

Bodenkohlenstoff nach Windwurf – eine CO₂-Quelle?

Silvan Rusch, Frank Hagedorn, Stephan Zimmermann, Peter Lüscher

Eidgenössische Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf



Inhalt

1	Hintergrund	1
1.1	Veränderung der C-Pools nach Störungen – eine Kontroverse.....	1
1.2	Fragestellung	3
2	Methodik	3
2.1	Standorte.....	3
2.2	Beprobungsstrategie	5
2.3	Entnahme und Aufbereitung der Bodenproben.....	5
2.4	Berechnungen und Statistik.....	6
3	Resultate	7
3.1	Lothar	7
3.1.1	Humustyp und Mächtigkeit auf den Lotharflächen.....	7
3.1.2	Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage	8
3.1.3	Auswirkungen des Windwurfs auf die Kohlenstoffspeicherung.....	8
3.1.4	Gesamteffekt auf die Kohlenstoffspeicherung auf den Lotharflächen.....	11
3.2	Vivian	12
3.2.1	Humustyp und Mächtigkeit auf den Vivianflächen	12
3.2.2	Kohlenstoffvorrat der Versuchsflächen	13
3.2.3	Auswirkungen des Windwurfs auf die Kohlenstoffspeicherung.....	14
3.2.4	Gesamteffekt auf die Kohlenstoffspeicherung auf den Vivian-Flächen	17
3.3	Bedeutung des Kohlenstoff-Verlustes durch Lothar und Vivian	18
3.4	Hotspots alpine Böden	19
3.5	Gesamtauswirkung der Sturmereignisse Lothar und Vivian.....	21
3.6	Einfluss von Sturmereignissen auf die CO ₂ -Senkenleistung des Bodens und des Waldes	22
4	Zusammenfassung	23
5	Offene Fragen.....	23
6	Bodenkohlenstoff nach Windwurf – Literaturüberblick	24
7	Literatur	28

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Veränderung des organischen Materials nach Störereignissen (Covington, 1981)	1
Abb. 2-1: Verbreitung der untersuchten Windwurf­flächen (grüne Kreissymbole: Lothar, rote Kreissymbole: Vivian) innerhalb der Schadengebiete (grüne Flächen: Lothar, rote Flächen: Vivian).....	4
Abb. 2-2: Material zur Entnahme der volumenproportionalen Bodenproben	6
Abb. 3-1 Mächtigkeiten der einzelnen Horizonte der organischen Auflagen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=8). Mit * gekennzeichnete Standorte liegen >600m.....	7
Abb. 3-2 C-Vorräte der organischen Auflagen auf den Lothar-Flächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=8) im Vergleich zur Erhebung von Moeri, 2007 (grau) (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=281).....	8
Abb. 3-3 Mittlere C-Vorräte der organischen Auflagen auf den Lotharflächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=14 Standorte à 8 Wiederholungen).....	9
Abb. 3-4 Anteile der einzelnen Unterhorizonten an den C-Vorräten der organischen Auflagen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=8).....	10
Abb. 3-5 C-Vorräte der oberen Mineralböden (0-10 cm) auf den Lotharflächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n= 8 Wiederholungen)	11
Abb. 3-6 Mittlerer C-Vorrat der organischen Auflagen und der obersten 10 cm der Oberböden auf den Lotharflächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=14 Standorte).....	12
Abb. 3-7 Mächtigkeiten der einzelnen Horizonte der organischen Auflagen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=8). Horizontale Linie zeigt den Mittelwert in den Schweizer Voralpen (1200-1800m) an (Moeri, 2007).....	13
Abb. 3-8 C-Vorräte der organischen Auflagen auf den Vivian-Flächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=8) sowie die durchschnittlichen Vorräte in den Schweizer Voralpen und Alpen	14
Abb. 3-9 Einfluss der Bewirtschaftung auf die C-Vorräte der organischen Auflagen der Vivian-Flächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=8).....	15
Abb. 3-10 Mittlerer C-Vorrat der oberen Mineralböden (0-10cm) auf den Vivianflächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=5 Standorte)	17
Abb. 3-11 Mittlerer C-Vorrat der organischen Auflagen und der obersten 10 cm der Oberböden auf den Vivianflächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=5 Standorte à 8 Wiederholungen).....	17
Abb. 3-12 Flächenbezogener C-Verlust der beiden Sturmereignisse (Mittelwerte \pm Standardfehler, n _{Lothar} =112, n _{Vivian} =32)	18
Abb. 1-13 Prozentualer C-Verlust auf den untersuchten Windwurf-Flächen des Mittellandes und der Voralpen in Bezug zur jeweiligen Kontrollfläche.....	19
Abb. 3-14 Modellvorstellung der Sturmauswirkungen auf die C-Bilanz des Bodens	20
Abb. 3-15 C-Verlust aus der oberirdischen Biomasse und des Bodens nach den beiden Sturmereignissen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n _{Lothar} =112, n _{Vivian} =32).....	21

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1 Resultate aus Untersuchungen zur Covington-Beziehung (gem. Spielvogel, 2006)...	2
Tab. 2-1 Eigenschaften der untersuchten Windwurf-Flächen.....	4
Tab. 3-1 C/N-Verhältnis der einzelnen Auflagehorizonte der Lotharflächen.....	10
Tab. 3-2 Durchschnittlicher C _{org} -Gehalt in den einzelnen Horizonten der Lotharflächen.....	12
Tab. 3-3 C/N-Verhältnis der einzelnen Auflagehorizonte der Vivianflächen	15
Tab. 3-4 Durchschnittlicher C _{org} -Gehalt in den einzelnen Horizonten der Vivian- und Lotharflächen	17
Tab. 3-5 Durchschnittlicher C-Gehalt [kg m ⁻²] auf den einzelnen Höhenstufen	19
Tab. 3-6 Quellenleistung zukünftiger Sturmereignisse im Schweizer Wald	22

Zusammenfassung

Sturmereignisse können in Wäldern grossflächige Schäden verursachen. Dadurch verändert sich sowohl der Streueintrag in den Boden als auch der Abbau organischen Materials, was sich auf die Kohlenstoffspeicherung im Boden auswirkt.

Auf 14 Flächen des Sturms Lothar (1999) im Schweizer Mittelland und auf fünf Flächen des Sturms Vivian (1990) in den Schweizer Voralpen wurden die Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage und den ersten 10 cm des Mineralbodens von Sturmflächen und benachbarten Kontrollflächen erfasst. Auf den Vivianflächen konnte zudem untersucht werden, wie sich drei Bewirtschaftungsmassnahmen (bepflanzt, belassen, geräumt) auf die Kohlenstoffspeicherung auswirken.

Beide Sturmereignisse führten zu einem Verlust von Kohlenstoff aus Waldböden, welche dadurch zu einer CO₂-Quelle wurden. Von dieser Veränderung waren vor allem die organischen Auflagen betroffen, während die Mineralböden kaum beeinflusst waren. Die relative und absolute Kohlenstofffreisetzung fiel dort stark ins Gewicht, wo die Böden mächtige Auflagehorizonte wie im Alpenraum hatten. So gingen aus den Böden der Nadelwälder in den Voralpen seit dem Viviansturm rund 25 tC/ha verloren. Im Mittelland mit gering mächtigeren Auflagehorizonten fiel die Kohlenstofffreisetzung nach dem Lotharsturm mit rund 4 tC/ha deutlich niedriger aus. Wird die CO₂-Quellenwirkung des Bodens mit der Eintrittswahrscheinlichkeit von Sturmereignissen abgeschätzt, so ergibt sich ein jährlicher schweizweiter Verlust von rund 21.5 ktC. Dies vermag die prognostizierte Netto-Senkenleistung des Waldes (2008-2012) von 80-190 kt C um 11-27% zu verringern.

Im Vergleich zu diesen Verlusten hatte die Bewirtschaftung der Flächen nach Windwurf nur geringe Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicherung in den Böden. Aufforstungsmassnahmen verringerten den C-Verlust gegenüber geräumten Flächen um 12%, während der Einfluss belassenen Totholzes vernachlässigbar war.

1 Hintergrund

Organische Substanz in Waldböden ist ein wichtiger Bestandteil des Nährstoff- und Kohlenstoffkreislaufs des Waldes. Weltweit ist in Böden mehr Kohlenstoff gespeichert als in jedem anderen terrestrischen C-Pool. Dabei spielt die organische Auflage die dynamischste Rolle (Yanai et al., 2003). Dies zeigt sich in der durchschnittlich hohen Umsetzungszeit (5 Jahre), welche sehr temperatur- und feuchtigkeitssensitiv reagiert.

Der C-Pool des Bodens ist ein Produkt des Streueintrags und des Abbaus der organischen Bodensubstanz, der von dessen Qualität sowie biotischen und abiotischen Faktoren abhängt. Störungen wie Sturmereignisse verändern alle diese Komponenten. Über das fehlende Kronendach wird der Streuinput verringert. Die neu nachwachsende Vegetation liefert qualitativ andere Streu in den C-Pool der Auflage (Spielvogel et al., 2006). Gleichzeitig verändern sich die mikroklimatischen Bedingungen, welche den Streuabbau beeinflussen. Zusammen mit der Störung durch das Entwurzeln der Bäume können diese Effekte schlussendlich zu einer Veränderung des C-Pools im Boden führen.

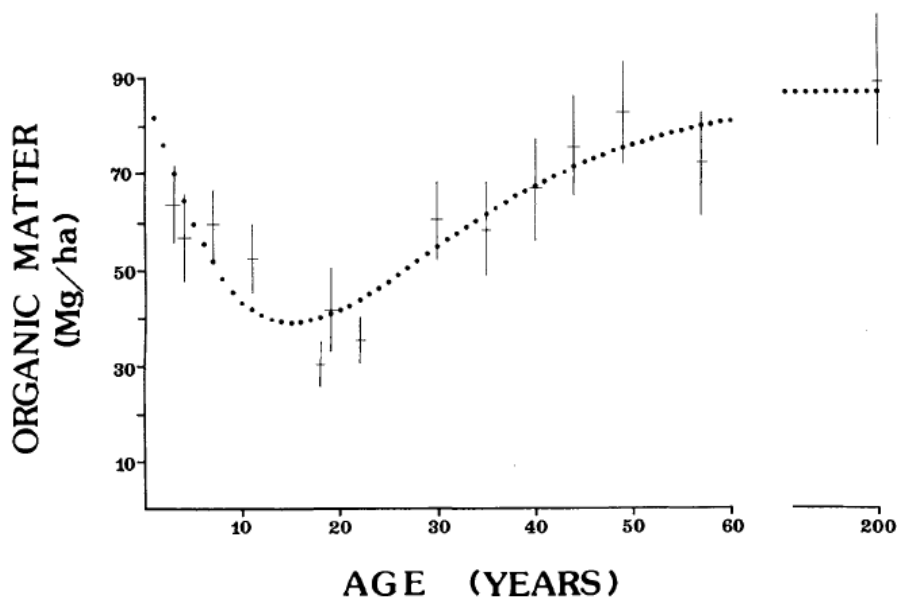


Abb. 1-1 Veränderung des organischen Materials nach Störereignissen (Covington, 1981)

1.1 Veränderung der C-Pools nach Störungen – eine Kontroverse

Forschungsarbeiten zu Störungseinflüssen auf die C-Pools des Bodens sind stark geprägt durch die Arbeit von Covington (1981). Diese zeigte, dass die C-Pools der organischen Auflage nach einem Störereignis (Kahlschlag) während rund 20 Jahren bis auf ein Minimum von 50% des Ursprungswertes abnahmen (Abb. 1-1). Diese Reduktion im C-Gehalt

begründete er mit der gesteigerten Abbaurate durch erhöhte Temperatur und Feuchtigkeitsgehalte sowie durch einen verringerten Streuinput aufgrund des fehlenden Kronendachs. Auf die Minimalwerte im C-Gehalt folgt jeweils eine 50-200 jährige Phase der C-Zunahme bis zu einem erneuten Steady-State-Level. Dieses kann je nach Bewirtschaftungsart tiefer oder höher als der Pre-Effect-Level liegen (IPCC, 2001).

Der Störungseffekt nach Covington wurde in den darauf folgenden Jahren von verschiedenen Autoren mit unterschiedlichen Resultaten überprüft (Tab. 1-1).

Tab. 1-1 Resultate aus Untersuchungen zur Covington-Beziehung (Spielvogel, 2006)

Autoren	Vergleichbarer Rückgang im C-Gehalt	Kleinere Rückgang im C-Gehalt	Keine Veränderung	Zunahme
Mattson & Smith, 1993	x			
Brais et al., 1995	x			
Federer, 1984		x		
Mroz et al., 1985		x		
Johnson et al., 1995		x		
Huntington & Ryan, 1990			X	
Johnson & Todd, 1998			X	
Johnson et al., 1985				x
Mattson & Swank, 1989				x
Hendrickson et al., 1989				x

Die Veränderung der C-Pools durch Störungen wird in der Literatur zurzeit immer noch kontrovers diskutiert. Es hat sich gezeigt, dass eine grossräumige Anwendung der Covington-Beziehung auf ganze Ökosysteme ungenau ist (Yanai et al., 2003). Zudem gibt es bezüglich der Prozesse nach Störungen immer noch Unklarheiten (Kramer, 2004):

- Überwiegt nach Sturmereignissen der erhöhte Abbau organischer Substanz aufgrund der Temperaturerhöhung oder wird der Abbau durch ein Austrocknen des Bodens verlangsamt?
- Nimmt der Feuchtigkeitsgehalt in der organischen Auflage durch die verringerte Interzeption des fehlenden Blätterdaches zu oder überwiegt die Austrocknung?
- Findet durch die Entwurzelung von Bäumen eine Durchmischung der organischen Auflage mit dem mineralischen Horizont statt? Überwiegt dabei die Verlagerung des Kohlenstoffs gegenüber dem Abbau?
- Wird durch eine allfällige Verlagerung mehr Kohlenstoff für den schnellen Abbau freigelegt?
- Stört ein Windwurf die natürliche Lagerung des Bodens und kurbelt er den mikrobiellen C-Abbau an?
- Was ist der Langzeiteffekt von liegen gebliebenem Sturmholz (Johnson, 2001)?

1.2 Fragestellung

Werden Schweizer Waldböden nach Sturmereignissen zu einer Kohlenstoffquelle?

Wenn ja,

- Wie viel Kohlenstoff ging seit den Sturmereignissen „Lothar“ und „Vivian“ verloren?
- Wie stark wurde und wird die Kohlenstoff-Senke im Schweizer Wald dadurch beeinflusst?
- Wo wirken sich Windwürfe am stärksten aus?
- Haben Bewirtschaftungsmassnahmen nach einem Windwurf wie Aufforstung oder Räumung einen Einfluss auf die C-Bilanz von Waldböden?

2 Methodik

Der methodische Ansatz basierte auf dem Vergleich des C-Vorrats des Bodens auf Windwurf- und vergleichbaren Kontrollflächen. Da nachweisbare Veränderungen in erster Linie im Oberboden zu erwarten waren, wurden die C-Vorräte in der organischen Auflage und in den obersten 10 cm des Mineralbodens gemessen. Bodenproben wurden von Schadensflächen der Stürme Lothar (1999) und Vivian (1990) genommen.

2.1 Standorte

A) Lothar

Insgesamt wurden 14 Lothar-Flächen beprobt, welche aus der Datenbank der Forschungseinheit „Walddynamik“ der WSL ausgewählt wurden (Abb. 2-1). Bewusst wurden nur Flächen untersucht, welche nicht bewirtschaftet werden, da dies die Situation nach zukünftigen Windwurfereignissen am besten widerspiegelt, welche voraussichtlich vermehrt in (vor)alpinen, gering bewirtschafteten Regionen auftreten werden. Das Totholz blieb auf diesen Flächen liegen und baute sich dadurch natürlicherweise ab und um. Zudem wurde die Bodenstruktur nicht durch Räumungsarbeiten gestört. Das gesamte System wird somit natürlichen Prozessen überlassen.

Der Sturm Lothar schädigte vor allem das Schweizer Mittelland (Abb. 2-1). Die Probestandorte repräsentierten diese Verteilung insofern, als rund 70% unterhalb einer Höhe von 600 m.ü.M., grösstenteils im Laubwald- und Mischwald und in saurem Milieu (pH<4) liegen (Tab. 2-1). Vier Standorte befinden sich in der voralpinen Region mit vorwiegend Nadel- und Mischwäldern. Je ein Standort des Mittellands und der Voralpen liegen auf basischem Bodensubstrat.

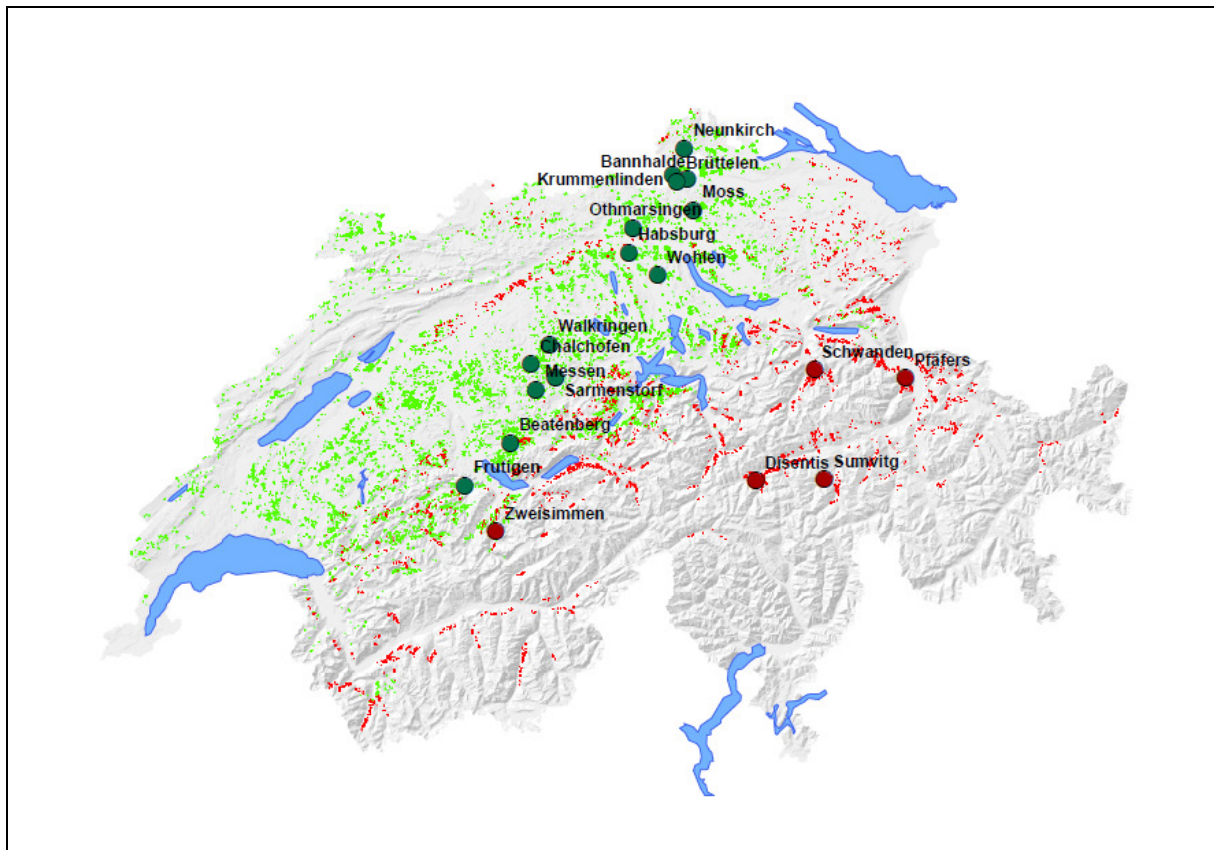


Abb. 2-1: Verbreitung der untersuchten Windwurfflächen (grüne Kreissymbole: Lothar, rote Kreissymbole: Vivian) innerhalb der Schadengebiete (grüne Flächen: Lothar, rote Flächen: Vivian)

Tab. 2-1 Eigenschaften der untersuchten Windwurf-Flächen

Lothar	Koordinaten	Höhenklasse [m.ü.M]			pH			Waldform		
		0-600	600-1200	>1200	<4	4-6	>6	Nadelwald	Mischwald	Laubwald
Habsburg	657650 / 258000	X			X				X	
Wohlen	664780 / 245800	X			X				X	
Sarmenstorf	661750 / 241180	X				X				X
Messen	601750 / 215350	X			X				X	
Frutigen	617000 / 154500		X				X		X	
Walkringen	615550 / 200800		X		X				X	
Chalchofen	623300 / 164700		X			X			X	
Beatenberg	624757 / 172177			X	X			X		
Othmarsingen	659550 / 250100	X				X			X	
Neunkirch	682450 / 282150	X					X		X	
Moos	676500 / 245700	X			X					X
Brüttelen	577050 / 207600	X			X					X
Bannhalde	681550 / 264300	X				X				X
Krummenlinden	667500 / 267800	X			X					X
Vivian										
Schwanden	725800 / 204600		1000		X				X	
Disentis	707000 / 170600			1500	X			X		

Pfäfers	756700 / 203000			1450		X		X		
Zweisimmen	597000 / 158300			1550		X		X		
Sumvitg	716000 / 173000			1230				X		

B) Vivian

Fünf Schadenflächen des Vivian wurden untersucht. Die Standorte entsprachen denjenigen von Lüscher (2002), der 1993 und 2002 schon die organische Auflage beschrieb. Zudem wurden an den Standorten Pfäfers, Schwanden und Disentis jeweils Teile einer beschädigten Waldfläche unterschiedlich bewirtschaftet worden:

- bepflanzt: Holzernte, Pflanzung
- geräumt: Holzernte, Naturverjüngung
- belassen: keine Holzernte, Naturverjüngung

In Zweisimmen existiert lediglich die belassene Fläche. Von der belassenen Fläche in Sumvitg sind Werte aus der Studie von Moeri (2007) verfügbar.

2.2 Beprobungsstrategie

An jedem Standort wurden je 8 Proben auf der Windwurf- bzw. der benachbarten Kontrollfläche genommen. Mit Angaben zu Exposition, Geländeform und zum Flächenanteil des liegenden Sturmholzes wurde die Sturmfläche charakterisiert. Die 8 Wiederholungen sollten diese Standortseigenschaften möglichst genau zu widerspiegeln.

Die Wahl der Kontrollfläche erfolgte aufgrund folgender Prioritätenliste:

1. gleicher Bewuchs
2. gleiche Exposition
3. ähnliche Topographie
4. gleiche Höhenlage

2.3 Entnahme und Aufbereitung der Bodenproben

Um die C-Vorräte pro Flächeneinheit zu bestimmen, wurden der Boden volumenproportional beprobt. Die Proben der organischen Auflage wurden aus einer mit einem Stahlrahmen begrenzten Fläche von 20 cm x 20 cm entnommen (Abb. 2-2). Über das gemessene Gewicht konnte so auf den C-Vorrat pro Fläche geschlossen werden. Die ersten 10 cm des mineralischen Horizonts wurden mit Burgerzylindern (1000 cm³) beprobt.

Nach der Entnahme wurden die Proben während 48 h bei 60°C im Ofen getrocknet. Mit einem 2 mm-Rüttelsieb wurde die Feinerde von Wurzeln und Skelett getrennt. Eine

Zerkleinerung mit dem Mörser gewährleistete eine möglichst gute Homogenisierung der einzelnen Auflagehorizonte. Danach wurden die Proben mittels einer Zentrifugalmühle (Retsch ZM 200) gemahlen und anschliessend im Labor deren Kohlen- und Stickstoffgehalte (NC 2500, Carlo Erba Instruments) gemessen.



Abb. 2-2:
Material zur
Entnahme der
volumen-
proportionalen
Bodenproben

Bei Mineralbodenproben mit einem pH-Wert über 6 wurde der organische C-Gehalt nach Zerstörung des anorganischen C bestimmt. Mittels HCl-Ansäuerung wurde der anorganische Kohlenstoff herausgelöst und anschliessend der Gehalt des organischen Kohlenstoffs bestimmt (Walthert, 2009).

2.4 Berechnungen und Statistik

Die Berechnung der Kohlenstoffvorräte erfolgte folgendermassen:

$$C = \sum_{i=0}^n C\% * M$$

wobei: C : organischer Kohlenstoffvorrat [kg/m^2], n : Anzahl Horizonte, $C\%$: Kohlenstoffgehalt der Probe [%], M : Trockengewicht des Streumaterials bzw. der Feinerde pro Fläche [kg/m^2].

Die Berechnung der Kohlenstoffpools erfolgte also über die Masse pro Flächeneinheit.

Die Auswirkungen von Sturmereignissen auf den Bodenkohlenstoff wurden durch den Vergleich der Mittelwerte auf den Windwurf- bzw. den Kontrollflächen untersucht. Für die Entscheidung der jeweiligen Testverfahren wurden die Daten zuerst mittels eines *Shapiro-Wilk Normality Test* auf ihre Verteilung hin untersucht. Die Mittelwert-Vergleiche erfolgten anschliessend mit der Software *R 2.8.0* (R Development Core Team, 2007) mit einem *Student's t-Test* für normalverteilte bzw. dem *Wilcoxon Rank Sum and Signed Rank Tests* für nicht normalverteilte Werte. Der Gesamteffekt wurde im Vergleich der Mittelwerte aus der Gesamtheit der Messungen getestet.

3 Resultate

3.1 Lothar

3.1.1 Humustyp und Mächtigkeit auf den Lotharflächen

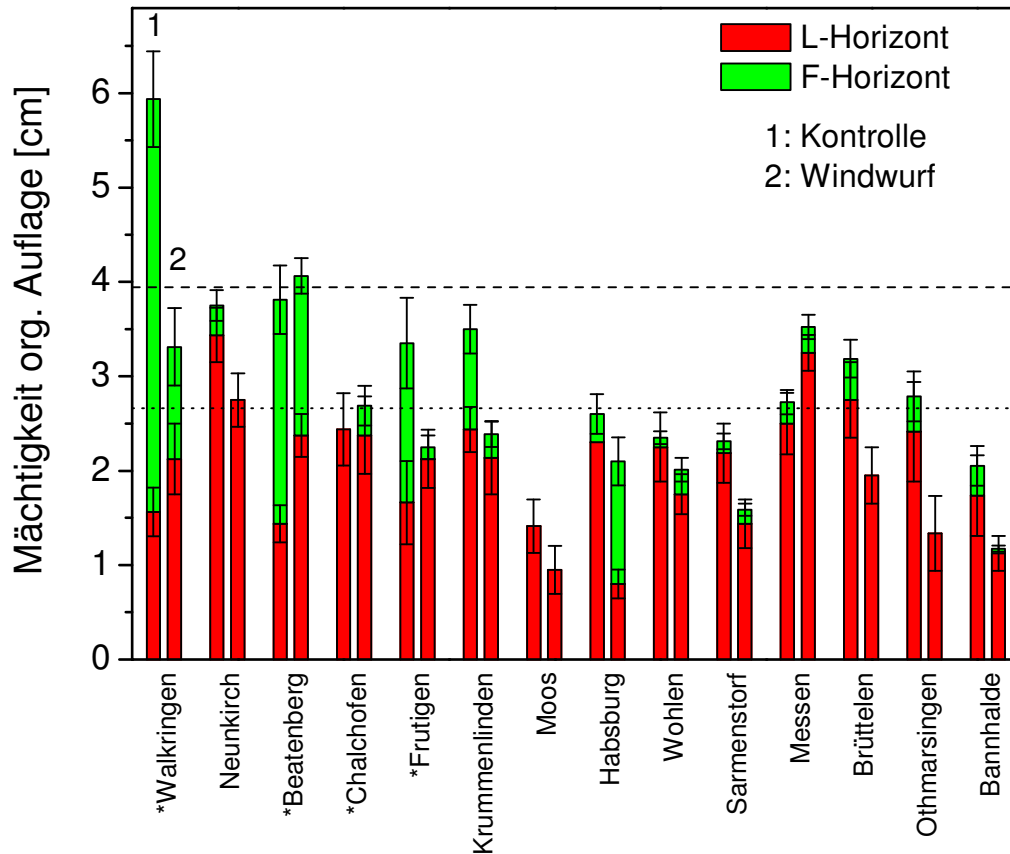


Abb. 3-1 Mächtigkeiten der Horizonte der organischen Auflagen (Mittelwerte \pm Standardfehler, $n=8$). Links Kontrollen, rechts Windwurf. Mit * gekennzeichnete Standorte liegen über 600m.ü.M. Gestrichelte Linie: Mittelwerte für Schweizer Mittelland 600-1200m.ü.M.; Punktierte Linie: Schweizer Mittelland unter 600m.ü.M.

Die organischen Auflagen der Lotharflächen waren Mull und Moder (Abb. 3-1), was typisch für das Schweizer Mittellandes ist (Moeri, 2007). Rohhumusformen waren auf den Lotharflächen gegenüber dem Mittelland etwas unterrepräsentiert. H-Horizonte waren selten vorzufinden und wenn, dann so geringmächtig, dass sie in dieser Untersuchung nicht separat, sondern mit der Mineralerde beprobt wurden. Im gesamten Durchschnitt lag die Mächtigkeit der organischen Auflage etwas unterhalb des Mittelwerts aus der Erhebung von Moeri (2007) (2.7 cm; Abb. 3-1).

3.1.2 Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage

Die C-Vorräte der organischen Auflage der Lotharstandorte lagen bei den Kontrollflächen zwischen 0.29 - 2.7 kg C/m² (Abb. 3-2). Im Mittel lagen die C-Vorräte der Kontroll-Standorte mit 0.71 kg C/m² rund 20% unter dem Durchschnitt des Schweizer Mittellandes (Moeri, 2007). Ein Vergleich mit dem gesamt schweizerischen Durchschnitt zeigt aber, dass auf den Lotharflächen des Mittellandes geringere Mengen an Kohlenstoff gespeichert waren.

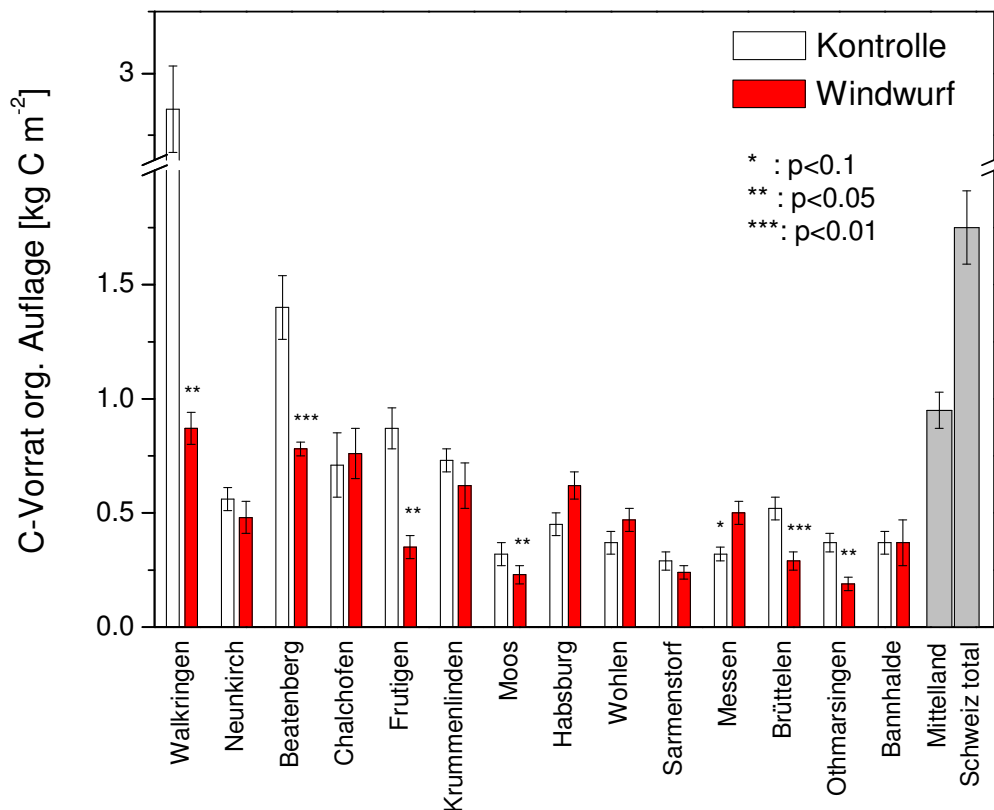


Abb. 3-2 C-Vorräte der organischen Auflagen auf den Lothar-Flächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n=8) im Vergleich zu den Mittelwerten des Mittellandes und der Schweiz (grau) aus der Studie von Moeri, 2007 (grau) (Mittelwerte \pm Standardfehler)

3.1.3 Auswirkungen des Windwurfs auf die Kohlenstoffspeicherung

Organische Auflage

Die Auswirkung des Sturmereignisses auf die Kohlenstoffspeicherung in der organischen Auflage variierte zwischen den Standorten. Während teilweise mehr als zwei Drittel des Kohlenstoffs (bis 1.8 kg C/m² im Vergleich zur Kontrolle) aus der organischen Auflage verloren gingen, gab es Standorte auf denen Windwurf keinen Einfluss hatte, oder sogar zu kleineren aber nicht signifikanten Zunahmen führte (bis 0.18 kg C/m² in Abb. 3-2).

Im Durchschnitt waren 10 Jahre nach Lothar rund 0.23 kg C/m^2 aus den organischen Auflagen der Sturmflächen verloren gegangen (Abb. 3-3). Dies entspricht einem Verlust von einem Drittel des in der Auflage gespeicherten Kohlenstoffs.

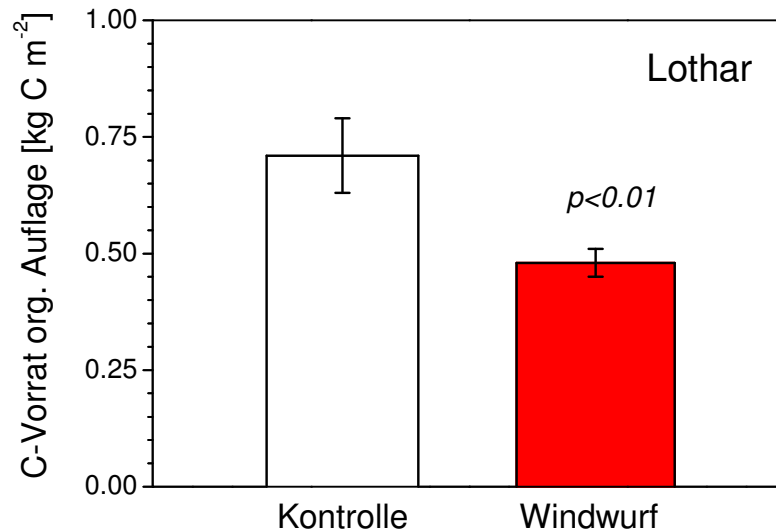


Abb. 3-3 Mittlerer C-Vorrat der organischen Auflagen auf den Lotharflächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, $n=14$ Standorte mit je 8 Wiederholungen)

Der C-Verlust aus der organischen Auflage war vor allem auf einen Rückgang des F-Horizonts zurückzuführen (Abb. 3-4). Die Streuauflage wies auf den Windwurfflächen die gleichen Vorräte wie auf den Kontrollflächen auf, hatte aber deutlich engere C/N-Verhältnisse. Dies deutet auf einen höheren Anteil von leichter abbaubarer Streu der sich neu entwickelnden Vegetation auf den Windwurfflächen hin (Tab. 3-1; Spielvogel, 2006). Für die Ausbildung eines F-Horizontes aus der neuen Streu war der Zeitraum seit Lothar wahrscheinlich zu kurz und die eingetragene Streumenge zu gering.

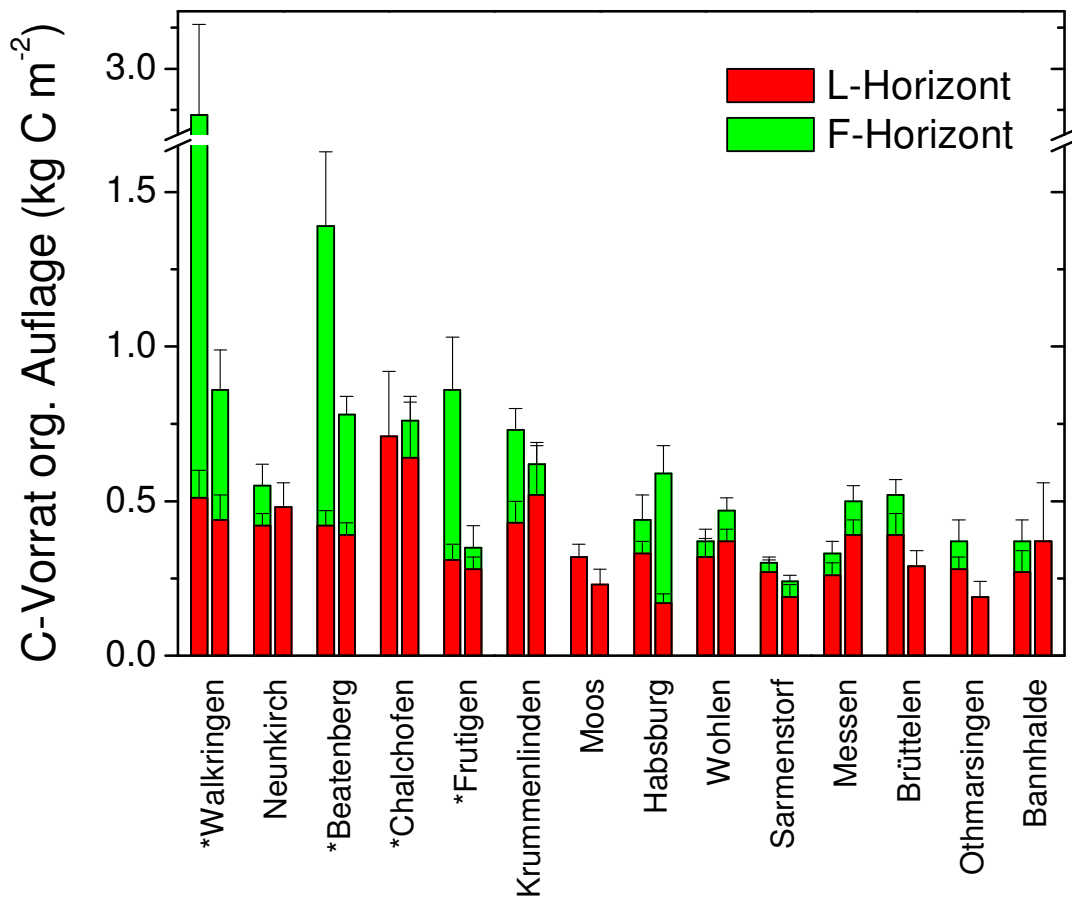


Abb. 3-4 Anteile der einzelnen Unterhorizonten an den C-Vorräten der organischen Auflagen (Mittelwerte ± Standardfehler, n=8). Links Kontrolle, rechts Windwurf.

Tab. 3-1 C/N-Verhältnis (Mittelwert und Standardfehler) der einzelnen Auflagehorizonte (L,F) und Mineralerde (0-10 cm) der Lotharflächen

	L		Kontrolle		F		Kontrolle		0-10 cm		Kontrolle	
	C/N	StF	C/N	StF	C/N	StF	C/N	StF	C/N	StF	C/N	StF
Walkringen	29.5	1.8	34.9	1.3	23.3	0.8	28.3	1.3	19.0	0.5	19.7	0.6
Neunkirch	32.2	1.3	35.5	1.7			27.2		15.3	0.2	16.5	0.3
Krummenlinden	29.3	1.1	31.8	1.9	25.0	1.0	26.3	0.8	20.5	0.6	21.8	0.6
Beatenberg	34.7	1.7	42.8	1.4	30.5	1.1	28.4	0.6	29.4	0.8	28.0	0.9
Chalchofen	37.8	3.2	33.5	1.8	29.6	0.7			21.5	1.3	16.9	0.7
Habsburg	43.4	4.3	32.2	1.3	31.9	1.6	31.0	2.3	17.1	0.6	17.9	0.9
Wohlen	26.3	1.7	29.0	1.4	22.5	0.6	29.7	2.8	16.2	0.3	14.3	0.4
Sarmenstorf	25.7	1.0	29.9	0.6	22.8	0.9	28.0	5.3	17.2	0.2	13.8	0.4
Messen	30.3	2.2	31.5	1.1	24.8	2.2	24.5	1.3	17.5	0.6	15.5	0.5
Bannhalde	33.9	2.4	32.0	1.3			32.4	3.1	15.0	0.5	15.8	0.6
Frutigen	27.3	1.5	34.3	1.7	19.0		24.9	1.4	14.6	0.5	16.5	0.4
Brüttelen	28.4	1.6	33.3	1.2			26.7		16.1	0.3	16.4	0.7
Othmarsingen	34.2	1.9	31.5	0.9			26.2	0.9	15.5	0.5	14.3	1.2
Moos	28.9	2.3	35.0	1.9					15.2	0.3	14.9	0.7

Mineralböden

Der obere Bereich des Mineralbodens (0-10 cm) enthielt deutlich mehr C als die organische Auflage. Der relativen Auswirkungen des Sturms Lothar waren deshalb deutlich schwächer. Zehn Jahre nach Lothar betrug der Verlust im Mittel 0.2 kg C/m² (Abb. 3-5), absolut also etwa gleich viel wie der Abbau in der organischen Auflage (Abb. 3-4). Relativ gesehen entsprach dies aber nur rund 5% des in diesem Bereich gespeicherten Kohlenstoffs. Der Abbau war statistisch nicht signifikant.

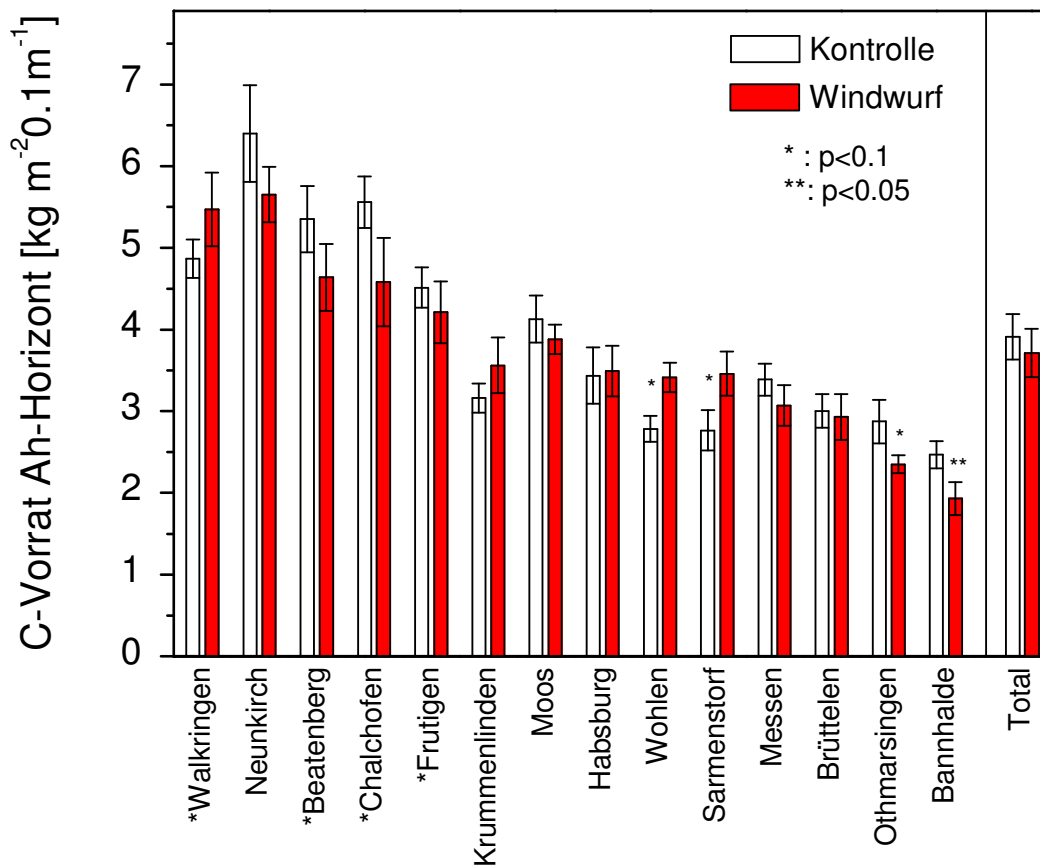


Abb. 3-5 C-Vorräte der oberen Mineralböden (0-10cm) auf den Lotharflächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n= 8 Wiederholungen)

3.1.4 Gesamteffekt auf die Kohlenstoffspeicherung auf den Lotharflächen

Zehn Jahre nach Lothar sind über die gemessene Bodentiefe (org. Auflage sowie Oberboden bis -10cm) rund 0.43 kg C/m² verloren gegangen (Abb. 3-6). Dieser Verlust entspricht rund 9% des bis in diese Tiefe gespeicherten organischen Kohlenstoffs. Der verloren gegangene Kohlenstoff stammt dabei zu etwa gleichen Teilen aus der organischen Auflage und der Mineralerde.

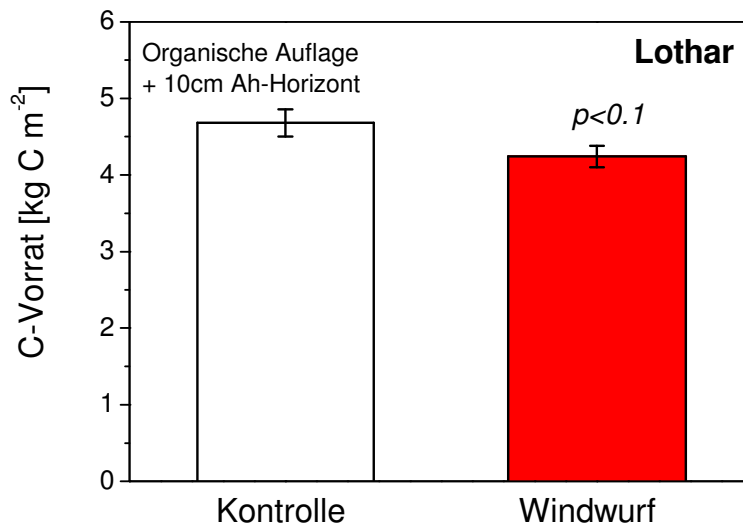


Abb. 3-6 Mittlerer C-Vorrat der organischen Auflagen und der obersten 10 cm der Oberböden auf den Lotharflächen (Mittelwerte ± Standardfehler, n=14 Standorte à 8 Wiederholungen)

Tab. 3-2 Durchschnittlicher C-Vorrat in den Auflagen und in den obersten Mineralböden der Lotharflächen

		Kontrolle	Windwurf	Moeri, 2007
Lothar (=Mittelland)	org. Auflage	0.71±0.08	0.48±0.06	0.84±0.03
	Ah-Horizont	3.96±0.28	3.76±0.30	
	Gesamt	4.67±0.44	4.24±0.33	

3.2 Vivian

3.2.1 Humustyp und Mächtigkeit auf den Vivianflächen

Die Vivianstandorte wiesen weit mächtigere organische Auflagen auf als diejenigen der Lotharflächen, was typisch für voralpine Regionen ist (Moeri, 2007). Dazu trugen vor allem die ausgeprägten F-Horizonte bei. Gegenüber dem Mittelwert in den Voralpen aus der Erhebung von Moeri (2007) war die gesamten Auflagen aber deutlich geringmächtiger, da auf den untersuchten Flächen keine H-Horizonte vorgefunden wurden (Abb. 3-7). Es handelte sich darum in den meisten Fällen um Moderformen.

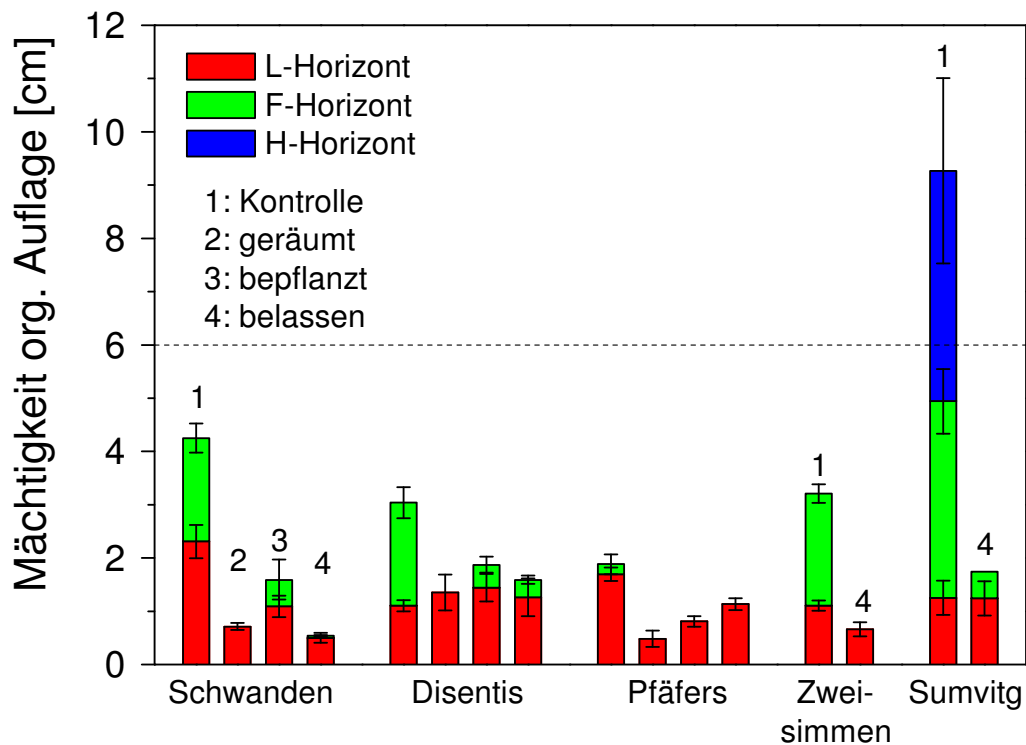


Abb. 3-7 Mächtigkeiten der Horizonte der organischen Auflagen (Mittelwerte \pm Standardfehler, $n=8$). Horizontale Linie zeigt den Mittelwert in den Schweizer Voralpen (1200-1800m) gemäss Moeri (2007) an.

3.2.2 Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage

Ein Vergleich mit dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt in der organischen Auflage (vor)alpiner Böden aus der Erhebung von Moeri (2007) zeigt, dass die Kontrollflächen die mittlere C-Speicherung der Voralpen widerspiegeln (Abb. 3-8). Im Durchschnitt waren in der organischen Auflage der Kontrollflächen rund 2.3 kgC/m^2 gespeichert. Verglichen mit den Kontrollflächen des Mittellandes ($0.71 \pm 0.08 \text{ kgC/m}^2$) lag in der organischen Auflage der voralpinen Flächen rund dreimal mehr Kohlenstoff vor.

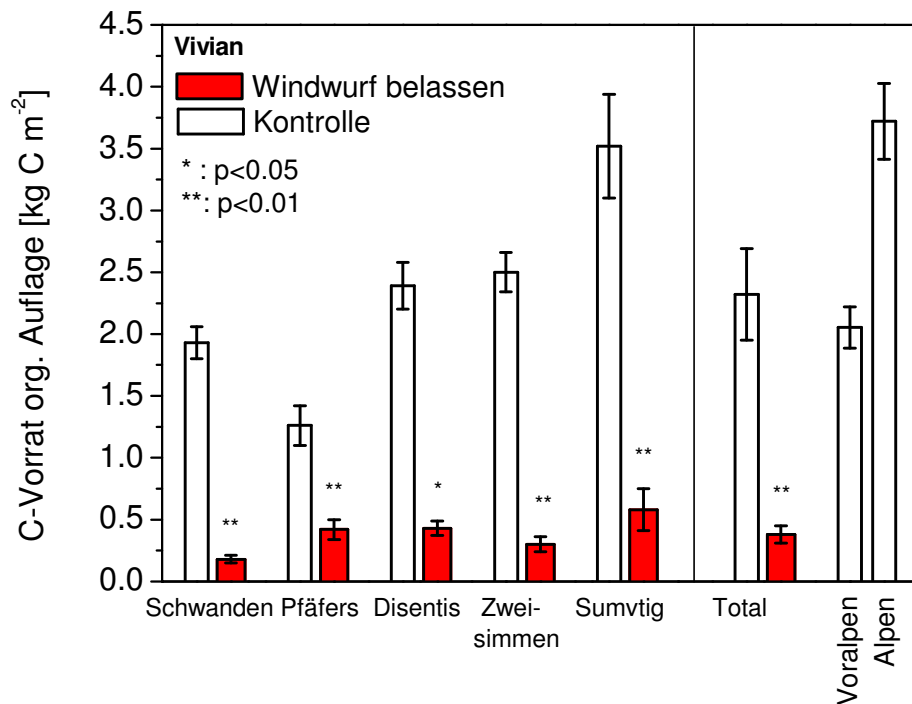


Abb. 3-8 C-Vorräte der organischen Auflagen auf den Vivian-Flächen (Mittelwerte, \pm Standardfehler, $n=8$) sowie die durchschnittlichen Vorräte in den Schweizer Voralpen und Alpen gemäss Moeri (2007)

3.2.3 Auswirkungen des Windwurfs auf die Kohlenstoffspeicherung

Organische Auflage

Zwanzig Jahre nach Vivian waren auf den betroffenen Flächen in der organischen Auflage rund 2 kg C/m^2 weniger gebunden als auf den Kontrollflächen. Dies entsprach einem Verlust von 83% (Abb. 3-8). Der Verlust war verglichen mit den Lotharflächen rund 9 mal grösser (Tab. 3-4). Allerdings war auch hier die Variabilität zwischen den einzelnen Untersuchungsflächen sehr gross. Der Verlust schwankte zwischen 0.84 und 2.94 kg C/m^2 .

Die Bewirtschaftung der Flächen nach Windwurf wirkte sich nur schwach aber signifikant auf den C-Pool der organischen Auflage aus. Der C-Verlust war 20 Jahre nach dem Sturmereignis auf den aufgeforsteten Flächen um rund 12% kleiner als auf den geräumten Flächen, was rund 0.2 kg C/m^2 entsprach ($p<0.05$). Gegenüber den belassenen Flächen war der Verlust um 6% ($p=0.2$) kleiner (Abb. 3-9). Auf den untersuchten Flächen stieg der C-Pool durch liegen gelassenes Sturmholz verglichen mit den geräumten Flächen um rund 44% ($p=0.19$), was aber den Verlust gegenüber den Kontrollflächen nur um 6% verringerte.

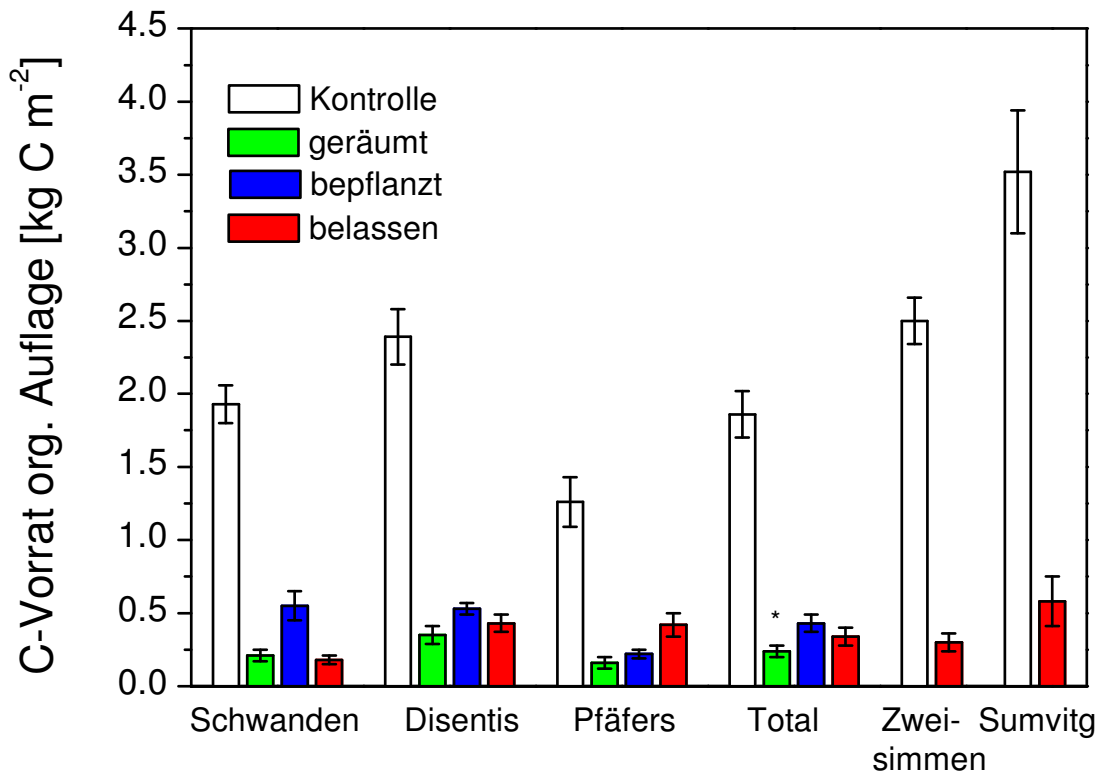


Abb. 3-9 Einfluss der Bewirtschaftung auf die C-Vorräte der organischen Auflage der Vivian-Flächen (Mittelwerte ± Standardfehler, n=8). * $p < 0.05$ im Vergleich zu bepflanzt, alle anderen Behandlungen $p < 0.1$.

Tab. 3-3 C/N-Verhältnis der Auflagehorizonte der Vivianflächen bei unterschiedlicher Bewirtschaftungsform.

		Schwanden		Disentis		Pfäfers		Zweisimmen	
		C/N	StF	C/N	StF	C/N	StF	C/N	StF
L	Kontrolle	37.3	2.2	40.9	2.0	43.8	3.3	42.1	1.4
	geräumt	33.2	2.2	34.2	4.6	40.9	4.3		
	bepflanzt	29.6	2.7	33.2	4.0	32.7	1.8		
	belassen	36.8	4.9	29.7	2.2	47.1	5.3	39.7	1.7
E	Kontrolle	27.2	0.5	27.4	1.0	27.3		30.9	0.7
	geräumt								
	bepflanzt	20.0	1.6	21.9	1.4				
	belassen	24.6		24.6	2.9				
Ah	Kontrolle	15.8	0.9	16.2	0.8	15.2	0.7	19.4	1.2
	geräumt	15.0	0.4	15.6	0.5	13.6	0.3		
	bepflanzt	14.2	0.4	18.8	0.6	13.9	0.4		
	belassen	13.3	0.3	15.0	0.4	14.6	0.6	19.8	1.2

Die Mächtigkeit des F-Horizontes trug auch nach 20 Jahren am wesentlichsten zum Unterschied im C-Vorrat der organischen Auflage bei (3-7). Die tieferen C/N-Verhältnisse der Windwurf-Flächen lassen vermuten, dass auf den Sturmflächen ein erhöhter Abbau stattfand (Tab. 3-3). Zusätzlich könnte auch der verminderte Streueintrag zur Abnahme der Auflage beigetragen haben.

Mineralboden

Zwanzig Jahre nach Vivian zeigte sich ein ähnliches Bild wie auf den Lotharflächen. Der mittlere Verlust aus dem oberen 10 cm des Mineralbodens war sehr gering und betrug nur 0.57 kg C/m^2 (13%), was auch hier statistisch nicht signifikant ist (Abb. 3-10). Die C/N-Werte zeigen keinen signifikanten Unterschied (Tab. 3-3), was die Annahme unterstützt, dass die Abbauraten durch die Sturmereignisse nicht bis in den oberen Teil der Mineralerde verändert wurden.

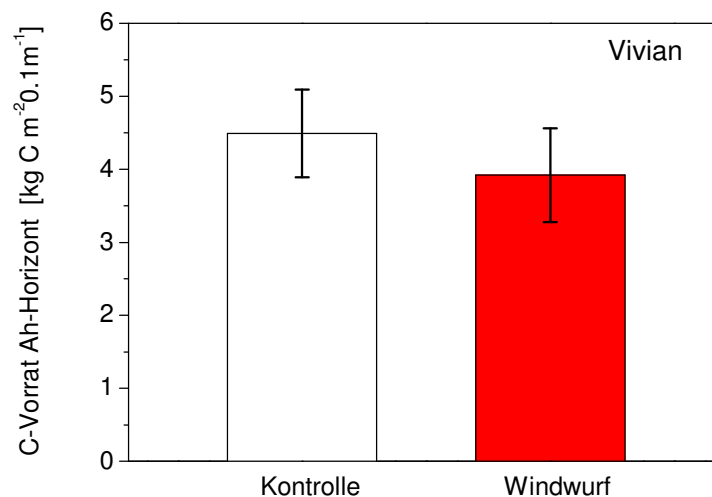


Abb. 3-10 Mittlerer C-Vorrat des oberen Mineralbodens (0-10cm) auf den Vivianflächen (Mittelwerte \pm Standardfehler, n= 5 Standorte à 8 Wiederholungen)

Bewirtschaftungsmassnahmen und Umschichtungen bei der Entwurzelung von Bäumen können organisches Material aus der Auflage in den Mineralboden verlagern. Dies würde sich an erhöhten C/N-Werten im Mineralboden widerspiegeln, da Streu und organische Auflagen weitere C/N-Verhältnisse haben als der Mineralboden (Tab. 3-3). Allerdings wiesen diese eher etwas niedrigere Werte als die der Kontrollfläche auf, was die Verlagerung und Einbau von organischer Substanz aus der Auflage ausschliessen lässt. Somit bestätigt sich die Annahme, dass erhöhte Abbauraten und nicht eine Verlagerung in den Mineralboden den C-Verlust in der organischen Auflage verursachten. Sowohl Aufforstungen als auch

Räumungsarbeiten beeinflussten den C-Gehalt im oberen Teil des Mineralbodens nicht (Daten nicht gezeigt).

3.2.4 Gesamteffekt auf die Kohlenstoffspeicherung auf den Vivian-Flächen

Zwanzig Jahre nach Vivian wiesen die Windwurfflächen bis in 10 cm Tiefe rund 2.5kg C/m² weniger C auf als die Kontrollflächen. Dies entspricht einem Verlust von rund einem Drittel der gesamthaft gespeicherten Menge (Abb. 3-11, Tab.3-4). Rund 80% dieses Verlustes erfolgte aus der organischen Auflage.

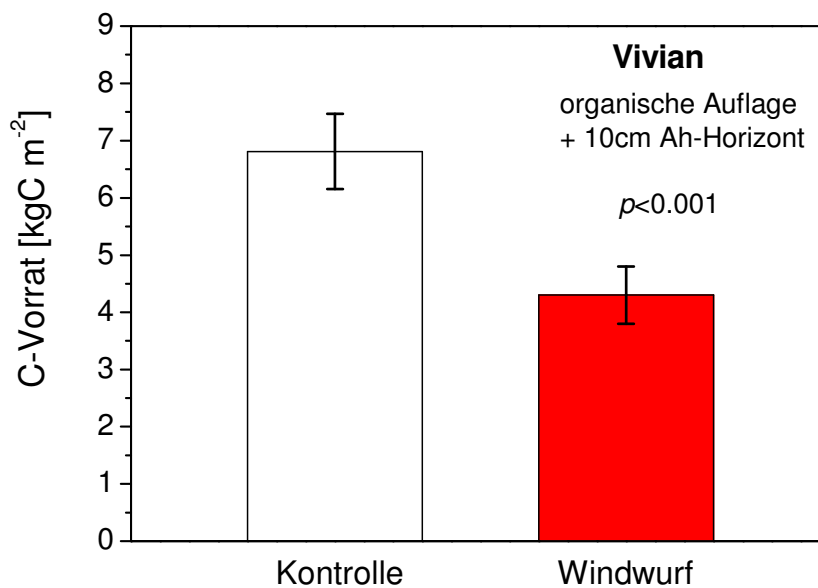


Abb. 3-11 Mittlerer C-Vorrat der organischen Auflagen und der obersten 10 cm des Oberbodens auf den Vivianflächen (Mittelwerte ± Standardfehler, n=5 Standorte à 8 Messungen)

Tab. 3-4 Durchschnittlicher C-Vorrat in den einzelnen Horizonten der Vivian- und Lotharflächen

		Kontrolle	Windwurf	Moeri, 2007
Lothar (=Mittelland)	org. Auflage	0.71±0.08	0.48±0.06	0.84±0.03
	Ah-Horizont	3.96±0.28	3.76±0.30	
	Gesamt	4.67±0.44	4.24±0.33	
Vivian (=Voralpen)	org. Auflage	2.32±0.37	0.38±0.07	2.05±0.17
	Ah-Horizont	4.49±0.60	3.92±0.64	
	Gesamt	6.81±0.75	4.30±0.65	

3.3 Bedeutung des Kohlenstoff-Verlustes durch Lothar und Vivian

Die voralpinen Wälder verfügen meist über mächtige organische Auflagen und sind demnach grosse Kohlenstoffspeicher (Moeri, 2007). Sturmereignisse in diesem Raum ziehen daher besonders grosse Folgen mit sich. Während 20 Jahren sind rund 25 ± 3 t C/ha aus der Auflage und dem Oberboden verloren gegangen. Dies entspricht rund 17% des in der lebenden, oberirdischen Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs der Schweizer Voralpen (144 tC/ha; Abb. 3-10). Im Mittelland sind die organischen Auflagen hingegen weit geringmächtiger und leichter abbaubar. Die Kohlenstofffreisetzung als Folge von Lothar erfolgte rascher und fiel in diesen Regionen mit 4.3 ± 1.8 t C/ha bedeutend geringer aus (Abb. 3-10). Allerdings ist auch in der oberirdischen Biomasse des Mittellandes weniger Kohlenstoff gespeichert, weshalb der C-Verlust aus dem Boden doch rund 4% ausmacht. Diese Werte widerspiegeln in etwa die Kohlenstoffverluste einer Untersuchung im Bayrischen Wald: in einem Mischwald auf 700-1500 m ü. M. gingen nach einem Störereignis durch Borkenkäfer innerhalb 25 Jahren rund 15 tC/ha verloren (Spielvogel, 2006).

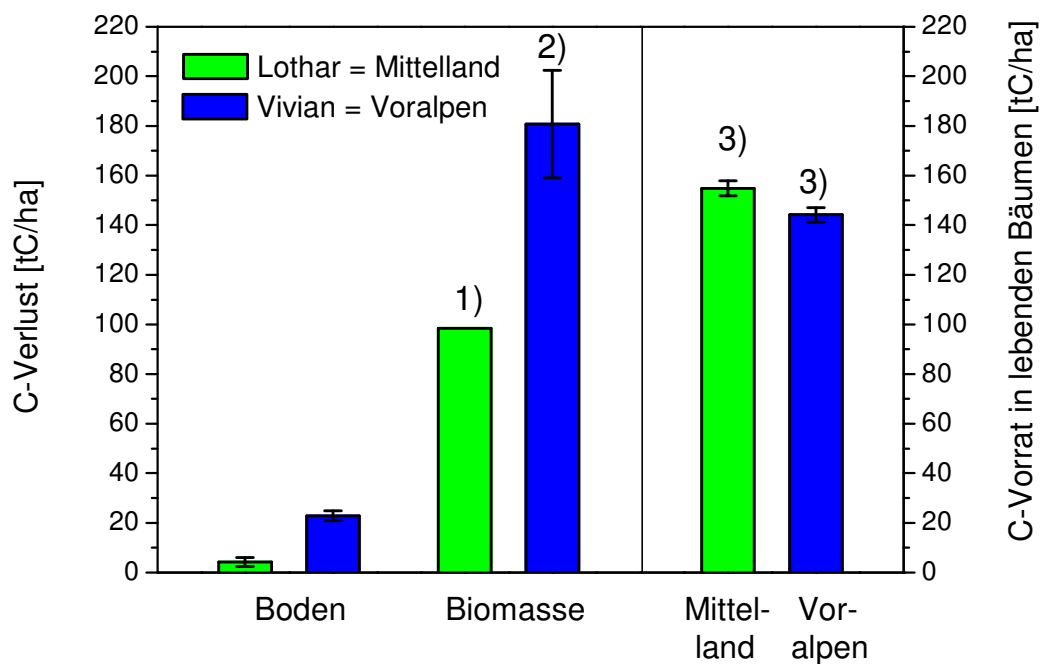


Abb. 3-10 Flächenbezogener C-Verlust der beiden Sturmereignisse (Mittelwerte \pm Standardfehler, $n_{\text{Lothar}}=112$, $n_{\text{Vivian}}=32$)

1) Als Mittelwert aus der gesamten Schadenfläche (Thürig, 2008)

2) Als Mittelwert aus den untersuchten Vivianflächen (Disentis, Pfäfers, Zweisimmen, Schwanden; Schönenberger, 2002)

3) Mittelwerte aus dem Landesforstinventar 1 (1993-1995) \pm %-Abweichung

3.4 Hotspots alpine Böden

Der Vergleich der Kohlenstoffverluste auf den Lothar- und Vivianflächen legt den Schluss nahe, dass dort wo die C-Vorräte in der organischen Auflage am grössten waren, der relative und absolute Verlust am höchsten war (Tab. 3-5; Abb. 3-13).

Tab. 3-5 Durchschnittlicher C-Vorrat [kg C m⁻²] auf den einzelnen Höhenstufen. (1): 10 Lotharflächen; (2): 3 Lothar-, 1 Vivianflächen; (3): 1 Lothar-, 3 Vivianflächen

Höhenstufe		Kontrolle	Windwurf
0-600 ⁽¹⁾	org. Auflage	0.43 ± 0.04	0.4 ± 0.05
	Ah-Horizont	3.48 ± 0.36	3.37 ± 0.31
	Gesamt	3.91 ± 0.38	3.77 ± 0.33
600-1200 ⁽²⁾	org. Auflage	1.56 ± 0.47	0.54 ± 0.16
	Ah-Horizont	4.61 ± 0.48	4.26 ± 0.56
	Gesamt	6.17 ± 0.55	4.79 ± 0.72
>1200 ⁽³⁾	org. Auflage	1.89 ± 0.16	0.48 ± 0.06
	Ah-Horizont	5.01 ± 0.39	4.38 ± 0.25
	Gesamt	6.90 ± 0.56	4.86 ± 0.51

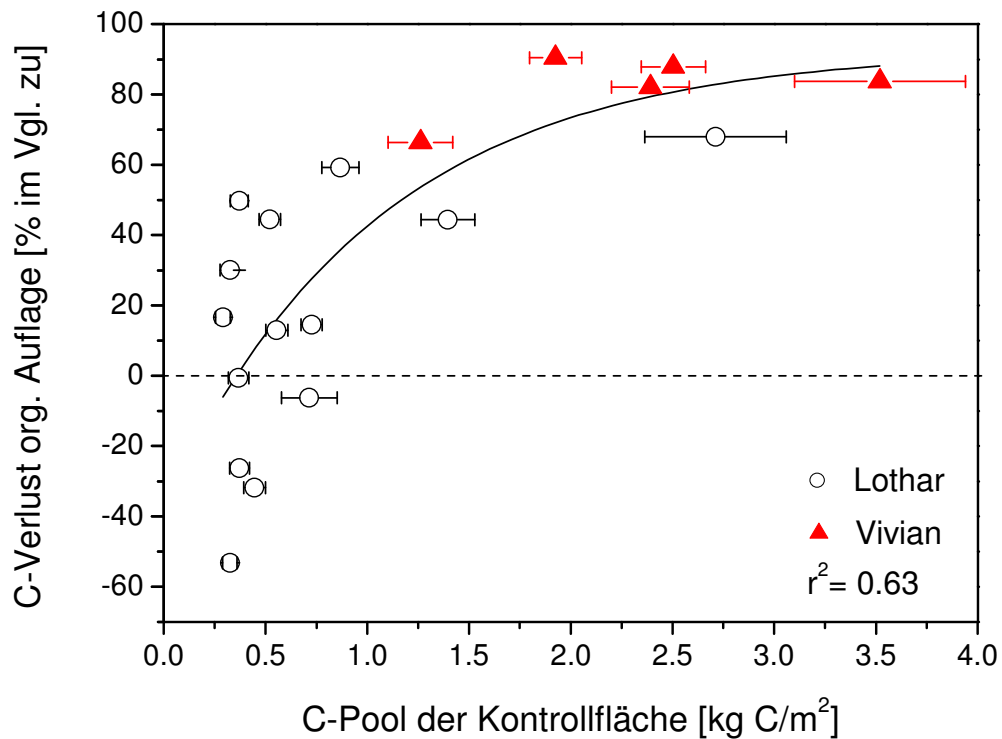


Abb. 3-13 Prozentualer C-Verlust auf den untersuchten Windwurf-Flächen des Mittellandes und der Voralpen in Bezug zur jeweiligen Kontrollfläche (Mittelwerte ± Standardfehler, n=8)

Die höheren Verluste auf den voralpinen Vivianflächen können mit folgender Modellvorstellung (Abb. 3-14) erklärt werden:

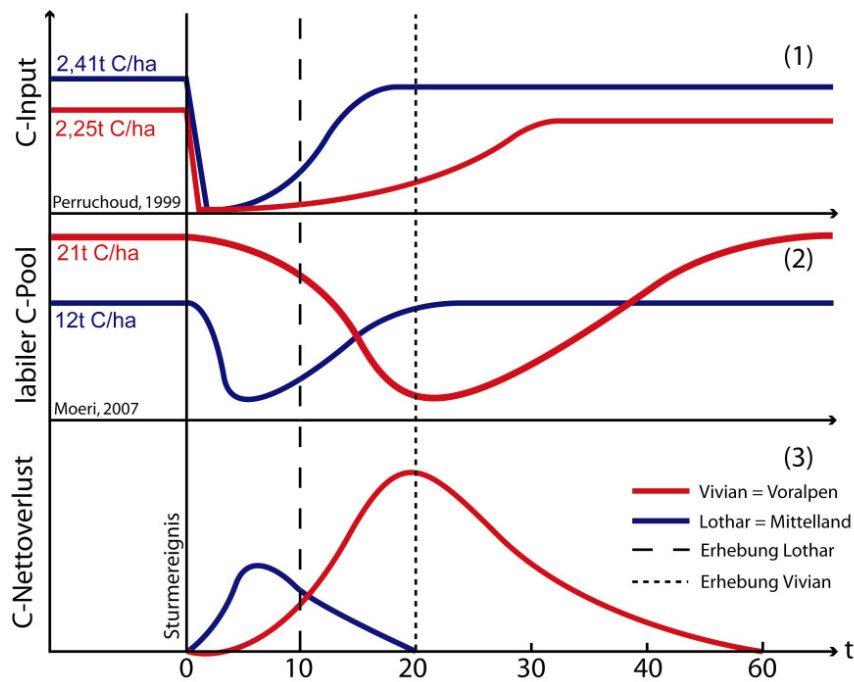


Abb. 3-14 Modellvorstellung der Sturmauswirkungen auf die C-Bilanz des Bodens

1. Ohne Störereignisse kann davon ausgegangen werden, dass sich die organische Auflage bezüglich ihrer Kohlenstoffspeicherung in einem dynamischen Gleichgewicht befindet (Abb. 3-14) (2). Mittellandböden (Lothar) erhalten gegenüber den Voralpen (Vivian) wegen der höheren Produktivität einen grösseren Streueintrag (1), haben aber aufgrund der grösseren Abbauraten und Aktivität der Bodenfauna durch das wärmere Klima einen kleineren C-Vorrat in der organischen Auflage (2).
2. Nach Sturmereignissen wird die geringmächtige, leicht abbaubare organische Auflage der Mittellandböden nach Sturmereignissen rasch zersetzt. Der C-Pool nimmt darum rasch ab, der Nettoverlust dementsprechend schnell zu, geht aber dann auch rasch wieder zurück. In den Nadelwäldern der Voralpen ist die Abbaurate der organischen Auflage kleiner, der Vorrat an labilem C jedoch grösser. Der C-Pool nimmt nach Störereignissen darum langsamer aber stärker und über eine längere Zeit ab (Abb. 3-14) (2).
3. Der Streueintrag durch die nachwachsende Vegetation beginnt im Mittelland wegen des günstigeren Klimas deutlich früher (Abb. 3-14) (1). Aufgrund des kleineren

Vorrats an labilem C (2) verringert der Input den Netto-C-Verlust wesentlich (3). In den Voralpen erfolgt der erneute Streuinput später und in kleinerem Ausmass (1). Da der Abbau des alten Humuskörpers anhält, geht insgesamt deutlich mehr Kohlenstoff verloren (3).

Auf diese Weise kann die von Covington (1981) beschriebene zeitliche Entwicklung des Boden C-Pools nach Störung (Abb. 1-1) erklärt werden. Allerdings hängt diese stark von Poolgrösse, Zusammensetzung und den Abbaubedingungen ab. Die C-Verluste sind dabei besonders gross, wenn Sturmereignisse in voralpinen und kühleren Regionen mit mächtigen Auflagehorizonten stattfinden. Böden des Alpenraumes stellen daher grosse potentielle CO₂-Quellen nach Windwurf dar.

3.5 Gesamtauswirkung der Sturmereignisse Lothar und Vivian

Lothar hat zu einem Grossteil das Mittelland betroffen. Auf einer Fläche von 46000 ha wurden rund 12.7 Mio m³ Holz geworfen. Darin waren rund 4.5 Mt Kohlenstoff gespeichert (Thürig, 2008). Die entspricht in etwa einem Drittel der jährlichen Schweizer Treibhausgasemissionen (12 Mt C für 2007; BAFU, 2009). Aus dem Boden gingen dabei über 10 Jahre hinweg 0.20 ± 0.08 Mt Kohlenstoff verloren (Abb. 3-15). Wie die jährliche Verteilung der C-Verluste aus dem Boden aufgrund des Sturmereignisses ausfällt, ist schwierig abzuschätzen, da unsere Erhebung nur einen Zeitpunkt erfasst. Es erscheint aber wahrscheinlich, dass die geringmächtige Auflage im Mittelland ziemlich rasch abgebaut wurde.

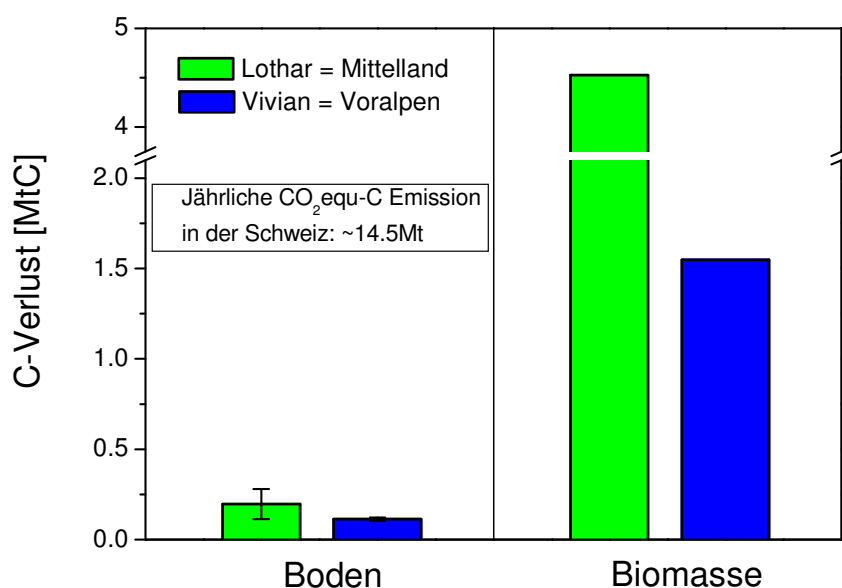


Abb. 3-15 C-Verlust der oberirdischen Biomasse und des Boden nach den beiden Sturmereignissen (Mittelwerte \pm Standardfehler, $n_{\text{Lothar}}=112$, $n_{\text{Vivian}}=32$)

Die Schadenfläche nach Vivian war mit 5000 ha wesentlich kleiner. Durch die dichte Bewaldung im voralpinen und alpinen Raum fielen aber doch rund 4.9 Mio m³ Sturmholz (Schmidtke & Scherrer, 1997), was einem Kohlenstoffverlust aus dem Sturmholz von rund 1.5 Mt C entspricht (Thürig, 2008). Eine Extrapolation der in der organischen Auflage und im Oberboden gemessenen Verluste an Boden-C auf die gesamte von Vivian betroffene Fläche, so ergibt sich eine C-Freisetzung aus dem Boden von rund 0.11 ± 0.01 Mt C.

3.6 Einfluss von Sturmereignissen auf die CO₂-Senkenleistung des Bodens und des Waldes

Der Schweizer Wald hat im Zeitraum zwischen 1990-2005 im Mittel netto jährlich rund 730 kt C gebunden (BAFU, 2007). Unberücksichtigt sind dabei Veränderungen beim Totholz und im Waldboden. Die Senkenleistung des Bodens ist schwierig abzuschätzen, liegt aber nach Modellierungsarbeiten durch zunehmende Streueinträge bei 350-500kt C/a (Liski, 2002; Perruchoud, 1999). Seit den beiden Sturmereignissen gingen schweizweit bislang total rund 310 kt C über den Waldboden verloren (Abb. 3-15), was ungefähr der jährlichen Senkenleistung des Bodens entspricht. Die beiden Sturmereignisse betrafen aber insgesamt rund 4% der Schweizer Waldfläche. Unter der vereinfachten Annahme eines konstanten C-Verlusts seit den beiden Sturmereignissen, gingen jährlich rund 26 kt C verloren (Lothar: 200 kt über 10 Jahre; Vivian: 110 kt über 20 Jahre).

Tab. 3-6 Quellenleistung zukünftiger Sturmereignisse im Schweizer Wald

	Vivian	Lothar	Total	Quelle
Senkenleistung Wald-Biomasse 1990-2005 [kt C/a] ⁽¹⁾			730	BAFU, 2007
Jährliche Eintretenswahrscheinlichkeit	0.05	0.08		WSL und BUWAL, 2001
Sturmholz [m ³] ⁽²⁾	3.25 Mio.	11.5 Mio.		BAFU, 2008
Borkenkäfer-Schäden	1.2 Mio.	4.5 Mio.		BAFU, 2008
Sturm+Borkenkäferwirkung Holz [m ³ /a] ⁽³⁾	223'000	1.28 Mio.	1.5 Mio.	BAFU, 2008
Quellenleistung Holz [kt C/a] ⁽⁴⁾	80	480	560	Berechnung gem. Thürig, 2008
Sturmwirkung Boden [kt C]	110	200	310	vgl. Kap. 3.3
Quellenleistung Boden [kt C/a] ⁽⁵⁾	5.5	16	21.5	
Prognostizierte Nettosenkenleistung 2008-2012 [kt C/a]			80-190	BAFU, 2008
Modellierte Nettosenkenleistung Boden [kt C/a] 1990			350 ¹ - 500 ²	¹ Perruchoud, 1999; ² Liski, 2002

⁽¹⁾ nur Veränderung der lebenden Biomasse, ohne Veränderung beim Totholz und im Waldboden

⁽²⁾ abzüglich Holzmenge aus regulärer jährlicher Nutzung

⁽³⁾ Jährliche Eintretenswahrscheinlichkeit * Sturmholz

⁽⁴⁾ Sturmholz [m³] * Holzdichte * Biomasse-Expansionsfaktor [BEF] * C-Gehalt

wobei: Holzdichte = 0.5; BEF = 1.5 (zur Umrechnung von Schaftholz in Rinde und Stock in totale Biomasse); C-Gehalt = 0.5

⁽⁵⁾ Sturmwirkung Boden [kt C] * Eintretenswahrscheinlichkeit (wobei angenommen wird, dass zum Zeitpunkt der Erhebung der Sturm bedingte C-Abbau abgeschlossen ist)

In einer BAFU Studie wurde die zukünftige Senkenleistung des Waldes mit einem Risikoanalyse-Ansatz abgeschätzt, der die Eintretenswahrscheinlichkeiten der Sturmereignisse berücksichtigt (BAFU, 2008). Diese Analyse ergab, dass durch Sturmwirkung und anschliessenden Borkenkäferbefall rund 560 kt C pro Jahr verloren gehen könnten, was rund drei Viertel der jährlichen Senkenleistung der Schweizer Wald-Biomasse während der Periode 1990-2005 entspricht. Wendet man diesen Ansatz auf den Waldboden an, so könnten durch Sturmereignisse jährlich weitere 21.5 kt C abgegeben werden, wodurch sich die prognostizierte C-Senke im Wald auf 60-170 kt C/a verringern könnte (Tab. 3-6).

4 Zusammenfassung

Die Windwürfe bei den Stürmen Lothar und Vivian führten zu einem Verlust von Kohlenstoff aus Waldböden, welche dadurch zu einer CO₂-Quelle wurden. Die relative und absolute Kohlenstofffreisetzung fiel dort stark ins Gewicht, wo Stürme Wälder mit mächtigen Auflagehorizonten wie im Alpenraum trafen. So gingen aus den Böden der Nadelwälder in den Voralpen rund 25 t C/ha verloren. Im Mittelland mit gering mächtigeren Auflagehorizonten fiel die Kohlenstofffreisetzung mit rund 4 t/ha deutlich niedriger aus. Wird die CO₂-Quellenwirkung mit der Eintrittswahrscheinlichkeit von Sturmereignissen abgeschätzt, so ergibt sich ein jährlicher Verlust in der Schweiz von rund 21.5 kt C.

Im Vergleich zu diesen Verlusten hatte die Bewirtschaftung der Flächen nach Windwurf geringe Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicherung in den Böden. Aufforstungsmassnahmen verringerten den C-Verlust gegenüber geräumten Flächen um 12%, während der Einfluss liegen gelassenen Totholzes vernachlässigbar war.

5 Offene Fragen

Sturmereignisse können häufig einen Grossteil der Bäume entwurzeln. Dies führt zu einer Störung der Bodenstruktur und zur Ausbildung einer neuen Mikrotopographie mit Hügeln (*mound*) und Senken (*pit*). Dadurch kann sich das Mikroklima und als Folge daraus der Abbau organischen Materials verändern. Wie gross diese Auswirkungen auf den C-Pool der organischen Auflage sind, wird mit dieser Arbeit nicht beantwortet.

Die Standorte für die Probenahme wurden so gewählt, dass die organische Auflage auch im Einflussbereich des sich zersetzenden Stammholzes beprobt werden konnte. Grosse Holzurückstände und das Stammholz selber konnten hingegen nicht erfasst werden. Da Totholz häufig von minderer Qualität ist und darum selten als Bauholz verwendet wird, entweicht der gespeicherte Kohlenstoff meist durch das Verbrennen oder Verrotten wieder. Unklar ist noch,

wie stark liegen gelassenes Stammholz über die Nährstofffreisetzung und den direkten C-Eintrag in den Boden die Senkenfunktion verstärken kann.

6 Bodenkohlenstoff nach Windwurf – Literaturüberblick

Oberthema	Autoren	Jahr	Titel	Untersuchungsgebiet	Inhalt
C-Verluste nach Störungen	LindBodenkohlenstoff nach Windwurf – Literaturüberblickroth et al.	2009	Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink	Fichtenwald in Südschweden	Jährliche Netto-Ökosystem-Produktion ist nach Windwurf weit negativer als nach Kahlschlag vermutet wurde. Modellierungen zeigen für Lothar eine Reduzierung der C-Bilanz um 16Mt C, was rund 30% der Netto-Biomproduktivität entspricht. Grosse Sturmereignisse können einen Teil der jährlichen Fluktuationen der C-Senke erklären und sollten darum in zukünftigen Klimaszenarien mit berücksichtigt werden.
	Jandl et al.	2007	How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? [Review]	Review	Störungen (Sturm, Feuer, Schädlinge) führen zu einer Mobilisierung von Kohlenstoff und damit zu einer grossen potenziellen C-Quelle. Dabei gibt es Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Waldbewirtschaftungs- massnahmen (Wahl der Baumarten, Regulierung der Bestandesstruktur, Ausdünnung, Verjüngung). Ohne Intervention durch die Bewirtschaftung wird der Einfluss durch Störungen auf die C-Dynamik weiter zunehmen.
	Spielvogel et al.	2006	Soil Organic Matter Changes in a Spruce Ecosystem 25 Years after Disturbance	Mischwald im Nationalpark Bayrischer Wald	Störereignisse (Borkenkäferbefall) verringern den C-Pool der organischen Auflage um bis zu 34% innerhalb von 25 Jahren. Gründe dafür liegen hauptsächlich in erhöhtem Umsatz und im kleineren Streuinput. Vor allem einfach abbaubare Fraktionen sind besonders stark betroffen, während stabile Fraktionen kaum verändert werden.
	Fahey	2005	The biogeochemistry of carbon at Hubbard Brook	Laubwald in New Hampshire	C-Pools in der organischen Auflage können nahmen in den ersten 20 Jahren nach grossräumigen Störungen um rund 20% ab. Allerdings sind räumliche Unterschiede meist sehr gross. Der Einfluss von Totholz auf die C-Bilanz ist besonders während der ersten Jahre sehr gross. Dadurch kann ein erhöhter Abbau von Kohlenstoff sogar fast kompensiert werden.

	Peltoniemi et al.	2004	Changes in soil carbon with stand age - an evaluation of a modelling method with empirical data	Modellsimulation	Modellrechnungen zeigen 20 Jahre nach einem Kahlschlag eine maximale Abnahme um 9% im Bodenkohlenstoffpool (Tiefe: -1m) mit anschl. Zunahme bis zum nächsten Kahlschlag.
	Bormann et al.	1995	Rapid soil development after windthrow disturbance in pristine forests	Tannen-, Fichtenwald in Südalaska	Wiederholte Sturmereignisse führen zu Fluktuationen im C-Speicher mit Perioden erhöhter Abbauraten und Perioden schneller Akkumulation. Je schneller diese Ereignisse aufeinander folgen, desto tiefer ist die Rate der Akkumulation, da die Perioden erhöhter Abbauraten häufiger werden. Maximaler C-Speicher wird bei Ereignissen im Abstand von ca. 200-350 Jahren erreicht. Häufigere Ereignisse führen eher zur Abnahme im C-Gehalt und zu produktiverer Vegetation.
	Hendrickson et al.	1989	Nutrient cycling following whole-tree and conventional harvest in northern mixed forest	Kanadischer Mischwald	Trotz höherer Bodenatmungsraten auf kahl geschlagenen Flächen resultiert kein Unterschied im SOC-Pool gegenüber den Kontrollflächen. Schlagabraum-Input, abbauende Wurzeln und Baumstrunke scheinen die erhöhten Abbauraten auszugleichen.
	Covington	1981	Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods	Laubwald in den White Mountain, New Hampshire	Auf Kahlschlag folgt eine Phase der C-Pool-Abnahme aufgrund erhöhten Abbaus organischen Materials und verringertem Streuinput mit einem Minimum von 50% (30.7Mg/ha) des Ausgangswertes nach ca. 20 Jahren. Anschliessend folgt eine Zunahme bis zum Ausgangswert zurück.
Einfluss von Bewirtschaftungsmethoden auf die C-Pools	Thürig et al.	2005	The impact of windthrow on carbon sequestration in Switzerland: a model-based assessment	Modellierung	Auch eine starke Zunahme der Sturmhäufigkeit wird die C-Bindung im Waldökosystem nicht wesentlich beeinflussen. Räumung hat auf Bodenkohlenstoff auf nationaler Ebene wenig Einfluss, da gefallenes Stammholz in Bezug auf sonstige Baumernte zu wenig stark ins Gewicht fällt. Bodenkohlenstoff scheint auf Änderungen im Streuinput nur langsam zu reagieren.
	Kaipainen et al.	2004	Managing carbon sinks by changing rotation length in European	Modellansatz mit Wäldern in Deutschland, Finnland (Föhre, Fichte), England	Späterer Holzschlag erhöht in den meisten Fällen die C-Speicherung in der oberirdischen Biomasse und meistens auch im Boden (-1.0 - +11.7 Mg/ha), sofern

			forests	(westl. Fichte), Spanien (Föhre)	durch Alterung keine Abnahme im Streuinput stattfindet.
	Johnson & Curtis	2001	Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis	Meta-Analyse	Holzernte hat im Durchschnitt keinen wesentlichen Effekt auf den C-Pool im Boden. Erfolgt nur Stammernte, so kann der C-Pool durch liegen gelassenes Astmaterial längerfristig um bis 18% zunehmen.
Veränderung der Abbauraten nach Sturmereignissen	Kramer et al.	2004	Soil carbon dynamics across a windthrow disturbance sequence in southeast Alaska	Nadelwald in Südostalaska	Horizontdurchmischung aufgrund von Sturmereignissen führt zu einem Verlust von organischem Kohlenstoff. Zusätzlich erhöht sich die Bodentemperatur, was den Abbau organischen Kohlenstoffs erhöht. Der Bodenkohlenstoffgehalt nahm dabei von Flächen mit grosser Störung (157Mg/ha) zu Flächen mit kleiner Störung (216Mg/ha) zu.
	Davis et al.	2003	Carbon storage along a stand development sequence in a New Zealand Nothofagus forest	Buchenwald, Neuseeland	Sturmholzurückstände können grosse C-Verluste nach Sturmereignissen abpuffern. Veränderungen im C-Pool in den einzelnen Horizonten sind je nach Altersstruktur der Wälder unterschiedlich. Ein Minimum
	Dai et al.	2001	Organic matter chemistry and dynamics in clear-cut and unmanaged hardwood forest ecosystems	Laubwald in New Hampshire	Nach Kahlschlag kann ein beschleunigter Abbau organischen Materials festgestellt werden. Sobald aber das Kronendach wieder geschlossen ist, geht der Abbau wieder zum pre-Clear-Cut Ausmass zurück. Nach 25-40 Jahren scheint Maximum des Streuinput wieder erreicht zu sein.
Einfluss von Sturmholz auf C-Flüsse	Knohl et al.	2002	Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw	Nadelwald in Russland	Rund ein $\frac{1}{3}$ der gesamten CO ₂ -Flüsse aus dem Boden kann vom Abbau des Totholzes stammen. Die Bodenatmung kann während 30 Jahren durch Abbau des Totholzes positiv verstärkt werden. Dieser erhöhte C-Fluss kann der Annahme widersprechen, dass junge, regenerierende Wälder C-Senken sind.
Einfluss von Hügel- und Muldentopographie durch Wurzelteller auf die C-Pools	Overby et al.	2002	Impacts of natural disturbance on soil carbon dynamics in forest ecosystems		Hügel- und Muldenlagen verändern Bodenfeuchtigkeit, Durchlüftung und Temperatur innerhalb kurzer Distanzen, was Einfluss auf den Abbau und die Ablagerung von organischem Material hat.
	Liechty et al.	1997	Pit and mound topography and its influence on storage of	Mischwald im Hiawatha National Forest, Michigan	In Muldenlagen ist der Pool an organischem Material um 54-244% höher als in Hügellänge. Dies widerspiegelt allerdings mehr die Umverteilung. Der

			carbon, nitrogen and organic matter within an old-growth forest		gesamte C-Pool in der organischen Auflage wird durch Hügel-und Muldeneffekte nicht signifikant verändert.
--	--	--	---	--	---

7 Literatur

BAFU (2007): Jährlicher Netto-Senkeneffekt im Wald, 1990-2005: Abteilung Wald. www.bafu.ch (Zugriff: 4.2009)

BAFU (2008): Schätzung der Senkenleistung des Schweizer Waldes für die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto Protokolls 2008-2012. www.bafu.admin.ch (Zugriff: 3.2009)

BAFU (2009): Emissionen nach CO₂-Gesetz und Kyoto-Protokoll: Abteilung Klima. www.bafu.ch (Zugriff: 4. 2009)

BORMANN, B.T.; SPALTENSTEIN, H.; MCCLELLAN, M.H.; UGOLINI, F.C.; CROMACK JR., K.; NAY, S.M. (1995): Rapid soil development after windthrow disturbance in pristine forests. *The Journal of Ecology*, 83, 5, 747-757.

BRAIS, S.C.; CAMIRE, C.; PARE, D. (1995): Impacts of whole-tree harvesting and winter windthrowing on soil-pH and base status of calyey sites of northwestern Quebec. *Can J For Res*, 25, 997-1007.

COVINGTON, W.W. (1981): Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods. *Ecology*, 62, 1, 41-48.

DAI, K'O.H.; JOHNSON, C.E.; DRISCOLL, C.T. (2001): Organic matter chemistry and dynamics in clear-cut and unmanaged hardwood forest ecosystems. *Biogeochemistry*, 54, 51-83.

DAVIS, M.R.; ALLEN, R.B.; CLINTON, P.W. (2003): Carbon storage along a stand development sequence in a New Zealand *Nothofagus* forest. *Forest Ecology and Management*, 177, 313-321.

FAHEY, T.J.; SICCAMI, T.G.; DRISCOLL, C.T.; LIKENS, G.E.; CAMPBELL, J.; JOHNSON, C.E.; BATTLES, J.J.; ABER, J.D.; COLE, J.J.; FISK, M.C.; GROFFMAN, P.M.; HAMBURG, S.P.; HOLMES, R.T.; SCHWARZ, P.A.; YANAI, R.D. (2005): The biogeochemistry of carbon at Hubbard Brook. *Biogeochemistry*, 75, 109-176.

FEDERER, C.A. (1984): Organic matter and nitrogen content of the forest floor in even-aged northern hardwoods. *Can J For Res*, 14, 763-767.

HENDRICKSON, O.Q.; CHATARPAUL, L.; BURGESS, D. (1989): Nutrient cycling following whole-tree and conventional harvest in northern mixed forest. *Can J For Res*, 19, 725-35.

HUNTINGTON, T.G.; RYAN, D.F. (1990): Whole tree harvesting effects on soil nitrogen and carbon. *For Ecol Manage*, 31, 193-204.

IPCC (2001): Working group III: Mitigation. Cambridge University Press. http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/

JANDL, R.; LINDNER, M.; VESTERDAL, L.; BAUWENS, B.; BARITZ, R.; HAGEDORN, F.; JOHNSON, D.W.; MINKKINEN, K.; BYRNE, K.A. (2007): How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137, 253–268.

JOHNSON, J.E.; SMITH, D.W.; BURGER, J.A. (1985): Effects on the forest floor of whole-tree harvesting in an Appalachian oak forest. *Am Midl Nat*, 114, 51-61.

JOHNSON, C.E.; DRISCOLL, C.T.; FAHEY, T.J.; SICCAMI, T.G.; HUGHES, J.W. (1995): Carbon dynamics following clear cutting of a northern hardwood forest. In: McFEE, W.W.; KELLY, J.M. (ed): *Carbon forms and functions in forest soils*. SSSA, Madison, WI.

JOHNSON, D.W.; TODD, D.E. (1998): Effects of harvesting intensity on forest productivity and soil carbon storage in a mixed oak forest. IN: Lal, R., et al, editor. *Management of carbon sequestration in soils*. Advances in soil science. Boca Raton, 351-63.

JOHNSON, D.W.; CURTIS, P.S. (2001): Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* 140, 227-238.

KAIPAINEN, T.; LISKI, J.; PUSSINEN, A.; KARJALAINEN, T. (2004): Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science & Policy*, 7, 205-219.

KNOHL A.; KOLLE, O.; MINAYEVA, T.Y.; MILYUKOVA, I.M.; VYGODSKAYA, N.N.; FOKEN, T.; SCHULZE, E.D. (2002): Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw. *Global Change Biology*, 8, 231-246.

KRAMER, M.G.; SOLLINS, P.; SLETTEN, R.S. (2004): Soil carbon dynamics across a windthrow disturbance sequence in southeast Alaska. *Ecology*, 85, 8, 2230-2244.

LIECHTY, H.O.; JURGENSEN, M.F.; MROZ, G.D.; GALE, M.R. (1997): Pit and mound topography and its influence on storage of carbon, nitrogen, and organic matter within an old-growth forest. *Can. J. For. Res.*, **27**, 1992-1997.

LÜSCHER, P. (2002): Humus dynamics and changes in rooting patterns in windthrow areas. *For Snow and Landsc Res*, 77, 49-59.

MATTSON, K.G.; SWANK, W.T. (1989): Soil and detrital carbon dynamics following forest cutting in the southern Appalachians. *Biol Fertil Soils*, 7, 247-253.

MATTSON, K.G.; SMITH, H.C. (1993): Detrital organic matter and soil CO₂ efflux in forests regenerating from cutting in west-virgina. *Soil Biology and Biochemistry*, 25, 9, 1241-1248.

MOERI, A. (2007): Kohlenstoffvorräte in Schweizer Waldböden mit besonderer Berücksichtigung der organischen Auflage. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich.

MROZ, G.D.; JURGENSEN, M.F.; FREDERICK, D.J. (1985): Soil nutrient changes following whole tree harvesting on three northern hardwood sites. *Soil Sci Soc Am J*, 49, 1552-1557.

OVERBY, S.T.; HART, S.C.; NEARY, D.G. (2002): Impacts of natural disturbance on soil carbon dynamics in forest ecosystems. In: Kimble, J.M.; Heath, L.S.; Birdsey, R.A.; Lal, R., eds. The potential of U.S. forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Boca Raton, FL: CRC Press, 159-172.

PELTONIEMI, M.; MÄKIPÄÄ, R.; LISKI, J.; TAMMINEN, P. (2004): Changes in soil carbon with stand age - an evaluation of a modelling method with empirical data. *Global Change Biology*, 10, 2078–2091.

SCHMIDTKE H.; SCHERRER, H-U. (1997): Sturmschäden im Wald: Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz“. NFP 31, vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH.

SCHÖNENBERGER, W.; FISCHER, A.; INNES, J.L. (eds) (2002): Vivian's Legacy in Switzerland - impact of windthrow on forest dynamics. *For. Snow Landsc. Res.* 77, 1/2: 1-224.

SPIELVOGEL, S.; PRIETZEL, J.; KOGEL-KNABNER, I. (2006): Soil organic matter changes in a spruce ecosystem 25 years after disturbance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, 2130-2145.

THÜRIG, E.; SCHMID, E. (2008): Jährliche CO₂-Flüsse im Wald: Berechnungsmethode für das Treibhausgasinventar. *Schweiz Z Forstwes*, 159, 2, 31-38.

WALTHERT, L.; GRAF, U.; KAMMER, A.; PEZZOTTA, J.; ZIMMERMANN, S.; HAGEDORN, F. (in press): Determination of organic and inorganic carbon, $\delta^{13}\text{C}$ and nitrogen in soils containing carbonates after acid fumigation with HCl. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*

WSL und BUWAL, 2001: Der Orkan 1999. Ereignisanalyse, Birmensdorf, Bern, WSL. BUWAL, 365 S.

YANAI, D.; WILLIAM, S.C.; GOODALE, C.L. (2003): Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems*, 6, 197-212.