

Energieholztrocknung

Endbericht



im Auftrag von



Energieholztrocknung

Endbericht

HFA-Nr.: F1887/04

Beauftragt durch

Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier

Autoren

DI Dr. Michael Golser

DI Wilfried Pichler

Florian Hader

Wien, März 2005

Vorwort

Der Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Energieholz kommt im Zuge der Expansion der erneuerbaren Energieträger in Österreich immer mehr Bedeutung zu. Trocknung von Energieholz ist dabei ein zentrales Thema. Die Mitglieder des Kooperationsabkommens Forst-Platte-Papier (Arbeitskreis Bioenergie; Vorsitzender: GD DI Dr. F. Fuhrmann) haben diese Entwicklungen zum Anlass genommen, um sich im Rahmen einer Forschungsarbeit dieser Thematik verstärkt zu widmen. Vorhandenes Wissen in Wissenschaft und Praxis soll dabei zusammengetragen, gesichtet und praxisgerecht dargestellt werden, sowie Wissenslücken aufgezeigt und Forschungskonzepte für deren Klärung erarbeitet werden. Im Sommer 2004 wurde die Holzforschung Austria von FPP mit der fachlichen Umsetzung dieser Aufgaben betraut. Die Arbeit der Holzforschung Austria wurde während des Projektes von Experten des FPP-Arbeitskreises - DI Schopfhauser (Papierholz Austria), Ing. Hinterholzer (Fa. Egger), DI Dr. Jauschnegg (LWK Steiermark) - fachlich begleitet und unterstützt. In das Projekt aktiv mit einbezogen war weiters das Institut für Holzforschung an der Universität für Bodenkultur im Rahmen einer durch Univ. Prof. DI Dr. Alfred Teischinger betreuten Diplomarbeit (Diplomand: Florian Hader). Neben der Aufarbeitung von schriftlich vorliegenden Ergebnissen zum Thema Energieholztrocknung wurde im Rahmen eines Workshops sowie bei Interviews bestehendes Wissen aus der heimischen Praxis gesammelt und in die Studie integriert. Den Beteiligten sei nochmals sehr herzlich für ihre Kooperationsbereitschaft gedankt.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	8
2	TROCKNUNG VON ENERGIEHOLZ ENTLANG LOGISTISCHER KETTEN	10
3	GRUNDLAGEN DER HOLZTROCKNUNG	15
3.1	Bindung des Wassers im Holzkörper	15
3.2	Trocknungspotential der Luft	17
3.3	Sorptionsgleichgewicht des Holzes	18
3.4	Strömungswiderstand von Schüttgütern	19
3.5	Belüftungsmenge und Luftführung	21
3.6	Zusammenfassung - Trocknungsgrundlagen	22
4	EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN WASSERGEHALT VON FRISCHEM ENERGIEHOLZ	23
4.1	Verteilung des Wassers in Holz und Rinde	23
4.2	Schlägerungszeitpunkt	31
4.3	Zusammenfassung - Einflussfaktoren auf den Wassergehalt	32
5	EFFEKT DER TROCKNUNG AUF DIE QUALITÄT VON ENERGIEHOLZ	34
5.1	Steigerung des Heizwertes durch Trocknung	34
5.2	Trockensubstanzverlust und Lagerfähigkeit	35
5.3	Zusammenfassung - Heizwert, Trockensubstanzverlust und Lagerfähigkeit	42
6	GESUNDHEITLICHE GEFÄHRDUNG DURCH SCHIMMELPILZE	43
7	ÖKOLOGISCHE ASPEKTE DER ENERGIEHOLZTROCKNUNG	45

7.1	Gefährdung durch Käferbefall während der Trocknungsphase	45
7.2	Problematik des Nährstoffentzug bei Ganzbaumnutzung	46
8	NORMATIVE KATEGORISIERUNG VON ENERGIEHOLZ ENTSPRECHEND DEM WASSERGEHALT	47
8.1	Regelungen für Österreich	47
8.2	Regelungen für Europa	48
9	METHODEN ZUR NATÜRLICHEN TROCKNUNG VON ENERGIEHOLZ IM FREILAND	50
9.1	Ganzbaum-Trocknung	50
9.2	Trocknung von Rundholz in Poltern	58
9.3	Trocknung von Waldhackgut	67
9.3.1	Schnelltrocknung am Boden durch Sonneneinstrahlung	67
9.3.2	Trocknung in Piles	67
9.3.3	Trocknung in Harpfen	70
9.3.4	Trocknung in überdachten Gebäuden	71
9.3.5	Freilandtrocknung von Schlagabraum	72
10	TECHNISCHE TROCKNUNG VON WALDHACKGUT	74
10.1	Belüftungskühlung	74
10.2	Belüftungstrocknung	75
10.3	Warmlufttrocknung	76
10.4	Trocknung durch gesteuerte Mikrobiologie	77
10.5	Trocknung durch starke Selbsterwärmung	78
10.6	Solartrocknung	79
10.7	Industrielle Trocknungsverfahren	81
10.7.1	Trommeltrockner	81
10.7.2	Bandrockner	82

10.8	Trocknungssysteme aus der Landwirtschaft	82
10.9	Kosten verschiedener Verfahren zur Hackguttrocknung	83
11	WORKSHOP – ENERGIEHOLZTROCKNUNG	85
11.1	Ganzbaum-Trocknung	86
11.1.1	Ausgangspunkt der Diskussion	86
11.1.2	Welche Erfahrungen gibt es in der Praxis?	86
11.1.3	Lagerplatz	86
11.1.4	Gestaltung der Lagerung	87
11.1.5	Kombination mit Ernteverfahren	87
11.1.6	Kosten und Wirtschaftlichkeit	88
11.1.7	Phytoparasitäres Risiko	88
11.1.8	Allgemeines	89
11.2	Trocknung von Rundholz in Poltern	89
11.2.1	Ausgangspunkt der Diskussion	89
11.2.2	Welche Erfahrungen gibt es in der Praxis?	90
11.2.3	Lagerort	90
11.2.4	Gestaltung der Lagerung	91
11.2.5	Kombination mit Ernteverfahren	92
11.2.6	Kosten und Wirtschaftlichkeit	92
11.2.7	Phytoparasitäres Risiko	92
11.2.8	Kritische Einwände	93
11.3	Trocknung von Schlagabraum	93
11.3.1	Ausgangspunkt der Diskussion	93
11.3.2	Bündelung – Erfahrungen aus der Praxis	94
11.3.3	Probleme bei der Nutzung von Schlagabraum	94
11.4	Trocknung von Waldhackschnitzeln	95
11.4.1	Ausgangspunkt der Diskussion	95
11.4.2	Welche Erfahrungen gibt es in der Praxis?	96
11.4.3	Trocknungsqualität	96
11.4.4	Lagerbedingungen	96
11.4.5	Selbsterwärmung	97
11.4.6	Gesundheitsrisiko	97

12	VERSUCHSKONZEPT	98
12.1	Trocknung von Ganzbäumen	98
12.1.1	Versuchsaufbau im Überblick	99
12.1.2	Auswahl der Baumarten und Standorte	100
12.1.3	Auswahl der Schlägerungszeitpunkte	103
12.1.4	Auswahl der Versuchsbestände	103
12.1.5	Dokumentation des Mikroklimas am Lagerplatz	104
12.1.6	Auszeige und Aufbau der Versuchsstapel	104
12.1.7	Kennzeichnung der Versuchsstapel	107
12.1.8	Festlegung der Zeitpunkte für die Probenentnahmen	108
12.1.9	Vorgehensweise bei der Probenentnahme	109
12.2	Trocknung von Rundholz	110
12.2.1	Versuchsaufbau für die Rundholztrocknung im Überblick	110
12.2.2	Auswahl der Baumarten und Standorte	111
12.2.3	Durchführung der Versuche im Wald	111
12.2.4	Durchführung der Versuche am Rundholzlagerplatz	113
12.3	Trocknung von Schlagabraum	119
12.3.1	Auswahl der Baumarten und Standorte	120
12.3.2	Auswahl der Versuchsbestände	120
12.3.3	Lagerungsformen und Lagerungsdauer	121
12.3.4	Schema der Probenentnahme	122
13	ZUSAMMENFASSUNG	124
14	LITERATURVERZEICHNIS	132

1 Einleitung

Neuinstallationen von holz- und rindebefeuerten Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromproduktion haben in den letzten Jahren rasant zugenommen. Besonders hervorzuheben ist der Boom bei den Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK). Gesetzliche Regelungen wie das Ökostromgesetz, Steuervorteile gegenüber Öl und Gas sowie gezielte Fördermaßnahmen für Bioenergieanlagen auf Landes- und Gemeindeebene haben diesen Trend gefördert. Laut Angaben führender Proponenten der österreichischen Forst- und Holzwirtschaft wird die damit induzierte Nachfrage nach festen Biobrennstoffen künftig aber nur zu befriedigen sein, wenn zusätzliche Rohstoffpotenziale aus den Wäldern freigesetzt werden können. Mit der Fertigstellung der derzeit noch in Planung oder in Bau befindlichen KWK-Anlagen wird sich besonders nach 2006 der Rohstoffbedarf noch weiter erhöhen. Eine zusätzliche Nutzung von Industrieholzabfällen stellt unter den gegenwärtigen Marktbedingungen keine Alternative dar. Vielmehr gilt es die Energieressource Nr. 1 – den heimischen Wald – zur Deckung der Nachfrage verstärkt zu nutzen. Um dies letztlich auch wirtschaftlich sinnvoll tun zu können, bedarf neben einer optimierten Logistikkette auch eines qualitativ hochwertigen Brennstoffs.

Warum ist nun die Trocknung von Energieholz so wichtig? - weil damit viele qualitätsrelevanten Parameter des Brennstoffes Holz – wie z.B. Lagerfähigkeit, Energiedichte, Transportgewicht, Aschegehalt, Emissionen, Anlagenwirkungsgrad - positiv beeinflusst werden können. Wird beispielsweise im Zuge der Trocknung der Wassergehalt von einem Schüttraummeter (Srm) Hackgut von 50% auf 25% gesenkt, dann steigt der Heizwert von knapp 590 kWh/Srm auf 650 kWh/Srm. Das heißt, für dieselbe Heizleistung sind etwa 10 % weniger Brennstoff nötig. Aufgrund der geringeren Brennstoffmenge sinkt zudem die Abgasmenge und der Aschenanfall. Wird Energieholz in Form von Rundholz transportiert, beeinflussen die gewichtsmäßigen Beschränkungen die Lademenge. Trocknung bedeutet in diesem Fall, dass je LKW-Ladung mehr Holz transportiert werden kann. Die Transportkosten werden also durch Wegfall des nutzlosen Wasserballasts vermindert. Trocknung bedeutet auch Gewährleistung einer verbesserten Lagerfähigkeit. Gehacktes Energieholz wird überhaupt erst nach Unterschreitung eines bestimmten Wassergehaltes länger lagerfähig.

Bei der Trocknung von Energieholz gilt es, die dargestellten Vorteile von trockenem Holz mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen. Ziel dieser Untersuchung ist es, einfache und kostengünstige Möglichkeiten zur Trocknung von Energieholz aufzuzeigen. Diese Verfahren sollen zur Bereitstellung eines qualitativ hochwertigen Brennstoffes beitragen,

die natürlichen Ressourcen schonen und sowohl Anbietern als auch Verbrauchern von Energieholz zu einer höheren Wertschöpfung verhelfen.

Folgende Mittel wurden zur Erreichung dieser Zielsetzung eingesetzt: Zu dem vorhandenen Wissen über Energieholztrocknung wurde eine umfangreiche Literaturstudie durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studie sind in den Kapiteln 3 bis 10 dargestellt. Der Literaturstudie vorangestellt ist eine Analyse der Logistikketten über welche Energieholz aus dem Wald bereitgestellt werden kann. Zur Ergänzung des Wissens aus der Literatur wurden österreichische Experten zu einem Workshop eingeladen, bei welchem die Themen der Energieholztrocknung ausführlich diskutiert wurden. Die Ergebnisse dieses Workshops sind in Kapitel 11 zusammengefasst. Schließlich wurde zu den wichtigsten Verfahren die sich für die Trocknung von Energieholz herauskristallisierten ein Versuchskonzept für Praxisversuche entwickelt. Dieses Versuchskonzept ist Inhalt von Kapitel 12. Mithilfe dieses Versuchskonzeptes sollen in einer Fortsetzung dieser Studie die vorhandenen Wissenslücken geschlossen werden, um daraus praxistaugliche und wirksame Richtlinien für die Trocknung von Energieholz zu erarbeiten.

2 Trocknung von Energieholz entlang logistischer Ketten

Vor der Auseinandersetzung mit dem Thema Energieholztrocknung ist es dienlich einen Blick auf die logistischen Ketten zu werfen, entlang welcher Energieholz anfällt. Das Sortiment Energieholz hat, wenn es aus der Forstwirtschaft kommt, je nach Art der Waldnutzung unterschiedliche Stellungen im Produktionsprozess. Bei der klassischen Holznutzung für die Schnittholzproduktion fällt es als Nebenprodukt an. Je nach Dimension steht es als Ergänzung zum Industrieholz mit kleineren Durchmessern, oder in Konkurrenz zum Industrieholz, wenn auch größere Durchmesser genutzt werden. Im Zuge von Erstdurchforstungen, wenn sehr schwache Dimensionen geerntet werden, kann das Energieholz auch als einziges Sortiment anfallen und dabei einen Beitrag für die Finanzierung der Waldpflege abwerfen. Die kleinsten von der Industrie genutzten Durchmesser liegen bei 7 cm (Zopf) und zum Teil auch darunter (Dünnholz).

Auch wenn Energieholz als Sortiment in Zukunft an Bedeutung gewinnen sollte, wird es dennoch hauptsächlich als Nebenprodukt anfallen. Als solches wird Energieholz nicht bestimmender Teil der Logistikkette sein, sondern muss in die bestehenden Abläufe eingliederbar sein. Wie viele aktuelle Untersuchungen aus Österreich zeigen, besteht für die Produktion von Energieholz ein sehr enger Kostenrahmen, welcher es nicht erlaubt, aufwändige Manipulations-, Transport- oder Trocknungsmaßnahmen zu treffen. Auf der anderen Seite zeichnet sich ab, dass künftig bei der Lieferung von Energieholz an Heiz- und KWK-Kraftwerke der Wassergehalt des angelieferten Holzes einen wesentlichen Einfluss auf den Preis haben wird. Die Herausforderung besteht also darin, mit möglichst geringem Aufwand eine größtmögliche Trocknung des Brennstoffes zu erreichen. Dies zeichnet sich besonders deutlich ab, wenn man das Stück-Masse Gesetz beachtet, welches besagt, dass mit sinkendem Durchmesser der Sortimente die Kosten pro geernteter Masse progressiv ansteigen. Energieholz wird zu einem Großteil aus kleinen Dimensionen gewonnen, was den Kostendruck bei der Produktion verschärft. Kramer et al. (1988) und Hakkila et al. (1979) ermittelten den Anteil verschiedener Komponenten an der gesamten Baum-Biomasse. Kramers Untersuchungen (Abbildung 1, links) beziehen sich auf die gesamten Holzvorräte Deutschlands, Hakkila beschreibt die Biomasse-Komponenten einzelner Bäume in Abhängigkeit von deren Durchmesser (Abbildung 1 rechts). Die Abbildungen zeigen, dass beträchtliche Mengen an Biomasse in Baumteilen vorhanden sind, welche bisher nicht genutzt wurden. Diese Baumanteile, es handelt sich in erste Linie um unverkäufliches Holz mit Durchmessern unter 7 cm, fallen häufig im Zuge von Holzernte und Pflegemaßnahmen an, bleiben dann aber meist im Wald liegen.

Diese Holzanteile, welche gut 10 % der gesamten vorhandenen Holzmenge darstellen, werden in Zukunft einen Schwerpunkt bei der Nutzung von Energieholz bilden.

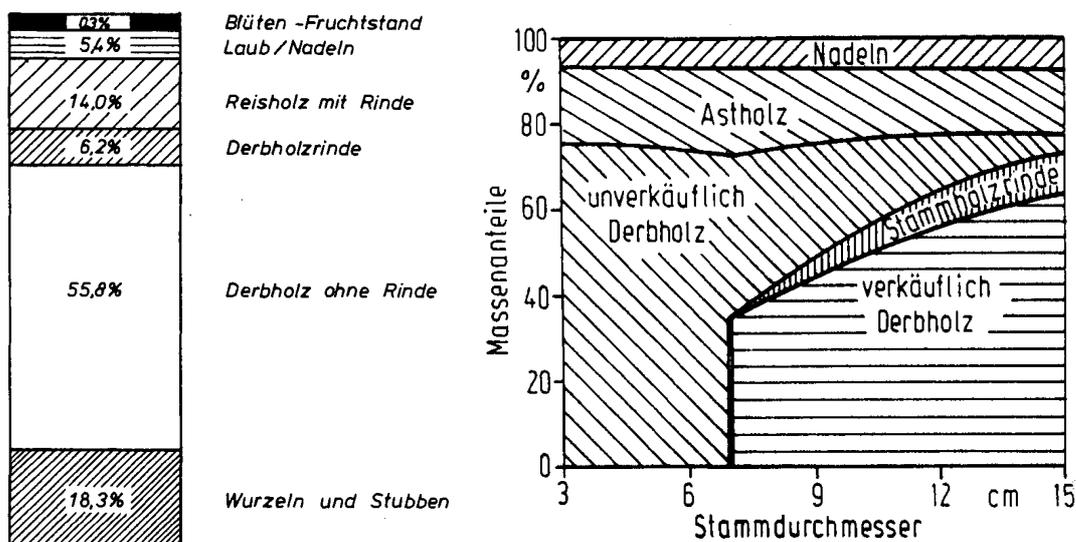


Abbildung 1: Verteilung der Baumanteile an der Gesamtmenge des Holzes. Links: Kramer et al (1988), Bezug auf die Gesamte Holzmenge Deutschlands, Rechts: Hakkila et al. (1979), (aus Brusche 1983), Bezug auf Einzelbäume in Abhängigkeit von deren Durchmesser.

Der zweite wichtige Anteil von nutzbarem Energieholz sind jene Holz mengen, welche nicht aufgrund der Dimension, sondern wegen ihrer Qualität bisher ungenutzt blieben. Dazu gehören derzeit schlecht vermarkt bare Baumarten oder Holz das durch Fäule- oder Käferschäden für höherwertige Verarbeitung ungeeignet ist.

Betrachtet man die logistische Kette entlang welcher die Energieholzsortimente anfallen, dann lassen sich unterschiedliche Stellen ausscheiden, die sich für eine Zwischenlagerung zum Zwecke der Trocknung anbieten. Aufgrund der Zielsetzung dieser Studie wurden in dieser Betrachtung, die aus der Industrie kommenden Energieholz-Sortimente nicht berücksichtigt. Abbildung 2 stellt den Arbeitsprozess von der Holzernte bis zur energetischen Nutzung des Energieholzes dar. Die im Ernteprozess anfallenden Sortimente sind Ganzbäume, Rundholz und Schlagabraum bzw. Waldhackgut.

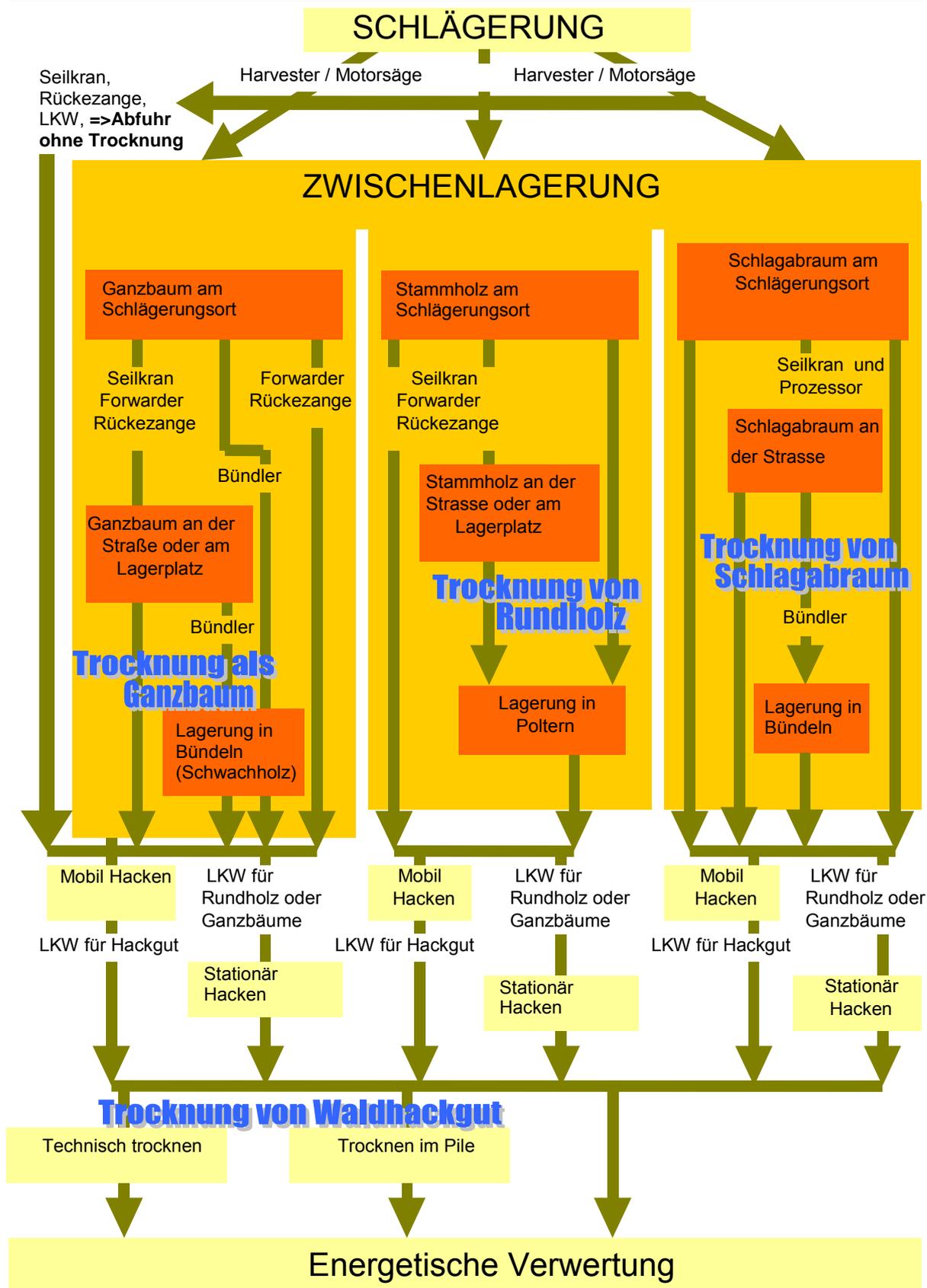


Abbildung 2: Möglichkeiten zur Trocknung von Energieholz entlang logistischer Ketten: Trocknung von Ganzbäumen, Trocknung von Rundholz, Trocknung von Schlagabraum

Folgende Zwischenlagerungen sind dabei möglich und kommen für die Trocknung von Energieholz in Frage:

Ganzbäume können direkt am Schlägerungsort einzeln oder in kleinen Stapeln gelagert werden. Einzelne Lagerung bietet sich bei der Ernte mit der Motorsäge an, Lagerung in kleinen Stapeln kann bei der Ernte mithilfe von Harvestern oder mit Feller-Buncher Systemen vollzogen werden; später bietet sich der Abtransport mit der Rückezange an. Die Lagerung von Ganzbäumen an der Straße oder auf einem Lagerplatz wird aus Platzgründen auf größeren Stapeln erfolgen. Eine weitere Möglichkeit, die derzeit in Österreich noch in den Anfängen steht, ist die maschinelle Bündelung von Schlagrücklässen, welche auch für sehr kleine Bäume aus Durchforstungen zum Einsatz kommen könnte.

Entastetes **Rundholz** aus Harvester-Nutzungen kann stapelweise an der Harvester-Linie gelagert werden, wenn die Rückung von der Ernte zeitlich entkoppelt ist. Wird entastetes Energieholz zusammen mit den andern Sortimenten aus dem Bestand gebracht, dann kann es entweder an der Forststraße oder auf einem Lagerplatz für die Trocknung zwischengelagert werden.

Schlagabraum kann im Zuge von Endnutzungen direkt am Schlägerungsort in Form von zusammengeschobenen Haufen oder Fratten zwischengelagert werden. Fällt der Schlagabraum durch Prozessoraufarbeitung an der Straße an, so kann er dort in großen Haufen gelagert werden oder zu Bündeln verarbeitet werden, welche sich gleich wie Rundholz stapeln lassen.

Zum Hacken kann das Material je nach Transportfähigkeit entweder auf einem zentralen Hackplatz gebracht werden oder mit einem mobilen Hacker direkt am Lagerort im Wald gehackt werden.

Eine ähnliche Unterteilung der Lagerungsmöglichkeiten wurde bereits in früheren Untersuchungen zur Bereitstellung von Waldhackgut getroffen (NEUßER et al. 1981b). Abweichungen dazu ergeben sich aufgrund von Neuentwicklungen in der Holzerntetechnik. Unter weiterer Vereinfachung der Lagerungs- und Trocknungsmöglichkeiten ergeben sich für die Trocknung von Energieholz folgende Schwerpunkte:

- (1) Trocknung von Ganzbäumen (vereinzelte oder gestapelt)
- (2) Trocknung von Rundholz in Poltern

(3) Trocknung von Schlagabraum in Fratten, Haufen oder Bündeln

(4) Trocknung von Waldhackgut (mit oder ohne Zuhilfenahme technischer Mittel)

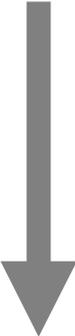
Dieser Gliederung folgend sind in den nächsten Kapiteln die verschiedenen in der Fachliteratur vorkommenden Methoden zur Trocknung von Energieholz beschrieben und diskutiert.

3 Grundlagen der Holztrocknung

3.1 Bindung des Wassers im Holzkörper

Die Art Wasserbindung im Holzkörper ist aufgrund ihres Einflusses auf den Trocknungsfortschritt, den Trocknungsaufwand und den mit einzelnen Trocknungsmethoden erreichbaren Endfeuchten von zentraler Bedeutung für die Energieholztrocknung. Die Arten der Bindungskräfte, die Wassergehaltsbereiche in denen sie auftreten sowie die jeweiligen typischen Merkmale sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 1: Arten der Wasserbindung während der Trocknung von Holz (nach Kollmann 1951)

Bindung	Wassergehalt (%) ¹	Merkmale	Zunahme der Bindungsintensität
Kapillarsorption und Adhäsion	> 25	freies ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen und Gefäßen; gebundenes Wasser in den Holzfasern	
Fasersättigungspunkt	19 – 25	Wasser in den Holzfasern gebunden; Schwinden des Holzes beginnt	
Kapillarsorption	13 – 25	Wasser kolloidal gebunden; Feuchtigkeitsbewegung durch Diffusion und Kapillarkräfte	
Elektrosorption	5,7 – 13	Wasser an der Micelle durch elektrische Kräfte gebunden	
Chemosorption	0 – 5,7	Molekulare Anziehungskräfte	

¹ Grundlegend für die Diskussion der Holztrocknung ist die Quantifizierung des im Wasser enthaltenen Holzes. Die Menge des im Holz gebundenen Wassers wird in der Fachliteratur meist mit einer der beiden Kennzahlen *Holzfeuchte* (oder *Holzfeuchtigkeit*) und *Wassergehalt* angegeben. Beide Größen werden in Prozent angegeben, weswegen es leicht zu Verwechslungen kommen kann. Um diese zu vermeiden, wurde in dieser Arbeit bei quantitativen Angaben als Maßeinheit immer der Wassergehalt verwendet. Ausnahmen davon wurden gemacht, wenn Abbildungen aus anderen Quellen übernommen wurden, welche die Holzfeuchte verwendeten. Der Wassergehalt (**WG** oder **w**) ist die Masse des im Holzkörper gebundenen Wassers (m_w) bezogen auf die Gesamtmasse des feuchten Holzkörpers (m_f) in Prozent.

$$WG = (m_w/m_f) \cdot 100$$

die Holzfeuchte (**u**) ist die Masse des im Holzkörper gebundenen Wassers (m_w) bezogen auf die Darrmasse des Holzes (m_d) in Prozent.

$$u = (m_w/m_d) \cdot 100$$

Die Masse des im Holz enthaltenen Wassers (m_w) wird durch Trocknen im Darrofen bei 102 °C - 105 °C bestimmt. Sie errechnet sich als Differenz zwischen der Masse des Feuchten Holzkörpers (m_f) und der Masse des darrtrockenen Holzkörpers (m_d).

$$m_w = m_f - m_d$$

Die Werte für den Wassergehalt sind immer kleiner als Hundert, die Holzfeuchte kann auch Werte über 100 % annehmen. So entspricht z.B. ein Wassergehalt von 50 % einer Holzfeuchte von 100 %.

Die Kräfte mit der Wasser im Holzkörper gebunden ist, nehmen von der Kapillarsorption - bei der freies, in den Zellhohlräumen gebundenes Wasser verdunstet wird - bis hin zur Chemosorption immer stärker zu. Diese Zunahme der Bindungsenergie bedeutet für den Trocknungsprozess, dass mit fortschreitender Trocknung immer mehr Energie darauf verwandt werden muss, um dem Holz das Wasser zu entziehen. Frisches Holz trocknet zuerst sehr rasch und mit konstanter Geschwindigkeit, bis der Fasersättigungspunkt erreicht ist. Ab unterschreiten des Fasersättigungspunktes, wenn kein freies Wasser mehr vorhanden ist, wird es aufgrund der sinkenden Trocknungsgeschwindigkeit immer aufwändiger, weitere Trocknungsfortschritte zu erzielen. Für die Trocknung von Energieholz, wie es in größerem Umfang in KWK-Anlagen zur Verwendung kommt, wird eine Trocknung bis zum Fasersättigungspunkt in den meisten Fällen ausreichen. Abbildung 3 veranschaulicht die Trocknungsgeschwindigkeit wie sie bei Holz unter konstanten Bedingungen auftritt. Die drei Abschnitte entsprechen dem Verlauf, welcher in Tabelle 1 skizziert ist. Der erste Abschnitt entspricht der Trocknung bis zum Fasersättigungspunkt. Abschnitt 2 beschreibt die Trocknung, bei welcher kapillares Wasser im Holz vorhanden ist. Im Abschnitt 3 ist das vorhandene Wasser ausschließlich durch elektrische und molekulare Bindungskräfte gebunden.

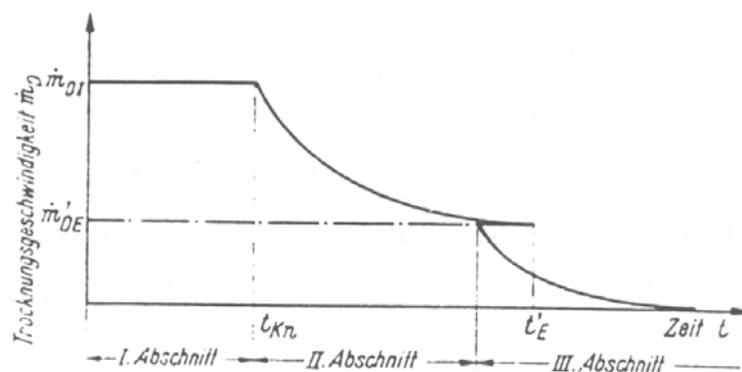


Abbildung 3: Charakteristischer Verlauf der Trocknung hygroskopischer Stoffe (aus Brunnbauer 1995)

3.2 Trocknungspotential der Luft

Der Erfolg der Trocknung hängt sehr stark mit der Temperatur und dem Wasserdampfgehalt der umgebenden Luft ab. Je höher die Temperatur, umso mehr Wasserdampf kann die Luft aufnehmen. So kann 1 m³ Luft bei 0 °C maximal 4,8 g Wasser enthalten, erhöht man die Lufttemperatur auf 20 °C, so steigt der maximale Wasserdampfgehalt auf 17,3 g/m³. Der Wasserdampfgehalt der Luft wird auch durch die relative Luftfeuchtigkeit ausgedrückt. Sie gibt an, wie viel Prozent des Maximalgehaltes an Wasserdampf in der Luft bei einer bestimmten Temperatur enthalten ist. Eine rel. Luftfeuchtigkeit von 100 % bedeutet, dass bei dieser Temperatur kein Wasser mehr von der Luft aufgenommen werden kann. Steigt die Temperatur der Luft, dann sinkt die relative Luftfeuchtigkeit, weil bei höherer Temperatur mehr Wasserdampf aufgenommen werden kann. Die Differenz zwischen maximalem und aktuellem Wasserdampfgehalt wird als Sättigungsdefizit bezeichnet. Kühlt man Luft ab, wird das Sättigungsdefizit kleiner bis die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Bei weiterer Abkühlung kann die Luft den Wasserdampf nicht mehr halten, Nebel und Taubildung (Kondensation) sind die Folge (Brusche 1983). In Abbildung 4 ist das „H,x-Diagramm“ nach Mollier dargestellt. Es findet in der Praxis bei der Planung, Betrieb und Abstimmung von Trocknungsanlagen seine Anwendung.

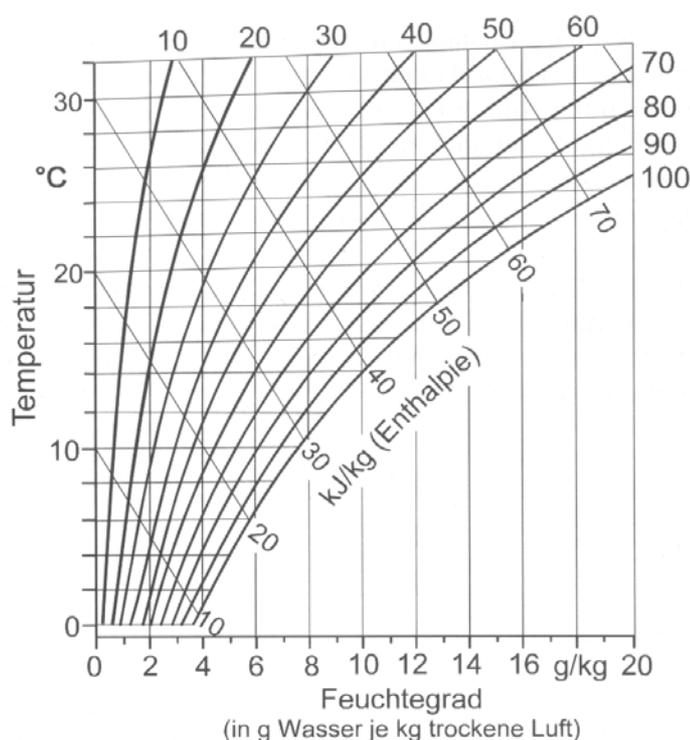


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem H,x-Diagramm nach Mollier (aus Kaltschmitt & Hartmann 2001)

Mittels des Diagramms ist es möglich, den Trocknungserfolg anhand vergleichender Messungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Trocknungsluft zu bestimmen. Ein Beispiel von Weingartmann (1991) zur Holztrocknung soll die Anwendbarkeit des „H,x - Diagramms“ in der Trocknungspraxis erläutern: Die in einen Gutstapel eintretende Luft wurde gemessen: Temperatur = 20 °C, relative Luftfeuchtigkeit = 35 %. Setzt man diese beiden Werte mit dem H,x-Diagramm in Beziehung erhält man als Ergebnis den Schnittpunkt der Geraden für 20 °C und der Kurve für 35 % rel. Luftfeuchtigkeit und in weiterer Folge das Ergebnis für die absolute Feuchte von 5 g/kg trockener Luft. Wird nun die aus dem Gutstapel austretende Luft beispielsweise mit 16 °C und 62 % Luftfeuchtigkeit gemessen, erhält man als absolute Feuchte einen Wert von 7 g/kg trockener Luft. Die Trocknungsluft hat beim Durchgang durch den Stapel also eine Wasserdampfmenge von 2 g/kg Luft aufgenommen. Die Tabelle ist des weiteren dazu geeignet, die maximal erreichbare Wasseraufnahmekapazität der Trocknungsluft abzuleiten. Ein Kennwert, welcher für die technische Auslegung von Trocknungsanlagen Bedeutung besitzt.

3.3 Sorptionsgleichgewicht des Holzes

Gleiche Temperatur und Luftfeuchte bedingen bei der Lagerung von Holz nicht in jedem Fall die Erreichung einer gleichen Holzfeuchte. Dies ist auf die Hysterese zurückzuführen, welche in Abbildung 5 ersichtlich ist. Bei konstanter Temperatur und Luftfeuchte der umgebenden Luft stellt sich die Gleichgewichtsfeuchte ein. Ändert sich die relative Luftfeuchte so stellt sich eine andere Gleichgewichtsfeuchte ein. Dieser Zustand wird als Sorptionsgleichgewicht des Holzes bezeichnet. Die Linien in Abbildung 5 stellen die Sorptionsisothermen dar. Sie zeigen den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft und der Holzfeuchte, bei konstanter Temperatur. Temperaturveränderungen bewirken eine Verschiebung der Sorptionsisothermen. Die Tatsache, dass Holz bei Befeuchtung (Adsorption) ein anderes Verhalten als bei Trocknung (Desorption) zeigt, wird als **Hysterese** bezeichnet. Die Ursache dafür liegt im Bereich der Chemosorption. Die OH-Gruppen der Zellwand geben bei der Trocknung H₂O-Moleküle ab und bilden Bindungen untereinander aus. Erfolgt nun eine Wiederbefeuchtung fehlen diese OH-Gruppen als Bindungspartner für die H₂O-Moleküle. Es bieten sich also weniger Anlagerungsstellen, die Gleichgewichtsfeuchte stellt sich daher früher ein. In Abbildung 5 sind die Sorptionsisothermen von Holz für die Temperaturen 10 °C und 60 °C dargestellt. Ein Beispiel soll dies erläutern: Trocknet feuchtes Holz bei 10 °C (Desorption) und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % so erhält man Holz mit einem Wassergehalt (in der Abbildung mit Feuchtegrad bezeichnet)

von ca. 20 %. Wird jedoch trockenes Holz unter den gleichen Bedingungen wiederbefeuchtet (Adsorption), etwa durch Regen, so stellt sich eine Holzfeuchtigkeit von nur 16 % ein. Dies ist für die Energieholz Trocknung insofern von Bedeutung, als trockenes Holz einer Wiederbefeuchtung einen Widerstand entgegenbringt.

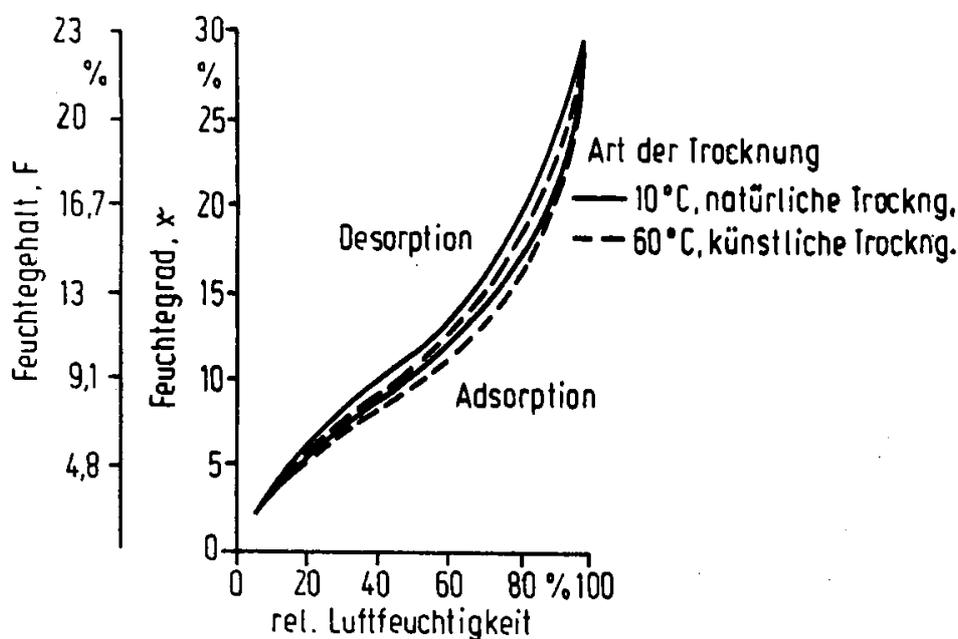


Abbildung 5: Sorptionsisothermen von Holz (aus Brusche 1983). (Feuchtegrad = Wassergehalt, Feuchtegehalt = Holzfeuchte).

3.4 Strömungswiderstand von Schüttgütern

Der Strömungswiderstand eines Lagergutes für die durchströmende Luft hängt von der Durchströmlänge (Schichtdicke), der Strömungsgeschwindigkeit und der Art des zu trocknenden Gutes (Körnung, Form der Einzelteilchen, Verdichtung) ab (Weingartmann 1991). Für Schüttgüter mit einer Schütthöhe von weniger als 2 m kann näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen dem Strömungswiderstand und der Durchströmlänge angenommen werden. Der spezifische Strömungswiderstand eines Gutes wird deshalb meist auf einem Meter Schichtdicke bezogen (Hartmann & Kaltschmitt 2001).

Wichtigster Einflussfaktor auf den Strömungswiderstand ist in der Praxis die Körnung des Gutes (siehe Abbildung 6). Feines Material ist bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit der Luft um ein Vielfaches schwerer zu durchströmen, als grobes Material.

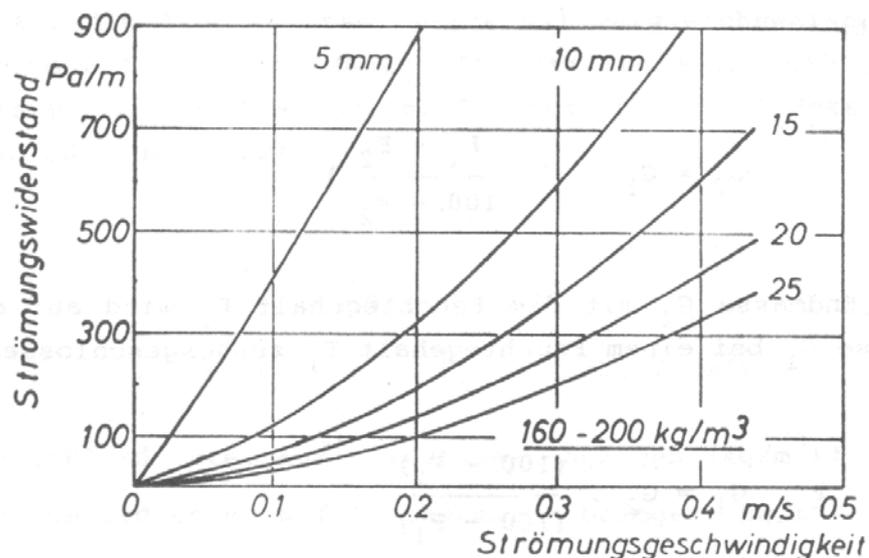


Abbildung 6: Spezifischer Strömungswiderstand verschiedener Hackgutfraktionen (Körnung 5 bis 25 mm) in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit. Schüttdichte 160 bis 200 kg/m³ (aus Weingartmann 1991).

Weingartmann (1991) findet in Versuchen mit verschiedenen Hackgutarten z.T. deutliche Unterschiede beim Strömungswiderstand in Abhängigkeit von Holzart, Wassergehalt, Körnung sowie Form und Oberflächenbeschaffenheit der Stücke (Abbildung 7).

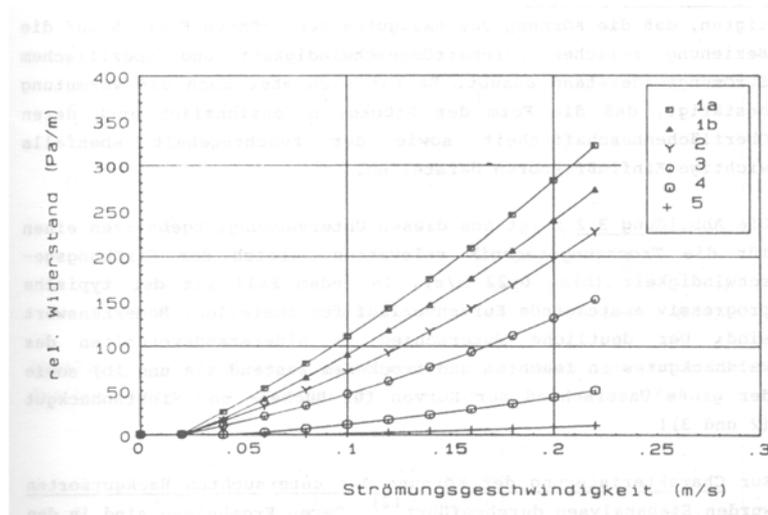


Abbildung 7: Spezifischer Strömungswiderstand bezogen auf 1 m Schütthöhe in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit, auf die Querschnittfläche der Schüttgutsäule berechnet. (1a) feuchtes Waldhackgut mit HF 39%; (1b) trockenes Waldhackgut mit 14 % HF; (2) trockenes Buchenhackgut, (3) trockenes Fichtenhackgut, (4) trockenes Industriebhackgut, (5) trockenes Buschholz-Hackgut (aus Weingartmann 1991).

3.5 Belüftungsmenge und Luftführung

Die Belüftungsmenge und Luftführung sind bei den Trocknungsverfahren für Energieholz, die im Freiland stattfinden, weitestgehend von den Wettergeschehnissen während der Trocknungsperiode abhängig. Deshalb werden diese Aspekte hier nur in Zusammenhang mit technischen Trocknungsverfahren behandelt. Bei technischen Trocknungsverfahren ist die Belüftungsmenge zumeist steuerbar. Die Wahl der Belüftungsmenge hängt dabei lt. Brusche (1983) von folgenden Faktoren ab: der Belüftungsintensität, der Menge des zu belüftenden Gutes, dem Strömungswiderstand und der angepeilten Trocknungszeit. Im Gegensatz dazu kann bei der natürlichen Trocknung im Wald oder auf Freiflächen die Belüftungsmenge nicht direkt geregelt werden. In diesem Fall ist es nur möglich, durch Wahl eines geeigneten windexponierten Standortes und durch Anpassung der Menge für einen möglichst hohen Luftdurchsatz durch das Trocknungsgut zu sorgen.

Der Trocknungsluftstrom hat grundsätzlich die Aufgabe trockene und warme Luft an das Holz heranzuführen, um Feuchtigkeit daraus zu verdunsten. Anschließend soll er die feuchte Luft aus dem Gut abtransportieren. Für eine gleichmäßige und schnelle Trocknung ist deshalb eine genügend starke und gleichmäßige Luftbewegung notwendig (Weinbrenner 1965). Um beispielsweise bei der Trocknung von Hackgut durch Luftzufuhr über einen doppelten Boden eine optimale Luftführung im Trocknungsgut zu gewährleisten, sollte die Oberfläche des gelagerten Gutes möglichst eingeebnet werden. Dies bewirkt, dass der Strömungswiderstand im Trocknungsgut überall gleich hoch ist und es nicht zur Ausbildung von Zonen mit geringerem Widerstand kommt, die dann bevorzugt von der Trocknungsluft durchströmt werden. Weiters ist zu beachten, dass durch Verdichtung des Schüttgutes im Zuge der Einlagerung höhere Strömungswiderstände entstehen können (Brusche 1983). Weingartmann (1991) gibt für eine günstige Luftführung in Hackgutlagern einige praktische Lösungen an:

Ganzflächiger Flachrost: Ein Rost aus Latten, Baustahl, Lochblech oder Betonspalten-Elementen mit einer luftdichten Umwandlung befindet sich unter dem Trocknungsgut. Die Höhe des Rostes über dem Boden sollte vierzig bis fünfzig Zentimeter betragen, der Lufteintritt möglichst von der Ecke erfolgen. Eine Befahrbarkeit ist ohne besondere Verstärkung nicht gegeben.

Unterflurkanäle: Die befahrbare Variante des Flachrostes, die Luftführung ist nicht so optimal wie beim ganzflächigen Rost, mit dem Abstand der Kanäle ist auch die Mindestschütthöhe definiert (Abstand der Kanäle = Mindestschütthöhe).

Oberflurkanäle: Auf den Boden werden Lochblechkanäle mit halbkreisförmigem oder trapezförmigem Querschnitt gelegt. Dieses System ist kostengünstiger und durch seine Flexibilität an die erforderlichen Bedingungen anpassbar.

Zentraler Dreieckskanal: Ein einziger zentraler Kanal mit ca. 0,5 bis 1 m² Querschnittsfläche wird am Boden verlegt. Das System kann aus Latten und Maschendraht gefertigt werden und ist besonders kostengünstig und flexibel.

3.6 Zusammenfassung - Trocknungsgrundlagen

Wasser wird im Holz chemisch, physikalisch oder durch Kapillarkräfte gebunden. Bei der Energieholztrocknung geht es hauptsächlich um die Entfernung des freien Wasser aus dem Holzkörper. Dabei sind insbesondere die Kapillarkräfte von Bedeutung. Für die Trocknung spielt das Trocknungspotential der Luft eine wichtige Rolle. Es steigt mit zunehmender Temperatur und abnehmender relativer Luftfeuchtigkeit. Das H,x-Diagramm nach Mollier kann zur Abschätzung des Trocknungspotentials der Luft herangezogen werden.

Die Gleichgewichtsfeuchte von Holz ist jene Holzfeuchte, die sich einstellt, wenn Holz bis zum Eintreten eines Gleichgewichtszustandes einer Atmosphäre mit konstanter Temperatur und Feuchtigkeit ausgesetzt wird. Diese erreichbare Gleichgewichtsfeuchte ist davon abhängig, ob das Holz durch die umgebende Luft getrocknet oder befeuchtet wird. Bei der Befeuchtung stellt sich die Gleichgewichtsfeuchte bereits früher ein als bei Trocknung, bereits getrocknetes Holz bringt der Wiederbefeuchtung also einen gewissen Widerstand entgegen (sog. Hysterese).

Der Strömungswiderstand des Lagergutes hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Trocknung. Er wird vor allem durch die Gutart, den Aufarbeitungsgrad und die Verdichtung des Materials beeinflusst. Die Länge des Durchströmungsweges der Luft sowie die Strömungsgeschwindigkeit der Außenluft sind von Wichtigkeit. Bei technischen Verfahren ist von Bedeutung, in welcher Richtung und mit welcher Intensität Trocknungsluft an das zu trocknende Holz herangeführt wird.

4 Einflussfaktoren auf den Wassergehalt von frischem Energieholz

4.1 Verteilung des Wassers in Holz und Rinde

Holz ist ein inhomogener organischer Stoff, welcher aus einem gewachsenen Gefüge verschiedener Zelltypen besteht. Baumarten und entwicklungsbedingte Unterschiede hinsichtlich Zusammensetzung und Aufbau des Stammkörpers führen dazu, dass die für die Energieholztrocknung relevanten Ausgangswassergehalte variieren. Welche Einflussfaktoren in diesem Kontext einen besonderen Einfluss ausüben und wie sich diese auf den Ausgangswassergehalt bei der Trocknung auswirken, soll nachfolgend näher beleuchtet werden.

Entscheidend für die Beurteilung des Ausgangswassergehaltes von frisch geschlägerten Energieholzsortimenten ist die Kenntnis über die zu erwartende Verteilung des Wassergehaltes im Stammquerschnitt sowie in Stammlängsrichtung. Aufgrund des unterschiedlichen anatomischen Aufbaues finden sich bei den heimischen Baumarten deutlich divergierende Wasserverteilungsmuster zwischen Kern- und Splintbereich.

Nadelhölzer sind entwicklungsgeschichtlich älter als Laubhölzer und aus nur zwei Zelltypen aufgebaut: Tracheiden und Parenchymzellen. Die langgestreckten Tracheiden erfüllen Aufgaben der Wasserleitung und Festigung, ihr Volumensanteil am Nadelholz beträgt rund 95 %. Die Parenchymzellen sind durch lebenden Zellinhalt gekennzeichnet, ihre Aufgaben bestehen in der Stoffspeicherung, -umwandlung und -leitung. Laubhölzer haben gegenüber den Nadelhölzern einen komplizierteren Bau und eine höhere Anzahl spezialisierter Zelltypen. Die Wasserleitung wird vorwiegend von Tracheen (Gefäßen) übernommen. Diese bestehen aus miteinander verbundenen Zellen und können einige Zentimeter bis einige Meter lang werden.

Neben den Unterschieden bei der zellulären Grundstruktur kommt insbesondere der unterschiedlichen Art der Bildung von Kernholz besondere Bedeutung bei der Verteilung des Wassers im Baumkörper zu (vgl. Tabelle 2 und 3). Als Kernholz bezeichnet man das um die Markröhre liegende, oftmals dunkler gefärbte Holz. Die Bildung eines Kernes ist auf strukturelle (Verthyllung bei Laubhölzern, Tüpfelverklebung bei Nadelhölzern) und chemische Veränderungen (Einlagerungen von Kernstoffen durch Abbau von Reservestoffen) zurückzuführen. Die Verkernung schützt das Holz vor Angriffen durch Pilze und Insekten. Abgesehen von diesen Veränderungen bleibt die mechanische Struktur des Holzes erhalten, die nun toten Zellen erfüllen weiterhin Festigungsfunktionen,

beteiligen sich aber nicht mehr an der Wasserleitung. Daraus resultiert der oft geringere Wassergehalt des Kernbereiches im Vergleich zum Splint. Die Verkernung beginnt, sobald der Splint eine für den Stofftransport notwendige Breite erreicht hat. Diese Breite ist unterschiedlich in Abhängigkeit von Standort, Baumart und Physiologie des Einzelbaumes. Bei jungen Bäumen ist demzufolge der ganze Stammquerschnitt an der Wasserleitung beteiligt. Mit dem Wachstum des Baumes vergrößert sich diese Fläche schneller als der Bedarf an neuen Leitungsbahnen. Ältere Bäume verwenden deshalb nur mehr die jüngeren Jahrringe (Splint) zur Wasserleitung. Die älteren Jahrringe (Kern) werden stillgelegt. In Tabelle 2 findet sich eine Einteilung der wichtigsten heimischen Baumarten nach der Art der Kernholzbildung sowie nach dem Verhältnis des Wassergehaltes zwischen Kern- und Splintbereich (Wagenführ 1988).

Tabelle 2: Arten der Kernholzbildung und Verhältnis des Wassergehaltes zwischen Kern- und Splintbereich (nach Wagenführ 1988)

	Wassergehalt Splint >> Kern	Wassergehalt Splint ~ Kern	Wassergehalt Splint < Kern
Baumarten mit obligatorischer Farbkernbildung	Kiefer Lärche Douglasie	Eiche Edelkastanie Robinie	
Baumarten mit fakulativer Farbkernbildung (Falschkern)			Rotbuche (Rotkern) Esche (Braunkern) Ahorn Birke Erle Pappel
Baumarten mit hellem Kernholz (Reifholzbäume)	Fichte Tanne	Rotbuche Tanne (Nasskern)	
Baumarten mit verzögerter Kernholzbildung (Splintholzbäume)		Bergahorn Birke Erle Spitzahorn Weißbuche	

Die bei verschiedenen Untersuchungen gefundenen Unterschiede im Wassergehalt zwischen Kern- und Splintholz sind in Tabelle 3 dargestellt. Diese Zahlen bestätigen die allgemeinen Aussagen aus Tabelle 2. So liegt der Unterschied bei Fichten, Tanne und Kiefer zwischen Kern- und Splintwassergehalt bei rund 30 % Wassergehalt. Bei Buche und Eiche sind hingegen die Wassergehalte von Kern und Splint weitgehend gleich.

Tabelle 3 Durchschnittlicher Wassergehalt w % (bezogen auf das Frischgewicht) des Splint- und Kernholzes (aus Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955, FPP 1998)

	Wassergehalt w %	
	Splint	Kern
Fichte	56 – 62	25 – 33
Kiefer	54 – 60	23 – 33
Tanne	58 – 64	29 – 33 (bis 62*)
Buche	41 – 50	33 – 44
Eiche	41 – 50	38 – 47

* Nasskern bei Tanne bis 62 % (nach Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955)

Ein ähnliches Ergebnis lässt sich aus Abbildung 8 ablesen, bei der der Verlauf des Feuchtigkeitsgehaltes vom Mark zur Rinde für verschiedene Baumarten dargestellt ist.

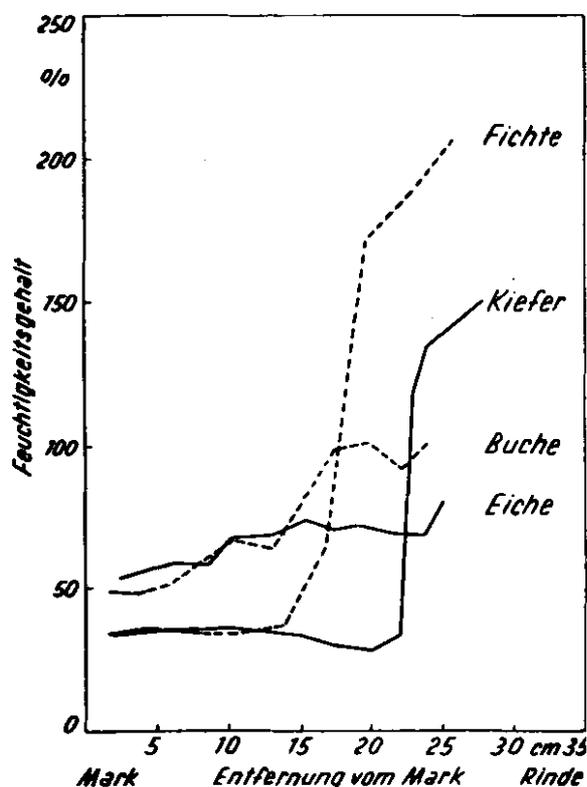


Abbildung 8: Unterschiede in der Holzfeuchte u % (bezogen auf das Darrgewicht) des Holzes auf dem Querschnitt je einer Fichte, Kiefer, Buche und Eiche zwischen Mark und Rinde (aus Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955)

Auffällig ist der markante Anstieg im Wassergehalt der Nadelbäume Fichte und Kiefer an der Grenze von Kern- zu Splintholz, wohingegen die Unterschiede bei den Laubbäumen Buche und Eiche viel geringer sind (vgl. Tabelle 3).

Weitere Ergebnisse finden sich bei Feller & Teischinger (2001). In Abbildung 9 sind die Feuchteprofile für drei Fichten aus dieser Untersuchung dargestellt. Auf der X – Achse wurde der Stammdurchmesser jeweils als 100 % gesetzt, an der Y-Achse ist die Holzfeuchte in % dargestellt. Der erste und letzte Messwert ist der Borke zuzuordnen. Die höchsten Wasseranteile sind demnach in den jüngsten Jahrringen zu finden, der Kern hat eine konstant niedrige Feuchte. Der Abfall des Feuchtegehaltes vom äußeren Splint zu Kern ist nicht konstant, sondern verläuft im äußeren Splint flacher als im inneren Splint.

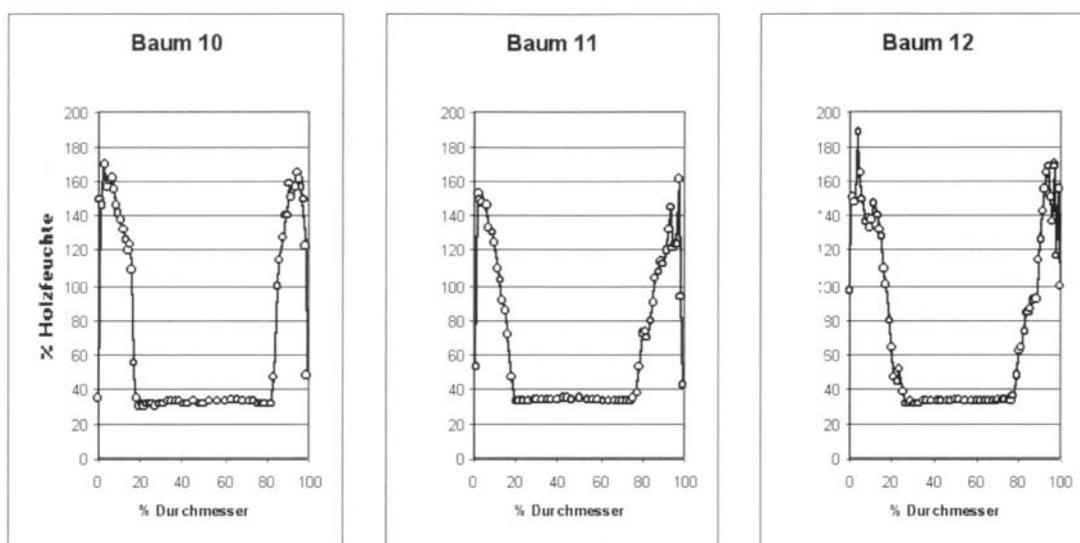


Abbildung 9: Feuchteprofile von drei Fichten, Schlägerungszeitpunkt April, Holzfeuchte u % bezogen auf das Darrgewicht (aus Fellner & Teischinger 2001).

Der Anteil von Kern und Splint am Gesamtquerschnitt des Schaftes ist von Baumart zu Baumart verschieden. Innerhalb einer Baumart wird der Splintanteil durch Alter und Standort beeinflusst. Eckmüllner (1990) zeigt auch den Zusammenhang zwischen Splintfläche und Benadelung bei Fichte. Vitale Bäume mit hoher Nadelmasse haben demnach einen größeren Splint.

Neben den grundsätzlichen Unterschieden betreffend Wassergehaltsverteilung von Kern und Splint ist insbesondere die Veränderung des **Anteils der Splintfläche am Gesamtquerschnitt** entlang der Stammachse für die Beurteilung der Ausgangsfeuchte bei der Energieholztrocknung von Bedeutung. Dies gilt natürlich vorrangig auch nur bei jenen Baumarten, mit differierenden Wassergehalten zwischen Kern und Splint, d.h. Fichte, Kiefer und Lärche.

Trendelenburg & Mayer-Wegelin (1955) beschreiben die Abhängigkeit des Splintanteiles von der Baumhöhe bei Kiefer. Demnach nimmt bei der Kiefer der Anteil des Splints nach oben zunächst stark ab. Ab einer Höhe von 7 bis 10 m über dem Boden wird er jedoch nur mehr wenig schmaler, bleibt gleich breit oder wird erst in der Krone wieder etwas breiter (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Splintbreite und Splintanteil in verschiedenen Höhen bei 90 – 140jährigen Kiefern (nach Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955)

Stammabschnitt	Durchmesser [cm]	Splintbreite [cm]	Anteil der Splintfläche [%] an der Querschnittsfläche
Stock	32 - 48	7 - 10	37 – 39
Mitte	20 – 28	4 - 5,5	35 – 36
Oben	bis 20	4 - 6	36 – 51 (bis 100)

Berechnet man aus den bei Trendelenburg & Mayer-Wegelin (1955) angegebenen Splintbreiten den Anteil der Splintfläche an der Gesamtfläche, erhält man im unteren und mittleren Stammbereich Werte zwischen 35 und 39 % (vgl. Tabelle 4). Im oberen Stammteil steigt rechnerisch der Anteil des Splintes bis über 50 % an. Stammteile aus dem Wipfelbereich haben also einen deutlich höheren Anteil an Splintfläche. Unter der Annahme in etwa gleichbleibender absoluter Splintbreiten wird bei einem Zopfdurchmesser von rund 10 cm letztlich einen Wert von 100 % erreicht. Bezieht man die Ergebnisse von Tabelle 3 in die Überlegungen mit ein, so haben Nadel-Schwachholzsortimente, welche vornehmlich für die Energieholznutzung in Frage kommen, mit 54 – 62 % die höchsten Startwassergehalte. Eine Zunahme des Wassergehaltes in Richtung Wipfel fand auch Hakkila (1962) bei seinen Versuchen an Fichte, Kiefer, Birke und Grauerle (Brusthöhendurchmesser 2 cm – 14 cm), wobei dieser Effekt bei den beiden untersuchten Laubholzbaumarten schwächer ausgeprägt war, als bei Fichte und Kiefer.

Trendelenburg & Mayer - Wegelin (1955) beschreiben aufgrund von Untersuchungen von Schober (1953), dass bei der Lärche die Splintbreite nur wenig variiert. Bis zum Alter von 30 Jahren wird der Splint von unten nach oben im Stamm eher etwas schmaler, bei älteren Lärchen eher etwas breiter. Der Splint der Lärche ist allgemein etwa nur halb so breit wie der gleich alter Kiefern und Fichten. Bis zum Alter von 60 Jahren bleibt der Splint bei gleichmäßig fortschreitender Verkernung etwa 2 cm breit, da mit steigendem Alter der Durchmesser zunimmt, die Splintbreite aber gleich bleibt, muss der Anteil des Kernes am

Durchmesser größer, der des Splintes kleiner werden. Der Kernanteil ist also am Stammanlauf mit 85 bis 90 % am größten und nimmt gegen oben nur allmählich ab.

Die in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse aus Trendelenburg & Mayer-Wegelin (1955) zeigen, dass bei gleichem Alter schwächere Stämme einen schmäleren Splint als stärkere besitzen. Einen ähnlichen Zusammenhang fand auch Hakkila (1962). Er kam aufgrund seiner Versuche zur Aussage, dass der Wassergehalt starker Bäume im selben Bestand größer ist, als jener von schwächeren Bäumen. Dies wurde für Fichte und Kiefer mit Brusthöhendurchmessern von 2 bis 14 cm festgestellt. Die Ergebnisse lassen die Vermutung zu, dass die soziale Stellung eines Baumes im Bestand einen Einfluss auf die Splintbreite, d.h. auch auf den Wassergehalt, hat. Eckmüllner & Sterba (2000) versuchten diesen Zusammenhang zu zeigen, konnten aber keine signifikante Abhängigkeit zwischen sozialer Stellung und Splintbreite feststellen.

Tabelle 5: Splintbreiten gleichaltriger Fichten unterschiedlicher sozialer Stellung (aus Trendelenburg & Mayer - Wegelin 1955)

Soziale Stellung im Bestand	Durchmesser in 1,3 m [cm o. R]	Splintbreite [cm]		Kernanteil [%]
		in 1,3 m	Durchschnitt	
vorherrschend	44,7	5,7	5,2	74,5
herrschend	34,2	3,6	4,0	79,0
mitherrschend	26,2	2,3	2,5	82,5
beherrscht	20,8	1,8	1,9	82,7

Bei der Buche beginnt die Kernbildung zwischen dem 80. und 100. Lebensjahr, der Durchmesser des Kerns nimmt ab diesem Zeitpunkt gleichmäßig zu (siehe Abbildung 10). Aufgrund des unterschiedlichen Wassergehaltes geht mit der Kernbildung auch eine Veränderung der Wassergehaltsverhältnisse im Stamm einher. Anzumerken ist, dass die Aussagen hinsichtlich des Wassergehaltes im Kernbereich widersprüchlich sind. Weist Wagenführ (1988) beispielsweise auf einen erhöhten Wassergehalt hin, so schreibt Wimmer (1998), dass der Wassergehalt vom Splint zum verkernten Markbereich hin abnimmt.

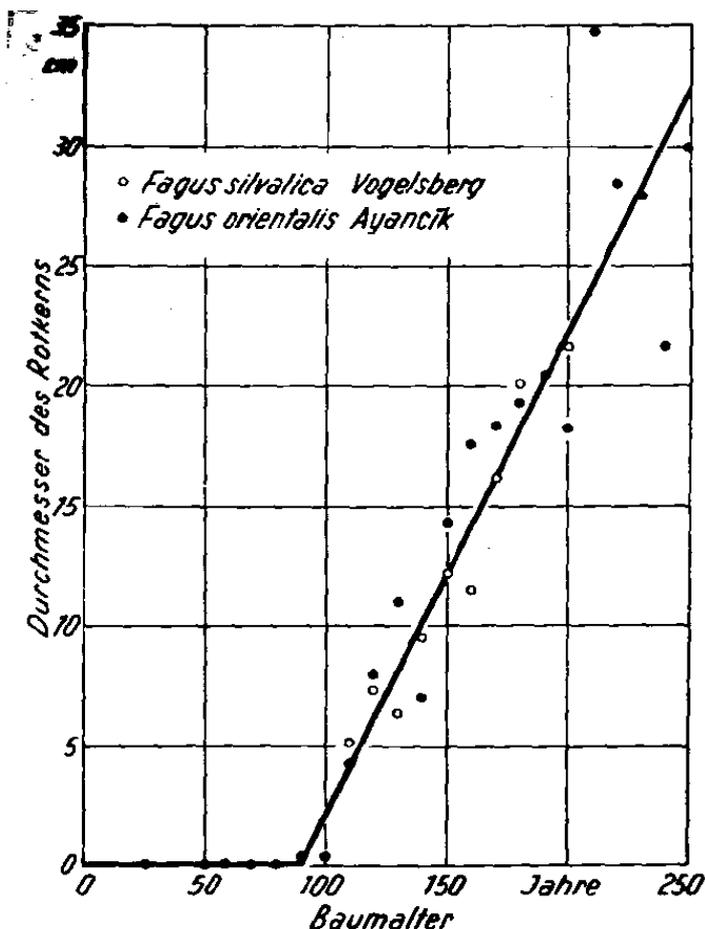


Abbildung 10: Durchmesser des Buchenrotkerns in Abhängigkeit vom Baumalter (aus Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955)

Über den Wassergehalt von **Astholz** konnten in der Literatur Angaben für Buche gefunden werden. Nach Untersuchungen von Gäumann (in Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955) weist das Astholz der Buche einen Wassergehalt von 43 %, die Astrinde von 45 %. Für den Splint, den Kern und die Rinde des Stammes wurden die Wassergehalte mit 48 %, 42 % und 42 % ermittelt. Grundsätzlich gilt, dass die am Baum verbleibenden Totäste bereits einen sehr niedrigen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Betrachtet man dagegen die lebende Krone (Zopfstück) und ihre Äste, kann man davon ausgehen, dass der Wassergehalt jenem von Splintholz gleicht. Für das Abtrocknungsverhalten ist die höhere spezifische Oberfläche des Astholzes von Vorteil.

Da im Zuge der energetischen Verwertung Holz und Rinde oftmals gemeinsam genutzt werden, gilt es auch dem **Rindenanteil** und dessen unterschiedlichen Wassergehalten bei der Energieholztrocknung Beachtung zu schenken. Die einzelnen heimischen Baumarten bilden bekanntermaßen verschiedene dicke Rinde aus. Allgemein nimmt die Rindenstärke von unten nach oben ab, dies ist vor allem bei Baumarten mit starker Rinde und am Schaftanlauf besonders deutlich. Betrachtet man den Anteil der Rinde am

Durchmesser so liegen die Zusammenhänge etwas anders. Während die Rindenstärke nach oben relativ konstant abnimmt, sinkt der Rindenanteil zunächst zu einem Minimum ab und nimmt dann in den oberen Stammteilen wieder zu, da etwa ab der Mitte des Schaftes der Durchmesser des Holzkörpers stärker abnimmt als die Rindenstärke. Der Rindenanteil an der Derbholzmasse ist also in den oberen Stammteilen und am Stammanlauf größer als in der Mitte.

Betrachtet man den **Wassergehalt der Rinde** am lebenden Baum, ist es sinnvoll zwischen der feuchten Innenrinde (Bast) und der trockenen Außenrinde (Borke) zu unterscheiden. Der erhöhte Wassergehalt der Innenrinde resultiert aus den Transportvorgängen des Baumes, wo hingegen die Feuchtigkeit der Außenrinde vor allem durch die klimatischen Verhältnisse des Standortes beeinflusst wird. Der Wassergehalt des Bastes im unteren Stammteil bis ca. 3 m Höhe bei mittelalten Beständen liegt zwischen 50 % und 60 %, jener der Borke zwischen 23 % und 33 % (Tamminen 1964, Bednar 1975, Smith & Kozak 1971 (in Koltzenburg 1985)). Der Wassergehalt bei Fasersättigung beim Fichtenbast liegt bei 62 % und jene der Borke bei 40 % (Wilhelmsen 1969 (in Koltzenburg 1985)). Mit zunehmenden Alter bzw. Durchmesser verändert sich das Verhältnis zwischen Bast und Borke. Insbesondere bei den starkkrindigen Baumarten Kiefer und Lärche nimmt der deutlich trockenere Borkenanteil mit zunehmenden Durchmesser stark zu. Untersuchungen von Bednar (1975) zeigen, dass die Feuchtigkeit auch von der Stammhöhe abhängig ist. Für die untersuchten Baumarten Fichte und Tanne konnte ein Ansteigen der Feuchtigkeit mit der Baumhöhe festgestellt werden (siehe Abbildung 11). Dies ist darin begründet, dass der Anteil der feuchteren Innenrinde an der Gesamtrinde mit der Höhe zunimmt. Deutlich ist auch der höhere Feuchtigkeitsgehalt der Fichtenrinde im Vergleich zur Tannenrinde zu sehen. In Abbildung 11 rechts ist der Feuchtegehalt der Außenrinde abgebildet. Die Feuchte der Außenrinde ist für beide Baumarten bis zur Hälfte der Baumhöhe etwa gleich groß, danach steigt die Feuchte der Fichtenrinde stärker an, als jene der Tannenrinde. Bednar (1975) erklärt diese Tatsache damit, dass die feuchte Innenrinde der Fichte durch Wasserabgabe auch den Feuchtigkeitsgehalt der Außenrinde erhöht.

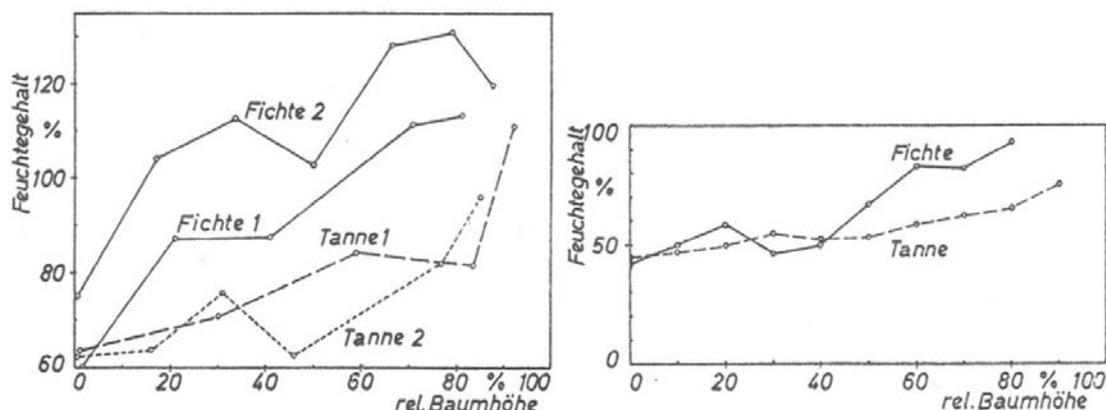


Abbildung 11: Vertikale Feuchtigkeitsverteilung bezogen auf das Darrgewicht bei Fichte und Tanne für die Gesamtrinde (links) und für die Außenrinde (rechts) (aus Bednar 1975).

4.2 Schlägerungszeitpunkt

Dem Einfluss des Schlägerungszeitpunktes auf die Holzeigenschaften wurde seit jeher große Bedeutung zugemessen. Die nahe liegende Überlegung, dass Bäume im Winter weniger Saft enthielten als im Sommer, wurde erstmals von Duhamel de Monceau im Jahr 1775 durch wissenschaftliche Untersuchungen widerlegt (Kollmann 1951). Auch Fellner & Teischinger 2001 präsentieren Ergebnisse (siehe Abbildung 12), wonach der Schlägerungszeitpunkt bei Fichten und Tannen keinen Einfluss auf den Wassergehalt des Holzes hat. Es wurde eine starke Schwankung des Wassergehaltes im Splint und eine eher geringe Schwankung im Kern festgestellt, die aber nicht eindeutig mit der Jahreszeit in Verbindung zu bringen sind.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Teischinger & Fellner (2001) bei ihren eigenen Untersuchungen an Fichte. Demnach hat der Kern der Fichte zu allen Schlägerungszeiten einen Wassergehalt zwischen 24 und 25 %. Gegen das Mark ist eine leichte Hebung der Feuchtwerte zu beobachten, die möglicherweise durch einen höheren Fasersättigungspunkt des marknahen Holzes zu erklären sind. Im Splint ergaben sich bei den untersuchten Bäumen starke individuelle Unterschiede, es kann aber gesagt werden, dass sich die Maximalwerte der Feuchte in den jüngsten Jahrringen befinden und der Abfall der Feuchte zum Kern hin nicht konstant, sondern progressiv ist. Im äußeren Splint konnte ein signifikanter Einfluss der Jahreszeit auf den Feuchtegehalt nachgewiesen werden. Das Niveau der Maximalwerte liegt hier im Winter höher als im Sommer. Gegen das Mark hin verliert die Jahreszeit an Bedeutung, ihr Einfluss ist schon im inneren Splint als unbedeutend auf die Feuchtigkeit zu werten. Der höchste Wassergehalt bei Splintholz konnte mit 67 % bei der Winterschlägerung beobachtet werden, während die

Sommerschlägerung Werte zwischen 62 % und 64 % bezogen auf das Darrgewicht aufweist (Fellner & Teischinger, 2001).

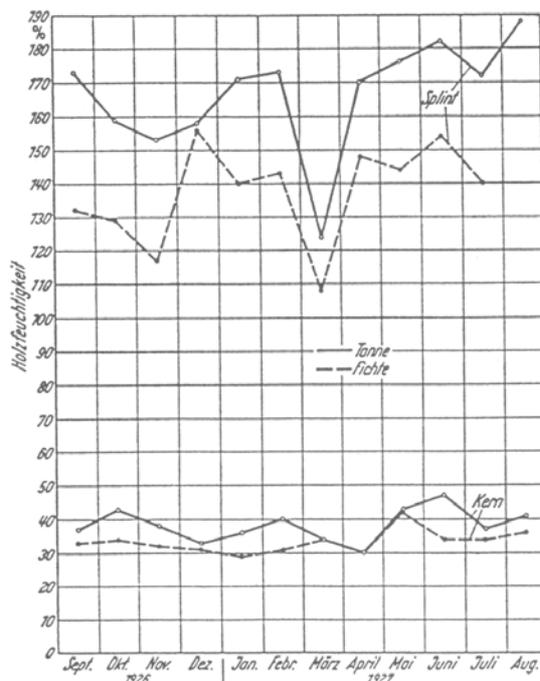


Abbildung 12: Der Feuchtigkeitsgehalt (bezogen auf das Darrgewicht) von Fichten- und Tannen-Kernholz und -Splintholz. Nach Versuchen von H. Knuchel (aus Fellner & Teischinger 2001)

4.3 Zusammenfassung - Einflussfaktoren auf den Wassergehalt

Baumarten und entwicklungsbedingte Unterschiede hinsichtlich Zusammensetzung und Aufbau des Stammkörpers führen dazu, dass die für die Energieholztrocknung relevanten Ausgangswassergehalte variieren. Entscheidend für die Beurteilung des Ausgangswassergehaltes von frisch geschlägerten Energieholzsortimenten ist die Kenntnis über die zu erwartende Verteilung des Wassergehaltes im Stammquerschnitt sowie in Stammängsrichtung. Aufgrund des unterschiedlichen anatomischen Aufbaues finden sich bei den heimischen Baumarten deutlich divergierende Wasserverteilungsmuster zwischen Kern- und Splintbereich. Das Splintholz enthält bei den Nadelhölzern deutlich mehr Wasser als das Kernholz. Sie weisen im Splint Wassergehalte um 55 % auf, der Kern liegt nur bei ca. 30 %. Im Gegensatz dazu zeigen die wichtigen Laubholzbaumarten Buche und Eiche keine bzw. nur geringe Unterschiede zwischen Kern- und Splintbereich. Der Wassergehalt liegt im Splint bei 41 bis 50 %, im Kern bei 33 bis 47 %.

Der Anteil des trockenen Kerns an der Querschnittsfläche nimmt bei der Kiefer im unteren Schaftteil nach oben hin zu, bei der Lärche und meist auch bei der Fichte ab. Im mittleren Schaftteil bleibt der Kernanteil

meist gleich groß, in der Krone wird er wieder geringer. Der Raumanteil des Kerns am gesamten Stammvolumen nimmt mit steigendem Stammdurchmesser beziehungsweise mit steigendem Alter bei allen Baumarten zu. Hinsichtlich der Trocknung von Energieholz bedeutet dies, dass jüngere Bäume einen höheren Anteil an Splintholz und so auch einen höheren Wassergehalt aufweisen. Auch die schwächeren Stammteile (Krone) weisen analog dazu einen höheren Wassergehalt auf (Splintanteil bis 100 %). Gerade diese Sortimente spielen bei der Energieholzproduktion eine wichtige Rolle. Bei der Trocknung ist also zu berücksichtigen, dass hier auf Grund des höheren Splintanteiles auch mehr Wasser aus dem Holz entfernt werden muss.

Der Wassergehalt des Astholzes liegt bei Buche im Bereich des Stammholzes, für andere Baumarten wurden keine Angaben in der Literatur gefunden. Grundsätzlich gilt, dass die am Baum verbleibenden Totäste bereits einen sehr niedrigen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Betrachtet man dagegen die lebende Krone (Zopfstück) und ihre Äste, kann man davon ausgehen, dass der Wassergehalt jenem von Splintholz gleicht. Für das Abtrocknungsverhalten ist die höhere spezifische Oberfläche des Astholzes von Vorteil.

Der Wassergehalt der Rinde wird stark von Witterung, Baumhöhe und Baumalter beeinflusst. Feuchte Witterung führt zu Aufnahme von Wasser in den äußeren Schichten der Rinde. Bei Untersuchungen an Fichte zeigte sich, dass junge Bestände höhere Rindenfeuchtigkeit aufwiesen. Es wurde auch gezeigt, dass die Rindenfeuchtigkeit mit der Baumhöhe steigt, die Rinde des Wipfels ist also feuchter als jene des Stammes. Ursache dafür ist jeweils das sich ändernde Verhältnis zwischen der trockenen Borke (Außenrinde) und dem feuchten Bast (Innenrinde).

Untersuchungen an Fichten und Tannen haben gezeigt, dass der Einfluss des Schlägerungszeitpunktes auf den Wassergehalt vernachlässigbar gering ist. Der Zeitpunkt der Schlägerung sollte daher, zumindest im Hinblick auf den zu erwartenden Startwassergehalt, vernachlässigt werden können.

5 Effekt der Trocknung auf die Qualität von Energieholz

Im folgenden Kapitel soll gezeigt werden, wie sich die Trocknung von Energieholz auf den Energieinhalt auswirkt. Weiters wird darauf eingegangen, welche Faktoren für den biologischen Abbau relevant sind.

5.1 Steigerung des Heizwertes durch Trocknung

Der Heizwert ist stark vom Wassergehalt des Brennstoffes abhängig. Je mehr Wasser im Brennstoff enthalten ist, desto geringer wird sein Heizwert, da während des Verbrennungsvorganges Wasser unter Energieaufwand verdampft werden muss (Jonas & Görtler 1988). Die Energiemenge um 1 kg Wasser bei Normalluftdruck zu verdampfen, beträgt 2257 kJ/kg. Sie wird auch als spezifische Verdampfungswärme des Wassers bezeichnet. In Abbildung 13 ist der Zusammenhang zwischen Wassergehalt bzw. Brennstofffeuchte und dem Heizwert dargestellt.

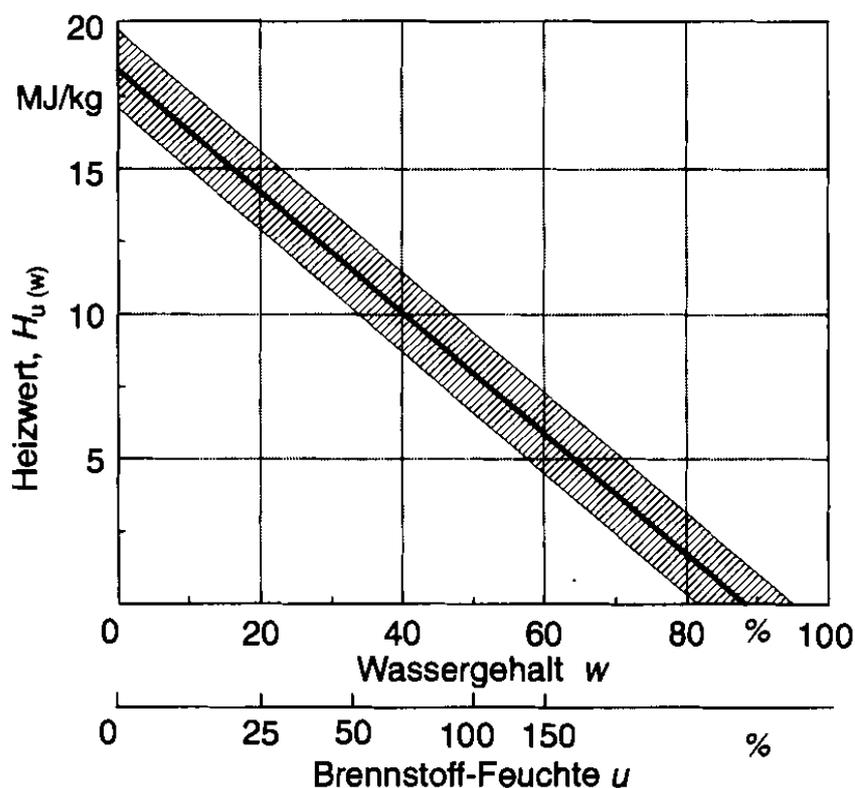


Abbildung 13: Heizwert von Holz in Abhängigkeit von Wassergehalt bzw. Feuchte (Kaltschmitt & Hartmann 2001)

Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt der Heizwert des Holzes linear ab, bei rund 88 % Wassergehalt erreicht er den Wert Null, d.h. die gesamte Energie aus der Verbrennung des Holzes wird zur Verdampfung des Wassers aufgewendet. Dies bedeutet, dass trockenes Holz bei der Verbrennung mehr Energie liefert und eine vom Verbraucher geforderte Leistung mit weniger Brennstoffeinsatz bereitgestellt werden kann. Die höhere Energiedichte des trockenen Holzes wirkt sich zudem positiv bei weiteren Logistiksritten wie Transport oder Lagerung aus. Es kann mehr Energie pro Fuhre Holz transportiert werden und Brennstofflager können kleiner dimensioniert werden (Zeilinger 1992, Hakkila 1962).

5.2 Trockensubstanzverlust und Lagerfähigkeit

Während der Lagerung und Trocknung von Biomasse finden durch Mikroorganismen (Pilze, Bakterien, Hefen) Abbauprozesse statt. Auch die lebenden Zellen des Holzes setzen ihre Atmung noch fort. Dabei entstehen Wärme und Stoffwechselprodukte, wie CO₂ und Wasser.

Der mikrobielle Abbau von Zellulose und Hemizellulose wird von verschiedenen von Pilzen produzierten hydrolytischen Enzymen kontrolliert. Beispielsweise wird das Enzym Cellulase von Weißfäule- oder Braunfäule-Pilzen produziert. Weißfäulepilze verwenden auch Oxidase- und Oxidoreduktase-Enzyme. Moderfäule-Pilze bauen die Zellwände der Holzfasern enzymatisch ab. Sie wachsen aus dem Zelllumen zu benachbarten Zellen durch bestehende Poren weiter. Braunfäule-Pilze greifen nur Zellulose und Hemizellulose, während Weißfäule-Pilze auch das Lignin durch extrazelluläre Enzyme abbaut (Ernstson et al. 1991).

Durch den Abbau kommt es zu einem Verlust an Trockensubstanz und damit zu einem Verlust an thermisch nutzbarer Energie. Außerdem verändert sich die Zusammensetzung des verbleibenden Materials. Ein höherer Anteil an anorganischen Verbindungen und somit ein höherer Aschegehalt bei der Verbrennung ist die Folge. Die Minimierung der biologische Aktivität ist demgemäss ein prioritäres Ziel bei der Energieholztrocknung.

Tabelle 6 zeigt auf, mit welchen Trockensubstanzverlusten aufgrund des biologischen Abbaus bei der Hackschnitzzellagerung gerechnet werden muss und wie die Abbauraten mit dem Wassergehalt zum Zeitpunkt der Einlagerung des Materials in Zusammenhang stehen.

Durch den physikalischen Prozess der Konvektion und durch die Tätigkeit von Mikroorganismen kommt es bei der Lagerung von Biomasse zu einer Erwärmung im

Lager. Kollmann (1951) gibt als Untergrenze für das Pilzwachstum eine **Temperatur** von 3 °C an. Die Erwärmung selbst stellt einen wichtigen Umweltfaktor für die Mikroorganismen dar. Das Temperatur-Optimum für die meisten Pilze liegt bei 20 bis 35 °C (Kaltschmitt & Hartmann 2001). Im Bereich bis 30 °C werden sämtliche biologischen Aktivitäten gefördert, im Bereich über 60 °C können nur mehr thermophile Mikroorganismen, vor allem Pilze gedeihen. Jirjis (1995) konnte bei Versuchen mit belüfteten Hackschnitzel-Piles im Bereich des Abluftkanals höhere biologische Aktivität feststellen. Dies wird auf die dort niedrigere Temperatur von etwa 30 °C zurückgeführt.

Tabelle 6: Zusammenhang zwischen Einlagerungswassergehalt, Lagerungsort und Substanzabbau bei der Hackschnitzellagerung (nach Webenau et al. 1999)

Einlagerungswassergehalt [%]	Trockensubstanzabbau [% pro Monat]		Literaturquelle
	im Freien	unter Dach	
		0,5 bis 1	MARUTZKY (1982)
20		0,5	LAUER et al. (1986)
20		0,2	MITCHELL et al. (1988)
30		0,5 bis 1	WEINGARTMANN (1991)
40	1,3		JIRJIS (1995)
50		1 bis 2	WEINGARTMANN (1991)
50		2,8	LAUER et al. (1986)
50	4	2	MITCHELL et al. (1988)
55	1,8	1,3	STOCKINGER (1998)

Von Bedeutung für die Temperatur im Lager ist natürlich auch die Temperatur der Umgebungsluft, sie beeinflusst wesentlich die Temperatur der Randbereiche. Bei der Lagerung von Hackschnitzeln besteht in der Regel ein deutliches Temperaturgefälle vom Innen- zum Außenbereich des Lagers. Eine starke Verdichtung des Materials bewirkt, dass sich die Temperatur im Inneren des Lagers länger auf einem hohen Niveau befindet und gegen Ende der Erwärmung auch langsamer absinkt (Bally et al. 2000).

Der Verlauf und die Maximalwerte der gemessenen Temperaturwerte sind, wie die Rahmenbedingungen bei der Trocknung, meist sehr unterschiedlich. Meist kommt es aber bereits nach ein bis zwei Tagen nach der Einlagerung zu einer Erwärmung im Hackguthaufen von ca. 1 bis 2 °C pro Tag, in den Randbereichen ist die Hitzeentwicklung etwas langsamer. Bei Einlagerung im Sommer wurden lt. Bally et al. (2000) Temperaturen von 65 bis 70 °C erreicht, während im Winter nur etwa 50 °C gemessen wurden. Die Temperaturen im rund 5.000m³ großen Haufen blieben nach der Erwärmung über

mehrere Monate auf diesem hohen Niveau. Fagnäs et al. (2003) berichtet ebenfalls über einen starken Temperaturanstieg in Hackschnitzel-Piles. Nach etwa 20 Tagen wurde eine Temperatur über 60 °C erreicht und bis zum Ende der Versuche (3 Monate) gehalten (siehe Abbildung 18, S.34).

Wittkopf & Webenau (1999) führten Trocknungsversuche unter Dach mit Hackschnitzeln aus frischen Fichtenkronen durch. Der Wassergehalt der Grobhackschnitzel lag zum Zeitpunkt der Einlagerung bei 41 %, der Grünanteil (Nadeln) betrug 10 % der Trockenmasse. Im Verlauf des Versuches zeigte sich eine Erwärmung auf maximal 35,4 °C, die maximale Tagesdurchschnittstemperatur lag bei 34,5 °C. Diese Werte wurden etwa 50 Tage nach der Einlagerung erreicht (siehe Abbildung 14).

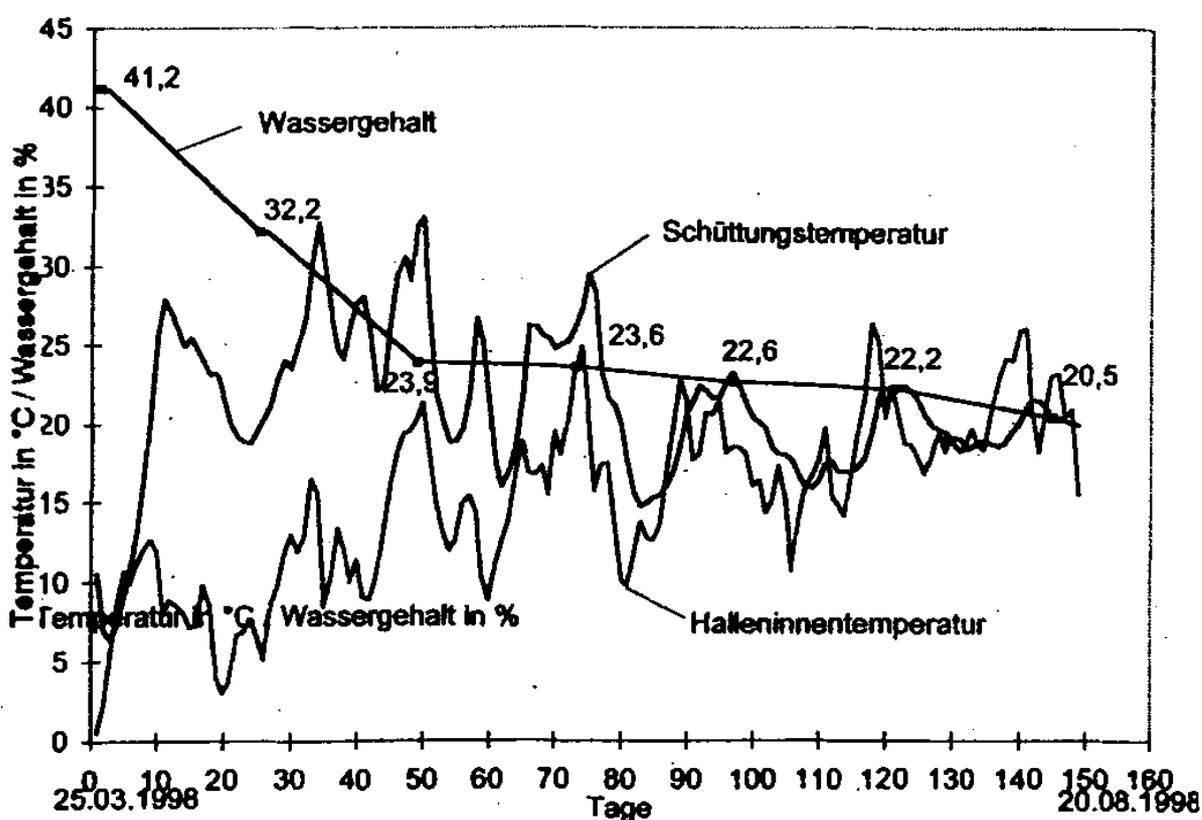


Abbildung 14: Verlauf der Schüttungs- und Halleninnentemperatur, sowie Wassergehalt der Hackschnitzel (aus Wittkopf & Webenau 1999)

Zu beobachten ist auch ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Halleninnentemperatur und der Temperatur in der Schüttung. Mit ein- bis zweitägiger Verzögerung folgte die Temperatur in der Schüttung den Änderungen der Raumtemperatur. Zu Beginn des Trocknungsprozesses herrschten in der Schüttung noch

um ca. 20 °C höhere Temperaturen, mit der Zeit wurde diese Differenz immer geringer. Dies zeigt auch deutlich die gute Durchlüftung der Grobhackschnitzel.

Buggeln (1999) stellt die Erwärmung eines Hackschnitzel-Piles grafisch durch Temperaturprofile dar (siehe Abbildung 15). Auf der Spitze des Piles bildet sich eine warme Zone (60 °C) aus, die gleichzeitig sehr feucht und sauer ist. Sie entsteht durch den Kamineffekt im Pile.

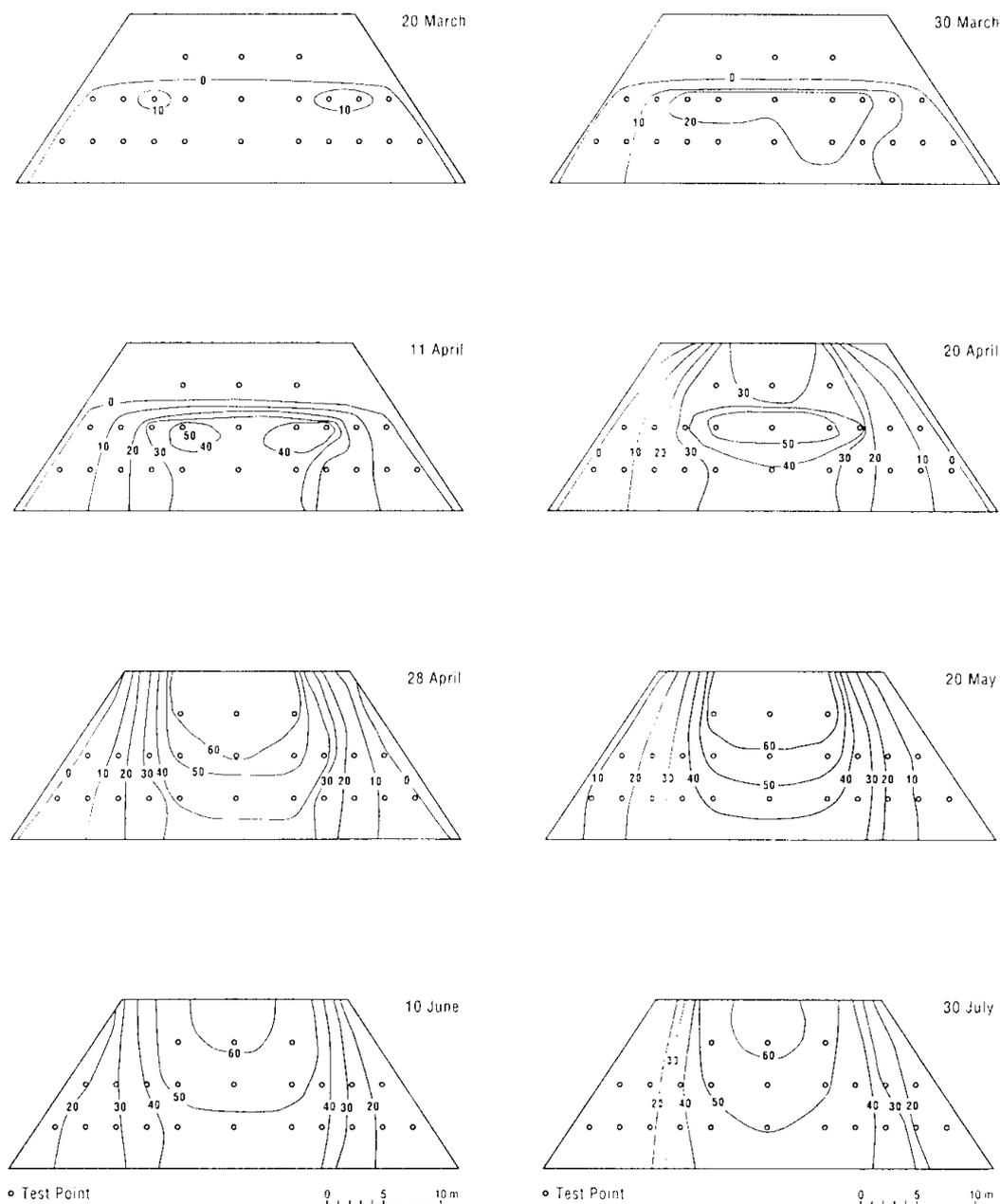


Abbildung 15: Temperaturprofile eines Hackgut-Piles von März bis Juli, Zonen gleicher Temperatur sind durch Isothermen (in 10° - Schritten) dargestellt (aus Buggeln 1999).

Lin & Schmidt (1991) untersuchten den Zusammenhang zwischen Temperaturentwicklung und Verdichtung bei Hackschnitzel aus Pappel. Der direkte Effekt der Verdichtung ist die Reduktion der lebensfähigen Parenchymzellen durch Beschädigung. Dies führt wahrscheinlich zu einer besseren Verfügbarkeit von Nährstoffen an der Oberfläche der Hackschnitzel und reduziert den Wassergehalt. Die Folge ist die Entwicklung einer anderen Biozönose auf dem verdichteten Material. Es kommt verstärkt zur Bildung von aeroben Bakterien und Basidiomyceten, während auf dem nicht verdichteten Material eher Phycomyceten und Fungi imperfecti entstehen. Dies bewirkt eine stärkere Erwärmung in den verdichteten Hackschnitzeln (siehe Abbildung 16).

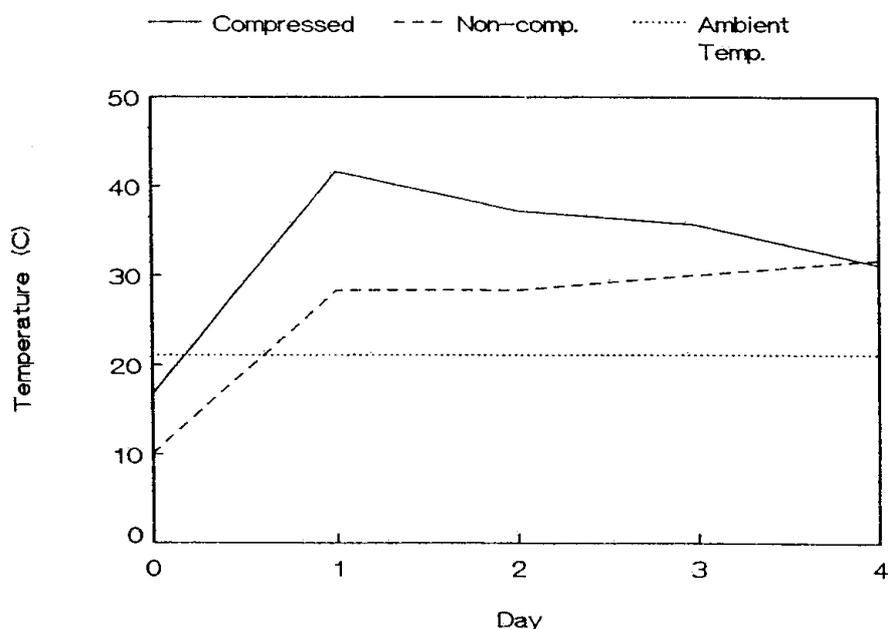


Abbildung 16: Temperaturentwicklung von verdichtetem und unverdichtetem Pappel-Hackschnitzeln (aus Lin & Schmidt 1991)

Die **Feuchtigkeit** des biogenen Materials stellt den wichtigsten Faktor für die Lagerfähigkeit dar. Durch Trocknung soll er so weit gesenkt werden, dass ein Abbau durch Mikroorganismen nicht mehr möglich ist. Kollmann (1951) gibt als Optimum für das Pilzwachstum eine relative Luftfeuchtigkeit von knapp unter 100 % an. Das Minimum liegt für die Mehrzahl der von ihm geprüften holzerstörenden Pilze bei 85 % relativer Luftfeuchtigkeit (bei einer Temperatur von 24 °C). Bezogen auf den Feuchtegehalt des Holzes gibt Kollmann (1951) als untere Wachstumsgrenze einen Wert von 15 % Wassergehalt an. Strehler (1996) sowie Hartmann & Kaltschmitt (2001) nennen als Obergrenze für die Lagerfähigkeit einen Wassergehalt von 20 %, ebenso Bally et al. (2000) setzt diese Grenze bei 25 % an. Laut ÖNORM M 7133 (1998) liegt sie bei 30 % Wassergehalt. Also Optimum des Pilzwachstums geben Hartmann & Kaltschmitt (2001) einen Wassergehalt von 30 bis 50 % an. Ab 65 % Wassergehalt kommt es zum

Wachstumsstillstand. Nach Brusche (1983) ist ein höherer Wassergehalt auch verbunden mit einem schnelleren Anstieg der Temperatur. Auch bei 25 % Wassergehalt tritt demnach noch ein Temperaturanstieg im Lager auf (siehe Abbildung 17).

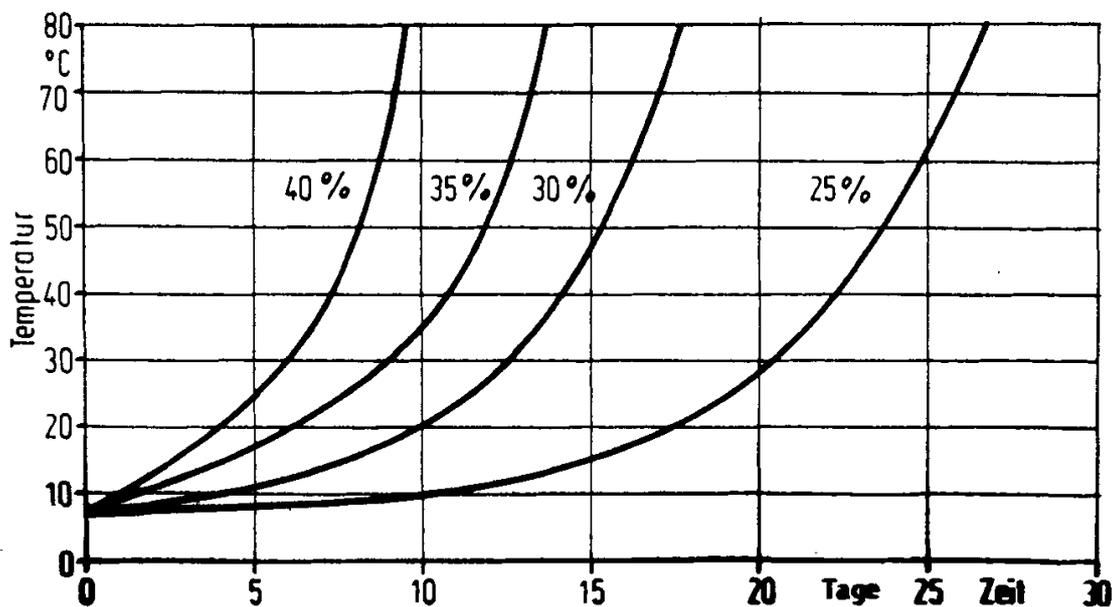


Abbildung 17: Temperaturanstieg bei der Hackschnitzellagerung in Abhängigkeit vom Wassergehalt (aus Brusche 1983)

Eine wichtige Rolle spielt beim biologischen Abbau auch die **Zusammensetzung des Lagergutes**. Grüne Nadeln und Blätter wirken sich sehr günstig auf die Entwicklung von Mikroorganismen aus. Die Begründung liegt einerseits im hohen Gehalt an organischen Verbindungen und andererseits im behinderten Luft- und somit Feuchteabtransport. Ernstson et al. (1991) untersuchte unter Laborbedingungen das Abbauverhalten von Nadeln, Rinde und Splintholz. Die Nadeln zeigen erwartungsgemäß vor Rinde und Splintholz die höchsten Abbaurate auf. Fagnäs et al. (2003) zeigt in Versuchen deutlich den Einfluss des Aufarbeitungsgrades auf die Temperaturentwicklung (siehe Abbildung 18). Die grünen Waldhackschnitzel erwärmten sich gegenüber den Waldhackschnitzeln ohne Grünanteil schneller und stärker. Die Sägespäne begannen sich sofort zu erwärmen, der Anstieg der Temperaturkurve ist aber flacher.

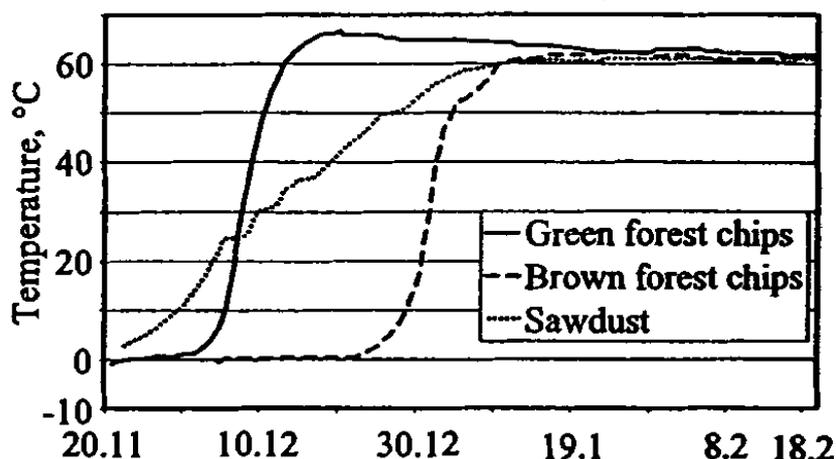


Abbildung 18: Temperaturentwicklung bei der Lagerung verschiedener Sortimente (aus Fagernäs et al. 2003)

Sehr feines Material behindert den Luftaustausch und schafft so günstige Bedingungen für Selbsterwärmung und damit für erhöhte biologische Aktivität. Sturos (1989) kommt zu dem Ergebnis, dass gröberes Material („chunkwood“) gegenüber feinerem Material besseres Trockungsverhalten, weniger Pilzwachstum und weniger Trockensubstanzverlust aufweist. Auch Jirjis (1995) weist darauf hin, dass gröberes Material weniger Trockensubstanzverlust und bessere Trocknung aufweist. Die Selbsterwärmung ist in diesem Fall geringer und der Temperaturverlauf im Gut wird stärker durch die klimatischen Umgebungsbedingungen beeinflusst. Versuche in Dänemark haben gezeigt, dass bei frischem Hackgut die monatliche Abbaurate durch die Produktion von besonders grobstückigem Hackgut (7,5 cm bis 15 cm Länge) um das Zehnfache auf rund 0,3 % pro Monat reduziert werden konnte (aus Hartmann & Kaltschmitt 2001).

Rundholz bzw. Ganzbäume zeigen gegenüber dem mechanisch aufbereitetem Hackgut allgemein deutlich geringere Abbauraten (siehe Tabelle 7). Weitere Untersuchungen (Neußer 1977b, Mackensen & Bauhus 1999) zeigen, dass der biologische Abbau von Rundholz im ersten Jahr sehr gering ist und bei Fichte und Kiefer rund 2 % beträgt. Bei Erle und Pappel wurden in einem Jahr höhere Abbauraten von bis zu 7 % bzw. 9 % festgestellt (Mackensen & Bauhus 1999). Diese Holzarten erlitten in den ersten 6 Monaten einen Substanzverlust von rund 2 %, danach erfolgte ein beschleunigter Abbau.

Tabelle 7: Ergebnisse einer norwegischen Untersuchung betreffend Verlust an Trockenmasse bei Lagerung von Stangenholz im Freien (aus Hartmann & Kaltschmitt 2001).

Lagerungsdauer	1 Jahr	2 Jahre	3 Jahre
Fichte	0,6 – 1,3	1,2 – 2,8	1,9 – 2,4
Kiefer	0,8 – 2,6	2,4 – 5,9	4,0 – 9,2
Birke	< 1,0 - 20	1 - 15	4 – 25

Bei vergleichbar guten Trocknungsfortschritten ist demzufolge der Lagerung in ganzen Stämmen bei Nadelholz gegenüber der Lagerung in aufbereiteter Form der Vorzug zu geben.

Die Trockensubstanzverluste bei Rinde liegen lt. Untersuchungen von Stockinger, Obernberger (1998) bei rund 1,5 % pro Monat. Damit liegen die Werte unter jenen von frischem Waldhackgut ohne Abdeckung.

5.3 Zusammenfassung - Heizwert, Trockensubstanzverlust und Lagerfähigkeit

Der Heizwert eines Brennstoffes ist stark von seinem Wassergehalt abhängig. Je mehr Wasser im Brennstoff enthalten ist, desto geringer wird sein Heizwert, da während des Verbrennungsvorganges Energie für die Verdunstung des Wassers aufgewendet werden muss. Durch die Trocknung von Energieholz wird also der Heizwert erhöht. Der höhere Heizwert wirkt sich in der Folge auch günstig auf Transport- und Lagerkosten aus, bei der Verbrennung selbst entstehen weniger Schadstoffe und Asche.

Ein weiterer Effekt der Trocknung ist die bessere Lagerfähigkeit. Energieholz unter 20 % bis 30 % Wassergehalt ist für Mikroorganismen schwer abbaubar. Es treten nur mehr geringe Trockensubstanzverluste auf. Bei der Lagerung muss aber berücksichtigt werden, dass neben dem Wassergehalt auch die Temperatur und die Zusammensetzung des Lagergutes wesentliche Einflussgrößen darstellen. Grünes Material begünstigt die Entwicklung von Mikroorganismen und kann zu hohen Temperaturen und hohen Trockensubstanzverlusten führen. Feines und verdichtetes Material verhindert den Luftaustausch und den Wasserabtransport im Lager und schafft somit ebenfalls positive Bedingungen für Mikroorganismen. Wie sich Material bei der Lagerung hinsichtlich Temperatur, Wassergehalt und Trockensubstanzverlust verhält kann kaum vorausgesagt werden, da viele Faktoren eine Rolle spielen. Verschiedene Autoren kommen aber zu dem

Ergebnis, dass der monatliche Trockensubstanzverlust bei Lagerung unter Dach zwischen 0,5 bis 2,8 % beträgt, bei der Lagerung im Freien zwischen 1,8 bis 4 %. Der Abbau von Rundholz ist dagegen um ein Vielfaches geringer. Er wird im ersten Jahr der Lagerung bei den meisten Holzarten mit weniger als 2 % angegeben. Bei Pappel, Erle und Birke sind höhere Abbauraten zu finden. In den ersten sechs Monaten der Lagerung sollte aber der Trockensubstanz bei den meisten Holzarten unter 2% liegen. Die Trockensubstanzverluste bei Rinde liegen bei rund 1,5 % pro Monat.

6 Gesundheitliche Gefährdung durch Schimmelpilze

Beim Abbau von Holz sind vor allem Schimmelpilze aus der Gruppe der Ascomyceten und der Deuteromyceten beteiligt. Sie bauen in erster Linie die Cellulose ab und nutzen den frei werdenden Kohlenstoff. Die verholzte Zellwand wird nicht abgebaut. Die Folgen sind Oberflächenvergrauung, Gewichts- und Festigkeitsverlust des Holzes, sowie schon erwähnt die Bildung von Sporen. Nach Angaben von Dreiner et al. (1994) konnten in der Luft von Hackschnitzzellagern Sporen von folgenden Pilzarten festgestellt werden: Bispora, Paxillus, Faligo, Trichoderma, Penicillium, Mucor, Paecilomyces, Aspergillus, Serratia. Jirjis & Lehtikangas (1990) führten Versuche zur Trocknung von Schlagabraum in Schweden durch.

Tabelle 8: Anzahl der Pilzsporen ($\times 10^{10}$) pro kg Trockensubstanz (nach Jirjis & Lehtikangas 1993)

Zeitpunkt	Anzahl Pilzsporen ($\times 10^{10}$)/kg Trockensubstanz		
	Haufen nicht abgedeckt	Haufen abgedeckt	Haufen abgedeckt*
Sep.90	0,2	0,2	0,3
Apr.91, (Messungen an zwei Stellen)	3,2	1,2	2,0
	1,7	3,0	-

* Material wurde erst im Sep. 90 hinzugefügt

Dazu wurde Schlagabraum aus der Endnutzung eines Fichtenbestandes zu einem 66 m langem, 4 m breitem und 2,7 m hohem länglichen Haufen aufgestapelt. Zur Beurteilung des Pilzwachstums wurde die Anzahl der Sporen pro kg trockenem Schlagabraum erhoben. Ausgehend von einem Wert von $0,5 \times 10^{10}$ Sporen pro kg Trockensubstanz wurde nach elfmonatiger Lagerung die Zunahme des Pilzsporenbestandes gezählt. Es wurde eine abgedeckte und eine nicht abgedeckte Variante untersucht. Die höchste Zunahme wurde zwar im unbedeckten Teil des Piles festgestellt (siehe Tabelle 8), die

Streuung der Ergebnisse war aber zu groß, um einen Trend nachzuweisen. Allgemein konnte Pilzwachstum vor allem in nassen und/oder feinem Material beobachtet werden. Die am häufigsten vorkommenden Arten waren *Penicillium* sp., *Aspergillus niger*, *A. fumigatus* und *Aureobasidium pullulans*. Die Autoren beurteilen die Zahl der gefundenen Sporen als relativ niedrig und hinsichtlich einer Gesundheitsgefährdung als unproblematisch.

Nach Reiß (1997) sind schätzungsweise 20 % aller Menschen empfindlich gegenüber Allergenen und können leicht durch Luftsporen bei Konzentrationen von $10^6/m^3$ oder weniger sensibilisiert werden. Die Pilzsporen schädigen die Lunge und das Immunsystem. Ist dieses bereits geschwächt und kann somit das Eindringen der Pilze in den Körper nicht verhindert werden, sind Mykosen (Pilzinfektionen) die Folge. Die ersten Symptome zeigen sich bereits 7 bis 10 Stunden nach der Infektion. Es treten Fieber, Kopfschmerzen, Atemnot und Müdigkeit auf.

Schimmelpilze bilden Sporen bevorzugt in Zonen höherer Feuchtigkeit, dazu gehören vor allem Randbereiche im Hackschnitzellager, wo die wassergesättigte Luft an den kühleren Hackschnitzeln kondensiert. Die kritische Phase mit den höchsten Pilzkonzentrationen liegt nach Weingartmann (1991) im Bereich zwischen 3 und 6 Monaten Lagerdauer, Thörnqvist beobachtete ab einer Lagerungsdauer von 6 Monaten eine deutliche Zunahme der Sporen (Webenau et al. 1999).

Zur Minimierung des Gesundheitsrisikos kommen folgende Maßnahmen in Frage: (Weingartmann 1991, Hartmann & Kaltschmitt 2001, Fagernäs et al. 2003):

- Senkung des Wassergehaltes des Hackgutes unter den Fasersättigungspunkt, die Abtrocknung sollte innerhalb einiger Wochen erfolgt sein, dabei ist auf eine gleichmäßige Durchlüftung zu achten.
- Hackschnitzel aus Harthölzern werden aufgrund ihrer vergleichsweise höheren Zahl an lebenden Zellen stärker von Pilzen befallen als jene aus Nadelholzarten, eine gemischte Lagerung ist deshalb vorteilhaft.
- Hackschnitzellager sollten vollständig geräumt und gereinigt werden.
- Vermeidung von Luftbewegungen im Lager, Mechanisierung und Automatisierung von Umschlagprozessen.
- Luft aus dem Hackgutlager sollte nicht in Arbeits- und Aufenthaltsräume gelangen können.
- Ausrüsten von Fahrzeugen mit Mikrofiltern und die Benützung von persönlicher Schutzausrüstung (Atemmasken)

7 Ökologische Aspekte der Energieholztrocknung

Ökologische Probleme spielen bei der Lagerung im Wald immer eine gewisse Rolle. In dieser Arbeit sollen zwei Themen aufgegriffen werden, die bei der Energieholz-Nutzung von Bedeutung sind. Einerseits das phytosanitäre Problem des Käferbefalls von im Wald zwischengelagerten Holz und andererseits das Problem des Nährstoffentzuges, wenn nicht nur Holz, sondern auch Äste und Grünmaterial verwertet werden.

7.1 Gefährdung durch Käferbefall während der Trocknungsphase

Bei der Lagerung heimischer Nadelbaumarten im Wald sind sowohl Ganzbäume als auch Rundholz ein attraktives Brutmaterial für Forstschädlinge (z.B. *Ips typografus*, *Pityogenes chalcographus*). Schwertfeger (1981) empfiehlt zur Bekämpfung des Buchdruckers wintergeschlägertes Holz bis spätestens Mitte Mai aus dem Wald zu entfernen. Entscheidend ist, dass das Material entfernt bzw. gehackt wird, bevor die Borkenkäfer sich verpuppen können. Zur Vorbeugung von Blastophaus-Befall bei Kiefern wird die Räumung von wintergeschlägertem Holz bis spätestens Ende Mai empfohlen. Im Zuge seiner Versuche zur Ganzbaum-Lagerung im Wald kommt Jonas zu folgendem Schluss für die praktische Energieholztrocknung (Jonas 1984 A): „Erfolgt die Ernte im Spätsommer oder Frühherbst, so kann die Abtrocknung von schwächerem Holz aus der Erstdurchforstung bis zum Frühjahr soweit erfolgen, dass im Frühjahr keine Käfergefahr mehr besteht.“ Aktuelle Aussagen von Tomitschek (2004) und Perny (2004) Grenzen diese Empfehlung ein, sie berichten, dass auch vor dem Winter geschlägerte Bäume im nächsten Frühjahr noch „fängisch“ sein können. Demnach muss bei jeder Lagerung von Holz im Wald die aktuelle Käfergefahr sorgfältig beachtet werden. Lagerplätze in Waldnähe sind während der Vegetationsperiode diesbezüglich zu überwachen. Eine andere Möglichkeit zur Umgehung der phytosanitären Gefahr ist die Lagerung des Holzes außerhalb des Waldes. Über den dabei einzuhaltenden Mindestabstand gibt es unterschiedliche Auffassungen. Tomitschek (2004) empfiehlt für die Lagerung von potentiell Brutmaterial als optimalen Abstand zum Waldrand 150 m. Als absoluten Mindestabstand gibt er 50 m an. Wauer (2000) empfiehlt ebenso die Lagerung des Holzes außerhalb vom Wald, gibt aber einen Mindestabstand von 500 m an. Selbst bei diesem Abstand seien einzelne Käferschäden nicht auszuschließen.

Neben den Aussagen von Fachliteratur und Experten ist für die Lagerung von Energieholz auch das österreichische Forstgesetz (1975) von Bedeutung. Der Schutz des Waldes vor Forstschädlingen ist unter § 43- § 45 geregelt. Schutz vor Forstschädlingen,

Anzeigepflicht, sowie Maßnahmen bei Schädlingsbefall und Gefahrdrohender Vermehrung sind im Forstgesetz vorgeschrieben. Paragraph 45, Absatz 1 lautet wie folgt:

§ 45. (1) *Es ist verboten, durch Handlungen oder Unterlassungen die gefahrdrohende Vermehrung von Forstschädlingen zu begünstigen; dies gilt auch für den Fall, dass eine Massenvermehrung nicht unmittelbar droht. Bereits gefälltes Holz, das von Forstschädlingen in gefahrdrohendem Ausmaß befallen ist oder als deren Brutstätte dienen kann, ist, wo immer es sich befindet, so rechtzeitig zu behandeln, dass eine Verbreitung von Forstschädlingen unterbunden wird. Diese Verpflichtung trifft den Waldeigentümer oder den jeweiligen Inhaber des Holzes.*

Dieser Text wird durch die Forstschutzverordnung (BGBL II Nr. 19/2003) ergänzt, welche vorsieht, dass im Falle gefahrdrohender Vermehrung von Forstschädlingen, Holz welches nicht in unbefallenem Zustand aus dem Wald entfernt wurde bekämpfungstechnisch zu behandeln ist und dass allenfalls vorhandene Forstschädlinge vernichtet werden müssen.

7.2 Problematik des Nährstoffentzug bei Ganzbaumnutzung

Bei der Nutzung von Energieholz kommt es dann zu verstärktem Nährstoffaustrag, wenn außer dem Stammholz auch Äste und Grünmaterial entnommen werden. Jonas untersuchte bei seinen Versuchen (Jonas 1984 A) auch den Nährstoffaustrag bzw. die Nährstofffreisetzung, welche durch verschiedene Nutzungsvarianten verursacht wurde. Als Beispiel dafür nahm er den 17jährigen Bestand, von welchem 2.000 von 5.000 Bäumen je ha entnommen wurden. Die entnommenen Bäume enthielten insgesamt 70 Tonnen oberirdische Biomasse. Diese teilte sich in 30 Tonnen Schaftholz, 16 Tonnen Zweige und 24 Tonnen Nadelmasse (alle Mengen beziehen sich auf ein ha Fläche). Er stellte seiner Kalkulation 3 Szenarien zugrunde: (1) Nutzung der gesamten oberirdischen Biomasse; (2) Nutzung von Stammholz und Astholz durch "Abnadeln" der Bäume (ein Teil der Feinäste und der Grossteil der Nadeln bleibt durch Rücken im Bestand), (3) Nutzung des Stammholzes ohne Äste und Nadeln. Bei der Variante 1 werden 36 % der Nährstoffe, welche in der oberirdischen Biomasse enthalten sind aus dem Bestand exportiert. Bei Variante 2 geht Jonas von etwa 45 Tonnen genutzter Biomasse aus und errechnet einen Nährstoffexport von 12 - 15 %. Dem Nährstoffaustrag steht eine Nährstofffreisetzung im Ausmaß von 21 - 24 % positiv gegenüber. Variante 3, die ausschließliche Nutzung des Stammholzes durch Entasten der Bäume, ergibt einen Nährstoffentzug von 7 % und eine Freisetzung von rund 30 % der in der oberirdischen Biomasse enthaltenen Nährstoffe an den Boden.

Die obig dargelegten Tatsachen sollten insbesondere dort berücksichtigt werden, wo Standorte bereits eine Degradation aufweisen. Danneberg et al. (2001) geben Richtlinien zur Waldbodensanierung und weisen Gebiete aus, in denen aufgrund natürlicher Nährstoffarmut und historischer Bodennutzung (Streunutzung) Fichten- und Kiefernwälder auf degradierten Standorten stehen. In Österreich handelt es sich dabei um folgende Gebiete: Böhmisches Masse, Zentralalpen (silikatisches Gestein), Nördliches und Südöstliches Alpenvorland (Quarzschotter). In diesen Gebieten treten zum Teil stark degradierte Böden auf, auf denen ein weiterer Nährstoffentzug nicht empfehlenswert ist. Neben degradierten Böden gibt es in diesen Gebieten jedoch auch gut mit Nährstoffen versorgte Standorte. Für den einzelnen Standort ist diese Frage jeweils individuell zu klären.

8 Normative Kategorisierung von Energieholz entsprechend dem Wassergehalt

Normative Brennstoffspezifikationen sind ein zentrales Instrumentarium für den effizienten Handel von festen Biobrennstoffen - sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene. Sie dienen dazu, ein eindeutiges Verständnis über die Qualität, Zusammensetzung und Eigenschaften des Brennstoffes zwischen Käufer und Verkäufer sicherzustellen. Welche standardisierten Arten der Einteilung nach dem Brennstoffwassergehalt es in Österreich bzw. für den grenzüberschreitenden Handel in Europa gibt, soll nachfolgend kurz dargelegt werden.

8.1 Regelungen für Österreich

Auf nationaler Ebene findet sich eine normative Kategorisierung von Energieholzsportimenten (mit Ausnahme der Holzpresslinge Pellets und Briketts) einzig in der ÖNORM M 7133 „Holzhackgut für energetische Zwecke“ (Ausgabe 1998). Die Norm umfasst die Einteilung von Holzhackgut nach verschiedenen Kriterien, sowie Methoden zu deren Prüfung. Notwendige Begriffsdefinitionen sowie Berechnungsfunktionen zur Ermittlung des Heizwertes bei unterschiedlichen Wassergehalten etc. finden sich in der ÖNORM M 7132 „Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff“ (Ausgabe 1998).

In Tabelle 9 findet sich die Wassergehaltsklasseneinteilung der ÖNORM M 7133. Neben der Klassenbezeichnung und den Wassergehaltsgrenzen gibt die ÖNORM M 7133 noch zusätzliche Informationen bezüglich der Lagerfähigkeit bzw. Beschaffenheit des

Holzhackgutes. Hackgut bis 30 % Wassergehalt wird laut Norm als „lagerbeständig“ definiert, der Bereich 30 bis 35 % Wassergehalt gilt bereits als „beschränkt lagerfähig“.

Tabelle 9: Klasseneinteilung von Holzhackgut nach dem Wassergehalt gemäß ÖNORM M 7133

Klasse	Wassergehalt	Anmerkungen
Holzhackgut W 20	$w \leq 20 \%$	lufttrockenes Holzhackgut
Holzhackgut W 30	$20 \% < w \leq 30 \%$	lagerbeständiges Holzhackgut
Holzhackgut W 35	$30 \% < w \leq 35 \%$	beschränkt lagerbeständiges Holzhackgut
Holzhackgut W 40	$35 \% < w \leq 40 \%$	feuchtes Holzhackgut
Holzhackgut W 50	$40 \% < w \leq 50 \%$	erntefrisches Holzhackgut

8.2 Regelungen für Europa

Seit mehreren Jahren werden auf europäischer Ebene im Auftrag von CEN (europäisches Normungsinstitut) und der Europäischen Kommission neue Normen für feste Biobrennstoffe erarbeitet. Die Kategorisierung der Brennstoffe wird dabei in der Norm prCEN TS 14961 „Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikation und –klassen“ (2005) behandelt. Ähnlich der ÖNORM M 7133 können auch dort Brennstoffe in Wassergehaltsklassen eingeteilt werden. Welche Wassergehaltsklassen für welchen Biobrennstoffe von Relevanz sind, ist für die sieben wichtigsten Biobrennstoffe (u.a. Pellets, Briketts, Hackgut, Rundholz, Rinde, Sägespäne) in eigenen Tabellen definiert. Verfeinerte Definitionen für Brennstoffe die in Kleinfeuerungsanlagen eingesetzt werden, finden sich im Annex der Norm.

In nachfolgender Tabelle sind die für die jeweiligen Brennstoffe festgelegten Wassergehaltsklassen dargelegt. Ein Brennstoff ist beispielsweise der Wassergehaltsklasse M20 zuzuteilen, wenn der durchschnittliche Wassergehalt einer Probe zwischen 20 % und 30 % liegt.

Tabelle 10: Wassergehaltsklassen für Hackgut, Shreddermaterial, Rinde, Sägespäne und Brennholz gemäß prnCEN TC 14961.

Klassen	Hackgut Shreddermaterial	Rinde	Sägespäne	Brennholz
M20	X		X	X
M30	X		X	X
M35			X	
M40	X	X		X
M50		X		
M55	X		X	
M60		X		
M65	X		X	X
M70		X		

Neben der reinen Kategorisierung finden sich vergleichbar der Österreichischen Norm ÖNORM M 7133 Anmerkungen betreffend den Wassergehalt bzw. der Lagerfähigkeit der Proben aufgrund der vorangegangenen Trocknung. Tabelle 11 gibt einen Überblick über diese klassen- und brennstofforientierten Anmerkungen in Bezug zur jeweiligen Wassergehaltsklasse.

Tabelle 11: Klassenspezifischen Anmerkungen zur Lagerfähigkeit bzw. dem Trocknungsgrad von Biobrennstoffen gemäß prnCEN TC 14961.

Klassen	Hackgut Shreddermaterial	Sägespäne	Brennholz
M20	Trocken	trocken	ofenfertig
M30	Lagerfähig	lagerfähig	getrocknet im Lager
M35		beschränkt Lagerfähig	
M40	beschränkt lagerfähig		getrocknet im Wald
M65	-	-	frisch

9 Methoden zur natürlichen Trocknung von Energieholz im Freiland

Die Trocknung von Waldhackgut im Freiland erfolgt durch Konvektion. Darunter versteht man eine Trocknung aufgrund durchströmender Luft, wobei die Luftbewegung durch Druck- (Wind) und/oder Dichteunterschiede (Auftriebsströmung) entsteht. Die Dichteunterschiede ihrerseits resultieren wiederum aus Feuchte- bzw. Temperaturunterschiede. Zur Trocknung werden ausschließlich natürlichen Wärmequellen wie Sonne, Wind und Wärme aus biologischen Prozessen verwendet.

Im nachfolgenden Teil sollen die wichtigsten Methoden zur Trocknung von Waldhackgut hinsichtlich der angewandten Verfahrensweisen und der mit den Methoden erzielten Ergebnissen beschrieben werden. Weiters wird versucht jeweils eine zusammenfassende Bewertung abzugeben.

9.1 Ganzbaum-Trocknung

Die Ganzbaum-Trocknung besteht in der Lagerung von ganzen, nicht aufgearbeiteten Bäumen. Häufig wird diese Methode in der Literatur erwähnt und meist im Zusammenhang mit der Lagerung von Laubhölzern (Skaar 1988, Kaltschmitt & Hartmann 2001), seltener auch im Zusammenhang mit Nadelhölzern (Jonas et al. 1990). Versuche zu diesem Verfahren wurden in jüngerer Zeit nicht durchgeführt, alle aussagekräftigen Ergebnisse stammen aus der Zeit vor 1980.

Hakkila (1962) führte 1959 bis 1960 umfangreiche Untersuchungen zur Ganzbaum-Trocknung an sechs Standorten in Finnland durch. Seine Untersuchungen galten Fichte, Kiefer, Birke und Grauerle. Es wurden bezüglich Trocknung die besten Lagerungsvarianten sowie die besten Fällzeitpunkte untersucht. Weiters untersuchte man den Einfluss des Stammdurchmessers auf die Trocknung sowie den Anfangswassergehalt zu verschiedenen Jahreszeiten. Hakkila lagerte in zwei aufeinander folgenden Jahren frisch geerntete Ganzbäume direkt am Fäll-Ort. Die Durchmesser des Versuchs-Materials waren 2 - 14 cm in Brusthöhe. Die Versuchsbäume wurden zu mehreren Zeitpunkten im Jahr gefällt. In monatlichen Intervallen wurden Bäume beprobt um die fortschreitende Trocknung zu untersuchen, dabei wurden jeweils Proben von $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, und $\frac{3}{4}$ der Baumhöhe entnommen. Die letzten Proben wurden im Herbst entnommen. Zusätzlich wurden bei der Lagerung von Kiefern-Ganzbäumen, Versuche mit Teilentrindung des astfreien Stammes bis in Brusthöhe durchgeführt.

Parallel zu den Ganzbäumen führte Hakkila auch Versuche mit gestapeltem Rundholz durch. Diese Versuche werden auch im Kapitel 9.1.2 behandelt, zu vergleichenden Zwecken werden einige der Ergebnisse jedoch bereits in diesem Kapitel einbezogen. Folgende **Stapelformen** wurden untersucht: Stapel am Boden, mit zwei Querhölzern etwa 20 cm bodenfrei gehalten, Stapel mit parallelen Stämmen auf Gestellen ca. 1 m über dem Boden und Kreuzstapel mit einem Querholz zwischen jeder Lage und etwa einer Stammbreite Abstand zwischen den Rundhölzern in horizontaler Richtung. Die Stapel enthielten etwa 25 Stämme, sie wurden nur zu Beginn und am Ende des Versuchs beprobt. Insgesamt wurden im Versuch über 4000 Ganzbäume und etwa 2000 Rundhölzer untersucht.

Die Wetterbedingungen für Trocknung waren im Sommer 1959 sehr gut, im Sommer 1960 durchschnittlich bzw. in der zweiten Sommerhälfte schlecht. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Die Trocknung von wintergeschlägerten Nadel-Bäumen begann mit der Schneeschmelze nahm aber erst im April bedeutsame Ausmaße an, i.e. Wassergehaltverluste von mehr als 5 % pro Monat. Wintergeschlägerte Birken und Grauerlen begannen nach dem Blattaustrieb zu trocknen, welcher auch bei den bereits gefällten Bäumen stattfand, jedoch mit einer gewissen Verzögerung. Bei sommergeschlägertem Laubholz-Ganzbäumen fand der Hauptanteil der Trocknung einen Monat nach der Fällung statt. Hakkila vermutet, sogar einen viel kürzeren Zeitraum. Er spricht von einem Tag an welchem die Haupttrocknung stattfindet. Diese Vermutung von Hakkila stimmt mit den Aussagen von Polster & Schletter (1962) sowie Neußer et al. (1981a) überein, wonach junge Bäume innerhalb weniger Tage durch Austrocknung 20 % ihres Gewichtes verlieren (siehe auch Abbildung 20).

Insgesamt stellte Hakkila bei seinen Versuchen für Ganzbäume einen höheren Trocknungseffekt fest als für Rundholz (siehe Tabelle 12). Weiters hatte die Trocknung als Ganzbaum folgende Effekte: die Feuchte-Verteilung im Stamm war regelmäßiger, als bei aufgearbeitetem Holz. Der Stammdurchmesser hatte einen geringeren Einfluss auf die Trocknung als bei Rundholz (limitierend ist hierbei zu bemerken, dass nur Stämme mit Durchmessern bis 14 cm BHD untersucht wurden). Für sehr kleine Durchmesser (2 - 3 cm) fand Hakkila, dass diese am besten im entasteten Zustand trocknen, bei allen stärkeren Durchmessern erzielte er mit Ganzbäumen bessere Trocknungsergebnisse. Für Birken-Ganzbäume fand Hakkila keinen Zusammenhang zwischen Durchmesser und Trocknungsgeschwindigkeit. Tabelle 12 zeigt einen Teil der Versuchsergebnisse für Fichte. Die dargestellten Wassergehalte sind die im Herbst, am Ende des Lagerversuches gemessenen Werte. (Im Jahr 1960 wurde der Versuch bis September durchgeführt, 1959

bis November). Die dargestellten Wassergehalte unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Schlägerungszeitpunkte und hinsichtlich der Lagerungsmethoden. Wurde z.B. ein Baum im April geschlägert (siehe schraffierte Zeile), so ergab sich aufgrund der Lagerung als Ganzbaum bis zum Herbst ein Wassergehalt von durchschnittlich 24 %. Wurde zum gleichen Zeitpunkt entastetes Holz auf bodenfreie Stapel gelagert, so erzielte es bis zum Herbst einen durchschnittlichen Wassergehalt von 31 %. Wurde das Holz im selben Zeitraum auf Kreuzstapel gelagert, dann hatte es im Herbst einen Wassergehalt von 22 %.

Tabelle 12: Wassergehalt von Fichten im Herbst in Abhängigkeit vom Fällzeitpunkt, nachdem sie mit unterschiedlichen Methoden gelagert wurden. Mittelwerte über alle Standorte und Versuchsjahre. (nach Hakkila 1962)

Fällzeitpunkt	Lagerungsvariante			
	Ganzbaum (1959 & 1960)	Kreuz-Stapel (1959)	Stapel auf 1m über dem Boden. (1959 & 1960)	Stapel ca. 20 cm über dem Boden (1960)
Dezember	26 % WG	-	-	-
Jänner	26 % WG	-	31 % WG	32 % WG
Februar	24 % WG	22 % WG	28 % WG	30 % WG
März	23 % WG	20 % WG	21 % WG	
April	24 % WG	22 % WG	29 % WG	31 % WG
Mai	25 % WG	20 % WG	27 % WG	36 % WG
Juni	26 % WG	23 % WG	30 % WG	36 % WG
Juli	28 % WG	28 % WG	36 % WG	39 % WG
August	36 % WG	40 % WG	41 % WG	45 % WG
September	44 % WG	51 % WG	52 % WG	
Oktober	47 % WG			
November	49 % WG			

Hakkila kam zum Schluss, dass der beste Zeitpunkt zur Fällung in den Monaten Februar bis April liegt, wenn das Holz im Herbst gehackt werden soll. Der Wassergehalt sank bis zum November im Mittel auf 24 %, wenn die Bäume in dieser Periode geschlägert und am Fällort belassen wurden. Sehr luftige Kreuzpolter erzielten während der selben Zeit mittlere Wassergehalte von rund 21 %. Unter den ungünstigeren Bedingungen im Jahr 1960 erreichte man durch Ganzbaum-Trocknung bei Fichte Wassergehalte um 25 %, aufgearbeitetes, parallel gestapeltes Holz trocknete im selben Jahr nur auf Wassergehalte um 30 %.

In Abbildung 19 ist die Veränderung des Wassergehaltes der Fichten-Ganzbäume infolge unterschiedlicher **Schlägerungszeitpunkte** über das gesamte Beobachtungsjahr 1959 dargestellt. Die Grafik wurde nach Zahlen von Hakkila erstellt. Dabei wird insbesondere deutlich, dass sich der Trocknungsverlauf von den im März, April und Mai gefällten Bäumen (rot, gelb, und orange) mit den Trocknungsverläufen der früher gefällten Bäumen überschneidet, d.h. Fichten die um diese Zeit gefällt wurden, haben die früher gefällten Fichten bis zum Herbst in ihrer Trocknung „überholt“. Alle Bäume die später als Mai geschlägert wurden, konnten den „Rückstand in der Trocknung“ nicht mehr einholen. Des weiteren ist in der Abbildung die Schwankung des Anfangswassergehaltes ersichtlich, welcher sich zwischen 52 % in den Wintermonaten und rund 45 % im Hochsommer bewegte.

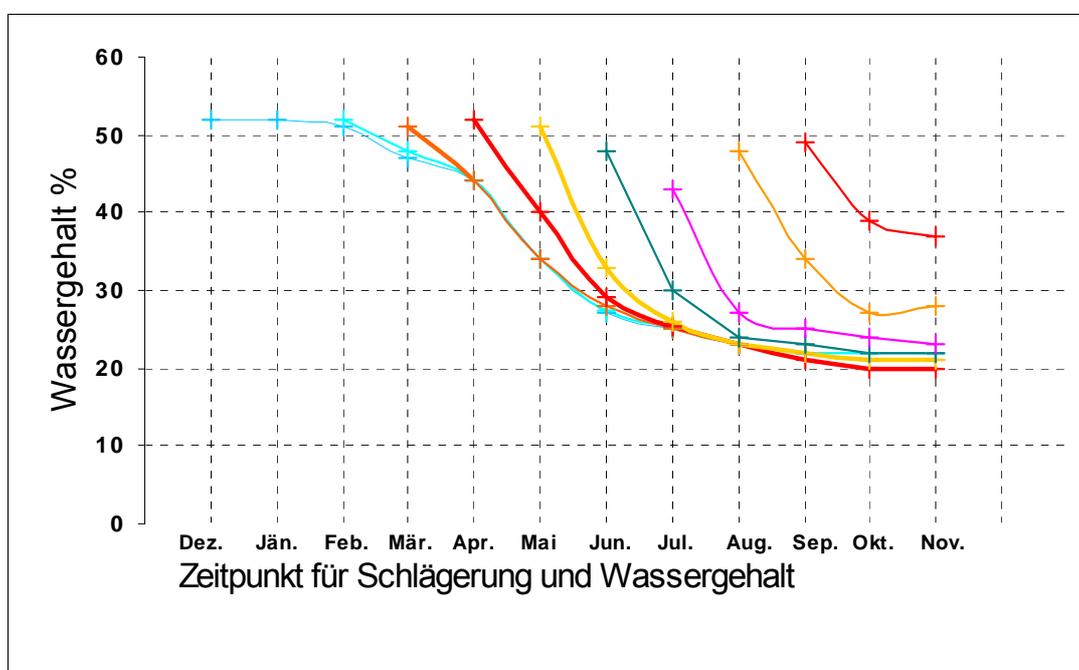


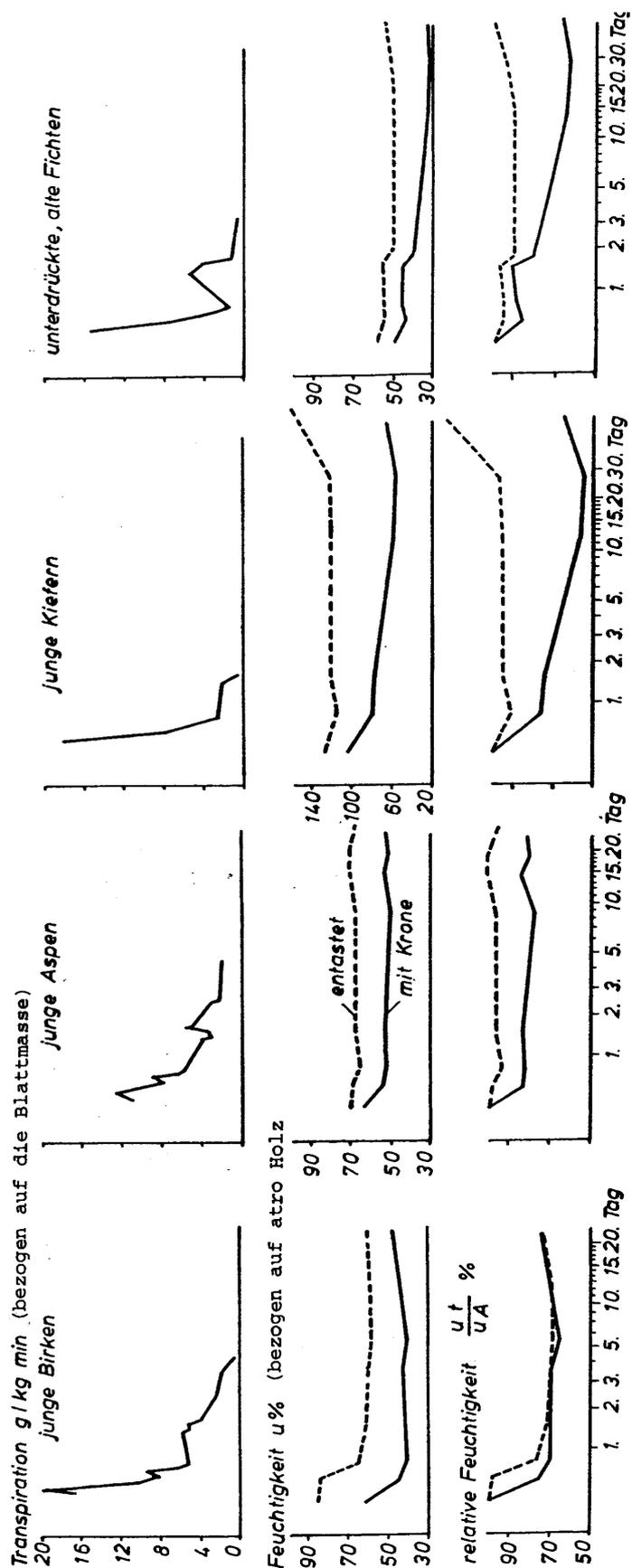
Abbildung 19: Verlauf des Wassergehaltes von Fichten-Ganzbäumen nach der Schlägerung zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr 1959 (erstellt nach Hakkila 1962)

Bei Kiefer lagen die Wassergehalte nach einer Saison im Schnitt etwa 5 % höher als bei der Fichte. Nur im Jahr 1959 gelang es unter 30 % zu trocknen, ausgenommen durch Teilentrindung des astfreien Stammes, wodurch im Jahr 1960 eine Trocknung auf 27 % WG erreicht wurde. Der Einfluss des Fällzeitpunktes war bei Kiefer gleich wie bei der Fichte. Bei der Kiefer trat im Herbst 1959 eine Wiederbefeuchtung des Holzes, mit einem Anstieg des Wassergehaltes um einige Prozente auf.

Birken-Ganzbäume hatten einen weit gestreuten Anfangswassergehalt von 38 – 51 %. Nach Lagerung unter guten Bedingungen trockneten sie bis zum Herbst auf Wassergehalte von durchschnittlich 30 %. Unter schlechteren Bedingungen lag der Wassergehalt um 2 % oder 4 % höher. Aufgearbeitete und gestapelte Birkenstämme erreichten durchschnittliche Wassergehalte von 36 %. Der Wassergehalt dieser Stämme sank nur unter den günstigen Witterungsverhältnissen im Sommer 1959 nennenswert. Im Jahr 1960 fand kaum eine Trocknung der Birkenstämme statt. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass Birken mit intakter Krone selbst bei ungünstiger Witterung zuverlässiger trocknen als Birkenstämme. Auch bei den anderen Baumarten lassen die Zahlen von Hakkila diese Vermutung zu.

Der Wassergehalt von Grauerle sank als Ganzbaum gelagert bis zum Herbst durchschnittlich auf 35 %. Bei Polterlagerung lag der Wassergehalt im Herbst noch bei durchschnittlich 40 %.

Polster & Schletter (1962) untersuchten die Trocknung von Birke, Aspe, Kiefer und Fichte, wenn sie im ganzen bzw. im entasteten Zustand gelagert wurden. Sie untersuchten den Wassergehalt der Bäume zu mehreren Zeitpunkten während der Lagerung. Zur Proben-Entnahme verwendeten sie einen Zuwachsbohrer, um den Wassertransport in den noch lebenden Bäumen nicht zu stören. Zusätzlich erhoben sie die Transpirationsraten der Blätter und Nadeln in den ersten fünf Tagen nach der Fällung. Aus Ihren Ergebnissen erstellten sie Abbildung 20. In der Abbildung wird oben die Änderung der Transpiration der Ganzbäume ab dem Zeitpunkt der Fällung beschrieben. Es zeigt sich, dass gefällte Bäume nach dem Zeitpunkt der Fällung noch 3 – 5 Tage weitertranspirieren. In der Mitte der Abbildung 20 ist die Änderung des Wassergehaltes von Ganzbäumen und entasteten Bäumen einander gegenübergestellt. Es ist klar ersichtlich, dass Bäume mit intakter Krone schneller abtrocknen, als entastete. Der Effekt ist bei Laubbäumen in den ersten Tagen ausgeprägter als bei Nadelbäumen. Später jedoch setzt sich die Trocknung bei Nadelbäumen länger fort als bei Laubbäumen. Dies stimmt mit den Untersuchungen von



ut = Holzfeuchtigkeit nach t Tagen Lagerzeit
 uA = Holzfeuchtigkeit im Ausgangszustand

Abbildung 20: Verlauf von Transpiration und Holzfeuchte (bezogen auf die Darmasse), bei Birke, Aspe, Kiefer und Fichte, aus Polster & Schletter (1962)

Hakkila (1962) überein, welche ebenso zeigten, dass die Wirksamkeit der Ganzbaum-Trocknung über mehrere Monate bei Nadelhölzern stärker ist als bei Laubhölzern. Polster & Schletter erklärten diesen langanhaltenden Effekt damit, dass Nadeln auch nach dem Schließen der Spaltöffnungen, welches binnen weniger Stunden erfolgt, noch längere Zeit über die Kutikula der Nadeln Wasser abgeben. Sie nannten diese Wasserabgabe „kutikuläre Transpiration“. In Abbildung 20 ist bemerkenswert, dass selbst bei älteren Fichten nach 30 Tagen Lagerungszeit als Ganzbaum der Wassergehalt auf unter 25 % sinkt. Polster und Schletter fanden, dass bei größeren Nadelbäumen der Effekt der Ganzbaum-Trocknung bis zu zwei Monaten anhielt. Sie leiteten daraus ab, dass die Geschwindigkeit der Ganzbaum-Trocknung vom Verhältnis zwischen Stammholzvolumen und Kronenmasse abhängig ist. *D.h.: je größer die Kronenmasse im Vergleich zum Stamm, um so schneller erfolgt die Trocknung. Je kleiner hingegen die Kronenmasse im Vergleich zum Stamm, um so länger dauert die Trocknung.*

Aufbauend auf die Ergebnisse von Hakkila (1962) sowie Polster & Schletter (1962) wurden auch in Österreich Anfang der Achtziger-Jahre einige Versuche zur Ganzbaum-Trocknung durchgeführt. Dokumentationen dazu finden sich in Jonas (1984a und 1984b), sowie in Neußer et al. (1981a).

Die Versuche von Jonas (Jonas 1984a) befassten sich mit Fichten-Durchforstungen mit anschließender Nutzung des Materials als Waldhackgut. Zwei Bestände im Alter 17 und 22 Jahre, Oberhöhe 7 und 9 m wurden nach der Ernte in zwei Varianten gelagert. Einmal als Ganzbäume, die im Bestand belassen wurden. Im zweiten Bestand wurden die Bäume entastet und auf Stapeln gelagert. Die Ganzbäume erreichten von April bis Juni eine Senkung des Wassergehalts von 58 % auf 41 %. Das entastete Material konnte im gleichen Zeitraum den Wassergehalt von 61 % auf 42 % senken. Die Versuche mussten vorzeitig abgebrochen werden, da die Bäume teilweise von *Pityogenes Chalcographus* (Kupferstecher) befallen wurden. Ein signifikanter Unterschied in der Trocknung zwischen intakten und aufgearbeiteten Bäumen konnte in diesem Versuch nicht nachgewiesen werden. Jonas schreibt (Jonas et al 1990), dass durch liegen lassen von Fichtenbäumen in sonnigen Lagen die „*Pumpwirkung der Nadeln*“ ausgenutzt werden kann. Auch wenn es in den oben dargestellten Versuchen nicht nachgewiesen werden konnte, stimmt diese Aussage mit den Ergebnissen der anderen Versuche überein.

Jonas (1984a) befasste sich in seinen Versuchen auch mit dem Nährstoffaustrag, welcher durch die Nutzung ganzer Bäume vollzogen wird (Siehe auch Kapitel 7.2). Der Nährstoffaustrag wird insbesondere durch die Entfernung von Nadeln, Blättern und Feinästen aus dem Bestand verursacht. Jonas ging davon aus, dass bei einer Lagerung

von Ganzbäumen im Bestand der Grossteil der Nadeln und ein Teil der Feinäste von den Bäumen abfällt. Das Abfallen der Nadeln wurde in finnischen Versuchen zur Lagerung von Schlagabraum (Nurmi & Hillebrand 2001) untersucht. Man beobachtete, dass sobald kein freies Wasser mehr im Astmaterial enthalten war, die Nadeln abstarben und ausfielen. Bei der Lagerung von Schlagabraum auf der Freifläche im Sommer sank der Nadelanteil des Materials von anfänglich 19 % innerhalb von einem Monaten auf 1,8 %. Bei Material, das auf Stapeln gelagert wurde, sank der Nadelanteil in der selben Zeit auf 4 %. Im Herbst fielen die Nadeln langsamer ab. Es wurde auch beobachtet, dass Frost das Abfallen der Nadeln verzögert. Es kann angenommen werden, dass der Nadelabfall bei Ganzbäumen in grundsätzlich ähnlicher Weise vor sich geht wie bei Schlagabraum. Da Ganzbäume nicht so schnell trocknen, werden die Nadeln im Vergleich zu Schlagabraum wahrscheinlich länger an den Ästen verbleiben. Experten berichten, dass der Grünzustand, also auch die Benadelung gefällter Bäume in höheren Lagen Österreichs über mehrere Monate aufrecht bleibt (siehe Kapitel 11.1.3). Für Laubbäume gibt Neußer (1981a) eine Blattfallzeit von mehreren Wochen an.

Nurmi (1994) beschreibt Versuche zur Lagerung von Weiden-Ganzbäumen auf nicht abgedeckten Stapeln im Freien. Die Versuche erstreckten sich über 18 Monate. Nach der Ernte im April konnte bis Juli der Wassergehalt von 52 % auf 35 % gesenkt werden. Nach 18 Monaten (Ende des Versuchs im September des zweiten Jahres) betrug der Wassergehalt 20 %. Es konnte kein signifikanter Unterschied des Wassergehaltes auf verschiedenen Höhen des Stapels festgestellt werden. Der Wassergehalt auf 80 % der Baumhöhe war signifikant höher als in den anderen Teilen der Bäume. Die Rohdichte des Holzes verringerte sich über den Versuchszeitraum signifikant von 411 kg/m³ auf 399 kg/m³, ebenso der Heizwert. Beides war auf sichtbaren biologischen Abbau zurückzuführen, welcher besonders am Boden des Stapels und im Kronenbereich der Bäume stattfand. Nurmi empfiehlt aufgrund seiner Untersuchung keine Lagerung über den Winter, sondern die Aufarbeitung und Verbrennung im Herbst des Erntejahres.

Aus den vorhandenen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Ganzbaum-Trocknung eine interessante und vielversprechende Methode ist, um Energieholz in guter Qualität bereitzustellen. Besonders positiv ist die Gleichmäßigkeit der Trocknung im ganzen Baum und auch bei ungünstigeren Witterungsverhältnissen, welche von Hakkila festgestellt wurde. Es erscheint aufgrund der vorhandenen Literatur möglich, innerhalb einer Saison bzw. weniger Monate eine Reduktion des Wassergehaltes auf 20 - 30 % zu erreichen. Im Vergleich zur Lagerung von Rundholz besteht ein Unterschied von etwa 5 % im Wassergehalt, nach einer Trocknungsperiode von einigen Monaten. Problematisch und noch nicht gut erforscht, ist das Verhalten von Ganzbäumen, wenn sie auf größeren

Stapeln gelagert werden. Eine weiterer kritischer Faktor ist die phytosanitäre Gefahr, die durch Lagerung von Nadelbäumen im Wald entsteht. Diesbezüglich wäre zu prüfen, welche Trocknungserfolge innerhalb sehr kurzer Zeit mit „Nadel-Ganzbäumen“ erzielt werden können. Die Zeit müsste dabei kurz genug sein, um eine Vermehrung von Forstschädlingen auf dem Material zu verhindern. Längere Lagerung von Nadelbäumen sollte dort möglich sein, wo ein Transport des Materials auf Flächen außerhalb des Waldes in logistischer Hinsicht durchführbar und finanzierbar ist. Eine weitere noch nicht durch Versuche belegte Möglichkeit ist die Abdeckung von Ganzbäumen, um die Wiederbefeuchtung des Materials während Herbst und Winter zu verhindern.

9.2 Trocknung von Rundholz in Poltern

Unter Lagerung und Trocknung in Poltern werden in diesem Kapitel alle Lagerungsformen zusammengefasst, bei welchen Stammholz im aufgearbeiteten Zustand gestapelt wird. Die gestapelten Rundhölzer unterliegen im Laufe der Lagerung je nach Rahmenbedingungen einem gewissen Trocknungsprozess. Diese Trocknung von Rundholz im Zuge der Lagerung wird in vielen Publikationen beschrieben, die sich meistens jedoch nicht auf Energieholz beziehen. Dennoch lassen sich für die energetische Verwendung wertvolle Informationen aus diesen Arbeiten ableiten. Im Folgenden werden zuerst allgemeine Einflüsse behandelt, die bei der Rundholz-Trocknung von Bedeutung sind und anschließend einige Erfahrungen mit der Lagerung von Rundholz in Poltern verschiedener Bauweise beschreiben.

Einen bedeutenden Einfluss auf die Trocknung von Rundholz hat das Vorhandensein einer ummantelnden **Rindenschicht**. Untersuchungen von Neußer (Neußer et al. 1977b, Neußer 1981) zeigten, dass entrindete Stämme innerhalb weniger Wochen deutlich stärker abtrockneten, als Stämme in Rinde. Der Zusammenhang ist in Abbildung 21 dargestellt, wobei sich zeigt, dass der Einfluss bei der Schwarzkiefer und Buche am stärksten ist, bei Fichte und Pappel hingegen etwas schwächer. Laut Expertenaussagen (siehe Kapitel 11.2.4) hat die Teilentrindung im Zuge der Harvester-Ernte einen großen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit.

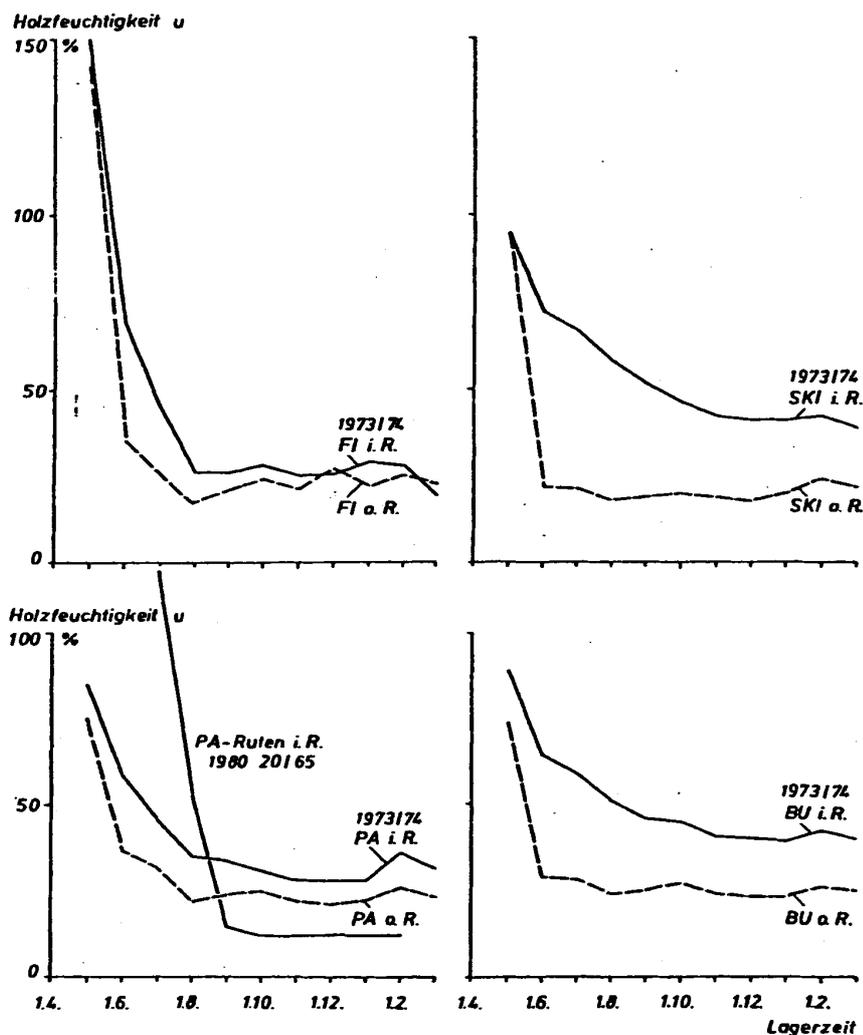


Abbildung 21: Entwicklung der Holzfeuchtigkeit bei einjähriger Lagerung von 1 m langem Holzstämmen (Fichte...Fi, Schwarzkiefer...SKI, Pappel...PA, Buche...BU, in Rinde...i.R., ohne Rinde...o.R.) auf einer nordexponierten Wiese (aus Neußer 1981).

Neußer et al. (1981a) kam durch Beobachtungen zum Schluss, dass die unterschiedliche Beschaffenheit der Rinde je nach Baumart und Alter die Austrocknung des Rundholzes verschiedentlich beeinflusst. Bei Versuchen mit gepolterten Eichenholz (Neußer et al. 1981a) wurde nachgewiesen, dass durch das Aufspalten des Stammes - bei dem so die transpirationshemmende Rindenhülle der Eichen aufgerissen wurde - die doppelte Menge an Wasser verloren geht, als im ungespaltenen Rundholz. Jüngere Pappeln hingegen reagierten weit weniger stark auf das Aufspalten und das damit verbundene Aufbrechen der Rinde. Neußer führte dieses Ergebnis auf die unterschiedliche Rindenbeschaffenheit der Bäume zurück.

Beim Auftrennen des Baumes durch Fäll- und Trennungsschnitte werden zusätzliche Austrittsmöglichkeiten für den Abtransport von Wasser aus dem Holzkörper geschaffen. Diese **Abtrocknung über die Stirnflächen** wurde von Neußer et al. (1981c) im

Zusammenhang mit der Holzübernahme nach Gewicht untersucht. Durch die Entnahme von Stammscheiben bzw. durch Motorsägeneinschnitte wurde der Wassergehalt von Stämmen in Abhängigkeit zum Abstand von der Stirnfläche untersucht. Das untersuchte Holz war Industrieholz mit entsprechend hohen Wassergehalten. Abbildung 22 zeigt den Trockengehalt vier untersuchter Stämme an verschiedenen Positionen im Stamm.

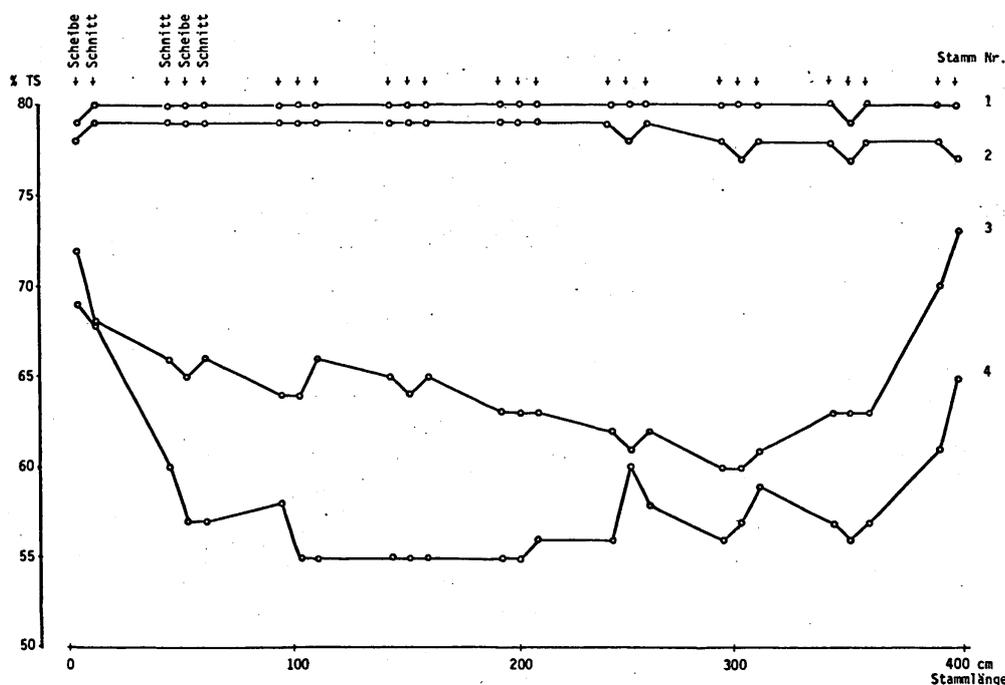


Abbildung 22: Der Trockengehalt in vier Stämmen (1, 2, 3, 4) an verschiedenen Positionen. Messwerte von Stammscheiben... *Scheibe* und benachbarten Spanproben... *Schnitt*.

Der Trockengehalt (TG) steht zum Wassergehalt (WG) in folgendem Verhältnis: Wassergehalt [%] = 100 - Trockengehalt [%]. Bei den feuchteren Stämmen (Nummer 3 und 4) ist sichtbar, dass der Trockengehalt in einem 50 cm breiten Randbereich deutlich höher ist als im Stamminneren, das heißt der Wassergehalt ist am Rand niedriger und im Stamminneren höher. Während der Wassergehalt am Rand zwischen 25 % und 35 % liegt, beträgt er im Stamminneren zwischen 32 % und 45 %. Bei den trockeneren Stämmen (Nummer 1 und 2) ist der Wassergehalt des Stammes über die gesamte Länge wesentlich konstanter und nimmt gegen den Rand hin eher zu. Andere Untersuchungen von Neußer et al. (1977b) befassten sich mit 18 Monate im Freien gelagerten Fichtenstämmen mit einer Länge von einem Meter. Aus der Lagerung resultierte die in Abbildung 23 dargestellte Verteilung des Wassers im Stamm. Auf einem Stammende nimmt der Wassergehalt zum Rand hin ab und am anderen Ende dagegen zeigt sich eine Zunahme des Wassergehaltes. Weiters zeigt sich ein Unterschied zwischen entrindetem Holz und Holz in Rinde. Das Holz in Rinde zeigt insgesamt einen gleichmäßigeren Wassergehalt. Eine Interpretation der Ergebnisse wird in der Arbeit nicht gegeben. Es ist

zu vermuten, dass für die unterschiedlichen Wassergehalte an den beiden Stammenden expositionsbedingte Einflüsse verantwortlich waren. Weiters lassen die gezeigten Messwerte die Vermutung zu, dass bei längerer Lagerung eine gewisse Wiederbefeuchtung des Holzes von den Stirnflächen her erfolgt.

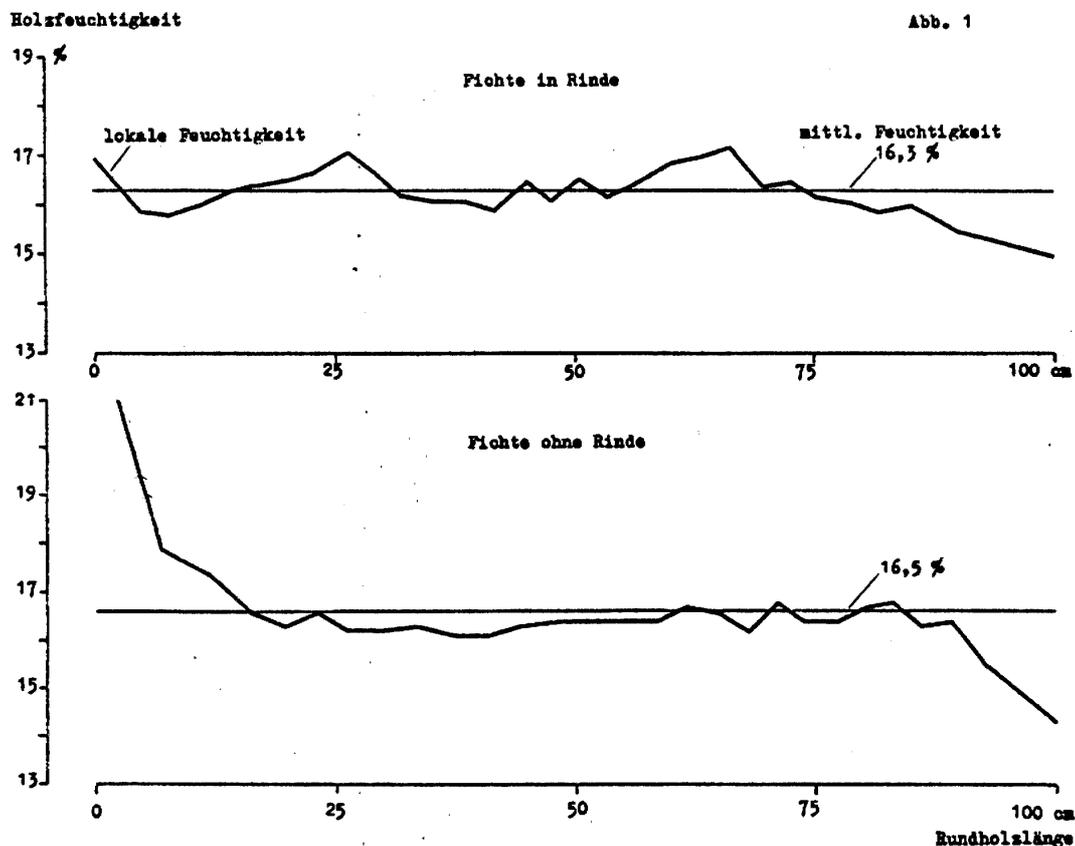


Abbildung 23: Darstellung der Feuchteverteilung in Stammlängsrichtung bei 18 Monaten im Freien gelagerten Fichtenstämmen (aus Neußer 1977b).

Bei der Austrocknung über die Stirnflächen dürfte auch eine Rolle spielen, mit welcher Geschwindigkeit die Feuchtebewegung im Holz in axialer Richtung erfolgt. Dazu liefern Wiberg und Morén (1999) interessante Ergebnisse. Sie untersuchten die Trocknung von Fichten-, Kiefern- und Birkenholz oberhalb des Fasersättigungspunktes unter erhöhten Temperaturen (60, 70, und 80 °C). Dabei zeichneten sie mittels Computertomografie den Fortschritt der Rückzugsgrenze des freien Wassers auf. Es zeigte sich, dass die Hauptbewegungsrichtung der Feuchte bei Nadelhölzern in radialer Richtung liegt und bei Laubhölzern in axialer Richtung. In Nadelhölzern bewegt sich das Wasser hauptsächlich über Markstrahlen und Tüpfel, bei den Laubhölzern hauptsächlich über die Gefäße. Die Rückzugsgrenze des freien Wassers bewegte sich bei 50 °C und 50 % relativer Luftfeuchte innerhalb von 16 Stunden 2 mm bis 5 mm ins Innere der Probe.

Bei längerer Lagerung von Rundholz stellt sich auch die Frage nach dem **Trockensubstanzverlust**, welcher durch biologischen Abbau auftritt. Verschiedene Untersuchungen (Neußler 1977b, Mackensen & Bauhus 1999) zeigen, dass der biologische Abbau von Rundholz im ersten Jahr sehr gering ist und bei den meisten Baumarten (Fichte, Kiefer) rund 2 % beträgt. Bei Erle und Pappel wurden in einem Jahr höhere Abbauraten von bis zu 7 % und 9 % festgestellt (Mackensen & Bauhus 1999). Diese Holzarten erlitten in den ersten 6 Monaten einen Substanzverlust von rund 2 %, danach erfolgte ein beschleunigter Abbau. Bei mehrjähriger Lagerung im Freien unterliegen alle Holzarten einem verstärkten Abbau, der zur Verrottung führt. Der im Vergleich zur Lagerung von Waldhackgut geringe Substanzverlust von Rundholz ist bezüglich der Nutzung als Energieholz als ein wichtiger Vorteil zu werten.

Auch der Aufbau der Polter hat Auswirkungen auf die Trocknungsvorgänge von Energieholz. Es lassen sich diesbezüglich zwei wesentliche Formen der Polterlagerung unterscheiden:

- Polter mit kreuzweise zueinander liegenden Stämmen (Kreuzpolter)
- Polter mit parallel zueinander liegenden Stämmen (Parallelpolter)

Interessante Versuche zur Trocknung in **Poltern mit kreuzweise zueinander liegenden Stämmen** wurden vor allem mit Rundholz für die Herstellung von Bauholz durchgeführt. Das Holz wird dabei meist entrindet und in bodenfreien Poltern mit Querhölzern zwischen jeder Lage aufgebaut. Beispiele dafür sind in Abbildung 24 dargestellt. Bei luftiger und sonniger Lagerung sinkt der Wassergehalt in drei Monaten auf rund 20 % (Wild & Wauer 2001).



Abbildung 24: Bilder von verschiedenen Kreuzpoltern für die Bauholztrocknung.

Steffen et al. (1998) untersuchten die Lagerung von Rundholz in Kreuzpoltern (Fichte, Lärche und Douglasie mit Durchmessern größer 25 cm) zur Erzeugung von trockenem Bauholz. Beim den beiden durchgeführten Versuchen wurden die Polter zum Schutz vor direkter Sonnenbestrahlung und Niederschlag abgedeckt. Als Abdeckung wurde eine UV-beständige, wasserfeste Plane verwendet. Beim ersten Versuch in Baden-Württemberg

wurde, nach Schlägerung und Einlagerung des Holzes im Frühjahr, bis zum Ende des Sommers ein Wassergehalt von 20 % erreicht. Nach Weiterführung der Lagerung über den Winter konnte im darauffolgenden Frühjahr ein Wassergehalt von 16 % ermittelt werden. Die Lagerung der Stämme erfolgte gut windzugänglich und leicht beschattet. Bei einem zweiten Versuch in Bayern sank der Wassergehalt im Zeitraum von April bis Dezember auf Wassergehalte von 23 – 28 %. Der Lagerplatz bei diesem Versuch war teilweise beschattet und nicht voll windzugänglich. Für die Einlagerung von Bauholz kommt Steffen et al. (1998) zum Schluss, dass der Aufbau der Polter im Frühwinter erfolgen sollte und eine Mindestlagerzeit von 10 Monaten erforderlich ist.

Die **Kosten für die Kreuzpoltertrocknung** von Bauholz wurden von Steffen et al. (1998) ebenfalls untersucht. Er kam zu einem Ergebnis von 12,5 - 15,5 Euro/fm. Dies beinhaltete die Kosten für Kapitalbindung (5 – 7,5 Euro/fm), Entrindung (5 Euro/fm), Polteraufbau (1 Euro/fm) und Abdeckung, (1,5 - 2 Euro/fm). Legt man diese Kosten auf Energieholz um, so müsste man die Kosten der Kapitalbindung auf den Kapitalwert des Energieholzes umrechnen. Die Kosten für Entrindung würden wegfallen. Nimmt man für die Kapitalbindungskosten von Energieholz den halben Wert an, welchen Steffen et al. (1998) für Bauholz verwendet hat, dann ergeben sich etwa 3 Euro Kapitalbindungskosten pro Jahr und Festmeter. In Summe ergäben sich so Kosten von rund 6 Euro je Festmeter. Angenommen ein Festmeter liefert 2,5 Schüttraummeter Hackgut, dann liegen die Kosten des Verfahrens bei 2,4 Euro je Schüttraummeter.

Müller (2002) untersuchte die Lagerung von 30 cm starken Kiefern-Stämmen unter den gleichen Bedingungen wie Steffen et al. (1998). Die Lagerung auf **abgedeckten, entrindeten Kreuzpoltern** begann im Frühjahr und dauerte 7 bis 21 Monate. Nach 7 Monaten betrug der Wassergehalt im Splint 21 % und im inneren Kern 25 %. Nach neun Monaten ergab sich ein Wassergehalt von 18 % im Splint und 22 % im inneren Kern. Nach 21 Monaten hatten sich die Wassergehalte zwischen Kern und Splint angeglichen. Der Wassergehalt im ganzen Stamm betrug rund 17 %.

Bereits weiter oben besprochen, wurden die Untersuchungen von Neußer (1981) an ein Meter langen Rundhölzern (siehe Abbildung 21). Die untersuchten Stämme wurden bei diesen Versuchen kreuzweise gepoltert. Der Wassergehalt sank von Anfang Mai bis Anfang Oktober auf 20 % bei Fichte, 25 % bei Pappel, 30 % bei Buche und auf 33 % bei Schwarzkiefer. Auch Hakkila (1962) untersuchte die Trocknung in luftigen Kreuzpoltern, die Ergebnisse sind zu vergleichenden Zwecken bereits im Kapitel „Ganzbaum-Trocknung“ dargestellt (Tabelle 12). Die untersuchten Polter wurden zu verschiedenen Zeitpunkten errichtet und jeweils im November beprobt. Wurden die Versuchspolter mit

den Fichtenstämmen vor Juli errichtet, so sank der Wassergehalt bis zum November auf 20 – 23 %. Fichtenpolter welche im Juli errichtet wurden, trockneten noch auf unter 30 % Wassergehalt. Bei später angelegten Poltern fand bis November nur mehr eine Trocknung auf etwa 45 % Wassergehalt statt. Bei Kiefer sank der Wassergehalt bei Kreuzpolterlagerung bis November auf 25 – 28 %, sofern vor Juli mit der Lagerung begonnen wurde. Bei Poltern die im Juli oder danach errichtet wurden, sank der Wassergehalt bis November nur mehr geringfügig auf Werte um 45 %. Vergleicht man diese Ergebnisse mit jenen der Kiefern Ganzbaum-Trocknung (Hakkila 1962) so fällt auf, dass beim Ganzbaumverfahren auch noch bei im Juli angelegten Lagern eine Abtrocknung auf 30 % Wassergehalt bis November erreicht wurde. Bei der Birke sank der Wassergehalt durch kreuzweise Polterung nie unter 30 %. Die Trocknung verlief gleichmäßig und betrug etwa 1 % pro Monat. Wurde im Februar und März eingelagert, so erhielt man bis zum November Wassergehalte von 31 %, bei Einlagerung zwischen April und August rund 35 % und im September 39 %.

Die am weitesten verbreitete Methode zur Lagerung von Baumstämmen ist der **Polter mit parallel zueinander liegenden Stämmen**, diese Lagerungsmethode wird in erster Linie zur kurzfristigen Lagerung von Sägerundholz und Industrieholz angewandt. Abbildung 25 zeigt zwei Beispiele für „Parallelpolter“.



Abbildung 25: Gemischte Polter mit parallel zueinander liegenden Stämmen.

Neußers Versuche zur Gewichtsübernahme von Industrieholz (1981c) liefern Ergebnisse zur Lagerung von solchen Poltern. Fichtenstämmen wurden im Februar geschlägert und bis Juli gelagert. Der Durchmesser betrug 15 - 20 cm, die Länge 2 m. Der Polter war ca. 1,2 m hoch und 40 m lang. Der Lagerort war der Rand einer Forststraße. Die Proben-Entnahme fand während einer längeren Regenperiode in einem kühlen und feuchten Sommer statt. Abbildung 26 zeigt die mittleren Wassergehalte von Stämmen, die sich in unterschiedlichen Lagen im Polter befanden. Die Proben wurden im Abstand von 10 cm zum Rand und innerhalb des Stammes in Abständen von 45 cm gezogen. Dabei ist sichtbar, dass die Stämme aus der untersten Lage den höchsten Wassergehalt hatten. In

der Mitte des Stammes betrug der Wassergehalt rund 60 %, am Rand 55 %. Die Stämme aus der mittleren Lage des Polters hatten einen Wassergehalt von 58 % im Mittelteil und 50 - 52 % in der Nähe der Schnittflächen. Die oberste Lage war durch den Regen befeuchtet und hatte 58 % Wassergehalt in der Mitte und 55 % an den Schnittflächen.

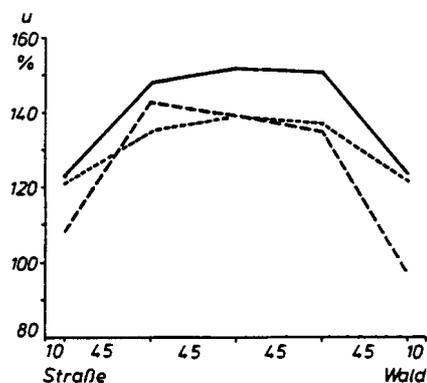


Abbildung 26: Die Holzfeuchte der Stämme in verschiedenen Lagen des Polters und in verschiedenen Positionen im Stamm. — untere Lage, --- mittlere Lage, ----- obere Lage. Die X-Achse stellt den Abstand der Proben von der Stirnfläche und zueinander in cm dar.

Die Versuche von Hakkila (1962) (siehe Kapitel 9.1.1 für die genauere Beschreibung der Versuche) ergaben für von Frühjahr bis November bodenfrei gepoltertes Nadelholz einen Wassergehalt von durchschnittlich 31 %. Der Wassergehalt bei Birke und Grauerle sank im selben Zeitraum auf durchschnittlich 37 %. Die Fichtenstämme trockneten bei etwas späterer Schlägerung im Juni bis Herbst noch auf rund 35 % Wassergehalt ab. Hingegen trockneten Kiefern, Birken und Grauerlen bei Schlägerung im Juni und Lagerung auf „Parallel-Poltern“ bis November nur noch um wenige Prozente. Die Wassergehalte lagen bei diesen Stämmen größtenteils über 40 %.

Brabeck (1987) beschreibt die Lagerung von Poltern mit parallel zueinander liegenden Stämmen mit Durchmessern größer als 30 cm. Stämme, welche schattig mit geringer Bodenfreiheit gelagert wurden, hatte nach 15 Monaten Lagerzeit einen unveränderten Wassergehalt gegenüber dem Fällungszeitpunkt.

Zusammenfassend lässt sich über die Trocknung von Rundholz in Poltern Folgendes sagen: Die Trocknung kann unter günstigen Wetterbedingungen und wenn die Polter durch den Einbau von Querlagen winddurchlässig gestaltet sind, sehr gute Trocknungsergebnisse liefern, i.e. Wassergehalte von 25 % und weniger, innerhalb einer Sommersaison. Aufgrund dünner Rinde mit geringem Diffusionswiderstand können z. B. junge Fichten und Pappeln besonders schnell trocknen. Baumarten mit dicker oder sehr wasser-undurchlässiger Rinde scheinen deutlich weniger abzutrocknen, weil die Rinde

den Wasserabtransport behindert. Beispiele dafür sind Birke, Eiche oder Schwarzkiefer. Holz aus Harvester-Durchforstungen bringt bei der Poltertrocknung den Vorteil, dass sich eine Teilentrindung im Zuge der Entastung positiv auf die Trocknung auswirkt. Vorteilhaft ist bei der Ausformung des Holzes als Rundholz die leichtere Transportfähigkeit, sowie die Tatsache, dass mit den Ästen der Großteil der Nährstoffe im Wald verbleibt. Abdeckungen scheinen dann sinnvoll zu sein, wenn das Holz nach der Trocknung im Sommer auch über den Winter gelagert werden soll, da sich in mehreren Versuchen auch eine Wiederbefeuchtung des Materials gezeigt hat. Der vielleicht größte Vorteil der Polterlagerung ist der geringe Substanzverlust aufgrund biologischen Abbaues. Durch die Verwendung von Abdeckungen könnte dieser Vorteil noch stärker zum Tragen kommen. Ein Nachteil der Polterung von Rundholz sind die Kosten, welche durch die Polterung und Abdeckung entstehen. Aufgrund der vorliegenden Literatur kann diesbezüglich jedoch noch kein Vergleich zwischen den verschiedenen Trocknungsmethoden gezogen werden. Die Lagerung in Poltern ohne Querlagen scheint bei weitem weniger Trocknungserfolge zu erzielen, als die Trocknung von gekreuzten Poltern. Wird das Rundholz so gestapelt, dann liegen die Wassergehalte nach einigen Monaten meist 5 –10 % höher, als bei Kreuzpoltern. Unter ungünstigen Bedingungen kann Rundholz in Parallelpoltern über mehrer Monate frisch bleiben, d.h. die Stämme behalten Wassergehalte um 50 %. Offen ist dabei die Frage, wie viele Querlagen erforderlich bzw. sinnvoll sind um die gewünschte Trockenheit des Materials zu erreichen. Sicher ist, dass ein geeigneter Standort, also eine windige und sonnige Lage die wichtigste Voraussetzung für ein gute Trocknung darstellt.

9.3 Trocknung von Waldhackgut

9.3.1 Schnelltrocknung am Boden durch Sonneneinstrahlung

Darunter wird die Trocknung eines Gutes durch darüber streichende Trocknungsluft verstanden. Bei der Bodentrocknung von Holzhackgut wird das Material auf einer großen befestigten Fläche in einer wenige Zentimeter dicken Schicht aufgeschüttet. Von einem Anhänger werden beispielsweise morgens kleine Portionen abgekippt, die dann mit dem Frontlader und/oder händisch gleichmäßig verteilt werden. Am Ende des Trocknungsvorganges (abends) wird das Hackgut entweder händisch oder mit dem Frontlader wieder eingesammelt und ins Lager gebracht (Lauer & Bergmayr 1986). Treibende Kraft für die Trocknung ist die Erwärmung durch Sonnenstrahlung.

Die Methode ist stark witterungs- und saisonabhängig. Unter günstigen Bedingungen kann sie aber rasch zu deutlich reduziertem Wassergehalt führen. Nach Weingartmann (1991) kann unter günstigen Bedingungen an einem Tag ein Wassergehalt von ca. 20 % erreicht werden. Die wichtigsten Voraussetzungen für die Durchführung der Bodentrocknung - ein großer asphaltierter Platz und ein Frontlader - sind bei Hackschnitzelheizwerken und bäuerlichen Hackschnitzelproduzenten häufig bereits vorhanden. Aufgrund des großen Platzbedarfs und des hohen Manipulationsaufwandes ist die Methode eher nur im kleinen Maßstab anwendbar.

9.3.2 Trocknung in Piles

Hackgut wird in Form von Piles verschiedenster Größe und Form gelagert. Durch Selbsterwärmung und unterschiedliche Wassergehalte in der Schüttung entstehen Temperaturunterschiede, welche eine Konvektionsströmung der Luft verursachen. Ob eine Konvektion zustande kommt und wie heftig sie sich entwickelt, hängt nach Weingartmann (1991) vom Temperaturgradienten und vom mittleren Querschnitt bzw. von der Körnung des Hackgutes ab. Für feines Hackgut (20 bis 30 mm) kann erst ab einem Temperaturgefälle von ca. 20 °C pro Meter eine merkliche Auftriebsströmung erwartet werden. Die Strömung ist aber laminar und für die Trocknung wenig geeignet. Anders ist die Situation bei Lagerung von Grobhackgut. Hier ist ein Temperaturgradient von 0,5 °C pro Meter ausreichend, um die Konvektion zu starten. Ab 5 °C/m ist turbulente Strömung mit besserem Trocknungserfolg zu erwarten.

Ein Problem bei der Lagerung von Hackschnitzeln in Piles ist die Entwicklung von Schimmelpilzen. Die Luft im Pile ist nahezu oder vollständig mit Wasser gesättigt, eine

Abkühlung um wenige Grad Celsius kann dazu führen, dass der Taupunkt unterschritten wird und Kondensationsvorgänge einsetzen. Diese Zonen sind meist durch starkes Pilzwachstum gekennzeichnet (vgl. Kapitel 5.2).

Im folgenden Teil soll über Erfahrungen bei der Lagerung in Piles berichtet werden. Die Ergebnisse sind, wie auch die Rahmenbedingungen, sehr unterschiedlich. Sie sollen dazu dienen die Größenordnungen abzustecken.

Neußer et al. (1977a) führten Lagerversuche von Fichte in Piles auf einem asphaltierten Lagerplatz durch. Der Ausgangswassergehalt der Hackschnitzel betrug 38 %. Im Verlauf der Lagerzeit traten schichtweise Feuchtigkeitsänderungen auf. Nach knapp 6 Monaten Lagerzeit betrug der Wassergehalt der feuchten äußeren Schicht (etwa $\frac{3}{4}$ des Querschnittes) 66 %, der Kern (etwa $\frac{1}{4}$ des Querschnittes) wies einen Wassergehalt von 41 % auf. Nach 9 Monaten hatte sich der Wassergehalt in der äußeren Schicht wieder auf 50 % gesenkt, im Kern dagegen auf 49 % erhöht. Insgesamt war bei diesen Versuchen also eine deutliche Erhöhung des Wassergehaltes im Zuge der Lagerung festzustellen. Pilznester waren vor allem im Bereich der Grenzzone feucht/trocken festzustellen.

Fagnäs et al. (2003) untersuchte die Lagerung von Hackschnitzeln mit Grünanteil, Hackschnitzeln ohne Grünanteil und Sägemehl. Während der ersten drei Monate der Lagerung erwärmten sich alle drei Piles auf 60 ° bis 70 °C, wobei der Temperaturanstieg bei den Hackschnitzelpiles sehr steil war, während sich das Sägemehl langsam und kontinuierlich erwärmte (siehe Abbildung 19 in Kap. 6.2). Nach sieben Monaten Lagerzeit wurden die Wassergehalte der Piles ermittelt. In Bodennähe betrug der Wassergehalt ca. 20 % und in den äußeren Schichten ca. 70 %. Die Feuchteverteilung war über den Querschnitt betrachtet sehr unterschiedlich. Am wenigsten Variation zeigte sich dabei innerhalb des Sägemehl-Piles.

Thörnqvist & Jirjis (1990) machten Versuche mit Hackgut aus Schlagabraum aus Fichten dominierten Beständen. Das Material setzte sich folgendermaßen zusammen: 46 % Holz, 16 % Astholz, 21 % Nadeln, 11 % Rinde und 6 % Feinanteil. Das Versuchspile war 90 m lang, 7 m hoch und enthielt Hackgut mit einem Wassergehalt von 33 bis 50 %. Nach einer Lagerdauer von 3 bis 5 Wochen konnte eine Verringerung des Wassergehaltes um 7 bis 8 % in jenen Teilen beobachtet werden, die zu Beginn ca. 40 % aufwiesen. In den feuchteren Teilen war, die Trocknung noch besser, in den trockeneren Teilen des Piles aber schlechter. Der Trockensubstanzverlust des Materials war zu Beginn am höchsten und wurde dann weniger. In der ersten Woche konnte ein Trockensubstanzverlust von 3,6 % pro Woche beobachtet werden. Nach 12 Wochen hatte sich der Wert auf 0,4 % pro Woche gesenkt, bis zur 16. Woche stieg er wieder geringfügig auf 0,7 % pro Woche um

letztlich wieder auf 0,4 % pro Woche zurückzufallen. Die höchste Verlustrate infolge mikrobiellen Abbaus war demnach in der ersten Woche zu verzeichnen.

Weitere Versuche zur Energieholz Trocknung im Pile beschreibt Bally et. al (2000). So konnte nach dreimonatiger Lagerung ausgehend von einem Anfangswassergehalt von 50 % eine Trocknung um 10 % beobachtet werden. In den Randbereichen des 5.000 m³ großen Piles bildete sich aber aufgrund der Kondensation und des Niederschlages eine Zone mit deutlich höherem Wassergehalt (rund 65 % Wassergehalt). Versuche in Schottland (Mitchell et al. 1988) mit einem Pile von 200 m³ und 2,5 m Höhe zeigten auf Grund einer niederschlagsreichen Periode eine Erhöhung des Wassergehaltes von 45 auf 59 %.

Ein Versuch von Müllerbuchhof (1993) mit Hackschnitzeln Kiefern-Ganzbäumen ergab nach einem Monat Lagerzeit bereits Absenkungen des Anfangswassergehaltes von 24 % auf 30 %. Nach 40 Tagen war die erste Phase der Trocknung abgeschlossen, was durch ein rasches Absinken der Innentemperaturen im Pile signalisiert wurde. Der weitere Verlauf war durch deutlich langsamere Trocknung und kurze Phasen der Wiederbefeuchtung gekennzeichnet. Nach 3 Monaten Lagerdauer war der Wassergehalt ausgehend von 43 % auf 25 % gesunken.

Hartmann & Kaltschmitt (2001) berichten über Versuche zur Lagerung von frischem Waldhackgut im Freien. Nach einer Lagerdauer von 7 bis 9 Monate auf einem 60 m³ großen, nicht abgedecktem Pile betrug der Trockenmasseverlust ca. 20 bis 23 %. Ein abgedeckter Haufen mit trockenen Hackschnitzeln (Wassergehalt 15 %) verlor während des gleichen Zeitraumes hingegen nur 2 % Trockensubstanz. Versuche mit abgedeckten Piles zeigten bei 6 bis 12monatiger Lagerung eine Abnahme des Wassergehaltes um bis zu 15 %.

Zusammenfassend lässt sich Folgendes über die Lagerung in Piles festhalten: Die Methode der Trocknung in Pileform nützt neben der durch die Sonne hervorgerufene Konvektion auch die Selbsterwärmung durch Mikroorganismen um eine Trocknung des Gutes herbeizuführen. Die Energie für die Erwärmung stammt aus dem Substanzabbau der Hackschnitzel, d.h. es wird Trockensubstanzverlust für die Erwärmung des Gutes in Kauf genommen, um eine höhere Energiedichte der Hackschnitzel zu erzielen. Bei den verschiedenen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Erwärmung und Trocknung sich auf einige Zonen beschränken, während andere Bereiche kalt und feucht bleiben bzw. im Zuge der Lagerung noch höher Wassergehalte erreichen, als zu Beginn bei Anlage der Piles. Die Trocknungserfolge sind insgesamt als eher gering einzustufen. Zudem werden die mäßigen Trocknungserfolge zusätzlich durch einen nicht

unerheblichen Substanzabbau weiter geschmälert (siehe Kapitel 5.2). Ein weiteres Problem ist die Pilzsporenbelastung und die damit verbundenen gesundheitlichen Risiken (siehe Kapitel 6).

9.3.3 Trocknung in Harpfen

Unter Harpfen versteht man Lagerungsbehälter mit Gitterwänden (siehe Abbildung 27). Sie waren früher vor allem in Maisanbaugebieten für die Lufttrocknung von Maiskolben in Verwendung. Für die Trocknung von Hackschnitzeln werden Harpfen als lange und hohe, aber schmale Bauwerke ausgeführt, um eine gute Durchströmung mit Luft zu gewährleisten. Das unterste Wandelement ist abnehmbar und dient als Entnahmeöffnung. Die Höhe sollte an die Beladungsmöglichkeit durch Frontlader oder an die Auswurfhöhe des Hackgerätes angepasst werden. Bei der Wahl des Standortes sollte berücksichtigt werden, dass die Konvektionsströmung in den Harpfen durch Winddruck als auch durch Sonnenstrahlung angekurbelt wird. Ein sonniger oder windiger Standort sollte also bevorzugt werden.

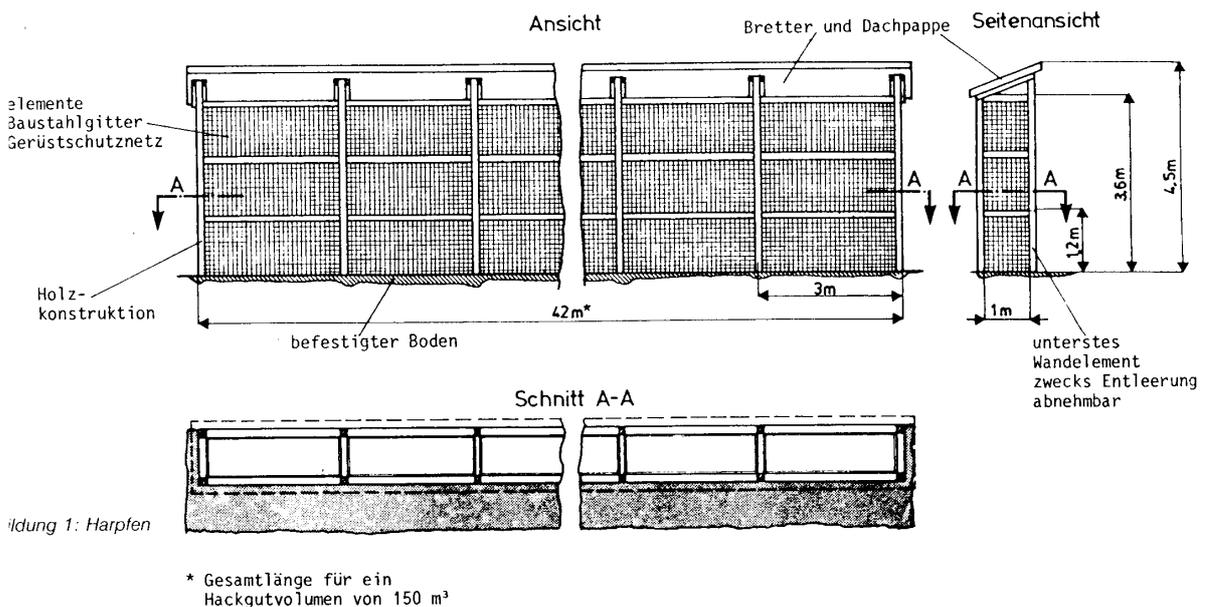


Abbildung 27: Trocknung von Hackgut in Harpfen (aus Lauer et al. 1987)

Eine ähnliche Methode zur Trocknung von Hackgut in sog. „chips“ beschreibt Sturos (1984). Ein „crib“ ist ein luftiger Trocknungsbehälter aus Holz mit einem Dach und einem Rauminhalt von ca. 7 m³. Die Trocknungsversuche wurde auf einer Freifläche in Michigan/USA von Juli bis Oktober durchgeführt. Beim Probenmaterial handelte es sich um Ahorn- und Pappelholz, welches jeweils in zwei unterschiedlich groben Fraktionen

vorlag. Zum einen als sog. „chunkwood“ - das ist fingerdick aufbereitetes Material mit untermischten Stammscheiben von dünnen Bäumen und Sträuchern (durchschnittliche Länge der Partikel ca. 9 cm). Es kann mit geringerem Energieaufwand hergestellt werden und wird durch Umgebungsluft besser durchlüftet. Bei der zweiten Fraktion handelte es sich um einheitlich große Hackschnitzel sog. „chips“ mit ca. 2 cm Länge. Nach einer Trocknungszeit von 61 Tagen trockneten die „Ahorn-Chunks“ ausgehend von einem Wassergehalt von 34 % auf 17 %. Danach konnte eine leichte Wiederbefeuchtung auf 18 bis 19 % festgestellt werden. Die „Ahorn-Chips“ trockneten in 61 Tagen auf einen Wert von 15 % und schwankten anschließend zwischen 17 und 19 % Wassergehalt. Obwohl die „chips“ am Ende etwas trockener waren als die Chunks, konnte in den ersten 18 Tagen des Versuches ein schnelleres Trocknen der gröberen Fraktion beobachtet werden. Etwas anders waren die Verhältnisse im Parallelversuch mit Pappel. Die Chips erreichten nach 91 Tagen einen Wassergehalt von 19 %, die Chunks 17 %.

Die Vorteile der Trocknung in Harpfen liegt im relativ geringen technischen und baulichen Aufwand, sowie im geringen Arbeitszeitbedarf. Bei ausreichender Durchlüftung ist kaum Verpilzungsgefahr gegeben. Durch die nach Süden ausgerichtete Frontwand kann auch im Winter ein Trocknungsfortschritt stattfinden. Die Trocknungsdauer beträgt etwa 4 bis 6 Monate (Lauer & Bergmayr 1986, Sturos 1984). Die Anwendung empfiehlt sich aufgrund relativ geringen Kapazität der Methode und möglicher Synergieeffekte vor allem für bäuerliche Selbstversorger.

9.3.4 Trocknung in überdachten Gebäuden

Die Trocknung in überdachten Gebäuden zählt definitionsgemäß nur mehr eingeschränkt zur Freilandtrocknung, soll aber in diesem Zusammenhang behandelt werden, da die Trocknungsmechanismen der Freilandtrocknung hier ebenfalls ihre Gültigkeit besitzen und auch keine gezielten technischen Maßnahmen zur Trocknung gesetzt werden. Webenau et al. (1999) beschreibt Trocknungsversuche in einer überdachten und dreiseitig geschlossenen Halle. Die Lagerhalle wies ein Fassungsvermögen von rund 1.000 Schüttraummeter auf und war nach Westen hin offen. Durch Schlitze in den Wänden und im Boden war eine allseits gute Durchlüftung der Hackgutschüttungen gewährleistet. Das Versuchsmaterial war aus Fichtenkronen produziertes, grobes Waldhackgut mit einem Grünanteil von 10 % Trockenmasse. Bei Versuchsbeginn Ende März hatte das Material einen durchschnittlichen Wassergehalt von 41 %. Nach 50tägiger Hallenlagerung verringerte sich der Wassergehalt auf 24 %. Ein Weitertrocknen über einen Zeitraum von 90 Tagen brachte nur mehr geringe Verbesserungen beim Wassergehalt (Endwassergehalt 20,5 %). Neben dem Trocknungsverlauf wurde auch die

Temperaturentwicklung im Hackgutpile untersucht. Die maximal während der Lagerung gemessene Temperatur lag unter 40 °C.

9.3.5 Freilandtrocknung von Schlagabraum

Grundlage für die Trocknung von Schlagabraum ist wiederum die Konvektionsströmung der Luft. Versuche zur Trocknung von Schlagabraum liegen in erster Linie aus Skandinavien vor. Einige interessante Beispiele sowie die dabei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

Versuche mit Schlagabraum aus Fichtenkahlschlägen wurden in Finnland von Nurmi & Hillebrand (2001) durchgeführt. Dazu wurden von 10 ha Kahlschlagsfläche zirka zwei Drittel des Schlagabraumes entfernt und in acht „grünen“ Piles auf Kahlhieben am Straßenrand gelagert. Vier von diesen Piles wurden durch ein mit Fiberglas und Bitumen verstärktes 230 g/m² Papier abgedeckt. Das restliche Drittel des Schlagabraumes wurde am Kahlschlag belassen um vorzutrocknen bis es „braun“ war. Aus diesem Material wurden vier „braune“ Piles errichtet, wobei wieder zwei Piles mit Papier abgedeckt wurden. Ausgehend von einem Wassergehalt des frischen Schlagabraumes von 50 bis 55 % zum Zeitpunkt der Ernte Ende Mai, konnte Anfang Juni bei allen entnommenen Proben bereits Werte unter 40 % gemessen werden. Das Material der „grünen“ Piles wies Werte zwischen 31 und 39 % Wassergehalt auf. Der Trocknungsfortschritt, des zu dieser Zeit noch auf der Freifläche gelagerten „braunen“ Materials Piles, war jenem auf den „grünen“ Piles ähnlich. Ende Juli konnten Werte um 20 % Wassergehalt gemessen werden. Ende August, Anfang Oktober begann bei den nicht abgedeckten Piles die Wiederbefeuchtung. Im Winter konnten für diese Piles Werte zwischen 35 bis 40 % Wassergehalt gemessen werden, während sich die Holzfeuchte in den abgedeckten Piles um weitere 15 % senkte (Nurmi, Hillebrand 2001).

Jirjis & Lehtikangas (1993) führten Versuche zur Trocknung von Schlagabraum in Schweden durch. Dazu wurde Schlagabraum aus der Endnutzung eines Fichtenbestandes zu einem 66 m langem, 4 m breitem und 2,7 m hohem länglichen Haufen aufgestapelt. Tabelle 13 wurde aus den Ergebnissen diese Versuchs erstellt.

Tabelle 13: Wassergehalte von Schlagabraum nach mehrmonatiger Lagerung in abgedeckten und nicht abgedeckten Haufen (nach Jirjis & Lehtikangas 1993)

Beprobungszeitpunkt	Haufen nicht abgedeckt		Haufen abgedeckt		Haufen abgedeckt *	
	Mittelwert	Stw	Mittelwert	Stw	Mittelwert	Stw
September 90	34,5	11,8	20,5	3,2	32,0	0,3
Jänner 91	45,9	8,2	29,3	3,8	-	-
April 91 (Messungen an zwei Stellen)	46,1 36,1	4,7 13,6	24,0 25,3	1,6 4,3	29,4 -	11,6 -

* Material wurde nach Vorlagerung in kleinen Haufen erst im Sep. 90 hinzugefügt

Die Anlage des Haufens erfolgte nach der Holzernte im Februar. Im Mai wurde die Hälfte des Haufens zum Schutz gegen Wiederbefeuchtung abgedeckt. Nach weiteren 6 Monaten wurde zusätzliches geerntetes Material, das bis dahin auf kleinen Haufen gelegen hatte, zum großen Haufen hinzugefügt. Ausgehend von einem Wassergehalt von 42 % im Mai 1990 trocknete das unbedeckte Material bis April 1991 auf 36 bzw. 46 % (Messungen an zwei verschiedenen Stellen). Im abgedeckten Teil wurde dagegen ein deutlich besserer Trocknungserfolg erzielt. Hier wurden nach 11 Monate Lagerung, Wassergehalte von nur mehr rund 25 % gefunden. (siehe Tabelle 13). Während der Winterlagerung konnte eine Wiederbefeuchtung im Haufen beobachtet werden. Der bedeckte Teil blieb dabei aber immer unter 30 % Wassergehalt. Die Trockensubstanzverluste im unbedeckten Teil blieben unter 1 % pro Monat, im bedeckten Teil waren sie mit 0,2 % pro Monat noch geringer. In dem erst im September hinzugefügten Teil waren sie mit 2 % pro Monat am höchsten.

Eine Möglichkeit, die Logistik des Schlagabraumes zu verbessern, steht derzeit auch in Österreich in der Erprobung – die Produktion von **Energieholzbündel**. Das zu Bündeln gepresste Material hat ein Volumen von zirka 1 - 1,2 m³ bei einem Durchmesser von 70 cm und einer Länge von 3 m. Der Energieinhalt für ein Bündel (Wassergehalt 50 %) liegt bei rund 1,1 – 1,2 MWh. Die Bündel können mit herkömmlichen Rundholztransportmitteln auf der Straße transportiert werden und durch ihre Form auch gestapelt werden. Trocknungsversuche von Energieholzbündeln in Österreich (Kanzian 2005) haben gezeigt, dass die Bündel (Fichte, Kiefer) auch nach mehrmonatiger Lagerung nicht bzw. nur geringfügig abtrocknen. Einzig bei Abdeckung der Bündel mit Spezialpapier konnte im Lagerzeitraum Jänner bis Oktober eine Reduktion von 48 % auf 32 % Wassergehalt

erreicht werden. Bündel aus überwiegend Laubholzmaterial trocknete im Zeitraum von Dezember bis April von 45 % auf 31 % Wassergehalt.

Jirjis (2003) untersuchte die Lagerung von 1,2 m langen und 1,2 m dicken zylindrischen Ballen aus Schlagabraum bei Außenlagerung, abgedeckter Lagerung sowie unter Dach. Das Ausgangsmaterial war hauptsächlich Fichte und hatte einen Wassergehalt von rund 35 %. Die Lagerung dauerte 10 Monate. Bei Außenlagerung betrug der Trockensubstanzverlust auf Basis der Trockenmasse 18,5 %, bei der Lagerung unter Dach und im abgedeckten Zustand betrug der Substanzverlust 14 %. Der Energieinhalt wurde bei beiden Lagerungsarten durch den hohen Trockenmasseverlust stark reduziert, es zeigte sich auch starkes Pilzwachstum. Nach vier Monaten der Lagerung war kein signifikanter Unterschied im Wassergehalt feststellbar. Nach 10monatiger Lagerung betrug der Wassergehalt 31 % bei dem im freien gelagerten Material und 21 % bei den überdachten und abgedeckten Ballen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der Trocknung von Schlagabraum bereits nach kurzer Zeit gute Trocknungserfolge möglich sind. Die Untersuchungen von Nurmi & Hillebrand (2001) haben gezeigt, dass nach nur zwei bis drei Wochen der Wassergehalt von Fichtenschlagabraum auf unter 30 % gesenkt werden konnte. Die Abdeckung der Haufen bringt vor allem für die Lagerung in den niederschlagsreichen Herbst- und Wintermonaten nachweisbare Vorteile. Zu beachten ist, dass bei der Trocknung von verdichtetem Schlagabraum mit starker Verpilzung des Materials gerechnet werden muss (Jirjis 2003). Die Bündelung von Schlagabraum bringt aus Sicht der Brennstoffqualität aufgrund der bisherigen Ergebnisse nur wenige Vorteile, da die durch Trocknung gewonnene Energie weitestgehend durch Substanzverluste wieder verloren geht. Es scheint deshalb, dass die Bündelung hauptsächlich aufgrund der logistischen Vorteile von Interesse ist. Wird grünes Material von der Schlagfläche entfernt, dann werden damit auch viele Nährstoffe entfernt, eine Verarmung und Versauerung des Bodens kann die Folge sein (siehe Kapitel 7.2).

10 Technische Trocknung von Waldhackgut

10.1 Belüftungskühlung

Die Belüftungskühlung erfolgt in überdachten Lagerhallen, wobei das Trocknungsgut in Haufen aufgeschüttet wird. Durch die biologische Selbsterwärmung erhöht sich die Temperatur im Brennstofflager und somit auch das Sättigungsdefizit der Luft. In der Folge wird Feuchtigkeit aus dem Brennstoff verdunstet und die relative Luftfeuchtigkeit der Luft

im Brennstofflager erhöht. Durch ein zeitgeregeltes Gebläse wird in Intervallen immer wieder Außenluft durch das Lager geblasen. Die bereits angefeuchtete Luft im Lager wird verdrängt und durch die Außenluft ersetzt. In der Folge kühlt sich das Trocknungsgut wieder ab und der Vorgang beginnt von neuem (Hartmann & Kaltschmitt 2001). Um die biologische Selbsterwärmung in Gang zu bringen, wird eine Mindestgröße der Schüttung von 15 Srm empfohlen (Webenau et al. 1999).

Die Vorteile dieser Methode liegen darin, dass nur für das Gebläse und die dazugehörige Steuerelektronik Energie notwendig ist. Die Steuerung kann an die Verhältnisse im Lager angepasst werden, wodurch eine weitere Effizienzsteigerung möglich ist. Durch die Selbsterwärmung steigt die Trocknungsleistung im Vergleich zu einer kontinuierlichen Belüftung mit Kaltluft. Im Gegenzug muss man dafür monatlich etwa 2 bis 3 % Verlust an Trockensubstanz in Kauf nehmen. Weiterer Vorteil - es ist auch im Winter ein Trocknungsfortschritt möglich. Bei tiefen Außentemperaturen und hoher Luftfeuchte ist der Wasserentzug jedoch geringer, wenn auch besser als bei der kontinuierlichen Kaltbelüftung. Mit zunehmender Trocknung erwärmt sich das Material nur mehr wenig, eine Verringerung der Trocknungsleistung ist die Folge. Ein Wassergehalt von unter 20 % kann auf diese Weise nicht erreicht werden, sofern nicht über längere Zeit Temperaturen über 60 °C im Lager erreicht werden. Anzumerken ist, dass durch die Selbsterwärmung auch das Gesundheitsrisiko steigt, weil im Lager Pilzsporen produziert werden (siehe Kapitel 6).

10.2 Belüftungstrocknung

Bei der mit der Belüftungskühlung verwandten Belüftungstrocknung wird die möglichst warme Außenluft kontinuierlich durch das Trocknungsgut geleitet und so eine Trocknung erzielt. Je trockener und wärmer die Luft ist, desto größer ihr Sättigungsdefizit und infolgedessen der Trocknungserfolg. Im Normalfall werden bei dieser Methode die warmen Sommermonate genutzt. Aber auch eine geringe technische Erwärmung der Luft, durch Abwärme ist möglich. Die Luftreibung im Gebläse bewirkt eine Temperaturerhöhung der Luft um 1 bis 5 °C und hat dadurch einen positiven Einfluss auf die Trocknung. Um eine optimale Luftführung in der Schüttung zu erreichen, sollte sie gleichmäßig hoch und eben sein um überall den gleichen Strömungswiderstand zu erzeugen. Die empfohlene erforderliche Mindestschütthöhe beträgt für Hackgut 1 m (Hartmann & Kaltschmitt 2001). Untersuchungen der Kielder Forest Products Ltd (2001) im Norden Englands kamen zu dem Ergebnis, dass für die Trocknung einer Tonne Hackschnitzel von 51 auf 35 % Wassergehalt eine Luftmenge von ca. 240 000 m³ notwendig ist. Für die Trocknung mittels Gebläse wurde das Hackgut auf einem Flachrost

in einem Gebäude gelagert. Es zeigte sich wie erwartet zuerst eine Trocknung in den bodennahen Schichten. Auch am Ende des Trocknungsvorganges variierte der Wassergehalt noch sehr stark. Die bodennahe Schicht war mit 5 % Wassergehalt am trockensten, darauf folgte eine Schicht mit 25 % und schließlich die oberste Schicht mit 55 %. Angaben über die Dauer der Belüftung sind in der Arbeit nicht angegeben.

Mit der Belüftungstrocknung können niedrigere Endwassergehalte als mit der Belüftungskühlung erreicht werden. Sie kann deshalb auch nachgeschaltet angewendet werden. Die Methode ist grundsätzlich für alle Biomasse-Schüttgüter anwendbar. Die Anwendung ist aber auf die warme Jahreszeit beschränkt. Durch die kontinuierliche Belüftung muss mehr Energie für das Gebläse aufgewendet werden als bei der Belüftungskühlung. Anzumerken ist überdies noch, dass auch bei dieser Methode mit Trockensubstanzverlust zu rechnen, da frisch eingelagertes Material noch eine Weile biologisch aktiv ist (Hartmann & Kaltschmitt 2001).

10.3 Warmlufttrocknung

Bei dieser Methode wird angewärmte Luft durch das Trocknungsgut geblasen oder gesaugt. Der große Unterschied und Vorteil gegenüber der Belüftungstrocknung/kühlung liegt darin, dass unabhängig von den äußeren klimatischen Bedingungen immer die gleiche Trocknungsleistung erbracht werden kann. Der Verlauf der Trocknung ist somit nur von den Eigenschaften des Trocknungsgutes, wie etwa Wassergehalt oder Körnung, abhängig. Die Temperatur mit der die Trocknungsanlage betrieben wird, richtet sich in der Praxis vor allem nach der vorhandenen Wärmequelle. Grundsätzlich reicht eine Anwärmung um einige Grad um das Trocknungsgut unter 20 % Wassergehalt zu trocknen. Höhere Temperaturen der Trocknungsluft beschleunigen zumeist den Trocknungsvorgang. In der Praxis werden je nach System bei der Warmlufttrocknung Temperaturen zwischen 40 und 130 °C eingesetzt. Zur Erwärmung der Luft kann Abwärme aus Industrie oder Gewerbe herangezogen werden. (Hartmann & Kaltschmitt 2001, Webenau et al. 1999). Auch die Nutzung der Sonnenenergie zur Wärmeengewinnung ist möglich (siehe Kapitel 10.6).

Die Vorteile dieser Methode liegen in der Unabhängigkeit von klimatischen Bedingungen. Es ist also über das ganze Jahr die gleiche Trocknungsleistung verfügbar. Die zusätzlich eingesetzte Wärmeenergie reduziert die Trocknungszeit und damit auch den Trockensubstanzabbau und die Bildung von Pilzsporen. Die notwendigen Investitionen in eine solche Anlage, sowie der notwendige technische Aufwand sind hoch. Probleme bei der Warmlufttrocknung können durch hohe Trocknungslufttemperaturen verursacht

werden. Mit der Temperatur steigt auch das Sättigungsdefizit der Trocknungsluft. Sie nimmt daher zunächst sehr viel Feuchtigkeit aus dem Trocknungsgut auf. Strömt diese Luft nun durch kühlere Gutschichten oder entlang von Gebäudekanten, kühlt sie ab und es kommt zur Kondensation von Wasserdampf und zu Pilzwachstum in diesen Bereichen.

10.4 Trocknung durch gesteuerte Mikrobiologie

Gillhofer (1998) beschreibt ein Verfahren zur Hackgut-trocknung, bei dem versucht wird, durch Beimpfung des Trocknungsgutes eine günstige Mikroflora zu etablieren, die eine Verpilzung des Materials verhindern soll. Zur Steuerung des Prozesses werden an der Unterseite und der Oberseite des Trocknungsbehälters Ventilatoren eingesetzt. Der Prozess gliedert sich in drei Phasen. In der Startphase wird das frisch gehackte Material in einen Trocknungssilo gefüllt und dabei mit einem speziell entwickelten Impfstoff benetzt. Dadurch entwickelt sich eine eigene Mikroflora, die der unerwünschten Verpilzung entgegensteuert. Das Material erwärmt sich anschließend innerhalb von drei bis vier Tagen auf die erforderliche Temperatur von 50 °C und die zweite Phase, die Aufschlussphase, beginnt. Während dieser Phase werden bevorzugt Parenchymzellen und Membrane der Hoftüpfel durch thermophile Bakterien abgebaut. Dies bewirkt eine enorme Steigerung der Porosität des Gutes und reduziert so den Diffusionswiderstand. Ein besseres Abtrocknungsverhalten des Hackgutes ist die Folge. Die Aufschlussphase dauert je nach Temperatur im Lager etwa vier bis fünf Tage. Schließlich wird das Material in der Abtrocknungsphase innerhalb von vier bis fünf Tagen auf einen Wassergehalt von 15 bis 20 % weitergetrocknet.

Der große Vorteil der Methode liegt nach Gillhofer (1998) darin, dass das Holz sofort nach der Schlägerung gehackt und getrocknet werden kann. Die Logistikkette wird also nicht durch eine Vortrocknung des Materials unterbrochen. Bei der Zerkleinerung des Holzes im frischen Zustand ist weniger Energie erforderlich. Es kann dadurch rund 1/3 des Treibstoffes für die Hackmaschine eingespart werden. Auch die Abnutzung der Hackmesser ist bei der Verwendung von frischem Material geringer. Der Heizwertverlust durch die Selbsterwärmung wird durch die kurze Dauer des Trocknungsvorganges minimiert. Innerhalb von 14 Tagen kann der Wassergehalt des Materials von über 50 % Wassergehalt auf 15 bis 20 % Wassergehalt reduziert werden. Der Masseverlust, der für die Trocknung von 54 % auf 15 % aufgewendet werden muss, beträgt nach Berechnungen von Gillhofer 15 % bezogen auf Masse des getrockneten Hackgutes.

Probleme haben sich in der Modellanlage durch erhöhten Pilzbelastungen durch Weißfäuleerreger in den Ecken des Trocknungsbehälters ergeben. Offenbar findet hier

durch die tieferen Temperaturen Kondensation des Wasserdampfes statt. Grundsätzlich ist bei der Trocknung durch Selbsterwärmung immer die Problematik gegeben, dass sich das Hackgut nicht homogen im Trocknungsbehälter verteilt. Die Folge sind unterschiedliche Strömungswiderstände im Hackgut, die eine gleichmäßige Durchlüftung behindern und so zu Kondensationszonen mit vermehrter Verpilzung führen. Erfahrungen mit dieser Methode liegen vorerst nur aus dem Versuch von Gillhofer vor. Das Trocknungsvolumen der Versuchsanlage betrug nur 9 m³.

10.5 Trocknung durch starke Selbsterwärmung

Diese Methode nützt gezielt die Selbsterwärmung durch Mikroorganismen um eine Trocknung des Gutes herbeizuführen. Die Energie für die Erwärmung stammt aus dem Substanzabbau der Hackschnitzel. Es wird also bewusst Trockensubstanzverlust für die Erwärmung des Gutes in Kauf genommen, um eine höhere Energiedichte der Hackschnitzel zu erzielen.

Das Anlagenprinzip besteht aus einem siloartigen Behälter, der nach außen mit einer Wärmedämmung versehen ist. In der Mitte des Behälters finden sich ein oder mehrere Abluftschächte, die das Abdampfen der feuchten Luft aus dem Hackgut ermöglichen. Nach oben hin ist das Hackgut mit Sägespänen beschichtet und mit einer Kunststoffolie und Strohballen abgedeckt. Um eine gute Selbsterwärmung zu gewährleisten, ist es notwendig, fein gehacktes Material mit einem bestimmten Grünmasseanteil zu verwenden, welches bei der Einlagerung zusätzlich verdichtet wird. Nach dem Befüllen der Anlage mit frischem Hackgut beginnen Mikroorganismen unter Anwesenheit von Luftsauerstoff und Feuchtigkeit das Material abzubauen. Dabei steigt die Temperatur im Behälter und die Luft nimmt Feuchtigkeit aus dem Trocknungsgut auf. Durch den dabei entstandenen Überdruck kommt es zum Abdampfen des Wassers über die Abluftschächte und so zur Trocknung der Hackschnitzel. Prankl & Weingartmann (1994) haben dieses Verfahren hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit untersucht. Für die Durchführung der Versuche wurde eine Anlage mit einem Fassungsvermögen von 265 m³ errichtet. Bei den mit Fichten- und Pappelhackgut durchgeführten Trocknungsversuchen konnte nur geringe bis durchschnittliche Verbesserungen beim Wassergehalt (Differenzen zwischen 8 % und 16 %) erzielt werden. Die Trocknungseffizienz der Methode wird zudem noch durch den erhöhten Trockensubstanzabbau weiter geschmälert. Ein Einsatz dieser Methode in der Praxis ist nach Aussage der Autoren derzeit nicht zu empfehlen.

10.6 Solartrocknung

Bei dieser Methode wird die Sonnenstrahlung zur Anwärmung der Trocknungsluft herangezogen. Dazu wird die Luft durch Solarkollektoren geleitet und anschließend durch das Trocknungsgut geleitet. Zu beachten ist, dass die Energieaufnahme der Kollektorfläche am besten funktioniert, wenn die Sonnenstrahlen senkrecht darauf auftreffen. Für eine ganzjährige Nutzung sollte deshalb eine Kollektorneigung von 45° gewählt werden, die Ausrichtung sollte natürlich möglichst nach Süden erfolgen. Für die Aufnahme von Sonnenstrahlung im Winter (tiefer Sonnenstand) eignen sich auch senkrechte Gebäudeflächen. Weingartmann (1991) unterscheidet nach ihrer Bauart folgende Systeme:

- Kollektoren mit transparenter Abdeckung
Die Sonnenenergie strahlt durch eine transparente Abdeckung auf eine schwarz gefärbte Oberfläche und wird an ihr absorbiert. Durch die Absorption erwärmt sich die Oberfläche und auch die daran vorbeistreichende Trocknungsluft. Die transparente Abdeckung bewirkt einen Glashauseffekt, welcher die Verluste durch Konvektion und Wärmeabstrahlung vermindert. Mit diesen Kollektoren sind Wirkungsgrade von 50 bis 60 % erreichbar.
- Kollektoren mit freiliegendem Absorber
Bei dieser Bauart wird die Trocknungsluft an der Rückseite des Absorbers erwärmt, als Absorberfläche dient also die Dachfläche. Eine Verschalung im Abstand einer Pfettenstärke an der Unterseite dient der Luftführung. Als Materialien für den Absorber eignen sich Eternit, Betonziegel und Blech, für die Verschalung können Spanplatten, Hartfaserplatten, Eternit oder auch gewebeverstärkte Folien verwendet werden. Natürlich ist auch hier eine dunkle Färbung des Absorbers von Vorteil. Es können Wirkungsgrade zwischen 30 und 40 % erreicht werden.
- Dachraumabsaugung
Die Trocknungsluft wird aus einem am Untergurt verschalten und mit einer Decke nach unten abgetrennten Dachraum abgesaugt. Da hier keine exakte Luftführung möglich ist, können nur Wirkungsgrade von ca. 10 bis 20 % erreicht werden.
- Passive Solarenergie-Nutzung
Darunter versteht man die Nutzung der Sonnenenergie, die von einem Gebäude passiv gesammelt wird. Es wird also statt Außenluft einfach Raumluft angesaugt.

In der Regel wird nur dann Luft durch das Trocknungsgut geblasen, wenn sie durch die Sonnenenergie eine bestimmte Temperatur erreicht hat. Obernberger (1997) spricht deshalb von der „pulsierenden Solartrocknung“ (siehe Abbildung 28): Der Verbrauch an elektrischer Energie für die Ventilatoren kann so durch eine Temperatursteuerung optimiert werden. Über einen Zeitraum von zwei Monaten lässt sich so der Wassergehalt

des eingelagerten Materials von 50 % auf 20 % reduzieren. Als Voraussetzung für diese Methode nennt Obernberger (1997) einen Heizwerkstandort mit entsprechend guter Sonneneinstrahlung, eine Brennstoffeinlagerung im Sommer und eine Ausrichtung der Dachflächen in südliche Richtung.

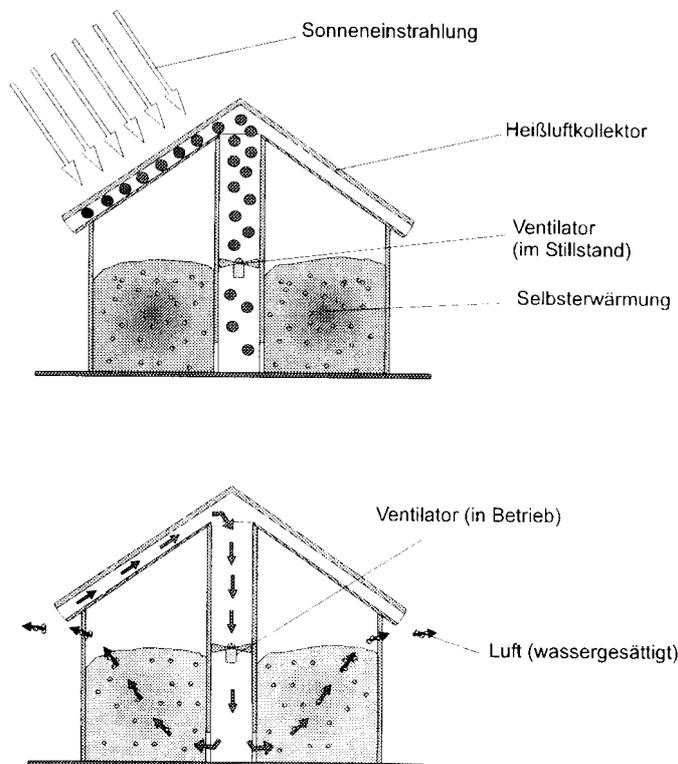


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Prinzips der pulsierenden Solartrocknung von Biomasse (aus Obernberger 1997). Bild oben – Teilschritt 1: Aufheizen der stehenden Luft in Solarkollektoren und Selbsterwärmung des Brennstoffes durch biologischen Abbau. Bild unten – Teilschritt 2: Erwärmte Luft wird mit Ventilatoren durch die Biomasse gedrückt. Danach wird das Wasser mit Luft aus Biomasse ausgetragen.

Zu einer durchwegs positiven Bewertung der Trocknung durch solare Luftanwärmung kommt auch Jünnemann (2002) bei Untersuchungen über die Anlage in Hintertux (Zillertal). Durch die solare Anwärmung kann in dieser Anlage das Trocknungspotential der Luft um 90 % erhöht werden. Die Abtrocknungsleistung der Anlage liegt bei 33 bis 60 kg Wasser pro Stunde bei einer Kapazität von 75 Tonnen. Durch die elektrische Belüftung wird die Selbsterwärmung im Trocknungsgut in Grenzen gehalten. Die durchschnittliche Trocknungsdauer für 75 Tonnen Hackschnitzel auf einen Wassergehalt kleiner 20 % beträgt rund 150 Tage. Die Rentabilität einer Trocknungsanlage in dieser Größenordnung (ca. 1000 Schüttraummeter/Jahr) ist aber nur bei einer entsprechend langen Nutzungsdauer von über 20 Jahre gegeben.

Ein weiteres System mit Solarenergie beschreiben Lauer & Bergmayr (1986). Das Hackgut wird dabei in einem Folientunnel aufgeschüttet. Bei Sonnenschein erwärmt sich die Luft im Raum zwischen dem aufgeschütteten Hackgut und der Gewächshausfolie und wird durch das Hackgut hindurch über am Boden befindliche Luftkanäle abgesaugt. Praktische Versuche mit diesem System sind nicht bekannt.

Die Nutzung der Solarenergie für die Trocknung von Biomasse ist insgesamt als positiv zu beurteilen. Prankl & Weingartmann (1994) geben den spezifischen Energiebedarf der Anlage in Kautzen/NÖ für das Jahr 1992/93 mit 0,36 bis 0,7 MJ pro kg Wasser an. Hinsichtlich des Energieaufwandes schneidet dieses Verfahren damit am besten unter den technischen Verfahren ab. Die Ergebnisse von Jünnemann (2002) haben gezeigt, dass das Verfahren auch in einem alpinen Tal gute Ergebnisse bringt. Bei der Beurteilung der Anwendbarkeit darf aber nicht außer Acht gelassen werden, dass die Solartrocknung eine starke saisonale Abhängigkeit aufweist. Wenn eine über das ganze Jahr annähernd gleich bleibende Trocknungsleistung benötigt wird, kann die solare Luftanwärmung nur unterstützende Funktion für eine Warmlufttrocknung sein (Weingartmann 1991).

10.7 Industrielle Trocknungsverfahren

10.7.1 Trommeltrockner

Trommeltrockner zählen zu sog. Durchlaufverfahren, das heißt das Trocknungsgut wird kontinuierlich durch den Trockner befördert. Das Gut liegt dabei im Innenraum einer rotierenden Trommel. Über einen Heißluftstrom, der aus einem Abgas-Luft-Gemisch besteht, wird das Material durch die Trommel transportiert und dabei getrocknet. Durch Trommeleinbauten, z.B. Hubschaufeln an der Trommelinnenseite, wird das Trocknungsgut mehrmals angehoben und fällt wieder in den freien Querschnitt der Trommel. Dabei wird es durchmischt und umgelagert. Die Temperatur des zugeführten Trocknungsgases kann bis zu 1000 °C betragen (www.stela.de). Der spezifische Wärmebedarf umfasst neben der Vorwärmungs- und Verdampfungswärme des Wassers auch den Aufwand für die Aufwärmung des trockenen Gutes sowie und liegt zwischen 0,8 und 1,1 kWh je kg Wasser das aus dem Holz entfernt werden soll. (Hartmann & Kaltschmitt 2001).

Die Trommeltrocknung ist eine seit langem bewährte industrielle Trocknungsanwendung, welche sich insbesondere durch eine hohe Trocknungskapazität auszeichnet (bis 50t/h Wasserverdampfung lt. Angaben Firma Stella). Problematisch sind die prozessbedingt hohen Emissionswerte, welche sekundäre Abluftreinigungsmaßnahmen notwendig

machen. Aufgrund der hohen Trocknungstemperatur ist zudem ein hoher Energieeinsatz notwendig. Auf niedertemperierte Abwärme aus anderen Prozessen kann nicht zurückgegriffen werden. Spezialverfahren mit einem geschlossenen Kreislauf und dem Einsatz von überhitztem Wasserdampf als Trocknungsmedium (Eco-dry Verfahren der Firma SwissCombi) ermöglichen eine prozessintegrierte Geruchs- und Schadstoffverbrennung. Bei Sekundärmaßnahmen sind lt. Herstellerangabe bei dieser Methode nicht notwendig. Zudem wird durch Wärmerückgewinnung der Wirkungsgrad der Anlage verbessert. In einem Praxisversuch von Gruber & Becker (2003) mit einer derartigen Pilotanlage von Swiss-Combi wies eine Energieeinsparung von 10 % gegenüber der konventionellen Trommeltrocknung nach.

10.7.2 Bandrockner

Bei der ebenfalls zu den Durchlaufverfahren zählende Bandrockner-Technologie, werden im Gegensatz zum Trommeltrockner weit geringere Trocknungstemperaturen eingesetzt (75 – 110 °C). Somit ist es auch möglich, Prozesswärme aus anderen Produktionsbereichen für die Trocknung zu nutzen. Das feuchte Trocknungsgut wird bei diesem Verfahren mittels eines speziellen Aufgabesystems in einer sehr gleichmäßigen Schichtdicke auf einem sich vorwärts bewegenden Gewebband verteilt. Die vorgewärmte Trocknungsluft durchströmt Förderband und Trocknungsgut während des Transportes. Die Trocknungsluft kühlt dabei ab und sättigt sich durch die Aufnahme von Wasserdampf aus dem Gut. Die nunmehr angefeuchtete Trocknungsluft wird über Ventilatoren ins Freie geleitet. Über eine automatische Online-Wassergehaltsmessungen am Ende der Trocknungsstrecke wird die Restfeuchte im Trocknungsgut ermittelt. Anhand dieser Messwerte kann wiederum die Bandgeschwindigkeit so gesteuert, dass ein kontinuierlich gleichbleibendes Trocknungsergebnis erzielt wird.

Vorteile der industriellen Bandrocknung liegen bei den mit Trommeltrocknern vergleichbaren Trocknungskapazitäten in den geringen Emissionswerten, in der Nutzung von niedertemperierter Prozessabwärme sowie in der schonenderen Trocknung des Gutes. Bandrockner werden in den letzten Jahren im Bioenergiebereich vermehrt bei der industriellen Produktion von Holzpellets zur Vortrocknung frischer Sägespäne eingesetzt.

10.8 Trocknungssysteme aus der Landwirtschaft

Gigler et al. (2000) untersuchte die Trocknungsmöglichkeiten von Weiden-Hackschnitzel in einem normalerweise für Kartoffeln verwendeten Trockner in den Niederlanden. Nach einer Belüftungsdauer von rund 55 Stunden mit maximal 20 °C warmer Luft wurde ein

Wassergehalt von 13 % erreicht. Der Ausgangswassergehalt betrug rund 43 %, die Belüftungsgeschwindigkeit an der Oberfläche wurde mit 0,3 Meter pro Sekunde gemessen. In den oberen Schichten der Hackschnitzel wurden durch Kondensationsvorgänge allerdings geringere Trocknungserfolge erzielt. Die Energiekosten für dieses Verfahren liegen bei 12 bis 25 Euro pro Tonne trockener Hackschnitzel (entspricht 2 bis 4,2 €/Srm). Diese weite Spanne ergibt sich durch die saisonale Abhängigkeit der Methode. Von März bis August waren die Kosten aufgrund der Wetterbedingungen am niedrigsten. Werden die Investitionskosten für die Anlage miteinbezogen, liegen die Kosten bei 28 bis 59 Euro pro Tonne trockener Hackschnitzel (entspricht 4,7 bis 9,8 €/Srm).

Eine Verwendung von bestehenden Trocknungsanlagen für verschiedene Anwendungen ist grundsätzlich sinnvoll. Fixkosten können so auf mehrere Produkte aufgeteilt werden. Die Anlage liegt auch bei Vergleich der Vollkosten im Bereich der von Zeilinger (1992) kalkulierten Kosten für die Hackguttrocknung mittels Belüftungskühlung bzw. Warmlufttrocknung. Die Kartoffeltrocknung findet üblicherweise in den Monaten September bis Februar statt, ein Zeitraum mit ungünstigen klimatischen Bedingungen (höhere relative Luftfeuchte, niedrigere Lufttemperatur). Der finanzielle Aufwand für die Trocknung ist in dieser Zeit am höchsten und kommt deshalb für die Trocknung von Hackschnitzeln weniger in Frage.

10.9 Kosten verschiedener Verfahren zur Hackguttrocknung

Zeilinger (1992) hat in seiner Diplomarbeit die Kosten verschiedener Verfahren berechnet. Obwohl die Zahlen nicht mehr aktuell sind, geben sie doch einen Überblick über die Kostenverhältnisse der einzelnen Verfahren zueinander (siehe Tabelle 14). Als Umtriebe pro Jahr wird in der Übersicht, die der Anwendungen pro Jahr verstanden. Bei mehreren Umtrieben können die Fixkosten des jeweiligen Verfahrens gesenkt werden. Es ergibt sich somit eine bessere Anlagennutzung und geringere Kosten. Es wurde auch zwischen den Trocknungskosten für 75 Srm und 340 Srm unterschieden und der Einfluss der Befüllkosten dargestellt. Diese könnten vernachlässigt werden, wenn die Trocknungseinheit auch als Lager verwendet wird.

Die geringsten Kosten ergeben sich nach den Berechnungen von Zeilinger (1992) für die Methode „Aufschütten im Freien“, Selbsterwärmung und Solartrocknung. Unter den bisher positiven Erfahrungen mit der Solartrocknung scheint sie bei mehreren Umtrieben pro Jahr ein kostengünstiges Verfahren zu sein. Auch die Methode „Harpfen“ schneidet relativ

gut ab. Die Warmlufttrocknung ist erwartungsgemäß am teuersten, durch mehrere Umtriebe pro Jahr können hier die Kosten gesenkt werden.

Tabelle 14: Übersicht über die Kosten verschiedener Verfahren zur Hackgutttrocknung in Euro pro Schüttraummeter (nach Zeilinger 1992).

Kosten verschiedener Verfahren in €/Srm						
Verfahren	Anwendungen pro Jahr					
	egal	1	2	3	4	6
Aufschütten im Freien						
ohne Wenden	3,20					
mit Wenden	4,00					
Harpfen						
ohne Befüllkosten		8,00	6,40			
mit Befüllkosten		8,80	6,90			
Selbsterwärmung						
für 340 Srm			5,90	4,60		
für 75 Srm						
ohne Befüllkosten		9,80	6,10	4,60		
mit Befüllkosten		10,30	6,60	5,50		
Belüftungskühlung						
für 380 Srm			7,10			
für 80 Srm						
ohne Befüllkosten		11,40	7,40			
mit Befüllkosten		12,00	10,00			
Warmlufttrocknung						
mit zusätzlichem Ofen 100 kW						9,40
ohne zusätzlichen Ofen						
ohne Befüllkosten		17,80				9,20
mit Befüllkosten		18,30				9,80
Solartrocknung						
Kollektorfläche 300 m ²					6,50	
Kollektorfläche 100 m ²						
ohne Befüllkosten		13,30			6,10	
mit Befüllkosten		13,90			6,70	

11 Workshop – Energieholztrocknung

Um das Wissen aus der Literatur durch Erfahrungen aus der Praxis zu vervollständigen und etwaige Lücken zu schließen, wurde ein Workshop mit heimischen Experten durchgeführt. Bei der Auswahl der Teilnehmer wurde insbesondere auf praktische Erfahrungen im Umgang mit Energieholz wertgelegt. Die Diskussion beim Workshop wurde in die vier Themenbereiche gegliedert, die sich bei der Analyse der Logistikketten und bei der Literaturrecherche herauskristallisierten:

- Ganzbaum-Trocknung
- Trocknung von Rundholz in Poltern
- Trocknung von Schlagabraum
- Trocknung von Waldhackgut

Jeder dieser Themenbereiche wurde mit einem Impulsreferat umrissen, der Inhalt dieser Referate ist im Folgenden unter dem Titel „Ausgangspunkt der Diskussion“ wiedergegeben. Die während des Workshops von der HFA aufgezeichneten Notizen wurden direkt nach dem Workshop gesammelt. Aus diesen Aufzeichnungen wurde ein Rohprotokoll verfasst. Dieses „Rohmaterial“ wurde anschließend gegliedert und in zusätzlichen Telefongesprächen mit den Teilnehmern konkretisiert und vervollständigt. Dabei wurden auch Gespräche mit anderen Personen geführt, die am Workshop nicht teilnehmen konnten. Auch Informationen aus diesen Gesprächen sind in das Protokoll eingeflossen.

Teilnehmer des Workshops: Aste Christof (Bistum Gurk), Ehrensberger Klaus (Egger Holzindustrie), Haberhauer Otto (Agrarmanagement NÖ Süd), Hinterholzer Norbert (Egger Holzindustrie), Jauschnegg Horst (Landwirtschaftskammer Steiermark), Krenn Johann (Hackschnitzelerzeugung Krenn), Nemestothy Nikolaus (Forstbetrieb Lackenbach), Sattler Herbert (Burgenländischer Waldverband), Schopfhauser Wolfgang (Papierholz Austria), Weingartmann Herbert (Universität für Bodenkultur Wien), Welz Adolf (Biomasseverband Kärnten, Fernwärme Eisenkappel)

Weitere befragte Personen: Arnold Gernot (Landwirtschaftskammer Oberösterreich), Hornek Erwin (Bundesministerium), Jonas Anton (Landwirtschaftskammer Niederösterreich), Kohlross Herbert (Bezirksbauernkammer Wiener Neustadt), Niedermühlbichler Bartl (Fernwärme Söll), Perny Bernhard (BFW), Pirchmoser Johann (Fernwärme Söll), Tomiczek Christian (BFW).

11.1 Ganzbaum-Trocknung

11.1.1 Ausgangspunkt der Diskussion

Als Ganzbaum-Trocknung wurde zum Eingang der Diskussion die Lagerung von Bäumen im unaufgearbeiteten Zustand definiert. Nach dem Fällschnitt werden dabei Bäume mit minimaler Manipulation gelagert. Die am Baum verbleibende Blatt- und Nadelmasse soll durch die weiterhin stattfindende Transpiration die Austrocknung des Holzes beschleunigen. Diese Lagervariante ist für alle Bewirtschaftungsformen denkbar, wobei die Frage offen ist, mit welchem Trocknungseffekt man rechnen kann, da das Verfahren in der Literatur wenig beschrieben wird. In Literatur und Fachwelt werden unterschiedliche Aussagen über den Effekt der Rest-Transpiration getroffen. Praktiker berichten immer wieder, dass sie durch das Lagern ganzer Bäume schnelle Trocknungserfolge erzielt haben, Pflanzenphysiologen hingegen sind der Meinung, dass der Wassertransport, wie er im lebenden Baum stattfindet, nach dem Fällschnitt durch das Unterbrechen der Leitungsbahnen schnell zusammenbricht. Eine Austrocknung durch Rest-Transpiration wäre demnach nur minimal möglich (Richter 2004, Neumüller 2004).

11.1.2 Welche Erfahrungen gibt es in der Praxis?

Folgende Übersicht fasst konkrete Erfahrungen mit der Ganzbaum-Trocknung zusammen, welche von verschiedenen Experten berichtet wurden.

Gebiet	See-Höhe	Ernteverfahren - Zeitpunkt	Baumart	Dauer Monate	Wassergehalt nach der Lagerung
Kärnten	1500	Almschwendung, Sommer, 4 m hohe Haufen	Fichte	6	kaum eine Trocknung bemerkbar, Material noch grün, z.T. modrig
Rax, Schneeberg Buckelige Welt	-	Durchforstung Winter	2/3 Weichholz 1/3 Hartholz	6 Monate	20 – 25 % bei optimalen Bedingungen
Nördl. Weinviertel	-	Durchforstung Juli	Ei, Bi, Asp, u.a. LH	1,5 - 2 Monate	29 – 32 %

11.1.3 Lagerplatz

- Das Ganzbaumverfahren erfordert große Lagerplätze, insbesondere dann, wenn die Bäume am Lagerplatz gehackt werden sollen.

- Mindestmenge um einen LKW (90 m³) zu befüllen: Haufen mit 3 m Höhe und ca. 20 - 40 m Länge (mindestens 3 m³ gelagertes Holz um einen Schüttraummeter Hackgut zu erhalten).
- Aus allem was man über Trocknung weiß, lässt sich ableiten, dass die Durchlüftung einen sehr großen Einfluss hat (auch wenn Resttranspiration zum Tragen kommen sollte). Im Laufe der Trocknung müssen Tonnen von Wasser abtransportiert werden.
- Die Durchlüftung hat einen größeren Einfluss auf die Trocknung als die Sonnenbestrahlung. Aus der Praxis ist bekannt, dass sehr sonnige Plätze mit schlechter Durchlüftung keinen großen Trocknungserfolg bringen.
- Der Unterschied zwischen gut windzugänglichen und windgeschützten Standorten bewirkt sehr schnell einen Unterschied im Wassergehalt von 10 %.
- In höheren Lagen (ca. 1500 Meter) bleibt der Grünzustand lange aufrecht. Das Käferproblem in diesen Lagen und bei dünnem Material weniger groß. Die Ganzbaummethode scheint hier untersuchungswürdig zu sein.

11.1.4 Gestaltung der Lagerung

- Die Durchlüftung funktioniert bei Nadelholz-Ganzbäumen eher schlecht, wenn sie zu Haufen gestapelt werden (Almschwendung).
- Laubholz Ganzbäume durchlüften relativ gut, Laubholz-Astmaterial und Strauchschnitt neigt dagegen schnell zu Kompostierung und ist schlecht durchlüftbar.
- Die getrocknete Blattmasse nimmt sehr viel Wasser auf, wenn sie dem Regen ausgesetzt wird, dies sollte deshalb vermieden werden.
- Einige Forstleute praktizieren die Schlägerung der Bäume mit dem Wipfel abwärts zum Hang, die Schwerkraft soll dabei den Trocknungsprozess unterstützen.

11.1.5 Kombination mit Ernteverfahren

- Bei Durchforstungen: Fällschnitt und Rückung können auch zeitversetzt zueinander erfolgen, bei Durchforstungen mit sehr dünnem Holz ist es möglich die ganze Ernte als Ganzbaum zu lagern.
- In der Endnutzung: Wipfelstücke können ohne Aufarbeitung gelagert werden.
- Bei Rodungen oder Almschwendungen, Bereinigung von Straßenrändern und dergleichen.
- Voll- oder Teilmechanisierte Ernteverfahren
- Harvester-Nutzung

- Motormanuell + Forstschlepper mit Rückezange
- Seilbringung, Baumverfahren mit Prozessor
- Feller-Buncher Systeme + Rückezange

11.1.6 Kosten und Wirtschaftlichkeit

- Grundsätzlich: Energieholz ist als Koppelprodukt und minderwertiges Sortiment derzeit immer nur dann wirtschaftlich nutzbar, wenn die Kosten möglichst gering gehalten werden. „Veredelungsschritte“ wie Trocknung sind nur unter bestimmten Bedingungen rentabel. Dazu gehört als erstes, dass trockenes Hackgut beim Kunden nachgefragt wird, bzw. einen höheren Preis erzielt.
- Hölzer mit Zopfdurchmesser 4 - 8 cm können mit Harvestern geerntet werden und sind nur als Brennholz vermarktbar. Alles ab 8 cm Zopf ist potentiell als Schleif- oder Faserholz geeignet.
- Beispiel aus Kärnten: für Hackgut aus Schlagabraum (Seilbringung mit Baumverfahren) wurde ein Preis von 6,5 EUR/Srm geboten. Der Förster konnte den Brennstoff jedoch erst ab einem Preis von 8 EUR/Srm (kostendeckend) anbieten.
- Die Kombination verschiedener Lagerungsmöglichkeiten zum Zwecke der Trocknung ist keine Alternative, die Kosten der Manipulation übersteigen den Zugewinn der dadurch erzielt werden kann.
- Die Abnutzung des Hackers ist bei Ganzbäumen aufgrund der stärkeren Verunreinigung des Materials größer als bei Stammholz. Solidere (stationäre) Hacker oder Shredder sind besser geeignet.

11.1.7 Phytosanitäres Risiko

- Höhere Lagen und kleinere Dimensionen entschärfen die Käferproblematik. Das Risiko ist aber für spezielle Fälle und einzelne Regionen jeweils gesondert zu beurteilen.
- Bei Laubholz sind bislang keine phytosanitären Probleme bekannt geworden.
- Durch Winterschlägerung erhält man bis zu Beginn der Käferzeit (März) Holz, welches für Käferbefall weniger gefährdet ist. Erfahrungen an Windwürfen zeigen jedoch, dass Holz erst nach einem Jahr vollständig unbedenklich für den Käferbefall ist. Dass in höheren Lagen manchmal Bäume im Herbst geschlägert werden, um dann im nächsten Jahr als Fangbaum zu dienen, zeigt, dass die Attraktivität für den Käfer auch über den ganzen Winter hinweg aufrecht bleiben kann. Es gibt also keine pauschale Absicherung gegen

Käferbefall durch Schlägerung im Winter, obwohl das Risiko verringert werden kann.

- Als Grenze für den Wassergehalt können etwa 30 % angegeben werden, Holz mit kleineren Wassergehalten ist aus phytosanitärer Sicht meist unbedenklich. Aber auch hier hängt es von der lokalen Situation und vom Käferdruck ab.
- Als optimaler Abstand von Holzlagerplätzen zum Wald sind 150 m zu sehen. Als Mindestabstand müssen 50 m eingehalten werden, bei allem was näher am Wald liegt, ist chemischer Schutz erforderlich.

11.1.8 Allgemeines

- Der Effekt der Austrocknung durch die Blattmasse ist nur bei schwächern Dimensionen bis zu 30 cm wirksam.
- Bei der Ganzbaum-Trocknung sollte das Grünmaterial vor dem Hacken entweder ganz braun oder abgefallen sein. Grünmaterial führt sowohl bei der Lagerung des Hackgutes, als auch im Verbrennungsprozess zu Problemen (insbesondere bei Heizwerken < 1 MW).
- Der Platzbedarf ist bei der Ganzbaum-Trocknung gegenüber der Polter-Trocknung ca. 3 - 5 mal so hoch; die Manipulation von Ganzbäumen ist aufwändiger als bei entasteten Stämmen.

11.2 Trocknung von Rundholz in Poltern

11.2.1 Ausgangspunkt der Diskussion

Polter-Trocknung wurde zu Beginn der Diskussion wie folgt definiert: Polterung der anfallenden Rundhölzer, welche für energetische Zwecke zur Verfügung stehen. Die anfallenden Sortimente sind Schwachholz oder aus anderen Gründen minderwertige Hölzer (krumm, drehwüchsig, abholzig, rotstreifig, faul). Ziel der Polter-Lagerung ist eine möglichst rasche Abtrocknung des Holzes durch luftige Lagerung. Dabei gelten für den Aufbau der Polter und die sonstigen Lagerbedingungen andere Kriterien als bei der Polterlagerung von Sägerundholz. Folgende Fragen wurden aufgeworfen:

- Trocknungsverhältnisse im Polter
- Polter-Formen
- Möglichkeiten zur Abdeckung von Poltern.

11.2.2 Welche Erfahrungen gibt es in der Praxis?

Folgende Übersicht zeigt auf einen Blick welche Erfahrungen in der Praxis mit Polter-Trocknung von Energieholz gemacht wurden.

Gebiet	Lagergestaltung	Ernteverfahren/ Zeitpunkt	Baumart	Dauer Monate	Wassergehalt nach der Lagerung
zuerst Wald dann 3 Monate Holzlagerplatz, NÖ	Holzlager-Platz 5,5 m hohe Polter	Winter	Laub	6 - 8	35 - 37%
Burgenland	Polter 4 m hoch 60 m lang	Harvester und Forwarder	Laubholz	6	30 - 35%
				12 - 14	29%
Burgenland	Polter 3 m hoch an Waldstraße, unterlüftet, Rinde stark beschädigt	Harvester, Sortimentver- fahren, im Frühjahr	Fichte, ca. 10 m x 4 m	1 - 2	25 - 35%
Burgenland	Bodenfreie Kreuzpolter	Harvester, im Winter	Laubholz schwache Dimensionen	8 - 9	17 - 25%

11.2.3 Lagerort

- Der Aufstellungsort der Holzpolter ist entscheidend. Optimal sind Kuppen und Freiflächen mit guter Windzugänglichkeit.
- Lagerplätze außerhalb des Waldes wirken sich entschärfend auf das phytosanitäre Risiko aus (Mindestabstand 50 m).
- Trend bei der Lagerung: Heizwerke haben nur kleine Lagerplätze, die Lagerung muss also im Wald oder auf anderen Lagerplätzen stattfinden. Das Hacken bei den Heizwerken wird zunehmend schwieriger, wegen Staub- und Lärmbelästigung. Deswegen gibt es auch schon Überlegungen, den Hacker bei Heizwerken innerhalb eines Gebäudes anzulegen.
- Durch die kleineren Lagerplätze bei den Heizwerken muss das ganze Jahr über angeliefert werden, dies ergibt u.U. Schwierigkeiten mit der Zugänglichkeit der Lagerplätze im Wald während der Wintersaison.
- Aufgrund der Schwierigkeiten von Waldlagerplätzen werden in letzter Zeit auch zentrale Lagerplätze außerhalb des Waldes eingerichtet. Dazu eignen sich z.B. Schottergruben oder ähnliches. Zentrale Lagerplätze haben folgende **Vorteile**:
- Bessere Hackmöglichkeiten und bessere Auslastung des Hackers
- Bessere Zugänglichkeit über das ganze Jahr

- Schutz vor phytosanitären Problemen (wenn der Mindestabstand eingehalten wird)
- Keine Probleme mit Lärm und Staub beim Hacken, wenn ein ausreichender Abstand zu bewohnten Gebieten besteht.

Nachteile:

- Unterbrochene Fracht
- U.U. größere Transportdistanzen
- Kapitalbindung bei längerer Lagerung

11.2.4 Gestaltung der Lagerung

- Energieholz-Polter werden durch Einführung von Zwischenlagen (ca. jeden Meter) luftiger gemacht. Wie viele Zwischenlagen optimal sind wurde noch nicht geprüft, unter Umständen ließe sich der Aufwand durch eine gezielte Untersuchung verringern.
- Bodenfreiheit: je größer der Abstand zum Boden um so besser. In der Praxis werden Polter mit bis zu 60 cm Abstand zum Boden errichtet.
- Die höheren Teile des Polters trocknen besser ab, da die Durchlüftung mit Abstand zum Boden besser wird (höhere Windgeschwindigkeit im Abstand zum Boden). Die Höhe von Poltern ist entsprechend der technischen Gegebenheiten und den Erfordernisse der Arbeitssicherheit anzupassen.
- Erfahrung im Burgenland: Polter werden 4 m x 60 m groß gebaut.
- Erfahrungen in Kärnten: Polter 4 - 5m x 100m
- Eine neue Überlegung: Polter am Lagerplatz niedrig und lang beginnen und mit hinzukommendem Holz sukzessive erhöhen. Die Oberfläche und Luftzugänglichkeit des Polters soll dadurch über den ganzen Lagerzeitraum maximiert werden. Ein möglicher weiterer Vorteil: die große Oberfläche vergrößert nicht nur die Luftzugänglichkeit, sondern auch die Sonnebestrahlung. Die Rinde platzt dadurch auf, was die Trocknung beschleunigt.
- Zur Abdeckung von Poltern gibt es bislang keine Erfahrungen, ein Betrieb in Österreich führt derzeit Versuche durch, wobei es darum geht Niederschläge unmittelbar vor dem Hacken von den Poltern abzuhalten. Über den Sommer gelagertes Holz wird im September abgedeckt um es vor den Herbst-Niederschlägen zu schützen.
- Entastetes Holz trocknet schneller ab, wenn es mit Harvestern entastet wurde und dabei die Rinde stark verletzt wurde

11.2.5 Kombination mit Ernteverfahren

Energieholz ist ein Nebenprodukt und kann überall dort, wo geringe Kosten anfallen im Zuge der Holzernte aus dem Wald gewonnen werden. Dies ist insbesondere bei hochmechanisierten Ernteverfahren der Fall. Für Rundholz trifft dies zu bei:

- Harvester-Nutzung mit Forwarder
- Seilbringung im Baumverfahren mit Prozessor

Insbesondere bei der Harvester-Nutzung besteht die Möglichkeit den Zopfdurchmesser für die dünnsten Sortimente von 8 cm auf etwa 12 - 13 cm anzuheben. Dadurch entsteht ein längeres Wipfelstück welches als Energieholzsortiment ausgeformt werden kann. Je nach Rahmenbedingungen der Nutzung kann in diesem Fall entschieden werden, ob die Wipfelstücke entastet werden oder ob sie als „Rest-Ganzbäume“ genutzt werden. Hierbei ist unter anderem folgendes zu beachten: Für eine pflegliche Ernte in der Harvester-Nutzung ist ein Astpolster für die schonende Befahrung des Geländes mit dem Harvester notwendig. In Verjüngungsbeständen kann ein Astpolster jedoch auch hinderlich für die nachwachsende Verjüngung sein.

11.2.6 Kosten und Wirtschaftlichkeit

- Ein Problem bei der Trocknung stellt die lange Kapitalbindung dar, der Zugewinn durch Trocknung muss mit der Kapitalverzinsung gegengerechnet werden.
- Bei Lagerplätzen außerhalb des Waldes besteht das Problem der unterbrochenen Fracht.
- Der Preis schwankt laut einem Beispiel aus Österreich je nach Wassergehalt zwischen 17 EUR und 40 EUR je LUTRO-Tonne, frei Straße. Der erntekostenfreie Erlös liegt für den Waldbesitzer zwischen 2 und 7 EUR je LUTRO-Tonne. Diese Preisunterschiede treffen jedoch nicht auf alle Abnehmer zu. Jeder Produzent muss sich diesbezüglich an seinen Kunden orientieren.
- In Situationen wo niedrige Wassergehalte (unter 20 - 25%) erforderlich sind, ist es ein erstrebenswertes Ziel, innerhalb von 6 Monaten eine Trocknung bis auf einen Wassergehalt von unter 20 - 25% zu erreichen.

11.2.7 Phytosanitäres Risiko

Wie bei Ganzbaum-Trocknung:

- Wintergeschlägertes Holz bringt etwas weniger Probleme, wenn es bis zum Sommer gelagert wird, da eine gewisse Vortrocknung stattfindet.

- Ab Mitte März bzw. bei Temperaturen ab 16 °C besteht Borkenkäfer-Gefahr. Das Holz sollte zu dieser Zeit einen Wassergehalt von weniger als 30 % aufweisen.
- Laubholz bringt nach bisherigen Erfahrungen keine phytosanitären Probleme bei der Lagerung im Wald.
- Lagerplätze außerhalb des Waldes sind als ungefährlich einzustufen (mindestens 50 m Abstand, optimal 150 m).

11.2.8 Kritische Einwände

Im Zuge der Diskussion wurden bezüglich der Trocknung von Energieholz auch kritische Fragen aufgeworfen:

- Inwieweit ist es bei dem großen Bedarf an Waldhackgut, der in Zukunft auftreten wird, möglich große Mengen davon auch zu trocken?
- Die Erzeugung von trockenem Hackgut muss sich an der Nachfrage orientieren. Es sollte kein kategorisches Ziel für niedrige Wassergehalte gesteckt werden. Der Aufwand ist nur dann zu rechtfertigen, wenn er auch finanzielle Vorteile bringt.
- In manchen Heizwerken kommt es vor, dass trockenes Holz Schwierigkeiten beim Wärmeübergang auf den Wärmetauscher bereitet. Manchmal erhöht sich die Heizleistung am Wärmetauscher, wenn das Holz eine höhere Feuchte hat.

Aufgrund nachträglicher Reflektion dieser Einwände muss den obigen Argumenten entgegengehalten werden, dass diese zwar eine gewisse Berechtigung haben, jedoch nicht überbewertet werden sollten. Gerade im Zusammenhang mit großen Mengen können auch geringe Wertschöpfungseffekte die durch Trocknung erzielt werden, in Summe einen spürbaren Effekt haben. Weiters ist damit zu rechnen, dass bei größeren Mengen entlang der gesamten Bereitstellungskette – auch bei Lagerung und Trocknung – Rationalisierungseffekte entstehen werden.

11.3 Trocknung von Schlagabraum

11.3.1 Ausgangspunkt der Diskussion

Unter Trocknung von Schlagabraum wurden einleitend alle Formen der Lagerung von Schlagabraum zusammengefasst. Dazu gehören sowohl die Lagerung in Form von Fratten und Haufen, als auch die Bündelung mit Hilfe des aus Skandinavien stammenden Bündler-Verfahrens.

In der Literatur finden sich Beispiele mit Schlagabraum-Mengen von bis zu hundert Tonnen pro Hektar. Als Einflussfaktoren für das Trocknungsverhalten von Schlagabraum wurden Niederschlag, Durchlüftung, Lagerungsform, Lagerstandort und verschiedene Formen der Abdeckung aufgezählt.

Es wurde zur Diskussion gestellt, inwieweit mit unterschiedlichen Lagerungsformen/Maßnahmen ein Trocknungseffekt des Schlagabraums erzielt werden kann bzw. welche praktischen Erfahrungen es diesbezüglich in Österreich gibt.

11.3.2 Bündelung – Erfahrungen aus der Praxis

- Derzeit werden in Bezug auf die Nutzung von Schlagabraum Versuche zur Bündelung durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen, dass nicht abgedeckte Bündel sehr schlecht lagerfähig sind. Der biologische Abbau ist sehr hoch.
- Durch Abdecken der Bündel können bessere Ergebnisse erreicht werden. In sechs Monaten wurden Wassergehalte von 21 bis 32 % erzielt.
- Die meisten Experten sind sich darüber einig, dass sich in Österreich die Bündelung nicht leicht durchsetzen wird. Probleme bei Lagerung, Transport und dem Nährstoffentzug werden als Ursachen dafür gesehen. Auch der Platzbedarf im Wald ist für das Bündeln manchmal zu hoch.

11.3.3 Probleme bei der Nutzung von Schlagabraum

- Hackgut aus grünem Schlagabraum verursacht durch die starke Selbsterwärmung große Lagerprobleme. Es gibt immer wieder Probleme mit Selbstentzündung. Grünes Hackgut ist praktisch nicht lagerfähig.
- Die Trocknung von Laubholz-Astmaterial führt bereits nach sechs Monaten zu beträchtlichem biologischem Abbau, wenn die Äste zu Haufen aufgeworfen werden.
- Transport von ungehacktem und nicht gebündeltem Schlagabraum ist sehr platzaufwändig. Die Manipulation von Astmaterial ist kostspielig und kann derzeit nicht realisiert werden. Die Kosten liegen noch über den angebotenen Preisen.
- Im für Österreich typischen steilen Gelände stellt die Manipulation und Lagerung von Schlagabraum meistens ein Platzproblem dar.
- Im Seilkran-Prozessorverfahren fallen große Schlagabraum-Mengen konzentriert an, diese müssten für die Nutzung kontinuierlich abtransportiert werden. Meist fehlt dafür jedoch der Platz.

- Das ökologische Problem: Nährstoffarme Standorte lassen keine Entnahme von Astmaterial bzw. Blatt- und Nadelmasse zu. Dies trifft insbesondere für Standorte mit silikatischem Grundgestein (Gneis und Granit) zu.
- Die Mengen-Potenziale für Schlagabraum werden oft überschätzt. Was in Erhebungen ausgesagt wird, kann in der Praxis meistens nicht genutzt werden.

11.4 Trocknung von Waldhackschnitzeln

11.4.1 Ausgangspunkt der Diskussion

Zu Beginn der Diskussion wurde ein Überblick über die Herkunft und die Prozessschritte bei der Bereitstellung von trockenem Waldhackgut gegeben. Das Rohmaterial besteht aus Ästen, Dünnholz, Gesundschnitten sowie minderwertigen Sortimenten und Baumarten. Die Verarbeitung des Rohmaterials zu Hackgut kann entweder im Wald oder auf einem beliebigen Lagerplatz außerhalb des Waldes erfolgen. Bei der Trocknung des Waldhackgutes ist die Trocknung von frischem Material gegenüber der Trocknung von vorgetrocknetem Material zu unterscheiden. Vorgetrocknetes Material bedeutet zwar einen unter Umständen höheren Manipulationsaufwand, dafür ergibt sich eine bessere Lagerfähigkeit, verbunden mit einem reduzierten biologischen Abbau und einem geringeren Gesundheitsrisiko.

Neben den technischen Trocknungsmöglichkeiten - welche aufgrund ihrer Vielfältigkeit und Situationsabhängigkeit aus der Diskussion ausgeklammert wurden - gibt es diverse Möglichkeiten der natürlichen Trocknung: Einerseits die Trocknung durch natürliche Konvektion, in Form von Piles oder als Bodentrocknung auf sauberen Flächen, andererseits die Trocknung durch Selbsterwärmung, unter Akzeptanz eines gewissen biologischen Abbaus.

11.4.2 Welche Erfahrungen gibt es in der Praxis?

Folgende Übersicht zeigt Eckdaten von Erfahrungen mit der Trocknung von Waldhackgut, die Experten aus der Praxis berichteten.

Methode	Lagergestaltung	Hackgut-Beschaffenheit	Verlust von Trockenmasse	Dauer Monate	Wassergehalt nach der Lagerung
Selbsterwärmung	Pile ohne Belüftung	G 20, G30 50 % WG, vorwiegend Pappel	12 – 15 %	2 - 3	Minimum bis 25 % aber sehr unregelmäßig
Gesteuerte Mikrobiologie (Versuche)	Regulierte Belüftung und ohne Belüftung	G50 ca. 40 % WG G20, G30	1 – 2 %	4 - 5	Ergebnis noch offen
				4 - 5	Ergebnis noch offen
Technisch: Containertrocknung	Abwärme Belüftung im Container	45 - 48 % WG	0 %	5 Tage	9 %
Technisch: Trocknungshalle	Abwärme-Belüftung mit doppeltem Boden	45 - 50 %	0 %	3 - 5 Tage	< 20 %

11.4.3 Trocknungsqualität

- Durch Bodentrocknung mit großer Oberfläche kann gute und gleichmäßige Trocknung erzielt werden; Wassergehalte unter 20 % sind möglich.
- Technische Trocknungsverfahren ermöglichen eine gleichmäßige, schnelle Trocknung mit geringen Wassergehalten.
- Trocknung durch Selbsterwärmung ist von der Qualität her eher problematisch, die Trocknung ist sehr unregelmäßig. Es gibt Zonen hoher Feuchtigkeit neben trockeneren Zonen. Das Material muss deshalb vor dem Verheizen oft noch im richtigen Verhältnis abgemischt werden.

11.4.4 Lagerbedingungen

- Verschiedene Hackschnitzelqualitäten müssen nach Möglichkeit getrennt gelagert werden, da eine Durchmischung die biologische Aktivität verstärkt.
- Liegt der Wassergehalt unter 30 – 35 % ist kaum noch mit biologischer Aktivität zu rechnen.
- Grobkörniges Material ab G50 ist besser durchlüftbar und damit resistenter gegen biologischen Abbau, deshalb sollte feuchtes Material gröber gehackt

werden. Grobes Hacken erhöht neben der Durchlüftbarkeit auch die Hackleistung.

- Bei Lagerung im Freien ist eine Abdeckung gegen Regen nur begrenzt wirksam, da Hackgut genauso wie Sägespäne eine Schicht ausbildet (etwa 10 cm). Unterhalb dieser Schicht wird das Hackgut vom Regen ohnehin nicht befeuchtet. Darum hat die Abdeckung nur für die äußere Schicht des Haufens eine Wirkung.

11.4.5 Selbsterwärmung

- Die Erwärmung in Hackschnitzelhaufen ist ein bei allen Heizwerken und Lagerplätzen auftretendes Phänomen. Die Erwärmung beginnt sofort nach der Einlagerung und erreicht nach 1 - 3 Wochen erste Spitzenwerte. Danach stellt sich im Inneren des Haufens eine Pendelbewegung der Temperatur ein.
- Durch die Hitzeempfindlichkeit der Pilze ist bei Pile-Höhen unter 8 Meter (genügende Wärmeabfuhr) eine Spitzentemperatur von rund 75 °C zu erwarten. Die biologische Aktivität geht bei dieser Temperatur zurück und die Wärme kann abgeführt werden. Wenn die Temperatur sinkt, steigt die biologische Aktivität wieder und damit auch die Temperatur (Pendelbewegung).
- Wenn die Haufen höher als ca. 8 Meter gebaut werden, dann entsteht wegen der sich stauenden Wärme die Gefahr der Selbstentzündung. Ungefähr ab einer Temperatur von 95 °C beginnen Verkohlungsprozesse. Mehrere Heizwerke in Österreich hatten bereits Probleme mit Selbstentzündung.
- Besonders anfällig für Selbsterwärmung ist feuchtes Material und Grünmaterial, sowie Rinde. Weiters wird die Erwärmung durch einen hohen Feinanteil, sowie Verdichtung und Durchmischung des Materials begünstigt.

11.4.6 Gesundheitsrisiko

- Die Sporenbildung wird nach ein bis zwei Wochen Lagerungsdauer intensiv, nachdem zum ersten Mal eine Erwärmung und Wiederabkühlung stattgefunden hat.
- Zwischen Korngröße und Sporenbelastung konnte in Versuchen kein Zusammenhang festgestellt werden.
- Wenn starke Sporenbildung auftritt ist es für das Bedienungspersonal nötig Atmungsschutz zu verwenden.

12 Versuchskonzept

Aufgrund der Analyse der Logistikketten, der Literatur und der Erfordernisse der Praxis (hoher Energieholzbedarf für KWK Anlagen) ergeben sich drei interessante Angriffspunkte für die Trocknung von Energieholz.

- Trocknung von Ganzbäumen
- Trocknung von Rundholz
- Trocknung von Schlagabraum

Zu diesen drei Bereichen wurden Versuchskonzepte entwickelt, durch welche die Potenziale bei der Trocknung mit verschiedenen Methoden experimentell ermittelt werden sollen. Die Ergebnisse aus den hier konzipierten Untersuchungen sollen Informationen liefern, die sich einerseits direkt praktisch nutzen lassen, andererseits soll das gewonnene Wissen auch als Grundlage für weitere Verbesserungsschritte in der Lagerung und Trocknung von Energieholz dienen. Die unten angeführten Versuchskonzepte sind als Vorschlag zu sehen, der im Zuge der Durchführung der Versuche zu diskutieren ist. Es besteht nach Bedarf die Möglichkeit Versuchskonzepte abzuändern, andere als die vorgeschlagene Baumarten und Standorte zu untersuchen bzw. Versuchsvarianten zu streichen und andere hinzuzufügen.

12.1 Trocknung von Ganzbäumen

Wie in der Literaturrecherche beschrieben, wurden von Hakkila (1962) umfangreiche Versuche zur Trocknung von Ganzbäumen dokumentiert. Im Gegensatz zu den einigen anderen Aussagen die zur Ganzbaum-Trocknung getroffen wurden (Kaltschnitt & Hartmann 2001, Skaar 1988), fand Hakkila, dass bei Nadelbäumen, insbesondere bei Fichte die größeren Effekte mit Ganzbaum-Trocknung zu erzielen sind, als bei Laubbäumen. Hakkila erläuterte dieses Ergebnis jedoch nicht näher und fand auch keine Begründung dafür. Ein Mangel bei den Versuchen Hakkilas war die Nichtberücksichtigung baumphysiologischer Faktoren und der Trocknungsbedingungen am Lagerplatz. Eine weitere weitgehend offene Frage bei den meisten Dokumentationen über die Ganzbaum-Trocknung ist, wie sich die Lagerung von Ganzbäumen in größeren Stapeln verhält.

Werden Versuche zur Ganzbaum-Trocknung durchgeführt, so sind eine Reihe von Variablen zu berücksichtigen. Dazu gehören baumphysiologische Variable wie Baumart, Alter, Jahreszeit bei der Ernte, Entwicklungszustand (i.e. Kronenzustand, Kern-Splint Verhältnis, Astigkeit, Gesundheit) und soziale Stellung (beherrscht, mitherrschend etc.) der geernteten Bäume. All diese Variablen haben zusammengenommen, wie bereits

besprochen, einen beträchtlichen Einfluss auf den Anfangswassergehalt der Bäume (Kapitel 4). Aus der Praxis wird des weiteren berichtet, dass der Austrocknungseffekt über die Blattmasse nur bis zu Baumdurchmessern von ca. 30 cm wirksam ist (Workshop). Hakkila hingegen fand für Bäume kleinerer Dimension einen gegenteiligen Zusammenhang. Bei der Ganzbaum-Trocknung muss angenommen werden, dass all diese baumphysiologischen Variablen einen Einfluss auf den Trocknungsprozess an sich haben. Beim Schlägerungszeitpunkt trifft dies natürlich besonders auf jene Gehölze zu, welche nur im Sommer Blätter oder Nadeln tragen. Lagerungsdauer und Lagerungsbedingungen wie Markoklima (i.e. Wuchsgebiet, Region, Seehöhe), Mikroklima, (i.e. Topografie, Exposition, Bestandeseinfluss) sowie Anordnung und Gestaltung des Lagers (i.e. Haufengröße, Ausrichtung, Abdeckung) beeinflussen das Ergebnis. Die Lagerungsbedingungen lassen sich im Wesentlichen auf die physikalischen Größen Luftfeuchte, Lufttemperatur, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Sonneneinstrahlung und Strömungsgeschwindigkeit der Luft (resultiert aus Windgeschwindigkeit und Thermik) zurückführen. Die Lagerungsbedingungen dürften für die Ganzbaum-Trocknung in ähnlicher Weise relevant sein, wie für konventionelle Trocknungsmethoden. Allerdings sind auch Abweichungen zu den konventionellen Trocknungsmethoden möglich. Z.B. könnte der Fall auftreten, dass Blätter durch direkte Sonneneinstrahlung ihre Transpirationsfähigkeit schneller verlieren (als z.B. im Halbschatten) und dadurch der Transpirationsprozess vorzeitig unterbrochen wird. Werden Versuche mit Nadelbäumen durchgeführt, so ist besonderes Augenmerk auf das phytosanitäre Risiko zu legen. Aufgrund dieser Ausgangsüberlegungen und offenen Fragen wurde nachfolgendes Versuchskonzept erarbeitet.

12.1.1 Versuchsaufbau im Überblick

In den folgenden Kapiteln wird das Versuchsdesign zur Ganzbaum-Trocknung im Detail dargestellt. Um das Versuchskonzept auf einen Blick zu erfassen, erfolgt jedoch schon am Anfang eine abgekürzte Beschreibung des Ablaufs. Im Versuch werden drei Lagerungsvarianten miteinander verglichen, diese Lagerungsvarianten dienen dazu verschiedene Lagerungsbedingungen bei der Ganzbaum-Trocknung zu untersuchen und Referenzergebnisse mit aufgearbeiteten Bäumen zu erhalten.

Die drei Varianten lauten wie folgt:

- Ganzbäume auf großen Stapeln (schlechte Durchlüftung)
- Ganzbäume auf kleinen Stapeln (gute Durchlüftung)
- Entastete Bäume auf kleinen Stapeln („Nullvariante“ keine Resttranspiration)

Für jede dieser Lagerungsvarianten wird der Trocknungsverlauf über einen Zeitraum von sechs Monaten untersucht. Für die Durchführung der Versuche werden in verschiedenen Gebieten Bestände verschiedener Baumarten ausgewählt um Variationen zwischen Baumarten und geografischen Gebieten zu erfassen. In den ausgewählten Beständen werden nach vorgegebenen Kriterien Bäume für jede Lagervariante ausgewählt und geerntet. Alle drei Lagervarianten werden nach einem vorgegebenen Plan unter gleichmäßigen Bedingungen aus dem Versuchsmaterial aufgebaut. Nach Aufbau der Lagerungsvarianten erfolgt eine Beschreibung des Standortes. Nach einem Probeentnahmeplan, werden zu Beginn des Versuches und während der Dauer von 6 Monaten Proben entnommen, gekennzeichnet, und auf ihren Wassergehalt hin untersucht. Die Wassergehalte der verschiedenen Baumarten, Gebiete, Bestände und Lagerungsvarianten sowie alle anderen relevanten Daten werden während der Versuchsdauer zentral gesammelt und zum Schluss statistisch ausgewertet. Das Ergebnis des Versuches sind Trockenverläufe unter verschiedenen Lagerbedingungen.

In den folgenden Kapiteln wird der Versuchsaufbau Schritt für Schritt in chronologischer Abfolge beschrieben.

12.1.2 Auswahl der Baumarten und Standorte

Grundsätzlich ist es zweckmäßig so viele Baumarten wie möglich in einen Versuch zur Ganzbaum-Trocknung mit einzubinden, da zu erwarten ist, dass der Trocknungseffekt durch Resttranspiration abhängig von den pflanzenphysiologischen Eigenschaften der Baumarten ist. Aufgrund der eingeschränkten Bedingungen bei einer praktischen Durchführung der Versuche wird jedoch die Anzahl der Baumarten eingeschränkt werden müssen. Diese Einschränkung soll sich auf jene Baumarten konzentrieren, welche relevant für die Energieholz-Bereitstellung in naher Zukunft sein können.

Der Standort spielt in zweifacher Hinsicht eine Rolle für die Versuche zur Ganzbaum-Trocknung. Einerseits sind die ausgewählten Baumarten in bestimmten geografischen Gebieten verstärkt angesiedelt und bieten sich dort für Versuche an. Andererseits haben manche Baumarten eine weitläufige geografische Verteilung und unterliegen an dieser Vielzahl von Standorten unterschiedlichen Lagerungsbedingungen. Folgende Baumarten und Standorte werden aufgrund der einleitenden Überlegungen für die Untersuchung vorgeschlagen:

12.1.2.1 Laubhölzer

Buche: Als eine der häufigsten Baumarten in Ost-Österreich, wo in Zukunft auch ein hoher Bedarf an Energieholz entstehen wird, hat die Buche aufgrund ihres Mengenpotentials eine Bedeutung als Energieholz. Welche Mengen und Qualitäten von Buche als Energieholz zum Einsatz kommen werden, wird letztlich der Markt entscheiden.

Aufgrund der geografischen Verbreitung der Buche empfiehlt es sich, die unterschiedlichen Vorkommen eigens zu untersuchen. Als Gebiete werden dazu vorgeschlagen:

- Wienerwald: Buchenreinbestände mit pannonischem Klimaeinfluss unter 500 m Seehöhe, Buchenerstdurchforstung
- Südösterreich: Buche als Mischwaldbaumart in minderer Qualität mit alpinem Klimaeinfluss, 800 - 1000 m Seehöhe

Eiche/Zerreiche: Eiche und insbesondere Zerreiche stellen klassische Holzarten dar, welche häufig in minderen Qualitäten vorkommen und auch in der Vergangenheit oft nur als Brennholz vermarktet werden können. Da die Eiche nach wie vor eine schwache Nachfrage am Schnittholzmarkt erlebt, ist es zu erwarten, dass in Zukunft große Mengen an Eiche der thermischen Verwertung zugeführt werden. Insbesondere sind hierfür die Vorkommen von Zerreiche im Weinviertel interessant, da die Zerreiche noch weniger Verwendung findet, als alle anderen Eichenarten. Als Versuchsgebiete kommen neben dem Weinviertel für Zerreiche auch das Burgenland für andere Eichenarten in Frage, 200 – 400 m Seehöhe.

Hainbuche: Die Hainbuche stellt in Niederwäldern und Mittelwäldern eine Baumart dar, welche entweder als Nebenbaumart oder Hauptbaumart meist in geringen Dimensionen anfällt. Hainbuche die im Stockausschlag vermehrt wird, fällt häufig in geringer Qualität an bzw. findet wenig Einsatz in der Verwertung als Werkstoff. Empfohlener Versuchsstandort: Eichen-Hainbuchen-Wälder im Alpenvorland in NÖ oder OÖ, ca. 300 - 500 m Seehöhe.

Pappel: Die Pappel steht hier stellvertretend für schnellwachsende Pionierbaumarten in Auwäldern. Diese Baumarten können eine wichtige Rolle in der Energieholzversorgung spielen, da sie sich auch für Kurzumtriebsflächen eignen, wobei eine besonders hohe Holzausbeute erzielt werden kann. Dort wo Pappel bisher für die Papier- und Zellstoffindustrie genutzt wurde, können schlechte Qualitäten der Energieholzproduktion zufallen. Der Anbau von Plantagen wird möglicherweise mit erhöhter

Energieholznachfrage einen neuen Stellenwert bekommen. Als Versuchsgebiet für die Ganzbaum-Trocknung werden Auwälder im Donauraum vorgeschlagen.

12.1.2.2 Nadelhölzer

Fichte: Die Fichte ist als die häufigste Baumart Österreichs prädestiniert für den Einsatz als Energieholz. Begünstigend wirkt sich hierbei der hohe Bestand an Rückständen bei der Erstdurchforstung aus. Durch die große Verbreitung der Fichte empfiehlt es sich, bei dieser Baumart eine größere Variation von klimatischen Lagen und Bestandestypen zu untersuchen. Folgende Gebiete wurden zu diesem Zweck ausgewählt:

- Inneralpines Klima, Salzburg oder Tirol
 - 600 - 900 m Seehöhe
 - 1300 - 1700 m Seehöhe
- Voralpenbereich, Waldviertel oder Mühlviertel 800-1000 m Seehöhe
- Südkärnten oder Südsteiermark 800-1000 m Seehöhe

Weißkiefer: Die Weißkiefer hat weite Verbreitung in Österreich, kommt jedoch oft in minderer Qualität vor. In Durchforstungsbeständen ist die Nutzung als Energieholz eine Alternative zum Liegenlassen der Bäume bzw. unter Umständen auch zum Einsatz als Schleif- und Faserholz. Der nutzbare Durchmesser kann nach unten verschoben werden. Trotz der weiten Verbreitung in Österreich wird aufgrund der mengenmäßig geringen Bedeutung für die Ganzbaum-Trocknung nur die Untersuchung eines Wuchsgebietes vorgeschlagen. In Frage kommen z.B. Dolomit – Kiefernwälder, in den nördlichen Kalkalpen.

Schwarzkiefer: Eine weitere interessante Kiefernart ist die Schwarzkiefer, diese Baumart ist in bestimmten Gebieten in Niederösterreich als Hauptbaumart künstlich angesiedelt und ist häufig durch Harzlachen entwertet. Diese Bäume sind grundsätzlich auch für den Einsatz als Energieholz geeignet. Die Schwarzkiefer hat ein konzentriertes Vorkommen im Steinfeld in Niederösterreich; diese Bestände bieten sich als Versuchsbestände für die Ganzbaum-Trocknung an.

Lärche: Ob die Lärche für eine Ganzbaum-Trocknung im Zuge von Energieholznutzungen in Frage kommt, hängt in erster Linie von der phytosanitären Frage ab, da der Effekte der Resttranspiration bei dieser Baumart nur im Sommer auftreten kann. In jedem Fall muss für eine längere Lagerung der Lärchenganzbäume im benadelten Zustand ein Lagerplatz mit einem Mindestabstand zum Bestand vorgesehen sein.

12.1.3 Auswahl der Schlägerungszeitpunkte

Nach der Festlegung, welche Baumarten auf welchen Standorten untersucht werden sollen, ist die nächste wesentliche Frage, zu welchen Zeitpunkten die Versuche gestartet werden. Diese sind gleichzeitig die Schlägerungszeitpunkte für das Probenmaterial. Um die jahreszeitlich unterschiedlichen Trocknungsbedingungen in die Versuche mit einfließen zu lassen, wird es sinnvoll sein, mehrere Schlägerungszeitpunkte über das Jahr verteilt auszuwählen. Die Wahl der Schlägerungszeitpunkte wird bei der Ganzbaum-Trocknung in starker Abhängigkeit zur Baumart stehen, insbesondere aufgrund des Belaubungszustandes und des phytosanitären Risikos.

Für **Nadelholz** werden zwei Startpunkte für Versuche im Herbst/Winter vorgeschlagen. Beide Zeitpunkte liegen außerhalb der Befallszeit von Käferschädlingen und erlauben eine gewisse Zeit der Vorlagerung bis zum Frühjahr, sodass die Attraktivität für den Käfer möglicherweise abgeschwächt ist. Jonas (1984 B) schreibt dazu: „Es sollte aber möglich sein, bei einem wesentlich früheren Fällungszeitpunkt (*als Anfang April*) im Spätherbst oder Frühwinter den Wettlauf mit dem Käfer zu gewinnen“.

Aufgrund dieser Überlegungen werden als Schlägerungszeitpunkte für Nadelholz (ausgenommen Lärche) Oktober/November und Jänner/Februar vorgeschlagen. Versuche im Sommer können nur dort empfohlen werden, wo die Möglichkeit besteht Lagerplätze außerhalb des Waldes (Mindestabstand 50 m, ideal 150 m) zu nutzen.

Für das wintergeschlägerte Nadelholz ist ab Anfang März besonderes Augenmerk auf den Zustand der Bäume in Hinblick auf die Borkenkäfer bzw. Kupferstecher-Gefahr zu legen.

Für **Laubholz** ist die Frage nach dem Schlägerungszeitpunkt in erster Linie eine Frage nach der Belaubung. Um verschiedene Bedingungen zu berücksichtigen, werden drei Zeitpunkte im Sommer vorgeschlagen: (1) nach dem Austrieb in voller Belaubung Mai/Juni, (2) im Hochsommer Juli/August, (3) im Spätsommer September/Oktober.

12.1.4 Auswahl der Versuchsbestände

Nach der Entscheidung, welche Baumarten, auf welchen Standorten, zu welcher Zeit definitiv untersucht werden sollen, sind konkrete Versuchsbestände auszuwählen. Unabhängig von Baumart und Standort sind dabei folgende Dinge zu beachten: Ein Versuchsbestand sollte möglichst homogen sein. Am besten sind Bestände in denen die zu untersuchende Baumart im Reinbestand oder als Hauptbaumart vorkommt. Weiters sollte der Bestand möglichst homogen in Hinblick auf Durchmesser, Alter der Bäume,

Gesundheitszustand und Wasserversorgung sein. Es sollte im Versuchsbestand einfach sein, eine ausreichende Menge vergleichbare Bäume auszuzeigen, zu ernten und auf einen geeigneten Lagerplatz zu bringen. Die Vergleichbarkeit der Bäume, die später aus dem Bestand ausgewählt werden, sollte in Hinblick auf Durchmesser, Höhe, Wasserversorgung, Kronenzustand und soziale Stellung gegeben sein. Durch diese Vergleichbarkeit soll die Auswahl repräsentativer Baumgruppen zur Probeentnahme erleichtert werden. Dies ist anzustreben, um alle Nebeneffekte - die sich auf den Wassergehalt auswirken könnten - möglichst klein zu halten. Als Versuchsbestände werden Erstdurchforstungsbestände vorgeschlagen, wobei es auch möglich ist zusätzliche Varianten mit älteren Beständen zu untersuchen (siehe Kap. 12.1.6).

12.1.5 Dokumentation des Mikroklimas am Lagerplatz

In Bezug auf die mikroklimatischen Verhältnisse ist bereits **bei der Auswahl des Lagerplatzes** darauf zu achten, dass am gesamten Lagerplatz etwa gleiche Verhältnisse herrschen. Stapel sollten sich nicht gegenseitig die Wind- oder Sonnenzugänglichkeit versperren. Unterschiede von Exposition, Hangneigung, Bodenbeschaffenheit, Abschattung, Windzugänglichkeit und dergleichen sind möglichst zu vermeiden und gegebenenfalls zu dokumentieren. Grundsätzlich ist es für den Versuch von Vorteil unterschiedliche Lageplätze zu untersuchen, eine all zu große Abweichung von optimalen Bedingungen (sonnig und windig) ist jedoch nicht sinnvoll. Allein aufgrund der natürlichen Gegebenheiten ist schon eine Variation der Versuchsbedingungen zu erwarten, welche am Ende Aussagen über die Trocknung unter verschiedenen Bedingungen zulassen sollte.

Im Zuge des Versuchs sind Mikroklima, Topografie und Exposition des Lagerplatzes in Form einer klassischen Bestandesbeschreibung zu dokumentieren. Konkret beschrieben werden sollen Oberbestand, Sonnenscheindauer (wenn diese von der Geländeform oder Vegetation beeinflusst wird), Überschattungsgrad, Bodenbeschaffenheit, Hauptwindrichtung, Windzugänglichkeit, Hangexposition, und Topografische Lage (Unterhang, Oberhang, Kuppe, Mulde, etc.).

12.1.6 Auszeige und Aufbau der Versuchsstapel

Zur Durchführung der drei Varianten (kleiner Stapel, großer Stapel, entastete Bäume) werden je Variante sieben Gruppen zu je zehn Bäumen benötigt. Zusätzlich wird nochmals die gleiche Menge (ca. 200 Bäume) als „Füllmaterial“ für die Variante „großer Stapel“ benötigt. Bei der Auswahl der Stämme ist wie folgt vorzugehen:

Vom Versuchsbestand werden etwa rund 400 Stämme ausgezeigt. Bereits bei der Auszeige sind möglichst gleiche Gruppen (in Hinblick auf Durchmesser, Höhe, Wasserversorgung, Kronenzustand und soziale Stellung) zu je zehn Bäumen zu bilden. Die Auszeige der restlichen Bäume („Füllmaterial“) erfolgt in beliebiger Weise. Die Zehnergruppen sind bei der Auszeige mit den Bezeichnungen so zu markieren, dass die Markierung nach Fällen und Rücken noch sichtbar ist. Jeder Baum soll am Ende zu einer der Zehner-Gruppen oder zu den restlichen rund 200 Bäumen eindeutig zuordenbar sein.

Die Bäume werden nach der Auszeige gefällt und getrennt nach Gruppen abgelegt. Für die Variante „Entastete Bäume“ werden gleich nach dem Fällen sieben Zehner-Gruppen entastet.

Im Anschluss an Fällen und Entasten werden die Bäume auf einen Lagerplatz mit gleichmäßigen Bedingungen gebracht (nähere Details zur Auswahl des Lagerplatzes sind im Kapitel 12.1.5 beschrieben). Zur Bestimmung des Anfangswassergehaltes wird am Lagerplatz für jede Variante sofort eine Zehnergruppe zum Hacken beiseite gelegt. Die anderen Zehnergruppen werden in drei Varianten für sechs Probenahmezeitpunkte (siehe Kap. 12.1.6) in folgender Weise gestapelt:

Variante I: Ganzbäume auf großen Stapeln (schlechte Durchlüftungsverhältnisse)

Sechs Zehnergruppen Ganzbäume (G1 - G6) werden jeweils zu Bündeln gebunden, sichtbar markiert und auf einen großen Stapel, umgeben von rund 200 Ganzbäumen Füllmaterial gelegt. Durch die Lagerung der Probestämme in einem großen Haufen, der sich durch das Eigengewicht verdichtet, entstehen schlechte Belüftungsverhältnisse.

Variante II: Ganzbäume auf kleinen Stapeln (gute Durchlüftungsverhältnisse)

Sechs Zehnergruppen Ganzbäume (K1 - K6) werden auf sechs kleine lockere Stapel gelegt. Durch die Lagerung auf kleinen Stapeln sollen gute Belüftungsverhältnisse herbeigeführt werden.

Variante III: Entastete Bäume auf kleinen Stapeln („Nullvariante“, ohne Resttranspiration)

Um den Effekt der Resttranspiration direkt messbar zu machen, werden neben den ersten beiden Varianten der Ganzbaum-Trocknung eine „Nullvariante“ durchgeführt. Sechs Zehnergruppen entastete Bäume (E1 - E6) werden dabei auf sechs kleine Stapel abgelegt. Die übrigen Bedingungen sollten dabei möglichst gleich gehalten werden, wie bei Variante 1 und Variante 2. Abbildungen 29 – 31 zeigen die Anordnung der Stapel.

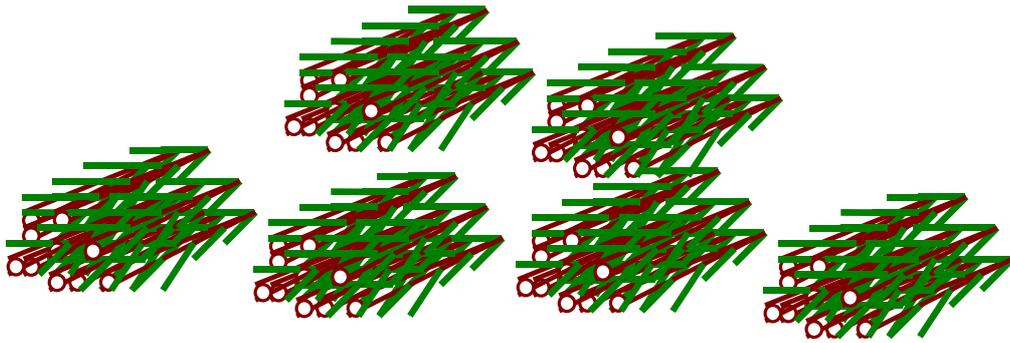


Abbildung 29: Variante 1 - sechs Zehnergruppen Ganzbäume

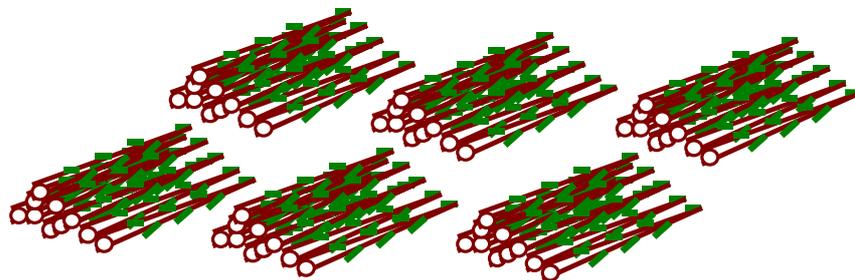


Abbildung 30: Variante 2 - sechs Zehnergruppen entastete Bäume

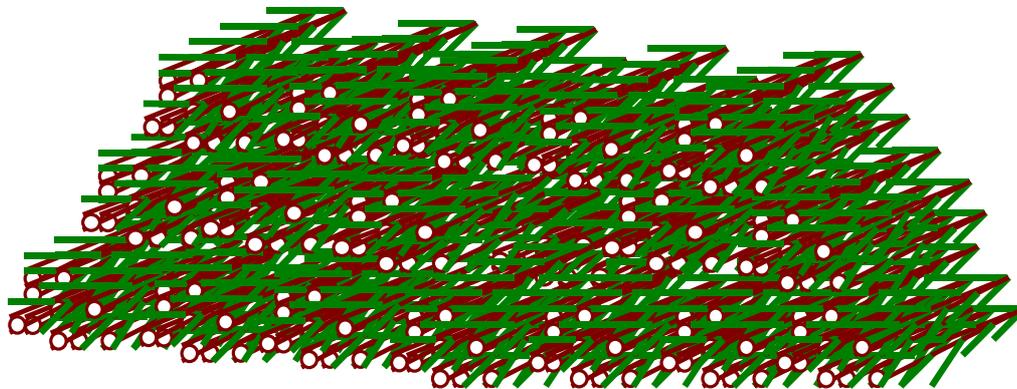


Abbildung 31: Variante 3 - sechs Zehnergruppen Ganzbäume in großem Stapel

Alle Stapel sollen bodenfrei ausgeführt werden; dazu können Querhölzer verwendet werden, die am Boden liegen.

Mögliche weitere Versuchsvarianten:

- Abdeckung der Stapel mit Spezialpapier (interessant während Winter und Herbst, zum Schutz vor Niederschlägen)

- Unterlegen mit Spezialpapier oder Plastikplane (zum Schutz vor aufsteigender Bodenfeuchtigkeit)
- Verbesserung der Luftdurchlässigkeit großer Stapel im Kronenbereich: Einlegen von „Querbäumen“ (Versuche an Weiden in Finnland haben ergeben, dass der Trocknungsfortschritt im Kronenbereich langsamer verläuft (Nurmi, Hytönen 1994).
- Variation der Baumgrößen: neben einer Baumgröße aus Beständen der Erstdurchforstung mit Mittendurchmessern von ca. 10 cm ist es auch interessant Versuche in älteren Beständen durchzuführen, z.B. mit Mittendurchmessern von rund 20 cm. Dafür wären z.B. Schadbestände geeignet, welche keine Nutzung zu sonstigen Zwecken zulassen.

12.1.7 Kennzeichnung der Versuchsstapel

Die kleinen lockeren Stapel bzw. die Zehnergruppen (Bündel) im großen verdichteten Stapel sind mit Nummern von 0 bis 6 zu kennzeichnen. Diese Kennzeichnung dient zur Wiedererkennung bei der Proben-Entnahme. Die Nummern 0 bis 6 stehen für die Zeitpunkte der Proben-Entnahme (siehe Kapitel 12.1.8 und Tabelle 15). Zusätzlich zur Nummerierung mit 0 bis 6 wird den Stapeln ein Buchstabe für die Lagerungsvariante zugeordnet. E steht für Entastet, K für kleine Stapel und G für große Stapel. Tabelle 15 stellt die Codes dar die sich daraus ergeben.

Tabelle 15: Codes zur Kennzeichnung de Probenmatriels

Zeitpunkte der Proben-Entnahme	Lager-Variante		
	Große Stapel	kleine Stapel	Entastet (Nullvariante)
Woche 0	G0	K0	E0
Woche 0 und 1	G1	K1	E1
Woche 0 und 2	G2	K2	E2
Woche 0 und 4	G3	K3	E3
Woche 0 und 9	G4	K4	E4
Woche 0 und 18	G5	K5	E5
Woche 0 und 26	G6	K6	E6

12.1.8 Festlegung der Zeitpunkte für die Probenentnahmen

Durch die Probenentnahme soll der Trocknungsverlauf der gesamten geernteten Menge unter den drei verschiedenen Lagerungsvarianten abgebildet werden. Dabei wird einerseits der Wassergehalt der ganzen Bäume ermittelt und andererseits der Wassergehalt des Stammholzes. Diese Vorgehensweise dient dazu, um den Wassergehalt unabhängig von natürlichen Schwankungen des Grünanteils der Bäume nur am Stammholz zu messen. Die Gruppen G0, K0 und E0 (siehe Tabelle 15) werden deshalb unmittelbar nach der Ernte gehackt und der Wassergehalt wird bestimmt (genaue Vorgehensweise siehe Kapitel 12.1.9). Diese Wassergehalte gelten als Anfangswassergehalt inklusive Grünanteil für die drei Varianten. Für die Ermittlung des Trocknungsverlaufes werden die restlichen sechs Zehnergruppen verwendet. Dazu wird für sechs Zeitpunkte im Trocknungsverlauf je eine Zehnergruppe pro Trocknungsvariante als Probe herangezogen. Diese Probe repräsentiert den Wassergehalt der gesamten Lagervariante zum gegebenen Zeitpunkt. Diese Vorgehensweise wird deshalb gewählt, weil die Bäume bei der Probenentnahme zerstört werden (siehe auch Kapitel 12.1.9). Dies bedeutet bei der Ganzbaum-Trocknung einen Eingriff in den Transpirationsprozess und somit eine Änderung der Trocknungsbedingung. Deshalb muss für die Ermittlung des Wassergehaltes zu einem bestimmten Zeitpunkt immer neues Probenmaterial zur Verfügung stehen.

Aus jeder der sechs Zehnergruppen werden zu zwei Zeitpunkten Proben entnommen:

- **Erste Probenentnahme:** Sofort nach dem Fällen. Aus diesen Proben wird der Anfangswassergehalt getrennt für jede Zehnergruppe ermittelt. Später wird aus diesen Wassergehalten der Wassergehalt der gesamten Menge arithmetisch gemittelt. Die getrennte Bestimmung des Wassergehaltes für jede Zehnergruppe ist deshalb nötig, um die Mittelwertabweichungen jeder Zehnergruppe zu kennen und rechnerisch ausgleichen zu können.
- **Zweite Probenentnahme:** Zu einem späteren Zeitpunkt, z.B. Woche 4. Für diese Beprobung ist zu jedem der 6 Zeitpunkte im Trocknungsverlauf eine Zehnergruppe als Probenmaterial bereitgestellt. Die entsprechende Zehnergruppe wird zu dem vorgesehenen Zeitpunkt beprobt und auf ihren Wassergehalt untersucht. Zusammen mit dem Anfangswassergehalt derselben Probe und dem Mittelwert der Anfangswassergehalte kann daraus der Wassergehalt der gesamten Trocknungsvariante zum entsprechenden Zeitpunkt ermittelt werden.

Beispiel: Für die Variante „Großer Stapel“ wird zum Zeitpunkt W4 (Ende der vierten Woche) das Bündel G3 entnommen und zum zweiten Mal beprobt. Der Wassergehalt des Bündels G3 steht nach einer rechnerischen Korrektur stellvertretend für den Wassergehalt der Variante „Großer Stapel“ in der vierten Woche.

12.1.9 Vorgehensweise bei der Probenentnahme

12.1.9.1 Stammholz

Die Probenentnahme erfolgt **bei der ersten Probe** (nach dem Aufbau der Stapel) durch Abschneiden eines ca. 20 cm langen Stammteiles (von der Seite des Fällschnittes aus gemessen) von allen Bäumen einer Zehnergruppe. Für die Probe selbst gibt es zwei Möglichkeiten, je nach technischer Ausrüstung:

- Einsammeln der Sägespäne beim Abtrennen des Stammteiles (mit einer dazu geeigneten Motorsäge; -> Vorgaben des FPP bei der Gewichtsübernahme)
- Abschneiden einer 2 cm starken Stammscheibe (auch hier sollen vorher 20 cm vom Stammende her abgeschnitten werden)

Bei der Probenentnahme ist in jedem Fall eine gut geschärfte Motorsäge zu verwenden!

Für jede Zehnergruppe wird die Probe getrennt abgepackt, gekennzeichnet und bezüglich Wassergehalt überprüft (Protokoll).

Die **zweite Probe** wird für jeden Stapel/Bündel zu dem festgelegtem Zeitpunkt gezogen. Diese Probenahme wird wie folgt durchgeführt: Die Bäume der gesamten Zehnergruppe werden in gleicher Weise wie bei der ersten Probenahme, jedoch 50 cm vom Stammende entfernt beprobt und auf ihren Wassergehalt untersucht.

Der Kronenzustand wird bei jeder Probenahme fotografisch dokumentiert (Veränderungen dokumentieren).

12.1.9.2 Ganzbaum inklusive Grünmaterial

Diese Vorgehensweise gilt für alle Zehnergruppen. Für die Gruppen G0, K0 und E0 (siehe Tabelle 15) unmittelbar nach der Ernte und für die anderen Zehnergruppen unmittelbar nach der zweiten Proben-Entnahme am Stammholz.

Um nicht nur das Stammholz, sondern auch das Ast- und Grünmaterial auf den Wassergehalt zu untersuchen, wird die ganze Zehnergruppe gehackt, das Hackmaterial

gut durchmischt und davon eine ca. 10 l große Menge entnommen. Von dieser Menge ist nach Reduktion der Probenmenge der Wassergehalt zu bestimmen.

12.2 Trocknung von Rundholz

12.2.1 Versuchsaufbau für die Rundholztrocknung im Überblick

Zur Beantwortung der in Zusammenhang mit der Literaturstudie und des Workshops aufgetretenen Fragestellungen, wird in den Versuchen eine Doppelstrategie vorgeschlagen:

Ein Teil der **Rundholz-Polterversuche** wird **im Wald** oder Waldnähe durchgeführt. Diese Rundholz-Polter im Wald werden nur einmal aufgebaut und am Anfang sowie am Ende des Versuchs beprobt. Die Trocknungsdauer beträgt 6 Monate bzw. 12 Monate für Lagerung über den Winter. Das Ziel dieser Versuche ist es, den Einfluss mikro- und makroklimatischer Faktoren auf die Trocknung zu quantifizieren. Ähnlich wie bei den Versuchen zur Ganzbaum-Trocknung sollen dabei Versuche in Regionen verschiedener klimatischer Ausprägung und auf unterschiedlichen Lokalstandorten (Kuppen, Oberhänge, ect.) durchgeführt werden. Bei den Nadelhölzern soll das phytosanitäre Risiko im Zuge der Trocknung mitbeachtet werden. Bei der Beprobung der Polter werden die Polter in verschiedene räumliche Bereiche unterteilt. Dadurch sollen innerhalb des Polters voneinander abweichende Trocknungsverhältnisse erfasst werden.

Der zweite Teil der **Rundholz-Polterversuche** wird **auf Rundholz-Lagerplätzen** von Industriebetrieben durchgeführt, welche über gute Möglichkeiten zur Rundholzmanipulation und zur Probenentnahme bieten. Das Ziel dieser Versuche ist es, den Einfluss verschiedener Aufbauvarianten auf die Trocknung zu ermitteln. Die untersuchten Varianten unterscheiden sich hinsichtlich Polterformen- und Größen, Exposition der Polter gegenüber Wind und Sonne, sowie verschiedener Formen der Abdeckung. Im Zuge dieser Versuche sollen nicht nur Anfangs- und Endwassergehalt ermittelt werden, sondern auch der Trocknungsverlauf während des ganzen Versuchs. Die Polter werden zur Probenentnahme während des Versuchs mehrmals partiell abgebaut und wieder aufgebaut. Es werden während des gesamten Trocknungsverlaufes auch die Randbereiche genauer untersucht. Ziel ist es, Trocknungsunterschiede zwischen Kern und Rand des Polters zu ermitteln.

Das doppelte Vorgehen bei den Versuchen (Versuche im Wald und Versuche auf Lagerplätzen) wird aus folgenden Gründen angestrebt: Die aufwändigeren Versuche bei denen unter größerem Aufwand wiederholt Proben entnommen werden, können unter

erleichterten Bedingungen mit Zuhilfenahme von bereitstehenden Maschinen durchgeführt werden. Im Wald dagegen, wo erschwerte Bedingungen herrschen, wird mit einem einfachen Probeschema mit **einer einheitlichen Polterform** und **einheitlicher Ausrichtung** der Polters gearbeitet. Die Untersuchung im Wald beschränkt sich auf jene Fragestellungen, die nur durch Versuche im Wald beantwortet werden können.

Ergebnisse aus diesen Untersuchungen sollen Informationen liefern, die sich einerseits direkt praktisch nutzen lassen, andererseits soll das gewonnene Wissen auch als Grundlage für weitere Verbesserungsschritte in der Lagerung und Trocknung von Energieholz dienen.

In den folgenden Kapiteln werden die Versuche im Detail erklärt. Zuerst die Versuche im Wald und dann die Versuche am Rundholz-Lagerplatz. Bevor auf diese Bereiche eingegangen wird, gilt es noch die Frage zu klären, welche Baumarten untersucht werden sollen.

12.2.2 Auswahl der Baumarten und Standorte

Für die Auswahl der Baumarten gelten bei den Versuchen zur Rundholz-Poltertrocknung die selben Überlegungen wie für die Ganzbaum-Trocknung. Die Rundholz-Poltertrocknung besitzt nach bisherigem Wissen keine Vorteile, die sich nur bei bestimmten Baumarten auswirken. Basierend auf den Überlegungen aus Kapitel 12.1.2, wird für die Versuche zur Rundholz-Poltertrocknung sowohl im Wald, als auch am Lagerplatz eine pragmatische Auswahl von Baumarten vorgeschlagen:

Brennholz weich: Fichte, Kiefer, Lärche, Pappel

Brennholz hart: Eiche, Buche, Hainbuche

In jedem Polter sollen nur Stämme von jeweils einer Baumart verwendet werden, damit baumartenspezifische Unterschiede im Versuch erfasst werden können.

12.2.3 Durchführung der Versuche im Wald

Die **Auswahl der Standorte** für die Poltertrocknung im Wald richtet sich nach den gleichen Kriterien wie bei der Ganzbaum-Trocknung. Dementsprechend werden für die Poltertrocknung auch die gleiche Versuchsregionen wie in Kapitel 12.1.2 vorgeschlagen.

Die **zeitliche Verteilung der Versuche** übers Jahr sollte gleichmäßig sein, um die wechselnden jahreszeitlichen Bedingungen und ihren Einfluss auf die Trocknung zu

erfassen. Eine Unterteilung des Jahres in zweimonatige Abschnitte wird vorgeschlagen. Start-Zeitpunkte für Versuche zur Polter-Trocknung wären demnach innerhalb der Zeiträume Jänner/Februar, März/April, Mai/Juni, Juli/August, September/Oktober und November/Dezember.

Versuche die im Sommer, später als Anfang August, begonnen werden sollen mit einer Versuchsdauer von 12 Monaten über den Winter fortgesetzt werden. Die Lagerungsdauer für die Versuche mit Beginn von Jänner bis Juli wäre 6 Monate, von August bis Dezember 12 Monate.

Die **Auswahl der Versuchsbestände** unterliegt für die Poltertrocknung keinen besonderen Kriterien, ausgenommen davon, dass von der zu untersuchenden Baumart genügend Individuen im Bestand zur Verfügung stehen müssen, um die Versuchspolter aufzubauen.

Das **Mikroklima** am Lagerplatz sollte gleich wie beim Versuch zur Ganzbaum-Trocknung gleichmäßig sein und sich im Rahmen der vorhandenen Möglichkeiten im optimalen bzw. sub-optimalen Bereich bewegen. Variationen können dabei sinnvoll sein: z.B. ein Polter auf der Kuppe eines Hügels, ein Polter unterhalb der Kuppe am Oberhang.

Die **Auswahl und Ernte des Versuchsmaterials** soll so erfolgen, dass für den jeweiligen Versuchspolter jeweils eine ausreichende Menge an Rundholz zur Verfügung steht (als Anhaltspunkt können ca. 150 m³ je Polter gelten).

Folgende **Varianten von Poltern** sollen errichtet werden:

- Polter aus dünnem Holz, Mittendurchmesser ca. 10 cm
- Polter aus stärkerem Holz, Mittendurchmesser ca. 20 cm oder auch > 20 cm

Ausführung der Polter: Die Höhe soll maximiert werden, d.h. mit Rücksicht auf die technischen Möglichkeiten und die Arbeitssicherheit sollen die Polter so hoch wie möglich errichtet werden. Als Richtwert gilt dabei eine Höhe von vier bis fünf Meter. Nach jedem Meter soll eine Lage von Querhölzern zur besseren Durchlüftung eingelegt werden. Die Länge der Polter soll mindestens 4 m betragen und die Breite sollte das Doppelte der Höhe nicht unterschreiten. Alle Polter sollen mindestens dreißig Zentimeter Bodenfreiheit haben. Die Ausrichtung der Polter soll **parallel zur Hauptwindrichtung** erfolgen. Diese Poltereigenschaften sollen möglichst durchgängig eingehalten werden, um auf den verschiedenen Standorten vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Im Zuge des Aufbaus der Polter sind die Probestämme auszuwählen, zu markieren und zu beproben. Das genaue

Schema der Probenentnahme ist bei den Versuchen am Rundholz-Lagerplatz unter „Sample A“ beschrieben (Kapitel 12.2.4.4).

12.2.4 Durchführung der Versuche am Rundholzlagerplatz

12.2.4.1 Gestaltung der Polter

Die Gestaltung der Polter lässt vielseitige Möglichkeiten offen. Am vielversprechendsten sind jene, die eine gute Durchlüftung ermöglichen. Die Durchlüftung des Materials ist über zwei Eigenschaften definiert: einerseits die Luftdurchlässigkeit, andererseits durch das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Die Luftdurchlässigkeit ist durch die Stärke der gelagerten Stämme und durch die Dichte der Stapelung beeinflusst. Die Dichte der Stapelung kann vor allem durch einlegen von Zwischenlagen beeinflusst werden, wie es bereits bei den Versuchen im Wald beschrieben wurde. Die Stärke der gelagerten Stämme ist in der Praxis ein Merkmal das nicht verändert werden kann. Man kann darauf höchstens reagieren, indem man bei geringerer Stammstärke eine größerer Zahl von Querlagen einfügt. Das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen ist durch Form und Größe des Polters bestimmt. Je kompakter die Form, um so kleiner die Oberfläche im Vergleich zum Volumen. Bildet sich ein Randbereich aus, in welchem eine schnellere Trocknung stattfindet, dann wird der Einfluss dieses Randbereiches immer größer, je kleiner das Volumen des Polters ist. Um diese Zusammenhänge zu untersuchen werden zwei Polterformen in verschiedenen Größen untersucht.

Trapezpolter: Die Stämme werden parallel zueinander gestapelt. Die Form des Polters ist einer Trapezform angenähert. Die Länge der Stämme soll mindestens vier Meter betragen. Die Höhe wird in zwei Varianten ausgeführt: einmal ca. 5 m, einmal ca. 2 m. Die Breite der Polter soll so groß sein, dass die Oberhöhe von 5 Metern ohne seitliche Stützen erreicht werden kann. Die Stammstärke soll, so wie bei den Versuchen im Wald, kleiner oder größer als 20 cm sein. Als Mittendurchmesser für die kleineren Stämme soll ca. 10 cm betragen.

Kreuzpolter: Zwischen den Lagen werden in unterschiedlichen Abständen Querhölzer eingelegt. Die Form des Polters ist auch hier mehr oder weniger trapezförmig. Gleich wie beim Trapezpolter werden Polterhöhe, Polterbreite und Länge sowie Durchmesser der Stämme im Polter gestaltet.

Die Dichte der Querlagen in den Kreuzpoltern beträgt grundsätzlich eine Querlage je Meter Polterhöhe. D.h. für 5,5 m hohe Polter fünf Querlagen, für 2 m hohe Polter eine

Querlage. Zusätzlich zu diesem Grundaufbau wird die Dichte der Querlagen für ein oder mehrere Baumarten variiert. Folgende Varianten werden vorgeschlagen:

- Baumart Fichte, Stammdurchmesser < 20 cm, Polterhöhe 5,5 m, eine Querlage je 2 m Polterhöhe (d.h. zwei Querlagen)
- Baumart Fichte, Stammdurchmesser < 20cm, Polterhöhe 5,5 m, eine Querlager je 0,5 m Polterhöhe (d.h. zehn Querlagen)

12.2.4.2 Exposition der Polter nach Windrichtung und Sonneinstrahlung

Grundsätzlich werden alle Polter so aufgestellt, dass die Ausrichtung der Stämme in etwa parallel zur Hauptwindrichtung steht. Die Hypothese lautet, dass dies die optimale Aufstellung der Polter ist. Um den Einfluss von Abweichungen von diesem Optimum zu ermitteln, werden einige Polter in abweichenden Ausrichtungen aufgestellt. Folgende Varianten werden dazu vorgeschlagen:

- Kreuzpolter, Nadelholz mit Stammausrichtung senkrecht zur Hauptwindrichtung, Höhe 5,5 m, Stammdurchmesser < 20 cm
- Kreuzpolter, Laubholz mit Stammausrichtung senkrecht zur Hauptwindrichtung, Höhe 5,5 m, Stammdurchmesser < 20 cm
- Trapezpolter, Nadelholz mit Stammausrichtung senkrecht zur Hauptwindrichtung, Höhe 5,5 m, Stammdurchmesser < 20 cm

Weitere Varianten sollen darüber Aufschluss geben, welchen Einfluss die Sonnenbestrahlung der Schnittflächen hat. Je nach Ausrichtung der Polter in Bezug zu den Himmelsrichtungen, werden die Schnittflächen und natürlich auch die Rinde der Stämme unterschiedlich von der Sonne bestrahlt. Als Versuchsbaumart für diese Variante wird ein Laubbaumart und ein Nadelholzbaumart vorgeschlagen. Folgende Varianten werden aus diesen Überlegungen heraus vorgeschlagen.

- Kreuzpolter, je eine Laubholz- und eine Nadelholzbaumart, Stammdurchmesser < 20 cm, Polter werden zusätzlich zu den sonstigen Versuchen jeweils in zwei Expositionen aufgebaut; die Schnittflächen zeigen nach:Nord/Süd bzw.Ost/West

12.2.4.3 Abdeckung und Abschattung der Polter

Die Poltervariante Kreuzpolter, 2m Höhe, Stammdurchmesser < 20 cm wird für alle Baumarten einmal abgedeckt und einmal ohne Abdeckung aufgebaut. Die Abdeckung erfolgt mit Spezialpapier.

Als Referenz zu den grundsätzlich in der Sonne gelagerten Poltern werden einige Polter abgeschattet (jedoch nicht abgedeckt), dies kann z.B. mit Stoffplanen geschehen, durch aufstellen eines kleinen Polters im Schatten eines großen Polters, an der Nordseite eines Gebäudes, o.ä.

12.2.4.4 Schema der Probenentnahme

Die folgende Beschreibung der Probenentnahme gilt für alle Versuche der Poltertrocknung, sowohl im Wald, als auch am Lagerplatz.

Die Probenentnahme erfolgt grundsätzlich nach dem Prinzip der Zeitreihe. Jeder beprobte Stamm wird markiert und mehrmals beprobt. Das ausgewählte Sample ist in zwei Gruppen unterteilt – Sample A und Sample B.

Sample A

Sample A wird bei allen Poltern entnommen, es liefert die Hauptaussage für den Versuch. Die Fragestellung lautet: Wie weit sinkt der Wassergehalt in Holzpoltern verschiedenen Aufbaus innerhalb des Zeitraumes von 6 bzw. 12 Monaten?

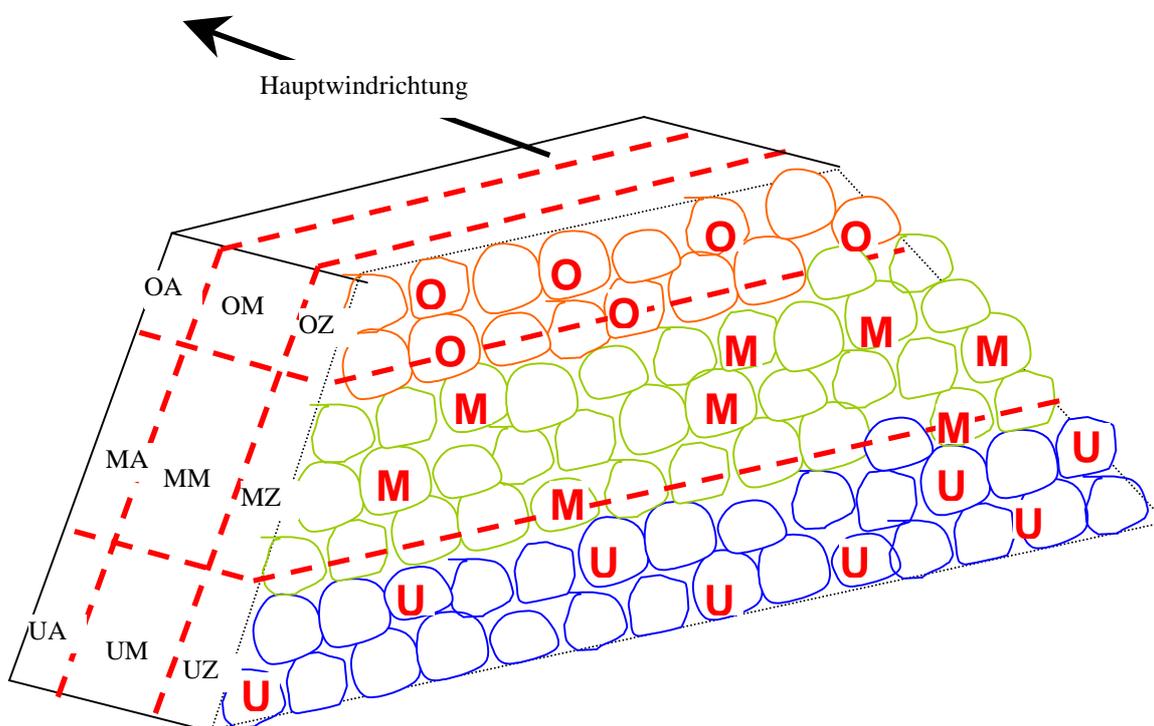


Abbildung 32: Unterteilung des Polters für Subsample A mit den neun Bereiche aus denen Proben gezogen werden (Kurzbezeichnungen vgl. Tabelle 16).

Sample A wird am Anfang und am Ende des Lagerungszeitraumes gezogen. Die Auswahl der Stämme für Sample A erfolgt zufällig. Das Ziel ist es, den gesamten Polter zu repräsentieren. Der Polter wird in neun räumliche Bereiche unterteilt, welche jeweils durch eine Mischprobe repräsentiert werden. Die Unterteilung in neun Bereiche geschieht wie in Abbildung 32 dargestellt. Nach der Höhe wird der Polter in drei Schichten unterteilt (oben, mitte, unten) und in Bezug auf die Länge auf drei Abschnitte: „Windzugewandt“, „Mitte“, „Windabgewandt“.

Tabelle 16 stellt die die neun Bereiche im Polter tabellarisch dar und weist jedem Bereich eine Kurzbezeichnung zu: z.B. oberes Drittel, windabgewandt wird mit „OA“ gekennzeichnet; diese Bezeichnungen sind auch in Abbildung 32 eingefügt.

Tabelle16: Kurzbezeichnungen der neun räumlichen Bereiche des Versuchspolters (vgl. Abbildung 32)

	Windzugewandt	Mitte	Windabgewandt
Oberes Drittel	OZ	OM	OA
Mittleres Drittel	MZ	MM	MA
Unters Drittel	ZU	UM	UA

Die Probenentnahme in den dargestellten neun Bereichen erfolgt nach folgender Vorgehensweise. Im Zuge des Aufbaus des Polters wird zufällig eine repräsentative Anzahl von Stämmen ausgewählt und je nach Lage im Polter mit „U“, „M“ oder „O“ markiert, (für „Unten“ „Mitte“ oder „Oben“). An den ausgewählten Stämmen werden mit der Motorsäge drei Schnitte vorgenommen, bevor sie auf den Polter gelegt werden. Die drei Schnitte repräsentieren die drei Längsabschnitte des Polters. Die Schnitte am Rand (windzugewandte und windabgewandte Seite) erfolgen in den äußeren 50 cm des Stammes. Ein Schnitt im mittleren Stammteil repräsentiert den Mittelteil des Polters. Abbildung 33 zeigt die Anordnung der Schnitte. Die Schnitte sollen den Stamm bis zur Mitte durchtrennen, damit Splint und Kern repräsentativ beprobt werden. Alle Schnitte werden mit einer zur Probenentnahme ausgerüsteten Motorsäge durchgeführt (Vorgaben des FPP bei Gewichtsübernahme). Das Schnittmaterial aller Schnitte wird getrennt nach räumlichen Bereichen gesammelt und bezüglich des Wassergehaltes überprüft. Die praktisch beste Vorgehensweise wird es sein, bereits vor Beginn des Polteraufbaus die Probestämme auszuwählen, zu markieren und zu beproben. Danach ist darauf zu achten, dass die beprobten Stämme zufällig in den drei Schichten des Polters mit der richtigen Ausrichtung verteilt werden.

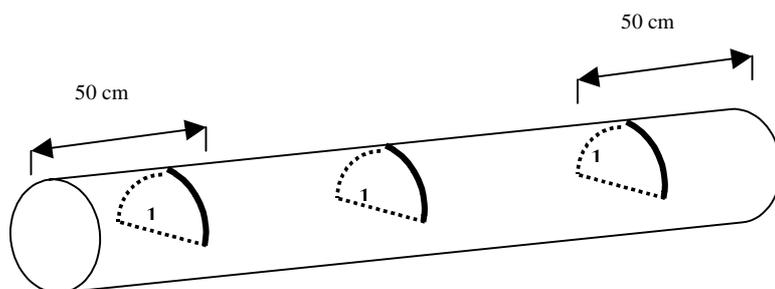


Abbildung 33: Positionierung der Schnitte bei Sample A

Sample B

Sample B wird nur bei einer kleineren Auswahl von Poltern am Lagerplatz entnommen. Es liefert Aussagen über die Verteilung des Wassergehaltes im Randbereich des Polters, sowie Aussagen über den Trocknungsverlauf während des Versuchszeitraumes. Die Bildung von Sample B wird für folgende Polter vorgeschlagen:

- Trapezpolter, Polterhöhe 5,5m, Hauptwindrichtung, alle Baumarten, Stämme < 20 cm und Stämme > 20 cm, nicht abgedeckt, nicht abgeschattet.
- Kreuzpolter, Polterhöhe 5,5 m, Hauptwindrichtung, alle Baumarten (eventuell nur Fichte), nur Stämme <20 cm, nicht abgedeckt, nicht abgeschattet.

Sample B wird nach dem Zählschema in Abbildung 34 in den Poltern gebildet. Die mit einer karierten Schraffur versehenen Schnittflächen bilden zwei gerade Linien, welche vom Rand zum Inneren des Polters gerichtet sind und sich dort schneiden. Diese Stämme bilden das Sample B. Diese Anordnung der Probestämme soll es ermöglichen, die Unterschiede in der Trocknung vom Rand bis hin zum Inneren Bereich des Polters zu untersuchen. Für die Stämme größer 20 cm werden so wie dargestellt 5 Stämme ins Polterinnere gezählt und für Stämme kleiner als 20 cm werden 6 Stämme gezählt. Damit soll erreicht werden, dass das ausgewählte Sample unabhängig von der Stammgröße etwa gleich tief ins Polterinnere reicht.

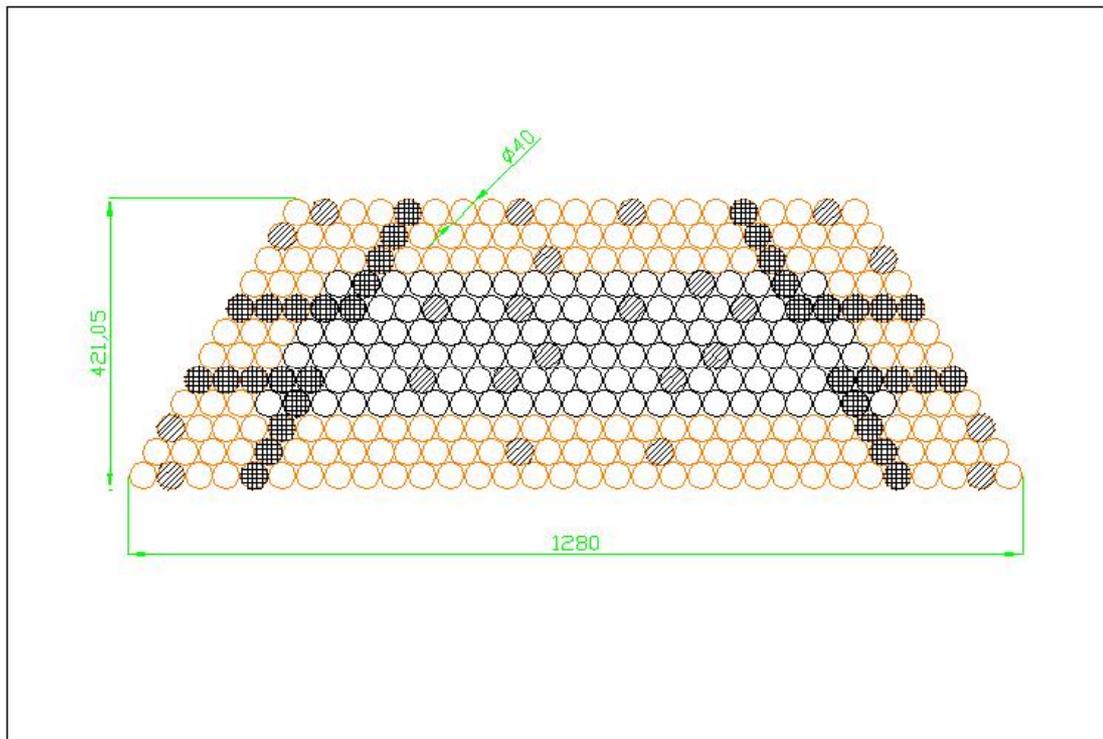


Abbildung 34: Aufbau des Trapezpolters und Anordnung der Probestämme. Gekreuzte Schraffur: Sub-Sample B, glatte Schraffur Sub-Sample A. Die orange gezeichneten Stämme bilden den vermuteten Randbereich die schwarz gezeichneten Polter den Kernbereich des Polters. Sub-Sample B ist so wie in der Zeichnung abzuzählen.

Sample B wird während der Versuchsdauer sechs mal beprobt, folgendes Zeitraster wird dafür vorgeschlagen:

- zu Beginn (beim Aufbau des Polters)
- nach 4 Wochen
- nach 8 Wochen
- nach 12 Wochen
- nach 17 Wochen
- nach 26 Wochen

Die Versuchsdauer beträgt also 6 Monate. Zur Beprobung von Sample B sind die Randbereiche des Polters vier mal während des Versuches abzubauen und wieder aufzubauen. Dazu wird in den Randbereichen jeder Stamm nummeriert und der Polter wird zusätzlich fotografiert. Die Probenentnahme für Sample B erfolgt für jeden der sechs Entnahmezeitpunkte durch einen Schnitt im mittleren Stammteil (d.h. der Schnitt ist mehr als 50 cm vom Stammende entfernt, siehe Abbildung 35). Jeder Schnitt wird dabei getrennt auf den Wassergehalt hin untersucht. Die Schnitte sind wie dargestellt in unterschiedliche Positionen und Drehlagen zu setzen, um für jeden Schnitt einen größtmöglichen Abstand zu den benachbarten Schnitten zu gewährleisten. Nach der

Probenentnahme sind die Schnitte mit einem breiten Klebeband zu versiegeln, damit verstärkte Austrocknung verhindert wird.

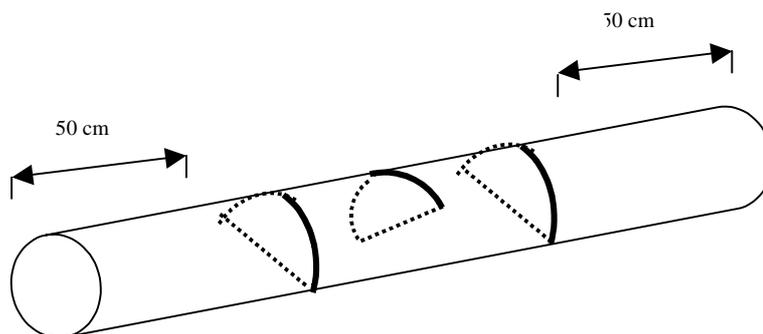


Abbildung 35: Positionierung der Schnitte bei den Probenentnahmen für Sample B.

12.3 Trocknung von Schlagabraum

Unter Schlagabraum wurden bereits in der Literaturrecherche und im Experten-Workshop die herkömmlichen Formen von forstlichen Ernterückständen und die neue Aufbereitungsform von gebündeltem Schlagabraum zusammengefasst. Wie aus den Ergebnissen der Literaturrecherche hervorgeht, gibt es insbesondere in Skandinavien Erfahrungen und aussagekräftige Ergebnisse zur Lagerung und Trocknung von Schlagrücklässen (Forest residues – logging residues). In Österreich wurde der energetischen Nutzung von Schlagabraum bisher wenig Beachtung geschenkt und auch die Trocknung von Schlagabraum wurde wenig untersucht. Es ergeben sich daher offene Fragen in fast jeder Hinsicht, sowohl was die Lagerung in herkömmlichen Fratten und Haufen betrifft, als auch die Lagerung von Schlagabraum-Bündeln. Da die Bündler-Technologie im Moment in Österreich nicht breit verfügbar ist und die Versuche bei Betrieben in der Praxis durchgeführt werden sollen, wird im Rahmen dieses Projektes vorgeschlagen, die Versuche auf jene Methoden zu beschränken, welche mit den verfügbaren technischen Mitteln in den meisten österreichischen Forstbetrieben durchgeführt werden können.

Die Versuche zur Trocknung von Schlagabraum sollten die Beantwortung folgender Fragestellungen zum Ziel haben:

- Welche Lagerungsmethoden sind am wirksamsten, um ein trockenes qualitativ hochwertiges Brennmaterial zu erhalten?
- Wie groß sind die erzielbaren Trocknungserfolge unter den in Österreich herrschenden Bedingungen?
- Mit welcher Trocknungsdauer ist zu rechnen?

- Wie verhält sich das Material im Laufe des Jahres und in den unterschiedlichen Regionen Österreichs?

Im Folgenden wird ein Versuchskonzept vorgestellt, welches sich einerseits aus Lücken zu bisher dokumentierten Versuchen ergibt und andererseits aus Anregungen, die aus Gesprächen mit Experten aus der Praxis entstanden sind.

12.3.1 Auswahl der Baumarten und Standorte

Wie bei den Versuchen für Ganzbaum und Poltertrocknung ist es auch hier erstrebenswert die unter Kapitel 12.1.2 beschriebenen **Regionen** zu untersuchen. Ziel ist es, die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse Österreichs im Versuch zu erfassen. Als **Baumarten** werden dabei Fichte, Buche und Mischlaubholz vorgeschlagen.

Als **Standort** für die Trocknung von Schlagabraum bietet sich am besten der Wald oder waldnahe Lagerplätze an, da der Transport von Schlagabraum über längere Distanzen nicht wirtschaftlich machbar ist. Nurmi und Hillebrand (2001) beobachteten in ihren Versuchen, dass der Transport von frischem Schlagabraum auch über kurze Distanzen erheblich aufwändiger ist, als wenn der Schlagabraum getrocknet und damit leichter ist. Deshalb ist es erstrebenswert für die Zwischenlagerung einen Platz möglichst nahe des Aufarbeitungsplatzes zu wählen.

12.3.2 Auswahl der Versuchsbestände

Versuchsbestände können entweder Endnutzungsbestände oder aber auch jüngere Bestände sein. Für diesen Versuch werden Endnutzungen vorgeschlagen, da sie für die Schlagabraumnutzung mehrere Vorteile bieten:

- Die bei der Endnutzung entstehende Freifläche ist ein geeigneter Lagerplatz und Manipulationsplatz für Schlagabraum. Diese Freifläche bietet nicht nur gute Trocknungsbedingungen, sondern auch größere Freiräume für die Durchführung von Versuchen.
- Die Entnahme von Schlagabraum im Rahmen der Endnutzung wird in verschiedenen Publikationen (z.B. Katzensteiner 2003) als weniger bedenklich hinsichtlich des stattfindenden Nährstoffentzuges eingestuft, da der Nährstoffentzug nicht während der Wachstumsphase stattfindet. Findet ein starker Nährstoffentzug während der Wachstumsphase statt, dann ist mit Zuwachsverlusten bis 25 % zu rechnen.

Wie bei den anderen Versuchen für ist für jeden Versuchsort eine klassische Bestandesbeschreibung durchzuführen (inklusive Mikroklima, Topografie, Bodenverhältnisse, etc.). Die Versuchsbestände sollten auch hier möglichst reine Bestände der zu untersuchenden Baumart sein.

12.3.3 Lagerungsformen und Lagerungsdauer

Folgende Lagerungsformen werden untersucht:

Runde Haufen: Die Haufen sollten etwa 4 - 5 m hoch und mindestens 5 - 8 Meter im Durchmesser sein. Dies entspricht einer Menge von etwa 80 - 90m³ im ungehackten Zustand, also etwa die Menge einer LKW-Ladung. Die Haufengröße soll für den Versuch in jedem Fall gewährleisten, dass im Inneren des Haufens unbelüftete Verhältnisse herrschen.

Fratten (langgezogene Wälle): Ca. 2 - 3 m hohe Fratten sollen auf der Schlagfläche errichtet werden. Die Fratten sollten lang genug sein, um mehrmals während der Laufzeit des Versuches Segmente als Proben zu entnehmen. Die Fratten sollen zum Vergleich auf unterschiedlich exponierten Hängen errichtet werden: Nordhang und Südhang, um den Einfluss der Sonnenbestrahlung zu ermitteln.

Die **Ausrichtung der Fratten in Bezug zur Hauptwindrichtung** soll in gleicher Weise wie bei der Polter-Trocknung untersucht werden. Die Fratten sollen einmal quer zur Hauptwindrichtung und einmal parallel zur Hauptwindrichtung errichtet werden. Bei Hängen die keine Hauptwindrichtung aufweisen, sollen die Fratten einmal entlang der Falllinie und einmal quer zur Falllinie errichtet werden, um so den Einfluss der hangaufwärts gerichteten thermischen Winde zu untersuchen.

Abdeckungen und Unterlagen sollen eine weitere Versuchsvariante bilden. Diese soll nur jeweils auf Fratten, welche quer zur Hauptwindrichtung stehen, untersucht werden bzw. auch an runden Haufen. Die Fratten bzw. Haufen sollen dabei an der Oberseite abgedeckt werden, sodass Regen und Schnee weitestgehend abgehalten werden.

Weiters sollen diese Fratten und Haufen mit einer wasserbeständigen Schicht unterlegt werden. Wenn dabei einseitig wasserdichtes Papier verwendet wird, müssten zwei Lagen davon verwendet werden, sodass eine beidseitig wasserundurchlässige Schicht entsteht. Das Unterlegen des Schlagabraums hat den Sinn, dass vom Boden aufsteigende Feuchte vom Material abgehalten wird.

Als **Lagerungsdauer** für den Schlagabraum wird ein Zeitraum von vier Monaten vorgeschlagen. Die Versuche sollen im Abstand von drei Monaten begonnen werden, um die unterschiedlichen Trocknungsbedingungen im Laufe des Jahres zu untersuchen, d.h. ein Versuchsstart je Quartal.

12.3.4 Schema der Probenentnahme

Die **Probenentnahme** soll einmal im Monat geschehen und erfolgt durch Entnahme von Schlagabraum an folgenden Stellen:

Fratten: In einem Abstand von 1,5 - 2 Meter vom Ende des Walles wird mit einer Motorsäge eine ca. 50 cm breite Scheibe aus dem Wall herausgeschnitten. Folgende Proben werden dabei getrennt entnommen (siehe auch Abbildung 36):

- eine Schicht von ca. 50 cm an der Oberfläche (O)
- eine Schicht von ca. 50 cm an Boden (B)
- Das restliche Material aus dem Kern (K).

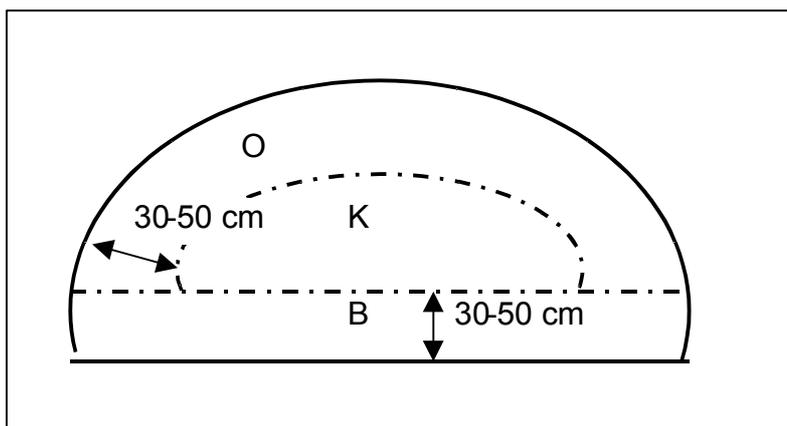


Abbildung 36: Schema zur Probenentnahme bei Schlagabraum: die drei Probenteile werden nacheinander entnommen; zuerst die Oberfläche (O), dann der Kern (K) und zum Schluss der Boden.

Von den **runden Haufen** sollen in der gleichen Weise Proben von der Oberfläche, von der Bodenschicht und vom Inneren des Haufens entnommen werden.

Nach der Probenentnahme soll die entstandene Lücke durch Zusammenschieben des Materials wieder geschlossen werden. Bei der Probenentnahme zu späteren Zeitpunkten ist zu den vorherigen Probestellen ein Mindestabstand von ca. einem Meter einzuhalten.

Das entnommene Probenmaterial ist zu markieren und getrennt in einem Hacker zu zerkleinern. Die so erhaltenen Hackgut-Proben sind nach Durchmischung und Mengenreduktion auf den Wassergehalt hin zu untersuchen.

13 Zusammenfassung

Die Anzahl der Neuinbetriebnahmen von Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromproduktion hat in den letzten Jahren rasant zugenommen. Die damit induzierte Nachfrage nach festen Biobrennstoffen wird künftig aber nur zu befriedigen sein, wenn die vorhandenen Rohstoffpotenziale der heimischen Wäldern in diese Richtung verstärkt genutzt werden. Um eine wirtschaftlich vertretbare Bereitstellung von Energieholz in großem Umfang gewährleisten zu können, bedarf es neben einer optimierten Logistikkette, auch eines qualitativ hochwertigen Brennstoffes. Die Trocknung von Energieholz bewirkt, dass aus einem einfachen Rohstoff letztlich ein effizienter und hochwertiger Brennstoff wird.

Bei der Trocknung von Energieholz gilt es, die dargestellten Vorteile von trockenem Holz mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen. Ziel dieser Untersuchung war es, einfache und kostengünstige Möglichkeiten zur Trocknung von Energieholz aufzuzeigen. Diese Verfahren sollen zur Bereitstellung eines qualitativ hochwertigen Brennstoffes beitragen, die natürlichen Ressourcen schonen und sowohl Anbietern als auch Verbrauchern von Energieholz zu einer höheren Wertschöpfung verhelfen.

Inhalte der FPP-Studie „Energieholztrocknung“

- **Analyse potentieller Trocknungsmöglichkeiten** entlang von wichtigen Energieholz-Logistikketten
- **Literaturstudie** zu den Themenkreisen
 - => Grundlagen der Holztrocknung
 - => Effekte der Trocknung auf die Qualität von Energieholz
 - => Ökologische Aspekte der Energieholztrocknung
 - => Methoden zur natürlichen Freilandtrocknung
 - => Technische Trocknung von Energiehackgut
- **Sammlung von Experten Know-how aus der Praxis** im Rahmen eines Workshops sowie von persönlichen Interviews
- **Versuchskonzept** für die Klärung noch offener Fragestellungen bei der Trocknung von Energieholz

Wassergehalt von frischem Energieholz

Aufgrund des unterschiedlichen anatomischen Aufbaues finden sich bei den heimischen Baumarten deutlich divergierende Wasserverteilungsmuster zwischen **Kern- und Splintbereich**. Das Splintholz enthält bei den Nadelhölzern deutlich mehr Wasser als das Kernholz. Sie weisen im Splint Wassergehalte um 55 % auf, der Kern liegt nur bei

ca. 30%. Im Gegensatz dazu zeigen die wichtigen Laubholzbaumarten Buche und Eiche keine bzw. nur geringe Unterschiede zwischen Kern- und Splintbereich. Der Wassergehalt liegt im Splint bei 41 bis 50 %, im Kern bei 33 bis 47 %. Der Raumanteil des Kerns am gesamten Stammvolumen nimmt mit steigendem Stammdurchmesser beziehungsweise mit steigendem Alter bei allen Baumarten zu. Jüngere Bäume weisen ebenso wie schwächere Stammteile (Krone) einen höheren Anteil an Splintholz und so auch einen höheren Wassergehalt auf.

Der Wassergehalt der **Rinde** wird stark von Witterung, Baumhöhe und Baumalter beeinflusst. Bei Untersuchungen an Fichte wurde festgestellt, dass junge Bestände höhere Rindenfeuchtigkeiten aufweisen und dass die Rindenfeuchtigkeit mit der Baumhöhe steigt. Die Rinde des Wipfels ist also feuchter als jene des Stammes. Ursache dafür ist jeweils das sich ändernde Verhältnis zwischen der trockenen Borke und dem feuchten Bast.

Aufgrund des höheren Splintholzanteiles bzw. der höheren Feuchtigkeit der Rinde haben **jüngere Bäume und Kronenteile insbesondere bei Nadelholz einen höheren Wassergehalt**. Gerade diese Sortimente spielen als Energieholz eine wichtige Rolle. Bei der Trocknung ist deshalb zu berücksichtigen, dass bei diesen Sortimenten auch mehr Wasser aus dem Holz entfernt werden muss. Der Ausgangswassergehalt liegt zumeist über 50 %.

Der **Zeitpunkt der Schlägerung** kann in Hinblick auf den zu erwartenden **Ausgangswassergehalt vernachlässigt werden**.

Untersuchungen an Fichten und Tannen haben gezeigt, dass der Einfluss des **Schlägerungszeitpunktes** auf den Wassergehalt gering ist. Der Zeitpunkt der Schlägerung sollte daher, zumindest im Hinblick auf den zu erwartenden Startwassergehalt, vernachlässigt werden können.

Effekt der Trocknung auf die Qualität von Energieholz

Durch die Trocknung von Energieholz wird der **Heizwert** deutlich erhöht. Der höhere Heizwert wirkt sich in der Folge günstig auf Transport- und Lagerkosten aus, bei der Verbrennung selbst entstehen aufgrund der verringerten Brennstoffmenge weniger Schadstoffe und Asche.

Heizwert-Erhöhung* durch Trocknung Ausgangswassergehalt 50 % [*bezogen auf MJ/kg]	
Trocknung um 10 %	➔ 26 %
Trocknung um 20 %	➔ 52 %
Trocknung um 30 %	➔ 78 %
Trocknung um 40 %	➔ 104 %

Ein weiterer Effekt der Trocknung ist die bessere **Lagerfähigkeit**. Energieholz unter 20 bis 30 % Wassergehalt ist für Mikroorganismen schwer abbaubar. Es treten nur mehr geringe Trockensubstanzverluste auf. Bei der Lagerung muss aber berücksichtigt werden, dass neben dem Wassergehalt auch die Temperatur und die Zusammensetzung des Lagergutes wesentliche Einflussgrößen darstellen. Grünes Material begünstigt die

Trockensubstanzverluste durch Lagerung [pro Monat]	
Wal dhackgut im Freien	1,8 – 4 %
Wal dhackgut unter Dach	0,5 – 2,8 %
Wal dhackgut (trocken)	< 0,5 %
Rundhol z	< 0,2 %
Ri nde	1,5 %

Entwicklung von Mikroorganismen und kann zu hohen Temperaturen und hohen Trockensubstanzverlusten führen. Feines und verdichtetes Material verhindert den Luftaustausch und den Wasserabtransport im Lager und schafft somit ebenfalls positive Bedingungen für Mikroorganismen.

Methoden zur Freilandtrocknung von Ganzbäumen

Aus den vorhandenen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Ganzbaum-Trocknung eine interessante und vielversprechende Methode ist, um Energieholz in guter Qualität bereitzustellen. Es erscheint aufgrund der vorhandenen Literatur möglich, innerhalb eines Sommers bzw. weniger Monate eine Reduktion des Wassergehaltes auf 20 – 30 % zu erreichen. Einige Ergebnisse weisen auf kürzere Trocknungszeiten von wenigen Wochen hin. Verschiedene Literaturangaben zur Ganzbaum-Trocknung im Vergleich zur Lagerung von Rundholz lassen für die Ganzbaum-Trocknung etwas bessere Trocknungsergebnisse erwarten. Nach einigen Monaten Lagerzeit zeigen sich meist Unterschiede von etwa 5 % Wassergehalt. Die Streuung der Ergebnisse kommt durch Baumarten, Standorte Wetterbedingungen zustande. Problematisch und noch nicht gut erforscht, ist das Verhalten von Ganzbäumen, wenn sie auf größeren Stapeln gelagert werden. Ein weiterer kritischer Faktor ist die phytosanitäre Gefahr, die durch Lagerung von Nadelbäumen im Wald entsteht. Zu bedenken ist weiters, dass dieses Verfahren große Lagerplätze erfordert.

Ungehackte Ganzbäume haben das dreifache Volumen des gehackten Materials. Gegenüber gepoltertem Rundholz besteht für Ganzbäume etwa 3 bis 5-facher Platzbedarf. Bei großen Haufen stellt die Durchlüftung ein Problem dar. Die Durchlüftung funktioniert bei Laubholz gut, bei Nadelholz und Astmaterial weniger gut. Laub- und Nadelmasse nehmen bei Regen sehr viel Wasser auf. Eine noch nicht durch Versuche belegte Möglichkeit ist die Abdeckung von Ganzbäumen, um die Wiederbefeuchtung zu verhindern. Das Hacken von Ganzbäumen führt, der stärkeren Verunreinigung des Materials wegen, zu einem höheren Maschinenverschleiß.

Bei der **Ganzbaum-Trocknung** ist innerhalb eines Sommers bzw. weniger Monate eine Reduktion des Wassergehaltes auf 20 – 30 % zu erreichen. Gegenüber der Lagerung von Rundholz lassen sich bei der Ganzbaum-Trocknung etwas bessere Trocknungsergebnisse erwarten (bis zu rund 5 % Differenz). Grünmaterial sollte vor dem Hacken braun oder abgefallen sein, andernfalls drohen Probleme bei weiterer Lagerung.

Zu beachten bei der Ganzbaumtrocknung:

- Sonnigen, luftigen und gut zugänglichen Lagerplatz aussuchen
- 3 bis 5-fachen Platzbedarf gegenüber gepoltertem Rundholz einplanen
- Bei Lagerung von Ganzbäumen in niederschlagsreichen Jahreszeiten sind Abdeckungen empfehlenswert
- Bei großen Stapeln auf gute Durchlüftung achten (insbesondere bei Nadelholz)
- Material sauber von Verunreinigungen halten (verringert die Hackkosten)
- Phytosanitäre Gefährdung bei Nadelholz beachten!

Methoden zur Freilandtrocknung von Rundholz in Poltern

Die Trocknung von Rundholz in Poltern kann unter günstigen Wetterbedingungen und wenn die Polter durch den Einbau von Querlagen winddurchlässig gestaltet sind, sehr gute Trocknungsergebnisse liefern, i.e. Wassergehalte von 25 % und weniger, innerhalb einer Sommersaison. In der heimischen Praxis wird das Holz meist über 6 Monate gelagert. Die Lagerung in Poltern ohne Querlagen scheint bei weitem weniger Trocknungserfolge zu erzielen. Wird das Rundholz so gestapelt, dann liegen die Endwassergehalte nach einigen Monaten Trocknung meist 5 – 10 % höher als bei Kreuzpoltern. Zu klären gilt, wie viele Querlagen das günstigste Kosten/Nutzen-Verhältnis ergeben. Unter ungünstigen Bedingungen kann der Wassergehalt in Rundholzpoltern über mehrere Monate unverändert bleiben. Laut Expertenerfahrung ist Bodenfreiheit

enorm wichtig für eine gute Trocknung. Ebenso wurde in der Praxis festgestellt, dass hohe Teile des Polters oft besser abtrocknen, da sie stärker vom Wind durchströmt werden. Ein geeigneter Standort, i. e. eine windige und sonnige Lage (Kuppe, Freifläche), stellen die wichtigste Voraussetzung für eine gute Trocknung dar. Der Einfluß der Holzart ist ebenfalls wesentlich für die Trocknung. Gute Ergebnisse wurden mit jungen Fichten und Pappeln erzielt. Die Baumarten Birke, Eiche oder Schwarzkiefer scheinen deutlich langsamer abzutrocknen. Begründet wird dies zum Teil damit, dass die Rinde den Wasseraustritt behindert. Holz aus Harvester-Durchforstungen bringt bei der Poltertrocknung den Vorteil, dass sich eine Teilentrindung im Zuge der Entastung positiv auf die Trocknung auswirkt. Vorteile die Rundholz als Energieholzsortiment bietet sind der geringe biologische Abbau des Materials, die gute Transportfähigkeit sowie der geringe Nährstoffaustrag aus dem Wald. Abdeckungen scheinen dann sinnvoll zu sein, wenn das Holz nach der Trocknung im Sommer auch über den Winter gelagert werden soll. In mehreren Versuchen zeigte sich eine Wieder-befeuchtung des Materials bei Regen. Ein Nachteil der Polterung von Rundholz sind die Kosten, welche bei der Polterung und beim Einbau von Querlagen entstehen.

Bei der **Trocknung von Rundholz in Poltern** können unter günstigen Wetter- und Lagerungsbedingungen innerhalb einer Sommersaison Wassergehalte von unter 25 % erzielt werden. Unter ungünstigen Bedingungen kann dagegen der Wassergehalt in Rundholzpoltern über mehrere Monate unverändert bleiben.

Zu beachten bei der Rundholz-Poltertrocknung:

- Windigen und sonnigen Lagerungsort aussuchen (Kuppe, Freifläche)
- Luftige Bauweise: Einbau von Querlagen (Kreuzpolter), möglichst große Bodenfreiheit der Stapel (> 0,5 m)
- Teilentrindung der Stämme begünstigt die Trocknung (z. B. im Zuge Harvesterdurchforstung)
- Abdeckung der Polter bei Lagerung über den Winter
- Phyto-sanitäre Gefahr bei Nadelholz
- Kosten durch Einbau der Querlagen

Methoden zur Freilandtrocknung von Waldhackgut & Schlagabraum

Die Methode der Trocknung von Waldhackgut in **Pileform** im Freien nützt neben der durch die Sonne hervorgerufene Konvektion auch die Selbsterwärmung durch Mikroorganismen um eine Trocknung des Gutes herbeizuführen. Die erzielbaren Trocknungserfolge sind dabei schwer vorhersehbar. Bei günstigem Verlauf der Trocknung kann innerhalb von 3 Monaten der Wassergehalt von frischem Holz auf 25 % sinken. Unter schlechten Bedingungen kann der Wassergehalt auch steigen. Meist bilden sich in Hackschnitzelhaufen neben starker Verpilzung auch Zonen mit sehr unterschiedlichen Wassergehalten. Dies ist auf Kondensationsprozesse während der Lagerung zurückzuführen. Auf Piles in überdachten offenen Hallen, welche nach allen Seiten hin gut durchlüftet sind, kann frisches Hackgut in ca. 2 Monaten auf einen Wassergehalt von unter 25 % getrocknet werden. **Schnelltrocknung am Boden** in dünnen Schichten durch Sonneneinstrahlung. Unter günstigen Bedingungen kann mit dieser Methode an einem Tag ein Wassergehalt von ca. 20 % erreicht werden. Platzbedarf und Manipulationsaufwand beschränken die Anwendung dieser Methode auf kleine Mengen.

Bei **Trocknung von Waldhackgut in Haufenform** kann im Freien innerhalb von 3 Monaten der Wassergehalt von frischem Holz auf 25 % sinken. Unter schlechten Bedingungen kann der Wassergehalt aber auch steigen. Erzielbare Trocknungserfolge sind schwer vorhersehbar.

Zu beachten bei der Trocknung von Waldhackgut:

- Noch vor dem Hacken sollte entschieden werden, ob es möglich ist, bereits das ungehackte Material zu trocknen.
- Wirksame Methoden sind Lagerung in offenen überdachten Hallen sowie Freilufttrocknung auf befestigten Flächen in dünner Schicht.
- Je gröber die Körnung desto besser sind Lagerfähigkeit und Trocknung.
- Bei Hackgut mit mehr als 25 - 30 % WG kommt es durch biologischen Abbau zu Massenverlusten bis 4 % im Monat.
- Durch Pilzsporen können gesundheitliche Belastungen auftreten
- Sehr hohe verdichtete Haufen können sich durch die Wärmeentwicklung selbst entzünden.

Die **Trocknung von Schlagabraum im Freien** führt im Sommer innerhalb von 2 Monaten zu Wassergehalten von um die 20 %. Wird Material im Winter oder über längere Zeit gelagert, so empfiehlt sie die Abdeckung des Materials, um Wiederbefeuchtung zu vermeiden. Die Lagerung in **abgedeckten Bündeln** bringt innerhalb von 6 – 10monatiger Lagerung eine Abtrocknung des Materials auf Wassergehalte zwischen rund 20 und 30

%. Bisherige Untersuchungen zeigen jedoch, dass bei dieser Lagerungsform hohe Trockensubstanzverluste auftreten. Wenn die Bündel abgedeckt waren, wurden 14 % Trockensubstanzverlust in 10 Monaten gemessen. Grünes Material führt zu Lagerungsproblemen, insbesondere die erhöhte Gefahr der Selbstentzündung. Manipulation, Transport und Lagerung von Schlagabraum stellen derzeit noch oft ein Platz- und Kostenproblem dar.

Trocknung von Schlagabraum führt im Sommer innerhalb von 2 Monaten zu Wassergehalten von um die 20 %. Bei Lagerung über den Winter ist eine Abdeckung empfehlenswert.

Zu beachten bei der Trocknung von Schlagabraum:

- Der Schlagabraum kann zum Trocknen auf Haufen oder Fratten konzentriert werden
- Das Material sollte frei von Sand und Steinen sein
- Bei Regenwetter sind Abdeckungen aus Spezialpapier oder Plastikplane sinnvoll

Die **Trocknung von abgedeckten Energieholzbündeln** bringt innerhalb von 6 – 10 Monaten eine Abtrocknung des Materials auf Wassergehalte zwischen rund 20 und 30 %. Es treten dabei aber auch hohe Trockensubstanzverluste auf.

Zu beachten bei der Trocknung von Bündeln:

- Bündel können wie Rundholz gestapelt und transportiert werden, trocknen aber langsamer als lose gelagerter Schlagabraum.
- Bei Regenwetter und längerer Lagerung sind Abdeckungen aus Spezialpapier oder Plastikplane sinnvoll.
- Das Material sollte frei von Sand und Steinen sein.

In der vorliegenden Studie wurde umfangreiches Material zur Energieholztrocknung zusammengetragen und aufgearbeitet. Insbesondere bei den Themenbereichen Ganzbaumtrocknung, Poltertrocknung und Trocknung von Schlagabraum sind aber bis dato einige wichtige Fragen unbeantwortet geblieben. Viele der Forschungsergebnisse stammen überdies aus Skandinavien. Es stellt sich die Frage, inwieweit diese Ergebnisse – bedenkt man etwa die Unterschiede Klima, Topographie, Baumartenzusammensetzung oder Durchmesser- und Durchmesserverteilung - auf die Situation in Österreich umlegbar und damit für die Praxis direkt nutzbar sind. Zur Klärung dieser Fragestellungen werden in der Arbeit Versuchskonzepte dargestellt, welche die Möglichkeit bieten, für die Praxis wichtige Wissenslücken zu schließen.

Forschungsfragen – Ganzbaumtrocknung

- Untersuchung des Trocknungsverhaltens unterschiedlicher Baumarten
- Einfluss des Schlägerungszeitpunktes auf den Trocknungserfolg
- Analyse der Möglichkeit der Trocknung von Ganzbäumen in großen Haufen

Forschungsfragen – Trocknung von Rundholz

- Einfluss des Makro- und Mikroklimas sowie der Topographie auf den Trocknungsfortschritt
- Systematische Untersuchungen der Polterform, Ausrichtung der Polter und Größe der Polter
- Analyse des Trocknungsfortschrittes innerhalb des Polters als Basis für Modell „Optimaler Energieholzpolter“

Forschungsfragen – Schlagabraum

- Analyse unterschiedlicher Lagermethoden
- Abschätzung der Trocknungserfolge unter heimischen Bedingungen
- Untersuchung des Nutzens von Abdeckungen bzw. Unterlagen bei der Trocknung von Schlagabraum sowie Ganzbäumen und Rundholz

14 Literaturverzeichnis

- BALLY, B., BUCHTER, B., und BUSIN, U. (2000): Literaturstudie zur Lagerung von Energieholzschnitzel. AMBIO Beratungsgemeinschaft in angewandten Umweltwissenschaften. Zürich. 13 S.
- BEDNAR, H. (1975): Vertikale Feuchteverteilung der Rinde bei Fichte und Tanne. Cbl. Ges. Forstwesen, 129 – 138
- BRABECK, W. (1987): Erhöhte Wertschöpfung durch bessere Ausformung und Lagerung. Österreichische Forstzeitung 12/1987, 8 – 9.
- BRUNNBAUER, M. (1995): Niedertemperatur-Trocknung von Holz-Hackschnitzel. Diplomarbeit TU Wien. Wien. 149 S.
- BRUSCHE, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz, Bergung, Lagerung, Trocknung, KTBL-Schrift 290. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt. 96 S.
- BUGGELN, R. (1999): Outside storage of wood. Biocycle 6-99: 32 – 34.
- DANNEBERG, O. et al (2001): Wald(boden)sanierung. Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Institut für Bodenwirtschaft. Wien. 27 S.
- DREINER, K., FRÜHWALD, A., KÜPPERS, J. G., SCHWEINLE, J., und THOROE, C. (1994): Holz als umweltfreundlicher Energieträger. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Münster. 192 S.
- ECKMÜLLNER, O. (1999): Benadelung und Splintflächen von Fichten aus Wuchsgebieten Österreichs. Holz-Zentralblatt, Nr. 18, 266 – 267.
- ECKMÜLLNER, O., STERBA, H. (2000) Crown condition, needle mass, and sapwood area relationships of Norway spruce (*Picea abies*). Can. J. For. Res. 30: 1646 – 1654.
- ERNSTSON, M. L., JIRJIS, R., und RASMUSON, A. (1991): Experimental Determination of the Degradation Rate for Some Forest Residue Fuel Components at Different Temperatures and Oxygen Concentrations. Scand. J. For. Res. 6: 271 – 287.
- FAGERNÄS, L., IMPOLA, R., RAUTIAINEN, R., und AJANKO, S. (2003): Changes and emissions in wood fuels during storage and drying. International Nordic Bioenergy 2003 conference.

FELLNER, J., TEISCHINGER, A. (2001): Alte Holzregeln – Von Mythen und Brauchbarem über Fehlinterpretationen zu neuen Erkenntnissen. Wien, 160 S.

GIGLER, J. K., LOON, W. K. P., VISSERS, M. M., und BOT, G. P. A. (2000): Forced convective drying of willow chips. *Biomass and Bioenergy* 19, 259 – 270.

GILLHOFER, A. (1998): Hackguttrocknung durch gesteuerte Mikrobiologie. Diplomarbeit Universität Salzburg. Salzburg. 69 S.

GRUBER, T., BECKER, M. (2003): Untersuchungen zur Trocknung von Holzspänen mit Dampf. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61, 89 – 94.

GOLSER, M., NEMESTOTHY, K., und SCHNABEL, R. (2004): Methoden zur Übernahme von Energieholz. FPP, *Holzforschung Austria*. Wien. 151 S.

HAKKILA, P. (1962): Forest seasoning of wood intended for fuel chips. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 54.4. Helsinki. 82 S.

HAKKILA, P., LEIKOLA, M. und SALAKARI M. (1979): Production, harvesting and utilization of small-sized trees. Helsinki 1979. In BRUSCHE (1983).

HARTMANN, H, KALTSCHMITT, M. (2001): *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin, Heidelberg, New York. 770 S.

HERMANSSON, M., ANDERSSON, P., und WIMMERSTEDT, R. (1992): Steam drying of wood fuels. *Drying Technology*, 10(5), 1267 – 1286.

JIRJIS R., THEANDER, O. (1990): The Effect of Seasonal Storage on the Chemical Composition of Forest Residue Chips. *Uppsala Scand. Journal of Forest Research*, 5: 437 – 448.

JIRJIS, R. (1995): Storage and Drying of Wood Fuel. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 9 Nos 1 – 5, 181 – 190.

JIRJIS, R. (2003): Storage of forest residues in Bales. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Bioenergy, report number 3

JIRJIS, R., LEHTIKANGAS, P. (1993): Fuel quality and dry matter loss during storage of logging residues in a windrow. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report No 236.

JONAS; A. (1984a): Waldhackguterzeugung in Verbindung mit Pflegemaßnahmen. Holz-Zentralblatt, 110, 21, 313 – 314

JONAS, A. (1984b): Waldhackguterzeugung in Verbindung mit Pflegemaßnahmen bei Fichte. Forstzeitung, Juli 1984, 207 – 210.

JONAS, A., GÖRTLER, F. (1988): Holz und Energie, 4. Auflage. Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer, Wien. 79 S.

JONAS, A., GÖRTLER, F., SCHUSTER, K. (1990): Holz und Energie, 5. Auflage. Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer, Wien. 79 S.

JÜNNEMANN, M. (2002): Biomassetrocknungsanlage im Zillertal. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur. Wien. 49 S.

KANZIAN, C. (2005): Bereitstellung von Waldhackgut – Verfahren Energieholzbündel im Gebirge. Online verfügbar unter www.fpp.at.

KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H. (2001): Energie aus Biomasse. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 770 S.

KATZENSTEINER, K. (2003): Ist eine Intensivierung der Nutzung von Biomasse aus dem Wald ökologisch nachhaltig? energy – Die Zeitschrift der Energieverwertungsagentur 3/03. 10 – 11.

KIELDER FOREST PRODUCTS LTD. (2001): Commercial woodchip storage drying trials. DTI Sustainable Energy Programme. 15 S.

KOLLMANN, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin, Göttingen, Heidelberg. 1050 S.

KOLTZENBURG, C. (1985): Untersuchungen über die physikalischen Eigenschaften der Fichtenrinde. Holz als Roh- und Werkstoff.

KRAMER, H., GUSSONE, H.-A. und SCHOBER, R. (1988): Waldwachstumslehre, ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. Paul Parey Verlag. Hamburg, Berlin. 476 S.

LAUER, M., BERGMAYR, M. (1986): Einfache Methoden zur natürlichen Trocknung von Hackgut und Rinde für kleine und mittlere Feuerungsanlagen bis 500 KW. Institut für Umweltforschung Graz. 61 S.

- LAUER, M., BERGMAYR, M., und SPITZER, J. (1987): Einfache Möglichkeiten für die Trocknung von Waldhackgut. Österreichische Forstzeitung 9/1987, 47 – 49.
- LIN, Y. L., SCHMIDT, E. L. (1991): Effects of compression on parenchyma cell viability, initial heating, and microflora of aspen fuel chips. Wood and Fiber Science, 23(2), 253 – 259.
- MACKENSEN, J., BAUHUS, J. (1999): The decay of coarse woody debris. National Carbon Accounting System Technical Report No. 6. Canberra. 41 S.
- MARUTZKY, R., KESERÜ, G. (1981/1982): Herstellung von Spanplatten aus gelagerten Hackschnitzeln. Sonderdruck aus Holzzentralblatt, Nr. 107/108. München.
- MITCHELL, C.P., HUDSON, J.B., GARDNER, D. N. A., STORRY, P. (1988): A comparative study of storage and drying of Chips and Chunks in the UK. In Proceedings IEA/BA TASK III conference production, storage and utilization of wood fuels. Vol. II, Uppsala. Swedish University of Agricultural sciences, Department of Operational efficiency. 72 – 89.
- MUELLER, J. (2002): Modeltrocknung kann Kiefernbläue verhindern – Untersuchungen zur Freilufttrocknung von Kiefernmodel und – rundholz während einer Saison. Holz-Zentralblatt 14, 162.
- MUELLERBUCHHOF, G. (1993): Lager-trocknung von Holz-Hackschnitzeln, Institut für Energieversorgung, Ingenieurbetrieb der vereinigten Energiewerke AG, Dresden.
- NEUßER, H., SILBERNAGL, H., MESSNER, K. und SCHEDL, C.(1977a): Untersuchung und Verhinderung unerwünschter Reaktionen im Hackschnitzelpile. Österreichisches Holzforschungsinstitut. Wien. 70 S.
- NEUßER, H., STROBACH, D., KRAMES, U., SILBERNAGL, H. und SCHEDL, C. (1977b): Lagerung von Holz in Rinde, Teil 1-3. Österreichisches Holzforschungsinstitut. 40 S.
- NEUßER, H., ENAYATI, A. und KRAMES, U. (1981a): Prüfung von Waldhackgut auf seine Eigenschaften und Optimierung der Arbeitskettens, Teil 1. Österreichisches Holzforschungsinstitut. 54 S.
- NEUßER, H., ENAYATI, A. und KRAMES, U. (1981b): Prüfung von Waldhackgut auf seine Eigenschaften und Optimierung der Arbeitskettens, Teil 2. Österreichisches Holzforschungsinstitut. 14 S.

NEUßER, H., KRAMES, U. und STREBA, H. (1981c): Ausarbeitung einer Methode zur Holzübernahme nach Gewicht. Österreichisches Holzforschungsinstitut. 22 S.

NEUßER, H. (1981): Wie viel Energie liefert Holz? Allgemeine Forstzeitung 92, 7, 274

NURMI, J. (1994) The effect of whole tree harvesting on fuel quality and coppicing ability of short rotation, intensive culture willow crops. Finnish forest research institute. Kannus. 6 S.

NURMI, J. (1999): The storage of logging residue for fuel. Biomass & Bioenergy 17, 41 – 47.

NURMI, J., HILLEBRAND, K. (2001): Storage alternatives affect fuelwood properties of Norway spruce logging residues. New Zealand Journal of Forestry Science 31(3): 289 – 297.

OBERNBERGER, I. (1997): Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. Graz. 349 S.

ÖSTERREICHISHES NORMUNGSINSTITUT, (1998): Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff Begriffsbestimmungen und Merkmale, ÖNORM M 7132

ÖSTERREICHISHES NORMUNGSINSTITUT, (1998): Holzhackgut für energetische Zwecke, Anforderungen und Prüfbestimmungen, ÖNORM M 7133

PERNY, B. (2004): Gespräch zum Thema Waldschutz. Teil der Expertenbefragung anlässlich des Workshops „Energieholztrocknung im Gespräch“.

PETERS, S. (2004): Hitzige Aufbruchstimmung. Forstzeitung 7/2004, S38 – 39

POLSTER, H., SCHLETTER, A. (1962): Zur Problematik der biologischen Holztrocknung. Vergleichende Untersuchungen von entasteten und mit Krone belassenen Bäumen anhand von Transpirations- und Holzleuchtemessungen. Archiv für Forstwesen 11, 4, 394 – 435.

PRANKL, H., WEINGARTMANN, H. (1994); Hackguttrocknung Wippenham. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Landtechnik Wieselburg, Heft Nr. 40. 62 S.

REISINGER, R. (1999): Trocknung von Biomasse: Aufzeigen der technischen Möglichkeiten und Untersuchen der Trocknungskinetik. Diplomarbeit TU Graz. 99 S.

- REISS, J. (1997): Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. Berlin, Heidelberg, New York. 308.
- REUSS, M., BENKERT, ST., AEBERHARD, A., MARTINA, P., RAUSH, G.,
- RENTZELL, B. V., und SOGARI, N. (1997): Modelling and experimental investigation of a pilot plant for solar wood drying. Solar Energy Vol. 59 Nos. 4-6, 259 – 270.
- SCHÜTT, P. (1979): Abkehr von der „sauberen Wirtschaft“ – ein phytopathologisches Risiko? Forstwissenschaftliches Centralblatt 98, 309 – 316
- SCHWERTFEGER, F: (1881): Waldkrankheiten, 4. Auflage. Paul Parey-Verlag. Hamburg, Berlin. 486 S.
- SKAAR, C. (1988): Wood-water relations. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 283 S.
- SMITH, J. H. G., KOZAK, A. (1971): Thickness, moisture content and specific gravity of inner and outer bark of some Pacific Northwest trees. Forest Prod. J. 21 (2): 38 – 40.
- STEFFEN, A., LANG, A., WELLING, J. (1998): Umweltfreundliche und flexible Erzeugung von trockenem Bauholz durch Rundholztrocknung. Holzzentralblatt Nr. 40, S. 613, 618, 620
- STOCKINGER, H., OBERNBERGER, I. (1998); Langzeitlagerung von Rinde. Bericht zu Lagerversuchen von Rinde bei unterschiedlichen Randbedingungen. Teilbericht zum FWF-Forschungsprojekt P10669-ÖTE, Life-Cycle Analyse für Bioenergie, Institut für Verfahrenstechnik, Arbeitsgruppe Thermische Biomassennutzung, TU Graz.
- STREHLER, A. (1996): Wärme aus Stroh und Holz. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. 80 S.
- STUROS, J. B. (1984): Characterization and air drying of chunkwood and chips. Research Note NC-308, Forest Service - U.S.D.A. St. Paul, Minnesota.
- STUROS, J. B. (1989): Airflow resistance of chunkwood. Forest Products Journal Vol. 39, 19 – 24.
- TAMMINEN, Z. (1964): Moisture content, density and other properties of wood and bark. II Norway spruce. Institutionen För Virkeslära, Rapporter Nr. R 47, Stockholm.
- THÖRNQVIST, T., JIRJIS, R. (1990): Changes in fuel chips during storage in large piles. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report No 219.

TOMICZEK C. (2004): Gespräch zum Thema Waldschutz. Teil der Expertenbefragung anlässlich des Workshops „Energieholztrocknung im Gespräch“.

TRENDELENBURG, R., MAYER-WEGELIN, H. (1955). Das Holz als Rohstoff. Carl Hansen Verlag. München. 541 S.

WAGENFÜHR, R. (1988): Anatomie des Holzes. VEB Fachbuchverlag Leipzig (4. Auflage). 320 S.

WAUER, A. (2000): Verfahren der Rundholzlagerung. Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft. LWF-Bericht Nr. 29, 60 S.

WEBENAU VON, B., KRAUSENBOECK, B., und GÖLDNER, A. (1999): Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Bayrische Landesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Freising. 105 S.

WEINBRENNER, R. (1965): Holztrocknung, Holzwirtschaftliches Jahrbuch Nr. 15. Stuttgart. 319 S.

WEINGARTMANN, H. (1991): Hackgutttrocknung. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik. Wien. 81 S.

WIBERG, P., MOREN T.J. (1999): Moisture flux determination in wood during drying above fibre saturation point using CT-scanning and digital image processing. Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1999) 137-144 .

WILD, C., WAUER, A. (2001): Rundholz richtig Lagern! Bayrische Landesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. LWF-Merkblatt Nr. 7, November 2001.

WIMMER, R. (1998): Holzkunde. Grundlagen der Biologie, Biochemie und Physik des Holzes. Universität für Bodenkultur. Wien. 120 S.

WITTKOPF, WEBENAU, B. (1999): Lagerung und Trocknung von Hackschnitzeln. AFZ/Der Wald, 26/1999, 1396 – 1398.

ZEILINGER, J. (1992): Analyse der Wirtschaftlichkeit verschiedener Hackgutttrocknungssysteme. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur. Wien. 92 S.