



FRIEDRICH-SCHILLER-  
**UNIVERSITÄT**  
**JENA**

Chemisch-Geowissenschaftliche  
Fakultät

## BACHELORARBEIT

---

# Enzymaktivitäten in den Waldböden der Biodiversitätsexploratorien der Schwäbischen Alb und deren Reaktion auf Lochhiebe und Totholzanreicherung

---

Lea Haugeneder  
geboren *am 29. November 1999*  
*in Lichtenfels*

Matrikelnummer: 178328

Estkorrektur: Dr. Alexander Tischer  
Zweitkorrektur: Dr. Ingo Schöning

Jena, 20.10.2021

Gliederung	
Danksagung	1
Abstrakt	1
1 Einleitung	2
2 Zielstellung und Hypothesen	3
3 Stand der Forschung	3
3.1 Abbau von organischer Substanz und Enzyme	3
3.2 Einfluss des Waldmanagements	4
3.3 Abschnitt Kohlenstoff im Boden	6
3.4 FOX-Experiment	7
4 Methodik	7
4.1 Untersuchungsgebiet	7
4.2 Beprobung der Kontrollflächen und Aufarbeitung im Field Lab	8
4.3 Beprobung der Flächen mit Experimentvarianten und Aufarbeitung im Field Lab	9
4.4 Probenaufbereitung	10
4.4.1 Trocknung der Proben	10
4.4.2 Mahlen	10
4.5 pH-Wert	11
4.6 Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel	11
4.7 Restwassergehalt	11
4.8 Geschätzter Tongehalt	11

4.9 Enzymanalyse	12
4.10 Datenanalyse und Auswertung	13
5 Ergebnisteil	14
5.1 pH-Werte	14
5.2 Geschätzter Tongehalt	15
5.3 Organischer Kohlenstoff	16
5.4 C/N-Verhältnis	16
5.5 Enzyme	18
5.5.1 Glu-Aktivität	18
5.5.2 Nac-Aktivität	20
5.5.3 Sul-Aktivität	21
5.5.4 Pho-Aktivität	22
6 Diskussion	23
6.1 pH-Wert	23
6.2 Geschätzter Tongehalt	24
6.3 Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel	26
6.4 Einfluss der Methoden	26
6.5 Enzyme	27
6.5.1 Glu- Aktivität	27
6.5.2 Nac-Aktivität	27
6.5.3 Sul-Aktivität	28
6.5.4 Pho-Aktivität	28

6.6 Effekte von Totholz	29
6.6.1 pH-Wert	30
6.6.2 Geschätzter Tongehalt	30
6.6.3 Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel	30
6.6.4 Enzyme	31
6.7 Effekte von Lücken	32
6.7.1 pH-Wert	32
6.7.2 Geschätzter Tongehalt	32
6.7.3 Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel	33
6.7.4 Enzyme	33
7 Zusammenfassung	34
8 Literatur	35
Tabellenverzeichnis	38
Abbildungsverzeichnis	39
Anhang	40
Selbstständigkeitserklärung	69

## Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei meinen Vorgesetzten Herr Dr. Ingo Schöning und Herr Dr. Alexander Tischer für die Begleitung in dieser Arbeit und Ihre Unterstützung. Zudem danke ich meinen Eltern für Ihr Verständnis und die aufmunternden Worte. Und nicht zuletzt danke ich meinen Arbeitskollegen am Institut für Biogeochemie, welche mich unterstützt und angeleitet haben. Auch möchte ich meinen Freunden danken, welche mir Beistand geleistet haben.

## Abstrakt

Diese Arbeit befasst sich mit den Veränderungen der Enzymaktivitäten in den Böden des Fox-Experimentes (Forest gap Experiment) in der Schwäbischen Alb. Dabei ist die Zielstellung zu untersuchen, wie sich das Waldmanagements in Form des Lochhiebs auf Enzymaktivitäten auswirkt. Der Grund für die Untersuchung der Enzyme in den Waldböden ist, dass die Bestimmung der bodenenzymatischen Kenngrößen gemeinsam mit physikalischen, chemischen und strukturellen Parametern die Abschätzung und Bewertung der Auswirkungen anthropogener Eingriffe in Richtung und Intensität auf die Nährstoffkreisläufe, die Bodenstruktur und die Bodenfunktionen erlauben. Die Enzyme werden durch Ab- und Umbau der organischen Substanz hergestellt und sind somit an die Stoffkreisläufe und Bodengesellschaften gebunden.

Für die Methodik wurde das Statistikprogramm R-Studio, sowie dessen Funktionen verwendet. Die Probennahme erfolgte nach dem Prinzip des Max-Planck-Institutes für Biogeochemie in Jena. Dabei wurden in der Schwäbischen Alb auf acht verschiedenen Untersuchungsflächen mit jeweils vier Experimentvarianten Bodenproben entnommen. Am Institut wurden im Anschluss die Messungen durchgeführt. Dazu gehören die pH-Wert Messung, das Mahlen der Proben, die CNS-Analyse (Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel), die Messung des Wasser- und Restwassergehaltes, sowie die Enzymmessung. Die Ergebnisse zeigen deutliche Signifikanzen im geschätzten Tongehalt und dem organischen Kohlenstoff. Die gemessenen Enzyme sind Methylumbelliferyl- $\beta$ -D-Glucosidase (Glu), 4-Methylumbelliferyl-N-Acetyl- $\beta$ -D-Glucosaminidase (Nac), 4-Methylumbelliferylsulfate (Sul) und 4-Methylumbelliferyl-Phosphatase (Pho). Die fluorometrische Messung wurde nach dem Prinzip von Marx et al. 2001 durchgeführt. Die Enzymmessung von Sul und Pho ist signifikant, da hier die Experimentvarianten eindeutigen Einfluss auf die Werte haben und dies auf in den Abbildungen zu erkennen ist. Die linearen Regressionen der Parameter geben weiteren Aufschluss über die Beeinflussung der Enzyme durch organischen Kohlenstoff.

In der Diskussion werden die Ergebnisse in den Kontext der aktuellen Forschung eingeordnet. Dabei wird klar, dass die Messungen Parallelen aufweisen und einen Beitrag zur Forschung mittels der fluorometrischen Messungsmethode von Marx leisten. Der größte Unterschied zu der Literatur ist das umgekehrte Verhältnis der Sul- und Pho-Aktivitäten im Zusammenhang mit den Experimentvarianten.

Weitere signifikante Einflüsse haben der organische Kohlenstoff und das C/N-Verhältnis, sowie der geschätzte Tongehalt.

In dieser Arbeit sollen die Hypothesen überprüft werden, ob die Lücken im Wald eine verringerte Enzymaktivität nach sich ziehen, der Totholzeintrag zu einer erhöhten Produktion von Ausgangssubstraten für die Stoffkreisläufe und die dazugehörigen Enzymproduktionen führt, die Unterschiede zwischen den einzelnen Experimentvarianten signifikant im Vergleich zur Kontrollfläche und untereinander sind, der Wasser- und Restwassergehalt im Boden von dem Waldmanagement beeinflusst werden und die Elementaren Gehalte von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S) und deren Verhältnisse zueinander durch dieses beeinflusst oder gar gesteuert werden.

## 1 Einleitung

Der Grund für die Untersuchung der Enzyme in den Waldböden ist, dass die Bestimmung der bodenenzymatischen Kenngrößen gemeinsam mit physikalischen, chemischen und strukturellen Parametern die Abschätzung und Bewertung der Auswirkungen anthropogener Eingriffe in Richtung und Intensität auf die Nährstoffkreisläufe, die Bodenstruktur und die Bodenfunktionen erlaubt. Die Bodenenzyme bauen die organische Substanz um und setzen dabei Nährstoffe frei, wobei v.a. Bodenmikroorganismen dazu beitragen. Des Weiteren beteiligen sich die Enzyme an den Prozessen der organischen Substanz, wie zum Beispiel der Umsetzung oder Umwandlung von Bodenfremden zu Bodeneigenen Stoffen, sowie an der Entwicklung und Aufrechterhaltung des Bodengefüges. Damit eignen sie sich zur Indikation von Standorten mit pflanzlicher Produktion und geben einen Einblick in die biochemische Leistungsfähigkeit von Böden (Schinner et al. 1996).

Die individuellen Enzyme beeinflussen unterschiedliche Stoffkreisläufe und deren Nährstoffe. Diese werden dabei von den jeweiligen Nährstoffen und deren Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien gesteuert, wodurch die Bestimmung der einzelnen Aktivitäten Aufschluss über anthropogene Einflüsse und biochemische Prozesse der Böden gibt (Schinner et al. 1996). Einer der größten Faktoren mit Einfluss auf die Enzyme ist die Bewirtschaftung der Waldböden. Darunter zählen die regelmäßige Ausdünnung und Ausschlag von Gestrüpp, aber auch der Eintrag von Düngemitteln und die regelmäßige Jagd auf waldschädliche Tiere. Dazu zählen Rot- und Damwild, welches teilweise starken Verbiss an der jungen Vegetation hervorruft.

Das betrachtete Untersuchungsgebiet liegt in den mittleren Breiten und bietet mit der Mischung aus kontinentalem und maritimem Klima eine Vielfalt an Ökosystemen, welche miteinander in Verbindung stehen. Der Einfluss des Klimas auf diese kann sich zusammen mit den Experimentvarianten aufsummieren und zu größeren Schäden führen. Zudem ist die organische Substanz und deren Veränderung, sowie die Qualität sowie Quantität der anfallenden Streu und Wurzelmasse ein weiterer Faktor, welcher an die mikrobiologischen und enzymatischen Parameter gekoppelt ist. Es gibt noch weitere Faktoren, welche allerdings den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden. Teilweise können

länger dauernde Monokulturen bestimmte Abfolgen von Enzymen aufweisen und der Eintrag bzw. Austrag von Rückständen kann ebenfalls die Parameter verändern. Zudem spielen Nährstoffhaushalt, Textur, Feuchte, pH-Wert und Substraterschöpfung eine Rolle. Beispiele dazu werden im Ergebnisteil und der Diskussion weiter ausgeführt (Farell et al. 1994). In dieser Studie wurde die Methode von Marx et al. (2001) zur Enzymmessung verwendet.

## 2 Zielstellung und Hypothesen

Diese Arbeit befasst sich mit den Veränderungen der Enzymaktivitäten in den Böden des Fox-Experimentes in der Schwäbischen Alb. Die Zielstellung ist die Aussage über eine signifikante Veränderung durch verschiedene experimentelle Behandlungen der Waldböden. Die Hypothesen bauen darauf auf, dass die Lücken im Wald eine verringerte Enzymaktivität nach sich ziehen, der Totholzeintrag zu einer erhöhten Produktion von Ausgangssubstraten für die Stoffkreisläufe und die dazugehörigen Enzymproduktionen führt, die Unterschiede zwischen den einzelnen Experimentvarianten signifikant im Vergleich zur Kontrollfläche und untereinander ist, der Wasser- und Restwassergehalt im Boden von dem Waldmanagement beeinflusst wird und die Elementaren Gehalte von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S) und deren Verhältnisse zueinander durch dieses beeinflusst oder gar gesteuert werden.

## 3 Stand der Forschung

### 3.1 Abbau von organischer Substanz und Enzyme

Die Aktivität der Enzyme kann von der Korngröße und der Messmethode abhängen. Das Problem bei der Messung ist die fehlende absolute hydrologische Aktivität in dieser Arbeit. Hierbei sind die begrenzte Informationsverfügbarkeit sowie die fehlende Indikation von dem „Status“ der Enzyme ein Hindernis. Dieser beschreibt, ob diese aktiv oder inaktiv sind bzw. die Aktivität zu gering ist, um sie zu messen (Marx et al. 2005). Die Enzymaktivität kann je nach Korngröße und mikrobieller Biomasse durch SOC (soil organic carbon) und TN (total nitrogen), aber auch C/N (Kohlenstoff Stickstoff Verhältnis) und pH verändert werden. Doch noch davor wird die Aktivität durch das Alter und die Größe der Bestände beeinflusst (Yang et al. 2020).

Die extrazellulären Enzyme können dazu verwendet werden, die Bodeneigenschaften zu beschreiben. Ein Grund dafür ist deren Reaktion auf bereits leichte Umweltänderungen und anthropogene Einflüsse. Glucosidase (Glu) wird oft als Schlüssel-Enzym gewählt da diese die Cellulose zerlegt, sowie Mehrfachzucker in Glucose umbaut. Ein Schlüsselenzym ist in seiner Funktion breit gefächert und bezieht andere Prozesse mit ein bzw. ist Grundvoraussetzung für diese. Somit spielt die Glucosidase im Hauptzyklus des organischen Materials eine Rolle. Daher ist das Management der Böden, und dessen organischer Eintrag, einer der Hauptgründe für eine Veränderung in der Enzymaktivität. Die fluorometrische Methode bietet dabei eine tiefere Einsicht bzw. ist sensitiver gegenüber den Werten und

deren Bedeutung für die Auswertung (Moscatelli et al. 2012). N-acetyl- $\beta$ -D-Glucosaminidase (Nac) wird verwendet, um das Wachstum von Pilzgesellschaften festzustellen, sowie als Kennzeiger für ernährungsphysiologische Parameter (Miller et al. 1998). Das Enzym baut Chitin, einen Baustoff der Vegetation, ab, wobei der entstandene Stickstoff in den Boden eingetragen und weiterverwendet wird. Sulfatase (Sul) ist für den Umsatz organischer Schwefelverbindungen verantwortlich und deren Mineralisierung, wobei Sulfat entsteht. Phosphatase (Pho) wird verwendet, da diese mit der Auflage bzw. der Streu stark zusammenhängt und eine höhere Rate einen besseren Abbau der Auflage und Umwandlung in nutzbare Ausgangssubstrate darstellt (Redel et al. 2008). Dabei wird organisch gebundener Phosphor abgespalten. In dieser Arbeit wird saure Phosphatase verwendet, weil die Bodenproben einen niedrigen pH-Wert aufwiesen. Alle vier genannten Enzyme sind hydrolytische Enzyme, welche unter Verbrauch von Wasser Ester-Verbindungen auflösen oder abspalten.

Die fluorimetrische Methode hat vor allem den Vorteil, dass die Messung viel einfacher und genauer als bei den herkömmlichen Methoden ist, während gleichzeitig dasselbe Produkt gemessen wird (Marx et al. 2001). Andere Methoden sind die colometrische oder radiometrische Methoden, welche aber in ihrem Inhalt und Funktion mit dieser Arbeit nicht viel zu tun haben.

### 3.2 Einfluss des Waldmanagements

Die Waldnutzung in Deutschland setzt sich aus der Holznutzung, der Waldweide, der Steunutzung, der Grasnutzung und dem Waldfeldbau zusammen (Abb. 1). Die damit einher gehenden Schäden an Wald und Umwelt sind der Entzug der Nährstoffe, Veränderungen an Baumzusammensetzung und Vegetation, sowie Kernfäule in Nadelbaumbeständen in intensiv genutzten Beständen (Schaal 2014).

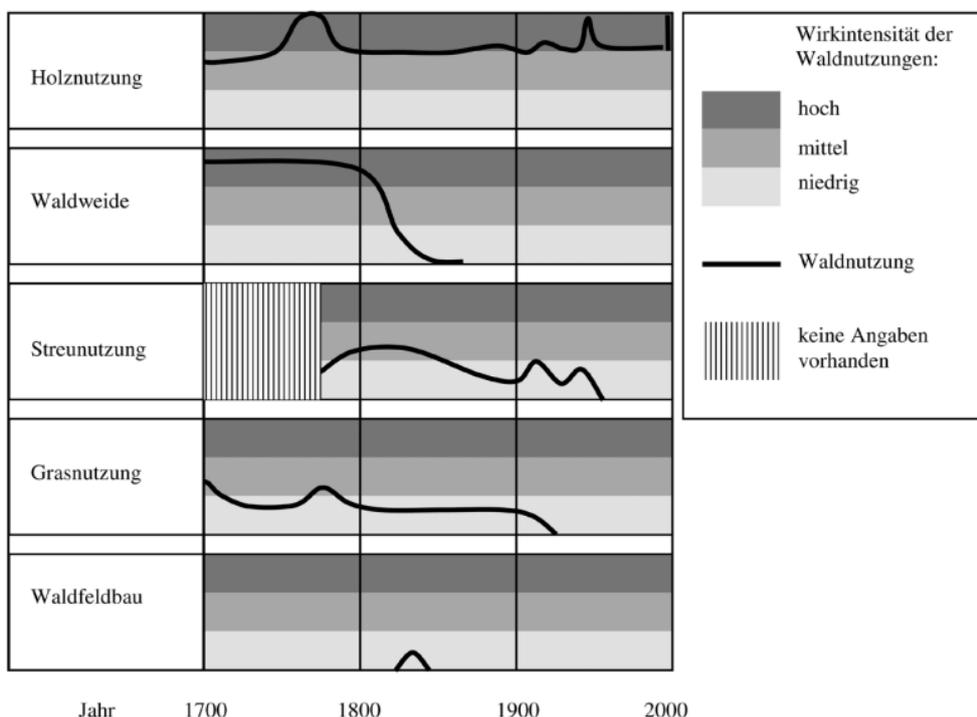


Abb. 1: Abschätzung der Intensität der Waldnutzung im Untersuchungsteilgebiet Alb zwischen 1700 und 2000 (Schaal R. 2014, S. 94)

Die Effekte der Lochhiebe auf Untersuchungsflächen wie in der Schwäbischen Alb, welche in dieser Arbeit als Quelle dienen, durchgeführt wurden, rufen andere Prozesse in den Bodenökosystemen hervor. Die Studie von Wang et al. (2021) unterteilte die untersuchten Flächen vom „*Castanopsis kawakamii*“-Wald in NG (keine Lücke), SG (kleine Lücke), MG (mittelgroße Lücke), LG (große Lücke) und GA (Lückenareal). Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Enzymaktivität in SG am höchsten und in MG am niedrigsten waren. Der Grund dafür waren unter anderem die niedrigen Bodenaktivitäten, geringe Nährstoffzufuhr, sowie die Mikroorganismen, welche mit ihrer Anzahl die Aktivität beeinflussen. In einer anderen Studie wurde davon gesprochen, dass Abholzung und Bewirtschaftung die mikrobielle Aktivität verringert und somit auch die verfügbaren Nährstoffe und deren Kreisläufe, wie Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Phosphor (P) und Schwefel (S). Als Folge sinkt die Enzymaktivität und die Böden werden unfruchtbar. Grund dafür sind die fehlenden Nährstoffe, aus denen die Enzyme hergestellt werden und fehlende Ausgangssubstrate für diese (Dinesh et al. 2004). Der Zeitraum zwischen der Rodung und der Messung von Enzymaktivitäten ist maßgeblich an der Aussagekraft der Ergebnisse beteiligt. So wurde bereits nach einem Jahr im chinesischen Kiefernwald Unterschiede in den Ergebnissen je nach Größe der Gaps gefunden. Dabei wurden die Enzyme und Nährstoffe untersucht, wobei festgestellt wurde, dass die Größe der Lücken zusammen mit dem Messungszeitraum großen Einfluss besitzen. Der Unterschied liegt darin, dass kleine Lücken positive und große Lücke negative Auswirkungen haben (Yang et al. 2017). In der Studie von Lull et al. (2020) wurde auf die Konzentrationen von Kohlenstoff direkt nach dem Lochhieb und sieben Jahre nach der Maßnahme verwiesen. Dabei stellte sich heraus, dass nach längeren Zeiträumen der Einfluss auf die Enzymaktivität nicht mehr so groß ist und eine kontinuierliche Beobachtung in jedem Fall sinnvoll ist.

Ebenfalls positiv kann sich die Ausdünnung von Hochwäldern auf die Mikrobielle Biomasse und Enzymaktivität auswirken. Auch hier ist der Kohlenstoffkreislauf die treibende Kraft dahinter. Zudem kann der pH-Wert und der Wassergehalt eine Rolle spielen, da diese die Nährstoffkonzentration beeinflussen. Dennoch ist auf die richtige Bewirtschaftung zu achten, da ansonsten Probleme auftreten können (Wu et al. 2019).

Der Eintrag von Totholz, sowie dessen Auswirkungen auf die Bodenbildung und Bodenbestandteile, wurde schon weitergehend untersucht. Es wurde ein Anstieg von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> zusammen mit dem Totholzanteil und dessen Zersetzung festgestellt, wodurch die Enzymaktivitäten im Zusammenhang mit der Cellulose-Zersetzung ebenfalls erhöhte Werte aufwies. Die Beeinflussungen durch die Fragmentierung und physikalische Translokation des Totholzeintrages kann positiv, aber auch negativ sein. Eine Einmischung des Menschen kann sich dabei entweder als hilfreich erweisen oder fatal enden (Lagomarsino et al. 2021). Nicht erwünscht ist die Einmischung des Menschen vor allem in Naturschutzgebieten und Bereichen der Erden mit empfindlichem Ökosystem, welches zerstört wird,

### 3.3 Abschnitt Kohlenstoff im Boden

Der organische Kohlenstoff wurde gemessen, da der Kohlenstoffkreislauf der wichtigste Kreislauf ist, da auf ihm viele weitere Kreisläufe und Prozesse aufbauen.

Die CN-Verhältnisse sind insofern grundlegend für die Enzyme, dass die Stoffkreisläufe und somit der Eintrag, Umbau und Ausgabe der Stoffe als treibende Kraft für die Herstellung von Enzymen und deren Prozesse gelten. Das CN-Verhältnis zeigt die relativen Anteile zueinander und wird in der Unterscheidung von fruchtbaren Böden genutzt. Es wird aus den Gewichtsanteilen des Kohlenstoffs und Stickstoffs berechnet.

Die Lochhiebe sorgen für einen geringeren Anteil an Streueintrag und einem geringeren natürlichen Nährstoffeintrag. Vor allem die organischen Kohlenstoff- und totalen Stickstoffgehalte in den oberen Bodenschichten bilden die Grundlage für die Enzyme. Jedoch sinkt dieser Gehalt mit der Abnahme des Waldanteils, da die landwirtschaftliche Nutzung den Oberboden stark beansprucht. Insbesondere die Phosphatase Aktivität und deren pH-Wert zeigen große Veränderungen im Wandel von Wald zu anderen Landnutzungen, da die pH-Werte stark durch die Streu und Bewirtschaftung der Böden abhängen. Die Unterscheidung zwischen saurer und alkalischer Phosphatase erfolgt mittels der Messung des zugehörigen pH-Wertes. Die dazugehörige Studie wurde in Indonesien durchgeführt, in der Nähe des Äquators, daher ist die Vergleichbarkeit nur sehr gering (Salam et al. 2012).

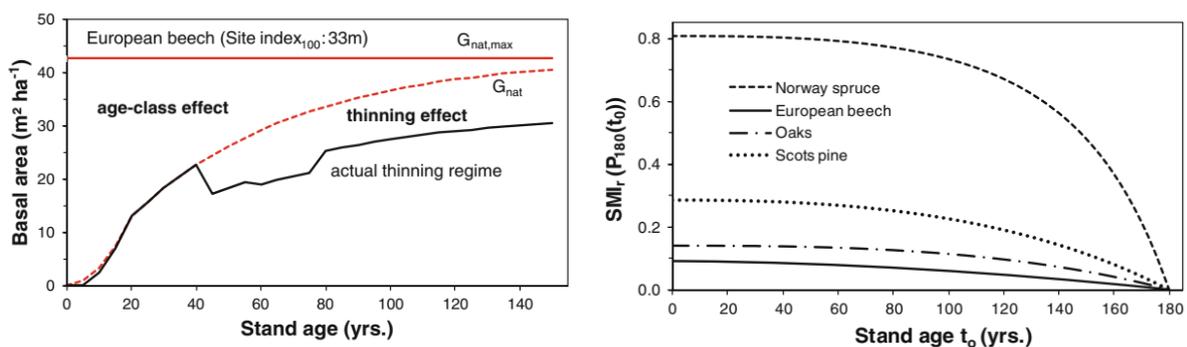


Abb. 2: links: Dichtekomponente der Managementintensität mit Altersklasseneffekt und Ausdünnungseffekt in einem gleich-alten Buchenbestand; rechts: Risikofaktor des Waldmanagements für die europäischen Baumarten mit zunehmenden Alter (Schall und Ammer 2013, S. 386)

Die Abbildung 2 zeigt, dass die Baumarten, das Alter der Bäume und die Experimentvarianten zusammenhängen können. Vor allem die Buche wurde in der Darstellung berücksichtigt. Auf den Untersuchungsflächen AEW22, 28, 42 und 47 herrscht diese vor, weshalb die Effekte übertragen werden können. Als Folge können Aussagen über die Zukunft gemacht werden, was ohne die Vergleichbarkeit und allein mit den Werten dieser Arbeit schwierig gewesen wäre.

### 3.4 Fox Experiment

Die Arbeit bezieht sich auf die FOX-Exploratorien in der Schwäbischen Alb und deren Untersuchung. Hierbei handelt es sich um das „Forest gap Experiment“, welches sich darauf bezieht, wie sich die Bodeneigenschaften ändern, wenn Lochhiebe erfolgten. Die Maßnahme der Lochhiebe bezieht sich auf die Entfernung der stehenden Vegetation und dessen Abtransport weg von der Untersuchungsfläche. Das dabei entstandene Totholz wird auf anderen Untersuchungsflächen abgelegt, um somit die Experimentvariante Totholzflächen zu schaffen.

Die Vegetation in der Schwäbischen Alb beläuft sich auf die Gemeine Fichte (*picea abies*) auf den Plots AEW03, AEW33 und AEW34, der Rotbuche (*Fatus sylvatica*) auf den Plots AEW22, AEW39 und AEW42, und einer Mischung aus Rotbuche und anderen Bäumen auf den Plots AEW28 und AEW47 (Tabelle 1).

## 4 Methodik

### 4.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt in den gemäßigten Breiten mit einer Mischung aus kontinentalem und marinem Klima. Es herrschen 4 Jahreszeiten mit einer Durchschnittsjahrestemperatur von ca. 8°C. Die Koordinaten der untersuchten Flächen liegen bei 48° 23' 6" N 9° 27' 9" E. Das Ausgangsgestein ist Kalkstein aus dem Jura und das Gebiet gehört zum Mittelgebirge bzw. Schichtstufenland.

Die untersuchten Proben entstammen den FOX-Waldflächen (Forest gap experiment) der Schwäbischen Alb. Die Proben wurden von den Untersuchungsflächen (Tabelle 1) entnommen, im Field Lab auf 2 mm gesiebt und tiefgefroren bei -20°C im Institut gelagert. Die Probennahme fand auf den Kontrollflächen (C\_EP), Lochhiebflächen (G), Flächen mit Totholz und Lochhieb (GD) und Totholzflächen (D) der Schwäbischen Alb statt. Hierbei wurden die Plot-Charts der BExIS-Datenbank verwendet, um die richtigen Unterflächen auszuweisen und zu beproben. Die Art der Beprobung unterscheidet sich je nach Experimentvariante.

Es wurden die Plots AEW3 und AEW33 mit Fichtenbeständen und Bodentyp Braunerde, AEW22, AEW28 und AEW47 mit Buchenbeständen und Braunerde, AEW34 und AEW39 mit Fichtenbeständen und Bodentyp Rendzina und AEW42 mit Buchenbeständen und Rendzina untersucht. Der Plot AEW3 wurde zudem als VIP angegeben, was bedeutet, dass er sehr interessant ist in den Untersuchungsergebnissen (Fischer et al. 2010).

Plot_ ID	Vegeta- tion	Boden- typ	Bestands- alter in a	Bewirtschaftungs- intensität SMId	Bewirtschaftungs- intensität SMIr	Struktur Ssm_BA m <sup>2</sup> /ha,
-------------	-----------------	---------------	-------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	---

							ssm_CPA
							m2/ha
AEW	Fichte	Brauner	63	0,3	0,8	43,3	
3		de				10072,6	
AEW	Buche	Brauner	128	0,3	0,1	26,8	
22		de				8406,5	
AEW	Buche	Brauner	73	0,4	0,1	29,6	
28		de				9520,1	
AEW	Fichte	Brauner	53	0,3	0,7	37,6	
33		de				9510,3	
AEW	Fichte	Rendzin	67	0,3	0,8	39,0	
34		a				9288,8	
AEW	Fichte	Rendzin	78	0,4	0,1	29,8	
39		a				10366,8	
AEW	Buche	Rendzin	93	0,4	0,1	25,9	
42		a				8425,2	
AEW	Buche	Brauner	93	0,3	0,1	34,8	
47		de				9719,5	

Tabelle 1: Wichtige Strukturell Merkmale der Untersuchungsstandorte; Schall und Ammer 2013: SMId Density component, wie viel Holz rausgenommen, SMIR Baumart und mögliche Lebenserwartung des Bestandes; BA: Baumstumpffläche, CPA: Fläche der Kronenbedeckung; (Bexis Zentrales Datenmanagement Biodiversitätsexploratorien)

#### 4.2 Beprobung der Kontrollflächen und Aufarbeitung im Field Lab

Die Kontrollflächen werden entlang von zwei Transekten, welche von Nord nach Süd und West nach Ost verlaufen, beprobt. Die Probe setzt sich aus 14 Teilproben zusammen, welche in drei Meter Abständen zum Startpunkt auf beiden Transekten genommen werden. Zuerst wird die Auflage mit Hilfe eines 150x150x150 mm Metallrahmens, welcher mit einem Plastikhammer in den Bodengeslagen wurde, gesammelt. Dabei wurde sie nach unzersetzter Streu (L), Streu, die fermentiert ist oder angefangen hat sich zu zersetzen (Of) und humifizierte organische Auflage (Oh) getrennt und für weitere Untersuchungen aufbewahrt. Als nächster Schritt wird mittels eines Split-Tubes, einer Art zweiteiliges Rohr mit Griffen, welches man auseinandernehmen kann, die Bodenprobe entnommen. Der Durchmesser des Split-Tubes beträgt 48 mm und es wird die Tiefe des obersten Horizontes gemessen und in das Protokoll eingetragen. Danach werden 10 cm des Kerns in eine Tüte gepackt und in einer Kühlbox aufbewahrt. Das entstandene Loch wird mit Füllmaterial aufgefüllt. Diese Prozedur wird für alle 14 Proben wiederholt. Die Proben werden durchmischt, um eine homogene Probe als Repräsentant der Kontrollfläche (C\_EP) zu erhalten. Es wird sehr darauf geachtet, dass die Proben möglichst schnell in das Field Lab geschafft und gesiebt werden, damit mögliche Bodeninhalte nicht durch zu warme

Temperaturen und zu lange Lagerung zerstört werden. Zu kalte Temperaturen gibt es nicht, da die Proben später auch bei  $-20^{\circ}\text{C}$  gelagert werden. Nach dem Sieben auf 4mm werden die Proben für die verschiedenen Abteilungen eingewogen und eingelagert. 20 g der gesiebten Bodenproben werden für eine erste Stickstoffanalyse genutzt, der Rest wird entweder bei  $-20^{\circ}\text{C}$  gelagert und später im Labor bei  $40^{\circ}\text{C}$  getrocknet.

#### 4.3 Beprobung der Flächen mit Experimentvarianten und Aufarbeitung im Field Lab

Die Experimentvarianten Lochhieb (G), Lochhieb mit Totholz (GD) und Totholz (D) werden auf die gleiche Weise beprobt. Die Proben werden in vier Unterflächen im Norden, Osten, Süden und Westen vom Zentrum der Untersuchungsflächen genommen. Es werden immer zwei Metallrahmen in der Südöstlichen Ecke der 2x2 m Unterfläche, im Abstand von 50cm, mit einem Plastikhammer in den Boden geschlagen. Dann wird die organische Auflage nach unzersetzter Streu (L), Streu, die fermentiert ist oder angefangen hat sich zu zersetzen (Of) und humifizierte organische Auflage (Oh) sortiert und in Plastiktüten gesammelt. Als nächster Schritt wird an gleicher Stelle der Split-Tube mit 48 mm Durchmesser mit einem Hammer in den Boden geschlagen und 10 cm des Kerns gesammelt. Das entstandene Loch wird mit Füllmaterial, zumeist Kalksteinmischungen, aufgefüllt. Diese Methode wird auf allen drei Experimentvariantsflächen in den vier Richtungen durchgeführt. Im Field Lab werden die Bodenproben auf 4mm gesiebt und die Wurzeln aussortiert. Nach dem Einwiegen werden die Bodenproben bei  $-20^{\circ}\text{C}$  gelagert, um mögliche Bodenprozesse aufzuhalten.





Abb. 3: AEW42 oben links: C\_EP, oben rechts: Gap, unten links: Deadwood, unten rechts: Gap-Deadwood (Foto: Lea Haugeneder, 27.07.2021)

Als Beispiel für die Untersuchungsflächen im Feld wurde der Plot AEW42 gewählt. Die Abbildung 3 zeigt die reale Umsetzung der Kontrollflächen, Lochhiebe, Totholzeintrag und Totholzeintrag mit Lochhieb.

#### 4.4 Probenaufbereitung

##### 4.4.1 Trocknung der Proben

Die gefrorenen Proben werden bis auf 100 g in Plastiktüten eingewogen und bei 40°C getrocknet. Dies kann bis zu einer Woche dauern. Die vollständige Trocknung der Proben ist daher wichtig, damit die Proben beim Mahlen nicht verkleben.

##### 4.4.2 Mahlen

Das Mahlen der getrockneten Proben erfolgt mittels einer Kugelmühle vom Typ „Mixer Mill (MM) 400 Retsch“, welche zwei Proben gleichzeitig bearbeiten kann. Die Proben werden für drei Minuten bei 25-30 Schüttlern pro Sekunde gemahlen. Bei sandhaltigen Proben kann diese Zeit auf sechs Minuten erhöht werden. Nach dem Mahlen werden die Proben in etikettierte Gläschen mittels Wäge Papier umgefüllt.

#### 4.5 pH-Wert

Für die pH-Wert Messung werden ca. 10 g der getrockneten Proben in 50ml Falcon Tubes eingewogen und mit 25 ml  $\text{CaCl}_2$  (0,01Mol/l) Lösung aufgefüllt und für mindestens eine Stunde überkopf geschüttelt. Vor jeder Messung mit dem pH-Meter muss eine Kalibrierung mit den Standards (im Kühlschrank aufbewahrt) durchgeführt werden und zwischen den Messungen wird die Sonde mit der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung abgespült und abgetrocknet. Es wird eine Einstab-Glaselektrode zur Messung benutzt vom Typ WTW-538.

#### 4.6 Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel

Die CNS Bestimmung folgte der Methode der trockenen Verbrennung mit dem Variomax (Elementar, Hanau, Deutschland). Dabei wird bei über  $900^\circ\text{C}$  unter Entzug des  $\text{CO}_2$  die eingewogene Bodenprobe verbrannt und der Anteil von Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel gemessen.

Für die CNS Analyse werden ca. 250 mg der gemahlene Probe in Keramiköpfchen mit Hilfe einer Feinwaage (Mettler Toledo XPR 205) eingewogen und mit 400-500 mg Wolfram versetzt. Das Wolfram wird mittels eines Schiffchens in die Keramiköpfchen übertragen. Für die Unterscheidung zwischen anorganischem und organischem Kohlenstoff werden zwei Durchläufe gemacht. Der organische Kohlenstoffgehalt wurde aus der Differenz zwischen dem totalen Kohlenstoff und dem anorganischen Kohlenstoff, welcher nach dem Prozess des Vermuffelns in der CNS-Analyse gemessen wurde, berechnet.

#### 4.7 Restwassergehalt

Für die Restwassergehaltbestimmung werden ca. 3 g der gemahlene Proben in kleine Glasfläschchen eingewogen, welche bei  $105^\circ\text{C}$  für zwei Tage getrocknet werden. Danach wird der Rahmen zusammen mit den Gläschen im Exikator gelagert. Nachdem sie abgekühlt sind, können die Proben ausgewogen werden.

Die Werte der Kontrollflächen von AEW 33, 39, 42 und 47 wurden mit Werten aus dem Jahr 2017 berechnet, da diese bessere Messwerte aufwiesen (Max-Planck-Institut für Biogeochemie).

#### 4.8 Geschätzter Tongehalt

Aus den Werten der Restwasseranalyse wurde der geschätzte Tongehalt berechnet, welcher im Ergebnisteil weiter ausgeführt und interpretiert wird. Die dafür genutzte Funktion wurde aus Wäldchen et al. (2012) genommen. Die verwendete Formel lautet:  $y = 13,2x + 15,7$ . Dabei ist die Variable „x“ der einzusetzende Restwassergehalt und „y“ der geschätzte Tongehalt in %.

## 4.9 Enzymanalyse

Die untersuchten Proben der Enzymanalyse wurden bei  $-20^{\circ}\text{C}$  gelagert und für die Analyse aufbereitet. Die gemessenen Enzyme sind Methylumbelliferyl- $\beta$ -D-Glucosidase (Glu), 4-Methylumbelliferyl-N-Acetyl- $\beta$ -D-Glucosaminidase (Nac), 4-Methylumbelliferylsulfate (Sul) und 4-Methylumbelliferyl-Phosphatase (Pho). Die fluorometrische Messung wurde nach dem Prinzip von Marx et al. (2001) durchgeführt. Für die Enzymanalyse wurden folgende Lösungen vorbereitet. Der MES-Puffer (pH 6,1), welcher durch das Auflösen von 20,673 g Hemisodium Salz in einem Liter autoklaviertem Wasser und anschließendem Autoklavieren hergestellt wurde. Dazu kommt der MUF-Standard. Dieser wird aus 17,62 mg Methylumbelliferone, welches mit 5ml Methanol versetzt und mit autoklaviertem Wasser auf 10ml in einem Kolben aufgefüllt wird, hergestellt. Die daraus resultierende Lösung dient als Vorrat für die 100  $\mu\text{l}$  und 10  $\mu\text{l}$  Verdünnungen. Die 100  $\mu\text{l}$ -Verdünnung wird aus 500  $\mu\text{l}$  der Vorratslösung und 49,5 ml MES-Puffer hergestellt, welche in einem 50 ml Kolben aufbewahrt wird. Die Herstellung der 10  $\mu\text{l}$ -Verdünnung verläuft über einen Zwischenschritt bei welchem 400  $\mu\text{l}$  der Vorratslösung und 3600  $\mu\text{l}$  des MES-Puffers gemischt werden. Von dieser Lösung werden 500  $\mu\text{l}$  in einem 50 ml Kolben gegeben und mit MES-Puffer aufgefüllt.

Für die Herstellung der verschiedenen Substratlösungen werden jeweils eine festgelegte Menge des Ausgangssubstrates abgewogen und mit anderen Chemikalien versetzt. Für Methylumbelliferyl- $\beta$ -D-Glucosidase (Glu) wird 0,033831g des Substrates Methylumbelliferyl- $\beta$ -D-Glucoside, für 4-Methylumbelliferyl-N-Acetyl- $\beta$ -D-Glucosaminidase (Nac) wird 0,037936 g des Substrates 4-Methylumbelliferyl-N-Acetyl- $\beta$ -D-Glucosaminide, für 4-Methylumbelliferylsulfatase (Sul) wird 0,029432 g des Substrates 4-Methylumbelliferylsulfate und für 4-Methylumbelliferyl-Phosphatase (Pho) wird 0,030011 g des Substrates 4-Methylumbelliferyl-Phosphate in einem Schiffchen eingewogen. Die Substrate werden in 10 ml PP-Tubes übertragen und in 9700  $\mu\text{l}$  autoklaviertem Wasser und 300  $\mu\text{l}$  Dimethyl Sulfoxides gelöst und so lange gemischt, bis keine Festbestandteile mehr zu erkennen sind. Diese 10 ml Tubes dienen als Vorratslösung, aus welcher die Arbeitslösung hergestellt wird. Dazu werden 1 ml der Vorratslösung und 9 ml MES-Puffer in weitere 10 ml PP-Tubes gefüllt und geschüttelt.

Während der Enzymmessung selbst, wird 1 g der gefrorenen Bodenprobe in ein 150ml Becherglas eingewogen und mit 50ml autoklaviertem Wasser versetzt. Danach wird die Lösung für 1,32 Minuten mit dem Ultraschallstab (60 J/ml-1) behandelt. Anschließend werden mit Hilfe einer Mehrfachpipette 50  $\mu\text{l}$  der Lösung in Microplates übertragen. Besonders ist dabei darauf zu achten, dass die Proben nicht kontaminiert, also vermengt werden. Es werden zwei Enzymplatten und eine Standardplatte pipettiert. Die erste Enzymplatte wird in jeder Reihe 12-mal mit der Lösung befüllt wohingegen bei der zweiten Platte die rechte Hälfte mit 48,5 ml autoklaviertem Wasser verdünnten Lösungen befüllt wird. Der Grund für die Verdünnung der Proben ist die verringerte Häufigkeit der Ausreißer in der Messung von 4-Methylumbelliferyl-Phosphatase. Nach dem Pipettieren werden die Microplates in den

Pipettierroboter (200, Tecan, Crailsheim, Germany) gegeben, welcher die Proben mit 50 µl MES-Puffer und 10 µl Substratlösung versetzt. Die Substratlösungen Glu und Nac werden auf der ersten Enzymplatte, Sul und Pho auf der zweiten Platte gemessen (Abb. 4). Die dazugehörige Standardplatte wird mit 0, 10, 20, 50, 80 und 120 µl MUF-Standard versetzt und anschließend noch mit 150, 140, 130, 100, 70 und 30 µl MES-Puffer. Die Plates werden danach für eine halbe Stunde bei 30°C und unter schütteln inkubiert. Die erste Messung der Fluoreszenz erfolgt nach diesen 30 Minuten und wird als Startpunkt Null dokumentiert. Die weiteren Messungen erfolgen 30, 60, 120 und 180 Minuten nach diesem, wobei die genaue Zeitführung wichtig ist zur Vermeidung von Fehlern. Die Platten werden während der Inkubation abgedeckt, um Verunreinigungen zu vermeiden. Die Auswertung erfolgt über Excel oder R-Studio. Die Enzymaktivitäten werden auf die getrockneten Proben bezogen, weil bereits in der Berechnung der Aktivität der dry-matter-content verwendet wurde. Grund dafür ist die Unabhängigkeit zum Wassergehalt.

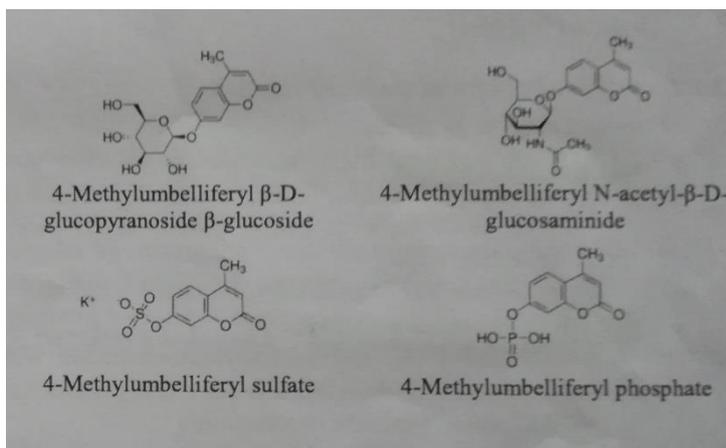


Abb. 4: Strukturformeln der vier gemessenen Enzyme (Foto Lea Haugeneder 10.09.2021)

#### 4.10 Datenanalyse und Auswertung

Mit Hilfe der diagnostischen Plots in R-Studio (R i386 3.5.1 R x64 3.5.1) wurden neben den Abbildungen und Rechenergebnissen auch die Bedingungen für die ANOVA untersucht. Die ANOVA selbst wurde dafür verwendet die Repräsentativität der Proben und deren Signifikanz für die Zusammenhänge und weitere Berechnungen darzustellen. Die Ergebnisse werden im Ergebnisteil genauer dargestellt und beschrieben und anschließend in der Diskussion in den Kontext der Forschung eingeordnet.

Die Bedingungen für die ANOVA sind die Normalverteilung der Daten, die Unabhängigkeit und Varianzhomogenität. Die Unabhängigkeit ist, bis auf die Schwefelverteilung, bei allen Untersuchungen gegeben. Grund dafür ist die Probennahme mit zwei Proben pro Unterfläche. Wodurch die Vergleichbarkeit bei gleichzeitiger Unabhängigkeit der Proben gegeben ist. Gleichzeitig ist der Abstand dazwischen groß genug für Unterschiede in der Enzymaktivität. Für pH-Werte, Glu Enzymverteilung,

Pho Enzymverteilung, Total Carbon Verteilung und Stickstoff Verteilung ist die Normalverteilung nicht oder nur teilweise gegeben.

## 5 Ergebnisteil

### 5.1 pH-Werte

Abbildung 1 zeigt die pH-Werte in 0-10cm Bodentiefe der jeweiligen Untersuchungsflächen. Die pH-Werte liegen zwischen 3,6 und 6,5, im leicht sauren bis extrem sauren pH-Wert Bereich (Tabelle 2). Die pH-Werte der Böden liegen somit überwiegend im Wirkungsbereich der Silikat- oder Austausch Puffer. Die niedrigsten pH-Werte weisen die Flächen AEW3 und AEW34 auf, was damit zusammenhängen könnte, dass hier Fichten als Hauptbaumart vorkommen. Nadelbaumbestände haben in der Regel niedrigere pH-Werte als Laubbaumbestände (z.B. AEW22 und AEW42). Auf den Flächen mit Lochhieb sind die mittleren pH-Werte mit Werten von 4,8 (G) und 4,9 (GD) geringfügig niedriger als in den geschlossenen Beständen mit Werten von 5,0 (D) und 5,2 (C\_EP). Ein konsistenter Trend kann jedoch nicht erkannt werden. Nur sind die pH-Werte auf den Lochhieblflächen konsistent niedriger. So sind beispielsweise in AEW39 und AEW28 die pH-Werte auf den Kontrollflächen höher als auf den anderen Flächen. Zudem ergibt die ANOVA unter Berücksichtigung der Kontrollflächen (C\_EP), dass der Effekt der Behandlung auf den pH-Wert nicht signifikant ist.

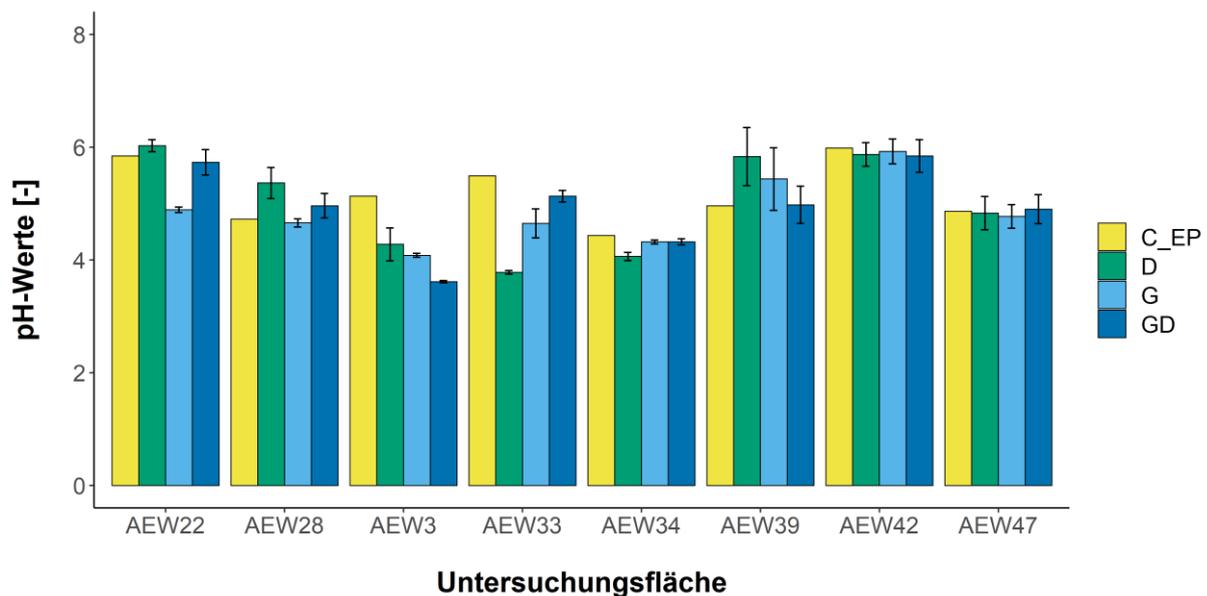


Abb. 5: pH-Werte auf den verschiedenen Untersuchungsflächen; C\_EP = Kontrollflächen, D = Totholzflächen, G = Lochhieb, GD = Totholzflächen mit Lochhieb

	pH-Wert		Geschätzter Tongehalt		C/N-Verhältnis		Corg	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
C_EP	5,2	0,6	72,7	8,3	13,5	0,6	6,4	1,1

D	5,0	1,0	57,7	14,4	13,2	0,9	6,6	2,9
G	4,8	0,7	57,3	12,1	13,0	0,8	5,3	1,22
GD	4,9	0,8	62,3	14,7	13,5	1,2	6,1	1,7

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen und oben dargestellten Werte: pH-Wert, geschätzter Tongehalt, C/N-Verhältnis, organischer Tongehalt; MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung

## 5.2 Geschätzter Tongehalt

Der geschätzte Tongehalt ist wichtig für die Textur. Zudem gibt er Aufschluss über Anteil an Ton im Boden die Nährstoffverfügbarkeit und den Wasserhaushalt bzw. wie stark er vom Wasserfluss beeinflusst wird. Der Tongehalt wird nur betrachtet, um sicherzustellen, dass die Untersuchungsflächen überhaupt vergleichbar sind. Er wurde aus den Restwassergehalten berechnet. Je nach Experimentvariante und Untersuchungsfläche gibt es Unterschiede. Dabei sind vor allem die Untersuchungsflächen AEW22, 28, 33 und 34 besonders inhomogen. Die mittleren Werte für C\_EP liegen bei 69,9 %, die für D bei 57,7 %, die für G bei 56,9 % und die für GD bei 62,3 %. Damit haben die Kontrollflächen die höchsten Werte, während sich die für D und G fast nicht voneinander unterscheiden. Die Flächen sind, bis auf die Kontrollflächen vergleichbar. Der Wertebereich liegt zwischen dem Minimum 36,3 % mit und dem Maximum mit 94,4 % und weist auf eine inhomogene Verteilung hin. Die Tongehalte auf den Kontrollflächen ist besonders auffällig und weisen auf eine Veränderung in der Textur, dem Wasserhaushalt und der Nährstoffverfügbarkeit hin.

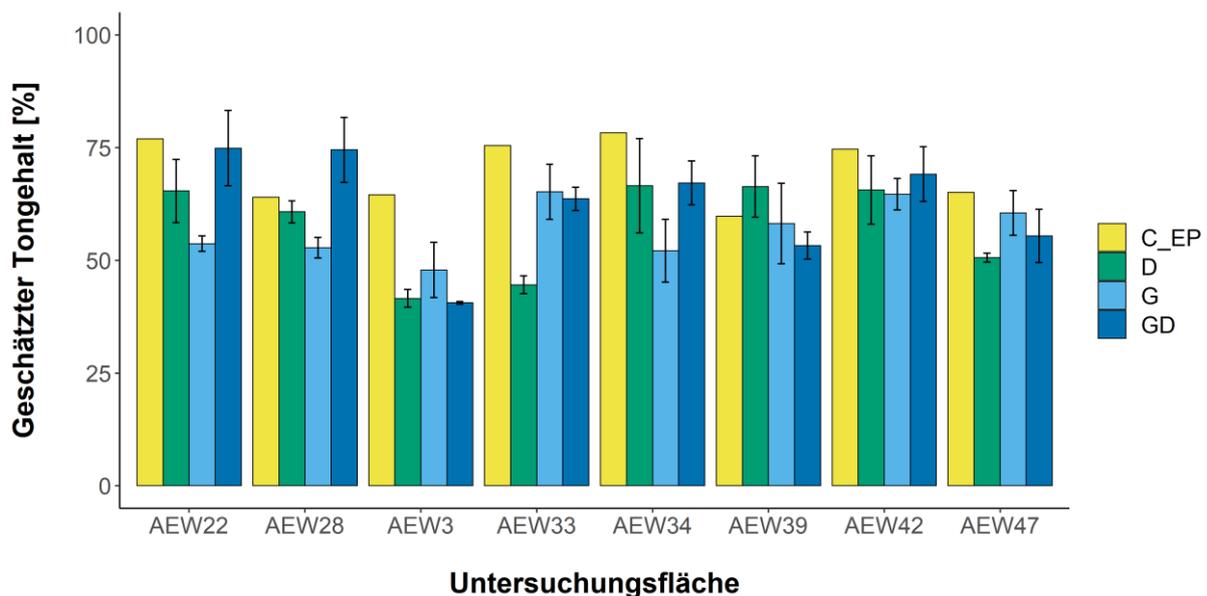


Abb. 6: geschätzter Tongehalt auf den verschiedenen Untersuchungsflächen; C\_EP = Kontrollflächen, D = Totholzflächen, G = Lochhieb, GD = Totholzflächen mit Lochhieb

### 5.3 Organischer Kohlenstoff

Der Anteil des organischen Kohlenstoffes in den Bodenproben wurde gemessen, um etwaige Zusammenhänge zwischen den C-Gehalten und der Enzymaktivität zu erkennen. Er wurde auch gemessen, um zu sehen, ob die Lochhiebe einen Einfluss auf den C-Gehalt haben. Die Flächen mit den Lochhieben bauen beispielsweise den Kohlenstoff schneller ab als andere Untersuchungsflächen. Dabei wird die Interpretation unter Ausschluss der Werte von AEW39\_D vollzogen, da hier zu starke Ausreißer zu finden sind. Die Abbildung 6 zeigt, dass insgesamt die Verteilung des organischen Kohlenstoffes nicht homogen ist. Der Wertebereich der Messung liegt zwischen 3,1 und 15,9 g/kg, was dies belegt. Die andere Hälfte sind AEW28, AEW33, AEW34 und AEW39. Dabei stechen vor allem die Werte der Flächen mit Totholzeintrag (D) mit Werten im Durchschnitt von 6,6 g/kg heraus. Ebenso hohe Werte sind auf den Kontrollflächen (C\_EP) zu finden mit 6,4 g/kg. Niedrigere Werte sind auf den Flächen mit Lochhieb und Totholzeintrag (GD) zu finden, welche im Durchschnitt bei 6,1 g/kg liegen. Die niedrigsten und am meisten abweichenden Werte von 5,3 g/kg sind auf den Flächen mit Lochhieb (G) zu erkennen. Die ANOVA zeigt unter der Berücksichtigung der C\_EP an, dass die Experimentvarianten großen Einfluss auf den Anteil des organischen Kohlenstoffes haben. Ebenso legt die lineare Regression des organischen Kohlenstoffes nahe, dass die Zusammenhänge zwischen dem Restwassergehalt bzw. dem Geschätzten Tongehalt flächenspezifisch, aber auch experimentvariantenspezifisch Einfluss ausüben.

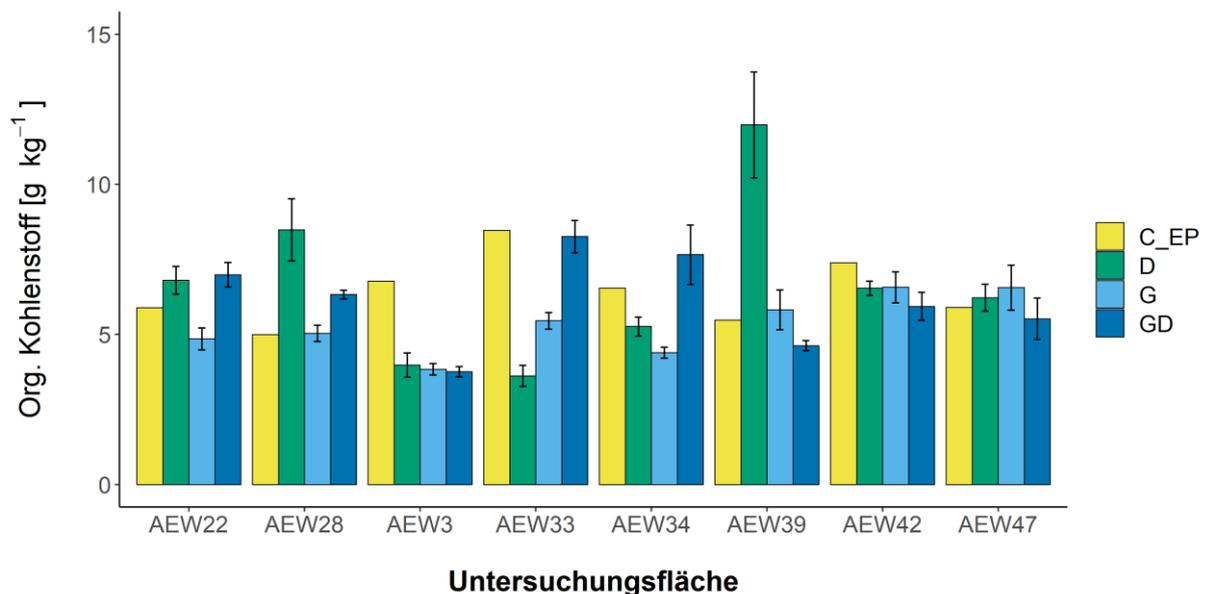


Abb. 7: organischer Kohlenstoff auf den verschiedenen Untersuchungsflächen; C\_EP = Kontrollflächen, D = Totholzflächen, G = Lochhieb, GD = Totholzflächen mit Lochhieb

### 5.4 C/N-Verhältnis

Böden mit engem C/N-Verhältnis sind in der Regel nährstoffreich und fruchtbar, während ein weites C/N-Verhältnis auf eine geringe biologische Aktivität des Bodens und den Eintrag von stickstoffarmer

Streu hinweist. Zudem beschreibt das C/N-Verhältnis die Gewichtsanteile von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden und dessen Verhältnis zueinander. Die Abbildung 4 zeigt, dass auf den Untersuchungsflächen das C/N-Verhältnis in einem engen Bereich liegt. Die Werte variieren im Wertebereich von 11,5 und 16,8. Auf den Flächen mit Nadelbäumen liegt das C/N-Verhältnis im Durchschnitt etwas höher als auf den Flächen mit Laubbäumen. Die Werte der Flächen mit Lochhieb sind größtenteils mit 13,0 etwas niedriger als in der Kontrolle, bei der die C/N-Verhältnisse im Durchschnitt bei 13,5 liegen. Im gleichen Wertebereich liegen die Flächen mit Lochhieb und Totholzeintrag, wohingegen die Werte der Totholzflächen im Durchschnitt bei 13,2 liegen. Dementsprechend zeigt die ANOVA einen signifikanten Effekt der Behandlung an.

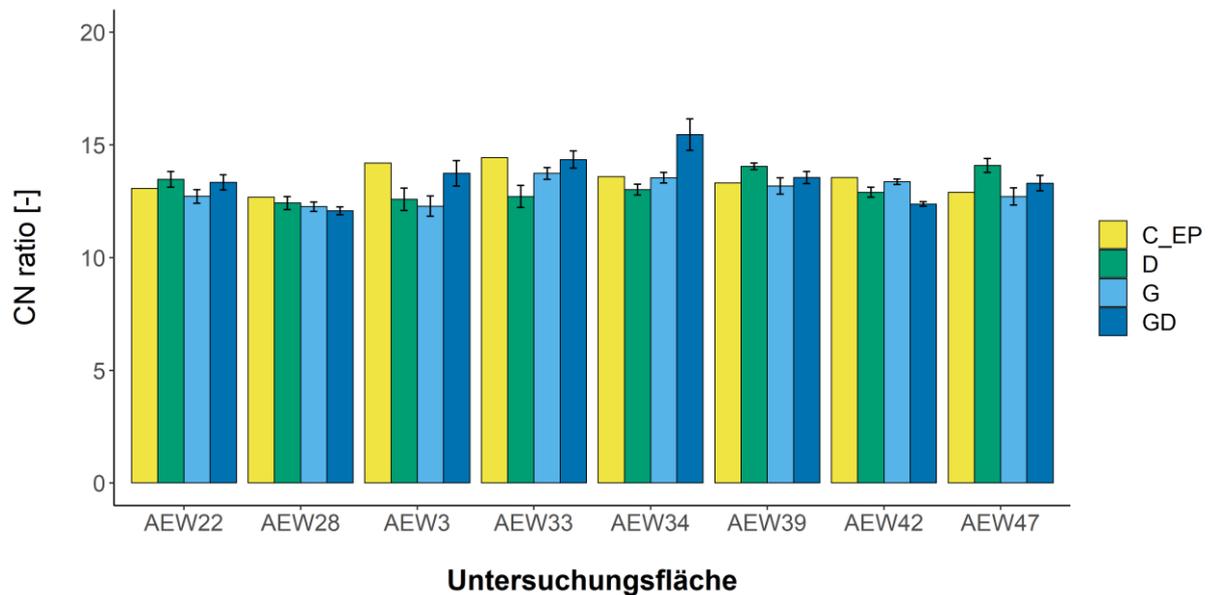


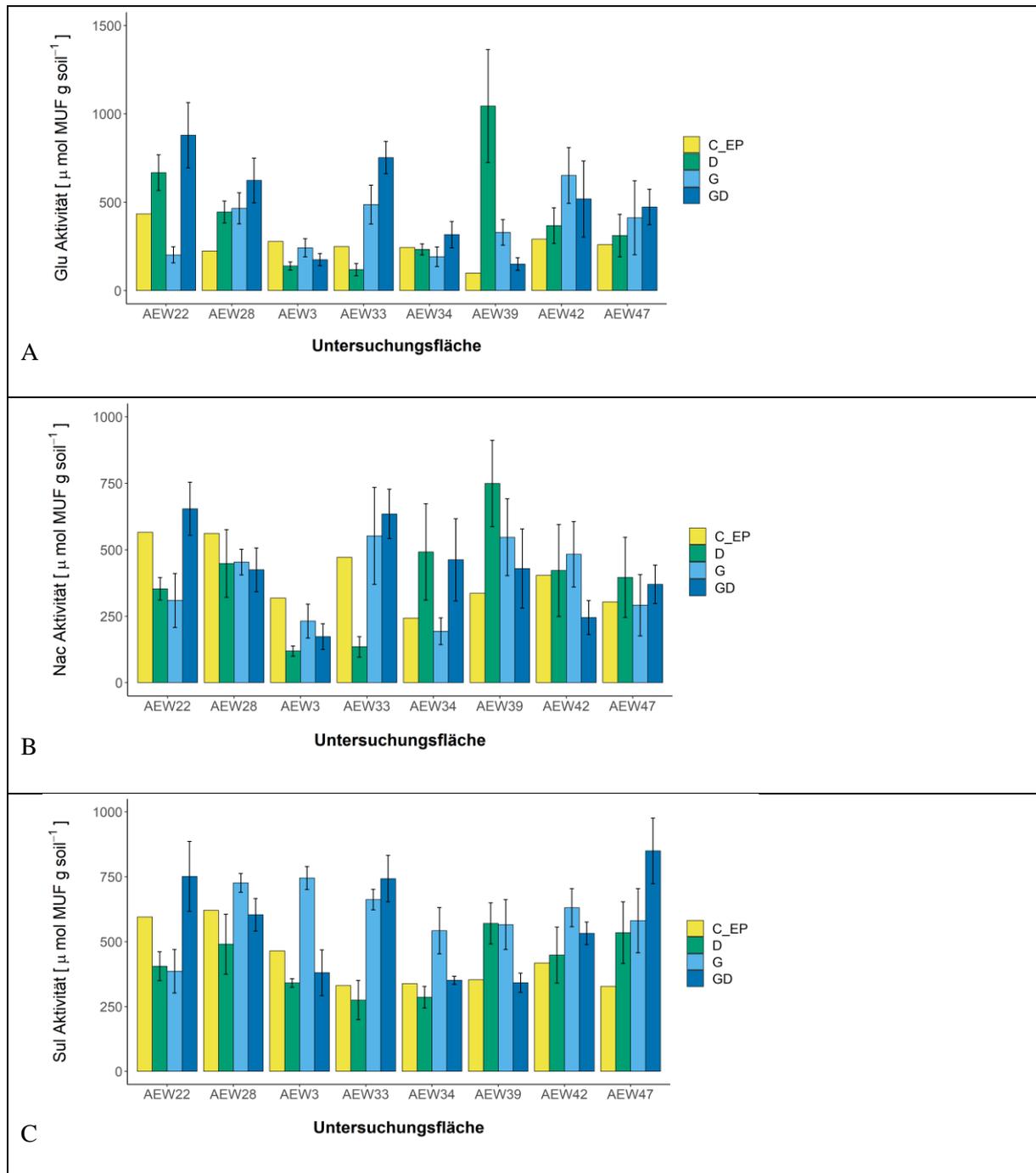
Abb. 8: C/N-Verhältnis der verschiedenen Untersuchungsflächen; C\_EP = Kontrollflächen, D = Totholzflächen, G = Lochhieb, GD = Totholzflächen mit Lochhieb

ANOVA der wichtigen Parameter

	pH-Wert			Geschätzter Tongehalt		C/N-Verhältnis		Corg	
	Df	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
EP_Plotid	7	5,3	22,3	0,2	6,4	3,6	7,2	0,3	11,6
Treatment	3	0,3	1,3	0,1	4,2**	1,8	3,7*	0,2	6,6***
EP_Plotid: Treatment	21	0,6	2,4	0,05	1,6	1,4	2,9	0,2	8,2
Residuals	72	0,2		0,03		0,5		0,03	

Tabelle 3: ANOVA Ergebnisse der pH-Werte, des geschätzten Tongehaltes, des C/N-Verhältnisses und des organischen Kohlenstoffs; Df = Freiheitsgrade, MS = mittleres Abweichungsquadrat, F = F-Werte

### 5.5 Enzyme



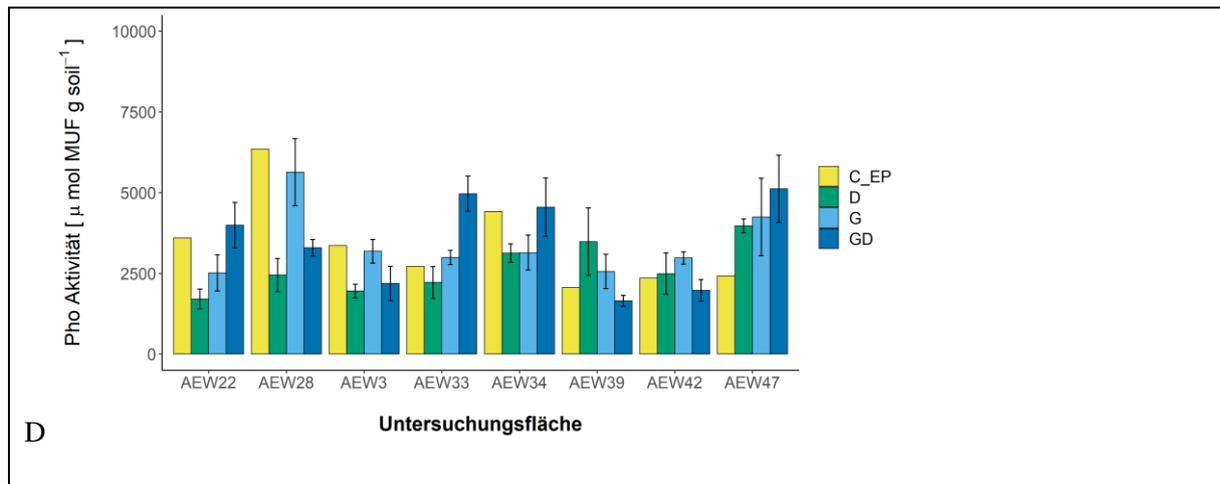


Abb. 9: A: Glu-Aktivität der verschiedenen Untersuchungsflächen, B: Nac-Aktivität der unterschiedlichen Untersuchungsflächen, C: Sul-Aktivität der verschiedenen Untersuchungsflächen, D: Pho-Aktivität der unterschiedlichen Untersuchungsflächen; C\_EP = Kontrollflächen, D = Totholzflächen, G = Lochhieb, GD = Totholzflächen mit Lochhieb

#### ANOVA der Enzyme

	Glu			Nac		Sul		Pho	
	Df	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
EP_Plotid	7	1,5	5,4	1,4	4,0	0,3	2,2	0,7	4,1
Treatment	3	0,5	1,8	0,3	0,8	1,1	8,8***	0,5	2,8*
Treatment: EP_Plotid	21	1,1	4,1	0,6	1,7	0,3	2,3	0,3	1,9
Residuen	72	0,3		0,4		0,1		0,2	

Tabelle 4: ANOVA Ergebnisse der Enzyme Glu, Nach, Sul und Phi; Df = Freiheitsgrade, MS = mittlere Abweichungsquadrate, F = F-Wert

#### 5.5.1 Glu-Aktivität

Die Glu-Enzymaktivität wurde gemessen, um die Umsatzrate von Cellulose und anderen Kohlenstoffverbindungen zu messen. Glu gilt als eines der wichtigsten Enzyme in der Messung von extrazellulären Enzymen, da es als Indikator für die Bodenprozesse gilt. Sie zersetzt Zwei- und Mehrfachzucker und Glukose, welche der Pflanze zur Verfügung steht. Der Wertebereich der Glu-Aktivität erstreckt sich von 54,1 bis 1728,0 nmol/g. Die geringsten Werte sind auf den Kontrollflächen mit 259,6 nmol/g, wohingegen die höchste Aktivität auf den GD-Flächen mit 486,1 nmol/g zu finden ist. Die Totholzflächen haben mit 415,7 nmol/g mehr Aktivität als G mit 372,6 nmol/g und zeigt einen gewissen Einfluss des Totholzes auf die Enzymaktivitäten, jedoch ist die ANOVA nicht signifikant. Die Glu-Aktivität zeigt vor allem auf den Flächen mit Lochhieb und gleichzeitigem Totholzeintrag hohe

Werte, mit Ausnahme des AEW39. Hier liegen die Werte der Experimentvariante D weit über denen der Kontrollfläche. Insgesamt ist die Aktivität auf den Kontrollflächen (C\_EP) bis auf die Fläche AEW33 recht gering (Abb. 9A). Folglich ist zu sagen, dass der Einfluss der Experimentvarianten signifikant ist. Die lineare Regression zeigt hingegen einen stark positiven Verlauf in Bezug auf den Kohlenstoff. Daraus folgt, dass der organische Kohlenstoffgehalt im Boden stark mit der Glu-Aktivität zusammenhängt. Die lineare Regression zeigt, inwieweit Werte oder Parameter zusammenhängen bzw. welche Art der Beziehung zwischen ihnen besteht. Die lineare Regression der Glu-Aktivität mit Sul und Pho zeigt einen positiven Verlauf, wobei die Sul eine größere Steigung und Ausreißer auf den D und GD-Flächen aufweist. Die Pho zeigt Ausreißer auf allen Flächen und eine größere Streuung (Abb. 10).

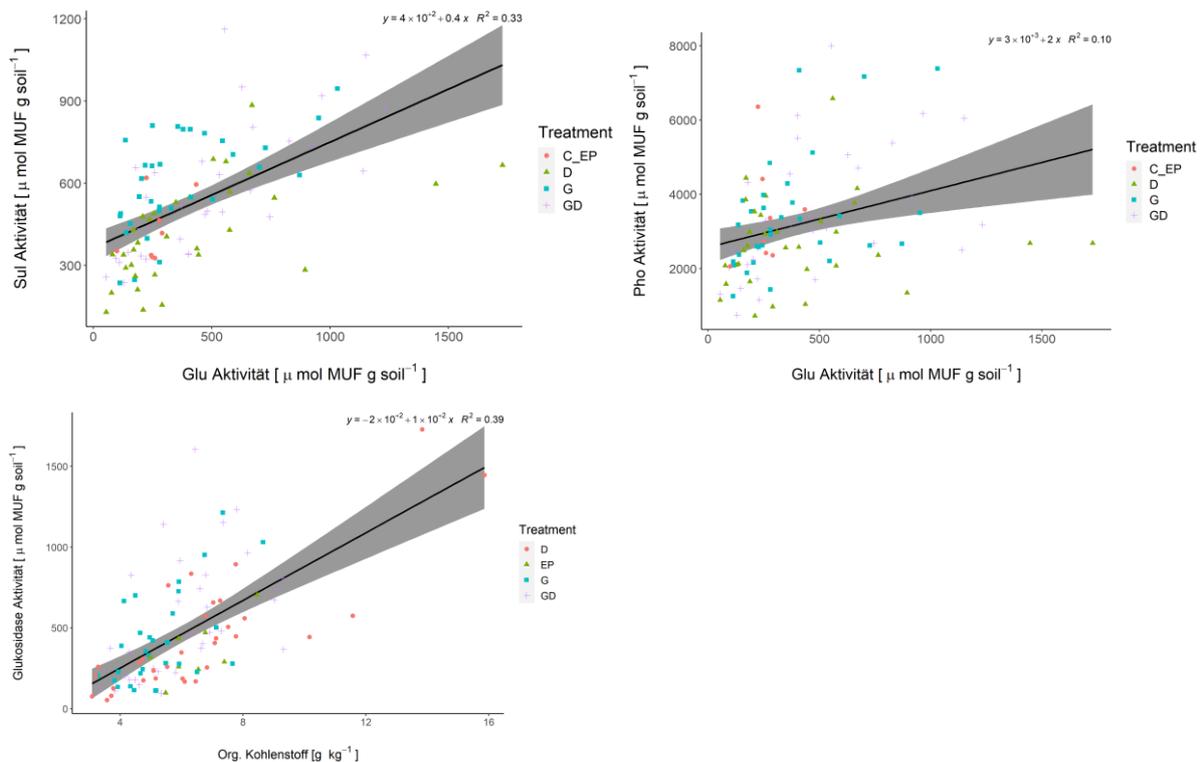


Abb. 10: lineare Regressionen der Glu-Aktivität mit der Sul- und der Pho-Aktivität, sowie dem organischen Kohlenstoff

### 5.5.2 Nac-Aktivität

Die Nac-Aktivität wurde gemessen, da dieses Enzym ein weiterer Indikator für die Ab- und Umbauprozesse im Boden ist. Durch die Nac werden im Boden bestehende Pilzgesellschaften um- und abgebaut, wobei pflanzennutzbarer Stickstoff entsteht. Die Aktivität zeigt, inwieweit der im Boden und der Streu verfügbare Stickstoff prozessiert werden kann, um dann wieder von der Flora genutzt werden zu können. Der Wertebereich der Nac-Aktivität reicht von 63,52 nmol/g bis zu dem Höchstwert 1184,3 nmol/g. Abbildung 9B zeigt, dass die geringste Aktivität auf den Flächen mit Lochhieb mit 382,8 nmol/g zu finden ist. Die Totholzflächen mit 389,4 nmol/g liegen etwas darüber. Die Flächen mit Lochhieb bei gleichzeitigem Totholzeintrag mit 423,0 nmol/g liegen recht nah an den Kontrollflächen mit 400,7

nmol/g und zeigen höhere Aktivitäten. Da es keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Experimentvarianten gibt, ist eine Aussage über diese nicht möglich. Die Nac-Aktivität ist ähnlich verteilt wie die Glu-Aktivität, mit dem Unterschied, dass die Werte generell niedriger sind. Insbesondere AEW3, AEW33 und AEW39 weisen starke Ähnlichkeit mit der Verteilung der Glu-Aktivität auf. Die ANOVA ist nicht signifikant, was auf keinen großen Einfluss der Experimentvarianten auf die Aktivität hinweist. Die linearen Regressionen des organischen Kohlenstoffs und der Glu-Aktivität mit der Nac-Aktivität zeigen einen positiven Verlauf. Des Weiteren ist die Verteilung ähnlich der der Glu-Aktivität und die Ausreißer sind, bis auf die Kontrollflächen, auf allen Untersuchungsflächen zu finden (Abb. 9B).

Die Nac-Aktivität und die Sul-Aktivität wurden innerhalb einer linearen Regression als insoweit zusammenhängend festgestellt, dass beide gewisse Überschneidungspunkte haben. Die weite Streuung der Werte erschwert eine Aussage über mögliche Zusammenhänge. Die lineare Regression der Nac-Aktivität mit der Pho-Aktivität hingegen zeigt nur einen leicht positiven Verlauf, was auf keine großen Zusammenhänge zwischen den beiden Enzymen zurückschließen lässt (Abb. 11). Die linearen Regressionen mit der Pho-Aktivität müssen zudem immer unter der Beachtung der pH-Werte betrachtet werden, da die verwendete saure Phosphatase stark von diesem beeinflusst wird. Der Grund dafür ist die Abhängigkeit der Pho-Aktivität vom pH-Wert, da diese bei dem hier gemessenen Enzym im niedrigen Bereich eine höhere Aktivität aufweist. Ausreißer konnten auf allen Flächen und Experimentvarianten erkannt werden.

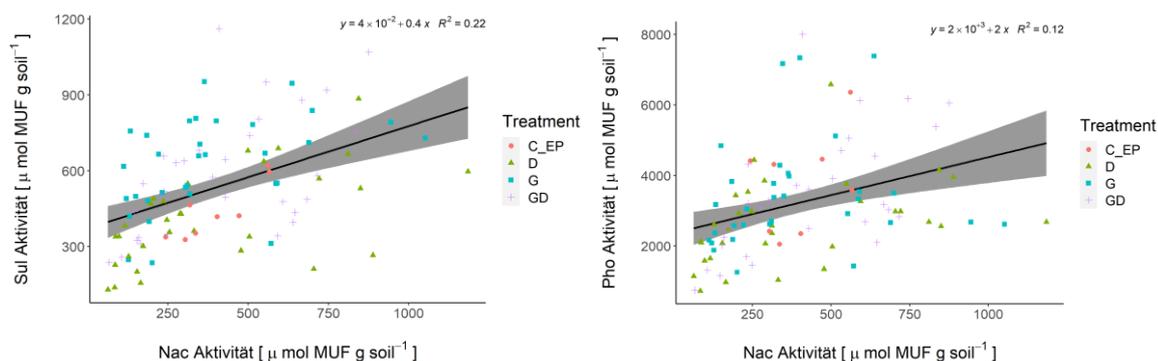


Abb. 11: lineare Regression der Nac-Aktivität mit der Sul- und der Pho-Aktivität

### 5.5.3 Sul-Aktivität

Die Messung der Sul-Aktivität erfolgte, um die Umsetzungsrate der Schwefelverbindungen zu messen. Sie zersetzt durch Hydrolyse Sulfatester in Schwefel und Alkohol. Zudem wurde auch noch der Schwefelanteil in den Bodenproben gemessen, gemeinsam mit den Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten. Der Wertebereich der Sul-Aktivität liegt zwischen dem Minimum bei 129,2 nmol/g und dem Maximum bei 1161,4 nmol/g. Die Abbildung (Abb. 9C) zeigt, dass die höchste Aktivität in den Proben der Lochhiebflächen mit durchschnittlichen Werten von 605,1 nmol/g und den Flächen mit Lochhieb und Totholzeintrag mit 569,2 nmol/g gefunden wurde. Die reinen Totholzflächen haben einen

Durchschnittswert von 418,9 nmol/g und liegen damit am niedrigsten. Die Kontrollflächen liegen mit 431,0 nmol/g dazwischen. Die Flächen mit nur Totholzeintrag liegen mit ihren Werten am nächsten zu den Kontrollflächen. Dies weist darauf hin, dass der Effekt des Lochhiebs, also das Ansteigen oder Abfallen der Werte, von dem Eintrag des Totholzes abgemildert wird. Es besteht zudem ein positiver Zusammenhang zwischen dem Lochhieb und der Sul-Aktivität. Die ANOVA ist hoch signifikant, wobei hier insbesondere die Flächen mit Lücken als Experimentvariante hohe Sul Werte aufweisen, welche stark von denen der Kontrollflächen abweichen. Die lineare Regression des organischen Kohlenstoffs mit der Sul-Aktivität hingegen zeigt nur einen leicht positiven Zusammenhang. Die lineare Regression der Sul-Aktivität mit der Pho-Aktivität zeigt einen stark positiven Verlauf. Dies weist auf einen starken Zusammenhang zwischen den beiden Enzymen hin, welcher sich in den hohen Werten der Flächen mit Lochhieb äußert. Je höher die Steigung, desto größer der Zusammenhang. Ausreißer sind auf allen Untersuchungsflächen und Experimentvarianten zu finden. Die lineare Regression der Sul-Aktivität mit dem Schwefelgehalt in den Bodenproben zeigt nur einen leicht positiven Zusammenhang und stark akkumulierte Wertebereiche. Die Verteilung der Werte beläuft sich auf ca. fünf Linien des S-Gehaltes mit verschiedenen Werten der Sul-Aktivität (Abb. 12). Daraus Schlüsse zu ziehen wäre äußerst kritisch kann nur unter der Bedingung erfolgen, dass ganz klar ersichtlich ist, warum die Schwefelwerte in einer stufenweisen Verteilung sind. Dies zu diskutieren, würde jedoch Maßnahmen erfordern, welche den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden.

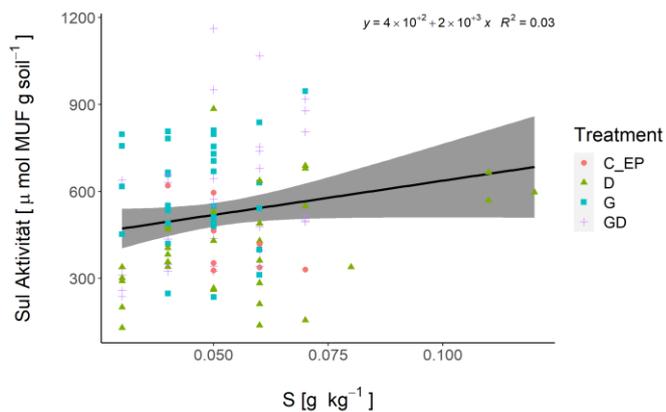


Abb. 12: lineare Regression der Sul-Aktivität und Schwefel

#### 5.5.4 Pho-Aktivität

Die Pho-Aktivität wurde gemessen aufgrund ihrer Phosphorumsetzung. Sie spaltet durch Hydrolyse von Phosphorsäureester und Polyphosphaten Phosphorsäure ab. Zudem ist die Verteilung des Phosphors und dessen ständig wechselnde Bindung an verschiedene Nährstoffe zu erwähnen, was eine Messung sehr divers darstellen kann. Grund dafür ist die Differenzierung der Quellen des Phosphors und dessen abweichende Ab- und Umbauraten als Folge davon. Wie in der Abbildung 9D dargestellt, liegt der Wertebereich der Pho-Aktivität zwischen 723,0 und 7998,0 nmol/g. Die Verteilung der Pho-Aktivität bei den Kontrollflächen liegt mit durchschnittlichen Werten von 3410,7 nmol/g knapp über den Flächen

mit Lochhieb mit 3408,2 nmol/g. Die Flächen mit Lochhieb und Totholzeintrag sind mit durchschnittlichen Werten von 3468,6 nmol/g hoch, wohingegen bei reinen Totholzflächen nur eine geringere Aktivität mit durchschnittlichen Werten von 2675,9 nmol/g zu erkennen ist. Aus diesen Werten kann man folgern, dass der Totholzeintrag durchaus die Pho-Aktivität beeinflusst. Außerdem weist sie Ähnlichkeit mit der Sul-Aktivität auf. Ausnahmen finden sich bei AEW28, AEW33 und AEW34, bei welchen die C\_EP-Flächen höhere Werte besitzen (Abb. 9D). Dies könnte mit den Ausgangssubstraten zusammenhängen und deren Vorkommen in den untersuchten Flächen. Die ANOVA ist signifikant, da die Abweichung der Werte, insbesondere der Flächen mit Totholz, groß ist. Des Weiteren zeigt die lineare Regression des organischen Kohlenstoffs mit der Pho-Aktivität ebenfalls einen leicht positiven Verlauf. Die Werte streuen jedoch weiter als bei der Sul-Aktivität.

	Glu		Nac		Sul		Pho	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
C_EP	259,6	92,0	400,7	121,5	431,0	119,4	3410,7	1420,6
D	415,7	377,0	389,4	296,0	418,9	181,7	2675,9	1198,3
G	372,6	250,5	382,8	240,7	605,1	176,6	3408,2	1546,3
GD	486,1	331,8	423,0	233,7	569,2	241,7	3468,6	1727,8

Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen und oben dargestellten Werte: Glu, Nac, Sul, Pho; MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung

## 6 Diskussion

### 6.1 pH-Wert

Die pH-Werte auf den Untersuchungsflächen liegen zwischen 3,6 und 6,5 (Abbildung 5). Die pH-Werte der Böden liegen somit im leicht sauren bis extrem sauren pH-Wert Bereich, in dem die Silikat- und Austauschpuffer wirken. Die Pufferbereiche sind geprägt durch eine Verarmung an  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  und  $K^+$ . Sobald der Austausch Puffer wirkt, werden diese dann auch ausgewaschen. Die niedrigsten Werte weisen die Flächen AEW3 und 34 auf, was vermutlich mit der dort vorkommenden Hauptbaumart Fichte zusammenhängt. Nadelbestände haben in der Regel niedrigere pH-Werte als Laubbestände (z.B. AEW22, 42). Dies liegt unter anderem daran, dass Nadelstreu generell schwerer zu zersetzen, ab- oder umzubauen ist. Als Folge sinkt der pH-Wert, weil dieser durch die in der Streu enthaltenen Stoffe saurer wird. Aufgrund des weiten C/N-Verhältnisses von Nadelstreu, der schwer zersetzbaren Substanzen (Wachse, Harze, Lignin) und der niedrigen pH-Werte (Abbildung 5) ist der Abbau von organischer Substanz auf den Nadelwaldflächen im Vergleich zu den Laubbaumflächen gehemmt. Dies führt über längere Zeit zu mächtigen organischen Auflagen in Nadelwäldern.

## 6.2 Geschätzter Tongehalt

Die Böden im Untersuchungsgebiet enthalten geschätzte Tongehalte zwischen 36,3 und 94,4 % (Abbildung 6). Dies zeigt, dass die Studie auf sehr tonreichen Böden durchgeführt worden ist. Die hohen Tongehalte stehen in Zusammenhang mit dem hier vorliegenden Ausgangsgestein. Es handelt sich um das Ausgangsgestein Kalkstein. Bei der chemischen Verwitterung des Kalksteins und der damit verbundenen Auflösung der Carbonate entsteht so genannter Residualton. Je höher die Tongehalte der Böden sind, desto mehr Wasser und Nährstoffe können sie speichern. Daher besitzen Tonböden eine geringe Wasserdurchlässigkeit. Ein Teil des gespeicherten Wassers ist jedoch als Totwasser nicht pflanzenverfügbar. Tonige Böden sind zudem durch eine hohe spezifische Oberfläche charakterisiert, an die Nährstoffe adsorbiert und desorbiert werden können. Mit der großen spezifischen Oberfläche ist eine hohe Kationenaustauschkapazität verbunden. Im Regelfall sind die geschätzten Tongehalte der unterschiedlichen Experimentflächen auf etwa vergleichbarem Niveau (Abbildung 6). Es fällt jedoch auf, dass bei AEW3 und AEW33 in der Kontrollfläche vergleichsweise hohe Tongehalte vorliegen, was eine Vergleichbarkeit der Behandlungsvarianten erschwert. Die hohen Tongehalte in den Kontrollflächen gehen dabei einher mit hohen pH-Werten (Abbildung 6) und sind vermutlich mit regionalen Unterschieden im Ausgangsgestein zu erklären. Diese Unterschiede erschweren die Verwendbarkeit der Kontrollflächen von AEW3 und AEW33.

## 6.3 Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel

Der organische Kohlenstoff in den Bodenproben der Alb ist vor allem mit dem Ausschlag des AEW34\_D (Abbildung 6) nicht sehr konsistent in seiner Verteilung über die Experimentvarianten und Untersuchungsflächen hinweg. Die Verteilung der Werte liegt zwischen 3,1 und 15,9 g/kg und zeigt eine inhomogene Verteilung der Werte. Dazu tragen vor alle Untersuchungsflächen bis auf AEW42 und 47 bei. Im Ergebnisteil ist nur vom organischen Kohlenstoff die Rede, da dieser allein für die weiteren Prozesse im Boden von Bedeutung ist. Als Maßnahme für die Messung des reinen organischen Kohlenstoffes wurden die Proben zwei Mal gemessen, wobei bei der zweiten Messung die Proben zuvor Vermuffelt wurden, um den anorganischen Kohlenstoff zu entfernen.

Kohlenstoff an sich wird häufig verwendet, um die Bodengüte und potenzielle Enzymaktivität zu beschreiben, da die Zerlegung der organischen Substanz in seine Einzelteile, sowie der Umbau zu benötigten Substraten eine der Hauptaufgaben im Kohlenstoffkreislauf darstellen. Dennoch ist der Eintrag von Stickstoff, Schwefel und Phosphor wichtig für die Entstehung von Enzymen und den Umbau der Ausgangssubstrate. Der Umbau von Schwefel mit vielen weiteren Prozessen zusammenhängt, die schwer zu identifizieren sind, sowie welche schwerwiegende Folgen nach sich

ziehen können wie Krankheiten, Unausgewogenheit in der Verteilung oder die Vergiftung der Vegetation durch Überproduktion. Daher ist die Umsatzrate von Schwefel sowohl in Kohlenstoffverbindungen als auch Reduktionen anderer Stoffe gering (Paul et al. 1996).

Im Ergebnisteil wurde nur oberflächlich mit Stickstoff und Schwefel umgegangen. Der organische Kohlenstoff ist die Haupttriebkraft der Enzyme, da dieser von den Pflanzen selbst geliefert wird. Phosphor hingegen ist oft nur Teil von kurzfristigen Verbindungen. Dies ist wichtig, weil die Bäume darauf angewiesen sind, dass die kleineren Pflanzengemeinschaften am Boden den Phosphor wieder freisetzen. Dieser freigesetzte Phosphor kann wiederum von den Bäumen genutzt werden (Paul et al. 1996). Im Ergebnisteil ist zu erkennen, dass der Schwefelgehalt sehr gering ist, der Stickstoffgehalt hingegen recht hoch, ebenso der organische Kohlenstoffgehalt.

Es war weit verbreitet, die Stoffkreisläufe und deren Produkte als Indikatoren für den Bodenzustand zu nutzen. Grund dafür waren die Zusammenhänge der Nährstoffe mit den Kreisläufen bei gleichzeitiger Enzymbeeinflussung. Das Problem dabei ist jedoch die Verschiedenheit der einzelnen Böden mit ihren Prozessen, Ausgangsgesteinen und Zusammensetzungen. In den meisten Fällen sind der Kohlenstoff und Stickstoff nicht einheitlich auf mehreren Flächen verteilt, weshalb hauptsächlich der Phosphor als Indikator genutzt wird (Sandoval-Pe'rez et al. 2009). Der im Boden enthaltene Kohlenstoff variiert zu stark um als Indikator zu dienen. Der menschliche Einfluss und die Pilzgesellschaften im Boden bilden ebenfalls zwei wichtige Punkte in der Erhaltung und Regenerierung der Böden zusammen mit der mikrobiellen Biomasse und den Kohlenstoffvorkommen (De Barros et al. 2019).

Die Wiederherstellung zum Ursprungszustand nach einer Störung oder einer bewusst verursachten Lücke kann bis zu einem Jahrhundert dauern. Jedoch haben die Enzymaktivität, die Stoffwechsellkapazität und die organische Substanz im Boden ähnliche Abläufe in der Wiederherstellung des Ausgangszustandes (Ananbeh et al. 2019). Des Weiteren kann die Qualität des zur Verfügung stehenden Kohlenstoffs als Indikator für die Interaktion zwischen mikrobieller Aktivität und Alter des Bestandes dienen (Yang et al. 2020). Diese wurde in dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht und nur das durchschnittliche Alter der Bestände aus den Daten von Schall und Ammer (2013) entnommen (Tabelle 1).

Der Vorgang zur Bestimmung der CNS-Gehalte im Boden verläuft immer nach dem gleichen Prinzip. Dabei ist zu beachten, dass mit Hilfe einer Formel aus dem organischen Kohlenstoff der Humusgehalt der Bodenproben berechnet werden kann. Zudem wird zusammen mit dem Stickstoffgehalt das C/N-Verhältnis abgeleitet, welches genutzt wird, um die Umsatzrate innerhalb der Pflanzen von Stickstoff und Kohlenstoff darzustellen. Das C/N-Verhältnis, sowie weitere Parameter zur Identifikation der Bodengüte wie das C/P-Verhältnis, das SOM/SOC-Verhältnis und das SMN/TN-Verhältnis können verwendet werden (Ren et al. 2018). Das C/N-Verhältnis im Ergebnisteil zeigt eine enge Reichweite des C/N-Verhältnisses durch den kleinen Wertebereich der Messung von 11,5 bis 16,8, wobei die größten Abweichungen auf den Flächen AEW3, 33, 34 und 47 zu erkennen sind (Abbildung 7). Dies hängt damit zusammen, dass auf diesen Untersuchungsflächen die Nadelbäume vorherrschen. Ausnahme davon ist

AEW47, da dort Laubbäume vorherrschen (Tabelle 1). Weshalb auf dieser Fläche das C/N-Verhältnis stärker variiert könnte daher nur durch den Tongehalt oder die vorherrschende Bodenart erklärt werden.

## 6.4 Einfluss der Methoden

Die in dieser Studie verwendete fluorimetrische Methode von Marx et al. (2001), wurde auch in anderen Studien verwendet. So beschrieb Trap (2012), dass die fluorimetrische Messung der Aktivitäten effektiver und effizienter arbeitet als bisherig verwendete Methoden. Die Dauer der Messungen sinkt, während die Qualität der erworbenen Daten, sowie die Anzahl an gleichzeitig messbaren Proben bei der Nutzung der Methode mit Mikrotitern und fluorimetrischer Messung steigt. Die Enzyme wurden als Indikatoren für die Funktionen der biochemischen Prozesse, deren Diversität das Potenzial der Funktionen und Prozesse widerspiegelt, sowie die Zusammenhänge zu spezifischen Stoffkreisläufen oder Ökosystemen. Die Methode der fluorimetrischen Messung mittels Mikrotitern soll dabei helfen die verschiedenen Funktionen zu sortieren und den einzelnen Enzymen zuzuordnen.

Aufgrund der langen Lagerung der Proben bei  $-20\text{ °C}$  kann eine Verringerung der Glu- und Nac-Aktivität aufgetreten sein. Im Gegensatz dazu kann bei der Sul- und Pho-Aktivität eine Erhöhung auftreten. Als weiterer Punkt ist auf die Konsistenz der verwendeten Substrate wie dem MUB-Standard zu achten. Grund dafür ist die Anfälligkeit von Fehlern bei der Zugabe oder im Zeitpunkt der Messung der Fluoreszenz dieser (DeForest 2009). In dieser Arbeit wurde bei der Durchführung der Prozesse darauf geachtet, diese vermeidbaren Fehler nicht zu begehen. Sind dennoch Fehler oder starke Abweichungen aufgetreten, so wurden Wiederholungen durchgeführt.

Des Weiteren ist die Wurzelmenge ein Faktor, welcher die Enzymproduktion und somit die Enzyme selbst beeinflusst. Werden nun die Wurzeln entfernt, sinkt die Enzymaktivität und die Menge an Ausgangssubstraten, was zu einem Wettkampf um diese führt (Loeppmann et al. 2016). In den Bodenproben dieser Arbeit wurden die Wurzeln nach der Probennahme entfernt, um solche Nebeneffekte zu vermeiden.

## 6.5 Enzyme

In dieser Arbeit wurden die extrazellulären Enzyme  $\beta$ -Glucosidase, N-acetyl- $\beta$ -D-glucosidase, Sulfatase und Phosphatase für die Enzymanalyse verwendet. Die Enzyme wurden ausgewählt, weil sie die größte Wahrscheinlichkeit für Veränderungen unter den durchgeführten Maßnahmen haben. Außerdem gehören sie zu den Bodenenzymen deren Bestimmung es erlaubt, das enzymatische Potenzial des Bodens zu messen. Jedoch kann die aktuelle enzymatische Aktivität abweichen (Blume et al. 2010). Des Weiteren wird dadurch ermöglicht, den anthropogenen Einfluss auf die Nährstoffkreisläufe, Bodenstruktur und Bodenfunktionen festzustellen. Die Vegetation und die bodenmikrobiellen Strukturen haben ebenfalls Einfluss auf die Prozesse im Boden und den Aufbau von Enzymen aus den Ausgangssubstraten. Die Enzyme werden durch Ab- und Umbau der organischen Substanz hergestellt

und sind somit an die Stoffkreisläufe und Bodengesellschaften gebunden. Dadurch gibt die Bestimmung der Enzymaktivitäten Aufschluss über die Abläufe in den Kreisläufen (Schinner et al. 1996). Zudem ist der Eintrag an organischem Material ein wichtiger Punkt in der Beobachtung und Beurteilung der Mikroorganismen und der Enzymatischen Gegebenheiten (Miralle et al. 2012). Ein wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang ist die Identifikator-Funktion der Enzymaktivität, welche zu Hilfe genommen wird, um festzustellen, wie gesund bzw. wie funktionstüchtig ein Boden ist (Ren et al. 2018).

Die vier Enzyme sowie deren Beeinflussung durch verschiedene Experimentvarianten sind nur für die Sul- und Pho-Aktivität signifikant. Des Weiteren korreliert die Sulfatase mit der Phosphatase. Ursachen dafür sind die Ausgangssubstrate und deren Ab- und Umbauprozesse. Ein weiterer Punkt ist die Verbundenheit zwischen den Enzymen selbst, den Stoffkreisläufen und dem ständigen Austausch dazwischen.

#### 6.5.1 Glu-Aktivität

Die Glu-basierten Enzyme werden als Indikatoren für die Bodengüte verwendet aufgrund der starken Reaktion bei Umweltveränderungen. Sie können jedoch von der Korngrößenebene und dem Nährstoffvorrat abhängig sein (Yang et al. 2020; Dominchin et al. 2019). Des Weiteren ist die fluorimetrische Messung verwendet worden, um die Zusammenhänge zwischen dem Kohlenstoffkreislauf und dem Umbau von Cellulose in ihrer Qualität und Effizienz besser erkennen zu können. Der Einfluss der Bewirtschaftung auf die Enzymaktivitäten, sowie der Ab- und Umbau kann besser analysiert und erklärt werden (Moscatelli et al. 2012). Die Werte der Glu variieren sehr stark zwischen 54,1 und 1728,0 nmol/g. Dieser weite Wertebereich zeigt, dass die Bodenproben sehr voneinander abweichen. Die Korrelation mit dem organischen Kohlenstoff wurde mittels der linearen Regression (Abb. 10) festgestellt, was Sinn ergibt, da der Kohlenstoff in den Cellulose-Verbindungen durch die Glu in Zucker zerlegt wird. Die Verteilung der Glu auf den verschiedenen Untersuchungsflächen ist sehr divers und vor allem AEW22, 33 und 39 haben starke Ausreißer (Abbildung 9A). Die ANOVA ist nicht signifikant, weshalb die Daten nicht als Indikator verwendet werden sollten. Die ANOVA ist eine einfaktorielle Varianzanalyse, welche zeigt, inwieweit die Mittelwerte der Parameter voneinander abweichen. Zudem ist die lineare Regression des organischen Kohlenstoffs stark positiv, während die Korrelation mit der Sul- und Pho-Aktivität zwar ebenfalls positiv ist, aber mehr streut (Abb. 10).

#### 6.5.2 Nac-Aktivität

Die Nac-Aktivität wurde in dieser Arbeit untersucht aufgrund des Zusammenhanges mit dem Stickstoffkreislauf. Der Umbau von Stickstoffverbindungen ist enzymgesteuert und transformiert organischen zu anorganischen Stickstoff. Sie wird zudem zur indirekten Messung der mikrobiellen Biomasse in den Böden verwendet. Auch das Wachstum von Pilzgesellschaften und das Auftreten von Enzymen mit Ursprung in toten Ausgangssubstraten können mit Hilfe der Nac erklärt werden (Miller et

al. 1998). Die Pilzgesellschaften im Boden haben daher einen gewissen Einfluss auf die dazugehörigen Enzymaktivitäten (Purahong et al. 2016).

Die Nac-Gehalte der Untersuchungsflächen liegen zwischen 129,2 und 1161,4 nmol/g. Dabei kann in der Abbildung 9B erkannt werden, dass die Verteilung ähnlich der der Glu-Aktivität ist. Die größten Ausreißer sind auf den Flächen der AEW22, 33 und 34. Diese Inhomogenität hängt mit den dort vorherrschenden pH-Werten, geschätzten Tongehalten, der Vegetation, der Bodenart und dem organischen Kohlenstoffgehalt zusammen (Siehe Anhang, S. 52). Die lineare Regression mit der Glu-Aktivität ist positiv, jedoch ist die ANOVA nicht signifikant.

In dieser Arbeit wurde für die Enzymmessung ein pH-Wert eingestellt. Dies wurde auch in der Studie von Rernglit et al. (2020) praktiziert aufgrund der Vergleichbarkeit der Daten. Zusammenhänge zwischen dem pH-Wert und der Nac-Aktivität können nur auf den Untersuchungsflächen AEW33 und 39 erkannt werden. Die Vegetation spielt ebenfalls eine große Rolle, weil unterschiedliche Bodenbedeckungen andere Umbauraten zur Folge haben. Es kann unter Umständen zu einem positiven Nachfolgeeffekt kommen, aufgrund der höheren Umbaurate auf Flächen mit vielen Flechten, welche auch eine größere Verfügbarkeit von Ausgangssubstraten zur Folge hat und somit wiederum die Wachstumsrate der Vegetation erhöht (Sedia und Ehrenfeld 2006).

#### 6.5.3 Sul-Aktivität

Die Abbildung 9 C zeigt, dass die Sul-Aktivität auf Flächen mit Lochhieb sehr hoch ist. Zudem sind die linearen Regressionen der Sul mit Glu, Nac und Pho, sowie dem organischen Kohlenstoff allesamt positiv, was zu dem Schluss führt, dass zwischen den Enzymen reger Austausch stattfindet (Abb. 10, Abb. 11; Anhang, S. 53, 55, 56). Der Wertebereich der Sul liegt zwischen 129,2 und 1161,4 nmol/g. Die geringsten Abweichungen der Abbildung zeigen sich auch den Untersuchungsflächen AEW28, 38 und 42. Ein weiterer Punkt ist, dass die ANOVA extrem hohe Signifikanz aufzeigt (Tabelle 4).

Im Ergebnisteil ist zu erkennen, dass die Werte der Sulfatase in ihrer Verteilung der der Phosphatase ähneln (Abb. 9C). In der Studie von Giacometti et al. (2014) wurde ein Zusammenhang des pH-Wertes und der Enzyme  $\alpha$ -glucosidase, N-acetyl-glucosaminidase, Arylsulfatase und Phosphodiesterase dargestellt. Zudem wurde der Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoffkreislauf und den Enzymen, welche die Verbindung „ $\alpha$ -glucosidase“ mit eingebaut haben, festgestellt.

#### 6.5.4 Pho-Aktivität

Die Werte der Pho-Aktivität zeigen Ähnlichkeiten mit der Verteilung der Sul-Aktivität. Der Wertebereich liegt zwischen 723,0 und 7998,0 nmol/g. Ebenso ist die lineare Regression mit dem organischen Kohlenstoff nur leicht positiv, wohingegen die Korrelation mit der Sul-Aktivität stark positiv ist (siehe Anhang, S. 55, 56). Zudem ist die ANOVA signifikant und weist darauf hin, dass die Experimentvarianten einen starken Einfluss auf die Pho-Aktivität haben. Unterschiede finden sich in

der Verteilung der Flächen AEW34 und AEW39, wobei hier die Pho-Aktivität von der Sul-Aktivität abweicht. Die größten Ausreißer sind auf den Untersuchungsflächen AEW22, 28 und 33 zu finden (Abbildung 9 C/D).

Die geringste Aktivität kann auf den Flächen des Totholzeintrages festgestellt werden. Im Gegensatz dazu ist in der Literatur zu lesen, dass je mehr Auflage vorhanden ist, die Aktivität beziehungsweise die Umbaurate steigt. Zudem kann je nach Vegetation, Experimentvariante und dem Zusammenhang mit dem pH-Wert die Aktivität untersucht werden, weil diese stark pH-abhängig ist und mit sinkendem pH-Wert steigt. Des Weiteren können Zusammenhänge zwischen verschiedenen Phosphatasen entstehen, wenn genügend Kohlenstoffverbindungen als Ausgangssubstrate vorliegen. Dabei ist jedoch die Menge des vorhandenen Kohlenstoffs wichtiger als dessen Qualität (Drouillon et al. 2005).

Die Umsatzrate von Phosphor und die dazugehörige Phosphodiesterase wurde in immergrünen Wäldern als am höchsten beschrieben. Darüber hinaus wirkt sich die Bewirtschaftung auf die Enzymaktivität aus, was in der Verringerung der Aktivität als Folge des Entfernens der Auflage zu sehen ist. (Redel et al. 2008). Im Gegensatz dazu ist die Enzymaktivität der Pho in dieser Arbeit geringer bei erhöhtem Eintrag des Totholzes. Den Grund dafür zu diskutieren, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Dennoch ist anzumerken, dass die signifikante ANOVA einen großen Einfluss der Experimentvarianten auf die Aktivität anzeigt.

Das Enzym Phosphatase wird ebenfalls für langzeitige Voraussagen der Bodengüte und der Folgen des Managements genutzt (Sandoval-Pe' rez et al. 2009). In anderen Gebieten wurden die Langzeiteffekte betrachtet, welche eine dauerhafte Reduzierung der Enzymaktivität nach der Ausdünnung zeigten (Dinesh et al. 2004).

## 6.6 Effekte von Totholz

Die Totholzanreicherung gilt als Maßnahme, um die Biodiversität zu erhöhen. So wurde von Doerfler et al. (2017) eine Studie verfasst über die Anreicherung von Totholz in unterschiedlich alten Beständen. Das häufigste Durchschnittsalter der Bestände lag bei 100 Jahren. Des Weiteren brachten sie viel Totholz ein. Bestände über 140 Jahren hatten weniger Totholz, waren dafür aber auch seltener anzutreffen. Als weiterer Punkt ist aufzuführen, dass die Vegetation in den Beständen der Flächen stark variiert. Wie in der Tabelle 1 zu erkennen ist, sind sowohl Buchen- als auch Fichtenbestände vorhanden.

Der Einfluss von der Vegetation kann je nach Ökosystem unterschiedlich sein. In Wäldern mit Bewirtschaftung ist die Adaption an neue Umstände gravierender als in Beständen ohne (Miralle et al. 2012). Zu beachten ist dabei, dass Totholzeintrag und Vegetationserneuerung unterschiedliche Prozesse sind und deshalb anders interpretiert werden müssen. Die Stoffkreisläufe, sowie die dazugehörigen Speicher der notwendigen Ausgangsmaterialien können durch Renaturierung erweitert werden. So stieg zum Beispiel der C- und N-Gehalt, sowie die Produktionsrate und Verarbeitungs- bzw. Anreicherungsrate (Karam et al. 2012). Je nach Vegetation sind zudem die Unterschiede in den

Experimentvarianten der Flächen mit Nadel- und Laubbäumen unterschiedlich. So haben Flächen mit Laubbäumen zumeist geringere Abweichungen, wohingegen die Flächen mit Nadelbäumen größere Abweichungen der Werte aufweisen.

#### 6.6.1 pH-Wert

Die mittleren Werte der pH-Werte auf den Flächen mit Totholz sind mit 4,9 für die Flächen mit Totholz und Lochhieb und 5,0 für die Flächen mit reinem Totholzeintrag recht hoch. Zwischen den einzelnen Untersuchungsflächen sind vor allem auf AEW22, 28 und 39 die Werte der Totholzflächen höher als die der anderen Experimentvarianten (Abb. 5). Dennoch sind die Werte der Kontrollflächen im Mittel höher als die pH-Werte der Totholzflächen (Tabelle 2).

Die Ergebnisse zeigen kurzfristige Änderungen im pH-Wert und den Stoffkonzentrationen durch die Entfernung der Vegetation und die Einführung durch Totholz. Die langfristigen Effekte können meist erst ab einem Zeitraum von mehreren Jahren nach der Maßnahme erkannt werden, zumal die Bodeneigenschaften Zeit brauchen, um sich nach der Störung wieder zu erholen.

Der pH-Wert spielt eine wichtige Rolle in den Umbauprozessen und dem Eintrag von Nährstoffen, aufgrund der Abhängigkeit dieser von den vorherrschenden pH-Werten. Als weitere Faktoren können der Wassergehalt, die Temperatur, die Lage und die Einstrahlung, sowie der mikrobiellen Gesellschaften im Boden genannt werden. Daher ist es immer wichtig, die Prozesse im Zusammenhang und nicht einzeln zu interpretieren oder Aussagen zu treffen (Purahong et al. 2016). In dieser Studie ist der pH-Wert nicht signifikant, dennoch ist die Tatsache, dass er im Bereich der Silikat- und Austauschpuffer liegt wichtig zu erwähnen. Grund dafür ist die veränderte Stoffumwandlung bei niedrigen pH-Werten.

#### 6.6.2 Geschätzter Tongehalt

Der geschätzte Tongehalt ist auf den Flächen des Totholzeintrages niedriger als auf den Kontrollflächen. Dennoch sind die mittleren Werte mit 57,7 % höher als die Werte der Lücken (Tabelle 2). Die Verteilung der Werte des geschätzten Tongehaltes ist nur auf der Untersuchungsfläche AEW39 höher als die anderen Experimentvarianten (Abb. 6). Als Ergebnis kann sich daraus, und der nicht signifikanten ANOVA, ergeben, dass die Untersuchungsflächen mit ihren Experimentvarianten durchaus vergleichbar sind in ihren Werten.

#### 6.6.3 Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel

Der organische Kohlenstoff auf den Flächen mit Totholzeintrag ist am höchsten mit 6,6 g/kg. Die Flächen mit Totholzeintrag und Lochhieb haben etwas niedrigere Werte mit 6,1 (Tabelle 2). Am meisten stehen die Untersuchungsflächen AEW22, 28 und 39 hervor, da hier die Werte im Vergleich zu den anderen Experimentvarianten hoch sind (Abb. 7).

Das C/N-Verhältnis auf den Flächen mit Totholzeintrag und Lochhieb bzw. reinen Totholzflächen der Untersuchungsflächen AEW22, 39 und 47 ist höher als das der anderen Experimentvarianten (Abb. 8). Die mittleren Werte liegen bei 13,2 für die Totholzflächen und bei 13,5 für die Flächen mit Totholz und Lochhieb. Die Werte sind sehr nahe denen der Kontrollfläche (Tabelle 2).

Eine Folge der Totholzanreicherung ist der vermehrte Ausstoß von CO<sub>2</sub> und NH<sub>4</sub>, welches bei der Zersetzung frei wird. Zudem haben die Fragmentierung und physikalische Umwandlung den größten Einfluss auf die enzymatischen und mikrobiellen Prozesse. Daher ist ein striktes Management des Totholzes notwendig, um die Stabilität der Systeme zu gewährleisten (Lagomarsino et al. 2021).

#### 6.6.4 Enzyme

Der vermehrte Eintrag von CO<sub>2</sub> und NH<sub>4</sub> durch den erhöhten Totholzeintrag hatte aber auch positive Effekte, wie zum Beispiel die bessere Zersetzung von Cellulose und eine Steigerung der Enzymaktivität bestimmter Enzyme (Lagomarsino et al. 2021). Im Falle dieser Arbeit hat der Totholzeintrag dazu beigetragen, den pH-Wert und den Wassergehalt zu erhöhen, sowie die Enzymaktivität. Dadurch können die signifikanten Unterschiede in der Enzymaktivität der einzelnen Enzyme auf den Untersuchungsflächen und deren unterschiedlichen Experimentvarianten erklärt werden. Dies trifft jedoch nicht auf die signifikanten Enzyme Sulfatase und Phosphatase zu. Beide Enzyme wurden, im Gegensatz zu der Glu- und Nac-Aktivität, signifikant vom Totholzeintrag beeinflusst. Die Glu- und Nac-Aktivität wurde aus diesem Grund hier nicht weiter diskutiert. Die Sul-Aktivität ist auf den Flächen mit Totholzeintrag ihre niedrigsten Werte. Dabei liegen die Flächen mit Totholzeintrag und gleichzeitigem Lochhieb mit 569,2 nmol/g über den reinen Totholzflächen mit 418,9 nmol/g (Tabelle 5). Die Untersuchungsflächen AEW22, 33, 39 und 47 haben zum Teil höhere Werte auf den Flächen mit Totholzeintrag oder den Flächen mit Totholzeintrag und gleichzeitigem Lochhieb (Abb. 9C). Der Rest der Verteilung ist äußerst inhomogen und stark von den Experimentvarianten abhängig. Zudem ist die ANOVA extrem signifikant (Tabelle 4). Besonders auffällig ist, dass in der Literatur zumeist die Enzymaktivität ansteigt, wenn Totholz eingetragen wird (Perreault et al 2020). Des Weiteren ist die große Inhomogenität der Werteverteilung auffällig, sowie die ebenfalls sinkende Pho-Aktivität bei steigendem Totholzeintrag. Die mittleren Werte der Pho-Aktivität liegen mit 3468,6 nmol/g für die Flächen mit Totholzeintrag und gleichzeitigem Lochhieb eher hoch, wohingegen bei reinen Totholzflächen nur eine geringe Aktivität mit durchschnittlichen Werten von 2675,9 nmol/g aufweisen (Tabelle 5). Die Untersuchungsflächen AEW34, 39 und 47 haben auf den Totholzflächen oder Flächen mit Totholz und Lochhieb die höchste Aktivität (Abb. 9D). Im Regelfall sinkt die Aktivität mit der Entnahme und steigt bei Hinzufügen von Vegetation. Der Grund für das umgekehrte Verhalten der Pho-Aktivität in den Messungen dieser Arbeit ist aus den Ergebnissen nicht eindeutig herauszulesen.

Die Enzyme zeigen verschieden stark ausgeprägte Änderungen in den Werten im Vergleich zu den Kontrollflächen, liegen jedoch in beiden Fällen unter diesen. Gründe dafür sind unter anderem die Ausgangssubstraten mit den dazugehörigen Stoffkreisläufen, welche aufgrund der Experimentvarianten

gestört werden. Als Folge kann geschlossen werden, dass die Experimentvarianten sehr wohl Einfluss auf die Enzymaktivitäten haben und somit abhängig voneinander sind.

## 6.7 Effekte von Lücken

Die auf den Flächen ausgeführten Lochhiebe und deren Einflüsse auf die Bodeneigenschaften können mit anderen Studien verglichen werden und somit zur Interpretation beitragen. Vor allem die Einflüsse des Bewuchses und dessen Beteiligung an der Veränderung der organischen Substanz und den dazugehörigen enzymatischen Parametern muss berücksichtigt werden. Des Weiteren ist auch wichtig darauf zu achten in welchem Zustand die untersuchten Bestände sind beziehungsweise die Parameter Temperatur, Nährstoffhaushalt, Belüftung, Textur, Feuchte, pH-Wert, Strahlungseffekte, Substraterschöpfung und klimatische Begebenheiten müssen in die Interpretation der Ergebnisse einbezogen werden (Farell et al. 1994). Zudem hat die Größe der Lücken Einfluss auf die Parameter Temperatur, Wassergehalt, organischer Kohlenstoff, Stickstoff und die bodeneigenen Mikroorganismen. Zumeist ist es so, dass die kleinen Lücken einen positiven Einfluss auf die Umbauraten und Aktivitäten haben, wohingegen die großen Lücken einen negativen Einfluss haben (Wang et al. 2021).

Der Unterschied zwischen dem Lochhieb und dem Ausdünnen der Wälder liegt in der Häufigkeit letzteres. Dabei ist die Ausdünnung eine Bewirtschaftungsmaßnahme, welche die Bodeneigenschaften regelmäßig stört. Insbesondere der Kohlenstoffkreislauf, sowie die mikrobiellen und einige andere Parameter werden beeinflusst. Dazu gehören der pH-Wert, der Wassergehalt und der Kohlenstoffumbau mit dem organischen Kohlenstoff als Hauptbestandteil. Zudem improvisiert die regelmäßige Ausdünnung die bodenmikrobiellen Stoffe (Wu et al. 2019).

### 6.7.1 pH-Wert

Die mittleren pH-Werte der Lücken sind mit 4,8 am geringsten (Tabelle 2). Die Untersuchungsflächen AEW34, 42 und 47 haben noch teilweise höhere oder ähnlich hohe Werte wie die anderen Experimentvarianten (Abb. 5).

Die pH-Werte der Böden in Nadelbeständen sind durchgehend niedriger als in Laubbeständen. Als Folge hat die Entfernung der Vegetation direkten Einfluss auf den pH-Wert, da dieser sinkt, wenn kein Material zum Verarbeiten vorhanden ist. Zudem sinken die Werte durch das Fehlen von Vegetation, was wiederum weitere Folgen nach sich zieht, wie zum Beispiel die Änderung der Pho-Aktivität (Salam et al. 2012). In dieser Studie konnten diese Effekte noch nicht beobachtet werden, da erstens der Zeitraum zwischen Lochhieb und Messung zu kurz war, und zweitens die ANOVA nicht signifikant ist.

### 6.7.2 Geschätzter Tongehalt

Der geschätzte Tongehalt der Flächen mit Lochhieb ist mit 56,9 % am geringsten, unterscheidet sich dennoch nicht sehr stark von den Werten der Totholzflächen (Tabelle 2). Die Untersuchungsflächen AEW 3, 33 und 47 haben auf den Flächen mit Lochhieb teilweise annähernd so hohe Werte wie die anderen Experimentvarianten (Abb. 6).

#### 6.7.3 Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel

Der organische Kohlenstoff ist auf den Flächen mit Lochhieb am geringsten. Die mittleren Werte liegen bei 5,3 g/kg und sind damit am kleinsten (Tabelle 2). Die Untersuchungsflächen AEW 42 und 47 haben hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Flächen. Dennoch sind sie niedriger, wie die anderen Experimentvarianten (Abb. 7).

Das C/N-Verhältnis der Flächen mit Lochhieb liegt auf den Untersuchungsflächen AEW28 und 42 recht nahe an den höchsten Werten, übersteigt diese jedoch nicht (Abb. 8). Die mittleren Werte des C/N-Verhältnisses liegen mit 13,0 unter denen der Kontrollflächen und damit am niedrigsten (Tabelle 2).

Der Zeitpunkt der Probennahme im Dezember 2020 lag ca. 1 ½ Jahre nach dem Lochhieb, beziehungsweise der Einführung von Totholz. Daher sind Langzeitfolgen und Abschätzungen für zukünftige Ergebnisse sowie Ereignisse nicht reliabel. Die Studie von Lull et al. (2020) zeigt, dass der Zeitpunkt von der Probennahme großen Einfluss auf die Ergebnisse und deren Interpretation hat. Hierbei wurde der vorhandene Kohlenstoff sehr nah am Ausdünnungsdatum, sowie sieben Jahre nach dem Vorgang gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass direkt nach dem Prozess mehr wasserlöslicher organischer Kohlenstoff gefunden wurde. Sieben Jahre nach der Ausdünnung hingegen hatte der Vorgang keinen Einfluss auf die Enzyme oder mikrobielle Biomasse mehr. Daher ist die kontinuierliche und wiederholte Messung der Bodenparameter erforderlich. Des Weiteren ist die Tiefe, in welcher die Proben genommen wurden, relevant, da in den oberen Bodenschichten vor allem der Kohlenstoff- und Stickstoffanteil in anderen Konzentrationen gefunden werden kann (Salam et al. 2012).

Je nach Jahreszeit kann die Entfernung der Vegetation andere Einflüsse haben. Im Frühling wird mehr Kohlenstoff und im Sommer mehr Stickstoff frei. Dies liegt an der Vegetation und deren Verbrauch an Kohlenstoff und Stickstoff. Im Frühling wird mehr Stickstoff benötigt, weil die Vegetation vom Winter noch geschwächt ist und wieder Blattwuchs betreiben muss, um im Anschluss Photosynthese betreiben zu können. Im Sommer wird mehr Kohlenstoff benötigt, da hier die Photosynthese Rate ansteigt und Zucker produziert werden. Daraus kann gefolgert werden, dass die kurzfristige Voraussage für die Bodenprozesse mehr verlässlich ist als die Voraussage für mittel- oder langfristige Folgen (Osburn et al. 2018). Obendrein sank die Aktivität der Stoffkreisläufe von Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Schwefel als Langzeitfolge von Ausdünnungen (Dinesh et al. 2004).

#### 6.7.4 Enzyme

Im Ergebnisteil wurde durch die ANOVA festgestellt, dass nur die Sul- und Pho-Aktivität signifikant von den Experimentvarianten beeinflusst wurden. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur die beiden Enzyme genauer diskutiert. Die Sul-Aktivität hat auf den Flächen mit Lochhieb ihre höchsten Werte mit durchschnittlich 605,1 nmol/g (Tabelle 5). Dies widerspricht der Studie von Salam (2012) in welcher die Aktivität der Sul sinkt, wenn die Vegetation entfernt wird. Die Werte der Sul-Aktivität sind auf den Untersuchungsflächen AEW3, 28, 34 und 42 höher als die der anderen Experimentvarianten (Abb. 9C). Als weiterer Punkt ist anzuführen, dass die ANOVA extrem signifikant ist, was zu dem Schluss führt, dass das Enzym stark durch die Experimentvarianten beeinflusst wird. Die Werte der Pho-Aktivität auf der Untersuchungsfläche AEW42 ist höher, wie die der anderen Experimentvarianten. Die Untersuchungsflächen AEW3 und 28 haben ebenfalls hohe Werte, jedoch überschreiten diese nicht die Werte der anderen Experimentvarianten (Abb. 9D). Die mittleren Werte der Pho-Aktivität liegen mit 3408,2 nmol/g knapp unter den Werten der Kontrollflächen (Tabelle 5).

In der Literatur hingegen wurde davon ausgegangen, dass die Störung der Produktion von Enzymen durch die Lochhiebe zu einem verringerten Umsatz bzw. Abbau der Ausgangssubstrate führt (Salam et al. 2012). Als Grund dafür kann der Zeitraum zwischen den Maßnahmen und der Probennahme oder der größere Einfluss anderer Parameter auf die Enzyme genannt werden. In den Gebieten um China wurden ebenfalls Studien zu Lücken in Wäldern durchgeführt. Darunter wurde in einem Kiefernwald festgestellt, dass die Größe der Lücken großen Einfluss auf die Veränderungen in der Enzymatik und der mikrobiellen Biomasse hat. Als Ergebnis der Untersuchung wurde festgestellt, dass kleine Lochhiebe oder Lücken dem Enzymhaushalt und dem Umbau von Stoffen zuträglich sein können. Jedoch ist in der Studie nur ein Zeitraum von einem Jahr verstrichen als die Proben genommen wurden, weshalb Langzeitfolgen noch nicht abzusehen sind (Yang et al. 2017). Weitere Autoren führten in ihren Arbeiten an, dass normalerweise der Mangel an Ausgangsmaterial einen negativen Einfluss auf die Enzymaktivität hat. Des Weiteren wurde der Einfluss des pH-Wertes auf die Pho-Aktivität angeführt, welcher mit der katalytischen Kapazität zusammenhängt (Gonzales-Carcedo et al. 1988). Allgemein wurde davon ausgegangen, dass die Enzymaktivität negativ von Lochhieben beeinflusst wird (Perreault et al. 2020). Mit Hilfe dieser Studie konnte nun ein Gegenbeispiel gefunden werden, dessen weitere Erforschung sinnvoll ist.

## 7 Zusammenfassung

Im Endeffekt ist zu erkennen, dass die Messung der bodenphysikalischen Parameter und enzymatischen Prozesse in den Bodenproben der Schwäbischen Alb durchaus überraschende Ergebnisse mit sich gebracht hat in der umgekehrten Enzymatik der Sul- und Pho-Aktivität. Die pH-Werte wurden, zwar nicht signifikant, aber wie erwartet durch die Lochhiebe und die Vegetation beeinflusst und waren insbesondere auf den Nadelbaumflächen niedriger.

Die Lochhiebe haben signifikanten Einfluss auf die Enzymaktivität von Sul und Pho. Zudem ist der Abstand zu den Werten der Kontrollflächen gering, bei gleichzeitig hohen Werten der Aktivität auf den Flächen mit Lochhieb. Des Weiteren sind die Werte auf den Totholzflächen gering. Ebenso verhält es sich bei der Sul-Aktivität. Im Gegensatz dazu sind die Glu- und Nac-Aktivitäten auf den Totholzflächen hoch, auf den Flächen mit Lochhieb gering, und weichen teilweise stark von den Kontrollflächen ab. Dies zeigt sich in den Abbildungen (Abb. 9A, 9B) und großen Werteunterschieden im Ergebnisteil.

Die Wassergehalte der Bodenproben sind recht hoch, tendieren aber dazu, auf den Kontrollflächen und den Flächen mit Totholzeintrag am höchsten zu sein. Zusätzlich dazu ist der Restwassergehalt der Kontrollflächen ebenfalls sehr hoch, was auf einen hohen Tongehalt hinweist. Dadurch ist klar ersichtlich, dass die Lochhiebe den Wasserhaushalt beeinflussen, oder dies zumindest kurzfristig nach der Maßnahme der Fall ist. Weitere Messungen in der Zukunft sind daher zur Beobachtung und Kontrolle der Werte sinnvoll.

Der organische Kohlenstoff wurden im Ergebnisteil als signifikant beschreiben. Dies liegt daran, dass der Kohlenstoffkreislauf mit den Enzymen verbunden ist und Einfluss auf die Ausgangssubstrate und deren Stoffkreisläufe hat. Das C/N-Verhältnis ist signifikant aufgrund der Experimentvarianten, da der Totholzeintrag zu mehr verfügbarem Ausgangsmaterial führt. Der Schwefelgehalt wurde im Zusammenhang mit der Sul-Aktivität beschrieben, jedoch ist die Interpretation zu weitreichend für diese Arbeit.

Alles in allem kann gesagt werden, dass die Hypothesen über den Einfluss der Experimentvarianten auf pH-Wert, Enzymaktivität, Wassergehalt und CNS-Gehalte, sich durchaus als zutreffend erwiesen haben. Jedoch sollte immer darauf geachtet werden, dass fortlaufende Messungen notwendig sind, um langfristige Veränderungen in den Böden der Schwäbischen Alb nach den Experimentvarianten und Eigriffen erkennen zu können.

## 8 Literatur

Ananbeh H., M. Stojanović, A. Pompeiano, S. Voběrková und C. Trasar-Cepeda, Use of soil enzyme activities to assess the recovery of soil functions in abandoned coppice forest systems, Elsevier, Science of the Total Environment 694, 2019

Blume H.-P., K. Stahr und P. Leinweber, Bodenkundliches Praktikum Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler 3., neubearbeitete Auflage Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2010

De Barros J. A., E. V. De Medeiros, D. P. Da Costa, G. P. Duda, J. R. De Sousa Lima, U. J. Dos Santos, A. C. D. Antonino und C. Hammecker, Human disturbance affects enzyme activity, microbial biomass and organic carbon in tropical dry sub-humid pasture and forest soils, Archives of Agronomy and Soil Science, 2019

- DeForest J. L., The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA, Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry* 41, 2009, S. 1180–1186
- Dinesh R., S. Goshal Chandhuri, T. E. Sheeja und J. Plant Nutr, Soil biochemical and microbial indices in wet tropical forest: Effects of deforestation and cultivation, *Soil Science* 167, 2004, S. 24-32
- Doerfler I., J. Müller, M. M. Gossner, B. Hofner und W. W. Weisser, Success of a deadwood enrichment strategy in production forests depends on stand type and management intensity, Elsevier, *Forest Ecology and Management* 400, 2017, S. 607–620
- Dominchin M. F., R. A. Verdenelli, A. Aoki und J. M. Meriles, Soil microbiological and biochemical changes as a consequence of land management and water erosion in a semiarid environment, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019
- Drouillon M. und R. Merckx, Performance of para-nitrophenyl phosphate and 4-methylumbelliferyl phosphate as substrate analogues for phosphomonoesterase in soils with different organic matter content, Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry* 37, 2005, S. 1527–1534
- Farell et al. 1994: Waldböden und deren enzymatischen Funktionen unter verschiedenen Bewirtschaftungsarten
- Fischer M., O. Bossdorf, S. Gockel, F. Hänsel, A. Hemp, D. Hessenmöller, G. Korte, J. Nieschulze, S. Pfeiffer, D. Prati, S. Renner, I. Schöning, U. Schumacher, K. Wells, F. Buscot, E. K. V. Kalko, K. E. Linsenmair, E.-D. Schulze und W. W. Weisser, Implementing large-scale and long term functional biodiversity research: The Biodiversity Exploratories, Elsevier, *Basic and Applied Ecology* 11, GfÖ, 2010, S. 473-485
- Giacometti C., L. Cavani, G. Baldoni, C. Ciavatta, C. Marzadori und E. Kandeler, Microplate-scale fluorometric soil enzyme assays as tools to assess soil quality in a long-term agricultural field experiment, Elsevier, *Applied Soil Ecology* 75, 2014, S. 80-85
- Gonzales-Carcedo et al. 1988/89: Waldböden höhere Ureaseaktivität und organische Substanzgehalte, als die ackerbaulich genutzten Flächen
- Karam D. S., A. Arifin, O. Radziah, J. Shamshuddin, N. M. Majid, A. H. Hazandy, I. Zahari, A. H. Nor Halizah und T. X. Rui, Research Article, Impact of Long-Term Forest Enrichment Planting on the Biological Status of Soil in a Deforested Dipterocarp Forest in Perak, Malaysia *The Scientific World Journal*, 2012
- Lagomarsino A., I. De Meo, A. E. Agnelli, A. Paletto, G. Mazza, E. Bianchetto, R. Pastorelli, Decomposition of black pine (*Pinus nigra* J. F. Arnold) deadwood and its impact on forest soil components, Elsevier, *Science of the Total Environment* 754, 2021
- Loeppmann S., E. Blagodatskaya, J. Pausch und Y. Kuzyakov, Substrate quality affects kinetics and catalytic efficiency of exoenzymes in rhizosphere and detritosphere, Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry* 92, 2016, S. 111-118

- Lull C., I. Bautista, A. Lidòn, A. D. del Campo, M. Gonzales-Sanchis und A. García-Prats, Temporal effects of thinning on soil organic carbon pools, basal respiration and enzyme activities in a Mediterranean Holm oak forest, Elsevier, *Forest Ecology and Management* 464, 2020
- Marx M.-C., E. Kandeler, M. Wood, N. Wermbter und S. C. Jarvis, Exploring the enzymatic landscape: distribution and kinetics of hydrolytic enzymes in soil particle-size fractions, Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry* 37, 2005, S. 35-48
- Marx M. C., M. Wood und S. C. Jarvis, Pergamon, A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils, Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry* 33, 2001, S. 1633-1640
- Miller M., A. Palojarvi, A. Rangger, M. Reeslev und A. Kjølner, The Use of Fluorogenic Substrates To Measure Fungal Presence and Activity in Soil, American Society for Microbiology, 1998, S. 613–617
- Miralles I., R. Ortega, G. Almendros, F. Gil-Sotres, C. Trasar-Cepeda, M. C. Leiros´ und M. Soriano, Modifications of organic matter and enzymatic activities in response to change in soil use in semi-arid mountain ecosystems (southern Spain), *European Journal of Soil Science*, 2012
- Moscattelli M. C., A. Lagomarsino, A. M. V. Garzillo, A. Pignataro und S. Grego, -Glucosidase kinetic parameters as indicators of soil quality under conventional and organic cropping systems applying two analytical approaches, Elsevier, *Ecological Indicators* 13, 2012, S. 322-327
- Osburn E. D., K. J. Elliott, J. D. Knoepp, C. F. Miniati und J.E. Barrett, Soil microbial response to Rhododendron understory removal in southern Appalachian forests: Effects on extracellular enzymes, Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry* 127, 2018, S. 50-59
- Paul E. A. und F. E. Clark, *Soil Microbiology and Biochemistry*, Academic Press, 1996
- Perreault L., J. A. Forrester, N. Wurzbürger und D. J. Mladenoff, Emergent properties of downed woody debris in canopy gaps: A response of the soil ecosystem to manipulation of forest structure, Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry* 151, 2020
- Purahong W., T. Arnstadt, T. Kahl, J. Bauhus, H. Kellner, M. Hofrichter, D. Krüger, F. Buscot und B. Hoppe, Are correlations between deadwood fungal community structure, wood physico-chemical properties and lignin-modifying enzymes stable across different geographical regions? Elsevier, *Fungal Ecology* 22, 2016, S. 98-105
- Redel Y., R. Rubio, R. Godoy und F. Borie, Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems, Elsevier, *Geoderma* 145, 2008, S. 216–221
- Ren Q., H. Song, Z. Yuan, X. Ni und C. Li, Changes in Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass after Revegetation in the Three Gorges Reservoir, China, *Forest MDPI*, 2018
- Rernglit W., J. Sucharitakul, A. Schulte und W. Suginta, Real-Time Electrochemical Measurement of N-Acetyl-β-D- Glucosaminidase Activity, Using Redox-Tagged N-Acetyl-β-D-Glucosaminide Hydrolysis as Proof-of-Principle, *IEEE Sensors Journal* VOL. 20, NO. 14, 2020
- Salam A. K., A. Katayama und M. Kimura, Activities of some soil enzymes in different land use systems after deforestation in hilly areas of West Lampung, South Sumatra, Indonesia, *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012

- Sandoval-Pe´ rez A. L., M. E. Gavito, F. Garcı ´a-Oliva und V. J. Jaramillo, Carbon, nitrogen, phosphorus and enzymatic activity under different land uses in a tropical, dry ecosystem, *Soil Use and Management* 25, 2009, S. 419–426
- Schaal R., Waldzustände als Spiegel gesellschaftlicher Ansprüche – Waldentwicklung auf der mittleren Schwäbischen Alb und im nördlichen Oberschwaben seit dem 16. Jahrhundert, *Jh. Ges. Naturkde, Württemberg* 170/1, 2014, S. 79-113
- Schall P. und C. Ammer, How to quantify forest management intensity in Central European forests, Springer Verlag, *Eur J Forest Res* 132, 2013, S. 379–396
- Schinner F. und R. Sonnleiter, Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik II, Bodenbewirtschaftung, Düngung und Rekultivierung, Springer, 1996, S. 11-27 und 41-44
- Schinner F., R. Öhlinger, E. Kandeler und R. Margesin, *Methods in Soil Biology*, Springer, 1996
- Sedia E. G. und J. G. Ehrenfeld, Differential effects of lichens and mosses on soil enzyme activity and litter decomposition, *Biol Fertil Soils* 43, 2006, S. 177–189
- Steinweg J. M., J. S. Dukes, E. A. Paul und M. D. Wallenstein, Microbial responses to multi factor climate change: effects on soil enzymes, *Frontiers in Microbiology*, 2013
- Trap J., W. Riah, M. Akpa-Vinceslas, C. Bailleul, K. Laval und I. Trinsoutrot-Gattin, Improved effectiveness and efficiency in measuring soil enzymes as universal soil quality indicators using microplate fluorimetry Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry* 45, 2012, S. 98-101
- Wang X., J. Liu, Z. He, C. Xing, J. Zhu, X. Gu, Y. Lan, Z. Wu, P. Liao und D. Zhu, Forest gaps mediate the structure and function of the soil microbial community in an *Castanopsis kawakamii* forest, Elsevier, *Ecological Indicators* 122, 2021
- Wu R., X. Cheng und H. Han, The Effect of Forest Thinning on Soil Microbial Community Structure and Function, MDPI, *Forest*, 2019
- Wäldchen J., I. Schöning, M. Mund, M. Schrumpf, S. Bock, N. Herold, K. U. Totsche und E. D. Schulze, Estimation of clay content from easily measurable water content of air-dried soil, *J. Plant Nutr, Soil Sci.* 175, 2012, S. 367-376
- Yang B., K. Qi, D. R. Bhulsal, J. Huang, W. Chen, Q. Wu, A. Hussain und X. Pang, Soil microbial community and enzymatic activity in soil particle-size fractions of spruce plantation and secondary birch forest, Elsevier, *European Journal of Soil Biology* 99, 2020
- Yang Y., Y. Geng, H. Zhou, G. Zhao und L. Wang, Effects of gaps in the forest canopy on soil microbial communities and enzyme activity in a Chinese pine forest, Elsevier, *Journal of soil ecology, Pedobiologia* 61, 2017, S. 51-60

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schall und Ammer 2013; Bexis Internetseite; 21.09.2021 09:30 Zugriff (<https://www.bexis.uni-jena.de/ddm/PublicSearch>)

Tabelle 2: ANOVA Ergebnisse der pH-Werte, des geschätzten Tongehaltes, des C/N-Verhältnisses und des organischen Kohlenstoffs; Df = Freiheitsgrade, MS = mittleres Abweichungsquadrat, F = F-Werte; ANOVA aus R-Studio, erarbeitet von: Lea Haugeneder

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen und oben dargestellten Werte: pH-Wert, geschätzter Tongehalt, C/N-Verhältnis, organischer Tongehalt; MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung

Tabelle 4: ANOVA Ergebnisse der Enzyme Glu, Nach, Sul und Phi; Df = Freiheitsgrade, MS = mittlere Abweichungsquadrate, F = F-Wert

Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen und oben dargestellten Werte: Glu, Nac, Sul, Pho; MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schaal R., Waldzustände als Spiegel gesellschaftlicher Ansprüche – Waldentwicklung auf der mittleren Schwäbischen Alb und im nördlichen Oberschwaben seit dem 16. Jahrhundert, Jh. Ges. Naturkde, Württemberg 170/1, 2014, S. 79

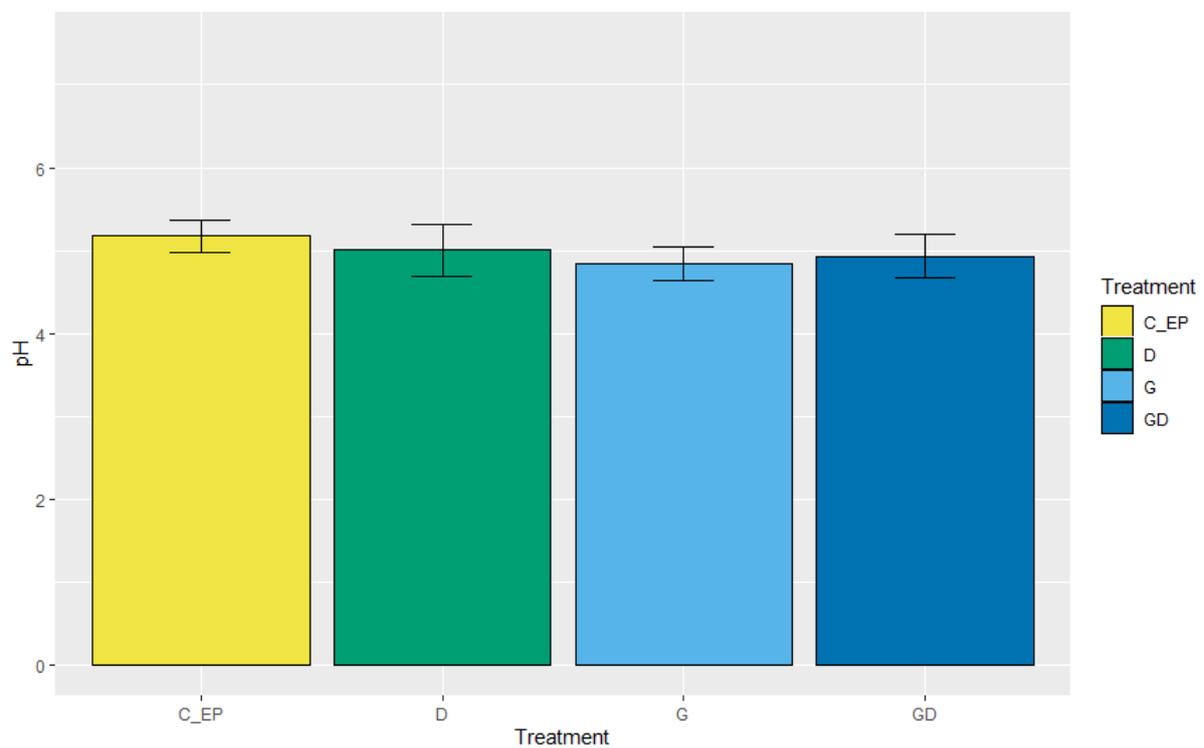
Abb. 2: Schall P. und C. Ammer, How to quantify forest management intensity in Central European forests, Springer Verlag, Eur J Forest Res 132, 2013, S. 386

Abb. 3: Lea Haugeneder 27.07.2021

Abb. 4: Lea Haugeneder 10.09.2021

Abb. 5 bis Abb. 12: aus RStudio Version R i386 3.5.1 R x64 3.5.1 exportiert

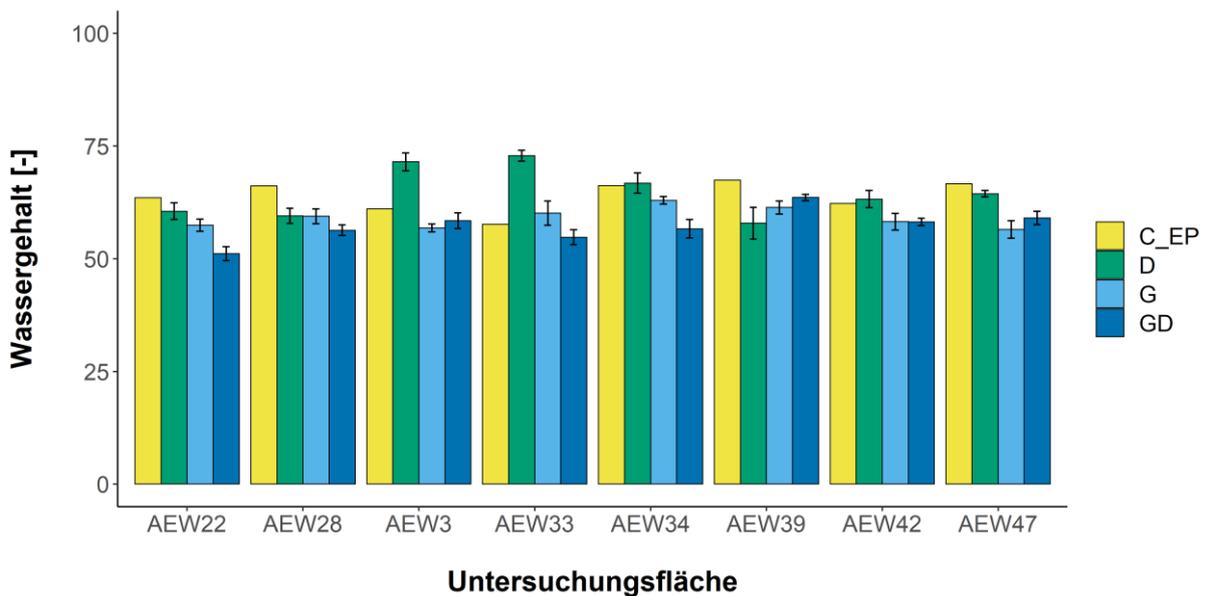
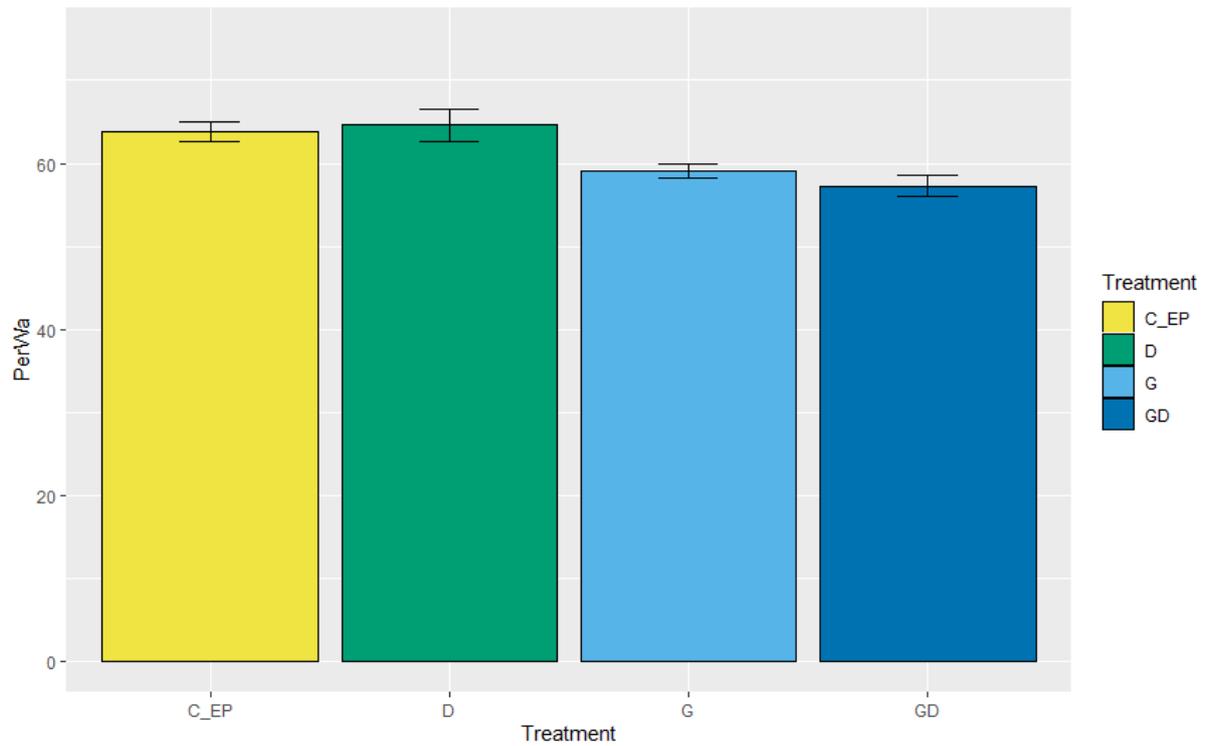
## Anhang



### pH-Werte

Die pH-Werte sind auf allen Flächen der Experimentvarianten recht niedrig. Am höchsten sind die Werte der Kontrollflächen und am niedrigsten die der Flächen mit Lochhieb. Dadurch ist der Zusammenhang zwischen pH- Wert und Lochhieb zu erkennen.

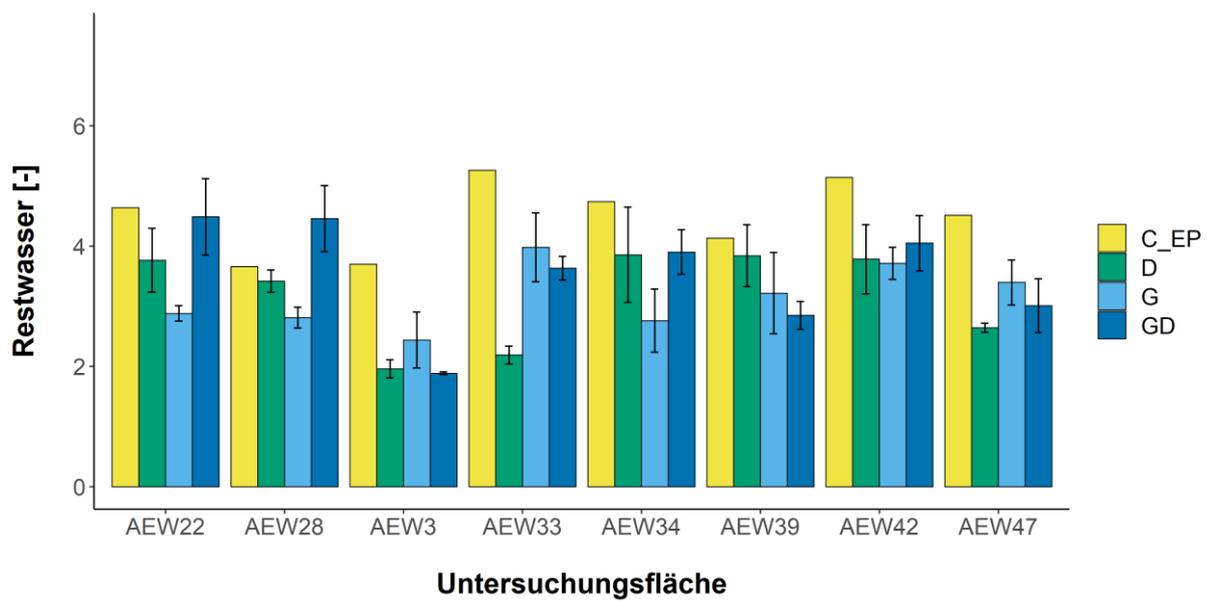
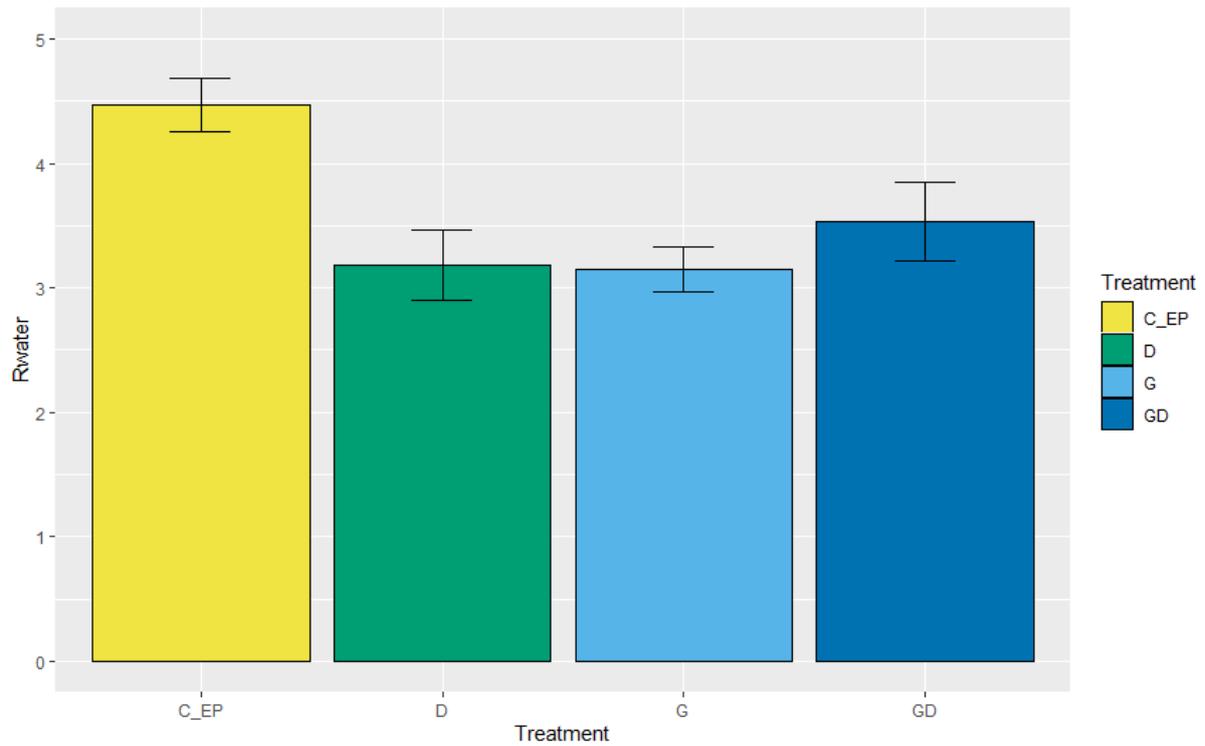
Die Mittelwerte liegen bei 4,8 für G, bei 4,9 für GD bei 5,0 für D und bei 5,2 für C\_EP.



### Wassergehalt in den Bodenproben

Die Werte der Kontrollflächen, sowie die Werte der Flächen mit Totholzeintrag liegen am höchsten. Dies zeigt, dass der Totholzeintrag die Wasserkapazität des Bodens erhöht. Im Gegenteil dazu sorgt der Lochhieb zu einer Verringerung des Wassergehaltes im Boden.

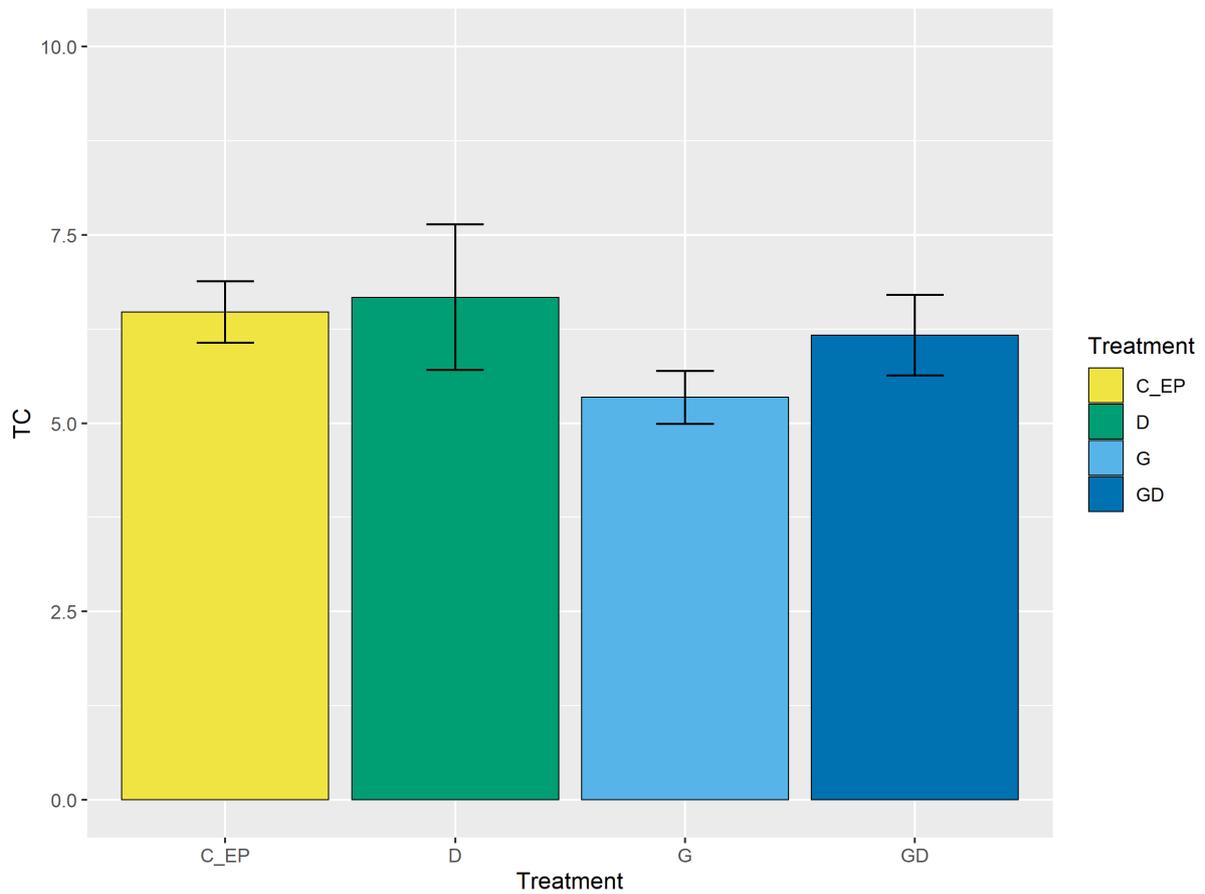
Der Wasseranteil war auf den Flächen C\_EP mit 64,6 und D mit 63,9 am höchsten und liegt nah zusammen. Der geringste Anteil ist bei GD mit 57,3 zu finden. Dazwischen liegen die G Plots mit 59,1.



### Restwassergehalt

Der Restwassergehalt ist auf den C\_EP-Flächen am höchsten. Darauf folgen die Totholz mit Lücke Flächen. Die Lücke- und Totholz-Flächen liegen nah beieinander.

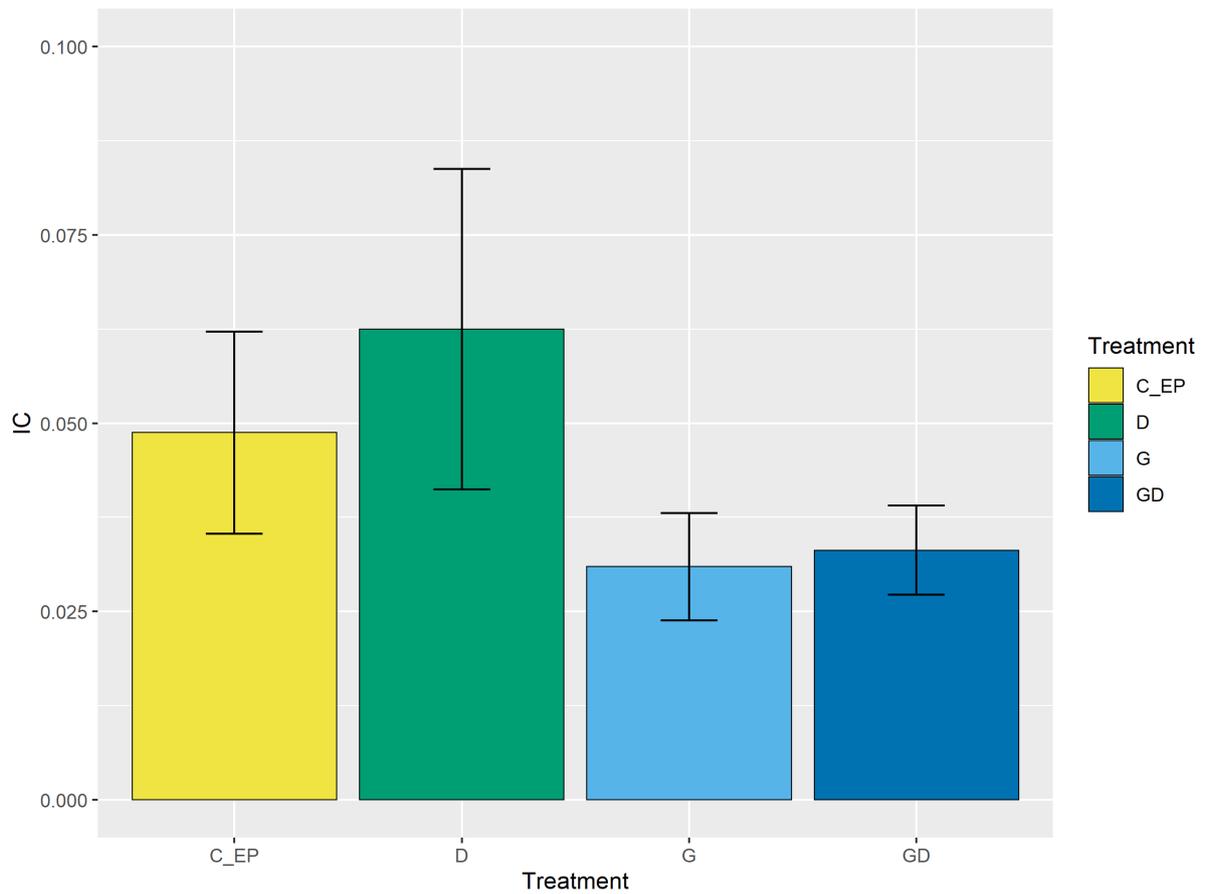
Die Mittelwerte liegen bei 4,3 für C\_EP, bei 3,2 für D, bei 3,1 für G und bei 3,5 für GD.



### TC totaler Kohlenstoff

Der niedrigste Anteil von Kohlenstoff ist in den Proben der G-Plots gefunden worden. Daher ist ein negativer Zusammenhang zwischen Kohlenstoff und Kahlschlag zu erkennen. Die höchsten Anteile wurden in den Flächen des Totholzeintragen gefunden und bestätigt damit Totholz al einen Lieferanten von Kohlenstoff.

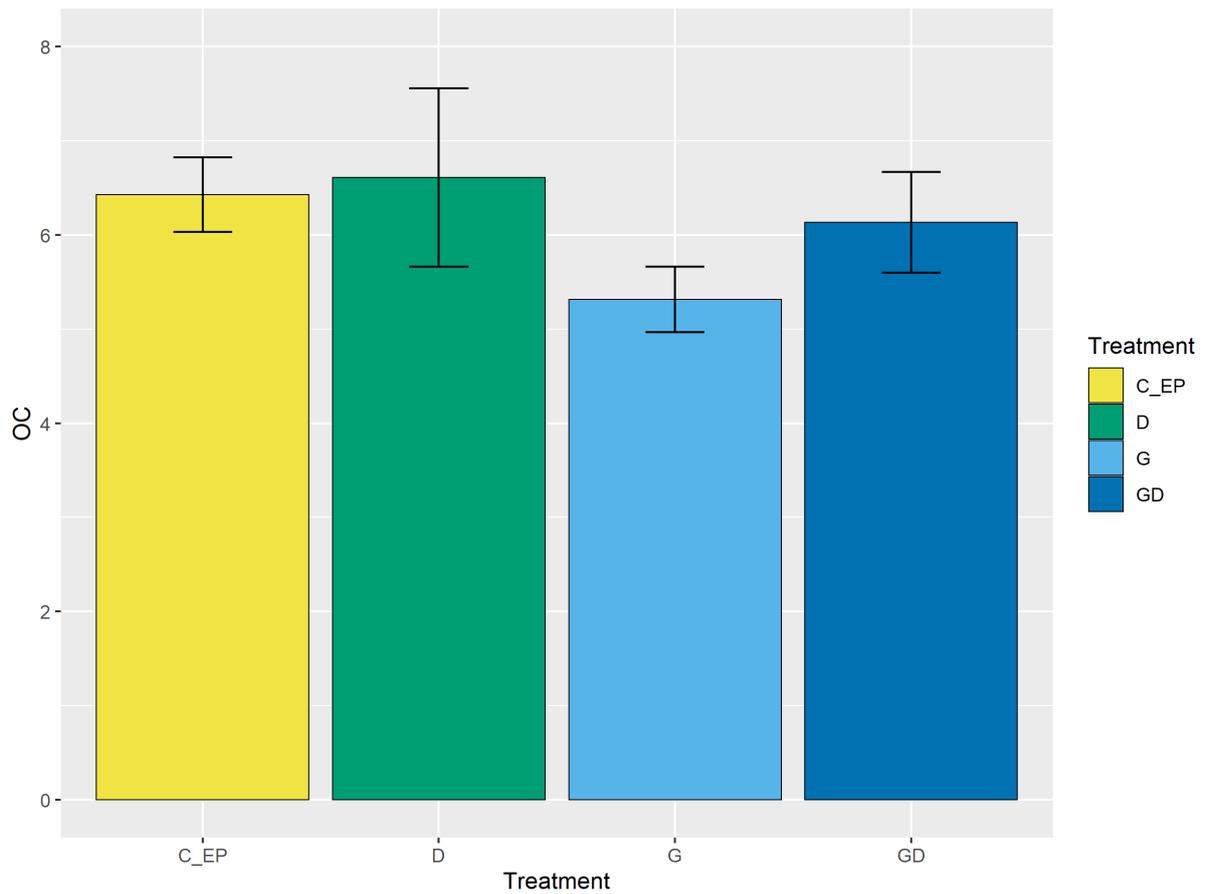
Die Mittelwerte des TC der untersuchten Flächen liegen bei 6,7 für die D-Plots, bei 6,5 für die EP-Plots, bei 5,3 für die G-Plots und bei 6,2 für die GD-Plots.



### IC anorganischer Kohlenstoff

Die höchsten Werte des anorganischen Kohlenstoffs sind in den Proben der Totholzflächen zu finden. Die Werte der Lücken und Totholz mit Lücke-Flächen liegen nahe beieinander und sind am niedrigsten. Die Werte der Kontrollfläche liegen dazwischen.

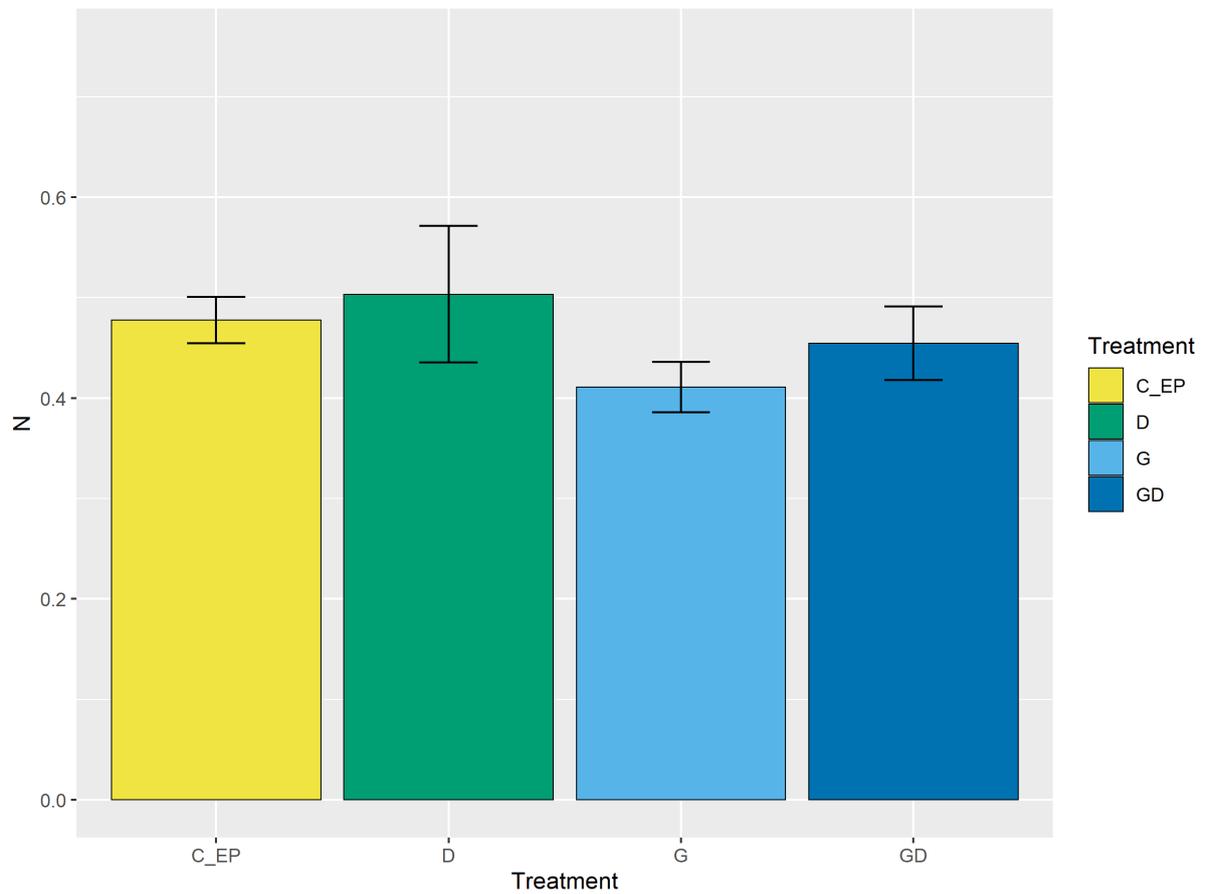
Die Mittelwerte des anorganischen Kohlenstoffs liegen bei 0,05 für C\_EP, bei 0,06 für D, bei 0,03 für G und bei 0,03 für GD.



OC organischer Kohlenstoff

Die Mittleren Werte der D Flächen liegen bei 6,6, die der GD-Flächen bei 6,1 und die der G Flächen bei 5,3. Die C\_EP Flächen haben Durchschnittswerte von 6,4.

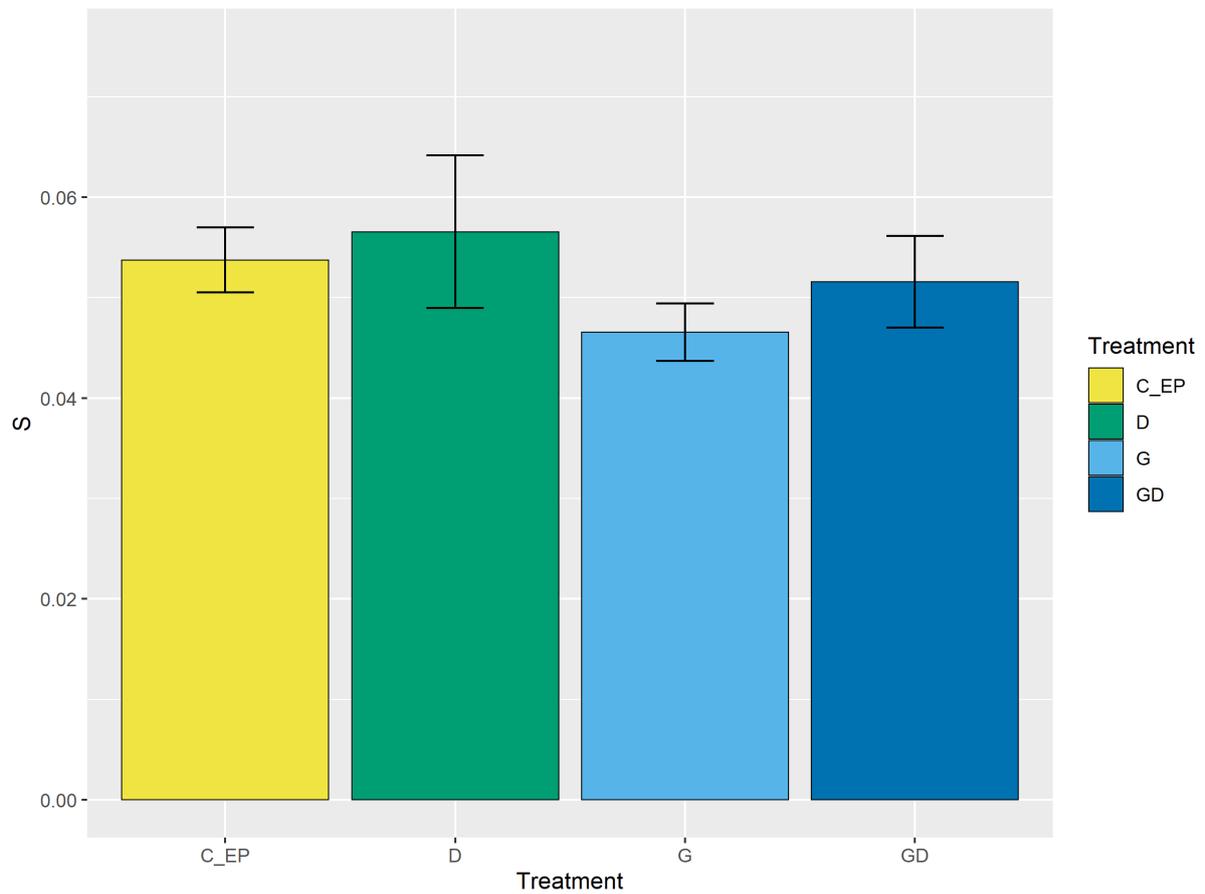
Der Einfluss der Lochhiebe ist besonders groß, da hier die Werte am niedrigsten sind. Die anderen Untersuchungsflächen liegen mit ihren Werten nah beieinander.



### N Stickstoffverteilung

Der niedrigste Anteil an Stickstoff wurde in den Proben der G-Plots gefunden. Daher besteht ein negativer Zusammenhang zwischen dem Kahlschlag und dem Stickstoffvorkommen. Der höchste Anteil an Stickstoff wurde in den Proben der D-Plots gefunden, was die Aussage bestätigt, dass Totholz ein Stickstofflieferant ist.

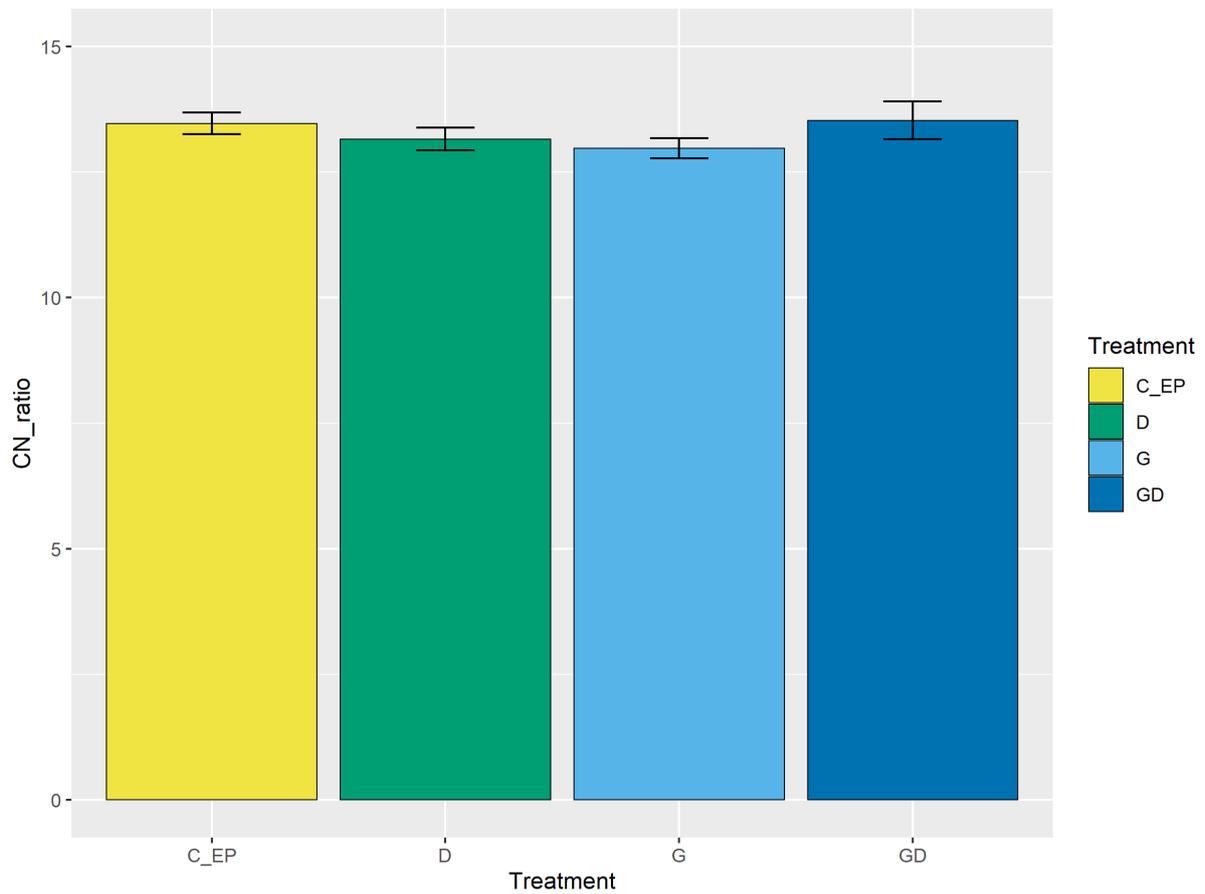
Die Mittelwerte des N der untersuchten Flächen liegen bei 0,5 für die D-Plots, bei 0,5 für die EP-Plots, bei 0,4 für die G-Plots und bei 0,5 für die GD-Plots.



### Schwefelverteilung

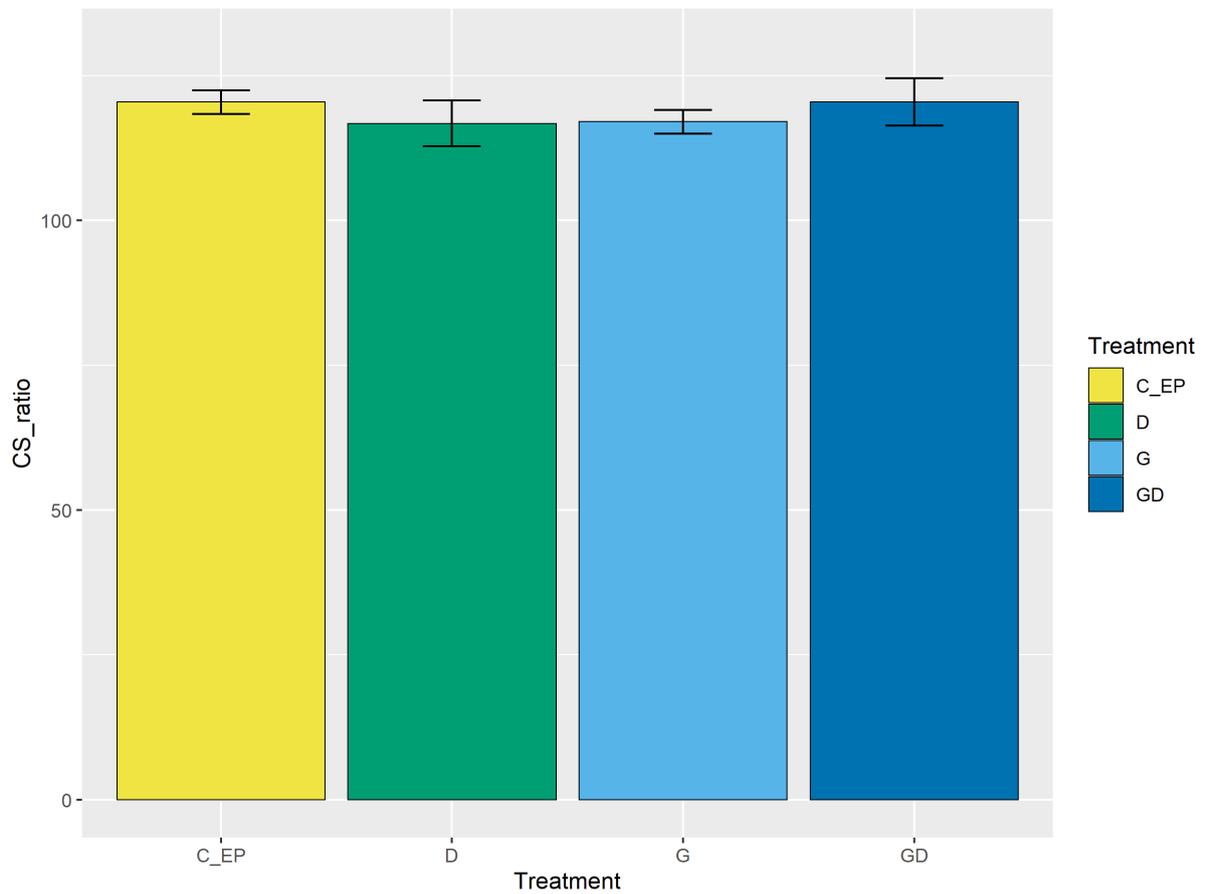
Die Schwefelanteile in den Bodenproben waren sehr gering, jedoch wurde der höchste Anteil in den Proben der D-Plots gefunden, was die Aussage bestätigt, dass Totholz als Lieferant für Schwefel dienen kann. Der geringste Anteil wurde in den Proben der G-Flächen gefunden. Damit ergibt sich ein negativer Zusammenhang zwischen Kahlschlag und Schwefelkonzentration.

Die Mittelwerte des Schwefels liegen bei 0,05 für C\_EP, bei 0,06 für D, bei 0,05 für G und bei 0,05 für GD.



### C/N-Verhältnis

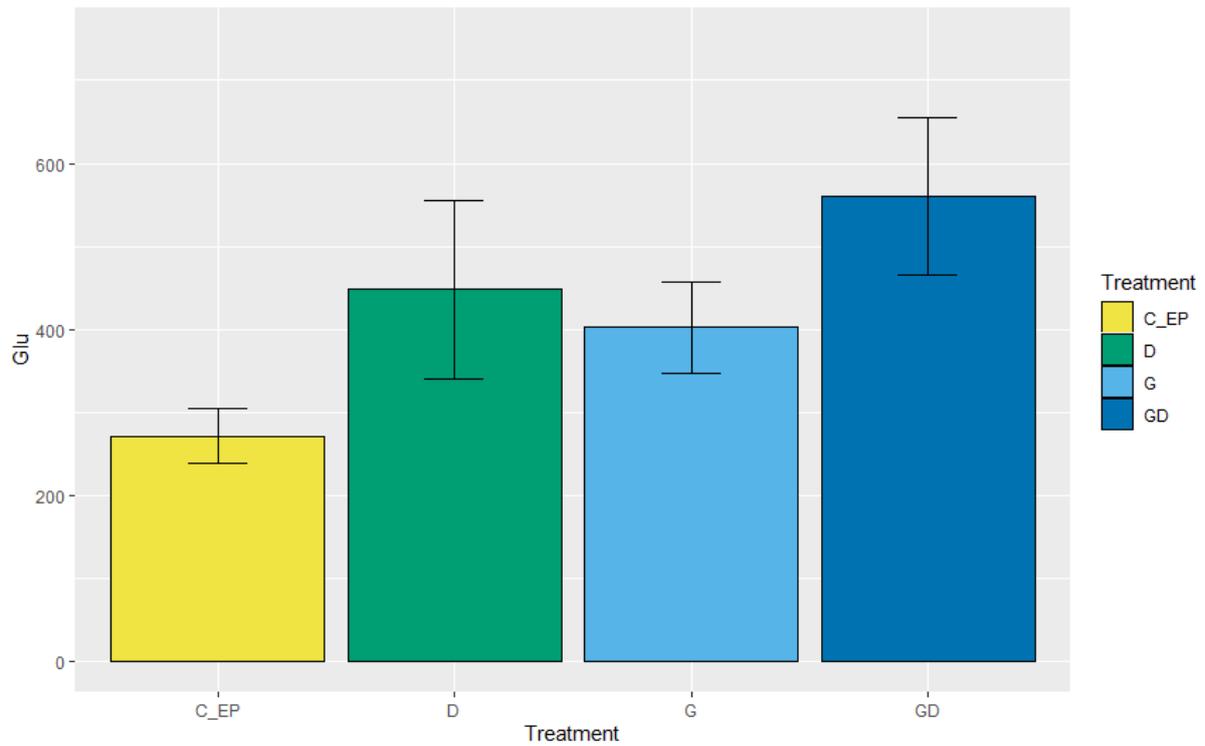
Die Werte der Flächen mit Lochhieb sind größtenteils mit 13,0 etwas niedriger als in der Kontrolle, bei der die C/N-Verhältnisse im Durchschnitt bei 13,5 liegen. Im gleichen Wertebereich liegen die Flächen mit Lochhieb und Totholzeintrag, wohingegen die Werte der Totholzflächen im Durchschnitt bei 13,2 liegen.



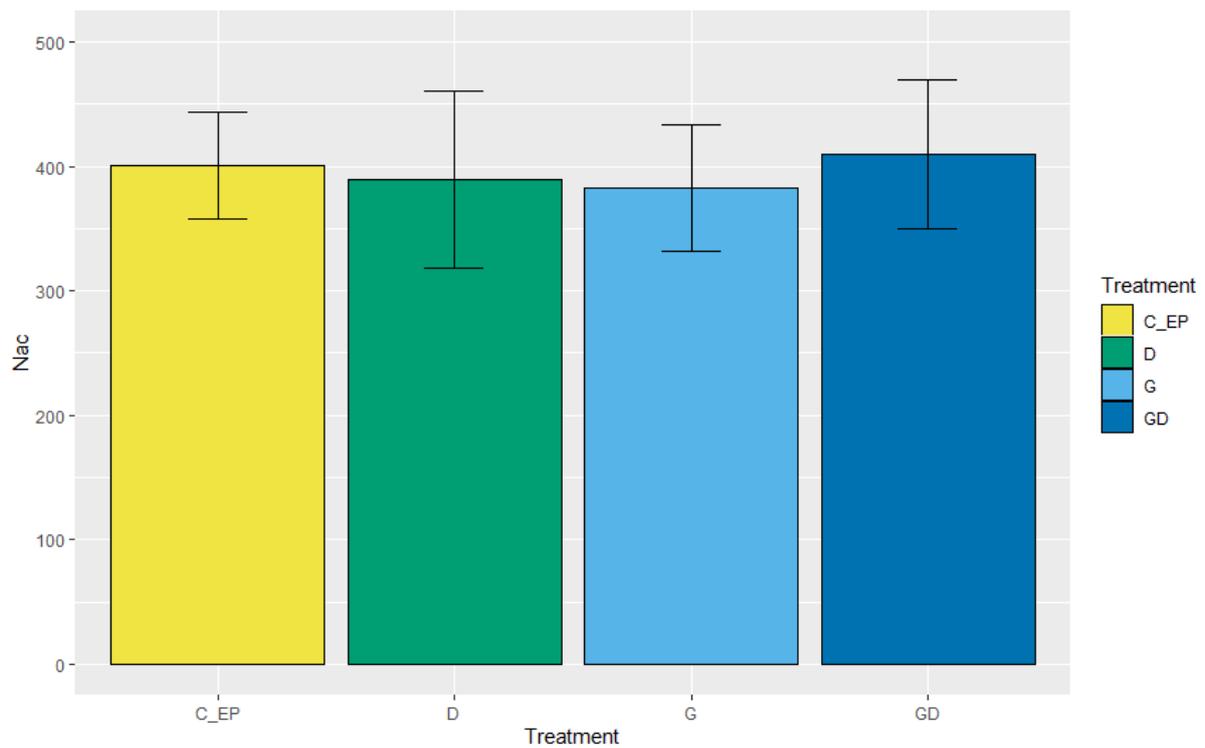
### C/S-Verhältnis

Die Werte der CS-Verteilung liegen nahe beieinander. C\_EP und GD haben die höheren Werte und sind sich sehr nahe. D und G sind ebenfalls sehr nahe und haben niedrigere Werte.

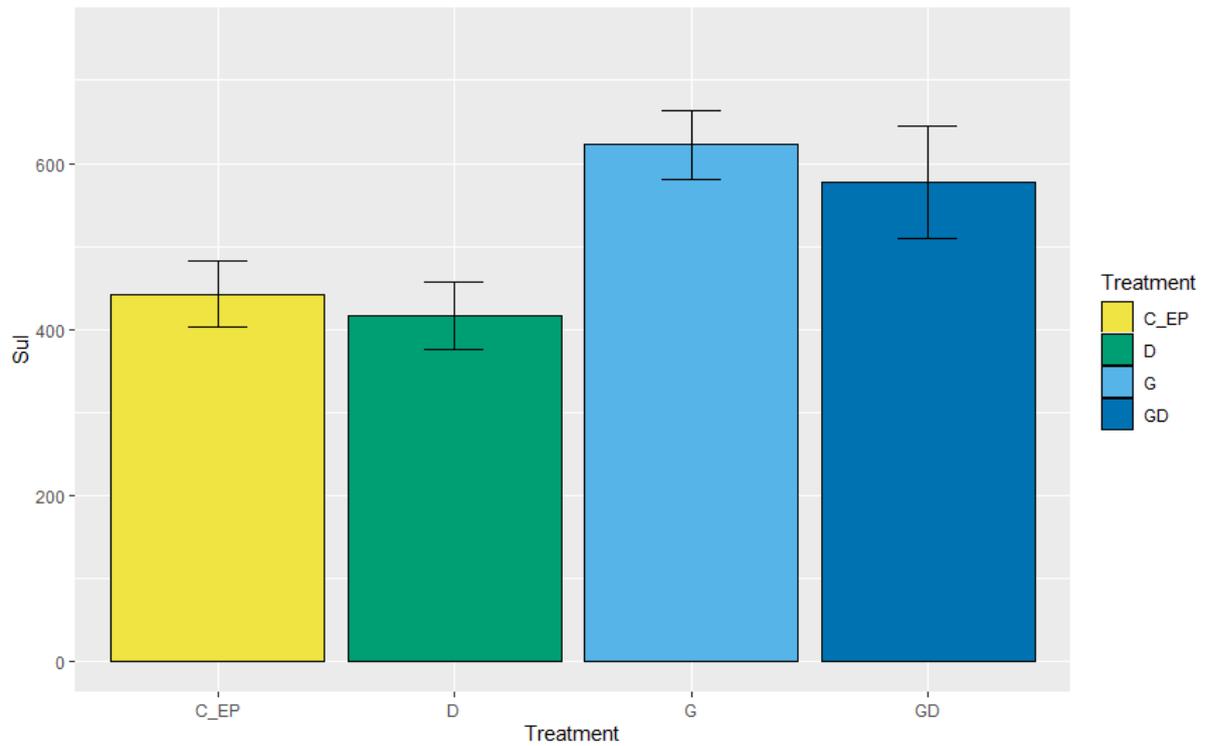
Die Mittelwerte der CS\_ratio der untersuchten Flächen liegen bei 116,74 für die D-Plots, bei 120,42 für die EP-Plots, bei 117,04 für die G-Plots und bei 120,42 für die GD-Plots.



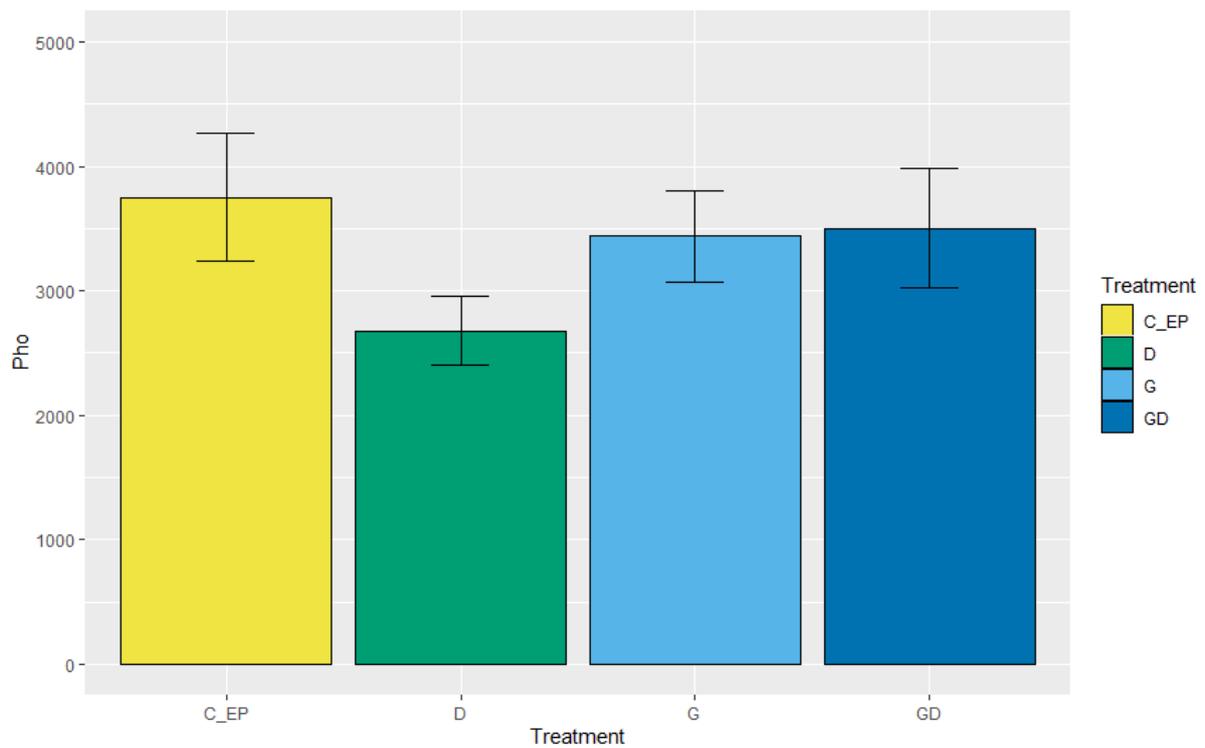
Die geringste Glu-Aktivität weisen die C\_EP auf. Die höchste Aktivität ist in den GD Proben zu finden. D hat mehr Aktivität als G und zeigt, dass Totholz ein wichtiger Bestandteil der Stoffkreisläufe bildet.



Die höchste Aktivität ist auf den GD Flächen zu finden. D und C\_EP besitzen geringere Aktivität. D liegt am niedrigsten Damit zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Kahlschlag und der Nac-Aktivität, welche zunimmt, wenn weniger lebende Bäume vorhanden sind.

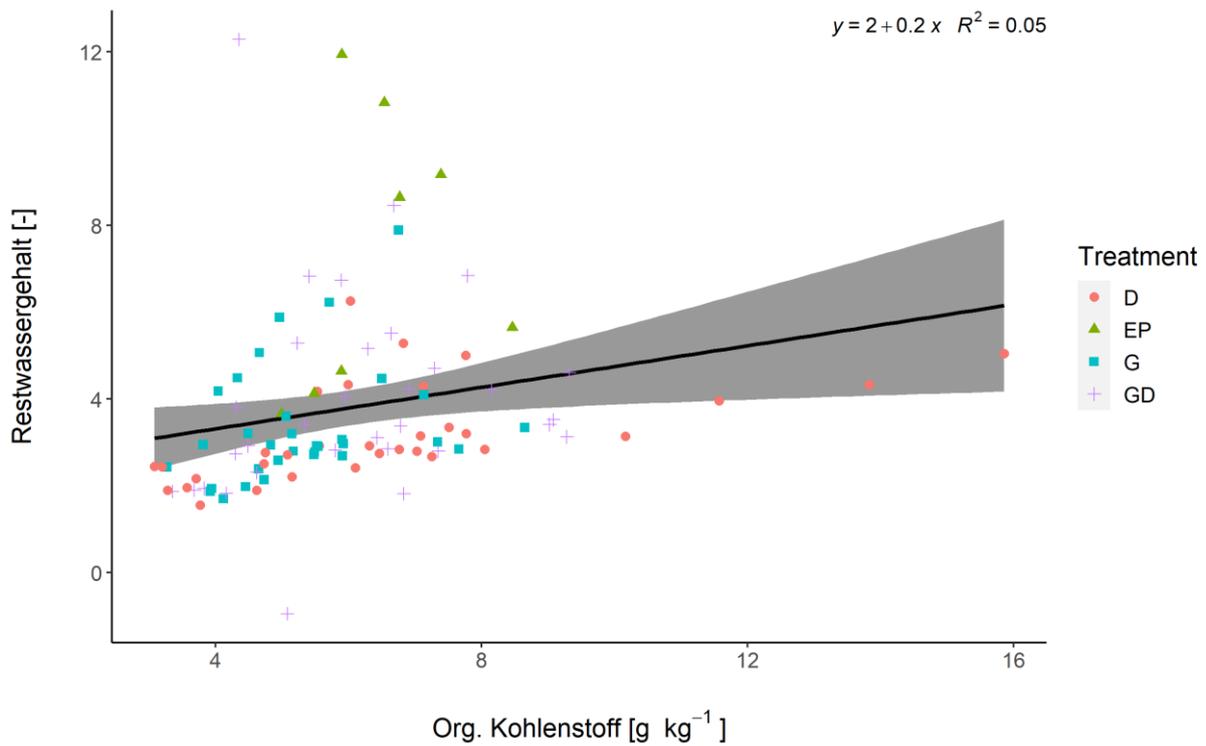


Die höchste Aktivität wurde in den Proben der G- und GD-Plots gefunden. D und C\_EP haben geringere Aktivitäten. Es besteht ein positiver Zusammenhang zwischen dem Kahlschlag und der Sul-Aktivität.

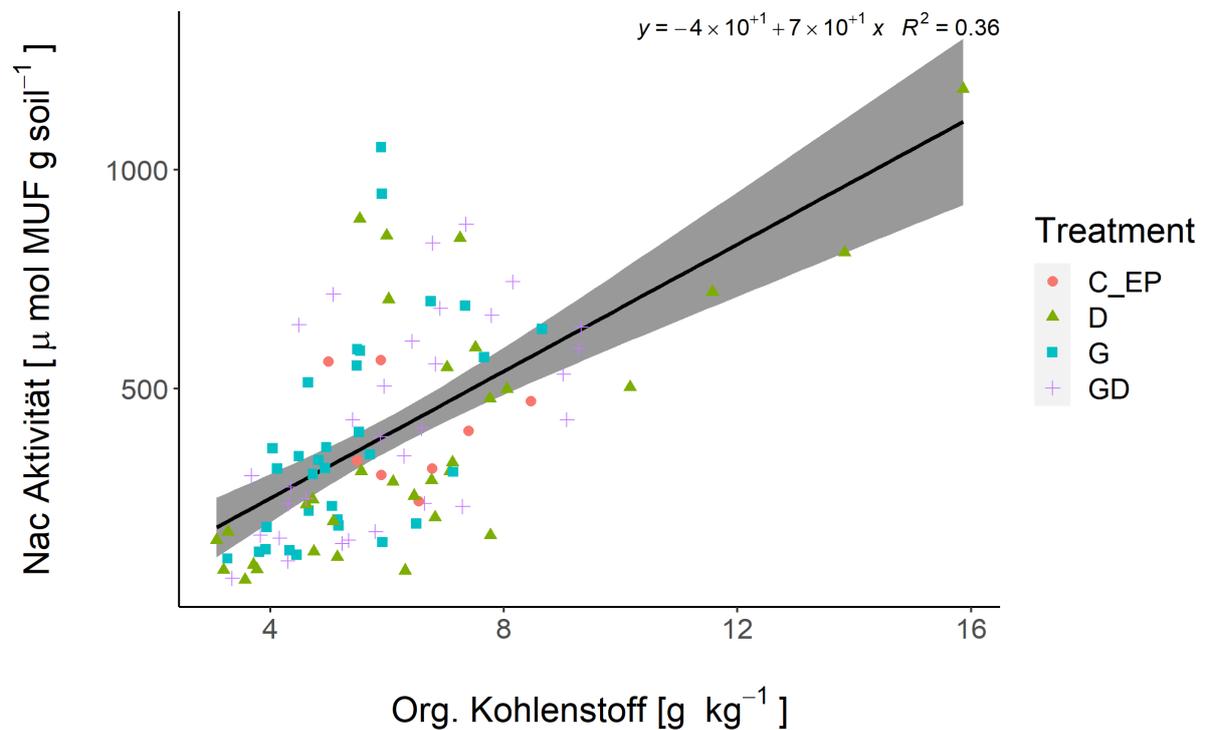


Die Verteilung der Pho-Aktivität ist bei C\_EP, G und GD hoch, wohingegen bei D nur eine geringere Aktivität zu erkennen ist. Daher ergibt sich ein positiver Zusammenhang zwischen einem normalen Bestand und dem reinen Eintrag von Totholz. Zu viel Totholz verringert die Pho-Aktivität.

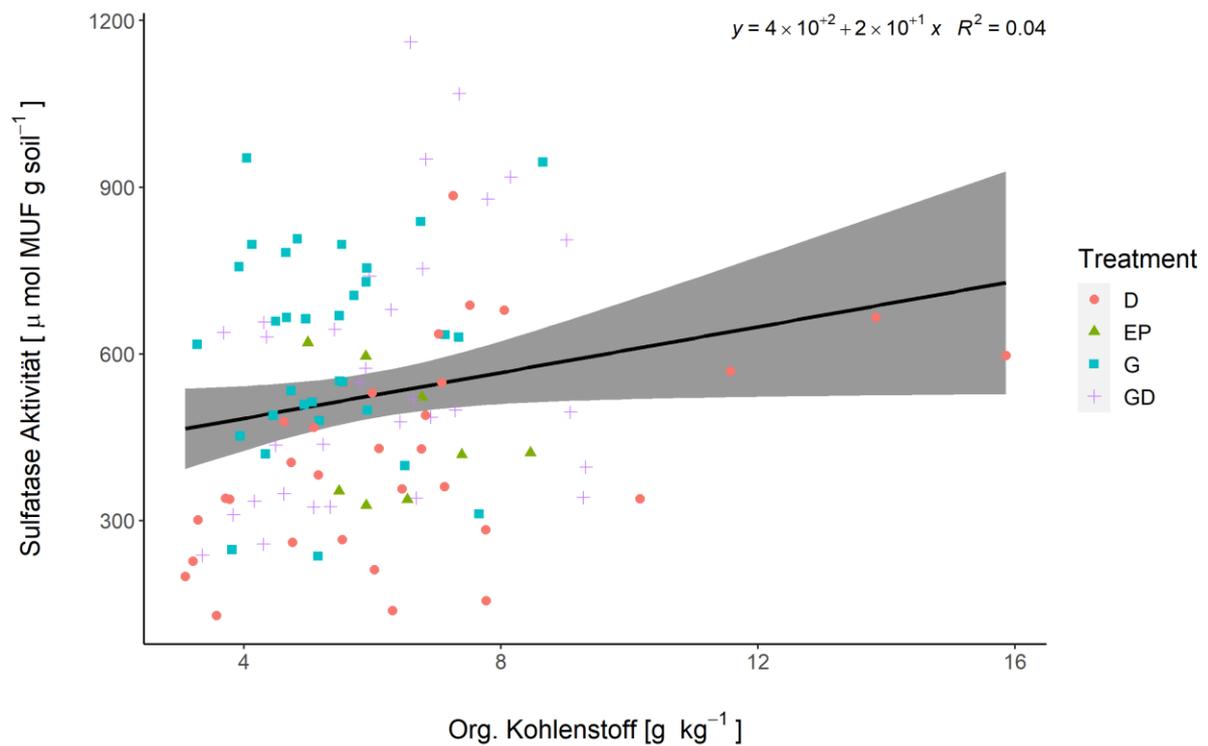
## Lineare Regressionen



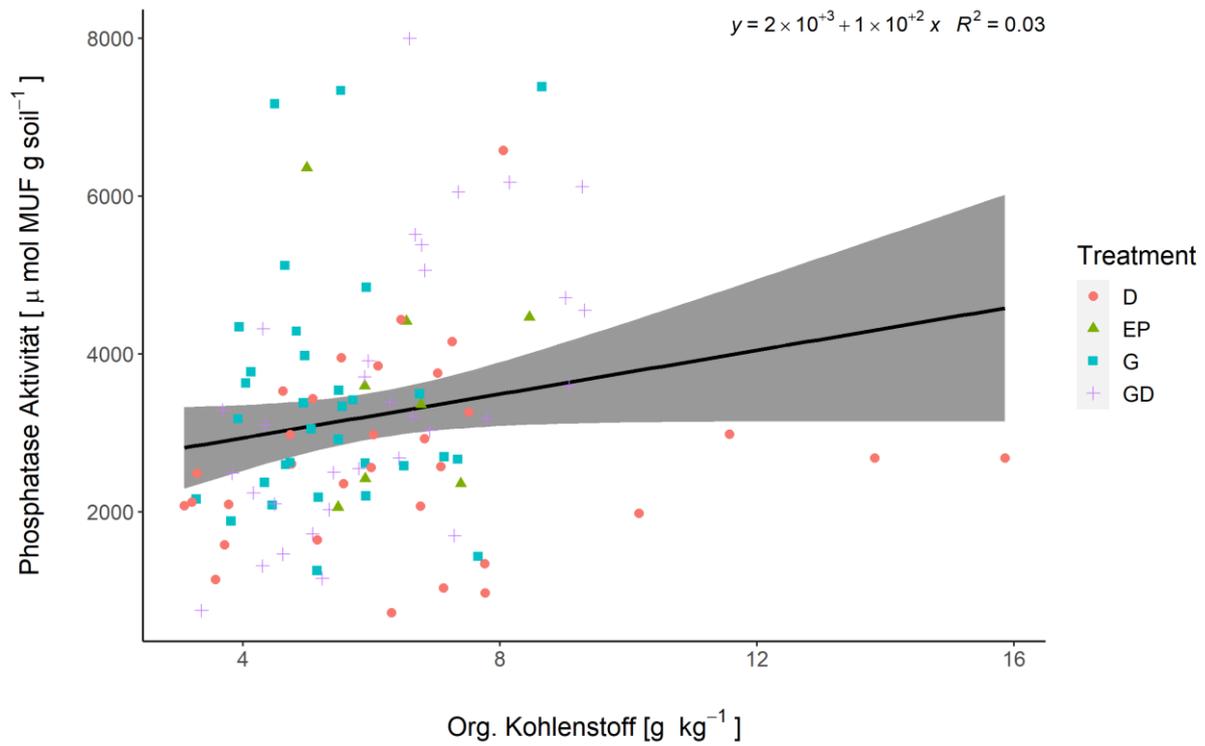
Die lineare Regression des organischen Kohlenstoffs mit dem Restwassergehalt zeigt einen leicht positiven Verlauf. Die Werte akkumulieren sich um den Bereich 4-8 des Kohlenstoffs und 2-4 des Restwassergehaltes. Es gibt einige Ausreißer vor allem auf den Totholz- und Kontrollflächen (EP).



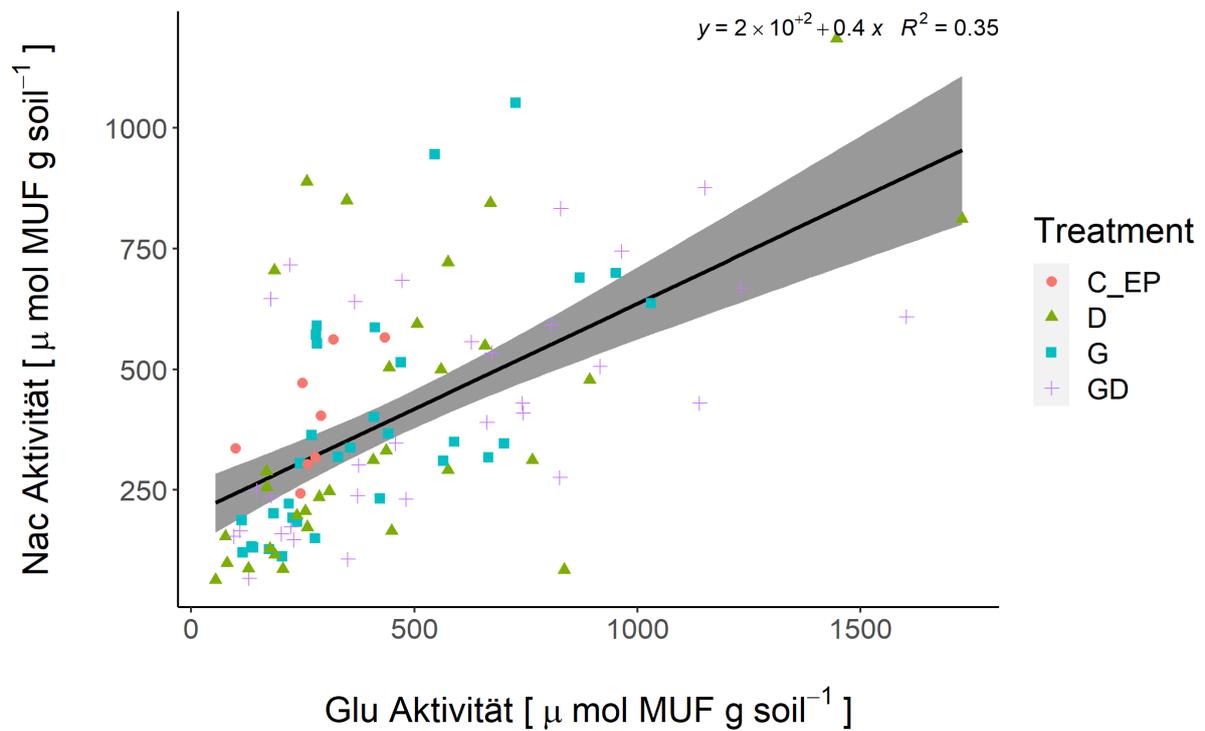
Die lineare Regression des organischen Kohlenstoffs mit der Nac-Aktivität zeigt einen nicht ganz so starken positiven Verlauf wie die Glu-Aktivität, jedoch ist die Verteilung der Werte sehr ähnlich. Auch die Ausreißer befinden sich an vergleichbaren Bereichen und in den Ergebnissen der Totholzflächen.



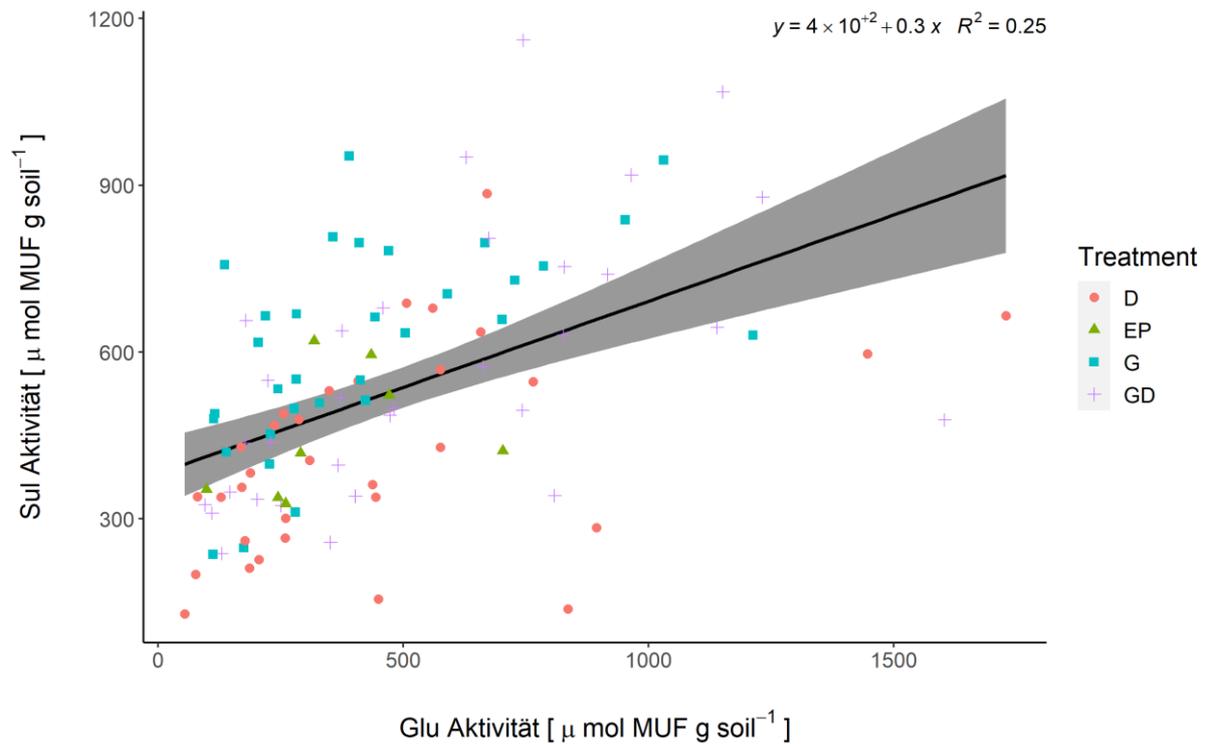
Die lineare Regression des organischen Kohlenstoffs mit der Sulfatase Aktivität zeigt einen leicht positiven Zusammenhang. Die Werte verteilen sich recht homogen im Bereich 4-10 und 200-900. Ausreißer finden sich vor allem in den Werten der Totholz- und Totholz mit Lücke Flächen.



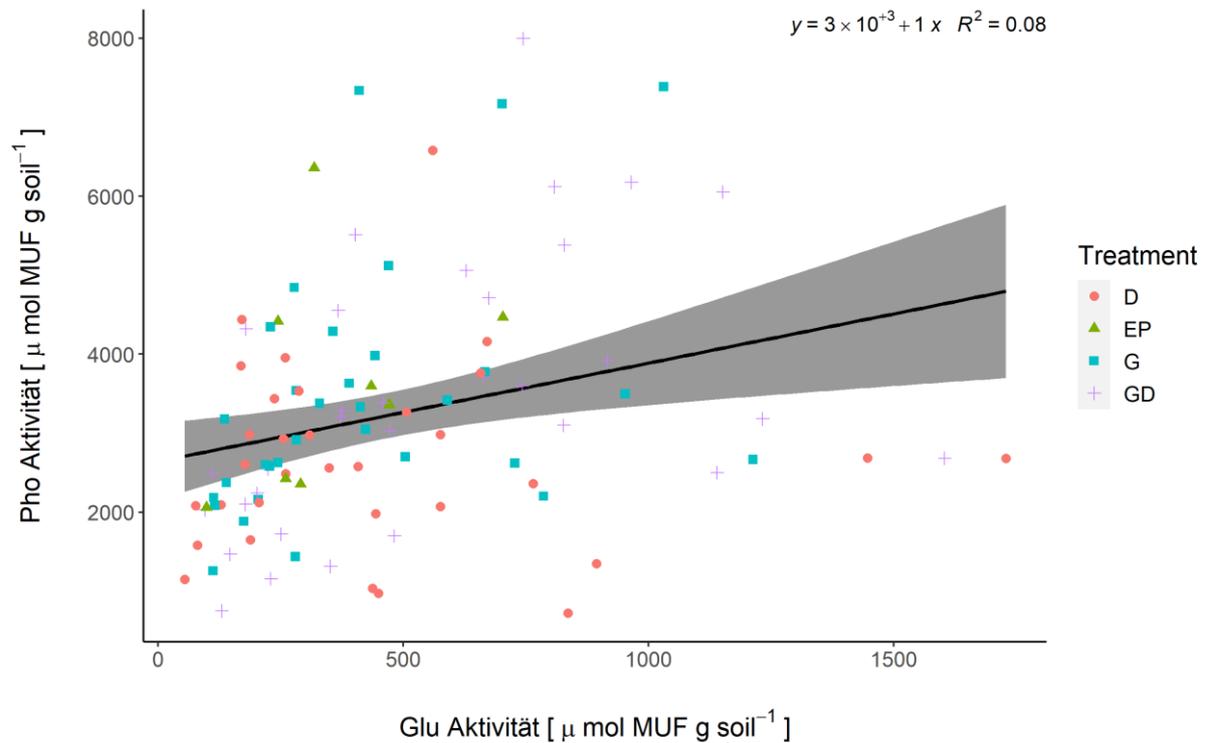
Die lineare Regression des organischen Kohlenstoffs mit der Phosphatase Aktivität zeigt ebenfalls einen leicht positiven Verlauf. Die Werte streuen jedoch weiter als bei der Sulfatase Aktivität. Sie liegen bei 2-8 und 1000-6000. Ausreißer sind auch hier wieder gemischt auf allen Flächen zu erkennen.



Die lineare Regression der Glu-Aktivität und der Nac-Aktivität zeigt einen stark positiven Verlauf. Die Werte streuen teilweise sehr stark, akkumulieren sich jedoch auch zwischen 0-1000 und 0-900. Ausreißer gibt es recht wenige und diese auf allen Flächen bis auf die EPs.

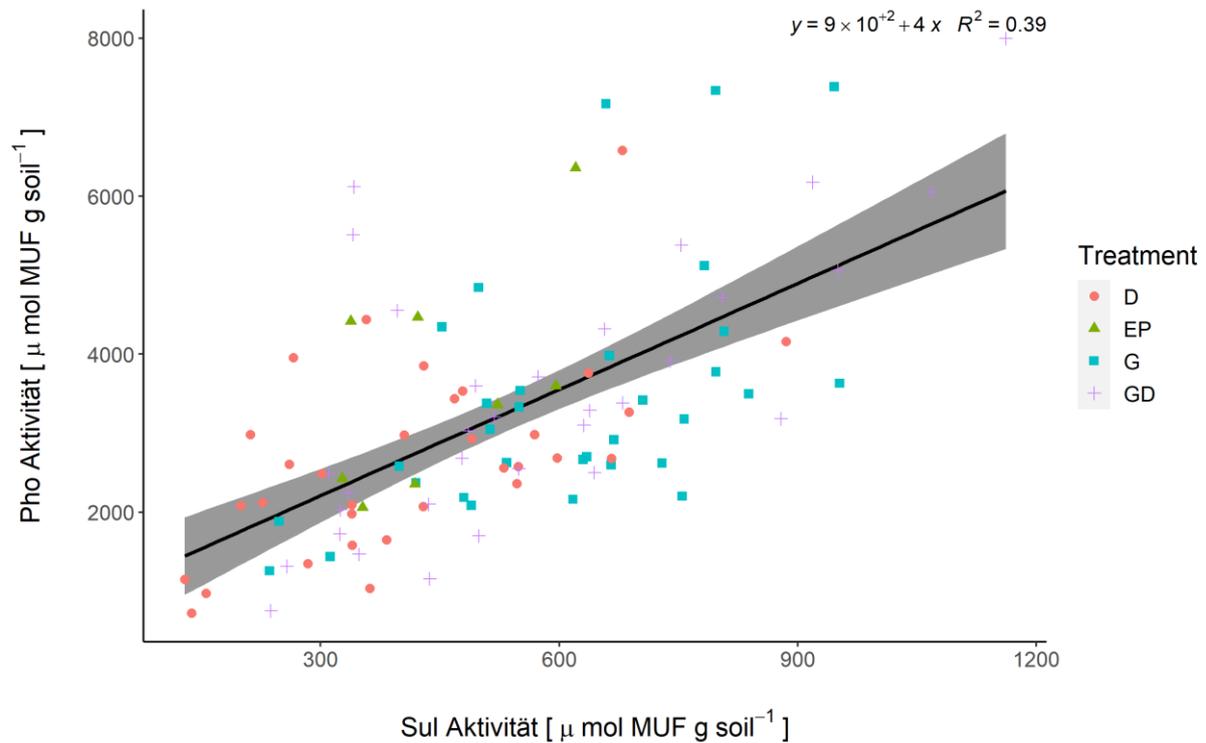


Die lineare Regression der Glu-Aktivität und der Sul-Aktivität zeigt einen positiven Verlauf. Die Werte streuen teilweise sehr stark, akkumulieren sich jedoch ebenfalls wieder zwischen 0-1000 und 0-900. Ausreißer gibt es vor allem auf den GD- und D-Flächen.



Die lineare Regression der Glu-Aktivität und der Pho-Aktivität zeigt einen leicht positiven Verlauf. Die Werte streuen sehr stark und akkumulieren sich hauptsächlich zwischen 0-1000 und 0-600. Ausreißer gibt es einige verteilt über alle Flächen.

Die lineare Regression der Nac-Aktivität und der Pho-Aktivität zeigt einen leicht positiven Verlauf. Die Werte streuen recht stark, weshalb kaum eine Akkumulation der Werte zu erkennen ist. Ausreißer gibt es dennoch einige, diese sind aber auf allen Flächen zu finden.



Die lineare Regression der Sul-Aktivität und der Pho-Aktivität zeigt einen stark positiven Verlauf. Die Werte streuen teilweise sehr stark, akkumulieren sich jedoch auch zwischen 0-900 und 0-5000. Ausreißer gibt es einige und diese finden sich auf allen Flächen.

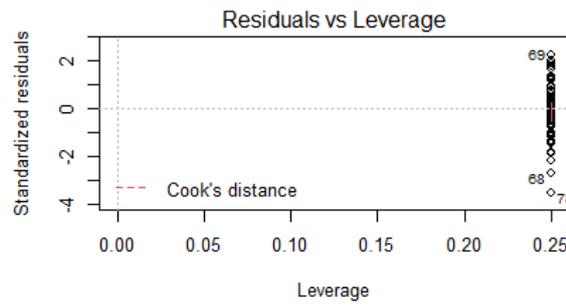
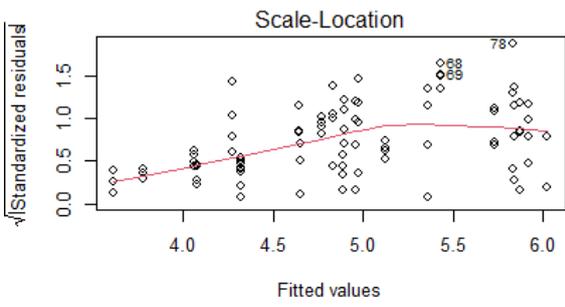
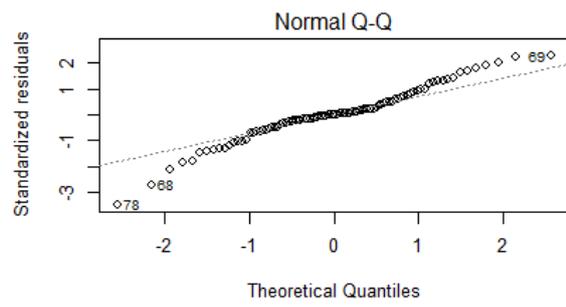
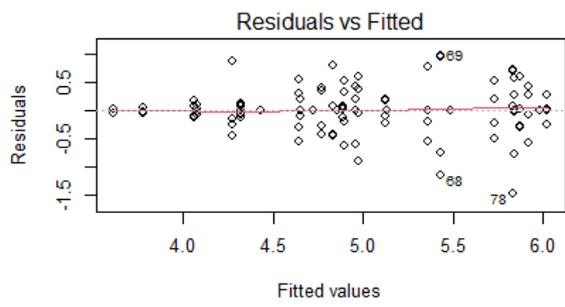
#### Weitere Daten

	TC		IC		N		S		CS_ratio		
	Df	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
EP_Plotid	7	11,4	7,3	0,01	4,4	0,07	10,3	0,001	11,2	566,9	8,9
Treatment	3	10,0	6,5***	0,007	4,2**	0,05	7,1***	0,001	6,9***	102,9	1,6
EP_Plotid:	21	11,0	7,1	0,004	2,44	0,05	7,4	0,001	8,3	215,8	3,4
Treatment											
Residuals	72	1,55		0,002		0,01		0,0001		63,5	

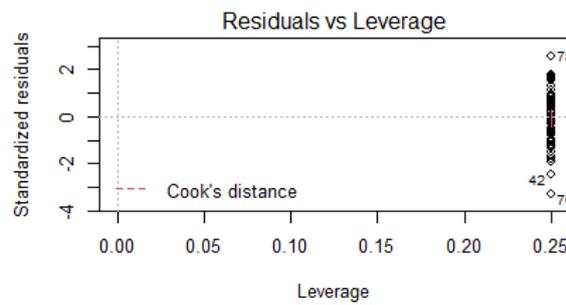
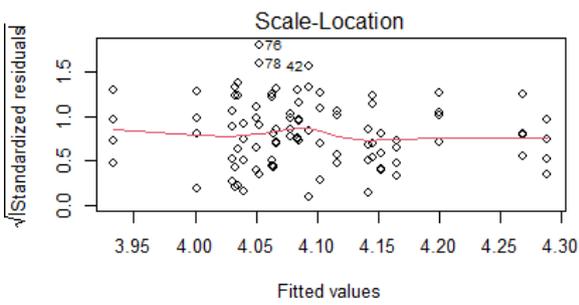
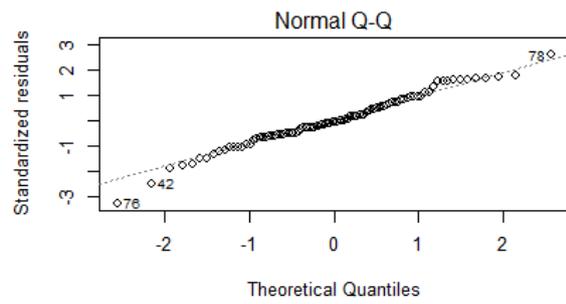
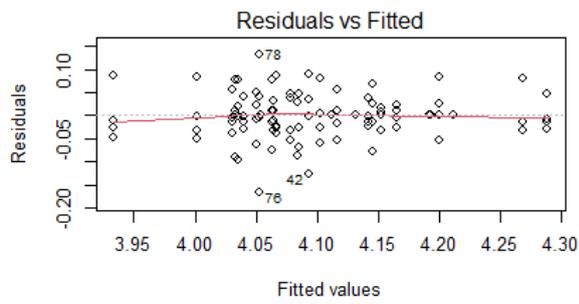
ANOVA Ergebnisse des totalen Kohlenstoffs, anorganischen Kohlenstoffs, Stickstoffs, Schwefels und des C/S-Verhältnisses

#### Diagnostische Plots

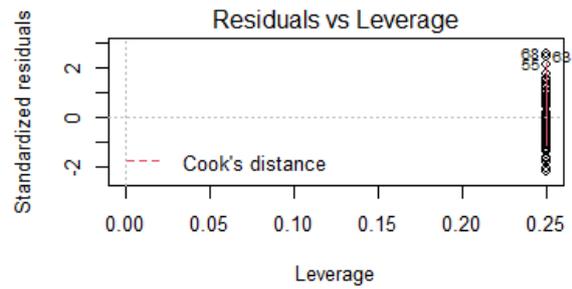
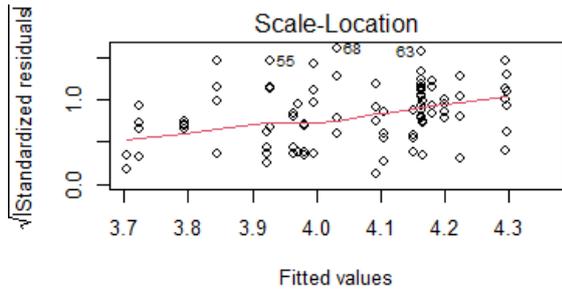
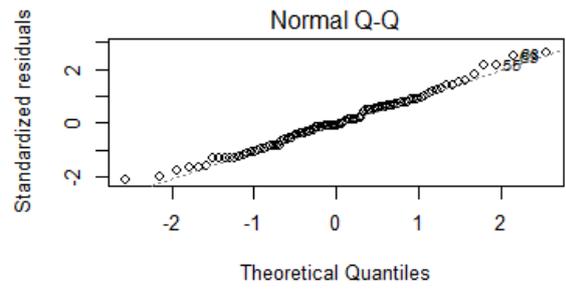
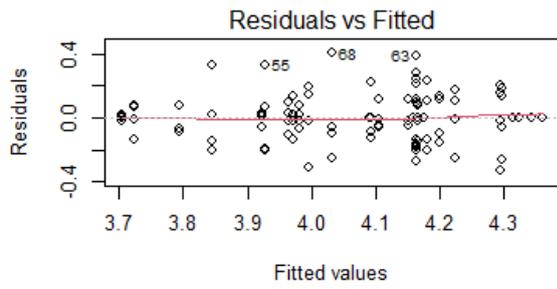
pH-Wert



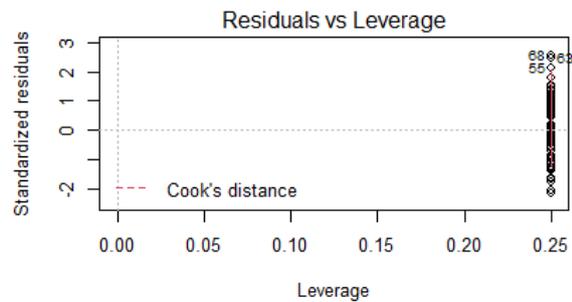
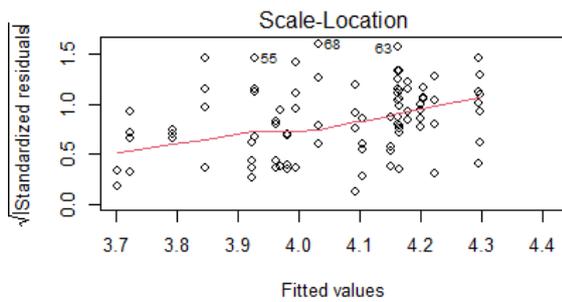
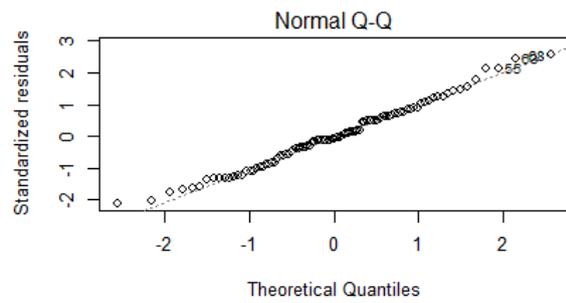
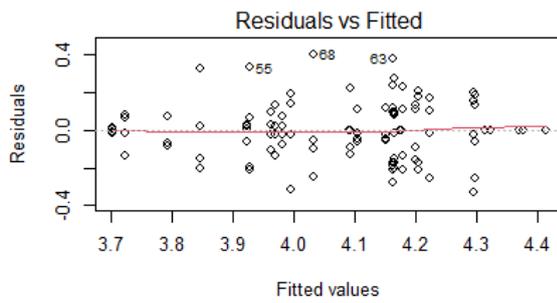
Wassergehalt



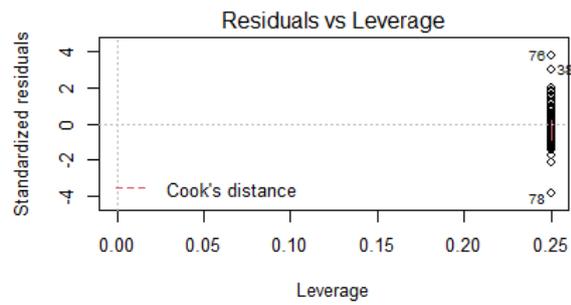
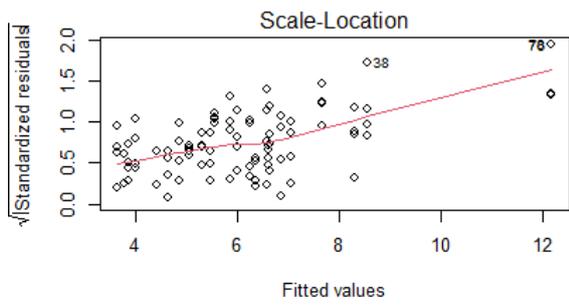
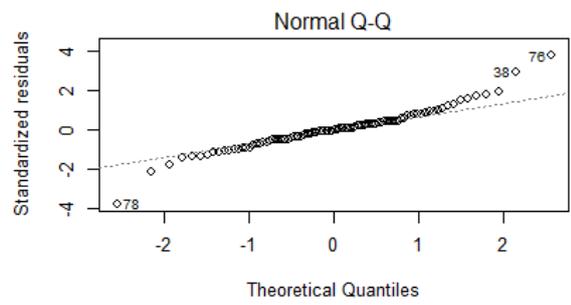
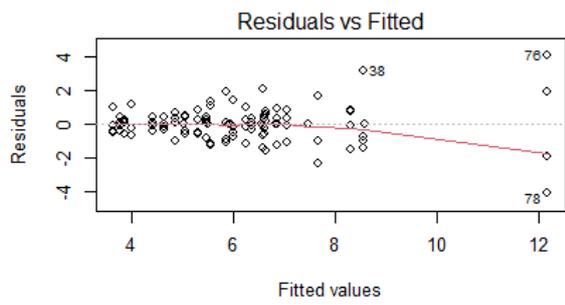
Restwassergehalt



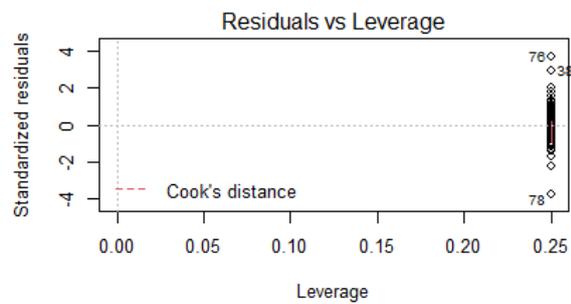
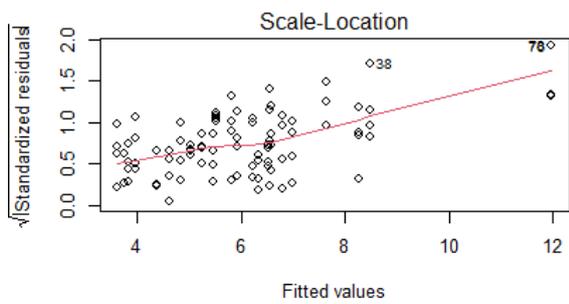
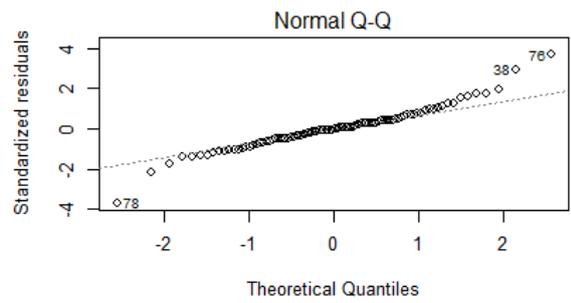
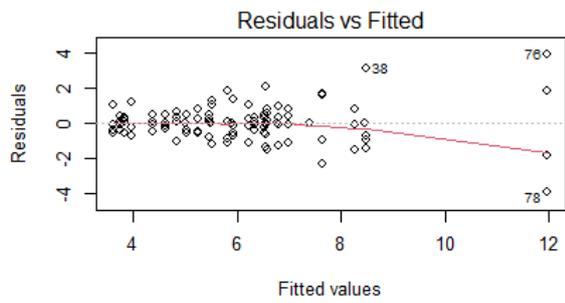
### Geschätzter Tongehalt



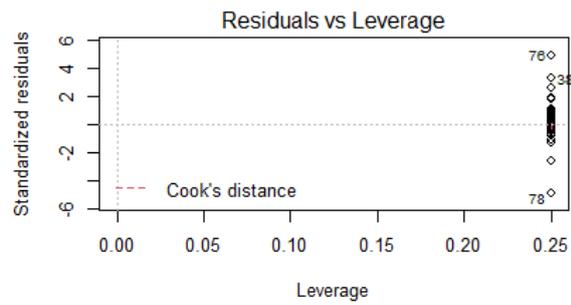
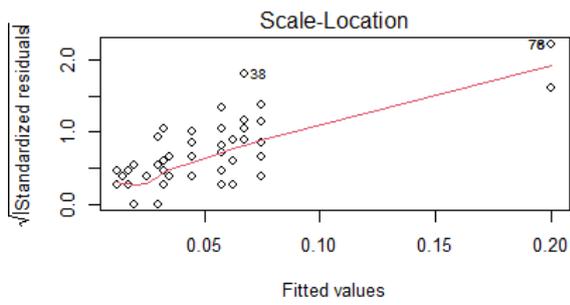
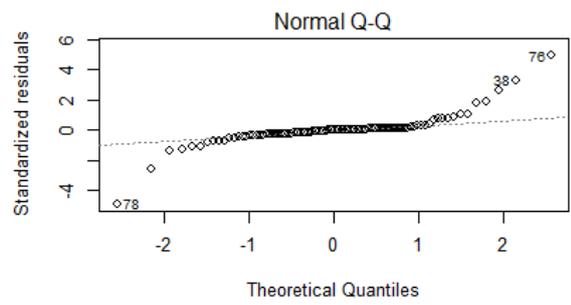
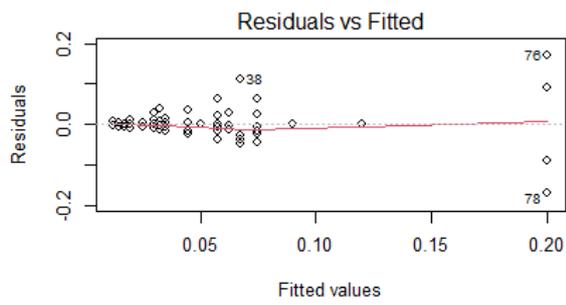
### Totaler Kohlenstoff



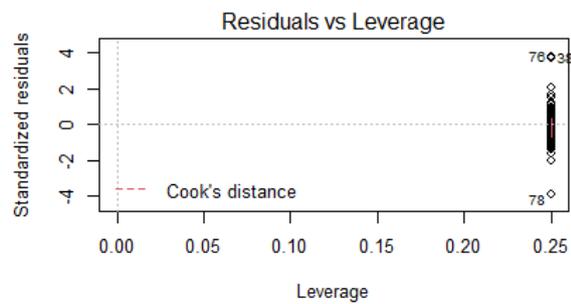
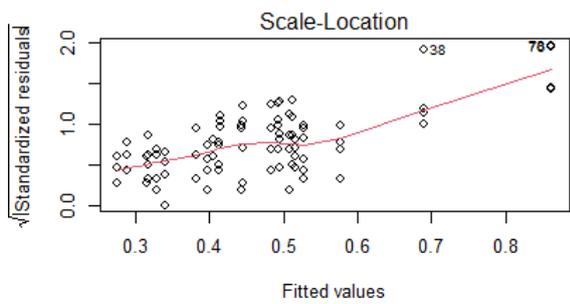
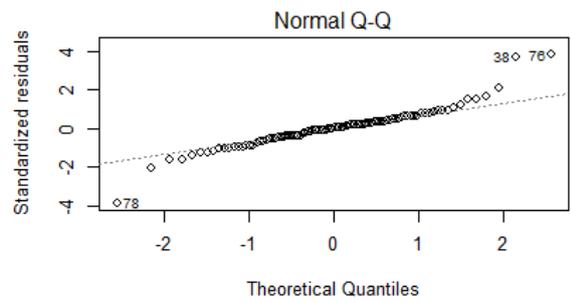
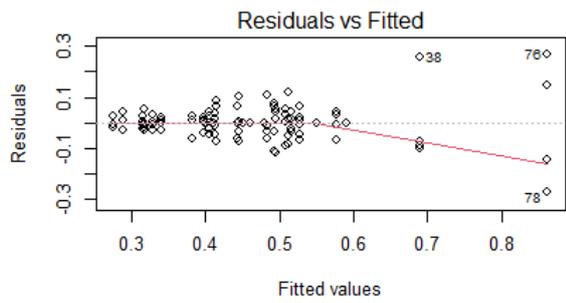
### Organischer Kohlenstoff



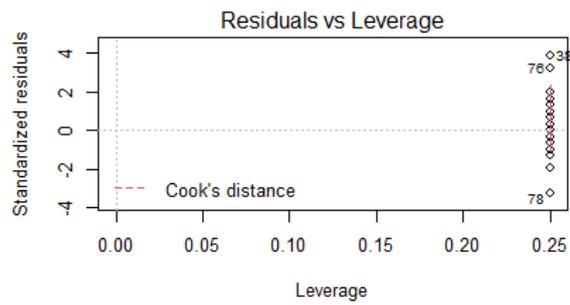
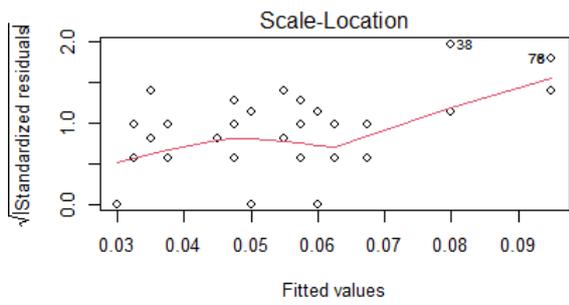
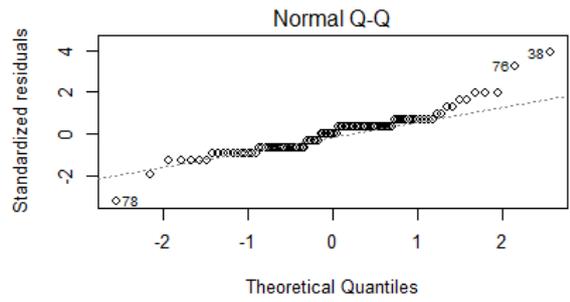
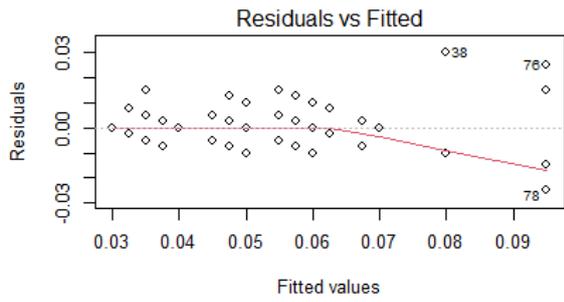
### Anorganischer Kohlenstoff



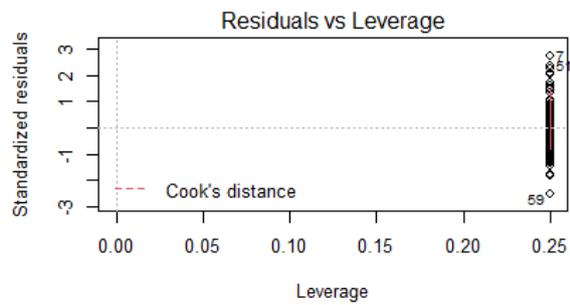
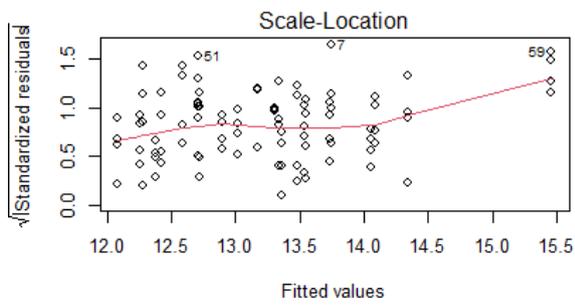
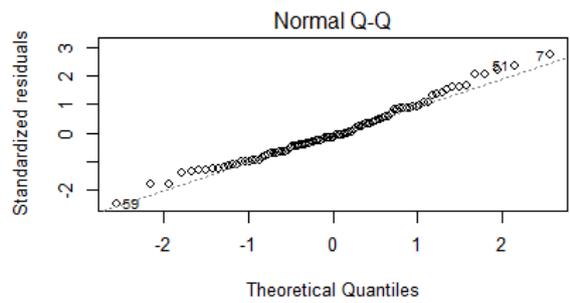
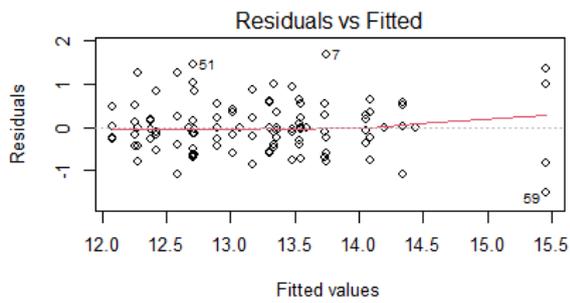
Stickstoff



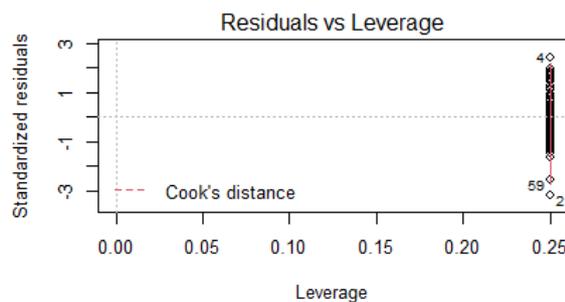
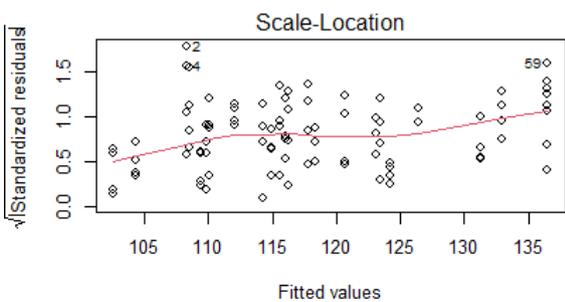
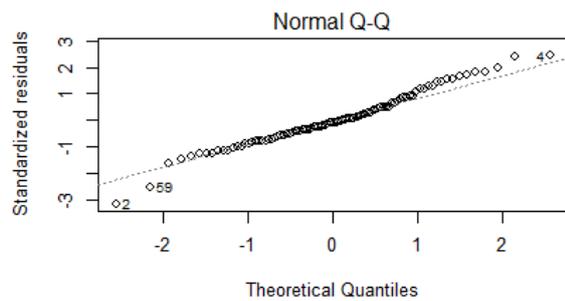
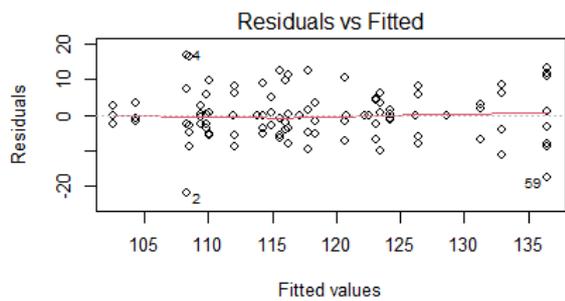
Schwefel



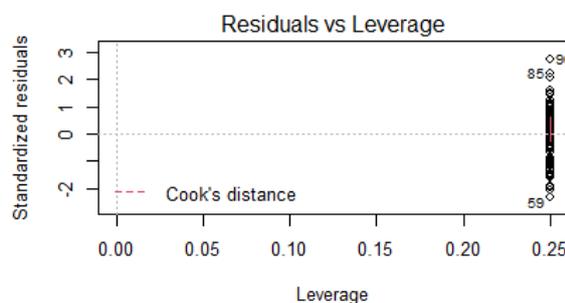
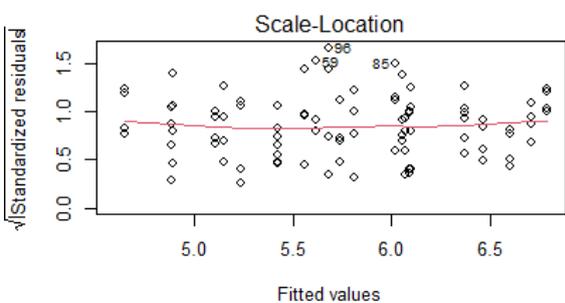
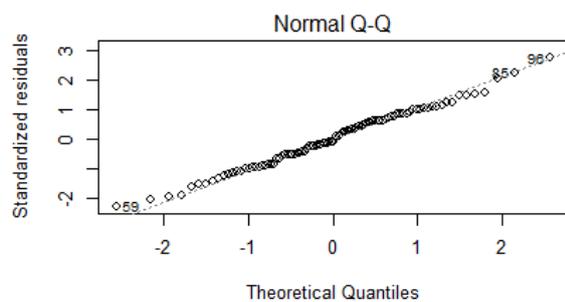
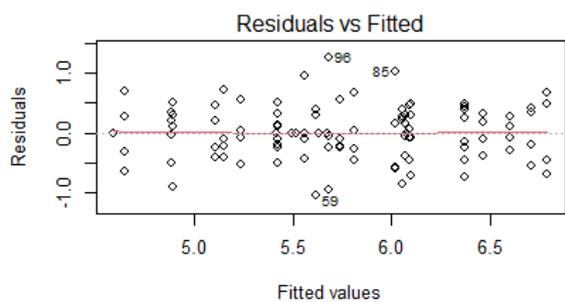
C/N -Verhältnis



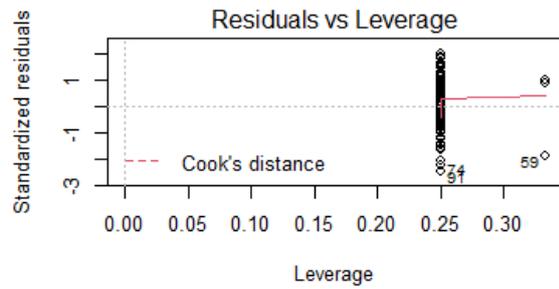
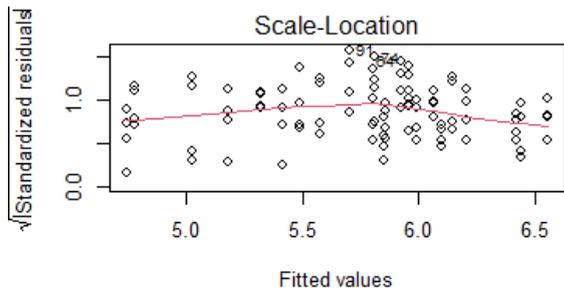
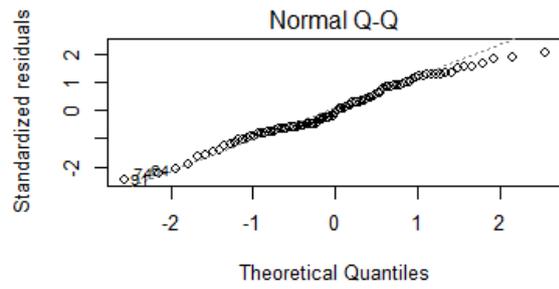
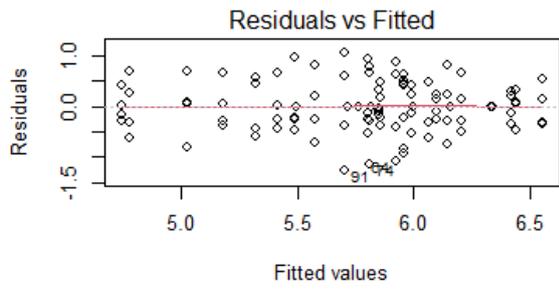
C/S-Verhältnis



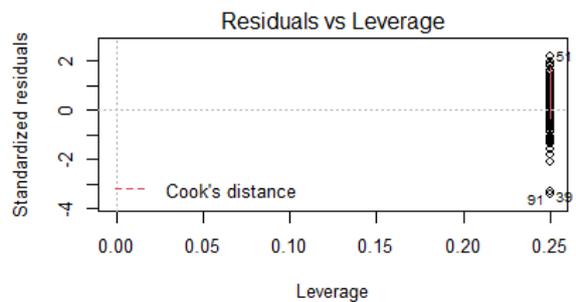
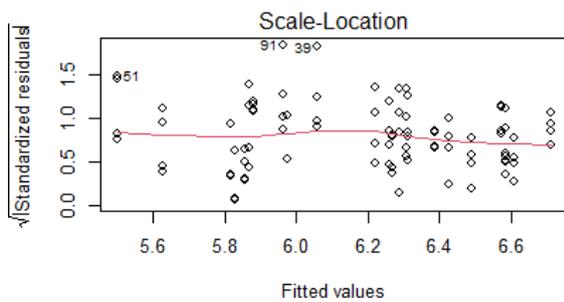
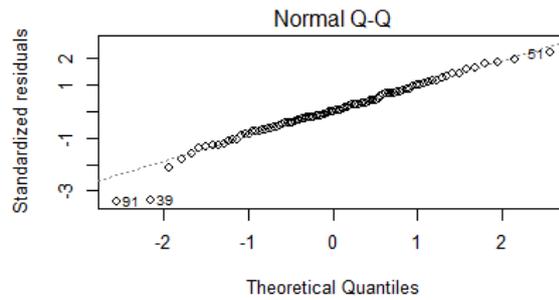
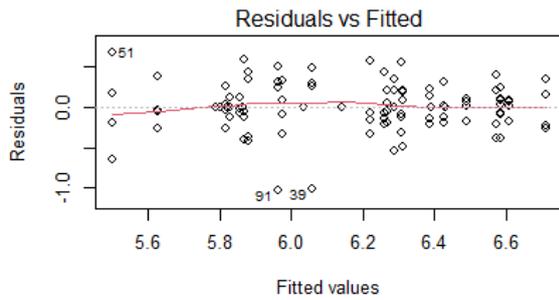
Glu



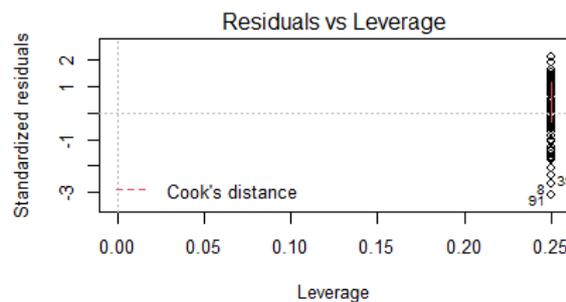
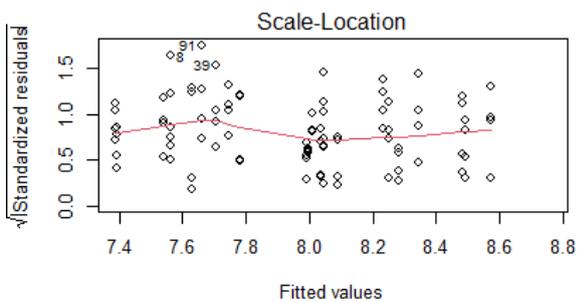
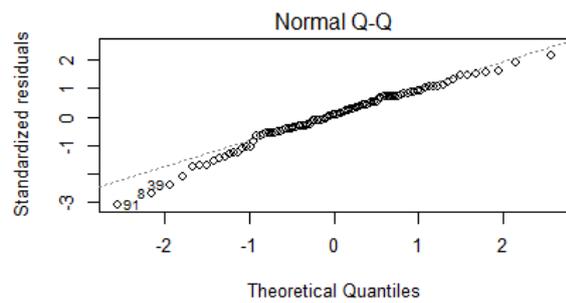
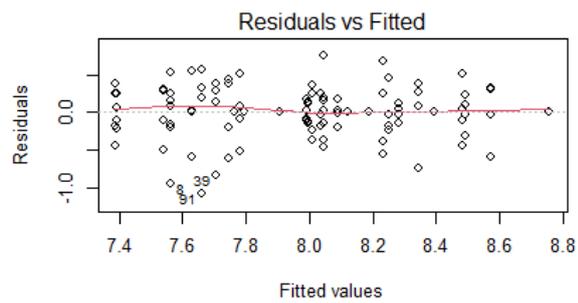
Nac



Sul



Pho



### Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt habe. Die eingereichte Arbeit ist nicht anderweitig als Prüfungsleistung verwendet worden oder in deutscher oder einer anderen Sprache als Veröffentlichung erschienen. Seitens der Verfasserin bestehen keine Einwände, die vorliegende Bachelorarbeit für die öffentliche Benutzung zur Verfügung zu stellen.

Haugeneder Lea