direkt verknüpft sein. Dies scheint jedoch nur für großporige Schüttungen, d.h. für Grobhackschnitzel mit geringem Strömungswiderstand zu gelten (vgl. **Bild 4-66**). In Feinhackschnitzelhaufen, in denen die Wärme weniger gut abgeführt wird, und sich

demzufolge hohe Temperaturen entwickeln (vgl. **Bild 5-1**), wirken offenbar andere Mechanismen. Denn hier verringern sich die Verluste mit steigender Temperatur (**Bild 5-17**). Die Ursache könnte die verminderte Aktivität von Schimmelpilzen aufgrund von Sauerstoffmangel und/oder aufgrund zu hoher Temperatur sein (Mittel > (25...30) °C; Maximum > (45...50) °C). Das sich Letzteres nicht am Rückgang der Anzahl der Schimmelpilze zeigt, ist möglicherweise in der Methodik der Pilzbestimmung begründet, mit der auch Dauersporen erfasst werden können. Diese Sporen entwickeln sich zur Überdauerung ungünstiger Umweltbedingungen (z.B. hohe Temperaturen) und können bei günstigen Bedingungen, wie sie auf der Nähragarplatte vorliegen wieder auskeimen (vgl. **Bilder 5-11 und 5-12** sowie **5-3 und 5-10**).

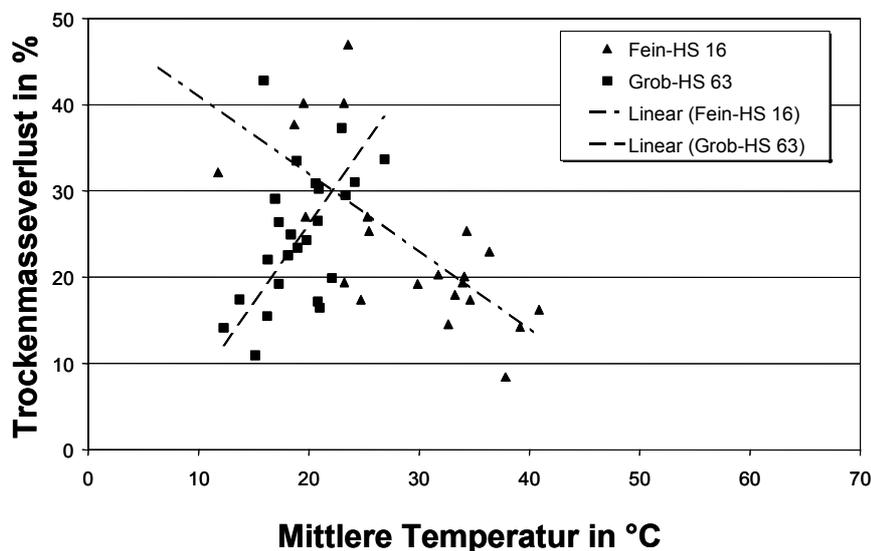
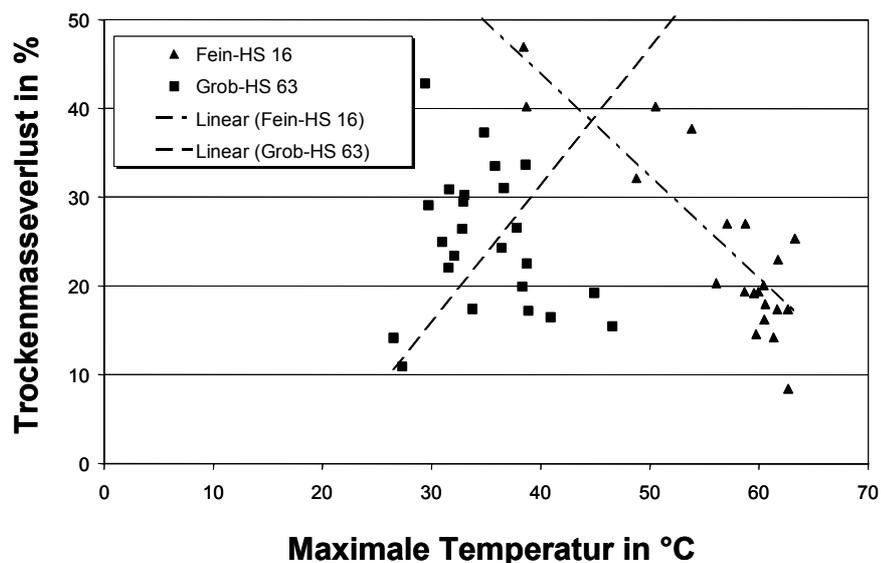
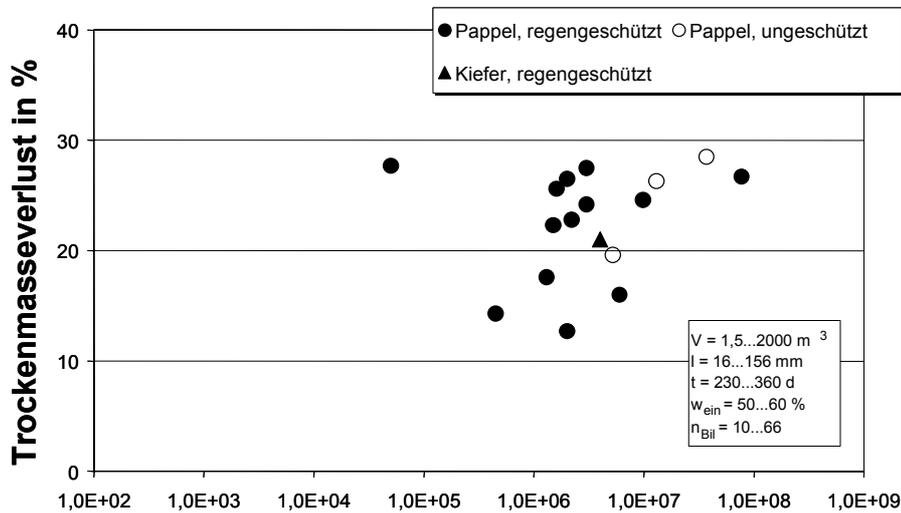


Bild 5-17: Örtliche Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Pappelhackschnitzeln in Abhängigkeit von der örtlichen Temperatur (Einzelwerte von Bilanzbeuteln)

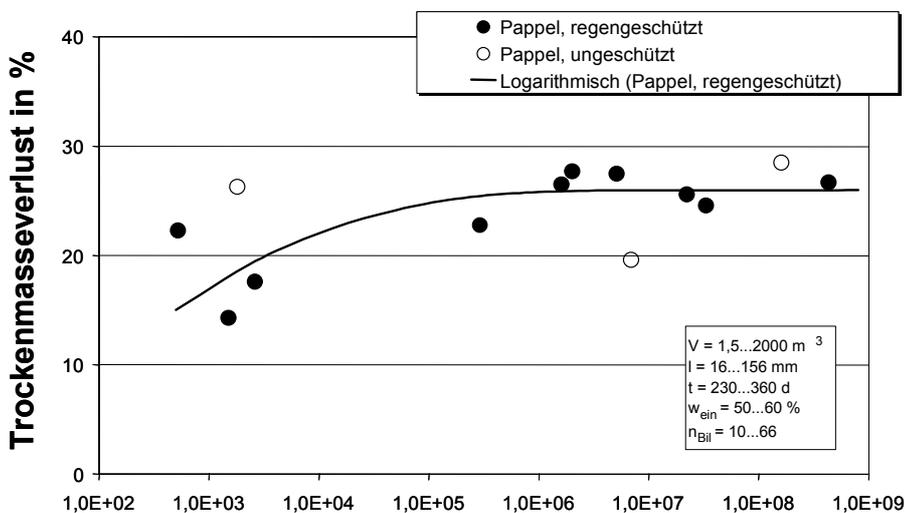
Oben: Maximale Temperatur

Unten: Mittlere Temperatur

Diese methodische Besonderheit könnte auch die Ursache für den scheinbar geringen Einfluss des Pilzbesatzes auf den Trockenmasseverlust sein. Bei mesophilen Schimmelpilzen ist keinerlei statistisch gesicherte Korrelation zum Masseverlust herleitbar, und bei thermophilen Pilzen bleibt der Trockenmasseverlust oberhalb von etwa 10^6 KbE/g FM, also über ca. 25 °C (**Bild 5-11**), weitgehend konstant, obwohl die Anzahl der Pilze weiter wächst (**Bild 5-18**).



Mesophile Schimmelpilze in KbE/g FM



Thermophile Schimmelpilze in KbE/g FM

Bild 5-18: Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Holzhackgut in Abhängigkeit vom mittleren Schimmelpilzbesatz während der Lagerung

Oben: Mesophile Pilze

Unten: Thermophile Pilze

Aufgrund der Abhängigkeit der Schimmelpilzentwicklung von der Wasseraktivität wird der Trockenmasseverlust auch vom Wassergehalt des Hackgutes beeinflusst. Hohe Wassergehalte führen in der Regel zu hohen Trockenmasseverlusten, was beim Vergleich der Feuchte- und Verlustprofile in Hackschnitzelhaufen deutlich wird (vgl. **Bilder 4-20, 4-48, 4-25 und 4-55**) (**Bild**

5-19). Bei den Mittelwerten der verschiedenen Schüttungen ist dieser Zusammenhang allerdings weniger deutlich ausgeprägt (**Bild 5-20**).

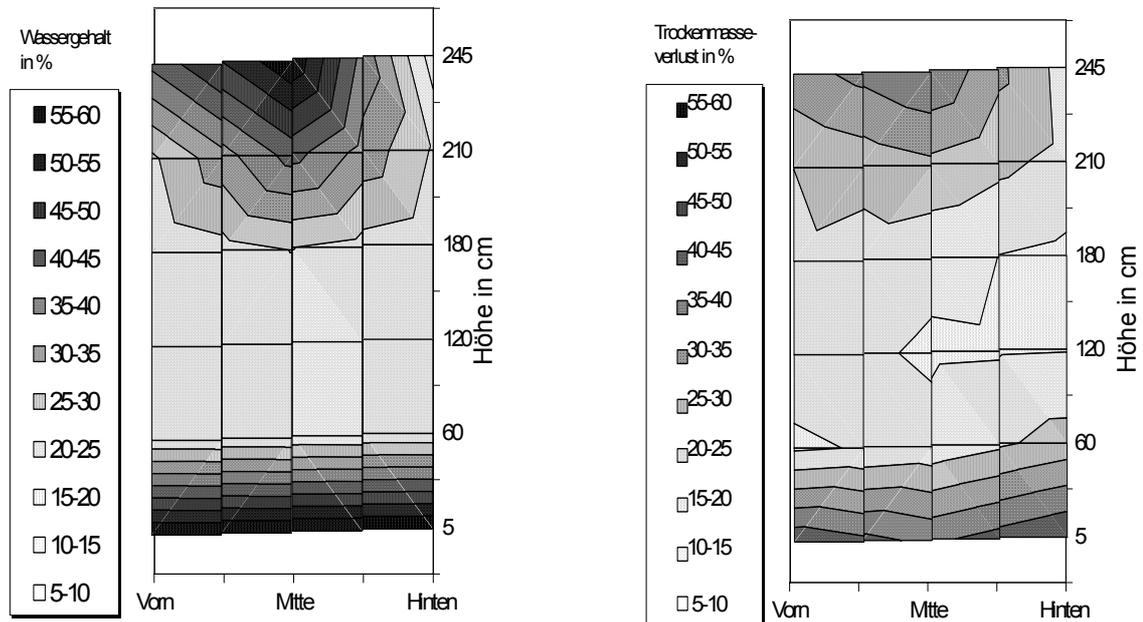


Bild 5-19: Typische Profile des Wassergehaltes und des Trockenmasseverlustes in 10 m³-Schüttungen aus Pappel-Mittelhackschnitzeln (HS 36) nach einjähriger Lagerung

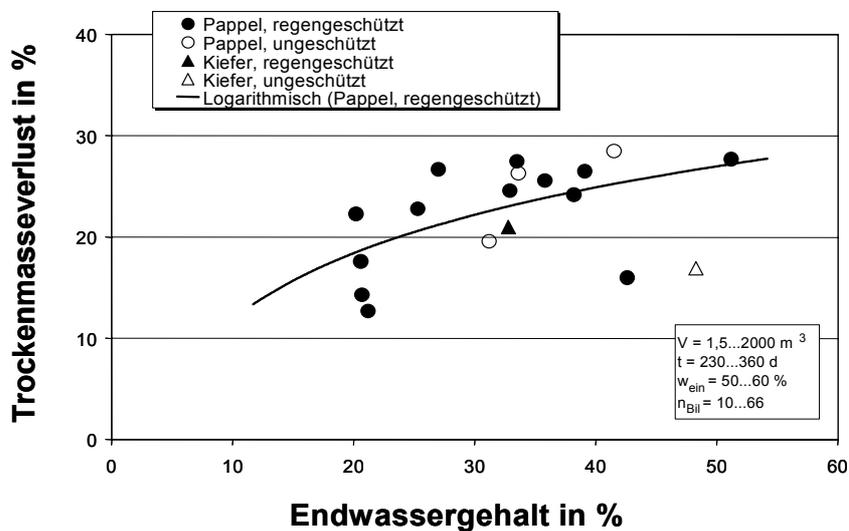


Bild 5-20: Mittlere Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Holzhackgut in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei der Auslagerung

Mit zunehmender Hacklänge verringert sich der Trockenmasseverlust und erreicht bei Grobhackstücken über 120 mm Werte zwischen 12 und 19 % p.a. Im Bereich von 16 bis 63 mm liegt er überwiegend darüber und wird mit Ausnahme der extrem feinen Hackschnitzel HS 16 nur geringfügig von der Länge beeinflusst. Bei den feinen Hackschnitzeln deutet sich ein Rückgang des Trockenmasseverlustes an, der in der o.g. Temperaturabhängigkeit bzw. im Sauerstoffmangel begründet sein könnte (**Bild 5-21**). Bei verschiedenen Messreihen in 5 l-Laborbehältern ist insbesondere bei Temperaturen von 20 und 25 °C eine ähnliche Tendenz festzustellen (**Tabelle 4-23**).

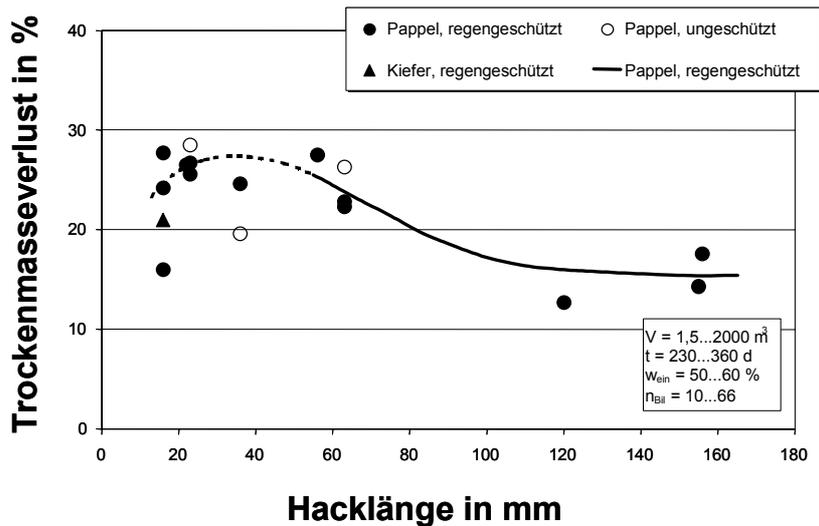


Bild 5-21: Mittlere Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Holzhackgut in Abhängigkeit von der Hackschnitzzellänge

Für die Praxis ist weniger der Trockenmasseverlust als vielmehr der Verlust an technisch nutzbarer Energie maßgebend. Sofern keine Brennwerttechnik eingesetzt wird, ergibt sich dieser aus dem Trockenmasse- und Wasserverlust sowie aus dem unteren auf Trockenmasse bezogenen Heizwert H_u (Gl. 3.4.5-2), der sich bei Langzeitlagerung jedoch kaum verändert (Kirschbaum, 1998). Bei Feinhackschnitzeln HS 16 ist er nahezu mit dem Trockenmasseverlust identisch und beträgt etwa 20 bis 30 % p.a., und bei groben Hackstücken > HS 120 liegt er aufgrund der geringen Trockenmasseverluste (**Bild 5-21**) und aufgrund des geringen Wassergehaltes (**Bild 5-7**) im Bereich von - 5 % bis + 5 % p.a. (**Bild 5-22**).

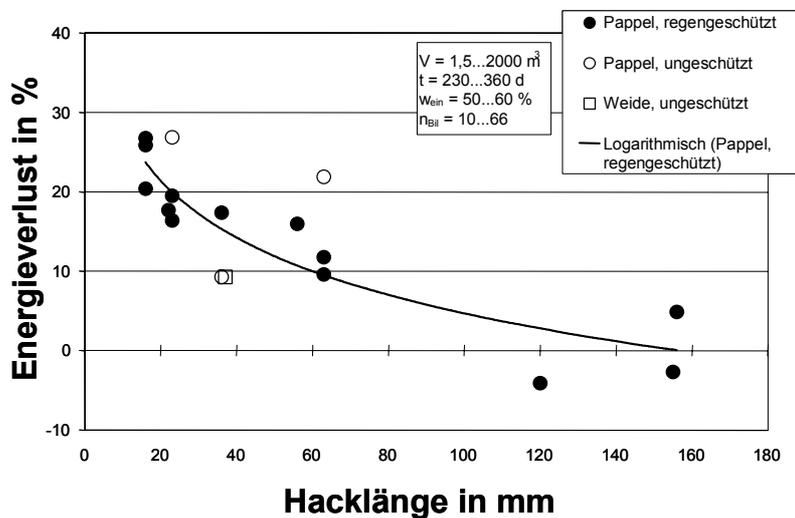


Bild 5-22: Energieverlust bei der Lagerung von Holzhackgut in Abhängigkeit von der Hackschnitzzellänge

Bei der Haufenlagerung von grobstückigem Pappelhackgut ab etwa 100 mm Hacklänge ist also der Verlust an nutzbarer Energie nahezu Null, während er bei Feinhackschnitzeln zwischen etwa 15 und 30 % liegt und damit eine wirtschaftlich relevante Größenordnung erreicht.

5.5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der zwischen 1998 und 2004 durchgeführten 33 Lagerversuche im halb- und großtechnischen Maßstab sind in **Tabelle 5-3** zusammengefasst. Demnach hat die Hacklänge dominierenden Einfluss auf die untersuchten Parameter. Wie die wenigen Versuche mit Weide und Kiefer zeigen, gibt es offenbar keine signifikanten Unterschiede zu Pappel, was statistisch jedoch nicht gesichert ist. Die Streuung der Messwerte ist insgesamt nicht unerheblich und wird auf die Stochastik des Schimmelpilzbefalls sowie auf unterschiedliche Lager- und Klimabedingungen und Ausgangsmaterialien zurückgeführt (**Bild 5-23**).

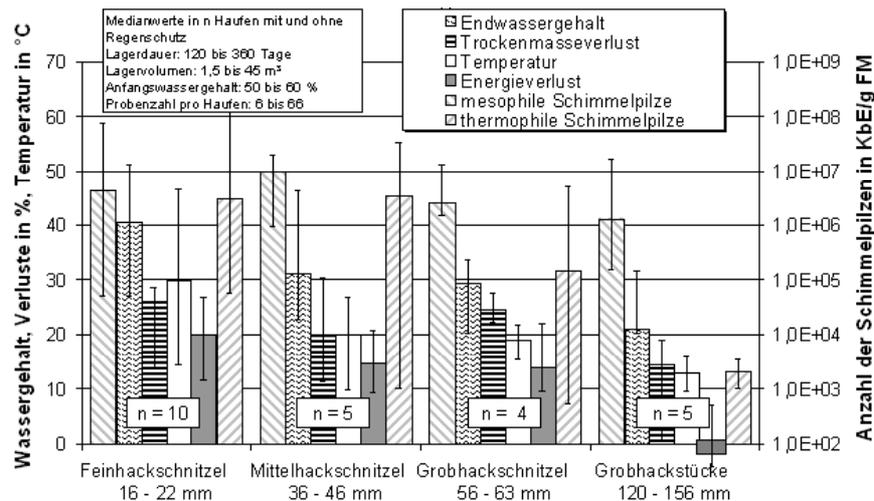


Bild 5-23: Haufentemperatur, Endwassergehalt, Schimmelpilzanzahl sowie Trockenmasse- und Energieverluste bei der Lagerung von Pappelhackgut unterschiedlicher Länge (Mittel- und Extremwerte aller Versuche im halb- und großtechnischen Maßstab)

Trotz der Streuung können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Die Trocknung von Holzhackgut in unbelüfteten Schüttungen ist in hohem Maße von der Hackschnitzelgröße abhängig. Mit zunehmender Hacklänge von 16 bis 156 mm verringert sich der End-Wassergehalt von Pappelhackgut bei einjähriger Lagerung von etwa 40 auf 20 %, bei Einlagerungswassergehalten zwischen 50 bis 60 %. Ein Regenschutzdach kann insbesondere bei Fein- und Mittelhackschnitzeln eine Verringerung des Wassergehaltes um etwa 10 Prozentpunkte bewirken. Auch ein Luftkanal verbessert die Trocknungsbedingungen.
- Die mittlere Temperatur einer Schüttung fällt mit zunehmender Hacklänge von etwa 45 °C (HS 16) auf 12 °C (HS 156) ab. Die Maximaltemperatur überschreitet im Mittel nicht 60 °C und örtlich nicht 65 °C.
- Die Anzahl der Pilze in einem Haufen erreicht bei Fein- und Mittelhackschnitzeln ähnlich wie die Temperatur bereits nach 1 bis 2 Wochen ihren Maximalwert von etwa 10^7 bis 10^8 KbE/g FM, bleibt dann aber im Gegensatz zur Temperatur nahezu konstant. Die während der Lagerung gemessene Anzahl mesophiler Pilze wird im Gegensatz zu thermophilen Pilzen nur geringfügig von der Hacklänge beeinflusst.
- Die Pilzsporen in der Luft nehmen in der Regel mit wachsender Anzahl der Pilze auf dem Holz progressiv zu. Mit 10^1 bis 10^3 KbE/m³ erreichen sie im allgemeinen keine humanhygienisch relevante Größenordnung. Lediglich beim Aus- und Umlagern oder

beim Fördern können bestimmte, für Bioabfallbehandlungsanlagen geltende Grenzwerte überschritten werden.

- Die Trockenmasseverluste bei der Lagerung in Haufen liegen bei Fein- bis Grobhackschnitzeln HS 16 bis HS 63 überwiegend im Bereich von 20 bis 30 % pro Jahr, während sie bei Grobhackstücken HS 120 bis HS 156 nur etwa 10 bis 20 % p.a. betragen. Bei höheren Haufentemperaturen, ab etwa 20 °C, weisen sie keine Korrelation zur Zahl der Schimmelpilze (KbE) auf. Etwa 80 bis 90 % der Verluste fallen zumindest bei Hackschnitzeln ≤ 63 mm innerhalb der ersten 100 Tage an.
- Der Verlust an nutzbarer Energie verringert sich mit zunehmender Hacklänge von ca. 20 % (HS 16 bis HS 23) auf etwa 0 % (HS 120 bis HS 156).

Tabelle 5-3: Zusammenstellung der Gesamtergebnisse der Lagerversuche im halb- und großtechnischen Maßstab von 1998 bis 2003

	Hacklänge med. ¹⁾	Volumen m ³	Beding.	Lagerbeginn Mon./a	Lagerdauer d	Bilanzbeutel	Wassergehalt		Temperatur im Haufen		Masse- und Energieverlust		Gehalt ¹⁾ an Schimmelpilzen	
							ein	aus	med. ¹⁾	max.	Δm _{TM}	ΔQ	meso.	therm.
	mm		-			-	%		°C		%		KbE/g FM	
Pappel	16	10	R	02/99	347	30	58,6	42,6	43,3	63	16,0	25,9	6,0 ^{E6}	-
	16	10	R/D	02/99	347	30	58,9	38,2	46,7	62	24,2	20,4	3,0 ^{E6}	-
	16	9,3		02/98	336	6	53,7	50,0	23,8	62	18,4	16,4	3,0 ^{E7}	-
	16	1,5	R/D	03/03	236	20	58,3	51,2	30,1	51	27,7	26,8	5,0 ^{E4}	2,0 ^{E6}
	22	1,5	R/D	03/03	236	20	59,7	39,1	23,5	34	26,5	17,7	2,0 ^{E6}	1,6 ^{E6}
	19	1,5	R/D	09/01	120	20	54,4	51,2	14,3	28	13,5	11,5	4,0 ^{E5}	5,8 ^{E4}
	23	1,5	R	01/02	360	20	55,6	39,3	22,5	58	27,7	22,1	5,6 ^{E6}	3,0 ^{E6}
	23	10	R	01/02	360	30	55,6	35,8	34,0	60	25,6	19,5	1,6 ^{E6}	2,2 ^{E7}
	23	18	R	02/02	360	66	55,6	27,0	35,2	56	26,7	16,4	7,7 ^{E7}	4,3 ^{E8}
	23	18		02/02	360	66	55,6	41,5	29,5	55	28,5	26,9	3,7 ^{E7}	1,6 ^{E8}
	36	1,5	R	01/02	360	20	54,2	22,7	19,2	29	30,4	20,7	9,2 ^{E5}	1,0 ^{E3}
	36	10	R	01/02	360	30	54,2	32,9	26,9	55	24,6	17,4	9,8 ^{E6}	3,3 ^{E7}
	36	70	D	02/02	360	32	54,2	31,2	20,0	52	19,6	9,3	5,2 ^{E6}	6,9 ^{E6}
	36	9,3		02/98	336	6	53,7	46,2	21,0	57	18,5	14,7	2,0 ^{E7}	-
	46	1,5	R/D	09/01	120	20	33,0	27,9	9,7	19	11,3	9,5	1,3 ^{E7}	9,9 ^{E2}
	56	1,5	R/D	03/03	236	20	59,8	33,5	21,7	32	27,5	16,0	3,0 ^{E6}	5,1 ^{E6}
	63	1,5	R ²⁾	01/02	360	20	55,9	52,0	19,8	27	36,7	42,4	8,0 ^{E5}	7,0 ^{E4}
	63	10	R	01/02	360	30	55,9	25,3	18,8	32	22,8	11,8	2,2 ^{E6}	2,9 ^{E5}
	63	18	R	02/02	360	66	55,9	20,2	19,1	35	22,3	9,6	1,5 ^{E6}	5,2 ^{E2}
	63	18		02/02	360	66	55,9	33,6	15,5	31	26,3	21,9	1,3 ^{E7}	1,8 ^{E3}
120	10	R/D	02/99	347	30	59,0	21,2	12,8	25	12,7	- 4,1	2,0 ^{E6}	-	
150	1,5	R/D	09/01	120	20	41,0	24,6	9,5	18	0,7	- 5,9	1,6 ^{E7}	9,9 ^{E2}	
155	1,5	R/D	03/03	236	20	59,4	20,7	15,8	26	14,3	- 2,7	4,5 ^{E5}	1,5 ^{E3}	
156	1,5	R	01/02	360	20	54,4	20,2	13,4	22	18,9	6,9	1,5 ^{E5}	3,5 ^{E3}	
156	10	R	01/02	360	30	54,4	20,6	11,7	24	17,6	4,9	1,3 ^{E6}	2,6 ^{E3}	
∞ ³⁾	23		02/98	336	-	51,8	31,6	-	-	-	-	-	-	
Weide	37	9,3		02/98	336	6	52,1	32,9	17,4	52	17,2	9,3	2,0 ^{E7}	-
	63	1,5	R	01/02	360	20	50,4	17,7	17,5	28	28,6	19,8	5,3 ^{E5}	2,0 ^{E4}
	∞ ³⁾	11,5		02/98	336	-	52,1	25,5	-	-	-	-	-	-
Kiefer	16	10	R/D	02/99	347	30	55,8	32,8	37,6	63	21,0	11,3	4,0 ^{E6}	-
	37	9,3		02/98	336	6	55,2	46,1	18,7	37	7,1	1,5	5,0 ^{E5}	-
	38	2000		02/03	169	10	58,7	48,3	30,8	60	16,9	3,65	2,9 ^{E3}	8,3 ^{E4}
	38	2000	⁴⁾	02/03	289	-	58,7	-	-	60	-	-	1,7 ^{E5}	1,8 ^{E4}

1) Medianwert

2) Hoher Wassergehalt durch Wassereintritt

3) Ganze Bäume in 2 m-Stapel

4) Gleicher Lagerhaufen wie in oberer Zeile, jedoch zu späteren Zeitpunkt

R ... Regenschutz

D ... Durchlüftung (Spaltenboden bzw. Luftkanal)

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Bei der Lagerung von erntefrischen Feldholz-Hackschnitzeln in unbelüfteten Haufen kommt es zur Wärmeentwicklung und damit zu Temperaturen bis zu 65°C, deren Ursache insbesondere das Wachstum von Pilzen (bis 60°C) und Bakterien (bis 70°C) ist. Die Wärmeentwicklung ist mit einem Substanzabbau (vorwiegend C- und N-Verbindungen) und daher mit Trockenmasseverlusten bis zu etwa 30 % pro Jahr verbunden. Hauptursache dieser Verluste sind Schimmelpilze. Je nach Temperatur und Feuchte entwickeln sich bestimmte Spezies vorzugsweise oder werden gehemmt und tragen damit anteilig zum Substanzabbau bei. In Abhängigkeit von den bevorzugten Wachstumsbedingungen werden mesophile (Temperaturoptimum 25 - 35°C) und thermophile (Temperaturoptimum 35 - 55°C) Arten unterschieden. Letztere sind besonders human- bzw. arbeitshygienisch relevant, weil deren luftgetragene Sporen Allergien und Infektionen beim Menschen verursachen können.

Die Temperatur in der Schüttung ist ein Indikator für die Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen. Je nach Länge der Hackschnitzel steigt sie nach 1 bis 6 Wochen auf den Maximalwert von ≤ 60 °C, verharrt dort ca. 1 bis 6 Wochen und fällt danach sukzessive auf Außentemperatur ab. Bei Feinhackschnitzeln können örtlich auch Temperaturen von 65 °C auftreten.

Die Anzahl der Schimmelpilze in koloniebildenden Einheiten pro 1 g Frischmasse (KbE/g FM) entwickelt sich im wesentlichen analog der Temperatur. Ausgehend von dem natürlichen Pilzbefall des erntefrischen Holzes von 10^2 bis 10^4 KbE/g FM werden nach 1 bis 4 Wochen Lagerung etwa 10^5 bis 10^8 KbE/g FM erreicht. Im Gegensatz zur Temperatur bleibt die Zahl der koloniebildenden Einheiten auf dem hohen Niveau mehr oder minder bestehen und fällt im Laufe des Jahres im groben Durchschnitt um lediglich eine Zehnerpotenz ab. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Pilze noch existent sind und z.B. Sporen emittieren können, aber auf Grund ungünstigerer Temperatur- und Feuchtebedingungen in ihrer Aktivität gehemmt sind. Der Befall und die Entwicklung von Pilzen ist ein überwiegend stochastischer Prozess, der insbesondere von der zufälligen Immission von Sporen bestimmt wird. Dennoch gestatten die durchgeführten Untersuchungen die Herleitung einiger statistisch weitgehend gesicherter Zusammenhänge, wie etwa die Korrelation zwischen Haufentemperatur und Anzahl thermophiler Pilze. Bei mesophilen Pilzen ist der Temperatureinfluss weniger ausgeprägt und unterliegt einer erheblichen Streuung.

Wie durch die Messungen belegt werden konnte, bewirkt eine hohe Pilzzahl in der Schüttung eine hohe Sporenkonzentration in der Umgebungsluft. Dies ist besonders prekär bei thermophilen humanpathogenen Arten, wie *Aspergillus fumigatus*. Im Ruhezustand überschreitet die Sporenkonzentration in der Luft selbst bei geringen Abständen unter 1 m nur selten 10^3 KbE/m³. Wird allerdings die Haufenstruktur gestört, z.B. während der Auslagerung, so werden noch in Entfernungen von über 5 m Werte zwischen 10^5 und 10^7 KbE/m³ gemessen und damit z.B. der für biologische Abfallbehandlungsanlagen festgelegte Technische Kontrollwert von $5 \cdot 10^4$ KbE/m³ überschritten. Die Sporenkonzentration in der Luft ist allerdings nicht nur von Pilzzahl und Spezies abhängig, sondern auch von zahlreichen anderen Einflussgrößen, wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Feuchte, Lagerform, Entnahmetechnologie etc.

Die Schimmelpilzentwicklung und damit Sporenemissionen und Verluste können durch entsprechende Gestaltung des Lagers und der Hackschnitzel verringert werden. Ziel muss es dabei

sein, die Temperatur in der gesamten Schüttung unter durchschnittlich 20 °C bzw. unter 35 °C zu halten. Dies kann durch passive oder aktive Belüftung realisiert werden (freie Konvektion oder Druckluft) und steht daher in engem Zusammenhang mit dem Strömungswiderstand, also mit der Form und Länge der Hackschnitzel. Mit zunehmender Hacklänge verringert sich der Strömungswiderstand und beträgt bei geringen Luftgeschwindigkeiten für 150 mm-Hackschnitzel nur etwa 2 bis 20 % der 20 mm-Hackschnitzel.

Mit größer werdenden Hackformaten verlängert sich allerdings die Trocknungsdauer der einzelnen Partikel. Da hierfür jedoch die kleinste Dimension maßgebend ist, hält sich dies bei Kurzumtriebsbaumarten, die bei der Ernte üblicherweise geringe Stammdurchmesser aufweisen, in vertretbaren Grenzen. Wie Messungen mit Stamm- bzw. Astabschnitten und ganzen Bäumen zeigen, trocknen Pappeln und Weiden bis zu einem Durchmesser von 80 mm innerhalb des ersten halben Jahres (Februar/März bis September) auf Wassergehalte unter 30% ab. Ansonsten kann davon ausgegangen werden, dass großvolumige Schüttungen aus Pappel-Hackstücken > 100 mm nach einjähriger ungeschützter Lagerung (Februar bis Februar) Wassergehalte unter 25 % aufweisen. Die Wassergehalte von Feinhackschnitzeln < 30 mm liegen demgegenüber meist über 30 % und bei extrem feinen Hackschnitzeln < 20 mm ist trotz der hohen Haufentemperatur nur ein geringer Trocknungseffekt nachweisbar, was u.a. auf hohe Strömungswiderstände und auf Kondensation in den 20 bis 50 cm dicken Schichten unter der Oberfläche und am Boden zurückzuführen ist.

Die Trockenmasseverluste sind von der Haufentemperatur und somit von der Hacklänge abhängig. Bei Grobhackschnitzeln (HS 63; Mittel 20 °C) nehmen sie mit steigender Temperatur zu und bei Feinhackschnitzeln (HS 16; Mittel 40 °C) ab. Aufgrund dieser temperatur- oder sauerstoffabhängigen gegenläufigen Tendenzen weisen die Trockenmasseverluste von Hackschnitzeln dieses Größenbereichs keine Abhängigkeit von der Länge auf und liegen überwiegend zwischen 20 und 30 % pro Jahr. Erst ab einer Länge von 100 mm und damit bei deutlich geringeren Haufentemperaturen (Mittel 15 °C) werden Werte zwischen 10 und 20 % p.a. erreicht. Bei längerfristiger Lagerung von Holzhackgut sind Trockenmasseverluste also nicht vermeidbar, sondern lediglich reduzierbar.

Im Gegensatz dazu kann der Verlust an nutzbarer Energie praktisch vollständig vermieden werden, zumindest wenn - wie in der Praxis üblich - keine Brennwerttechnik vorgesehen ist. Da der Energieverlust sowohl vom Trockenmasse- als auch vom Wasserverlust bestimmt wird, weisen grobe Hackstücke keinen Verlust, sondern eher einen Gewinn an nutzbarer Energie auf, während er bei Feinhackschnitzeln meist um 20 % pro Jahr liegt, und damit eine wirtschaftlich relevante Größenordnung erreicht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei der Lagerung von Feldholzhackgut in unbelüfteten Haufen zwar Trockenmasseverluste und Schimmelpilze nicht gänzlich vermieden werden können, die Energieverluste und die Bildung gesundheitsgefährdender Pilzspezies können jedoch auf ein vertretbares Minimum reduziert werden. Die Hackschnitzel bzw. Hackstücke sollten hierfür jedoch eine mittlere Länge von mindestens ca. 100 mm aufweisen (entsprechend der Sieblochweite von ca. 50 mm), also im Bereich des oberen Grenzwertes der Grobhackschnitzelklasse G 100 der österreichischen Hackschnitzelnorm liegen (Ö-Norm M 7133). Hackschnitzel von etwa 60 mm Länge (ebenfalls G 100) verursachen Energieverluste von über 10 % pro

Jahr und meist mehr als 10^4 KbE/g FM thermophile Pilze und Feinhackschnitzel < 30 mm (G 30) noch deutlich höhere Verluste und Pilzbelastungen. Um bei Fein- und Mittelhackschnitzeln die Pilzbelastung in Grenzen zu halten, sollten in unbelüfteten Haufen Lagerzeiten von 1 bis 2 Wochen deutlich unterschritten werden. Die mittleren Wassergehalte der entsprechenden Hackgutklassen liegen nach einem Jahr Lagerung zwischen 20 % und 50 %.

Ein Regenschutz kann insbesondere bei Fein- und Mittelhackschnitzeln die Trocknung erheblich verbessern und Pilzbesatz und Verluste senken. Dies ist jedoch von Hacklänge, Witterungsverlauf, Haufenform u.a. abhängig. Ein Spaltenboden oder Luftkanal verbessert ebenfalls die Lagerbedingungen, ist aber nur für Hacklängen ab ca. 30 mm effektiv. Außerdem muss er so gestaltet sein, dass die Spalten nicht durch das Lagermaterial abgedichtet werden. Zum Einfluss der Holzart auf Schimmelpilzbesatz und Verluste von Hackschnitzeln können aus den durchgeführten Untersuchungen keine gesicherten Aussagen abgeleitet werden.

Weiterführende Untersuchungen sollten u.a. der letzten Frage nachgehen, also Lagerverluste und Schimmelpilzwachstum anderer Holzarten klären und insbesondere die hier gewonnenen Ergebnisse mit Feldholzhackgut in der Praxis bestätigen. Darüber hinaus sollten Pilzsporenmessungen in Praxisanlagen durchgeführt werden, um das reale Gefährdungspotenzial abzuschätzen, und geeignete Schnellbestimmungsmethoden für Schimmelpilze und Sporen sowie ingenieurtechnisch und mikrobiologisch begründete Dimensionierungsgrundlagen für Hackschnitzellager entwickelt werden.

Literatur

- Anonymus: Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Nr. 21, ISSN 0945-8131, 2000
- Bally, B.; Buchter, B.; Busin, U.: Entwurf der Literaturstudie zu "Lagerung von Energieholzschnitzeln" AMBIO, Beratungsgemeinschaft in angewandten Umweltwissenschaften, Schweiz, 2000
- Bergmann, Ö.: Deterioration and protection of pulpwood chips in outdoor storage Rapport Sveriges Lantbruksuniversitet 170 Swedish Univ. of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Products, Uppsala, 1985
- Bergmann, Ö.; Nilsson, T.: An experiment on outdoor storage of whole-tree-chips. Rapport Nr. 109, Uppsala Lantbruksuniversitet, Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Products Paper presented at the IUFRO-Meeting in Mexico, 1978
- Blanchette, R.A. et al.: Changes in structural and chemical components of wood delignified by fungi. Wood Sci. Technol., Berlin 19, 35-46, 1985
- Burger, F.; Scholz, V.: Stand der Technik bei der Ernte von Energiewäldern. Holzzentralblatt Nr. 46, S. 610-611, 2004
- Burger, F.; Sommer, W.: Von der Pappel bis zum Hackschnitzel - Moderne Erntetechnik für Energiewälder. LWF aktuell Nr. 39, S.4-6, 2003
- Brunner, T.; Obernberger, I.: Trocknung von Biomasse – Grundlagen und innovative Technik. In: Tagungsband der 3. Internat. Fachtagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, Freiberg, 1997
- Brusche, R.: Verfahren zur Bergung, Lagerung und Trocknung von Hackschnitzeln aus Schwachholz, Dissertation, Kiel, 1983
- Crawford, R. L.: Mutualistic of the lignin model compound veratrylglycerol- β -(o - methoxyphenyl) ether by bacteria. Can. J. Microbiol. 21, 1654 – 1657, 1975
- Deschamps, A. M.; Mahoudeau, G.; Lebeault, J.M.: Fast degradation of kraft lignin by bacteria. European J. Appl. Microbiol. Biotechnol. 9, 45 – 51, 1981
- DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft): MAK- und BAT-Wert-Liste 2001. Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Mitteilung 37. Wiley-VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, Deutschland, 2001
- Domsch, K.W. [Hrsg.]: Lexikon der Mykologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 1998
- DVG: 5. Hohenheimer Seminar "Nachweis und Bewertung von Keimemissionen bei der Entsorgung von kommunalen Abfällen sowie spezielle Hygieneprobleme der Bioabfallkompostierung" vom 5.-6. Oktober 1994 in Stuttgart-Hohenheim, 1994
- Eichler, H.: Praxis der Holztrocknung. Fachbuchverlag Leipzig, 1981
- EU-Weissbuch: Energie für die Zukunft - Erneuerbare Energieträger. Weissbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan. Mitteilung der EU-Kommission, Brüssel 26.11.1097

- Feicht, E.: Hackschnitzel-Alveolitis Studie, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2001
- Feicht, E.; Wittkopf, S.; Ohrner, G.; zur Mühlen, A.; Nowak, D.: Gefährdung durch Holzhackschnitzel analysiert. Holz-Zentralblatt, Nr. 39/40, S. 500
- Feicht, E.: Holzhackschnitzel-Alveolitis: Gesundheitliche Probleme bei der Handhabung und Lagerung von Hackschnitzeln. Studie im Auftrag der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Februar 2001
- Fuzzi, S.; Mandrioli, P.; Perfetto, A.: Fog droplets-an atmospheric source of secondary biological aerosol particles. Atmos. Environ., 31,287-290, 1997
- Gedeck, B.: Kompendium der medizinischen Mykologie. Verlag Parey, Berlin, Hamburg, 1980
- Gigler, J.: Drying of willow biomass in supply chains. Thesis, Wageningen University, ISBN 90-5808-177-X, 2000
- Göttlich, E.; Engesser, K.H.; Bardte, D.: Emission von Pilzsporen in Müllverbrennungsanlagen. In: DVG, 5. Hohenheimer Seminar "Nachweis und Bewertung von Keimemissionen bei der Entsorgung von kommunalen Abfällen sowie spezielle Hygieneprobleme der Bioabfallkompostierung" vom 5.-6. Oktober 1994 in Stuttgart-Hohenheim, 1994
- Gravesen, S.; Frisvad J.C. and Samson, R.A.: Microfungi, Pre Press High Tech A/F Copenhagen, 1. Auflage, 1994
- Green, F.; Highley, T. L.: Mechanism of brown-rot decay: Paradigm or paradox. Intern. Biodeterioration Biodegradation 39, (2-3), 113-124, 1997
- Gruber, E.: Grundprozesse der Zellstoffherstellung, Vorlesung BA1, 2003
- Gründlinger, R.: Tierische und mikrobielle Schadorganismen auf verbautem Holz. Proceedings der VII. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene vom 24. – 26.9. 2003 in Lübeck. Band 7, S.17-34, 2003
- Guelaud, C.; Fruit, J.; Vannimenus, C.; Wallaert, B.; Tonnel, A.B.: Occupational extrinsic allergic alveolitis due to *Aspergillus oryzae*. Revue des Maladies Respiratoires. 10, 4, 362-365; 9 ref., 1993
- Haider K.; Trojanowski J.: A comparison of the degradation of ¹⁴C-labelled DHP and cornstalk lignins by micro- and macrofungi and bacteria. In: T. K. Kirk, T. Higuchi and H.-M. Chang (eds): Lignin biodegradation: Microbiology, chemistry, and potential applications. CRS Press, Boca Raton, Vol. I. 111-134, 1980
- Hartmann, H.; Thuneke, K.: Ernteverfahren für Kurzumtriebsplantagen. Landtechnik-Bericht, Heft 29, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Weißenstephan, 1997
- Hirst, J.M.: Bioaerosols: Introduction, retrospect and prospect. In: Bioaerosols Handbook, C.S. Cox and C.M. Wathes (Hrsg.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 5-14, 1995
- Hoog, G.S.; Guarro, J.; Gene, J.; Figueras, M.J.: Atlas of clinical fungi. 2nd edition, Centraalbureau voor Schimmelcultures, Universität Rovira I Virgili, 2000
- Idler, C.; Daries, W.; Scholz, V.; Egert, J.: Probleme und Lösungen zur Lagerung von Feldholzhackgut. In: Tagungsband „Energieholzproduktion in der Landwirtschaft“, Symposium, Potsdam, 29.01.2004

- Idler, C.; Scholz, V.: Lagerung von Feldholz – Probleme und Lösungsansätze. In: Tagungsband zur 6. Internationalen Fachtagung "Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe", Freiberg 7./8.9.2000, S. 34-39, 2000
- Idler, C.; Scholz, V.: Lösungsansätze für eine verlustlimitierende und humanhygienische Lagerung von Feldholz. In: Tagungsband zur 60. Internat. Tagung Landtechnik „Agrartechnik für den Umweltschutz“, Halle 10./11.10.02, VDI-Verl., S. 221-226, 2002
- Idler, C.; Scholz, V.: Lösungsansätze für eine verlustlimitierende Lagerung von Feldholz. Vortrag auf Symposium "Holz vom Feld für die energetische und stoffliche Nutzung", Köllitsch, 12.06.2003, S. 39-44, 2003
- Idler, C.; Scholz, V.: Storage of field wood chips – Problems and solutions. In.: Proceedings of Internat. Conference. "Renewable Energy Sources in the Verge of XXI Century", Warszawa 10./11.12.2001, S. 253-258, 2001
- Idler, C.; Scholz, V.: Verlustreduzierte und humanhygienische Lagerung von Feldholzhackgut. 6. Internationale Fachtagung "Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe", Freiberg 7./8.9.2000
- Janshekar, H.; Fiechter, A.: Lignin-Biosynthesis, Applikation and Biodegradation. Berlin, Akademie-Verlag, 1983
- Jirjis, R.: Enumeration and distribution of fungi in stored fuel chip piles. Material und Organismen, 24. Bd. 1989 Heft 1, S. 27-38, ISSN 0025-5270, 1989
- Katamyama, Y.; Fukutumi, T.: Bacterial degradation of dimers structurally related to lignin. III. Metabolism of -veratryl- β -guaiacylpropionic acid and D, L-pinoresinol by *Pseudomonas putida*. Mokuzaki Gakkaishi 25, 67-76, 1979a
- Katamyama, Y.; Fukutumi, T.: Bacterial degradation of dimers structurally related to lignin. IV. Metabolism of guaiacetyl-glycerol- β -coniferyl ether by *Pseudomonas putida*. Mokuzaki Gakkaishi 25, 367-373, 1979b
- Kirschbaum, H.-G.: Lagerung von Holzhackschnitzeln für eine energiewirtschaftliche Nutzung. In: Beiträge des IBZ Hohen Luckow e.V., 4/1998, S. 159-171, 1998
- Kleist, G.: Besiedlungs- und Abbaumuster holzerstörender Pilze. Proceedings der 4. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene vom 15. bis 16. 9. 2000 in Lübeck, S, 107-119, 2000
- Kofman, P.D.; Thomsen, I.M.; Ohlsson, Ch.; Leer, E.; Schmidt, E.R.; Sørensen, M.; Knudsen, P.: Preservation of forest wood chips. Danish Energy Resear programme Biomann, 1999
- Kofman, P.D.; Thomson, I.M.; Ohlsen, C. et al.: Preservation of Forest Wood Chips. ISBN: 87-986376-4-9, Elsamprojekt, 1999
- Kühnast, M.: Die natürliche und künstliche Holzrocknung. Fachbuchverlag Leipzig, 1954
- Kutzner, H.J.; Kempf, A.: Emission von Actinomyceten-Sporen in Kompostwerken und anderen müllverarbeitenden Anlagen. In: DVG, 5. Hohenheimer Seminar "Nachweis und Bewertung von Keimemissionen bei der Entsorgung von kommunalen Abfällen sowie spezielle Hygieneprobleme der Bioabfallkompostierung" vom 5.-6. Oktober 1994 in Stuttgart-Hohenheim

- Lauer, M.; Bergmayer, M.: Einfache Methode zur natürlichen Trocknung von Hackgut und Rinde für kleine und mittlere Feuerungsanlagen bis 500 kW. Institut für Umweltforschung, Graz, 1986
- Levy, J. F.: The soft rot Fungi and their mode of entry into wood and woody cell walls. Holt und Organismen. Beiheft zu Material und Organismen, Berlin 1, 57 – 60, 1966
- Liese, W.: Feinstruktur und mikrobieller Abbau des Holzes. Der Wald als Rohstoffquelle, 69, 140 – 149, 1981
- LWF aktuell Nr. 22: Hinweise zur Trockenlagerung von Sturmholz. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, ISSN 1435-4098, 2000
- LWF Merkblatt Nr. 11: Hackschnitzel richtig lagern. Bayerische Staatsforstverwaltung, 2002
- Madelin, T.M.; Johnson, H.E.: Acute exposure to swine dust causes bronchial hyperresponsiveness in health subjects. Eur. Resp. J. 6, 400-404, 1992
- Madson, B.: Wood destroying fungi-physical methods for detection and eradication. Proceedings der 4. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene vom 15. bis 16. 9. 2000 in Lübeck, S. 121-136, 2000
- Maier, J.; Vetter, R.; Siegler, V.; Spliethoff, H.: Anbau von Energiepflanzen-Ganzpflanzen-Gewinnung mit verschiedenen Beerntungsmethoden (Ein- und mehrjährige Pflanzenarten); Schwachholzverwertung, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 22-94.11 des Ministeriums Ländlicher Raum Baden-Württemberg, Stuttgart, 1998
- Marutzky, R.; Keserue, G.: Herstellung von Spanplatten aus gelagerten Hackschnitzeln. 3. Mitt. Einfluss der Lagerung auf die Qualität der Holzspanplatten, Holz-Zentralblatt 108 (1982), Nr.7, S.81-82, 1982
- Marutzky, R.; Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse. Grundlagen-Technik-Emissionen-Wirtschaftlichkeit-Entsorgung-Recht. DRW-Verlag Echterdingen, 1999
- Matthias-Maser, S.; Jaenicke, R.: The size distribution of primary biological aerosol particles in the multiphase atmosphere. Aerobiologia, 16, 207-210, 2000
- Merkblätter Sichere Biotechnologie Nr. B007 Eingruppierung biologischer Agenzien: Pilze. Hrsg. Berufsgenossenschaft der chem. Industrie, Jedermann-Verl. Heidelberg, 1998
- Mitchell, C. P.; Hudson, J. B.; Gardener, D.; Storry: A Comparative Study of Storage and Drying of Chips and Chunks in the United Kingdom, Produktion, Storage and Utilization of Wood Fuels. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency, Research Notes 134, Schweden, 1988
- Mücke, W.; Lemmen, Ch.: Umweltentwicklung Bayern, Schimmelpilze, Bay.Stm. Landesentw. u. Umweltfragen Nr. 135, 1999
- Müller, W.; Wieser, P.: Dust and microbial emission from animal production. In: Animal prouction and environmental health, Strauch, D. (Hrsg.); Word animal Science, B6; Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam, Niederlande, 47-89, 1977
- N.N.: Vorlesung Holzkunde der fh-egerswalde.de/forst/forstnutzung, 2004

- Nilsson, T.: Comparison of storage of chunk wood and fuel chips. (Originaltitel: Jamforande lagringsstudie av smaved och brnsleflis.) Rapport Nr. 192, 1987, No. 192, vi + 76 + 2 pp.; 32 ref. Swedish Univ. of Agric. Sci., Dept. of Forest Products, Uppsala, 1987
- Ö-NORM M 7133: Energiehackgut - Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 1988
- Palmgren, M.S.; Lee, L.S.: Separation of mycotoxin-containing sources in grain dust and determination of their mycotoxin potential. Environ. Health Persp.; 66, 105-108, 1986
- Pitt, J.I.; Hockin, A. D.: Fungi and Food Spoilage. Blackie Academic & Professional, 2. Auflage, 1997
- Plank, J.: Brennstoffgewinnung und Aufbereitung. Landtechnik 6/94
- Reiß, J.: Schimmelpilze-Lebensweise, Nutzen Schaden Bekämpfung. 2. Aufl. Springer-Verlage, 1997
- Reponen, T. ; Willeke, K.; Ulevicus, V.; Reponen, A.; Grinshpun, S.A.: Effect of relative humidity on the aerodynamic diameter and respiratory deposition of fungal spores. Atmosp. Environ., 30, 3967-3974, 1996
- Rink, H.: Trocknung von Holzhackschnitzel durch freie Konvektionslüftung, Diplomarbeit, Universität Rostock, 1997
- Roth, L.; Frank, H.; Kormann, K.: Giftpilze - Pilzgifte. Vorkommen-Inhaltsstoffe-Pilzallergien-Nahrungsmittelvergiftungen. Ecomed-Verlagsgesellschaft mbH, 1990
- Sam, H.: Mikrobielle Umsetzung von lignocellulose-haltiger Biomasse. (Hrsg. M. Ringfeil) 115 – 123, Berlin, Akademie-Verlag, 1982
- Samson, R.A.; Hoekstra, E.S.; Frisvad, J.C.; Filtenborg, O.: Introduction to food-borne fungi. Centraalbureau voor Schimmelcultures Baarn/Delft, 4. Auflage, 1995
- Samson, R.A.; Hoekstra, E.S.; Frisvad, J.C.; Filtenborg, O.: Introduction to food-and airborne fungi. Centraalbureau voor Schimmelcultures Baarn/Delft, 6. Auflage, 2000 a
- Samson, R. A.; Pitt, J. I.: Integration of modern taxonomic methods for Penicillium and Aspergillus classification. Harwood academic publisher, Germany, 2000 b
- Schindel, K.: Die Röntgenmikroanalyse von Lignin als Untersuchungsmethode für Holz- und Holzwerkstoffe, Diss. Georg-August-Universität Göttingen, 1998
- Schmidt, O.: Holz- und Baumpilze. Springer-Verlag, Berlin, 1994
- Schmidt, O.: On the bacterial decay of the lignified cell wall. Holzforschung, Berlin (West) 32, 214 – 215, 1978
- Schmidt, O.: Über den bakteriellen Abbau der chemisch behandelten verholzten Zellwand. Material und Organismen, Berlin (West), 15, 3, 207-224, 1980
- Schmidt, O.: Umsetzung von Holz zu mikrobiellem Eiweiß. Naturwissenschaftliche Rundschau 34, 333 – 336, 1981b
- Schmidt, O.: Zum Verhalten der Bakterien gegenüber der verholzten Zellwand. Ref.: Material und Organismen, Berlin (West), 15, 4, 316 –317, 1981a

- Scholz, V. et al.: Umwelt- und technologiegerechter Anbau von Energiepflanzen. Forschungsbericht des ATB, 137 S. 1999
- Scholz, V.: Aufwand und Ertrag an Energie bei der Produktion von nachwachsenden Brennstoffen. Archives of Agronomy and Soil Science, 402, S. 75-89, 1997
- Scholz, V.; Ellerbrock, R.: The growth productivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany. Biomass and Bioenergy 23, p.81-92, 2002
- Scholz, V.; Hellebrand, H.J.: Ökologische Vorzüge des Anbaus schnellwachsender Baumarten. Tagungsband zum Symposium „Holz vom Feld für die energetische und stoffliche Nutzung“, Köllitsch, 2003
- Scholz, V.; Hellebrand, H.J.; Höhn, A.: Energetische und ökologische Aspekte der Feldholzproduktion. In: Tagungsband „Energieholzproduktion in der Landwirtschaft“, Symposium, Potsdam, 29.01.2004
- Scholz, V.; Hellebrand, H.J.; Grundmann, P.: Produktion von nachwachsenden Energierohstoffen auf landwirtschaftlichen Flächen. KTBL-Schrift 420, Landwirtschaftsverlag Münster, S. 167-180
- Scholz, V.; Idler, C.: Loss Reduced and Human Hygienic Storage of Field Wood Chips. In: Proceedings of 1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry in Sevilla, Spanien, 5./9.06.2000, p. 536-539
- Scholz, V.; Idler, C.: Mikrobiell bedingte Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Feldholz-Hackschnitzeln. Tagungsband des 10. OTTI-Symposiums „Energie aus Biomasse“, Kloster Banz, S. 289-394, 2001
- Scholz, V.; Idler, Ch.; Daries, W.: Dry matter loss and fungi development in wood chip piles. Poster auf 3rd Research and Development Conference of Central- and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering, Gödöllő, Hungary, 11./12.09.2003
- Scholz, V.; Idler, Ch.; Daries, W.: Verlustarme Lagerung von Feldholz-Hackgut. Poster auf 9. Internationaler Fachtagung "Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe" Freiberg, 4./5.09.2003
- Scholz, V.; Idler, C.; Daries, W. et al.: Untersuchungen zur verlustminimierten und humanhygienischen Lagerung von Feldholz. 1. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben 99NR136 der FNR Gülzow , ATB Potsdam 2001, 43 S.
- Scholz, V.; Idler, C.; Daries, W. et al.: Untersuchungen zur verlustminimierten und humanhygienischen Lagerung von Feldholz. 2. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben 99NR136 der FNR Gülzow , ATB Potsdam 2002, 123 S.
- Scholz, V.; Idler, C.; Daries, W. et al.: Untersuchungen zur verlustminimierten und humanhygienischen Lagerung von Feldholz. Endbericht zum Forschungsvorhaben 99NR136 der FNR Gülzow , ATB Potsdam 2004, 264 S.
- Scholz, V.; Krüger, K.; Höhn, A.: Environmentally Compatible and Energy-Efficient Production of Energy Plants (Umweltverträgliche und energieeffiziente Energiepflanzenproduktion). Agrartechnische Forschung 7, Heft 3, S. 63-71, 2001
- Scholz, V. (Red.): Energieholzproduktion in der Landwirtschaft. Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 35, Potsdam-Bornim, 2004

- Seedorf, J.; Hartung, J.: Stäube und Mikroorganismen in der Tierhaltung, KTBL-Schrift 393, KTBL- Schriften- Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 2002
- Sexton, M.J.; Mascaskill, C.; Gray, B.F.: Self-heating and drying in two-dimensional bagasse piles. Institute of Physics Publishing, 2001
- Sieber, W.; Siemon, G.: Exogen-allergische Alveolitis durch Pilzsporen in schimmeliger Blumenerde. Medizinische Klinik II, Universitätsklinikum, 93053 Regensburg, Germany. Allergologie, 1996, 19:3, 142-144; 14 ref., 1996
- Spicher, G.: Identifizierung von Schimmelpilzen. In: Untersuchungen von Getreide, Mehl und Brot. Behr's Verlag Hamburg, 1985
- Spikermann, H.: Lagerung und Trocknung von Feldholz. Praktikumsbericht ATB Bornim, 1999
- Spikermann, H.: Untersuchungsbericht zur Lagerung von Holzhackschnitzeln der Fa. Energieholz Zempow. ATB Bornim, 2001
- Stalder, K.: Infektions- und Allergisierungsmöglichkeiten durch Keimemission aus kommunalen Abfällen. In: DVG, 5. Hohenheimer Seminar "Nachweis und Bewertung von Keimemissionen bei der Entsorgung von kommunalen Abfällen sowie spezielle Hygieneprobleme der Bioabfallkompostierung" vom 5.-6. Oktober 1994 in Stuttgart-Hohenheim
- Stern, A. M.; Gasner, L. L.: Degradation of lignin by combined chemical and biological treatment. Biotechnology and Bioeng. New York, 16, 789-885, 1974
- Stockinger, H.; Obernberger, I.: Systemanalyse der Nahwärmeversorgung mit Biomasse. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, TU Graz, 1998
- Strehler, A.: Möglichkeiten der Trocknung von Holzhackschnitzeln. Landtechnik Weihenstephan, 1984
- Tansey, M.R.: Isolation of Thermophilic Fungi From Self-Heated, Industrial Wood Chip Piles. Mycologia 1971, 63, 537-547, 1971
- TRBA Nr. 211: Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Biologische Abfallbehandlungsanlagen, Schutzmassnahmen, Bundesarbeitsblatt 83-88, 8/2001
- TRBA Nr. 430: Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Verfahren zur Bestimmung der Schimmelpilzkonzentrationen in der Luft am Arbeitsplatz. Bundesarbeitsblatt 8/2001
- TRBA Nr. 460: Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe – Einstufung von Pilzen in Risikogruppen. Bundesarbeitsblatt 10/2002
- Thörnqvist, R.; Gustafsson, G.: The importance of air drying for the storing property of fuel chips. Rep. No. 142, 1983, The Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 1983
- Venendaal, R.; Jorgensen, U.; Foster, C.A.: European Energy crops: A synthesis. Biomass and Bioenergy, Vol.13. No.3 pp 147-185, 1997
- Viitanen, H.; Titschkoff, A.C.: Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Rapport 221, Swedish Univ. of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Products, 1991
- Wagenführ, A.: Praxisrelevante Untersuchungen zur Nutzung biotechnologischer Wirkprinzipien bei der Holzwerkstoffherstellung. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1988

- Wagenführ, R.M.; Scheiber, A.: Holzatlas. 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 1985
- Webenau, B.; Krausenboeck, B.; Göldner, A.: Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Bericht, Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, Freising, 1999
- Weber, H. [Hrsg.]; Arnold, G.: Allgemeine Mykologie. Jena, Stuttgart, G. Fischer, 1993
- Weidenbörner, M.: Lebensmittelmykologie. 1. Aufl., Behr's Verlag, Hamburg, 1998
- Weingartmann, H.: Hackgut-Trocknung, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, ISBN 3-9005-3478-0, 81 S., 1991
- Weingartmann, H.; Prankel, H.: Hackgutrocknung Wippenham, 1994
- Wippermann, J.; Stampfer, K.: Entwicklung von Erntemaschinen für Energieholzflächen. Holz-Zentralblatt Nr.16, S. 274-276, 1995
- Wittkopf, S.: Die Lagerung von Hackschnitzel. energiepflanzen, 8-10, II/2000
- Wittkopf, S.: Die Schnitzel müssen trocken ins Lager. top agrar extra, 2000
- Wolff, J. et al.: Belastung des Verbrauchers und der Lebensmittel mit Ochratoxin A. Studie, des BAGKF und BGVV 2001/2002

Symbole und Abkürzungen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a_w		Wasseraktivität
d	mm	Durchmesser
H_u	MJ/kg	Unterer Heizwert
$H_{u,atro}$	MJ/kg	Unterer Heizwert für absolut trockenes Material
$H_{u,w}$	MJ/kg	Unterer Heizwert des feuchten Materials
h	mm	Höhe
l	mm	Länge
m_{aus}	g, kg	Masse des ausgelagerten Materials
m_{ein}	g, kg	Masse des eingelagerten Materials
n		Anzahl
T	°C	Temperatur
t	h, d	Zeit
TS	%	Trockensubstanzgehalt
V	dm ³ , m ³	Volumen
w	%	Wassergehalt
w_{aus}	%	Wassergehalt des ausgelagerten Materials
w_{ein}	%	Wassergehalt des eingelagerten Materials
x_{50}	mm	Median (Zentralwert)
Δm_{TM}	%	Trockenmasseverlust
ΔQ	%	Energieverlust, bezogen auf $H_{u,w}$
ρ	kg/m ³	Dichte
FM	-	Frischmasse
HS x_{50}	-	Hackschnitzel der wahren mittleren Länge x in mm (Median)
K	-	Kiefer
P	-	Pappel
RS	-	Regenschutz
TM	-	Trockenmasse
W	-	Weide

In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 1996)	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 1997)	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg - Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 1998)	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998
Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999

Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik - Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion Statusseminar, 29./30.9.2004 in Potsdam	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005

Interessenten wenden sich an:

Institut für Agrartechnik Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
D 14469 Potsdam

Tel.: 0331 5699-820
Fax.: 0331 5699-849
E-mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €