



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wald- und Boden-
wissenschaften

Freilufttrocknung von Energieholz in Rundholzpoltern

Diplomarbeit

Erstellt von:

Gernot Erber

Betreuer:

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer
Dipl.-Ing. Christian Kanzian

Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wald- und Bodenwissenschaften
Institut für Forsttechnik

Wien, August 2011

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
	1.1 Problemstellung	1
	1.2 Zielsetzung	1
2	WASSERGEHALT UND TROCKNUNG	3
	2.1 Theoretische Grundlagen	3
	2.1.1 Definitionen	3
	2.1.2 Wasserspeicherung im Holz.....	3
	2.1.3 Wasseraufnahme von Holz	3
	2.1.4 Wassertransport im Holz.....	4
	2.1.5 Trocknung von Holz und deren Bedeutung für den Heizwert.....	5
	2.2 Literaturanalyse	7
	2.2.1 Freilufttrocknung allgemein	7
	2.2.2 Wassergehalt	8
	2.2.3 Trockenmassenverlust	9
	2.2.4 Idealer Lagerungszeitraum	9
	2.2.5 Abdeckung	9
	2.2.6 Effekte von Bearbeitung.....	10
	2.2.7 Lagerungsbedingungen	10
	2.2.8 Heizwert	11
	2.2.9 Modellierung des Wassergehalts	11
3	MATERIAL UND METHODEN	12
	3.1 Modellhypothesen.....	12
	3.2 Versuchsaufbau und Standort	12
	3.3 Vorbereitung der Datenerhebung	15
	3.4 Datenerhebung	15
	3.5 Nachbereitung der Datenerhebung.....	15
	3.6 Datenauswertung.....	16
	3.7 Statistische Auswertung	17
	3.8 Messfehlerkorrektur	19
4	ERGEBNISSE	20
	4.1 Deskriptive Statistik	20
	4.2 Verlauf des Wassergehaltes über die Stammlänge	25

4.3 Modellierung	26
4.3.1 Variante A	26
4.3.2 Variante B	27
4.3.3 Variante C	28
4.3.4 Variante D	29
4.4 Zusammenfassung aller Varianten	30
4.5 Sensitivitätsanalyse	33
4.6 Szenarienanalyse	34
4.6.1 Abdeckung	34
4.6.2 Starkniederschlagsereignisse	34
4.1 Kosten-Nutzen-Rechnung der längeren Lagerungszeit	37
5 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	39
5.1 Diskussion	39
5.2 Methodische Herausforderungen.....	42
5.3 Gültigkeit.....	43
5.4 Zukünftige Anwendungen	43
5.5 Verbesserungsmöglichkeiten des Versuchsdesigns.....	43
6 ZUSAMMENFASSUNG.....	45
7 LITERATURVERZEICHNIS.....	46
8 ANHANG	49
8.1 Abbildungsverzeichnis	49
8.2 Tabellenverzeichnis	50
8.3 Tabellenanhang.....	51

Abstract

Moisture content influences the calorific value of fuel wood and is classified as an important quality criterion. This paper discusses modelling moisture content in fuel wood windrows. For this purpose, a windrow of pine stems (*Pinus sylvestris*) in a frame, based on load sensors, was erected. Next to the frame, a meteorological station was set up. Relative humidity, wind speed, temperature, rainfall and total pile mass were recorded every ten minutes. The investigation period covers December 2009 to February 2011. Statistical analysis was carried out by multiple linear regression models. Equations were found to predict moisture content, based on daily averages up to 0.53% average deviation over 14 months. Moisture content in the pile decreased from December 2009 until February 2011 from 50.09% to 32.15%. From May to June, drying rates up to 4.5% were observed. In autumn moisture content increased by 1.6%. Dry matter losses ranged around 5% in the investigation period. Further the effect of heavy rainfall on the moisture content was investigated. Heavy rainfall events can cause a rise in moisture content and a slowdown in drying for several days. A cost-benefit-analysis showed that drying allowed an interest rate of 60% in comparison with 2% without.

Keywords: moisture content, natural wind drying of fuelwood, model simulations, windrow

KURZFASSUNG

Der Wassergehalt von Energieholz beeinflusst den Heizwert und gilt als wichtiges Qualitätskriterium beim Verkauf. Ziel dieser Arbeit ist es Modelle zu entwickeln, die den Wassergehalt eines Energierundholzpolters bei Freilufttrocknung über einen längeren vorhersagen können. Dazu wurde ein auf Wiegezellen gelagerter Polter mit Kiefernholz (*Pinus sylvestris*) über knapp 14 Monate beobachtet. Eine automatische Wetterstation zeichnete im 10 Minuten-Intervall die Gewichts- und Wetterdaten auf. Die statistische Analyse wurde auf Basis von multiplen linearen Regressionen durchgeführt. Dabei konnten Funktionen gefunden werden, die es ermöglichen den Wassergehalt auf Basis von Tagesmittelwerte im Mittel auf bis zu 0,53% genau über knapp 14 Monate vorherzusagen. Der Wassergehalt des Polters sank von Dezember 2009 bis Februar 2011 von 50,09% auf 32,15%. Dabei konnten von Mai bis Juli monatliche Trockenraten von bis zu 4,5% erreicht werden. Im Herbst nahm der Wassergehalt wieder um etwa 1,6% zu. Der Trockenmassenverlust lag bei etwa 5% im gesamten Versuchszeitraum. Weiters wurde untersucht wie sich Starkregenereignisse auf den Wassergehalt eines Polters auswirken. Es zeigte sich, dass intensive Niederschlagsereignisse die Trocknung mehrere Tage lang bremsen können. Eine Kosten-Nutzen-Rechnung ergab eine

60%tige Verzinsung des eingesetzten Kapitals durch die Trocknung. Ohne die Trocknung wären lediglich 2% erzielt worden.

Schlüsselbegriffe: Wassergehalt, Freilufttrocknung von Energieholz, Modellsimulation, Polter

VORWORT

Ich möchte mich an dieser Stelle bei den Personen bedanken, die mir bei der Erarbeitung dieser Diplomarbeit geholfen haben. Mein herzlicher Dank gilt Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer und Herrn Dipl.-Ing. Christian Kanzian, die mich sowohl bei inhaltlichen, als auch Fragen technischer Natur unterstützt und jederzeit ein offenes Ohr gehabt haben. Weiterer Dank gilt Dipl. Ing. Thomas Leitner, der mich bei den Außenaufnahmen und Laboruntersuchungen unterstützt hat. Nicht zuletzt durch die breite Unterstützung ging die Freude an der Arbeit nie verloren.

Weiters möchte ich mich bei allen am Projekt „ÖKOCHIP – Neue Energien 2020“ beteiligten Institutionen bedanken, ohne die diese Diplomarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Viktoria Öllerer, die mir bei den Arbeiten in R bei allen kleinen und größeren Problemen mit Rat zur Seite gestanden ist.

Frau Christina Kickingger, Frau Julia Erber und Herrn Gerhard Pichler möchte ich für ihre moralische Unterstützung während der Arbeit und für ihr kritisches und penibles Korrekturlesen danken.

Herrn Ing. Michael Bubna-Litic gilt mein Dank für fruchtbare Diskussionen zu diesem Thema und für die Möglichkeit während meines Studiums praktische Erfahrungen in seinem Betrieb zu sammeln.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir nicht nur dieses Studium ermöglicht hat, sondern mir auch immer eine Stütze und sicherer Rückhalt war.

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Frisch geschlagenes Holz besitzt einen Wassergehalt von etwa 50% bis 60%. Um handelsübliche Heizkessel in Ein- und Mehrfamilienhäusern zu beheizen, sollte der Wassergehalt nicht wesentlich höher liegen als 25% (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH, 2011). Dabei ist der Heizwert die zentrale Kenngröße. Dieser steigt linear mit sinkendem Wassergehalt (HARTMANN & KALTSCHMIDT, 2001). Mit sinkendem Wassergehalt steigt aber nicht nur der Heizwert, sondern es sinken auch die Transportkosten (u.a. NURMI, 1999). Weiters können mit natürlicher Trocknung die Aufbereitungskosten für Hackgut reduziert werden. Die Trocknung als Stammholz unter Freiluftbedingungen hat darüber hinaus den Vorteil, dass sie im Vergleich zur Hackguttrocknung sehr geringe Trockenmassenverluste aufweist. Diese liegen bei Nadelholz bei 1-2% pro Jahr. (JIRIJIS, 1995, GIGLER et al., 2004, GOLSER et al., 2005). Eine immer fragliche Kenngröße ist der aktuelle Trocknungszustand des zukünftigen Hackgutes. Um einen optimalen Zeitplan für die Trocknungsdauer und den Hackzeitpunkt erstellen zu können, ist es entscheidend den aktuellen Wassergehalt möglichst effizient ermitteln zu können (FILBAKK et al., 2011). Einen ähnlichen Weg haben GIGLER et al. (2000a und 2000b), sowie FILBAKK et al. (2011) in ihren Arbeiten aufgezeigt. GIGLER et al. (2000a und 2000b) modellierten dabei einen Weidenstamm als Zylinder, der von einer Membran (zwischen Holz und Rinde) und einer Außenschicht (Rinde) umgeben wird. Die Trocknung errechnete sich dabei mittels verschiedener Diffusionsgleichungen, wobei jede Schicht unterschiedliche Diffusionskoeffizienten aufwies. Die Menge des hinaus diffundierten Wassers wurde dann von der zu Beginn im Stamm befindlichen Wassermenge abgezogen und ergab so den aktuellen Wassergehalt. FILBAKK et al. (2011) erstellten Trocknungsmodelle für Laubbäume, wobei sie als erklärende Variable den Trocknungszeitraum, die Umweltbedingungen sowie Baumart, Kronenlänge und Durchmesser eingehen ließen. Diese Arbeit legt ihr Augenmerk auf die Komponenten Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Niederschlagsmenge und Windgeschwindigkeit und untersucht ihre Bedeutung hinsichtlich des Trocknungsvorganges bei in Poltern gelagertem Rundholz.

1.2 Zielsetzung

Bei der Lagerung im Freiland sind zwei Fragen entscheidend: Wie lange braucht der Polter bis er einen gewünschten Wassergehalt erreicht hat und wie kann der Trocknungsverlauf möglichst effizient bestimmt werden? Folgende Fragestellungen sollen im Rahmen dieser Arbeit geklärt werden:

1. Ist es möglich ein Vorhersagemodell zu erstellen, das es ermöglicht, den Wassergehalt eines Polters basierend auf Wetterdaten vorherzusagen?

2. Wie wirken sich Schlechtwetterperioden mit intensiven Niederschlägen auf das Trocknungsverhalten des Polters aus?
3. Rechtfertigt der Trocknungserfolg auf der Freifläche die längere Lagerungszeit?

Die Simulation des Wassergehaltes soll in dieser Arbeit möglichst einfach gestaltet werden, um sie für spätere praktische Anwendungen tauglich zu machen. Dies soll durch Anwendung einer linearen multiplen Regression gelingen.

2 WASSERGEHALT UND TROCKNUNG

2.1 Theoretische Grundlagen

2.1.1 Definitionen

Die Begriffe des Feuchtegehalts und Wassergehalts, die im Laufe der Arbeit immer wieder auftauchen, sollen definiert werden und, so nicht explizit vermerkt, im nachfolgenden Sinne zu verstanden werden. Der Feuchtegehalt (Formel 1) beschreibt das Verhältnis von Wasser zu darrtrockener Holzmasse, der Wassergehalt (Formel 2) jenes von Wasser zu feuchter Holzmasse.

$\omega_1 = \frac{m_\omega - m_{dtr}}{m_{dtr}} * 100 (\%)$	Formel 1
$\omega_2 = \frac{m_\omega - m_{dtr}}{m_\omega} * 100 (\%)$	Formel 2

ω_1Feuchtegehalt

ω_2Wassergehalt

m_ωMasse des Holzes in feuchtem Zustand

m_{dtr}Masse des Holzes in darrtrockenem Zustand

(WAGENFÜHR, 2008 und LWF, 2011)

2.1.2 Wasserspeicherung im Holz

Wasser kann in Holz sowohl in Makro- als auch in Mikroporen (im Zellwandsystem) eingelagert werden. Dabei können drei Grenzzustände des Holzes unterschieden werden:

1. Der des **darrtrockenen** Holzes, bei dem kein Wasser mehr im Holz vorhanden ist. Somit beträgt der Feuchtegehalt 0%.
2. Der Zustand der **Fasersättigung**, bei dem das System der Mikroporen maximal mit Wasser gefüllt ist. Dabei liegt der Feuchtegehalt je nach Holzart bei 28% bis 32%.
3. Zustand der **Wassersättigung**. Neben dem Mikroporensystem ist auch das Makroporensystem maximal mit Wasser gefüllt. Man unterscheidet nach der Art der Bindung zwei Arten von Wasser im Holz. Bei mittels chemischer, physikalischer oder kapillarer Sorption bis zur Fasersättigung aufgenommenem Wasser spricht man von gebundenem Wasser. Oberhalb der Fasersättigung spricht man von freiem Wasser (WAGENFÜHR, 2008).

2.1.3 Wasseraufnahme von Holz

Holz ist ein hygroskopischer Stoff. Wasser wird von ihm aus der Luft durch Adsorption aufgenommen und durch Desorption wieder abgegeben. Bei einer relativen Luftfeuchte von 100% ist der Fasersättigungsbereich erreicht. Sinkt die relative Luftfeuchte, so kommt es zur Desorption. Im Bereich bis zur

Fasersättigung ist ein Hysterese-Effekt (Abbildung 1) zwischen Adsorption und Desorption vorhanden. Dies bedeutet, dass trockenes Holz einer Wiederbefeuchtung Widerstand leistet. Die Adsorption kann in Chemisorption, Physisorption und Kapillarkondensation getrennt werden. Bei der Chemisorption lagern sich Wassermoleküle an hydrophile Gruppen (z.B. Hydroxylgruppen) an. Physisorption bedeutet, dass sich Wassermoleküle durch Van-der-Waals-Kräfte anlagern. Von Kapillarkondensation spricht man wenn Wasser, aufgrund eines niedrigeren Sättigungsdruckes in den Kapillaren als über einer ebenen Oberfläche, kondensiert.

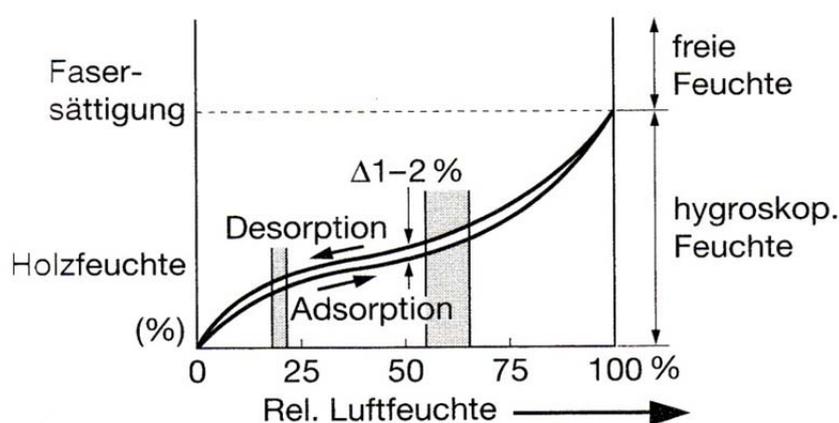


Abbildung 1: Hysterese-Effekt in der Trocknungsphase (Quelle: WAGENFÜHR, 2008).

2.1.4 Wassertransport im Holz

Es können zwei Arten des Wassertransportes im Holz unterschieden werden. Oberhalb des Fasersättigungsbereiches erfolgt der Wassertransport durch Kapillarkräfte, im Fasersättigungsbereich durch Diffusion. Beim Transport durch Kapillarkräfte bewegt sich Wasser nach den Gesetzen der Kapillarphysik von weiten in Richtung enger Kapillaren. Die Geschwindigkeit der Aufnahme wird dabei von der Dichte des Materials (je höher die Dichte, desto niedriger die Aufnahmegeschwindigkeit), von den Oberflächeneigenschaften, von der anatomischen Richtung des Holzes (in Faserrichtung schneller als quer zur Faser), und von der Holzart (Verthyllung bei Laubholz und Tüpfelbildung bei Nadelholz) gesteuert. Eine Kenngröße dazu ist der Wasseraufnahmekoeffizient nach der DIN EN ISO 15148. Bei der Aufnahme von Wasser im Fasersättigungsbereich erfolgt der Transport der Wassermoleküle durch Diffusion. Der Diffusionswiderstands (μ) nach DIN EN ISO 15272 ist dabei die wichtigste Kenngröße, welche sich als Quotient aus dem Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten der Luft δ_d und dem des Stoffes, in diesem Fall des Holzes, berechnet. Die Diffusionswiderstandszahl steigt bei Holz mit zunehmender Dichte und abnehmendem Feuchtegehalt (WAGENFÜHR, 2008).

2.1.5 Trocknung von Holz und deren Bedeutung für den Heizwert

„Trocknung kann ganz allgemein als thermischer Prozess aufgefasst werden, bei dem ein Feststoff (Holz) Flüssigkeit (Wasser) entzogen wird“ (WAGENFÜHR, 2008). Der Feuchteentzug erfolgt durch Überführung des im Holz gebundenen Wassers in Dampf und den Abtransport dessen durch Luftströmungen. Ziel einer jeden Holztrocknung ist es den Feuchtegehalt im Holz zu senken, um es für bestimmte Anwendungen nutzbar zu machen (WAGENFÜHR, 2008).

Je wärmer und trockener die zuströmende Luft ist, desto intensiver ist die Trocknung. Die zuströmende Luft ist bemüht ein Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen dem Trocknungsgut und ihr herzustellen. Daher nimmt sie Wasser in Form von Dampf auf. Die Luft enthält aber schon eine gewisse Menge an Wasserdampf. Erreicht sie ihren Sättigungspunkt, so kann sie keinen weiteren Wasserdampf aufnehmen. Man spricht hier von der Sättigungsfeuchte. Wo sie liegt, hängt von der Temperatur und Wassermenge ab. So kann wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte. Ist die Luft gesättigt, so liegt die relative Luftfeuchte bei 100%. Zu einer Sättigung kann es aber nicht nur durch Aufnahme von Wasserdampf kommen, sondern auch durch Abkühlen der Luft. Hierdurch wird das potentielle Wasserhaltevermögen gesenkt. Kühlt die Luft bei Erreichen einer relativen Luftfeuchte von 100% noch stärker ab, so gibt sie Wasser in Form von Nebel und Taubildung ab. Steigt die Temperatur wieder, sinkt die Luftfeuchte und die Luft kann wieder mehr Wasser aufnehmen. Wie viel Wasser aufgenommen werden kann lässt sich im h-x-Diagramm nach Mollier (Abbildung 2) ablesen. Es zeigt den Zusammenhang zwischen Temperatur, relativer Luftfeuchte und Feuchtegehalt in g/kg bzw. g/m³ trockener Luft. So kann ein m³ Luft bei 0 °C maximal 4,8 g Wasser aufnehmen. Bei 20 °C kann derselbe m³ 17,3 g Wasser aufnehmen (BRUSCHE, 1983).

Möchte man Holz energetisch nutzen, so dient das Abtransportieren von Feuchtigkeit aus dem Holzkörper primär der Steigerung des Heizwertes. Bezogen auf den Wassergehalt sinkt der Heizwert linear mit zunehmendem Wassergehalt, während der Brennstoffbedarf exponentiell ansteigt. Der Grund dafür ist, dass beim Verbrennen feuchten Holzes zuerst das im Holz gespeicherte Wasser verdampft werden muss. Dabei ist Energie in Höhe der Verdampfungswärme von Wasser (2441 kJ/kg) aufzuwenden. Um diesen Wert wird der Heizwert von Holz vermindert. Dieser liegt bei Holz bei etwa 18 MJ/kg. Mit Reduktion des Heizwertes kommt es auch zu einem Sinken des feuertechnischen Wirkungsgrades.

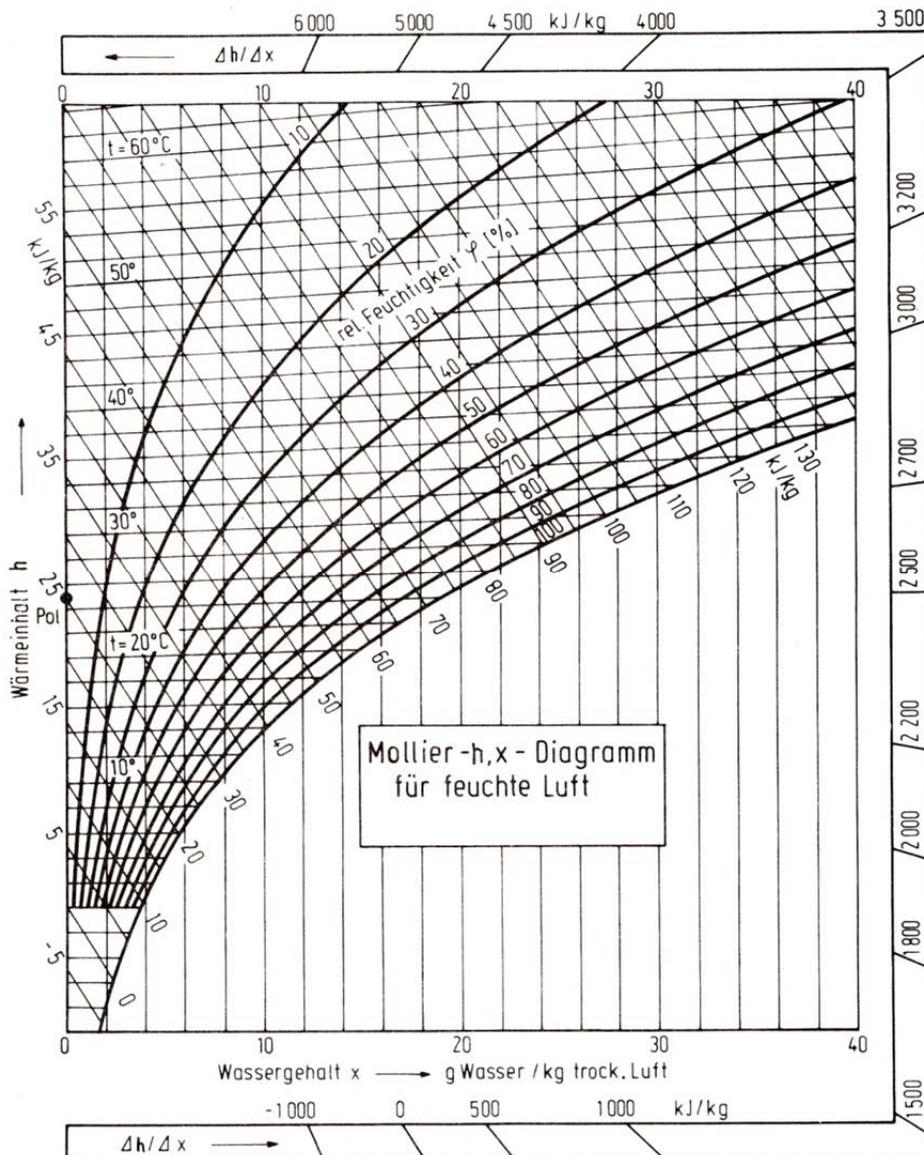


Abbildung 2: h-x-Diagramm nach Mollier (Quelle: BRUSCHE, 1983).

Damit gehen ein Sinken der Brenngeschwindigkeit und -temperatur einher. Bei über 30% Wassergehalt kommt es zu unvollständiger Verbrennung, vor allem bei Kleinanlagen. Die Taupunkttemperatur der Abgase steigt ebenfalls an. Dies kann zu Kondensatbildung an den Kaminwänden führen (WEINGARTMANN, 1991).

Mit sinkendem Wassergehalt steigt der Heizwert an (Abbildung 3). Bei ca. 88% Wassergehalt muss bei der Verbrennung die gesamte aus dem Holz gewonnene Energie zum Verdampfen des im Holz gespeicherten Wassers aufgewendet werden. Dies bedeutet, dass je niedriger der Wassergehalt desto weniger Brennstoff wird für dieselbe Menge an Energie benötigt.

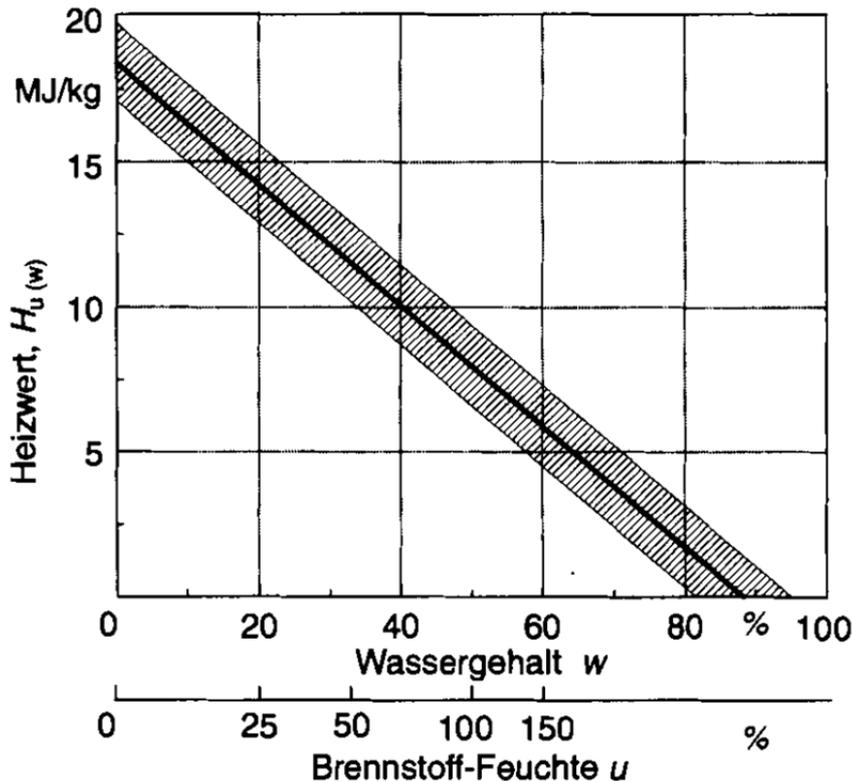


Abbildung 3: Heizwert in Abhängigkeit vom Wassergehalt (HARTMANN & KALTSCHMIDT, 2001).

2.2 Literaturanalyse

2.2.1 Freilufttrocknung allgemein

Bei der Trocknung im Freiland steht das Holz in Wechselwirkung zum natürlichen Umgebungsklima (WAGENFÜHR, 2008). Es sind dabei grundsätzlich zwei Arten der Trocknung zu unterscheiden. Einerseits trocknet das Gut durch die Sonneneinstrahlung (Strahlungstrocknung), andererseits durch den Umstand, dass die an der Erdoberfläche erwärmte Luft durch Luftdruckunterschiede in Bewegung kommt und über den zu trocknenden Körper strömt (Konvektionstrocknung). Bei der Strahlungstrocknung wirkt, senkrecht auf die oberste Grenze der Erdatmosphäre, im Mittel ein Energiestrom von $1,35 \text{ kW/m}^2$ (Solarkonstante) auf die oberste Grenze der Erdatmosphäre. Davon kommen in etwa $0,17 \text{ kW/m}^2$ auf der Erdoberfläche an. Schräge und senkrechte Flächen erhalten im Durchschnitt weniger Energie. Die Konvektionstrocknung hängt von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Windstärke ab. Der Trocknungsverlauf wird stark von den Witterungsbedingungen beeinflusst. Sie sind entscheidend für den Trocknungsverlauf und dessen Geschwindigkeit. Selbst unter günstigen Bedingungen sei bei der Freilufttrocknung nur eine Trocknungsgeschwindigkeit von $0,4 \text{ kg/m}^2\text{h}$ zu erwarten. KRÖLL (1978) sieht für Deutschland nur die Monate April bis Oktober als jene mit nennenswerten Trocknungsgeschwindigkeiten an. Lange Schlechtwetterperioden würden dem Trocknungserfolg erheblich schaden.

2.2.2 Wassergehalt

Der erreichbare Wassergehalt ist stark von der Trocknungsperiode und den darin herrschenden Klimabedingungen abhängig. Darüber hinaus kommen noch Aspekte der Lagerung hinzu. NURMI (1995) konnte ein Absinken des Wassergehaltes bei Weidenstämmchen (*Salix aquatica*) von 53,9% auf 34,6% im Zeitraum von April bis Juli nachweisen. Bis zum September des folgenden Jahres sank der Wassergehalt auf 26,0%. GIGLER et al. (2000b) beobachteten bei Weidenstämmchen (*Salix viminalis*) ein Absinken des Wassergehaltes auf 20% bis 30% im Zeitraum von Dezember bzw. März bis August. Bei einer europaweiten Studie von RÖSER et al. (2010) konnte in Finnland eine Trocknung von Grauerlen- (*Alnus incana*) und Kiefernrundholz (*Pinus sylvestris*) innerhalb eines Jahres von 53% auf 30% bis 40% festgestellt werden. In Schottland sank der Wassergehalt von Sitkafichte (*Picea sitkensis*) und Küstenkiefer (*Pinus contorta*) von 55% auf 30% im Zeitraum von Juni bis Jänner.

Der Wassergehalt von im Frühjahr gefällten Fichtenbäumen (*Picea abies*) nahm durch Trocknung über den Sommer von 57% auf 42% ab (SUADICANI u. GAMBORG, 1999). Bei Trocknung von Durchforstungsholz im Bestand konnten NURMI und HILLEBRAND (2007) beobachten, dass Birke (*Betula pubescens*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) von Mai bis August auf unter 30% Wassergehalt trockneten.

JIRJIS (1995) belegt ein Absinken des Wassergehaltes um 20% bei Weide (*Salix* sp.) bei Lagerung von Schlagrücklass im Polter über einen Sommer. In einer weiteren Studie zeigte sich, dass Schlagrücklass von Fichte (*Picea abies*), vergleichsweise lose auf der Schlagfläche, an der Straße im Polter und als Hackgut in einem Lager getrocknet, am Ende verschieden hohe Wassergehalte aufwies. So trocknete Ersterer von September bis April von 56,0% auf 46,7%. Danach wurde er bis September in einem Polter gelagert und der Wassergehalt sank auf 28,5%. Im selben Zeitraum trocknete der Schlagrücklass im Polter auf 42,2%, bei jenem als Hackgut gelagerten stieg der Wassergehalt auf 65,3% (NURMI, 1999). Bündelt man Schlagrücklass von Fichte (*Picea abies*), Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Birke (*Betula pubescens*), und poltert diesen, so kann der Wassergehalt von 47% bis 56% auf 22% bis 33% im Zeitraum von April bis Oktober sinken (NORDFJELL und LISS, 2000). Das Trocknungsverhalten von gebündeltem Durchforstungsholz und Schlagrücklass, hauptsächlich Birke (*Betula pubescens*) wurde von PETERSON und NORDFJELL (2007) untersucht. Im Mai war der Wassergehalt schon auf 28,6% gesunken, nach neun bzw. zwölf Monaten lag der Wassergehalt bei 18,2% bis 18,8% bzw. 20,7% bis 24,9%. Trocknet man Schlagrücklass lose über den Sommer und bündelt ihn erst dann, so kann im Vergleich zur Bündelung in feuchtem Zustand ein besseres Trocknungsergebnis erzielt werden. (NURMI und HILLEBRAND, 2007).

Für kreuzgepoltertes Bauholz geben GOLSER et al. (2005) einen Endwassergehalt von 20% nach einem Sommer an. Bei Lagerung im

Parallelpolter werden für Fichte (*Picea abies*) von Mai bis Oktober 20% Endwassergehalt angegeben, für Pappel (*Populus* sp.) 25%, für Buche (*Fagus sylvatica*) 30% und für Schwarzkiefer (*Pinus nigra*) 33%. Es kann also allgemein geschlossen werden, dass bei passender Lagerung über einen Sommer, längstens nach einem Jahr, Wassergehalte im Bereich von 20-30% erreicht werden können, sowohl für Rundholz als auch für Schlagrücklass. Dabei spielen neben äußeren Einflussbedingungen auch baumartenspezifische Eigenschaften eine Rolle. So trocknen Baumarten wie Buche (*Fagus sylvatica*) und Schwarzkiefer (*Pinus nigra*), die Rinde mit hohem Diffusionswiderstand besitzen langsamer (GIGLER et al., 2000b; GOLSER et al., 2005).

2.2.3 Trockenmassenverlust

Der Trockenmassenverlust bei der Lagerung von Energierundholz kann als gering bezeichnet werden. Bei Rundholz liegt der Trockenmassenverlust der Baumarten Fichte und Kiefer bei 2%, jener von Erle und Pappel bei 7% bis 9% pro Jahr (GOLSER et al., 2005). JIRIJIS (1995) nennt für abgedeckte Polter weniger als 1% pro Monat. Für Weidenklötzchen geben GIGLER et al. (2004) 3,5% bis 5% Trockenmassenverlust im Zeitraum März bis Juni an. Naturgemäß liegen die bei PETTERSON und NORDFJELL (2007) beobachteten Trockenmassenverluste bei gebündelten Schlagrücklass von 8,4% bis 18,1% pro Jahr höher als bei Rundholz.

2.2.4 Idealer Lagerungszeitraum

Der Großteil der Autoren kommt zum Schluss, dass es ideal ist Holz zu Beginn des Frühjahres einzulagern und bis Ende des Sommers gepoltet zu lassen. Danach ist es entweder abzutransportieren oder durch Abdeckung vor Wiederbefeuchtung zu schützen, da sich im Herbst feuchteres Wetter einstellt (HÖLDRICH et al., 2006, NURMI 1995, NURMI, 1999, NURMI und HILLEBRAND, 2007, PETTERSON und NORDFJELL, 2007). Mit Abdeckung kann Holz einen weiteren Sommer gelagert bleiben und der Wassergehalt noch weiter abgesenkt werden (HÖLDRICH et al., 2006, NURMI und HILLEBRAND, 2007, PETTERSON und NORDFJELL, 2007).

2.2.5 Abdeckung

Die Notwendigkeit der Abdeckung hängt stark von den klimatischen Bedingungen im Lagerungsgebiet ab. So zeigte sich bei RÖSER et al. (2010), dass unter den herbst- und winterfeuchten Bedingungen in Finnland und Schottland eine Abdeckung notwendig ist, im milderen Klima Italiens aber nicht unbedingt. Buche (*Fagus sylvatica*) zeigte hier keine Reaktion auf Abdeckung, während Fichte (*Picea abies*) etwas besser trocknete. GIGLER et al. (2000b) konnten keinen signifikanten Einfluss der Abdeckung auf den Wassergehalt des Polter feststellen. Als Grund dafür geben sie an, dass nur die obersten Reihen des Polters vom Niederschlag betroffen seien und diese durch Einstrahlung wieder schnell trockneten. HÖLDRICH et al. (2006) konnten für gespaltenes Brennholz zeigen,

dass eine Abdeckung zu niedrigeren Wassergehalten führt. Auch PETERSON und NORDFJELL (2007) stellten für gebündelten Schlagrücklass fest, dass der in abgedeckten Poltern gelagerte besser trocknete. NURMI und HILLEBRAND (2007) grenzen den damit erzielbaren Effekt mit 3-6% weniger Wassergehalt ein. Sie konnten aber nur bei der Birke (*Betula pubescens*), nicht aber bei der Kiefer (*Pinus sylvestris*), einen signifikanten Effekt der Abdeckung nachweisen. JIRJIS (1995) spricht nach neun Monaten Trocknung von einem Wassergehalt von 26% bei abgedecktem im Vergleich zu 30% bei nicht abgedeckten, gebündelten und gepolterten Schlagrücklass.

2.2.6 Effekte von Bearbeitung

Unter Bearbeitungseffekten sind alle Arten der Bearbeitung, aus dem Prozess der Holzernte resultierend oder zusätzlich durchgeführt, zu verstehen. Dazu gehören Entrindung bzw. teilweise Entrindung, Spaltung, Bündelung und Entastung. NURMI und HILLEBRAND (2007) fanden bei Kiefer (*Pinus sylvestris*) keinen signifikanten Effekt der Entastung auf den Trocknungsverlauf. Sie hätten erwartet, dass Ganzbäume schneller trocknen, da sie wesentlich stärker transpirieren. Das Ausbleiben dieses Effektes wird mit den durch die Entastung entstandenen Wunden erklärt, die eine gleiche Trocknungsrate ermöglichen.

NURMI und LETHIMÄKI (2010) teilentrindeten Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Birke (*Betula pubescens*) mittels zusätzlichen Bolzen auf den Astungsmessern eines Harvesters, konnten aber keinen signifikanten Effekt auf die Trocknung finden. RÖSER et al. (2010) konnten nur bei der Grauerle einen Effekt der Entrindung feststellen, nicht aber bei der Kiefer. GOLSER et al. (2005) sprechen hingegen von einem großen Einfluss einer Teilentrindung bei der Ernte. GIGLER et al. (2000a) quantifizieren diesen Effekt mit einer Verzehnfachung der Trocknungsgeschwindigkeit bei Weidenstämmchen (*Salix viminalis*).

Spaltung lässt Brennholz anfangs schneller trocknen als ungespaltenes (HÖLDRICH et al., 2006). GOLSER et al. (2005) geben an, dass, wenn man Holz vor der Lagerung spaltet, die doppelte Menge an Feuchtigkeit im selben Zeitraum verloren gehe. PETERSON und NORDFJELL (2007) konnten zeigen, dass Schlagrücklass in Bündeln besser trocknete, als loser Schlagrücklass in Poltern. Schon 2000 hatten NORDFJELL und LISS nachweisen können, dass dabei weniger stark komprimierte Bündel besser trocknen als stark komprimierte. HILLEBRAND (2007) konnten am Ende der Trocknung im Heizwert keinen Unterschied zwischen geasteten und nicht geasteten Holz finden.

2.2.7 Lagerungsbedingungen

Bei der Lagerung von Rundholz erwiesen sich Kreuzpolter als etwas trocknungsaktiver als Parallelpolter. Generell ist die bodenfreie Lagerung mittels Querhölzern zu empfehlen. Dies dient dazu Wiederbefeuchtung aus dem Boden hintanzuhalten (GOLSER et al., 2005, NORDFJELL und LISS, 2000, NURMI und

HILLEBRAND, 2007). Wie erwähnt spielt Abdeckung unter bestimmten Voraussetzungen eine Rolle. Generell wird empfohlen den Polter an einem windzugänglichen, sonnigen und exponierten Standort zu errichten (GOLSER et al., 2005, HÖLDRICH et al., 2006). Schlagrücklass sollte auf der Fläche vorgetrocknet und dann gebündelt in Polter verbracht werden (NURMI, 1999). JIRJIS (1995) hebt bei der Bündelung auch die leichtere Manipulierbarkeit hervor.

2.2.8 Heizwert

SUADICANI und GAMBORG (1999) konnten zeigen, dass Hackgut aus im Frühjahr gefällten und bis zum Herbst getrockneten Fichten, bezogen auf das Frischgewicht einen höheren Heizwert aufweist. Lediglich auf das Trockengewicht bezogen ist jener frischen Hackgutes höher, da hier noch flüchtige brennbare Extraktstoffe in den Nadeln enthalten sind.

2.2.9 Modellierung des Wassergehalts

Bei der Modellierung von Wassergehalten finden sich zwei unterschiedliche Ansätze. GIGLER et al. (2000a) modellieren Trocknungsfunktionen über Diffusionsgleichungen unter der Annahme einer zylindrischen Form eines Stammes. Dabei weist die Rinde als dünne Schicht einen höheren Diffusionswiderstand auf als das Holz selbst. In GIGLER et al. (2000 b) wird ein generalisiertes, lineares, gemischtes Modell verwendet. Für die Trocknung wurden relative Luftfeuchte und Temperatur als Erklärende identifiziert, für die Evaporation und Wiederbefeuchtung Windgeschwindigkeit, Niederschlag und Globalstrahlung. FILBAKK et al. (2011) hingegen verwendeten quadratische Wurzeln und Polynome dritten Grades für die Trocknungsfunktion. Klimabedingungen (Temperatur, Niederschlag), Abdeckung des Polters und die Kronengröße sind entscheidende Faktoren für die Trocknung.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Modellhypothesen

- Hypothese 1: Die Trocknung im Freiland liefert einen Wassergehalt der die längere Lagerungszeit rechtfertigt.
- Hypothese 2: Es ist möglich den Wassergehalt eines Polters über die Trocknungsdauer zu simulieren: $Wassergehalt = df(\text{Windgeschwindigkeit}, \text{Lufttemperatur}, \text{relative Luftfeuchte}, \text{Niederschlag})$
- Hypothese 3: Starke Niederschlagsereignisse haben einen entscheidenden Einfluss auf das Trocknungsverhalten eines Polters. Die Trocknung wird für einen längeren Zeitraum unterbrochen und es verbleibt Feuchtigkeit am Polter.

3.2 Versuchsaufbau und Standort

Als Standort für den Versuchsaufbau wurde Hartberg in Nordosten der Steiermark gewählt. Auf dem dortigen Biomassehof des Maschinenringes „Hartbergerland“ wurde eine Fläche für den Versuch bereitgestellt. Hartberg liegt auf etwa 395 m Seehöhe (STATISTIK STEIERMARK, 2011) und befindet sich im Wuchsgebiet 5.2. „Bucklige Welt“. Das Klima dieses Wuchsgebietes wird als wenig illyrisch und etwas kühl beschrieben. Der Niederschlag liegt in diesem submontan- bis tiefmontanen Gebiet bei 700-1000 mm (BFW, 2011). Die Niederschlagsmaxima treten in den Sommermonaten Juni und Juli auf, während die Frühjahrs- und Herbstniederschläge eher gering ausfallen. 2010 war gegenüber dem langjährigen Mittel ein leicht unterdurchschnittlich warmes und wesentlich niederschlagsreicherer Jahr (Tabelle 2). Die niedrigere mittlere Lufttemperatur der eigenen Messung gegenüber der Messung der ZAMG für Hartberg lässt sich wahrscheinlich aus teilweiser Beschattung der eigenen Messstation durch die umgebenden Bäume und Gebäude erklären.

Tabelle 1: Mittlere Lufttemperatur und mittlerer Niederschlag für Hartberg im langjährigen Mittel und 2010 (Quelle: STATISTIK STEIERMARK, 2011, eigene Messung).

Monat	Mittlere Lufttemperatur in °C			Summe Niederschlag in mm		
	Mittel ZAMG 1971-2000	Messung ZAMG 2010	Eigene Messung 2010	Mittel ZAMG 1971-2000	Messung ZAMG 2010	Eigene Messung 2010
Jänner	-1,0	-2,4	-3,1	21	34	26
Februar	0,5	-0,1	-0,6	22	21	24
März	4,6	4,8	4,3	35	30	18
April	9,4	9,8	9,6	43	23	20
Mai	14,3	15,2	14,1	84	83	99
Juni	17,2	18,9	18,2	109	123	103
Juli	19,3	22,0	21,4	90	103	67
August	18,9	19,0	18,2	99	160	158
September	14,8	13,4	13,0	76	129	108
Oktober	9,6	7,2	6,9	61	30	30
November	3,5	5,8	5,4	52	65	49
Dezember	0,1	-3,5	-3,7	35	43	42
Summe	9,3	9,2	8,7	725	844	744

Nachfolgend sind Minima, Maxima und Mittel der Parameter Lufttemperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und relativer Luftfeuchte im Untersuchungszeitraum dargestellt. (Tabelle 4). Die Messwerte beziehen sich dabei auf zehnminütige Messintervalle, d.h. dass ein Messwert von 15,4 mm Niederschlag in zehn Minuten hochgerechnet einem Niederschlag von 92,4 mm pro Stunde entspräche. Die hohe Auflösung der Daten wurde gewählt um Auswirkungen von Starkregenereignissen besser abbilden zu können.

Tabelle 2: Ausgewählte Klimaparameter basierend auf zehnminütigen Messintervallen.

Parameter	Minimum	Mittel	Maximum
Lufttemperatur in °C	-16,70	8,68	33,56
Niederschlag in mm	0,00	0,02	15,40
Windgeschwindigkeit in km/h	0,00	4,41	30,56
Relative Luftfeuchte in%	22,25	80,04	100,00

Der Versuchsaufbau befindet sich auf ebenem Gelände, welches im Südwesten talwärts abfällt. Im Nordwesten und -osten wird es von Wald begrenzt. Der Versuchsaufbau besteht aus einem 500 kg schweren Rungenkorb, ähnlich dem Aufbau eines Holztransport-LKWs (Abbildung 4). Dieser Korb wurde an den Eckpunkten auf vier Wiegezellen des Typs HBM 1-RTN0.05/15T positioniert. Neben dem Rungenkorb befindet sich eine Wetterstation, die auf einem Datalogger sowohl die Wetterdaten als auch die Messungen der Wiegezellen erfasst. Diese werden über ein integriertes Modem einmal täglich von einem Server der Universität für Bodenkultur abgerufen. Die Stromversorgung für den Betrieb wurde mittels Solarpanel und Pufferbatterien sichergestellt.

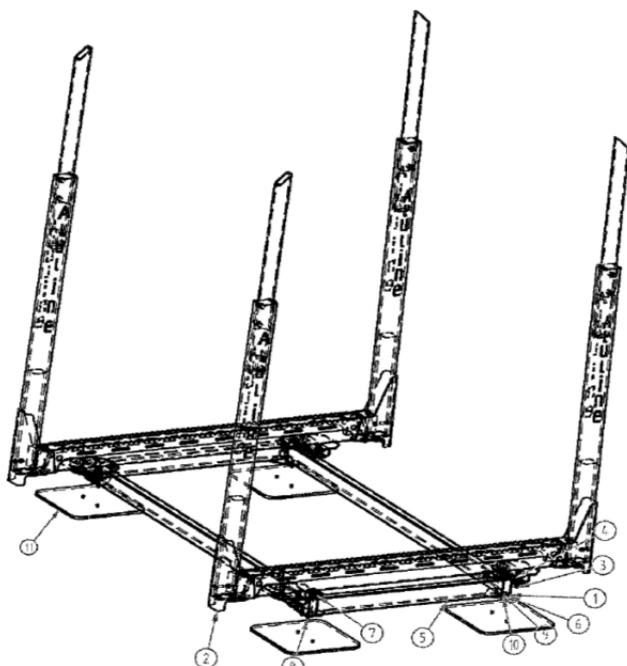


Abbildung 4: Konstruktionszeichnung des Rungenkorbes.

Das Messintervall für die aufgezeichneten Parameter (Tabelle 3) betrug zehn Sekunden, wobei aus diesen Werten dann wiederum Mittel über zehn Minuten gebildet wurden, welche die Grundlage für die statistische Analyse darstellen.

Tabelle 3: Variablen der eigenen Messung.

Variablenname	Einheit	Beschreibung
TIMESTAMP	TS	Zeitstempel; Format: YYYY-MM-DD HH:MM:SS; Winterzeit
RECORD	RN	Fortlaufende Datensatznummer
Batt_Volt_Avg	Volt	10 min. Mittel der Batteriespannung
Zelle1_Avg	N	10 min. Mittel der Kraft auf Zelle 1
Zelle2_Avg	N	10 min. Mittel der Kraft auf Zelle 2
Zelle3_Avg	N	10 min. Mittel der Kraft auf Zelle 3
Zelle4_Avg	N	10 min. Mittel der Kraft auf Zelle 4
Zelle5_Avg	N	10 min. Mittel der Kraft auf Zelle 5
WS_ms	m/s	Letzter Messwert der Windgeschwindigkeit
WindDir	Grad	Letzter Messwert der Windrichtung
WS_ms_Avg	m/s	10 min. Mittel der Windgeschwindigkeit
WS_ms_Max	m/s	10 min. Maximum der 10 sec. Messwerte d. Windgeschwindigkeit
WS_ms_S_WVT	m/s	Standardabweichung des 10 min. Mittels der Windgeschwindigkeit
WindDir_D1_WVT	Grad	10 min. Mittel der Windrichtung
WindDir_SD1_WV	Grad	Standardabweichung des 10 min. Mittels der Windrichtung
AirTC_Avg	°C	10 min. Mittel der Lufttemperatur
RH_Avg	%	10 min. Mittel der relativen Luftfeuchtigkeit
Waage_Avg	kg	Summe der 10 min. Mittel von Zelle 1 bis 4
Rain_mm_Tot	mm	Summe des Niederschlages letzte 10 min; 0,1mm Auflösung

Die Dauer der Messung wurde mit einem Zeitraum von mindestens einem Jahres veranschlagt. Der tatsächliche Versuchszeitraum erstreckte sich dann über ein

Jahr und zwei Monate. An Stammproben wurde der Anfangs- und Endwassergehalt, die Anfangs- und Enddichte, sowie der Verlauf des Wassergehaltes im Stamm bestimmt.

3.3 Vorbereitung der Datenerhebung

Der Versuch wurde am 16.12.2009 gestartet. Das zur Einlagerung bestimmte Holz stammte aus einer Durchforstung im Raum Stuhleck (etwa 60 km nördlich von Hartberg) und setzte sich zu 100% aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) zusammen. Bei der Anlieferung wurde an jedem Stamm Länge und Mittendurchmesser gemessen. Zur Identifikation der Stämme bei der Endvermessung wurden diese an der Stirnfläche mit einer Nummer versehen. Die mittlere Länge der Stämme betrug 4,72 m. Der kleinste Durchmesser lag bei 5,5 cm, der größte bei 35,5 cm, der mittlere bei 15,19 cm. Die Volumsberechnung ergab ein Gesamtvolumen des Polters von 19,5 m³ mit Rinde. Nach der Einlagerung in den Rungenkorb wurde ein Gewicht von 17.629 kg gemessen. Insgesamt wurden 208 Stämme eingelagert.

Aus Gruppen von jeweils fünf Stämmen wurde der Stamm mittleren Durchmessers ausgewählt und an diesem Proben zur Bestimmung der Dichte und des Ausgangswassergehalts des Polters geworben. Das Werben der Proben erfolgte mittels Motorsäge. Dabei wurden 15 cm starke Stammscheiben vom Stammfuß abgetrennt. Die Proben wurden mit einer Identifikationsnummer versehen und luftdicht verpackt im Tiefkühlraum der Universität für Bodenkultur Wien gelagert. Insgesamt wurden an 42 Stämmen Proben genommen.

Die Wiegezellen, auf denen der Rungenkorb positioniert war, wurden vor der Einlagerung des Holzes mittels Tara-Taste auf null gesetzt. Das Einlagern der Stämme in den Rungenkorb erfolgte mittels Rückeanhänger mit aufgebautem Kran.

3.4 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte vollautomatisiert im Zeitraum vom 16.12.2009 bis zum 10.02.2011. Die Messung war sowohl vor Beginn als auch nach Beendigung des Versuchs einige Zeit aktiv, woraus Daten für die Korrektur umweltbedingter Messfehler gewonnen werden konnten. Um abzuklären ob ein signifikanter Messfehler vorliegt, wurde am 14.10.2010 eine fünfte Wiegezelle installiert, die vorerst mit keinem, ab 06.11.2010 dann mit einem bekannten Gewicht von 25,325 kg belastet wurde. Diese Wiegezelle ist bis 04.12.2010 beobachtet worden.

3.5 Nachbereitung der Datenerhebung

Der Versuch lief bis zum 10.02.2011. Vor dem Auslagern wurden vierzehn ausgesuchte Stämme, von denen schon bei der Einlagerung Proben genommen worden waren, anhand ihrer ID aufgesucht und mit gelbem Farbmarkierspray

gekennzeichnet. Weiters wurde aus jeweils dem unteren, mittleren und oberen Drittel des Polters ein Stamm zufällig ausgewählt und mit rotem Farbspray markiert.

Die Auslagerung erfolgte mittels Rückeanhänger mit aufgebautem Kran. Sobald der Hänger voll beladen war, wurde er auf einer Brückenwaage gewogen. Die markierten Stämme sind beim Entladen vorerst beiseitegelegt und erst mit der letzten Fuhre gewogen worden. Diese wurden vom Rest des Polters separiert.

An den gelb markierten Stämmen wurden Stammscheiben im Abstand von 50 cm vom Stammfuß und mit einer Dicke von 20 cm genommen. Dies diente dazu Randeffekte zu vermeiden. An den rot markierten Stämmen wurden mehrere Proben genommen, die Länge des Stammes gemessen und dann Stammscheiben mit einer Dicke von 15 cm gewonnen. Dies geschah von beiden Enden beginnend mit je einem Abstand von 50 cm zwischen den Mitten der Scheiben. Die mittlere Stammscheibe entnahm man bei 50% der Stammlänge. Zusätzlich wurden bei allen für das Werben der Stammscheiben notwendigen Schnitten die Späne aufgefangen, wie die Stammscheiben luftdicht verpackt und mit einer Identifikationsnummer versehen in den Tiefkühlraum verbracht.

3.6 Datenauswertung

Alle, sowohl vor Beginn, als auch nach dem Ende der Messung genommenen Proben, wurden zuerst kreuzweise vermessen, um den mittleren Durchmesser zu bestimmen. Dabei wurde neben dem Durchmesser auch der Rindenanteil ermittelt. Danach wurden die Probestücke auf einer Bandsäge geviertelt und mit einer kalibrierten Waage gewogen. Die exakte Volumsbestimmung fand im Tauchverfahren statt. Die Dichte wurde dann mittels nachfolgender Formel bestimmt:

$\rho = \frac{m}{v}$	Formel 3
----------------------	-----------------

ρDichte in g/cm³
 mMasse in g
 vVolumen in cm³

Zur Bestimmung der Darrdichte wurden die Probestücke im Darrofen bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Danach wurde die oben beschriebene Messprozedur wiederholt. Nachdem auf diese Art und Weise Frisch- und Trockenmasse ermittelt wurden, konnte der Wassergehalt als deren Differenz bestimmt werden.

Für die Auswertung aller mittels Rungenkorbwaage und Klimastation gemessenen Daten wurde die freie Programmiersprache R gewählt. Ihr Vorteil liegt darin, dass

sie es ermöglicht, große Datenmengen schnell, übersichtlich und nachvollziehbar auszuwerten.

Der Auswertzeitraum aller in Folge dargestellten Auswertungen reicht vom 16.12.2009 bis zum 06.02.2011. Zu Beginn wurden die im .csv-Format vorliegenden Daten in R eingelesen und die Wiegedaten von N in kg umgerechnet, sowie die Messfehlerkorrektur der Wiegezellen, (siehe 3.8) durchgeführt. Es folgte das Berechnen der Wägedifferenzen, was der Darstellung der Gewichtsveränderung und des Wassergehaltes dienen sollte. Startwert für den Wassergehalt war der im Labor ermittelte Wassergehalt der Proben. Im nächsten Schritt wurden jene Gewichtsveränderungen ermittelt, bei denen die Lufttemperatur kleiner oder gleich null Grad war und das Gewicht des Polters zunahm. Diese Gewichtsveränderungen wurden als fester Niederschlag (Schnee) angesprochen. Die Gewichte wurden in mm flüssigen Niederschlags umgerechnet und zum flüssigen Niederschlag addiert. Ein Trocknungspotential der Luftfeuchte berechnete sich als 100 minus dem Messwert der relativen Luftfeuchte. Alle Daten wurden stunden- und tageweise gemittelt bzw. aufsummiert.

Zur Quantifizierung des Effektes von Starkniederschlägen auf den Trockenvorgang im Polter wurden die drei niederschlagsstärksten Tage ausgewählt und beschrieben. Dabei war vor allem von Interesse wie stark der Wassergehalt des Polters ansteigt und wie lange es dauert bis er den Wassergehalt vor dem Starkniederschlagsereignis wieder erreicht hat. Dazu wurde jedes Ereignis so lange beobachtet bis der Anfangswassergehalt wieder erreicht war. Zuletzt wurde zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage eine Kosten-Nutzen-Rechnung angestellt.

3.7 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse erfolgte nach der Vorbereitung der Daten. Durchgeführt wurde sie mittels multipler linearer Regressionen. Hierzu wurde als abhängige Variable die Veränderung des Wassergehaltes gewählt. Dabei wurden zwei Analyseansätze gewählt, wobei einer die festen Niederschläge mit einbezog, der andere nicht. Die Auswertung erfolgte sowohl auf Stunden- als auch auf Tageswertbasis.

Es wurden mehrere Varianten getestet. Variante A beinhaltet eine multiple lineare Regression mit den aufbereiteten Rohdaten. Diese Variante wurde einmal mit der Summe des flüssigen und einmal mit der Summe des flüssigen und festen Niederschlages berechnet, was sowohl tages-, als auch stundenbasiert erfolgte. Diese vier Teilvarianten finden sich in den Varianten A bis C. Variante D rechnet nur mit der Kombination von flüssigem und festem Niederschlag.

Bei Variante B war eine weitere Aufbereitung der Daten nötig. Diese wurden in solche geteilt, bei denen die Gewichtsveränderung positiv (Polter nimmt an Gewicht zu) und solche, bei denen die Gewichtsveränderung negativ war (Polter verliert Gewicht). Aus Ersteren wurde die Wiederbefeuchtungsfunktion, aus

Zweiteren die Trockenfunktion errechnet. Die Summe der Wiederbefeuchtung und der Trocknung in einer Stunde bzw. an einem Tag stellte die Änderung des Wassergehalts dar.

Variante C baut auf Variante A und B auf. Es bedurfte einer weiteren Datenmanipulation. Um etwaige Ausreißer und Messfehler abzuschwächen, wurden die Daten mittels gleitendem Mittel geglättet, wobei man bei den Stundenwerten zwölf Stunden (einen halben Tag) und bei den Tageswerten 7 Tage (eine Woche) als Obergrenze für die Glättung festlegte. Als Prüfgröße galt die mittlere Abweichung vom gemessenen Wassergehalt. Innerhalb der definierten Grenzen sollte diese minimiert werden. Dies wurde sowohl für die Funktionen aus Variante A, als auch für jene aus B durchgeführt. Variante D arbeitet nicht mit Mittelwerten, sondern mit den Summen der Variablen auf Stunden- und auf Tagesbasis.

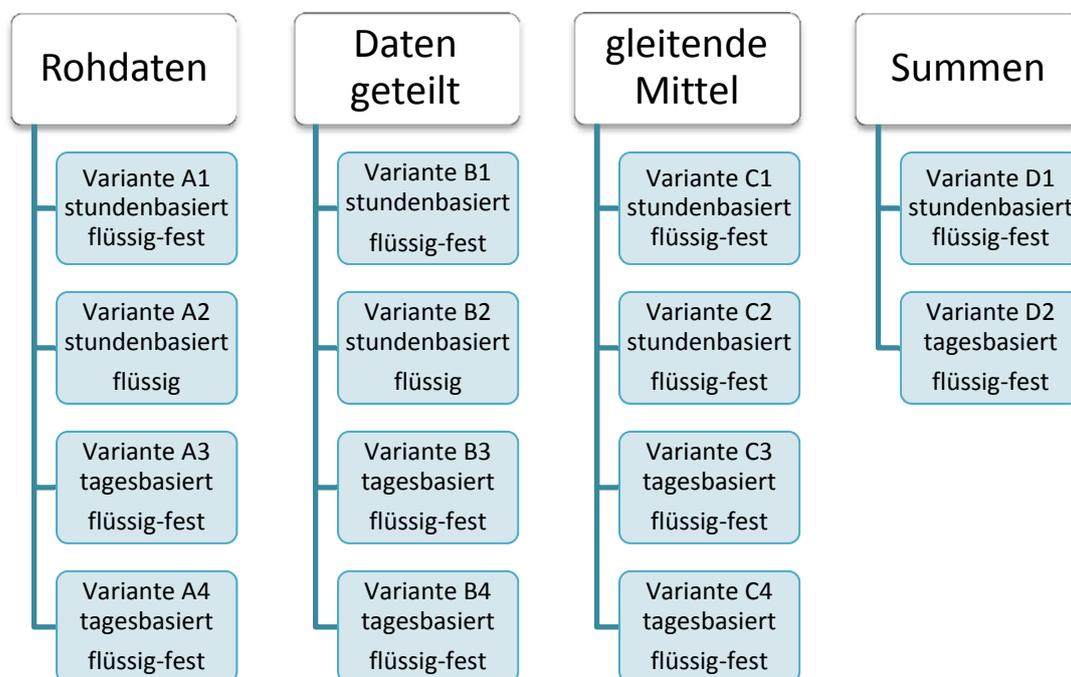


Abbildung 5: Übersicht der untersuchten Varianten.

Weiters wurde bei allen Varianten eine Funktion auf Basis des AIC-Wertes (Akaikes Informationskriterium) benutzt die mittels schrittweiser Regression die nicht signifikanten Variablen ausscheidet. Die AIC „ist eine Kennzahl die zum Vergleich alternativer Spezifikationen von Regressionsmodellen“ dient (WIRTSCHAFTSLEXIKON, 2011).

Nach der Simulation der Modelle A bis D wurden die Ergebnisse mittels paarweisen t-Tests mit den beobachteten Werten verglichen. Für die beste Variante wurde dann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der die Auswirkung der Veränderung der unabhängigen Variablen um jeweils eine Einheit nach unten

und nach oben getestet wurde. Darüber hinaus wurde der Effekt einer Abdeckung simuliert, indem alle Werte des Niederschlages auf null gesetzt wurden.

3.8 Messfehlerkorrektur

Zur Messfehlerkorrektur wurde eine Wiegezeile mit bekanntem Gewicht positioniert. Dabei zeigten sich Abweichungen von durchschnittlich 4,2 kg je Wiegezeile. Um diesem Effekt genauer auf den Grund zu gehen, wurde der Versuchsaufbau in entleertem Zustand vom 11.02.2011 bis zum 23.03.2011 beobachtet. Dann wurde wiederum eine multiple Regression mit den Wettervariablen als unabhängigen und der Abweichung der Messwerte der Wiegezeile von Null als abhängigen Variable gerechnet. Die so gewonnenen Koeffizienten wurden für die in 3.6 angesprochene Formel (Formel 4) zur Messfehlerkorrektur verwendet. Das Bestimmtheitsmaß lag bei 0,792. Der mittlere Fehler konnte von 38,7 N auf $3,0 \cdot 10^{-15}$ N gesenkt werden.

$$W_{Corr} = (W - 27.1709 + 9.6820 * S - 8.8156 * T - 0.1271 * RI) / 9.81 \quad \text{Formel 4}$$

W_{corr}.....Korrektur der Gewichtsmessung in kg

W.....Gemessenes Gewicht in kg

S.....Windgeschwindigkeit in m/s

T.....Lufttemperatur in °C

RI.....relative Luftfeuchte

4 ERGEBNISSE

4.1 Deskriptive Statistik

Beim Verlauf der Lufttemperatur (Abbildung 6) zeigt sich, dass die mittlere Tagestemperatur an 111 von 417 Tagen unter null Grad lag. Die niedrigste mittlere Tagestemperatur wurde am 19.12.2010 gemessen und lag bei $-12,35\text{ °C}$. Die höchste mittlere Tagestemperatur wurde am 17.07.2010 gemessen und lag bei $27,15\text{ °C}$. Der niedrigste Temperaturmesswert von $-16,97\text{ °C}$ wurde am 21.12.2009, der höchste Temperaturwert von $33,56\text{ °C}$ am 12.06.2010 beobachtet. Die mittlere Tageslufttemperatur im Versuchszeitraum lag bei $7,37\text{ °C}$. Die im Jahr 2010 beobachtete Jahresmittellufttemperatur lag bei $8,67\text{ °C}$ und damit $0,53\text{ °C}$ unter dem von der ZAMG beobachteten Wert der Station Hartberg.

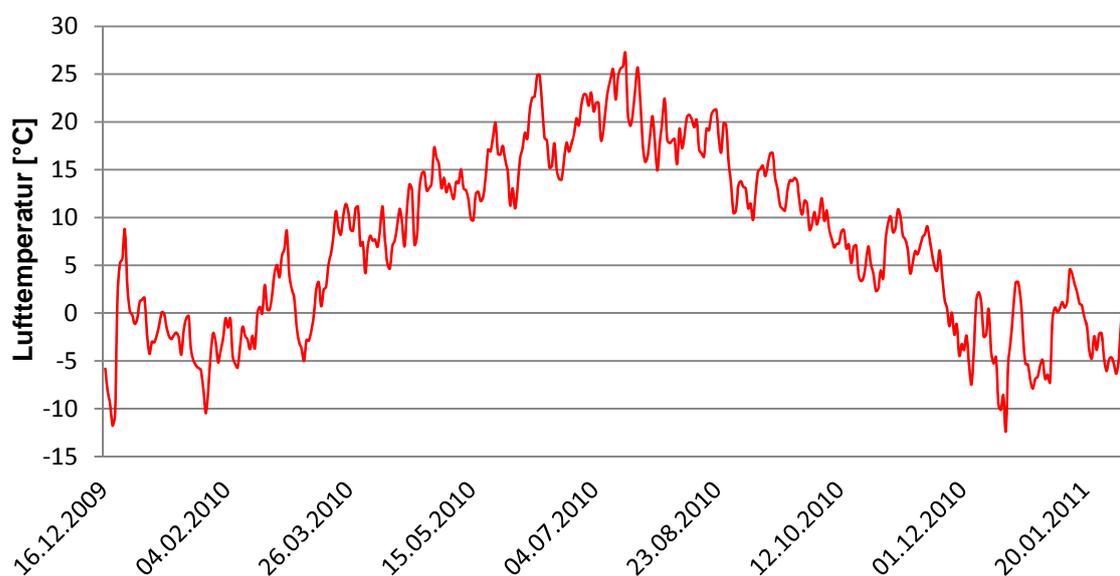


Abbildung 6: Verlauf der mittleren Tageslufttemperatur.

Die mittlere Tageswindgeschwindigkeit (Abbildung 7) lag bei lediglich $1,67\text{ km/h}$. Die maximale mittlere Tageswindgeschwindigkeit wurde am 21.01.2011 gemessen und lag bei $5,91\text{ km/h}$. Die maximal gemessene Windgeschwindigkeit lag bei $30,56\text{ km/h}$ und wurde am 30.03.2010 beobachtet. Die relativ niedrigen Windgeschwindigkeiten lassen sich durch die wenig exponierte Lage des Polters erklären.

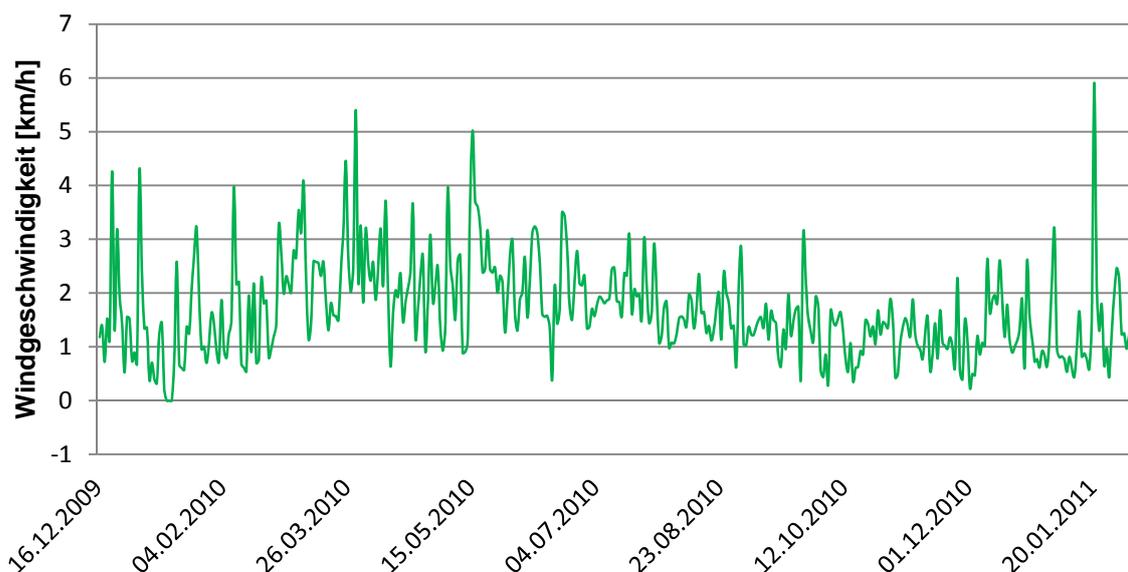


Abbildung 7: Verlauf der mittleren Tageswindgeschwindigkeit.

Ebenfalls durch die Exposition erklären lässt sich die Verteilung der mittleren Tageswindrichtung (Abbildung 8). Es zeigt sich, dass fast 50% des Windes aus Süden kam. Der Grund dafür ist, dass sich der Polter an einem südexponierten Standort befand, wo aus dem Tal kommende Winde den Hauptteil ausmachen.

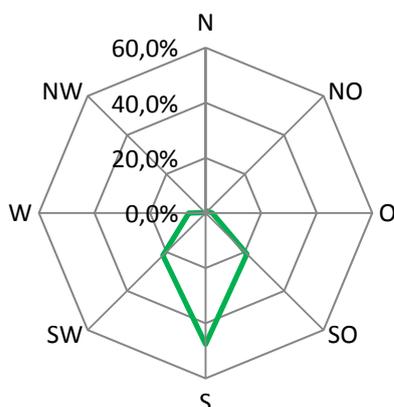


Abbildung 8: Verteilung der mittleren Tageswindrichtung.

Die relative Luftfeuchte (Abbildung 9) ist einer der ausschlaggebenden Parameter was die Aufnahmefähigkeit der Luft für Feuchtigkeit betrifft. Im Versuchszeitraum lag die niedrigste mittlere Tagesluftfeuchte bei 46,37% und wurde am 17.05.2010 gemessen. Der niedrigste Messwert der relativen Luftfeuchte datiert vom 01.03.2010 und lag bei 22,25%. Die mittlere Jahresluftfeuchte lag bei 81,14%.

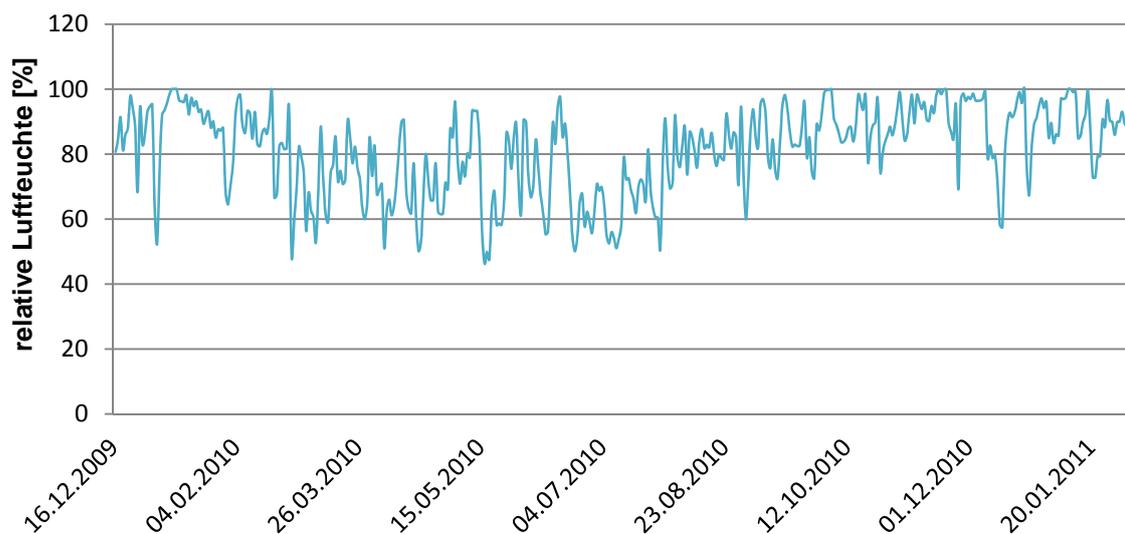


Abbildung 9: Verteilung der mittleren relativen Tagesluftfeuchte.

Die Monate Mai, Juni, Juli, August und September weisen beim flüssigen Niederschlag die intensivsten Ereignisse auf (Abbildung 10). Insgesamt fiel im Versuchszeitraum an 185 von 417 Tagen flüssiger Niederschlag. Der niederschlagsreichste Tag war der 13.08.2010 mit 38,9 mm Niederschlag. Am selben Tag wurde der stärkste Niederschlag pro Stunde mit 31,3 mm beobachtet. Insgesamt wurde eine Niederschlagssumme von 777,3 mm gemessen. Der im Jahr 2010 beobachtete Niederschlag von 743,6 mm lag um 100,4 mm unter dem der ZAMG-Station Hartberg. Der feste Niederschlag wurde lediglich über eine Gewichtszunahme des Polters bei Temperaturen kleiner oder gleich null Grad geschätzt. Die Berechnung ergab für den festen Niederschlag eine Summe von 276,3 mm.

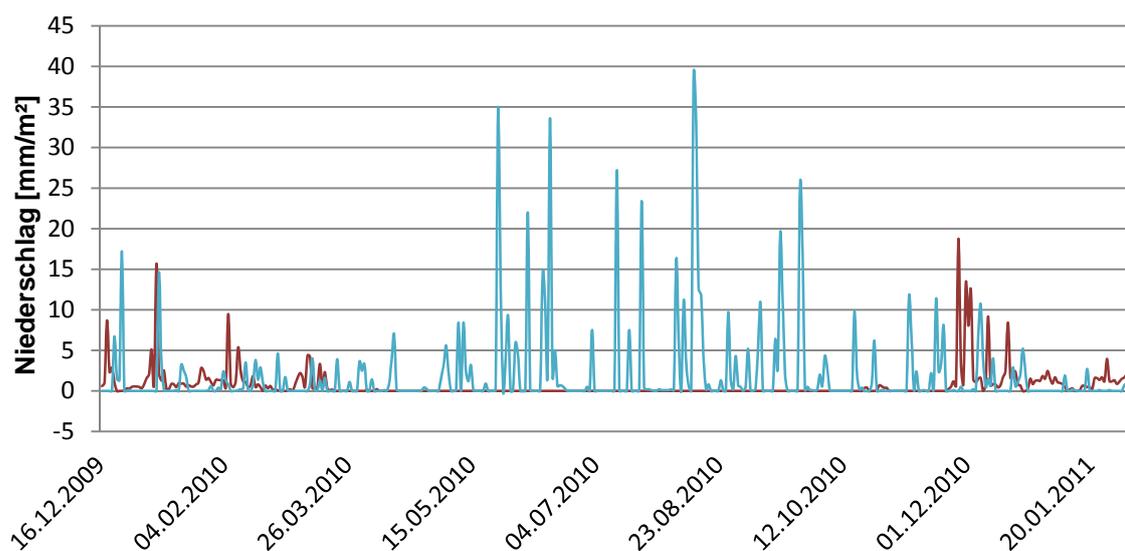


Abbildung 10: Verlauf des flüssigen und festen Niederschlags.

Aus den Gewichtsmessungen wurde die Wassergehaltsveränderungen (Abbildung 11) des Polters berechnet, die den Erfolg der Trocknung darstellen. Zur monatlichen Wassergehaltsveränderung ist anzumerken, dass die Monate Dezember 2009 und Februar 2011 keine vollen Monate darstellen. Dezember 2009 repräsentiert 15 Tage und Februar 2011 nur 6 Tage.

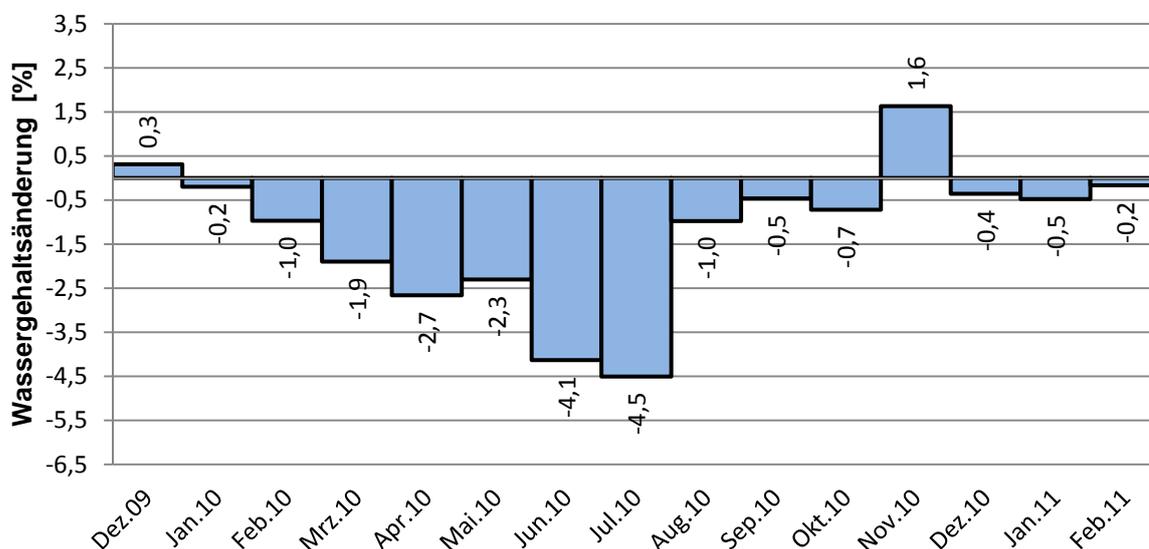


Abbildung 11: Monatliche Wassergehaltsveränderung des Polters im Versuchsverlauf.

Das Ausgangsgewicht des Polters lag am 16.12.2009 bei 17649 kg. Das maximale Gewicht des Polters betrug 17964 kg und wurde am 25.12.2009 gemessen. Das minimale Gewicht von 12730 kg wurde am 07.11.2010 beobachtet. Das Endgewicht des Polters lag bei 12967 kg. Im Mittel verlor der Polter im Versuchszeitraum 11,2 kg/Tag an Gewicht (Abbildung 12).

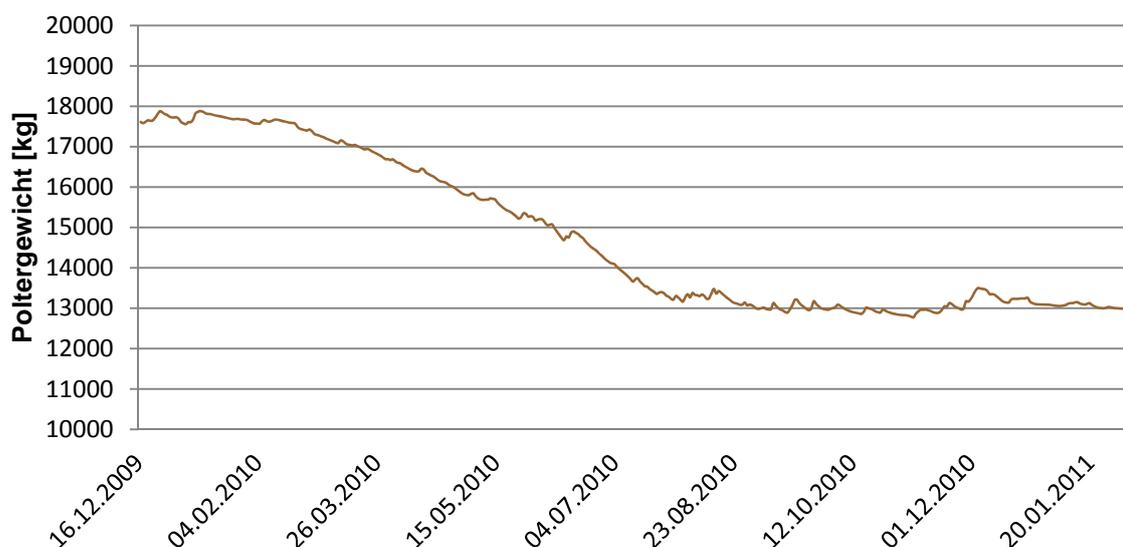


Abbildung 12: Verlauf des Poltergewichtes im Versuchsverlauf.

Der Ausgangswassergehalt des Polters lag am 16.12.2009 bei 50,1%. Der maximale Wassergehalt des Polters betrug 56,0% und wurde am 25.12.2009 gemessen. Der minimale Wassergehalt von 31,1% wurde am 07.11.2010 beobachtet. Der Endwassergehalt des Polters lag bei 32,2%. Im Mittel verlor der Polter im Versuchszeitraum 0,046%/Tag an Wassergehalt. Das Maximum der Trocknung pro Tag wurde am 16.08.2010 beobachtet und lag bei 0,55%. Dieser Wert dürfte aber durch ablaufenden Regen zustande gekommen sein. Ein realistischer Wert wurde am niederschlagsfreien 15.07.2010 mit 0,39% beobachtet (Abbildung 13). Am Ende ergab die stichprobenartige Bestimmung des Wassergehalts einen niedrigeren Wassergehalt (Tabelle 4) als über die Gewichtsmessung beobachtet.

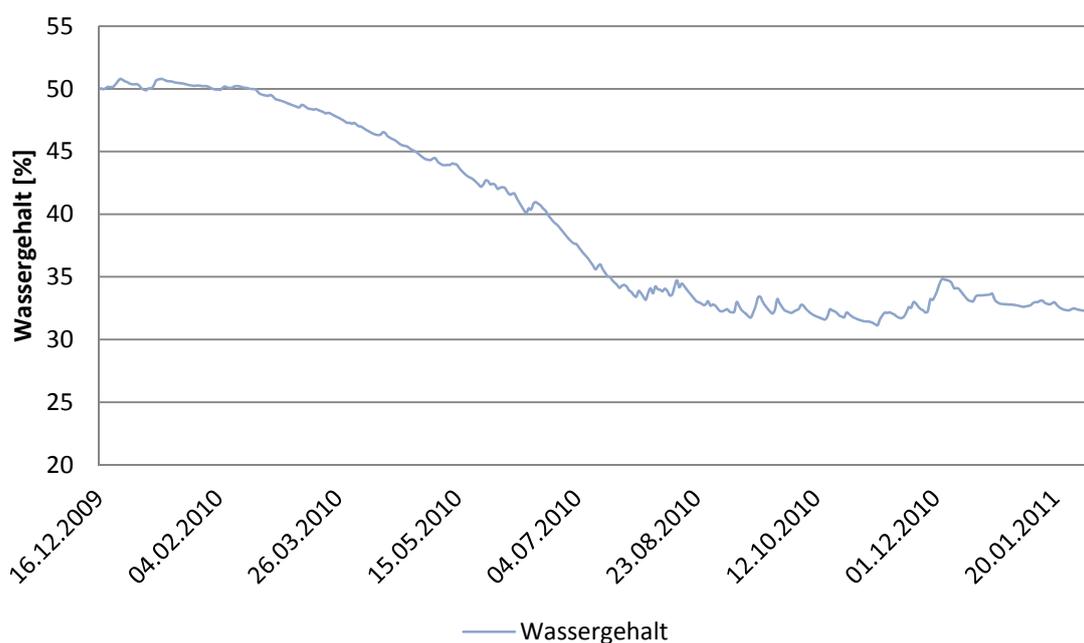


Abbildung 13: Verlauf des Wassergehalts.

Tabelle 4: Mittlere im Labor bestimmte Darrdichten und Wassergehalte.

KenngroÙe	Messwert
Mittlere Darrdichte Anfang	0,509 g/cm ³
Mittlere Darrdichte Ende	0,483 g/cm ³
Mittlerer Wassergehalt Anfang	50,1%
Mittlerer Wassergehalt Ende	29,5%

Mittels paarweisem t-Test wurde überprüft, ob sich die Darrdichte am Anfang von der am Ende unterscheidet. Die Nullhypothese musste mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% abgelehnt werden. Die Darrdichten unterscheiden sich signifikant.

Um die multiple lineare Regression zur Auswertung verwenden zu können, war zu prüfen, ob zwischen der Zielvariablen und den Unabhängigen eine lineare

Beziehung besteht. Abbildung 14 zeigt lineare bzw. annähernd lineare Beziehungen zwischen der Wassergehaltsänderung und Klimaparametern. Mit steigender Lufttemperatur nimmt der Wassergehalt ab, während er mit steigendem Niederschlag zunimmt. Einen besonders straffen Zusammenhang weisen das Trocknungspotential der relativen Luftfeuchte und die Veränderung des Wassergehalts auf. Mit seinem Ansteigen sinkt auch wie mit Ansteigen der Windgeschwindigkeit der Wassergehalt.

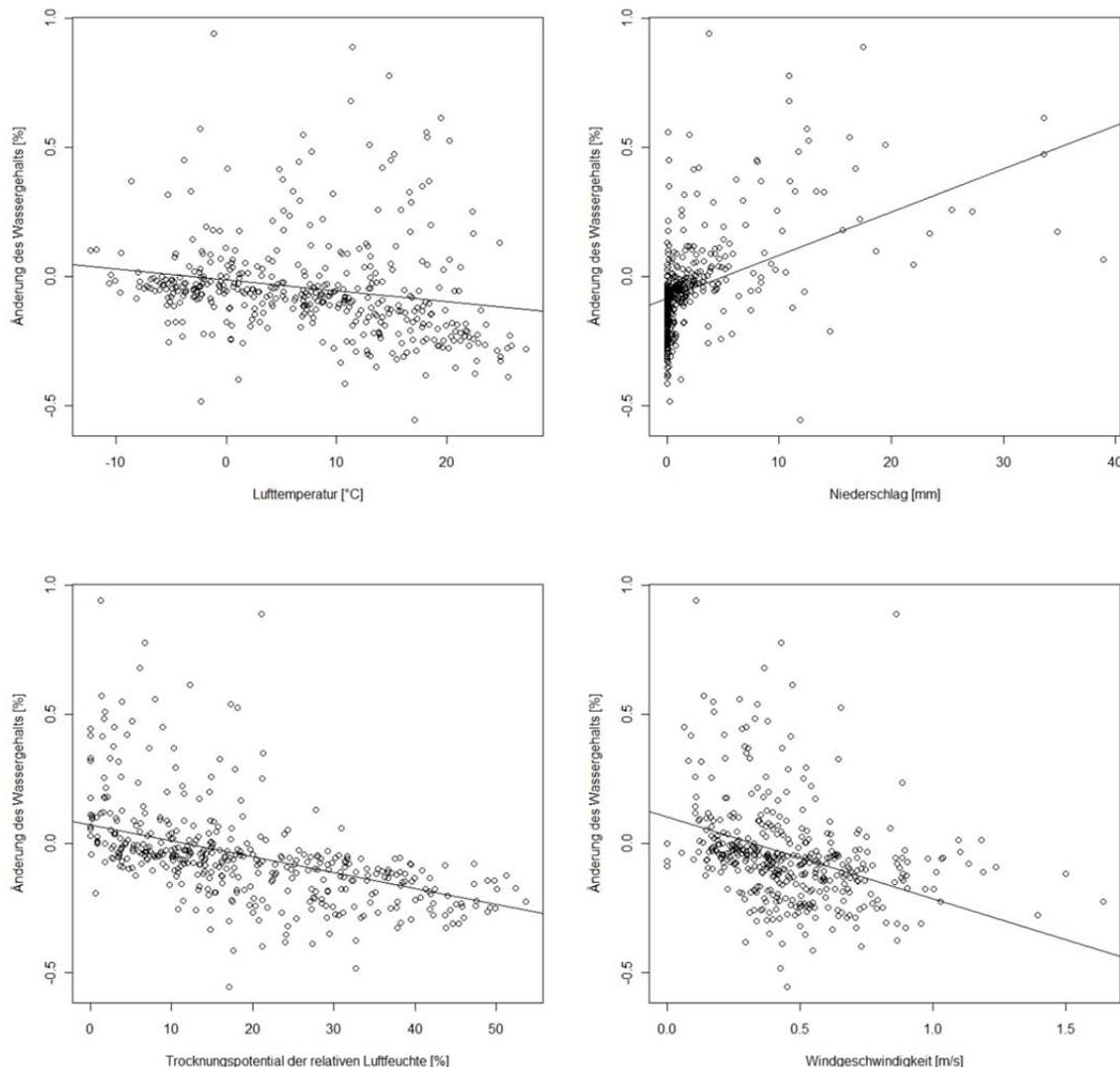


Abbildung 14: Scatterplots zwischen der Änderung des Wassergehaltes und den Variablen (Lufttemperatur l. o.; Niederschlag r. o.; Trocknungspotential der relativen Luftfeuchte l. u.; Windgeschwindigkeit r. u.).

4.2 Verlauf des Wassergehaltes über die Stammlänge

Die bei der Abschlusserhebung rot markierten Stämme waren genauer auf ihren Wassergehalt und dessen Verteilung über die Stammlänge untersucht worden. Dabei zeigte sich, dass der Wassergehalt in der Mitte des Stammes tendenziell

am höchsten, der absolute Wert des Wassergehaltes aber sehr variabel ist. Der Wassergehalt an der Stammspitze war niedriger als am Stammfuß (Abbildung 15).

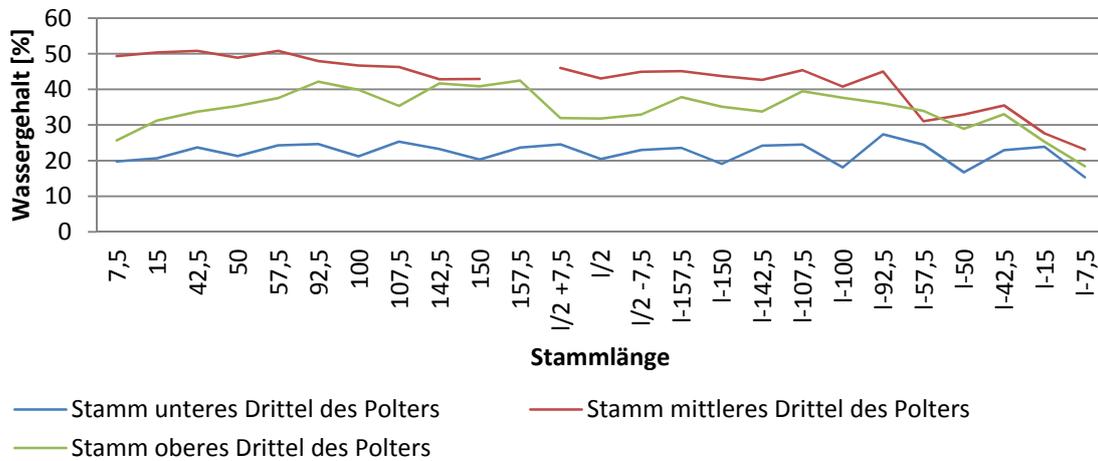


Abbildung 15: Verlauf des Wassergehaltes im Stamm.

4.3 Modellierung

4.3.1 Variante A

Die Varianten A1 und A2 (Abbildung 16) unterschätzen den Wassergehalt vor allem in den Sommermonaten. A3 und A4 (Abbildung 17) nähern den Wassergehalt besser an, unterschätzen ihn im Sommer aber ebenfalls.

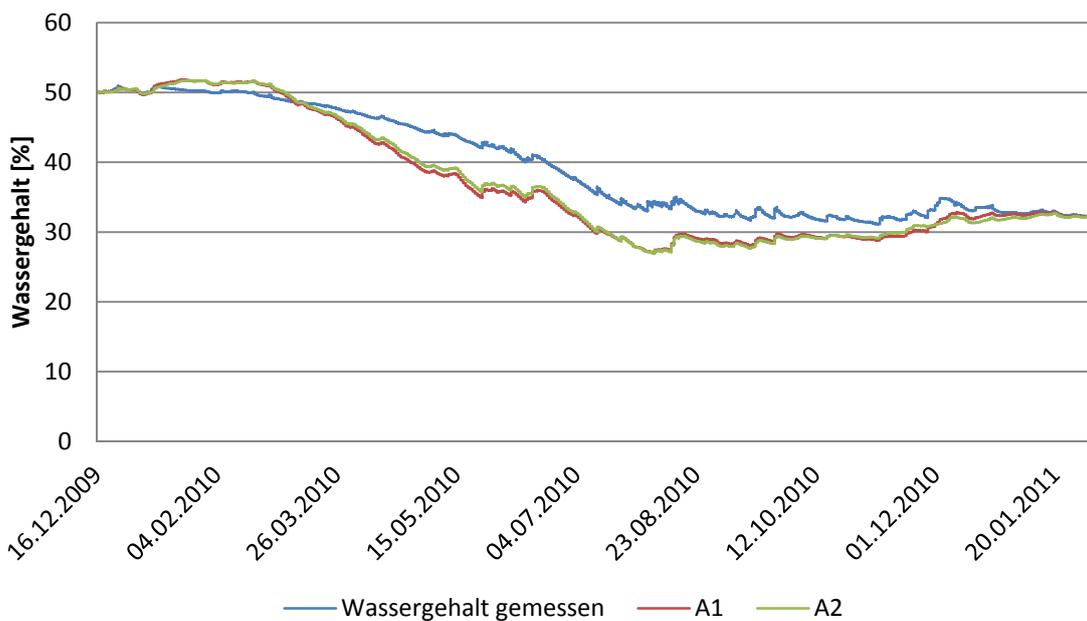


Abbildung 16: Varianten A1 und A2 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und stundenweise modelliert im Versuchszeitraum.

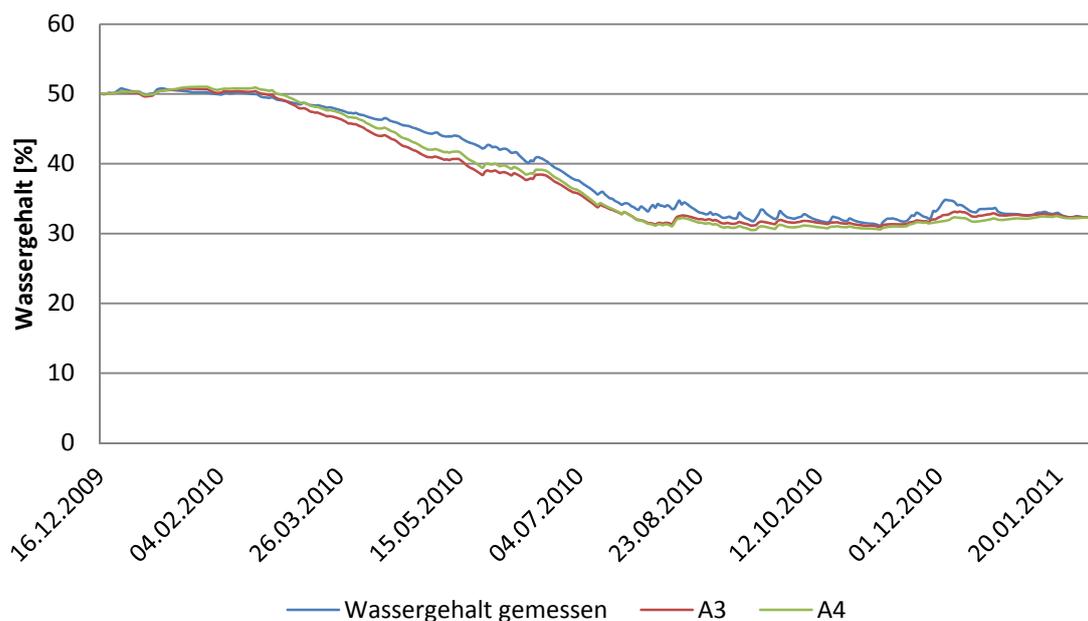


Abbildung 17: Varianten A3 und A4 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und tageweise modelliert im Versuchszeitraum.

4.3.2 Variante B

Die Varianten B1 bis B4 müssen als für eine Vorhersage nicht tauglich eingestuft werden, da sie den Wassergehalt in keiner Weise passend simulieren. B1 und B2 überschätzen stark im Sommer und unterschätzen stark im Winter (Abbildung 19.). B3 und B4 überschätzen den Wassergehalt im gesamten Verlauf (Abbildung 20).

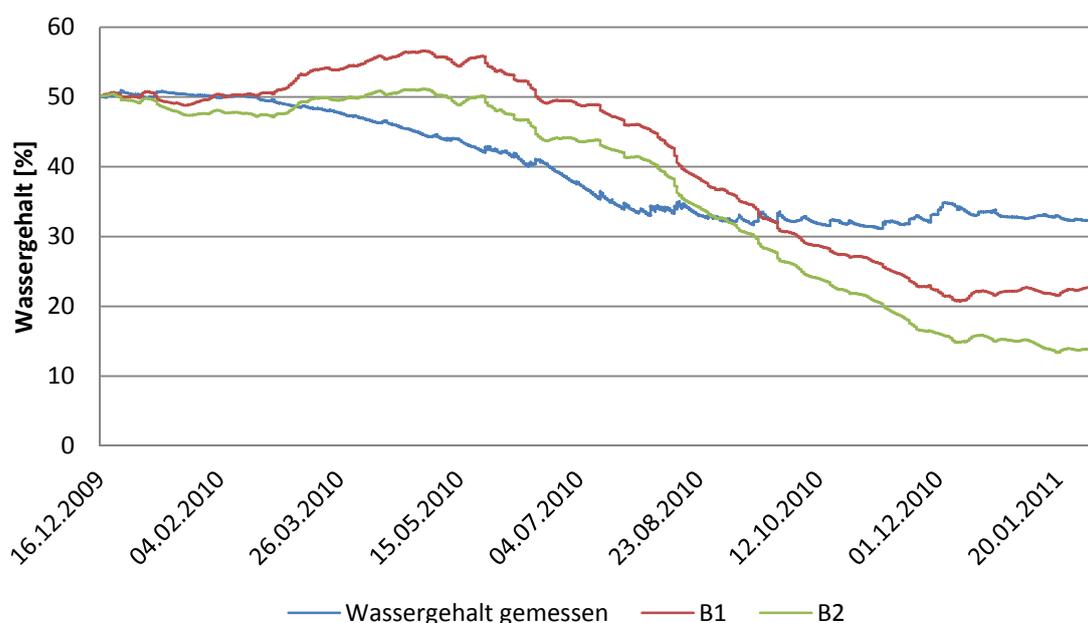


Abbildung 18: Varianten B1 und B2 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und stundenweise modelliert im Versuchszeitraum.

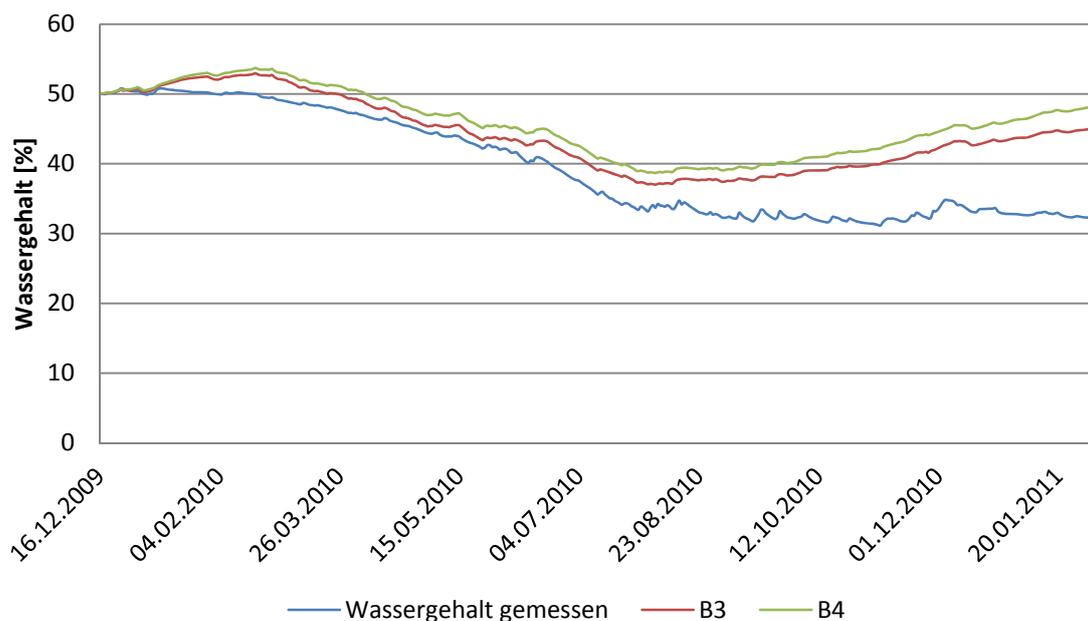


Abbildung 19: Varianten B3 und B4 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und tageweise modelliert im Versuchszeitraum.

4.3.3 Variante C

Variante C1 unterschätzt den Wassergehalt in den Sommermonaten und C2 überschätzt diesen stark im selben Zeitraum (Abbildung 21). Variante C3 nähert den Verlauf der Kurve sehr gut an, während C4 den Wassergehalt unterschätzt (Abbildung 22).

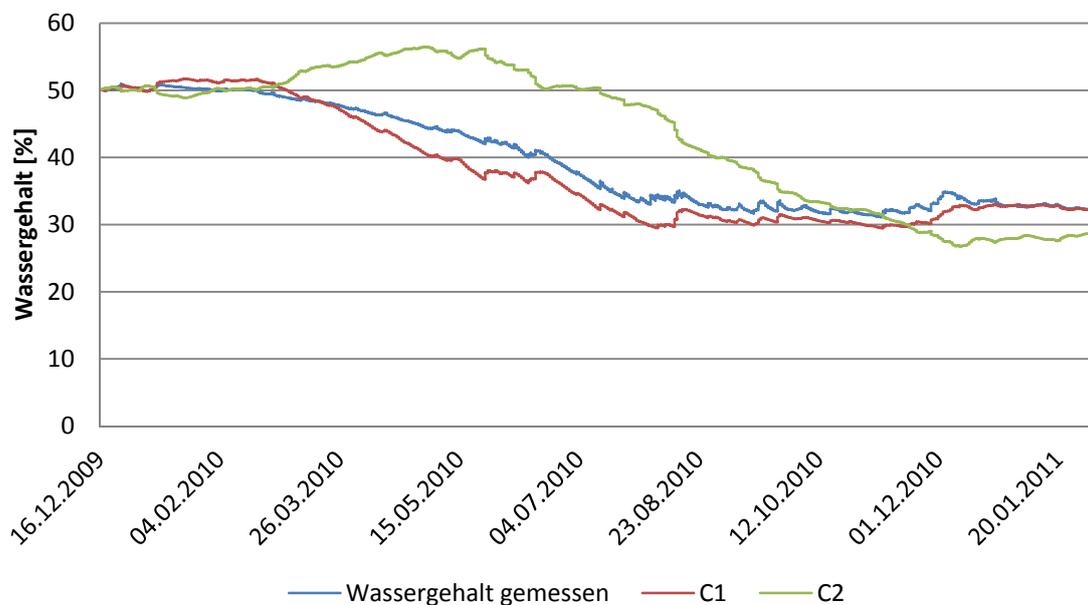


Abbildung 20: Varianten C1 und C2 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und stundenweise modelliert im Versuchszeitraum.

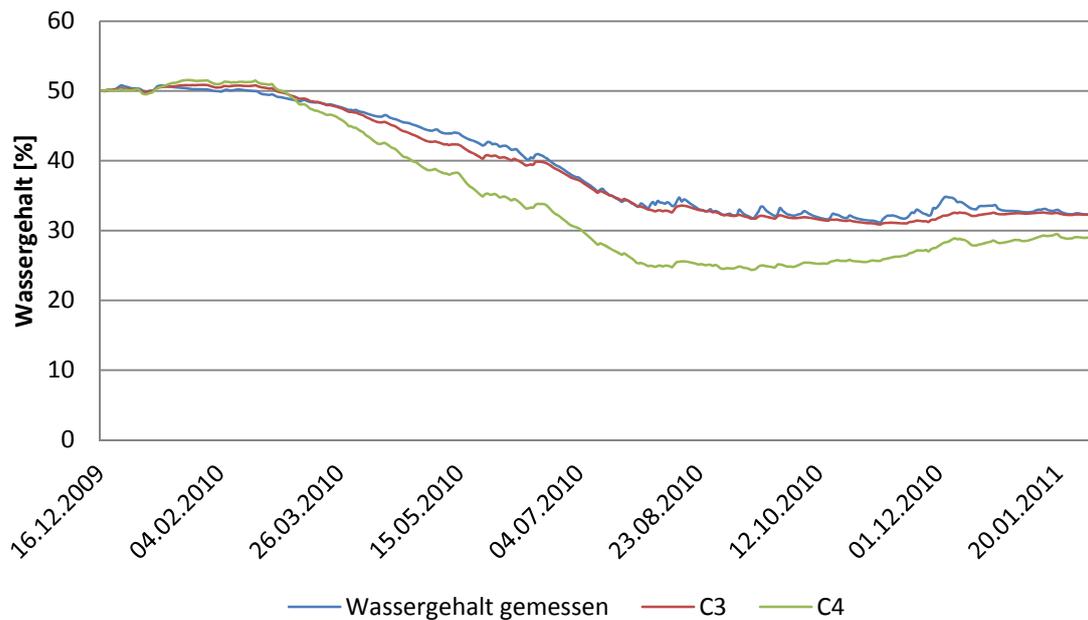


Abbildung 21: Variante C3 und C4 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und tageweise modelliert im Versuchszeitraum.

4.3.4 Variante D

Variante D1 verläuft ähnlich wie A1 (Abbildung 23), Variante D2 ähnlich wie A3 (Abbildung 24). Somit kann festgestellt werden, dass es für das Modell unerheblich ist, ob mit Mittelwerten oder-summen gearbeitet wird.

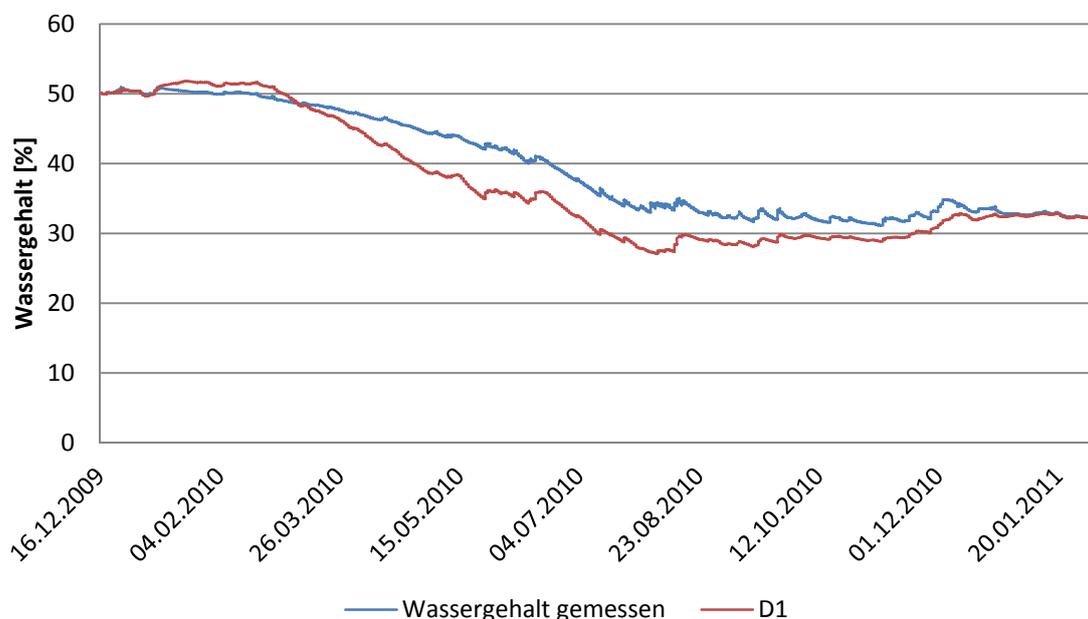


Abbildung 22: Variante D1 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und stundenweise modelliert im Versuchszeitraum.

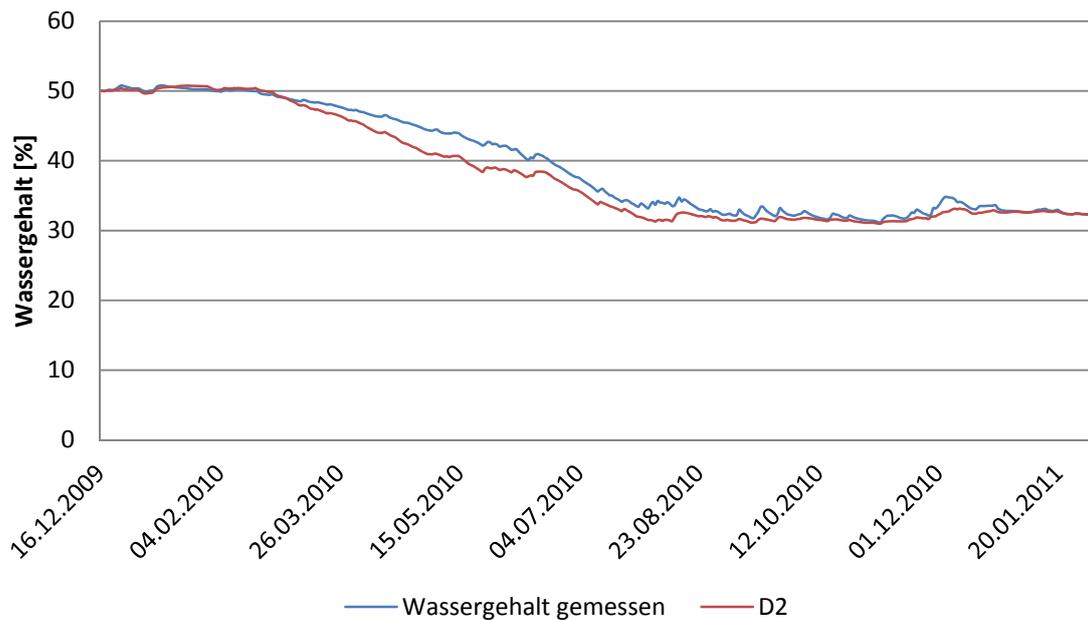


Abbildung 23: Variante D2 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und tageweise modelliert im Versuchszeitraum.

4.1 Zusammenfassung aller Varianten

Nachfolgend finden sich die Kennwerte aller Varianten (Tabelle 7) zusammengefasst. Erklärend sei dazu bemerkt, dass die Beschreibung „flüssig/fest“ oder „flüssig“ die verwendete Form des Niederschlages beschreibt und „T“ und „WB“ für „Trockenfunktion“ und „Wiederbefeuchtungsfunktion“ stehen. Die Koeffizienten aller Varianten finden sich im Anhang (Tabelle 11).

Tabelle 5: Statistische Kennwerte der Varianten A bis D.

Variante	R²	Standard-Fehler [% WG]	Mittlere Abweichung [% WG]	1. Quartile der Abweichung [% WG]	3. Quartile der Abweichung [% WG]	Median der Abweichung [% WG]
A1 – Stunden – flüssig/fest	0,439	0,0234	2,56	0,195	4,93	2,60
A2 – Stunden – flüssig	0,410	0,0241	2,46	0,323	4,54	2,43
A3 – Tage – flüssig/fest	0,438	0,147	1,15	0,246	1,91	0,828
A4 – Tage – flüssig	0,413	0,150	1,03	0,341	1,67	1,26
B1 – Stunden – flüssig/fest – T	0,332	0,0342	-1,60	-9,83	4,54	-0,871
B1 – Stunden – flüssig/fest – WB	0,513					
B2 – Stunden – flüssig – T	0,331	0,0355	3,12	-4,79	9,84	1,104
B2 – Stunden – flüssig – WB	0,474					
B3 – Tage – flüssig/fest - T	0,385	0,204	-4,67	-7,70	-1,99	-3,33
B3 – Tage – flüssig/fest - WB	0,144					
B4 – Tage – flüssig - T	0,385	0,270	-6,30	-9,76	-3,10	-4,98
B4 – Tage – flüssig - WB	0,120					
C1 – Stunden – wie A1	0,594	0,00921	-1,51	-2,82	-0,0596	-1,62
C2 – Stunden – wie B1 – T	0,377	0,027	3,94	-1,08	10,7	2,44
C2 – Stunden – wie B1 –WB	0,622					
C3 – Tage – wie A3	0,616	0,0566	-0,51	-0,988	-0,0827	0,386
C4 – Tage – wie B3 – T	0,466	0,154	-4,61	-7,25	-2,341	-5,61
C4 – Tage – wie B3 –WB	0,284					
D1 – Stunden – wie A1	0,439	0,0234	2,56	0,195	4,94	2,60
D2 – Tage – wie A3	0,438	0,147	1,15	0,246	1,91	0,828

Abbildung 24 zeigt, dass die Variante C3 die geringsten Abweichungen von den tatsächlich gemessenen Werten hat. Deshalb wurde sie als Modellfunktion ausgewählt (Formel 5).

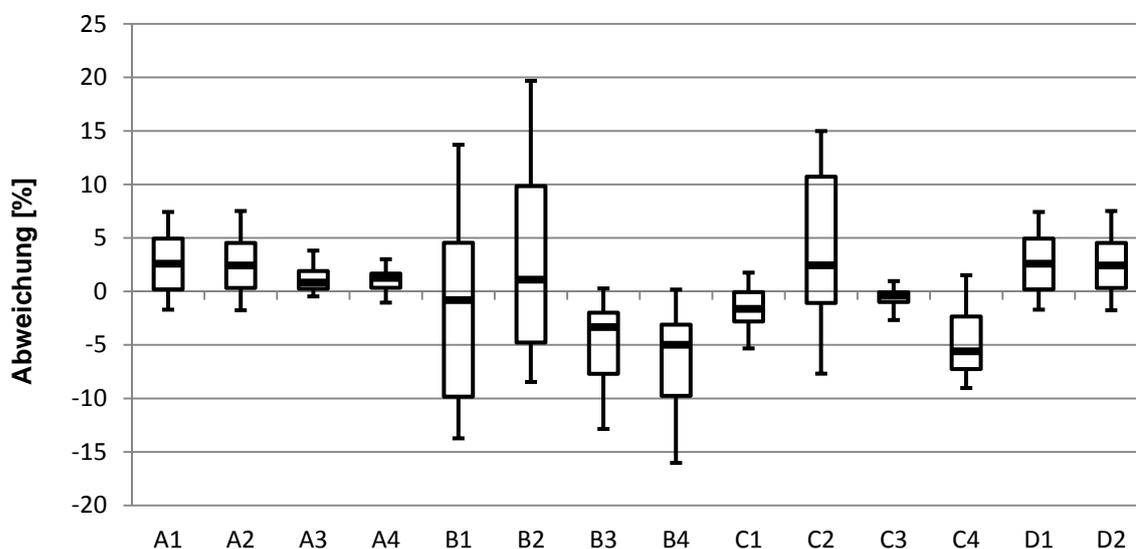


Abbildung 24: Box and Whiskers-Diagramm der Abweichungen der Modelle von der Messung.

$$WGdiff = 2,440 \cdot 10^{-2} - 1,757 \cdot 10^{-3} \cdot TC - 4,691 \cdot 10^{-3} \cdot RH + 1,359 \cdot 10^{-2} \cdot P$$

Formel 5

WGdiff.....Wassergehaltänderung pro Tag [%]

TC.....Mittlere Tageslufttemperatur [°C]

RH.....Mittleres Tagesrocknungspotential der relativen Luftfeuchte [%]

P.....Summe des flüssigen und festen Niederschlages pro Tag [mm]

Mittels paarweisen t-Tests wurden die errechneten Ergebnisse jeder Funktion mit der Messung verglichen. Die Nullhypothese, dass sich die Funktionen in ihren Ergebnissen von der Messung nicht unterscheiden musste mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% abgelehnt werden. Alle unterscheiden sich signifikant von der Messung (Tabelle 8).

Tabelle 6: Ergebnis des paarweisen t-Tests von Messung und Modellierung.

Variante	Mittlere Abweichung [% WG]	Standardabweichung [% WG]	t-Wert $\alpha=0,05$; zweiseitig	t-Wert berechnet
A1 – Stunden – flüssig/fest	2,56	2,49	1,960 (FG=9990)	102,640
A2 – Stunden – flüssig	2,46	2,34	1,960 (FG=9990)	105,169
A3 – Tage – flüssig/fest	1,15	1,14	1,966 (FG=416)	20,443
A4 – Tage – flüssig	1,03	0,98	1,966 (FG=416)	21,456
B1 – Stunden – flüssig/fest	-1,60	8,17	1,960 (FG=9990)	19,567
B2 – Stunden – flüssig	3,12	8,80	1,960 (FG=9990)	35,481
B3 – Tage – flüssig/fest	-4,67	3,55	1,966 (FG=416)	26,809
B4 – Tage – flüssig	-6,30	4,19	1,966 (FG=416)	30,654
C1 – Stunden – wie A1	1,51	1,75	1,960 (FG=9990)	60,323
C2 – Stunden – wie B1	3,94	6,52	1,960 (FG=9990)	86,349
C3 – Tage – wie A3	-0,51	0,71	1,966 (FG=416)	14,507
C4 – Tage – wie B3	-4,61	3,16	1,966 (FG=416)	29,725
D1 – Stunden – wie A1	2,54	2,48	1,960 (FG=9990)	102,340
D2 – Tage – wie A3	1,15	1,14	1,966 (FG=416)	20,443

4.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wurde für die Funktion C3 durchgeführt. Hierzu wurden ihre unabhängigen Variablen um je eine Einheit erhöht bzw. gesenkt. Dabei zeigte sich wie erwartet, dass höhere Temperaturen und ein höheres Trocknungspotential der relativen Luftfeuchte zu niedrigeren Wassergehalten und höhere Niederschläge zu höheren Wassergehalten führen (Tabelle 9).

Tabelle 7: Sensitivitätsanalyse der Variante C3 bei einer Veränderung um eine Einheit.

Variable	Erhöhung / Absenken	Veränderung Mittelwert [% WG]	Standardabweichung [%WG]
Lufttemperatur	erhöht	-0,367	0,212
Lufttemperatur	abgesenkt	0,367	0,212
Trocknungspotential d.r. LF	erhöht	-0,981	0,565
Trocknungspotential d.r. LF	abgesenkt	0,981	0,565
Niederschlag	erhöht	2,840	1,638
Niederschlag	abgesenkt	-2,840	1,638

Um vergleichen zu können, welche Variable den stärksten Einfluss auf das Modell hat, wurden alle unabhängigen Variablen um denselben Prozentsatz (10%) erhöht bzw. abgesenkt. Es zeigte sich, dass dabei die Änderung des Trocknungspotentials die stärkste Auswirkung hatte. Niederschlag und Temperatur wirkten sich weniger stark aus (Tabelle 10).

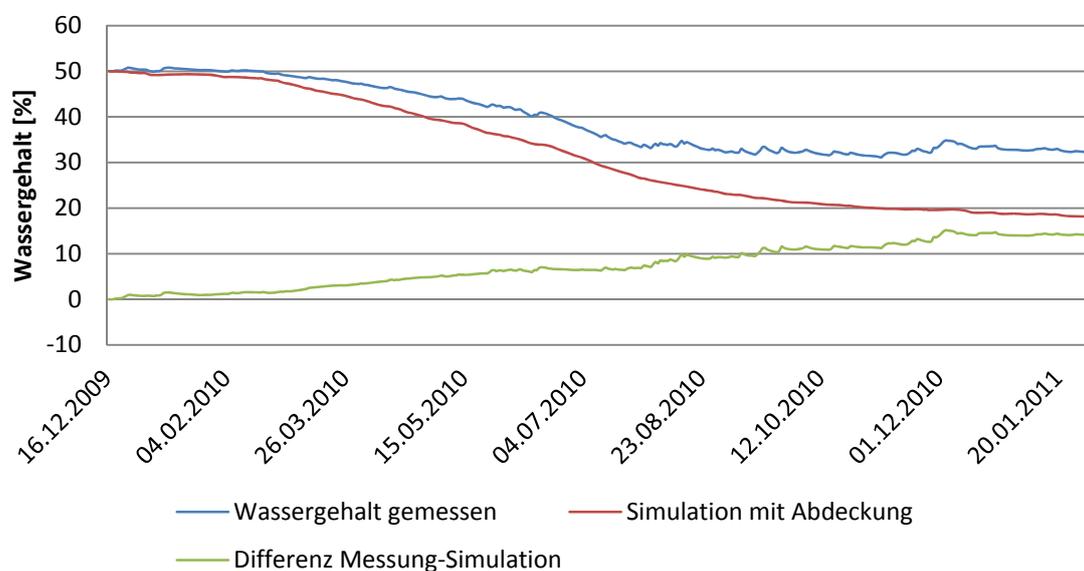
Tabelle 8: Sensitivitätsanalyse der Variante C3 bei einer Veränderung um 10%.

Variable	Erhöhung / Absenken	Veränderung Mittelwert [% WG]	Standardabweichung [% WG]
Lufttemperatur	erhöht	-0,349	0,257
Lufttemperatur	abgesenkt	0,349	0,257
Trocknungspotential d.r. LF	erhöht	-2,046	1,223
Trocknungspotential d.r. LF	abgesenkt	2,046	1,223
Niederschlag	erhöht	0,699	0,438
Niederschlag	abgesenkt	-0,699	0,438

4.3 Szenarienanalyse

4.3.1 Abdeckung

Das hergeleitete Modell erlaubt auch den Effekt einer Abdeckung zu simulieren. Hierzu wurde der Niederschlag gleich null gesetzt. Über den Umweg der relativen Luftfeuchte kann es aber noch immer zu einer Wiederbefeuchtung kommen. Diese Annäherung gibt einen guten Anhaltspunkt, wie stark der Effekt einer Abdeckung sein könnte (Abbildung 26). Würde der Polter niederschlagsdicht abgedeckt, so läge der Endwassergehalt nicht bei 32,2% sondern bei 18,0% und somit 14,2% niedriger.

**Abbildung 25: Simulation des Wassergehaltes bei Abdeckung des Polters.**

4.3.2 Starkniederschlagsereignisse

Zur Quantifizierung des Effektes von Starkniederschlägen und deren Auswirkungen wurden wie in 3.6 erläutert die drei stärksten Niederschlagsereignisse im Beobachtungszeitraum ausgewählt und analysiert. Dabei erstreckte sich jede Analyseperiode bis zu jenem Zeitpunkt an dem der Polter den Wassergehalt vor dem Niederschlagsereignis wieder unterschritten hatte.

Das erste Ereignis fand am 26.05.2010 (Abbildung 27) statt. Dabei fielen im Zeitraum von 12:00 bis 17:00 Uhr 34,4 mm Niederschlag. Der Wassergehalt des Polters war vor dem Ereignis bei 42,0% gelegen. Mit leichter Verzögerung zum Ereignis erreichte er um 16:00 Uhr ein Maximum von 42,8%. Bis zum 27.05.2010 15:00 Uhr trocknete der Polter wieder bis auf 42,4%, um dann durch ein weiteres Niederschlagsereignis im Ausmaß von 13,8 mm im Zeitraum von 15:00 bis 23:00 Uhr auf ein neues Maximum von 42,8% (23:00 Uhr) anzusteigen. Danach folgte eine lediglich durch kleinere Niederschlagsereignisse unterbrochene Trocknungsphase. Am 30.05.2010 14:00 Uhr lag der Wassergehalt bei 42,2% und stieg durch ein Niederschlagsereignis von 9,2 mm (14:00 bis 16:00 Uhr) auf 42,6% an. Nach einer längeren trockenen Phase erreichte der Polter am 01.06.2010 13:00 Uhr erstmals einen geringeren Wassergehalt als er vor dem Starkniederschlagsereignis vom 26.05.2010 gehabt hatte (42,0%).

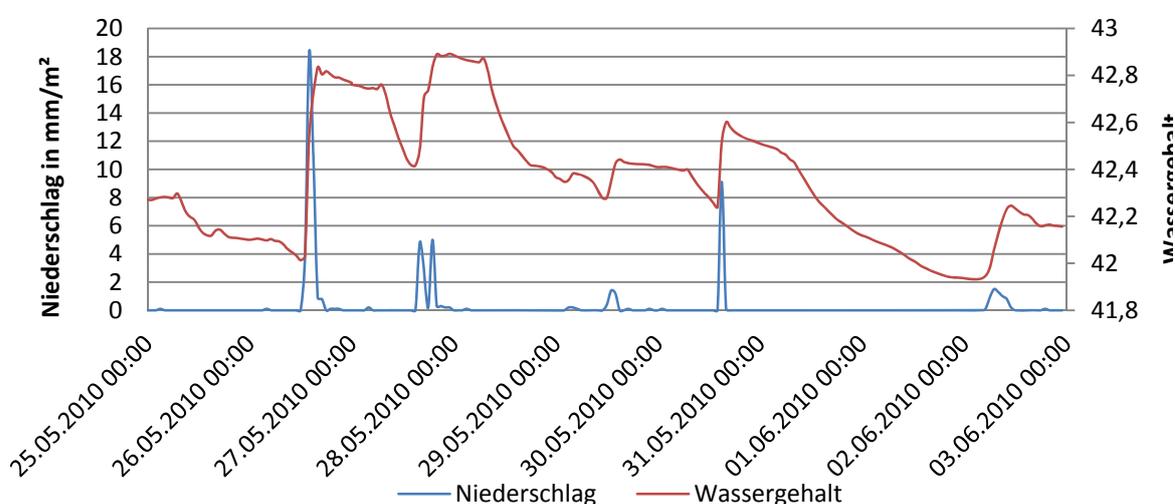


Abbildung 26: Niederschlagsereignis vom 26.05.2010.

Das zweite Starkniederschlagsereignis fand am 16.06.2010 statt (Abbildung 28). Dabei fielen im Zeitraum von 04:00 bis 12:00 Uhr 35,5 mm Niederschlag. Es kam zum Ansteigen des Wassergehaltes von 40,3% um 03:00 Uhr auf 41,1% um 11:00 Uhr. Danach folgte eine trockene Phase, die durch ein Niederschlagsereignis von 1,8 mm am 17.06.2010 (03:00 bis 11:00 Uhr) unterbrochen wurde. Die darauffolgende Trocknungsphase ließ den Wassergehalt bis zum 18.06.2010 17:00 Uhr auf 40,6% sinken, um dann durch 4,9 mm Niederschlag von 16:00 bis 20:00 Uhr wieder auf 40,8% (20:00 Uhr) zu steigen. Den Wassergehalt vor dem Ereignis unterschritt der Polter nach schwachen Niederschlagsereignissen am 21.06.2010 08:00 Uhr (40,3%).

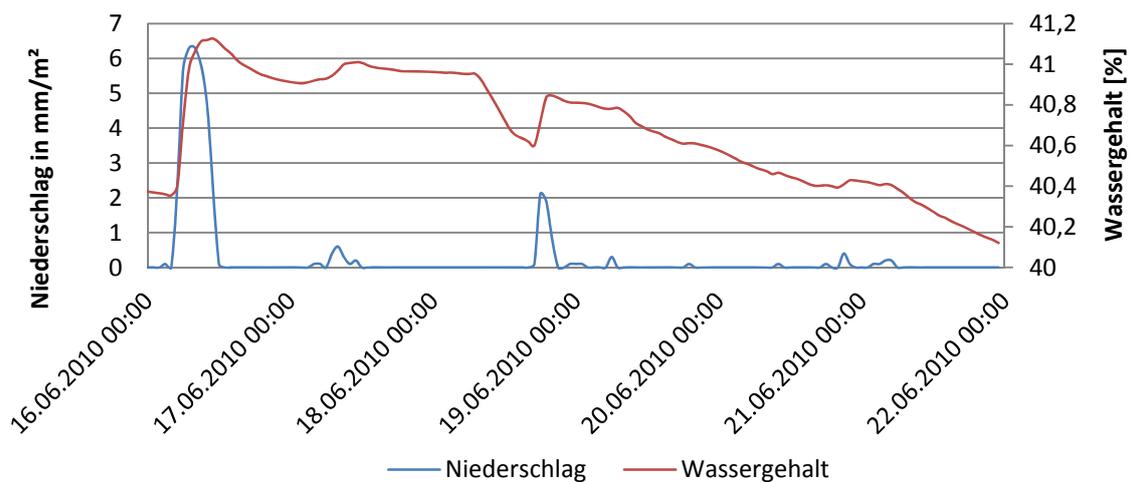


Abbildung 27: Niederschlagsereignis vom 16.06.2010.

Das dritte starke Niederschlagsereignis fand an zwei Tagen statt. So fielen einerseits am 13.08.2010 von 18:00 bis 22:00 h 33,6 mm sowie von 14.08.2010 auf 15.08.2010 42,2 mm im Zeitraum von 19:00 bis 02:00 Uhr. Vor Beginn des Ereignisses am 13.08.2010 war der Wassergehalt durch ein einzelnes Ereignis von 5,3 mm (09:00 bis 10:00 Uhr) schon von 33,3% (09:00 Uhr) auf 33,6% (11:00 Uhr) angestiegen. Bis 18:00 Uhr sank er wieder auf 33,4%, um dann durch das Starkniederschlagsereignis auf 34,4% (22:00 Uhr) anzusteigen. Bis zum 14.08.2010 19:00 Uhr sank der Wassergehalt auf 33,9%, um dann am 15.08.2010 08:00 Uhr ein Maximum von 35,1% zu erreichen. Die nachfolgende Trocknungsphase wurde nur mehr durch kleine Niederschlagsereignisse unterbrochen und am 22.08.2010 12:00 Uhr unterschritt der Polter den Wassergehalt vor dem ersten Niederschlagsereignis (33,3%) (Abbildung 29).

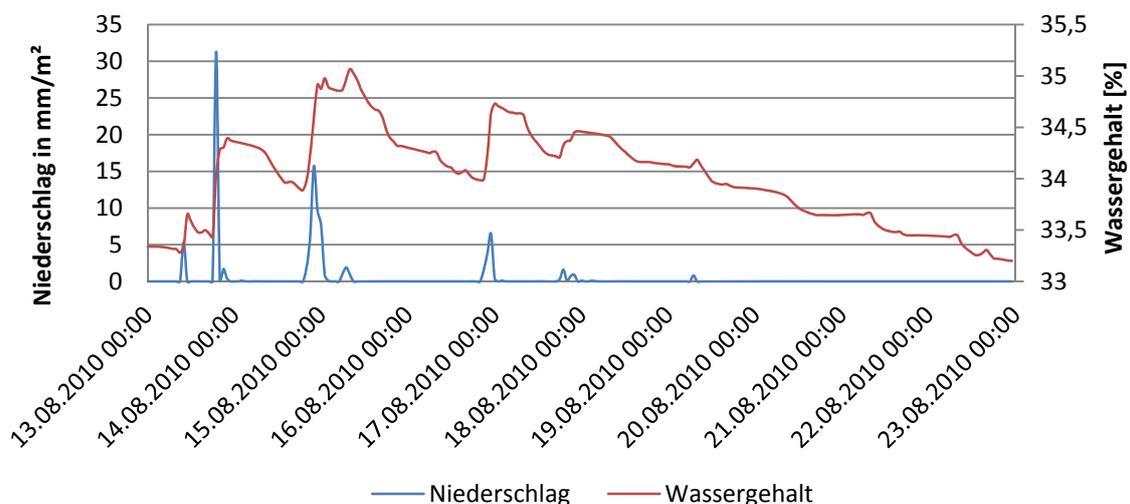


Abbildung 28: Niederschlagsereignis vom 13.08.2010 und 14.08.2010.

4.1 Kosten-Nutzen-Rechnung der längeren Lagerungszeit

Auf Basis der Monatsmittelwerte des Wassergehaltes für die Monate April bis September wurde berechnet, welche Erlöse damit zu erzielen seien. Die Erlöse konnten für den Polter von € 49,59/t lutro auf € 64,80/t lutro gesteigert werden. Der Heizwert war in derselben Zeit von 2,53 kWh/kg auf 3,34 kWh/kg gestiegen, was einer Steigerung von 31% entspricht (Tabelle 6). Die Preise basieren auf Angaben der BioEnergie Stainach GmbH für den Monat Mai (Auskunft von Hrn. Stadler an DI Thomas Leitner vom 09.05. 2011) (Tabelle 5).

Tabelle 9: Preismatrix der BioEnergie Stainach GmbH (Mai 2011).

Wassergehalt [%]	Preis frei Werk [€/t atro]
0 – 34	96,00
35 – 50	92,00
50 – 55	88,00

Tabelle 10: Erlöse und Energiegehalt über den Untersuchungszeitraum.

Probennahme	Gewicht [t lutro]	WG [%]	Preis [€/t atro]	Gewicht [t atro]	Erlös [€]	Energiegehalt [MJ/kg]	Heizwert [kWh/kg]
April	1	46,1	92	0,539	49,59	9,12	2,53
Mai	1	43,4	92	0,566	52,07	9,70	2,69
Juni	1	40,5	92	0,595	54,74	10,32	2,87
Juli	1	35,4	92	0,646	59,43	11,41	3,17
September	1	32,5	96	0,675	64,80	12,03	3,34

Wäre das Holz nicht getrocknet und stattdessen sofort verkauft worden und hätte man einen Erlös von € 49,59 über denselben Zeitraum (sechs Monate) verzinst, so ergäben sich pro t lutro Zinsen von € 0,50 (Formel 6). Diesen steht ein Mehrerlös von 15,21€/t lutro gegenüber. Das bedeutet eine Verzinsung von 61% über den Untersuchungszeitraum durch die Trocknung.

$$Z = \frac{K * p * d}{360 * 100}$$

Formel 6

Z.....Zinsen
 K.....Kapital am Beginn
 p.....Zinssatz
 d.....Anzahl Tage (30/360)

Dieser Verzinsung sind die ortsüblichen Kosten für die Holzernte gegenüberzustellen. Diese betragen etwa 20,00 €/fm (Harvester und Forwarder). Mit dem Umrechnungsfaktor von 1,56 (AUSTRIAN ENERGY AGENCY, 2009) einer t lutro bei einem Wassergehalt von 35% ergeben sich dann Holzerntekosten

in der Höhe von 31,20 €/t lutro. Verzinst man diesen Betrag über dieselbe Zeit wie die Erlöse, so ergeben sich aus der Vorfinanzierung der Holzernte Zinsen von 0,31 €/t lutro. Abzüglich dessen sinkt der Mehrerlös auf 14,90 €/t lutro und die Verzinsung auf 60% in sechs Monaten (Abbildung 16).

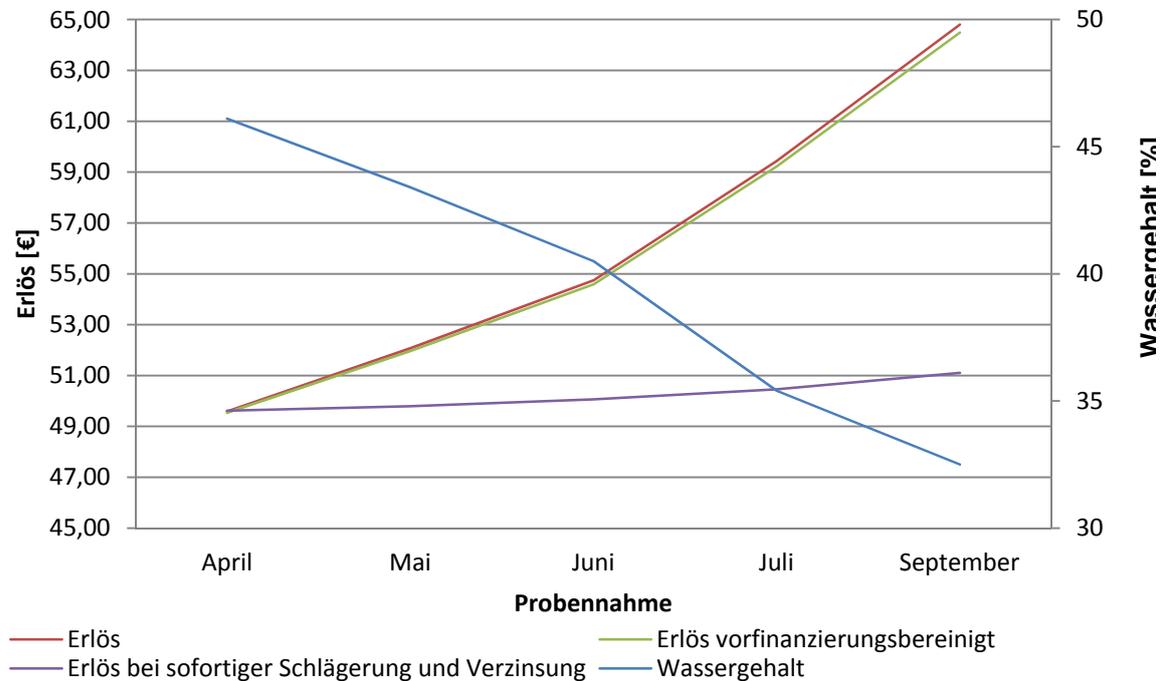


Abbildung 29: Zinsberichtigte Erlöse im Untersuchungszeitraum.

5 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

5.1 Diskussion

Die Trocknung von Energieholz in einem Rundholzpoltern unter Freilandbedingungen ist fast während des ganzen Jahres möglich. Dabei verläuft die Trocknung in den Herbst- und Wintermonaten von September bis Februar schleppend mit Trocknungsraten von unter einem Prozent pro Monat. Grund dafür sind nicht unbedingt stärkere Niederschläge, sondern das allgemein feuchtere und kältere Wetter. Die stärksten Niederschläge waren in den Monaten Mai bis August zu verzeichnen. Hier war aber auch das Trocknungspotential aufgrund von höheren Temperaturen und niedrigerer relativer Luftfeuchte der Luft wesentlich höher gewesen.

Es kam aber abgesehen von November (+1,6% Wassergehalt) zu keiner starken Wiederbefeuchtung des Polters, wie sie sich etwa bei NURMI (1995,1999) oder NURMI und HILLEBRAND (2007) findet. Bei letzteren war der Wassergehalt allein im Zeitraum von August bis September um über 5% angestiegen. Die Trocknung verlief ab Februar stetig ansteigend bis Juli, wobei im Juni und Juli Trocknungsraten von über 4% pro Monat beobachtet werden konnten. Im August waren die Temperaturen nicht mehr ausreichend um die Niederschläge auszugleichen und die Trocknungsrate sank auf 1%. Betrachtet man den Monat November genauer, so zeigt sich, dass hier die flüssigen Niederschläge und nicht die festen für die Gewichtszunahme ausschlaggebend gewesen sein dürften. Insgesamt kann der Wassergehaltsverlust des Polters von Jänner bis Dezember mit 17,2% beziffert werden. Vergleichsweise können hier die Ergebnisse von RÖSER et al. (2010) herangezogen werden. In ihrer Studie war der Wassergehalt innerhalb eines Jahres von 53% auf 30% bis 40% gesunken. Der Endwassergehalt von 32,15% im Februar 2011 bzw. der minimale Wassergehalt von 31,10% im November 2011 decken sich mit den Ergebnissen von GOLSER et al. (2005) die bei Trocknung von Mai bis Oktober für Schwarzkiefer einen Endwassergehalt von 33% angeben. Der erzielte Wassergehalt liegt damit etwas über den Ergebnissen von NURMI und HILLEBRAND (2007) für den Zeitraum Mai bis August von einem Endwassergehalt von unter 30% sprechen. Insgesamt kann aber festgestellt werden, dass eine Trocknung um etwa 20% in einem Jahr möglich ist. 2010 war ein niederschlagreicherer Jahr gewesen, was sich auch auf die Trocknungsraten ausgewirkt haben dürfte.

Wenngleich auch signifikante Unterschiede in den Darrdichten zu Anfang und zu Ende des Versuchszeitraumes beobachtet werden konnten, so ist es nicht möglich, daraus exakt auf die Trockenmassenverluste zu schließen. Der Grund dafür ist, dass bei der Auslagerung bei vielen Stämmen die Rinde verlorenging und deren Dichte in das Laborergebnis nicht einfluss. Dies dürfte auch der Grund dafür sein, dass der Wassergehalt der Laborproben unter dem über die Waage beobachteten liegt. Die tendenziell feuchtere Rinde fehlt auch in dieser Analyse.

Der Verlauf des Wassergehaltes über den Stamm zeigt, dass dieser wie zu erwarten an seinem dünnen Ende schneller trocknet, da dort neben der geringeren absoluten Dicke auch jene der Borke geringer ist. Etwas überraschend erscheint es, dass der Stamm aus dem unteren Drittel den geringsten Wassergehalt aufweist. Dies ist wahrscheinlich auf die geringeren direkten Einflüsse der Witterung und die gute bodenseitige Durchlüftung des Rungenkorbes zurückzuführen. Der Stamm aus dem mittleren Drittel hatte am Ende den höchsten Wassergehalt. Ein Grund dafür könnte sein, dass er in der Mitte des Polters einerseits noch der Witterung ausgesetzt war, andererseits aber zu wenig durchlüftet lag, um mehr Feuchtigkeit abzugeben.

Ökonomisch gesehen macht die Trocknung durchaus Sinn. Wie gezeigt werden konnte, ergab sich durch diese eine Verzinsung von gut 60% in sechs Monaten. Damit liegt der erzielte Erlös nach Abzug der verzinsten Erntekosten (Vorfinanzierung) durch die Trocknung € 13,38/t lutro über dem mit 2% verzinstem Erlös aus einem sofortigen Verkauf nach der Schlägerung.

Es zeigte sich weiter, dass eine Modellierung des Wassergehaltes des Polters über die Wetterdaten möglich ist. Dabei erscheint es äußerst praxisfreundlich, dass mit Tagesmittelwerten und –summen gearbeitet werden kann. Eine Annäherung auf $0,51\% \pm 0,71\%$ über knapp 14 Monate erscheint ausreichend genau. Es zeigte sich, dass die Variante A1-A4 über die Rohdaten den Wassergehalt durchgängig unterschätzen, während die Varianten B1-B4 ihn durchgängig überschätzen. Damit kann für letztere festgestellt werden, dass es nicht möglich ist, den Wassergehalt über Teilfunktionen für Trocknung und Wiederbefeuchtung zu simulieren. Mit dem Anwenden von gleitenden Mitteln konnte die Kurve im Mittel besser angenähert werden, wodurch aber der Wassergehalt bei kurzfristigen stärkeren Schwankungen unter- bzw. überschätzt wird. Das Ausmaß dieser Abweichung liegt aber in einem tolerablen Bereich. Mit dem Funktionen D1 und D2 konnte gezeigt werden, dass es keine Rolle spielt ob man der Auswertung Mittel- oder Summenwerte zugrunde legt. Somit kann eine Anwendung in der Praxis auf die vorhandene Datengrundlage angepasst werden.

Eine Sensitivitätsanalyse der Modells zeigt, dass die Variable Trocknungspotential und somit die relative Luftfeuchte den stärksten Einfluss auf den Wassergehalt hat, gefolgt vom Niederschlag und der Temperatur. Auch die Modellierungen von GIGLER et al. (2000b) und FILBAKK et al. (2011) weisen die Variablen relative Luftfeuchte und Temperatur als für die Trocknung bedeutend aus. Niederschlag zeigte sich bei GIGLER et al. (2000b) lediglich bei der Wiederbefeuchtung signifikant. Da es sich beim gewählten Modell um ein kombiniertes Trocknungs- und Wiederbefeuchtungsmodell handelt, passt es sehr gut ins Bild, dass sowohl Variablen der Trocknung als auch Variablen der Wiederbefeuchtung als signifikant angesprochen werden können. Dabei ist anzumerken, dass hier die Variablen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Niederschlag durch physikalische Zusammenhänge zueinander in Beziehung stehen. Die Bestimmtheitsmaße der Modelle legen nahe, dass die in die Modellbildung eingegangenen Variablen die

Trocknung nicht umfassend beschreiben können. Ein weiterer, möglicherweise einzubeziehender Faktor wär etwa die Globalstrahlung, wobei GIGLER et al. (2000b) anmerken, dass diese nur auf die oberste Reihe des Polters wirken dürfte. Die Wahl einer multiplen linearen Regression als Modellierungsfunktion scheint ein geeigneter Weg zu sein, um den Wassergehalt eines Polters zu simulieren. Es gibt natürlich auch eine Reihe anderer Ansätze, wie sie FILBAKK et al. (2011) oder GIGLER et al. (2000b) gewählt haben.

Die Simulation einer Abdeckung des Polters zeigt deutlich, dass der Polter damit wesentlich besser trocknen würde. Ob in Wirklichkeit mit einem derart starken Effekt gerechnet werden kann ist fraglich. In der Literatur finden sich für den Unterschied zwischen abgedeckten und nicht abgedeckten Poltern Angaben von 3-6% (NURMI und HILLEBRAND, 2007) sowie etwa 4% (JIRJIS, 1995).

Der Effekt von starken Niederschlagsereignissen war auf die Hypothese hin untersucht worden, dass sie sich signifikant auf den Wassergehalt des Polters auswirken und Feuchtigkeit auf dem Polter Es zeigte sich, dass es Niederschlagsereignisse von 30 mm bis 35 mm vermögen, den Wassergehalt des Polters um etwa 0,9% zu heben. Im Allgemeinen erreicht der Wassergehalt am Ende des Niederschlagsereignisses ein Maximum, um dann wieder rasch abzusinken. Länger andauernde Niederschlagsereignisse führen zu einer späteren Erreichung des Maximums und zu einem etwas längeren Verharren des Wassergehalts auf hohem Niveau. Wie auf Abbildung 27 bis 29 zu erkennen, dauerte es in allen beobachteten Fällen mehrere Tage bis der ursprüngliche Wassergehalt wieder erreicht war. Dies ist aber unter anderem darin begründet, dass nach den beobachteten Ereignissen immer wieder neue, weniger intensive Ereignisse auftraten. So ist eine genaue, auf ein einzelnes Ereignis bezogene Aussage über die Auswirkung der Niederschlagsereignisse nicht möglich. Es kann aber trotzdem geschlussfolgert werden, dass einzelne, intensive Niederschlagsereignisse kurzfristig (im Bereich von 2-3 Tagen) wieder ausgeglichen werden können, so nicht weitere Niederschlagsereignisse folgen. Es verbleibt Feuchtigkeit auf dem Polter. Dabei ist anzunehmen, dass der Großteil der Feuchtigkeit in der Rinde verbleibt, und daher relativ schnell wieder abtransportiert werden kann. Da solche Ereignisse im Laufe der Trocknungsperiode öfter vorkommen und so immer wieder, wenn auch kurz, die Trocknung bremsen, spricht dies dafür, den Polter mit wasserundurchlässiger Folie abzudecken. Dieses Ergebnis zum Teil steht im Widerspruch zu GIGLER et al. (2000b), die festgestellt hatten, dass Niederschlag nur sehr kurzfristig auf dem Polter verbleibe und nicht in die Stämme eindringe. Der Grund für diesen Unterschied mag in der Baumart liegen (GIGLER et al. verwendeten Weide (*Salix viminalis*)) und der Niederschlag verbleibt bei der Kiefer (*Pinus sylvestris*) an ihrer dicken Borke und läuft nicht sofort ab, was plausibel erscheint.

5.2 Methodische Herausforderungen

Wie schon angesprochen, stellte vor allem die Bewertung des Einflusses von festem Niederschlag ein Problem dar. Dies ergab sich aus dem Umstand, dass der feste Niederschlag von der Klimastation nicht gemessen werden konnte. Der Grund dafür war, dass aufgrund des hohen Energieverbrauches eines beheizten Messbechers dieser vom verwendeten Solarpanel nicht betrieben werden konnte. Dieser Umstand war vor Beginn des Versuches bekannt gewesen. Somit lagen vorerst keine Daten über den Schneefall bzw. die Höhe der Schneedecke vor. Es wurde daher erwogen, Daten der nahen Messstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) heranzuziehen. Diese wiesen aber ebenfalls keine Daten den festen Niederschlag betreffend auf. Der Grund dafür ist, dass die ZAMG in Hartberg lediglich eine automatische Klimastation betreibt, die kein Modul zur Schneehöhen- und Schneemengenmessung besitzt. Daher wurde der Weg der rechnerischen Annäherung gewählt. Es wurden alle Datenpunkte angesprochen, bei denen eine Gewichtszunahme vorlag und bei denen die Lufttemperatur bei kleiner oder gleich null Grad °C lag. Dabei wurde davon ausgegangen, dass diese Gewichtszunahme infolge von Schneefall zustande gekommen war. Dividiert durch die Fläche und unter der Annahme, dass ein Kilogramm Schnee einem Liter Wasser entspricht, konnte so die Schneemenge in flüssige Niederschlagsäquivalente transponiert werden. Für die Regressionen wurde diese zusätzliche Niederschlagsmenge zum flüssigen Niederschlag addiert.

Der davor gewählte Ansatz, den festen Niederschlag als Gewicht vom gemessenen Gewicht des Polters abzuziehen wurde wieder verworfen. Der Grund dafür war, dass man so zwar den Schneefall, aber nicht seinen Verbleib auf dem Polter korrigieren könne. Es ist unbekannt, wie lang welche Menge Schnee auf dem Polter verblieb. Daher wurde der Ansatz gewählt, den festen Niederschlag in die Berechnung zu integrieren. Dies lässt sich damit argumentieren, dass, wenn im Winter gehackt würde, der Schnee zu einem größeren Teil mit in den Hacker ginge und somit das Hackgut befeuchten würde.

Ein weiteres, aber kleineres Problem stellte die Niederschlagsmessung an sich dar. Wie oben schon angesprochen wurde fester Niederschlag in Form von Schnee nicht gemessen. Es kam aber durchaus vor, dass Schnee im Messtrichter, erwärmt von der Sonneneinstrahlung, schmolz. Somit wurde flüssiger Niederschlag registriert, obwohl keiner gefallen war. Weiters wurde der Messtrichter mindestens zwei Mal von Blättern verstopft. Beim Lösen der Verstopfung kam es dann zum gesammelten Abfluss des während der Zeit der Verstopfung gesammelten Niederschlags. Die Mengen waren allerdings nicht so groß, als dass sie als außergewöhnliche Niederschlagsereignisse aufgefallen wären. In Anbetracht der detaillierten und breiten Datenbasis stellen einzelne Abweichungen wie diese kein Problem dar.

Ein weiteres Problem war die unterschiedliche Exposition des Polters gegenüber von Witterungseinflüssen während des Versuchszeitraumes. So veränderte sich

die nähere Umgebung des Polters mehrmals. Am Ende des Versuches zum Beispiel war der Polter an der Süd- und Westseite von Kunststoffcontainern umgeben, die den Polter in einem Abstand von einem Meter an Höhe überragten. Es ist davon auszugehen, dass dies das Kleinklima beeinflusst hat. Es kann aber nicht genau gesagt werden, im welchem Ausmaß.

Es konnten aber auch viele positive Erkenntnisse aus dem Versuch gewonnen werden. So ist anzumerken, dass sich das Wiegeverhalten der Zellen über den Versuchszeitraum nicht veränderte, die Zellen sehr genau messen und es zu keinem Ausfall der Messstation kam. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass eine automatisierte Messung mit automatischer Übertragung der Daten per mail an einen Server und somit tagesaktuelle Auswertungen möglich sind.

5.3 Gültigkeit

Gültigkeit erlangen die oben dargestellten Modelle vorerst nur für diesen einen Versuch und diesen einen Standort. Da es sich bei der Trocknung aber grundlegend um physikalische Zusammenhänge handelt, so ist davon auszugehen, dass sich das Modell auch in weiterem Umkreis anwenden lässt. Es kann aber nicht erwartet werden, dass eine absolut exakte Berechnung des Wassergehalts an jedem beliebigen Standort möglich sein wird. Das Modell kann aber einen guten Anhaltspunkt geben, wie die Trocknung verläuft. Daher wäre ein Versuch in dieser oder ähnlicher Art zu wiederholen, um das Modell zu kalibrieren.

5.4 Zukünftige Anwendungen

In Zukunft könnte das Modell etwa als Microsoft-Excel-Sheet Anwendung finden, in welches die aktuellen Wetterparameter eingespeist werden. Basierend auf einer vorherigen, auf Stichproben beruhenden Bestimmung des Wassergehalts des Polters kann so ein permanentes Monitoring des Wassergehaltes ermöglicht werden und so ein günstiger Termin für die Verarbeitung des Energieholzes gewählt werden. Hier werden vor allem die Eingangsdaten eine Rolle spielen. Es ist nicht davon auszugehen, dass für jeden Polter ortsnahe Daten vorliegen werden. Der praktikabelste Weg scheint jener über die Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zu sein. Hier ist aber auf eine enge räumliche Nähe zur Messstation zu achten. Eine weitere Möglichkeit stellt das Lagern des Holzes, wie bei diesem Versuch geschehen, auf einem Holzmanipulationsplatz dar. Hier kann zentral eine handelsübliche Klimastation eingerichtet werden, die Stunden- oder Tagesmittel liefert. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit könnte die prognostische Verwendung des Modells sein, wobei das Modell mit den Wettervorhersagen für die nächsten Tage gefüttert wird.

5.5 Verbesserungsmöglichkeiten des Versuchsdesigns

Eine grundlegende Verbesserung des Versuchsdesigns würde das Einsetzen eines beheizten Messtrichters für das sichere Quantifizieren des festen

Niederschläge darstellen. Dies schafft Klarheit wie viel Schnee gefallen ist, aber nicht wie lange dieser auf dem Polter verbleibt und so die Gewichtsmessung beeinflusst. Eine Möglichkeit den Effekt von Niederschlag auszuschließen wäre das Abdecken des Polters mit wasserfester Folie. Dabei müsste die Abdeckung allerdings in Dachform angelegt werden, um Schnee abrutschen zu lassen, da dieser ja sonst die Gewichtsmessung beeinflusst. Damit würde sich aber das Versuchsdesign des Polters entscheidend ändern, da so ja abgedeckte Polter untersucht würden.

Eine weitere, organisatorische Verbesserung des Versuchsdesigns stellt die dauerhafte Markierung der Stämme für die Probennahme am Ende der Messperiode dar. Es zeigte sich, dass es zum Teil schwierig war die mit Forstmarkierfarbe aufgetragenen Identifikationsnummern eindeutig anzusprechen, vor allem in Bereichen, in denen die Stämme besonders wetterexponiert waren. Eine Markierung mit den bei der Holzübernahme üblichen Kunststoffplättchen wäre eine Möglichkeit dieses Problem zu lösen.

Um unterschiedliche Expositionsbedingungen während der Messperiode zu vermeiden, ist ein Standort auszuwählen, an dem im näheren Umkreis um den Polter keinerlei Manipulation stattfindet.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war es den Trocknungsverlauf von Energieholz in Abhängigkeit von Wetterparametern zu modellieren. Dazu wurde Kiefernholz in einem Rungenkorb auf Wiegezellen getrocknet und die Einflussparameter automatisch aufgezeichnet.

Der Wassergehalt des Polters sank von Dezember 2009 bis Februar 2011 von 50,1% auf 32,2%. Die stärksten Trocknungsraten wurden von Mai bis Juni beobachtet und lagen bei über 4% pro Monat. Im November nahm der Wassergehalt um 1,6% zu.

Die Modellierung des Wassergehaltes ist mittels multipler linearer Regression möglich und erfordert dazu Tagesmittel und –summen von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Niederschlag. Dabei konnte in der Simulation über 14 Monate eine maximale mittlere Abweichung von 0,53% +/- 0,71% Wassergehalt vom beobachteten Wassergehalt erreicht werden. Durch die Verwendung von Tagesmittelwerten erscheint dieses Modell auch in der Praxis anwendbar.

Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die relative Luftfeuchte den weitaus größten Einfluss auf die Trocknung hat. Die Simulation einer Abdeckung ergab einen um 14,2% niedrigeren Endwassergehalt als ohne Abdeckung. Daher wäre auch in unseren Breiten die in Skandinavien längst übliche Abdeckung von Poltern anzudenken.

Starkniederschlagsereignisse sind vor allem für die Wahl des Hacktermines von Bedeutung. So konnte gezeigt werden, dass Niederschlagsereignisse um die 30 mm bis zu 0,9% höheren Wassergehalten führen. Folgen weitere Niederschlagsereignisse, so kann es bis zu einer Woche dauern bis der Wassergehalt vor dem ersten Ereignis wieder erreicht ist. Die bremsende Wirkung von Niederschlägen auf die Trocknung konnte deutlich dargestellt werden.

Es zeigte sich, dass das Trocknen von Energieholz in Form von Rundholz über den Umweg des Heizwertes eine enorme Wertsteigerung mit sich bringt. So konnte für den Zeitraum April bis September 2010 eine Wertsteigerung von 14,90 €/t lutro erzielt werden, was unter Inbetrachtung der Vorfinanzierung der Holzernte einer Verzinsung von knapp 60% entspricht. Hätte man das eingesetzte Kapital im selben Zeitraum mit 2% verzinst, so wäre es nur zu Zinsen von 0,50 €/t lutro gekommen. Somit kann geschlussfolgert werden, dass sich die Trocknung in ökonomischem Sinne durchaus rechnet.

7 LITERATURVERZEICHNIS

BRUSCHE, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz, Bergung, Lagerung, Trocknung, KTBL-Schrift 290. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 96 S.

FILBAKK, T., HOIBO, O. und NURMI, J. (2011): Modelling natural drying efficiency in covered and uncovered piles of broadleaf trees for energy use. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35, 454-463.

GIGLER, J., VAN LOON, W. K. P., SERES, I., MEERDINK, G. und COUMANS, W.J. (2000a): Drying characteristics of willow chips and stems. *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 77, 391-400.

GIGLER, J., VAN LOON, W. K. P., VAN DER BERG, J. V., SONNEVELD, C. und MEERDINK, G. (2000b): Natural wind drying of willow stems. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 19, 153-163.

GIGLER, J., VAN LOON, W. K. P. und SONNEVELD, C. (2004): Experiment and modelling of parameters influencing natural wind drying of willow chunks. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 26, 507-514.

GOLSER, M., PICHLER, W., HADER, F. (2005): Energieholztrocknung. *Holzforschung Austria*. 138 S.

HÄCKEL, H. (1999): *Meteorologie*. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart. 448 S.

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

HÖLDRICH, A., HARTMANN, H., DECKER, T., REISINGER K., SOMMER, W., SCHARDT, M., WITTKOPF, S. und OHRNER, G. (2006): *Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren*. Berichte aus dem TFZ 11. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. 279 S.

JIRIS, R. (1995): Storage and Drying of Wood Fuel. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 9, 181-190.

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

KRÖLL, K. (1978). *Trocknungstechnik: Trockner und Trocknungsverfahren*. Springer Verlag. Berlin Heidelberg New York. 654 S.

NORDFJELL, T., LISS, J. E. (2000). Compressing and drying of bunched trees from a commercial thinning. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 15, 284-290.

NURMI, J. (1995): The effect of whole-tree-storage on the fuelwood properties of short-rotation Salix crops. Biomass and Bioenergy, Vol. 8, 245-249.

NURMI, J. (1999): The storing of logging residue for fuel. Biomass and Bioenergy, Vol. 17, 41-47.

NURMI J. und LEHTIMÄKI, J. (2010): Debarking and drying of downy birch (*Betula pubescence*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) fuelwood in conjunction with multi-tree-harvesting. Biomass and Bioenergy, Article in Press, 1-7.

NURMI J. und HILLEBRAND, K. (2007): The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. Biomass and Bioenergy, Vol. 31, 381-392.

PETTERSON, M., NORDFJELL, T. (2007): Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. Biomass and Bioenergy, Vol. 31, 782-792.

RÖSER, D., ERKKILÄ, A., MOLA-YUDEGO, B., SIKANEN, L., PRINZ, R., HEIKKINEN, A., KAIPAINEN, H., ORAVAINEN, H., HILLEBRAND, K., EMER, B., und VÄÄTÄINEN, K. (2010): Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energywood stems. Working papers of the Finnish Forest Research Institute, Vol. 186, 60 S.

SUADICANI, K., GAMBORG, C. (1999): Fuel quality of whole-tree chips from freshly felled and summer dried Norway spruce on a poor sandy soil and a rich loamy soil. Biomass and Bioenergy, Vol. 17, 199-208.

WAGENFÜHR, A., Scholz, F. (Hrsg.) (2008): Taschenbuch der Holztechnik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. München. 568 S.

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

Internetquellen:

AUSTRIAN ENERGY AGENCY (2009): www.klimaaktiv.at/filemanager/download/42357 (15.07.2011)

BFW (2011): <http://bfw.ac.at/300/1192.html> (23.04.2011)

STATISTIK STEIERMARK (2011): http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/10232095_7954241/183070ea/Hartberg.pdf (23.04.2011)

LANDWIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH (2011): <http://www.agrar-net.at/?id=2500%2C1590118%2C%2C> (25.04.2011)

LWF (2011): http://www.lwf.bayern.de/veroeffentlichungen/lwf-aktuell/54/lwf-aktuell_54-25.pdf (09.05.2011)

WIRTSCHAFTSLEXIKON (2011): <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/89401/akaike-informationskriterium-v4.html> (08.05.2011)

Werksinformation

GSODAM Fahrzeugbau GmbH. (2009): Konstruktionszeichnung des Rungenkorbes.

Mündliche Mitteilung

Auskunft zu Hackguteinkaufspreisen der BioEnergie Stainach GmbH von Hrn. Stadler an DI Thomas Leitner (Institut für Forsttechnik der Universität für Bodenkultur Wien) vom 09.05.2011.

8 ANHANG

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hysterese-Effekt in der Trocknungsphase (Quelle: WAGENFÜHR, 2008).....	4
Abbildung 2: h-x-Diagramm nach Mollier (Quelle: BRUSCHE, 1983).	6
Abbildung 3: Heizwert in Abhängigkeit vom Wassergehalt (HARTMANN & KALTSCHMIDT, 2001).	7
Abbildung 4: Konstruktionszeichnung des Rungenkorbes.	14
Abbildung 5: Übersicht der untersuchten Varianten.	18
Abbildung 6: Verlauf der mittleren Tageslufttemperatur.	20
Abbildung 7: Verlauf der mittleren Tageswindgeschwindigkeit.....	21
Abbildung 8: Verteilung der mittleren Tageswindrichtung.	21
Abbildung 9: Verteilung der mittleren relativen Tagesluftfeuchte.....	22
Abbildung 10: Verlauf des flüssigen und festen Niederschlags.....	22
Abbildung 11: Monatliche Wassergehaltsveränderung des Polters im Versuchsverlauf.	23
Abbildung 12: Verlauf des Poltergewichtes im Versuchsverlauf.....	23
Abbildung 13: Verlauf des Wassergehalts.....	24
Abbildung 14: Scatterplots zwischen der Änderung des Wassergehaltes und den Variablen (Lufttemperatur l. o.; Niederschlag r. o.; Trocknungspotential der relativen Luftfeuchte l. u.; Windgeschwindigkeit r. u.).	25
Abbildung 15: Verlauf des Wassergehaltes im Stamm.....	26
Abbildung 16: Varianten A1 und A2 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und stundenweise modelliert im Versuchszeitraum.	26
Abbildung 17: Varianten A3 und A4 –Verlauf des Wassergehalts beobachtet und tageweise modelliert im Versuchszeitraum.	27
Abbildung 18: Varianten B1 und B2 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und stundenweise modelliert im Versuchszeitraum.	27
Abbildung 19: Varianten B3 und B4 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und tageweise modelliert im Versuchszeitraum.	28
Abbildung 20: Varianten C1 und C2 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und stundenweise modelliert im Versuchszeitraum.	28
Abbildung 21: Variante C3 und C4 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und tageweise modelliert im Versuchszeitraum.	29
Abbildung 22: Variante D1 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und stundenweise modelliert im Versuchszeitraum.	29
Abbildung 23: Variante D2 – Verlauf des Wassergehalts beobachtet und tageweise modelliert im Versuchszeitraum.	30
Abbildung 24: Box and Whiskers-Diagramm der Abweichungen der Modelle von der Messung.	32
Abbildung 25: Simulation des Wassergehaltes bei Abdeckung des Polters.....	34
Abbildung 26: Niederschlagsereignis vom 26.05.2010.....	35

Abbildung 27: Niederschlagsereignis vom 16.06.2010.....	36
Abbildung 28: Niederschlagsereignis vom 13.08.2010 und 14.08.2010.....	36
Abbildung 29: Zinsberichtigte Erlöse im Untersuchungszeitraum.....	38

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere Lufttemperatur und mittlerer Niederschlag für Hartberg im langjährigen Mittel und 2010 (Quelle: STATISTIK STEIERMARK, 2011, eigene Messung).	13
Tabelle 2: Ausgewählte Klimaparameter basierend auf zehnminütigen Messintervallen.	13
Tabelle 3: Variablen der eigenen Messung.	14
Tabelle 4: Mittlere im Labor bestimmte Darrdichten und Wassergehalte.	24
Tabelle 5: Statistische Kennwerte der Varianten A bis D.	31
Tabelle 6: Ergebnis des paarweisen t-Tests von Messung und Modellierung.	33
Tabelle 7: Sensitivitätsanalyse der Variante C3 bei einer Veränderung um eine Einheit.	33
Tabelle 8: Sensitivitätsanalyse der Variante C3 bei einer Veränderung um 10%...	34
Tabelle 9: Preismatrix der BioEnergie Stainach GmbH (Mai 2011).	37
Tabelle 10: Erlöse und Energiegehalt über den Untersuchungszeitraum.....	37
Tabelle 11: Koeffizienten der Varianten A bis D.	51

8.3 Tabellenanhang

Tabelle 11: Koeffizienten der Varianten A bis D.

Variante	Intercept	Wind- geschwindigkeit	Luft- temperatur	Trocknungspotential der relativen Luftfeuchte	Niederschlag flüssig/flüssig und fest
A1 – Stunden – flüssig/fest	$0,317 * 10^{-3} ***$	$-5,052 * 10^{-3} ***$	-	$-2,962 * 10^{-4} ***$	$2,822 * 10^{-2} ***$
A2 – Stunden – flüssig	$4,755 * 10^{-3} ***$	$-5,018 * 10^{-3} ***$	$-1,066 * 10^{-4} ***$	$-2,961 * 10^{-4} ***$	$2,758 * 10^{-2} ***$
A3 – Tage – flüssig/fest	$3,490 * 10^{-2} *$	-	-	$-6,188 * 10^{-3} ***$	$1,548 * 10^{-2} ***$
A4 – Tage – flüssig	$5,908 * 10^{-2} ***$	-	$-2,356 * 10^{-3} *$	$-6,010 * 10^{-3} ***$	$1,594 * 10^{-2} ***$
B1 – Stunden – flüssig/fest - T	$-3,558 * 10^{-4}$	$-5,834 * 10^{-3} ***$	$-4,356 * 10^{-4} ***$	$-1,353 * 10^{-4} ***$	$-5,550 * 10^{-3} ***$
B1 – Stunden – flüssig/fest - WB	$5,568 * 10^{-3} ***$	-	$1,038 * 10^{-3} ***$	$-2,122 * 10^{-4} ***$	$2,778 * 10^{-2} ***$
B2 – Stunden – flüssig - T	$-4,442 * 10^{-4} *$	$-5,837 * 10^{-3} ***$	$-4,294 * 10^{-4} ***$	$-1,356 * 10^{-4} ***$	$-5,547 * 10^{-3} ***$
B2 – Stunden – flüssig - WB	$8,143 * 10^{-3} ***$	-	$8,434 * 10^{-4} ***$	$-2,010 * 10^{-4} ***$	$2,706 * 10^{-2} ***$
B3 – Tage – flüssig/fest - T	$-4,536 * 10^{-2} ***$	-	$-4,636 * 10^{-3} ***$	$-2,102 * 10^{-3} ***$	-
B3 – Tage – flüssig/fest - WB	$0,161 ***$	-	$4,891 * 10^{-3} ***$	$-5,752 * 10^{-3} ***$	$7,334 * 10^{-3} ***$
B4 – Tage – flüssig - T	$-4,536 * 10^{-2} ***$	-	$-4,636 * 10^{-3} ***$	$-2,102 * 10^{-3} ***$	-
B4 – Tage – flüssig - WB	$0,182 ***$	-	$3,838 * 10^{-3}$	$-5,723 * 10^{-3} *$	$6,651 * 10^{-3} *$
C1 – Stunden – wie A1	$1,438 * 10^{-3} ***$	$-5,740 * 10^{-3} ***$	$-7,996 * 10^{-5} ***$	$-1,1753 * 10^{-4} ***$	$3,170 * 10^{-2} ***$
C2 – Stunden – wie B1 – T	$-4,034 * 10 *$	$-6,251 * 10^{-3} ***$	$-4,399 * 10^{-4} ***$	$-1,206 * 10^{-4} ***$	$-7,004 * 10^{-3} ***$
C2 – Stunden – wie B1 –WB	$4,297 * 10^{-3} ***$	-	$9,263 * 10^{-4} ***$	$-1,495 * 10^{-4} ***$	$3,220 * 10^{-2} ***$
C3 – Tage – wie A3	$2,440 * 10^{-2} ***$	-	$-1,757 * 10^{-3} ***$	$-4,691 * 10^{-3} ***$	$1,359 * 10^{-2} ***$
C4 – Tage – wie B3 – T	$-5,320 * 10^{-2} ***$	-	$-4,951 * 10^{-3} ***$	$-1,658 * 10^{-3} ***$	-
C4 – Tage – wie B3 –WB	$0,198 ***$	$-0,158$	$5,243 * 10^{-3} **$	$-6,365 * 10^{-3} *$	$1,082 * 10^{-2} ***$
D1 – Stunden – wie A1	$3,177 * 10^{-3} ***$	$-8,465 * 10^{-4} ***$	-	$-2,958 * 10^{-4} ***$	$2,822 * 10^{-2} ***$
D2 – Tage – wie A3	$3,491 * 10^{-2} *$	-	-	$-6,188 * 10^{-3} ***$	$1,548 * 10^{-2} ***$