

GIS-basierte Kohlenstoffvorratsinventur:

Waldböden an der CarboEuropelP Untersuchungsfläche Lägeren

Diplomarbeit von Linda Wehrli



Betreuung: Dr. Alexander Heim
PD Dr. Werner Eugster

Fakultätsvertretung: Prof. Dr. Michael W.I. Schmidt

**Universität Zürich
Geographisches Institut
Abteilung Physische Geographie**

Juli 2006



GIS-basierte Kohlenstoffvorratsinventur:

**Waldböden an der
CarboEuropelP
Untersuchungsfläche Lägern**

Diplomarbeit von Linda Wehrli

Juli 2006

Titelbild: Blick auf eine Lotharschadenfläche in der
Untersuchungsfläche am Lägern Südhang
Fotos: Linda Wehrli

Vorwort

Bereits als Kind kannte ich die Tonvorkommen in der Umgebung unseres Gartens. Mein Bruder und ich liebten es, diesen tonreichen Boden abzubauen und daraus grossartige Skulpturen zu kreieren. Schon damals war ich begeistert von der Natur und verbrachte meine Freizeit am liebsten draussen. Ich war kaum davon abzuhalten, mit meinem Bruder unsere Umgebung mit viel ursprünglicher Natur zu erkunden.

Im letzten Sommer während meiner Feldarbeit am steilen und zum Teil Natur belassenen Lägern-Südhang fühlte ich mich oft in diese Zeit zurück versetzt: Laub einsammeln, graben, bohren, pH-Wert bestimmen, Fühlproben nehmen. Es war eine sehr schöne und intensive Zeit, den ganzen Tag im Wald verbringen zu können.

Zu einem späteren Zeitpunkt der Diplomarbeit, bei der Probenaufbereitung und bei der Auswertung der Resultate, hat mich das Thema Waldökosysteme vollends gepackt und ich wusste, dass ich das richtige Thema gewählt hatte.

* * *

Der Boden als wichtiger Teil terrestrischer Ökosysteme im globalen Kohlenstoffkreislauf rückte in den letzten Jahren immer mehr ins Zentrum der aktuellen Klimaforschung.

Der Stellenwert des Bodens als Lebensraum und Substrat wurde schon viel früher erkannt und stand im Blickfeld menschlichen Interesses, wie untenstehende Zitate zeigen:

„Es gibt in der Nation keinen wichtigeren, keinen der Betrachtung würdigeren Gegenstand als den Boden. Eine Nation, die ihren Boden zerstört, zerstört sich selbst.“

Albert Frédéric Fallou (1862), Bildungsminister von Louis Napoléon

Die ganz dünne Decke zwischen dem Grundwasserspiegel und dem grünen Pflanzenkleid, das ist der Reichtum eines Landes.

Raul H. Francé (1922), Chemiker, Mikrobiologe und Bodenökologe

Dank

Ein herzlicher Dank geht an alle Personen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vor allem geht mein Dank an:

Prof. Dr. Michael W. I. Schmidt für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit, für die Betreuung und die Vermittlung von guten Kontakten. Besonders möchte ich mich für die Gelegenheit, das Poster für den Swiss Global Change Day 2006 in Bern zu erstellen und gestalten, bedanken.

Dr. Alexander Heim für die stetige Betreuung dieser Diplomarbeit und für die grosse Mithilfe bei der Erstellung des Posters für den Swiss Global Change Day, sowie für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts. Seine fachlich kompetente und hilfreiche Unterstützung war mir eine grosse Hilfe.

PD Dr. Werner Eugster vom Institut für Pflanzenwissenschaften der ETH Zürich für die Initiierung dieser Diplomarbeit und für die Unterstützung mit vielen guten Ideen und Tipps während der ganzen Diplomarbeitszeit.

Herrn Bruno Kägi vom Labor des Geographischen Instituts. Seine Unterstützung bei der Laboranalyse war mir eine grosse Hilfe. Herzlichen Dank für die wohlwollende Betreuung während den Untersuchungen im Labor. Ich habe bei ihm nicht nur einen guten Einblick in die Laborarbeit erhalten, sondern auch viel Neues dazugelernt.

PD Dr. Markus Egli für die Mithilfe bei der Planung und Vorbereitung der Feldarbeit. Seine Inputs waren sehr nützlich und gut umsetzbar.

PD Dr. Ross Purves. Bei Problemen und Fragen rund ums GIS hatte er stets ein offenes Ohr. Herzlichen Dank für das Interesse an meiner Arbeit und für die hilfreichen Tipps vor allem bei der Datenanalyse.

Förster Philipp Vock vom Forstbetrieb Wettingen. Seine guten Hinweise zum Untersuchungsgebiet und seine kooperative Unterstützung erleichterten mir meine Feldarbeit und die Zusammenstellung des Exkursionsführers sehr.

Die AGIS Koordination des Kantons Aargau für die prompte und grosszügige Bereitstellung der Datensätze, was meine Arbeit ungemein erleichtert hat.

Karin Sörgel vom Isolab am Institut für Pflanzenwissenschaften der ETH Zürich. Herzlichen Dank für die Unterstützung und Mithilfe bei der Bestimmung der Isotopensignatur.

Nadine Rühr, Doktorandin am Institut für Pflanzenwissenschaften der ETH Zürich. Sie untersucht die Wurzelatmung am CarboEuropeIP Hauptstandort Lägern. Mit ihr konnte ich Informationen über die Lägern austauschen. Es hat mir viel bedeutet, mit dir über unser gemeinsames Untersuchungsgebiet zu diskutieren.

Simone Bircher und Katrin Hächler. Meine beiden Mitbewohnerinnen haben vor allem in moralischer Hinsicht einen grossen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet! Ich bedanke mich ganz herzlich für euere grosse Unterstützung durch die vielen guten Gespräche. Ohne euch wären manche Stunden zu Hause sehr einsam geworden. Für das Begleiten und die Mithilfe bei der Feldarbeit möchte ich mich bei Simone Bircher und Kristina Roth speziell bedanken. Ebenso möchte ich mich bei meinen StudienkollegInnen bedanken. Die gemütlichen und humorvollen Kaffeepausen werde ich nie vergessen. Vielen, vielen Dank!

Simon Maurer. Er war während meiner ganzen Diplomarbeitszeit, in fröhlichen und anstrengenden Momenten, mit seiner verständnisvollen und motivierenden Art eine grosse Hilfe. Dafür danke ich dir ganz herzlich.

Ein grosser Dank gilt meiner Familie. Meinem Bruder, Philipp Wehrli, danke ich für die Begleitung und Mithilfe bei der Feldarbeit. Der grösste Dank gilt jedoch meinen Eltern, Markus und Rosmarie Wehrli: Sie standen mir während des ganzen Geographie-Studiums unterstützend zur Seite. Euer Interesse an meiner Diplomarbeit und eure grosse Mithilfe bei der Feldarbeit, das aufmerksame Korrekturlesen der Arbeit, sowie die aufbauenden Komplimente waren unentbehrlich. Ich danke euch von Herzen!

Juni 2006

Linda Wehrli

Zusammenfassung

Das Ziel des CarboEuropeIP (Integrated Project), ein Projekt des 6. Rahmenprogramms der Europäischen Union, ist die Quantifizierung der Kohlenstoffbilanzen der wichtigsten Ökosystemtypen in ganz Europa. An über 100 Standorten wird der CO₂-Austausch zwischen Atmosphäre und Ökosystem mittels Eddy-Kovarianz-Methode durch Sensoren über der Vegetation gemessen. Mit Hilfe mikrometeorologischer Modelle kann die Fläche (genannt Footprint Area), von welcher das am Turm durch diese Sensoren gemessene CO₂ stammt, berechnet und dadurch die Kohlenstoffbilanz für einen Ökosystemtyp ermittelt werden. Die Eigenschaft, Kohlenstoff aufzunehmen und zu speichern, wird im Rahmen der Klimakonvention als Senkenleistung für atmosphärisches CO₂ anerkannt (Kyoto Protokoll).

Am Schweizer Hauptstandort Lägern wird innerhalb des CarboEuropeIP die Kohlenstoffbilanz eines montanen Mischwaldes im Schweizer Jura untersucht. Damit die Resultate der Kohlenstoffbilanz genauer interpretiert werden können, sind detaillierte Informationen über den Kohlenstoffvorrat in Boden und Biomasse und dessen Verteilung in der Footprint Area notwendig. In der vorliegenden Diplomarbeit wurde der Kohlenstoffvorrat der Streu, des Oberbodens (0–10 cm-Horizontes) und des 0–40 cm-Horizontes, sowie der Stickstoffvorrat des Oberbodens (0–10 cm) und dessen Verteilung in der Footprint Area untersucht. In der ca. 77 ha grossen Untersuchungsfläche wurden an 27 Stichprobenstandorten Bodenproben bis 40 cm Tiefe, Streuproben und Dichteproben entnommen.

Die Resultate zeigen, dass in der Footprint Area das Ausgangsmaterial der Bodenbildung einen entscheidenden Einfluss auf Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat im Ober- und Unterboden hat. Aufgrund der unterschiedlichen Substrate sind die Vorräte in der Footprint Area unregelmässig verteilt. Die Böden auf Malmkalk speichern beispielsweise doppelt soviel Kohlenstoff in den obersten 10 cm wie die Böden auf Sandstein der Unteren Süsswassermolasse. Im Untersuchungsgebiet sind in der Streu durchschnittlich 5 t C/ha, in den obersten 10 cm des Bodens 52 t C/ha und in den obersten 40 cm 120 t C/ha gespeichert. Der Stickstoffvorrat im Oberboden (0–10 cm) beträgt durchschnittlich 4 t N/ha. Anhand der ermittelten Vorräte kann das Untersuchungsgebiet Lägern als repräsentativer Standort für einen montanen Mischwald im Schweizer Jura betrachtet werden. Die C- und N-Vorräte in der Footprint Area liegen in einem ähnlichen Bereich zu Vergleichsdaten aus dem Schweizer Jura. Die Ergebnisunsicherheit der Vorratsabschätzung liegt im Bereich von 10%. Die hohe Geländevariabilität der Untersuchungsfläche am Lägern-Südhang stellte sich dabei als grösster Unsicherheitsfaktor heraus.

Um Veränderungen des Kohlenstoffvorrates im Boden aufzeigen zu können, ist eine Wiederholung der Vorratsinventur sinnvoll, allerdings erst wenn aufgrund der am Eddy-Messturm ermittelten jährlichen C-Bilanzen eine Veränderung des C-Pools im Boden im Bereich der Ergebnisunsicherheit erwartet werden kann.

Abstract

The goal of CarboEurope IP (Integrated Project), a project within the 6th framework programme of the European Union, is the quantification of the carbon budget of the most important ecosystem types within Europe. At more than 100 sites CO₂-exchange between the atmosphere and the ecosystem is measured using the eddy covariance method. At the eddy flux tower CO₂ is measured above the vegetation. Micrometeorological models are then used to compute the source and sink areas (called footprint area) of this CO₂. Thus, the carbon budget of a certain ecosystem can be determined. The uptake and storage of carbon is recognised as a sink for atmospheric CO₂ in the framework of climate conventions (Kyoto Protocol).

The Swiss main site Lägern contributes to the CarboEuropeIP efforts with the quantification the carbon budget of a montane mixed forest in the Swiss Jura mountains. In order to improve interpretation of the carbon flux data, detailed information about the carbon pool in the soil and its distribution over the footprint area is essential. Therefore, in this diploma thesis the carbon stock of the litter, the topsoil (0–10 cm depth) and the layer of 0–40 cm depth, as well as the nitrogen stock of the topsoil (0–10 cm depth) and its variation across the footprint area were surveyed. Soil samples down to 40 cm depth, litter samples and bulk density samples were taken at 27 sampling sites within the investigation area, which is approximately 77 ha in size.

Within the footprint area the results show a strong correlation between the source material of the pedogenesis and the carbon- and nitrogen stocks in the topsoil and subsoil. Additionally, it is evident that these reservoirs are heterogeneously distributed over the study area. For instance, the soils on limestone contain twice as much carbon in the top 10 cm as soils on sandstone of the lower freshwater molasse. Averaged over all soils, carbon stocks are 5 t C/ha in the litter, 52 t C/ha in the top 10 cm and 120 t C/ha in the top 40 cm. The nitrogen stock of the topsoil (0–10 cm depth) amounts to 4 t N/ha on average. The calculated stock data show that the main site Lägern can be considered as representative for a montane mixed forest in the Swiss Jura. The carbon and nitrogen stocks in the soils of the footprint area show results similar to other sites in the Swiss Jura. The carbon and nitrogen stocks were quantified with an empirical accuracy of 12% and 10%, respectively. The heterogeneous spread of reservoirs at the investigation site Lägern thereby proved to be the main factor of uncertainty.

To determine changes in the carbon stocks of the soil, a repetition of the stock inventory is recommended. However, this should be started at a stage only when a measurable change of the carbon pool in the soil (data calculated on the basis of the yearly carbon flux data measured at the eddy flux tower) can be expected that exceeds the above mentioned level of uncertainty.

Inhalt

Vorwort

Dank

Zusammenfassung

Abstract

Inhalt i

Abbildungsverzeichnis vi

Tabellenverzeichnis viii

1 Einleitung 1

1.1 Der globale Kohlenstoffkreislauf 1

1.2 Terrestrische Ökosysteme im globalen Kohlenstoffkreislauf 2

1.3 Das Kyoto-Protokoll und die Rolle von Kohlenstoffsenken 3

1.4 Die Rolle des organischen Kohlenstoffs im Boden 3

1.5 Das CarboEurope Projekt 5

1.5.1 Ziel 5

1.5.2 Methodik..... 6

1.5.3 Der Standort Lägern 7

2	Fragestellung	8
2.1	Kontext dieser Diplomarbeit	8
2.2	Fragestellung und Ziele	9
2.2.1	Kohlenstoffkonzentration und -vorrat in den Böden der Footprint Area	9
2.2.2	Die Verteilung des stabilen Isotops ^{13}C und der Stickstoffvorrat (N-Vorrat)	9
2.2.3	Datenbank „GIS-Lägern“	9
3	Untersuchungsgebiet	10
3.1	Geographischer Überblick	10
3.2	Geologie	11
3.3	Klima	14
3.4	Vegetation	16
3.4.1	Typische Pflanzengesellschaften	16
3.4.2	Waldgeschichte	18
3.5	Bodeneigenschaften	18
3.5.1	Bodenbildung	18
3.5.2	Wasserhaushalt und Humusformen	19
3.5.3	Die Bodentypen in der Footprint Area	19
4	Methoden	23
4.1	Generelle Vorgehensweise	23
4.2	Erfassung der räumlichen Variabilität des Bodens	24
4.3	Probenahmemuster: GIS-basierte Konzeptkarte	25
4.3.1	Parameter	25
4.3.2	Konzeptkarte	27
4.3.3	Standortwahl	28
4.4	Probenarten	29
4.4.1	Bodenproben: Mischprobe	29
4.4.2	Dichteproben	29
4.4.3	Streuproben	29

4.5	Probenahmeplan	30
4.5.1	Mischproben	30
4.5.2	Dichteproben	31
4.5.3	Streuproben	31
4.6	Labormethoden	32
4.6.1	Probenaufbereitung	32
4.6.2	Bestimmung der chemischen Bodeneigenschaften	32
4.6.3	Bestimmung der physikalischen Bodeneigenschaften	35
4.7	Bestimmung der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte	36
4.8	Statistische Methoden	37
4.8.1	Ergebnisunsicherheit und Qualitätssicherung	37
4.8.2	Fehlerfortpflanzung	38
4.8.3	Faktorenanalyse mit ANOVA (Analysis of Variance)	39
4.8.4	Ergebnisunsicherheit bei der Kohlenstoffvorratsinventur	40
4.8.5	Extrapolation fehlender Werte	40
4.9	Kohlenstoffvorratskarte	43
4.9.1	Kartiereinheiten	43
4.9.2	Interpolation in GIS	43
5	Resultate	44
5.1	Der organische Kohlenstoff	45
5.1.1	C _{org} -Konzentrationen	45
5.1.2	Vorräte	46
5.1.3	Extrapolation fehlender Werte	48
5.1.4	Das stabile Isotop ¹³ C	49
5.2	Der Stickstoff und das C/N-Verhältnis	50
5.2.1	Konzentrationen und Vorräte	50
5.2.2	C/N-Verhältnisse	52
5.3	Die Streu	53
5.3.1	Humusform, C-Konzentrationen und Vorräte	53
5.4	Dichte, Skelettgehalt und pH-Wert	54
5.4.1	Scheinbare Dichte, Feinerdedichte, Skelettgehalt	54
5.4.2	pH-Werte	55

5.5	Kohlenstoffvorratsinventur	56
5.5.1	Oberboden 0–10 cm	56
5.5.2	Kohlenstoffvorrat 0–40 cm	62
5.5.3	Verteilung des Gesamt C-Gehaltes in der Footprint Area	63
5.5.4	Kohlenstoffvorratskarten nach Geländeeinheiten	64
5.6	Stickstoffinventur	67
5.6.1	Stickstoffvorrat im Oberboden	67
5.6.2	Kartiereinheiten für die Stickstoffvorratsinventur	68
5.6.3	Stickstoffvorratskarten nach Vorratseinheiten	68
5.7	Alternative Methode zur Berechnung des Kohlenstoffvorrates in der Footprint Area	70
6	Diskussion	71
6.1	Der organische Kohlenstoff im Boden der Footprint Area	71
6.1.1	Die räumliche Verteilung des Kohlenstoffvorrates im Untersuchungsgebiet ..	71
6.1.2	Vergleich mit anderen Kohlenstoffinventuren	75
6.1.3	Das stabile Isotop $\delta^{13}\text{C}$	76
6.2	Evaluation der Vorratsinventur – Vergleich mit der räumlichen Interpolationsmethode Kriging	77
6.3	Der organische Kohlenstoff in der Streu	79
6.3.1	Der Kohlenstoffvorrat in der Streu	79
6.3.2	Die räumliche Verteilung in der Footprint Area	80
6.4	Der Stickstoff	81
6.4.1	Der Stickstoffvorrat im Oberboden der Footprint Area	81
6.4.2	Vergleich mit anderen Stickstoffinventuren	81
6.5	Ergebnisunsicherheit: Wie genau ist die Vorratsinventur?	83
6.5.1	Genauigkeit der Vorratsinventuren	83
6.5.2	Können Veränderungen des Kohlenstoffvorrates auf Grund dieser Unsicherheit durch eine erneute Beprobung aufgezeigt werden?	85
6.6	Bedeutung der Ergebnisse für den CarboEuropelP Hauptstandort Lägern	88
6.6.1	Repräsentativität des Hauptstandortes Lägern	88
6.6.2	Boden, Streu und Biomasse	88

6.7	Schwierigkeiten bei Feldarbeit und Methoden	90
6.7.1	Geländevariabilität und Sampling Design	90
6.7.2	Statistische Analyse	91
7	Schlussfolgerungen	92
8	Literaturverzeichnis	94
9	Anhang	100
9.1	Datentabellen	100
9.1.1	Standorte	100
9.1.2	Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat	102
9.2	Klassifikation der Standortseigenschaften	103
9.2.1	Horizontbezeichnung bei der Humusform	103
9.2.2	Klassifikation der Humusformen	104
9.3	Datenkatalog	105
9.4	Konzeptkarten	106
9.5	Geologie	111
9.5.1	Geologische Zeittafel	111
9.5.2	Profil durch die Läger Südfanke	112

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Der globale Kohlenstoffkreislauf unter menschlichem Einfluss	1
Abb. 2:	Lagekarte der CarboEuropelP Hauptstandorte in Europa	5
Abb. 3:	Schema der Footprint (Source) Area einer Messung an einem Messturm und die charakteristische Dimension der entstehenden Fläche	6
Abb. 4:	Footprint Area am Hauptstandort Lägern	6
Abb. 5:	Eddy-Messturm (links), montaner Laubmischwald mit Bärlauchbewuchs (rechts)	7
Abb. 6:	Übersicht und Lage der Untersuchungsfläche	10
Abb. 7:	Geologische Karte der Lägern	13
Abb. 8:	Niederschlag - Temperatur Diagramm des Jahres 2005	14
Abb. 9:	Mittlere jährliche Windrose des Jahres 1998	15
Abb. 10:	Buchenhallenwald (links), Kalk und Wärme liebende Pflanzen: Frühlingsplatterbse (oben), Mandelblättrige Wolfsmilch (unten mitte) Immenblatt (unten rechts)	17
Abb. 11:	Rendzina	19
Abb. 12:	Terra Fusca	20
Abb. 13:	Braunerde	21
Abb. 14:	Kalkbraunerde	21
Abb. 15:	Generelle Vorgehensweise und Arbeitsablauf	23
Abb. 16:	Einflussfaktoren auf die Kohlenstoffspeicherung im Waldboden	24
Abb. 17:	Probenahmestandorte in der Footprint Area	28
Abb. 18:	Schematische Darstellung der Beprobungsfläche und der Probenahme an den 27 Untersuchungsstandorten	30
Abb. 19:	Schematische Darstellung der Fehlerquellen bei einer Untersuchung	37
Abb. 20:	Kohlenstoffkonzentrationen nach Bodentyp und Beprobungstiefe	45
Abb. 21:	Kohlenstoffvorräte in den obersten 10 cm nach Bodentyp und Beprobungstiefe	46
Abb. 22:	Kohlenstoffvorräte in den obersten 40 cm nach Bodentyp und Beprobungstiefe	47

Abb. 23:	Stickstoffkonzentrationen im Oberboden an den 27 Untersuchungsstandorten	50
Abb. 24:	Stickstoffvorräte im Oberboden an den 27 Untersuchungsstandorten	51
Abb. 25:	C/N-Verhältnisse der obersten 10 cm des Mineralbodens nach Bodentypen	52
Abb. 26:	pH-Werte der 27 Stichprobenflächen nach Bodentypen	55
Abb. 27:	Kohlenstoffvorrat nach Kartiereinheiten: Wertebereich der einzelnen Einheiten	56
Abb. 28:	Zusammenhang zwischen Wasserhaushalt und Kohlenstoffvorrat im Boden	57
Abb. 29:	Einfluss der Vegetation auf den Kohlenstoffvorrat im Boden	58
Abb. 30:	Kohlenstoffvorrat im Oberboden (0–10 cm) nach Ausgangsmaterial.....	59
Abb. 31:	Kohlenstoffvorrat in den obersten 40 cm nach Ausgangsmaterial	62
Abb. 32:	Verteilung des Kohlenstoffvorrates im Oberboden der Footprint Area	65
Abb. 33:	Verteilung des Kohlenstoffvorrates in Ober- und Unterboden inklusive Streu.....	66
Abb. 34:	Stickstoffvorrat im Oberboden nach Ausgangsmaterial	67
Abb. 35:	Stickstoffvorrat im Oberboden der Footprint Area	69
Abb. 36:	Kohlenstoffvorratskarte des Oberbodens (0–10 cm) mit Kriging interpoliert.....	70
Abb. 37:	Oberboden (0–10 cm): Vergleich des C-Anteils mit dem Flächenanteil der Geländeeinheiten.....	72
Abb. 38:	Oberboden (0–10 cm): Vergleich des C-Anteils mit dem Flächenanteil der Geländeeinheiten.....	73
Abb. 39:	Vergleich der Kohlenstoffvorratskarten des Oberbodens (0–10 cm): Oben - mit Kriging interpoliert, unten - nach Kartiereinheiten.....	78
Abb. 40:	Profil und Steckbrief des Standorts D2	86
Abb. 41:	Vergleich des Stichprobenfehlers mit dem Standortfehler und dem Messfehler im Labor am Beispiel Malmkalk	86
Abb. 42:	Vergleich der Kohlenstoffvorräte zwischen Biomasse, Streu und Boden	89
Abb. 43:	Schematischer Aufbau des Auflagehorizontes	103
Abb. 44:	Geologische Zeittafel	111
Abb. 45:	Profil durch die Lägern-Südflanke	112

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Die fünf geologischen Einheiten in der Footprint Area	12
Tab. 2:	Wasserhaushalt und pflanzennutzbare Gründigkeit	26
Tab. 3:	Klassierung der Entwicklungsstufen und der Lothar-Schadenflächen	27
Tab. 4:	Übersicht über die Beprobungsarten an den 27 Probenahmestandorten	31
Tab. 5:	Zusammenfassung über die Anzahl der extrapolierten Werte nach Tiefenklassen	42
Tab. 6:	Übersicht über die Probenahmestandorte und die beprobten Tiefen	44
Tab. 7:	Extrapolation fehlender Kohlenstoffvorräte in den Tiefenklassen	48
Tab. 8:	Isotopenverhältnisse an 7 ausgewählten Standorten	49
Tab. 9:	Klassierung der C/N-Verhältnisse	52
Tab. 10:	Humusform, C-Konzentrationen und -vorräte der 27 Probenahmestandorte	53
Tab. 11:	Lagerungsdichte, Feinerdedichte und Skelettgehalt	54
Tab. 12:	Einfaktorielle ANOVA (Type III Sum of Square)	60
Tab. 13:	Einfaktorielle ANOVA (Type I Sum of squares)	61
Tab. 14:	Geländeeinheiten nach Ausgangsmaterial mit ähnlichen C-Gehalt	63
Tab. 15:	Kohlenstoffvorratsinventur der obersten 10 cm	63
Tab. 16:	Kohlenstoffvorratsinventur der obersten 40 cm und der Streu	64
Tab. 17:	Kartiereinheiten der Stickstoffvorräte für die Vorratskarte	68
Tab. 18:	Vergleich von Kohlenstoffvorräten in Böden der Schweiz, Europa und der Welt	75
Tab. 19:	Vergleich des Stickstoffvorrates	82
Tab. 20:	Ergebnisunsicherheit der Kohlenstoffvorräte in Ober- und Unterboden	83
Tab. 21:	Ergebnisunsicherheit der Stickstoffvorräte im Oberboden (0–10 cm)	84
Tab. 22:	Standortsbeschreibung der 27 Stichprobenstandort	100
Tab. 23:	Lage und Topographie der 27 Stichprobenstandorte	101
Tab. 24:	Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte an den 27 Stichprobenflächen nach Bodentypen sortiert	102
Tab. 25:	Klassierung der Humusformen	104
Tab. 26:	Datenkatalog der verfügbaren Daten	105
Tab. 27:	Übersicht über die fünf Konzeptkarten	106

1 Einleitung

1.1 Der globale Kohlenstoffkreislauf

Unter dem globalen Kohlenstoffkreislauf versteht man die weltweite Umverteilung von Kohlenstoff (C) zwischen verschiedenen C-Speichern. Dabei stellen Atmosphäre, Ozeane, terrestrische Biosphäre und geologische Speicher die wichtigsten Kompartimente dar (Schimel 1995).

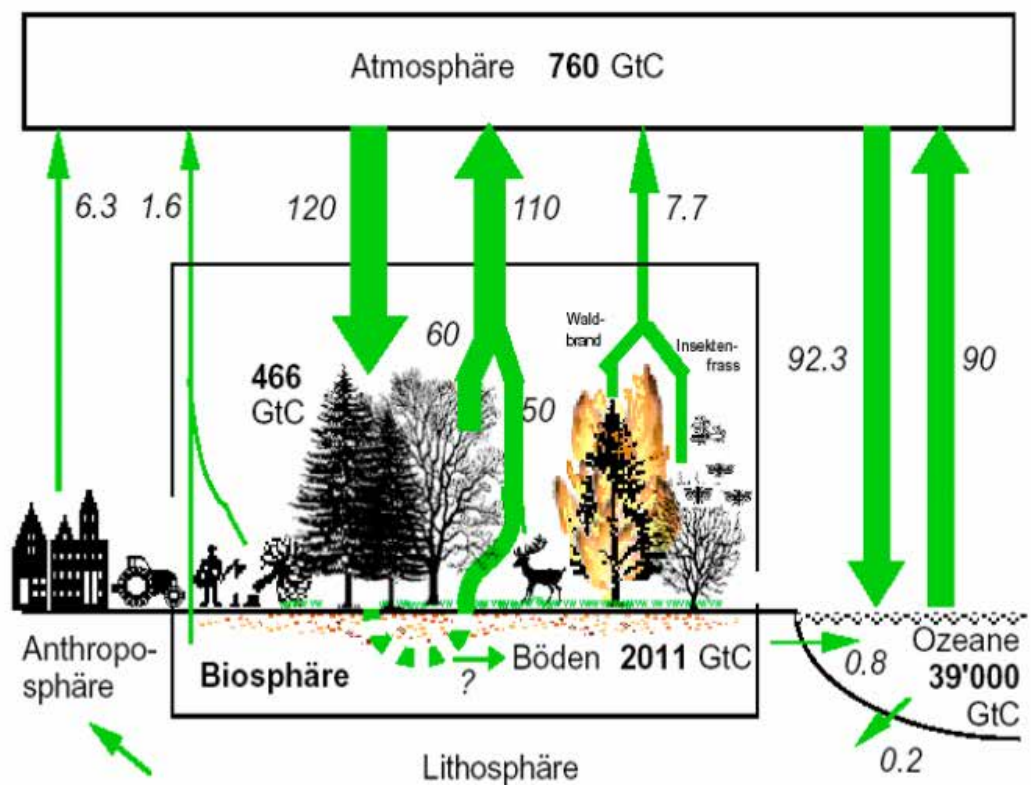


Abb. 1: Der globale Kohlenstoffkreislauf unter menschlichem Einfluss

Die fettgedruckten Zahlen stehen für die Kohlenstoffvorräte, die kursiven für jährliche Kohlenstoffflüsse in Gt C. (aus Fischlin et al., nach IPCC 2001)

Der Kohlenstoffspeicher in der Lithosphäre und in den Tiefenwasserbereichen der Weltmeere wird als statisch angesehen. Zwischen dem Oberflächenwasser, den terrestrischen Ökosystemen (Biomasse und Boden) und der Atmosphäre wird ständig Kohlenstoff ausgetauscht (Abb. 1). Dies geschieht durch die gegenläufigen Prozesse der Primärproduktion und der Respiration. Im Wesentlichen erfolgt der Austausch gasförmig über das Kohlendioxid-Molekül (CO_2) und wird durch die genannten Prozesse angetrieben (IPCC 2000).

In der Atmosphäre beläuft sich der C-Vorrat auf ungefähr 760 Gt C, in der Biosphäre und den Böden ist er mit 2500 Gt C etwa dreimal so hoch und in den Meeren (39'000 Gt C) und der Lithosphäre (61'000'000 Gt C) noch viel grösser (IPCC 2001).

Motiviert durch den raschen Anstieg von CO_2 in der Atmosphäre, wurde die Rolle der einzelnen Komponenten des globalen Kohlenstoffkreislaufes von mehreren internationalen Forschungsprogrammen untersucht. Der heutige Wissensstand über den Kohlenstoffkreislauf reicht aus, um beurteilen zu können, dass natürliche Prozesse den CO_2 -Anstieg in der Atmosphäre verlangsamen. Unser Wissen ist aber ungenügend, um die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten des System Erde und deren gegenseitige Beziehung zwischen dem Kohlenstoffkreislauf und anderen biogeochemischen und klimatischen Prozessen beschreiben zu können. Um diese Einschränkung zu überwinden, ist eine systematische Betrachtungsweise notwendig (Falkowski et al. 2000).

1.2 Terrestrische Ökosysteme im globalen Kohlenstoffkreislauf

Die Verbrennung fossiler Brennstoffe und Landnutzungsänderungen führten seit dem 19. Jahrhundert zu einem drastischen Anstieg des Kohlenstoffdioxids (CO_2) in der Atmosphäre. Seit 1800 hat sich die CO_2 -Konzentration von 280 ppm (parts per million) auf 367 ppm im Jahr 1999 erhöht. Kohlenstoffdioxid ist, was den anhaltenden Klimawandel betrifft, das wichtigste Treibhausgas (IPCC 2001).

Nur die Hälfte der anthropogenen CO_2 -Emissionen haben sich in der Atmosphäre angehäuft, der Rest wurde von den terrestrischen Ökosystemen und den Ozeanen in ungefähr gleichem Verhältnis aufgenommen (IPCC 2001). Die Aufnahme von Kohlenstoff durch terrestrische Ökosysteme ist vor allem auf die im Vergleich zum Abbau (Respiration) erhöhte Produktion von Biomasse zurückzuführen, einerseits verursacht durch die Zunahme der Waldfläche in der Schweiz und andererseits durch das bei manchen Bäumen festgestellte erhöhte Wachstum in CO_2 -reicher Atmosphäre

(Körner et al. 2005). Terrestrische Ökosysteme können also als *globale Senken* atmosphärischen CO₂'s dienen. Durch Landnutzungsänderungen (z. B. Rodungen), welche zu einem Verlust von Kohlenstoff aus Biomasse und Boden führen (Guo und Gifford 2002), können dieselben Systeme aber auch zu einer *anthropogenen Quelle* für CO₂ werden. Trotzdem wirken Landökosysteme zurzeit als globale Senken für CO₂ (IPCC 2000). Um den Kohlenstoffvorrat in terrestrischen Ökosystemen und dessen Veränderungen abschätzen zu können, werden adäquate Informationen über Landnutzung, Kohlenstoffvorrat in Vegetation und Boden sowie über das Verhalten und den Verbleib von Kohlenstoff benötigt. Die exakte Rolle, welche Ökosysteme im Klimasystem spielen, ist deshalb Gegenstand aktueller wissenschaftlicher Forschung (Fischlin und Buchmann 2004).

1.3 Das Kyoto-Protokoll und die Rolle von Kohlenstoffsenken

Das Kyoto-Protokoll bildet die Grundlage für die international verbindliche Politik zur Reduktion der Treibhausgase, die für die globale Klimaerwärmung verantwortlich sind. In der Schweiz ist das Kyoto-Protokoll seit dem 16. Februar 2005 in Kraft. Darin verpflichtet sich die Schweiz, ebenso wie die Europäische Union, die Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2008 bis 2012 um acht Prozent unter den Stand von 1990 zu senken (BAFU 2005).

Verhandlungen im Rahmen der Klimakonvention UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) haben ergeben, dass das Kyoto-Protokoll auch die Möglichkeit vorsieht, Senken für die Erfüllung der Klimaverpflichtungen anzurechnen. In der Schweiz wurden dazu bisher erst zuverlässige Daten zu lebenden Bäumen und Totholz erhoben. Immer noch ein grosser Unsicherheitsfaktor ist der Boden (Fischlin et al. 2003).

1.4 Die Rolle des organischen Kohlenstoffs im Boden

Der im Boden gespeicherte organische Kohlenstoff (soil organic carbon SOC) gilt als grösstes terrestrisches Kohlenstoffreservoir (Perruchoud et al. 2000). Nach Batjes (1996) wird der organische Kohlenstoffpool im Boden (bis 1 m Tiefe) der ganzen

Landfläche der Welt zwischen 1462 und 1548 Pg C gespeichert, während die Kohlenstoffvorräte in Vegetation (610 Pg C) und Atmosphäre (750 Pg C) nicht einmal die Hälfte davon betragen.

Der Kohlenstoffgehalt im Boden wirkt sich auf die Biomassenproduktion aus und wird von dieser im Gegenzug wieder beeinflusst (Finzi et al. 1998), da der Eintrag an organischem Kohlenstoff in den Boden alleine über die Vegetation erfolgt (Perruchoud et al. 1999). Durch die Klimaerwärmung können das Pflanzenwachstum und die Streuproduktion ansteigen, wodurch mehr organischer Kohlenstoff in den Boden gelangen kann (Liski et al. 2002). Bei der Mineralisierung der organischen Substanz sind die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse wie auch der pH-Wert entscheidend, da sie die Aktivität und die Zusammensetzung der Mikroorganismen steuern (Schachtschabel et al. 1998). Im Stabilisierungsprozess des Kohlenstoffs spielen allerdings die Bodeneigenschaften eine Schlüsselrolle (Hagedorn et al. 2001). Mit zunehmendem Tongehalt nimmt der C-Verlust ab, da Tonminerale mit Humusstoffen stabile Ton-Humus-Komplexe bilden und den Kohlenstoff vor Auswaschung und weiterer Zersetzung schützen (Christensen 2001).

Durch die vielfältigen Einflüsse auf den Abbau der organischen Substanz ist die Variabilität des Kohlenstoffgehaltes im Oberboden von Waldböden hoch (1–30% C-Gehalt). Die grosse Bedeutung des Kohlenstoffgehalts liegt in den wichtigen Funktionen, welche die organische Substanz in Böden übernimmt (Walthert et al. 2004):

- Nährstoffquelle für die Pflanze: Stickstoff liegt zu ca. 95% in organischer Bindung vor und kann so von der Pflanze kontinuierlich aufgenommen werden.
- Verbesserung von Wasser- und Lufthaushalt: Die organische Substanz begünstigt die Bildung und die Stabilität eines Aggregatgefüges im Mineralboden. Je nach Zersetzungsgrad kann Humus das 3–5-fache seines Eigengewichts an Wasser festhalten, wodurch die Wasserspeicherkapazität zusätzlich vergrössert wird.

Durch die grosse Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts von den oben genannten Faktoren, kann der C-Vorrat im Boden durch Landnutzungsänderungen signifikant ändern (Jones et al. 2005). Nach Guo und Gifford (2002) nimmt der C-Vorrat im Boden beispielsweise bei einer Umnutzung von natürlicher Vegetation zu Getreideanbau um 42% ab, während er bei einer Umnutzung von Getreideanbau zu Sekundärwald um 59% ansteigt.

Bedingt durch die Bedeutung des organischen Kohlenstoffs im Boden für Ökosystemprozesse und der Rückkoppelungseffekte des Bodenkohlenstoffpools auf die atmosphärische Zusammensetzung ist es wichtig, die Kontrollmechanismen der Kohlenstoffspeicherung und deren räumliches Verteilungsmuster für das Verständnis der Biosphäre zu kennen (Trumbore et al. 1996).




1.5 Das CarboEurope Projekt

1.5.1 Ziel

CarboEuropeIP (Integrated Project) ist ein von der Europäischen Union unterstütztes Forschungsprojekt mit Schweizer Beteiligung, in dem sich 61 Forschungsanstalten aus 15 Ländern zusammengeschlossen haben, um das Verständnis über die CO₂-Bilanz Europas auf interdisziplinärem Weg voranzutreiben. Umfassendes Ziel des Projekts ist das Verständnis und die Quantifizierung der gegenwärtigen terrestrischen Kohlenstoffbilanz der wichtigsten Ökosystemtypen Europas und der damit verbundenen Unsicherheit auf lokaler, regionaler und kontinentaler Ebene. Kann dieses Ziel erreicht und folglich das Kohlenstoffbudget eines Kontinentes mit akzeptabler Genauigkeit abgeschätzt werden, so haben die Ergebnisse des Projektes durch die Verpflichtungen der EU gegenüber dem Kyoto-Protokoll auch politisch höchste Relevanz (CarboEurope-IP 2004).

Messungen werden in einem Netzwerk von über 100 europäischen Untersuchungsflächen in borealen, temperierten und mediterranen Ökosystemen durchgeführt. Zu jedem Hauptstandort (Main Site) gehört je eine Untersuchungsfläche auf Ackerland, Grasland und im Wald.

Die Besonderheit des CarboEurope Projekts liegt in seinem länderübergreifenden Konzept, welches für sein gesamtes europaweites Netzwerk eine einheitliche Planung vorsieht und die Ergebnisse in einer einzigen Kohlenstoffdatenbank zusammenfasst.

Wald	Grasland	Ackerland
		

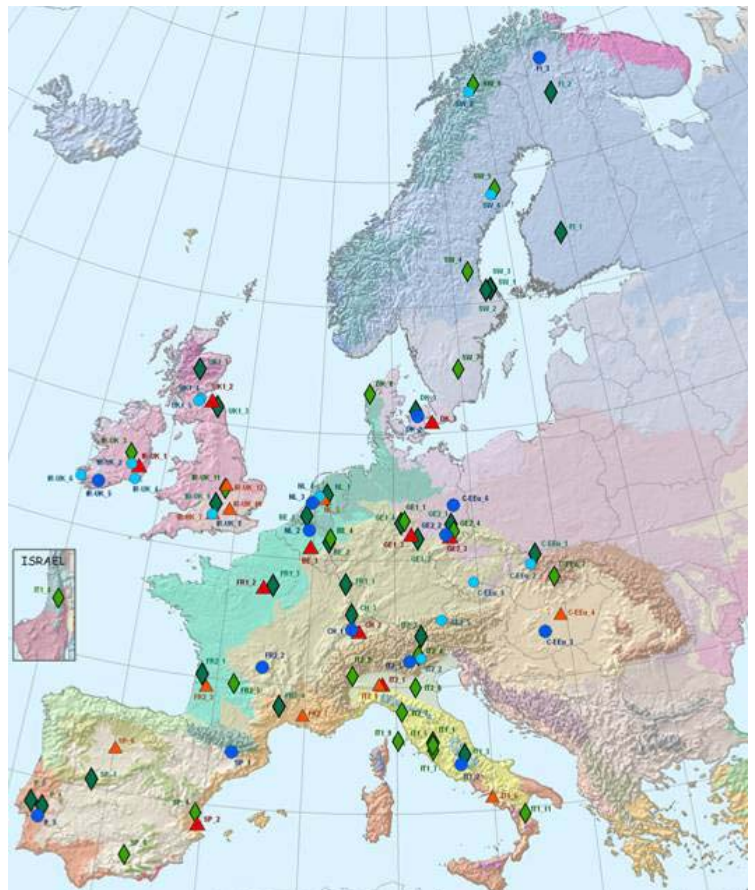


Abb. 2: Lagekarte der CarboEuropeIP Hauptstandorte in Europa (CarboEurope-IP 2006)

1.5.2 Methodik

Bei der Ermittlung von Kohlenstoffbilanzen von terrestrischen Ökosystemen spielt die Eddy-Kovarianz-Methode eine Hauptrolle, da mit dieser Methode CO_2 -Flüsse in das Ökosystem hinein und aus ihm heraus direkt gemessen werden können.

Im Wald werden an einem Messturm in einer Höhe von 25 m über den Baumwipfeln hochfrequent (bei 10 Hz) Windrichtung, Windgeschwindigkeit und CO_2 -Konzentration der Luft gemessen. Mittels mikrometeorologischen Modellen kann berechnet werden, aus welcher räumlichen Einheit das am Turm gemessene CO_2 stammt. Diese Fläche nennt man Footprint oder Source Area (Schmid und Oke 1990).

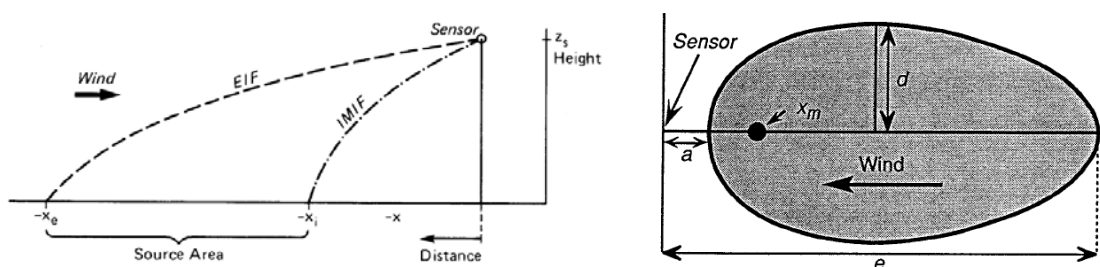


Abb. 3: Schema der Footprint (Source) Area einer Messung an einem Messturm und die charakteristische Dimension der entstehenden Fläche (nach Schmid und Oke 1990).

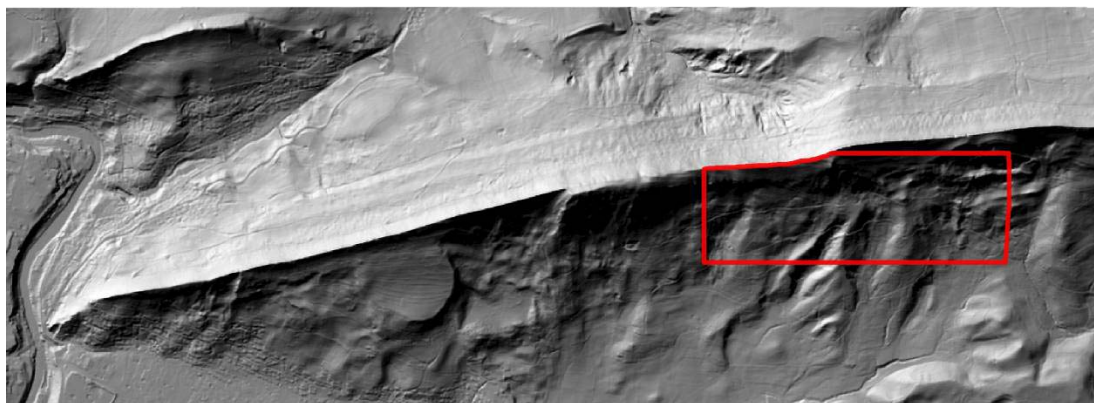


Abb. 4: Footprint Area am Hauptstandort Lägern
Digitales Geländemodell (Auflösung 5 m), Rohdaten: AGIS Koordination Kanton Aargau

Abbildung 4 zeigt ein DGM (Digitales Geländemodell) der Footprint Area am Hauptstandort Lägern. 90% des am Sensor gemessenen CO_2 stammen von dieser Fläche. Da an der Lägern die Hauptwindrichtung entlang des Lägerngrates zieht, hat

die Footprint Area eine Länge von ca. 1500 m und eine Breite von ca. 500 m und beinhaltet eine Fläche von ca. 77 ha.

1.5.3 Der Standort Lägern

Der Standort Lägern ist Teil des CarboEuropeIP-Netzwerkes. Die zum Standort zugehörigen Untersuchungsflächen „Grasland“ und „Ackerland“ befinden sich in Oensingen. Die Untersuchungsfläche Lägern repräsentiert einen montanen Mischwald im östlichsten Ausläufer des Schweizer Faltenjuras.

Zusätzlich zu den Messungen am Eddy-Messturm werden auch Messungen an der Bodenoberfläche durchgeführt. Hier wird insbesondere ermittelt, wie und in welchen Mengen der Kohlenstoff, den die Bäume aus dem CO₂ der Atmosphäre aufnehmen, durch Bodenatmung der Wurzeln und Mikroorganismen wieder an die Luft abgegeben wird.

Die Forschungsarbeiten an der Lägern werden es erlauben, die genauen Mengen dieser Kohlenstoffumsätze zu erfassen und zu beziffern.



Abb. 5: Eddy-Messturm (links), montaner Laubmischwald mit typischem Bärlauchbewuchs (rechts)

2 Fragestellung

2.1 Kontext dieser Diplomarbeit

Waldökosysteme spielen im globalen Kohlenstoffkreislauf eine zentrale Rolle. Zwischen 62 und 78% des globalen terrestrischen Kohlenstoffs werden in Wäldern gespeichert, wovon sich 70% in den Waldböden befindet (Dixon et al. 1994). Jede Veränderung der Zusammensetzung oder der Menge des Kohlenstoffgehaltes im Boden hat Einfluss auf die Prozesse, welche im System ablaufen (Batjes 1996). Um Aussagen über den Kohlenstoffvorrat in Boden und Biomasse und über dessen Veränderung machen zu können, müssen genaue Informationen über dessen Menge und räumliche Verteilung ermittelt werden (Morisada et al. 2004).

Am Messturm Lägern wird im Rahmen des CarboEuropeIP die Netto-CO₂-Bilanz des Waldökosystems direkt im Feld gemessen, wodurch die genauen Mengen der Kohlenstoffumsätze erfasst und beziffert werden können. In der Doktorarbeit von Nadine Rühr wird der Beitrag der Wurzelatmung zum Netto-CO₂-Fluss des Waldökosystems untersucht. Andreas Zingg und Mitarbeiter der Abteilung „Strategien Waldentwicklung“ der WSL (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft) ermittelt den Zuwachs der Biomasse.

Um die Interpretation der Flussmessungen am Turm verbessern zu können, müssen möglichst genaue Angaben über die Charakteristik der Footprint Area vorliegen. Das Hauptziel dieser Diplomarbeit bestand deshalb darin, bei der Untersuchung des Bodens den Kohlenstoffvorrat in den obersten 10 und in den obersten 40 cm (inklusive der Streu) mit akzeptabler Genauigkeit zu ermitteln. Damit Aussagen über die Nährstoffverhältnisse in der Footprint Area gemacht werden können, wurde zusätzlich der Stickstoffvorrat der obersten 10 cm des Bodens und der Streu zusätzlich untersucht.

Schliesslich sollen alle gesammelten Daten in einer Datenbank als Geographisches Informationssystem über das Untersuchungsgebiet (GIS-Lägern) abrufbar gemacht werden.

2.2 Fragestellung und Ziele

2.2.1 Kohlenstoffkonzentration und -vorrat in den Böden der Footprint Area

- Wie hoch sind Kohlenstoffkonzentration und -vorrat im Boden und in der Streu der Footprint Area?
- Welche Faktoren beeinflussen den Kohlenstoffvorrat im Boden am meisten?
- Wie genau lässt sich der Kohlenstoffvorrat in der Footprint Area ermitteln?

2.2.2 Die Verteilung des stabilen Isotops ^{13}C und der Stickstoffvorrat (N-Vorrat)

- Wie ist das stabile Isotop ^{13}C im Oberboden der Footprint Area verteilt?
- Welche Stickstoffkonzentrationen und -vorräte weisen die obersten 10 cm des Bodens und die Streu auf?
- Wie verhalten sich die C/N-Verhältnisse im Oberboden?

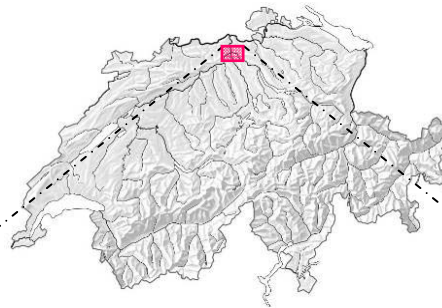
2.2.3 Datenbank „GIS-Lägern“

- Erstellung einer Datenbank über das Untersuchungsgebiet in einem Geographischen Informationssystem (GIS-Lägern).

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Geographischer Überblick

In West-Ost-Richtung durchschneidet eine Jura-Antiklinale das Kartenblatt Baden: Die Lägern, ihr Name weist auf die Bänderung des Berges hin. Die Lägern gilt als östlichster Ausläufer des Faltenjuras und erstreckt sich von Ennetbaden / Wettingen im Kanton Aargau bis nach Regensberg im Kanton Zürich, mit einer Ausdehnung von ca. 11 km Länge und 1.5 km Breite. Der höchste Punkt liegt bei der Ruine Alt-Lägern, 866 m ü. M.



Das Untersuchungsgebiet liegt in den Gemeindewaldungen von Wettingen an der Kantonsgrenze Aargau – Zürich. Der Eddy-Messturm befindet sich auf 685 m ü. M. an süd-exponierter Lage in einem montanen Laubmischwald.

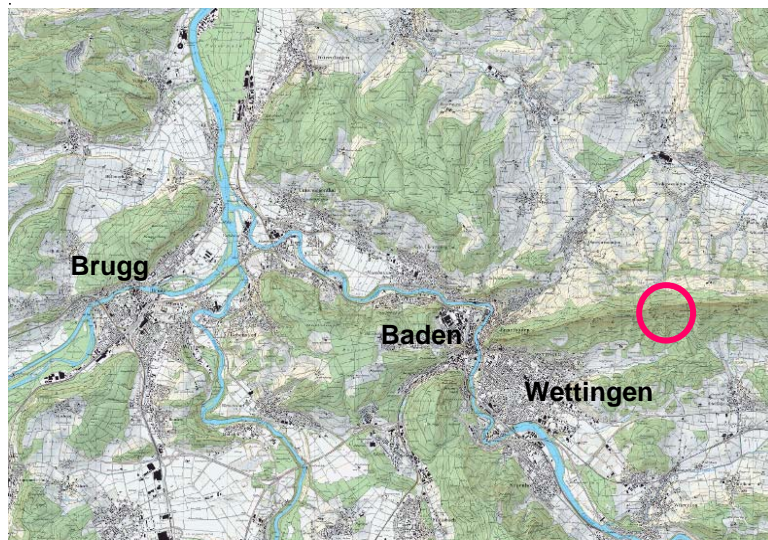


Abb. 6: Übersicht und Lage der Untersuchungsfläche.
Landeskarte der Schweiz 1:25'000
Kartenblatt 1070 Baden

3.2 Geologie

Zusammensetzung und Beschaffenheit des Ausgangsgesteins stellen einen entscheidenden Faktor bei der Entstehung eines Bodens dar und bestimmen wesentlich mit, welcher Bodentyp entsteht und welche Eigenschaften ein Boden aufweist (Blum und Schroeder 1992). Im Untersuchungsgebiet treten neben den fossilreichen, kalkigen Mergeln aus der Jurazeit Sandsteine der Unteren Süsswassermolasse auf, was auf eine interessante und vielfältige Geologie hinweist (Schindler 1978). Diese ungleichen Gesteinstypen beeinflussen die Pedogenese stark und schlagen sich in unterschiedlichen Bodentypen im Untersuchungsgebiet nieder. Ein Gebiet mit hoher Geländevariabilität ist die Folge dieser geologischen Konstellation.

Geologisch betrachtet gehört die Lägern zum Juragebirge, welches sich in Chambéry (Frankreich) von den Alpen trennt und als einzelne Falte an der Lägern unter die Molasse abtaucht. Der Jura ist ein Mittelgebirge aus mesozoischen (siehe geologische Zeitskala im Anhang) Sedimenten, welches sich in den letzten Phasen der Alpenfaltung aufgewellt hat (Labhart 2001).

In der Footprint Area am Lägern-Südhang sind grobbankige Malmkalke aus der Jurazeit sowie Mergel und Sandsteine der Unteren Süsswassermolasse (Tertiär) aufgeschlossen.

Kalkgestein aus der Jurazeit

Die ältesten Gesteinsschichten, welche im Untersuchungsgebiet aufgeschlossen sind, stammen aus dem so genannt weissen Jura, dem Malm, und bestehen aus hellgrauen Mergeln und Kalken. Es sind die Badener- und die Wettingerschichten, welche die jüngste Einheit der Jurazeit bilden (Meier und Meier 2003). Die Badenerschichten bestehen aus teilweise fossilreichen kalkigen Mergeln und sind bei Fossiliensammeln und Wissenschaftlern schweizweit bekannt. Die jüngste Einheit des Malms bilden die Wettingerschichten. Es sind grobbankige, harte Kalke, welche lokal Kieselknollen enthalten können (Schindler 1978).

Sandsteine und Mergel der Unteren Süsswassermolasse (USM)

Unterhalb des Eddy-Messturmes sind Sandsteine und Mergel der Unteren Süsswassermolasse aufgeschlossen (siehe auch Profil der Lägern im Anhang). Diese Gesteine haben ganz andere Eigenschaften als die harten Malmkalke, was sich markant in den Bodentypen niederschlägt.

Geologische Karte der Lägern

Die geologische Karte verdeutlicht (Abbildung 7) die kleinräumig wechselnde Gliederung an Gesteins- und Ablagerungsformen am Lägern-Südhang. Der Lägerngrat, sowie die Lägern-Nordseite bestehen aus jurassischen Sedimenten (Dogger und Malm). An der Lägern-Südseite sind im unteren Teil (ab ca. 650 m ü. M.) Molasse-sedimente aufgeschlossen. Die weiss eingefärbten Flächen auf der Karte entsprechen quartären Formen, wie Hangrutschungen und Sackungen. Die letzten Gletschervorstösse während der Würm-Eiszeit erreichten die Lägern nicht mehr. Die quartären Landschaftsformen auf der geologischen Karte am Lägern-Südhang sind durch periglaziale Prozesse entstanden. Die Endmoränenwälle der maximalen Ausdehnung der Gletscher während der Würmeiszeit (vor etwa 23'000 Jahre) befanden sich in Mellingen, Killwangen und Schöfflisdorf.

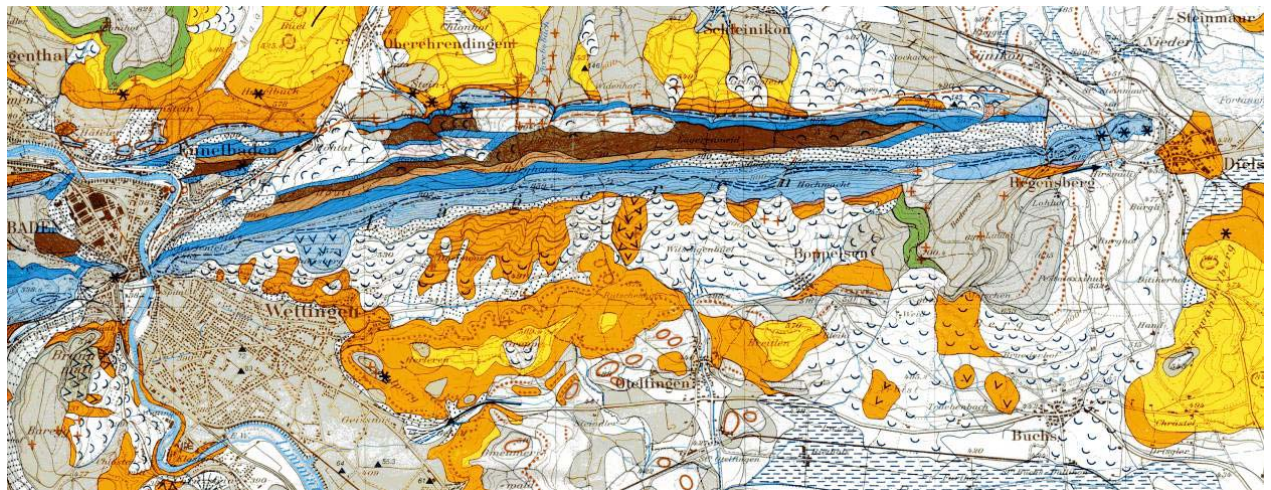
Die fünf Geologischen Einheiten in der Footprint Area

Die Footprint Area kann in fünf geologische Einheiten eingeteilt werden:

Tab. 1: Die fünf geologischen Einheiten in der Footprint Area

Ausgangsmaterial	Beschreibung der Geländeinheit
Felssturzschant	Böden mit > 80% Skelettanteil auf Malmkalk
Malmkalk	Böden auf Malmkalken der Badener- und Wetingerschichten
blockiger Hangschutt	Böden auf Hangschutt und Hanglehm aus Malmkalken und Molassemergeln
Molassehanglehm	Böden auf Molassehanglehm (Verwitterungsprodukt aus Mergeln und Sandsteinen)
USM	Böden auf Sandsteinen der unteren Süsswassermolasse

Die Einheiten wurden anhand der Geologischen Karte der Schweiz, Blatt Baden (Graf 1996) ausgeschieden.



Erdneuzeit

Quartär Würm-Moränen

- frühwürmeiszeitliche Moränen
- Riss-Moränen
- Niederterrassenschotter
- Tiefere Deckenschotter
- Höherer Deckenschotter
- Tertiär** Obere Süswassermolasse
- Obere Meeresmolasse
- Untere Süswassermolasse
- Siderolith-Formation (Bolus mit Bohnerz)

Erdmittelalter

- Jura** Mittlerer und Oberer Malm: (Wettinger, Badener, Wangener Schichten)
- Unterer Malm (Geissberg, Effinger, Birnenstorfer Schichten)
- Mittlerer und Oberer Dogger
- Unterer Dogger
- Lias
- Trias** Keuper

Zeichen

- Rutschungen
- Sackungen
- Eiszeitliche Schmelzwasserrinnen
- Fundstellen fossiler Tierreste
- Erratiker (Findlinge)
- Thermalquellen

Abb. 7: Geologische Karte der Läger (aus Meier und Meier 2003, Geologische Karte des Kantons Zürich, R. Hanke)

3.3 Klima

Das grossräumige Klima der Schweiz ist durch die Wettersysteme von Nordatlantik und Mittelmeer sowie durch die eurasische Landmasse geprägt (MeteoSchweiz 2005). Das kleinräumige Klima hingegen wird stark durch die Bergmassive der Alpen und des Juras beeinflusst. Geographische Besonderheiten wie Höhenlage, Exposition oder spezielle Kammerungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die bodennahen Windverhältnisse und somit auf das Mikroklima einer Region (BVU 2003).

Durch die West-Ost-Ausrichtung der Lägern ergibt sich eine klare Trennung in eine Nord- und eine Südseite, was sich markant auf die Klimaverhältnisse und somit besonders auf die Pflanzenwelt auswirkt. Die Untersuchungsfläche wird der montanen Klimastufe zugeordnet, was mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von unter 8 °C (trotz Lage auf der Südseite) einem ziemlich kühlen Klima entspricht. Die Vegetationsperiode dauert hier 170–190 Tage. Der mittlere Jahresniederschlag liegt mit fast 1200 mm/Jahr im schweizerischen Mittelfeld (FAL 1996).

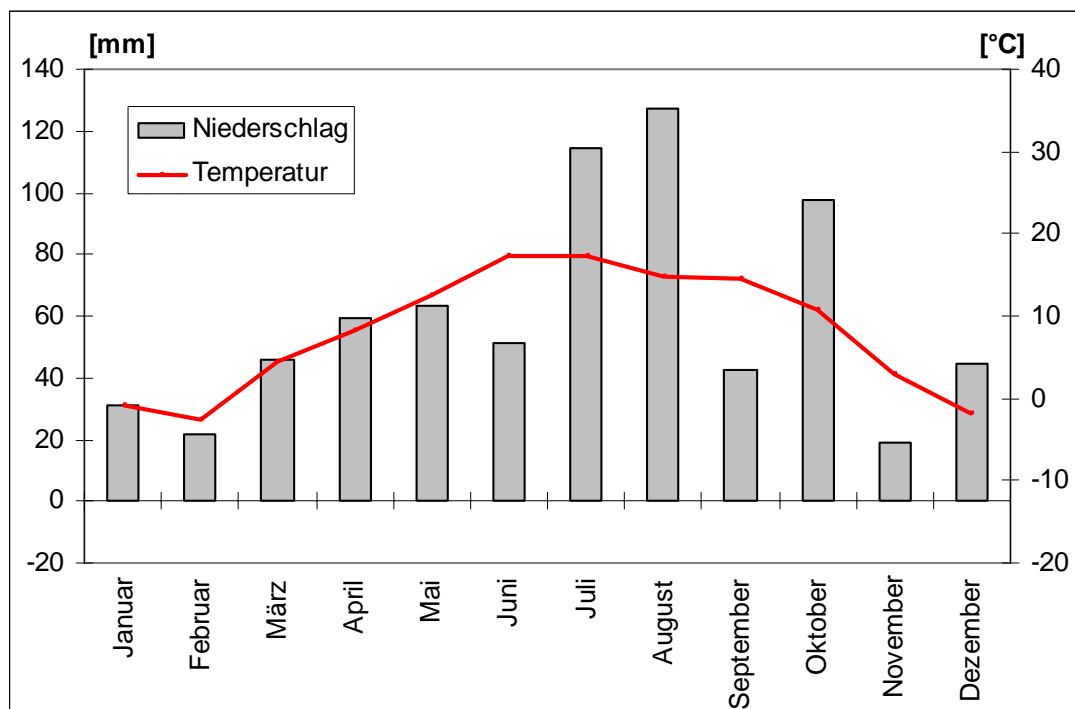


Abb. 8: Niederschlag - Temperatur Diagramm des Jahres 2005
(Daten NABEL Messturm Lägern des BAfU)

Aus dem Klimadiagramm der Messstation Lägern (Abb. 8) sind die Monatsmittelwerte aus dem Jahr 2005 ersichtlich. Die Niederschlagsverteilung zeigt ihr Minimum in den Monaten Januar, Februar und November sowie ihr Maximum im Juli und August. Das sommerliche Niederschlagsmaximum steht im Zusammenhang mit den häufigen Gewitterregen. Im Jahr 2005 sind im Winter 14%, im Frühling 23%, im Sommer 41% und im Herbst 22% der Jahresniederschläge angefallen, was durchschnittlichen Werten entspricht. Das Temperaturmaximum der Monatsmittelwerte (Juni 17.3 °C, Juli 17.2 °C) deckt sich mit dem Niederschlagsmaximum und liegt ebenfalls in der Vegetationsperiode. Das Minimum trat 2005 im Februar (-2.6 °C) auf.

Hauptwindrichtung

Aus Abbildung 9 ist deutlich sichtbar, dass die Winde durch die West-Ost-Ausrichtung des steilen Lägerngrates kanalisiert werden. Winde aus West-Südwesten sind im Untersuchungsgebiet vorherrschend, was auf die Westwinde in höheren Lagen zurückzuführen ist. Vor allem im Winter transportieren sie feuchte Meeresluft vom Atlantik auf den Kontinent.

Auch der Orkan Lothar, welcher am 26. Dezember 1999 über die Schweiz fegte, war einer dieser Westwindstürme, welcher auch im Untersuchungsgebiet enorme Schäden anrichtete und sogar den Messturm zerstörte, so dass ein Neubau notwendig wurde.

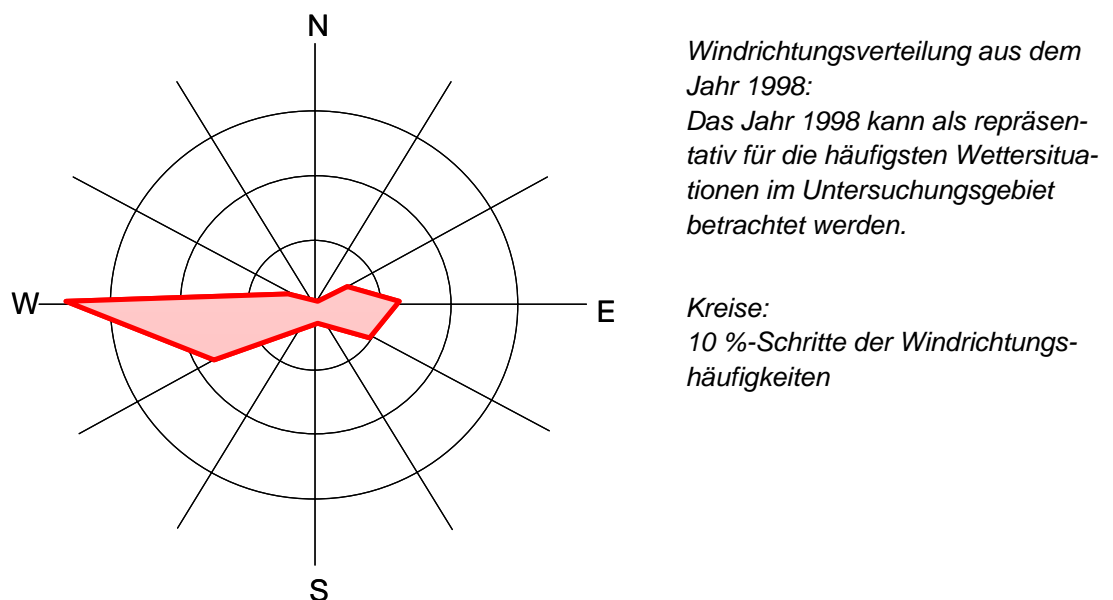


Abb. 9: Mittlere jährliche Windrose des Jahres 1998 (Daten NABEL Messturm Lägern des BfU)

3.4 Vegetation

Bei der Landschaft Lägern handelt es sich nicht nur geologisch um eine Besonderheit: 1977 ist das Lägerengebiet ins Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung aufgenommen worden. Vor allem am Grat treten interessante Waldgesellschaften und seltene Felsfluren auf (Egloff 1999). Der gesamte Lägerwald-Perimeter unterliegt auch dem Lägern-Schutzdekret¹, das besondere Rücksichtnahme bei der Bewirtschaftung auf das Landschaftsbild verlangt.

3.4.1 Typische Pflanzengesellschaften

Auf Grund der Standorteigenschaften kommen viele unterschiedliche und zum Teil sehr seltene Waldgesellschaften vor.

Die Buche als die im Aargau dominante Baumart ist allgegenwärtig. Unterhalb des Messturmes, auf der Unteren Süsswassermolasse und dem Gehängeschutt, sind z.B. verschiedene Formen des *Waldmeister-Buchenwaldes* zu finden. Etwas oberhalb dieser Standorte, im Gebiet des Kalk-Gehängeschuttes, finden sich etwas trockenere Standorte, auf welchen sich vor allem Kalk-Buchenwälder verbreitet haben. Die trockensten Waldstandorte im Untersuchungsgebiet sind unterhalb des Grates zu finden. Hier wachsen Hangschuttwälder wie der *Ahorn-Linden-Hangschuttwald* und der *Lerchensporn-Ahornwald* (Cuny 1983).

Waldmeister-Buchenwälder

Waldmeister-Buchenwälder sind meist gut wüchsige Buchen-Hallenwälder mit starken, geraden Stämmen. An der Lägern sind oft Formen auf kalkhaltigen Böden anzutreffen. Hier ist die Artenvielfalt mit vielen Kalk und Wärme liebenden Pflanzen in der Kraut- und Strauchschicht besonders gross. Typische Arten sind: Buche, Ahorn, Kirsche, Weissdorn, Gemeiner Seidelbast, Mandelblättrige Wolfsmilch, Gemeine Akelei.

Kalk-Buchenwälder

Kalk-Buchenwälder sind ebenfalls wüchsige Buchen-Hallenwälder mit vielen Frühjahrsblüchern in der Krautschicht, wie dem Bingelkraut und der Frühlingsplatterbse. Kalk-Buchenwälder stocken auf den skelettreichen Rendzinen und Kalkbraunerden

¹ Rechtserlass 787.320 des Grossen Rates des Kt. Aargau vom 13. Dez. 1977: Dekret zum Schutz des Landschaftsbildes der Lägern und des Geissberges (Lägernschutzdekret)

oberhalb des Messturms. In der Krautschicht sind hier Kalk und Wärme liebende Pflanzen wie etwa der Lorbeerseidelbast zu finden.

Hangschuttwälder

Hangschuttwälder sind mässig wüchsige Mischwälder an sonnigen, losen Schutthängen. Häufig trifft man Stockausschläge an. Zum Teil sehr seltene Waldgesellschaften mit Wärme liebenden Pflanzenarten (Bärlauch, Lerchensporn, Blaustern, Immenblatt) (Stocker et al. 2002).



Abb. 10: Buchenhallenwald (links), Kalk und Wärme liebende Pflanzen: Frühlingsplatterbse (oben), Mandelblättrige Wolfsmilch (unten mitte) Immenblatt (unten rechts)

3.4.2 Waldgeschichte

Alten Waldwirtschaftsplänen ist zu entnehmen, dass der Gemeindewald von Wettingen 1806 ca. 286 ha umfasste. Das mittlere Baumalter betrug damals nur gerade 26–40 Jahre. Insgesamt waren 74 ha schlecht bestockt und 28 ha sogar öde. Das war in der damaligen Zeit ein allgegenwärtiges Waldbild.

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden die Wälder im Allgemeinen – und auch der Wettinger Wald bildete keine Ausnahme – durch Übernutzung, Waldweide, Streunutzung, sowie Holzfrevell in einen sehr schlechten Zustand gebracht. Neben einer grossen Holznot waren auch Erosionen und Abrutschungen des Geländes die Folge. Aus diesen unhaltbaren Zuständen heraus entstand nach und nach eine Forstgesetzgebung in der Schweiz, welche die notwendigen Planungs- und Kontrollinstrumente für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung schuf und endlich die gewünschte Wirkung zum Schutz der Wälder brachte, so das Aargauische Forstgesetz von 1860 und das Schweizerische Forstgesetz von 1876 (Schnetzler 1983).

Bereits im 2. Wettinger Wirtschaftsplan von 1884 (ein erster Plan von 1865 ist nicht mehr auffindbar) wird der Waldzustand als wesentlich verbessert dargestellt.

Vom Orkan Lothar am 26. Dezember 1999 waren im Untersuchungsgebiet am Lägern-Südhang grossen Waldflächen betroffen. In der Footprint Area wurden ca. 9 ha oder 12% des Waldes geschädigt. Auch die Messstation wurde stark beeinträchtigt und ein neuer Messturm musste aufgebaut werden.

Heute werden in den Gemeindewaldungen von Wettingen 205 ha Wirtschaftswald genutzt. 68 ha sind als Naturwaldreservat ausgeschieden und werden grösstenteils sich selbst überlassen (Vock 2004). Mit einem durchschnittlichen Holzvorrat von 343 m³/ha liegt der Wettinger Gemeindewald im kantonalen Durchschnitt (342 m³/ha) (Brassel und Brändli 1999).

3.5 Bodeneigenschaften

3.5.1 Bodenbildung

Während in der Riss-Eiszeit der Linth-Rhein-Gletscher das Untersuchungsgebiet noch mit einem Moräneschleier aus aufgearbeitetem Molassematerial überzog, blieb die Fläche in der Würm-Eiszeit eisfrei. Kryoturbation und Solifluktion führten jedoch zu einer starken Überprägung der Böden. Seit dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 18'000 Jahren entwickelten sich auf den harten Malmkalken vorwiegend Rend-

zinen, während sich auf den Sandsteinen Braunerden bildeten. An manchen Stellen findet man auch Kalkbraunerden, welche durch Einwaschung von karbonathaltigem Wasser entstanden sind (Papritz 1991).

3.5.2 Wasserhaushalt und Humusformen

Die Verfügbarkeit des Wassers für die Pflanzen wird neben den klimatischen Bedingungen maßgeblich vom Wasserhaushalt des Bodens bestimmt (Blum und Schroeder 1992). Im Untersuchungsgebiet sind 95% der Böden gut bis sehr gut wasserdurchlässig. Überschüssiges Wasser kann praktisch ungehindert versickern. Durch die hohe Sonneneinstrahlung auf der Lägern-Südseite ist das Trockenheitsrisiko zudem relativ hoch, was sich auf den Streuabbau negativ auswirken kann. Obwohl an den meisten Probenahmestandorten im August noch viel Streu vorhanden war, konnte auf den meisten Bodentypen die Humusform Mull festgestellt werden. Der Of-Horizont (Fermentationshorizont: teilweise zersetztes Pflanzenmaterial) fehlte an den meisten Standorten.

3.5.3 Die Bodentypen in der Footprint Area

Rendzina

Der Begriff Rendzina stammt aus dem Polnischen und heisst "Rauschen der Steine am Pflug", ein Geräusch, welches entsteht, wenn der Pflug durch diese flachgründigen, steinreichen Böden gezogen wird.

Renzinen entstehen aus karbonatreichen Gesteinen. Die Humusbildung verläuft rasch und führt wegen der ausgezeichneten Karbonat-Pufferung zu einer stabilen Krümelstruktur. Der stark humose Ah-Horizont hat ein großes Porenvolumen mit günstigem Luft- und Wasserhaushalt und hoher Austauschkapazität.



Profil:

Die typische Rendzina besitzt einen humus- und skelettreichen, intensiv durchwurzelten Ah-Horizont, der unmittelbar dem C-Horizont (Kalk, Dolomit, Mergel) aufliegt.

Bei der verbrauchten Rendzina erscheint unter dem Ah-Horizont ein brauner B-Horizont. Es handelt sich aber nicht um eine echte Verbraunung sondern um Rückstände der Kalkverwitterung.

Abb. 11: Rendzina

Terra Fusca

Im Untersuchungsgebiet kommt mit der Terra Fusca ein besonderer Bodentyp vor, der sich unter den heutigen Klimaverhältnissen nicht hätte bilden können. Er bildete sich im Eozän aus den Jurakalken unter warm-humidem Klima. Durch die starke Verwitterung wurden Rückstände aus unlöslichen Tonmineralien, feinen Sandkörnern und Eisenhydroxiden als so genannter Boluston an der Erdoberfläche gebildet und in Karstspalten ein gewaschen (Bolliger 1999). Die Entwicklung verläuft sehr langsam, weil der Lösungsrückstand des Ausgangsgesteins meist gering ist. Die Terra Fusca ist meist vollkommen entkarbonatisiert, mässig bis stark sauer, reich an Ton und sehr dicht. Ihr Humusgehalt ist im Allgemeinen niedriger als jener benachbarter Rendzinen (Schachtschabel et al. 1998).



Profil:

Die Terra Fusca hat zwischen dem Ah- und dem C-Horizont noch einen T-Horizont. Dieser Horizont ist im Unterschied zum Bv-Horizont der Braunerde leuchtend gelbbraun bis rotbraun gefärbt. Dieses leuchtende Ocker ist auf die Farbe des Lösungsrückstandes der Kalkgesteine zurückzuführen und nicht auf eine echte Verbraunung.

Abb. 12: Terra Fusca

Braunerde

Braunerden entstehen in gemässigt-humidem Klima aus Rankern, Regosolen und Pararendzinen, sobald die Entkarbonatisierung abgeschlossen ist und die damit verbundene pH-Absenkung einsetzt. Erst jetzt können die silikatischen Mineralien von den sauren Bodenlösungen angegriffen und teilweise aufgelöst werden. Dabei werden Ionen in die Bodenlösung abgegeben, woraus Sekundärmineralien (Oxide, Hydroxide und kombinierte Formen) gebildet werden, die dem Boden eine rötlichbraune oder rostige Farbe verleihen („Verbraunung“). Gleichzeitig wandeln sich die in der Bodenlösung vorhandenen Al-Ionen zusammen mit freier Kieselsäure zu Tonmineralen um („Verlehmung“). Beide Prozesse sind charakteristisch für den Bv-Horizont einer Braunerde.



Profil:

Braunerden weisen einen humosen Ah-Horizont auf, der in einen Bv-Horizont übergeht. Der C-Horizont folgt häufig erst in 1.5 m Tiefe.

Abb. 13: Braunerde

Kalkbraunerde

Eine Ausnahmeform bei den Braunerden stellt die Kalkbraunerde dar, die zwar einen Bv-Horizont besitzt, aber im ganzen Profil etwas Karbonat enthält und somit neutral reagiert. Dieser Untertyp ist meist durch eine sekundäre Aufkalkung entstanden, entweder durch Vermischung von Braunerdematerial mit karbonathaltigem Material (z.B. Kolluvium am Hangfuss) oder durch eine sekundäre Hangwasserbeeinflussung mit kalkhaltigem Wasser.



Profil:

Im ganzen Profil ist etwas Karbonat vorhanden. Unter dem humosen Ah-Horizont liegt ein schwach humoser Bv-Horizont mit stabilem Gefüge. Meist ist der Ah-Horizont sehr mächtig.

Abb. 14: Kalkbraunerde



4 Methoden

4.1 Generelle Vorgehensweise

Das methodische Vorgehen der vorliegenden Arbeit gliedert sich in fünf Schritte:

- GIS-basierte Konzeptkarte für die Standortwahl der Beprobung
- Durchführung der Feldarbeit
- Laborarbeit
- statistische Datenauswertung
- Darstellung der Ergebnisse als GIS-basierte Vorratskarten

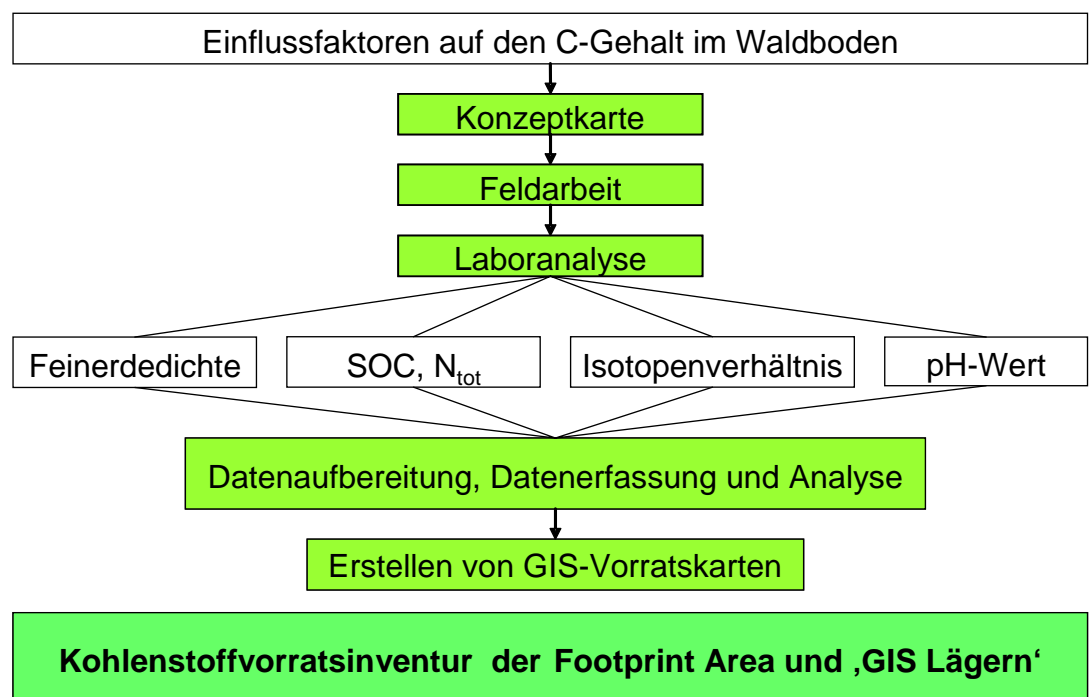


Abb. 15: Generelle Vorgehensweise und Arbeitsablauf

4.2 Erfassung der räumlichen Variabilität des Bodens

Das Hauptziel der Feldarbeit bestand darin, den Kohlenstoffvorrat im Boden möglichst zuverlässig zu erfassen und abzubilden und dabei vor allem die räumliche Variabilität des Kohlenstoffgehaltes der Böden möglichst exakt aufzuzeigen.

Auf Grund der hohen Variabilität der Geländeformen an der Lägern und der Tatsache, dass die Probenmenge auf einem innerhalb einer Diplomarbeit verarbeitbaren Rahmen gehalten werden musste, war ein gezieltes Probenahmemuster am sinnvollsten (BUWAL 1996). Um die Standorte dafür gezielt auswählen zu können, wurden diejenigen Faktoren, welche die Kohlenstoffspeicherung und somit den Kohlenstoffvorrat im Waldboden entscheidend beeinflussen, mit einbezogen. Mit Hilfe dieser wichtigsten Einflussfaktoren wurde eine Hypothesenkarte über die Verteilung des Kohlenstoffvorrates im Waldboden (Konzeptkarte) erstellt.

Das Ausmass der Kohlenstoffspeicherung ist das Resultat folgender Prozesse: Streuproduktion, Mineralisierung, Humifizierung, Humusstabilisierung sowie Humusverlust durch Auswaschung oder Erosion. Diese Prozesse wiederum stehen mit den Bodenbildungsfaktoren in direktem Zusammenhang (Walthert et al. 2004).

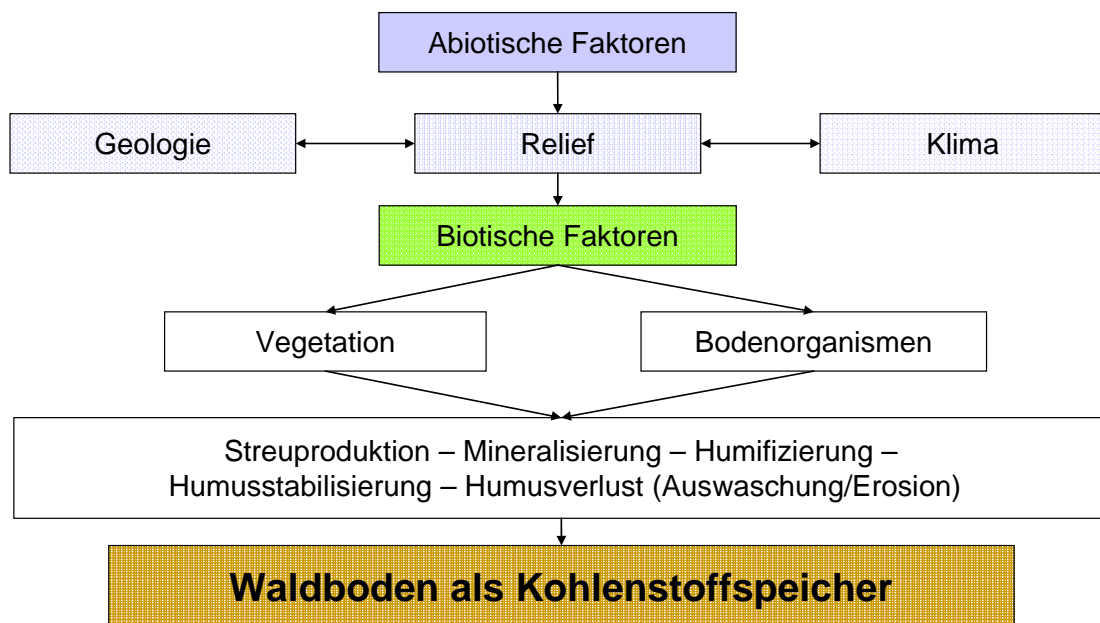


Abb. 16: Einflussfaktoren auf die Kohlenstoffspeicherung im Waldboden

Ausgangsgestein, Klima, Relief, Flora und Fauna, menschliche Tätigkeit und die Zeit sind die Bodenbildungsfaktoren, welche für die unterschiedliche Entwicklung der Böden verantwortlich sind. Zu den abiotischen Faktoren zählen alle unbelebten Einflüsse auf einen Standort, welche die Wechselwirkungen der Organismen untereinander und zu der sie umgebenden Umwelt beeinflussen können. Zu den biotischen Faktoren zählen alle Einflüsse der belebten Umwelt (Schachtschabel et al. 1998).

4.3 Probenahmemuster: GIS-basierte Konzeptkarte

Für die Erstellung der Konzeptkarte wurden die im folgenden Abschnitt beschriebenen Parameter ausgewählt.

4.3.1 Parameter

Bei der Wahl der Parameter wurde darauf geachtet, dass nicht zu viele verschiedene Faktoren mit einbezogen werden, da die Footprint Area sonst in zu viele Einheiten unterteilt würde und es nicht mehr möglich wäre, die Probenmenge und die Feldarbeit im Rahmen einer Diplomarbeit zu verarbeiten. Deshalb wurde je ein Parameter stellvertretend für die abiotischen und die biotischen Faktoren ausgewählt. Zusätzlich wurden die Lotharflächen (durch Orkan „Lothar“ im Jahr 1999 verursachte Schadenflächen, ca. 9 ha = 12% der Footprint Area) ausgeschieden, um allfällige Veränderungen des Kohlenstoffvorrates auf Grund dieses Ereignisses kartieren zu können.

Abiotische Faktoren

Stellvertretend für die abiotischen Faktoren wurde der Parameter Wasserhaushalt/pflanzennutzbare Gründigkeit gewählt. Die Datengrundlage stammt von der Schweizer Bodenkarte 1:25'000 Blatt 1070 Baden, die Daten aus dem Aargauischen Geographischen Informationssystem (Agis). In der Footprint Area kommen 6 unterschiedliche Wasserhaushaltsregimes vor.

Die Menge der organischen Kohlenstoffproduktion im Boden wird stark von den klimatischen Gegebenheiten und vom Wasserhaushalt des Bodens gesteuert, da auch biotische Faktoren wie Pflanzenwachstum und Aktivität der Bodenorganismen stark von den klimatischen Bedingungen abhängig sind (Post et al. 2001). Der Wasserhaushalt hat den Vorteil, dass er klimatische und geologische Merkmale eines Bodens widerspiegelt.

Insgesamt werden drei Bodenwasserhaushaltsklassen unterschieden: Senkrecht durchwaschene Böden, stauwassergeprägte Böden und grund-/hangwassergeprägte Böden. Diese drei Klassen werden mit den möglichen Gründigkeitsbereichen näher beschrieben (FAL 1996). Im nachfolgenden Abschnitt werden die in der Footprint Area vorkommenden Bodenwasserhaushaltsklassen beschrieben und mit dem entsprechenden „Code-Buchstaben“, wie er in der Bodenkarte der Schweiz verwendet wird, versehen (FAL 1996).

Tab. 2: Wasserhaushalt und pflanzennutzbare Gründigkeit (nach der Landeskarte der Schweiz 1:25'000, Bodenkarte Baden, Blatt 1070)

Wasserhaushalt und pflanzennutzbare Gründigkeit:

Senkrecht durchwaschene Böden:

Normal durchlässige Böden:

pflanzennutzbare Gründigkeit:

b	tiefgründig	70 -100 cm
c	mässig tiefgründig	50 – 70 cm
d	ziemlich flachgründig	10 – 50 cm

Stauwasserbeeinflusste Böden:

f	tiefgründig	70 -100 cm
---	-------------	------------

Grund- /hangwasserbeeinflusste Böden

k	tiefgründig	70 -100 cm
---	-------------	------------

Grund- /hangwassergeprägte und überschwemmte Böden:

Selten bis zur Oberfläche porengesättigte Böden:

t	mässig tiefgründig	50 – 70 cm
---	--------------------	------------

Biotische Faktoren

Über die biotischen Faktoren gibt die Bestandeskarte des Kantons Aargau genauere Auskunft. Vor allem das Alter eines Bestandes hat grossen Einfluss auf den Kohlenstoffvorrat im Boden. Auf Jungwuchsflächen ist der Boden schlechter vor Einstrahlung geschützt, wodurch die Bodenorganismen mehr Kohlenstoff veratmen. In alten Beständen stellt sich ein Vorratsgleichgewicht ein, das wesentlich höher ist als der Vorrat in jungen Beständen (Mund 2004). Deshalb wurde stellvertretend für die biotischen Faktoren die Entwicklungsstufe der Waldbestockung gewählt. Ebenfalls ausgeschieden wurden Lothar-Schadenflächen, um zu untersuchen, ob der Kohlenstoffvorrat auf diesen Flächen geringer ist als auf vergleichbaren Flächen.

In der Footprint Area sind 3 Entwicklungsstufen und 2 Stärken von Lotharschäden ausgeschieden worden:

Tab. 3: Klassierung der Entwicklungsstufen und der Lothar-Schadenflächen

<i>Entwicklungsstufen:</i>	<i>Durchmesser D:</i>
Jungwuchs	D < 12 cm
Stangenholz	D = 12 bis 30cm
Baumholz 1+2	D = 31 bis 50 cm (schwaches und mittleres Baumholz)
<i>Lothar -Schadenflächen:</i>	
80 -100 % Schadendeckung	
40 – 80 % Schadendeckung	
ohne Schaden	

D = Durchmesser des Baumes auf Brusthöhe

4.3.2 Konzeptkarte

Als Datengrundlage wurden vom Aargauischen Geographischen Informationssystem (agis) zur Verfügung gestellte Daten verwendet. Ein Datenkatalog mit genauen Angaben über die Daten befindet sich im Anhang. Die Daten wurden im Software Paket ArcGis 9.1 verarbeitet. Jede Wasserhaushaltsklasse wurde mit 3 Vegetationsklassen und 2 Lothar-Schadenklassen verschnitten, woraus eine Konzeptkarte mit unterschiedlichen Einheiten entstanden ist (Annahme: Jede Geländeeinheit vertritt eine Kohlenstoffvorratsklasse).

Bei der Verschneidung der 3 Kategorien Wasserhaushalt, Entwicklungsstufe und Lothar-Schadenflächen sind 40 Einheiten entstanden. Für jede Einheit wurde der Flächenanteil an der Footprint Area berechnet. Einheiten mit weniger als 1% Flächenanteil wurden vernachlässigt. Bei Einheiten mit über 5% Flächenanteil wurde pro 5%-Flächenanteil ein Probenahmestandort ausgewählt. Somit wurden schliesslich 27 Stichprobenstandorte für die Beprobung der Footprint Area bestimmt. In Abbildung 17 ist die Lage der 27 Probenahmestandorte dargestellt. Als Hintergrund wurden die Entwicklungsstufen des Waldes und die Lothar-Schadenflächen gewählt. Die Wasserhaushaltsklassen wurden auf Grund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Die vollständigen Konzeptkarten und die Tabelle mit der Übersicht über die Stichprobenstandorte sind im Anhang zu finden.

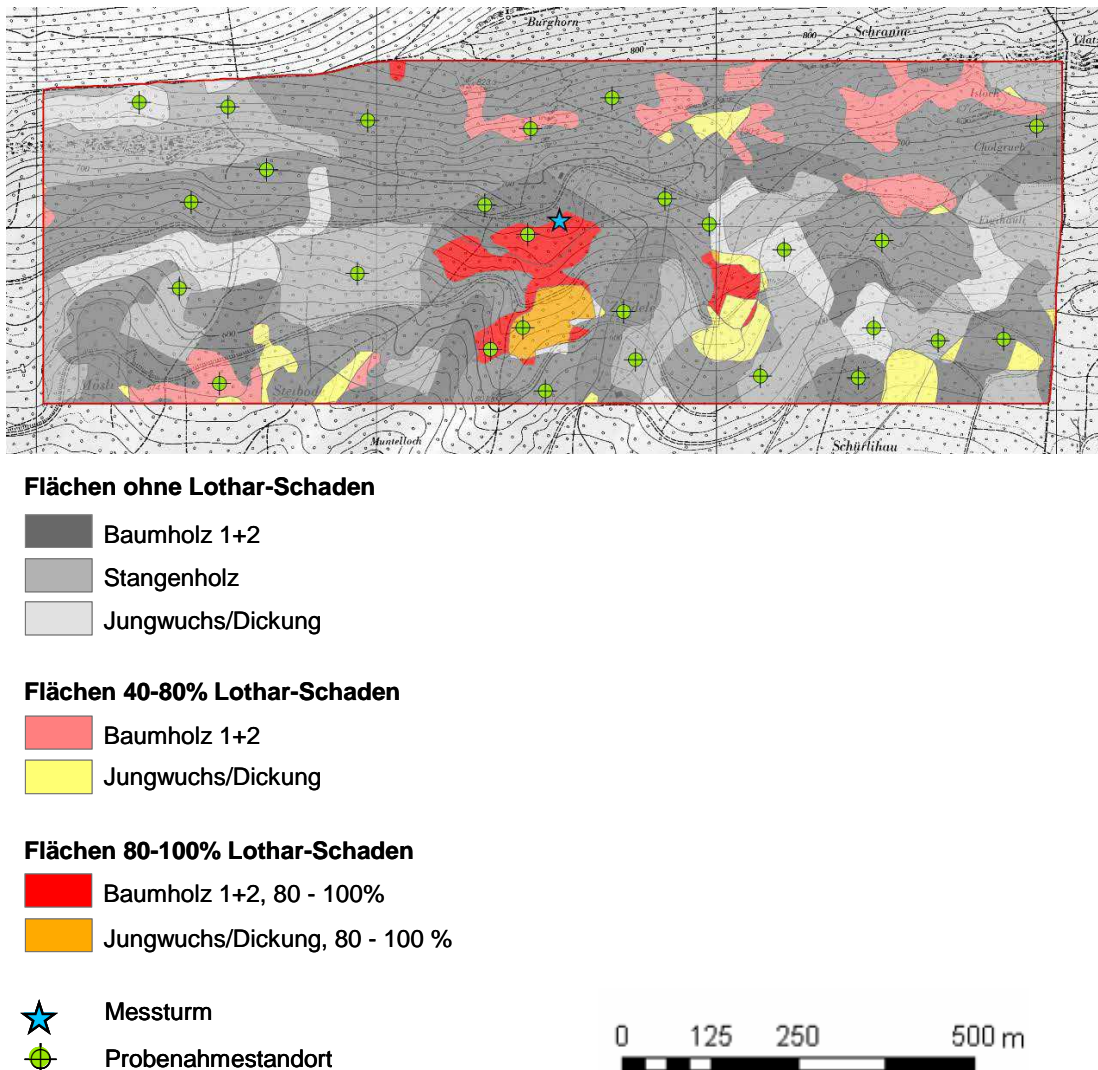


Abb. 17: Probenahmestandorte in der Footprint Area

4.3.3 Standortwahl

Die Standorte wurden direkt im Feld mit Hilfe der Konzeptkarte ausgewählt. Dabei wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- möglichst im Zentrum des zu erfassenden Landschaftselements
- möglichst in ungestörten Beständen und gleichmäßigem Relief
- genügend Abstand von Waldstrassen, Gräben und Bächen

4.4 Probenarten

4.4.1 Bodenproben: Mischprobe

Um eine repräsentative Probe von einer räumlichen Einheit zu erhalten, mussten mehrere Einzelproben zu einer gestörten Mischprobe vereinigt werden. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Kohlenstoffkonzentration der Mischprobe etwa dem Mittelwert des Kohlenstoffgehaltes der beprobten räumlichen Einheit entspricht. Damit ist die Berücksichtigung der Heterogenität der Untersuchungsfläche bereits bei der Probenahme gewährleistet (BUWAL 2003).

In der vorliegenden Arbeit wurden Flächenproben aus 3 Bodentiefen mittels Hohlmeisselbohrer entnommen und zu je einer Mischprobe vereinigt:

- Oberboden: 0–10 cm
- Unterboden: 10–20 cm
- 20–40 cm

In dieser Diplomarbeit ist der Oberboden als die oberste, humose Schicht zu verstehen. Mit Unterboden ist der Wurzelraum unterhalb des Oberbodens bezeichnet.

4.4.2 Dichteproben

Für die Bestimmung der Lagerungs- und der Feinerdedichte waren Einzelproben mit vordefiniertem Volumen nötig, welche mittels Stechzylinder entnommen wurden.

4.4.3 Streuproben

Bei der Beprobung des Auflagehorizontes galten dieselben Voraussetzungen wie bei den Bodenproben. Die Streu wurde in einem 20 x 20 cm Holzrahmen eingesammelt. Um eine repräsentative Probe für die Stichprobenfläche zu erhalten, wurden 5 Stichproben pro Untersuchungsstandort jeweils in diagonalen Anordnung in der Stichprobenfläche entnommen. Die Flächenproben wurden anschliessend zu einer Mischprobe vereinigt.

4.5 Probenahmeplan

4.5.1 Mischproben

Als Beprobungsmethode wurde ein Verfahren verwendet, welches von der NABO (Nationale Bodenbeobachtung, FAL Zürich-Reckenholz) für die langfristige Dauerbeobachtung von Böden angewendet wird. Dieses Verfahren wurde ursprünglich entwickelt, um auch geringe Veränderungen von Schadstoffgehalten statistisch und kausal zuverlässig nachweisen zu können. Diese Methode eignet sich auch deshalb sehr gut, weil die Kohlenstoffvorräte genau bestimmt werden müssen und die Möglichkeit besteht, die Standorte in 5 Jahren noch einmal zu untersuchen, um Veränderungen des Kohlenstoffvorrates bestimmen zu können (BUWAL 2002).

An jedem der 27 Standorte wurde eine quadratische Beprobungsfläche von 100 m² metergenau eingemessen und durch Fixpunkte gesichert. Die Eckpunkte wurden an jedem Standort mit Holzpfosten, welche eine Schraube und eine Unterlagsscheibe enthalten, gesichert. So können die Standorte später mit dem Metalldetektor wieder geortet werden.

In Abbildung 18 ist das Probenahmemuster dargestellt, wie es sich im Rahmen der Nationalen Bodenbeobachtung bewährt hat.

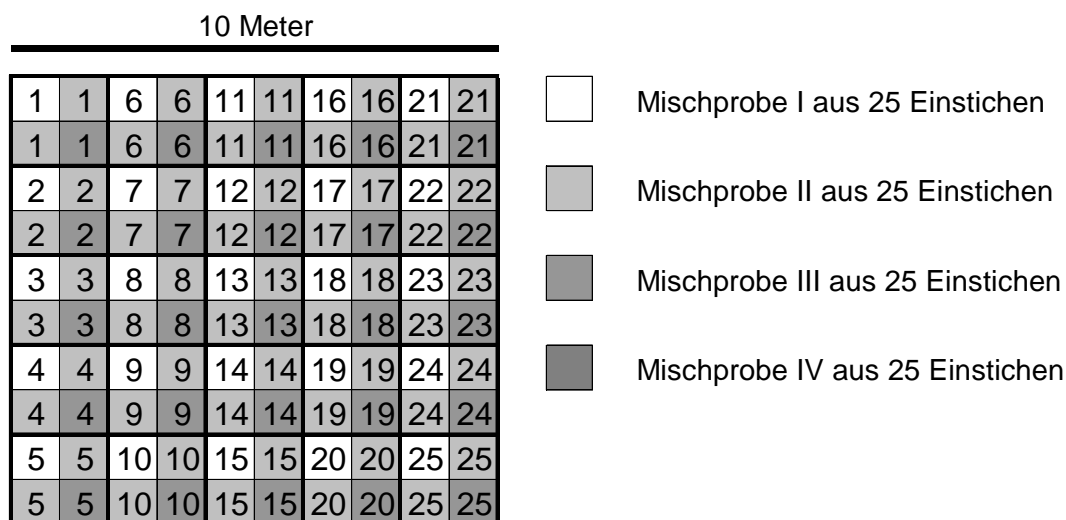


Abb. 18: Schematische Darstellung der Beprobungsfläche und der Probenahme an den 27 Untersuchungsstandorten

In Quadratrasteranordnung werden mit einem Hohlmeisselbohrer aus Einfachstahl von 3 cm Innendurchmesser je eine Mischprobe aus den 25 Einstichen (Tiefen 0–10, 10–20 und 20–40 cm) entnommen. Um die Standortreproduzierbarkeit zu erfassen (Gesamtstreuung der Probenahme für die Beprobungsfläche) wurden auf 4 der insgesamt 27 Beprobungsflächen 4 Mischproben entnommen, wie in Abbildung 18 dargestellt. Wegen der Aufwendigkeit der Feld- und Laborarbeiten konnten im Rahmen dieser Diplomarbeit an den übrigen Standorten nur je 1 Mischprobe pro Tiefenklasse entnommen werden.

4.5.2 Dichteproben

Für die Ermittlung der Bodendichte wurden an jedem Untersuchungsstandort an drei Punkten mit einem Stechzylinder je 2 Stichproben entnommen. Es wurden also 6 Dichtewerte für jede Untersuchungsfläche ermittelt.

4.5.3 Streuproben

Pro Standort wurden 5 Stichproben diagonal über die Beprobungsfläche entnommen. Die Streu wurde in einem 20 x 20 cm Holzrahmen eingesammelt, zu einer Mischprobe vereint und anschliessend gewogen.

Tab. 4: Übersicht über die Beprobungsarten an den 27 Probenahmestandorten

Übersicht über die Beprobungsarten	Beprobte Tiefen:	Werkzeug/Hilfsmittel:
Bodenproben: 1 Mischprobe aus 25 Einstichen auf einer 10x10m Stichprobenfläche, 1 Einstich pro 4 m ²	0 - 10 cm 10 - 20 cm 20 - 40 cm	Hohlmeisselbohrer
Streuproben: 1 Mischprobe aus 5 Subsampels, Beprobung diagonal über die Stichprobenfläche		Sammelrahmen 20 x 20 cm
Dichteproben: 3 x 2 Proben mit vordefinertem Volumen	0 - 10 cm 10 - 20 cm 20 - 40 cm	Stechzylinder

4.6 Labormethoden

4.6.1 Probenaufbereitung

Mischproben

Die Trocknung der Proben erfolgte im Trockenschrank bei 40 °C während 48 Stunden. Alle Mischproben wurden zermörsert und mit Hilfe eines Handsiebes (Maschenweite 2 mm) in die Fraktionen Feinerde und Skelettmaterial aufgeteilt. Um eine homogene Durchmischung des Materials zu erreichen, war die Verwendung des Probenteilers unabdingbar. Damit konnte die Feinerde in die für die chemischen Analysen notwendigen Mengen geteilt werden. Die für die C/N-Analyse verwendete Teilmenge (3 g) wurde mit der Kugelmühle gemahlen.

Dichteproben

Ebenfalls bei 40 °C aber während 24 Stunden wurden die Proben aus den Stechzylindern getrocknet und anschliessend gewogen. Mit Hilfe des Handsiebes wurde jede Probe in die Fraktionen Feinerde und Skelettmaterial aufgeteilt. Beide Fraktionen wurden gewogen.

Streuproben

Die Trocknung aller Proben erfolgte ebenfalls im Trockenschrank bei 40 °C während 24 Stunden. Anschliessend wurde die gesamte Probe gewogen, um später abschätzen zu können, wie viel Streu in der Footprint Area vorhanden ist. Die Mischproben wurden mit einem Häcksler zerkleinert und mit dem Probenteiler in Teilmengen von 5 g unterteilt. Diese Teilmenge wurde für die C/N-Analyse in der Kugelmühle gemahlen.

4.6.2 Bestimmung der chemischen Bodeneigenschaften

Bestimmung der Wasserstoffionenkonzentration (pH)

Die Wasserstoffionenkonzentration (pH-Wert) beschreibt den Säuregehalt der Bodenlösung. Der Säurezustand beeinflusst praktisch alle biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse im Boden.

Die Messung erfolgte potentiometrisch mit einer kombinierten Glaselektrode, welche in die Bodensuspension getaucht wurde (Page et al. 1982). Im Rahmen dieser Arbeit wurde der pH-Wert in einer CaCl₂-Lösung (Elektrolytlösung) bestimmt, in einem Verhältnis Feststoff zu Wasser von 1:2.5.

Bestimmung von Totalkohlenstoff- und Totalstickstoffgehalt mit dem CHN-Elementaranalysator

Mit diesem Messverfahren wird der gesamte Gehalt von Kohlenstoff (C_{tot}) beziehungsweise Stickstoff (N_{tot}) mit einem CHN-Elementaranalysator (Elementar Vario EL, Elementar Analysensysteme GmbH) ermittelt. Gerade in Gebieten mit karbonathaltigem Ausgangsgestein kann ein beträchtlicher Teil des Kohlenstoffs allerdings anorganisch (C_{karb}) sein. Da aber nur der organische Anteil (C_{org}) ermittelt werden sollte, musste der anorganische Anteil am Gesamtkohlenstoffgehalt nachträglich mit einer anderen Methode ermittelt werden.

Nach der Einwaage in Zinnschiffchen wurde die gemahlene Bodenprobe in einer angereicherten Sauerstoffatmosphäre bei 950 °C explosionsartig verbrannt. Mit Hilfe eines Heliumgasstromes wurde das frei werdende CO_2 auf eine Adsorptionssäule gebracht und an deren Oberfläche adsorbiert. Später wird es mittels Ausheizen durch einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor geleitet. Die entstandene Spannungsänderung des Detektors ist der Konzentration des CO_2 proportional. Das bei der Verbrennung zusätzlich entstandene Stickoxid wurde für die Bestimmung von N benötigt. Daraus konnte dann der C_{tot} - ($= C_{\text{org}} + C_{\text{karb}}$) und der N_{tot} -Gehalt ermittelt werden (Smith 1990).

Bestimmung des Verbrennungsrückstandes der Streuproben

Die gemahlene Streuproben wurden ebenfalls in Zinnschiffchen eingewogen und die C-Konzentration mit dem CHN-Elementaranalysator gemessen. Bei Streuproben werden Kohlenstoffgehalte von ungefähr 500 g C/kg erwartet. Tatsächlich wurde jedoch nur ein Wert zwischen 280 und 420 C/kg ermittelt. Diese gering ausgefallene Kohlenstoffkonzentration der Streu lässt vermuten, dass bei der Probennahme Mineralboden in die Streuproben gelangte.

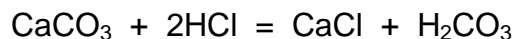
Um dieser Vermutung nachzugehen wurden 2 g gemahlene Streu in Keramiktiegel eingewogen und im Muffelofen bei 950 °C während 30 Minuten verkohlt. Dabei wird alles organische Material verbrannt. Durch erneutes wiegen nach der Verbrennung kann anhand der Rückstände berechnet werden, wie viel Mineralboden in der Streuprobe enthalten war.

Für die Kohlenstoffvorratsberechnungen der Streu wurden allerdings die C-Konzentrationen, welche mit dem CHN-Elementaranalysator ermittelt wurden, verwendet, weil es bei der Vorratsberechnung um prozentuale Anteile am Gewicht der gesamten Stichprobe geht.

Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes und des C/N-Verhältnisses

Der Carbonatgehalt wurde mit der Titrationsmethode bestimmt. Dabei wird 1 g gemahlene Bodenprobe in einen Erlenmeyerkolben eingewogen und mit 50 ml 1M Salzsäure versetzt. Damit die Reaktion der Salzsäure mit dem Carbonat (CaCO_3) vollständig abläuft, wird die Lösung 2 Minuten erhitzt. Die Suspension wird anschliessend dispergiert, von der klaren Lösung werden 20 ml für die Titration verwendet. Als pH-Indikator werden der Lösung zwei Tropfen Phenolphthalein beigelegt und anschliessend mit 1M Natriumlauge titriert bis ein deutlicher Farbumschlag (pH-Wert = 7) sichtbar ist. Mit dieser Methode wird der Karbonatgehalt der Bodenprobe bestimmt, woraus der anorganische Kohlenstoffgehalt (C_{karb}) mit untenstehender Formel berechnet werden kann. Für die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes (C_{org}) wird C_{karb} von C_{tot} abgezogen (Page et al. 1982).

Carbonatbestimmung:



Mit 2 M HCl wird 1 M Kalziumcarbonat neutralisiert

HCl-Verbrauch D_v : $D = 20 \text{ ml HCl} - x \text{ ml NaOH}$

$$D_v = D \cdot 1 \text{ M HCl}$$

CaCO_3 -Gehalt P_{CaCO_3} : $P_{\text{CaCO}_3} = D_v / 2$

$$P = P_{\text{CaCO}_3} \cdot 100$$

$$P\% = P / 400 \text{ mg}$$

C_{karb} -Gehalt: $C_{\text{karb}} = P\% / 100 \cdot 12$

x die Menge verbrauchter Natronlauge beim Farbumschlag in ml, D HCl-Verbrauch in ml, D_v HCl-Verbrauch in mmol, P_{CaCO_3} in der Probe enthaltener CaCO_3 -Gehalt in mmol in 0.4g Bodenprobe (da nur 20 ml titriert → nur 40% der Einwaage), P in der Probe enthaltener CaCO_3 -Gehalt in mg in 0.4g Bodenprobe, $P\%$ CaCO_3 -Gehalt in %

Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ -Isotopensignatur

Für die Ermittlung der Isotopenverhältnisse an 7 ausgewählten Standorten wurde die gemahlene Bodenprobe in Zinnschiffchen eingewogen und dreimal mit Salpetersäure behandelt, um den anorganischen Kohlenstoff aus der Probe zu entfernen.

Das Isotopenverhältnis wurde am Institut für Pflanzenwissenschaften der ETH Zürich mit einem Elementaranalysator (FlashEA 1112, Thermo Electron Corp.), der an

ein Massenspektrometer (Isotope Ratio Mass Spectrometry [IRMS], Delta PlusXP Thermo Electron Corp.) gekoppelt ist, gemessen.

Die Werte werden in der δ -Notation bezüglich des Standortes angegeben:

4.6.3 Bestimmung der physikalischen Bodeneigenschaften

Bestimmung der Skelettgehalte

Der Skelettgehalt eines Bodens besteht aus allen mineralischen Bestandteilen, die grösser als 2 mm sind. Er ist eine wichtige Schätzgrösse zur Beurteilung des Feinerdeanteils. Ein hoher Skelettgehalt bedeutet, dass wenig Feinerde vorhanden ist. In dieser Arbeit wurde er als gewichtsmässiger Anteil des Skeletts der gesamten Probe bestimmt.

Bestimmung der Lagerungs- und Feinerdedichte

Das Verhältnis zwischen Trockenmasse und Lagerungsvolumen wird als Lagerungsdichte ρ_a bezeichnet. Weil man die Dichte der Festsubstanz nicht kennt, ist die Lagerungsdichte ρ_a nur eine scheinbare Dichte (Smith und Mullins 1991). Die Dichte der Feinerde ist das Verhältnis der Trockenmasse der Feinerde zum Lagerungsvolumen. Die verwendeten Stechzylinder haben ein Volumen von 100 cm³.

Lagerungsdichte ρ_a :

$$\rho_a [g/cm^3] = M_a / V$$

Feinerdedichte ρ_f :

$$\rho_f [g/cm^3] = M_f / V$$

M_a Trockengewicht der Probe in g, M_f Trockengewicht der Feinerde in g, V Volumen in cm³, Dichte in g/cm³.

4.7 Bestimmung der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte

Die Kohlenstoff- und der Stickstoffvorräte von Streu und Mineralboden wurden nach folgenden Formeln berechnet:

Streu:
$$C_{\text{tot}} [\text{t C/ha}] = C_{\text{konz(S)}} / 100 \times M_{\text{mittel}} / A \times 100$$

$$N_{\text{tot}} [\text{t N/ha}] = N_{\text{konz(S)}} / 100 \times M_{\text{mittel}} / A \times 100$$

$C_{\text{konz(S)}}$ Kohlenstoffgehalt der Streu in %, $N_{\text{konz(S)}}$ Stickstoffgehalt der Streu in %, M_{mittel} Trockengewicht der mittleren Menge der Streu in g/cm^2 (*100 → Umrechnung in t/ha), A Fläche des Beprobungsrähmchens in cm^2 .

Oberboden 0–10 cm:
$$\text{SOC}_{10} [\text{t C/ha}] = C_{\text{konz(0-10)}} / 100 \times \rho_{\text{f(0-10)}} \times 10'000 \times 0.1 \text{ m}$$

$$\text{SON}_{10} [\text{t N/ha}] = N_{\text{konz(0-10)}} / 100 \times \rho_{\text{f(0-10)}} \times 10'000 \times 0.1 \text{ m}$$

$C_{\text{konz(0-10)}}$ Kohlenstoffgehalt des Oberbodens in %, $N_{\text{konz(0-10)}}$ Stickstoffgehalt des Oberbodens in %, $\rho_{\text{f(0-10)}}$ Dichte der Feinerde des Oberbodens in g/cm^3 .

Ober- und Unterboden 0–40 cm:

$$\text{SOC}_{40} [\text{t C/ha}] =$$

$$C_{\text{konz(0-10)}} / 100 \times \rho_{\text{f(0-10)}} \times 10'000 \times 0.1 \text{ m}$$

$$+ C_{\text{konz(10-20)}} / 100 \times \rho_{\text{f(10-20)}} \times 10'000 \times 0.1 \text{ m}$$

$$+ C_{\text{konz(20-40)}} / 100 \times \rho_{\text{f(20-40)}} \times 10'000 \times 0.2 \text{ m}$$

$C_{\text{konz(0-10)}}$ Kohlenstoffgehalt des Oberbodens in %, $C_{\text{konz(10-20)}}$ Kohlenstoffgehalt der Bodentiefe 10–20 cm in %, $C_{\text{konz(20-40)}}$ Kohlenstoffgehalt der Bodentiefe 20–40 cm in %, $\rho_{\text{f(0-10)}}$, $\rho_{\text{f(10-20)}}$ und $\rho_{\text{f(20-40)}}$ Dichte der Feinerde der entsprechenden Bodentiefen in g/cm^3 .

4.8 Statistische Methoden

4.8.1 Ergebnisunsicherheit und Qualitätssicherung

Bei einer Untersuchung entstehen zwangsläufig Fehler und damit Unsicherheiten, welche einen grossen Einfluss auf das Endergebnis und dessen Qualität haben. Die vielen Einflüsse auf das Resultat der vorliegenden Untersuchungen sind in untenstehender Graphik schematisch dargestellt. Dabei fällt besonders auf, dass die Fehlerquelle im Labor am geringsten ist, da die heutigen Messinstrumente eine sehr hohe Genauigkeit aufweisen.

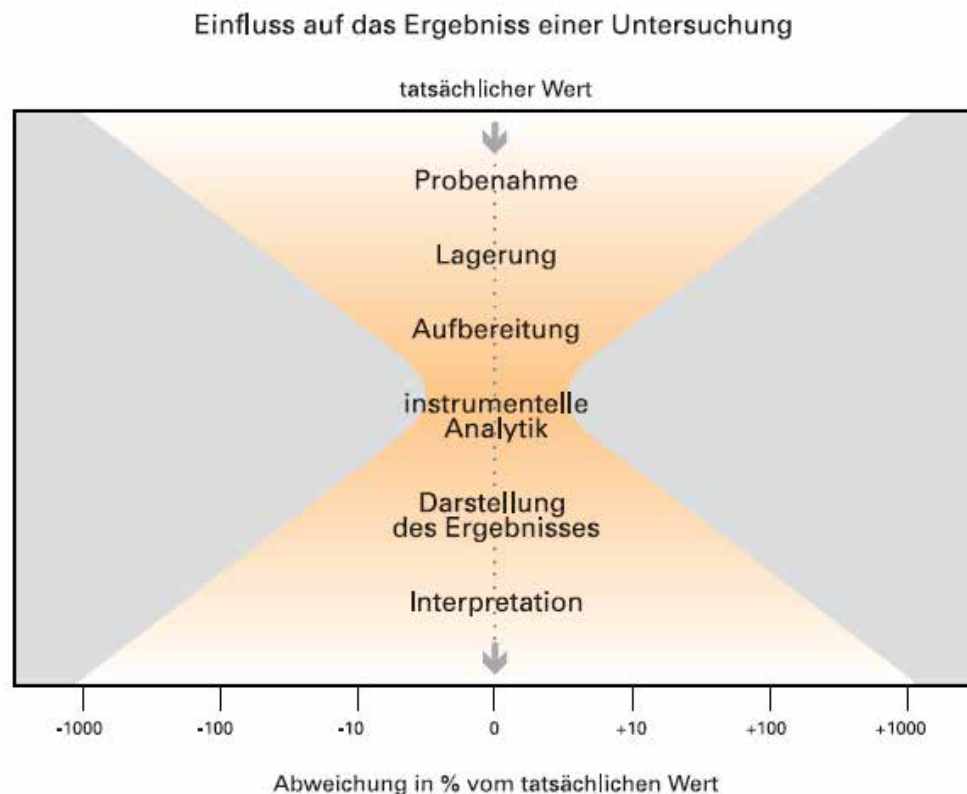


Abb. 19: Schematische Darstellung der Fehlerquellen bei einer Untersuchung (Unterlagen Laborkurs 2005)

Das Hauptproblem der Ergebnisunsicherheit liegt bei der Probennahme. Dabei spielt die räumliche Variabilität und damit die Heterogenität des Kohlenstoffvorrates im Boden der Footprint Area eine zentrale Rolle. Die Fehler im Stichproben- und Massenverkleinerungsverfahren können nur näherungsweise quantifiziert werden, weil die Fehlerquellen mannigfaltig sind und es unmöglich ist, eine absolut repräsentative

Probe zu gewinnen. Um sich dem wahren Wert so gut wie möglich anzunähern, müssen die Schritte im Stichproben- und Massenverkleinerungsverfahren so angewendet werden, dass jede Subprobe für die vorhergehende Probe so repräsentativ wie möglich ausfällt und der Fehler dadurch möglichst klein bleibt (BUWAL 2003).

Um eine genügende Qualität zu erreichen, wurden im Rahmen dieser Arbeit während der Planung, der Feldarbeit und im Labor Massnahmen zur Qualitätssicherung getroffen mit dem Hauptziel, die Strategien der Fehlerreduktion rückverfolgbar und nachvollziehbar zu machen.

4.8.2 Fehlerfortpflanzung

Die Kohlenstoffvorräte an den einzelnen Standorten wurden aus Kohlenstoffkonzentration und Feinerdedichte ermittelt. Wie vorgängig erwähnt (→ Kap. 4.5.1) wurden an 4 Standorten je 4 Mischproben entnommen, um die Standortreproduzierbarkeit abschätzen zu können. Da die Feinerdedichte stark variiert, wurden an jedem Standort 6 Stichproben zur Ermittlung der Dichtevariabilität entnommen. Die Messgenauigkeit im Labor konnte durch Doppelbestimmung der Kohlenstoffkonzentrationen ermittelt werden. Der Labormessfehler wurde für alle Proben als gleich gross angenommen. Mehrfachbestimmungen von Messwerten sind für die Fehlerabschätzung unabdingbar.

Der mittlere Fehler des Kohlenstoffvorrates wird als Standardabweichung der Eingangsvariablen angegeben. Da die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte aus dem C-, bzw. N-Gehalt und der Feinerdedichte berechnet wurden, kann die Standardabweichung der Vorräte mit folgender Formel für die Fehlerfortpflanzung berechnet werden:

$$\begin{aligned} \text{Oberboden 0–10 cm:} \quad s_{C\text{-vorrat}(0-10)} &= \sqrt{(C_{\text{konz}}(0-10)^2 \times s_{pf}^2 + \rho_f^2 \times s_{C\text{konz}}^2)} \\ s_{N\text{-vorrat}(0-10)} &= \sqrt{(N_{\text{konz}}(0-10)^2 \times s_{pf}^2 + \rho_f^2 \times s_{N\text{konz}}^2)} \end{aligned}$$

$s_{C\text{-vorrat}}$, $s_{N\text{-vorrat}}$ *mittlere Standardabweichung von Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat*, $s_{C\text{konz}}$, $s_{N\text{konz}}$ *Standardabweichung der C- und N-Konzentration (Stdabweichung des Labormessfehlers)*, s_{pf} *Stdabweichung der 6 Messwerte der Feinerdedichte*.

Ober- + Unterboden 0–40 cm:

Die Standardabweichung wurde für jede Tiefenklasse analog der Formel für den Oberboden berechnet. Die Standardabweichung der Vorräte für die gesamte Tiefe wurde aus der Summe der Standardabweichungen von jeder Tiefenklasse gebildet:

$$\begin{aligned} s_{C\text{-vorrat}(0-40)} &= \sqrt{(s_{C\text{-vorrat}(0-10)}^2 + s_{C\text{-vorrat}(10-20)}^2 + s_{C\text{-vorrat}(20-40)}^2)} \\ s_{N\text{-vorrat}(0-40)} &= \sqrt{(s_{N\text{-vorrat}(0-10)}^2 + s_{N\text{-vorrat}(10-20)}^2 + s_{N\text{-vorrat}(20-40)}^2)} \end{aligned}$$

4.8.3 Faktorenanalyse mit ANOVA (Analysis of Variance)

Mit Hilfe der Varianzanalyse kann statistisch untersucht werden, ob sich die Kohlenstoffvorratsdaten anhand der in Kapitel 4.3.1 dargestellten Parameter in Gruppen einteilen lassen. Das Verfahren testet, ob die Varianz zwischen den Gruppen grösser ist als die Varianz innerhalb der Gruppen. Dadurch kann ermittelt werden, ob die Gruppeneinteilung sinnvoll ist oder nicht, bzw. ob sich die Gruppen signifikant unterscheiden oder nicht.

Die ANOVA wurde mit den Faktoren Wasserhaushalt, Entwicklungsstufen und Ausgangsmaterial durchgeführt. Wenn sich die Gruppen, welche innerhalb eines Faktors bestimmt wurden, signifikant unterscheiden, kann davon ausgegangen werden, dass der Kohlenstoffvorrat davon beeinflusst wird und die Footprint Area nach diesem Faktor in Einheiten mit ähnlichem Kohlenstoffvorrat eingeteilt werden kann.

Mit der ANOVA kann auch untersucht werden, ob der Kohlenstoffvorrat von zwei beziehungsweise von allen drei Faktoren beeinflusst wird. Dabei werden die Varianzen von unterschiedlichen Gruppen mit mehreren Einflussfaktoren getestet.

ANOVA (Analysis of Variance) im Statistik Programm SPSS

Die einfaktorielle Varianzanalyse wurde mit dem Type I und III Sum of Square durchgeführt. Type I und Type III unterscheiden sich dadurch, dass die Varianzen unterschiedlich abgeschätzt werden und dadurch die Einflussfaktoren auf zwei Arten getestet werden können.

Einfaktorielle ANOVA: Type III Sum of Squares

Bei der Varianzanalyse mit Type III Sum of Square wird untersucht, ob ein Faktor auf die Grundgesamtheit einen signifikanten Einfluss hat, d. h. ob auf Grund des Einflussfaktors die Grundgesamtheit in mindestens zwei Gruppen geteilt werden kann oder nicht. Wenn alle Gruppen derselben Grundgesamtheit entstammen, dann sollten die Varianzen gleich gross sein. Das heisst, sie dürfen sich nur zufällig durch einen kleinen Fehler (ϵ) unterscheiden. Dabei kann auch getestet werden, ob sich die Grundgesamtheit auf Grund einer Faktorenkombination (z.B. Wasserhaushalt und Entwicklungsstufe oder Wasserhaushalt und Ausgangsmaterial) in zwei Gruppen einteilen lässt oder nicht.

- Nullhypothese $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 + \varepsilon$
- Alternativhypothese $H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 + \varepsilon$

Nullhypothese: Die Stichproben stammen aus normal verteilten Grundgesamtheiten mit gleichen Mittelwerten und gleichen Varianzen, also aus einer einzigen Gesamtheit.

Alternativhypothese: H_0 stimmt nicht, in mindestens einem Fall unterscheiden sich die Mittelwerte, die Stichproben stammen also aus mindestens 2 Grundgesamtheiten.

μ : Mittelwert

ε : zufälliger Fehler

Einfaktorielle ANOVA: Type I Sum of Squares

Um genauer zu erfahren, ob ein Zusammenhang zwischen den Faktoren besteht, wurde die ANOVA ebenfalls mit dem Type I Sum of Square durchgeführt. Der Type I ist auch als die hierarchische Auflösung der Methode bekannt. Dabei werden die Variablen in der Reihenfolge, wie man sie in die ANOVA einliest, gewichtet. Die ANOVA muss sechs Mal durchgeführt werden, weil bei drei Inputfaktoren sechs Permutationen möglich sind.

4.8.4 Ergebnisunsicherheit bei der Kohlenstoffvorratsinventur

Da bei der Kohlenstoffinventur nur ein kleiner Teil der Footprint Area erfasst wird, sind alle Schätzungen mit dem Stichprobenfehler behaftet. Solche zufälligen Fehler lassen sich mit statistischen Kenngrößen wie Standardabweichung, respektive Varianz und Vertrauensintervall quantifizieren. Diese Kenngrößen sind direkt von der Variabilität des Merkmals und von der Anzahl der Beobachtungen abhängig. Je größer die Geländevariabilität und je kleiner die Probenzahl, desto ungenauer die Schätzung (Brassel und Brändli 1999).

Für die Vorratsangaben der Flächeninventur wurde der doppelte Standardfehler in Prozent des Mittelwertes als Genauigkeitsmass für den Stichprobenfehler angewendet. Unter Annahme der Normalverteilung der Mittelwerte, liegt der wahre Mittelwert der Grundgesamtheit mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 95% im Bereich angegebener Mittelwert \pm doppelter Standardfehler.

4.8.5 Extrapolation fehlender Werte

Die meisten Standorte in der Footprint Area weisen hohe Skelettgehalte auf, was die Probenentnahme erschwert. An 3 Standorten konnte die Tiefenklasse 10 - 20 cm und an 12 Standorten die Tiefenklasse 20–40 cm dadurch nicht beprobt werden. In diesen

Tiefenklassen muss aber ebenfalls organischer Kohlenstoff vorhanden sein, auf Grund des hohen Skelettgehaltes allerdings in kleineren Mengen. Demzufolge wird angenommen, dass das Verhältnis des Kohlenstoffvorrates der obersten 10 cm zum Kohlenstoffvorrat des 10–20 cm-Horizonts (O/M) bzw. das Verhältnis des C-Vorrates der obersten 10 cm zum C-Vorrat des 20–40 cm-Horizonts (O/U) beträchtlich kleiner ist, als in Böden wo diese Tiefenklassen beprobt werden konnten. Für die Extrapolation der fehlenden Werte wurde deshalb jeweils vom kleinsten Verhältnis ausgegangen.

Böden, welche sich auf Malmkalken entwickelt haben, weisen viel höhere Skelettgehalte auf, als Böden, die sich auf der Unteren Süßwassermolasse entwickelt haben. Deshalb wurde das Extrapolationsverfahren auf das Ausgangsmaterial angepasst und für Böden auf Malmkalk ein anderes Verhältnis als für Böden auf Molasse gewählt.

Zuerst wurden die Verhältnisse der vorhandenen Werte von Oberboden (O = 0–10 cm) zu Unterboden (M = 10–20 cm, U = 20–40 cm) berechnet. Für die Extrapolation wurde das tiefste Verhältnis der jeweiligen Gruppe verwendet.

Die fehlenden Werte wurden nach folgender Methode ermittelt:

Extrapolation der Standorte auf Malmkalk:

- ***Abschätzung fehlender Werte der Tiefenklasse M (10–20 cm):***

Kleinstes vorhandenes Verhältnis $M / O = 0.62$

Für die Abschätzung der fehlenden Kohlenstoffvorräte wurde mit 50% des kleinsten Verhältnisses gerechnet; also mit einem Wert von 0.3.

An 3 Standorten konnte diese Tiefenklasse nicht ermittelt werden. Der Kohlenstoffvorrat dieser 3 Standorte wurde mit folgender Formel berechnet:

Extrapolation für M (10–20 cm):	$C_{\text{tot}}M = C_{\text{tot}}O * 0.3$
---------------------------------	---

- ***Abschätzung der fehlenden Werte der Tiefenklasse U (20–40 cm):***

Kleinstes Verhältnis $U / O = 1.09$

Für die Abschätzung der fehlenden Kohlenstoffvorräte wurde mit knapp 50% des kleinsten Verhältnisses gerechnet; also mit einem Wert von 0.5.

Bei den drei oben genannten Standorten, welche einen besonders hohen Skelettgehalt aufwiesen, so dass bereits 10–20 cm nicht mehr beprobt werden konnten, wurde sogar nur 25% des kleinsten Verhältnisses als Faktor für die Berechnung verwendet, also mit einem Wert von 0.25 gerechnet.

An insgesamt 10 Standorten konnte diese Tiefenklasse nicht ermittelt werden. Der Kohlenstoffvorrat dieser 10 Standorte wurde mit folgender Formel berechnet:

Extrapolation für U (20–40 cm):	$C_{\text{tot}}U = C_{\text{tot}}O * 0.5$
Bzw. an den sehr skeletthaltigen Standorten:	$C_{\text{tot}}U = C_{\text{tot}}O * 0.25$

Extrapolation der Standorte auf Molasse:

- ***Abschätzung der fehlenden Werte der Tiefenklasse M (10–20 cm):***

Keine fehlenden Werte.

- ***Abschätzung der fehlenden Werte der Tiefenklasse U (20–40 cm):***

Kleinstes Verhältnis $U / O = 0.78$

Für die Abschätzung der fehlenden Kohlenstoffvorräte wurde mit 50% des kleinsten Verhältnisses gerechnet; also mit einem Wert von 0.4.

An 2 Standorten konnte diese Tiefenklasse nicht ermittelt werden. Der Kohlenstoffvorrat dieser 2 Standorte wurde mit folgender Formel berechnet:

Extrapolation für U (20–40 cm):	$C_{\text{tot}}U = C_{\text{tot}}O * 0.4$
---------------------------------	---

- ***Extrapolierte Werte pro Tiefenklasse:***

Tab. 5: Zusammenfassung über die Anzahl der extrapolierten Werte nach Tiefenklassen

Tiefenklasse cm	Anz. Proben vorhanden / total	Anz. Proben extrapoliert
0 - 10	27 / 27	0
10 - 20	24 / 27	3
20 - 40	15 / 27	12

4.9 Kohlenstoffvorratskarte

Die Kohlenstoffvorratskarten sowie die Stickstoffvorratskarte wurden mit dem Software Paket ArcGis 9.1 von ESRI erstellt. In einem ersten Schritt wurde geprüft, ob sich die Probenahmestandorte nach den Kriterien der Konzeptkarte in Gruppen mit ähnlichen Kohlenstoffvorräten einteilen liessen, oder ob für die Einteilung besser andere Bodenbildungsfaktoren gewählt werden müssten. Geprüft wurde auch die Möglichkeit, dass gar keine Untereinheiten gebildet werden müssen, weil alle Standorte ohnehin ähnliche Vorräte aufweisen.

4.9.1 Kartiereinheiten

Die Footprint Area wurde an Hand von Kartiereinheiten in Flächeneinheiten unterteilt. Für jede Einheit wurde der Mittelwert des Vorrates berechnet und in der Karte dargestellt.

Vorratskarten wurden für die Vorräte im Oberboden, für die Vorräte im Ober- und Unterboden inklusive der Streu und für die Stickstoffvorräte im Oberboden erstellt.

4.9.2 Interpolation in GIS

Die gleichen Vorratskarten wurden ebenfalls mit Hilfe des Interpolationsverfahrens Kriging in ArcGis 9.1 erstellt. Interpolationsverfahren sind wenig zeitaufwändig und haben den Vorteil, dass keine anderen Basisdaten benötigt werden, wie es etwa die vorgenannte Kartierungsmethode erfordert. Aus diesen Gründen sollen die Resultate der beiden Methoden verglichen werden.

Kriging ist ein geostatistisches Interpolationsverfahren, das räumliche Zusammenhänge von räumlich verteilten Daten schätzt. Dabei handelt es sich um ein lineares Schätzverfahren, das Werte an unbeprobten Orten schätzt (Zhang und McGrath 2004). Auch im Interpolationsverfahren Kriging wird ein unbekannter Wert durch ein gewichtetes Mittel der bekannten Nachbarwerte geschätzt. Grundlage für den Schätzer ist dabei das geostatistische Modell und das Variogramm, das den räumlichen Zusammenhang des Prozesses beschreibt, wodurch das geostatistische Modell optimiert wird (Burrough und McDonnell 1998).

5 Resultate

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht über die 27 Stichprobenstandorte. Die beprobten Tiefenklassen sind in der Tabelle mit einem Kreuz markiert. Vor allem bei den flachgründigen Rendzinen konnte der 20–40cm-Horizont nicht beprobt werden. An drei Standorten war auf Grund der hohen Skelettgehalte sogar eine Beprobung des 10–20cm-Horizonts unmöglich.

Tab. 6: Übersicht über die Probenahmestandorte und die beprobten Tiefen
(X = beprobt); Beprobungstiefen: O = 0–10 cm, M = 10–20 cm, U = 20–40 cm

Standort und Wasserhaushalt		Entwicklungs- stufe	Lothar- schaden	Bodentyp	Tiefe		
Senkrecht durchwaschene Böden:					O	M	U
B1	Normal durchlässig, tiefgründig	Baumholz		neutrale Braunerde	X	X	
B2		Baumholz		saure Braunerde	X	X	X
B3		Stangenholz		Kalkbraunerde	X	X	X
B4		Jungwuchs		Kalkbraunerde	X	X	X
B5		Baumholz	80 - 100 %	saure Braunerde	X	X	X
B6		Baumholz	40 - 80%	saure Braunerde	X	X	X
C1	Normal durchlässig, mässig tiefgründig	Baumholz		neutrale Braunerde	X	X	X
C2		Baumholz		Rendzina, verbraunt	X	X	
C3		Baumholz		neutrale Braunerde	X	X	X
C4		Stangenholz		Kalkbraunerde	X	X	X
C5		Stangenholz		saure Braunerde	X	X	X
C6		Jungwuchs		neutrale Braunerde	X	X	X
D1	Normal durchlässig, flachgründig	Baumholz		Rendzina, verbraunt	X	X	
D2		Baumholz		Rendzina	X	X	
D3		Baumholz		Rendzina	X		
D4		Baumholz		Kalkbraunerde	X	X	
D5		Baumholz		Rendzina	X		
D6		Baumholz		saure Braunerde	X	X	X
D7		Stangenholz		Rendzina	X	X	
D8		Stangenholz		saure Braunerde	X	X	X
D9		Jungwuchs		Rendzina	X	X	
D10		Baumholz	80 - 100 %	Rendzina	X		
D11		Baumholz	40 - 80%	saure Braunerde	X	X	X
D12		Jungwuchs	80 - 100 %	saure Braunerde	X	X	X
F1	Stauwasserbeeinflusst, tiefgründig	Baumholz		saure Braunerde	X	X	X
K1	Grund-/hangwasserbeeinflusst, tiefgründig	Baumholz		neutrale Braunerde	X	X	
K2		Stangenholz		neutrale Braunerde	X	X	

5.1 Der organische Kohlenstoff

5.1.1 C_{org} -Konzentrationen

Die Kohlenstoffkonzentrationen der 27 Untersuchungsstandorte weisen eine sehr hohe Variabilität auf. Die Konzentrationen nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Der höchste Wert in den obersten 10 cm wurde mit 23.0% in einer Rendzina auf Felsturzschnitt ermittelt. Der tiefste Wert findet sich in einer Sauren Braunerde auf Molasse-sandstein mit 1.2%. In den tieferen Horizonten (10–20 cm und 20–40 cm) gleichen sich die Werte immer mehr an. Zwischen 20 und 40 cm liegt der höchste Wert bei 2.8% C und der tiefste bei 1.1%.

Die Rendzinen weisen eindeutig die höchsten C_{org} -Konzentrationen auf. Zwischen den Kalkbraunerden und Braunerden ist kein deutlicher Unterschied feststellbar, mit Ausnahme der sauren Braunerden, welche die tiefsten C-Konzentrationen aufweisen.

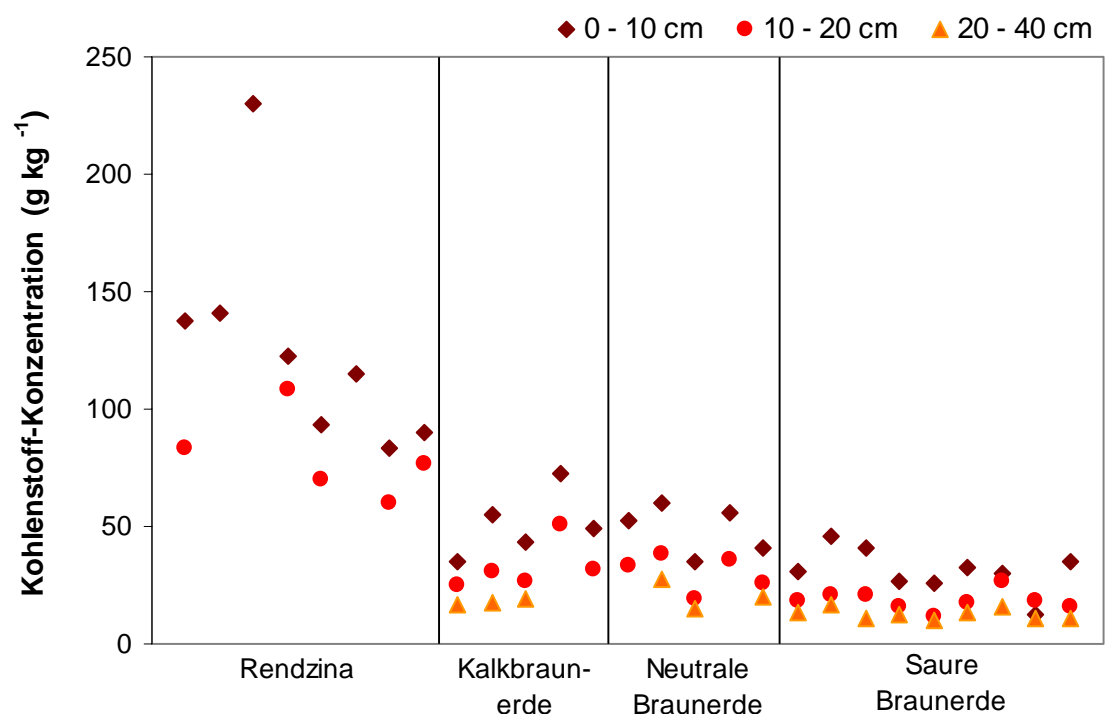


Abb. 20: Kohlenstoffkonzentrationen nach Bodentyp und Beprobungstiefe

Die Daten der 27 Standorte wurden nach Bodentypen sortiert, die Abfolge der Standorte ist in Tabelle 24 im Anhang wiedergegeben.

5.1.2 Vorräte

C_{org}-Vorrat 0–10 cm

Der Kohlenstoffvorrat im Oberboden ist am stärksten vom C-Austausch mit der Atmosphäre betroffen und anfälliger auf Störungen als der Unterboden. Zudem konnten nur der Oberboden an allen 27 Standorten beprobt werden, weshalb er separat betrachtet wird.

In den Rendzinen ist in den obersten 10 cm durchschnittlich am meisten Kohlenstoff gespeichert. Der tiefste Kohlenstoffvorrat wurde in einer sauren Braunerde auf Unterer Süsswassermolasse gemessen.

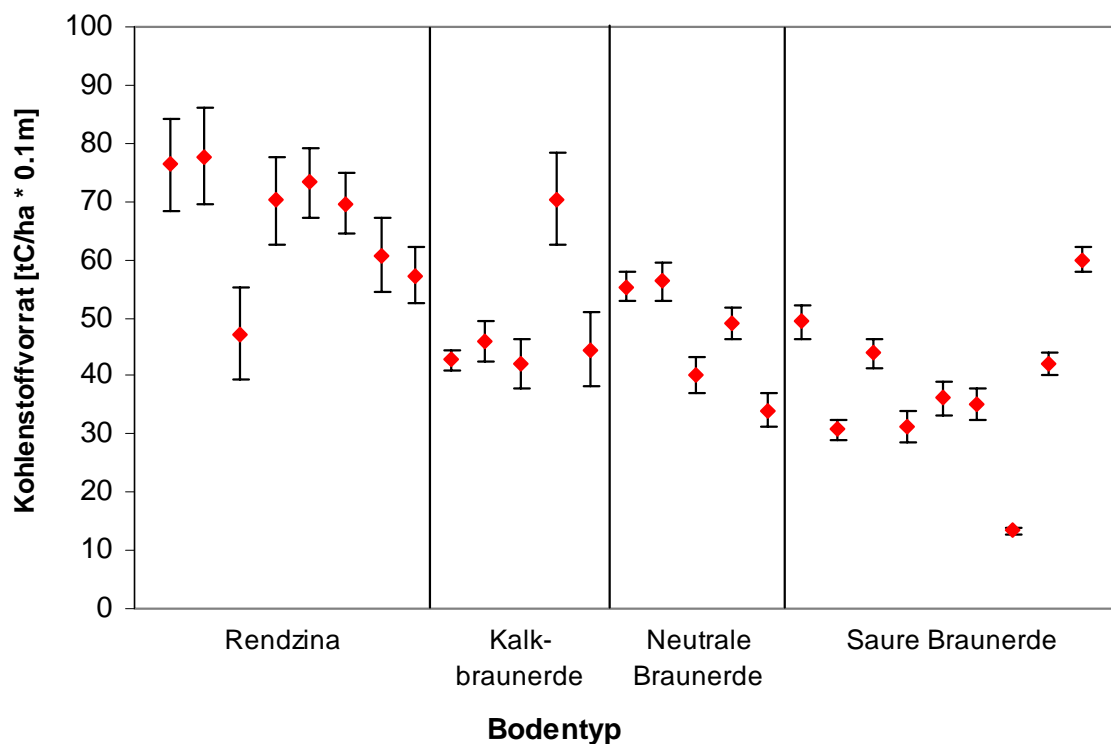


Abb. 21: Kohlenstoffvorräte in den obersten 10 cm nach Bodentyp und Beprobungstiefe (Datenabfolge: Vgl. Tab. 24 im Anhang)

Bei den Rendzinen sind die Fehlerbalken am grössten, da wegen der hohen Skelettgehalte die Dichten der Feinerde stärker streuen als in den sauren Braunerden, wo praktisch kein Skelettanteil vorhanden ist.

C_{org}-Vorrat 0–40 cm

Der Kohlenstoffvorrat der obersten 40 cm variiert zwischen 62 t C/ha und 175 t C/ha. Die Unterschiede im Kohlenstoffvorrat sind also auch für grössere Tiefen beträchtlich. Die höchsten Werte wurden analog dem Oberboden in den Rendzinen gemessen, obwohl der Skelettgehalt in diesen flachgründigen Bodentypen mit der Tiefe sehr stark zunimmt. Die tiefsten Kohlenstoffvorräte sind in den sauren Braunerden ermittelt worden. Die Kalkbraunerden und die neutralen Braunerden weisen ähnliche C-Vorräte auf.

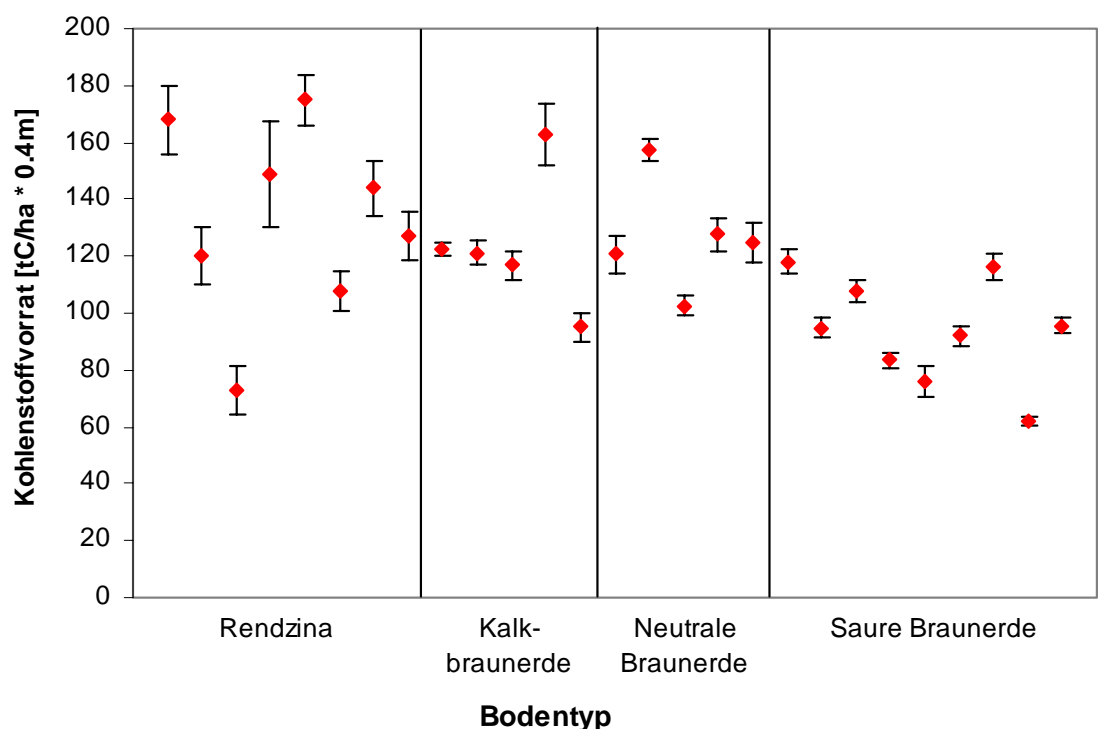


Abb. 22: Kohlenstoffvorräte in den obersten 40 cm nach Bodentyp und Beprobungstiefe (Datenabfolge: Vgl. Tab. 24 im Anhang)

Fehlende Werte der C-Vorräte von Tiefenklassen, welche auf Grund ihres Skelettgehaltes nicht beprobt werden konnten, wurden mit Hilfe der Verhältnisse zum Kohlenstoffvorrat der obersten 10 cm extrapoliert (Kap. 5.7).

Für die Fehlerabschätzung wurden die Fehler für jede Tiefenklasse separat berechnet und anschliessend addiert. Bei den fehlenden Werten wurde auf Grund der prozentualen Fehler (Standardabweichung in % vom Mittelwert) der vorhandenen Daten ein Fehler von 20 % geschätzt.

5.1.3 Extrapolation fehlender Werte

In untenstehender Tabelle sind die fehlenden Werte und die Berechnungsfaktoren rot markiert. Die übrigen Werte sind gemessen. An 3 Standorten musste der Kohlenstoffvorrat für die Tiefenklasse 10–20 cm und an 12 Standorten für die Tiefenklasse 20–40 cm geschätzt werden. Von insgesamt 81 (3 x 27) Werten mussten 15 Werte geschätzt werden, was einem Anteil von 18.5% entspricht.

Tab. 7: Extrapolation fehlender Kohlenstoffvorräte in den Tiefenklassen

Standort		Bodentyp	M/O	U/O	O t C/ha	M t C/ha	U t C/ha	Ctot t C/ha
B1	Malm	neutrale Braunerde	0.68	0.50	55.3	37.8	27.7	120.8
B2	Molasse	saure Braunerde	0.53	0.88	49.0	26.1	43.0	118.1
B3	Molasse	Kalkbraunerde	0.81	1.05	42.7	34.7	45.0	122.5
B4	Molasse	Kalkbraunerde	0.71	0.93	46.0	32.7	42.6	121.3
B5	Molasse	saure Braunerde	0.69	1.09	34.1	23.6	37.0	94.8
B6	Molasse	saure Braunerde	0.56	0.63	49.3	27.5	31.1	107.9
C1	Malm	neutrale Braunerde	0.69	1.10	56.3	39.1	62.2	157.5
C2	Malm	Rendzina, verbraunt	0.87	0.50	60.8	52.7	30.4	143.8
C3	Molasse	neutrale Braunerde	0.59	0.96	40.3	23.6	38.7	102.6
C4	Malm	Kalkbraunerde	0.68	1.09	42.1	28.7	46.0	116.8
C5	Molasse	saure Braunerde	0.64	1.06	30.8	19.8	32.8	83.3
C6	Molasse	neutrale Braunerde	0.68	1.16	43.8	30.0	50.8	124.6
D1	Malm	Rendzina, verbraunt	0.72	0.50	57.3	41.1	28.7	127.1
D10	Malm	Rendzina	0.30	0.25	69.5	20.9	17.4	107.8
D11	Molasse	saure Braunerde	1.01	1.30	35.1	35.4	45.5	116.0
D12	Molasse	saure Braunerde	1.63	1.98	13.4	22.0	26.6	61.9
D2	Malm	Rendzina	0.70	0.50	76.3	53.6	38.1	168.0
D3	Malm	Rendzina	0.30	0.25	77.7	23.3	19.4	120.4
D4	Malm	Kalkbraunerde	0.81	0.50	70.3	57.3	35.2	162.7
D5	Malm	Rendzina	0.30	0.25	47.1	14.1	11.8	73.0
D6	Molasse	saure Braunerde	0.50	0.93	31.3	15.5	29.1	75.9
D7	Malm	Rendzina	0.62	0.50	70.2	43.6	35.1	148.9
D8	Molasse	saure Braunerde	0.61	0.94	36.1	22.0	33.8	91.9
D9	Malm	Rendzina	0.89	0.50	73.2	65.0	36.6	174.8
F1	Molasse	saure Braunerde	0.49	0.78	42.1	20.7	32.8	95.6
K1	Molasse	neutrale Braunerde	0.73	0.40	60.0	43.7	24.0	127.7
K2	Molasse	neutrale Braunerde	0.73	0.40	44.5	32.6	17.8	95.0

Bodentiefe: O = 0–10 cm, M = 10–20 cm, U = 20–40 cm

5.1.4 Das stabile Isotop ^{13}C

Die $\delta^{13}\text{C}$ Isotopenwerte wurden nur an 7 Standorten gemessen. Die Standorte wurden nach dem Bodentyp ausgewählt, wobei nur der Oberboden berücksichtigt wurde. Das tiefste Isotopenverhältnis konnte in einer Rendzina ermittelt werden, wobei alle Rendzinen ähnliche Verhältnisse aufweisen. Etwas höhere Werte wurden in Braunerden gefunden.

Tab. 8: Isotopenverhältnisse an 7 ausgewählten Standorten

Standort		Mean \pm s.e. (n = 3) ‰
D1	Rendzina Laubwald: Baumholz	-26.96 \pm 0.09
D3	Rendzina Laubwald: Baumholz	-27.05 \pm 0.19
D5	Rendzina Laubmischwald: Baumholz	-26.96 \pm 0.22
D8	Saure Braunerde Nadelwald: Stangenholz	-26.64 \pm 1.62
C1	Neutrale Braunerde Laubmischwald: Baumholz	-26.57 \pm 0.26
C3	Neutrale Braunerde Laubwald: Baumholz	-26.46 \pm 0.14
B1	Neutrale Braunerde Laubmischwald: Baumholz	-26.92 \pm 0.36

In der Footprint Area am Lägern-Südhang wurden in den Rendzinen (Standorte D1, D3, D5) Werte zwischen -26.96‰ und -27.05‰, in den neutralen Braunerden (Standorte B1, C1 und C3) Werte zwischen -26.46‰ und -26.92‰ und in der sauren Braunerde (Standort D8) ein Wert von -26.64 ermittelt. Die Isotopenwerte bewegen sich insgesamt in einem engen Bereich um -27‰, ein typischer Wert, wie er unter einer reinen C3-Vegetation zu erwarten ist.

5.2 Der Stickstoff und das C/N-Verhältnis

5.2.1 Konzentrationen und Vorräte

Im Oberboden verhalten sich die Konzentrationen und –vorräte von Stickstoff ähnlich wie jene des Kohlenstoffs. Die höchsten Werte wurden in den Rendzinen festgestellt und die tiefsten Werte in den sauren Braunerden.

Die höchste Stickstoffkonzentration beträgt 17 g N/kg, während der tiefste Wert bei 1 g N/kg liegt. In den Rendzinen liegen die meisten Werte zwischen 6 und 10 g N/kg. In den übrigen Bodentypen liegen alle Werte zwischen 1 und 4 g N/kg.

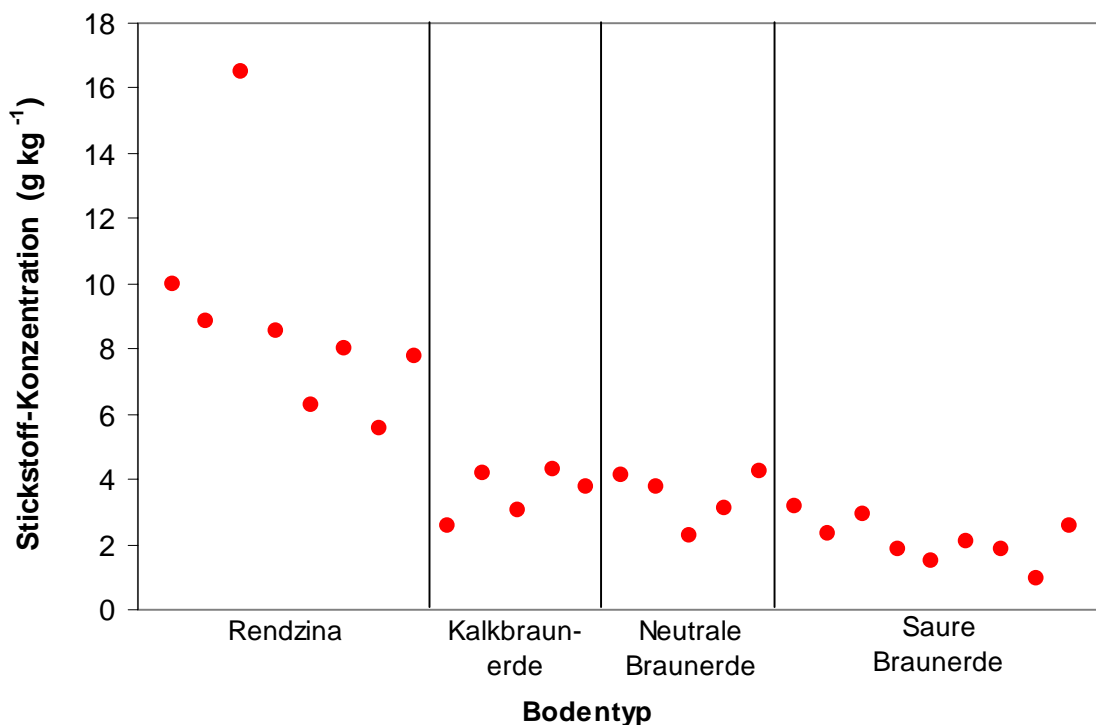


Abb. 23: Stickstoffkonzentrationen im Oberboden an den 27 Untersuchungsstandorten

Datenabfolge: Vgl. Tab. 24 im Anhang.

Der höchste Vorrat beträgt 5.5 t N/ha, während der kleinste Wert mit 1.0 t N/ha 5 mal kleiner ist. Analog zu den Stickstoffkonzentrationen sind auch die Stickstoffvorräte in den Rendzinen im Vergleich zu den anderen Bodentypen höher.

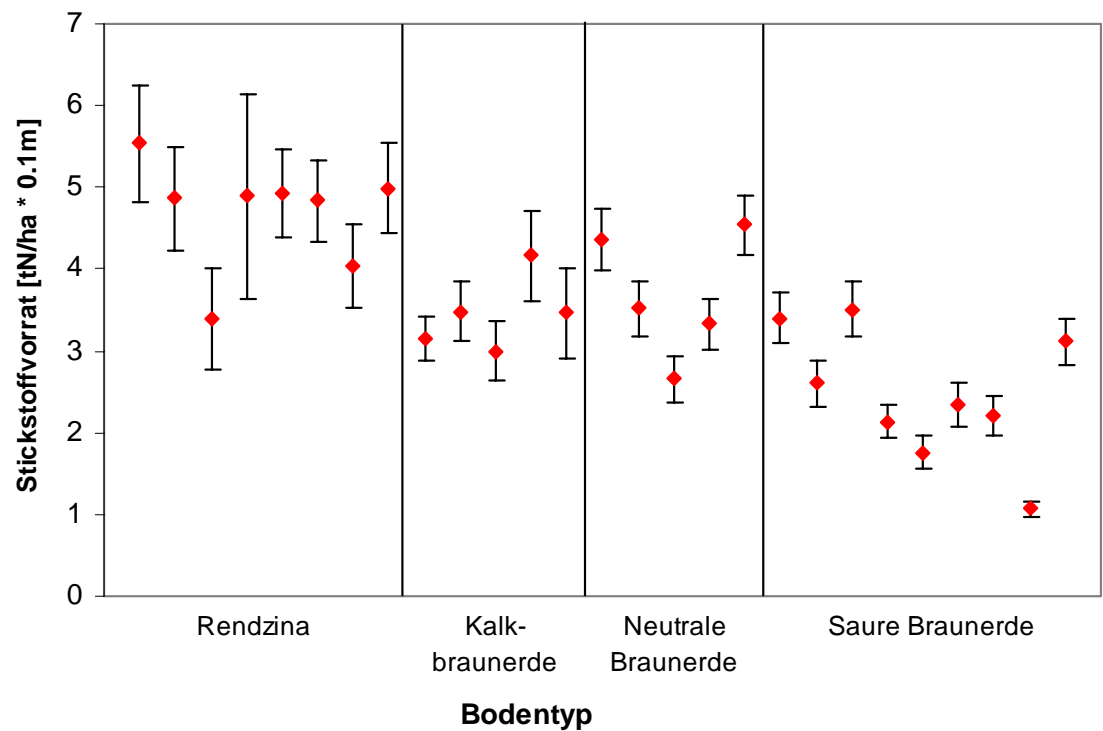


Abb. 24: Stickstoffvorräte im Oberboden an den 27 Untersuchungsstandorten

Datenabfolge: Vgl. Tab. 24 im Anhang.

5.2.2 C/N-Verhältnisse

Die C/N-Verhältnisse liegen an den meisten Standorten zwischen 13 und 16, was auf hohe Mineralisierungsraten zurückzuführen ist. Mit einem C/N-Verhältnis zwischen 17 und 20 weisen 5 Standorte nur mittlere Mineralisierungsraten auf. Niedrige Mineralisierungsraten kommen an keinem der untersuchten Standorte vor.

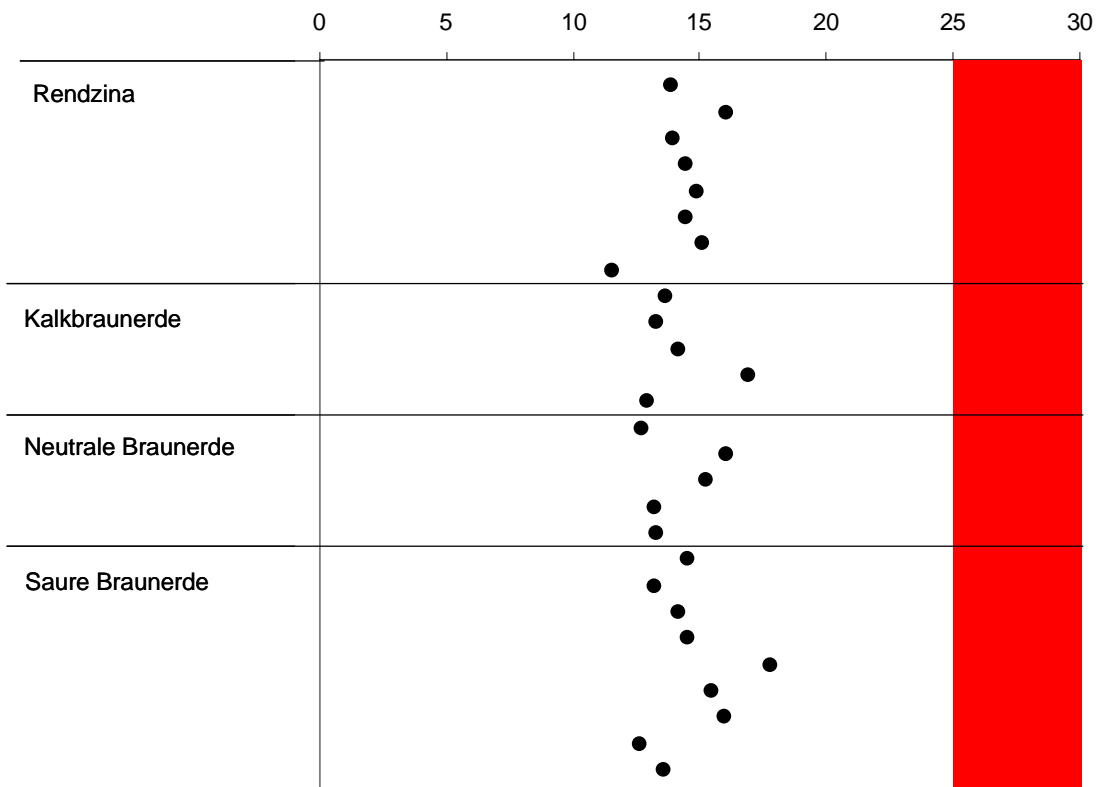


Abb. 25: C/N-Verhältnisse der obersten 10 cm des Mineralbodens nach Bodentypen

Tab. 9: Klassierung der C/N-Verhältnisse (AK SK 1996)

Farbe	C/N-Verhältnis	Klassierung	Mineralisierungsrate
	< 10	sehr eng	hoch
	10 - 12	eng	hoch
	13 - 16	mässig eng	hoch
	17 - 20	mittel	mittel
	21 - 25	mässig weit	niedrig
	26 - 35	weit	niedrig
	> 35	sehr weit	niedrig

5.3 Die Streu

5.3.1 Humusform, C-Konzentrationen und Vorräte

Tab. 10: Humusform, C-Konzentrationen und -vorräte der 27 Probenahmestandorte

Standort	Humusform		Streu	Kohlenstoffgehalt		C-Vorrat
				CN-Analyzer	Muffelofen (Aschefreie Streu)	
			t/ha	g C/kg		t C _{org} /ha
D2	Rendzina	Mull	14.3	333.0	445.3	6.4
D3	Rendzina	Mull	8.0	424.3	544.5	4.4
D5	Rendzina	Xeromoder	21.7	387.6	474.9	10.3
D7	Rendzina	Mull	11.6	286.5	438.3	5.1
D9	Rendzina	Mull	9.5	396.3	466.1	4.4
D10	Rendzina	Mull	15.8	361.7	462.0	7.3
C2	Rendzina, verbraunt	Mull	6.4	369.4	472.0	3.0
D1	Rendzina, verbraunt	Mull	10.1	280.6	423.1	4.3
B3	Kalkbraunerde	moderartiger Mull	15.6	391.1	492.0	7.7
B4	Kalkbraunerde	Mull	9.3	364.7	457.3	4.3
C4	Kalkbraunerde	Mull	6.5	357.3	481.0	3.1
D4	Kalkbraunerde	moderartiger Mull	11.8	318.9	409.5	4.8
K2	Kalkbraunerde	Mull	4.3	283.3	474.9	2.0
B1	neutrale Braunerde	moderartiger Mull	7.4	313.4	464.7	3.5
C1	neutrale Braunerde	Mull	14.7	362.2	481.3	7.1
C3	neutrale Braunerde	Mull	12.8	353.8	480.1	6.2
C6	neutrale Braunerde	moderartiger Mull	6.1	299.4	430.3	2.6
K1	neutrale Braunerde	Mull	5.3	344.0	505.3	2.7
B2	saure Braunerde	Mull	13.9	345.2	491.4	6.8
B5	saure Braunerde	Mull	12.2	367.1	477.3	5.8
B6	saure Braunerde	Mull	4.9	354.6	464.1	2.3
C5	saure Braunerde	Mull	8.1	316.7	478.5	3.9
D6	saure Braunerde	Moder	25.8	385.2	509.1	13.1
D8	saure Braunerde	Moder	21.0	345.8	488.4	10.3
D11	saure Braunerde	moderartiger Mull	7.1	422.9	483.5	3.4
D12	saure Braunerde	Mull	5.6	338.0	488.7	2.8
F1	saure Braunerde	Mull	7.4	372.8	483.6	3.6

An 19 der 27 Untersuchungsstandorte kommt die Humusform Mull vor. An 5 Standorten wurde ein moderartiger Mull und an 2 Standorten ein Moder und an einem Standort ein Xeromoder (siehe Klassifikation der Humusformen im Anhang) festgestellt.

Die Kohlenstoffkonzentrationen, welche mit dem CHN-Analyzer gemessen wurden, liegen viel tiefer als die Werte, welche mit Hilfe des Aschegehaltes bestimmt wurden. Das rührt daher, dass bei der Probennahme mit der Streu zum Teil vermutlich auch Mineralboden aufgenommen wurde.

5.4 Dichte, Skelettgehalt und pH-Wert

5.4.1 Scheinbare Dichte, Feinerdedichte, Skelettgehalt

Auf Grund der hohen Skelettgehalte in den Rendzinen sind deren Werte für die Feinerdedichte sehr gering. Die höchsten Werte sind in 20–40 cm Bodentiefe bei den sauren Braunerden zu finden.

Tab. 11: Lagerungsdichte, Feinerdedichte und Skelettgehalt

Standort		Lagerungsdichte p_a			Feinerdedichte			Skelett		
		g/cm^3			g/cm^3			%*		
		O	M	U	O	M	U	O	M	U
D2	Rendzina	0.89	1.11		0.55	0.48		38	35	
D3	Rendzina	0.72			0.55			23		
D5	Rendzina	1.18			0.21			83		
D7	Rendzina	0.78	1.14		0.57	0.62		27	21	
D9	Rendzina	0.74	0.97		0.78	0.93		0	10	
D10	Rendzina	0.71			0.60			13		
C2	Rendzina, verbraunt	0.78	1.19		0.73	0.88		6	26	
D1	Rendzina, verbraunt	0.78	0.99		0.64	0.54		18	27	
B3	Kalkbraunerde	1.23	1.39	1.36	1.23	1.36	1.39	0	0	0
B4	Kalkbraunerde	0.84	1.05	1.24	0.84	1.05	1.24	0	0	0
C4	Kalkbraunerde	0.98	1.07	1.20	0.98	1.07	1.19	0	0	1
D4	Kalkbraunerde	0.97	1.12		0.97	1.12		0	0	
K2	Kalkbraunerde	1.00	1.10		0.91	1.04		9	6	
B1	neutrale Braunerde	1.11	1.14		1.06	1.13		5	1	
C1	neutrale Braunerde	0.94	1.03		0.94	1.03	1.13	0	0	0
C3	neutrale Braunerde	1.16	1.23	1.28	1.16	1.21	1.27	0	0	0
C6	neutrale Braunerde	1.10	1.20	1.30	1.07	1.17	1.27	3	3	5
K1	neutrale Braunerde	1.08	1.26		1.07	1.23		0	3	
B2	saure Braunerde	1.07	1.25	1.31	1.07	1.25	1.31	0	0	0
B5	saure Braunerde	1.12	1.32	1.39	1.12	1.32	1.39	0	0	0
B6	saure Braunerde	1.20	1.33	1.47	1.20	1.33	1.47	0	0	0
C5	saure Braunerde	1.19	1.23	1.31	1.15	1.24	1.28	4	2	3
D6	saure Braunerde	1.20	1.34	1.42	1.20	1.34	1.42	0	0	0
D8	saure Braunerde	1.10	1.24	1.27	1.10	1.24	1.27	0	0	0
D11	saure Braunerde	1.18	1.34	1.44	1.18	1.34	1.44	0	0	0
D12	saure Braunerde	1.09	1.21	1.24	1.09	1.21	1.24	0	0	0
F1	saure Braunerde	1.18	1.32	1.47	1.20	1.32	1.47	0	0	0

O = 0–10 cm; M = 10–20 cm; U = 20–40 cm

* Skelettgehalt in Gewichts-% des Gesamtgewichtes

5.4.2 pH-Werte

Der Säurezustand des Bodens beeinflusst viele biologische, chemische und physikalische Prozesse und ist eine der wichtigsten Steuergrößen im System Boden. Der pH-Wert bestimmt neben den Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen maßgeblich den Abbau der organischen Substanz, da er die Artenvielfalt der Zersetzer-Fauna und deren biologischer Aktivität steuert. Die pH-Werte variieren zwischen 4 und 7.5. Die Rendzinen weisen alle pH-Werte zwischen 6.5 und 7.5 auf. Ebenfalls hohe pH-Werte treten in den Kalkbraunerden auf, während die sauren Braunerden sehr tiefe pH-Werte zeigen.

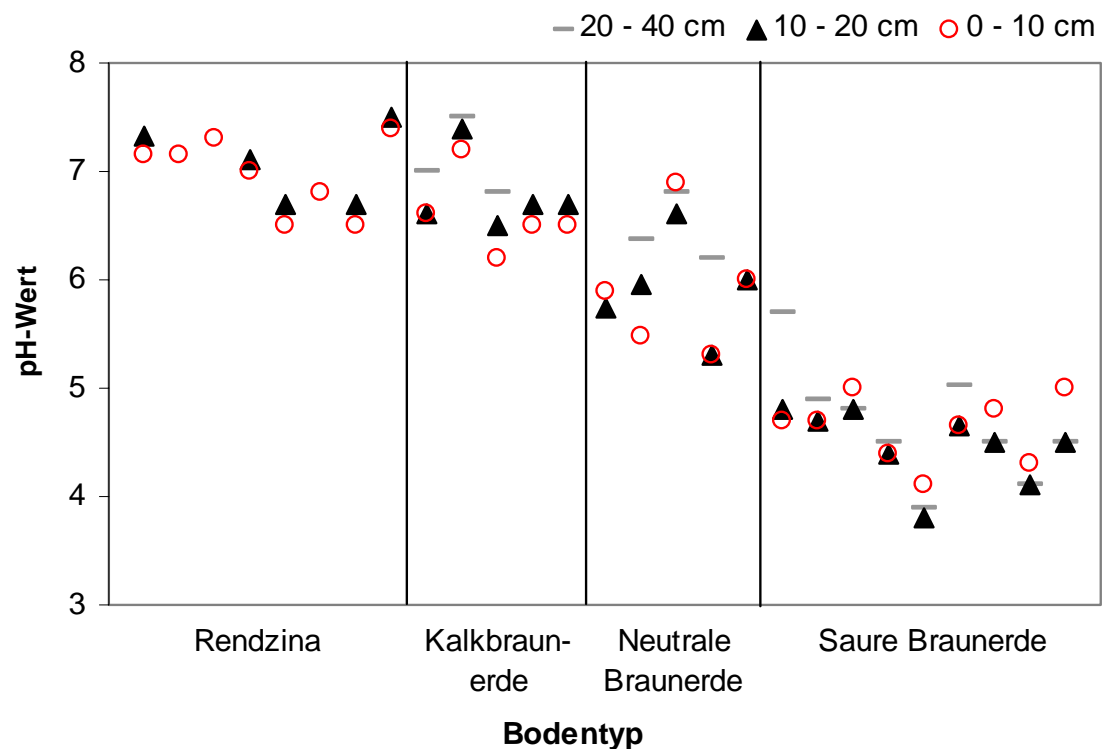


Abb. 26: pH-Werte der 27 Stichprobenflächen nach Bodentypen

Datenabfolge: Vgl. Tab. 24 im Anhang.

5.5 Kohlenstoffvorratsinventur

Damit der Kohlenstoffvorrat für die Footprint Area mit möglichst geringem Fehler ermittelt werden konnte, wurde zuerst analysiert, ob ein räumliches Verteilungsmuster des Kohlenstoffvorrates in der Footprint Area vorliegt und, wenn ja, welche Faktoren die Verteilung des C-Vorrats im Boden beeinflussen. In den folgenden Abschnitten sind die Resultate dieser Untersuchung dargestellt.

5.5.1 Oberboden 0–10 cm

Von den obersten 10 cm sind lückenlos alle Werte vorhanden. In einem ersten Schritt wurden deshalb nur diese Werte in die Faktorenanalyse miteinbezogen.

In Abbildung 27 sind die Kohlenstoffvorräte der 27 Standorte nach ihren in der Konzeptkarte verwendeten Kartierungseinheiten dargestellt. Die Streuung innerhalb der einzelnen Einheiten ist sehr gross, weshalb keine Kohlenstoffvorratsklassen mit ähnlichen Werten gebildet werden können.

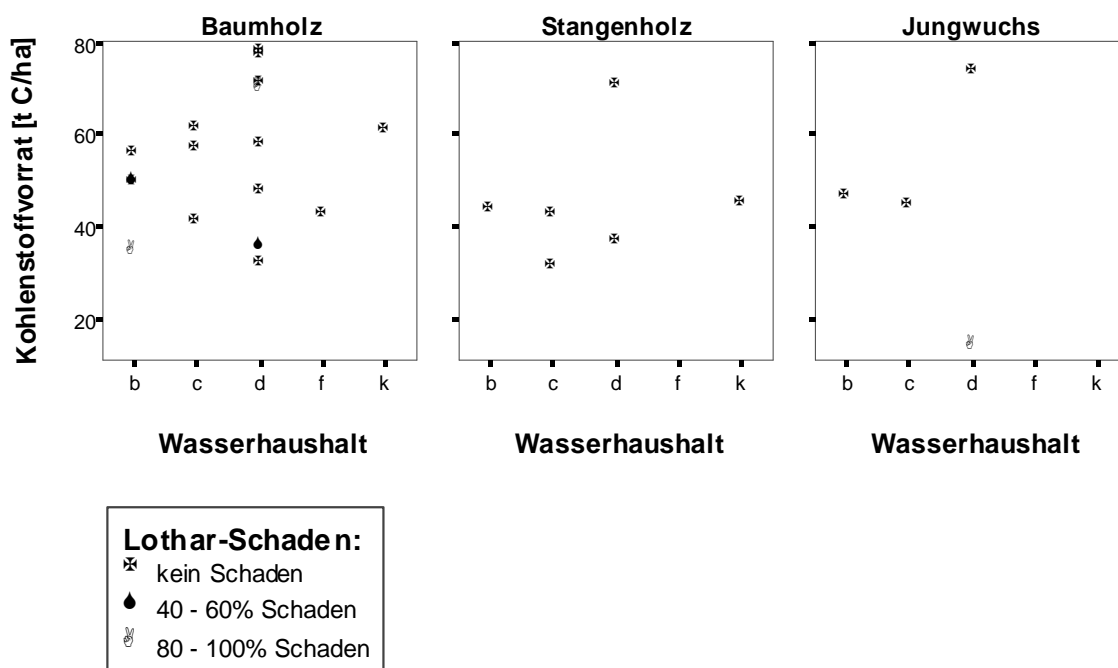


Abb. 27: Kohlenstoffvorrat nach Kartiereinheiten: Wertebereich der einzelnen Einheiten Wasserhaushaltsskizzen b, c, d, f, k (FAL 1996): Vgl. Tab. 2, Kap. 4.3.1.

Um die einzelnen Faktoren genauer untersuchen zu können, wurde für die Faktoren „Wasserhaushalt/Gründigkeit“, „Entwicklungsstufe des Waldes“ und für das „Ausgangsmaterial“ jeweils eine separate Grafik erstellt (siehe Abbildungen 28, 29, 30).

Wasserhaushalt

Die Streuung innerhalb der Einheit 'Wasserhaushalt des Bodens' ist sehr gross. In der Klasse normaldurchlässige, flachgründige Böden wird die ganze Bandbreite der vorkommenden Kohlenstoffvorräte abgedeckt. Die auf Grund des Wasserhaushaltes ausgeschiedenen Untergruppen unterscheiden sich nicht bezüglich ihres Kohlenstoffvorrates.

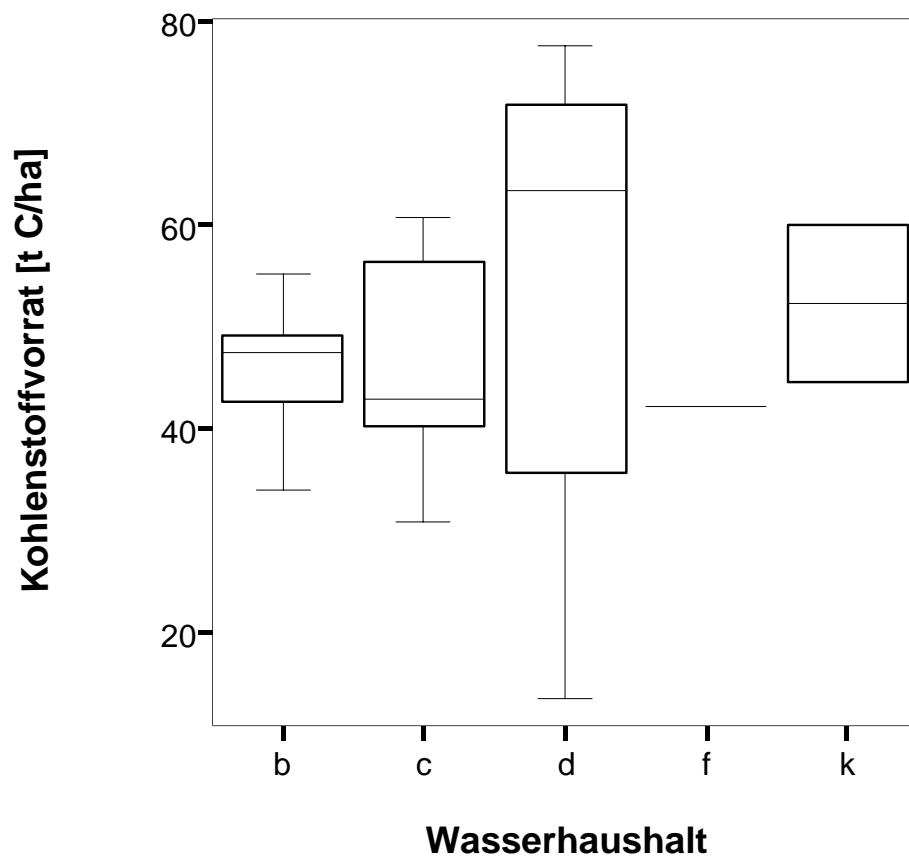


Abb. 28: Zusammenhang zwischen Wasserhaushalt und Kohlenstoffvorrat im Boden
Wasserhaushaltsklassen b, c, d, f, k (FAL 1996) , Vgl. Tab. 2, Kap. 4.3.1.

Vegetation

Wird die Vegetation unabhängig von den anderen Faktoren betrachtet, resultiert ein ähnliches Bild. Die durchschnittlichen Kohlestoffvorräte aller Einheiten liegen zwischen 40 t C/ha und 60 t C/ha. Die einzelnen Klassen unterscheiden sich bezüglich ihres C-Vorrates kaum. Fazit: Auch die Vegetation eignet sich nicht als Grundlage für die Kohlenstoffinventur.

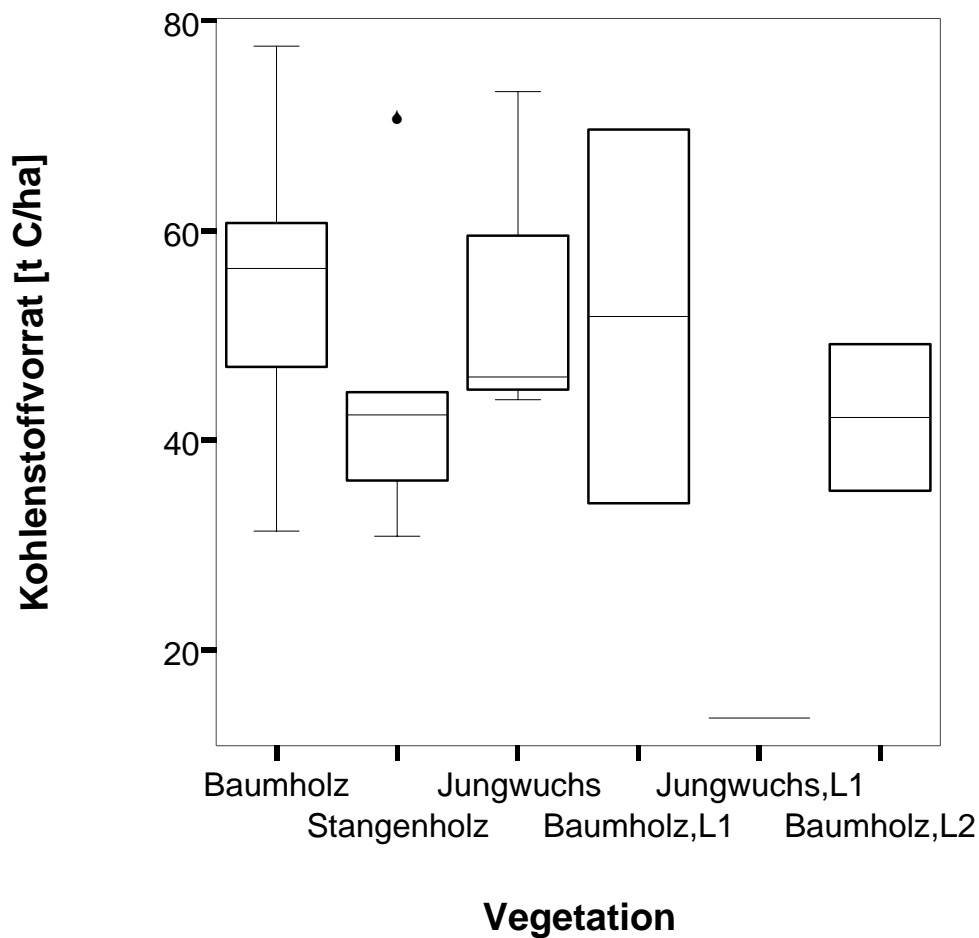


Abb. 29: Einfluss der Vegetation auf den Kohlenstoffvorrat im Boden

L1: Lothar-Schadenfläche mit 80–100% Schaden

L2: Lothar-Schadenfläche mit 40–60% Schaden

Ausgangsmaterial

Wählt man das Ausgangsmaterial als Einflussgrösse, nimmt die Streuung innerhalb der Einheiten stark ab. Es ist deutlich sichtbar, dass Böden auf der Unteren Süsswassermolasse viel weniger Kohlenstoff speichern, als Böden auf Malmkalk. Eine Ausnahme bilden Böden auf Felssturzschant. Sie haben sich zwar aus Malmkalk entwickelt, haben aber einen Skelettgehalt > 80%, wodurch der Kohlenstoffvorrat in den obersten 10 cm stark abnimmt.

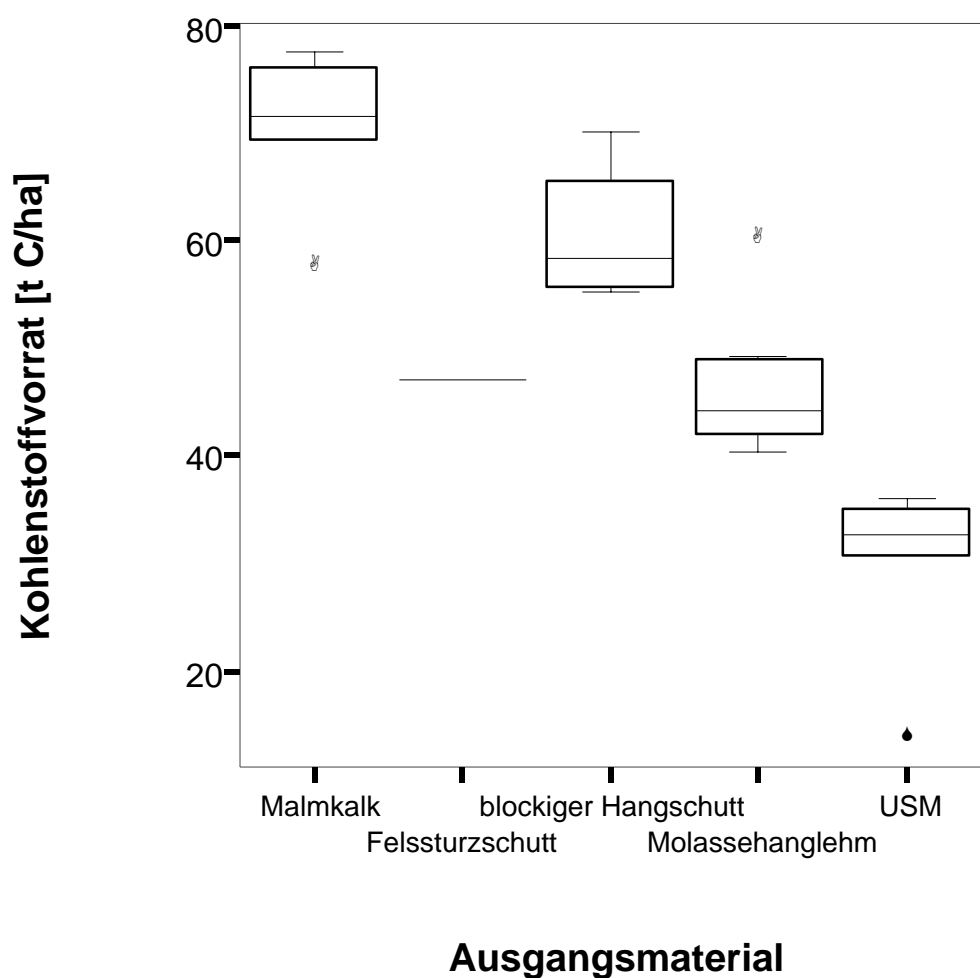


Abb. 30: Kohlenstoffvorrat im Oberboden (0–10 cm) nach Ausgangsmaterial

Faktorenanalyse mit ANOVA (Analysis of Variance)

Einfaktorielle ANOVA: Type III Sum of Square

Die einzelnen Faktoren und die möglichen Faktorenkombinationen wurden mit der ANOVA getestet. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0.05$ kann ein Faktor als signifikant betrachtet werden.

Tab. 12: Einfaktorielle ANOVA (Type III Sum of Square)

Source	p (Irrtumswahrscheinlichkeit)
Entwicklungsstufe	0.459
Wasserhaushalt	0.357
Ausgangsmaterial	0.001
Entwicklungsstufe * Wasserhaushalt	0.664
Entwicklungsstufe * Ausgangsmaterial	0.171
Wasserhaushalt * Ausgangsmaterial	0.418
Entwicklungsstufe * Wasserhaushalt * Ausgangsmaterial	-

Weder die Kombination von zwei Faktoren (Entwicklungsstufe * Wasserhaushalt, Entwicklungsstufe * Ausgangsmaterial und Wasserhaushalt * Ausgangsmaterial) noch die Kombination von allen drei Faktoren (Entwicklungsstufe * Wasserhaushalt * Ausgangsmaterial) haben der Varianzanalyse zu Folge einen signifikanten Einfluss auf die Verteilung des Kohlenstoffvorrates.

Das Ausgangsmaterial ist der einzige Faktor, bei dem ein signifikanter Einfluss auf den C-Vorrat festgestellt werden konnte.

Einfaktorielle ANOVA: Type I Sum of Square

Aus Tabelle 13 ist ersichtlich, dass auch beim Type I das Ausgangsmaterial die einzige signifikante Einflussgrösse ist, unabhängig von der Reihenfolge, wodurch die Aussage relativ robust wird. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0.05$ kann ein Faktor als signifikant betrachtet werden.

Tab. 13: Einfaktorielle ANOVA (Type I Sum of squares)

Source	p	Source	p	Source	p
Entwicklungsstufe	0.038	Entwicklungsstufe	0.038	Ausgangsmaterial	0.000
Wasserhaushalt	0.109	Ausgangsmaterial	0.001	Wasserhaushalt	0.578
Ausgangsmaterial	0.001	Wasserhaushalt	0.611	Entwicklungsstufe	0.441
Source	p	Source	p	Source	p
Ausgangsmaterial	0.000	Wasserhaushalt	0.111	Wasserhaushalt	0.111
Entwicklungsstufe	0.402	Entwicklungsstufe	0.037	Ausgangsmaterial	0.001
Wasserhaushalt	0.611	Ausgangsmaterial	0.001	Entwicklungsstufe	0.441

p: Irrtumswahrscheinlichkeit

Wichtigste Ergebnisse der Faktorenanalyse

Der Kohlenstoffvorrat an den 27 Untersuchungsstandorten zeigt grosse Unterschiede. Der tiefste Kohlenstoffvorrat im Oberboden von 13 t C/ha ist sechsmal kleiner als der grösste C-Vorrat (78 t C/ha).

Auf Grund der in Kapitel 5.5.1 und 5.5.2 dargestellten Resultate, kann die Footprint Area anhand des Ausgangsmaterials in Geländeeinheiten mit ähnlichem Kohlenstoffvorrat im Oberboden unterteilt werden. Es wird erwartet, dass der Fehler für die Abschätzung des durchschnittlichen C-Vorrates der gesamten Footprint Area und der einzelnen Geländeeinheiten, dadurch relativ klein wird.

5.5.2 Kohlenstoffvorrat 0–40 cm

Ausgangsmaterial

Die Analyse der Kohlenstoffvorräte des 0–40 cm-Horizonts ergeben ein ähnliches Verteilungsmuster der Kohlenstoffvorräte in der Footprint Area wie im Oberboden. Der grösste C-Vorrat wurde in den Böden auf blockigem Hangschutt (146 t C/ha) und der kleinste in Böden auf Felsturzschutt (73 t C/ha) ermittelt.

Auch für den C-Vorrat bis in 40 cm Bodentiefe sind deutliche Unterschiede der C-Vorräte an den verschiedenen Stichprobenstandorten feststellbar. Für die totale Beprobungstiefe von 40 cm wurden dieselben Geländeeinheiten wie für den Oberboden gewählt.

Abbildung 31 zeigt die Verteilung des Kohlenstoffvorrates in den einzelnen Geländeeinheiten. In Böden auf Malmkalk und in Böden auf blockigem Hangschutt sind grosse C-Vorräte gespeichert. Verhältnismässig wenig Kohlenstoff ist in der Unteren Süsswassermolasse (USM) gespeichert.

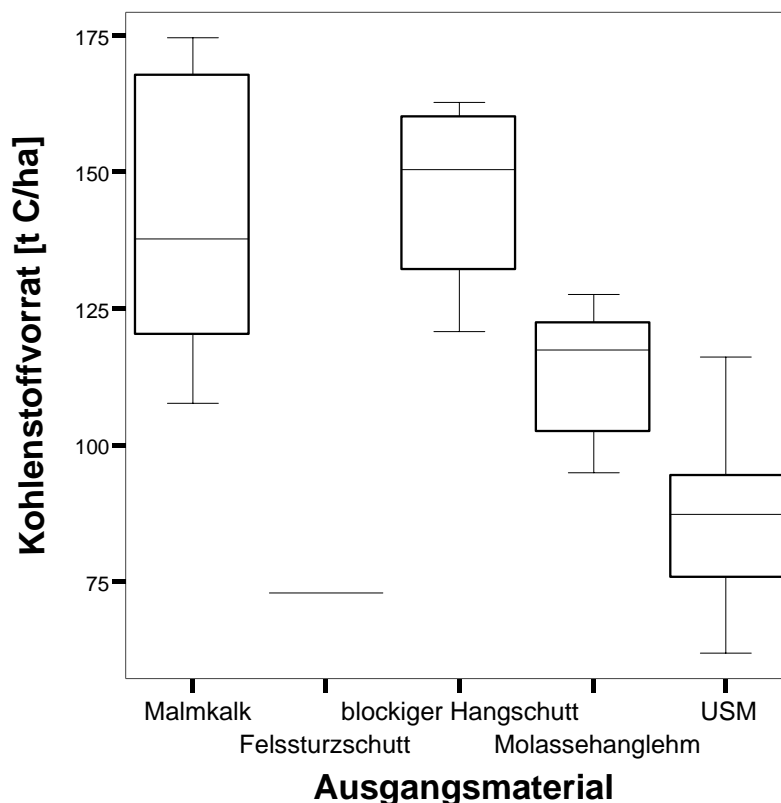


Abb. 31: Kohlenstoffvorrat in den obersten 40 cm nach Ausgangsmaterial

5.5.3 Verteilung des Gesamt C-Gehaltes in der Footprint Area

Die Footprint Area wird also auf Grund des Ausgangsmaterials in fünf Geländeeinheiten mit ähnlichem C-Vorrat unterteilt:

Tab. 14: Geländeeinheiten nach Ausgangsmaterial mit ähnlichen C-Gehalt

Ausgangsmaterial	Beschreibung der Geländeeinheit
Felssturzschant	Böden mit < 80% Skelettanteil auf Malmkalk
Malmkalk	Böden auf Malmkalken der Badener- und Wettingerschichten
blockiger Hangschutt	Böden auf Hangschutt und Hanglehm aus Malmkalken und Molassemergeln
Molassehanglehm	Böden auf Molassehanglehm (Verwitterungsprodukt aus Mergeln und Sandsteinen)
USM	Böden auf Sandsteinen der unteren Süsswassermolasse

Geländeeinheiten für die Kohlenstoffinventur und die Vorratskarte

Um die Vorratskarte und die Inventur des Kohlenstoffs etwas genauer zu untergliedern, wurde die Footprint Area zusätzlich zu den Hauptgeländeeinheiten des Ausgangsmaterials zusätzlich nach Wasserhaushalt/Gründigkeit in Untereinheiten eingeteilt. Würden anstelle des Wasserhaushaltes die Entwicklungsstufen des Waldes als Unterteilungsmerkmal hinzugezogen, würden zusätzliche Geländeeinheiten entstehen, welche bei der Feldarbeit nicht beprobt wurden, was deshalb nicht sinnvoll ist.

Tab. 15: Kohlenstoffvorratsinventur der obersten 10 cm

Ausgangsmaterial	Wasserhaushalt	Fläche ha	Flächenanteil %	C - Vorrat 0-10 cm t C/ha	C -Vorrat pro Fläche 0 - 10 cm t C
Malmkalk	d	20	26	71	1421
Felssturzschant	d	3	4	47	152
Blockiger Hangschutt	b	3	4	55	175
	c	6	7	59	323
	d	4	5	70	270
Molassehanglehm	b	9	11	47	398
	c	12	16	42	506
	f	2	2	42	71
	k	4	6	52	223
Untere Süsswassermolasse	b	2	3	34	69
	c	2	2	31	48
	d	11	14	29	318
TOTAL 0 - 10 cm		77	100		3975
MEAN Footprint Area				52	

Legende:

normal durchlässige Böden:

b tiefgründig
c mässig tiefgründig
d flachgründig

stauwasserbeeinflusste Böden:

f tiefgründig

grund- /hangwasserbeeinflusste Böden:

k mässig tiefgründig

Tab. 16: Kohlenstoffvorratsinventur der obersten 40 cm und der Streu

Ausgangsmaterial	Wasser- haushalt	Fläche ha	C - Vorrat 0-40 cm t C/ha	Streu t C/ha	Vorrat 0-40 inkl. Streu t C/ha	TOTAL inkl. Streu Einheit t C
Malmkalk	d	20	141	5	146	2945
Felssturzschant	d	3	73	10	83	269
Blockiger Hangschutt	b	3	121	3	124	394
	c	6	151	5	156	860
	d	4	163	5	168	644
Molassehanglehm	b	9	117	5	123	1044
	c	12	115	4	119	1427
	f	2	96	4	99	167
	k	4	111	2	114	485
Untere Süsswassermolasse	b	2	95	6	101	203
	c	2	83	4	87	136
	d	11	86	7	94	1029
TOTAL		77	9199	405		9604
MEAN Footprint Area			120	5	125	

Legende:**normal durchlässige Böden:**

b tiefgründig

c mässig tiefgründig

d flachgründig

stauwasserbeeinflusste Böden:

f tiefgründig

grund- /hangwasserbeeinflusste Böden:

k mässig tiefgründig

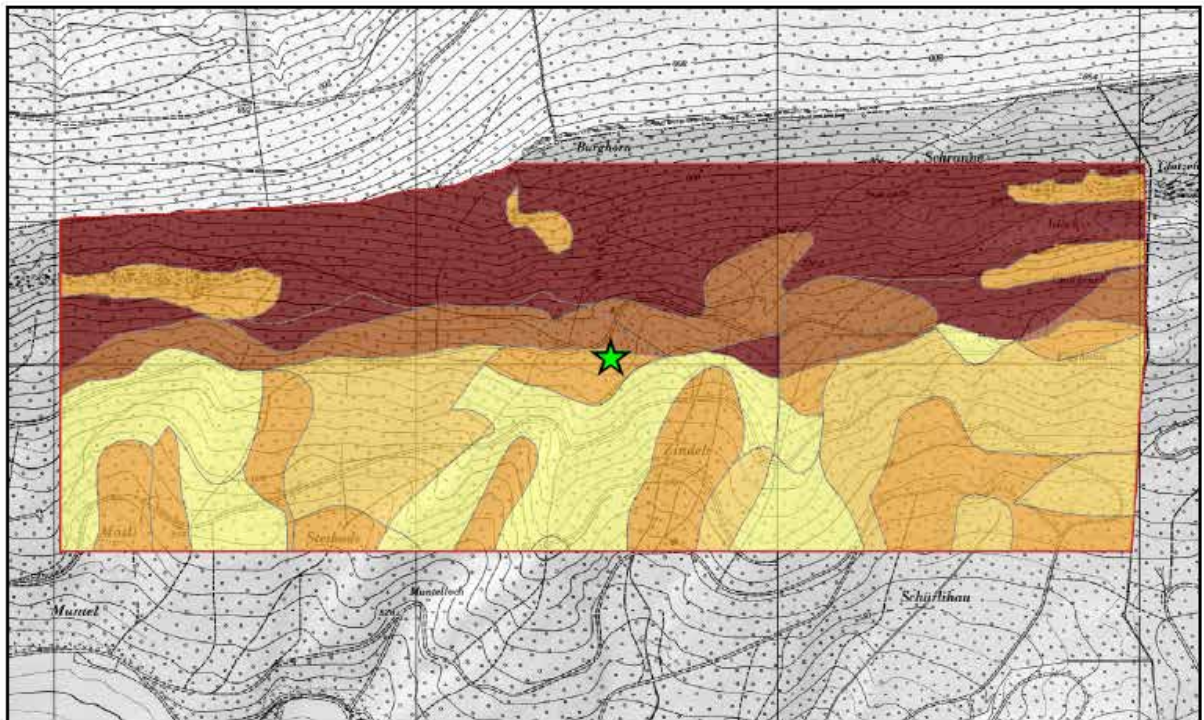
5.5.4 Kohlenstoffvorratskarten nach Geländeeinheiten

Die räumliche Verteilung des Kohlenstoffvorrates in der Footprint Area wird in Abbildung 32 und 33 auf den Kohlenstoffvorratskarten ersichtlich.

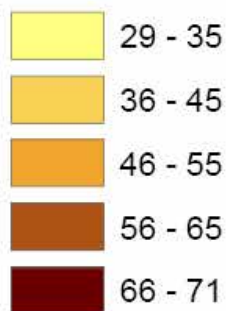
Für den Oberboden (0–10 cm) und die totale Beprobungstiefe von 40 cm inklusive Auflagehorizont wurden Kohlenstoffvorratskarten erstellt und im Massstab 1:10'000 dargestellt.

Kohlenstoffvorrat

Oberboden 0 -10 cm



Kohlenstoffvorrat (t C/ha):



Flux Tower

Steckbrief:

(Footprint Area 0 - 10 cm)

Total 3975 t C
Mean 52 t C/ha

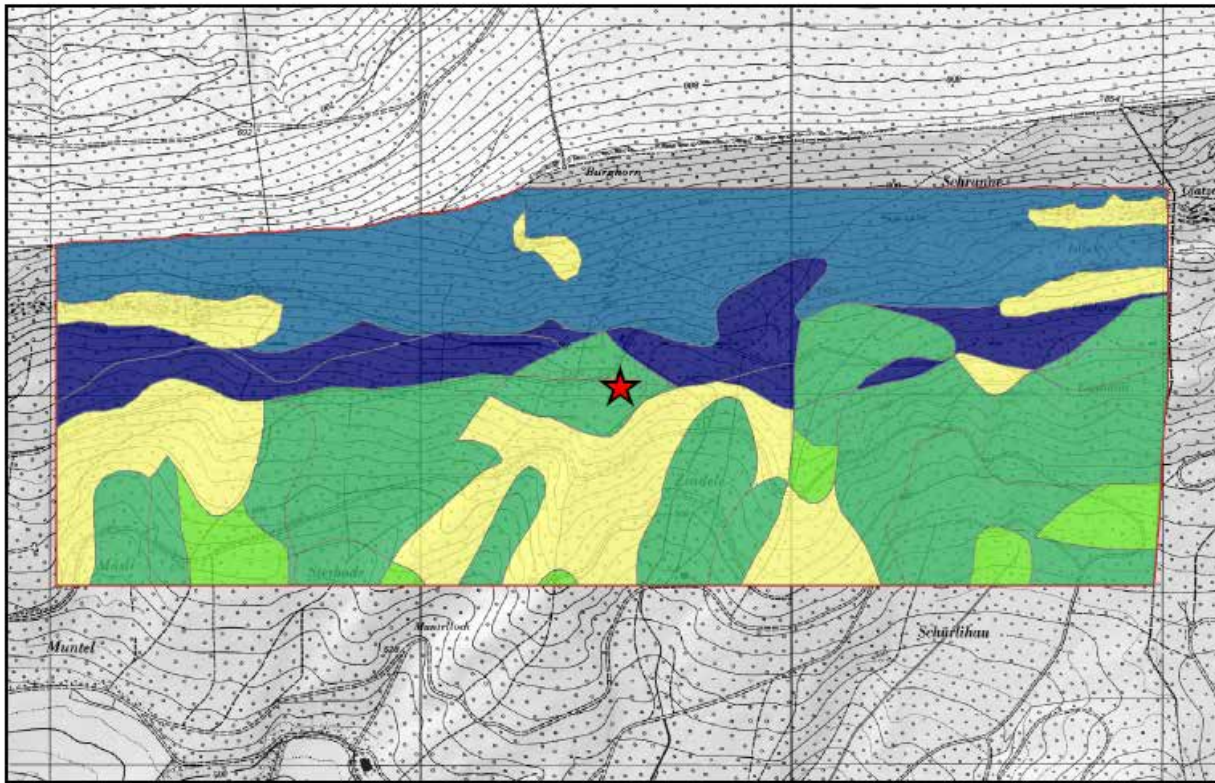
Massstab 1 : 10'000

0 125 250 375 500 Meter

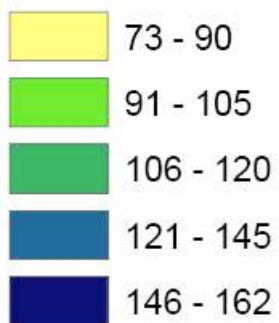
Abb. 32: Verteilung des Kohlenstoffvorrates im Oberboden der Footprint Area

Kohlenstoffvorrat

Ober- und Unterboden 0 -40 cm, inklusive Streu



Kohlenstoffvorrat (t C/ha):



Messturm

Steckbrief:

(Footprint Area 0 - 40 cm, inkl. Streu)

Total 9604 t C
Mean 125 t C/ha

Massstab 1 : 10'000

0 125 250 375 500 Meter

Abb. 33: Verteilung des Kohlenstoffvorrates in Ober- und Unterboden inklusive Streu

5.6 Stickstoffinventur

5.6.1 Stickstoffvorrat im Oberboden

Auch der Stickstoffvorrat zeigt im Oberboden eine Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial. Daher wurden für den Stickstoffvorrat die gleichen Geländeeinheiten gewählt wie für den Kohlenstoffvorrat.

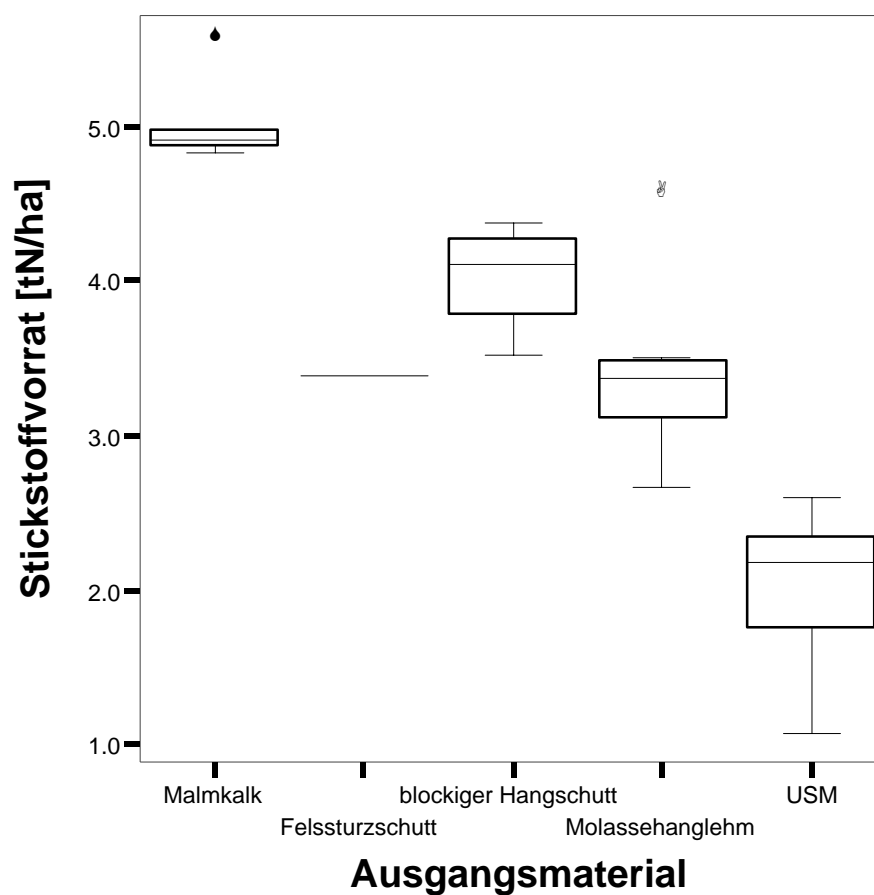


Abb. 34: Stickstoffvorrat im Oberboden nach Ausgangsmaterial

Der Stickstoffvorrat im Oberboden zeigt das gleiche Muster wie der Kohlenstoffvorrat: Auf Malmkalk ein grosser Vorrat, auf Unterer Süsswassermolasse verhältnismässig wenig gespeicherter Stickstoff.

5.6.2 Kartiereinheiten für die Stickstoffvorratsinventur

Stickstoffvorrat im Oberboden

Tab. 17: Kartiereinheiten der Stickstoffvorräte für die Vorratskarte

Ausgangsmaterial	Wasser- haushalt	Fläche ha	Flächen- anteil %	N-Vorrat 0-10 cm t N/ha	N-Vorrat pro Fläche 0 - 10 cm t N
Malmkalk	d	20	26	5.0	101
Felssturzschild	d	3	4	3.4	11
Blockiger Hangschild	b	3	4	4.4	14
	c	6	7	3.8	21
	d	4	5	4.2	16
Molassehanglehm	b	9	11	3.4	29
	c	12	16	3.0	36
	f	2	2	3.1	5
	k	4	6	4.0	17
Untere Süsswassermolasse	b	2	3	2.6	5
	c	2	2	2.1	3
	d	11	14	1.8	20
TOTAL 0 - 10 cm		77	100		278
MEAN					4

Legende:

normal durchlässige Böden:

B tiefgründig,
C mässig tiefgründig,
D flachgründig;

stauwasserbeeinflusste Böden:

F tiefgründig;

grund- /hangwasserbeeinflusste Böden:

K mässig tiefgründig

5.6.3 Stickstoffvorratskarten nach Vorratseinheiten

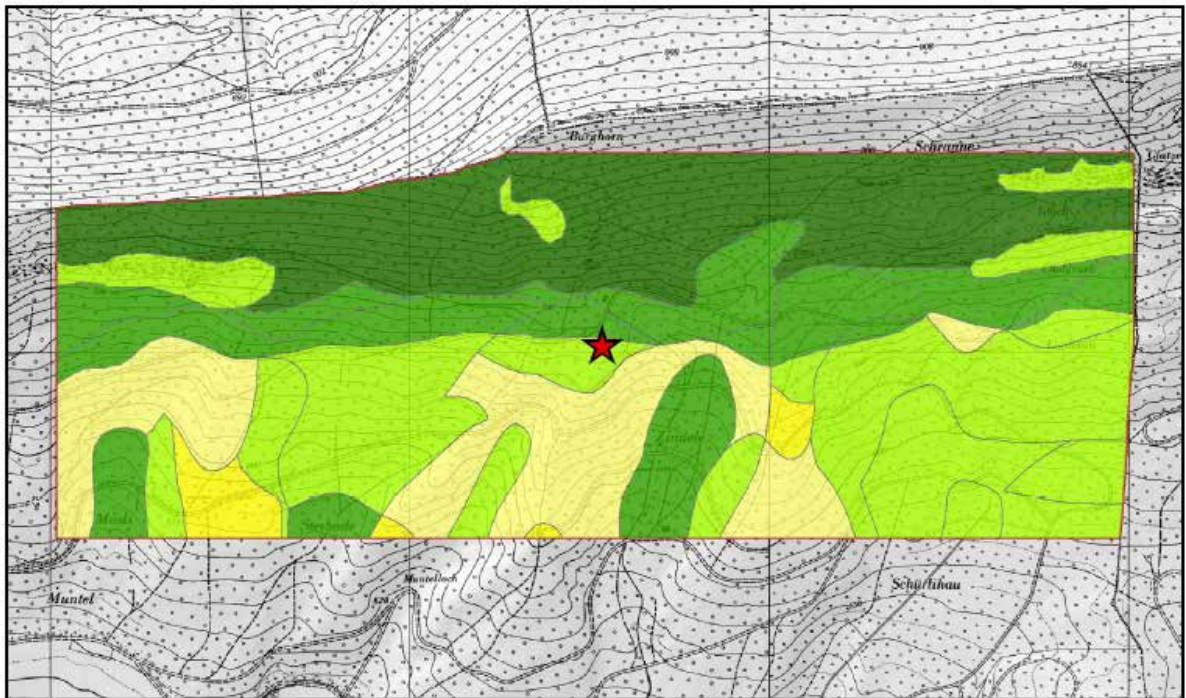
Stickstoffvorrat im Oberboden

Die Stickstoffvorratskarte der Footprint Area (Abb. 35) zeigt die Verteilung des Stickstoffvorrates im Oberboden. Die Geländeeinheiten sind gleich wie bei den Kohlenstoffvorratskarten und wurden von der geologischen Karte (Originalkartierung) der Schweiz, Blatt Baden hergeleitet.

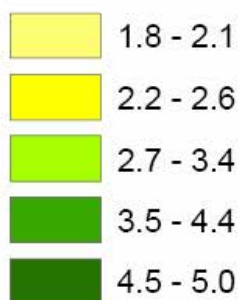
Die Stickstoffvorratskarte ist im Massstab 1:10'000 für den Oberboden dargestellt.

Stickstoffvorrat

Oberboden 0 - 10 cm



Stickstoffvorrat (t N/ha):



★ Messturm

Steckbrief:

(Footprint Area 0 - 10 cm)

Total	280 t N
Mean	4 t N/ha

Massstab 1 : 10'000

0 125 250 375 500 Meter

Abb. 35: Stickstoffvorrat im Oberboden der Footprint Area

5.7 Alternative Methode zur Berechnung des Kohlenstoffvorrates in der Footprint Area

Kohlenstoffvorrat im Oberboden mit Kriging interpoliert

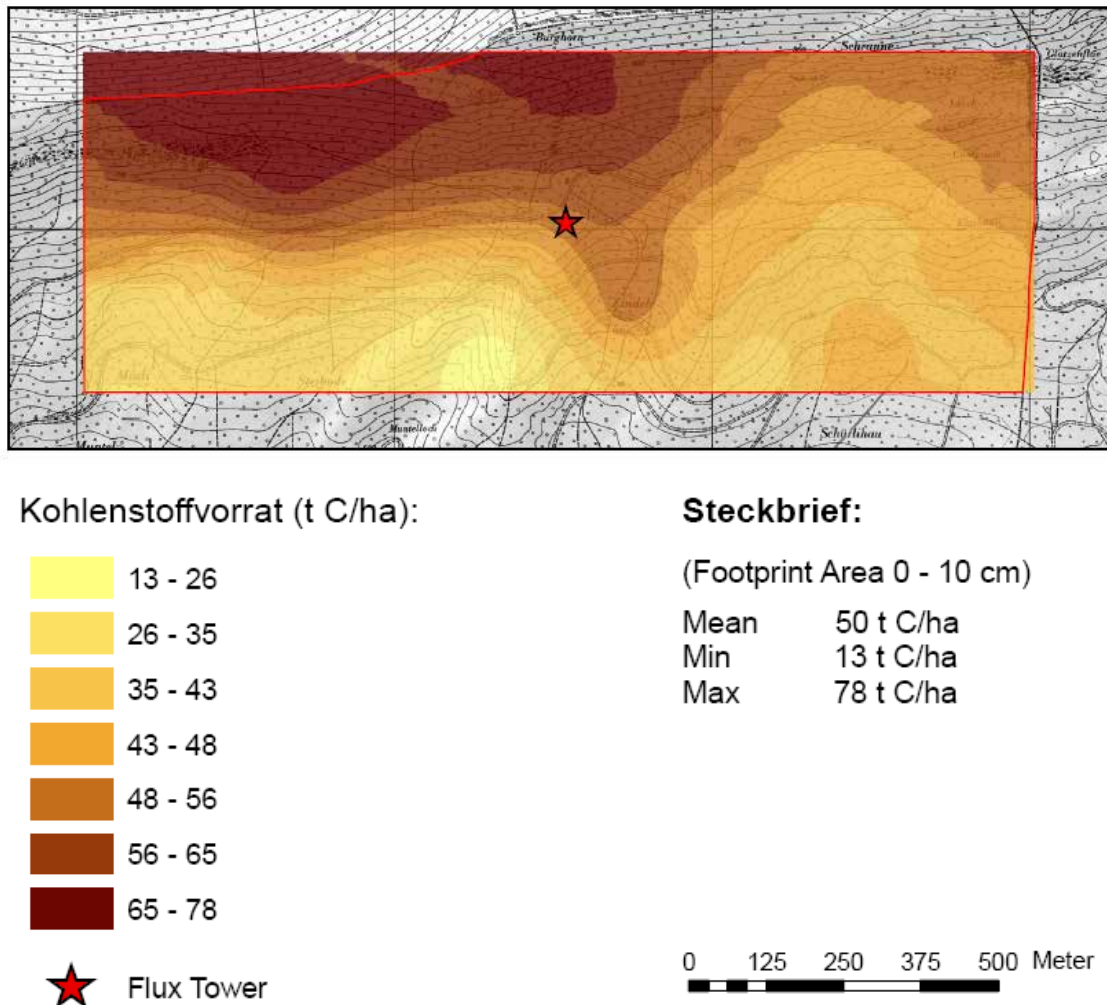


Abb. 36: Kohlenstoffvorratskarte des Oberbodens (0–10 cm) mit Kriging interpoliert

Der Kohlenstoffvorrat im Oberboden zeigt einen höheren Kohlenstoffvorrat nördlich des Messturmes und tiefere Kohlenstoffvorräte im südlichen Teil der Footprint Area. Der durchschnittliche C-Vorrat beträgt 50 t C/ha.

6 Diskussion

6.1 Der organische Kohlenstoff im Boden der Footprint Area

6.1.1 Die räumliche Verteilung des Kohlenstoffvorrates im Untersuchungsgebiet

Hohe Variabilität der C-Konzentrationen und -Vorräte an den 27 Stichprobenflächen

Die Kohlenstoffkonzentrationen und -vorräte sind nicht homogen über die Untersuchungsfläche an der Lägern verteilt, sondern variieren an den insgesamt 27 Stichprobenflächen sehr stark: Für den Oberboden (0–10 cm) wurden Vorräte zwischen 13 t C/ha und 78 t C/ha ermittelt. Für die totale Beprobungstiefe konnten Unterschiede zwischen 62 t C/ha und 175 t C/ha festgestellt werden. Es hat sich gezeigt, dass gleiche Bodentypen ähnliche Kohlenstoffvorräte aufweisen. Dies lässt darauf schließen, dass die Bodeneigenschaften in der Untersuchungsfläche die Stabilisierung von C im Boden beeinflussen.

Nach Hagedorn et al. (2003) spielt der Bodentyp im Stabilisierungsprozess des Kohlenstoffs im Waldboden eine Schlüsselrolle. Dabei kontrollieren vor allem chemische und physikalische Bodeneigenschaften wie pH-Wert, Mineralogie, Wasserhaushalt und Gefüge die Stabilisierung von Kohlenstoff (Post et al. 2001, Bird et al. 2002). Die je nach Bodeneigenschaften unterschiedlich ablaufenden Stabilisierungsprozesse bestimmen somit, ob der Kohlenstoff veratmet und an die Atmosphäre abgegeben, ausgewaschen oder ob er als langfristig stabiler organischer Kohlenstoff im Waldboden gespeichert wird (Hagedorn et al. 2001).

Im konkreten Fall der Footprint Area an der Lägern enthalten beispielsweise die Rendzinen im Oberboden (0–10 cm Tiefe) durchschnittlich zwei- bis dreimal höhere Kohlenstoffkonzentrationen als die Kalkbraunerden und die Braunerden. Für die unterschiedlichen C-Konzentrationen und -Vorräte in den Böden der Footprint Area sind verschiedene Ursachen denkbar. Die stärkste Korrelation der räumlichen Verteilung der Kohlenstoffvorräte in der Footprint Area konnte mit dem Ausgangsmaterial hergestellt werden.

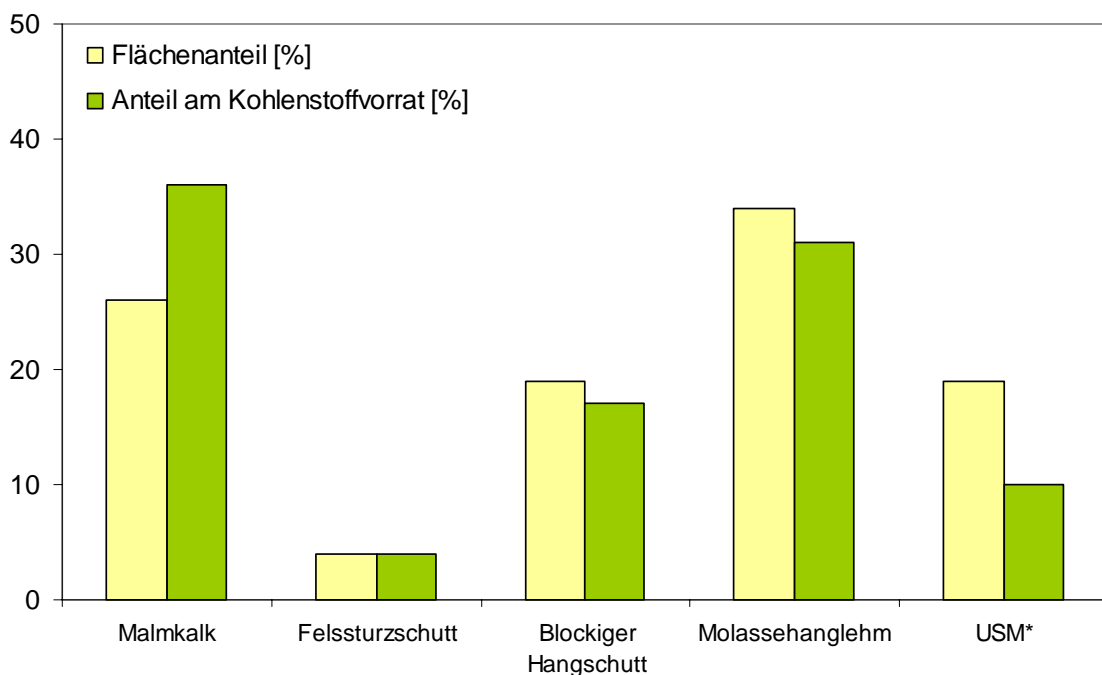
Entscheidender Einfluss des Ausgangsmaterials auf die räumliche Verteilung des Kohlenstoffvorrates

Die Untersuchungsfläche wird durch zwei unterschiedliche Ausgangsgesteine etwa auf Höhe des Eddy-Messturmes in zwei Hälften geteilt. Im oberen Teil bilden harte Kalkgesteine (Malmkalk der Badener- und der Wettingerschichten), im unteren Teil Sandsteine der Unteren Süßwassermolasse das Substrat für die Bodenbildung. Im mittleren Teil ist das Gebiet von Hangschutt und Hanglehm bedeckt, welche aus Verwitterungsprodukten von den beiden obgenannten Ausgangsmaterialien bestehen.

Aufgrund des Ausgangsmaterials wurde die Footprint Area in fünf Geländeeinheiten (Felssturzschutt, Malmkalk, blockiger Hangschutt, Molassehanglehm und Untere Süßwassermolasse) mit unterschiedlichem Kohlenstoffvorrat unterteilt.

Oberboden (0-10 cm):

Anteil am Gesamtkohlenstoffvorrat nach Geländeeinheiten



* USM = Untere Süßwassermolasse

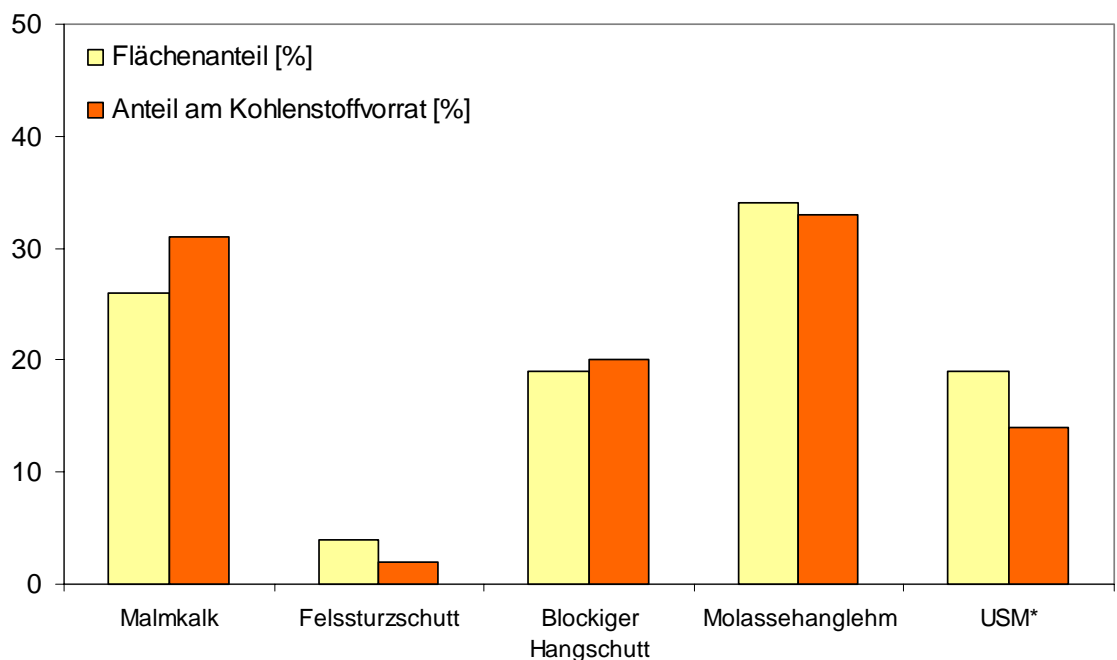
Abb. 37: Oberboden (0–10 cm): Vergleich des C-Anteils mit dem Flächenanteil der Geländeeinheiten

In Abbildung 37 ist der prozentuale Kohlenstoffvorratsanteil der fünf Geländeeinheiten am Gesamtkohlenstoffvorrat im Oberboden im Vergleich zum Flächenanteil der Geländeeinheiten an der Footprint Area dargestellt. Im Oberboden (0–10 cm) wurde

der höchste Vorrat in den Böden auf Malmkalk ermittelt. Hier ist überproportional viel (36%) des C-Vorrates der Footprint Area gespeichert, während der Flächenanteil an der Untersuchungsfläche nur 26% beträgt. Die Böden auf Unterer Süßwassermolasse bedecken dagegen 19% der Fläche der Footprint Area, speichern aber nur 10% des gesamten C-Vorrates im Oberboden. In den Böden auf Felssturzschant wird 4% (4% Flächenanteil), in den Böden auf blockigem Hangschutt 19% (17% Flächenanteil) und in den Böden auf Molassehanglehm 31% (34% Flächenanteil) des C-Vorrates im Oberboden gespeichert.

Ober- und Unterboden (0-40 cm):

Anteil am Gesamtkohlenstoffvorrat nach Geländeeinheiten



* USM = Untere Süßwassermolasse

Abb. 38: Oberboden (0–10 cm): Vergleich des C-Anteils mit dem Flächenanteil der Geländeeinheiten

Berechnet man die Vorräte über die gesamte Beprobungstiefe von 40 cm, wurde der höchste Kohlenstoffvorratsanteil in den Böden auf Molassehanglehm festgestellt. Sie speichern 33% des gesamten C-Vorrates in der Untersuchungsfläche. Die Vorratsdichte in t C/ha ist allerdings mit 146 t C/ha in den Böden auf blockigem Hangschutt am höchsten, gefolgt von den Böden auf Malmkalk mit 141 t C/ha. In Ober- und Un-

terboden (0–40 cm) speichern die Böden auf Malmkalk 31%, die Böden auf Felsturzschant 2%, die Böden auf blockigem Hangschant 20% und die Böden auf Unterer Süsswassermolasse 14% des Kohlenstoffvorrates der gesamten Footprint Area.

In der gesamten Beprobungstiefe (40 cm) der Footprint Area sind 9604 t organischer Kohlenstoff gespeichert. Davon sind 41% in den obersten 10 cm (3975 t C) und 4 % (405 t C) in der Streu enthalten. Nach Walthert (2005) sind zwischen 28% und 59% des Kohlenstoffvorrates (0–40 cm-Horizont) in den obersten 10 cm gespeichert. Die Tiefenverteilung des Kohlenstoffvorrates in der vorliegenden Kohlenstoffinventur liegt daher im Bereich der bei Walthert für den schweizerischen Jura festgestellten Werte.

Die Stabilisierung von organischer Substanz steht in engem Zusammenhang mit dem Gehalt an Ton-, Silt- und Sandpartikeln im Boden. Ton- und Siltpartikel bilden mit der organischen Substanz starke Komplexe und schützen sie dadurch vor weiterem Abbau (Six et al. 2002).

Die Malmkalke der Badener- und Wettingerschichten bestehen aus sehr feinkörnigem Material mit einem hohen Carbonat(CaCO_3)- und Tonanteil (Schindler 1978). Bei der Carbonatverwitterung gelangen die Tonminerale und Ca-Ionen in den Boden. Sie bilden mit den Humusstoffen stabile Ton-Humus-Komplexe, welche die organische Substanz vor weiterem Abbau schützen. Die Sandsteine der Unteren Süsswassermolasse enthalten hingegen mehr grobkörnigeres Material der Sandfraktion. Bindungen von organischen Substanzen an die Sandfraktion sind nur wenig stabil, während jene an die Tonfraktion mässig stabil sind. Die stabilsten Bindungen finden sich in der Schlufffraktion (Balabane und Plante 2004). Das könnte erklären warum die Böden auf Malmkalk (vorwiegend Rendzinen) am CarboEuropeIP Hauptstandort Lägern vor allem im Oberboden grosse Kohlenstoffvorräte aufweisen. Durch den mit der Tiefe stark zunehmenden Skelettgehalt nimmt der C_{org} -Vorrat im Unterboden ab. Aus diesem Grund ist der Kohlenstoffvorrat auf Felsturzmateriale viel kleiner als in den Böden auf Malmkalke. Der Skelettanteil beträgt an diesen Standorten über 80%. Das bedeutet, dass der Feinerdeanteil, in welchem der organische Kohlenstoff gespeichert werden könnte, sehr gering ist.

Die Böden auf der Unteren Süsswassermolasse an der Lägern haben viel tiefere pH-Werte als die Böden auf Malmkalk. Im sauren Milieu ist die Tätigkeit der Bodenfauna eingeschränkt, so dass der Abbau der abgestorbenen Biomasse langsamer und nur unvollständig verläuft. Durch den unvollständigen Abbau der organischen Substanz liegen anstelle von Huminstoffen organische Säuren vor, welche nicht in organomineralischen Bindungen festgehalten werden, sondern löslich bleiben und daher leicht ausgewaschen werden können (Schachtschabel et al. 1998). Dies könnte ein weiterer Grund für die tieferen C-Vorräte in den Böden auf unterer Süsswassermolasse sein.

6.1.2 Vergleich mit anderen Kohlenstoffinventuren

Tabelle 18 zeigt organische Kohlenstoffvorräte aus anderen Studien im Vergleich zu den Daten der vorliegenden Kohlenstoffvorratsinventur.

Tab. 18: Vergleich von Kohlenstoffvorräten in Böden der Schweiz, Europa und der Welt

	Profilort	Bodentyp	Vorrat nach Bodentiefe		
		Waldboden im Jura (Lägern)	0 - 10 cm	0 - 20 cm	0 - 40 cm
diese Arbeit		mean	52	85	120
	D1	Rendzina	57	98	n.b.*
	D2	Rendzina	76	130	n.b.*
	B3	Kalkbraunerde	43	80	122
	C6	Neutrale Braunerde	42	74	125
	D6	Saure Braunerde	31	47	76
		Waldboden im Jura (CH)	0 - 10 cm	0 - 20 cm	0 - 40 cm
Walthert et al. (2004)	Bärschwil	Rendzina	60	121	172
	Geissgrat	Rendzina	31	57	109
	Schnitterwald	Rendzina	n.b.*	143	n.b.*
	Balmberg	Parabraunerde	30	63	n.b.*
	Etzwil	Braunerde	47	n.b.*	80
		Landwirtschaftsböden (CH)	0 - 20 cm	0 - 30 cm	0 - 100 cm
Leifeld et al. (2004)		Ackerland	41	54	90
		Grasland (günstig)	51	64	92
		Grasland (ungünstig)	48	60	63
		Waldboden in den Alpen (CH)	0 - 20 cm	0 - 30 cm	ganzes Profil
Perruchoud et al. (2000)		mean	62	72	98
		Waldboden der Schweiz			ganzes Profil
Waldbericht (2005)		mean			115
		Jura			90
		Waldboden in Frankreich		0 - 30 cm	
Arrouays et al. (2001)		mean		60	
		Rendzina		77	
		Cambisol**		73	
		Europa		0 - 30 cm	0 - 100 cm
Batjes (2002)		mean		77	158
		Cambisol**		69	118
		World		0 - 30 cm	0 - 100 cm
Batjes (1996)	World	Rendzina		133	n.b.*
	World	Cambisol**		50	96

* n.b. Wert wurde nicht bestimmt

** Cambisol (FAO-ISRIC 1990) entsprechen in der Regel den Braunerden (FAL 2002, Bodenkundliche Kartieranleitung 2005).

Braunerden und Cambisole sind allerdings nicht als Synonyme verwendbar, sondern gehören zwei verschiedenen Klassifikationssystemen an. In der Regel gehören die Braunerden zu den Cambisolen. Bei Arrouays et al. (2002) und Batjes (2002) wurden die Daten für Cambisole ermittelt.

Durchschnittlich waren im Waldboden der Schweiz im Jahr 2005 115 t C/ha, in den Jurawaldböden 90 t C/ha (WSL und BUWAL 2006), in den Alpenwaldböden 98 t C/ha (Perruchoud et al. 2000) und im Acker- und Grasland der Schweiz zwischen 63 t C/ha und 92 t C/ha (Leifeld et al. 2005) gespeichert. In der Footprint Area am Lägern-Südhang sind bis in eine Bodentiefe von 40 cm durchschnittlich 120 t C/ha gespeichert. Im Vergleich zu den oben genannten Daten ist das ein hoher Wert. Ein detaillierter Vergleich ist allerdings nicht direkt möglich, da in den verschiedenen Untersuchungen nicht die gleichen Tiefenintervalle gewählt wurden und die Bodentypen nach unterschiedlichen Klassifikationssystemen eingeteilt sind.

An den drei Beispielen von Rendzinen nach Walthert et al. (vgl. Tabelle 18) wird deutlich ersichtlich, dass der Kohlenstoffvorrat auch innerhalb eines Bodentyps hohe Variabilitäten aufweisen kann. Bei Rendzinen mit zum Teil sehr hohem Skelettgehalt kann der C-Vorrat besonders stark variieren. Bei den Rendzinen in der Footprint Area an der Lägern, wurden ebenfalls grosse Unterschiede im Kohlenstoffgehalt festgestellt. Diese Kohlenstoffvorräte liegen in einem ähnlichen Wertebereich wie die Rendzinen nach Walthert et al. (2004).

Arrouays et al. (2001) ermittelten einen durchschnittlichen Kohlenstoffvorrat im Oberboden (0–30 cm) für Rendzinen in Frankreich von 77 t C/ha und Batjes (1996) schätzte den C-Vorrat für dieselbe Bodentiefe auf einen weltweiten Vorrat von 133 t C/ha. Für Braunerden wurde der durchschnittliche Wert für den Oberboden in Europa auf 69 t C/ha (Batjes 2002) und weltweit auf 50 t C/ha (Batjes 1996) geschätzt. In der im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellten Kohlenstoffvorratsinventur variieren die C-Vorräte in den Rendzinen zwischen 73 t C/ha und 175 t C/ha (0–40 cm Bodentiefe) und in den Braunerden zwischen 62 t C/ha und 163 t C/ha (0–40 cm Bodentiefe). Im Vergleich zu den Durchschnittswerten von Arrouays et al. (2001) und Batjes (1996) weisen die Rendzinen und Braunerden in der Footprint Area am Lägern-Südhang Kohlenstoffvorräte in einer ähnlichen Grössenordnung auf.

6.1.3 Das stabile Isotop $\delta^{13}\text{C}$

Typische $\delta^{13}\text{C}$ -Werte für C_3 -Pflanzen

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des organischen Kohlenstoffs im Oberboden an 7 auf Grund des Bodentyps ausgewählten Standorten bewegen sich in einem engen Bereich zwischen -26.5 und -27.1‰, was typisch für eine C_3 -Vegetation ist. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen für C_3 -Pflanzen liegen zwischen -40‰ und -20‰, während sich diejenigen von C_4 -Pflanzen zwischen -17‰ und -9‰ bewegen (Staddon 2004). In Waldböden variieren die $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen verhältnismässig wenig. Für Waldböden im 0–30cm-Horizont wurde ein durchschnittlicher Wert von -28.4 ± 0.7 ‰ ermittelt (Bird und Pousai 1997).

Höhere $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen in feinkörnigem Material

In der Footprint Area an der Lägern wurden Werte zwischen -26.5‰ und -27.1‰ ermittelt. Mit einem Unterschied von 0.6‰ zwischen dem höchsten und dem tiefsten im Rahmen dieser Diplomarbeit ermittelten Wert ist die Variabilität zwischen den untersuchten Standorten gering. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Signatur kann in der Footprint Area als homogen betrachtet werden.

Allerdings wurden in den untersuchten Rendzinen durchschnittlich tiefere Werte und in einer sauren Braunerde dagegen ein verhältnismässig höherer Wert festgestellt, was allenfalls mit der Korngrösse in Zusammenhang stehen könnte. Vergleichsweise ähnliche Werte wurden entlang des Yennisey in Sibirien festgestellt. Im 1000 km Transekt konnte ein durchschnittlicher $\delta^{13}\text{C}$ -Wert für den 0–5cm-Horizont von $-27.1 \pm 0.6\text{‰}$ und für den 0–30 cm-Horizont $-26.5 \pm 0.5\text{‰}$ gemessen werden. Dabei wurde festgestellt, dass die $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen in grobkörnigem Material höher und in feinkörnigem Material tiefer waren (Bird et al. 2002).

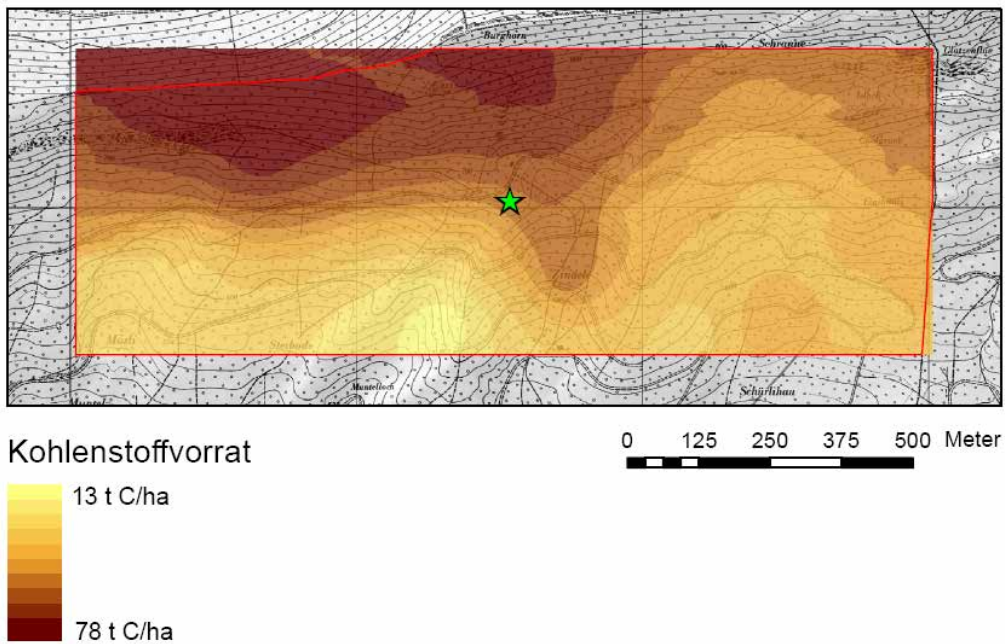
6.2 Evaluation der Vorratsinventur – Vergleich mit der räumlichen Interpolationsmethode Kriging

Die Footprint Area am Hauptstandort Lägern wurde in Geländeeinheiten mit ähnlichem Kohlenstoffvorrat eingeteilt, woraus die Kohlenstoffvorratsinventur und eine Vorratskarte erstellt werden konnte. Mit Hilfe des GIS können punktuell gemessene Daten interpoliert werden. Diese alternative Methode den durchschnittlichen Kohlenstoffvorrat in der Footprint Area zu ermitteln und als Vorratskarte darzustellen, soll mit der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Methode verglichen werden. Die Messwerte der 27 Stichprobenstandorte für den Oberboden wurden mit Kriging interpoliert.

Der durchschnittliche Kohlenstoffvorrat der Footprint Area beträgt nach der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Methode 52 t C/ha und mit der Interpolationsmethode Kriging 50 t C/ha (Vgl. Abb. 39).

Die durch die beiden alternativen Methoden erstellten Kohlenstoffvorratskarten für den Oberboden sind in Abbildung 39 dargestellt.

Kohlenstoffvorratskarte: Interpolation mit Kriging



Kohlenstoffvorratskarte: nach Geländeeinheiten

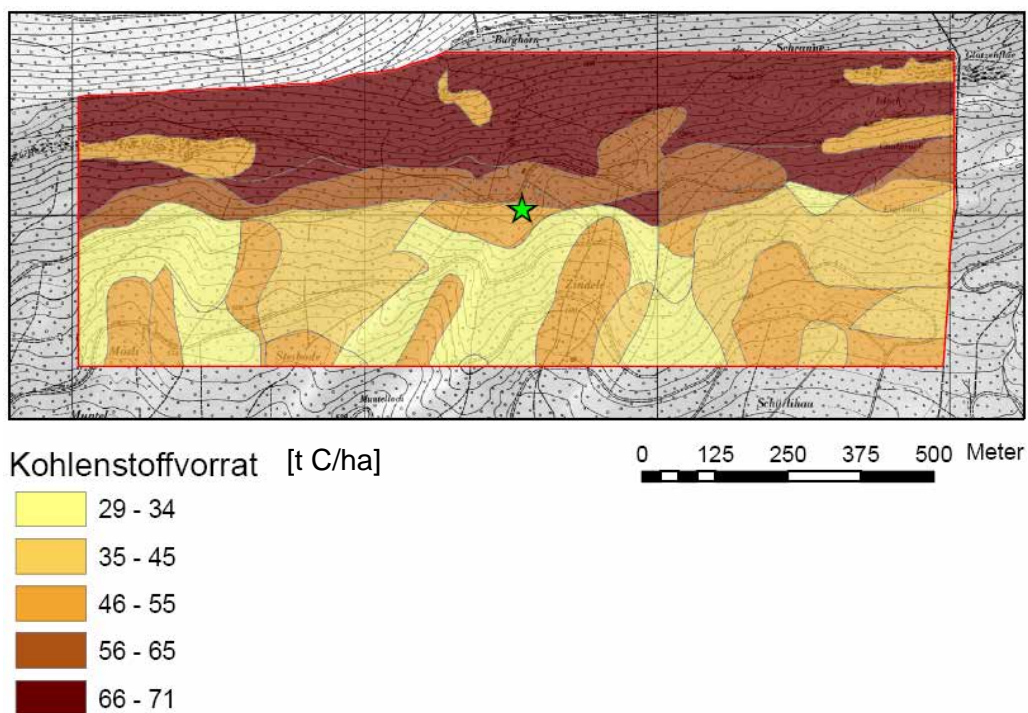


Abb. 39: Vergleich der Kohlenstoffvorratskarten des Oberbodens (0–10 cm): Oben - mit Kriging interpoliert, unten - nach Kartiereinheiten

Bei beiden Methoden befinden sich die grössten C-Vorräte im oberen Teil der Footprint Area auf den Malmkalken und die vergleichsweise tieferen Vorräte unterhalb des Messturmes auf den Hanglehmen und der Unteren Süsswassermolasse.

Der grösste Unterschied zwischen den beiden Methoden bei der Berechnung des durchschnittlichen C-Vorrats einer Fläche zu berechnen zeigt sich oberhalb des Turmes im östlichen Teil der Untersuchungsfläche. An dieser Stelle werden mit der Interpolationsmethode niedrigere Werte errechnet als auf der Kohlenstoffvorratskarte nach Geländeeinheiten. Dieser Unterschied entsteht dadurch, dass der östlichste Probenahmestandort auf Felssturzmateriale liegt und daher ein viel tieferer C-Vorrat als auf den angrenzenden Böden (auf Malmkalk) ermittelt wurde. Bei der Interpolation konnte dies nicht berücksichtigt werden. Um solche Fehler zu vermeiden, wäre ein regelmässigeres Probenahmemuster mit einer möglichst hohen Stichprobedichte notwendig. Andererseits führt die Kartierung nach Geländeeinheiten zu künstlichen, scharfen Grenzen, die in der Natur eher graduelle Übergänge sind. Trotzdem dürfte dieser Ansatz die beste Abschätzung des flächengewichteten Kohlenstoffvorrates erlauben.

An Standorten mit einer hohen Geländevariabilität wie sie in der Footprint Area Lägern zu finden ist, sind für eine gute Interpolation viele Stichprobenpunkte nötig. Der durchschnittliche Kohlenstoffvorrat im Oberboden konnte mit beiden Methoden mit einem kleinen Unterschied von 2 t C/ha bestimmt werden. Auf Grund der geringen Abweichungen können die Durchschnittswerte der Vorratsinventur relativ verlässlich geschätzt werden.

6.3 Der organische Kohlenstoff in der Streu

6.3.1 Der Kohlenstoffvorrat in der Streu

Die Kohlenstoffvorräte in der Streu liegen zwischen 2.0 t C/ha und 13.1 t C/ha. Nur an drei Standorten beträgt der C-Vorrat mehr als 10 t C/ha. An diesen drei Standorten wurden die Humusformen Xeromoder oder Moder bestimmt, was die hohen C-Vorräte mit einem gehemmten Streuabbau erklären lässt.

Der Abbau der Streu ist ein wichtiger Prozess bei der Aufnahme von organischem Kohlenstoff durch den Boden. Die Geschwindigkeit der Zersetzung der Streu wird hauptsächlich von der Qualität der Streu und den klimatischen Bedingungen bestimmt (Berg und Meentemeyer 2002). Vor allem in den ersten 2 Jahren des Streu-

abbaus wird die Zersetzung von der Streuqualität dominiert (Heim und Frey 2004), während in späteren Stadien die klimatischen Einflüsse zunehmend wichtiger werden können.

Der Kohlenstoffvorrat in der Streu der Footprint Area beträgt mit durchschnittlich 5 t C/ha nur 4% des Vorrates, welcher in Ober- und Unterboden (0–40 cm) gespeichert ist. Der durchschnittliche Kohlenstoffvorrat von Streu beträgt im Schweizer Wald gemäss Waldbericht 2005 der (WSL und BUWAL 2006) 13 t C/ha, was durchschnittlich ca. 11% des C-Vorrates im Boden (ganzes Profil durchschnittlich 115 t C/ha) entspricht.

In Neuseeland wurde der durchschnittliche C-Vorrat der Streu von Waldböden entlang eines W-E-Transektes auf der Südinsel auf 15.5 t C/ha geschätzt (Coomes et al. 2000).

Im Vergleich zu diesen Daten ist der Kohlenstoffvorrat in der Footprint Area am Untersuchungsstandort Lägern in der Streu gering und beträgt nicht einmal die Hälfte des schweizerischen Durchschnittes. An den meisten Stichprobenstandorten erfolgt der Streuabbau durch die hohe biologische Aktivität rasch, wodurch der Kohlenstoff schnell in den Boden eingearbeitet wird. Ein weiterer Aspekt der niedrigen Kohlenstoffvorräte in der Streu könnte auch der Zeitpunkt der Feldarbeit sein. Da die Feldarbeit im Juli und August 2005 stattgefunden hat, wurde ein beträchtlicher Anteil der Streu bereits vor der Beprobung abgebaut. Nach Heim und Frey (2004) wurde in Schweizer Wäldern der grösste Massenverlust im ersten Jahr des Streuabbaus in den Wintermonaten festgestellt.

6.3.2 Die räumliche Verteilung in der Footprint Area

Der in der Streu gespeicherte Kohlenstoffvorrat konnte nicht wie der C-Vorrat des Bodens mit dem Ausgangsmaterial korreliert werden, da beim Streuabbau ganz andere Prozesse wirken als bei der Stabilisierung des Kohlenstoffes im Waldboden und deshalb durch andere Faktoren beschrieben werden muss. Streuabbau ist ein sehr heterogener Prozess, mit einer grossen Zahl an Einflussfaktoren. Wichtig sind in erster Linie die klimatischen Bedingungen und die Qualität der Streu (Nährstoffangebot, Ligningehalt) (Andersson 2005).

Die relativ hohe Variabilität des Kohlenstoffvorrates in der Streu (zwischen 2 und 13 t C/ha) fällt für den Gesamtkohlenstoffvorrat der Footprint Area jedoch nicht ins Gewicht. Weil der Anteil des C-Vorrates in der Streu am Gesamtkohlenstoffvorrat im Boden mit 4% gering ausfällt, wird er in dieselben fünf Geländeeinheiten wie der Kohlenstoffvorrat des Bodens eingeteilt und in die Kohlenstoffvorratskarte des Bodens mit einbezogen.

6.4 Der Stickstoff

6.4.1 Der Stickstoffvorrat im Oberboden der Footprint Area

Der Stickstoffvorrat wurde in der Footprint Area für den Oberboden (0–10 cm) ermittelt. Durchschnittlich sind in der Untersuchungsfläche 3.6 t N/ha oder total 280 t N festgestellt worden. Wie beim Kohlenstoff- sind auch beim Stickstoffvorrat Unterschiede in der räumlichen Verteilung feststellbar, welche ebenfalls stark mit dem Ausgangsmaterial korrelieren. So sind die Stickstoffvorräte im Boden auf Malmkalk im Durchschnitt mehr als doppelt so gross wie in den Böden auf der Unteren Süsswassermolasse. Die Variabilität der Stickstoffspeicherung im Waldboden wird besonders von der Zusammensetzung des Waldes und von der Abfolge der Bodentypen bestimmt (Kulmatiski et al. 2004).

An den 27 Stichprobenstandorten konnten Stickstoffvorräte im Oberboden zwischen 1.1 t N/ha in einer sauren Braunerde und 5.5 t N/ha in einer Rendzina festgestellt werden.

6.4.2 Vergleich mit anderen Stickstoffinventuren

In Tabelle 19 sind die Stickstoffvorräte der vorliegenden Arbeit im Vergleich zu Daten aus anderen Inventuren aufgelistet. Vergleicht man die Vorratsdaten mit den von Walthert et al. (2004) für den Schweizer Jura ermittelten Werten, stellt man fest, dass die Stickstoffvorräte der Rendzinen an der Lägern vergleichsweise hoch sind, während sich die Werte für Braunerden in ähnlichem Rahmen bewegen wie an anderen Jura-Standorten (vgl. Tabelle 19).

Tab. 19: Vergleich des Stickstoffvorrates

	Profilort	Bodentyp	Vorrat nach Bodentiefe		
diese Arbeit	Waldboden im Jura (Lägern)		0 - 10 cm		
		mean	4.0		
	D1	Rendzina	5.0		
	D2	Rendzina	4.8		
	B3	Kalkbraunerde	3.2		
	C6	Neutrale Braunerde	3.3		
	D6	Saure Braunerde	1.8		
Walther et al. (2004)	Waldboden im Jura (CH)		0 - 10 cm	0 - 20 cm	0 - 40 cm
	Bärschwil	Rendzina	3.5	7.5	11.0
	Geissgrat	Rendzina	1.6	3.0	5.7
	Schnitterwald	Rendzina	n.b.*	11.3	
	Balmberg	Parabraunerde	2.0		
	Etwil	Braunerde	2.2		
Batjes (2002)	Europa		0 - 30 cm		0 - 100 cm
		mean	9		19
		Cambisol**	7.6		14.8
Batjes (1996)	World		0 - 30 cm		
	World	Rendzina	10.5		
	World	Cambisol**	5.8		

* n.b. Wert wurde nicht bestimmt

** Cambisol (FAO-ISRIC 1990) entsprechen in der Regel den Braunerden (FAL 2002a, b, Bodenkunde 2005)

Braunerden und Cambisole sind allerdings nicht als Synonyme verwendbar, sondern gehören zwei verschiedenen Klassifikationssystemen an. In der Regel gehören die Braunerden zu den Cambisolen. Bei Batjes (2002) wurden die Daten für Cambisole ermittelt.

In Tabelle 19 ist der durchschnittliche Stickstoffvorrat für die obersten 30 cm zusammengestellt: Für Rendzinen wurde der durchschnittliche Stickstoffvorrat weltweit auf 10.5 t N/ha und bei Braunerden auf 5.8 t N/ha geschätzt, während es für Europa im Durchschnitt 9 t N/ha und für Braunerden 7.6 t N/ha (Batjes 1996) sind. Für Rendzinen wird kein europäischer Mittelwert angegeben (Batjes 2002). Die durchschnittlichen Vorräte der vorliegenden Vorratsinventur (5 t N/ha im 0–10 cm-Horizont) sind mit dem globalen Durchschnittsvorrat in Rendzinen (10.5 t N/ha im 0–30 cm-Horizont) vergleichbar und erscheinen daher plausibel.

6.5 Ergebnisunsicherheit: Wie genau ist die Vorratsinventur?

6.5.1 Genauigkeit der Vorratsinventuren

Als Genauigkeitsmass für den Stichprobenfehler wird das 95%-Konfidenzintervall (in t C/ha und % am Mittelwert) angegeben.

Der Schätzfehler der gesamten Footprint Area wurde aus den Stichprobenfehlern der einzelnen Geländeeinheiten berechnet, in dem nach Flächenanteil gewichtet wurde.

Kohlenstoff

Tab. 20: Ergebnisunsicherheit der Kohlenstoffvorräte in Ober- und Unterboden

Ausgangsmaterial	Anzahl Standorte	max	min	mean	Standardfehler 2 x s.e.		Fläche	Total C _{org}
Oberboden: 0 - 10 cm		t C/ha	t C/ha	t C/ha	tC /ha	%	ha	t C
Felssturzschutt	1			47			3	141
Malmkalk	6	77.7	57.3	70.7 ±	6.0	8.4	20	1421
blockiger Hangschutt	4	70.3	55.3	60.7 ±	6.9	11.3	13	761
Molassehanglehm	10	60.8	40.3	46.1 ±	3.8	8.2	26	1221
USM	6	36.1	13.4	30.1 ±	6.9	22.9	15	438
TOTAL	27			51.7 ±	6.1		77	
Ergebnisunsicherheit (nach Fläche gewichtet) 0 - 10 cm:						11.7		3982

Ober- und Unterboden: 0 - 40 cm								
Felssturzschutt	1			73.0			3	219
Malmkalk	6	174.8	107.8	141.2 ±	22.1	15.6	20	2838
blockiger Hangschutt	4	162.7	120.8	146.2 ±	18.7	12.8	13	1833
Molassehanglehm	10	127.7	95.0	113.2 ±	7.6	7.6	26	3000
USM	6	116.0	61.9	87.3 ±	15.0	15.0	15	1270
TOTAL	27			119.0 ±	14.4		77	
Ergebnisunsicherheit (nach Fläche gewichtet) 0 - 40 cm:						12.1		9160

Der Stichprobenfehler für die Footprint Area beträgt im Oberboden 11.7%, für die gesamte Beprobungstiefe 12.1%, liegt also für beide Schätzungen im Bereich von 12%.

Die totalen Kohlenstoffvorräte der Footprint Area, welche auf Grund der Berechnungen der Fehlerabschätzung ermittelt wurden, unterscheiden sich leicht von jenen der Kohlenstoffvorratsinventur. Diese Unterschiede sind deshalb entstanden, weil bei der Fehleranalyse alle Wasserhaushaltsklassen einer geologischen Einheit zusammenge-

fasst wurden. Dieser Entscheid war nötig, weil dadurch die Klassengrößen für eine Fehlerabschätzung zu klein geworden wären.

Der Kohlenstoffvorrat beträgt nach Berechnungen der Fehlerabschätzung (Tab. 20) im Oberboden 3982 t C (52 t C/ha) und in der gesamten Beprobungstiefe (0–40 cm) 9160 t C (119 t C/ha). In der Kohlenstoffvorratsinventur und in den Vorratskarten beträgt der C-Vorrat 3975 t C (52 t C/ha) im Oberboden (siehe Tab. 15), in der gesamten Beprobungstiefe (siehe Tab. 16) 9199 t C (120 t C/ha). Der Unterschied zwischen den beiden Schätzmethoden ist sehr gering und beträgt für den Oberboden 0.2% und für die totale Beprobungstiefe von 40 cm 0.4%.

Für die Berechnung des Gesamtkohlenstoffvorrats können die Wasserhaushaltsklassen daher vernachlässigt werden. Für die Kartendarstellung wurden sie jedoch einbezogen, um eine bessere räumliche Differenzierung der Kohlenstoffvorräte in der Footprint Area darstellen zu können.

Stickstoff

Der Stichprobenfehler für den Stickstoffvorrat im Oberboden wurde nach derselben Methode wie für den Kohlenstoffvorrat ermittelt. Er beträgt für die gesamte Untersuchungsfläche 10.3% und kann ebenfalls als zuverlässig betrachtet werden.

Tab. 21: Ergebnisunsicherheit der Stickstoffvorräte im Oberboden (0–10 cm)

Ausgangsmaterial	Anzahl	N-Vorrat			Standardfehler		Fläche	Total N
	Standorte	max	min	mean	2 x SE			
Oberboden: 0 - 10 cm		t N/ha	t N/ha	t N/ha	t N/ha	%		
Felssturzschutt	1			3.4			3	10
Malmkalk	6	5.5	4.8	5.0 ±	0.2	4.3	20	101
blockiger Hangschut	4	5.2	2.7	4.0 ±	0.4	9.0	13	50
Molassehanglehm	10	4.5	2.7	3.4 ±	0.3	9.2	26	90
USM	6	2.8	1.1	2.0 ±	0.5	21.8	15	29
TOTAL	27			3.6 ±	0.3		77	
Ergebnisunsicherheit (nach Fläche gewichtet) 0 - 10 cm:						10.3		280

Nach Schätzung der Fehleranalyse beträgt der Stickstoffvorrat in der gesamten Untersuchungsfläche 280 t N (3.6 t N/ha) und nach Schätzung der Stickstoffinventur (Tab. 17) 278 t N (3.6 t N/ha).

Der Unterschied zwischen den beiden Schätzungen ist auch beim Stickstoffvorrat sehr gering.

Zuverlässigkeit der Stichprobeninventur

Im Landesforstinventar, wo dieselbe Methode zur Ermittlung von Schätzfehlern angewendet wurde, werden Fehler bis 10% noch als „zuverlässige“ Schätzung interpretiert (Brassel und Brändli 1999). Nach der Interpretation des Landesforstinventars können die Schätzungen zum Kohlenstoffvorrat im konkreten Fall der Footprint Area im 0–10 cm- und im 0–40 cm-Horizont folglich als zuverlässig eingestuft werden.

Die Grenzen der Fehlerabschätzung liegen bei der vorliegenden Vorratsinventur vor allem bei der Genauigkeit der gewählten Geländeeinheiten. Die räumliche Ausdehnung der fünf Geländeeinheiten ist natürlich ebenfalls mit einem Fehler behaftet, da sich die Geländeeinheiten der Wirklichkeit nur annähern. Dieser Fehler konnte in der Fehlerrechnung nicht berücksichtigt werden und stellt eine zusätzliche Unsicherheit dar.

6.5.2 Können Veränderungen des Kohlenstoffvorrates auf Grund dieser Unsicherheit durch eine erneute Beprobung aufgezeigt werden?

Die Unsicherheit der Kohlenstoffvorratsabschätzung liegt in der Footprint Area im Bereich von 10%. Für den 0–40 cm-Horizont sind das rund 15 t C/ha (vgl. Tabelle 18). Um eine echte Veränderung dieser Zahlen durch eine erneute Beprobung in fünf oder zehn Jahren aufzeigen zu können, müsste sich der Kohlenstoffvorrat somit relativ stark (im Bereich von 10%) ändern.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Repräsentativität der Stichproben an den Lägern durch die hohe Geländevariabilität als grösste Unsicherheit bei der Kohlenstoffvorratsabschätzung betrachtet werden muss. Kleinere Fehler erwarten wir für die 27 Stichprobenstandorten selber, da die Standortreproduzierbarkeit durch eine vierfache Beprobung (Mischproben aus jeweils 25 Einstichen) an vier von 27 Standorten ermittelt wurde (siehe 4.5.1). Der Messfehler im Labor wurde mittels Doppelbestimmungen ermittelt und kann dank der hohen Messgenauigkeit der Analysegeräte minimal gehalten werden.

Im folgenden Beispiel werden die unterschiedlichen Fehlerquellen bei der Bestimmung der Kohlenstoffvorräte aufgezeigt:

Geländeeinheit Malmkalk

In der Geländeeinheit Malmkalk wurden 6 Standorte beprobt. Am Standort D2 (vgl. Abb. 40) wurden 4 Mischproben entnommen.

Profil Standort D2



Steckbrief

Topographie:

748 m ü. M., Steilhang (62% Hangneigung)

Waldform:

Hallen-Buchenwald, Strauchschicht fehlt, Krautschicht vorhanden (Bärlauch, Bingelkraut, Buschwindröschen)

Humusform:

Mull

Abb. 40: Profil und Steckbrief des Standorts D2

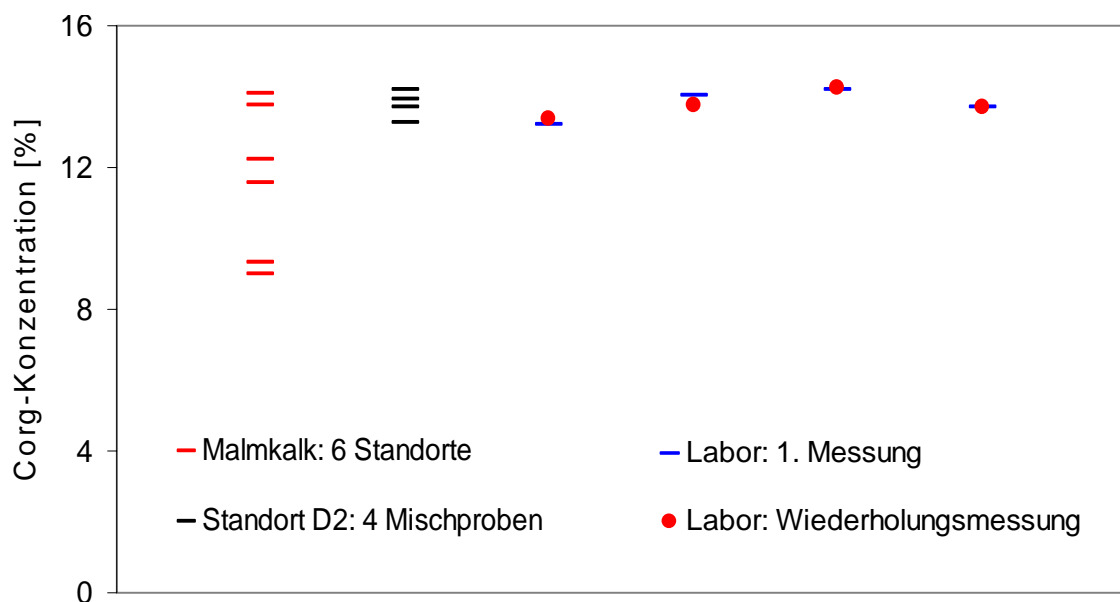


Abb. 41: Vergleich des Stichprobenfehlers mit dem Standortfehler und dem Messfehler im Labor am Beispiel Malmkalk

Abbildung 41 zeigt die Kohlenstoffkonzentrationen des Oberbodens (0–10 cm) der 6 Stichprobenstandorte der Geländeeinheit Malmkalk im Vergleich zu den C_{org} -Konzentrationen am Standort D2.

Die ermittelten C-Konzentrationen variieren an diesen sechs Standorten zwischen 9 und 14%. Am Standort D2 ergaben die vier Mischproben Werte zwischen 13 und 14%. Bei den jeweiligen Doppelbestimmungen der vier Mischproben sind die Abweichungen sehr klein und weichen um maximal 0.3% von einander ab.

Eine Wiederholung der Inventur für die Footprint Area ist erst dann sinnvoll, wenn aufgrund der jährlichen C-Bilanzen der Eddy-Kovarianz-Messung eine Veränderung des C-Vorrates im Boden in der Grössenordnung von 10% erwartet werden kann. Allerdings könnte die Veränderung des Kohlenstoffvorrats zumindest an den 27 Stichprobenstandorten der vorliegenden Diplomarbeit schon früher untersucht werden. Die Standorte sind durch das NABO-Konzept (siehe Kapitel 4.5.1) auf eine Langzeituntersuchung ausgelegt. Daher können der Kohlenstoff- und der Stickstoffvorrat für jede 10x10m-Stichprobenfläche sehr genau ermittelt werden. Die vergleichsweise grosse Unsicherheit entsteht erst bei der Extrapolation der Vorräte auf die ganze Untersuchungsfläche und bei der Standortwahl.

Standortwahl und Anzahl Beprobungsflächen

Der Standort D5 lieferte durch den hohen Skelettgehalt (>80%) im Vergleich zu den angrenzenden Rendzinen sehr tiefe Kohlenstoffvorräte. Dies zeigt, dass die Standortwahl und die Anzahl der Probenahmestandorte einen enormen Einfluss auf das Resultat haben können. Deshalb war es sinnvoll, der Standortwahl in der Footprint Area grosses Gewicht beizumessen (vgl. Kap. 4.3.3). In der vorliegenden Diplomarbeit wurde darauf geachtet, dass die Standortreproduzierbarkeit abgeschätzt werden kann und dadurch die Möglichkeit besteht, Veränderungen in den Vorräten der 27 Untersuchungsflächen feststellen zu können. Zusätzlich mussten genügend Standorte beprobt werden, damit der Kohlenstoffvorrat der gesamten Footprint Area zuverlässig ermittelt werden konnte. Um die Unsicherheit der Vorräte für die gesamte Untersuchungsfläche weiter verringern zu können, wären mehr Stichprobenstandorte nötig gewesen. Dadurch hätte aber auf die Erfassung der Standortreproduzierbarkeit verzichtet werden müssen, da sonst der Arbeitsaufwand den Rahmen einer Diplomarbeit gesprengt hätte.

Um die Anzahl der Probenahmestandorte in einem verarbeitbaren Rahmen zu halten, wurde als Probenahmemuster ein stratifiziertes Muster gewählt. Der Vorteil dieser Beprobungsart besteht darin, dass eine Hypothese der räumlichen Verteilung der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Boden berücksichtigt werden kann. Allerdings ist dieses System anfällig auf systematische Fehler. Ein zufälliges Probenahme-

muster ist das einzige objektive Verfahren und nur mit einem geringen systematischen Fehler behaftet. Allerdings ist für ein solches Verfahren eine hohe Probenanzahl notwendig. Zusätzlich ist die Beprobung nicht flächenproportional (BUWAL 2003).

Für eine weitere Beprobung wäre es sicher von Vorteil, die Beprobungsfläche in vier bis fünf Einheiten einzuteilen mit jeweils vier Wiederholungen pro Stichprobenstandort. Die Einteilung nach Wasserhaushalt, Wald-Altersklassen und Lothar-Schadenflächen erwiesen sich nicht als ideal. Dadurch entstanden Geländeeinheiten, in welchen nur ein oder zwei Stichprobenstandorte gewählt wurden und diese Merkmale dadurch gar nicht analysiert werden konnten. Der Einfluss der Lothar-Schadenflächen auf den Kohlenstoffvorrat im Boden konnte somit nicht untersucht werden. Bei der Auswertung der Daten wurde das Gebiet deshalb nur in fünf Geländeeinheiten nach Ausgangsmaterial eingeteilt.

6.6 Bedeutung der Ergebnisse für den CarboEuropeIP Hauptstandort Lägern

6.6.1 Repräsentativität des Hauptstandortes Lägern

Im Vergleich zu den Daten für den Schweizer Jura aus Walthert et al. (2004) scheinen die Kohlenstoffvorräte im Waldboden am CarboEuropeIP Hauptstandort Lägern plausibel. Die Kohlenstoffvorräte liegen in einem ähnlichen Bereich zu den Vergleichsdaten aus Kapitel 6.1.2. Die C-Vorräte in der Streu der Untersuchungsfläche sind im Vergleich zu Durchschnittswerten für den Schweizer Wald (WSL und BUWAL 2006) eher gering. Dies kann an der Zeit der Beprobung oder an den günstigen Abbaubedingungen liegen.

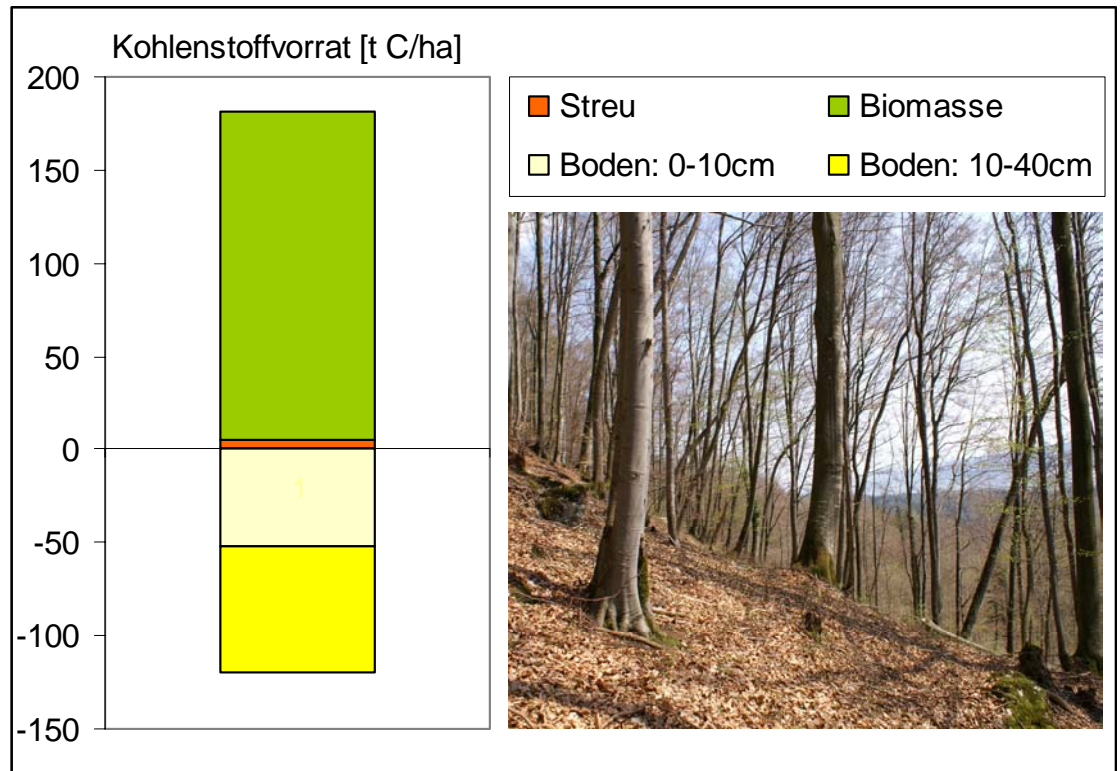
Anhand der ermittelten Kohlenstoffvorratsdaten kann der Hauptstandort Lägern als repräsentativ für einen montanen Mischwald im Schweizer Jura betrachtet werden.

6.6.2 Boden, Streu und Biomasse

Vergleich der Kohlenstoffvorräte in Boden, Streu und Biomasse

Abbildung 42 zeigt den durchschnittlichen Kohlenstoffvorrat in der oberirdischen Biomasse der Ortsbürgergemeinde Wettingen im Vergleich zum Kohlenstoffvorrat in Streu und Boden. In den obersten 40 cm der Böden in der Footprint Area sind 71%

des Kohlenstoffvorrates der Biomasse gespeichert. Die Bäume erreichen eine Höhe von über 25 m und enthalten ca. 50% C_{org} , während die Böden der Footprint Area viel tiefere Kohlenstoffkonzentrationen (zwischen 2 und 15%) aufweisen. Dies zeigt, wie wichtig die Speicherung von organischem Kohlenstoff im Boden ist.



Biomasse: Durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat im Holzvorrat der Gemeinde Wettingen
 Streu, Boden: Durchschnittliche Kohlenstoffvorräte der Footprint Area

Abb. 42: Vergleich der Kohlenstoffvorräte zwischen Biomasse, Streu und Boden

Beitrag der Streu zu den CO₂-Flussmessungen am Turm

Anhand von Abbauraten der Streu kann abgeschätzt werden, wie viel Kohlenstoff pro Jahr durch die Veratmung der Streu an die Atmosphäre abgegeben wird. Somit kann der Beitrag der Streu an den am Eddy-Messturm gemessenen CO₂-Flüssen ganz grob abgeschätzt werden.

Für den Schweizer Wald wurden Abbauraten von Heim und Frey (2004) präsentiert. Nach diesen Untersuchungen beträgt die Abbaukonstante (k) für Laubstreu (*Fagus sylvatica*) zwischen 0.271 und 0.325 (Abbaukonstante k [a^{-1}]). Die mittlere Verweildauer ($T = 1 / k$) von Kohlenstoff in der Streu wird danach auf 3.08 bis 3.96 a geschätzt.

Der Kohlenstoffvorrat der Streu beträgt in der Footprint Area 405 t C. Werden die Abbauraten nach Heim und Frey (2004) berechnet, würden in der Footprint Area (77 ha) jährlich zwischen 110 t C und 131 t C veratmet (das entspricht 143–173 g C/m²) und könnten somit je nach Windrichtung, am Eddy-Messturm als CO₂-Fluss gemessen werden. Diese Werte müssen als minimale Schätzung angesehen werden, da Litterbags den tatsächlichen Abbau eher unterschätzen und der Abbau der Wurzeln (unterirdische Streu) nicht eingerechnet wurde.

6.7 Schwierigkeiten bei Feldarbeit und Methoden

Durch die grosse Geländevariabilität im Untersuchungsgebiet stellten sich für die Feldarbeit diverse Schwierigkeiten. Die statistische Auswertung wurde durch die ungleiche Gruppengrösse der Untersuchungsparameter erschwert.

6.7.1 Geländevariabilität und Sampling Design

Die grösste Herausforderung für die Feldarbeit war die grosse Heterogenität der Landschaftselemente im Untersuchungsgebiet. Der Kohlenstoffvorrat musste einerseits mit möglichst hoher Genauigkeit ermittelt werden. Und andererseits sollte die Möglichkeit offen bleiben, die Beprobung der gleichen Standorte in fünf Jahren zu wiederholen, um allfällige Veränderungen des Kohlenstoffvorrates aufzeigen zu können. Der Aufwand für die Beprobung musste zudem in einem innerhalb einer Diplomarbeit durchführbaren Rahmen gehalten werden. Die Entscheidung weniger Standorte zu beproben, diese dafür genau zu untersuchen, erwies sich im Nachhinein als richtig. Es wurden weniger Stichprobenstandorte pro Flächenanteil der Geländeeinheiten im Untersuchungsgebiet gewählt, dafür wurden diese mit Holzpfeilen an jedem Eckpunkt gut markiert, mit dicken Schrauben versehen und mit GPS eingemessen. So sollten die Stichprobenstandorte später wieder gefunden werden können. Das Probenahmeverfahren der NABO ermöglichte eine genaue Untersuchung der einzelnen Standorte, wodurch die Unterschiede im Kohlenstoffvorrat zwischen den 27 Untersuchungsflächen deutlich aufgezeigt werden konnten. Der Kohlenstoffvorrat konnte schliesslich mit akzeptabler Genauigkeit abgeschätzt werden.

6.7.2 Statistische Analyse

Bei der Varianzanalyse stellte sich als Problem heraus, dass die Gruppengrößen der zu testenden Einflussfaktoren nicht gleich waren. Die Varianzanalyse kann auf diese Weise zwar durchgeführt werden, liefert aber nicht so zuverlässige Werte wie bei der Analyse von gleich grossen Gruppen. Zusätzlich war die Stichprobenmenge relativ gering. Andererseits bot sich dafür als Vorteil an, dass auch Faktoren geprüft werden konnten, welche nicht von Beginn an als Einflussgrösse definiert worden sind. Im Fall des stratifizierten Probenahmemusters, wie es in der vorliegenden Diplomarbeit angewendet wurde, ist es aber trotzdem sinnvoll, eine flächenproportionale Verteilung der Probenahmestandorte zu wählen. Es ist zweckmässig in grossen Teilflächen mehr Stichprobenstandorte zu wählen als in kleinen.

7 Schlussfolgerungen

Entscheidender Einfluss des Ausgangsmaterials auf die räumliche Verteilung des Kohlenstoff- und Stickstoffvorrates

Der Kohlenstoffvorrat in der Footprint Area am Hauptstandort Lägern beträgt in der Streu durchschnittlich 5 t C/ha, im Oberboden (0–10 cm) 52 t C/ha und im 0–40 cm-Horizont 120 t C/ha. Der Stickstoffvorrat im Oberboden wurde auf durchschnittlich 4 t N/ha geschätzt.

Die hohe Geländevariabilität im Untersuchungsgebiet, widerspiegelt sich auch in der räumlichen Verteilung des Kohlenstoff- und des Stickstoffvorrates: Insgesamt variieren die Kohlenstoffvorräte an den 27 Stichprobenflächen zwischen 87 t auf Unterer Süsswassermolasse und 146 t auf blockigem Hangschutt. Dabei konnte festgestellt werden, dass das Ausgangsmaterial einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilisierung von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden der Footprint Area hat.

Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte der Footprint Area sind mit Daten für den Schweizer Jura vergleichbar

Anhand der ermittelten Vorratsdaten kann der Hauptstandort Lägern als repräsentativer Standort für einen montanen Mischwald im Schweizer Jura betrachtet werden. Die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Boden der Footprint Area liegen in einem ähnlichen Bereich zu Vergleichsdaten aus dem Schweizer Jura.

Die gemachten Erfahrungen haben gezeigt, dass in einer allfälligen weiteren Beprobung auf eine allzu feine Unterteilung der Untersuchungsfläche in Teilflächen mit gleicher Vorrathypothese verzichtet werden sollte. Es ist sinnvoller, weniger Einheiten zu beproben, diese dafür anhand möglichst vieler Stichprobenstandorte genau zu untersuchen. In der vorliegenden Arbeit war die Einteilung nach Lothar-Schadenflächen nicht ideal, weil der Einfluss dieses Faktors wegen zu kleiner Stichprobenzahl nicht untersucht werden konnte. Bei einer zukünftigen Inventur könnte deshalb die gezielte Untersuchung des Einflusses von Lothar auf den Kohlenstoffvorrat im Boden interessante neue Resultate liefern.

Homogene $\delta^{13}\text{C}$ -Isotopensignatur im Oberboden

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Signatur am Hauptstandort Lägern ist im Oberboden homogen verteilt und typisch für einen Waldstandort mit reiner C_3 -Vegetation. Eine Unterteilung der Footprint Area in Teilflächen mit unterschiedlicher $\delta^{13}\text{C}$ -Signatur erscheint deshalb nicht möglich. Durchschnittlich weisen Rendzinen etwas tiefere $\delta^{13}\text{C}$ -Isotopenverhältnisse als die Braunerden auf, was ebenfalls mit der Korngrösse der Feinerde in Zusammenhang stehen könnte. Eine systematische Analyse der Isotopensignatur an allen Standorten könnte solche Fragen vielleicht beantworten.

Ergebnisunsicherheit: räumliche Variabilität als Hauptproblem

Die Unsicherheit in der Vorratsabschätzung liegt im Bereich von 10%. Eine Wiederholung der Inventur für die Footprint Area ist erst dann sinnvoll, wenn aufgrund der jährlichen C-Bilanzen der Eddy-Kovarianz-Messung eine Veränderung im Boden C-Pool in der Grössenordnung von 10% erwartet werden kann. Allerdings könnte die Veränderung des Kohlenstoffvorrats zumindest an den 27 Stichprobenstandorten der vorliegenden Diplomarbeit schon früher untersucht werden. Die Standorte sind durch das NABO-Konzept für Langzeituntersuchung, darauf ausgelegt geringe Veränderungen in den C- und N-Vorräten aufzeigen zu können.

8 Literaturverzeichnis

- AK SK (1996): Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. IHW-Verlag, München.
- Andersson, C. (2005): Litter decomposition in the forest ecosystem - influence of trace elements, nutrients and climate. ESS Bulletin 3:4-17.
- Arrouays, D., Deslais, W. und Badeau, V. (2001): The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. Soil Use and Management 17:7-11.
- BAFU (2005): FOKUS FEBRUAR 2005: Das Kyoto-Protokoll. Bundesamt für Umwelt, <http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fokus/200502/box1/index.html>.
- Balabane, M. und Plante, A. F. (2004): Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. European Journal of Soil Science 55:415-427.
- Batjes, N. H. (1996): Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science 47:151-163.
- Batjes, N. H. (2002): Carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe. Soil Use and Management 18:324-329.
- Berg, B. und Meentemeyer, V. (2002): Litter quality in a north European transect versus Carbon storage potential. Plant and Soil 242:83-92.
- Bird, M. I. und Pousai, P. (1997): Variations of $\delta^{13}C$ in the surface soil organic carbon pool. Global Biogeochemical Cycles 11:313-322.
- Bird, M. I., Santruckova, H., Arneth, A., Grigoriev, S., Gleixner, G., Kalaschnikov, Y. N., Lloyd, J. und Schulze, E.-D. (2002): Soil carbon inventories and carbon-13 on a latitude transect in Siberia. Tellus B 54:631-641.
- Blum, W. E. H. und Schroeder, D. (1992): HIRTS Stichwortbücher Bodenkunde in Stichworten, Berlin, Stuttgart.
- Bodenkunde, A. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, Hannover.
- Bolliger, T. (1999): Geologie des Kantons Zürich. Ott Verlag, Thun.
- Brassel, P. und Brändli, U.-B. (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.

- Burrough, P. A. und McDonnell, R. A. (1998): Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, Oxford.
- BUWAL (1996): Handbuch Waldbodenkartierung. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL (2002): Schriftenreihe Umwelt. Nationales Boden-Beobachtungsnetz NABO. Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- BUWAL (2003): Handbuch Probennahme und Probenvorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- BVU (2003): Naturatlas Aargau. Departement Bau, Verkehr und Umwelt; Abteilung Landschaft und Gewässer, Aarau.
- CarboEurope-IP (2004): Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance. S. 28, Jena, Germany.
- CarboEurope-IP (2006): <http://www.carboeurope.org/>.
- Christensen, B. T. (2001): Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science* 52:345-353.
- Coomes, D. A., Allen, R. B., Scott, N. A., Goulding, C. und Beets, P. N. (2000): Designing system to monitor carbon stocks in forests and shrublands. *Forest Ecology and Management* 164:89-108.
- Cuny, R. (1983): Die Pflanzengesellschaften der Lägern (Schweiz: Jura). *Mitteilungen der Aargauischen Naturforschenden Gesellschaft. Sauerländer AG, Aarau.* S. 5-64.
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C. und Wisniewski, J. (1994): Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190.
- Egloff, F. (1999): Besonderheiten der Lägernflora und der Kampf um die Erhaltung der Felsfluren. *Badener Neujaarsblätter, Baden.* S. 23-36.
- FAL (1996): Bodenkarte Baden mit Erläuterungen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz.
- FAL (2002): Klassifikation der Böden der Schweiz. Bodenprofiluntersuchung, Klassifikationssystem, Definition der Begriffe, Anwendungsbeispiel. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz.
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Hogberg, P., Linder, S., Mackenzie, F. T., Moore, B., III, Pedersen, T., Rosenthal, Y., Seitzinger, S., Smetacek, V. und Steffen, W. (2000): The Global Carbon Cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* 290:291-296.
- FAO-ISRIC (1990): Guidelines for Soil Description. Food and Agricultural Organization, Rome.

- Finzi, A. C., Van Breemen, N. und Canham, C. D. (1998): Canopy Tree-Soil Interactions within Temperate Forests: Species Effects on Soil Carbon and Nitrogen. *Ecological Applications* 8:440-446.
- Fischlin, A. und Buchmann, N. (2004): Leistungsfähige Biosphäre. *Bulletin, Magazin der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich* 293:10-13.
- Fischlin, A., Buchter, B., Matile, L., Ammon, K., Hepperle, E., Leifeld, J. und Fuhrer, J. (2003): Bestandesaufnahme zum Thema Senken in der Schweiz. Verfasst im Auftrag des BUWAL. *Systems Ecology Report No. 29*, Institut für Terrestrische Ökologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Schweiz.
- Graf, H. (1996): Geologischer Atlas der Schweiz, 1 : 25'000, Blatt Baden (unveröffentlichte Originalkartierung). Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.
- Guo, L. B. und Gifford, R. M. (2002): Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8:345-360.
- Hagedorn, F., Maurer, S., Egli, P., Blaser, P., Bucher, J. B. und Siegwolf, R. (2001): Carbon sequestration in forest soils: effects of soil type, atmospheric CO₂ enrichment, and N deposition. *European Journal of Soil Science* 52:619-628.
- 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.
- Heim, A. und Frey, B. (2004): Early stage litter decomposition rates for Swiss forests. *Biogeochemistry* 70:301-315.
- IPCC (2000): Land-use, land-use change, and forestry. Special Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2001): Climate Change 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones, R. J. A., Hiederer, R., Rusco, E. und Montanarella, L. (2005): Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. *European Journal of Soil Science* 56:655-671.
- Körner, C., Asshoff, R., Bignucolo, O., Hättenschwiler, S., Keel, S. G., Peláez-Riedl, S., Pepin, S., Siegwolf, R. T. W. und Zotz, G. (2005): Carbon Flux and Growth in Mature Deciduous Forest Trees Exposed to Elevated CO₂. *Science* 309:1360-1362.
- Kulmatiski, A., Vogt, D. J., Siccama, T. G., Tilley, J. P., Kolesinskas, K., Wickwire, T. W. und Larson, B. C. (2004): Landscape Determinants of Soil Carbon and Nitrogen Storage in Southern New England. *Soil Sci Soc Am J* 68:2014-2022.
- Labhart, T. P. (2001): Geologie der Schweiz, 5. überarbeitete Auflage 2001. Ott Verlag Thun.
- Leifeld, J., Bassin, S. und Fuhrer, J. (2005): Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105:255-266.

- Liski, J., Perruchoud, D. und Karjalainen, T. (2002): Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* 169:159-175.
- Meier, R. und Meier, B. (2003): *Die Lägern - Eine Gratwanderung*. Hier und Jetzt Verlag.
- MeteoSchweiz (2005): *Das Klima der Schweiz - ein Kurzportrait*. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.
- Morisada, K., Ono, K. und Kanomata, H. (2004): Organic carbon stock in forest soils in Japan. *Geoderma* 119:21-32.
- Mund, M. (2004): Carbon pools of European beech forests (*Fagus sylvatica*) under different silvicultural management. Doktorarbeit. Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie. Georg-August-Universität Göttingen. Jena.
- Page, A. L., Miller, H. R. und Keeney, D. R. (1982): *Methods of Soil Analyses*, Second Edition edition. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Papritz, A. (1991): Bodenkundliche Charakterisierung der Beobachtungsflächen, 2.3 Lägern. Belastung von Waldböden, Programmleitung NFP 14, Zürich.
- Perruchoud, D., Kienast, F., Kaufmann, E. und U., B. O. (1999): 20th century carbon budget of forest soils in the alps. *Ecosystems* 2:320-337.
- Perruchoud, D., Walthert, L., Zimmermann, S. und Lüscher, P. (2000): Contemporary carbon stocks of mineral forest soils in the Swiss Alps. *Geochemistry* 50:111-136.
- Post, W. I., Izaurralde, R. C., Mann, L. K. und Bliss, N. (2001): Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climatic Change* 51:73-99.
- Schachtschabel, P., Blume, H. P., Hartge, K. H. und Schwertmann, U. (1998): *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*, Enke, Stuttgart.
- Schimel, D. S. (1995): Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* 1:77-91.
- Schindler, C. (1978): Zur Geologie von Baden und seiner Umgebung. *Badener Neujahrsblätter*, Baden. S. 109-172.
- Schmid, P. und Oke, T. R. (1990): A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terrain. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 116:965-988.
- Schnetzler, H. R. (1983): *Waldwirtschaftsplan*. S. 70 OBG Wettingen Revision Herbst 1981, Wettingen.
- Six, J., Contant, R. T., Paul, E. A. und K., P. (2002): Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications of C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241:155-176.
- Smith, K. A. (1990): *Soil Analyses: Modern Instrumental Techniques*. Marcel Dekker, Inc., New York.

- Smith, K. A. und Mullins, C. E. (1991): Soil Analyses: Physical Methods. Mardel Dekker Inc., New York.
- Staddon, P. L. (2004): Carbon isotopes in functional soil ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 19:148-154.
- Stocker, R., Burger, T., Elsener, O., Liechti, T., Portmann-Orlowski, K. und Zantop, S. (2002): Die Waldstandorte des Kantons Aargau. Finanzdepartement des Kantons Aargau, Abteilung Wald, Aarau.
- Trumbore, S. E., Chadwick, O. A. und Amundson, R. (1996): Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science* 272:393-396.
- Vock, P. (2004): Betriebsplan 2002, Wettingen.
- Walther, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J. und Lüscher, P. (2004): Waldböden der Schweiz. Band 1: Grundlagen und Region Jura. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- WSL und BUWAL (2006): Waldbericht 2005. Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- Zhang, C. und McGrath, D. (2004): Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods. *Geoderma* 119:261-275.

9 Anhang

9.1 Datentabellen

9.1.1 Standorte

Standortbeschreibung

Tab. 22: Standortbeschreibung der 27 Stichprobenstandort

Standort		Vegetation		Geologie	Boden	
Senkrecht durchwaschene Böden		Entwicklungsstufe	Lothar-Schaden	Ausgangsmaterial	Bodentyp	Humusuform
<i>Normal durchlässig:</i>						
B1	tiefgründig	Baumholz		blockiger Hangschutt	neutrale Braunerde	moderartiger Mull
B2	tiefgründig	Baumholz		Molassehanglehm	saure Braunerde	Mull
B3	tiefgründig	Stangenholz		Molassehanglehm	Kalkbraunerde	moderartiger Mull
B4	tiefgründig	Jungwuchs		Molassehanglehm	Kalkbraunerde	Mull
B5	tiefgründig	Baumholz	80- 100%	USM	saure Braunerde	Mull
B6	tiefgründig	Baumholz	40 - 80%	Molassehanglehm	saure Braunerde	Mull
C1	mässig tiefgründig	Baumholz		blockiger Hangschutt	neutrale Braunerde	Mull
C2	mässig tiefgründig	Baumholz		blockiger Hangschutt	Rendzina, verbraunt	Mull
C3	mässig tiefgründig	Baumholz		Molassehanglehm	neutrale Braunerde	Mull
C4	mässig tiefgründig	Stangenholz		Molassehanglehm	Kalkbraunerde	Mull
C5	mässig tiefgründig	Stangenholz		USM	saure Braunerde	Mull
C6	mässig tiefgründig	Jungwuchs		Molassehanglehm	neutrale Braunerde	moderartiger Mull
D1	flachgründig	Baumholz		Malmkalk	Rendzina, verbraunt	Mull
D2	flachgründig	Baumholz		Malmkalk	Rendzina	Mull
D3	flachgründig	Baumholz		Malmkalk	Rendzina	Mull
D4	flachgründig	Baumholz		blockiger Hangschutt	Kalkbraunerde	moderartiger Mull
D5	flachgründig	Baumholz		Felssturzschutt	Rendzina	Xeromoder
D6	flachgründig	Baumholz		USM	saure Braunerde	Moder
D7	flachgründig	Stangenholz		Malmkalk	Rendzina	Mull
D8	flachgründig	Stangenholz		USM	saure Braunerde	Moder
D9	flachgründig	Jungwuchs		Malmkalk	Rendzina	Mull
D10	flachgründig	Baumholz	80- 100%	Malmkalk	Rendzina	Mull
D11	flachgründig	Baumholz	40 - 80%	USM	saure Braunerde	moderartiger Mull
D12	flachgründig	Jungwuchs	80- 100%	USM	saure Braunerde	Mull
<i>Stauwasserbeeinflusst:</i>						
F1	tiefgründig	Baumholz		Molassehanglehm	saure Braunerde	Mull
<i>Grund- /hangwasserbeeinflusst:</i>						
K1	tiefgründig	Baumholz		Molassehanglehm	neutrale Braunerde	Mull
K2	tiefgründig	Stangenholz		Molassehanglehm	neutrale Braunerde	Mull

Lage der 27 Probenahmestandorte

Tab. 23: Lage und Topographie der 27 Stichprobenstandorte

Die Landeskoordinaten beziehen sich jeweils auf den Mittelpunkt der 10 x 10m Stichprobenfläche.

Standort	Schweizer Landeskoordinaten		Höhe [m.ü.M]	Hangneigung [%]	Lage im Gelände
B1	669671	259037	691	12	Hangfuss
B2	670209	258780	578	17	Unterhang
B3	670327	258834	585	33	Hangfuss
B4	670233	258853	591	19	Hangfuss
B5	669278	258771	574	11	Hangfuss
B6	669723	258990	678	15	Mittelhang
C1	669925	259042	680	29	Mittelhang
C2	669269	259020	664	61	Mittelhang
C3	670244	258981	639	67	Mittelhang
C4	669472	258932	632	65	Mittelhang
C5	670082	258793	602	39	Unterhang
C6	670113	258963	644	32	Unterhang
D1	669851	259169	746	70	Oberhang
D2	669331	259077	694	63	Mittelhang
D3	669471	259138	748	80	Oberhang
D4	669969	259007	674	49	Mittelhang
D5	670497	259164	701	88	Mittelhang
D6	669733	258758	598	52	Mittelhang
D7	669261	259177	766	66	Oberhang
D8	669219	258922	618	56	Mittelhang
D9	669173	259173	765	54	Oberhang
D10	669723	259139	741	76	Mittelhang
D11	669714	258862	633	58	Mittelhang
D12	669666	258801	612	66	Mittelhang
F1	670423	258836	590	24	Hangfuss
K1	669864	258876	614	38	Unterhang
K2	669881	258806	595	20	Hangfuss

9.1.2 Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat

Tab. 24: Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte an den 27 Stichprobenflächen nach Bodentypen sortiert

Standort	Bodentyp	Kohlenstoffvorrat		Stickstoffvorrat
		0-10 cm t C/ha	0-40 cm t C/ha	0-10 cm tN/ha
D2	Rendzina	76.3	168.0	5.5
D3	Rendzina	77.7	120.4	4.9
D5	Rendzina	47.1	73.0	3.4
D7	Rendzina	70.2	148.9	4.9
D9	Rendzina	73.2	174.8	4.9
D10	Rendzina	69.5	107.8	4.8
C2	Rendzina, verbraunt	60.8	143.8	4.0
D1	Rendzina, verbraunt	57.3	127.1	5.0
B3	Kalkbraunerde	42.7	122.5	3.1
B4	Kalkbraunerde	46.0	121.3	3.5
C4	Kalkbraunerde	42.1	116.8	3.0
D4	Kalkbraunerde	70.3	162.7	4.2
K2	Kalkbraunerde	44.5	95.0	3.5
B1	neutrale Braunerde	55.3	120.8	4.4
C1	neutrale Braunerde	56.3	157.5	3.5
C3	neutrale Braunerde	40.3	102.6	2.7
K1	neutrale Braunerde	49.0	127.7	3.3
C6	neutrale Braunerde	34.1	124.6	4.5
B2	saure Braunerde	49.3	118.1	3.4
B5	saure Braunerde	30.8	94.8	2.6
B6	saure Braunerde	43.8	107.9	3.5
C5	saure Braunerde	31.3	83.3	2.1
D6	saure Braunerde	36.1	75.9	1.8
D8	saure Braunerde	35.1	91.9	2.3
D11	saure Braunerde	13.4	116.0	2.2
D12	saure Braunerde	42.1	61.9	1.1
F1	saure Braunerde	60.0	95.6	3.1

9.2 Klassifikation der Standortseigenschaften

9.2.1 Horizontbezeichnung bei der Humusform






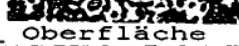

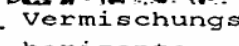
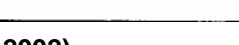
Horizont	Anteil		Schematischer Profilaufbau Auflage- horizonte
	Oberirdi- sche Pflan- zenreste	Organische Feinsubstanz	
Ol (<u>l</u> itter)	> 90 %	max. 10 %	60 —  ol1
Of (<u>F</u> ermen- tation)	30 - 90 %	10 - 70 %	50 —  ol2
Oh (<u>H</u> umus- stoff)	max. 30 %	> 70 %	40 —  of1
<u>Subhorizonte</u>			30 —  of2
Ol1 (<u>ne</u> u)	unverändert	max. 10 %	20 —  oh1
Ol2 (<u>ver</u> än- dert)	verändert		10 —  oh2
Of1 (<u>R</u> est)	70 - 90 %	10 - 30 %	0 —  Oberfläche
Of2 (<u>m</u> ittel)	30 - 70 %	30 - 70 %	10 —  Ahh
Oh1 (<u>R</u> est)	10 - 30 %	70 - 90 %	
Oh2 (<u>f</u> ein)	max. 10 %	über 90 %	20 —  Ah
			Vermischungs- horizonte

Abb. 43: Schematischer Aufbau des Auflagehorizontes (FAL 2002)

9.2.2 Klassifikation der Humusformen

Tab. 25: Klassierung der Humusformen (BUWAL 1996)

Humusform	Horizontabfolge	Beschreibung
Mull	OI – Ah	Rege biologische Tätigkeit mit Streuabbau innerhalb eines Jahres. Der Ah-Horizont ist über 8 cm mächtig und weist meist ein stabiles Krümelgefüge auf.
Moderartiger Mull	OI – Of – Ah	Zwischen dem Streuhorizont und dem Ah-Horizont liegt ein mindestens 2 cm mächtiger Fermentationshorizont. Die Mächtigkeit des Ah-Horizontes ist im Vergleich zum Mull geringer.
Moder	OI – Of – Oh – Ah	Unterhalb des Fermentationshorizontes ist ein deutlicher Humusstoffhorizont ebenfalls vorhanden. Der Ah-Horizont ist meist weniger als 5 cm mächtig.
Rohhumusartiger Moder	OI – Of – Oh – Ah	Die einzelnen Horizonte werden kaum noch durchmischt und sind scharf gegeneinander abgegrenzt. Der Ah-Horizont ist oft etwas gebleicht.
Rohhumus	OI – Of – Oh – Ah	Im Rohhumus fehlen bodenwühlende Lebewesen gänzlich. Die einzelnen Horizonte sind deutlich geschichtet und zeigen scharfe Übergänge. Der pH-Wert ist stark sauer, Huminstoffe werden mit dem Sickerwasser nach unten verlagert und der Oberboden ist meist stark ausgewaschen.
Xeromoder	OI – Of – Ah	Der Abbau der Vegetationsrückstände ist bei Trockenheit gehemmt. Dadurch bilden sich ein relativ mächtiger Streu- und ein Fermentationshorizont. Durch den im Laufe der Zeit anwachsenden Humusgehalt in der Mineralerde, erhält der Oberboden seine auffällig dunkle Farbe.

9.3 Datenkatalog

Tab. 26: Datenkatalog der verfügbaren Daten

Themenfeld	Unterlage	Daten	Bemerkungen	Massstab	Jahr Bestellung
Übersicht	Landeskarte der Schweiz, Blatt Baden	Vektor25 (swisstopo)	Allgemeine Geländeeigenschaften	1: 25'000	2000 Swisstopo
Relief	DGM	AGIS	Relief	5 m Auflösung	swisstopo
Geologie	Geologische Karte der Schweiz, Blatt Baden	Originalkarte (swisstopo)	Ausgangsmaterial für die Bodenbildung, Substrat	1: 25'000	1996 Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG)
Geomorphologie	Geomorphologisches Inventar des Kantons	AGIS: Vektorkarte	Relief, Ausgangsmaterial für die Bodenbildung	1:10'000	1997 AGIS
Klima	Wärmegliederungskarte	AGIS	Klimatische Charakterisierung: Übersicht	1:200'000	1992 AGIS
Arealstatistik	Arealstatistik 92/97, 24 Kategorien (BFS)	Pixelkarte	Landnutzung	1: 25'000	1999 AGIS
Bodenbedeckung	Landeskarte der Schweiz: Primäre Bodenbedeckung	Vector25 (swisstopo)	Ausgangsmaterial für Bodenbildung, Vegetation	1: 25'000	2002 AGIS
Vegetation	Bestandskarte AG	AGIS: Vektorkarte	Vegetation Informationen zu Entwicklungsstufe, Laubholzanteil, Deckungsgrad	1: 15'000	2002 AGIS
	Pflanzensoziologische Kartierung AG	AGIS: Vektorkarte	Darstellung der potentiell-natürlichen Waldgesellschaften		2003 AGIS
	Alterstruktur des Waldes		Ev. WSL oder aus der Landeskarte: Bodenbedeckung		offen
Naturschutz	Waldnaturschutzinventar AG	AGIS: Vektorkarte	Inventar mit naturkundlich wichtigen Waldobjekten, diverse Angaben zu Waldgesellschaften, Bestandesstrukturen, seltenen Arten, etc.		2001 AGIS
	Naturschutzgebiete von kant. Bedeutung im Wald	AGIS: Vektorkarte		1: 50'000	2001 AGIS
	Pflegeverträge AG	AGIS: Vektorkarte	Alle Flächen im Wald, die zur Erreichung des Pflegeziels im Naturschutz einen periodischen Pflegeeingriff brauchen		2001 AGIS
	Waldflächen mit Nutzungsverzicht AG	AGIS: Vektorkarte			2004 AGIS
Schadenflächen	Lotharflächen AG	AGIS: Vektorkarte			2000 AGIS
Wasser	Grundwasserkarte	AGIS: Vektorkarte	Grundwassermächtigkeit und Bedeckung von Grundwasserleitern	1: 25'000	1997 AGIS
Boden	Bodenkarte der Schweiz, Blatt Baden	Vektor25 (swisstopo)	Feldkartierung im Massstab 1:10'000 (Eidgen. Forschungsanstalt ZH-Reckenholz)	1: 25'000	1996 AGIS

9.4 Konzeptkarten

Für jede Wasserhaushaltsklasse wurde eine Konzeptkarte erstellt. Die Auswahl der Stichprobenstandorte erfolgte auf Grund dieser Konzeptkarten getroffen:

Tab. 27: Übersicht über die fünf Konzeptkarten

Wasserhaushalt		Gründigkeit
Konzeptkarte B:	Senkrecht durchwaschene Böden <i>Normaldurchlässige Böden</i>	tiefgründig
Konzeptkarte C:	Senkrecht durchwaschene Böden <i>Normaldurchlässige Böden</i>	mässig tiefgründig
Konzeptkarte D:	Senkrecht durchwaschene Böden <i>Normaldurchlässige Böden</i>	flachgründig
Konzeptkarte FK:	K: Senkrecht durchwaschene Böden <i>Grund-/hangwasserbeeinflusste Böden</i>	tiefgründig
	F: Senkrecht durchwaschene Böden <i>Stauwasserbeeinflusste Böden</i>	tiefgründig

9.5 Geologie

9.5.1 Geologische Zeittafel

Geologische Zeiteinheit				Alter in Mio. Jahren	
KAENOZOIKUM (Erdneuzeit)	Quartär	Heute		Alpine Gebirgsbildung: Hebung und Abtrag	1.6 bis heute
		Würm:	25'000 bis 10'000 Jahre BP		
		Warmzeit			
		Riss:	200'000 bis 125'000 Jahre BP		
		Warmzeit			
		Mindel			
		Warmzeit			
		Günz			
		Warmzeit			
	Tertiär	Pliozän Juraufaltung		Alpine Gebirgsbildung: Hebung und Abtrag	
		Miozän	Obere Süsswassermolasse		16 bis 5
			Obere Meeresmolasse		22 bis 16
			Untere Süsswassermolasse		30 bis 22
		Oligozän	Untere Meeresmolasse		35 bis 30
		Eozän			65 bis 35
		Paläozän			
MESOZOIKUM (Erdmittelalter)	Kreide	Beginn der alpinen Gebirgsbildung			250 bis 65
	Jura	Meeressedimente in grosser Vielfalt			
	Trias	Flaches, tropisches Meer			
PALÄOZOIKUM (Erdaltertum)	Perm				500 bis 250
	Karbon				
	Devon				
	Silur				
	Ordoviz				
	Kambrium				
PRÄKAMBRIUM		Entstehung der Erde			4600 bis 500

Abb. 44: Geologische Zeittafel

9.5.2 Profil durch die Lägern Südflanke

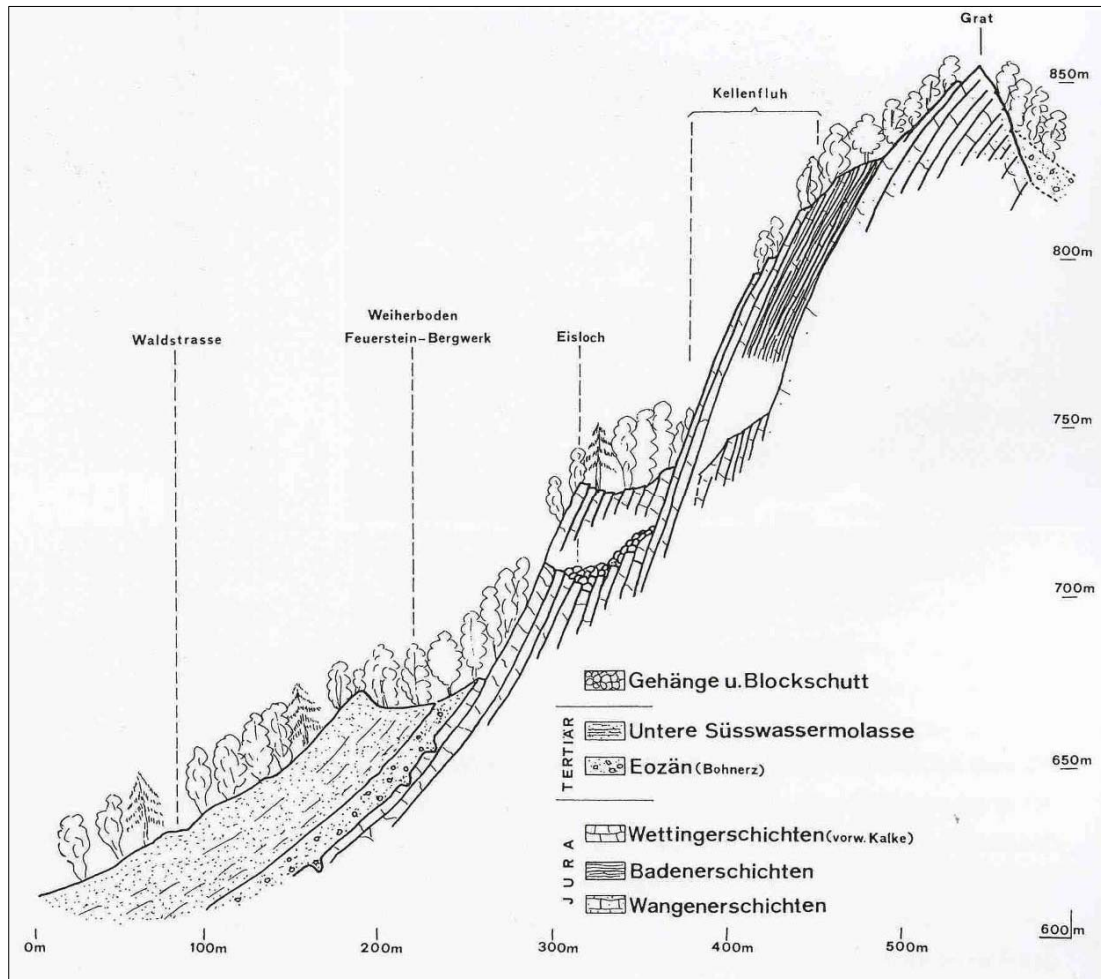


Abb. 45: Profil durch die Lägern-Südflanke längs der Kantonsgrenze beim Weiherboden (aus Meier und Meier 2003: 39, nach G. Senftleben und R. Vogler 1923)

