



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

FEUCHTEGEHALT-ÄNDERUNGEN DES WALDFRISCHHOLZES BEI LAGERUNG IM WALD

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Urs Elber, Vision Engineering GmbH

Gallusstrasse 51, 4612 Wangen, www.visionpellets.ch

Dank: Ein spezieller Dank geht an die folgenden Personen und Institutionen, ohne deren aktive Mit-hilfe dieses Projekt nicht zu Stande gekommen wäre.

- KANTON SOLOTHURN, Amt für Wald, Jagd und Fischerei, Abteilung Wald
- Jürg von Büren, Förster, Forstrevier Untergäu in Hägendorf, Rickenbach und Wangen SO
- Markus Frey, Förster, Forstrevier Olten
- Jürg Schlegel, Kreisförster, Kanton Solothurn, Amt für Wald, Jagd und Fischerei, Abteilung Wald
- Peter Richner, Dr. sc. nat. dipl. chem, Dintikon
- Tumasch Meiler, Hortima AG, Hausen AG

Impressum

Datum: 18. November 2007

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Erneuerbare Energie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, daniel.binggeli@bfe.admin.ch

Projektnummer: 101410

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Abstract	4
1. Ausgangslage	6
2. Ziel der Arbeit	6
3. Grundlagen zur Trocknung von Holz	6
3.1 Generelle Aspekte	6
3.2 Trocknung von Energieholz	9
4. Praktische Trocknungsversuche	12
5. Ergebnisse.....	15
5.1 Arbeitshypothese	15
5.2 Einfluss Lagerart und Lagerort	16
5.2 Vergleich Buche und Fichte.....	21
5.3 Einfluss Schlagzeit und weitere Holzarten	22
6. Diskussion	23
7. Schlussfolgerungen.....	25
Symbolverzeichnis	26
Referenzen	26
Anhang 1 Bestimmung des Wassergehaltes	27
Anhang 2 Rohdaten	29

Zusammenfassung

Angesichts der durch die Emission von Treibhausgasen verursachten Klimawandels und der rasant ansteigenden Preise für fossile Brennstoffe hat Holz als nachwachsender einheimischer Brennstoff in den letzten Jahren eine eigentliche Renaissance erlebt. Im Vordergrund stehen die Verwendung von Hackschnitzeln und von Pellets, die nicht nur aus Sägemehl sondern auch aus Waldfrischholz hergestellt werden können. In jedem Fall besteht ein grosses Interesse daran, den Wassergehalt des zu verarbeitenden Holzes auf natürlichem Weg möglichst stark reduzieren zu können, da damit der Brennwert des Holzes ansteigt.

Durch eine Reihe von Lagerungsexperimenten, bei denen die Art der Lagerung, der Ort der Lagerung und der Schlagzeitpunkt variiert wurden, konnten folgende Faustregeln für eine ideale Lagerung von Rundholz abgeleitet werden. Diese Regeln werden durch Erkenntnisse aus der Literatur gestützt:

- Rundholz sollte in möglichst **kurzen** Abschnitten gelagert werden, da die Austrocknung über die Stirnseiten am schnellsten erfolgt.
- Je **dünnere** die Rundhölzer sind, umso schneller trocknen diese
- Eine vollständige oder zumindest teilweise **Entrindung** beschleunigt die Trocknung
- Die Polter müssen auf einer **trockenen** Unterlage errichtet werden und über ausreichende **Bodenfreiheit** verfügen, d.h. nicht direkt auf den Boden aufgeschichtet werden und sollten **besont** sein
- Der Schlagzeitpunkt ist von untergeordneter Bedeutung, d.h. es können während des **ganzen** Jahres Polter angelegt werden
- Die Trocknung ist in der **Sommersaison** am effizientesten
- Die **Abdeckung** der Polter lohnt sich erst 4-8 Monate nach der Poltererstellung. Mit der Abdeckung kann auch langfristig ein Wiederanstieg des Wassergehaltes verhindert werden.
- Die **Lagerung im Bestand** mit Ästen bringt wenig bis keine erkennbaren Vorteile
- Der Wassergehalt von Fichtenholz wird stark durch die **Regenmenge** beeinflusst. Es lohnt sich, das Fichtenholz am Ende einer längeren Trockenperiode einzusammeln und nicht während oder kurz nach einer Regenperiode.
- **Fichte** erreicht bei Auslagerung im Frühling nach **3-5 Monaten** einen minimalen Wassergehalt. Ohne Abdeckung steigt der Wert nachher wieder an.
- **Buche** erreicht bei Auslagerung im Frühling nach **8-9 Monaten** einen minimalen Wassergehalt, der anschliessend in etwa konstant bleibt.

Abstract

The emission of greenhouse gases which leads to climate change and the ever increasing prices for fossile fuels lead to dramatic increase in the interest to use wood for heating since it is a renewable source of energy. The focus is on using wood in the form of wood chips or as wood pellets. The pellets can be made of saw dust or from fresh wood. Regardless of the sort of product, the water content of the raw material has to be reduced as much as possible by natural drying processes since the heating value will increase as the water content decreases.

The report describes a number of experiments in which the type of storage, the place of storage and the time when the storage was started were systematically varied. Based on the results and findings from the literature the following rules of thumb for the most effective way to dry lumber were derived:

- The length of the lumber should be **as short as possible** since drying via face side is most effective.
- The **smaller diameter** of the lumber, the faster the drying process will proceed
- The **removal of the bark** increases the drying process
- The lumber should be stored on a **dry ground** and sufficient space between the lumber and the ground should be assured. Ideally the place is **sunny**

- The time of harvesting the lumber is of less importance. It is possible to start the drying process **any time** during the year
- The drying process is fastest during the **summer season**
- **Covering** the lumber stacks is only necessary after 4-8 months. The covering has the advantage that the moisture content will not start to increase again.
- The storage of **complete trees** has not resulted in any detectable advantages
- The moisture content of spruce is highly influenced by the **amount of rain**. It is highly recommended to collect spruce at the end of dry period and not in rainy period
- **Spruce** will reach a minimal moisture content after **3-5 month** if the storage has started in spring. Without coverage, the moisture content will afterwards start to rise again.
- **Beech** will reach a minimal moisture content after **8-9 month** if the storage was started in spring. Afterwards, the moisture content remains more or less stable.

1. Ausgangslage

Die Klimaproblematik und die begrenzten Reserven an fossilen Brennstoffen führen zu einer vermehrten Nachfrage nach erneuerbaren Energieträgern. Eine attraktive Möglichkeit stellen Holzpellets-Heizungen dar, die denn auch in den letzten Jahren stark an Marktanteilen gewonnen haben. Heute werden die Pellets fast ausschliesslich aus Sägemehl hergestellt. Es ist absehbar, dass in wenigen Jahren in der Schweiz nicht mehr ausreichend Sägemehl zur Verfügung stehen wird, um den wachsenden Bedarf an Pellets zu decken. Die Vision Engineering hat deshalb unter dem Label „Vision Wald“ ein Konzept erarbeitet, das die Herstellung von Pellets aus frischem Waldholz vorsieht, welches nicht für anforderungsreichere Anwendungen eingesetzt werden kann.

Innerhalb der Logistik-Kette für die Produktion von Waldpellets ist der Feuchtegehalt des zu verarbeitenden Holzes ein massgeblicher Faktor. Um auf den vorgeschriebenen Wassergehalt von 8-10% für Pellets oder von Energieholz in anderen Formen zu kommen, muss die überschüssige Feuchte möglichst energieeffizient eliminiert werden.

2. Ziel der Arbeit

Ziel des Projektes ist die Ermittlung der optimalen Lagerdauer und Lagermethodik für frisch geschlagenes Holz im Wald und deren wirtschaftliche Folgen für die Pelletierung. Dabei darf die Lagerung nicht zu lange andauern, da ansonsten der Feuchtegehalt nach einem anfänglichen Absinken wieder ansteigt und das Holz zudem an Brennwert infolge mikrobiologischem Abbaus verliert. Bei einer optimalen Lagerung werden der Trocknungsaufwand und damit der Fremdenergiebedarf verringert. Zudem sinken aufgrund des reduzierten Gewichtes die Transportkosten. Oft hat trockeneres Holz auch einen positiven Einfluss auf Lebensdauer und Wartungskosten von Feuerung und Kessel sowie auf die Rauchgase.

Die Resultate des Projektes sollen als Grundlage für die Entwicklung der Logistikkette vom Wald zum Pelletswerk dienen. Zudem können die Resultate auch für die Herstellung von Hackschnitzeln mit reduziertem Feuchtegehalt und somit erhöhtem Brennwert verwendet werden.

3. Grundlagen zur Trocknung von Holz

3.1 GENERELLE ASPEKTE

Der Trocknungsgrad von Holz lässt sich durch zwei verschiedene Grössen beschreiben, die Holzfeuchte u und den Wassergehalt w [5]. Die Holzfeuchte ist der Quotient zwischen dem enthaltenen Wasser m_w und der Trockenmasse m_{atro} des Holzes (Gleichung 1) und wird häufig in der Holzbe- und verarbeitenden Industrie verwendet:

$$u = \frac{m_w}{m_{atro}} \quad \text{in \%} \quad (1)$$

Der Wassergehalt entspricht dem Quotienten zwischen dem enthaltenen Wasser m_w und der Gesamtmasse des feuchten Holzes m_f (Gleichung 2) und wird oftmals im Zusammenhang mit Energieholz verwendet:

$$w = \frac{m_w}{m_f} = \frac{m_w}{m_{atro} + m_w} \quad \text{in \%} \quad (2)$$

Holzfeuchte und Wassergehalt lasse sich über die folgende Beziehung (Gleichung 3) ineinander umwandeln:

$$u = \frac{w}{1-w} \quad \text{bzw.} \quad w = \frac{u}{1+u} \quad (3)$$

Ursache für das Interesse an der Holzfeuchtigkeit ist die Tatsache, dass für Holz ein kritischer Feuchtigkeitsbereich besteht, innerhalb dessen das Holz durch Pilze befallen wird, welche die Holzstruktur nachteilig verändern. Diese Veränderungen können sowohl rein ästhetischer Natur sein (Dunkelfärbung), als auch die mechanischen Eigenschaften betreffen, beide für die Verwendung von Holz zu Konstruktionszwecken von eminenter Bedeutung. Der angesprochene kritische Feuchtigkeitsbereich

reicht von ca. 25% bis 120% Holzfeuchtigkeit, wobei es je nach Holzsorte Unterschiede gibt. An der unteren Grenze dieses Bereiches liegt die Fasersättigung des Holzes, d.h. das Wasser ist chemisch-physikalisch an die Zellwände gebunden. Der obere Grenzwert wird durch die Wassersättigung bestimmt, bei der die Zellhohlräume vollständig mit Wasser gefüllt sind. Die Lagerungsbedingungen müssen so ausgestaltet werden, dass die Holzfeuchtigkeit dauernd darüber liegt, was mit der Nasslagerung (Beregnung) erreicht wird, oder das Holz muss rasch unterhalb den Wert der Fasersättigung getrocknet werden und dort gehalten werden. Dabei kommen praktisch immer forcierte Trocknungsmethoden zum Einsatz, bei denen ein Optimum zwischen Trocknungsgeschwindigkeit, Formstabilität des Holzes und Kosten gesucht wird. Die Holzfeuchtigkeit ist aber auch für Energieholz wichtig, da der Brennwert mit fallender Holzfeuchtigkeit ansteigt und der durch Pilze induzierte Abbau des Holzes den Brennwert negativ verändert.

Der Trocknungsprozess wird durch die Art des Holzes und seinen Aufbau, sowie durch atmosphärische Einflüsse bestimmt. Holz besteht zu 85-95% aus longitudinal angeordneten Zellen, durch die das Wasser einfach transportiert werden kann. Nur 5-15% der Zellen sind radial angeordnet und ermöglichen einen Wassertransport in Querschnittsrichtung. Generell gilt, dass die Trocknungsgeschwindigkeit mit zunehmender Dichte des Holzes abnimmt, d.h. Laubholz trocknet prinzipiell langsamer als das spezifisch leichtere Nadelholz.

Die für die Trocknung wichtigsten Umweltfaktoren sind die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit. Bei ansteigender Temperatur nimmt die Diffusionsgeschwindigkeit des Wassers im Holz zu und es kann schneller Wasser aus dem Innern des Holzes in die Randzonen nachgeliefert werden, aus denen das Wasser dann verdunstet. Der Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit rF und Trocknungsrate lässt sich durch folgende Beziehung beschreiben [1]:

$$\text{Trocknungsrate} = \text{Konstante} \cdot (100 - rF)$$

Sinkt also beispielsweise die rF von 80% auf 60%, so verdoppelt sich die Trocknungsrate. Die Windgeschwindigkeit hat vor allem bei hohen Holzfeuchtenheiten von 40% und mehr einen grossen Einfluss (vgl. Bild 1). Die Trocknung ist dann stark davon abhängig, wie schnell das Wasser von der Holzoberfläche wegtransportiert werden kann, da sich bei der üblichen Stapelung von geschnittenen Stämmen zwischen den einzelnen Brettern ein Mikroklima mit stark erhöhter Feuchtigkeit ausbilden kann, wenn das verdunstete Wasser nicht abtransportiert werden kann. Ähnliche Überlegungen gelten zweifelsohne auch für die Stapelung von ungeschnittenen Stämmen für die Energieholzgewinnung. Unterhalb 30% Holzfeuchtigkeit nimmt dieser Einfluss stark ab und bei einer Feuchtigkeit von 20% ist er praktisch zu vernachlässigen.

Eine andere wichtige Grösse ist die Gleichgewichtsfeuchtigkeit, die sich zwischen Holz und der rF der Atmosphäre bei einer bestimmten Temperatur einstellt. Eine Zusammenstellung der Beziehung ist in Tabelle 1 aufgeführt. Aufgrund dieser Daten wird ersichtlich, dass unterhalb der Fasersättigung bei Temperaturen von 0°C bis 30°C selbst bei einer rF von 95% die Gleichgewichtsfeuchtigkeit unterhalb von 30% liegt. Der Trocknungsprozess wird umso schneller verlaufen, je grösser die Differenz der effektiven Holzfeuchtigkeit und der Gleichgewichtsfeuchtigkeit ist.

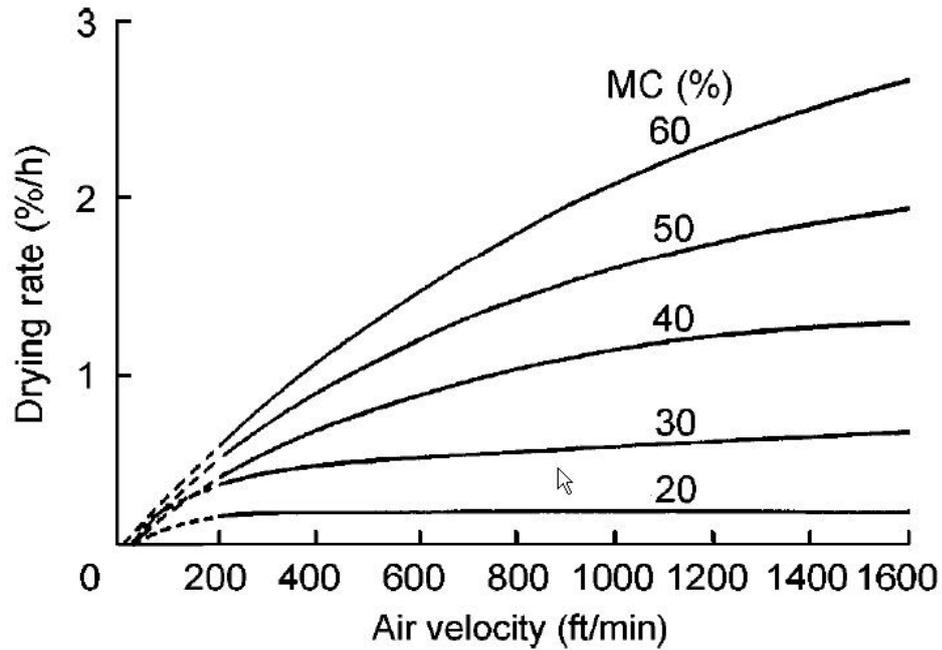


Bild 1 Abhängigkeit der Trocknungsgeschwindigkeit von Holz in Funktion der Holzfeuchtigkeit (Moisture Content MC) und der Windgeschwindigkeit [1]

Tabelle 1: Gleichgewichtswert für die Holzfeuchtigkeit u in Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur [4]

Temperature		Moisture content (%) at various relative humidity values																		
(°C	(°F))	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1	(30)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4	(40)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0	(50)	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6	(60)	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1	(70)	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7	(80)	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2	(90)	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8	(100)	1.2	2.3	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3	(110)	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9	(120)	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4	(130)	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0	(140)	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6	(150)	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1	(160)	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7	(170)	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2	(180)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8	(190)	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3	(200)	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9	(210)	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4	(220)	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			
110.0	(230)	0.3	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.3	6.0	6.7						
115.6	(240)	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	4.6								
121.1	(250)	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9										
126.7	(260)	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4												
132.2	(270)	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4													

3.2 TROCKNUNG VON ENERGIEHOLZ

Die Mehrzahl der in der Literatur beschriebenen Ergebnisse bezieht sich auf die Trocknung von Konstruktionsholz. Allerdings lassen sich fallweise auch aus diesen Arbeiten Erkenntnisse für Energieholz gewinnen. Nur vereinzelt finden sich spezifische Untersuchungen, die sich mit der Thematik der Vortrocknung von Energieholz befassen, wobei meist Nadelhölzer im Vordergrund standen. Im Folgenden werden die wichtigsten Resultate zusammengefasst.

3.2.1 Rundholzlagerung von Fichte

Die Holzfeuchteverteilung über den Stammquerschnitt ist für die Fichte nicht gleichmässig: Das Kernholz hat eine konstante Holzfeuchte von ca. 35%, die im Splintholz auf über 200% ansteigt (vgl. Bild 2). Das feuchte Splintholz ist beim frischgefallten Holz als dunkler Ring zu erkennen. Im Laufe der Lagerung kommt es zu einem Austrocknen des Splintholzes, während die Holzfeuchte des Kernholzes praktisch konstant bleibt. Der Übergang von Splint- zu Kernholz ist recht scharf und muss bei der Probenahme für die Feuchtigkeitsbestimmung berücksichtigt werden. Der Feuchteverlauf über die Länge des Stammes ist ebenfalls sehr ungleichmässig, da das Holz primär von den Stirnseiten her austrocknet (vgl. Bild 3).

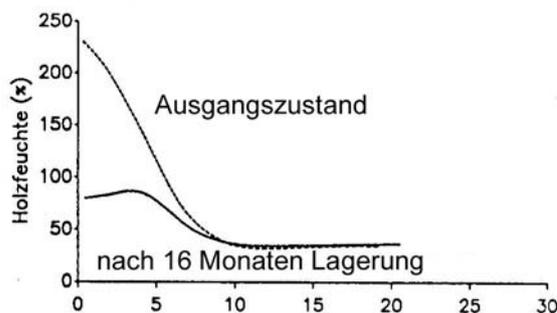


Bild 2 Feuchteverlauf über den Stammquerschnitt von Fichtenholz von der Aussenseite (links) in Richtung Mark, x-Achse: Distanz vom Kambium in cm [6]

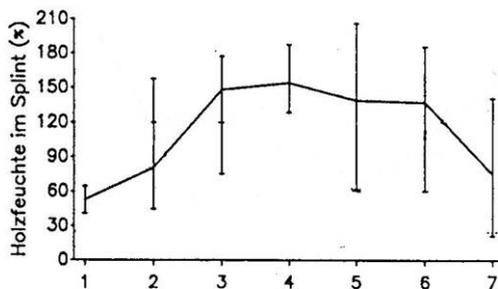


Bild 3 Feuchteverlauf im Splint über die Stammlängsachse von frischem Fichtenholz. Der Abstand zwischen den einzelnen Stammscheiben, die analysiert wurden, beträgt 1 m [6]

Aus verschiedenen Untersuchungen wird klar, dass die Austrocknungsgeschwindigkeit wesentlich durch die Tatsache beeinflusst wird, ob das Holz mit oder ohne Rinde gelagert wird. Generell wird in diesen Arbeiten empfohlen, die Nasslagerung des Holzes mit Rinde zu machen, da diese ein schnelles Austrocknen verhindert und so allfällige Störungen in der Berechnungsanlage überbrückt werden können. Bei der Lagerung von Stämmen mit Rinde auf Poltern im Freien nahm die Holzfeuchte im Splint innerhalb von 11-16 Monaten je nach Lagerort in der Schweiz um 13 bis 86% ab [7]. Innerhalb der Lagerorte streuten die Werte für die einzelnen Probestämme sehr stark, so wurden am Ende der Lagerzeit Holzfeuchten im Splintholz von 95-149% gefunden. Dies weist darauf hin, dass der Prozess sehr unregelmässig verläuft und eventuell durch lokale Schädigungen der Rinde stark beeinflusst werden kann.

Eine sehr aufschlussreiche Arbeit wurde 2002 in Deutschland publiziert, bei der es um die Vortrocknungsmöglichkeiten von Rundholz durch eine gezielte Zwischenlagerung ging [8]. Das Fichtenholz

war nicht für energetische sondern konstruktive Zwecke gedacht, trotzdem sind einige der Resultate auch für Energieholz sehr nützlich. Die Bäume wurden im Dezember 1999 gefällt und ein Teil davon wurde sofort entastet und entrindet. Andere Bäume wurden zuerst noch einer Ganzbaumlagerung unterzogen. Es erfolgte eine Feuchtemessung zu Beginn, dann eine zweite Messung im August und eine dritte Messung im Oktober 2000. Eine Übersicht der Messwerte ist in Tabelle 2 dargestellt. Daraus lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Die Anfangsfeuchtigkeit im Splintholz streut viel stärker als im Kernholz, wo sie fast konstant ist
- Bereits nach 8 Monaten Lagerung nimmt die Gesamt-Holzfeuchtigkeit um ca. 20% ab und die Streuung zwischen den einzelnen Rundhölzern nimmt um eine Grössenordnung ab

Aus der umfassenden statistischen Analyse aller Resultate, d.h. auch der Proben die unterschiedlich lang einer Ganzbaumlagerung unterzogen wurden, bevor sie entrindet auf einem Polter gelagert wurden:

- Die der Rundholzlagerung vorgeschaltete Ganzbaumlagerung hatte keinen Einfluss auf die Ausgangsfeuchtigkeit
- Die Trocknungsgeschwindigkeit des Rundholzes nimmt bei einem Lagerungsbeginn in den Sommermonaten zu
- Der Lagerungsort (kreuzweise aufgeschichtete Lagerpolter, einmal auf einem sonnen- und windexponierten Plateau, einmal halbschattig und windgeschützt in einer Tallage) hatte keinen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit
- Je grösser der mittlere Durchmesser eines Rundholzes, umso kleiner die Trocknungsgeschwindigkeit, die Ausgangsfeuchtigkeit wurde aber durch den Durchmesser nicht beeinflusst

Generell wurden die erreichten Trocknungsraten als eher gering bewertet, was aber auf die in diesem Jahr herrschende nass-kalte Witterung zurück geführt wurde. Der starke Einfluss der Witterung wurde in allen Untersuchungen immer wieder erwähnt und ist dafür verantwortlich, dass es relativ schwierig ist, Untersuchungen aus unterschiedlichen Jahren miteinander zu vergleichen.

Tabelle 2 Holzfeuchtigkeit von entrindeten Fichtenstämmen [8]

		n	Mittelwert	Standardabweichung
Dezember 1999	Gesamt	226	71.43	55.63
Dezember 1999	Splint	109	109.26	60.25
Dezember 1999	Kern	117	36.19	5.05
August 2000	Gesamt	12	52.04	6.02
Oktober 2000	Gesamt	12	50.68	5.76

In verschiedenen Arbeiten wurde immer wieder der Einfluss des Lagerortes untersucht. Auch wenn die Aussagen teilweise widersprüchlich ausfallen, scheinen sich die Autoren zumindest darüber einig zu sein, dass ein idealer Polter auf einem trockenen Standort ohne stehende Nässe erstellt werden sollte (vgl. z.B. [9]).

In Skandinavien wurde eine Studie durchgeführt, bei der Energieholz mit Folie abgedeckt von Mai bis September gelagert wurde und dabei eine Reduktion des Wassergehaltes von 42% auf 21% erreicht wurde [10]. Im Winter erfolgte dann eine Wiederbefeuchtung des Holzes.

Ein grösseres Projekt unter dem Titel „Energieholztrocknung“ wurde auch in Österreich durchgeführt [11]. Auch in diesem Bericht wird auf den positiven Einfluss einer Entrindung auf die Trocknungsgeschwindigkeit hingewiesen. Für Nadelhölzer wird zudem darauf hingewiesen, dass die für die Energieholzgewinnung wichtigen jüngeren Bäume und die Kronenanteile mit einem höheren Wassergehalt zu rechnen ist, da der Anteil an Splintholz höher ist. Ein Einfluss des Schlagzeitpunktes auf den Ausgangswassergehalt konnte nicht nachgewiesen werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde auch der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Heizwert des Holzes analysiert. Wie in Tabelle 3 gezeigt, nimmt der Heizwert um 26% zu, wenn der Wassergehalt um 10% reduziert wird. Diese Zahlen belegen das grosse ökonomische Potential, den ein optimiertes Trocknungsverfahren bietet. Auf den Trockensubstanzverlust infolge mikrobiologischen Abbau wird in der Studie ebenfalls eingegangen. Wie an anderen Stellen wird darauf hingewiesen, dass bei Wassergehalten von weniger als 30% dieser Abbau praktisch zum Stillstand kommt. Wird nasses Holz im Freien gelagert muss man mit 1.8-4% Abbau pro Monat rechnen.

Für die Trocknung von Rundholz in Poltern werden folgende Empfehlungen gemacht:

- Luftige Bauweise (insbesondere wird grossen Wert auf Bodenfreiheit gelegt)
- Windige und sonnige Standorte
- Zumindest eine Teilentründung vornehmen
- Abdeckung der Polter über die Wintersaison

Gemäss Aussage der Autoren ist es unter Beachtung dieser Punkte möglich, innerhalb einer Sommersaison Wassergehalte von weniger als 25% zu erreichen.

Tabelle 3 Heizwerterhöhung (bezogen auf MJ/kg) durch Trocknung [11]. Ausgangswassergehalt: 50%

Trocknung um x%	Zunahme Heizwert
10%	26%
20%	52%
30%	78%
40%	104%

4. Praktische Trocknungsversuche

Für die praktischen Trocknungsversuche wurde am Jurasüdfuss an unterschiedlichen Standorten und zu unterschiedlichen Zeitpunkten Energieholz geschlagen. Das frisch geschlagene Waldholz wurde direkt im Wald unter unterschiedlichen Bedingungen gelagert. In periodischen Abständen wurde der Wassergehalt des Holzes gemessen (vgl. dazu die Beschreibung im Anhang 1). Insgesamt wurden 16 Polter angelegt, deren Lage, Lagerart Schlagzeit und Holzsortiment in Tabelle 4 zusammengefasst ist. Am Standort Untergäu wurden alle Polter am 3. April 2006 mit je einer Laubholzsorte (Buche) und einem Nadelholz (Fichte) erstellt. Besonnung und Lagerart wurden variiert, mit dem Ziel deren Einfluss auf das Trocknungsverhalten zu untersuchen (vgl. auch Bild 4 und Bild 5). Im Unterschied dazu wurden am Standort Olten im Zeitraum Mai 2006 bis Februar 2007 insgesamt 10 Polter mit unterschiedlichen Holzsorten angelegt. Diese Versuchsreihe soll den saisonalen Einfluss des Schlagdatums auf das Trocknungsverhalten zeigen. Das Holz wurde in allen Fällen in Rinde gelagert.

Tabelle 4 Übersicht Polter

Schlagort	Polter	Schlagzeit	Holzart	Standort	Lagebeschreibung
Untergäu	1	3. 4. 2006	Buche, Fichte	E 628.271 N 242.542	Kreuzweise geschichtet, 50% besonnt
	2	3. 4. 2006	Buche, Fichte	E 628.284 N 243.544	Normal gelagert, 50% besonnt
	3	3. 4. 2006	Buche, Fichte	E 628.294 N 243.556	Gedeckt gelagert, 50% besonnt
	4	3. 4. 2006	Buche, Fichte	E 628.369 N 243.604	Im Bestand mit Ästen, 50% besonnt
	5	3. 4. 2006	Buche, Fichte	E 630.683 N 244.358	Normal gelagert, 100% besonnt
	6	3. 4. 2006	Buche, Fichte	E 629.266 N 243.779	Normal gelagert, 0% besonnt
Olten	1	2. 5. 2006	Buche, Eiche, Ahorn		Normal gelagert, 50% besonnt
	2	9. 6. 2006	Buche, Fichte, Eiche		Normal gelagert, 50% besonnt
	3	30. 6. 2006	Buche, Lärche		Normal gelagert, 50% besonnt
	4	4. 8. 2006	Buche, Espe		Normal gelagert, 50% besonnt
	5	5. 9. 2006	Buche, Espe, Tanne		Normal gelagert, 50% besonnt
	6	2. 10. 2006	Ahorn, Espe		Normal gelagert, 50% besonnt
	7	30. 10. 2006	Buche		Normal gelagert, 50% besonnt
	8	6. 12. 2006	Buche, Eiche, Ahorn		Normal gelagert, 50% besonnt
	9	11. 1. 2007	Espe, Eiche		Normal gelagert, 50% besonnt
	10	20. 2. 2007	Eiche, Hartbuche		Normal gelagert, 50% besonnt



Polter 1 Kreuzweise geschichtet, 50% besonnt



Polter 2 Normal gelagert, 50% besonnt



Polter 6 beschattet (Schlucht)



Kennzeichnung der Polter

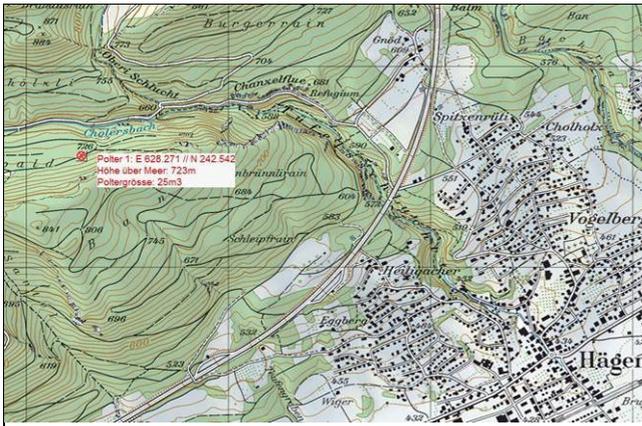


Polter 3 Gedeckt gelagert, 50% besonnt

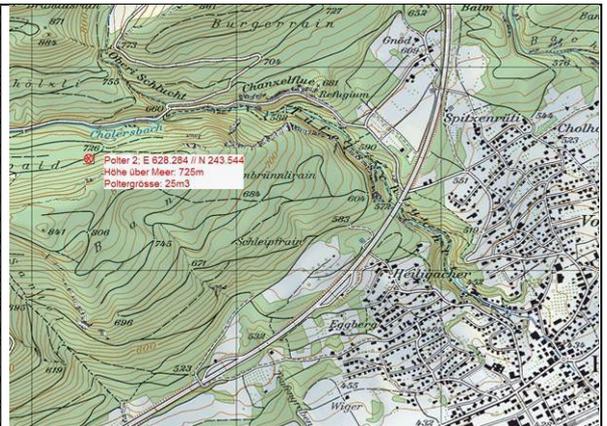


Polter 5 Normal gelagert, 100% besonnt

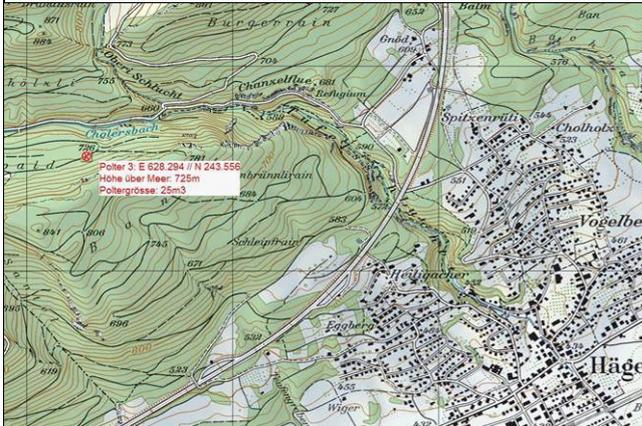
Bild 4 Fotos der Polter 1, 2, 3, 5 und 6 am Standort Untergäu



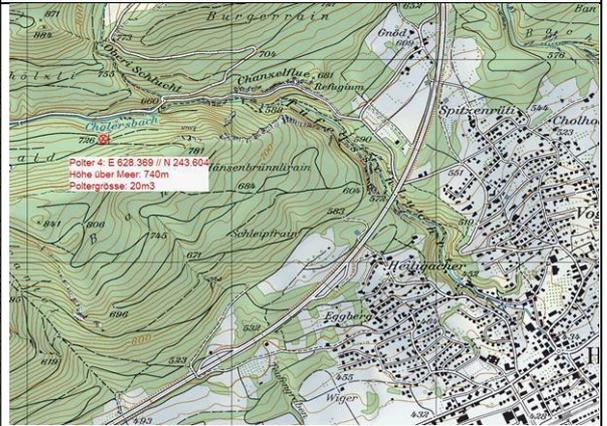
Standort Polter 1 FR Untergräu



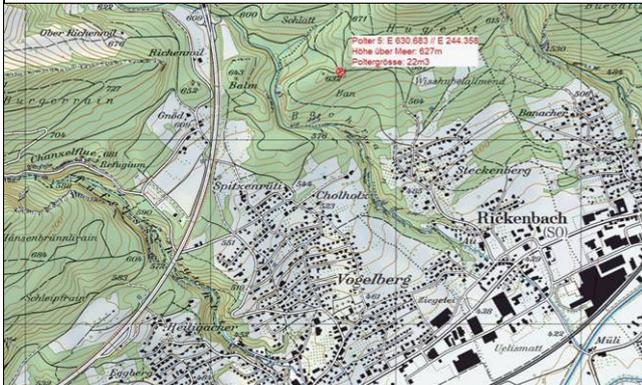
Standort Polter 2 FR Untergräu



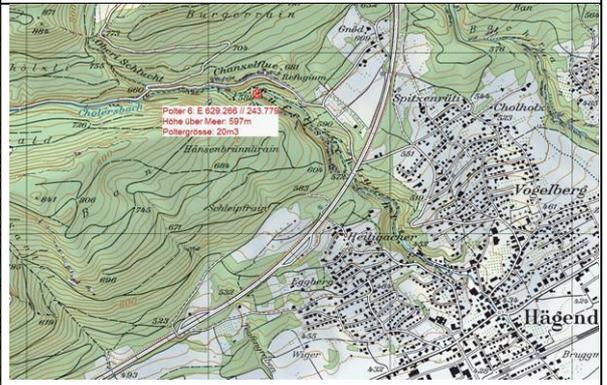
Standort Polter 3 FR Untergräu



Standort Polter 4 FR Untergräu



Standort Polter 5 FR Untergräu



Standort Polter 6 FR Untergräu

Bild 5 Standorte der Polter im Untergräu

5. Ergebnisse

5.1 ARBEITSHYPOTHESE

Aus Vorversuchen, deren Resultate in Tabelle 5 beschrieben sind, wurde die Hypothese aufgestellt, dass der Trocknungsverlauf von Rundholz in drei Phasen unterteilt werden kann: einen anfänglichen relativ starken Abfall des Wassergehaltes, gefolgt von einer Phase relativer Konstanz und einem anschließenden Wiederanstieg (vgl. Bild 6).

Messungen Proben Januar 2004 bis Januar 2006

(Dicke in cm, Wassergehalt in%)

Probendatum	Probe 1 Bu, 20	Probe 2 Bu, 20	Probe 3 BU, 100	Probe 4 Fi/Ta, 20	Probe 5 Bu, 20	Probe 6 Fi, 100	Probe 7 Fi, 30	Probe 8 Bu, 50	Probe 9 Bu, 50	Probe 10 Bu, 100
Jan 04		46.00								
Feb 04				50.00						
Mrz 04			46.00			50.00				
Nov 04	46.00									
Jan 05					46.00					46.00
Mrz 05							50.00		46.00	
Aug 05	37.72	26.73	29.50	30.63	39.42	29.55				
Dez 05								46.00		
Jan 06	31.61	33.74	30.10			24.29	24.11	44.22	31.97	32.51

Tabelle 5 Resultate Vorversuche

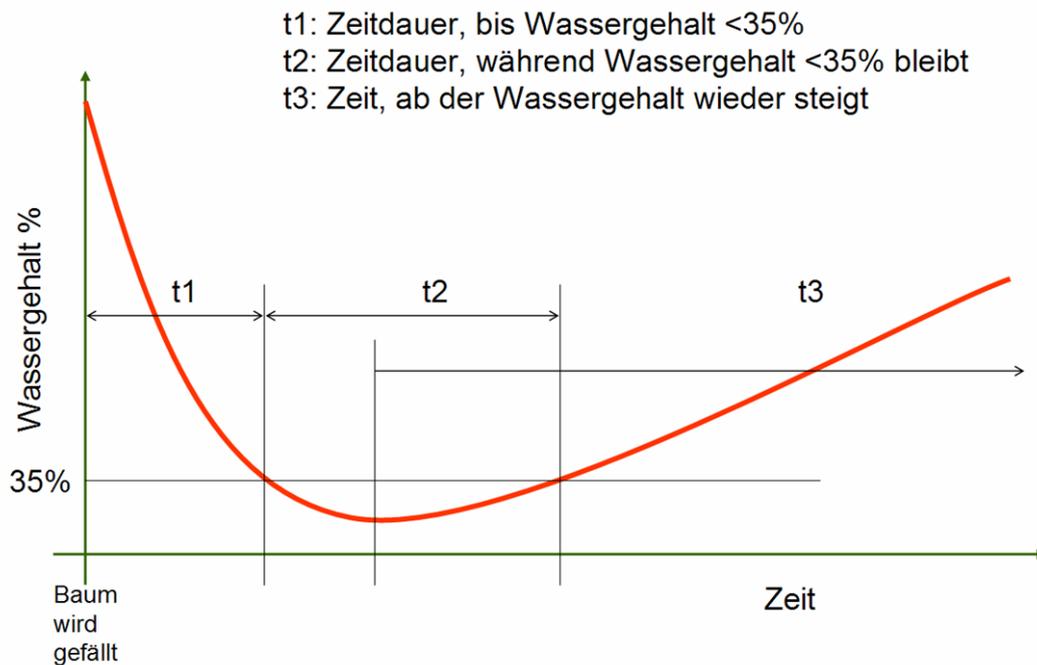


Bild 6 Erwarteter Trocknungsverlauf

Idealerweise wird das Holz im Zeitraum t2 geerntet, da man bei einer energetischen Nutzung des Holzes in dieser Phase den geringsten Wassergehalt und somit den höchsten Heizwert hat. Die folgenden Untersuchungen wurden durchgeführt, um diese Hypothese verifizieren zu können und t2 für unterschiedliche Holzarten bestimmen zu können.

5.2 EINFLUSS LAGERART UND LAGERORT

Die Versuchsreihe Untergäu diente dazu, den Einfluss von Lagerart und Lagerort auf das Trocknungsverhalten zu verfolgen. Eine Zusammenfassung der Resultate über die gesamte Lagerungszeit ist für Fichte und Buche in den Tabellen 6 und 7 zusammengefasst. Mittelwerte und Standardabweichungen aller Polter sind zudem in den Bilder 7 und 8 dargestellt. Generell ist der Trocknungsverlauf nicht stetig, sondern grösseren Schwankungen unterworfen und zwar sowohl von Probenahme zu Probenahme als auch von Polter zu Polter. Offensichtlich sind die Art der Lagerung und das Ausmass der Besonnung nicht relevant genug, um andere Effekte, die den Trocknungsvorgang beeinflussen, unterdrücken zu können.

Tabelle 6 Verlauf des Wassergehaltes w in % des Buchenholzes an den 6 Standorten im Untergäu; m : Mittelwert, s : Standardabweichung

	7.4.06	21.4.06	5.5.06	22.5.06	8.6.06	21.6.06	21.7.06	18.8.06	29.9.06	30.1.07	28.3.07
P1	38.3	40.1	39.2	37.6	36.5	38.4	35.6	32.6	34.3	35.1	36.1
P2	38.5	44.3	41.3	34.1	36.4	33.9	37.2	38.1	37.7	36.8	37.3
P3	38.2	36.6	38.5	37.1	42.3	35.0	32.9	35.4	34.8	28.5	32.7
P4	37.2	37.2	34.6	33.0	39.3	33.3	33.2	33.0	39.2	32.8	32.5
P5	39.1	39.4	35.4	29.3	29.4	36.1	34.1	36.7	38.9	29.8	31.0
P6	38.7	45.2	38.3	37.9	43.5	30.8	42.6	39.5	38.1	33.2	33.0
m	38.3	40.4	37.9	34.8	37.9	34.6	35.9	35.9	37.2	32.7	33.8
s	0.7	3.6	2.5	3.4	5.1	2.6	3.6	2.8	2.1	3.1	2.4

Tabelle 7 Verlauf des Wassergehaltes w in % des Fichtenholzes an den 6 Standorten im Untergäu; m : Mittelwert, s : Standardabweichung

	7.4.06	21.4.06	5.5.06	22.5.06	8.6.06	21.6.06	21.7.06	18.8.06	29.9.06	30.1.07	28.3.07
P1	42.7	54.1	53.1	48.6	50.0	46.4	45.2	48.0	45.0	54.2	52.6
P2	48.2	56.2	49.1	47.9	47.4	30.4	50.7	47.6	46.4	54.0	57.6
P3	46.9	56.5	58.4	44.7	41.4	22.9	47.7	46.3	35.5	36.7	22.6
P4	47.3	37.1	38.9	40.1	38.5	35.2	35.0	41.8	38.5	43.2	36.5
P5	46.6	49.0	44.4	36.8	40.3	32.3	37.2	35.5	30.1	38.5	36.7
P6	42.8	49.6	48.2	57.5	38.0	42.3	26.4	26.5	28.5	45.8	39.5
m	45.7	50.4	48.7	45.9	42.6	34.9	40.4	39.3	37.3	45.4	40.9
s	2.4	7.3	6.7	7.3	4.9	8.4	9.1	9.3	7.4	7.5	12.6

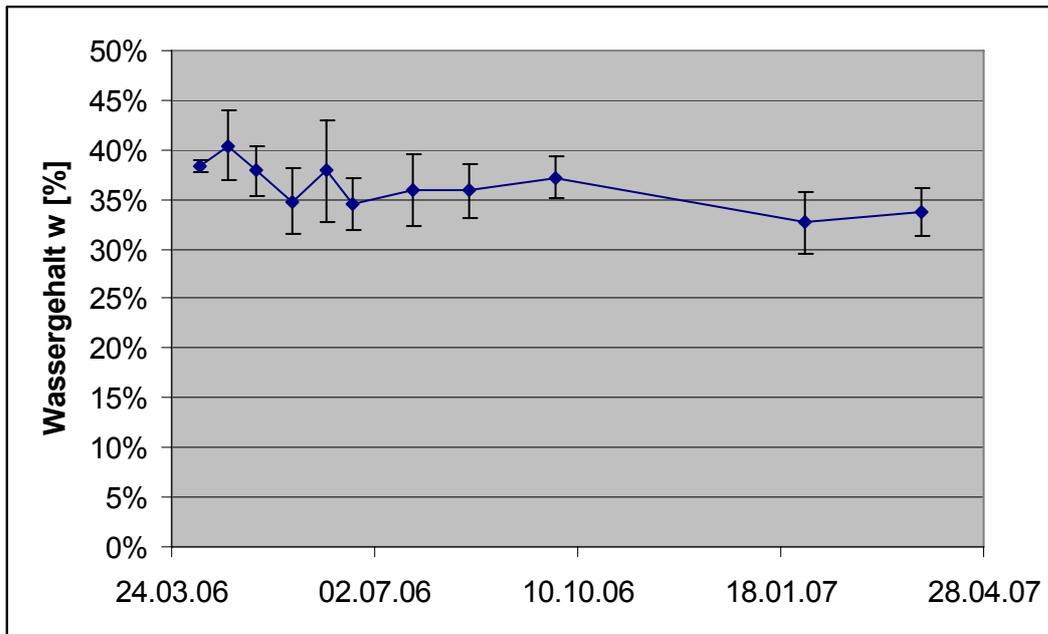


Bild 7 Mittelwert und Standardabweichung des Wassergehaltes w des Buchenholzes an den 6 Standorten im Untergräu

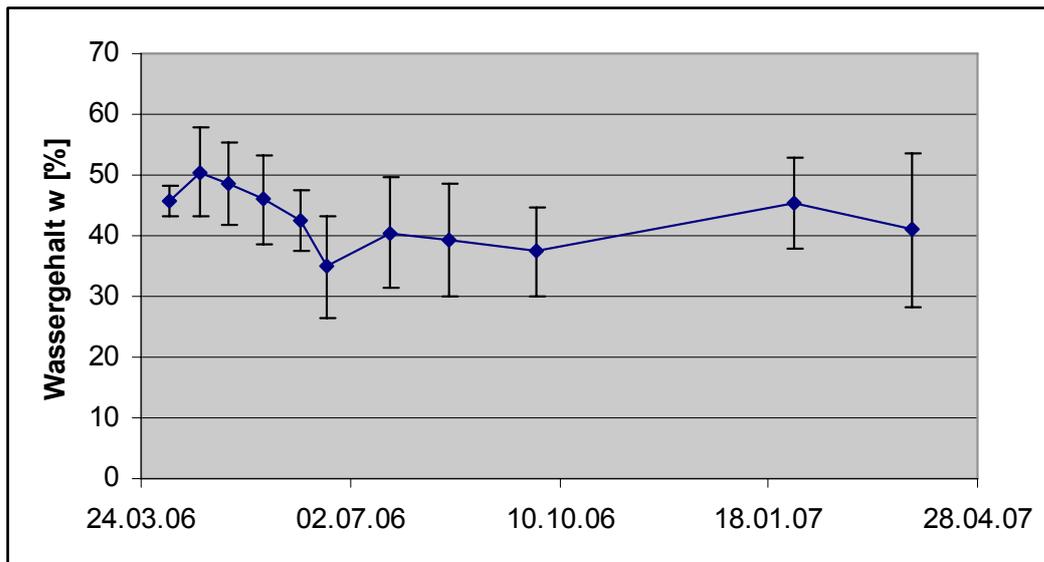


Bild 8 Mittelwert und Standardabweichung des Wassergehaltes w des Fichtenholzes an den 6 Standorten im Untergräu

Ein gutes Beispiel dafür sind die beiden Polter 1 (kreuzweise geschichtet) und 2 (normal geschichtet). Beide wurden in unmittelbarer Nähe voneinander aufgebaut, d.h. Besonnung und Bodenbeschaffenheit waren praktisch identisch. Trotzdem lässt sich weder für die Buche noch für die Fichte ein signifikanter Vorteil der kreuzweisen Schichtung erkennen (vgl. Bild 9), die mit einem erheblichen Mehraufwand bei der Erstellung verbunden ist. Ähnliche Resultate wurden in der bereits zitierten Studie [8] beschrieben, wo man aber im Unterschied zu diesem Projekt mit entrindetem Material arbeitete.

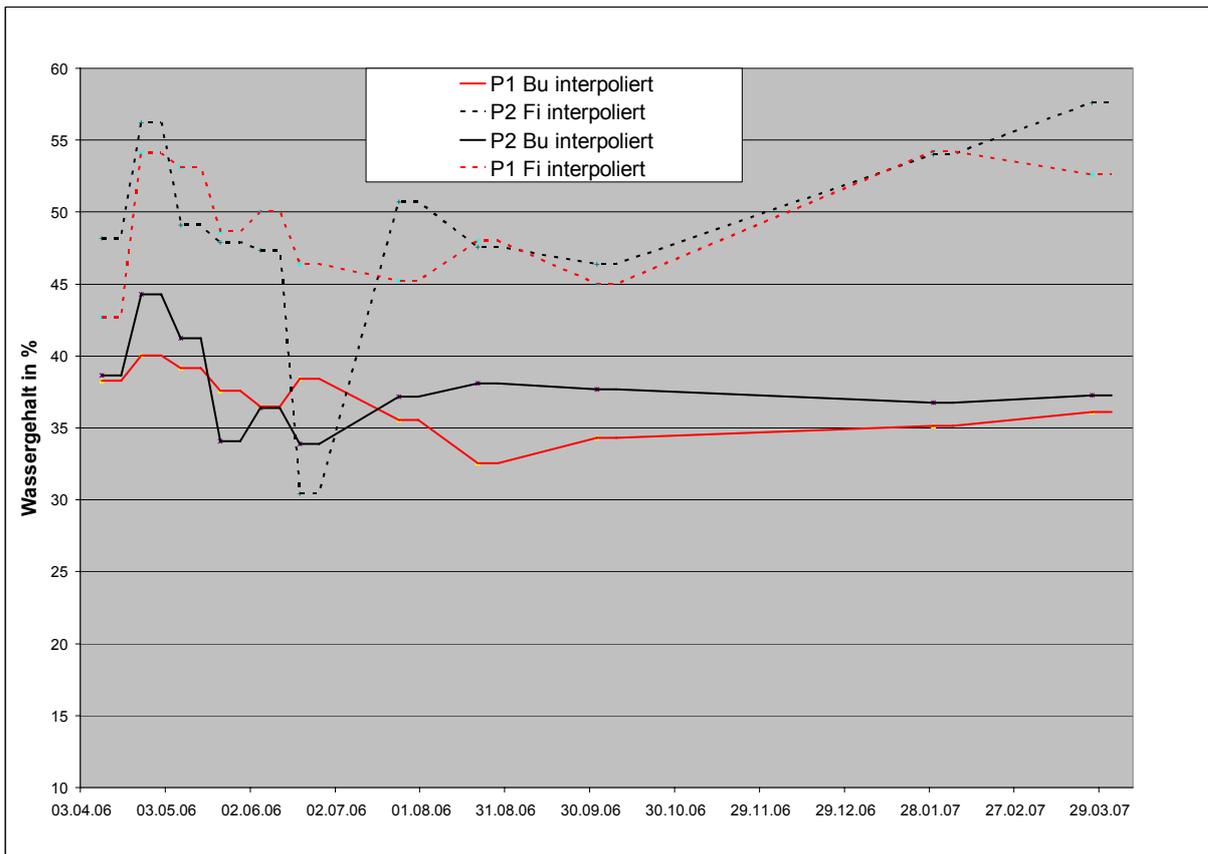


Bild 9 Vergleich Polter 1 (kreuzweise Schichtung) und Polter 2 (normale Lagerung)

Interessant ist der Vergleich dieser beiden Polter mit dem abgedeckten Polter 3, die alle am selben Standort liegen, der zu 50% besonnt ist und über einen humusreichen und feuchten Untergrund verfügt (Bild 10). Die Abdeckung des Polters 3 erfolgte ein Monat nach dem Fälldatum mit dem Toptex-Kompostschutzfließ (Luftaustausch bei gleichzeitiger Ableitung des Regenwassers). Auch hier ist zumindest in den ersten Monaten kein klarer Vorteil der Abdeckung zu erkennen, die Wassergehalte entwickeln sich sehr ähnlich. Allerdings scheint es, dass die Abdeckung sich längerfristig lohnt, sowohl für Buche als auch für die Fichte sind nach 5 Monaten die Wassergehalte im abgedeckten Polter kleiner als in den beiden anderen Poltern. Insbesondere im Falle der Fichte sinkt der Gehalt ab August im abgedeckten Polter kontinuierlich, während er im freien Polter wieder anzusteigen beginnt.

Dass der Wassergehalt im abgedeckten Polter anfangs nicht schneller sinkt könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich unter der Folie ein „Treibhausklima“ bildet und das verdunstende Wasser nicht ausreichend effizient abgeführt wird. Dieser Effekt könnte durch den humusreichen Boden, auf dem die Polter aufgebaut wurden, noch verstärkt worden sein. Wahrscheinlich würde es ausreichen, die Polter erst nach 4–8 Monaten abzudecken. Vor allem bei der Fichte werden über längere Zeiträume mit dem abgedeckten Polter die besten Resultate erzielt und auch bei der Buche bleibt der Wassergehalt über einen längeren Zeitraum am tiefsten. Mit der Abdeckung kann also effizient ein Wiederanstieg des Wassergehaltes verhindert werden und somit das Fenster t_2 für den Erntezeitpunkt verbreitert werden.

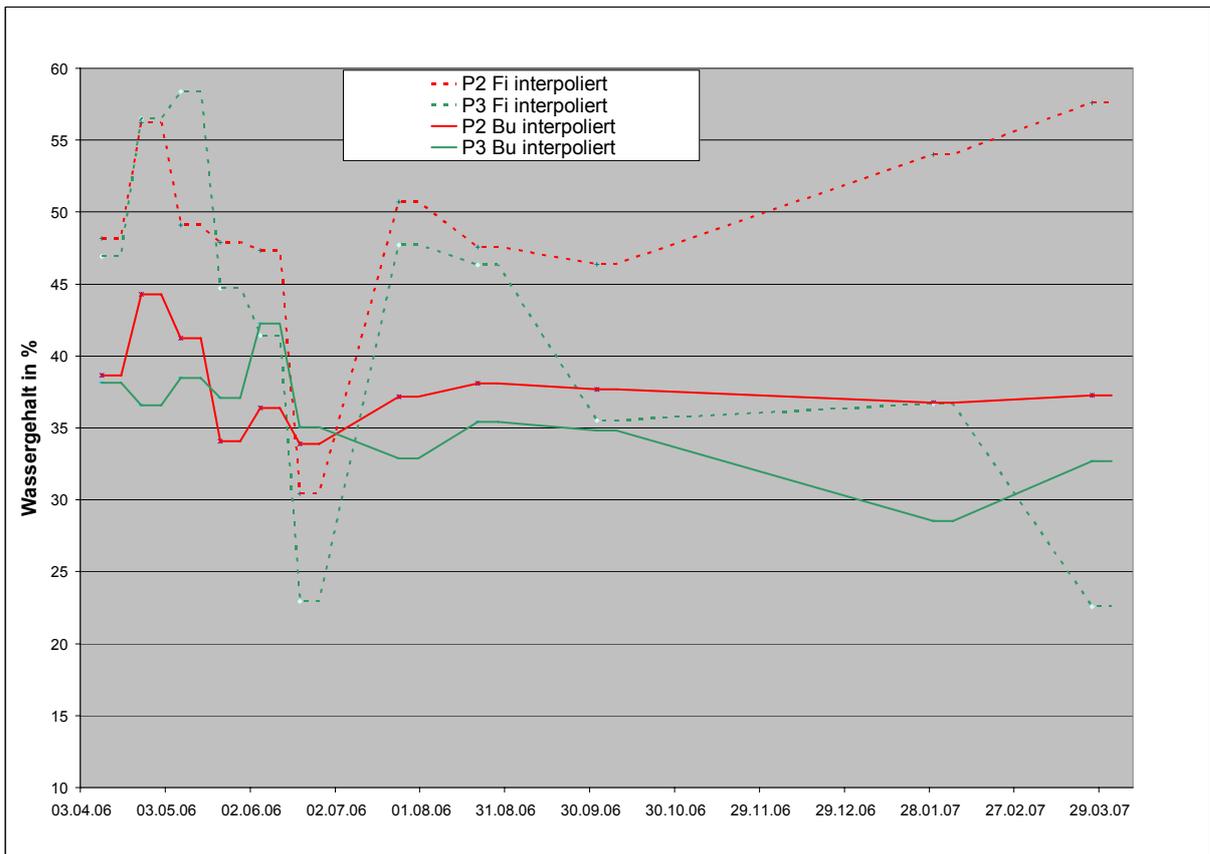


Bild 10 Vergleich Polter 2 (normale Lagerung) und Polter 3 (gedeckte Lagerung)

Die Lagerung im Bestand mit Ästen (Polter 4) hat ebenfalls keinen signifikanten Einfluss. Theoretisch müsste die Verdunstung über die Blätter schneller voranschreiten, allerdings wurden die Bäume vor dem Austreiben gefällt und die Frage kann damit nicht abschliessend beantwortet werden. Auch in diesem Fall hat wahrscheinlich das durch den Boden induzierte feuchte Mikroklima einen zusätzlich negativen Einfluss. Dieses Resultat steht auch in Übereinstimmung mit Erkenntnissen aus der Literatur [8]. Es lassen sich somit weder aus den eigenen Untersuchungen noch aus denen von Dritten gute Argumente für eine Lagerung im Bestand ableiten.

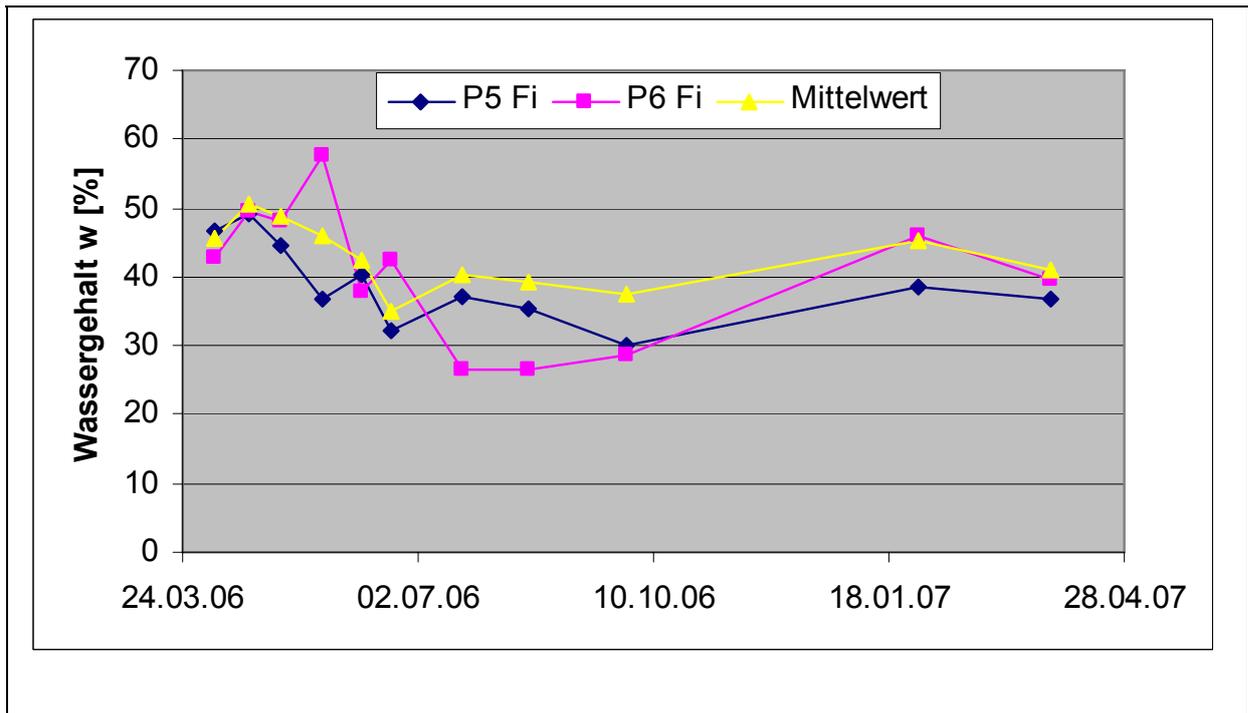


Bild 11 Vergleich des Polters 5 (komplett besonnt, Polter 6 (komplett beschattet) und dem Mittelwert aller Polter für Fichte

Der Einfluss von Besonnung und Untergrund kann am Vergleich der Polter 5 (komplett besonnt) und Polter 6 (komplett beschattet) schön herausgearbeitet werden. In Bild 11 ist der Verlauf des Wassergehaltes für Fichte inklusive dem Mittelwert aller Polter aufgetragen. Es fällt dabei auf, dass bereits nach einem Quartal Lagerung beide Polter ein besseres Trocknungsverhalten als der Durchschnitt aller Polter aufweisen. Im Falle von Polter 5 kann das der guten Besonnung zugeschrieben werden, im Falle von Polter 6 kann man das nur mit dem trockenen Untergrund erklären.

Im Unterschied zu den anderen Poltern handelt es sich bei Polter 6 nicht um einen humusreichen Boden, sondern er besteht vornehmlich aus Stein und Fels. Diese Art Boden funktioniert nicht als Wasserspeicher, sondern wird nach einem Regenereignis viel schneller trocken und wird nicht zusätzlich Feuchtigkeit an das darüber liegende Polter abgeben. Auf humusreichem Boden wird hingegen das Polter von unten her zusätzlich und kontinuierlich befeuchtet. Dieser Effekt wurde auch in der Literatur schon beschrieben [9]. In der praktischen Anwendung heisst dies: Die Wahl des Untergrundes (steinig, rasch abtrockend) ist wichtiger als die Wahl als die Wahl des Lagerortes (sonnig, luftig).

Der in Bild 11 dargestellte Effekt ist für Fichte deutlicher als für die Buche. Aber auch bei der Buche ist es so, dass im Bereich von 9-12 Monaten Lagerzeit diese beiden Polter besser oder mindestens gleich gut abschneiden wie der Durchschnitt aller Polter. Auch hier ist wieder zu sagen, dass Fichtenholz viel unmittelbarer auf die mikroklimatischen Bedingungen reagiert als das Buchenholz.

Als Fazit lässt sich sagen, dass ein idealer Standort sonnig ist und über einen trockenen Untergrund verfügt.

Der Vergleich des beschatteten Polters mit dem gedeckten Polter (Bild 12) zeigt, dass die Buchen im gedeckten Polter 3 praktisch identische Trocknungsergebnisse erzielen wie im Polter 6 in der Schlucht (ungedeckt, beschattet). Daraus lässt sich folgern, dass für Laubholztrocknung in erster Linie der Untergrund (humusartig, feucht /steinig, trocken) des Polters eine Rolle spielt und nicht der Besonnungsgrad und auch nicht, ob das Polter abgedeckt wird oder nicht. Für die Trocknung von Laubstammholz heisst dies in der praktischen Anwendung sogar, dass ein trockener Untergrund eine Abdeckung kompensieren kann. Etwas differenzierter fällt die Betrachtung mit Nadelholz aus: Wird das Polter abgedeckt, sind die Resultate deutlich besser als auf trockenem Untergrund, was wahrscheinlich auf die rasche Wasseraufnahme des Nadelholzes bei Regenereignissen zurück zu führen ist.

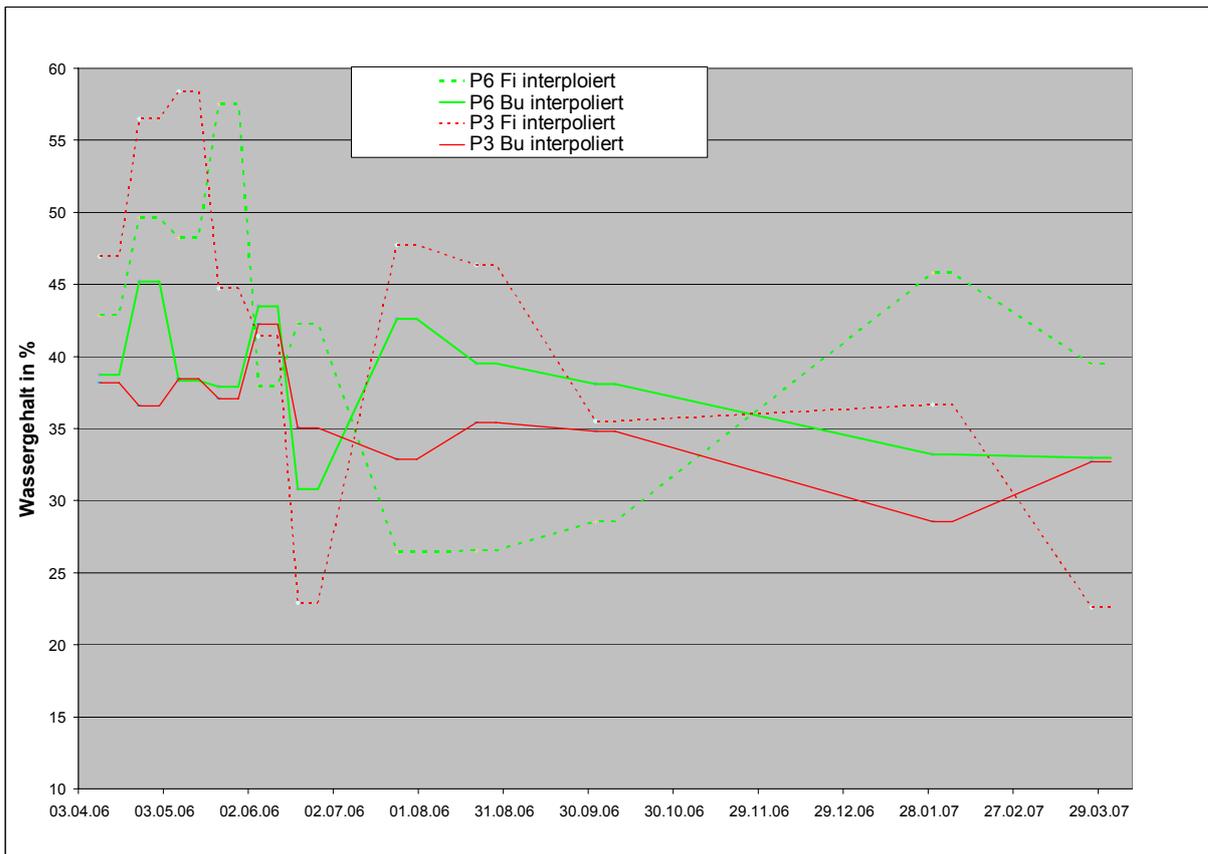


Bild 12 Vergleich des Polters 3 (gedeckt) und Polter 6 (komplett beschattet)

5.2 VERGLEICH BUCHE UND FICHTE

Das Trocknungsverhalten von Buche und Fichte als jeweils wichtigste Vertreter der einheimischen Laub- und Nadelhölzer lässt sich am besten an den Resultaten aus der Versuchsreihe Untergäu demonstrieren. Für alle Polter wurden anfangs sehr ähnliche Wassergehalte ermittelt: $38.3\% \pm 0.7\%$ für die Buche und $45.7\% \pm 2.4\%$ für die Fichte. Dies ist auch ein Indiz für die Reproduzierbarkeit der Probenahme und der Messungen. Wie bereits erwähnt, bedingt dies vor allem bei der Fichte mit den grossen Unterschieden im Wassergehalt zwischen Splint- und Kernholz grosse Sorgfalt bei der Probenahme.

Betrachtet man die Mittelwerte aller Polter fällt auf (Bilder 7 und 8), dass die Streuung und die Veränderungen zwischen den einzelnen Messintervallen für die Fichte durchwegs deutlich grösser ausfallen als für die Buche. Dass die Trocknung nicht gleichförmig verläuft, hat viel mit den meteorologischen Bedingungen in den einzelnen Perioden zu tun. Ein gutes Beispiel ist der Anstieg der Feuchtigkeit in praktisch allen Poltern nach der Fällung bis zur nächsten Messung 2 Wochen später. Dies erstaunt weiter nicht, sind doch in diesem Zeitraum mehr als 120 l/m^2 Regen gefallen. Der durchschnittliche Anstieg für die Buche betrug 2.1% , für die Fichte sogar 4.7% . Da das Fichteholz eine geringere Dichte und somit eine höhere Porosität als das Buchenholz aufweist, ist es nicht erstaunlich, dass der Wassergehalt unter gleichen Umweltbedingungen höheren Schwankungen unterworfen ist, als das beim Buchenholz der Fall ist.

Die Korrelation zwischen Regenmenge und Wassergehalt lässt sich schön am Beispiel des Polters 6 zeigen. Dieses Polter war sehr schattig gelegen und die Sonneneinstrahlung spielte hier nur eine untergeordnete Rolle. Vom Schlagzeitpunkt bis Mitte Juni wurde in etwa alle 2 Wochen eine Messung vorgenommen. Dementsprechend direkt ist der Einfluss der durchschnittlichen Regenmenge in dieser Periode. Wie man in Bild 13 gut erkennen kann, führten nasse Perioden zu einem Anstieg, trockene Perioden zu einer Reduktion des Wassergehaltes des Fichtenholzes. Die Korrelation ist nicht perfekt, da es selbst bei kurzen Messintervallen noch eine Rolle spielt, ob der Regen eher anfangs oder unmittelbar vor dem Messdatum fiel. Im Falle der Buche ist die Korrelation nicht so klar zu erkennen.

Betrachtet man sich den Verlauf der Mittelwerte über alle Polter (Bilder 5 und 6) während der Versuchsphase so kann man erkennen, dass der Wassergehalt von Buche nach 8-9 Monaten ein Minimum erreicht und der Wert einigermassen stabil bleibt. Bei der Fichte ist es eher so, dass bereits nach 3-5 Monaten ein minimaler Wert erreicht wird und der Wassergehalt anschliessend wieder zu steigen beginnt.

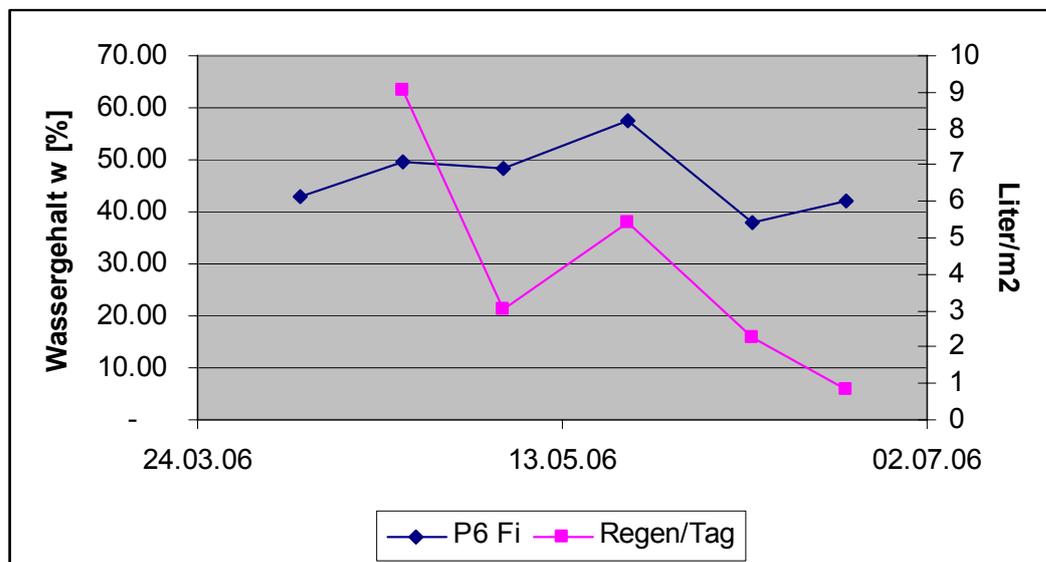


Bild 13 Verlauf des Wassergehaltes w des Fichtenholzes im Polter 6 und der mittleren Regenmenge pro Tag während der Messperiode

5.3 EINFLUSS SCHLAGZEIT UND WEITERE HOLZARTEN

Mit der Versuchsreihe in Olten sollte der Einfluss des Schlagzeitpunktes auf das Trocknungsverhalten untersucht werden. Zudem wurden noch weitere Holzarten (Eiche, Ahorn, Lärche, Espe, Tanne und Hartbuche) miteinbezogen. Eine Analyse der Daten (vgl. Rohdaten im Anhang 2) zeigte aber, dass aufgrund der ungenügenden Zahl von Messwerten pro Holzart und Schlagzeitpunkt keine exakten Aussagen gemacht werden können.

Trotzdem lassen sich einige Schlüsse ziehen. So konnten in den Messungen keine klare Tendenz bezüglich Anfangswassergehalt (nach dem Fällen) und Fällzeitpunkt erkannt werden. Im Gegensatz zu den Annahmen konnte nicht nachgewiesen werden, dass im Winter geschlagenes Holz einen klar tieferen Wassergehalt hat. Diese Resultate sind in Übereinstimmung mit den in der Literatur beschriebenen Ergebnissen in [11].

Die Tendenzen aus der Versuchsreihe Untergäu betreffend Trocknungsverhalten konnte indessen im Rahmen der zur Verfügung stehenden Messungen aus Olten insgesamt bestätigt werden. Ebenfalls tendenziell bestätigt sich das Wissen der Praktiker, dass insbesondere Eiche eine längere Trocknungszeit hat.

In diesem Versuch bleibt eine wichtige Frage ungeklärt: Weshalb existieren so grosse Streuungen im Wassergehalt direkt nach dem Fällen, ohne dass eine erkennbare Gesetzmässigkeit dahinter stehen würde? Der Versuch hat gezeigt, dass der Anfangswassergehalt (in normalen Poltern) direkt proportional auf den zu erreichenden tiefsten Wassergehalt wirkt. Wären die entsprechenden Gesetzmässigkeiten bekannt, könnte gezielt Holz mit einem tiefen Wassergehalt geschlagen werden. Mögliche Effekte könnten sein: „Mondholz“, Gesundheitszustand des Baumes, Mikroklima am Ort, Untergrund und Bodenbeschaffenheit, Waldstruktur, Bodenfeuchtigkeit, Besonnung, etc. Dies könnte Gegenstand eines Folgeprojektes sein.

6. Diskussion

Bei einem kritischen Vergleich der in der Literatur beschriebenen Erkenntnisse und der in den eigenen Versuchen gewonnenen Resultaten zeigt sich, dass es eine Reihe von Übereinstimmungen gibt, dass es aber auch Aspekte gibt, die kontrovers bleiben. Einigkeit besteht darin, dass die Trocknung von Rundholz sinnvoll ist und grosses Potential hat, da damit der Brennwert des Energieholzes massiv gesteigert werden kann, ohne dass durch den Verarbeiter selber Energie aufgewendet werden muss. Zudem kommen noch Einsparungen durch die Reduktion der zu transportierenden Masse dazu. Der günstige Einfluss einer Entrindung auf die Trocknungsgeschwindigkeit ist ebenfalls gut belegt. Allerdings ist damit ein zusätzlicher Aufwand verbunden, der dem zu erwartenden Nutzen gegenüber gestellt werden muss.

Ob es Sinn macht, die Polter kreuzweise zu schichten, wird von den Autoren sehr unterschiedlich beurteilt. Eng damit ist auch die Frage verknüpft, ob es einen Unterschied macht, wie stark ein Polter besonnt wird. Aufgrund der eigenen Erfahrungen und verschiedener Hinweise in der Literatur dürften die unterschiedlichen Einschätzungen folgende Ursachen haben:

- Der Untergrund hat einen massgeblichen Einfluss auf das Trocknungsverhalten des Polters. Diesem Aspekt wurde aber bei vielen Untersuchungen zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Auf einem trockenen Boden ohne stehende Nässe wird ein Polter deutlich rascher trocknen als auf einem humusreichen Boden. Die in [11] gemachte Empfehlung, auf ausreichende Bodenfreiheit zu achten, sollte wenn immer möglich befolgt werden.
- Alle Trocknungsversuche liefen typischerweise über 6-12 Monate. Damit sind sie alle stark von den klimatischen Bedingungen abhängig, wie sie zu dem Zeitpunkt gerade herrschten. Die klimatischen Bedingungen in dieser Studie sind Bild 14 zusammengefasst. Fiel eine Versuchsreihe in eine überdurchschnittlich nasse Periode, konnten nur mässige Trocknungsergebnisse erzielt werden und umgekehrt. So hat eine intensive Regenperiode in der vorliegenden Studie zu einem anfänglichen Ansteigen des Wassergehaltes geführt. Damit ist ein direkter Vergleich zwischen den Versuchsreihen nur bedingt möglich, ganz abgesehen von der Variabilität, die sich aus der unterschiedlichen Holzqualität ergibt.
- Bei Nadelholz sind die klimatischen Bedingungen unmittelbar vor der Messung des Wassergehaltes bei nicht abgedecktem Holz von grosser Bedeutung. Der Wassergehalt reagiert sehr dynamisch auf Regenereignisse.

Eine endgültige Beantwortung nach den idealen Trocknungsbedingungen für Energieholz könnte nur in einer sehr umfangreichen Versuchsreihe bestimmt werden, die über mehrere Jahre angelegt sein müsste, um den Einfluss klimatischer Schwankungen bestimmen zu können. Folgende Faktoren müssten miteinbezogen werden:

- Standort (Untergrund, Besonnung)
- Poltertyp (konventionelle, kreuzweise, mit/ohne Bodenfreiheit, abgedeckt/offen)
- Holzart (in Frage kommende Nadel- und Laubhölzer)
- Mit/ohne Entrindung
- Geografische Lage (Mittelland, Voralpen, Alpen)

Ob sich eine derartige Studie finanzieren liesse, ist eher unwahrscheinlich und ob sie wirklich alle offenen Fragen klären könnte, ist offen. Aufgrund des Literaturstudiums und der eigenen Resultate können aber bereits heute eine Reihe von Faustregeln aufgestellt werden, die ohne Zweifel zu einer Verbesserung der Trocknungsergebnisse für Energieholz beitragen können. Dabei ist zu beachten, dass diese Erkenntnisse sowohl für eine Pelletsproduktion aus Waldholz als auch für die Hackschnitzelproduktion verwendet werden können, da auch im zweiten Fall die Waldeigentümer daran interessiert sind, möglichst trockenes Material verkaufen zu können.

Die Arbeitshypothese, dass sich nach einer bestimmten Zeit ein minimaler Wassergehalt einstellt, konnte bestätigt werden. Die ideale Erntezeit wird für Fichte im Bereich nach 3-5 Monaten und für Buche nach 8-9 Monaten erreicht (bei einem Auslagerungsbeginn im Frühling). Durchschnittliche Werte für den Wassergehalt unter 35% sind möglich (siehe Bild14).

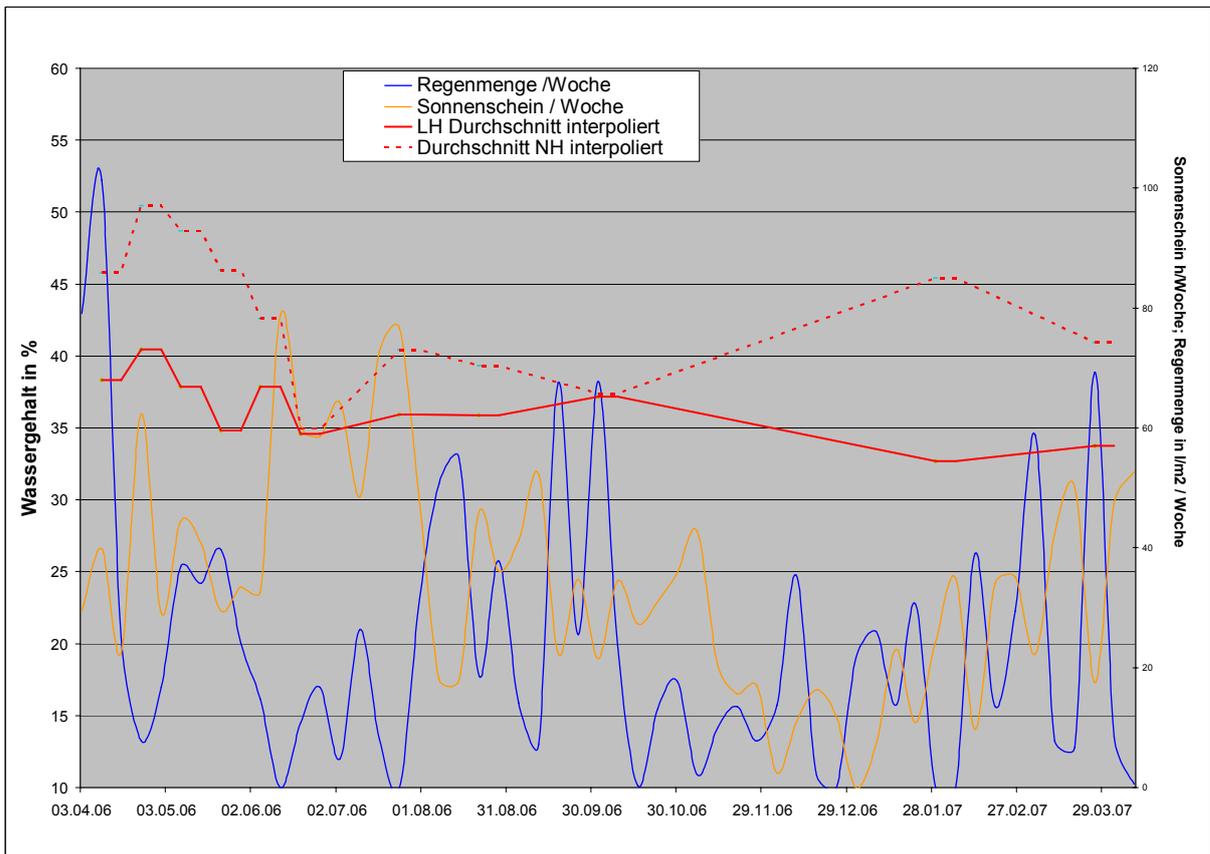


Bild 14 Klimaverlauf während der Versuchsperiode (Stunden Sonnenschein pro Wochen, wöchentliche Regenmenge in l/m²) und durchschnittlicher Wassergehalt in allen Poltern im Untergäu für Buche und Fichte

Die Resultate derartiger Feldversuche sind direkt von den konkreten Wetterverhältnissen abhängig. Die Versuchsphase war geprägt von einem nassen Frühling, einem aussergewöhnlich heissen und trockenen Sommer und einem trockenen Winter (Bild 14).

7. Schlussfolgerungen

Um eine möglichst rasche und bleibende Trocknung von Rundholz zu erreichen, sind die folgenden Faustregeln zu beachten:

- Rundholz sollte in möglichst **kurzen** Abschnitten gelagert werden, da die Austrocknung über die Stirnseiten am schnellsten erfolgt.
- Je **dünn**er die Rundhölzer sind, umso schneller trocknen diese
- Eine vollständige oder zumindest teilweise **Entrindung** beschleunigt die Trocknung
- Die Polter müssen auf einer **trockenen** Unterlage errichtet werden und über ausreichende **Bodenfreiheit** verfügen, d.h. nicht direkt auf den Boden aufgeschichtet werden und sollten **besont** sein
- Der Schlagzeitpunkt ist von untergeordneter Bedeutung, d.h. es können während des **ganzen** Jahres Polter angelegt werden
- Die Trocknung ist in der **Sommersaison** am effizientesten
- Die **Abdeckung** der Polter lohnt sich erst 4-8 Monate nach der Poltererstellung. Mit der Abdeckung kann auch langfristig ein Wiederanstieg des Wassergehaltes verhindert werden.
- Die **Lagerung im Bestand** mit Ästen bringt wenig bis keine erkennbaren Vorteile
- Der Wassergehalt von Fichtenholz wird stark durch die **Regenmenge** beeinflusst. Es lohnt sich, das Fichtenholz am Ende einer längeren Trockenperiode einzusammeln und nicht während oder kurz nach einer Regenperiode.
- **Fichte** erreicht bei Auslagerung im Frühling nach **3-5 Monaten** einen minimalen Wassergehalt. Ohne Abdeckung steigt der Wert nachher wieder an.
- **Buche** erreicht bei Auslagerung im Frühling nach **8-9 Monaten** einen minimalen Wassergehalt, der anschliessend in etwa konstant bleibt.

Symbolverzeichnis

u	%	Holzfeuchte
w	%	Wassergehalt
rF	%	relative Luftfeuchtigkeit

Referenzen

- [1] J. Denig, E. M. Wengert, W. T. Simpson: **Drying Hardwood Lumber**, United States Department of Agriculture, General Technical Report FPL-GTR-118, 2000
- [2] H. Vettiger, W. Berthoud, Ch. Niederhauser: **Tagungsband Holz Trocknung (Ergebnisse KTI Projekt 3464.1)**, Schweizerische Hochschule für Holzwirtschaft Biel, 1999
- [3] St. Feller, B. v. Webenau, H. Weixler, B. Krausenboeck, A. Göldner, N. Rempler: **Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln**, Bayerische Staatsforstverwaltung, Freising, 1999
- [4] **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**, United States Department of Agriculture, General Technical Report FPL-GTR-113, 1999
- [5] S. Wittkopf: **Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern**, Forstliche Forschungsberichte München, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2005
- [6] M. Arnold: **Grundlagen und technisch-organisatorische Aspekte der Rundholzlagerung**, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 1993, Nr. 11, 843-857
- [7] M. Arnold, J. Sell: **Qualitätserhaltung von Rundholz bei längerer Lagerung**, Empa Bericht 115/25, 1992
- [8] V. Klaiber, R. Mutz, U. Seeling, G. Becker: **Veränderung der Holzfeuchte im Rundholz von Fichten in Abhängigkeit von Art und Dauer der Lagerung – Abschätzung mittels einer Kohorten-Sequenzanalyse**, Allg. Forst. u. J. Ztg., 2002, Nr. 9, 162-172
- [9] **Fichtenstammholz vortrocknen?**, Holz und Wald, 2001, Nr. 2, 36-38
- [10] R. Jirjis: **Storage and drying of wood fuel**, Biomass & Bioenergy, 1995, Nr. 1-5, 181-190
- [11] M. Golser, W. Pichler, F. Hader: **Energieholztrocknung – Zusammenfassung des Endberichtes HFA-Nr. F1887/004**, Holzforschung Austria, 2005

Anhang 1 Bestimmung des Wassergehaltes

Grundsatz

Die Proben wurden in regelmässigen Abständen bei den Poltern genommen. Die Sägespäne aus den Einschnitten mit der Motorsäge wurden sofort in luftdichte Plastikbeutel gefüllt, beschriftet, katalogisiert und in der Regel gleichentags der Wassergehalt mit einem Labormessgerät bestimmt. Bei unplausiblen Messungen wurde die Messung wiederholt oder eine zweite Probe genommen. Damit die Messungen möglichst repräsentativ sind, wurden jeweils etwa gleich dicke Stämme in jedem Polter ausgewählt sowie möglichst alle Messungen am selben Stamm durchgeführt. Zusatzmessungen an anderen Stämmen der gleichen Baumart im Polter wurden zu Referenzvergleichen beigezogen.

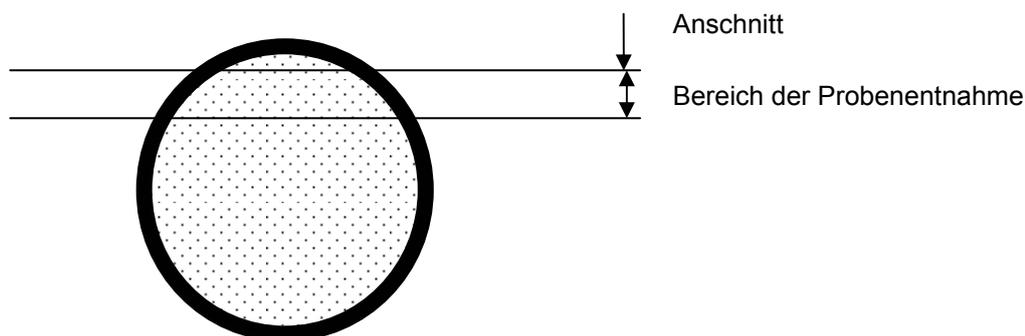
Probenentnahme im Polter

Die periodische Probenentnahme erfolgte grundsätzlich bei trockener Witterung, um eine Benetzung der Proben zu vermeiden und im Schatten, um eine Austrocknung zu verhindern.

Normalerweise wurden Stämme innerhalb des Polters genommen, welche eine Dicke von 20..30cm aufwiesen. Die Zugänglichkeit zur Probeentnahme erforderte, dass die Entnahme oft bis 1,5m vom Stammende genommen werden konnte. Da bei Nadelholz der Feuchteverlauf entlang des Stammes nicht linear ist, dürften die absoluten Wassergehalte leicht höher als die gemessenen liegen. Relativ zu den Poltern ist die Streuung aber klein, weil überall gleich gemessen wurde.

Zwischen den Einschnitten der Proben wurde ein Abstand von min. 20 cm eingehalten, um den Einfluss der Vormessung möglichst gering zu halten.

Untenstehende Abbildung zeigt, wie die Proben genommen wurden:



Während die Feuchteverteilung im Stammdurchschnitt bei Laubholz linear ist, ist dies bei Nadelholz abhängig vom Durchmesser selbst. Damit ist selbst mit der gewählten Einschnittmethode die Streuung der Messwerte bei Laubholz geringer als bei Nadelholz. Bei der Probeentnahme wurden Rindenteile möglichst vermieden.

Die Späne wurden unverzüglich nach dem Einschnitt in eine luftdicht verschlossene Kunststofftüte gegeben und beschriftet. Die Luft wurde möglichst vollständig herausgedrückt.

Bestimmung des Wassergehaltes

In der Regel gleichentags wie die Probenentnahme erfolgte die Bestimmung des Wassergehaltes, um Fehlmessungen zu vermeiden. Nachmessungen nach 3 Tagen haben eine Veränderung von <1% ergeben, womit sich die Notwendigkeit einer sofortigen Messung relativiert hat.

Die Messungen erfolgten mit dem Messgerät UX 2011D der Serie „Ultra X“ von a&p instruments, was dem Top-Messgerät zur Bestimmung des Wassergehaltes in der Holzindustrie entspricht.

Bei der Messung wird jeweils eine Probe von ca. 10g soweit abgetrocknet, bis keine Feuchtigkeit mehr enthalten ist. Aus der Differenz zwischen Anfangs- und Endgewicht wird der Wassergehalt ermittelt und auf einem Ausdruck festgehalten. Der Ausdruck wurde sofort an die Probe angeheftet und mit einem Visum versehen, sobald diese im System erfasst wurde.

Jede Messung wurde auf die Plausibilität überprüft. Differierte ein Wert ungewöhnlich stark von der Vormessung, wurde die Messung wiederholt, um Messfehler auszuschliessen. In einigen Fällen wurde die Probenentnahme wiederholt. Insbesondere die Messung vom 21. 6. 2006, welche bei fast allen Proben ungewöhnlich tief lag, konnte entsprechend verifiziert werden.

Die Rohdaten enthalten nur die plausibilisierten und verifizierten Werte.



Proben bereit zur Messung



Messinitialisierung



Wassergehaltbestimmung



Gemessene Probe nach der Erfassung

Anhang 2 Rohdaten

Messwerte des Wassergehaltes in % der Proben Untergäu

Messungen FR Untergäu

Erstellt: 08.04.2006
Visum: Elber
Messblatt Untergäu
Datei: V1_0.xls

	07.04.06	21.04.06	05.05.06	22.05.06	08.06.06	21.06.06	21.07.06	18.08.06	29.09.06	30.01.2007	28.03.2007
P1 Bu	38.30	40.05	39.18	37.57	36.47	38.40	35.55	32.55	34.30	35.13	36.12
P1 Fi	42.68	54.10	53.13	48.62	50.01	46.39	45.23	48.00	45.00	54.23	52.61
P2 Bu	38.64	44.31	41.26	34.08	36.39	33.88	37.18	38.08	37.70	36.75	37.25
P2 Fi	48.15	56.20	49.08	47.90	47.36	30.42	50.73	47.58	46.38	54.01	57.62
P3 Bu	38.16	36.57	38.46	37.08	42.25	35.03	32.89	35.43	34.81	28.52	32.71
P3 Fi	46.94	56.50	58.40	44.72	41.43	22.92	47.71	46.34	35.52	36.67	22.58
P4 Bu	37.15	37.19	34.58	33.03	39.32	33.30	33.23	33.00	39.17	32.78	32.50
P4 Fi	47.30	37.11	38.94	40.11	38.51	35.22	35.04	31.77	38.51	43.15	36.50
P5 Bu	39.07	39.38	35.42	29.30	29.38	36.09	34.10	36.73	38.94	29.80	31.02
P5 Fi	46.58	49.03	44.43	36.76	40.32	32.26	37.24	35.50	30.13	38.53	36.66
P6 Bu	38.72	45.19	38.31	37.90	43.49	30.82	42.59	39.50	38.08	33.22	32.98
P6 Fi	42.83	49.62	48.22	57.51	37.95	42.26	26.42	26.49	28.52	45.81	39.48
Durchschnitt NH	45.75	50.43	48.70	45.94	42.60	34.91	40.40	39.28	37.34	45.40	40.91
Durchschnitt LH	38.34	40.45	37.87	34.83	37.88	34.59	35.92	35.88	37.17	32.70	33.76

Messwerte des Wassergehaltes in % der Proben Olten

Forschungsprojekt Feuchtegehalt – Änderung FR Olten

Erstellt: 08.04.2006
 Visum: Elber
 Datei: Messbaltt V1_0.xls

	Messung=15.8.														
	05.05.06	22.05.06	02.06.06	30.06.06	13.07.06	11.08.06	25.08.06	08.09.06	20.10.06	23.11.06	18.12.06	11.01.07	30.01.07	16.03.07	05.04.07
Grenzwert	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
P1 Bu Olten	36.78	33.74	35.27	32.40	31.65	31.71	27.25	36.48	31.94	34.12	35.45	38	37.10	37.48	37.95
P1 Ei Olten	41.79	41.42	39.33	40.51	39.92	41.58	30.05	42.56	48.39	43.93	43.93	45.29	42.35	43.75	43.37
P1 Ahorn Olten		26.01	34.18	21.49	24.30	20.77	19.53	27.25	27.35	32.81	31.13	39.49	40.98	39.90	41.17
P2 Bu Olten				33.11	33.29	33.11	33.17	32.93	31.47	33.73	32.52	33.01	33.61	38.07	38.16
P2 Fi Olten				24.5	24.99	22.42	17.84	24.12	24.54	24.48	26.23	25.22	25.18	26.72	23.90
P2 Ei Olten				43.64	43.93	43.83	43.05	44.16	44.46	44.64	46.03	46.86	45.6	44.09	45.75
P3 Bu Olten				41.53	30.85	31.26	33.28	31.29	34.29	31.27	30.98	46.3	43.31	34.77	34.02
P3 Lä Olten				22.52	28.08	31.22	25.89	34.01	36.01	33.34	31.73	32.3	33.5	35.71	32.27
P4 Bu Olten						45.06	39.76	41.01	42.96	39.26	41.65	41.39	41.2	40.5	39.2
P5 Es Olten								33.02	31.56	31.39	31.38	32.14	31.55	30.96	29.32
P5 Ta Olten								46.33	46.26	43.66	45.48	39.95	45.08	44.61	35.76
P5 Bu Olten								35.82	35.27	37.04	37.93	36.3	37.98	38.93	37.58
P6 Ah Olten									39.69	38.16	39.1	37.35	37.77	33.43	40.82
P6 Es Olten									28.56	30.1	28.8	28.36	17.65	27.03	26.17
P7 Bu Olten										40.89	42.71	42.81	40.85	41.01	39.89
P8 Ah Olten											37.54	39.49	38.74	35.92	37.33
P8 Bu Olten											43.17	42.65	41.08	40.49	38.74
P8 Ei Olten											46.29	45.14	46.29	43.46	43.83
P9 Es Olten													34.12	30.79	33.03
P9 Ei Olten													47.35	45.72	39.99
P10 Ei Olten														41.62	39.25
P10 HB Olten														36.76	40.94
Durchschnitt P1 Olten	39.29	33.72	36.26	31.47	31.96	31.35	25.61	35.43	35.89	36.95	36.84	40.93	40.14	40.38	40.83

Beschreibung:

- Polter 1 normal gelagert, Olten Nr. 1, Ob. Grubacker, Schlagdatum 2.5.
- Polter 2 normal gelagert, Olten Nr. 2, Chutzenfluh M Schlagdatum 9. 6. 2006
- Polter 3 normal gelagert, Olten Nr. 3 Chutzenfluh O, Schlagdatum 30.6. 2006
- Polter 4 normal gelagert, Olten Nr. 4, Ruttigerweg, Schlagdatum 4.8.2006
- Polter 5 normal gelagert, Olten Nr. 5, Chutzenfluh W, Schlagdatum 5.9.2006
- Polter 6 normal gelagert, Olten Nr.6, Chutzenfluh W, Schlagdatum 2.10.06
- Polter 7 normal gelagert, Olten Nr.7, Rumpelweg, Schlagdatum 30.10.06
- Polter 8 normal gelagert, Olten Nr.8, Wangnerweg, Schlagdatum 6.12.06
- Polter 9 normal gelagert, Olten Nr 9, Hard, Schlagdatum 11.1.07
- Polter 10 normal gelagert, Oltern Nr 10, Hardwald, Schlagdatum 20.2.07