

MANUSKRIPT

SCHOLZ, V.; IDLER, CH.; DARIES, W.; EGERT, J.:

Lagerung von Feldholzhackgut

Verluste und Schimmelpilze

erschieden in:

Agrartechnische Forschung 11 (2005)

Heft 4, S. 100-113

Lagerung von Feldholzhackgut

Verluste und Schimmelpilzbefall

Volkhard Scholz¹, Christine Idler², Werner Daries¹, Johannes Egert³

¹ Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung

² Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Abteilung Bioverfahrenstechnik

³ Büro für Holzschutz und Wohnraumhygiene

Bei der Lagerung von erntefrischen Holzhackschnitzeln in unbelüfteten Haufen entwickeln sich Mikroorganismen, insbesondere Schimmelpilze, die in wenigen Wochen zu erheblichen Trockenmasseverlusten führen und darüber hinaus ein arbeitshygienisches Risiko darstellen. Durch Versuche in klein- und großtechnischem Maßstab wird der dominante Einfluss der Hackschnitzellänge auf Temperatur- und Trocknungsverlauf sowie auf Schimmelpilzentwicklung und Masse- bzw. Energieverluste bei der Langzeitlagerung von Feldholzhackgut nachgewiesen und quantifiziert.

The storage of freshly harvested wood chips in unventilated piles leads to the development of microorganisms, especially mould, which after only a few weeks results in a considerable loss in dry matter and also presents a hazard to work hygiene. In semi-technical and large scale experiments, the dominant influence of the wood chip length on the course of temperature and drying as well as the development of mould and the mass or energy losses in long term storage of field wood chips is proven and quantified.

Schlüsselwörter

Holzhackschnitzel, Lagerung, Verluste, Schimmelpilze, schnellwachsende Baumarten

Keywords

Wood chips, storage, loss, mould fungi, short rotation coppice

Einleitung

Die Nachfrage nach Holzhackschnitzeln ist in den letzten Jahren erheblich gestiegen. Selbst in dem walddreichen Bundesland Brandenburg übersteigt der prognostizierte Bedarf der geplanten Holzheizkraftwerke das Potenzial an nachhaltig nutzbarem Waldholz [1]. Um diesen Bedarf langfristig decken zu können, bietet sich der Anbau von schnellwachsenden Baumarten, wie Pappeln und Weiden, auf landwirtschaftlichen Flächen an [2] [3]. Für die Ernte dieser Feldgehölze wird die Schüttgutlinie favorisiert, bei der die Bäume in einem Arbeitsgang gefällt und gehackt werden [4]. Die so produzierten Hackschnitzel sind auf Grund des hohen Wassergehaltes von 50 bis 60 % allerdings nur begrenzt lagerfähig. Bei der Lagerung in unbelüfteten Schüttungen verursachen Mikroorganismen, insbesondere Schimmelpilze, innerhalb weniger Tage hohe Temperaturen und wirtschaftlich relevante Masse- und Energieverluste. Außerdem kann der Schimmelpilzbefall eine arbeitshygienisch bedenkliche Größenordnung erreichen.

Die wenigen zur Lagerung von Nadel- und Laubholzhackschnitzeln vorliegenden Ergebnisse weisen eine erhebliche Streuung auf, sind nicht vergleichbar und stellen die verschiedenen Einflussfaktoren nicht im Zusammenhang dar. Die Zielstellung der Arbeit, die zeitweise von der FNR geförderten wurde, besteht in der Bestimmung des Schimmelpilzbefalls und der Verluste im Zusammenhang mit Temperatur- und Trocknungsverlauf bei der Langzeitlagerung von Hackschnitzeln aus verschiedenen Holzarten, insbesondere aus Pappeln, sowie in der Ermittlung und Quantifizierung des Einflusses der Hacklänge.

Der natürliche Holzabbau erfolgt durch verschiedene Mikroorganismen, wie Bakterien und Pilze, sowie deren Enzyme, welche die Holzbestandteile zu löslichen Produkten abbauen. Der Beitrag der Bakterien wird kontrovers diskutiert. Sicher scheint, dass ihr Anteil durch das Lignin limitiert wird. Im Vergleich zu den Pilzen verläuft der Abbau zudem wesentlich langsamer [5]. Insgesamt ist der Verlust durch bakteriellen Eingriff eher selten und begrenzt, während die Pilze imstande sind, Lignin oder Cellulose oder beide Zellbestandteile zugleich abzubauen.

Am Holzabbau sind sowohl holzerstörende Pilze (Braunfäule-, Weißfäule- und Moderfäulepilze) als auch Schimmelpilze beteiligt. Mycelwachstum, Sporenbildung und Sporenkeimung hängen in hohem Maße von der Feuchtigkeit des Substrates, der Temperatur und dem pH-Wert ab. Ausschlaggebend ist der Gehalt an frei verfügbarem Wasser auf dem Substrat [6]. Nach ihrem Temperaturoptimum wer-

den mesophile (Optimum 25...35 °C) und thermophile Arten (Optimum 35...55 °C) unterschieden. Die Schimmelpilze bevorzugen ein leicht saures Milieu mit pH-Werten zwischen 4,5 und 6,5 [7], und sie gehören zu den aeroben Organismen. Als Substrate werden von den Schimmelpilzen vor allem Cellulose und andere Kohlenhydrate sowie 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 Weiß- oder Moderfäulepilzen gezählt. Weitere Ligninabbauer sind u.a. *Aspergillus fumigatus* und *Paecilomyces sp.*

Zum Umfang des Substanzabbaus durch Pilze wurden insbesondere im vergangenen Jahrzehnt verschiedene Untersuchungen durchgeführt, und zwar um das Holz einerseits aufzuschließen und andererseits die Lagerverluste zu bestimmen [8]. Die hierbei ermittelten Trockenmasseverluste werden mit 0,5 % bis 10 % pro Monat angegeben (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Masseverluste bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln (Literaturlauswertung)

Holzart	Hacklänge	Lagerdauer	Wassergehalt		Max. Temp.	Trockenmasseverlust	Quelle
			Einlagerg.	Auslagerg.			
	mm	d	%	%	°C	% p. Mon.	
-	-	-	-	-	-	0,5...1,0	Marutzky, Keserue [9]
-	-	-	-	-	-	1...2	Brusche [10]
-	-	-	50	-	-	2,8	Lauer, Bergmayer [11]
-	-	-	20	-	-	0,5	
-	-	-	20	-	-	0,5	Mitchell et al. [12]
-	-	-	50	-	-	2	
-	-	-	50	-	-	4	
Buche*	-	14...84	-	-	25	6,5...8,8	Wagenführ [13]
Div. Holz*	< 1	8...30	-	-	25	2,2...4,7	
-	-	-	30	-	-	0,5...1,0	Weingartmann [14]
-	-	-	50	-	-	4...6	
-	11...20	91	-	-	65	10,3	
Rinde	-	183	54	53	-	1,8	Brunner, Obernberger [16]
Rinde	-	183	59	36	-	1,3	
Pappel	85,4	48	-	-	14	0,4	Rink [17]
Nadelholz	94,1	60	-	-	14	0,6	
Linde	23,8	46	-	-	65	11,5	
-	-	-	55	-	-	1,3	Stockinger, Obernberger [18]
-	-	-	55	-	-	1,8	
Pappel	80...150	-	-	-	60	0,45...0,8	Kirschbaum [19]
Pappel	25	-	-	-	60	0,8...1	
Feldholz	-	-	-	-	-	1,4...3,3	Stockinger, Obernberger [20]
-	-	-	-	-	-	1...5	
Fichte	25	50	41	23,9	35	0,5...4	Webenau et al. [21]
Fichte	25	90	41	20,5	35	0,5...4	

* Laborbedingungen (Fermentation)

Relativ umfangreiche Ergebnisse zur Schimmelpilzbelastung von Holzhackschnitzeln und damit in Berührung kommenden Personen liegen im Bereich der Holzverarbeitung vor [22] [23]. Hierbei konzentrieren sich die Untersuchungen auf das Einatmen von Stäuben und den damit verbundenen Schädigungen der Lungen (Holzarbeiterlunge, Holzschnitzellunge, Holzschnitzelalveolitis, Holzarbeiteralveolitis) [24]. Vereinzelt sind auch Befunde über solche Erkrankungen in den Bereichen Wohnen und Freizeit bekannt geworden [25] [26]. Zur Pilzbelastung in Kompostier- und Recyclinganlagen gibt es ebenfalls Untersuchungsergebnisse [27] [28].

Die Schimmelpilze können nach ihren Wirkungen und ihrer Bedeutung für die menschliche Gesundheit in drei Gruppen unterteilt werden: opportunistisch pathogen, toxischen und allergen. Dabei ist zu bemerken, dass einige Spezies aufgrund ihres breiten Wirkungsspektrums in mehreren Wirkgruppen genannt werden [29] [30] [31]. Zu den wichtigsten der auf Holz anzutreffenden Schimmelpilze gehören Vertreter der Gattungen *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Rhizopus*, *Mucor*, *Botrytis*, *Cladosporium* und *Paecilomyces*. In diesen Gattungen sind insbesondere thermophile Spezies vertreten, also Pilze, die bei der Körpertemperatur des Menschen die günstigsten Wachstumsbedingungen finden.

Methoden

Hackschnitzel

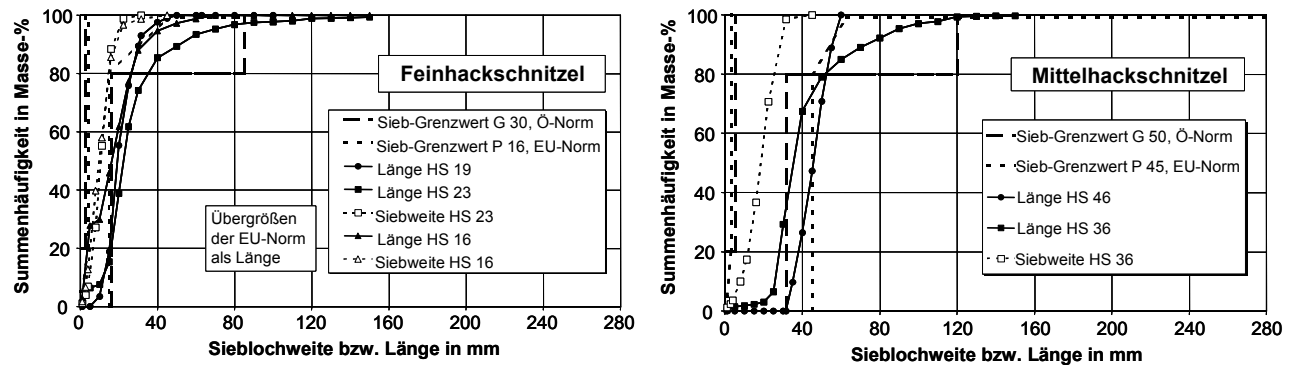
Für die Lagerversuche wurden motormanuell gefällte 2 bis 8-jährige Kurzumtriebspappeln (Japan 105, NE 42, UNAL VII) und Weiden (*Salix viminalis* 83/21/12) bis zu einem Brusthöhendurchmesser von 120 mm sowie Kiefer (Durchforstungsmaterial) verwendet. Der Wassergehalt w_{ein} betrug jeweils 50 bis 60 %. Das Hackgut wurde mit vier verschiedenen Hackern erzeugt und hatte eine mittlere Länge l (Median) von 16 bis 156 mm (HS 16 bis HS 156), was einer mittleren Sieblochweite von 10 bis etwa 80 mm entspricht. Die Zeitdauer zwischen Ernte, Hacken und Einlagerung betrug maximal 2 Tage (**Tabelle 2**).

Tabelle 2: Mittlere Länge der verwendeten Hackgut-Klassen

Hackgut	Hacker	Medianwert	
		Sieb- loch- weite mm	Reale Länge mm
Feinhackschnitzel	Scheibenradhacker Frami CH 150	10...11	16...23
Mittelhackschnitzel	Schneckenhacker Laimet HP 21 / 65 ¹⁾	15...19	36...46
Grobhackschnitzel	Schneckenhacker Laimet HP 21 / 110 ¹⁾	26...30	56...63
Hackstücke	Kurzholz-Scherhacker Diemer MSK 25-15	48...82	120...156

1) Steigung der Schnecke in mm

Um eine Klassifizierung der verwendeten Hackschnitzel zu ermöglichen, wird auf die bestehende österreichischen Hackschnitzelnorm M 7133 [32] und die im Entwurf befindliche europäische Norm prCENTS/TS 14961 [33] zurückgegriffen und neben der Häufigkeitsverteilung der Siebfraction auch die der tatsächlichen Partikellänge bestimmt. Demnach können drei Hackschnitzel-Klassen unterschieden werden, die in Folgendem als Fein-, Mittel- und Grobhackschnitzel bezeichnet werden. Die vierte Hackschnitzel-Klasse, die sogenannten (Grob-) Hackstücke, sind mit 120 bis 156 mm extrem lang und liegen zum Teil außerhalb der Normen (**Bild 1**).



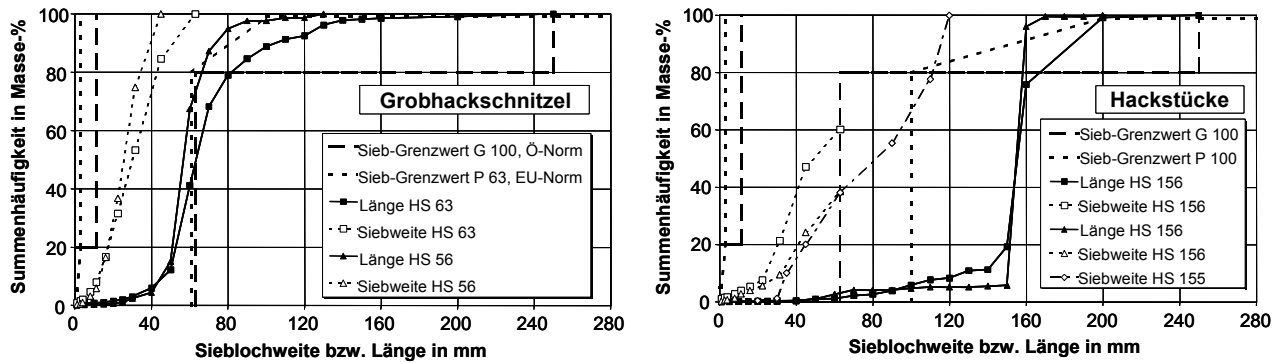


Bild 1: Längenverteilung ausgewählter Hackgüter nach Siebung und Längenmessung mit Angabe der korrespondierenden Klassengrenzen der Ö-Norm M 7133 [32] und des EU-Normentwurfs prCENTS/TS 14961 [33]

Lagerformen

Das Hackgut wurde in folgenden Behältern bzw. Haufen gelagert:

- Lagersilos ($V = 1,5 \text{ m}^3$), bestehend aus zylindrischen PU-Hartschaumdämmkörpern mit dichtem bzw. luftdurchlässigem Boden und Regenschutzhaube (**Bild 2**).
- Lagerboxen ($V = 10 \text{ m}^3$), bestehend aus quaderförmig angeordneten, wärmeisolierten Betonplatten mit festem bzw. luftdurchlässigem Boden und einem abnehmbaren Regenschutzdach (**Bild 3**).
- Lagerhaufen ($V = 18 \dots 2.000 \text{ m}^3$), bestehend aus frei aufgeschütteten Dreiecksmieten ($h = 3 \dots 6 \text{ m}$, $b = 4 \dots 15 \text{ m}$) z.T. mit Regenschutzdach und horizontalem Luftkanal (**Bilder 4 und 5**).

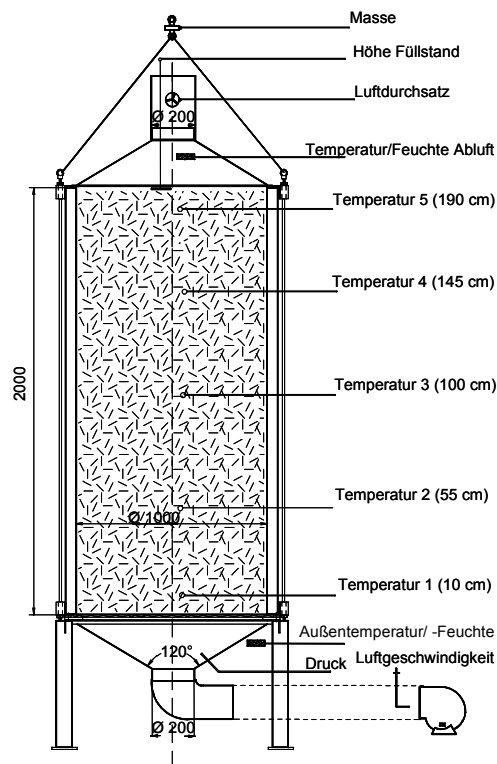


Bild 2: 1,5 m³-Modellsilo mit Sensoren

Es handelt sich hierbei also um Schüttungen von 1,5 bis 2.000 m³ Volumen (V), die überwiegend regengeschützt sind und teilweise über eine luftdurchlässige, nachfolgend auch als Spaltenboden bezeichnete, Bodenfläche verfügen. Da die Seitenwände der Silos und der Boxen wärmeisoliert sind

und somit der horizontale Wärmefluss weitgehend unterbunden wird, sind Füllungen dieser Behälter mit einem Segment eines horizontal unbegrenzten Haufens definierter Höhe vergleichbar. Die Zeitdauer t der Lagerung betrug in der Regel ein Jahr.

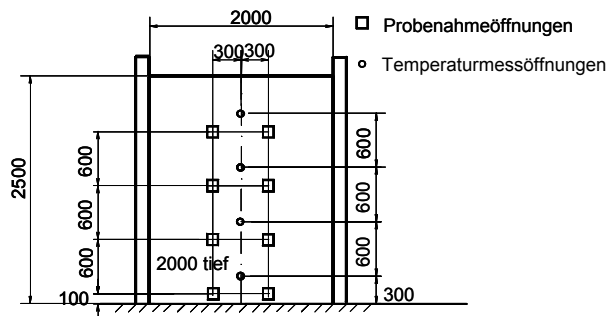


Bild 3: 10 m³-Lagerbox

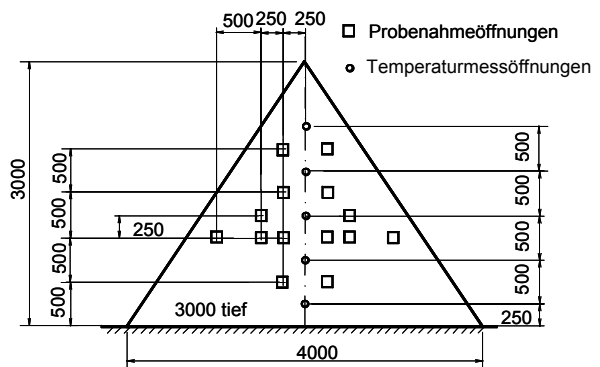


Bild 4: 18 m³-Lagerhaufen (Dreiecksmiete)

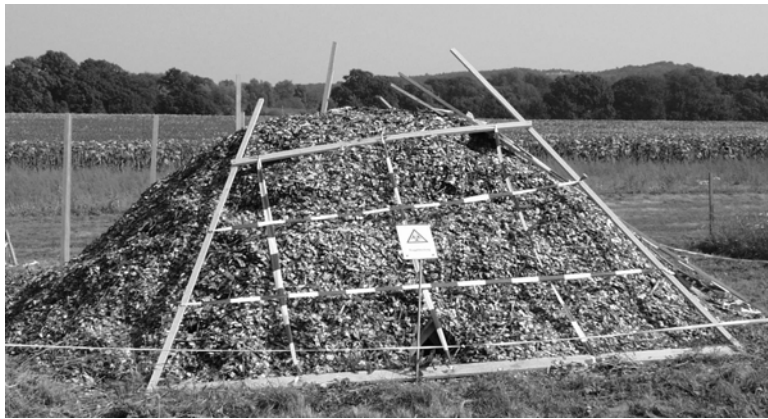


Bild 5: 70 m³-Lagerhaufen am Feldrand

Messungen und Analysen

Temperatur

Die Messung der Temperatur in den verschiedenen Schüttungen erfolgte jeweils in 4 bis 5 Höhen mit mehreren Vierdraht-PT100-Fühlern in den Lagersilos und 1,20 m langen elektronischen Mietenthermometern in den Boxen und Haufen sowie teilweise mit daumengroßen Temperatur-Minidataloggern der Fa. Gemini Data Loggers Ltd. Das Messintervall lag im Bereich von 20 Minuten bis zu 7 Tagen.

Trockenmasseverlust

Die Trockenmasseverluste wurden mit Hilfe von Bilanzbeuteln ermittelt, wie sie in ähnlicher Form zur Bestimmung von Siliverlusten in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Sie bestehen aus engmaschigen Kunststoff-Netzsäcken, die jeweils mit 500 bis 1000 g Versuchsmaterial gefüllt sind. Vor der Einlagerung in das Gutbett wurden Masse und Wassergehalt des Beutelinhalts bestimmt und nach der Auslagerung ebenfalls. Aus der Differenz errechnet sich der Trockenmasseverlust. Je Lagertyp (Silo, Box, Haufen) wurden insgesamt 6 bis 66 Bilanzbeutel (n_{Bil}) in 3 bis 6 Ebenen angeordnet.

Schimmelpilzgehalt

Die Bestimmung der Zahl der Schimmelpilze erfolgt nach der indirekten Methode. Dazu werden 20 g keimarm zerkleinerte Holzstücke (ca. 1 cm³) in 180 ml Ringerlösung ausgeschüttelt, dekadisch verdünnt und auf Malzextraktagar mit 0,01 % Chloramphenicolzusatz sowie auf DG 18 Agar aufgespaltet. Die DG 18 Platten werden nach 7-tägiger Inkubation bei 20°C (mesophile Pilze) - abweichend von der TRBA 430 (25 °C) [34] - ausgewertet und die Malzextrakt-Platten nach 1 bis 2-tägiger Inkubation bei 37 °C (thermophile Pilze). Die gewachsenen Kolonien werden gezählt und morphologisch unter-

schiedliche Kolonien identifiziert. Dazu werden die Bestimmungsschlüssel von Pitt und Hockin [29], Samson et al. [31] und Hoog et al. [30] herangezogen.

Pilzsporenmessung

Die Messung der Sporenkonzentration der Schimmelpilze in der Luft erfolgte in Anlehnung an die Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe TRBA 430 [34]. Die Proben wurden mit dem Luftkeimsammelgerät MD 8 (Fa. Sartorius, Göttingen) genommen. Dabei wurden die Pilzeinheiten auf einem Gelatinemembranfilter mit einer Porengröße von 3 μm und einem Durchmesser von 80 mm (Gelatine-Einweegeinheiten, Sartorius) abgeschieden. Für Langzeitmessung (2 Messungen pro Messpunkt) wurde mindestens 1 m^3 Luft angesaugt. Die Einstellung am MD 8 lag dabei nicht höher als 5 m^3/h . Die beaufschlagten Filter wurden in 10 ml physiologische Kochsalzlösung (0,9 %iges NaCl mit 0,01 % Tween 80, 35 - 40 °C) verbracht, ca. 30 Minuten bei 30 bis 40 °C geschüttelt und vor der Entnahme „gevortext“. Die Suspension wurde dekadisch verdünnt und ein Aliquot auf Kulturplatten mit DG 18 Agar mit 0,01 % mit Chloramphenicolzusatz und Malzextrakt-Agar (MEA) ausgespatelt. Die Kultivierung der Nähragarplatten erfolgte wie bei der Schimmelpilzanalyse bei 20 °C bzw. 37 °C.

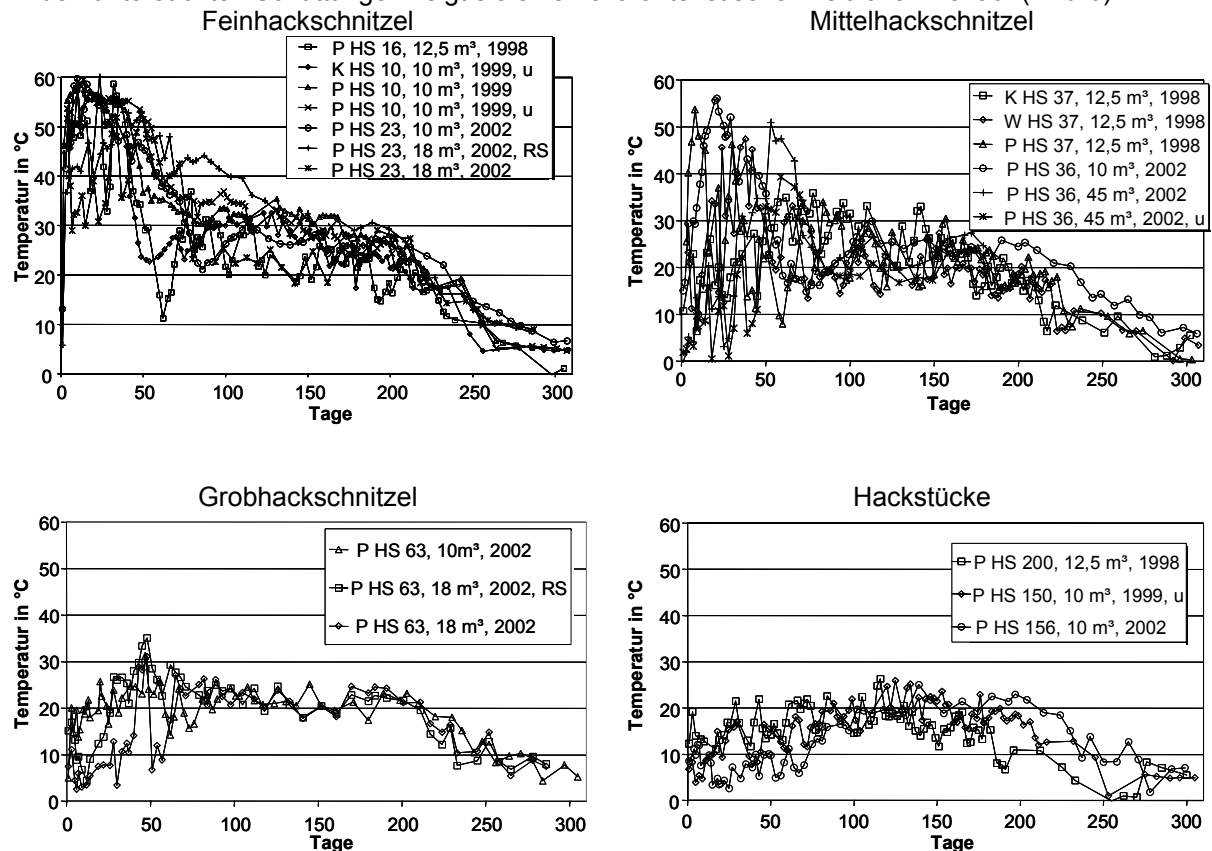
Statistische Methoden

Die Daten wurden mittels Varianzanalyse Modell 2 mittels SAS, Version 9.0 bewertet [35].

Ergebnisse und Diskussion

Temperatur

Die Temperatur in Holzhackguthaufen steht sowohl mit der Aktivität von Mikroorganismen als auch mit dem Verlust an Trockenmasse in Zusammenhang. Außerdem beeinflusst sie den Trocknungsverlauf. In den untersuchten Schüttungen zeigt sie einen charakteristischen zeitlichen Verlauf (**Bild 6**).



P...Pappel, W... Weide, K...Kiefer, RS...Regenschutz, u...Spaltenboden

Bild 6: Temperaturverläufe in Hackgut-Schüttungen unterschiedlicher Hacklänge

Unmittelbar nach der Einlagerung steigt die mittlere Temperatur sprunghaft an und erreicht nach 10 bis 50 Tagen ihren Maximalwert von ≤ 60 °C, dessen Höhe im wesentlichen von Schüttvolumen, Oberfläche, Umgebungs- bzw. Oberflächentemperatur und insbesondere von der Hackschnitzelgröße

bestimmt wird. Örtlich kann die Temperatur in der Schüttung bis auf 65 °C ansteigen. 100 bis 150 Tage nach der Einlagerung (Ende Januar) erreicht sie ein deutlich niedrigeres Niveau von $\leq (25 \dots 35)^\circ\text{C}$ und fällt danach sukzessive auf Umgebungstemperatur ab.

Die Ursache der Temperaturerhöhung ist die Wärmeentwicklung infolge der Atmung noch nicht abgestorbener Splintholzzellen ($< 40^\circ\text{C}$) und infolge der Aktivität von Mikroorganismen, insbesondere von Pilzen ($< 60^\circ\text{C}$) und Bakterien ($< 70^\circ\text{C}$). Bei Temperaturen um 60°C wird das Wachstum der Pilze gehemmt, so dass sich auf Grund der Wechselwirkung zwischen Stoffwechselaktivität und Temperatur der Haufen nicht weiter erwärmt.

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. Wie Messungen mit Einstichthermometern und mit einer Thermografie-Kamera belegen, können die Temperaturen in großvolumigen Schüttungen in gleicher Höhe örtlich um mehr als 25 K differieren. Dies ist offenbar auf die Ausbildung von sogenannten Schloten zurückzuführen, also vertikalen Zonen, in denen eine verstärkte Wärme-konvektion erfolgt [36].

Trocknung

Die Trocknung von Holz hackschnitzeln ist im wesentlichen von Anfangswassergehalt, Temperaturentwicklung und Hackschnitzelgröße abhängig. Sowohl bei Fein- als auch bei Grobhackschnitzeln und sogar bei ganzen Bäumen ($\varnothing < 80\text{ mm}$) ist die Trocknung nach 100 bis 150 Tagen im wesentlichen abgeschlossen, also mit dem Ende der Hochtemperaturphase in den Schüttungen. In Folge des hohen Strömungswiderstandes, der hohen Temperatur 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 Wassergehalte unter 30 % erreicht. 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 (**Bild 7**).

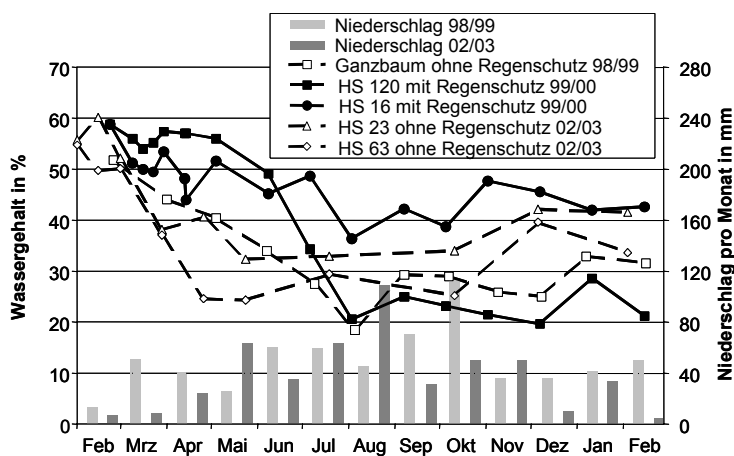


Bild 7: Typische Trocknungsverläufe in Schüttungen aus unterschiedlich zerkleinertem Pappelholz (ca. 10 m^3) mit und ohne Regenschutz

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 (**Bild 8**).

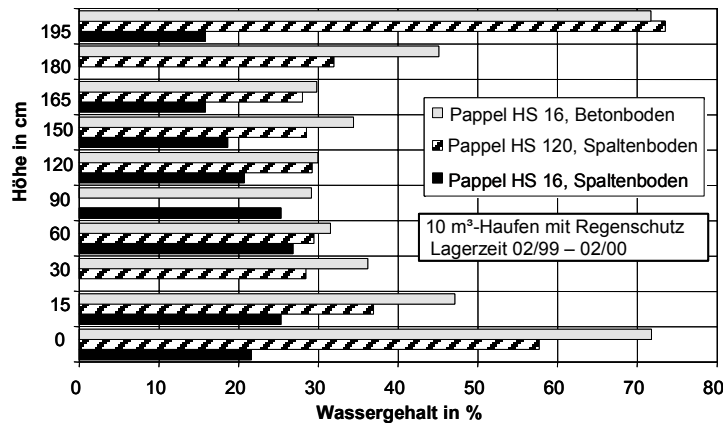


Bild 8: Feuchteprofil in 10 m³-Schüttungen aus Pappelhackgut nach einjähriger Lagerung

Ein luftdurchlässiger Spaltenboden oder Luftkanal kann zumindest in den angrenzenden Zonen zu verbesserten Trocknungsbedingungen führen, der Effekt auf den Wassergehalt der Gesamtschüttung scheint sich jedoch in Grenzen zu halten. 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 %. Dessen ungeachtet, könnte ein mit geringem Überdruck beaufschlagter Luftkanal bzw. -boden einen erheblichen Trocknungseffekt bewirken, insbesondere während der Hochtemperaturphase [36]. Allerdings würde dies zusätzliche technische und finanzielle Aufwendungen erfordern.

Schimmelpilzentwicklung

Schimmelpilze gelten als die Hauptverursacher für Trockenmasseverluste. Außerdem sind einige Arten gesundheitsgefährdend. Ihre Entwicklung weist enge Wechselwirkungen zur Temperatur im Holzhackschnittelhaufen auf. Daher steigt die Anzahl der Schimmelpilze - gemessen in koloniebildenden Einheiten pro Gramm Frischmasse (KbE/g FM) - analog der Temperatur in den ersten 10 bis 30 (100) Tagen auf den Maximalwert von etwa 10³ bis 10⁸ KbE/g FM, bleibt danach jedoch im Gegensatz zur Temperatur mehr oder weniger konstant und fällt meist nur geringfügig ab (**Bild 9**). Die Ursache dieser Diskrepanz liegt möglicherweise in der Eigenart der Pilzsporen, unter ungünstigen Wachstumsbedingungen nicht abzusterben, sondern über einen längeren Zeitraum bei verminderter Aktivität in einem Ruhezustand zu verharren und sich zahlenmäßig wenig zu verändern.

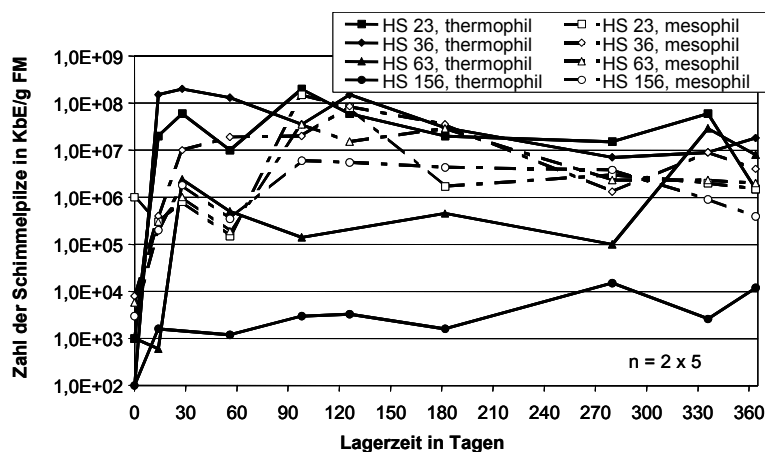


Bild 9: Entwicklung von Schimmelpilzen in 10 m³-Schüttungen aus Pappelhackgut unterschiedlicher Hacklänge (Mittelwerte aus jeweils 5 Doppelbestimmungen)

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 Schimmelpilze mit steigender Temperatur signifikant zu und erreichen zwischen 20 und 35 °C eine ähnliche Größenordnung wie die der mesophilen Pilze. 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 vorwiegend potenziell humanpathogenen Arten kann jedoch durch Vermeidung von Temperaturen über im Mittel 20 °C bzw. maximal 35 °C verhindert werden (**Bild 10**).

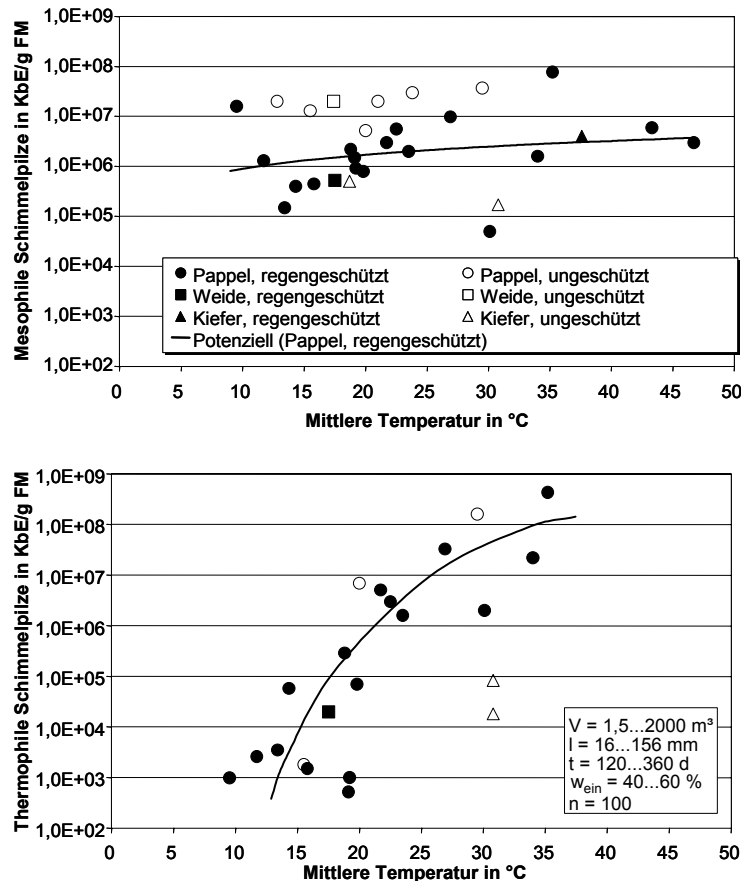


Bild 10: Mittlerer Schimmelpilzbesatz bei der Lagerung von Hackgut in Haufen in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur (Medianwerte über der Zeit)

Oben: Mesophile Pilze

Unten: Thermophile Pilze

Für die Beurteilung der Wirkung von Schimmelpilzen ist nicht nur die Anzahl, sondern auch die Spezies von Interesse. Von insgesamt jeweils 6 bis 8 identifizierten thermophilen Pilzarten wurden bei Feinhackschnitzeln 4 bis 8 und bei Grobhackstücken 2 bzw. 4 potenziell humanpathogene, toxische und/oder allergene Arten festgestellt, die während der einjährigen Lagerung zumindest zeitweilig auftraten. Der Pilz mit der höchsten humanpathogenen Potenz, *Aspergillus fumigatus*, trat während des gesamten Lagerzeitraums auf. In 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 diesbezüglich analysierten Proben nachgewiesen.

Sporemission

Die Verbreitung der Sporen, also der luftgetragenen vermehrungsfähigen Keimzellen der Schimmelpilze, ist von zahlreichen Faktoren abhängig, insbesondere jedoch von Pilzbesatz und Luftgeschwindigkeit. Die unmittelbar über den vier 10 m^3 -Pappelhackgut-Boxen gemessene Sporenkonzentration in der Luft bestätigt, dass mit wachsender Anzahl der Schimmelpilze auf dem Holz die mittlere Anzahl der Sporen in der Luft progressiv zunimmt und bei etwa 10^7 KbE/g FM Werte von über 10^4 KbE/ m^3 überschreitet (**Bild 11**).

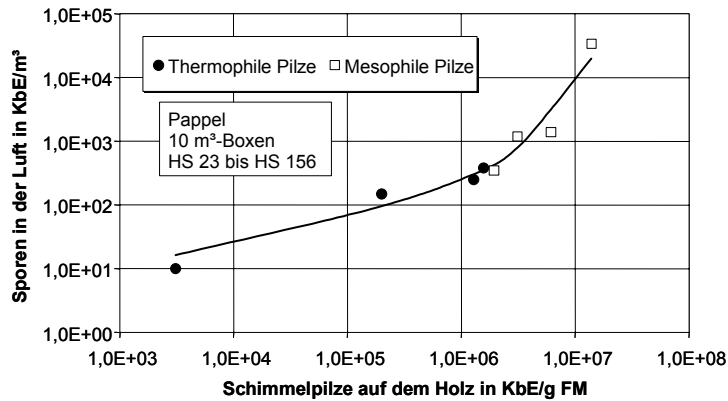


Bild 11: Zusammenhang zwischen der Anzahl der Schimmelpilze auf dem Pappelhackgut und der ca. 30 cm über 10 m³-Boxen gemessenen Sporenzahl in der Luft (Medianwerte über der Zeit)

Die bei ungestörten Hackgut-Schüttungen in unterschiedlichen Entfernungen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelte Sporenkonzentration in der Luft liegt im Bereich von 10^1 bis 10^4 KbE/m³. Damit werden die in der Umgebungsluft gemessenen Werte von $5 \cdot 10^1$ bis $5 \cdot 10^2$ KbE/m³ für mesophile und von 0 KbE/m³ für thermophile Pilzsporen um etwa ein bis zwei Zehnerpotenzen überschritten. Wie auf dem Holz dominiert auch in der Luft die thermophile Pilzspezies, *Aspergillus fumigatus*. Über Schüttungen aus Grobhackschnitzeln und -stücken (HS 63 und HS 156) ist seine Sporenkonzentration in Abhängigkeit von der Lagerzeit bis zu drei Zehnerpotenzen geringer als über Feinhackschnitzeln (HS 23) [36].

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 10^5 bis 10^8 KbE/m³ ansteigen. Damit wird beispielsweise der technische Kontrollwert (TKW) für biologische Abfallbehandlungsanlagen von $5 \cdot 10^4$ KbE/m³ für mesophile Schimmelpilze überschritten [37]. 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.

Lagerverluste

Bei der Lagerung von Holzhackgut treten Verluste auf, deren Ursache überwiegend den Schimmelpilzen 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. Örtlich, insbesondere in den Randzonen, können sogar Höchstwerte von über 40 % p.a. auftreten. Eine statistisch gesicherte Korrelation zwischen Schimmelpilzbesatz und Trockenmasseverlust ist jedoch nicht ableitbar.

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 (**Bild 12**). Bei den Mittelwerten der verschiedenen Schüttungen ist dieser Zusammenhang allerdings weniger deutlich ausgeprägt.

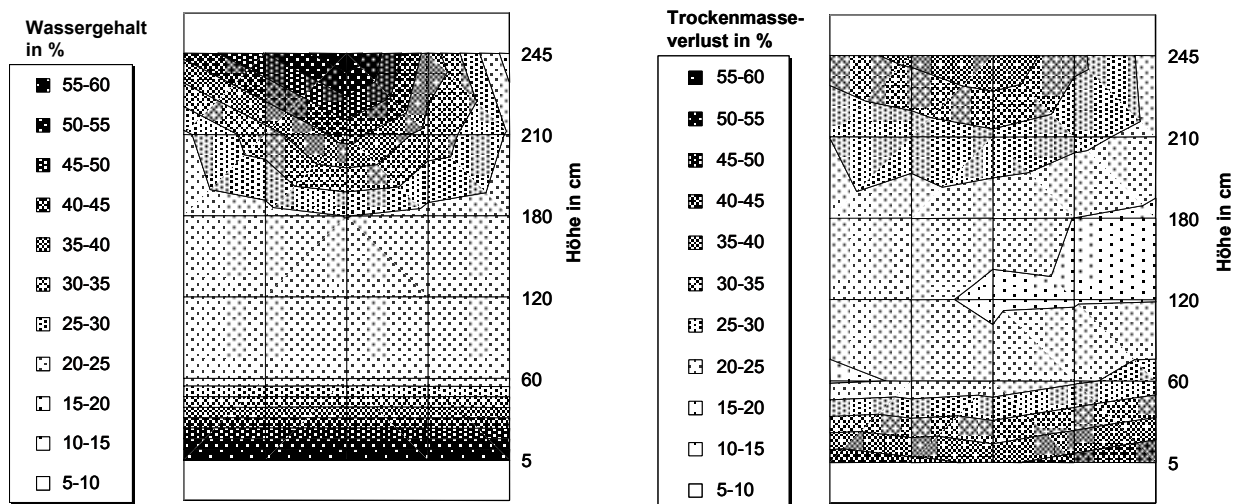


Bild 12: Typische Profile des Wassergehaltes (links) und des Trockenmasseverlustes (rechts) in 10 m³-Schüttungen aus Pappel-Mittelhackschnitzeln nach einjähriger Lagerung

Unter der Annahme, dass der Trockenmasseverlust proportional der gebildeten Wärme ist und diese wiederum proportional der Temperatur in der Schüttung, müssten Trockenmasseverlust und 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. In Feinhackschnitzelhaufen, in denen die Wärme weniger gut abgeführt wird, wirken offenbar andere Gesetzmäßigkeiten. Hier verringern sich die Verluste bei hohen Temperaturen (**Bild 13**). Die Ursache könnte die verminderte Aktivität von Schimmelpilzen aufgrund von Sauerstoffmangel und/oder zu hoher Temperatur sein. Das sich Letzteres nicht am Rückgang der Anzahl der Schimmelpilze zeigt, ist möglicherweise in der Methodik der Pilzanalyse begründet, mit der auch Pilze erfasst werden, die nach Überschreitung ihres Temperaturoptimums zwar noch lebensfähig und zählbar, aber weitgehend inaktiv sind.

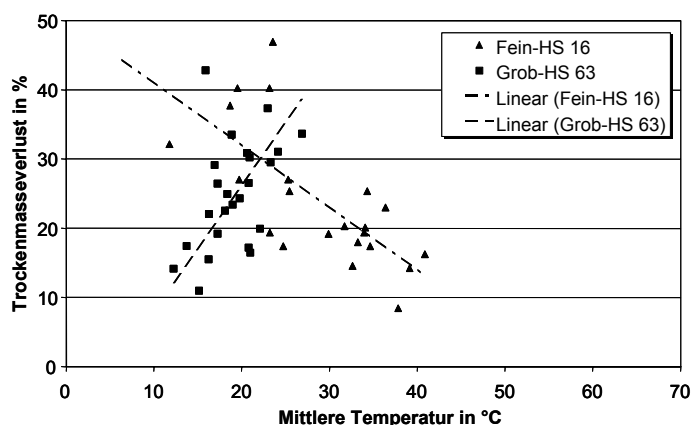


Bild 13: Örtliche Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Pappelhackschnitzeln in Abhängigkeit von der örtlichen Temperatur (Einzelwerte von Bilanzbeuteln)

Diese methodische Besonderheit könnte auch die Ursache für den offenbar 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 10⁶ KbE/g FM weitgehend konstant, obwohl die Anzahl der Pilze weiter wächst (**Bild 14**).

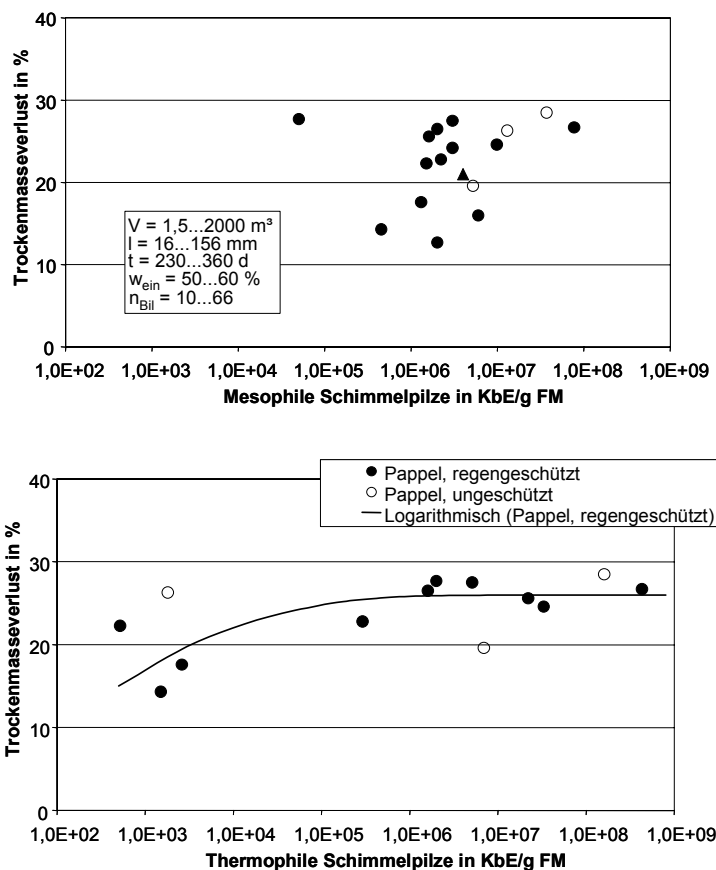


Bild 14: Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Holzhackgut in Abhängigkeit vom mittleren Schimmelpilzbesatz während der Lagerung

Oben: Mesophile Pilze

Unten: Thermophile Pilze

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der zwischen 1998 und 2003 durchgeführten 33 Lagerversuche im halb- und großtechnischen Maßstab sind in **Bild 15** zusammengefasst. Demnach hat die Hacklänge dominierenden Einfluss auf die untersuchten Parameter. Sie bestimmt die Temperatur und damit im wesentlichen Schimmelpilzentwicklung, Trocknungsverlauf und Lagerverluste in einer Schüttung. Während die mittlere Hauttemperatur eine statistisch relativ gut gesicherte Korrelation zur Hacklänge aufweist, zeigt die jeweils über mehrere Monate gemittelte Anzahl thermophiler Pilze eine erhebliche Streuung. Die Ursachen werden vornehmlich in der Stochastik des Pilzbefalls vermutet. Die Anzahl mesophiler Pilze weist - wie oben gezeigt wurde - methodisch bedingt ohnehin keine Temperaturabhängigkeit auf. Die Trockenmasseverluste zeigen in Abhängigkeit von der Hacklänge einen unerwarteten Verlauf. Zwar sind sie bei kleinen Hackschnitzeln < 60 mm deutlich höher als bei großen Hackstücken > 120 mm, doch überschreiten sie bei sehr feinen Hackschnitzeln < 20 mm nicht 30 % p.a. (gestrichelter Bereich der Regression). Die möglichen Ursachen (Temperatur, Sauerstoffmangel) sind vorn genannt. 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 der Änderung des unteren Heizwertes, der sich bei Langzeitlagerung jedoch nur wenig verändert [19]. Bei Feinhackschnitzeln HS 16 ist der Energieverlust 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 und aufgrund des geringen End-Wassergehaltes im Bereich von - 5 % bis + 5 % p.a.

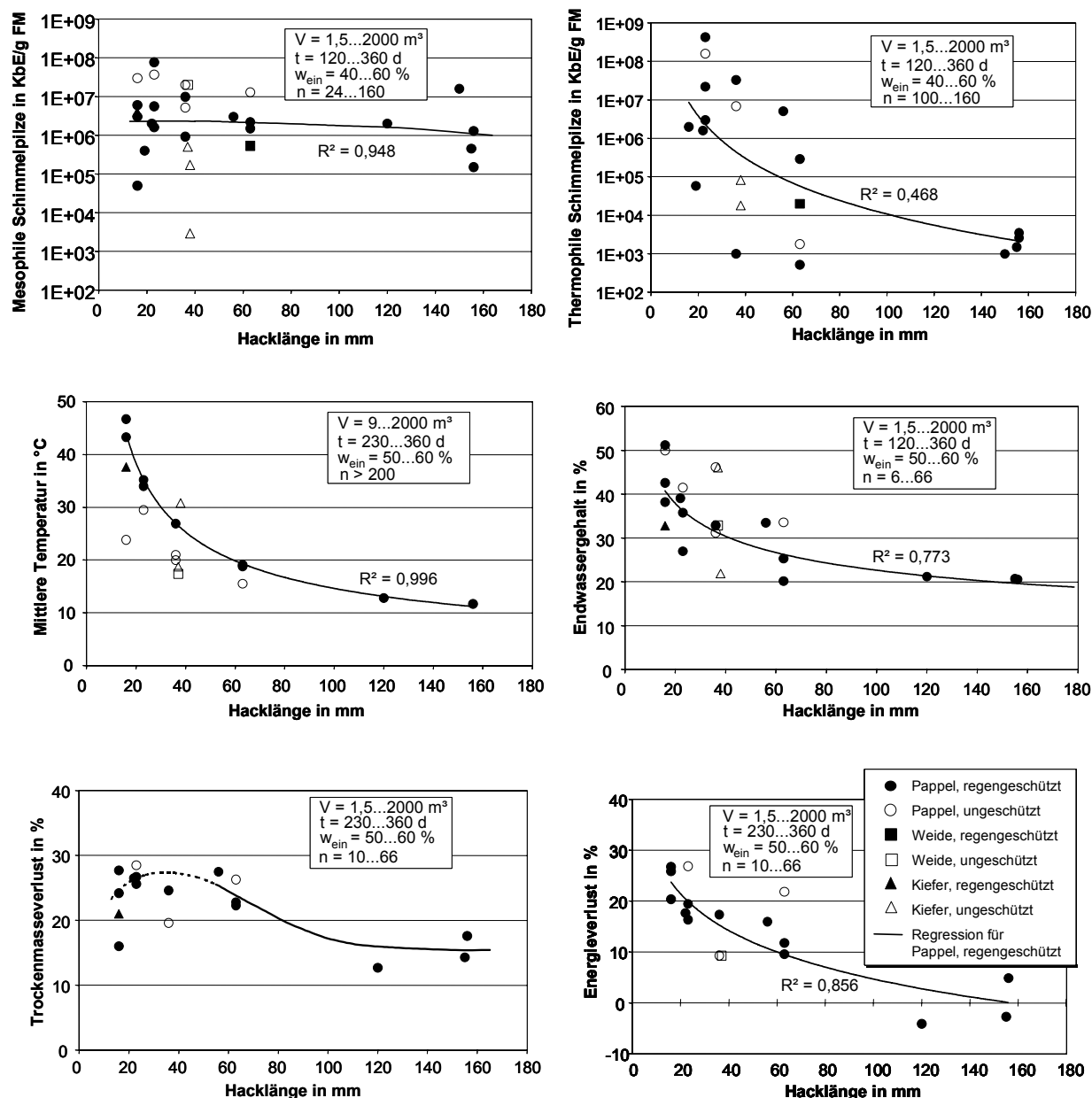


Bild 15: Einfluss der Hacklänge auf Schimmelpilzbesatz und Temperatur während der Langzeitlagerung von Holzhackschnitzeln sowie auf Wassergehalt und Verluste bei der Auslagerung (Medianwerte von jeweils n Einzelwerten je Messpunkt)

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann festgestellt werden, 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 100 mm aufweisen (entsprechend einer Sieblochweite von ca. 40 bis 50 mm), also im oberen Bereich der größten Hackschnitzelklassen der bestehenden österreichischen und der im Entwurf befindlichen europäischen Norm liegen. Grobhackschnitzel von etwa 60 mm Länge (Median) verursachen Energieverluste von über 10 % pro Jahr und häufig mehr als 10^5 koloniebildende Einheiten thermophiler Pilze pro Gramm Frischmasse. Feinhackschnitzel unter 30 mm bewirken noch deutlich höhere Verluste und Pilzbelastungen. Um bei Fein- und Mittelhackschnitzeln (< 50

mm) die Pilzbelastung in Grenzen zu halten, sollten in unbelüfteten Haufen Lagerzeiten von 1 bis 2 Wochen nicht überschritten werden.

Nach einem Jahr Lagerung liegen die mittleren Wassergehalte der Schüttungen zwischen 20 % bei Grobhackstücken und bis zu 50 % bei Feinhackschnitzeln. 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.

Zum Einfluss der Holzart auf Schimmelpilzbesatz und Verluste von Hackschnitzeln können aus den durchgeführten Untersuchungen keine gesicherten Aussagen abgeleitet werden. Der augenscheinlich deutlich geringere Pilzbesatz bei Kiefer gegenüber Pappel konnte analytisch nicht bestätigt werden.

Weiterführende Untersuchungen sollten u.a. dem letzten Problem nachgehen, also Lagerverluste und Schimmelpilzwachstum für andere Holzarten klären. Darüber hinaus sollten Pilzsporenmessungen in Praxisanlagen durchgeführt werden, um das reale Gefährdungspotenzial abzuschätzen, sowie ingenieurtechnisch und mikrobiologisch begründete Dimensionierungsgrundlagen für Holzhackschnitzellager entwickelt werden.

Literatur

- [1] *Fischer, A.; Dahle, S.*: Persönliche Mitteilung. ZAB Brandenburg und IHK Potsdam, 2.5.2005
- [2] *Scholz, V.; Hellebrand, H.J.; Höhn, A.*: Energiepflanzen im Vergleich – Ertrag und Umweltverträglichkeit (Teil I). energie-pflanzen IV/2004, S. 13-16
- [3] *Scholz, V.; Grundmann, P.*: Energiepflanzen im Vergleich – Energiegewinn und Produktionskosten (Teil II). energie-pflanzen VI/2004, S. 13-16
- [4] *Burger, F.; Scholz, V.*: Stand der Technik bei der Ernte von Energiewäldern. Holz-Zentralblatt Nr. 46 (2004) S. 610-611
- [5] *Crawford, R.L.*: Mutualistic of the lignin model compound veratrylglycerol- β -(o - methoxyphenyl) ether by bacteria. Can. J. Microbiol. 21, 1654 – 1657, 1975
- [6] *Reiß, J.*: Schimmelpilze-Lebensweise, Nutzen Schaden Bekämpfung. 2. Aufl. Springer-Verlag, 1997
- [7] *Wagenführ, R.M.; Scheiber, A.*: Holzatlas. 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 1985
- [8] *Scholz, V.; Ilder, 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, 5./9.6.2000
- [9] *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
- [10] *Brusche, R.*: Verfahren zur Bergung, Lagerung und Trocknung von Hackschnitzeln aus Schwachholz Dissertation, Universität Kiel, 1983
- [11] *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
- [12] *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, Research Notes 134, Schweden, 1988*
- [13] *Wagenführ, A.*: Praxisrelevante Untersuchungen zur Nutzung biotechnologischer Wirkprinzipien bei der Holzwerkstoffherstellung. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1988
- [14] *Weingartmann, H.*: Hackgut-Trocknung, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, ISBN 3-9005-3478-0, 81 S., 1991
- [15] *Weingartmann, H.; Prankel, H.*: Hackguttrocknung Wippenham. unveröfftl. Bericht, BOKU Wien, 1994
- [16] *Brunner, T.; Obernberger, I.*: Trocknung von Biomasse – Grundlagen und innovative Technik. In: Tagungsband der 3. Internat. Fachtagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, Freiberg, 1997, S. 86-94
- [17] *Rink, H.*: Trocknung von Holzhackschnitzeln durch freie Konvektionslüftung. Diplomarbeit, Universität Rostock, 1997
- [18] *Stockinger, H.; Obernberger, I.*: Logistik der Brennstoffversorgung von Biomasse-Nahwärmanlagen. Report for the FWF research project P10669-ÖTE, TU Graz, 1997
- [19] *Kirschbaum, H.-G.*: Lagerung von Holzhackschnitzeln für eine energiewirtschaftliche Nutzung. In: Beiträge des IBZ Hohen Luckow e.V. 4/1998, S. 159-171

- [20] *Stockinger, H.; Obernberger, I.*: Systemanalyse der Nahwärmeversorgung mit Biomasse. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, TU Graz, 1998
- [21] *Webenau, B.; Krausenboeck, B.; Göldner, A.*: Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Bericht, Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, Freising, 1999
- [22] *Bergmann, Ö.; Nilsson, T.*: An experiment on outdoor storage of whole-tree-chips. Rapport Nr. 109, Swedish University of Agricultural Sciences, 1978
- [23] *Feicht, E.*: Hackschnitzel-Alveolitis Studie. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2001
- [24] *Mücke, W.; Lemmen, Ch.*: Umweltentwicklung Bayern, Schimmelpilze, Bay. Stm. Landesentw. u. Umweltfragen Nr. 135, 1999
- [25] *Sieber, W.; Siemon, G.*: Exogen-allergische Alveolitis durch Pilzsporen in schimmeliger Blumen-erde. Medizinische Klinik II, Regensburg, Allergologie, 1996, 19:3, 142-144
- [26] *Guelaud, C.; Fruit, J.; Vannimetus, C.; Wallaert, B.; Tonnel, A.B.*: Occupational extrinsic allergic alveolitis due to *Aspergillus oryzae*. Revue des Maladies Respiratoires. 10, 4, 362-365; 9, 1993
- [27] *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. Okt. 1994 in Stuttgart-Hohenheim
- [28] *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. Okt. 1994 in Stuttgart-Hohenheim
- [29] *Pitt, J.I.; Hockin, A.D.*: Fungi and Food Spoilage. Blackie Academic & Professional, 2. Auflage, 1997
- [30] *Hoog, G.S.; Guarro, J.; Gene, J.; Figueras, M.J.*: Atlas of clinical fungi. 2nd edition, Centraalbureau voor Schimmelcultures, Universität Rovira I Virgili, 2000
- [31] *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
- [32] ÖNORM M 7133: Energiehackgut - Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 1988
- [33] prCENTS/TS 14961: Solid biofuels – Fuel Specifications and Classes. Europäisches Komitee für Normung, unveröffentl. Entwurf, Brüssel, Juli 2004
- [34] TRBA Nr. 430: Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Verfahren zur Bestimmung der Schimmelpilzkonzentrationen in der Luft am Arbeitsplatz. Bundesarbeitsblatt 8/2001
- [35] SAS Institute Inc. 2002. SAS OnlineDoc® 9. Cary, NC: SAS Institute Inc
- [36] *Scholz, V.; Ilder, C.; Davies, W.; Egert, J.; Gottschalk, K.*: Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut. Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 39, ATB Potsdam-Bornim, 2005
- [37] TRBA Nr. 211: Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Biologische Abfallbehandlungsanlagen, Schutzmassnahmen. Bundesarbeitsblatt 83-88, 8/2001

Diese Arbeiten wurden von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) bzw. vom Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) gefördert.

Autoren

Dr.-Ing. Volkhard Scholz
Abt. Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam
Tel.: +49-331-5699-312,
Fax: +49-331-5699-849
E-Mail: vscholz@atb-potsdam.de

Dr. rer. nat. Christine Idler
Abt. Bioverfahrenstechnik
Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam
Tel.: +49-331-5699-124,
Fax: +49-331-5699-849
E-Mail: cidler@atb-potsdam.de

Dipl.-Ing. Werner Daries
Abt. Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam
Tel.: +49-331-5699-326,
Fax: +49-331-5699-849
E-Mail: wdaries@atb-potsdam.de

Dr. rer. nat. Johannes Egert
Büro für Holzschutz und Wohnraumhygiene
Forststraße 101
14471 Potsdam
Tel.: +49-331-960534
Fax: +49-331-960534
E-Mail: johannes.egert@freenet.de