

Kohlenstoffvorräte in Schweizer
Waldböden
mit besonderer Berücksichtigung der
organischen Auflage

Diplomarbeit von Ana Cristina Moeri

Betreuer: Frank Hagedorn und Stefan Zimmermann

Fakultätsvertreter: Prof. Dr. M. W. I. Schmidt

Geographisches Institut der Universität Zürich
Februar 2007

Vorwort

Dem Kohlenstoffkreislauf kommt im Zusammenhang mit dem Klimawandel eine immer grössere Bedeutung zu. Oftmals liegt der Fokus dabei auf der Verursacherseite. Die Rolle des Waldes, den Kohlenstoff-Senken also, ist jedoch von ebenso grosser Wichtigkeit für das klimatische Gleichgewicht auf der Erde. Noch weitgehend unerforscht ist der Waldboden, der nebst der Biomasse ein grosser Kohlstoffspeicher darstellt. Der Waldboden und dessen Funktion als Kohlenstoffspeicher erschien mir deshalb ein gleichsam relevantes wie interessantes Forschungsthema, dem ich in meiner Diplomarbeit nachgehen wollte.

Nach ersten Nachforschungen in der Literatur begann ich im Herbst 2005 mit meiner Feldarbeit. 30 Waldstandorte in der Schweiz galt es zu beproben. Nebst der praktischen Forschungsarbeit war es für mich als Auslandschweizerin eine einmalige Gelegenheit, um Orte kennen zu lernen, an denen ich zuvor noch nie war. Gerade die alpinen Standorte waren zum Teil sehr beeindruckend. Die anschliessende Verarbeitung und Analyse der Proben an der WSL erlaubten mir den Einblick in ein modernes Labor und gaben mir die Gelegenheit meine bereits vorhandenen Kenntnisse in der Probenaufbereitung und -analyse zu vertiefen.

Das Ergebnis meiner Arbeit und die Tatsachen, dass alles so reibungslos abgelaufen ist, habe ich nicht zuletzt den vielen Personen zu verdanken, die mich bei meiner täglichen Arbeit unterstützten: Ein grosser Dank geht an meinen Betreuer, Frank Hagedorn. Er hat mich von seiner Begeisterung zur Wissenschaft angesteckt, immer wieder neue Inputs geliefert und dabei viel Geduld gezeigt. Ebenso Stefan Zimmermann, der stets ein offenes Ohr für meine Fragen hatte und mich in die Bodendatenbank der WSL einweihte. Bei Christian Hoffmann bedanke ich mich ganz herzlich für die wochenlange Geduld und sein grosses Fachwissen, das mir bei der statistischen Auswertung viel geholfen hat. Mein Dank geht auch an das ganze WSL-Team, in dem ich mich vom ersten Tag an wohl fühlte, insbesondere Roger Köchli, mit dem ich die ersten Wochen in der ganzen Schweiz auf Probenahme unterwegs war. Mein Dank geht auch an Prof. Dr. Michael Schmidt, meinen Fakultätsvertreter. Ohne ihn wäre meine Arbeit erst gar nicht möglich gewesen. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir stets den Rücken freigehalten und viel Geduld bewiesen hat. Gleiches gilt für Tjerk Brühwiller, der meine Arbeit in stundelanger Arbeit gegengelesen und korrigiert hat.

Zusammenfassung

Bei den Verhandlungen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen spielen Wälder als mögliche CO₂-Senken eine wichtige Rolle. Innerhalb der terrestrischen Ökosysteme speichern Böden die grössten Kohlenstoffmengen. Zur Anrechnung von C-Senken müssen daher ober- wie auch unterirdische C-Pools und deren Veränderungen möglichst zuverlässig abgeschätzt werden. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, welche eine möglichst präzise Bestimmung des Kohlenstoffvorrates in der organischen Auflage der Schweizer Waldböden erlaubt. Der erste Teil der vorliegenden Arbeit beschreibt die Beprobung von der organischen Auflage an 30 ausgewählten Standorten, verteilt über die 3 wichtigsten schweizerischen Waldtypen: Nadel-, Misch und Laubwald. Es wurden Proben entnommen, die Mächtigkeit gemessen, die Dichte berechnet und im Labor den Kohlenstoffvorrat bestimmt. Diese genaue Untersuchung ermöglichte eine Extrapolation auf Standorte der Datenbank wo nur die Mächtigkeit untersucht wurde.

Die Vervollständigung der Datenbank und die Statistische Analyse bilden den zweiten Teil der Untersuchung. Anhand einer multiplen Regressionsanalyse wird der Einfluss der biotischen und abiotischen Faktoren berechnet und ein Modell bestimmt. Dieses Modell ermöglicht die Berechnung des Kohlenstoffvorrates der organischen Auflage in Schweizer Waldböden anhand der Parameter Waldtyp, Höhe und pH-Wert mit einem Bestimmtheitsmass R² von 0.38. Diese drei Parameter beschreiben am besten die Kohlenstoffspeicherung in Schweizer Waldböden.

Die höchsten Kohlenstoffvorräte pro Flächeneinheit können Nadelwäldern in höheren Lagen und Böden mit tiefem pH-Wert zugeordnet werden: ca. 40 t/ha. Als schweizerischer Mittelwert für die organische Auflage von Waldböden resultiert ein Wert von ca. 17 t/ha bei einer mittleren Mächtigkeit von 0.05m. Demnach kann man für die organische Auflage der gesamten schweizerischen Waldfläche (1.23 Mio ha) einen Kohlenstoffvorrat von 20 Mt berechnen.

Abstract

Forests as potential carbon sinks play a major role in the negotiations about greenhouse gas reduction efforts. Within the terrestrial ecosystems, forest floors accumulate the largest amounts of carbon. In order to be taken as credits for the fulfilment of the CO₂ reduction goals, surface and subsurface C-pools have to be assessed very accurately.

The aim of this study was the assessment of carbon pools in the organic layers of the Swiss forest soils: The first part of the present work describes the sampling procedures of 30 selected Sites, distributed over the 3 major forest types: coniferous, mixed and deciduous. Samples were taken, thickness measured, the density calculated and the carbon inventory determined in the laboratory. This accurate assessment was extrapolated to the sites of the existing data set of WSL, which recorded the thickness only.

The complement of the entire data set and the statistical analysis is presented and discussed in the second part of the study. The influence of biotic and abiotic factors and the respective model was tested by a multiple regression analysis. The resulting equation permits the determination of the amount of carbon in the organic layers of the forest soil based on the forest type, elevation and pH with a R² of 0.38. These three parameters are the most appropriate ones for defining the carbon content in the Swiss forest floors.

The highest C-pools per surface area have been found in coniferous forests at high elevations and soils with low pH-values: approximately 40 tons/ha. As a Swiss average for the forest floor, a value of 17 tons/ha with an average thickness of 0.05 m can be determined. Therefore, the overall C-reservoir of the total Swiss forest floors (1.23 Mha) can be estimated as 20 Mt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	I
Zusammenfassung	II
Abstract	III
1. Einleitung	1
1.1 Klimapolitik der Schweiz	1
1.2 Senken	1
1.3 Fragestellungen und Ziele dieser Arbeit	2
2. Theoretische Grundlagen	4
2.1 Der Kohlenstoffkreislauf	4
2.1.1 Der globale Kohlenstoffkreislauf	4
2.1.2 Kohlenstoffkreislauf in der Schweiz	5
2.1.3 Bedeutung des Waldes im Kohlenstoffkreislauf	6
2.1.4 Waldböden als Kohlenstoffsinken	7
2.2 Pflanzliche Streu	7
2.2.1 Streuabbau	7
2.2.2 Was beeinflusst den Streuabbau?	8
2.3 Organische Bodensubstanz und Humusformen	9
2.3.1 Definition Organische Bodensubstanz	9
2.3.2 Die organische Auflage	9
L-Horizont	10
F-Horizont	10
H-Horizont	11
Ah-Horizont	11
2.3.3 Humusformen	11
Definition	11
Mull	12
Moder	13
Rohhumus	14
Anmoor	14
Torf	14
2.3.4 Bedeutung der organischen Substanz und Humusformen in Wäldern	15
3. Untersuchungsgebiet Schweiz	16
3.1 Produktionsregionen	16
3.2 Wald	16
3.3 Klima	17
3.3.1 Temperatur	17
3.3.2 Niederschlag	18
3.4 Geologie	18
3.4.1 Jura	19
3.4.2 Mittelland	19
3.4.3 Voralpen	19
3.4.4 Alpen	20
3.4.5 Alpensüdseite	20
3.5 Bodentypen	20

4. Methoden	22
4.1 Überblick der Methodenanwendung	22
4.2 Feldarbeit	22
4.2.2 Standortsuche	22
4.2.3 Probenentnahme	23
4.3 Probenaufbereitung	24
4.4 Laboranalysen	24
4.5 Berechnungen	24
4.2 WSL-Datenbank	24
4.2.1 Datenverarbeitung	25
5.7.1 Multiple Regressionsanalyse	26
Hilfsvariable für Wald	27
4.2.2 Scatterplotmatrix	27
4.2.3 Statistische Auswertung	28
4.3 Unabhängige Variablen	28
4.3.1 Relief	28
Höhe	29
Exposition und Neigung	29
4.3.2 Klima	30
Wärme	30
Kontinentalitätsindex	32
Gradtage	32
Niederschlag	32
Frosttage	32
4.3.3 Waldtyp	32
4.3.4 Ausgangsgestein	33
4.3.5 pH-Wert im Oberboden	33
5. Resultate	34
TEIL A	34
5.1 Organische Auflage an ausgewählten Standorten	34
5.1.1 Der L-Horizont	35
5.1.2 Der F- und H-Horizont	35
5.2 Anzahl der benötigten Proben	36
5.3 Berechnung der Dichte	38
5.4 Das Kohlenstoff/Stickstoff (C/N) - Verhältnis	38
5.5 Kohlenstoffvorräte	42
TEIL B	45
5.6 Kohlenstoffvorräte aus WSL-Datenbank	45
5.7 Multiple Regressionsanalyse	46
5.7.2 Scatterplotmatrix	46
5.7.3 Drei Modelle	47
Modell 1: pH und W2	47
Modell 3: ph, Höhe, W2 und Wärme	49
Vergleich der drei Modelle	50
5.8 Kohlenstoffvorräte vorhergesagt auf dem 8x8km Netz	52
5.8 Kohlenstoffvorräte vorhergesagt auf dem 8x8km Netz	52
5.9 Untersuchung der biotischen und abiotischen Faktoren	52
5.9.1 Waldtyp	53
5.9.2 Die Höhe	54
5.9.3 pH-Wert	55
5.9.4 Klima	56
Wärme	56
Niederschlag	57

5.10 Verhältnis Mineralboden/organische Auflage	58
5.10.1 Nach Höhenstufen	58
5.10.2 Nach Waldtyp.....	58
5.10.3 Nach pH-Wert	59
5.11 Kohlenstoffvorrat im Schweizer Wald	61
Organische Auflage.....	61
Biomasse	61
Mineralboden	62
6. Diskussion.....	64
6.1 Kohlenstoffvorrat im Schweizer Wald	64
6.1.1 Biomasse.....	64
6.1.2 Mineralboden.....	64
6.2 Steuernde Parameter der C-Speicherung in der organischen Auflage	65
6.2.1 Einfluss des Waldtyps und der Biomasse	65
6.2.2 Einfluss der Höhe	66
6.2.3 Einfluss des Klimas	67
6.2.4 Einfluss des pH-Wertes	68
6.3 Vergleich mit anderen Autoren	68
6.4 Vergleich mit anderen Ländern	69
6.4.1 Österreich	69
6.4.2 Deutschland	70
6.4.3 Andere Europäische Länder.....	71
6.4.4 Nordamerika	71
6.5 Qualität und Quantität der Daten	71
7. Fazit und Ausblick	73
8. Literaturverzeichnis.....	74
9. Abbildungsverzeichnis.....	82
10. Tabellenverzeichnis.....	83

1. Einleitung

1.1 Klimapolitik der Schweiz

Die schweizerische Klimapolitik wird wesentlich von drei rechtlichen Regelungen bestimmt: dem CO₂-Gesetz, der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen über die Klimaänderung (Klimakonvention) und dem Kyotoprotokoll. Das CO₂-Gesetz bildet das Kernstück der schweizerischen Klimapolitik und ist seit dem 1. Mai 2000 in Kraft. Bis ins Jahr 2010 müssen die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energien insgesamt um 10% unter das Niveau von 1990 gesenkt werden. Zudem sind Teilziele verankert für Brennstoffe (minus 15%) und Treibstoffe (minus 8%). Für das Reporting an die Klimakonvention wird grundsätzlich die gesamte CO₂ Bilanz eines Landes erfasst, welche vom Menschen beeinflusst wird. Die ganze Landnutzung soll bilanziert werden („full accounting“).

Seit dem 16. Februar 2005 ist das Kyotoprotokoll in Kraft. Die Schweiz hat sich – wie die Europäische Union – verpflichtet, ihre Treibhausgas-Emissionen bis 2012 um 8% im Vergleich zu 1990 zu reduzieren. Somit kann die im Kyotoprotokoll vorgeschriebene Reduktion hauptsächlich durch die Umsetzung des CO₂-Gesetzes erreicht werden, da das CO₂ in der Schweiz das mit Abstand wichtigste der sechs Treibhausgase ist (für die fünf anderen sind bisher keine Begrenzungsziele festgelegt worden). Da die Ziele des CO₂-Gesetzes und des Kyotoprotokolls kompatibel sind, wird bei der Reduktion von 10% des CO₂ gleichzeitig auch die Vorgabe des Kyotoprotokolls erfüllt.

Die Erfüllung der Reduktionsverpflichtungen wird auf der Grundlage von Sachverständigenberichten und Treibhausgasinventaren überwacht, die von jedem Vertragsstaat des Übereinkommens aufgestellt werden. Erfüllt ein Staat die Reduktionsziele bis zum Zeitraum 2010-2012 nicht, so wird er sanktioniert, beispielsweise durch Einschränkungen bei der Nutzung der flexiblen Mechanismen.

Der Schweiz ist es bisher gelungen den Ausstoss von Treibhausgasen seit 1990 zu stabilisieren.

1.2 Senken

Aus den vorangehenden Verhandlungen der Klimakonvention (UNFCCC, 1997) sind die „Einigung von Bonn“ und die „Vereinbarungen von Marrakesch“ hervorgegangen. Die Verhandlungen haben ergeben, dass zur Erfüllung der Reduktionsverpflichtungen auch Massnahmen verrechenbar werden, die zu einer Erhöhung ökosystemarer Senken für CO₂ führen (FISCHLIN et al., 2003). Es wird also zusätzlich CO₂ aus der Atmosphäre aufgenommen („Sequestrierung“). Für die Anrechnung der Senken hat die Schweiz gemäss Artikel 3.3 des Kyotoprotokolls Aufforstungen, Wiederaufforstungen und Rodungen zu berücksichtigen, während sie nach Artikel 3.4 in schon bestehenden Wäldern, Wiesen und Äckern für die erste Verpflichtungsperiode noch wählen kann, welche Aktivitäten sie sich anrechnen lassen will (UNFCCC, 1997). Die Waldbewirtschaftung dürfte dabei der Sektor sein, der quantitativ am stärksten ins Gewicht fällt. Nach Kyotoprotokoll ist aber nur der Teil dieser Senkenleistungen

anrechenbar, der vom Menschen verursacht ist und durch Massnahmen zustande kam, die nach 1990 getroffen wurden. Bei der Abschätzung der Senkenleistungen fällt dem ober- und unterirdischen Kohlenstoffvorrat eines Ökosystems eine entscheidende Rolle zu, denn ein Ökosystem vermag Kohlenstoff mit der Atmosphäre sowohl über das Kohlendioxid auszutauschen als auch, je nach Situation, über das Methan. Zur Anrechnung von C-Senken müssen daher ober- wie auch unterirdische Kohlenstoff-Pools und deren Veränderungen möglichst zuverlässig abgeschätzt werden.

Bei einer Senkenanrechnung muss schliesslich beachtet werden, dass ein späterer Vorratsabbau im Wald durch Holznutzung oder infolge von Schäden durch Stürme oder Borkenkäfer die Senkenleistung wieder rückgängig macht. Bei einer Entschädigung der Senkenleistung muss deshalb auch die Verantwortung bei einem späteren Vorratsabbau geregelt werden. Dieser bildet eine CO₂-Quelle und muss über andere Massnahmen kompensiert werden (ENGLISCH et al., 2001).

Der Bund führt ein nationales Treibhausgasinventar. Das verlangt die UNO-Klimarahmenkonvention. Das Kyotoprotokoll erfordert unter anderem wegen der hinzugekommenen Anrechnung der Senken weiteren administrativ-technischen Aufwand. Im Treibhausgasinventar ist neben der jährlichen Bilanz zu den Emissionen der im Kyotoprotokoll erwähnten Treibhausgase auch die jährliche CO₂-Aufnahme oder -Abgabe der Wälder und der landwirtschaftlichen Böden aufgeführt. Künftig muss der Bund also eine jährliche Bilanz aller Kohlenstoffspeicher ziehen: oberirdisches Pflanzenmaterial, Wurzeln, Streuauflage, Totholz, Boden.

1.3 Fragestellungen und Ziele dieser Arbeit

In der Schweiz haben sich hauptsächlich zwei Autoren mit den Kohlenstoffvorräten in Schweizer Waldböden befasst. PAULSEN (1995) hat in seiner Dissertation mit Hilfe der Bodeneignungskarte den Kohlenstoffvorrat im Mineralboden auf 136 tC/ha geschätzt. Dabei wurden die Vorräte über alle Kartierungseinheiten aufaddiert. Der Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage schätzt er auf 12 tC/ha wobei unklar ist wie er auf diesen Wert kommt.

Eine breitere Datenbasis stand PERRUCHOUD et al (2000) mit der Waldschadeninventur im 8 x 8 km Netz zur Verfügung. Die Daten bestehen aus Mess- und Schätzgrössen aus Profilaufnahmen. Es kann daher angenommen werden, dass sein Kohlenstoffvorrat von 98 tC/ha realistischer ist als der von PAULSEN (1995). Den Vorrat in der organischen Auflage übernimmt er von PAULSEN (1995), da ihm keine Daten zu den Auflagehorizonten zur Verfügung stehen.

In dieser Arbeit wird eine Abschätzung des gesamten Kohlenstoffvorrates in den Auflagehorizonten der Schweizer Waldböden gemacht, wobei folgende Fragestellungen im Zentrum stehen:

- *Wie viel Kohlenstoff ist im Auflagehorizont Schweizer Waldböden gespeichert?*

- *Welche Faktoren beeinflussen die C-Speicherung in den organischen Auflagen? Sind es die klimatischen Verhältnisse, die Höhenlage, die Bodeneigenschaften, oder die Produktivität oder Art der Vegetation?*
- *In welchem Bezug zu den bisherigen Kenntnissen über die C-Verteilung in Schweizer Waldböden stehen die neuen Erkenntnisse?*
- *Mit welcher Genauigkeit können die C-Vorräte der organischen Auflage gemessen werden? Könnte man über eine Wiederholung der Messung Veränderungen des C-Vorrats ermitteln?*

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Der Kohlenstoffkreislauf

2.1.1 Der globale Kohlenstoffkreislauf

Der globale Kohlenstoffkreislauf besteht aus einem System von zusammenhängenden Kompartimenten. In diesem System kann jedem Kompartiment ein bestimmter Kohlenstoffinhalt zugeordnet werden: 760 Gt C in der Atmosphäre, 2500 Gt C in der Biosphäre (inklusive Böden!), 39.000 Gt C in den Weltmeeren und schliesslich 61.000.000 Gt C in der Lithosphäre, hauptsächlich in Kalkgesteinen (Abbildung 2-1) (SCHIMMEL, 1995). Der Austausch von Kohlenstoff zwischen den verschiedenen Kompartimenten findet vor allem über das CO_2 -Molekül statt (BEGON et al., 1998). Der globale Kohlenstoffkreislauf ist daher ein im Wesentlichen gasförmiger Zyklus, welcher durch die Photosynthese und die Atmung angetrieben wird (BEGON et al., 1998).

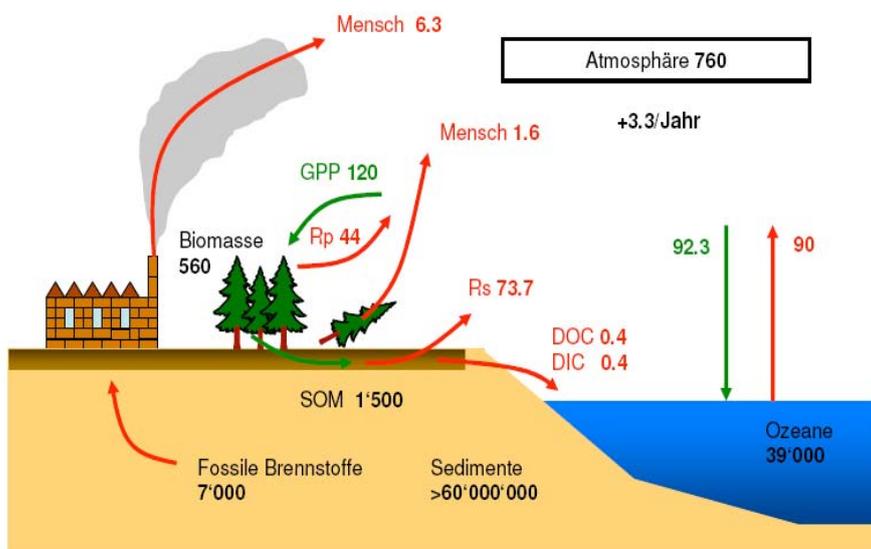


Abbildung 2- 1: Der globale C-Kreislauf mit den wichtigsten Speichern (Gigatonnen C) und Flüssen (Gigatonnen C/Jahr). (Darstellung aus Diplomarbeit Adrian Kammer)

Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, sowie durch Abholzung und Änderungen der Landnutzungsformen wird zusätzlich Kohlenstoff in die Umwelt abgegeben was zu einem CO_2 -Konzentrationsanstieg in der Atmosphäre führt (IPCC 2001). In den letzten 400.000 Jahren ist die mittlere CO_2 -Konzentration von 290 ppm in der Atmosphäre nie überschritten worden. Im Jahr 1957 wurde auf dem Mauna Loa (Hawaii) eine CO_2 -Konzentration von 315 ppm gemessen und im Jahr 1999 erreichte die Konzentration 367 ppm (WATSON et al., 2000). Eine Verdoppelung der CO_2 -Konzentration wird vor Ende des 21. Jahrhunderts erwartet (IPPC, 2001; PRENTICE, 2001).

2.1.2 Kohlenstoffkreislauf in der Schweiz

Im Jahr 2003 beliefen sich die CO₂-Emissionen der Schweiz auf 44,7 Millionen Tonnen, d.h. 6,05 Tonnen pro Kopf. Knapp drei Viertel dieser Emissionen stammen aus dem Verkehr (34%) und aus Kleinfeuerungen (26% Haushalte, 12% Handel/Dienstleistungen/Verwaltung). Die Industrie verursachte rund 20% der CO₂-Emissionen (17% energetisch, 4% nicht energetisch). Die übrigen Emissionsquellen sind von untergeordneter Bedeutung. Gegenwärtig ergibt die Differenz zwischen der Freisetzung von Kohlenstoff (Holzernte und Bodenbewirtschaftung) und der Kohlenstoffaufnahme durch Holzzuwachs eine Absorption von rund 1,8 Millionen Tonnen CO₂. Diese Menge entspricht 4% der CO₂-Emissionen (BUWAL, 2005).

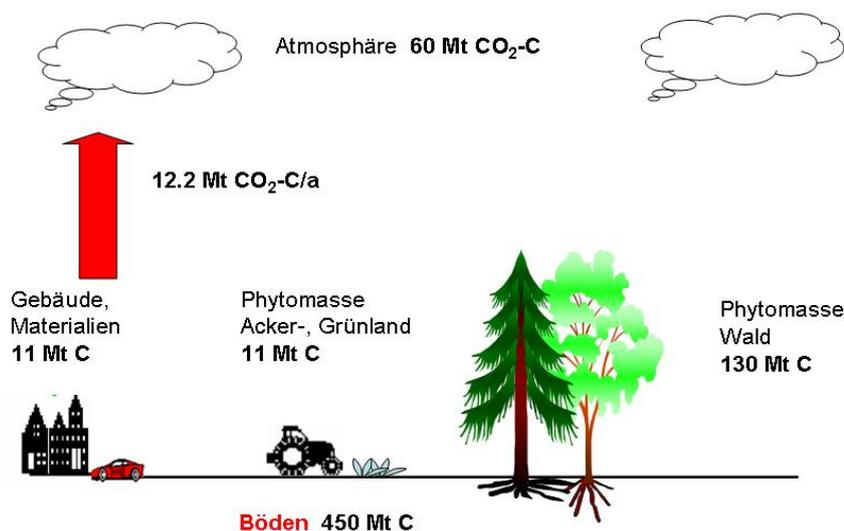


Abbildung 2- 2: Kohlenstoffkreislauf der Schweiz

Schweizer Wälder enthalten in ihrer Pflanzenmasse und im Boden vier- bis fünfmal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre über dem Land. Etwas mehr als die Hälfte davon liegt im Boden, den Rest speichert die Pflanzenmasse (Abbildung 2-2). Die Berechnungen ergeben, dass der Schweizer Wald rund 130 Millionen Tonnen Kohlenstoff in seiner Biomasse enthält. Pro Hektar speichert der Schweizer Wald also durchschnittlich 120 Tonnen Kohlenstoff. Dies ist rund dreimal so viel wie im europäischen Durchschnitt und 60% mehr als im restlichen Zentraleuropa. Der hohe Kohlenstoffvorrat des Schweizer Waldes widerspiegelt einerseits die günstigen Wachstumsverhältnisse. Andererseits ist der hohe Wert auch eine Folge der grossen Holzvorräte und der geringen Nutzung (BUWAL, WSL, 2005).

2.1.3 Bedeutung des Waldes im Kohlenstoffkreislauf

Neben der Atmosphäre und der Ozeane gehört die terrestrische Biosphäre zu den wichtigsten Kohlenstoffreservoirs im globalen Kohlenstoffkreislauf. Die Reduktion der Waldfläche um 20% durch Abholzung ist verantwortlich für beinahe 90% der geschätzten Emissionen infolge Landnutzungsänderung seit 1850 (HOUGHTON et al., 1999). Bewirtschaftete und verjüngte Wälder speichern weniger Kohlenstoff als natürliche Wälder, auch wenn sie ausgewachsen sind (PRENTICE et al., 2001).

Pflanzen nehmen durch Wachstum CO_2 aus der Luft auf und binden es als Kohlenstoff in ihre Biomasse. Ein wachsender Wald wirkt daher als CO_2 Senke, allerdings nur solange Biomasse gebildet wird (HAGEDORN, 2002). Damit ein Wald eine Senke ist muss er verjüngt werden (PRENTICE et al., 2001). Die Tatsache das 80% des Kohlenstoffes, der in Pflanzen gespeichert ist, und 40% des Kohlenstoffes der im Boden gespeichert ist, sich in Waldökosysteme befinden zeigt die Bedeutung des Waldes im globalen Kohlenstoffkreislaufes (DIXON et al. 1994).

Der Gesamteffekt einer Temperaturerhöhung auf die CO_2 -Bilanz der Wälder wird nur ungenügend verstanden, da Felduntersuchungen an ausgewachsenen Bäumen sehr kostspielig und technisch schwierig durchzuführen sind. Begasungsexperimente zeigen nach einigen Jahren eine Abnahme der Kohlenstoffaufnahme von Waldbeständen bei erhöhten atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen. Verschiedene Effekte wie eine erhöhte Wachstumsrate oder eine höhere Streuproduktion klingen mit der Zeit ab. Diese Resultate werden durch andere experimentelle Untersuchungen nur zum Teil bestätigt (HAGEDORN et al, 2003).

Die grossräumigen Untersuchungen am globalen Kohlenstoffkreislauf sprechen hingegen eine deutliche Sprache: In mittleren Breiten, in denen sich auch die Schweiz befindet, sind die Wälder zurzeit starke Kohlenstoffsenken, und das erst noch mit wachsendem Trend (1990er Jahre 2.3 GtC). Sie vermögen sogar die grossen Mengen an Kohlenstoff, die infolge Rodungen in den 1990er Jahren in den Tropen freigesetzt wurden (1.6 GtC), zu kompensieren. Als mögliche Ursache für die grosse Senkenwirkung gilt hauptsächlich die im letzten Jahrhundert stetig zurückgegangene Nutzung; aber auch Düngungseffekte durch die um 30% angestiegenen atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen, menschverursachte, luftverfrachtete Stickstoff-Ablagerungen und klimatische Effekte könnten mitverantwortlich sein.

Stürme können aus der Senke über Nacht eine Kohlendioxid-Quelle machen. Der Sturm Lothar zum Beispiel zerstörte Ende 1999 innerhalb weniger Stunden Bestände, die vier Millionen Kohlenstoff enthielten. In Anbetracht solcher Ereignisse sind Fachleute vorsichtig und gehen von einer Kohlendioxid-Senkenleistung von jährlich zwischen 0,1 bis 1,0 Millionen Tonnen Kohlenstoff aus. Dies entspricht 1 bis 7 % der gegenwärtigen Emissionen. Der Schweizer Wald bindet also bloss einen Bruchteil der Treibhausgasemissionen (BUWAL, WSL 2005).

2.1.4 Waldböden als Kohlenstoffsinken

Etwa 80% der terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte, die am aktiven Kohlenstoffkreislauf teilnehmen, sind in den Böden gebunden und nur etwa 20% in den Pflanzen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Wird die auf einem Boden anfallende organische Substanz nicht vollständig mineralisiert, sondern humifiziert, reichert sich Humus an und der Waldboden wird zum Kohlenstoffspeicher (WALTHERT et al., 2004). Das Ausmass der Kohlenstoffspeicherung ist die Netto-Summe aus folgenden Prozess-Schritten: Streuproduktion, Mineralisierung, Humifizierung, Humusstabilisierung und Humusverlust durch Auswaschung oder Erosion (WALTHERT et al., 2004). Die Rückführung des gebundenen Kohlenstoffes erfolgt über die Bodenatmung, überwiegend als Funktion mikrobieller Oxidationsprozesse (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Nur aus anaeroben Böden (Moore, Reisböden, Permafrostböden) mit sehr niedrigen Redoxpotentialen wird C in Form von Methan (CH_4) freigesetzt (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

Die Rolle von Böden als C-Senken ist umstritten. Zeitreihen Studien auf Dünenböden mit unterschiedlichem Alter weisen einen mit der Zeit mehr oder weniger konstanten C-Vorrat auf (SCHLESINGER et al., 2000). Demgegenüber lassen Modellrechnungen vermuten, dass Böden in den Wäldern Westeuropas gegenwärtig Kohlenstoff anreichern. Die Gründe dafür sind die zunehmende Waldfläche und ein gesteigertes Wachstum der Bäume, was den Kohlenstoff-Input in die Böden steigert (LISKI et al., 2002; JANSEN et al., 2003). Schweizer Waldökosysteme im 21. Jahrhundert dürfen als Kohlenstoffsinken dargestellt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Senken generell mengenmässig und zeitlich limitiert sind. Die Reduktion der atmosphärischen CO_2 -Konzentration sollte daher in erster Linie durch eine direkte Senkung der anthropogenen CO_2 -Emissionen erfolgen (THÜRIG, 2005).

2.2 Pflanzliche Streu

2.2.1 Streuabbau

Streuabbau ist ein wichtiger Prozess im globalen Kohlenstoffkreislauf, weil er den durch die terrestrische Biomasse fixierten Kohlenstoff zurück in die Atmosphäre gibt (HEIM et al., 2004).

Nach GISI (1997) kann der Abbau der Streu in vier Phasen gegliedert werden, die nahtlos ineinander übergehen und sich überlappen: 1. Absterbephase, 2. Auswaschphase, 3. Zerkleinerungsphase, 4. Mikrobielle Phase (GISI, 1997). Die Streu besitzt den einfachsten Aufbau, wenn das Blatt vom Baum fällt (BERG et al., 2003).

Der Abbau des Pflanzenmaterials beginnt noch an der intakten Pflanze mit dem Rückzug wichtiger Nährstoffe in die Wurzel und der hydrolytischen und oxidativen Spaltung von polymeren Inhaltsstoffen (Stärke, Proteine, Cutine) sowie mit einer Zunahme der Mikroflora auf den absterbenden Pflanzenteilen. Das tote

Pflanzenmaterial kann noch lange mit den lebenden Organen in Verbindung bleiben, bevor es auf den Boden fällt (GISI 1997). Diese Phase nennt man Absterbephase. Auf dem Boden geht der Abbau von Zucker, Stärke, Proteinen, Hemicellulosen oder Cellulose, allgemein der nichtverholzten Anteile, besonders schnell vor sich (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Die Abbauraten nehmen mit zunehmender Verweildauer im Boden immer mehr ab, da allmählich eine Stabilisierung der Abbauprodukte in Form von Huminstoffen erfolgt (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Während der Auswaschphase werden die wasserlöslichen Spaltprodukte (Zucker, Peptide, Aminosäuren, organische Säuren) freigesetzt und durch Regen aus der Streu entfernt (GISI 1997). In der nächsten Phase (Zerkleinerungsphase) wird das organische Material durch mechanische Zerkleinerung, Umwandlung und Durchmischung von Bodentieren vielfach verarbeitet (GISI 1997). In der Mikrobiellen Phase wird das organische Material durch enzymatische Tätigkeiten von Bakterien und Pilzen abgebaut. Sie nutzen das organische Material als Energie und Nährstoffquelle (vor allen C, N) und wandeln es dabei um in anorganische Endprodukte wie CO_2 , H_2O , HN_4^+ (Mineralisierung) oder in neue organischen Zwischenprodukten (Humifizierung) (GISI, 1997).

2.2.2 Was beeinflusst den Streuabbau?

Hauptsächlich sind drei Gründe für eine unvollständige Streuzersetzung, welche zu einer Streuakkumulation führt, verantwortlich: Klima (Temperatur und Luftfeuchtigkeit), Chemische und Physische Zusammensetzung der Streu (HEIM und FREY, 2004) und Biologische Aktivität (PRESCOTT et al., 2000).

Gehalt, Menge und Eigenschaften der organischen Substanz werden massgeblich vom Klima beeinflusst. Biomasseproduktion und mikrobieller Abbau sind unter den Bedingungen des gemässigt-humiden Klimas sehr eng mit der Temperatur korreliert. Trotzdem steigt der Humusgehalt nicht entsprechend der Streuzufuhr, da der zunehmende Mikroorganismenbesatz mit einer höheren Abbaurate verbunden ist, die dem entgegenwirkt (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002, ADL, 2003).

Zucker, Stärke, Proteine, Hemicellulose und Cellulose sind relativ leichtabbaubare Bestandteile des organischen Materials und werden entsprechend schnell von den Bodenorganismen umgesetzt. Die aromatischen Strukturen des Lignins und die aliphatischen Verbindungen von Fetten und Wachsen dagegen können von den Mikroorganismen nur schwer geknackt werden und reichern sich mit fortschreitender Humifizierung in der organischen Auflage an (SJÖBERG, 2003). Neben der Temperatur und der Feuchtigkeit stellt die Streuqualität den wichtigsten steuernden Parameter für den Abbau und die Umsetzung der organischen Substanz dar. Dabei gilt in der Regel: Je höher die Ligninkonzentration und je niedriger die N-Konzentration ist, umso langsamer verläuft der Abbau (HOBBIE et al., 2000; HEIM und FREY, 2004). Lignin ist eine hochmolekulare, Substanz aus Phenylpropaneinheiten, die in verholzten Pflanzen das Gefüge der Zellmembran ausfüllt und versteift (BERG, 2000, SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Das Lignin der Nadel- und der Laubhölzer bestehen

aus Unterschiedlichen Alkoholeinheiten. In den ersten zwei Jahren hat der Faktor Streuqualität einen grösseren Einfluss auf den Abbau als die biotischen Faktoren. Im Verlauf der Zeit nimmt der Einfluss der abiotischen (Klimatischen) Faktoren immer mehr zu (HEIM und FREY, 2004, ADL, 2003).

2.3 Organische Bodensubstanz und Humusformen

2.3.1 Definition Organische Bodensubstanz

Zur organischen Bodensubstanz (Synonym: Humus, engl.: „soil organic matter“), gehören alle in und auf dem Mineralboden befindlichen, abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe sowie deren Umwandlungsprodukte. Die lebenden Organismen (das aus Bodenflora und Bodenfauna bestehende Edaphon), sowie lebende Wurzeln gehören nicht zur organischen Substanz der Böden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

Je nach Abbaubedingungen wird ein gewisser Teil des so angelieferten organischen Materials bereits nach kurzer Zeit durch Bodenorganismen mineralisiert (HEIL, 2000). Ein Teil des abgestorbenen Pflanzenmaterials verbleibt als organische Bodensubstanz für längere Zeit - zum Teil Jahrtausende - im Boden. Die stoffliche Zusammensetzung der organischen Bodensubstanz ist sehr heterogen, da sich wohl pflanzliche wie auch tierische Ausgangsstoffe in den verschiedenen Stadien ihrer Umwandlung befinden.

Pflanzenreste, die auf den Boden gelangen, unterliegen zum Teil einer sehr schnellen Mineralisierung, während ein anderer, meist kleinerer Teil, zu Humusstoffen umgewandelt wird (Humifizierung). Humusstoffe werden mit der Zeit mineralisiert, können aber auch physikalisch-chemisch stabilisiert und erst im Lauf von Jahrzehnten bzw. Jahrhunderten mineralisiert werden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Humusstoffe bilden zusammen mit Streuresten den Humus eines Bodens.

Wird die auf und in einem Boden anfallende organische Substanz nicht vollständig mineralisiert, sondern teilweise humifiziert, reichert sich Humus an (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Der Vorrat an Streu und Humus hängt von der Geschwindigkeit des Abbaus sowie von den jährlich zugeführten Mengen ab (GISI, 1997).

2.3.2 Die organische Auflage

Definition: „Unter organische Auflage („organic layer“ oder „forest floor“) wird der Abschnitt des Bodenprofils bezeichnet, an dessen Ausbildung sowohl lebende Organismen wie deren tote Reste wesentlich beteiligt sind; die toten Reste können verschieden weit umgewandelt sein. Sie ist einfach gesagt, der Teil des Bodens, der belebt ist. Die organische Auflage kann in eine L-, F- und H-Lage unterteilt werden (Abbildung 2-3). Die einzelnen Lagen stellen die von oben nach unten aufeinander folgenden Stadien der Zersetzung der Bestandesabfälle dar“(BABEL, 1970).

Da die vorliegende Arbeit auf einer WSL - Datenbank aufbaut, wird im Folgenden die bei der Feldanalyse angesprochene Klassifizierung der Humushorizonte nach BABEL (1970) vorgestellt:

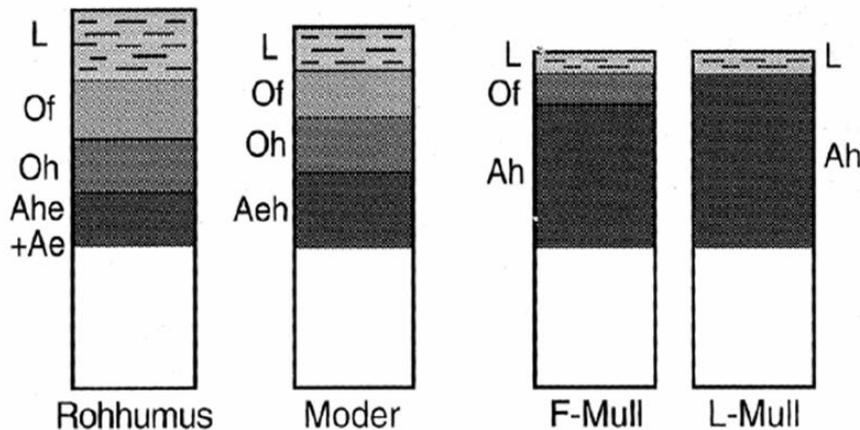


Abbildung 2- 3: Schematische Darstellung der Humusformen

L-Horizont

Oberirdische Pflanzenreste (>90%) ohne quantitativ bedeutenden Anteil von Feinsubstanz (< 10%).

Ln- Index (n von „novus“): Oberirdische Pflanzenreste, die gegenüber dem Zustand beim Abfall von der lebenden Vegetation unverändert erscheinen. Es handelt sich beim Ln gewöhnlich um die Bestandesabfälle des letzten Herbstes

Lv- Index (v von „verändert“): Oberirdische Pflanzenreste ohne quantitativ bedeutenden Anteil an Feinsubstanz; die Pflanzenreste sind gegenüber dem Zustand beim Abfall von der lebenden Vegetation leicht erkennbar morphologisch verändert. Die Veränderungen sind Anzeichen beginnender Zersetzung.

F-Horizont

Oberirdische Pflanzenreste (39-90%) mit geringer bis mittlerer Menge an organischer Feinsubstanz (10-70%). Lebende Feinwurzeln, Skelettierung von Blättern, gut geformte Losungen von Bodentieren, Verpilzung sind typische Merkmale die oft auftreten.

Fr- Index (r von Pflanzen-„rest“; englisch: „residue“): Pflanzenreste herrschen vor und organische Feinsubstanz spielt mengenmässig und für die Gefügebildung eine wesentliche Rolle. Oft werden auch Blattpakete beobachtet.

Fm- Index (m von „mittel“): mittlerer Anteil von Feinsubstanz, mittlere Phase der Zersetzung. Oberirdische Pflanzenreste und organische Feinsubstanz in etwa gleichen Mengen. Die Pflanzenreste sind immer zerkleinert und Pakete von Blattresten treten kaum mehr auf.

H-Horizont

Organische Feinsubstanz (>70%) mit wenigen, sehr wenigen oder keinen oberirdischen Pflanzenresten (<30%). Mineralische Substanz fehlt oder ist bis zur Hälfte des Substanzvolumens vorhanden (entspricht also ca. 65 Gewichtsprozenten). C-Gehalt >20% Wenn oberirdische Pflanzenreste auftreten, sind sie vereinzelt in die organische Feinsubstanz eingebettet und spielen keine gefügebildende Rolle. Wurzelreste können dagegen in grossen Mengen vorhanden sein und sind in der Regel leicht von oberirdischen Pflanzenresten zu unterscheiden (stängelig, verzweigt, oft schwarz). Bei mächtigen H-Horizonten kann eine Subhorizontierung auftreten:

Hr-Index (r von Pflanzen-„rest“): Organische Feinsubstanz bestimmt das Gefüge. Oberirdische Pflanzenreste sind leicht zu erkennen.

Hf-Index (f von „Feinsubstanz“): Oberirdische Pflanzenreste sind im frischen Material höchstens bei genauerer Untersuchung zu erkennen. In getrockneten Proben fallen sie jedoch auf, da sie dann hell sind.

Ah-Horizont

Durch Humus deutlich gefärbter oberster Mineralbodenhorizont. Da dieser Horizont zum Mineralboden gehört, wurde er bei der Feldarbeit nicht weiter betrachtet. Ausnahme ist der Subhorizont Ahh (BABEL, 1970), weil er, im Vergleich zum restlichen Ah-Horizont, stark humos ist.

Ahh- Index (hh: „Verdoppelung des Index h“): Dieser Subhorizont ist deutlich vom darauf folgenden Teil des Ah zu unterscheiden.

2.3.3 Humusformen

Definition

Eine bestimmte Folge von Humushorizonten entspricht einer Humusform (RICHARD, 1978).

Die Horizonte L, F, H, Ah stellen im Abbauprozess der organischen Substanz bestimmte Phasen bzw. Zustände dar, die in der Natur je nach dem Bodentyp relativ stabil sein können und im Aufbau des Bodenprofils charakteristische Grössen repräsentieren. Je nach Bodentyp sind aber infolge unterschiedlicher Abbaugeschwindigkeit nicht alle vier Humushorizonte gleichzeitig vorhanden. Bestimmte Kombinationen von Humushorizonten entsprechen bestimmten biologischen Aktivitäten, die ihrerseits wiederum für bestimmte Bodentypen und Untertypen charakteristisch sind. Nicht nur die Streu beeinflusst die Humusformen und die Humuskörper. Das ist verständlich, wenn man bedenkt, dass die Streuarten sich in Streubestand und Gefüge weit weniger unterscheiden als die darunterliegenden Gesteine (SCHLICHTING, 1986).

Ein L-Horizont als Streuhorizont kann prinzipiell immer vorkommen. Ein F-Horizont allein tritt nicht auf, da ein Vermoderungshorizont ein instabiles Stadium darstellt, aus dem in kurzer Zeit ein H- oder Ah-Horizont entstehen müsste (RICHARD, 1978).

Grundsätzlich werden die Humusformgruppen Mull, Moder und Rohhumus unterschieden. Nach RICHARD 1978 können die einzelnen Humusformengruppen weiter aufteilen. Diese Unterteilung entspricht der Definition der Humusformen in der „Bodenkundlichen Kartieranleitung“ (SPONAGEL et al., 2005).

Mull

Im Mull (L- und Ah-Horizont) überwiegen die Bodenwühler insbesondere die Regenwürmer. Die Streuzersetzung geschieht vor allem im Ah-Horizont und verläuft rasch (LÜSCHER, 1991).

Eine Humusaufgabe fehlt bei der Humusform Mull völlig oder sie verschwindet unter sommergrünen Laubwäldern einige Monate nach dem Streufall (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Der Fermentationshorizont erscheint, wenn überhaupt vorhanden, nur in Ansätzen (LÜSCHER, 1991). Der schnelle Streuabbau ermöglicht, dass die an der organischen Bodensubstanz gebundenen Nährstoffe wieder den Pflanzen zur Verfügung stehen (WALTHERT et al., 2004). Mull bildet sich in Böden unter sehr günstigen Abbaubedingungen, also über nährstoffreichen und nicht zu starker Vernässung neigenden Gesteinen, bei leicht abbaubarer Streu, guter Nährstoffversorgung und schwach alkalisch bis schwach sauren Bedingungen, ausreichender Bodenwärme und guter Durchlüftung (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Die pH-Verhältnisse im Ah-Horizont sind schwach sauer bis neutral (LÜSCHER, 1991).

Typischer Mull (L-Mull) entsteht bei guter biologischer Bodenaktivität (vor allem Regenwürmer), rascher Streuumsetzung, wobei der L-Horizont während der Vegetationsperiode verschwindet (LÜSCHER, 1991). Der Typische Mull kommt in Mittellandverhältnissen hauptsächlich in Laubwaldgesellschaften mit einer ausgeprägten Mischstreu aus der Baum-, Strauch- und Krautschicht vor; in den Voralpen kommen häufig meist leicht vernässte Varianten vor, in den Alpen findet man typischen Mull vor allem an Standorten mit kalkhaltigem Ausgangsmaterial, zum Teil auch beeinflusst durch eine ausgeprägte Krautschicht (Hochstauden). In tieferen Lagen und auf nichtsilikatischem Ausgangsmaterial kommt der typische Mull im Tessin vor (LÜSCHER, 1991). Aufgrund des Vorhandenseins von Kalk bis an die Bodenoberfläche kann in speziellen Fällen ein „**Kalkmull**“ ausgeschieden werden. Er ist morphologisch identisch mit dem L-Mull, doch weist der Ah Horizont Kalk auf.

Beim **Moderartigen Mull (F-Mull)** ist ein dünnerer F-Horizont ganzjährig zu beobachten (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Der Ah-Horizont ist oft etwas geringmächtiger entwickelt als beim typischen Mull. Farblich unterscheidet sich der moderartige Mull deutlich vom darunterliegenden Mineralerdehorizont. Im Mittelland kommt diese Humusform hauptsächlich in reinen Nadelholzbeständen vor, bei oft fehlender Krautschicht, in der Region Jura vor allem an nordexponierten und skelettreichen Lagen, wo der Kontakt der organischen Rückstände mit der mineralischen Feinerde diskontinuierlich ausfällt. In den Voralpen häufig in feinerdereichen, zum Teil vernässten Böden, mit Übergängen zu feuchten bis nassen Varianten. Im Bereich der Alpen ist der moderartige Mull auf klimatisch günstige

Standorte beschränkt, oft mit einseitigem Streueintrag. Im Tessin ist der Moderartige Mull in der Kastanienstufe weit verbreitet (LÜSCHER, 1991).



Abbildung 2- 4: Mull

Moder

Im Moder sind alle Auflagehorizonte vorhanden, jedoch in geringer Mächtigkeit (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Er bildet sich vor allem in krautarmen Laub- und Nadelwäldern mit relativ nährstoffarmen Böden unter kühlfeuchten Klimaverhältnissen (WALTHERT et al., 2004). Der Moder nimmt eine Zwischenstellung zwischen dem Rohhumus und dem Mull ein.

Beim **Mullartigen Moder** kann der Fermentationshorizont eine schichtige Lagerung aufweisen und der H-Horizont ist nur schwach ausgeprägt und gering mächtig mit unscharfem Übergang zum Ah-Horizont. Anzeichen einer beginnenden Auswaschung können auftreten. Im Mittelland kommt diese Humusform in trockenen Gebieten und in höheren Lagen (Jura, Voralpen, Alpen und Tessin) unter klimatisch ungünstigen Voraussetzungen vor (LÜSCHER, 1991). Aufgrund der Mächtigkeit des F- und H-Horizontes kann zwischen **feinhumusreichen** und **feinhumusarmen Moder** unterschieden werden. Die einzelnen Horizonte gehen stets unscharf ineinander über. Die Vernetzung der Pflanzenreste nimmt von oben nach unten zu. Die Horizonte des **Rohhumusartigen Moders** sind infolge fehlender tierischer Aktivität durch scharfe Horizontgrenzen getrennt und kommen hauptsächlich im Mittelland auf klimatisch extremen (oft Reliefbedingt) Standorten vor (LÜSCHER, 1991).



Abbildung 2- 5: Moder

Rohhumus

Diese Humusform ist durch eine mächtige Humusauflage gekennzeichnet. Es kommen nahezu keine wühlenden und bodenvermischenden Bodentiere vor; deshalb fehlt ein humoser A-Horizont. Rohhumus bildet sich insbesondere bei extrem nährstoffarmen und grobkörnigen Böden unter einer Vegetationsdecke, die schwer abbaubare und nährstoffarme Streu liefert, wie Heiden oder Koniferen (*Picea*, *Pinus*). Dichte, lichtarme Fichten- oder Rotbuchenforste ohne krautigen Unterwuchs begünstigen eine Rohhumusbildung ebenso wie ein kühlfeuchtes Klima (SCHEFFER, 2002). Der Rohhumus ist weit verbreitet im voralpinen Raum, hauptsächlich aber in den Alpen über silikatischem Ausgangsmaterial und unter einseitigem Streueintrag.



Abbildung 2- 6: Rohhumus

Im Bereich von Böden mit eingeschränkter Versickerung oder unter dem Einfluss von hohen Grund- oder Hangwasserständen entstehen Feucht- bzw. Hydrovarianten:

Anmoor

Ganzjährig hohe Grundwasserstände bewirken besonders bei nährstoffreichen Mineralböden Humusgehalte, die zwischen 15 und 30% liegen und als Aa-Horizonte bezeichnet werden. Fehlt solchen Böden eine Humusauflage, so liegt ein Anmoor vor. Im Anmoor dominieren Huminstoffe, die von Wassertieren und fakultativ anaeroben Mikroorganismen gebildet werden. Die humosen Horizonte sind zusammen 20-40 cm mächtig und reagieren neutral bis schwach sauer (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

Torf

Auf nährstoffarmen Standorten mit hohem Grundwasserstand und auf nährstoffreicheren Standorten, die längerfristig oder ganzjährig überflutet sind, tritt die Streuzersetzung durch Tiere stark zurück, sodass Humusauflagen mit über 30% organischer Substanz entstehen, die als Torfe bezeichnet werden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

2.3.4 Bedeutung der organischen Substanz und Humusformen in Wäldern

Die Struktur des Waldbodens spiegelt den aktuellen Zustand eines Waldökosystems wider und zeichnet somit den Grad an, wie Überlebensfunktionen des Ökosystems im Hinblick auf Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit erfüllt werden. Humusformen widerspiegeln den aktuellen Zustand des Ökosystems (BARITZ, 2003).

Das Nährstoffreservoir der organischen Substanz ist für das Pflanzenwachstum auf ungedüngten Böden von entscheidender Bedeutung. Nährstoffe werden gebunden und später langsam und nachhaltig wieder freigesetzt. In den letzten Jahren wurden zunehmend die wichtigen Regelungsfunktionen der organischen Bodensubstanz in der Umwelt erkannt. So sind die mikrobiell gesteuerten Prozesse der Umsetzung organischer Substanz eng mit der Bindung oder Freisetzung von klimarelevanten Spurengasen wie CH_4 , CO , H_2 , N_2O und NO verknüpft (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Der von der Biomasse aufgenommene Kohlenstoff wird im Boden gespeichert und nach der Zersetzung wieder freigegeben. Betrachtet man aber den ganzen Lebenszyklus eines Waldes, dann ist er grundsätzlich Kohlendioxid-neutral (BUWAL, 2005). Abholzung oder Stürme können diese C-Senken aber sehr schnell zerstören. Entfällt die Biomasse, verschwindet die organische Auflage sehr schnell und der Kohlenstoff wird wieder in die Atmosphäre abgegeben (BUWAL, WSL, 2005).

3. Untersuchungsgebiet Schweiz

3.1 Produktionsregionen

Die Einteilung der Schweiz in die fünf Produktionsregionen Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite wird von den forstlichen Statistiken seit längerer Zeit verwendet und stellt die unterschiedlichen Produktionsbedingungen dar (Abbildung 3-1). Diese Einteilung macht für die Untersuchungen in dieser Arbeit Sinn, da sie die Geologie und zum Teil die Waldtypen mitberücksichtigt. Die Schweiz wird dominiert durch die geologische Dreiteilung in Alpen, Mittelland und Jura.

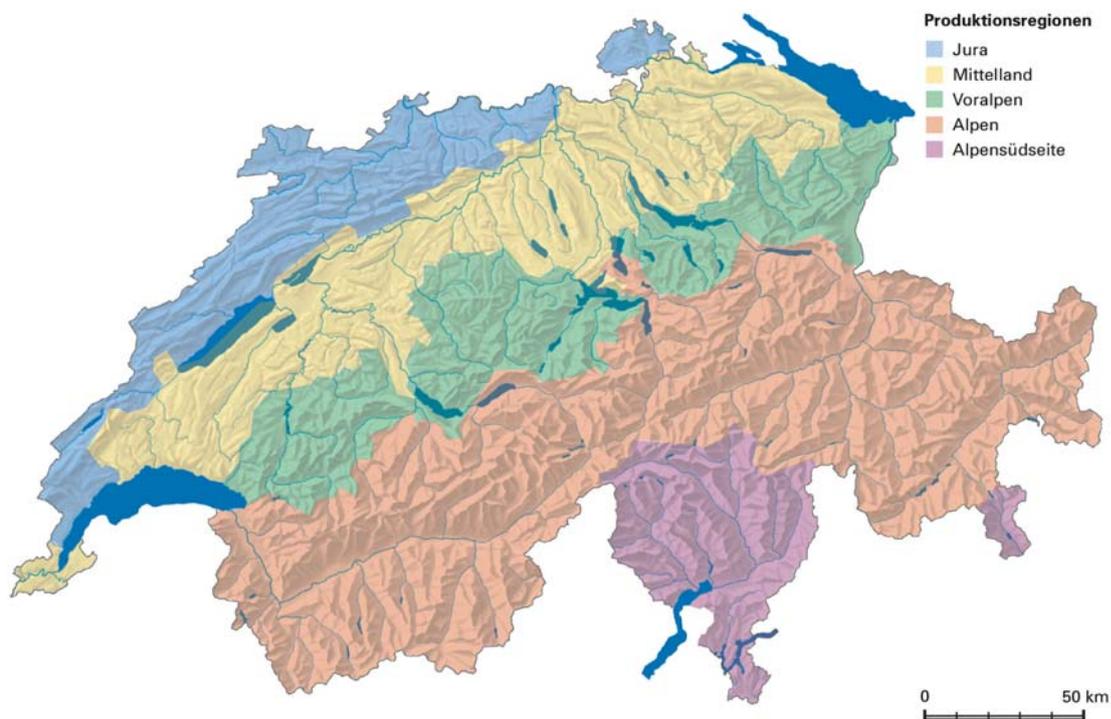


Abbildung 3- 1: Die fünf Produktionsregionen der Schweiz (Quelle: Walther et al., 2004)

3.2 Wald

Die Schweiz ist zu rund 30% bewaldet, wobei die Bewaldung im Mittelland mit 24% am geringsten und auf der Alpensüdseite mit 48,3% am grössten ist (Tabelle 3-1). Da die Schweiz ein gebirgiges Land ist, liegen 53% der Waldfläche oberhalb von 1000 mü.M. Unterdurchschnittlich sind die landwirtschaftlichen Gunstlagen unterhalb von 600 müM und oberhalb von 1800 müM, wo ein grosser Teil der Fläche nicht waldfähig ist. Skelettreiche und flachgründige Standorte prägen den Schweizer Wald; die Waldflächenzunahme in den letzten 10 Jahren findet vor allem auf diesen Böden statt (BRASSEL et al., 1999).

Tabelle 3- 1: Waldfläche nach Höhenlage und Bewaldungsprozent in 1000 ha pro Produktionsregion Auswertungseinheit: Gesamtwald; Bewaldung in % der Gesamtfläche Zustand 1993/95 (Quelle LFI)

m ü. M.	Jura	Mittelland	Voralpen	Alpen	Alpensüdseite	Schweiz
	1000ha(±%)	1000 ha (±%)	1000 ha(±%)	1000 ha(±%)	1000 ha(±%)	1000 ha (±%)
über 1800	-	-	1.1(15)	86.4(2)	19.4(4)	106.9(2)
1401 - 1800	3 (9)	1.2(15)	37.1(3)	152.5(1)	47.7(2)	241.4(1)
1001 - 1400	59.9(2)	4.3(8)	91(2)	108.7(2)	44.9(2)	308.9(1)
601 – 1000	81.9(2)	89.2(2)	81.6(2)	58.2(2)	38.8(2)	349.8(1)
bis 600	55.9(2)	132.2(1)	9.5(5)	9.2(5)	20.3(3)	227(1)
Gesamt	200.7(1)	226.9(1)	220.3(1)	415(1)	171.2(1)	1234(0)
Bewald. (%)	40.7(0.3)	24.1(0.2)	33.3(0.3)	24.7(0.2)	48.3(0.4)	29.9(0.1)

In der Schweiz sind rund zwei Drittel der Waldfläche von Nadelholz dominiert. Die Alpensüdseite ist die einzige Region, in der laubholzdominierte Wälder flächenmässig vorherrschen. Die Alpen und Voralpen sind die beiden nadelholzreichsten Regionen (80% der Waldfläche). Das Mittelland und der Jura nehmen eine Zwischenstellung ein. Hier sind rund 60% der Waldfläche von Nadelholz beherrscht. Die Dominanz der Nadelwälder ergibt sich in den Alpen und Voralpen vor allem aus den klimatischen Bedingungen, teilweise aber auch wegen der edaphischen Böden. Im Mittelland und Jura ist die Baumartenzusammensetzung vieler Wälder durch die Bewirtschaftung stark beeinflusst und entspricht nicht den natürlichen Gegebenheiten. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden in der Vergangenheit vor allem Nadelhölzer und insbesondere die Fichte gefördert. Daher sind heute in diesen Regionen viele Wälder zu nadelholzreich im Vergleich zum Naturwald. Auf der Alpensüdseite ist der hohe Laubholzanteil vor allem klimatisch bedingt (WALTHERT et al, 2004).

3.3 Klima

Das Klima in der Schweiz ist stark geprägt durch die Bergmassive der Alpen und des Juras. Diese beeinflussen das Klima regional und lokal. Viele Waldstandorte sind aufgrund der grossen mittleren Höhe eher kühl und feucht. Auch tiefere Lagen sind im Vergleich zu anderen Gebieten der gemässigten Breiten relativ feucht. Im Weiteren treten wegen der Kleinräumigkeit und der komplexen Orographie der Schweiz oft vom regionalen Durchschnitt abweichende lokale Mikroklimata auf (WALTHERT et al. 2004).

3.3.1 Temperatur

Aufgrund ihrer Lage in Mitteleuropa nimmt die Schweiz in klimatischer Hinsicht eine Mittelstellung zwischen den ozeanisch beeinflussten Gebieten im Westen und den kontinentalen Bereichen im Osten Europas ein. Die Durchschnittstemperaturen bringen

diesen Übergangscharakter zum Ausdruck. Die Schweiz liegt zu weit vom Atlantik entfernt, um noch von der ausgleichenden Wirkung des Meeres dominiert zu werden. Doch ist das Land noch keineswegs den Härten eines kontinentalen Klimas mit langen, strengen Wintern und heissen Sommern unterworfen (ODERMATT et al., 2004).

Die vertikalen Temperaturunterschiede sind im Verhältnis zu den horizontalen Differenzen auf gleicher Höhe so bedeutend, dass letztere vernachlässigt werden können. Generell nimmt die mittlere Jahrestemperatur mit je 100m Höhengzunahme um durchschnittlich 0,5°C ab. Dies führt zu einer Verlängerung der Winter in höheren Lagen. Allerdings ist besonders im Gebirge die Hangexposition sehr wichtig, so dass es zu starken lokalen Abweichungen kommen kann. Insbesondere in west-östlich verlaufenden Tälern haben die nach Süden exponierten Hänge ein wesentlich vorteilhafteres Klima als die Nordhänge. Eine andere wichtige Beeinflussung ergibt sich dadurch, dass sich im Winter bei Hochdrucklagen in den Niederungen des Mittellandes häufig Kaltluftseen bilden an deren Obergrenze eine Hochnebeldecke entsteht. Diese verhindert den Wärmeaustausch und führt zu einer Temperaturumkehr oder Inversion: Die Temperaturen über der Nebeldecke liegen tagsüber über diejenigen unter dem Nebel (WALTHERT et al., 2004).

3.3.2 Niederschlag

In der Niederschlagsverteilung spiegeln sich die Grundzüge des Reliefs (Höhenlage, Exposition und Hangneigung) wider. Regen bringen insbesondere die westlichen Winde, die feuchte maritime Luft vom Atlantik heranzuführen. Extrem viel Niederschlag finden wir deshalb in den westexponierten Hängen des Juras und der gesamten Nordabdachung der Alpen, da dort die zum Aufsteigen gezwungene Luft abkühlt, kondensiert und ausregnet. Im Mittelland ist die Luft schon ausgetrocknet, weshalb es dort vergleichsweise trocken ist (900-1000 mm/a). Diese Gebiete liegen im Regenschatten. Im inneralpinen Raum bilden verschiedene Bündner Täler, das Rhonetal und weitere südliche Walliser Täler eigentliche Trockeninseln, weil das umrahmende Gebirge den Niederschlag abfängt.

In der Voralpenregion erhöhen sich die Niederschläge bei gleicher Höhe über Meer mit zunehmender Nähe zum Gebirge (WALHERT et al., 2004).

Tessin und Südbünden weisen zwar eine hohe jährliche Niederschlagssumme auf, haben hingegen weniger Niederschlagstage als der schweizerische Durchschnitt. Die ergiebigen Niederschläge konzentrieren sich auf wenige Niederschlagstage, bei Föhnlage (ODERMATT et al., 2004).

3.4 Geologie

Die Schweiz wird dominiert durch die Dreiteilung in Alpen, Mittelland und Jura. Die Entstehung des Mittellandes ist mit der alpinen Gebirgsbildung verknüpft. Im Becken Mittelland hat sich bei der Faltung der Alpen, vor etwa 36 bis 5 Millionen Jahren im Tertiär, der Abtragungsschutt des entstehenden Gebirges gesammelt: die Molasse. In

einer späteren Phase der Alpenfaltung, vor etwa 5 Millionen Jahren, wirkten letzte Schübe auf den westlichen und nördlichen Rand des Molassegebiets. Es entstand der Jura. Das französische Zentralmassiv, die Vogesen sowie der Schwarzwald bildeten einen Widerstand und drängten die Falten gegen das Pariser Becken hin. Nicht alle Gebiete wurden zur gleichen Zeit und mit gleicher Kraft von der Faltung erfasst. Deshalb kann das Juragebirge unterteilt werden in Faltenjura im Westen und Tafeljura im Nordosten. Nach dem Tertiär verschlechterte sich das Klima, was im Quartär zu Eiszeiten führte. Die Gletscher rückten von den Alpen bis zum Mittelland und auf die Alpensüdseite vor. In den Kaltzeiten stiessen die Gletscher vor und zogen sich in der Warmzeit für einige Zeit wieder in die Alpen zurück. Diese Kalt- und Warmzeiten, die sich in einem Rhythmus von mehreren zehntausend Jahren abwechselten, nennt man auch Eis- und Zwischeneiszeiten. In dieser Zeit formten sich die Täler und die heutige Landschaft. Im Mittelland wurde durch Moränen, See- und Flussablagerungen eine kleinräumige Landschaft gebildet (KÖNIG, 1967; LABHART, 1998; WALTHERT et al. 2004).

3.4.1 Jura

Der Tafel- und der Faltenjura sind die am weitesten verbreiteten Einheiten in der Region Jura und bestehen aus leicht verwitterbaren, karbonathaltigen Gesteinen. In einigen Gebieten, zum Beispiel im Grenzbereich zur Region Mittelland, in der Region Basel und in den Tälern des Faltenjuras befinden sich grössere tertiäre Molasseablagerungen.

3.4.2 Mittelland

Die Molasse ist die wichtigste Einheit im Mittelland. Sie bildet auf rund 95% des Gebietes den Untergrund und ist vielmals von quartären Ablagerungen (Moränen, Terrassen- und Deckenschotter) bedeckt.

3.4.3 Voralpen

In den Voralpen nimmt die Molasse 40% der Oberfläche ein. Im westlichen Teil haben ausserdem die Voralpen (meist karbonathaltig) und verschiedene Flyschserien eine grössere Verbreitung. Im östlichen und mittleren Teil sind neben der Molasse vor allem die helvetischen Decken mit ihren mächtigen Kalksteinformationen (Schrattenfluh, Pilatus, Alpstein u.a.) aber auch penninische Klippen (meist karbonathaltiges Gestein) und verschiedene Flyschserien von Bedeutung. Topographisch flache oder nur wenig geneigte Gebiete sind in der gesamten Region meistens von eiszeitlichen Ablagerungen bedeckt (WALTHERT et al.; 2004, LABHART 1998; BUWAL, 2002).

3.4.4 Alpen

Die Region Alpen ist sehr heterogen. An der Grenze zu den Voralpen nehmen die helvetischen Decken (überwiegend karbonathaltige Sedimentgesteine) einen schmalen lang gezogenen Raum ein. Angrenzend ans Helvetikum liegt das Zentralmassiv (Aar- und Gotthardmassiv) im zentralen Bereich der Region. In den Kantonen Wallis und Graubünden liegen die penninischen und ostalpinen Decken. In diesem Gebiet dominieren flächenmässig Gneise, Schiefer und Phyllite – kristalline Gesteine. Es sind auch Zonen mit Sedimentgesteinen eingebettet, die während der Alpenfaltung nur wenig oder gar nicht überprägt wurden, wie zum Beispiel die ausgedehnte Bündnerschieferzone und die aus Kalken und Dolomiten aufgebauten Sedimentdecken des Ostalpins. Auch in der Region Alpen sind die flacheren Gebiete mit eiszeitlichen Ablagerungen bedeckt.

3.4.5 Alpensüdseite

In der Region Alpensüdseite biegen die Südenden der penninischen und der ostalpinen Decken unvermittelt von flacher in steiler Lagerung um. Die Grenze dieses Überganges wird Insubrische Linie bezeichnet (LABHART, 1998). Im nördlichen Teil liegt das durch mächtige Gneisvorkommen charakterisierte Penninikum, das im Verlauf der Alpenfaltung stark metamorph geprägt wurde. Das Alpengebiet südlich der insubrischen Linie wird als Südalpen bezeichnet. Sie sind im Kanton Tessin überwiegend aus kristallinem Gestein aufgebaut, wurden jedoch nicht metamorph geprägt. Im südlichen Teil des Tessins sind mesozoische Sedimente anstehend, welche häufig aus karbonathaltigem Gestein bestehen. Das Puschlav, das ebenfalls zur Region Alpensüdseite gehört, wird durch Sedimente und Kristallin des Ostalpins aufgebaut.

3.5 Bodentypen

Die Entstehung der Böden ist vor allem auf eine seit dem Ausklingen der letzten Eiszeit einsetzende und bis heute andauernde Vernetzung von physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen zurückzuführen. Neben der Gesteinsbeschaffenheit und den Grundwasserverhältnissen spielen dabei vor allem auch Klima, Relief und biologische Faktoren eine entscheidende Rolle. Während auf silikatreichem Untergrund (Granite, Gneise) vor allem saure Böden entstehen, führt ein kalkreicher Fels eher zu basischen Böden. Die ertragreichsten Böden bildeten sich auf den eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Gletscher-, Fluss- und Seeablagerungen (BAFU, 2002).

Das Bodenklassifikationssystem der Schweiz ist eng auf die Landwirtschaft ausgerichtet. Es werden vier Hierarchiestufen unterschieden: In der ersten Stufe (Klasse) geht es um den Wasserhaushalt, in der zweiten Stufe (Ordnung) um die

Zusammensetzung der festen Bodensubstanz, in der 3. Stufe (Verband) um die chemisch-mineralogischen Komponenten und in der vierten Stufe (Typ) schliesslich um die kennzeichnenden Perkolate (also um Süsswasserkomponenten) (FITZE, 1998).

In der Region Jura finden wir auf karbonatreichen Gesteinen verbreitet alkalische oder nur oberflächlich saure, wenig entwickelte Bodentypen wie beispielsweise Rendzinen oder Kalkbraunerden. Die genetische Entwicklung dieser Böden ist insbesondere durch das Vorhandensein von Kalk gehemmt. Auf Mischgesteinen mit erhöhtem Anteil an kristallinen Komponenten wie beispielsweise Moräne, Löss oder Deckenschotter kommen saure und weiter entwickelte Bodentypen wie Braunerde oder Parabraunerde vor.

Im Mittelland ist das Ausgangsgestein überall karbonathaltig. Die Parabraunerde ist der häufigste Bodentyp, gefolgt von der Braunerde. Weiter kommen im Mittelland die Bodentypen Gley, Stagnogley und Pararendzina. Die meisten Böden sind bis in den Unterboden relativ skelettarm.

In den Voralpen findet sich eine breitere Palette verschiedener Bodentypen vom Rohboden bis zum Eisen-Humuspodsol. Da bei den meisten Profilorten karbonathaltiges Ausgangsgestein angenommen wird, können analog der Region Mittelland viele Böden der Pararendzina-Parabraunerde-(Pseudogley-) Gesellschaft zugeordnet werden. Allerdings spielen die Gleye eine viel grössere Rolle als in der Region Mittelland. Die Gleye können nicht der oben genannten Gesellschaft zugeordnet werden, da bei ihnen durch hoch anstehendes Grund- oder Hangwasser die Tiefensickerung von Wasser und Stoffen behindert wird. In der Region Voralpen sind viele Rohböden hydromorph geprägt.

Die Regionen Alpen und Alpensüdseite sind geologisch und petrographisch so vielfältig, dass man aufgrund des Ausgangsgesteins mit den unterschiedlichsten Bodenbildungen rechnen muss. Zudem wird der Einfluss des Ausgangsgesteins in diesen Regionen durch kleinräumig stark variierende Relief- und Klimaverhältnisse überlagert, so dass keine verallgemeinernden Aussagen gemacht werden kann. Häufige Bodentypen in der Region Alpen: Braunerde, Pararendzina und Eisen-Humuspodsol. Typische Bodentypen in der Region Alpensüdseite: Braunerde, Kryptopodsol und podsoliierte Braunerde.

4. Methoden

4.1 Überblick der Methodenanwendung

In einem ersten Teil dieser Arbeit wurde eine Feldarbeit durchgeführt, in der an 30 ausgewählten Standorten die organische Auflage untersucht wurde. Es wurden Proben entnommen, die Mächtigkeit gemessen, die Dichte berechnet und im Labor den Kohlenstoffvorrat bestimmt. Diese genaue Untersuchung ermöglichte eine Extrapolation auf Standorte der Datenbank, in der nur die Mächtigkeit untersucht wurde. Die Vervollständigung der Datenbank und die statistische Analyse bilden den zweiten Teil der Untersuchung.

4.2 Feldarbeit

4.2.2 Standortsuche

Die Auswahl der Standorte basiert im Wesentlichen auf den von der WSL im Rahmen der Waldzustandsinventur 1993 erhobenen Bodenprofilen, aus denen der C-Vorrat in Schweizer Waldböden berechnet wurde. Vor kurzem sind diese Profile in dem an der WSL erschienenen Buch „Waldböden der Schweiz“ (Band 1-3) veröffentlicht worden. Insgesamt werden darin für die Regionen Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite 95 verschiedenen Waldböden beschrieben (WALTHERT et al., 2004). Pro Region werden 15 bis 20 Bodenprofile dokumentiert. Bei den Standorten aus dem Buch handelt es sich um ausführlich beschriebene Bodenprofile – die organische Auflage wurde jedoch selten oder ungenau aufgenommen. In dieser Arbeit wurden 30 Standorte (24 aus der Publikation „Waldböden der Schweiz“) ausgesucht und beprobt. Dank den vorhandenen Daten musste an diesen Standorten lediglich die Auflage untersucht werden, da andere Daten (Morphologie, Chemie, Relief, Vegetation) schon bei früheren Feldaufnahmen dokumentiert wurden. Für die Felduntersuchung wurden 8 Standorte aus der Region Alpen bestimmt, 12 Standorte aus der Region Mittelland, 4 Standorte aus der Region Jura sowie 6 aus der Region Voralpen.

4.2.3 Probenentnahme

Auf Flächen von je 50 x 50 Meter wurden je 8 Stichproben entnommen. Die einzelnen Punkte wurden zufällig gewählt, wobei Wegrand, Pfad und gestörte Flächen gemieden wurden. Die Einzelprobe wurde mit einem 20 x 20 cm Stahlrahmen ausgestochen, und anschliessend die einzelnen Horizonte (L, F, H und Ahh) getrennt entnommen. Das gesamte Material wurde gesammelt – auch Äste und Wurzeln –, in Plastiksäcke aufgefüllt und nummeriert (Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Bilder der Probenahme. Links: Rahmen (20x20cm) wurde in den Boden gedrückt und einzelne Horizonte wurden getrennt aufgenommen. Rechts: Jeder Horizont wurde separat in einem Plastiksack gefüllt und nummeriert.

Bei jedem Stichpunkt wurden die Mächtigkeiten senkrecht zur Bodenoberfläche gemessen, wobei nicht nur das Total gemessen wurde, sondern auch die einzelnen Horizontmächtigkeiten. Zusätzlich wurde durch das Gebiet ein Transekt gezogen, entlang dem in zwei Richtungen (senkrecht zueinander) je 10 Auflagemächtigkeiten erfasst und somit zusätzlich Daten zu jedem einzelnen Standort gewonnen wurden (Abbildung 4-2).



Abbildung 4-2: Messung der Auflagemächtigkeit

4.3 Probenaufbereitung

Die Proben wurden in Aluschalen bei einer Temperatur von 60°C während 24 Stunden in einem Trockenschrank getrocknet. Danach wurden sie gewogen. Mit den Mächtigkeiten konnte das Volumen bestimmt werden, da Breite und Länge durch den 20x20 cm Stahlrahmen vorbestimmt waren. Mit dem Gewicht und dem Volumen konnte schlussendlich die Dichte bestimmt werden, die die Grundlage für die Kohlenstoffvorratsberechnung ist. Nach dem Trocken und Wägen wurden die Proben zerkleinert und mit einer Kaffeemühle und einer Scheibenschwingmühle (Typ: Fritsch, Pulverisette 9) fein gemahlen.

4.4 Laboranalysen

Da es sich insgesamt um über 400 Proben handelt, wurden Mischproben gemacht: Für jede Untersuchungsfläche wurde pro Horizont eine Probe gemischt. Zwei Flächen wurden vollständig gemessen. Die Proben wurden eingewogen und im Zentrallabor einer C-/N-Analyse unterzogen.

4.5 Berechnungen

Aus der Mächtigkeiten der Auflagenhorizonte konnte das Volumen bestimmt werden, da Breite und Länge durch den 20 x 20 cm Rahmen vorbestimmt war. Die Dichte ergibt sich als Quotient des Gewichts und des Volumens, die Masse als Produkt der Dichte und des Volumens. Der C-Vorrat aus der Masse und den C-Wert in Prozent der Laboranalyse.

$$\text{Dichte (g/cm}^3\text{)} = \text{Masse/Volumen}$$

$$\text{Volumen (cm}^3\text{)} = 20 \times 20 \times \text{Mächtigkeit}$$

$$\text{Masse (g)} = \text{Dichte (g/cm}^3\text{)} \times \text{Volumen (cm}^3\text{)}$$

$$\text{Vorrat (kg/m}^2\text{)} = (\text{Masse(g)} \times 25) / 1000$$

$$\text{Kohlenstoffvorräte (kg C/m}^2\text{)} = \text{Vorrat (kg/m}^2\text{)} \times \text{C-Wert (\%)}$$

4.2 WSL-Datenbank

An der WSL wurde in den letzten Jahren eine Bodendatenbank erstellt, in der alle bisher untersuchten Bodenprofile der WSL abgelegt wurden. Zu jedem Bodenprofil (insgesamt 1024) sind physikalische, chemische und morphologische Daten vorhanden, die im Rahmen verschiedener Projekte gesammelt und in einer Datenbank zusammengestellt wurden.

4.2.1 Datenverarbeitung

Zu jedem Bodenprofil waren die Horizont-Mächtigkeiten aufgeführt, in vielen Fällen fehlten jedoch Angaben zur organischen Auflage. Aus Aufnahmeprotokollen, oder in einigen Fällen anhand von Fotos, ergänzte ich die fehlenden Daten.

Aus den in der Feldarbeit bestimmten Dichten konnten zusammen mit den Mächtigkeiten aus der Datenbank die Masse und somit die Vorräte bestimmt werden.

Die C-Konzentrationen der organischen Auflage lagen von 400 Bodenprofilen vor. Aus diesen und den Messungen der Felderhebung errechnete ich eine durchschnittliche C-Konzentration für die verschiedenen Auflagehorizonte. Allerdings existierten nicht für alle Horizonte gleich viele Daten (Tabelle 4-1). Zum Beispiel sind für den Waldtyp 2 (Mischwald) sehr wenige Daten für die Horizonte F, H und Ahh vorhanden – und keine Werte für den Horizont L. Die fehlenden Daten wurden durch die Mittelwerte der jeweiligen Horizonte in den Waldtypen 1 und 3 bestimmt.

Tabelle 4-1: Mittel der C-Werte (in Prozent) in den einzelnen Horizonten unterteilt nach Höhen (</> 1000mü.M.) und Waldtyp (1=Laubwald; 2=Mischwald; 3=Nadelwald)

L	N (Anzahl)	Mittelwert (%)	Median (%)	Stabw	Min	Max
1 (<1000)	57	40.87	42.72	5.87	22.52	48.81
1 (>1000)	6	44.85	45.05	1.37	43.23	46.86
2 (<1000)	0		43			
2 (>1000)	0		45			
3 (<1000)	9	43.58	43.31	3.03	40.00	48.81
3 (>1000)	38	44.58	45.46	3.56	37.41	50.62
F						
1 (<1000)	50	37.40	37.68	4.72	24.42	46.19
1 (>1000)	7	32.83	34.97	8.02	21.90	42.84
2 (<1000)	0		35			
2 (>1000)	2	33.79	37	2.00	32.37	35.20
3 (<1000)	9	33.52	31.80	7.82	23.94	46.19
3 (>1000)	53	40.25	42.34	7.22	21.49	48.52
H						
1 (<1000)	16	33.61	30.34	6.19	24.28	44.18
1 (>1000)	4	33.18	34.51	7.19	24.02	39.67
2 (<1000)	1	41.28	31(41.28)		41.28	41.28
2 (>1000)	3	27.23	34(23.82)	13.26	16.02	41.87
3 (<1000)	11	33.87	33.40	7.32	19.90	44.18
3 (>1000)	75	35.35	36.04	7.61	7.59	47.30
Ahh						
1 (<1000)	54	20.35	18.92	8.26	7.27	38.91
1 (>1000)	9	20.11	20.09	9.52	5.28	36.79
2 (<1000)	3	12.67	17(11.70)	2.76	10.53	15.79
2 (>1000)	7	16.40	19(14.83)	5.58	10.45	23.95
3 (<1000)	8	17.19	14.90	10.05	7.65	38.91
3 (>1000)	57	18.27	17.60	7.60	4.01	37.50

Nach Definition (Vgl. Kapitel 2.3.2) gehören nur Horizonte zu der Humusaufgabe, die über 20% Kohlenstoff besitzen. In den Daten aus der Datenbank besitzen einige Ahh-Horizonte C-Konzentrationen von unter 10%. Diese Horizonte müssten daher zum Mineralboden gezählt werden. Um allerdings die C-Vorräte in der Auflage vollständig zu erfassen, wurden sie bei der Mittelwertberechnung belassen, da ich annehme, dass auch bei der Felddaufnahme einige Horizonte fälschlicherweise als Ahh bezeichnet wurden.

Um Ausreisser weniger zu gewichten, wurde für die Berechnungen ein Median bestimmt und die Kohlenstoffvorräte berechnet. Schlussendlich war es möglich von 870 Standorten deren Kohlenstoffvorrat (t/ha), Mächtigkeit (cm), Streuvorrat (kg/m²) und Masse (g) für jeden einzelnen Horizont zu bestimmen (Abbildung 4-3).

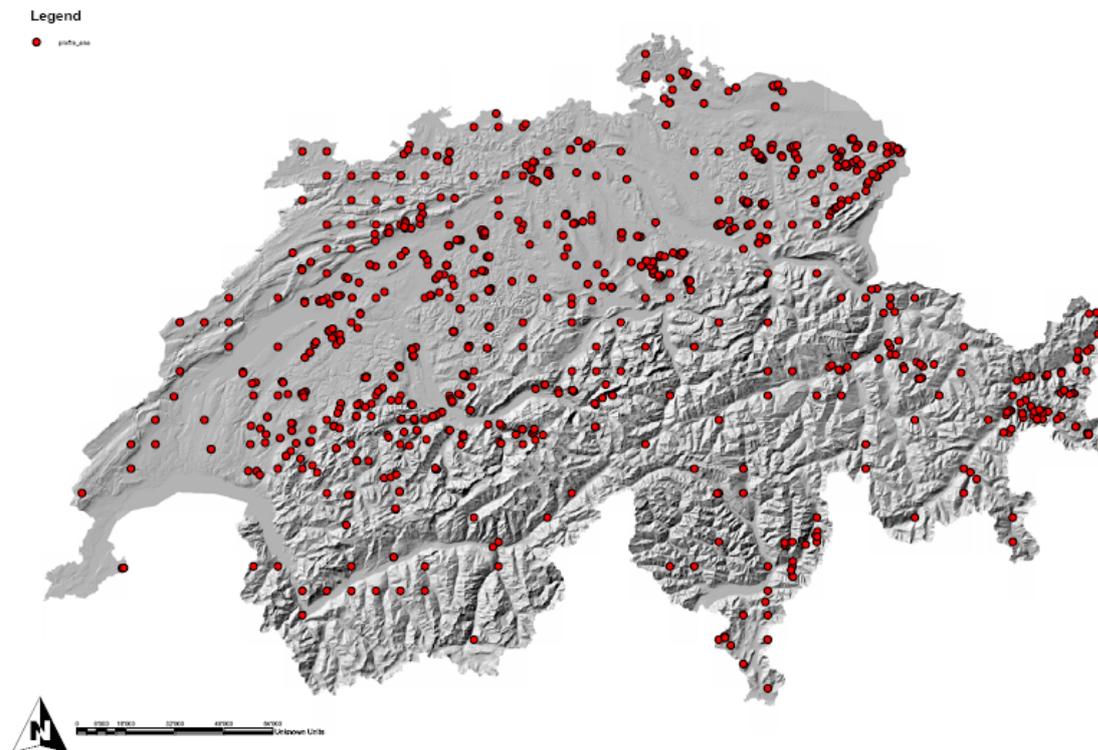


Abbildung 4-3: Standorte aus WSL-Datenbank

5.7.1 Multiple Regressionsanalyse

Mit Hilfe einer multiplen Regression wurde eine Datenanalyse der aus der Datenbank entnommenen Daten durchgeführt. Ziel war es, herauszufinden, welche Parameter die Kohlenstoffspeicherung in den Wäldern am stärksten beeinflussen. Die Regressionsanalyse ist ein statistisches Verfahren zur Analyse von Daten, bei dem statistische Abhängigkeiten durch so genannte Regressionsfunktionen beschrieben werden. Dazu wird eine metrische Variable y betrachtet, die von einer oder mehreren metrischen unabhängigen Variablen abhängt. Dabei werden die Variable y Zielvariable

und die Variable x erklärende Variable genannt. Versucht man die Zielvariable mit einer erklärenden Variable zu beschreiben, spricht man von einer linearen Regression. Werden mehrere Variablen benötigt, um die Zielvariable zu erklären, wird von einer multiplen linearen Regression gesprochen (SACHS, 1984). Das Modell der linearen Regression beschreibt eine Gerade mit der Formel:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

bestimmt durch die beiden Größen β_0 , den Achsenabschnitt, und β_1 , die Steigung der Geraden.

Für die multiple lineare Regression wird die Formel verallgemeinert zu:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_m x_m + \dots$$

Die Parameter sind die so genannten Koeffizienten $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_m$.

Die multiple Regressionsanalyse in dieser Arbeit wurde mit dem Statistik-Programm "R" durchgeführt.

Hilfsvariable für Wald

Im Gegensatz zu den anderen metrischen Variablen handelt es sich bei der Variable Waldtyp um kategoriale Werte. Die Werte 1 bis 3 bedeuten 1=Laubwald, 2=Mischwald und 3=Nadelwald. Sie sind nominal skaliert. Die Parameterwerte lassen sich durch eine multiple Regression zwar bestimmen, die Interpretation des erreichten Modells ist jedoch sehr sinnvoll (STAHEL, 2000; DORIGO, 2003).

Um das Merkmal Waldtyp in die Analyse aufzunehmen, wurde sie in drei Hilfsvariablen aufgespalten: W1, W2 und W3. Die Hilfsvariablen nennt man *Dummy-Variablen* (DORIGO, 2003).

W1=1, falls Waldtyp=2 ist; andernfalls wird W1 der Wert 0 zugeordnet.

W2=1, falls Waldtyp=3 ist; andernfalls wird W2 der Wert 0 zugeordnet.

W3=1, falls Waldtyp=1 ist; andernfalls wird W3 der Wert 0 zugeordnet.

Man benötigt von diesen drei Hilfsvariablen aber nur zwei, da sich der Wert der dritten Variablen aus den Werten der anderen beiden ergibt. W1 und W2.

4.2.2 Scatterplotmatrix

Die Scatterplotmatrix zeigt die Korrelationen zwischen den untersuchten Variablen: *Höhe, Waldtyp, Neigung, Exposition, Wärme, Kontinentalitätsindex, Gradtage, Niederschlag, Frosttage, pH-Wert* und *C-Vorrat*, wobei *Höhe, Waldtyp, Neigung,*

Exposition, Wärme, Kontinentalitätsindex, Gradtage, Niederschlag, Frosttage und *pH-Wert* die erklärenden Variablen sind und *C-Vorrat* die Zielvariable ist. Zusätzlich wird zu jeder Variable ein Histogramm angegeben, um die Verteilung der Daten zu sehen. Da die Zielvariable Kohlenstoffvorrat nicht normal verteilt ist, wird der natürliche Logarithmus daraus genommen, um die Regression zu berechnen.

4.2.3 Statistische Auswertung

Mit Hilfe des Statistik-Programms R wird eine multiple Regression durchgeführt. Es werden dabei drei mögliche Modelle getestet, die die Kohlenstoffspeicherung erklären können. Am Schluss werden die drei Modelle anhand einer Varianzanalyse (ANOVA) miteinander verglichen, um zu sehen, mit welchem Modell weiter gerechnet wird.

Die Grösse *Multiple R-Squared* oder R^2 ist das Quadrat der so genannten multiplen Korrelation zwischen Beobachtungen und den beobachteten Werten. Diese quadrierte multiple Korrelation wird Bestimmtheitsmass genannt, da sie den erklärenden Anteil der Streuung der Y-Werte misst. Je näher R^2 bei eins ist, desto grösser ist der Anteil der durch das Modell erklärten Streuung der Zielgrösse. Die Werte in Spalte *Pr(>t)* beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass der Einfluss eines Parameters auf die Zielvariable durch Zufall zustande kommt.

Mit Hilfe eines *Tukey-Anscombe Plots* werden die Residuen der Modelle analysiert, um die Modellannahmen zu überprüfen. Dazu werden die Residuen des Modells gegen die berechnete Kohlenstoffvorräte aufgetragen. Im Tukey-Anscombe Plot sollte keine erkennbare Struktur in den Residuen erkennbar sein. Zudem dürfen in allen vier Ecken möglichst keine Punkte auftauchen, da diese einen grossen Einfluss auf die Steigung der Regressionsgeraden durch die Punktwolke haben können.

Mit dem *Q-Q-Plot* und dem *T3plot* (GHOSH, 1996) wird überprüft, ob die Residuen normalverteilt sind.

4.3 Unabhängige Variablen

Die abiotischen und biotischen Faktoren (Relief, Geologie, Waldtyp, Klima, pH-Wert) beeinflussen die untersuchte (abhängige) Variable (Kohlenstoffvorrat).

4.3.1 Relief

Das Relief umfasst Höhenlage, Exposition und Neigung und modifiziert die Bodenbildung, indem es die Wirkung des Klimas, des Wassers, der Schwerkraft und letztlich auch von Organismen beeinflusst (WALTHERT et al., 2004).

Höhe

Mit der Höhenlage ändert sich in erster Linie das Klima. Mit ansteigender Höhe über Meer gehen abnehmende Temperaturen und zunehmende Niederschläge einher. In dieser Datensatz liegen die Höhen zwischen 305 und 2263 m ü.M. Abbildung 4-4 zeigt die Höhenverteilung der Standorte nach den Produktionsregionen Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite.

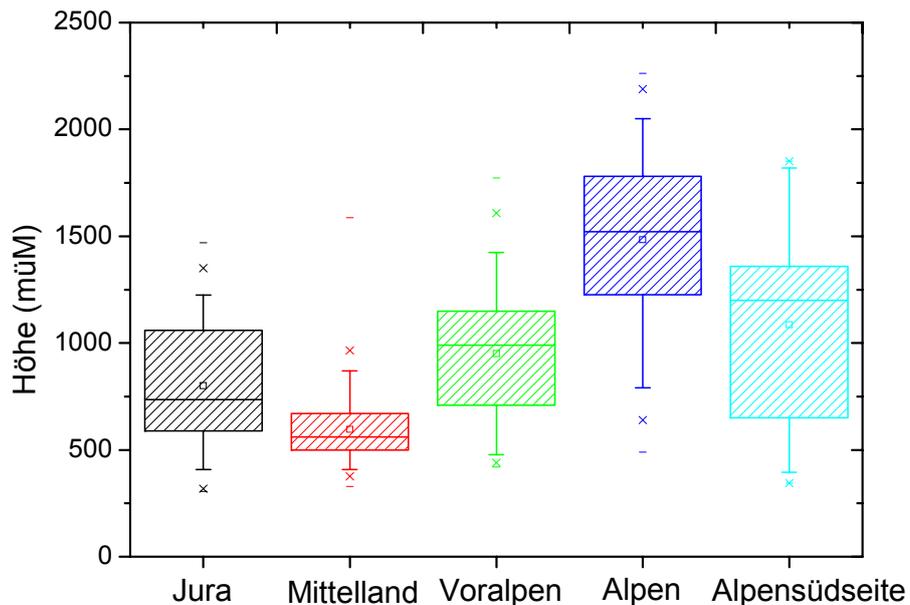


Abbildung 4-4: Boxplot der Höhe der fünf Produktionsregionen

Exposition und Neigung

Die Exposition und die Neigung haben einen grossen Einfluss auf die Bodenbildung, da sie das Mikroklima eines Standortes einstellen und unter Umständen mehr Einfluss haben als das Grossklima.

Die Exposition ist die Lage eines Hanges in Bezug auf die Einfallsrichtung der Sonnenstrahlen:

- Exposition N: Hang der nach Norden ausgerichtet ist („Schattseite“)
- Exposition E: Osthang, Hang mit viel Morgensonne
- Exposition S: Südhang („Sonnenseite“)
- Exposition W: Westhang, Hang mit viel Abendsonne (dafür aber in Mitteleuropa am meisten den Witterungseinflüssen ausgesetzt)

Die Variable Exposition wird bei der statistischen Berechnung in zwei Variablen unterteilt: Exposition N, was dem \cos der Exposition in Grad ($1^\circ - 360^\circ$) entspricht, und Exposition E, was dem \sin der Exposition entspricht. Es wird mit den Variablen Exposition E und Exposition N gerechnet.

Die Neigung wird als Prozent angegeben. Beinahe ein Drittel des Waldareals der Schweiz ist zu weniger als 20% geneigt, für weitere 28% beträgt die Neigung zwischen 20% und 40%. Etwa 58% des Waldareals der Schweiz sind also relativ flach bis schwach geneigt. Nur rund 5% des Waldareals befindet sich an stark geneigten (>80%) Lagen (BRASSEL und BRÄNDLI, 1999).

In den Regionen Jura und Mittelland liegt der Wald vorwiegend in schwach geneigtem Gelände; im Jura sind nur 3,2%, im Mittelland deren 0,5% steiler als 60%. Steile Waldflächen sind erwartungsgemäss in den Alpen häufig, wo 67% der Fläche eine Neigung von mehr als 40% aufweisen. Steile Waldflächen sind erwartungsgemäss in den Alpen häufig, wo 67% der Fläche eine Neigung von mehr als 40% aufweisen (Abbildung 4-5) (BRASSEL und BRÄNDLI, 1999).

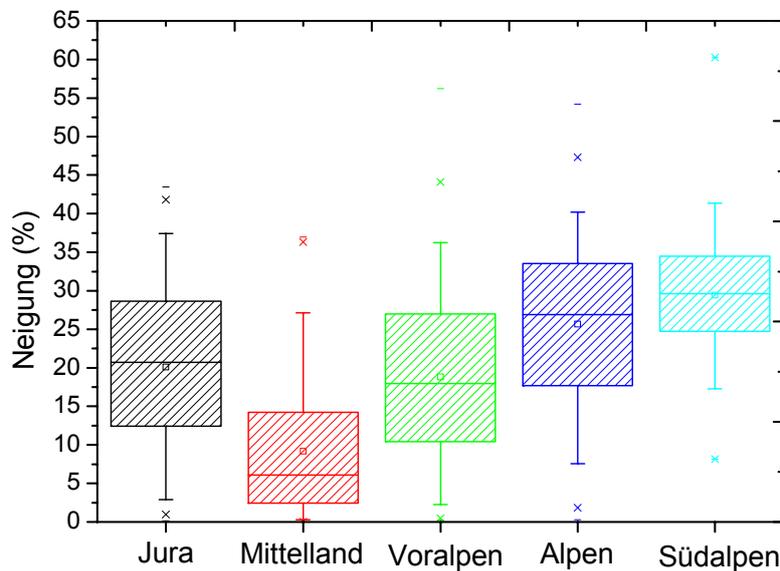


Abbildung 4-5: Boxplot der Neigung (in %) der fünf Produktionsregionen

4.3.2 Klima

Das Klima wird in dieser Arbeit mit den Variablen Wärme, Kontinentalitätsindex, Gradtage, Niederschlag und Frosttage beschrieben. Die Variable Wärme wurde aus entnommen. Die restlichen Variablen wurden aus dem Modell von Niklaus E. Zimmermann entnommen (ZIMMERMANN und KIENAST, 1999)

Wärme

Die Variable Wärme beinhaltet die Vegetationsperiode und die mittleren Sommer- und Jahrestemperaturen. Die Vegetationsperiode ist die Zeitdauer, während der pflanzliches Wachstum möglich ist, d.h. in der die Pflanzen blühen, fruchten und reifen. Die Werte der Variable „Wärme“ gehen von 1-19, wobei 1 und 2 null und sehr kalt sind und 19 sehr heiss bedeutet (Vgl. Tabelle 4-2). In meinem Datensatz kommen die Werte 1 bis 16 vor (Abbildung 4-6).

Tabelle 4-2: Codes der Wärme

Code	Stufe	Vegetationsperiode	Sommer-Mitteltemperatur	Jahres-Mitteltemperatur
1	(null)	(null)	(null)	(null)
2	sehr kalt	55-88	3.5-5.0	ñ0-1.0
3	kalt	80-100	5.0-6.0	1.0-2.0
4	ziemlich kalt	100-120	6.0-7.0	2.0-3.0
5	sehr rau	120-135	7.0-8.0	3.0-4.0
6	rau	135-150	8.0-9.0	4.0-5.0
7	ziemlich rau	150-165	9.0-10.0	5.0-6.0
8	sehr kühl	165-180	10.0-11.0	6.0-7.0
9	kühl	180-190	11.0-12.0	7.0-7.5
10	ziemlich kühl	190-200	12.0-13.0	7.5-8.0
11	ziemlich mild	200-205	13.0-13.5	8.0-8.5
12	mild	205-210	13.5-14.0	8.5-9.0
13	sehr mild	210-215	14.0-14.5	9.0-9.5
14	ziemlich warm	215-225	14.5-15.0	9.5-10.0
15	warm	225-235	15.0-15.5	10.0-10.5
16	sehr warm	235-245	15.5-16.0	10.5-11.0
17	ziemlich heiss	245-255	16.0-16.5	11.0-11.5
18	heiss	255-265	16.5-17.0	11.5-12.0
19	sehr heiss	>265	>17.0	>12.0

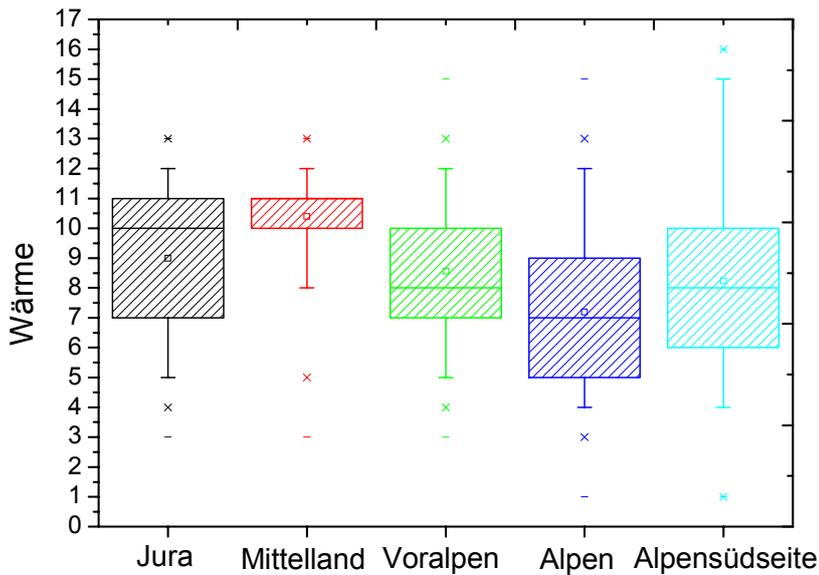


Abbildung 4-6: Boxplot der Wärme

Kontinentalitätsindex

Kontinentalitätsindex nach GAMS, modifiziert durch ZIMMERMANN und KIENAST (1999): Im Gegensatz zu GAMS (1932, 1935), welcher seinen Index mit der Meereshöhe und der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge bildete, wird GAMST aus der jährlichen mittleren Niederschlagsmenge und der mittleren Jahrestemperatur berechnet (ZIMMERMANN und KIENAST, 1999).

Gradtage

Summe der jährlichen Gradtage mit Basis 5.56 °C, welches die Minimaltemperatur für das Pflanzenwachstum im potentiell waldfähigen Gebiet der Schweiz darstellt. Die jährlichen Gradtage stellen die Summe der Tages-Mitteltemperaturen aller Tage dar, an denen die Tages-Mitteltemperatur 5.56 °C übersteigt, wobei nur jene Grade summiert werden, welche den Wert von 5.56 °C übertreffen. Es werden also nur Tage berücksichtigt, welche in der Vegetationsperiode liegen (ZIMMERMANN und KIENAST, 1999).

Niederschlag

Anzahl Niederschlagstage (>1mm) im Sommer (Juni, Juli, August). Periode 1961-1990 (ZIMMERMANN und KIENAST, 1999).

Frosttage

Durchschnittliche Anzahl Frosttage während der Vegetationszeit eines Jahres. Als Frosttag gilt, wenn die mittlere Tagestemperatur weniger als 0 °C beträgt.

4.3.3 Waldtyp

Bei den einzelnen Standorten wurde bei der Feldaufnahme der Waldtyp nach ELLENBERG und KLÖTZLI (1972) bestimmt. Diese Einteilung besteht aus 71 unterschiedlichen Waldgesellschaften. Für die statistische Auswertung in dieser Arbeit wurde aus diesen Aufnahmen jedem Standort zugeordnet, ob es sich um einen Nadelwald, einen Laubwald oder einen Mischwald handelt. Die Waldtypen wurden folgendermassen aufgeteilt (in Klammern noch die entsprechenden Waldgesellschaften):

1. Laubwald (1-17, 22-36, 37-42, 43-44)
2. Mischwald (18-21, 64)
3. Nadelwald (46-53, 61-63, 45, 54-59, 70-71, 68, 65-69, 60)

4.3.4 Ausgangsgestein

Die Zusammensetzung und Beschaffenheit der Boden bildenden Gesteine ist einer der wichtigsten Faktoren bei der Bodengenese. Er bestimmt wesentlich mit, welcher Bodentyp entsteht, und welche Eigenschaften ein Boden besitzt (WALTHERT et al., 2004). Die Ausgangsgesteine der Standorte wurden folgendermassen eingeteilt:

1. Kalkhaltiges Ausgangsgestein
2. Kalkfreies Ausgangsgestein
3. Nicht-zuordnungsfähiges Ausgangsgestein: Moräne, Flussalluvionen

4.3.5 pH-Wert im Oberboden

Der pH-Wert beeinflusst die biologische Aktivität des Bodens und somit auch die Abbaubarkeit der Streu (WALTHERT et al., 2004). Der pH-Wert des Ah-Horizontes wurde untersucht und in statistische Auswertung miteinbezogen.

5. Resultate

TEIL A

In einem ersten Schritt wurde bei ausgewählten Bodenprofilen die Mächtigkeit der organischen Auflage, deren Dichte und Kohlenstoffvorräte erfasst (Teil A). Diese Daten dienen anschliessend zur Extrapolation auf den grösseren Datensatz der WSL-Datenbank (Teil B).

5.1 Organische Auflage an ausgewählten Standorten

Pro Standort wurden zwischen 4 und 28 Mächtigkeitsmessungen durchgeführt (mit dem Transekt). Einige Horizonte, vor allem die F-, H- und Ahh-Horizonte, kommen nicht überall vor (Abbildung 5-1). Für diese Horizonte wurde Null cm eingesetzt damit diese nicht übergewichtet werden.

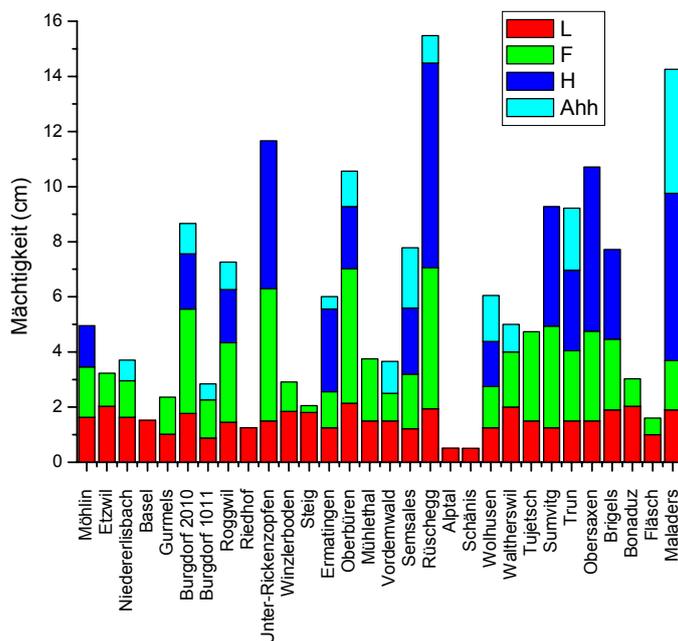


Abbildung 5-1: Mächtigkeit der untersuchten Standorte in die einzelnen Humuslagen aufgeteilt, nach Region sortiert. (Von links: 4 Jura-, 12 Mittelland-, 6 Voralpen- und 8 Alpen-Standorte)

Es ist bekannt, dass die Mächtigkeit der organischen Auflage mit der Sequenz Rohhumus, Moder, Mull abnimmt. Dies aufgrund ansteigender Mineralisation der organischen Substanz (SOM) und eines Anstieges der biologischen Aktivität (BENS et al., 2006a).

Tabelle 5- 1: Mittlere Mächtigkeit der Humuslagen

Horizont	Mittelwert	Standardabweichung	Min	Max	N
L	1.49	0.42	0.5	2.14	30
F	2.25	1.35	0.25	5.12	30
H	3.57	1.91	1.50	7.42	30
Ahh	1.45	1.06	0.45	4.5	30

5.1.1 Der L-Horizont

Die Streulage ist bei allen Standorten vorzufinden. Die Mächtigkeiten variieren zwischen 0.5 cm und 2.14 cm. Der L-Horizont ist jährlichen Schwankungen unterworfen. Das Streumaterial ist erfahrungsgemäss unter Mittellandverhältnissen meist ein-, selten mehrjährig (LÜSCHER, 1991). In dieser Arbeit wurde die Beprobung mit wenigen Ausnahmen in einer beschränkten Zeitperiode von Mitte September bis Ende Oktober durchgeführt. Aus diesen Gründen ist es schwierig, eine genaue Aussage über den Streuhorizont zu machen. Die Feldaufnahme für die WSL-Bodendatenbank hingegen wurde während vieler Jahre zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt und ist daher einer starken Schwankung unterworfen, was es erschwert, eine Beziehung mit steuernden Faktoren zu identifizieren.

5.1.2 Der F- und H-Horizont

Die Horizonte F und H sind im Gegensatz zur Streu mehrjährig aber kommen nicht an allen Standorten vor, wie es beim L-Horizont der Fall ist. In Abbildung 5-2 wurden die kalkhaltigen Standorte von den kalkfreien Standorten getrennt und die Mächtigkeit in Abhängigkeit mit der Höhe dargestellt. Es kann bei beiden Horizonten eine Zunahme der Mächtigkeit mit der Höhe beobachtet werden.

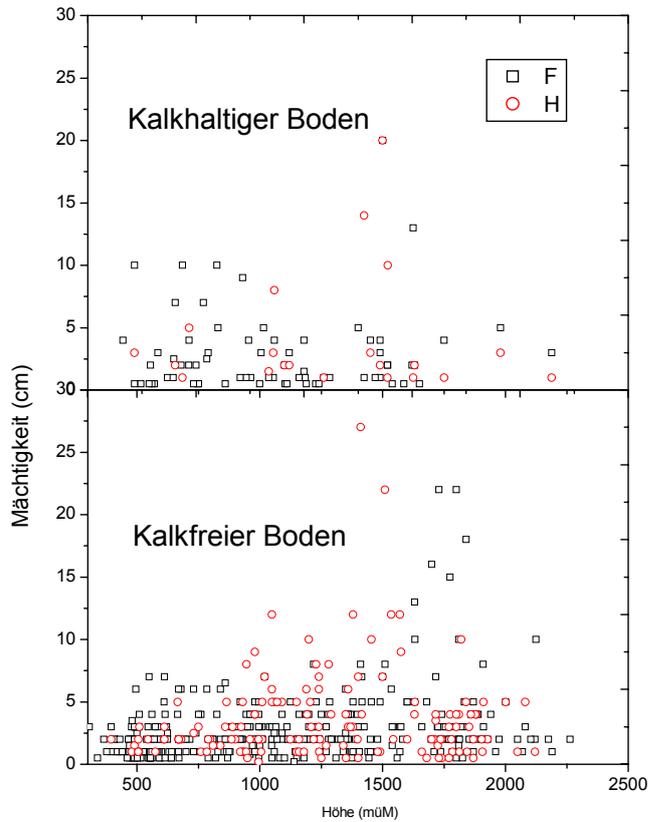


Abbildung 5- 2: Mächtigkeit des F- und H-Horizontes auf einem kalkhaltiger Boden (oben) und auf einem Kalkfreien Boden (unten) in Abhängigkeit mit der Höhe.

5.2 Anzahl der benötigten Proben

Pro Standort wurden 28 Messungen der Auflagemächtigkeiten durchgeführt. Um zu bestimmen, wie viele Messungen nötig sind, um einen Standort ausreichend zu beschreiben, wurden die Mittelwerte von allen möglichen 2er-Kombinationen berechnet und der maximale Fehler dieser Messungen in Prozent des Mittelwertes ausgedrückt. Dies wurde mit allen 3er-, 4er-Kombinationen (bis 27er-) wiederholt. Für jede Humusform (Mull, Moder und Rohhumus) wurde ein typischer Standort evaluiert, um die Berechnungen durchzuführen. Für die Humusform Mull wurde der Standort Gurmels im Kanton Freiburg gewählt. Der Standort befindet sich auf einer Höhe von 590 m ü.M. in einem Laubwald (Waldmeister-Buchenwald mit Hainsimse). Ein typischer Moder ist am Standort Winzlerboden im Kanton Zürich anzutreffen. Die Waldgesellschaft an diesem Standort ist nach ELLENBERG und KLÖTZLI (1972) ein Waldlabkraut-Hainbuchenmischwald. Beim Rohhumus-Standort handelt es sich um einen Fichtenwald im Kanton Graubünden auf der Untersuchungsfläche Obersaxen.

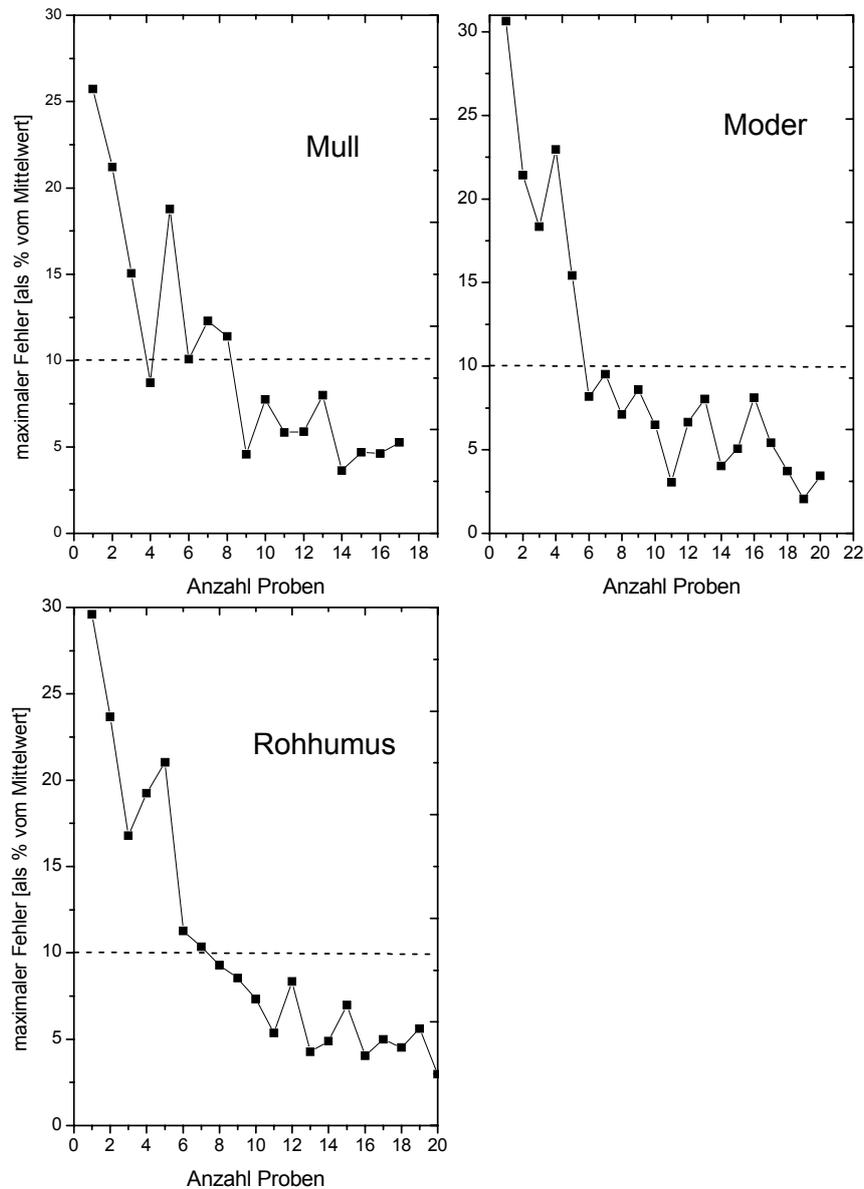


Abbildung 5-3: Abnahme des maximalen Fehlers, ausgedrückt in % des Mittelwerts der Mächtigkeit an einem Mull-, einem Moder- und einem Rohhumus-Standort.

Aus der Abbildung 5-3 geht hervor, dass nach 7-8 Mächtigkeitmessungen der maximale Fehler unterhalb von 10% liegt. Nach 9 Messungen erreicht man den minimalen Fehler beim Mull-Standort. Schon nach 6 Messungen wird der minimale Fehler für den Moder-Standort (Winzlerboden) erreicht. Nach 8 Messungen liegt der Fehler für den Rohhumus-Standort unter 10%. Nach den Berechnungen aus diesem Kapitel folgt für zukünftige Untersuchungen: 8 Mächtigkeitmessungen genügen also, um einen Standort ausreichend beschreiben zu können.

5.3 Berechnung der Dichte

Tabelle 5-2: Dichten nach Horizonten aufgeteilt

Standort	L(g/cm ³)	F(g/cm ³)	H(g/cm ³)	Ahh(g/cm ³)
A12	0.09	0.22	n.v	n.v
A13	0.07	0.13	0.15	n.v
A14	0.11	0.13	0.16	0.16
A15	0.08	0.12	0.12	n.v
A16	0.12	0.14	0.19	n.v
A17	0.12	n.v	n.v	n.v
A18	0.05	0.07	n.v	n.v
A19	0.14	0.11	0.25	0.25
M1	0.03	n.v	n.v	n.v
M4	0.06	0.1	n.v	n.v
M6	0.06	0.16	0.13	0.3
M7	0.12	0.15	n.v	0.19
M9	0.07	0.14	0.24	0.24
M10	0.08	n.v	n.v	n.v
M11	0.08	0.16	0.25	n.v
M13	0.06	0.19	n.v	n.v
M14	0.05	0.09	n.v	n.v
M17	0.1	0.2	0.35	0.37
M18	0.07	0.18	0.26	0.24
V1	0.06	0.1	0.32	0.18
V9	0.08	0.13	0.2	0.2
V18	0.08	n.v	n.v	n.v
V19	0.03	n.v	n.v	n.v
J10	0.14	0.16	0.28	n.v
J12	0.08	0.22	n.v	n.v
Wolhusen	0.09	0.12	0.17	0.12
Niedererlisbach	0.08	0.08	n.v	0.18
Mühlethal	0.06	0.14	n.v	n.v
Waltherswil	0.24	0.16	n.v	0.47
Vordemwald 2	0.09	0.12	n.v	0.24
Basel	0.09	n.v	n.v	n.v
Mittelwert	0.09	0.14	0.22	0.24

Die Dichten nehmen mit zunehmender Humifizierung, das heisst mit zunehmender Tiefe, zu. Am höchsten ist die Dichte im Ahh-Horizont mit 0.24 g/cm³, am niedrigsten im L-Horizont mit 0.09 g/cm³ (Tabelle 5-2). Die grössten Schwankungen sind in den F- und H-Lagen anzutreffen (Tabelle 5-4). Die Dichte (gewichtet) der gesamten organischen Auflage ohne Ahh ist 0.18 g/cm³. Die organische Auflage mit der Ahh-Lage besitzt eine Dichte von 0.19 g/cm³

5.4 Das Kohlenstoff/Stickstoff (C/N) - Verhältnis

Aus den Labordaten können die C/N-Verhältnisse berechnet werden. Die Zusammensetzung der organischen Auflage wirkt sich stark auf die C/N-Verhältnisse der Auflagen aus. Die C/N-Verhältnisse für die L-Horizonte liegen zwischen 22-36 und sind deutlich höher als diejenigen der F-Horizonte, welche zwischen 18-31 liegen. Bei den H-Horizonten liegen die Werte zwischen 16-36, bei den Ahh-Horizonten zwischen

15-25 (Abbildung 5-5). Das C/N-Verhältnis von den F- und H-Lagen unterscheiden sich nur schwach voneinander. Innerhalb einer Humusauflage nimmt das C/N-Verhältnis mit zunehmender Zersetzung ab. Die Abnahme wird mit dem Verlust stickstoffarmer Substanzen durch Veratmung und Auswaschung erklärt (BABEL, 1970).

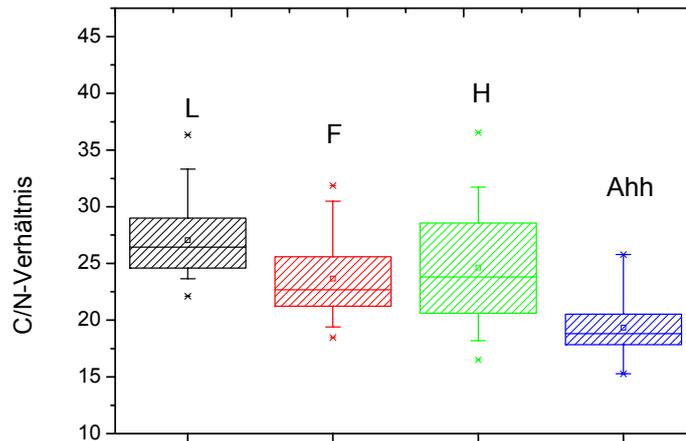


Abbildung 5-4: C/N-Verhältnisse

Bei allen vier Auflagehorizonten steigt das C/N-Verhältnis mit zunehmender Höhenlage der Profile an (Abbildung 5-5). In Böden nehmen mit der Tiefe das Alter und somit auch der Zersetzungsgrad des SOM zu; das C/N-Verhältnis nimmt daher meist innerhalb eines Bodenprofils ab (CHRISTENSEN et al., 1999). Mehrere Autoren stellten einen positiven Zusammenhang zwischen C/N-Verhältnis und Abbaubarkeit des SOM fest (GÖDDE et al., 1996; CHRISTENSEN et al., 1999; MICHEL et al., 2006).

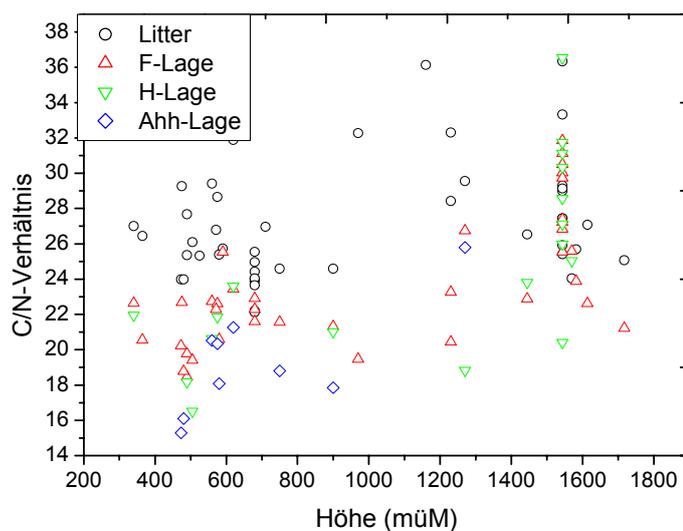


Abbildung 5-5: C/N-Verhältnisse mit der Höhe

Die C/N-Verhältnisse sind im Allgemeinen an Nadelwaldstandorten höher als an Laubwaldstandorten. Bei den Horizonten L, F und H ist eine Zunahme des C/N-Verhältnisses mit der Höhenlage zu beobachten (Abbildung 5-6 bis 5-8).

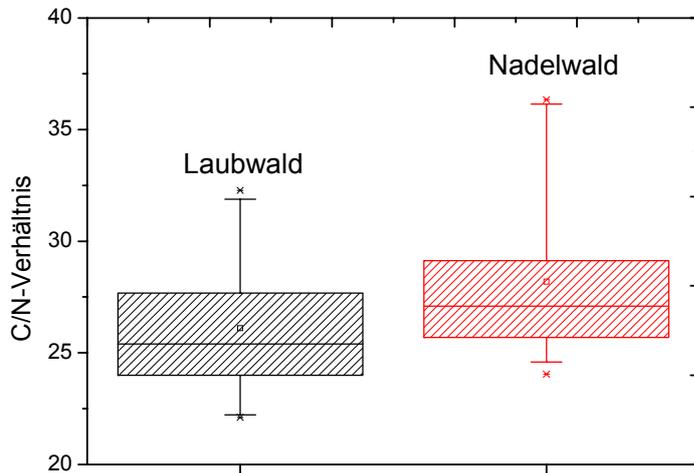


Abbildung 5-6: C/N-Verhältnisse im L-Horizont für Laub- und Nadelwald.

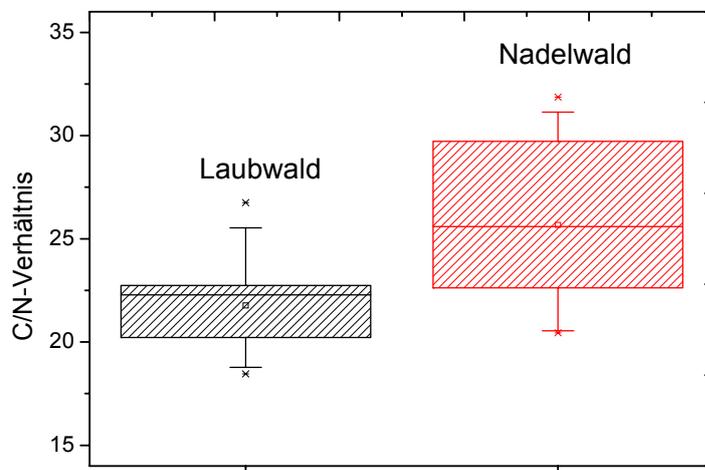


Abbildung 5-7: C/N-Verhältnis im F-Horizont für Laub und Nadelwald

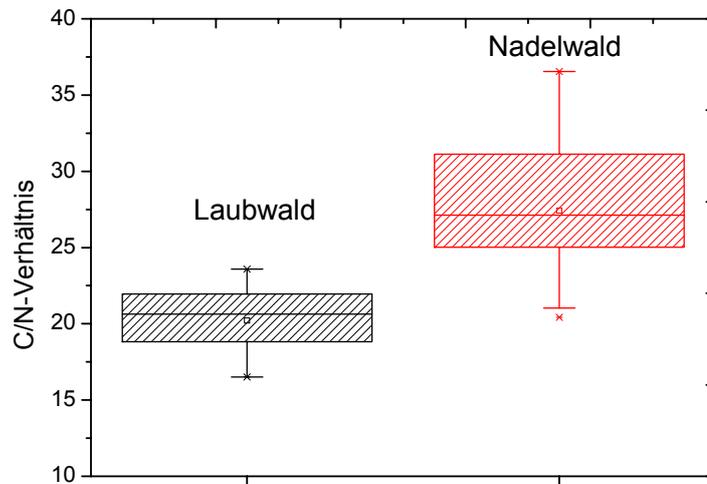


Abbildung 5-8: C/N-Verhältnis im H-Horizont für Laub- und Nadelwald

Zusätzlich wird noch die Höhenabhängigkeit nach Laub und Nadelwald getrennt betrachtet, um auszuschliessen, dass die Höhenabhängigkeit einen zunehmenden Nadelholzanteil mit zunehmender Höhe widerspiegelt (Abbildungen 5-9 und 5-10).

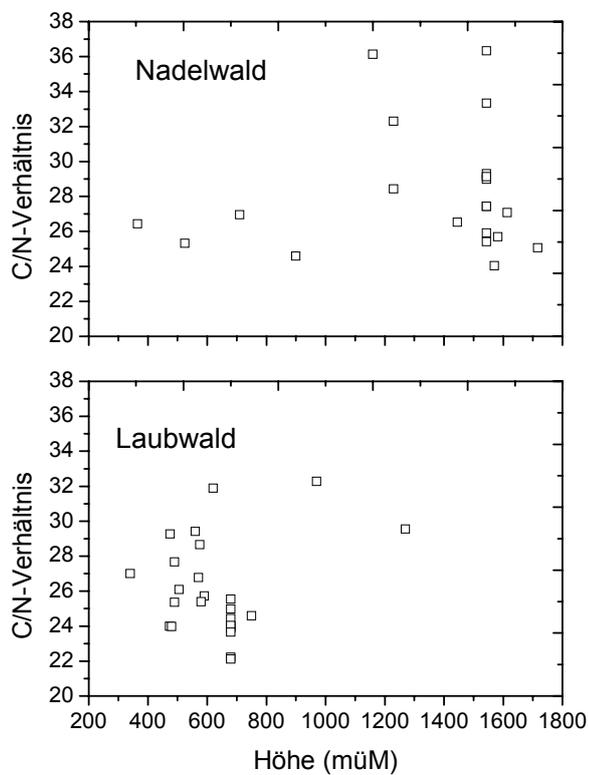


Abbildung 5-9: Höhenabhängigkeit des C/N-Verhältnisses im L-Horizont für Laub- und Nadelwald

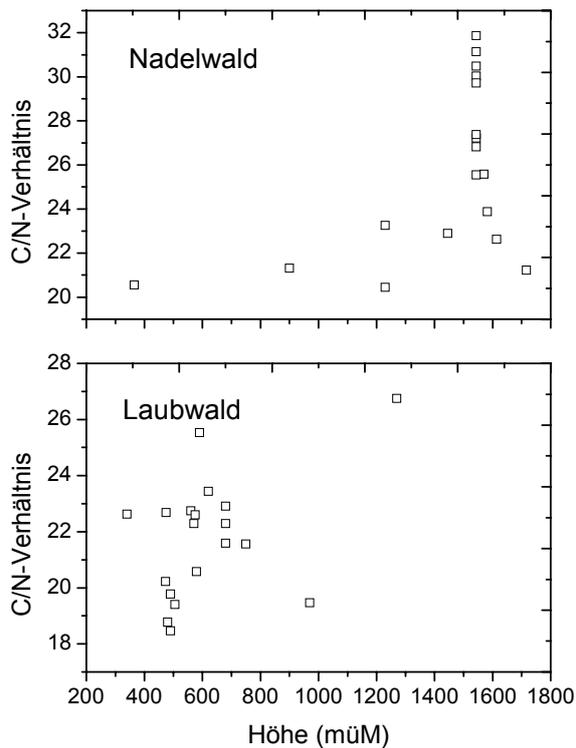


Abbildung 5-10: Höhenabhängigkeit des C/N-Verhältnisses im F-Horizont für Laub- und Nadelwald

Für eine Darstellung des Ahh-Horizontes sind zu wenige Daten vorhanden, darum wurde auf eine Abbildung der Daten dieses Horizontes verzichtet.

5.5 Kohlenstoffvorräte

Die gesamten Kohlenstoffvorräte liegen zwischen 1.8 t/ha (Schänis) und 104 t/ha (Rüschegg) (Abbildung 5-11). Von den Humuslagen weist die H-Lage die höchsten Vorräte auf – mit einem Mittelwert von 26.3 t/ha- und die L-Lage die niedrigsten mit einem Mittelwert von 5.8 t/ha (Abbildung 5-12).

Die geringsten Kohlenstoffvorräte sind in den L- und Ahh-Horizonten zu finden. Die Werte beider Horizonte liegen unter 20 tC/ha. Einen etwas höheren Vorrat kann in den F-Horizonten beobachtet werden. Mit zunehmender Höhe steigen die Kohlenstoffvorräte schwach an. Für den alpinen Standort Obersaxen wurde keine Mischprobe gemacht, sondern jede einzelne Probe ins Labor geschickt. Aus der Laboranalyse kann eine grosse Streuung der Kohlenstoffvorräte im H-Horizont des Standortes Obersaxen beobachtet werden. Die Werte schwanken zwischen 6.75 tC/ha und 65 tC/ha (Abbildung 5-13).

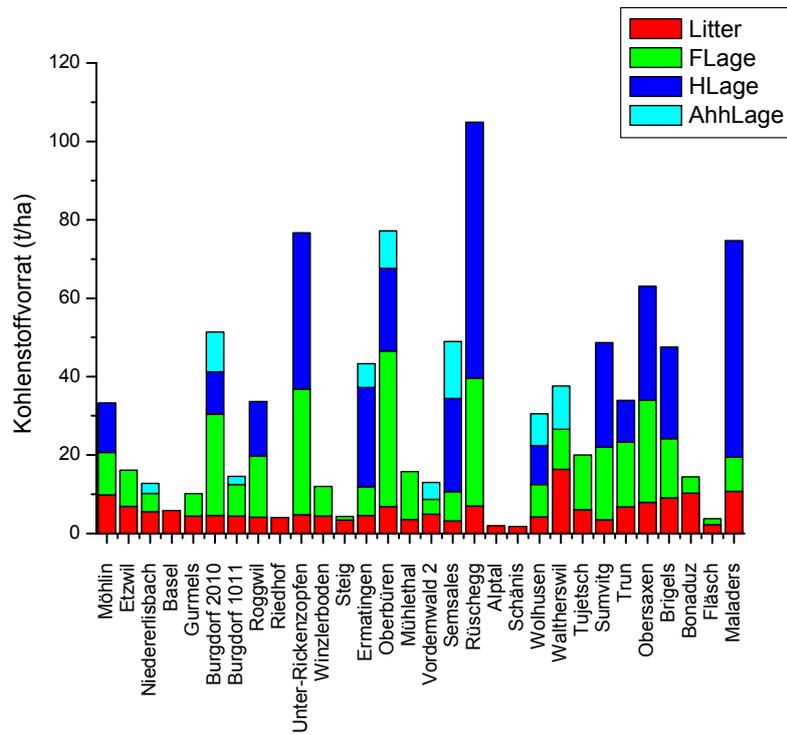


Abbildung 5-11: Kohlenstoffvorräte der untersuchten Standorte in die einzelnen Humuslagen aufgeteilt, nach Region sortiert (von links: 4 Jura-, 12 Mittelland-, 6 Voralpen- und 8 Alpen-Standorte)

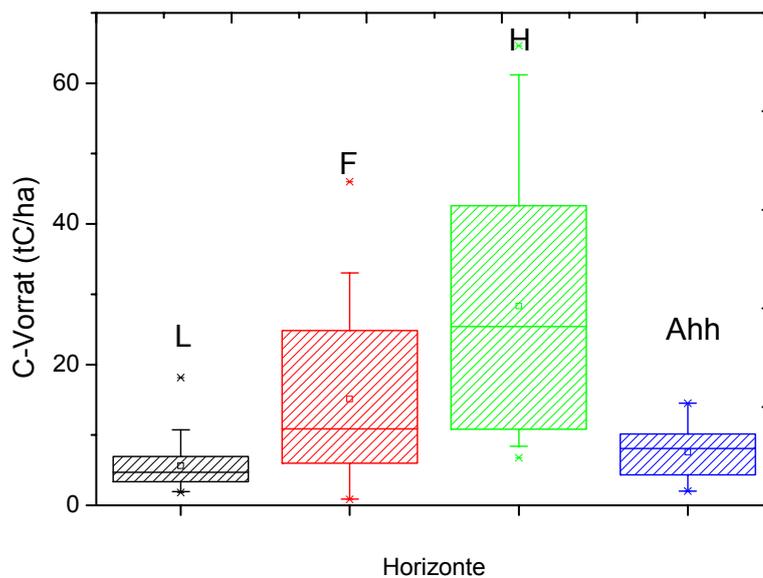


Abbildung 5-12: Kohlenstoffvorräte der einzelnen Horizonte

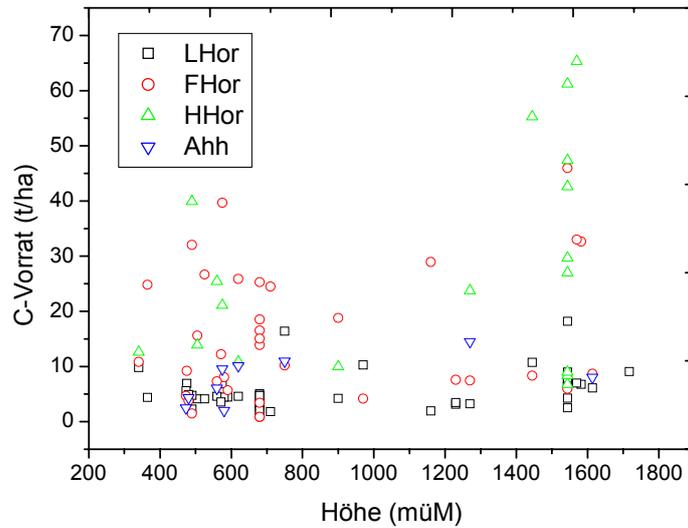


Abbildung 5-13: Veränderung der Kohlenstoffvorräte mit der Höhe

Die grosse Schwankung ist zum Teil mit den unterschiedlichen Mächtigkeiten zu erklären, andererseits durch das Vorkommen von dicken Wurzeln, die an einigen Stellen vorgefunden wurden. Das Wurzelmaterial wurde in die Untersuchungen miteinbezogen.

TEIL B

Nachdem die Datenbank mit den Ergebnissen aus der Feldarbeit und Laborarbeit vervollständigt wurde, konnte eine statistische Datenanalyse durchgeführt werden. Als erstes wurde der Mittelwert des Kohlenstoffvorrates in den einzelnen Produktionsregionen aus den gemessenen Daten berechnet. Anschliessend wurde eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt, um den Einfluss biotischer und abiotischer Faktoren zu untersuchen. Anhand der Regressionsanalyse konnte ein Modell bestimmt werden, womit die Kohlenstoffvorräte punktuell berechnet werden können.

5.6 Kohlenstoffvorräte aus WSL-Datenbank

Die Auflagen in den verschiedenen Produktionsregionen weisen bezüglich des Kohlenstoffvorrats (t/ha) deutliche Unterschiede auf. Die höchsten Vorräte pro Hektar sind in den Alpen zu finden (37.2 tC/ha). Die geringsten Vorräte befinden sich in den Regionen Jura und Mittelland. Es kann ein klarer Zuwachs mit steigender Höhe beobachtet werden. Die Alpensüdseite weist einen erstaunlich hohen Kohlenstoffvorrat auf, trotz geringer Niederschlagsmenge und hoher Temperaturen.

Tabelle 5-3: Gemessener Kohlenstoffvorrat in den verschiedenen Horizonten nach Produktionsregion aufgeteilt (\pm Standardabweichung)

Produktionsregion	L	F	H	Ahh	Total
Jura (72)	7.8 \pm 4.6	1.4 \pm 3.3	0.51 \pm 3.1	1.4 \pm 10.5	11.1 \pm 15.1
Mittelland (281)	4.8 \pm 3.5	3.6 \pm 6.9	1.1 \pm 4.5	2.1 \pm 4.7	11.6 \pm 13.3
Voralpen (287)	4.4 \pm 3.2	6.3 \pm 9.4	6.6 \pm 19.8	2.3 \pm 5.6	20.5 \pm 28.4
Alpen (199)	6.0 \pm 0.4	16.6 \pm 26.6	10.8 \pm 24.1	3.6 \pm 9.6	37.2 \pm 43.3
Alpensüdseite (37)	7.3 \pm 4.1	10.6 \pm 14.6	4.4 \pm 14.3	4.9 \pm 13.6	26.0 \pm 29.9
Schweiz (876)	5.3 \pm 4.2	7.6 \pm 15.5	5.2 \pm 17.0	2.8 \pm 7.5	20.9 \pm 30.0

5.7 Multiple Regressionsanalyse

5.7.2 Scatterplotmatrix

In der Matrix ist ersichtlich, dass die erklärenden Variablen, die einen signifikanten Einfluss auf die Zielvariable haben, die höchsten Korrelationen ausweisen. Es sind dies: der Waldtyp (W2), der pH-Wert, die Wärme und die Höhe. Gradtage (DDeg) werden für diese Regression ausgelassen, da sie sehr stark mit der Wärme korrelieren ($r=0.95$).

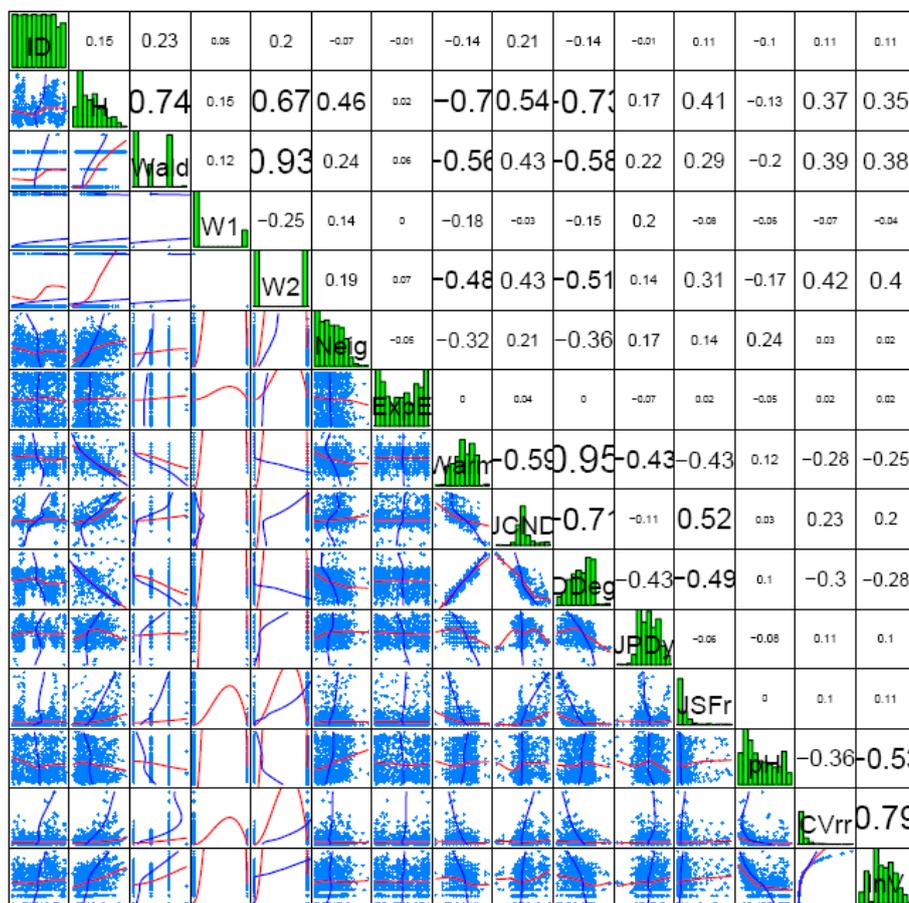


Abbildung 5-14: Scatterplotmatrix. Variablen (von oben): Probe, Höhe, Waldtyp, W1/W2 Hilfsvariablen, Neigung, Exposition E, Wärme, Kontinentalitätsindex, Gradtage, Niederschlag, Frosttage, pH-Wert, C-Vorrat, In C-Vorrat.

Die restlichen Variablen werden für die Berechnungen weggelassen.

5.7.3 Drei Modelle

Modell 1: pH und W2

Im Modell 1 wurde der Kohlenstoffvorrat nur mit den Variablen pH und W2 gerechnet

Das Ergebnis sieht folgendermassen aus:

Residuals:				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-3.7327	-0.6264	0.0483	0.6208	3.6061

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.8094	0.1140	33.4	<2e-16 ***
pH	-0.3767	0.0219	-17.2	<2e-16 ***
W2	0.8616	0.0750	11.5	<2e-16 ***

Residual standard error: 0.976 on 836 degrees of freedom
(5 observations deleted due to missingness)

Multiple R-Squared: 0.38, Adjusted R-squared: 0.378
F-statistic: 256 on 2 and 836 DF, p-value: <2e-16

Im oberen Teil der Tabelle findet man Standardinformationen zu den Residuen. In der Spalte Pr ist zu sehen, dass alle Parameter hoch signifikant sind. Das Bestimmtheitsmass R^2 ist 0.38.

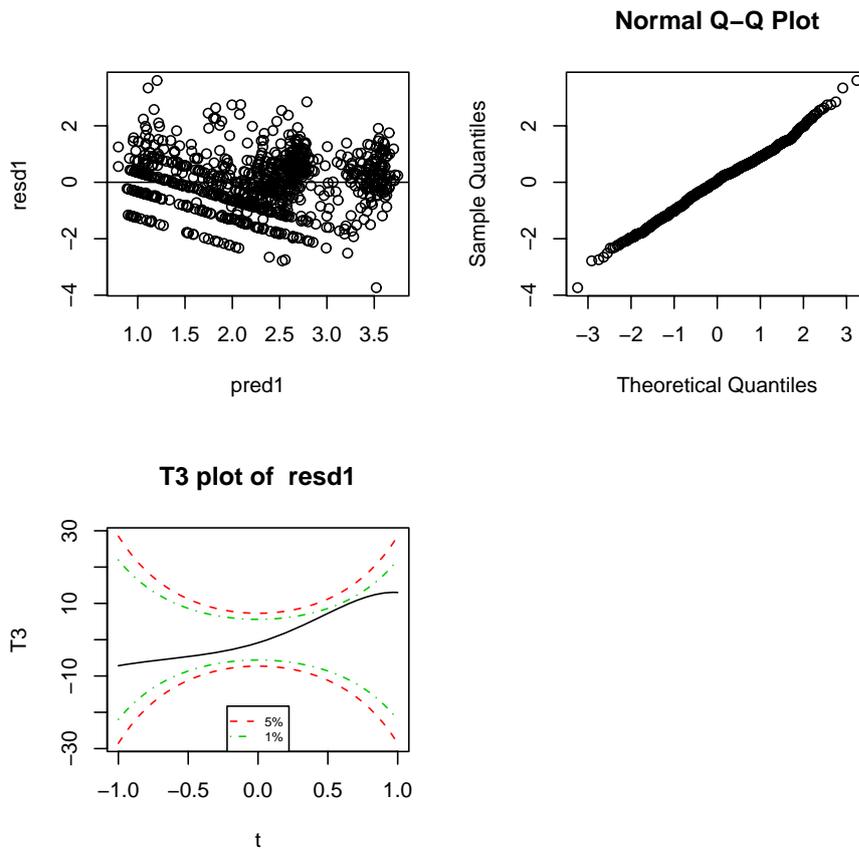


Abbildung 5-15: Tukey-Anscombe-Plot, Normal plot und T3plot (GHOSH, 1996) der Residuen für Modell 1.

Aufgrund des Tukey Asombe Plot kann davon ausgegangen werden, dass der Erwartungswert gleich null ist und die Varianz konstant ist. Der Normalplot ist schön gerade, und die mittlere Linie im T3plot schneidet die gestrichelten Linien nicht, was auf eine Normalverteilung hindeutet.

Modell 2: pH, Höhe und W2

Im Modell 2 wird zusätzlich die Höhe hinzugenommen.

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-4.0145	-0.6353	0.0578	0.6075	3.4580

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.450123	0.140880	24.49	< 2e-16 ***
pH	-0.374826	0.021661	-17.30	< 2e-16 ***
W2	0.583476	0.098877	5.90	5.2e-09 ***
Höhe	0.000468	0.000110	4.26	2.3e-05 ***

Residual standard error: 0.966 on 835 degrees of freedom
(5 observations deleted due to missingness)

Multiple R-Squared: 0.393, Adjusted R-squared: 0.391
F-statistic: 180 on 3 and 835 DF, p-value: <2e-16

Auch hier sind die Pr-Werte sehr nahe an null. Das R^2 ist minimal höher als beim Modell ohne die Höhe.

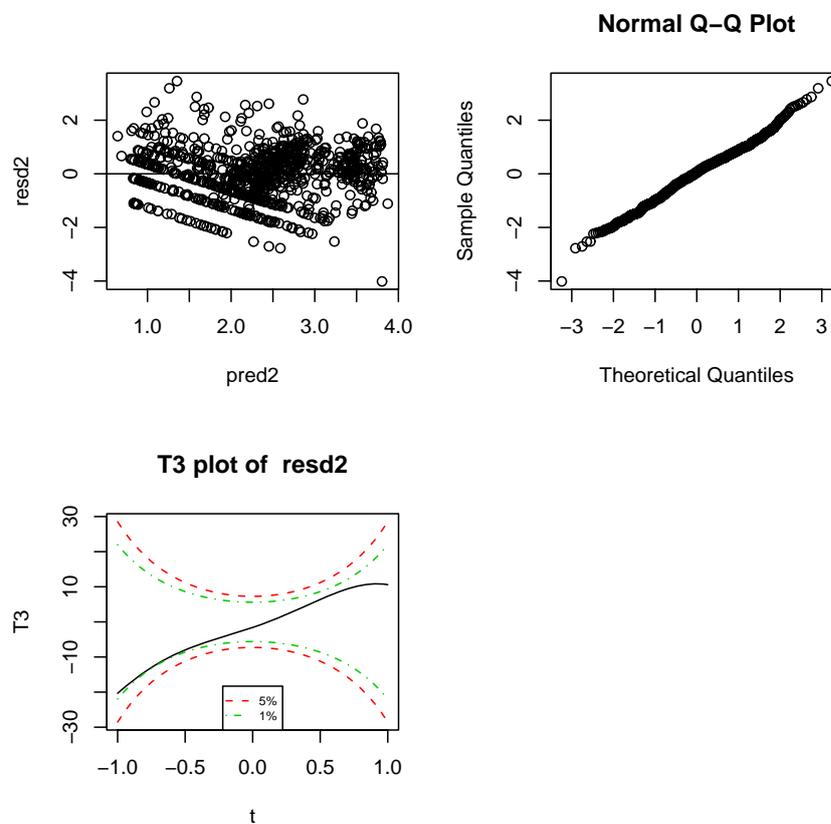


Abbildung 5- 16: Tukey-Anscombe-Plot, Normal plot und T3plot (GHOSH, 1996) der Residuen für Modell 2.

Auch hier sind die Residuen normalverteilt und der Erwartungswert gleich Null und die Varianz konstant.

Modell 3: ph, Höhe, W2 und Wärme

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-4.011	-0.632	0.058	0.611	3.454

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.356148	0.279736	12.00	< 2e-16 ***
pH	-0.375146	0.021687	-17.30	< 2e-16 ***
W2	0.583909	0.098933	5.90	5.2e-09 ***
Höhe	0.000500	0.000136	3.67	0.00026 ***
Wärme	0.007472	0.019211	0.39	0.69743

Residual standard error: 0.967 on 834 degrees of freedom
(5 observations deleted due to missingness)

Multiple R-Squared: 0.393, Adjusted R-squared: 0.39
F-statistic: 135 on 4 and 834 DF, p-value: <2e-16

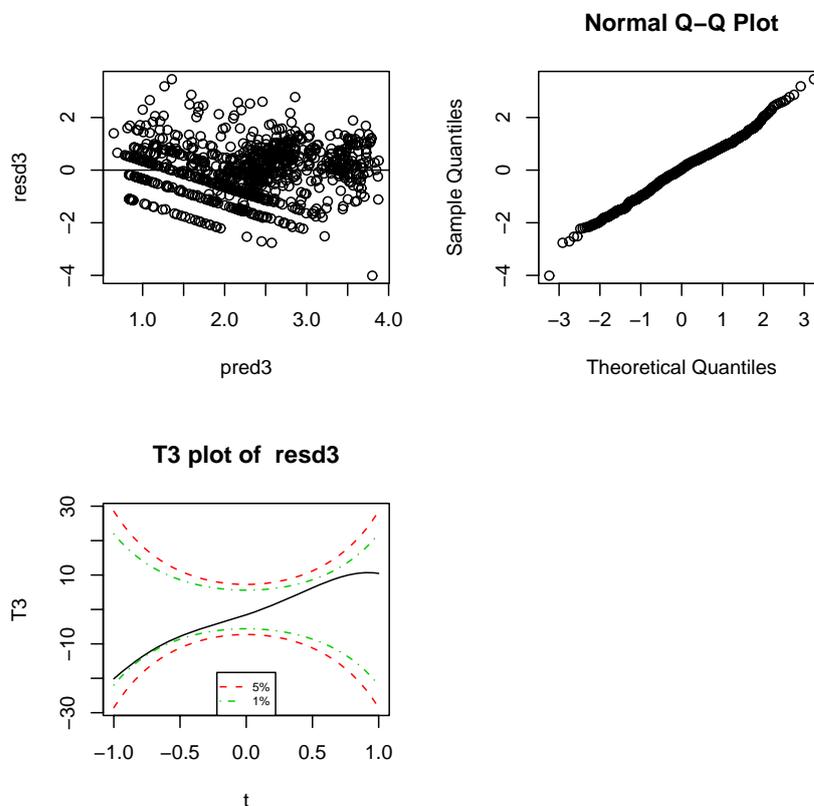


Abbildung 5-17: Tukey-Anscombe-Plot, Normal plot und T3plot (GHOSH, 1996) der Residuen für Modell 3.

Vergleich der drei Modelle

Um die drei Modelle zu vergleichen wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt.

Analysis of Variance Table

Model 1: In C-Vorrat ~ pH + W2

Model 2: In C-Vorrat ~ pH + W2 + Höhe

Model 3: In C-Vorrat ~ pH + W2 + Höhe + Wärme

	Res. Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	836	796.3				
2	835	779.4	1	16.9	18.104	2.33e-05 ***
3	834	779.2	1	0.1	0.151	0.697

Die ersten beiden Modelle unterscheiden sich signifikant voneinander, das dritte Modell hingegen praktisch nicht. Das geeignetste Modell ist daher das Modell 2. Für die Vorhersage der Kohlenstoffvorräte wurde der Korrekturfaktor nach FINNEY (1941) verwendet, mit dem der Mittelwert besser getroffen und damit die Schätzung verbessert wird. Letztlich ergab sich für die Berechnung der Kohlenstoffvorräte folgende Gleichung:

$$\mathbf{C\text{-Vorrat} = K * e^{3.45012 - 0.37483pH + 0.58348W^2 + 0.000468429H}}$$

Mit $K = 1.5934$

Es wurde noch ein zusätzliches Modell berechnet, welches nur die Parameter Höhe und Waldtyp beinhaltet. Das Modell musste jedoch verworfen werden, da die Residuen viel schlechter waren als bei den übrigen drei Modellen.

5.8 Kohlenstoffvorräte vorhergesagt auf dem 8x8km Netz

Mit dem Regressionsmodell kann mit Daten der Waldzustandsinventur (WZI) des Jahres 1993 im regelmässigen 8x8km Netz der gesamte C-Vorrat vorhergesagt werden (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Berechneter Kohlenstoffvorrat der WZI-Standorte in der organischen Auflage (mit Ahh) nach Produktionsregion aufgeteilt: Mittelwert (t/ha), +/- Standardfehler, Minimum, Maximum, N= Anzahl Proben.

Produktionsregion	Mittelwert	Standardfehler	Min	Max	N
Jura	8.56	0.85	3.73	21.71	36
Mittelland	12.35	1.07	4.29	22.43	29
Voralpen	20.69	2.49	5.07	60.67	33
Alpen	31.43	2.92	4.70	71.83	53
Alpensüdseite	23.46	3.17	5.85	56.58	21
Schweiz	20.39	1.30	3.73	71.83	172

Die regelmässig verteilten Stichproben weisen keine signifikanten Unterschiede zu den 870 zufällig verteilten Stichproben aus der Datenbank auf (Vergleich Tabelle 5-5).

Tabelle 5-5: Gemessene Kohlenstoffvorrat nach Produktionsregion aufgeteilt: Mittelwert (t/ha), Standardfehler, Minimum, Maximum, N = Anzahl Proben

Produktionsregion	Mittelwert	Standardfehler	Min	Max	N
Jura	11.07	1.78	3.87	122.78	72
Mittelland	11.60	0.79	0.77	77.12	281
Voralpen	20.53	1.68	0.77	233.55	287
Alpen	37.20	3.07	0.81	280.05	200
Alpensüdseite	26.01	4.85	3.87	120.78	38
Schweiz	20.93	1.01	0.77	280.05	878

5.9 Untersuchung der biotischen und abiotischen Faktoren

Die Regressionsanalyse zeigt, dass der Kohlenstoffvorrat der organischen Auflage aus den Faktoren Höhe, Waldtyp und pH-Wert im Oberboden vorhergesagt werden kann. Da diese Faktoren den grössten Einfluss auf die Kohlenstoffspeicherung im Waldboden haben, werden sie daher in diesem Kapitel besonders beschrieben.

5.9.1 Waldtyp

Im Laubwald ist der Kohlenstoffvorrat 12 tC/ha, im Mischwald ein wenig höher, 15.3 tC/ha. Deutlich höher ist der Kohlenstoffvorrat im Nadelwald 38.7 tC/ha, beinahe dreimal soviel wie an einem Laubwaldstandort (Abbildung 5-18).

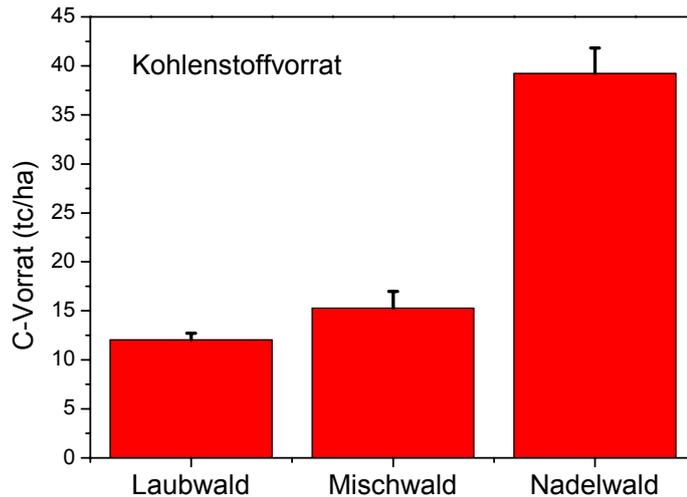


Abbildung 5-18: Kohlenstoffvorräte der organischen Auflage in den drei Waldtypen

Im L-Horizont ist in den drei Waldtypen gleich viel Kohlenstoff gespeichert. Im Laub- und im Mischwald ist im F-Horizont zwischen 3-4 tC/ha gespeichert. Die Auflage im Nadelwald speichert viermal mehr C als diejenigen der Laub- und Mischwälder. Auch der H-Horizont im Laubwald speichert dreimal so viel Kohlenstoff wie die entsprechende Horizonte im Mischwald und viermal so viel wie im Laubwald. Der Ahh-Horizont ist in den drei Waldtypen sehr dünn und speichert daher auch am wenigsten (zwischen 2-4 tC/ha). Im Laubwald ist jedoch mehr Kohlenstoff im Ahh-Horizont gespeichert als im H-Horizont.

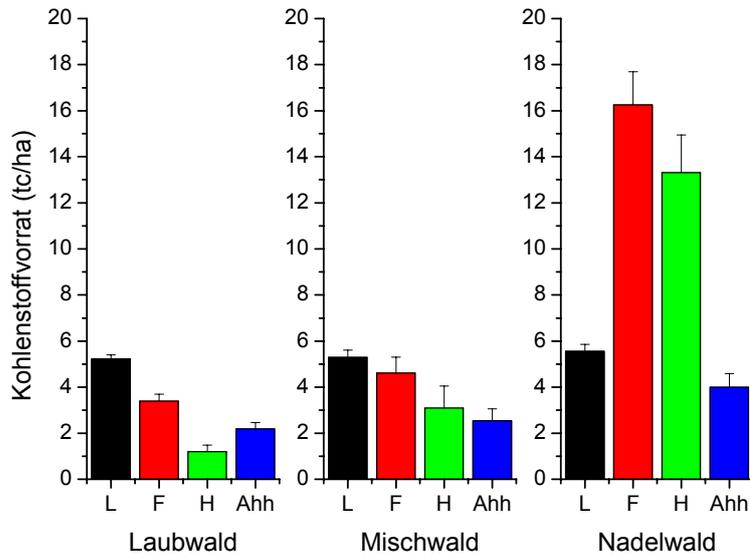


Abbildung 5-19: Kohlenstoffvorrat der einzelnen Horizonte in den drei Waldtypen

5.9.2 Die Höhe

Auch die Höhe hat einen bedeutenden Einfluss auf die Auflagemächtigkeit und somit auf die Kohlenstoffspeicherung. Der Kohlenstoffvorrat und die Auflagemächtigkeit nehmen mit zunehmender Höhe zu (Abbildung 5-20): An höheren Standorten wird die Streu weniger schnell zersetzt und wird deshalb akkumuliert, denn die Höhe beeinflusst die Temperatur und die Feuchtigkeit im Boden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

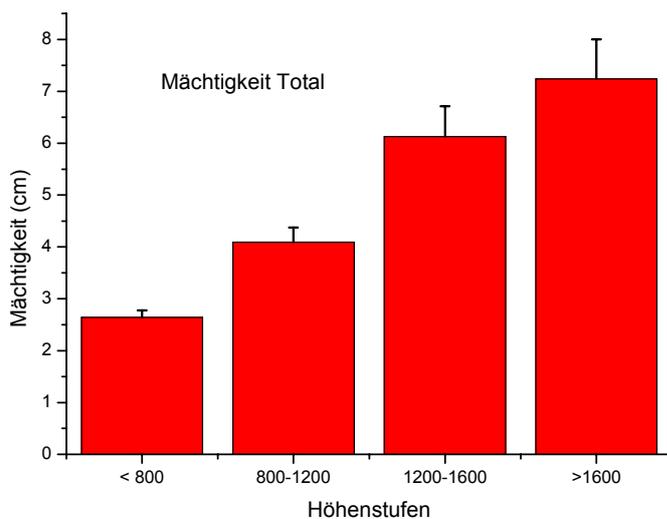


Abbildung 5-20: Mächtigkeit der organischen Auflage in den verschiedenen Höhenstufen

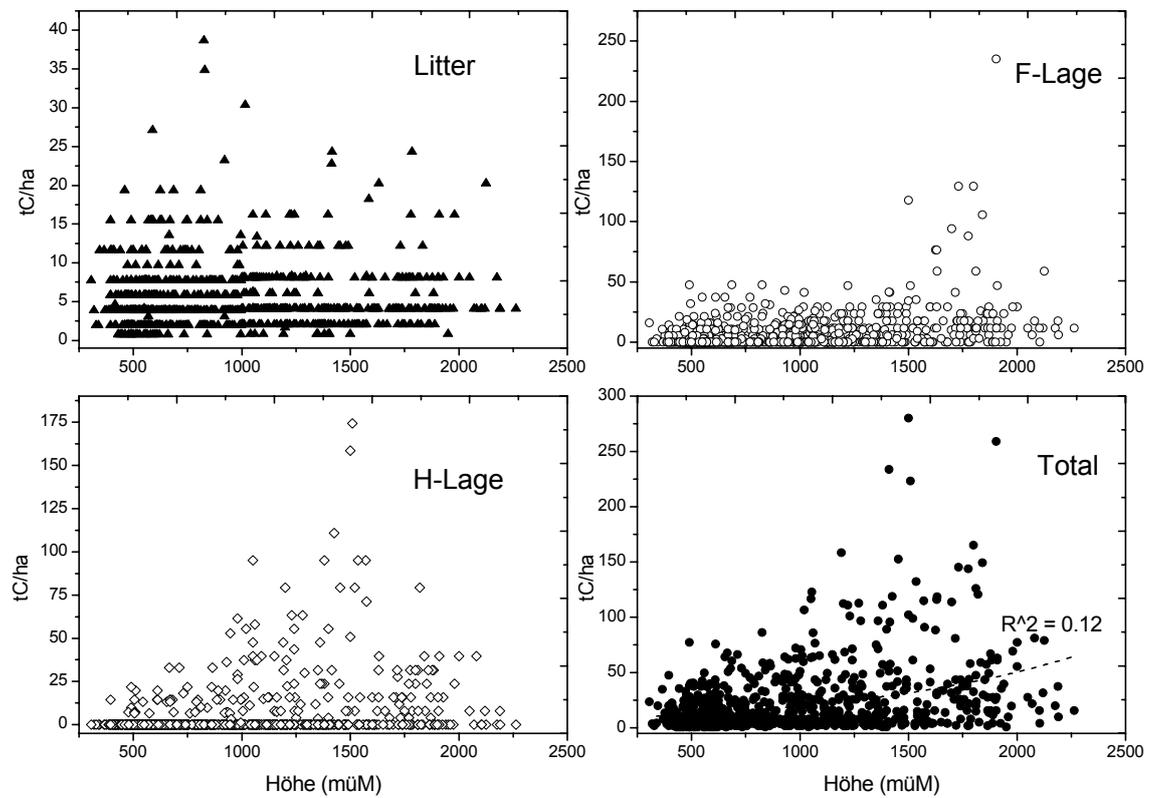


Abbildung 5-21: Streudiagramme der Kohlenstoffvorräte in den einzelnen Horizonten mit Zunehmender Höhe

Mit zunehmender Höhe nimmt nicht nur die Auflagemächtigkeit zu, sondern auch der Kohlenstoffvorrat (Abbildung 5-21). Der F-Horizont steigt ab 1500 müM stärker an. Darunter ist der Kohlenstoffvorrat mehr oder weniger konstant unter 50 tC/ha. Der H-Horizont zeigt schon ab 1000 müM an einigen Standorten einen Kohlenstoffvorrat über 50 tC/ha an. Der L-Horizont nimmt geringfügig mit zunehmender Höhe ab.

5.9.3 pH-Wert

Die C-Vorräte sind umso höher, je saurer die Oberböden sind. Die höchsten Kohlenstoffvorräte sind im pH-Bereich zwischen 2,5 und 3,5. Das gilt für die Horizonte F und H. Die Kohlenstoffvorräte nehmen deutlich ab mit zunehmendem pH-Wert. Der L-Horizont zeigt eine geringe Abnahme bei zunehmendem pH-Wert (Abbildung 5-22).

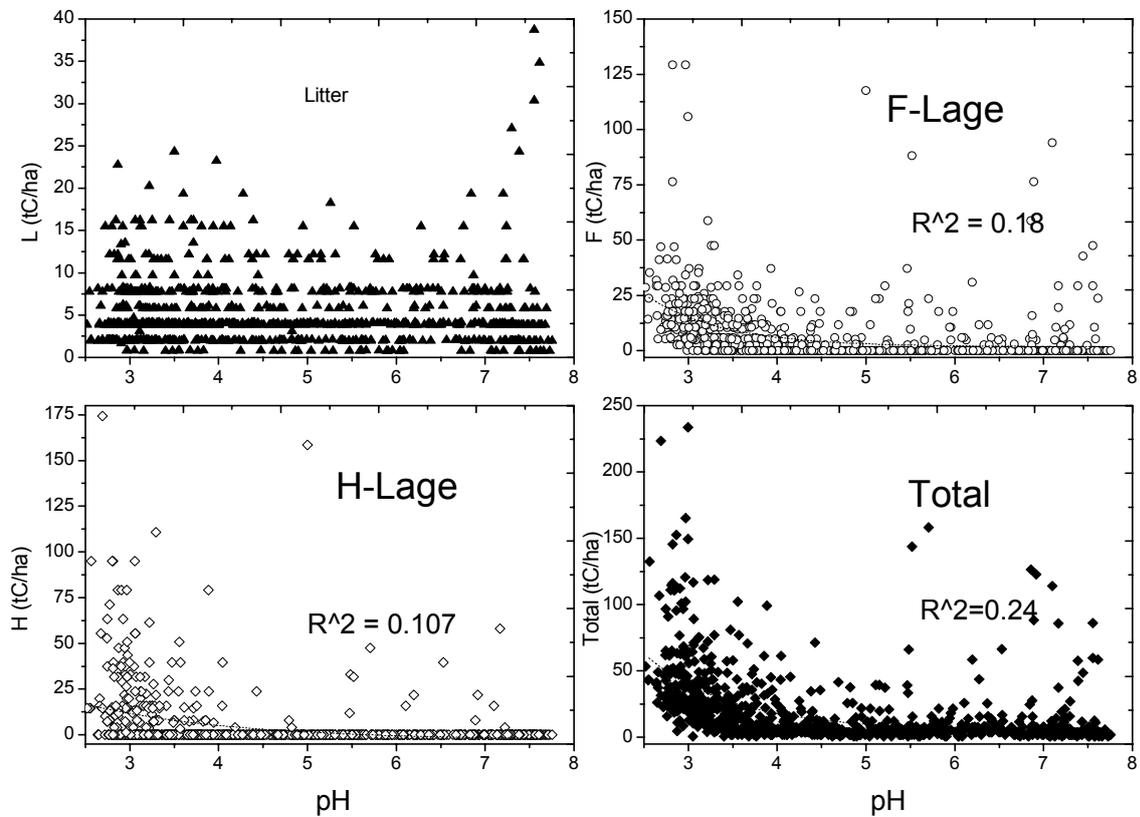


Abbildung 5-22: Kohlenstoffvorrat der verschiedenen Horizonte in Abhängigkeit von pH-Wert im Oberboden

5.9.4 Klima

Wärme

Die Untersuchung zeigt deutlich ein Maximum zwischen 5 und 8 – also dort, wo Pflanzenwuchs noch möglich ist, aber durch geringe Bodentemperatur nur wenig organische Substanz abgebaut wird und somit akkumuliert (Abbildung 5-23).

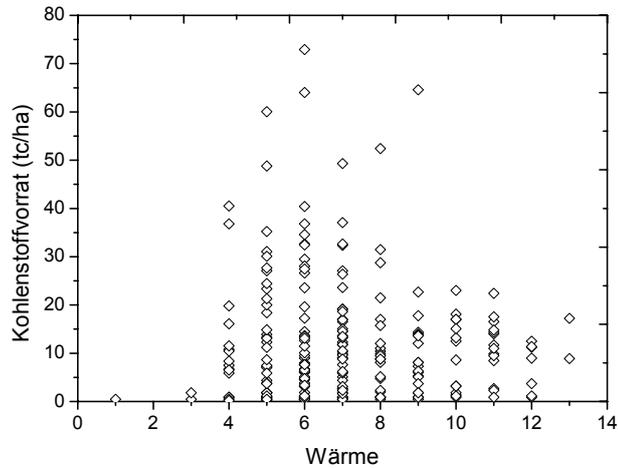


Abbildung 5-23: Kohlenstoffvorrat nach Wärme

Niederschlag

Im Gegensatz zur Wärme hat die Niederschlagsmenge keinen Einfluss auf den Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage (Abbildung 5-24).

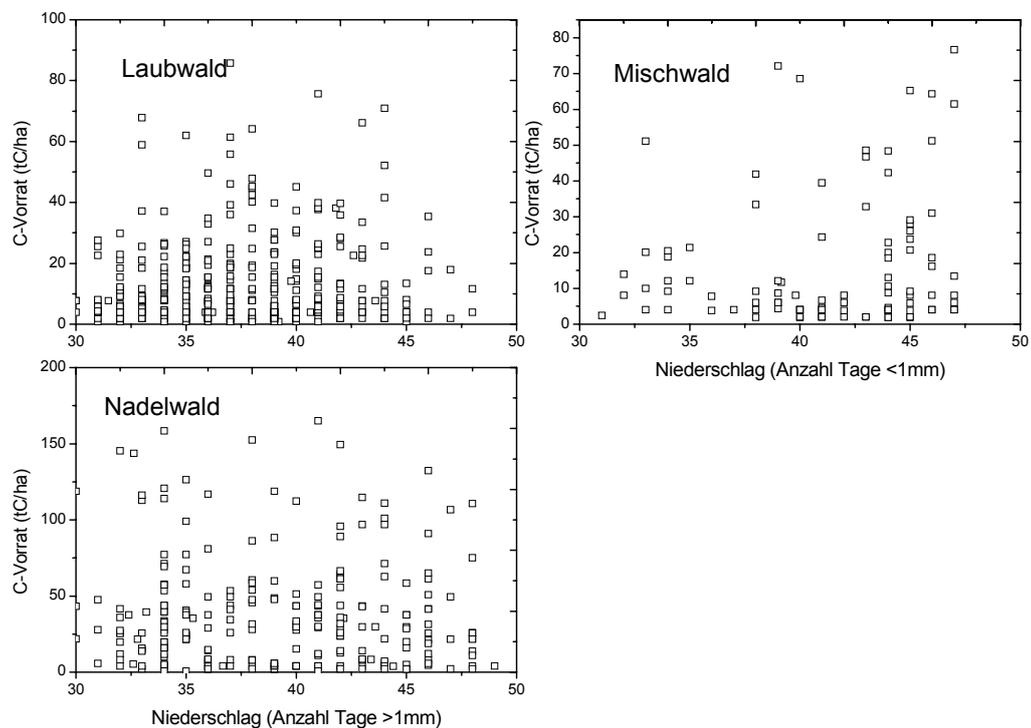


Abbildung 5-24: Zusammenhang des Kohlenstoffvorrates mit der Anzahl Tage, an denen der Niederschlag grösser als 1mm war.

5.10 Verhältnis Mineralboden/organische Auflage

In diesem Kapitel wird das Verhältnis des Mineralbodens zur organischen Auflage untersucht für drei verschiedene Einteilungen: nach Höhenstufen, nach Waldtyp und nach pH-Wert. Um zu entscheiden, ob es einen signifikanten Unterschied zwischen den Stichproben gibt, wurde der Kruskal-Wallis H-Test gewählt.

5.10.1 Nach Höhenstufen

Das Verhältnis Mineral/Auflage der Höhenstufe >1600 müM unterscheidet sich signifikant von den übrigen Höhenstufen, am stärksten von der Höhenstufe < 800 müM. In den übrigen Höhenstufen unterscheiden sich die Verhältnisse nicht signifikant voneinander. In den Standorten, die über 1600 müM liegen, finden wir 10-mal mehr Kohlenstoff im Mineralboden als in der organischen Auflage. An den Standorten unter 800 müM 17-mal mehr, in 800-1200 müM 13-mal und in 1200-1600 15-mal mehr Kohlenstoff im Mineralboden als in der organischen Auflage. Mit der Höhe nimmt das Verhältnis zwischen den Vorräten ab, die relative Bedeutung der organischen Auflage nimmt daher zu (Abbildung 5-25).

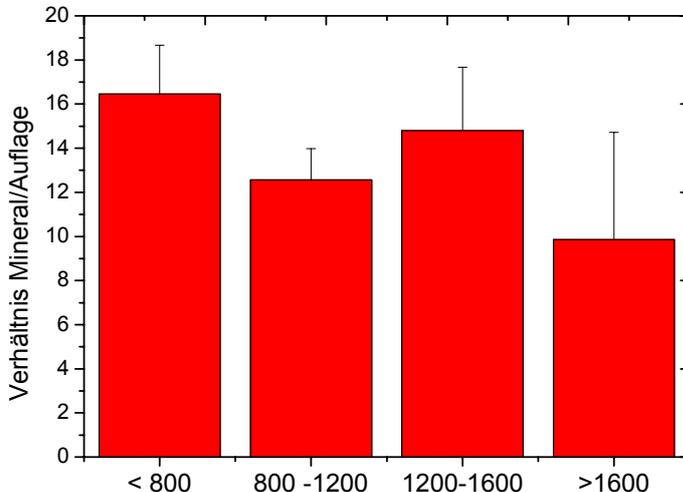


Abbildung 5-25: Verhältnis Mineral/Auflage in vier Höhenstufen eingeteilt

5.10.2 Nach Waldtyp

Das Verhältnis der Kohlenstoffvorräte des Mineralbodens zur organischen Auflage ist am grössten an den Laubwaldstandorten (Mittelwert = 15.8 ± 1.5) und am kleinsten an den Nadelwaldstandorten (Mittelwert = 10.76 ± 2.6). Im Laubwald findet man im Mineralboden ca. 16-mal mehr Kohlenstoff als in der organischen Auflage. Im Nadelwald beträgt das Verhältnis 11. Im Mischwald finden wir 14-mal mehr Kohlenstoff

im Mineralboden als in der organischen Auflage (Abbildung 5-26). Die Verhältnisse von Laubwald und Mischwald unterscheiden sich signifikant.

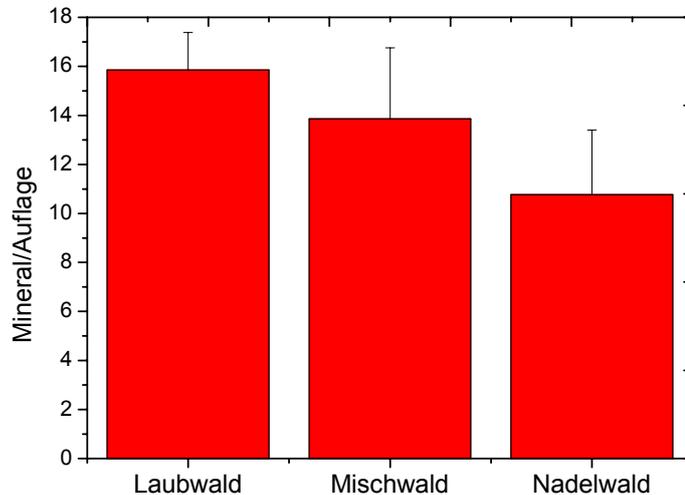


Abbildung 5-26: Verhältnis Mineral/Auflage

5.10.3 Nach pH-Wert

Auch beim pH-Wert ist ein Unterschied der Verhältnisse zu beobachten (Abbildung 5-27). Das Verhältnis ist am grössten, wo der Abbau des organischen Materials am grössten ist, d.h. im Bereich neutral bis schwach sauer. Signifikante Unterschiede herrschen zwischen den Bereichen stark sauer und basisch, neutral und stark sauer, sauer und stark sauer sowie schwach sauer und stark sauer.

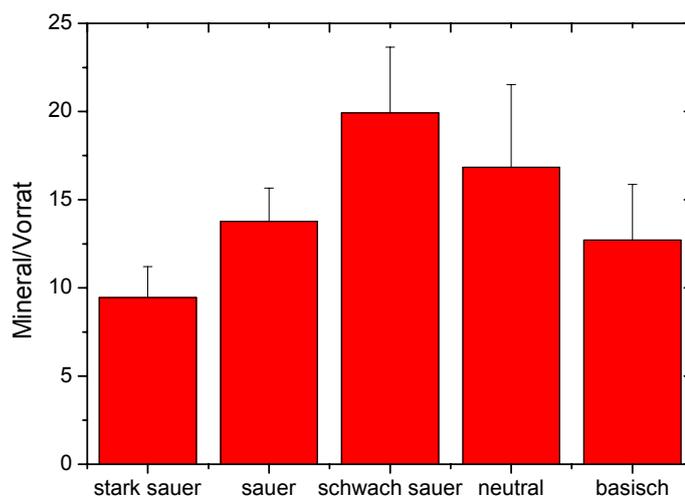


Abbildung 5-27 :Verhältnis Mineral/Auflage nach Säuregrad (stark sauer=2.8-3.9; sauer=4-5.9; schwach sauer=6-6.4; neutral=6.4-7; basisch=7-7.5)

Das Verhältnis Mineralboden zur organischen Auflage nimmt bei steigendem pH-Wert zu. Auf neutralen bis basischen Böden ist der Abbau der organischen Substanz am grössten. Deshalb ist im Mineralboden verhältnismässig mehr Kohlenstoff als in der organischen Auflage gespeichert (Abbildung 5-28).

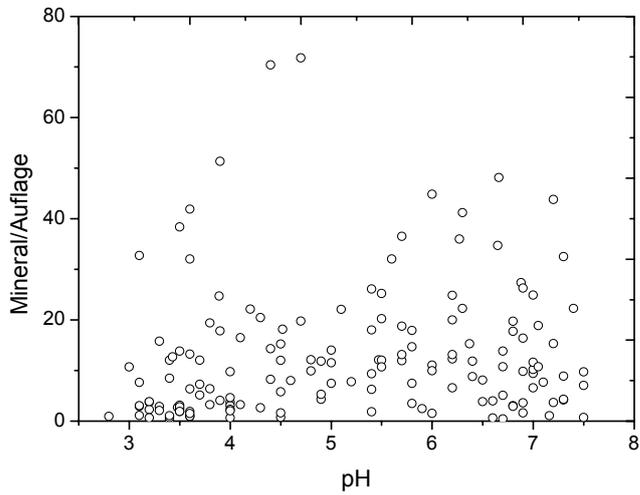


Abbildung 5-28: Streudiagramm pH-Verhältnis Mineral/Auflage

5.11 Kohlenstoffvorrat im Schweizer Wald

Die Werte für den C-Vorrat im Mineralboden und in der Biomasse (Abbildung 5-29) stammen aus Berechnungen der WZI-Daten. Pro Hektare Wald wird in der Biomasse am meisten Kohlenstoff gespeichert, rund sechsmal mehr als in der Auflage. PERRUCHOUD et al. (2000) haben in ihren Berechnungen für den Mineralboden den Ahh-Horizont zum Mineralboden gezählt. Deshalb wird hier für die organische Auflage aus den WZI-Daten den Kohlenstoffvorrat ohne den Ahh-Horizont verwendet, damit dieser Vorrat nicht doppelt berechnet wird.

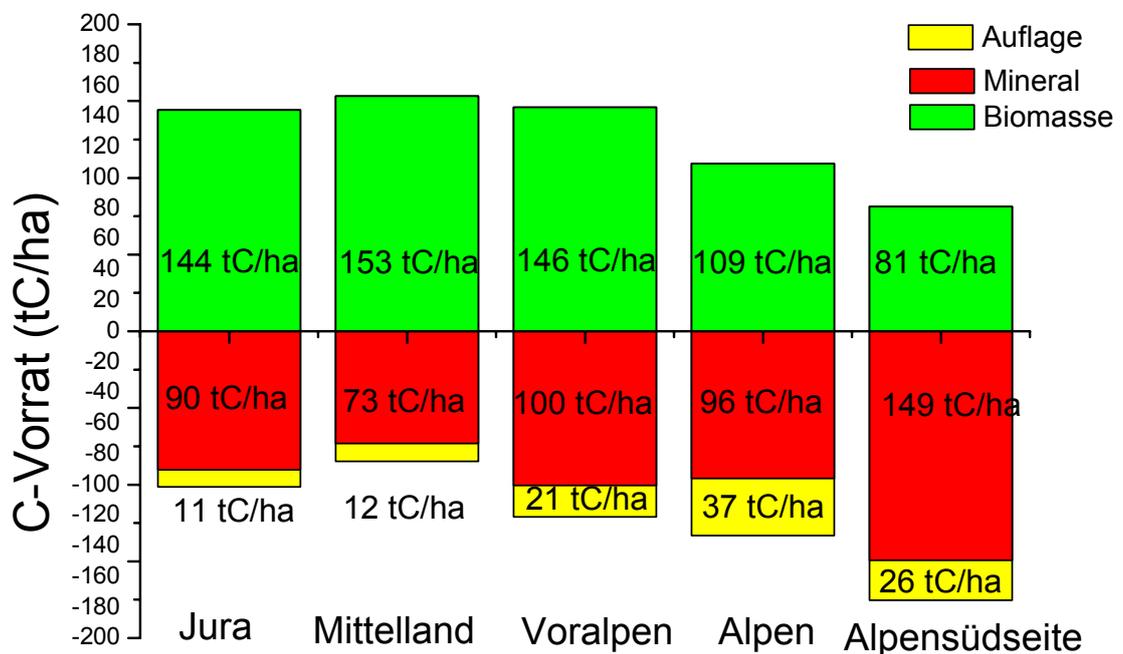


Abbildung 5-29: Ober- und unterirdischer Kohlenstoffvorrat in Schweizer Waldböden

Organische Auflage

Die höchsten Kohlenstoffvorräte sind in den Regionen Alpen und Alpensüdseite vorhanden. In der Region Jura ist der Kohlenstoffvorrat gering und nimmt in Richtung Alpen zu. Aus Abbildung 5-31 kommt eine Zunahme des Kohlenstoffvorrates mit zunehmender Höhe hervor.

Biomasse

Die Kohlenstoffvorräte variieren zwischen den Produktionsregionen. Die kleinsten Kohlenstoffvorräte sind in den Wäldern der Alpensüdseite anzutreffen. Nördlich der Alpen nimmt der Kohlenstoffvorrat mit zunehmender Höhe – vom Mittelland über die

Voralpen zu den Alpen – ab (Abbildung 5-31). Dazwischen sind die Kohlenstoffvorräte der Region Jura. Der Kohlenstoffvorrat in der Biomasse korreliert nicht mit dem Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage (Abbildung 5-30).

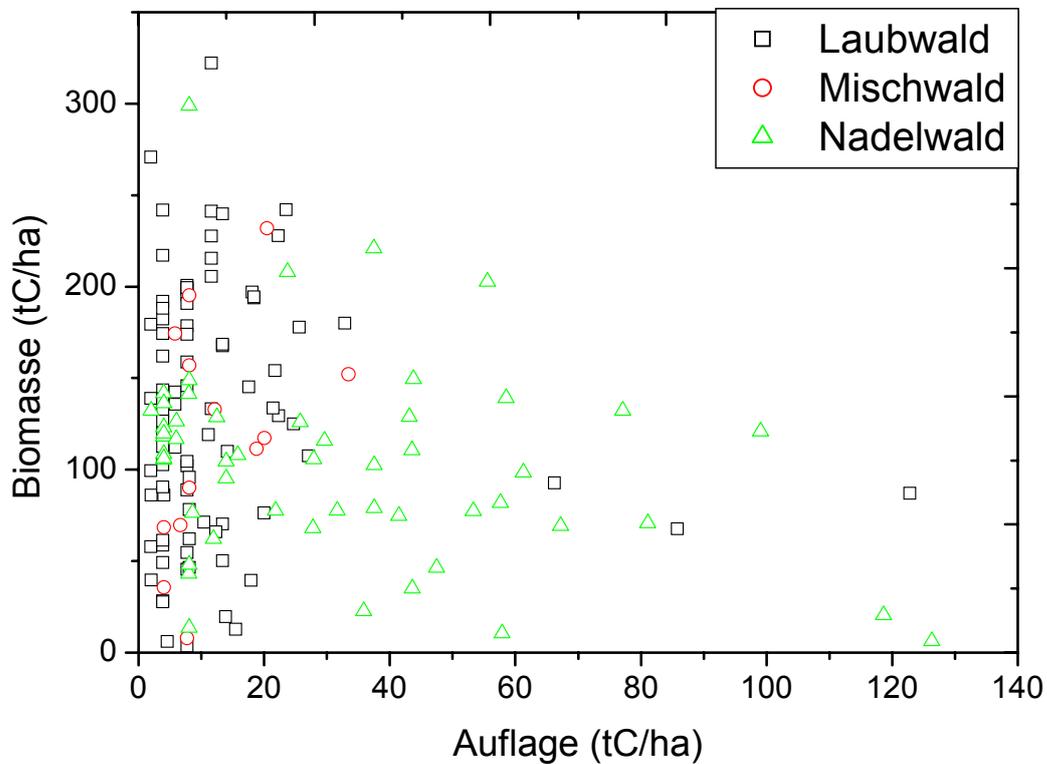


Abbildung 5-30: Korrelation Biomasse/organische Auflage

Mineralboden

Der Mineralboden zeigt eine kleine Veränderung mit der Höhe (Abbildung 5-31). Der Kohlenstoffvorrat nimmt vom Mittelland zu den Alpen zu. Der Kohlenstoffvorrat in der Region Jura kann zwischen Region Mittelland und Region Voralpen eingeordnet werden. Die höchsten Kohlenstoffvorräte sind in der Alpensüdseite gespeichert.

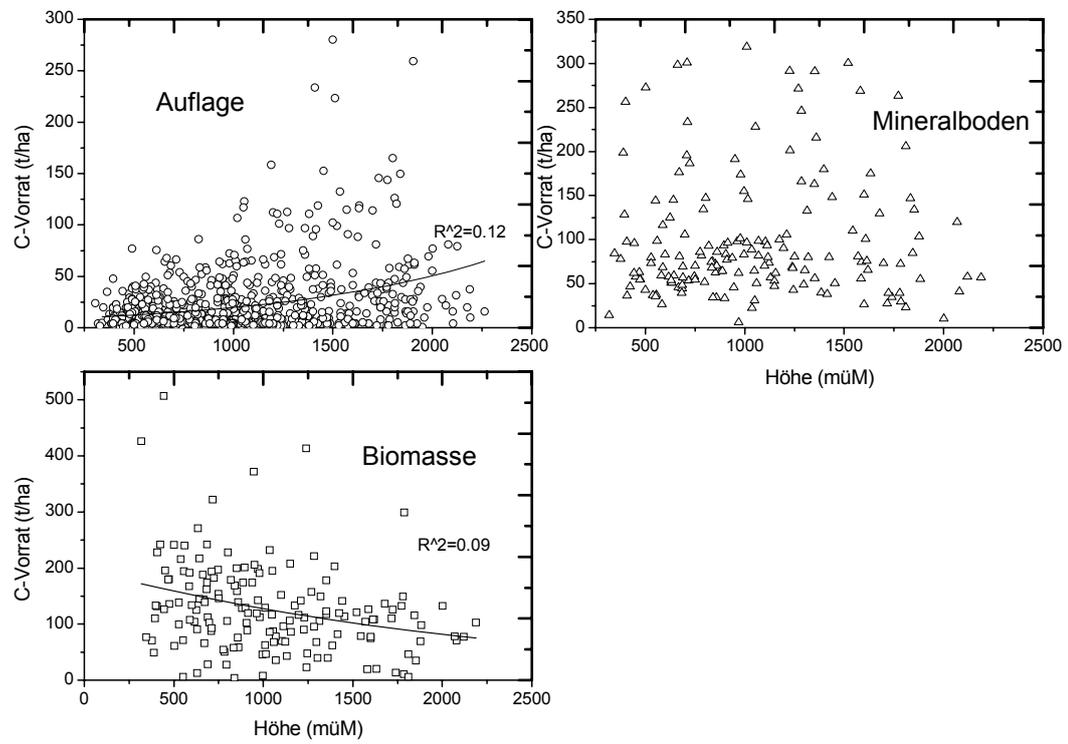


Abbildung 5-31 : Kohlenstoffvorräte in Auflage, Mineralboden und Biomasse in Abhängigkeit zur der Höhe

6. Diskussion

6.1 Kohlenstoffvorrat im Schweizer Wald

Die vorliegende Studie erlaubt eine An­schätzung für den Kohlenstoffvorrat des Schweizer Waldes insgesamt, rund 298 Mt C. Davon sind 158 Mt C in der Biomasse, 121 Mt C im Mineralboden und rund 20 Mt C in der organischen Auflage (ohne Ahh) gespeichert. Pro Hektar speichert die Auflage eine Kohlenstoffmenge von 17.5 ± 1.6 tC/ha. Obwohl die Schweiz nur zu 30% der Fläche bewaldet ist, befinden sich 90% der Phytomasse in den Wäldern (PAULSEN, 1995). Die Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage sind ungefähr doppelt so hoch wie die jährlichen CO₂-Emissionen in der Schweiz (BAFU, 2006) Da die Auflagen ein labiler Kohlenstoffpool sind, der durch Störungen und Landnutzungsänderungen schnell abgebaut werden kann (YANAI et al., 2004), kann eine nachhaltige und schonende Waldbewirtschaftung einen wichtigen Beitrag zur Schweizer CO₂-Bilanz leisten.

6.1.1 Biomasse

Die grössten Kohlenstoffvorräte in der Biomasse der Schweiz befinden sich in den Regionen Jura, Mittelland und Voralpen. Diese gehören zu den grössten Vorräten Europas (LISKI et al., 2002). Gründe hierfür sind das günstige Klima und der hohe Anteil an Buchen und Fichten. Ein Vergleich der Baumartenzusammensetzung zwischen der Region Jura und der restlichen Schweiz zeigt, dass der Jura relativ reich an Laubholz ist (BLASER et al. 2005): Rund 50% der Waldfläche ist von Laubholz beherrscht (BRASSEL und BRÄNDLI, 1999). Kleinere Kohlenstoffvorräte findet man in den Alpen und auf der Alpensüdseite. In den Alpen ist das Wachstum der Biomasse durch die tieferen Temperaturen geringer als im Unterland (BRASSEL und BRÄNDLI, 1999). Auf der Alpensüdseite sind die Gründe für die geringen Kohlenstoffvorräte die relativ jungen Wälder und der hohe Anteil an offenen Kastanienwäldern. Viele Wälder der Alpensüdseite sind in der Vergangenheit intensiv vom Menschen genutzt worden. Vor allem in den tieferen und damit relativ warmen Lagen sind die Spuren dieser Bewirtschaftung, beispielsweise in Form von ehemaligen Niederwäldern oder eingewachsenen Kastanien-Salven, noch heute deutlich sichtbar (BLASER et al., 2005).

6.1.2 Mineralboden

Im gesamtschweizerischen Vergleich haben die Wälder der Alpensüdseite die höchsten Kohlenstoffvorräte im Mineralboden. Die Tessiner Böden besitzen einen grossen Humusreichtum und weisen im europäischen Vergleich die höchsten

Kohlenstoffkonzentrationen auf (PERRUCHOUD et al., 1999) und hohe Kohlenstoffvorräte auf. Diese sind unter anderem auf den hohen Aluminium- und Eisenoxid-Gehalt zurückzuführen, der den Humus stabilisiert und vor weiterem Abbau schützt (BLASER et al. 1997, SIX et al, 2002; BOSSUYT et al., 2004). Ein weiterer Grund könnten die hohen Gehalte an „Black Carbon“ in den Tessiner Böden sein (STARY, 2006). Nicht selten sind Holzkohlereste in der humushaltigen Mineralerde zu finden, welche dem Boden eine charakteristische dunkle Farbe geben (STARY, 2006). Die kleinsten Kohlenstoffvorräte befinden sich in der Region Mittelland, gefolgt von den Regionen Jura, Alpen und Voralpen. Die Kohlenstoffvorräte im Schweizer Waldboden gehören zu den grössten Europas (LISKI et al. 2002).

6.2 Steuernde Parameter der C-Speicherung in der organischen Auflage

6.2.1 Einfluss des Waldtyps und der Biomasse

Der Einfluss des Waldtyps auf die Kohlenstoffspeicherung in der Auflage ist eindeutig feststellbar – sowohl in den Daten aus der Feldarbeit als auch bei der Untersuchung der Bodendatenbank mittels Regressionsanalyse. Der grösste Kohlenstoffvorrat der Auflage befindet sich in Nadelwäldern und der geringste Vorrat in den Laubwäldern. Im Nadelwald wird mehr als doppelt so viel Kohlenstoff gespeichert als im Laubwald und im Mischwald. Als Ursache wird die bessere Zersetzbarkeit von Laubstreu verglichen mit Nadelstreu beschrieben. Ausschlaggebend dafür sind vor allem der geringe Nährstoffgehalt (Ca, Mg, P), das weitere C/N-Verhältnis und die starke Imprägnierung der Nadeln (SWIFT et al., 1979; REHFUESS, 1990; BERG, 2000). Andere Autoren nennen vor allem das Lignin/N-Verhältnis und die Mn-Konzentration der Streu als Hauptfaktoren (HEIM und FREY, 2004; FISCHER et al., 2002). Auch diese Untersuchung hat gezeigt, dass das C/N-Verhältnis der beprobten Standorten in Nadelwäldern höher ist als in Laubwäldern. Sie akkumulieren deshalb meist mehr Humus als Laubwälder (SCHLESINGER, 1977; BENS et al., 2006, PELTONIEMI et al., 2004). In Böden nimmt mit der Tiefe in der Regel das Alter und somit auch der Zersetzungsgrad des SOM zu; das C/N-Verhältnis nimmt daher meist innerhalb eines Bodenprofils ab (CHRISTENSEN et al., 1999). Verschiedene Autoren stellten einen positiven Zusammenhang zwischen C/N-Verhältnis und Abbaubarkeit des SOM fest (GÖDDE et al., 1996; CHRISTENSEN et al., 1999; MICHEL et al., 2006).

Das Verhältnis zwischen Mineralboden und organischer Auflage zeigt ein deutliches Muster: Im Laubwald ist das Verhältnis des Kohlenstoffvorrates am höchsten und nimmt über den Misch- zum Nadelwald ab. Folglich ist im Nadelwald der Anteil der Auflage am gesamten Kohlenstoffvorrat am grössten. Ein Vergleich der Baumartenzusammensetzung in den Produktionsregionen der Schweiz zeigt, dass in den Alpen relativ viel Nadelholz und auf der Alpensüdseite verhältnismässig viel Laubholz vorhanden ist (BRASSEL und BRÄNDLI, 1999). Die Qualität und damit

Abbaubarkeit der oberirdisch anfallenden Streu wird in den Regionen Alpen aufgrund der Nadelholzdominanz als relativ ungünstig, auf der Alpensüdseite dagegen als recht günstig bewertet. Allerdings wird der Tessiner Laubwald durch die Kastanie dominiert, die hohe Tanningehalte aufweist (SCHLUMPF, 2004). Tannine wirken durch ihre Eigenschaft, in wässrigen Lösungen Proteine zu binden, stark abbauhemmend (FOO et al., 1997; VAN ACKER et al., 1996), was zu den hohen Kohlenstoffvorräten in Mineralböden der Südalpen beitragen könnte.

In den Voralpen überwiegen die Nadelwälder und im Mittelland halten sich die Laub- und Nadelhölzer praktisch die Waage. Die Abbaubarkeit der Streu ist also in der Region Voralpen durch die Nadelholzdominanz ungünstiger als im Mittelland. In der Region Jura sind rund 50% der Waldflächen von Laubholz beherrscht. Die Abbaubarkeit der Streu wird deshalb in der Region Jura als günstig bewertet.

Interessanterweise korrelieren die C-Vorräte der organischen Auflage im Gegensatz zum Waldtypen nicht mit der stehenden Biomasse. Da die Biomasse die Menge des Streueintrags bestimmt, weist dies daraufhin, dass die Streuqualität bzw. die Standorteigenschaften einen stärkeren Einfluss auf die Kohlenstoffumsetzung im Boden haben als der Input.

In dieser Arbeit wurden Standorte aus unterschiedlichen Bestandesalter untersucht, womit eine ziemliche Unsicherheit verbunden ist. Nach BÖTTCHER und SPINGOB (2001) nimmt der Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage mit zunehmenden Bestandesalter zu. Das durchschnittliche Bestandesalter der Schweizer Wälder liegt bei 100 Jahren (BRASSEL und BRÄNDLI, 1999) – viel älter als das durchschnittliche Bestandesalter europäischer Wälder.

6.2.2 Einfluss der Höhe

In der Schweiz ist eine Zunahme des Kohlenstoffvorrates mit zunehmender Höhe in der organischen Auflage zu beobachten, vom Mittelland bis zu den Alpen. Auch das C/N-Verhältnis nimmt mit zunehmender Höhe zu, was auf eine geringere Zersetzung in höheren Lagen hindeutet. Höhere Lagen wie die Voralpen und Alpen sind von Nadelholz dominiert, was ein weiter Grund für die Kohlenstoffakkumulation in den Auflagen dieser Gebiete ist. Das Verhältnis des Kohlenstoffvorrates zwischen Mineralboden und organischer Auflage nimmt mit zunehmender Höhe ab. Während der Kohlenstoffvorrat im Mineralboden ungefähr gleich bleibt, steigt er in der organischen Auflage deutlich an, was zu einem engeren Verhältnis führt. In höheren Lagen hat die organische Auflage daher einen grösseren Einfluss auf die Gesamtvorräte. Dies deutet auch auf eine geringere bodenbiologische Aktivität und folglich auf eine schlechtere Durchmischung schwach zersetzten Humus' mit dem Mineralboden hin.

6.2.3 Einfluss des Klimas

Der Faktor Klima hat zwar einen Einfluss auf den Kohlenstoffvorrat, wie die Regressionsanalyse gezeigt hat. Dennoch wird er nicht für die Formel zur Bestimmung des Kohlenstoffvorrates benötigt, da er indirekt bereits durch den Faktor Höhe einfließt. Das Klima beeinflusst nicht nur die Produktivität der Bäume, sondern auch die Bodentemperatur. Die biochemische Aktivität im Boden nimmt im Allgemeinen unabhängig vom Klimabereich mit steigender Temperatur zu, wobei im Bereich zwischen 5 und 30°C eine Zunahme um 10°C die mikrobielle Aktivität um das 2- bis 3-fache ansteigen lässt (SWIFT et al., 1979). Bodenfrost führt bei vielen Organismen zum weitgehenden Erliegen ihrer Aktivität (SIMMONS et al., 1996). Einige Lebewesen können Kälteperioden als Sporen, Cysten oder als von Kokons umgebene Eier (Würmer) überdauern. Viele Arthropoden setzen im Winter ihren Gefrierpunkt durch einen hohen Glyceringehalt im Gewebe herab und können somit in gefrorenen Bodenhorizonten überdauern. Regenwürmer und Wirbeltiere dagegen suchen tiefere, frostfreie Horizonte auf. Die von der Strahlungsbilanz abhängige Bodentemperatur wirkt daher direkt auf die Zersetzungsprozesse. Dadurch, dass die Temperatur auch die Vegetation beeinflusst, spielt sie eine wichtige Rolle für das Vegetationswachstum und damit für die Quantität und Qualität der Streu (BERG, 1993; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

In den Regionen Mittelland und Voralpen ist das Spektrum der Wärmeverhältnisse nicht so gross wie beispielsweise in den Alpen oder auf der Alpensüdseite. Mit gehemmtem Abbau von organischer Substanz aufgrund hoher Temperaturen ist im Mittelland und in den Voralpen nicht zu rechnen (BLASER et al., 2005). Durchschnittliche Wärmeverhältnisse weist die Region Jura auf. Die biologische Aktivität ist dort an den Nordhängen oder während Trockenperioden gehemmt. In den Regionen Alpen und Alpensüdseite ist das Spektrum der Wärmeverhältnisse gross. Hier trifft man an bewaldeten Standorten die extremsten Bedingungen der Schweiz an. Mit gehemmtem Abbau von organischer Substanz ist sowohl aufgrund hoher als auch tiefer Temperaturen zu rechnen. An der oberen Waldgrenze, die im Innern der Alpen maximal 2350 müM erreicht, ist der Abbau der organischen Substanz aufgrund des kalten Klimas während des grössten Teils des Jahres gehemmt. Am ungünstigsten sind die Abbaubedingungen in nordexponierten, schattigen Hochlagen (BEDNORZ et al., 2000). Andererseits kann die biologische Aktivität in Trockenperioden zumindest oberflächlich durch hohe Bodentemperaturen eingeschränkt sein. Betroffen sind vor allem lichte Wälder in südlicher Exposition, die aufgrund ihres grossen Humusgehaltes dunkel gefärbt sind und viel Sonnenlicht absorbieren. Das grösste Potential für zu hohe Bodentemperaturen besteht demnach in den tiefsten Lagen der kontinental geprägten Inneralpen und der Alpensüdseite (BLASER et al. 2005).

Die Niederschlagsmenge weist keine signifikante Beziehung zu den Kohlenstoffvorräten in der organischen Auflage auf, wie aus der vorliegenden Untersuchung hervorging.

6.2.4 Einfluss des pH-Wertes

Der Faktor pH-Wert zeigte in der multiplen Regressionsanalyse einen klaren Einfluss auf den Kohlenstoffvorrat. In der Scatterplotmatrix ergab sich eine negative Korrelation, d.h. mit zunehmender Azidität nimmt die Auflagemächtigkeit zu und somit der Kohlenstoffvorrat. Auch BARITZ (2005) fand in seinen Untersuchungen diesen Zusammenhang. Der pH-Wert in der Bodenlösung kann die Verfügbarkeit lebenswichtiger Nährstoffe der Mikroorganismen wegen der Löslichkeitsveränderung der Ionen verringern (SWIFT et al., 1979, BÖTTSCHER und SPRINGOB, 2001).

Das Verhältnis von Mineralboden zur organischen Auflage zeigt für den pH-Wert ein interessantes Muster: Am grössten ist das Verhältnis im schwach sauren/neutralen Bereich. Dort ist der Kohlenstoffvorrat im Mineralboden im Gegensatz zur organischen Auflage relativ hoch. In den Säurebereichen, in denen die biologische Aktivität gehemmt ist und eine Akkumulation der organischen Auflage zu beobachten ist, ist das Verhältnis viel geringer.

Die Lebensbedingungen für die Bodenorganismen sind für die Bodenorganismen in alkalischen bis schwach sauren Böden ideal (SWIFT et al., 1979). Deshalb sind auch in diesen Gebieten – vor allem im Jura – die Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage am geringsten. Besonders langsam verläuft der Abbau der organischen Substanz unter sauren Bedingungen. Saure Böden sind sowohl in den Alpen als auch auf der Alpensüdseite häufig, mit einem Schwergewicht im Tessin und im Aar- und Gotthard-Massiv (BLASER et al., 2005). Günstige Abbaubedingungen (alkalische bis schwach saure Böden) findet man verbreitet am Alpennordhang der Region Voralpen, wo karbonathaltige Gesteine wie Kalke, Flysch oder quartäre Ablagerungen den Untergrund bilden. Aber auch im Mittelland kommen schwach saure bis alkalische Böden vor. Tief greifend saure Böden sind vor allem im Mittelland häufig, mit einem Schwergewicht in Gebieten mit Rissmoräne und Deckenschottern sowie auf Molassesanden. In den Voralpen finden sich saure Böden vor allem auf Nagelfluh und Sandsteinen (ZIMMERMANN et al., 2006).

6.3 Vergleich mit anderen Autoren

Der in dieser Arbeit ermittelte Kohlenstoffvorrat für die organische Auflagen Schweizer Waldböden ist deutlich höher als der von PAULSEN (1995) ermittelte Wert von 12 tC/ha (Tabelle 6-1). Inwieweit er in seiner Untersuchung Rohhumus mit eingeschlossen hat, ist unklar. Der Streuvorrat in den Wäldern der Schweiz wurde vom Autor selbst anhand von über 230 Stichproben in für den Schweizer Wald (ohne Südalpen) repräsentativen Waldbeständen untersucht und quantifiziert. PERRUCHOUD et al. (2000), die den Kohlenstoffvorrat in den Schweizer Waldböden errechneten, verwendeten für ihre Untersuchungen lediglich den Mineralboden. Dabei übernahmen sie den Kohlenstoffvorrat für die organische Auflage (12 tC/ha) von PAULSEN (1995).

Für den Mineralboden berechneten PERRUCHOUD et al. (2000) einen Kohlenstoffvorrat von 98 t/ha.

Tabelle 6-1: Autoren, die sich mit dem Kohlenstoffvorrat in Schweizer Waldböden befasst haben

Autoren	Mineralboden (t/ha)	Vorrat mit Auflage (t/ha)
Paulsen (1995)	136	12
Perruchoud et al. (2000)	98	12
Moeri (2007)	98	17.5 ± 1.6

Zwei Autoren untersuchten Alpine Böden und deren organischen Auflage. BEDNORZ et al. (2000) untersuchten die organische Auflage in Übergangsgesellschaften Wald–Alpine Tundra im Stillberg (Dischmatal) und errechneten einem Kohlenstoffvorrat von 17.6 bis 30 tC/ha in den F- und H-Lagen. RISCH et al. (2005) untersuchten Kohlenstoffpools im Schweizerischen Nationalpark. Sie untersuchten unterschiedliche Waldtypen und errechneten einen Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage von 20 bis 23 tC/ha im entsprechenden Gebiet. Aus den Untersuchungen dieser Arbeit kommt für die Region Alpen ein Kohlenstoffvorrat von 26.9 ± 3.6 t/ha (ohne Ahh) heraus. Der Wert ist ziemlich nahe am von BEDNORZ et al. (2000) berechneten Kohlenstoffvorrat und etwas höher als der von RISCH et al. (2005) im Schweizerischen Nationalpark. Der Grund für die etwas tieferen Kohlenstoffvorräte liegt womöglich in der Geologie: Der Nationalpark befindet sich in den Engadiner Dolomiten – das dortige Hauptgestein Dolomit ist dem Kalk sehr ähnlich. Dadurch ist der Oberboden eher pH-neutral und bietet somit gute Bedingungen für die Mikroorganismen.

6.4 Vergleich mit anderen Ländern

6.4.1 Österreich

Eine vollständige Kohlenstoffbilanz liegt aus Österreich vor (WEISS et al., 2000). Da dieses Land geographisch und klimatisch der Schweiz ähnelt, liegt es nahe, diese beiden Länder miteinander zu vergleichen. Der Kohlenstoffvorrat in den österreichischen Waldböden (organische Auflage und Mineralboden bis 50 cm Tiefe) wurde aus den Daten der österreichischen Waldbodenzustandsinventur abgeleitet. Da im Rahmen dieser Erhebung der organischen Auflage volumengerecht erhoben wurde, können die mittleren C-Vorräte je Hektar direkt als gewichtetes Mittel der Vorräte der einzelnen Bodentypen berechnet werden. Demnach beträgt der mittlere Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage österreichischer Waldböden 15 tC/ha, was 15% niedriger ist als der hier ermittelte Vorrat in Schweizer Waldböden. Dies ist möglicherweise auf den höheren Anteil an Kalkböden in Österreich zurückzuführen. Einen weiteren Grund sind die im Schnitt niedrigeren Höhenlagen in Österreich. In Österreich befindet sich nur 16% des Waldes über 1500 müM, während in der Schweiz

28% der Waldflächen in diesen Höhenlagen und darüber liegen. Die mit Laubhölzern bestockten Flächen haben nach der Österreichischen Waldinventur 2000/02, um insgesamt 54.000 ha zugenommen, während besonders deutlich der Rückgang an Nadelholzflächen um rund 65.000 ha zu beobachten war (WEISS et al., 2000). Für den Mineralboden mussten in beiden Ländern die Kohlenstoffkonzentrationen mit Hilfe von im Gelände geschätzten Grobskelettanteilen und Literaturdaten zur Ermittlung der Bodendichte auf Kohlenstoffmassen umgewandelt werden (WEISS, 2000; PERRUCHOUD et al, 2000). Der österreichische Wald enthielt im Jahr 1990 einen Kohlenstoffvorrat von 783±190 Mt C (Waldbiomasse: 320±42 Mt C; Waldboden: 463±185 Mt C). Pro Fläche entspricht dies für die Waldbiomasse 81±10 tC/ha und für den Waldboden 117±47 tC/ha. In der Schweiz ist der Kohlenstoffvorrat in der Waldbiomasse mit 128 tC/ha etwas höher und im Mineralboden mit 98 tC/ha etwas tiefer. Die Waldfläche Österreichs ist mit 3.924.000 ha (WEISS, 2000) mehr als dreimal so gross wie jene der Schweiz (Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Vergleich Kohlenstoffvorräte Schweiz, Österreich und Deutschland.

	Schweiz	Österreich	Deutschland
Waldfläche	1`234`000 ha	3`924`000 ha	11`075`798 ha
Waldbiomasse	128 tC/ha	81 tC/ha	120-190 tC/ha
Mineralboden	98 tC/ha	106 tC/ha	68 tC/ha
Auflage	17.5 tC/ha	15 tC/ha	20-35 tC/ha
Dichte Auflage	0.18 g/cm ³	0.22 g/cm ³	-

6.4.2 Deutschland

Für Wälder des norddeutschen Tieflandes errechnete BARITZ (2005) für die organische Auflage einen Kohlenstoffvorrat von 20-35 t/ha, wofür ihm 443 forstliche Inventurstandorte zur Verfügung standen. Im schweizerischen Mittelland ist der Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage lediglich 7.8 tC/ha (ohne Ahh). Im Vergleich zum Mittelland in der Schweiz sind im norddeutschen Tiefland sowohl die Azidität als auch der Stickstoffstatus im Durchschnitt höher (BARITZ, 2005). Ein weiterer Grund für den hohen Kohlenstoffvorrat ist die Vegetation. Im norddeutschen Tiefland besteht ein Großteil der heutigen Waldfläche aus Kiefernauaufforstungen. Neben den zwei heimischen Laubbaumarten Buche und Eiche hat auch die neophytische Nadelbaumart Douglasie mittlerweile einen festen Platz in der Reihe der verschiedenen anzustrebenden Waldentwicklungstypen eingenommen. Der Kohlenstoffvorrat je Hektar in Deutschland erreicht je nach Altersklasse und Baumart 120-190 tC/ha. Die Baumverteilung in Deutschland liegt bei 57% Nadelbäumen und 40% Laubbäumen (DIETER und ELSÄSSER, 2002). Der Anteil an Laubbäumen, welche Kohlenstoffreicher sind, ist also in Deutschland höher als in der Schweiz.

6.4.3 Andere Europäische Länder

Im Europäischen Vergleich sind die Kohlenstoffvorräte in Zentraleuropa die höchsten. Die höchsten Vorräte in Zentraleuropa liegen in der Schweiz. (LISKI et al. 2002). Grund dafür sind die Kohlenstoffreichen Böden im Tessin und in den Alpen (PERRUCHOUD et al, 1999). Die geringsten Kohlenstoffvorräte wurden im Süden Europas gemessen, in den Ländern Griechenland, Portugal, Italien und Spanien (LISKI et al. 2002). Aus Gründen des Wassermangels im mediterranen Raum, ist die Verwitterung weniger intensiv und die Bodenbildung demzufolge auch geringmächtiger (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002). Weiter sind im südlichen Europa die Wälder zum Teil weniger Dicht als in Zentral- und Nordeuropa. Dies hat einen geringeren Streueintrag und somit geringeren Kohlenstoffeintrag zur Folge (LISKI et al, 2002). Die Böden in den Skandinavischen Ländern speichern laut der Untersuchung von LISKI et al. (2002) weniger Kohlenstoff als jene der Schweiz. In Norwegen ist der Kohlenstoffvorrat 29 tC/ha, in Finnland 48 tC/ha, in Schweden 47 tC/ha und am höchsten in Dänemark mit 62 tC/ha (LISKI et al. 2002).

6.4.4 Nordamerika

In den USA wurde in einem Inventar der Kohlenstoffvorrat der organischen Auflage (L, F und H-Horizont) in den verschiedenen Regionen bestimmt. In Alaska wurde ein Kohlenstoffvorrat von über 30 tC/ha geschätzt. Im Westen der USA liegt der C-Vorrat bei ca. 28 tC/ha im Süden bei ca. 7 tC/ha und im Norden bei 18 tC/ha (SMITH und HEATH, 2002). Grund für die hohen Kohlenstoffvorräte im Westen sind die Gebirge (Rocky Mountains) und ein hoher Anteil an Nadelwäldern. Ähnlich hohe Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage finden sich in den Schweizer Alpen (27 tC/ha), wo die Topographie und das Klima ähnlich sind. In Alaska sind die tiefen Temperaturen und ebenfalls die vielen Nadelwälder verantwortlich für den hohen Kohlenstoffvorrat. Das höhere Vorkommen von Laubwäldern (Aspen-Birke, Buche und Ahorn) ist der Grund für einen tieferen Kohlenstoffvorrat im Norden. Im Süden sind die Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage wegen der hohen Temperaturen und der dadurch höheren Zersetzungsgeschwindigkeit sehr gering (SMITH und HEATH, 2002). In der Schweiz finden sich ähnliche Kohlenstoffvorräte in der Region Jura und im Mittelland. Auch da ist der Anteil an Laubwäldern relativ hoch.

6.5 Qualität und Quantität der Daten

Durch die grosse Datenmenge der vorliegenden Untersuchung (870 Standorte) kann – trotz Heterogenität des Untersuchungsgebietes – die Kohlenstoffverteilung der Schweizer Wälder (1.2 Mha) gut erklärt werden. Die Standorte sind in der ganzen Schweiz verteilt. Für die Produktionsregion Jura standen 73, das Mittelland 281, die

Voralpen 287, die Alpen 200 und die Alpensüdseite 39 untersuchte Standorte zur Verfügung. Für die verschiedenen Waldtypen ist die Anzahl Standorte ungefähr proportional zum Flächenanteil: 490 Nadelwaldstandorte und je 274 Laub- und Mischwaldstandorte (rund zwei Drittel der Schweizer Waldflächen sind Nadelwälder). Der Vergleich mit anderen Studien verdeutlicht, dass es sich hierbei um eine relativ grosse Anzahl Stichproben handelt.

KAUPPI et al. (1997) basierten ihre Aussagen über den Kohlenstoffvorrat im Finnischen Hochland für ein Gebiet von 14 Mha auf Daten aus 370 Bodenprofilen. Für die deutschen Wälder (10 Mha) wurde der Kohlenstoffvorrat mit Daten aus 103 Standorten errechnet (BURSCHEL et al. 1993). Und SILTANEN et al. (1997) standen 1462 Bodenprofil Daten zur Verfügung, um den Kohlenstoffvorrat in den kanadischen Wäldern (404 Mha) zu bestimmen. PERRUCHOUD et al. (2000) standen für die Berechnung der Kohlenstoffvorräte Schweizer Waldböden 168 Bodenprofile zur Verfügung.

Zu den Daten aus der WSL-Bodendatenbank gilt es allerdings zu bemerken, dass diese über einen grossen Zeitraum, von verschiedenen Personen und teilweise während unterschiedlichen Jahreszeiten zusammengetragen wurden. Darüber hinaus wurden einige der Waldflächen zwischenzeitlich durch Sturm oder Insektenbefall gestört. Sie sind jedoch trotzdem in die Untersuchung eingeflossen. Die beprobte Fläche Sumvitg im Bündnerland ist ein solches Beispiel: Der Wald wurde im Jahre 1999 durch den Lothar-Sturm zur Hälfte zerstört. Die organische Auflage der gerodeten Fläche wies eine deutlich geringere Mächtigkeit auf als der bewaldete Teil. Aufgrund dieser Beobachtung wird ersichtlich, wie schnell sich die organische Auflage durch Störungen und bei fehlender darüber liegender Biomasse abbaut. Weitere Waldschäden können durch Trockenheit, Borkenkäfer, eingeschleppte Organismen oder Waldbrände verursacht werden (BUWAL, 2005). Da die organische Substanz in der organischen Auflage nicht mineralisch stabilisiert ist, ist sie daher eine potentielle CO₂-Quelle, falls Wälder gestört oder umgenutzt werden.

7. Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen in dieser Diplomarbeit liefern einen genaueren Wert, 17.5 ± 1.6 tC/ha, für den Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage in Schweizer Waldböden. Die Auswertung von eigenen Feldaufnahmen und Laboranalysen ermöglichte es, vollständige Daten über die Kohlenstoffverteilung in Schweizer Waldböden zu erzeugen und diese in die bestehende, grössere Datenbank der WSL zu integrieren. Die neuen Parameter bezogen sich auf die Dichte und Kohlenstoffkonzentrationen aus Labordaten in den verschiedenen Bodenhorizonten. Eine statistische Analyse (multivariate Regressionsanalyse) der verschiedenen Parameter erlaubte die Korrelation der biotischen und abiotischen Faktoren auf den Kohlenstoffvorrat.

Die multivariate Regressionsanalyse zeigte, dass der Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage vor allem durch die Höhenlage, die Bodeneigenschaften und die Art der Vegetation gesteuert wird. Die Biomasse und die Niederschlagsmenge weisen keinen deutlichen Zusammenhang mit der organischen Auflage auf. Basierend darauf wurde ein Modell zur Berechnung des Kohlenstoffvorrates vorgeschlagen, welches sich lediglich auf die Parameter Waldtyp, pH-Wert und Höhe bezieht. Mit diesem Modell kann nun an jedem Waldstandort, an dem diese Parameter bekannt sind, der Kohlenstoffvorrat vorhergesagt werden. Der Vergleich der Kohlenstoffvorräte, berechnet aus den Standorten des 8 x 8 km Netzes (Kapitel 5.6) mit den berechneten Daten aus der WSL-Datenbank (Kapitel 5.8), zeigt sehr ähnliche Resultate. Interessant wäre ein Vergleich mit den Berechnungen auf einem engeren Rasternetz wie zum Beispiel dem 1 x 1 km-Netz, um eventuell eine noch genauere Schätzung des Kohlenstoffvorrates zu erhalten.

Die bisher publizierten Resultate von PAULSEN (1995) und PERRUCHOUD et al. (2000) wurden einerseits bestätigt, andererseits ergänzt durch die zusätzlichen Informationen über die organische Auflage, welche in deren Berechnungen und Abschätzungen teilweise nicht miteinbezogen wurde. Der Kohlenstoffvorrat in Schweizer Waldböden mit der organischen Auflage wurde von Perruchoud für die gesamte Waldfläche der Schweiz (1.123 Mio ha) auf 123.5 Mt C geschätzt. Aus der vorliegenden Arbeit ergibt sich neu ein Kohlenstoffvorrat in Schweizer Waldböden von 129 Mt C. Dieser Unterschied entspricht einer Gesamtmenge von 5.5 Mt C.

Die entwickelte Methode könnte in Zukunft systematisch auf die Schweizer Waldböden angewendet werden mit dem Ziel, die Berechnungsformel zu validieren und eventuell zu verfeinern. In künftigen Felderhebungen sollten die Auflagehorizonte miteinbezogen werden und eventuell der Kohlenstoffvorrat im Labor bestimmt werden, damit mehr Labordaten zu diesen Horizonten verfügbar sind.

8. Literaturverzeichnis

ADL, Sina M. (2003): The ecology of soil decomposition. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, London UK. 335 S.

BABEL, U. (1970): Gliederung und Beschreibung des Humusprofils in Mitteleuropäischen Wäldern. *Geoderma*, 5: 297-324.

BAFU (2006): Treibhausgasinventar. <http://www.klima-schweiz.ch/thg-inventar>. Zugriff: 15. Januar 2006.

BARITZ, R. (2003): Humus forms in forests of the Northern German lowlands. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik (Hrsg). *Geologisches Jahrbuch. Reihe F, Bodenkunde; Sonderheft 3*.

BEDNORZ, F. et al. (2000): Humus forms in the forest-alpine tundra ecotone at Sillberg (Dischmatal, Switzerland): Spatial heterogeneity and classification. *Arct., Antarct., Alp. Res. Vol. 32*, 21-29.

BEGON, M., Townsend, C. und Harper, J.L (1998): *Oekologie*. Spektrum Akademischer Verlag. 750 S.

BENS, O., Buczko U., Sieber, S., Hüttl, R. (2006): Spatial variability of O layer thickness and humus forms under different pine beech – forest transformation stages in NE Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 5-15.

BERG, B. et al. (1993): Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. *Biogeochemistry* 20: 127-159.

BERG, B. (2000). Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133: 13-22

BERG, B., Mc Clagherty, C. (2003): *Plant Litter – Decomposition, Humus Formatio, Carbon Sequestration*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 300 S.

BLASER, P. et al. (1997): Cryptopodzolic Soils in Switzerland. *European Journal of Soil Science*. 48: 411-423.

BLASER, P., Zimmermann, S., Luster, J., Walthert, L., Lüscher, P. (2005): Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag. 920 S.

BOSSUYT, H.; Six, J.; Hendrix, P. (2004): Rapid incorporation of carbon from fresh residues into newly formed stable microaggregates within earthworm casts. In: *European Journal of Soil Science*, 55, 393-399.

BÖTTCHER, J., Springob, G. (2001): A carbon balance model for organic layers of acid forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164: 399-405. WILEY-VCH Verlag GmbH Weinheim 2001

BRASSEL, P., Brändli, U. (1999): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, Stuttgart, Wien, Haupt. 442 S.

BURSCHEL, P., Kürsten E., Larson B.C. und Weber M. (1993): Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and options to its increase. *Water Air Soil Pollut.* 70: 325–340

BUWAL, WSL (Hrsg.) (2005): Waldbericht 2005 – Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft.

BUWAL (Hrsg) (2005): Vierter Bericht der Schweiz zuhanden der Uno-Klimakonvention.

CHRISTENSEN, T.R.; Johansson, S.; Callaghan, T.V.; Havström, M. (1999): On the potential CO₂ release from tundra soils in a changing climate. In: *Applied Soil Ecology*, 11, 127-134.

DIETER, M., Elässer, P. (2002): Carbon stocks and carbon stocks changes in the tree biomass of Germany's forest. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121(4): 195-210.

DIXON, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon A.M., Trexler, MC und Wisiniewski, J. (1994): Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190

DORIGO, G. (2003): Statistische Analyse in der Geographie – Skript zur Vorlesung. Universität Zürich.

ELLENBERG, H., Klötzli, F. (1972): Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Schweizerische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen Band 8,1972/ Heft 4

ENGLISCH, M., Weiss, P., Hacker, R. und Mutsch, F. (2001): Bodeninformation und das Kyoto-Protokoll: Der Waldboden als Kohlenstoffsенke – Hypothesen und Möglichkeiten der konkreten Messung. *Mitt. DBG* 96(2), 493-494

FINNEY, D.J. (1941): On the distribution of a variable whose logarithm is normally distributed. *J.R.Stat.Soc. B7*: 155-161.

FISCHER, H., Bens, O., Hüttli, R.F. (2002): Veränderung von Humusform, -vorrat und -verteilung im Zuge von Waldumbau-Massnahmen im Nordostdeutschen Tiefland. *Forstw. Cbl.* 121 (2002), 322-334.

FISCHLIN, A. et al. (2003). Bestandesaufnahme zum Thema Senken in der Schweiz. Verfasst im Auftrag des BUWAL. *Systems Ecology Report No. 29*, Institut Terrestrische Ökologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Schweiz: 86 S.

FITZE, P. (1998): Bodengeographie-Skript zur Vorlesung. Universität Zürich

FOO, L.Y., Lu Y., McNabb W.C., Waghorn G.C, Ulyatt M.J. (1997): Proanthocyanidins from *Lotus pedunculatus*. *Phytochemistry* 45, 1689-1696.

GAMS, H. (1932): Die klimatische Begrenzung von Pflanzenarealen und die Verteilung der hygrischen Kontinentalität. *Z.Ges.Erdk.* 1931/1932: 56-68, 178-198.

GAMS, H. (1935): Zur Geschichte klimatischen Begrenzung und Gliederung der immergrünen Mittelmeerstufe. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stift. Rübel Zür.* 12: 163-204.

GHOSH, S. (1996): A new graphical tool to detect non-normality. *Journal Royal Statistical Society B* 58, No.4, pp 691-702.

GISI, U. (1997): Bodenökologie. Stuttgart, New York: Thieme Verlag, 1997

GÖDDE, M.; David, M.B.; Christ, M.J.; Kaupenjohann, M.; Vance, G. F. (1996): Carbon mobilization from the forest floor under red spruce in the northeastern USA. In: Soil Biology and Biochemistry, 28, 1181-1189.

HAGEDORN, F. (2002): Kann der Schweizer Wald als CO₂-Senke dienen? Natur + Mensch 6 6-11

HAGEDORN, F., Spinnler, D., Bundt, M., Blaser, P. und Siegwolf, R. (2003): The input and fate of new C in two forest soils under elevated CO₂. Global Change Biology 9, 862-872.

HEIL, B. (2000): C- und N-Dynamik sowie Elementgradienten in Böden temperater Waldökosysteme. Dissertation am Forschungszentrum für Waldökosysteme der Universität Göttingen.

HEIM, A., Frey, B. (2004): Early stage litter decomposition rates for swiss forests. Biogeochemistry 70: 299-313

HOBBIE, S.; SCHIMEL, J.P.; TRUMBORE, S.; RANDERSON, J.R. (2000): Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils. In: Global Change Biology, 6, 196-210.

HOUGHTON, R.A., Hackler, J.F, Lawrence, K.T., (1999). The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. Science 285: 574-578

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2001): The Scientific Basis – Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Earth Print, 944 S.

JANSEN, I.A. et al. (2003): Europe`s Terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12 % of European Anthropogenic CO₂ Emissions. Science 300: 1538-1542.

KAUPPI, P.E., Posch, M., Hänninen, P., Henttonen, H.M., Ihalainen, A., Lappalainen, E., Starr, M. und Tamminen, P. (1997): Carbon reservoirs in peatlands and forests in the boreal regions of Finland. Silva Fennica 31: 13–25

LABHART, T. (1992): Geologie der Schweiz. Ott Verlag. Thun

LISKI, J., Perruchoud, D., Karjalainen, T. (2002): Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* 169: 159-175.

LÜSCHER, Peter (1991): Humusbildung und Humusumwandlung in Waldbeständen. Diss ETH Nr. 9572 Zürich

MICHEL, K.; Matzner, E.; Dignac, M.F.; Kögel-Knabner, I. (2006): Properties of dissolved organic matter related to soil organic matter quality and nitrogen additions in Norway spruce forest floors. In: *Geoderma*.

ODERMATT, A., Wachter, D. (2004): Schweiz: eine moderne Geographie. Verlag Neue Zürcher Zeitung. 268 S.

PAULSEN, J. (1995). Der biologische Kohlenstoffvorrat der Schweiz. Chur: Verlag Rüegger.

PELTONIEMI, M., Mäkipää, R., Liski, J. und Tamminen, P. (2004): Changes in soil carbon with stand age – an evaluation of a modelling method with empirical data. *Global Change Biology* 10: 2079-2091.

PERRUCHOUD, D. (1996) Modeling the Dynamics of Nonliving Organic Carbon in a Changing Climate: A Case Study for Temperate Forests. Diss. ETHZ No. 11900.

PERRUCHOUD, D., Kienast, F., Kaufmann, E., Bräker, O. (1999) 20th Century Carbon Budget of Forest Soils in the Alps. *Ecosystems* (1999) 2:320-337. Springer Verlag.

PERRUCHOUD, D. (2000): Contemporary carbon stocks of mineral forests soils in the Swiss Alps. *Biogeochemistry* 50: 111-136

PRENTICE, I. C., Farquar, G.D., Fasham, M.J.R. (2001): The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In Houghton J.T. et al. (eds). *Climate Change 2001. The scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge 183-237

PRESCOTT C.E., Maynard, D.G., Laiho, R. (2000). Humus in northern forests: friend or foe? *Forest Ecology and Management* 133: 23-36

REHFUESS, K.E. (1990): Waldböden – Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. 2.Auflage Verlag Paul Parey, Hamburg Berlin.

RICHARD, F. (1978): Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz“, Band 1. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen Birmensdorf.

RISCH, A.C. et al. (2004): Above- and belowground carbon and nutrient pools during succession following land use change in subalpine ecosystems of the Central Europeans Alps. Diss., ETHZ No. 15368

SACHS, Lothar (1984): Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden. Springer Berlin.

SCHEFFER, F., Schachtschabel, P.(2002). Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg Berlin, 593S.

SCHIMMEL, D.S. (1995): Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* 1: 77-91.

SCHLESINGER, W.H. (1977): Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 8:51-81.

SCHLESINGER, W.H., Andrews, J.A., (2000): Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* 48: 7-20.

SCHLICHTING, Ernst. (1986): Einführung in die Bodenkunde. Pareys Studentexte 58. Hamburg, 131 Seiten.

SCHLUMPF, N. (2004): Schwarze Böden der Südschweiz. Diplomarbeit. Geografisches Institut der Universität Zürich. 114 Seiten

SILTANEN,R.M, Apps, M.J., Zoltai, S.C., Mair, R.M., Strong, W.L. (1997) A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils. Technical Report. Canad. Forest Service, Northern Forestry Service. Edmonton, Alberta

SIMMONS, J.A., Fernandez, I.J., Briggs, R.D., Delaney, M. T. (1996): Forest floor carbon pools and fluxes along a regional climate gradient in Maine, USA. *Forest Ecology and Management* 84: 81-95.

SIX, J.; Conant, R.T. ; Paul, A.; Paustian, K. (2002) : Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. In: *Plant and Soil*, 241, 155–176.

SJÖBERG, G. (2003): Lignin degradation: Long-term effects of nitrogen addition on decomposition of forest soil organic matter. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala.

SMITH, James E., L.S. Heath (2002): A Model of Forest Floor Carbon Mass for United States Forest Types. United States Department of Agriculture, Research Paper NE-722

SPONAGEL, H. et al. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland. Stuttgart : Schweizerbart.

STAHEL, Werner.A. (2000). *Statistische Datenanalyse. Eine Einführung für Naturwissenschaftler*. Vieweg.

STARY Minikus, N. (2006): Schwarze Böden der Südschweiz. Organo-geochemische Charakterisierung von Böden auf carbonatischem und silikatischem Ausgangsgestein. Diplomarbeit. Geografisches Institut der Universität Zürich. 114 Seiten.

SWIFT, M.J., O.W. Heal and J.M. Anderson (1979). *Decomposition in terrestrial ecosystems*. *Studies in Ecology* Vol 5, Oxford, London, 372p.

THÜRIG, Esther (2005): Carbon budget of Swiss forests: evaluation and application of empirical models for assessing future management impacts. Diss ETH Nr 15872, Zürich

UNFCCC (1997): Kyoto Protocol. <http://www.unfccc.de/resource>.

VAN ACKER, S., Plemper van Balen G.P., van den Berg D.J., Bast A., van der Vijgh W.J.F. (1998): Influence of iron chelation on the antioxidant activity of flavonoids. *Biochemistry and Pharmacology* 56, 935-943.

WALTHERT, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J., Lüscher, P. (2004). Waldböden der Schweiz. Band 1 Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag.

WEISS, P., Schieler, K., Schadauer, K., Radunsky, K., English, M. (2000): Die Kohlenstoffbilanz des österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll. Umweltbundesamt-Monographien, Wien.

YANAI, R.D., Currie, W.S., Goodale, C.L. (2004): Soil Carbon Dynamics after Forest Harvest: An Ecosystem Paradigm Reconsidered. *Ecosystems* 6: 197-212.

ZIMMERMANN, S., Luster, J., Blaser, P., Walthert, L., Lüscher, P. (2006): Waldböden der Schweiz. Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag. 848 S.

ZIMMERMANN, Niklaus.E. KIENAST, Felix (1999): Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: Species versus community approach. *Journal of Vegetation Science* 10: 469-482, 1999 IAVS; Opulus Press Uppsala.

ZIMMERMANN, S., Hagedorn, F., Walthert, L. (2004) Erfassung des Kohlenstoffvorrats in Schweizer Waldböden: Wunschdenken und Realität. *Bulletin BGS* 27: 11-16

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Der globale C-Kreislauf mit den wichtigsten Speichern	4
Abbildung 2-2: Kohlenstoffkreislauf der Schweiz	5
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Humusformen	10
Abbildung 2-4: Mull	13
Abbildung 2-5: Moder	13
Abbildung 2-6: Rohhumus	14
Abbildung 3-1: Die fünf Produktionsregionen der Schweiz	16
Abbildung 4-1: Bilder der Probenahme	23
Abbildung 4-2: Messung der Auflagemächtigkeit	23
Abbildung 4-3: Standorte aus WSL-Datenbank	26
Abbildung 4-4: Boxplot der Höhe der fünf Produktionsregionen	29
Abbildung 4-5: Boxplot der Neigung (in %) der fünf Produktionsregionen	30
Abbildung 4-6: Boxplot der Wärme	31
Abbildung 5-1: Mächtigkeit der untersuchten Standorte	34
Abbildung 5-2: Mächtigkeit des F- und H-Horizontes in Abhängigkeit mit der Höhe.	36
Abbildung 5-3: Abnahme des maximalen Fehlers,	37
Abbildung 5-4: C/N-Verhältnisse	39
Abbildung 5-5: C/N-Verhältnisse mit der Höhe	39
Abbildung 5-6: C/N-Verhältnisse im L-Horizont für Laub- und Nadelwald	40
Abbildung 5-7: C/N-Verhältnis im F-Horizont für Laub und Nadelwald	40
Abbildung 5-8: C/N-Verhältnis im H-Horizont für Laub- und Nadelwald	41
Abbildung 5-9: Höhenabhängigkeit des C/N-Verhältnisses im L-Horizont	41
Abbildung 5-10: Höhenabhängigkeit des C/N-Verhältnisses im F-Horizont	42
Abbildung 5-11: Kohlenstoffvorräte der untersuchten Standorte	43
Abbildung 5-12: Kohlenstoffvorräte der einzelnen Horizonte	43
Abbildung 5-13: Veränderung der Kohlenstoffvorräte mit der Höhe	44
Abbildung 5-14: Scatterplotmatrix. Variablen	46
Abbildung 5-15: Tukey-Anscombe-Plot, Normal plot und T3plot Modell 1.	48
Abbildung 5-16: Tukey-Anscombe-Plot, Normal plot und T3plot Modell 2.	49
Abbildung 5-17: Tukey-Anscombe-Plot, Normal plot und T3plot Modell 3.	50
Abbildung 5-18: Kohlenstoffvorräte der organischen Auflage in den drei Waldtypen	53
Abbildung 5-19: Kohlenstoffvorrat der einzelnen Horizonte in den drei Waldtypen	54
Abbildung 5-20: Mächtigkeit der organischen Auflage i	54
Abbildung 5-21: Streudiagramme der Kohlenstoffvorräte der einzelnen Horizonte	55
Abbildung 5-22: Kohlenstoffvorrat der verschiedenen Horizonte	56
Abbildung 5-23: Kohlenstoffvorrat nach Wärme	57
Abbildung 5-24: Zusammenhang des Kohlenstoffvorrates mit Niederschlag	57
Abbildung 5-25: Verhältnis Mineral/Auflage in vier Höhenstufen eingeteilt	58
Abbildung 5-26: Verhältnis Mineral/Auflage	59
Abbildung 5-27 :Verhältnis Mineral/Auflage nach Säuregrad	59
Abbildung 5-28: Streudiagramm pH-Verhältnis Mineral/Auflage	60
Abbildung 5-29: Ober- und unterirdischer Kohlenstoffvorrat in Schweizer Waldböden	61
Abbildung 5-30: Korrelation Biomasse/organische Auflage	62
Abbildung 5-31 : Kohlenstoffvorräte in Auflage, Mineralboden und Biomasse	63

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3- 1: Waldfläche nach Höhenlage und Bewaldungsprozent	17
Tabelle 4-1: Mittel der C-Werte (in Prozent) in den einzelnen Horizonten.....	25
Tabelle 4-2: Codes der Wärme.....	31
Tabelle 5- 1: Mittlere Mächtigkeit der Humuslagen.....	35
Tabelle 5-2: Dichten nach Horizonten aufgeteilt.....	38
Tabelle 5-3: Gemessener Kohlenstoffvorrat in den verschiedenen Horizonten.....	45
Tabelle 5-4: Berechneter Kohlenstoffvorrat der WZI-Standorte.....	52
Tabelle 5-5: Gemessene Kohlenstoffvorrat nach Produktionsregion aufgeteilt:	52
Tabelle 6-1: Autoren, die sich mit dem Kohlenstoffvorrat befasst haben.....	69
Tabelle 6-2: Vergleich Kohlenstoffvorräte Schweiz, Österreich und Deutschland.....	70