

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Waldbodenkalkung als Maßnahme zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel und zur Sicherung und Erhöhung der CO₂-Speicher- und Senkenfunktion der Wälder.

Teilvorhaben 1: Stabilisierung der Kohlenstoffsequestrierung in der ober- und unterirdischen Biomasse.

Zuwendungsempfänger:

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)

Förderkennzeichen:

22WB407501

Laufzeit:

01.05.2017 bis 30.06.2021

Monat der Erstellung:

10/2021

Datum der Veröffentlichung:

02.01.2023



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für den Waldklimafonds unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung des Vorhabens	3
Short Project Description.....	5
I. Ziele	7
1. Aufgabenstellung.....	7
2. Stand der Technik	9
3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
II. Ergebnisse.....	12
1. Erzielte Ergebnisse.....	12
2. Verwertung	37
3. Erkenntnisse von Dritten	37
4. Veröffentlichungen.....	37
III. Literaturverzeichnis	38

Kurzfassung des Vorhabens

Projektbeschreibung:

Ziel des Vorhabens war es, Grundlagen für Handlungsempfehlungen zum Schutz der Wälder unter sich ändernden Klimabedingungen und zur nachhaltigen Stärkung ihrer Ökosystemdienstleistungen zu schaffen. Dafür sind die Wirkungen der Kalkung auf die C-Sequestrierung in Waldökosystemen, die Bodenstruktur, die Vertiefung der Wurzelsysteme, die klimarelevanten Spurengasflüsse, den Wasserhaushalt, die Waldernährung und das Baumwachstum als Folge der Bodenentsauerung von besonderer Bedeutung. Es ging um den Nachweis, dass mit der Bodenschutzkalkung parallel zur Entsauerung des Bodens die Bioturbation, Aggregatbildung und -stabilität und damit der Gasaustausch als Grundlage für eine verstärkte Tiefendurchwurzelung gefördert werden. Von einer besseren Tiefendurchwurzelung ist ein wichtiger Beitrag zur Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel zu erwarten.

Im Fokus des Teilvorhabens stand im Arbeitspaket 1 die Stabilisierung der C-Sequestrierung in der ober- und unterirdischen Biomasse. Es wurden einerseits die Kohlenstoffpools in der unterirdischen Biomasse quantifiziert, andererseits Bestandesdaten ertragskundlich ausgewertet und Vegetationsaufnahmen durchgeführt, um die Kohlenstoffpools in der oberirdischen Biomasse zu ermitteln. In der Synopse werden die Ergebnisse vor dem Hintergrund der Forschungsfragen teilprojektübergreifend diskutiert. Neben den inhaltlichen Arbeiten im Rahmen des AP 1 hatte die NW-FVA die Koordination des gesamten Kalko-Projektes inne. Dazu gehörten die Kommunikation mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe und die Organisation regelmäßiger Treffen, sowie die Organisation von Informationsveranstaltungen für die forstliche Praxis.

Projektergebnisse:

AP 1.1 C-Vorrat der oberirdischen Biomasse

Sowohl auf den Fichten- als auch auf den Buchenversuchsflächen ist der Zuwachs auf den gekalkten Parzellen größer als auf den ungekalkten. Auf den Fichtenversuchsflächen führt die Waldbodenkalkung langfristig zu einer Steigerung des Wachstums, auf den Buchenversuchsflächen bleibt das Wachstum auf den Kontrollparzellen hinter dem erwartbaren Zuwachs zurück und die Waldbodenkalkung stabilisiert das Wachstum auf dem zu erwartenden Niveau.

Auf die Biomasseproduktion der Kraut- und der Strauchschicht (bis 100 cm Höhe) hat die Waldbodenkalkung hingegen keinen signifikanten Einfluss. Die Biomasse der Moosschicht wird durch die Kalkung auf den Fichtenversuchsflächen signifikant reduziert, auf den Buchenversuchsflächen jedoch nicht verändert.

Die Hypothese, dass die Kohlenstoffsequestrierung in der oberirdischen Biomasse (sowohl in der krautigen Vegetation als auch im Baumbestand) als Folge der Waldbodenkalkung gesteigert wird, kann somit nur für den Baumbestand, nicht aber für die Bodenvegetation bestätigt werden.

AP 1.2 C-Vorrat der unterirdischen Biomasse

Die Feinwurzelbiomasse wurde durch die Waldbodenkalkung auf den Fichtenversuchsflächen nicht signifikant verändert, auf den Buchenversuchsflächen hat sie jedoch, entgegen der Erwartungen, signifikant abgenommen. Die Abnahme geht hauptsächlich auf Veränderungen in der Humusaufgabe zurück. Durch die kalkungsbedingt verbesserten bodenchemischen Eigenschaften ist die Nährstoffverfügbarkeit gesteigert und somit der Bedarf eines großen Feinwurzelsystems zur Erschließung limitierter Nährstoffvorräte verringert. Die Bäume investieren folglich verstärkt in die oberirdische anstelle der unterirdischen Biomasse.

Die Grobwurzelbiomasse wurde durch die Waldbodenkalkung auf den Fichtenversuchsflächen signifikant vergrößert, auf den Buchenversuchsflächen blieb sie jedoch gleich.

Die Hypothese, dass die Kohlenstoffsequestrierung in der unterirdischen Biomasse als Folge der Waldbodenkalkung gesteigert wird, kann so nicht bestätigt werden. Lediglich die Grobwurzelbiomasse auf den Fichtenversuchsflächen hat durch die Waldbodenkalkung zugenommen. Die Feinwurzelbiomasse auf den Buchenversuchsflächen hat hingegen durch die Waldbodenkalkung abgenommen.

AP 1.3 C-Vorrat und Säure-Basenzustand des Bodens

Über das gesamte Bodenprofil (Humusaufgabe bis 60 cm Bodentiefe) betrachtet hatte die Waldbodenkalkung keinen Einfluss auf die Kohlenstoffvorräte. In der Humusaufgabe verringerte die Kalkung den Kohlenstoffvorrat allerdings signifikant, was eine Verringerung sowohl des Kohlenstoffgehalts als auch der Humustrockenmasse widerspiegelt. Die Fichten- und die Buchenversuchsflächen wiesen ähnliche Kohlenstoffverluste in der Humusaufgabe auf. Im Gegensatz zu den Fichtenversuchsflächen kam es auf den Buchenversuchsflächen zu einer signifikanten Zunahme des Kohlenstoffvorrats im Oberboden (0-5 cm).

Der kalkungsbedingt verringerte Kohlenstoffvorrat in der Humusaufgabe wurde weitgehend durch pH-Wertveränderungen getrieben. Entsprechend wiesen die Kalkungsmengen (Säureneutralisierungskapazität), die für die pH-Wertveränderungen verantwortlich sind, eine negative, lineare Beziehung zu den Kohlenstoffvorratsveränderungen auf, was darauf hindeutet, dass höhere Kalkungsmengen zu größeren Kohlenstoffverlusten führen.

Der Sandgehalt im oberen Mineralboden (0-5 cm) hatte einen deutlichen Einfluss auf die Veränderung der Kohlenstoffvorräte durch Kalkung. Während auf Standorten mit hohen Sandgehalten (> 50 %) eine Zunahme des Kohlenstoffvorrats zu beobachten war, zeigte sich auf Standorten mit geringen Sandgehalten (< 50 %) kaum eine Änderung des Kohlenstoffvorrats bzw. eine Abnahme in der Tiefenstufe 10-30 cm. Auf Standorten mit höheren Sandgehalten war allerdings in den Humushorizonten eine stärkere Abnahme der Kohlenstoffvorräte zu beobachten.

Die Veränderung des Kohlenstoffvorrats hing außerdem vom Kohlenstoffgehalt im oberen Mineralboden (0-5 cm) der Kontrollparzelle ab. Auf Versuchsfeldern mit niedrigen Kohlenstoffgehalten auf der Kontrollparzelle (< 5,5 % in 0-5 cm) nahm der Kohlenstoffvorrat durch Kalkung zu, während er auf Flächen mit hohen Kohlenstoffgehalten auf der Kontrollparzelle (> 5,5 % in 0-5 cm) abnahm.

Auf einem Teil der Versuchsfeldern sind die Kohlenstoffvorräte in verschiedenen Zeitintervallen zwischen 1990 und 2019 quantifiziert worden. In der Humusaufgabe nahmen die Kohlenstoffvorräte mit der Zeit zu, allerdings im L/O_r-Horizont der gekalkten Parzellen am wenigsten. Das führte zu einer signifikant geringeren jährlichen Zunahme der Kohlenstoffvorräte im L/O_r-Horizont auf den gekalkten im Vergleich zu den Kontrollparzellen. Schwierigkeiten bei der Trennung von Humusaufgabehorizonten könnten den zeitlichen Trend allerdings beeinflusst haben. Die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden haben sich weder auf den gekalkten noch auf den Kontrollparzellen mit der Zeit signifikant verändert.

Die Hypothese, dass in den ersten Jahren nach Kalkung der Abbau von Auflagehumus die Kohlenstoffbilanz dominiert, kann nur eingeschränkt bestätigt werden. Zwar waren die Kohlenstoffvorräte in der Humusaufgabe der gekalkten Parzellen geringer als der ungekalkten, aber auch auf den gekalkten Parzellen kam es im Laufe der Zeit zu einer Zunahme im Auflagehumus, wenn auch weniger ausgeprägt als auf den Kontrollparzellen. Der zweite Teil der Hypothese, dass langfristig der Umbau von Auflagehumus in Mineralbodenhumus und die Bildung von stabilen Calciumhumaten zu einer Steigerung der Kohlenstoffspeicherung im Waldboden führt, wird nur eingeschränkt durch die Ergebnisse unterstützt. Der Kalkungseffekt ist stark standortsabhängig, wobei der Sandgehalt und der Kohlenstoffgehalt im oberen Mineralboden der Kontrollparzelle eine wichtige Rolle zu spielen scheinen.

Short Project Description

Project objective:

The aim of the project was to create the basis for recommendations for action to protect forests under changing climatic conditions and to sustainably strengthen their ecosystem services. The effects of liming on carbon sequestration in forest ecosystems, the soil structure, the deepening of the root systems, the climate-relevant trace gas fluxes, the water balance, forest nutrition and tree growth as a result of soil de-acidification are of particular importance. The aim was to prove that with the soil protection liming parallel to the de-acidification of the soil the bioturbation, aggregate formation and stability and thus the gas exchange are promoted as the basis for an increased deep rooting. Enhanced deep rooting can be expected to make an important contribution to the adaptability of forests to climate change.

The focus of the sub-project in WP 1 was the stabilisation of C sequestration in the above-ground and below-ground biomass. On the one hand, the carbon pools in the belowground biomass were quantified, on the other hand, stand data were analysed from the point of view of yield and vegetation surveys were carried out in order to determine the carbon pools in the aboveground biomass. In the synopsis the results are discussed across subprojects against the background of the research questions.

In addition to the content-related work within the framework of WP1, the NW-FVA was responsible for the coordination of the entire KalKo-project. This included communication with the project-accompanying working group and the organisation of regular meetings, as well as the organisation of information events for forestry practice.

Project results:

AP 1.1 C stock of the above-ground biomass

On both the spruce and the beech experimental plots, the growth on the limed plots is greater than on the unlimed plots. On the spruce experimental plots, forest soil liming leads to an increase in growth in the long term; on the beech experimental plots, growth on the control plots falls short of the expected growth and forest soil liming stabilises growth at the expected level.

On the other hand, forest liming has no significant influence on the biomass production of the herbaceous and shrub layer (up to 100 cm height). The biomass of the moss layer is significantly reduced by liming on the spruce experimental plots, but not changed on the beech experimental plots.

The hypothesis that carbon sequestration in above-ground biomass (both in herbaceous vegetation and in the tree stand) is increased as a result of forest liming can thus only be confirmed for the tree stand, but not for the ground vegetation.

AP 1.2 C stock of the belowground biomass

The fine root biomass was not significantly changed by forest liming on the spruce experimental plots, but on the beech experimental plots it decreased significantly, contrary to expectations. The decrease is mainly due to changes in the humus layer. Due to the improved soil chemical properties as a result of liming, nutrient availability has increased and thus the need for a large fine root system to exploit limited nutrient reserves has been reduced. As a result, the trees invest more in above-ground biomass instead of below-ground biomass.

The coarse root biomass was significantly increased by forest liming on the spruce experimental plots, but remained the same on the beech experimental plots.

The hypothesis that carbon sequestration in the belowground biomass is increased as a result of forest liming can thus not be confirmed. Only the coarse root biomass on the spruce experimental plots increased as a result of forest liming. The fine root biomass on the beech experimental plots, on the other hand, has decreased as a result of forest liming.

AP 1.3 C stock and acid-base state of the soil

Considered over the entire soil profile (forest floor up to 60 cm soil depth), forest liming had no influence on carbon stocks. In the forest floor, however, liming significantly reduced carbon stocks, reflecting a reduction in both carbon content and forest floor dry mass. The spruce and beech experimental plots showed similar carbon losses in the forest floor. In contrast to the spruce experimental plots, there was a significant increase in the carbon stock in the topsoil (0-5 cm) on the beech experimental plots.

The liming-induced reduction in carbon stocks in the forest floor was largely driven by changes in pH. Accordingly, the liming amounts (acid neutralisation capacity) responsible for the pH changes showed a negative linear relationship with the carbon stock changes, indicating that higher liming amounts lead to greater carbon losses.

The sand content in the upper mineral soil (0-5 cm) had a significant influence on the change in carbon stocks due to liming. While on sites with high sand contents (> 50 %) an increase in carbon stocks was observed, on sites with low sand contents (< 50 %) there was hardly any change in carbon stocks or a decrease in 10-30

cm soil depth. On sites with higher sand contents, however, a stronger decrease in carbon stocks was observed in the forest floor.

The change in carbon stocks also depended on the carbon content in the upper mineral soil (0-5 cm) of the control plot. On experimental plots with low carbon contents on the control plot (< 5.5 % in 0-5 cm), the carbon stock increased due to liming, whereas it decreased on plots with high carbon contents on the control plot (> 5.5 % in 0-5 cm).

On some of the experimental plots, carbon stocks were quantified at different time intervals between 1990 and 2019. In the forest floor, carbon stocks increased over time, but least in the L/Of horizon of the limed plots. This resulted in a significantly lower annual increase in carbon stocks in the L/Of horizon on the limed compared to the control plots. Difficulties in separating forest floor horizons may have influenced the temporal trend, however. Carbon stocks in the mineral soil did not change significantly over time in either the limed or control plots.

The hypothesis that in the first years after liming the decomposition of organic matter in the forest floor dominates the carbon balance can only be confirmed to a limited extent. Although the carbon stocks in the humus layer of the limed plots were lower than those of the unlimed plots, there was also an increase in the forest floor on the limed plots over time, albeit less pronounced than on the control plots. The second part of the hypothesis that in the long term the conversion of forest floor humus into mineral soil humus and the formation of stable calcium humates lead to an increase in carbon storage in the mineral soil, is only supported to a limited extent by the results. The liming effect is strongly site-specific, whereby the sand content and the carbon content in the upper mineral soil of the control plot seem to play an important role.

I. Ziele

1. Aufgabenstellung

Gesamtziel des Vorhabens

Mit dem geförderten Vorhaben sollten die Einflüsse der Waldbodenkalkung auf die Kohlenstoffsequestrierung in Waldökosystemen einerseits und auf die Resilienz der Ökosysteme bei sich ändernden Klimabedingungen andererseits quantifiziert werden. Ziel des Vorhabens war es, die Grundlagen für Handlungsempfehlungen zum Schutz der Wälder unter sich ändernden Klimabedingungen und zur nachhaltigen Stärkung ihrer Ökosystemdienstleistungen zu erweitern. Neben dem Bodenschutz, insbesondere seiner Klimafunktion, ist hier auch der Hochwasserschutz von hoher gesellschaftlicher Relevanz. Ein wichtiger Aspekt des Bodenschutzes im Wald ist es, die Wasserretention und die Verringerung des Risikos von Hochwasser zu gewährleisten. Die kalkungsbedingte Stabilisierung von Bodenaggregaten, die Verbesserung hydraulischer Eigenschaften, wie Infiltrations- und Wasserspeicherkapazität, und die tiefere Durchwurzelung spielen dabei wahrscheinlich eine wichtige Rolle.

Wissenschaftliche Arbeitsziele des Vorhabens

Zur Erweiterung der Grundlagen für Handlungsempfehlungen zum Schutz der Wälder unter sich ändernden Klimabedingungen und zur nachhaltigen Stärkung ihrer Ökosystemdienstleistungen sind die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Wirkungen der Kalkung auf die Kohlenstoffdynamik in Waldökosystemen, die Biomassebildung, die Bodenstruktur und die Vertiefung der Wurzelsysteme als Folge der Bodenentsauerung von besonderer Bedeutung. Außerdem wurde der Effekt der Kalkung auf klimarelevante Spurengasflüsse zwischen Waldböden und Atmosphäre bilanziert, um eine mögliche Mitigationsleistung (Festlegung von Treibhausgasen und Kohlenstoffsequestrierung) durch die kalkungsbedingte Stabilisierung der Waldökosysteme in der Gesamtbewertung zu berücksichtigen. Als zentrale Vitalfunktion wurde die Wirkung der Bodenschutzkalkung auf die Waldernährung und das Baumwachstum untersucht. Es geht um den Nachweis, dass mit der Bodenschutzkalkung parallel zur Entsauerung des Bodens die Bioturbation, Aggregatbildung und -stabilität und damit der Gasaustausch (Kohlendioxid CO₂, Lachgas N₂O, Methan CH₄) als Grundlage für eine verstärkte Tiefendurchwurzelung gefördert werden. Von einer besseren Tiefendurchwurzelung ist ein wichtiger Beitrag zur Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel zu erwarten.

Forschungsfragen und Hypothesen

(1) *Kann die Waldbodenkalkung die Kohlenstoffsequestrierung in Waldökosystemen nachhaltig steigern?*

Die Erhöhung der Kohlenstoffbindung in Waldökosystemen kann sowohl durch Steigerung der photosynthetischen CO₂-Bindung als auch durch Kohlenstoffsequestrierung in Waldböden erfolgen. Mit Blick auf die Nachhaltigkeit der Kohlenstoffsequestrierung in den Waldböden ist die Untersuchung der Stabilität des Bodenkohlenstoffs bei veränderter Niederschlagsverteilung, erhöhten Temperaturen in der Vegetationszeit und zunehmenden Wetterextremen (Stürme, Starkregen, Trockenperioden etc.) von besonderer Bedeutung. Im Einzelnen wurden folgende Fragen zu diesem Komplex bearbeitet:

- (i) *Welchen Einfluss hat die Waldbodenkalkung mittel- bis langfristig auf die oberirdische Biomassenproduktion?*
- (ii) *Welchen Einfluss hat die Waldbodenkalkung mittel- bis langfristig auf die unterirdische Biomassenproduktion?*
- (iii) *Welchen Einfluss hat Waldbodenkalkung auf die Kohlenstoffdynamik der Waldböden?*

(2) *Kann die Kalkung einen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit von Waldökosystemen an den Klimawandel leisten?*

Neben der globalen Erwärmung gehen die Prognosen zum Klimawandel vor allem von regionalen Zunahmen der Wetterextreme wie Stürmen und Starkregen aus (Bárdossy 2005). Auch sollen sommerliche Trockenperioden länger werden (Stocker 2014). Inwieweit Waldbodenkalkungen die Anpassungsfähigkeit (Resilienz) der Waldökosysteme an diese veränderten Umweltbedingungen erhöhen, wurde anhand folgender Fragen geklärt:

- (iv) *Welchen Einfluss hat die Waldbodenkalkung auf die Tiefendurchwurzelung der Mineralböden?*
- (v) *Verringert Waldbodenkalkung mittel- bis langfristig die Windwurfanfälligkeit von Waldbeständen?*
- (vi) *Stabilisiert Waldbodenkalkung langfristig die Ernährung und das Wachstum von Wäldern?*
- (vii) *Welchen Einfluss hat Waldbodenkalkung auf den Wasserhaushalt der Waldböden?*

(3) *Welchen Beitrag kann die Kalkung zur langfristigen Sicherung und Stärkung der Ökosystemdienstleistungen von Wäldern leisten?*

Waldökosysteme erbringen zahlreiche wichtige Ökosystemdienstleistungen für die Menschen. Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind hier die Transformationsfunktion der Waldböden und ihre Ausgleichsfunktion im Wasserhaushalt von besonderer Bedeutung. Außerdem sind Wälder die größten terrestrischen Senken für Treibhausgase (insbesondere CO₂ und CH₄, die Stellung von N₂O ist unklar). In diesem Zusammenhang wurden folgende Fragen überprüft:

- (viii) *Welchen Einfluss hat die Waldbodenkalkung auf Produktion und Konsumption der klimawirksamen Gase CO₂, CH₄ und N₂O?*
- (ix) *Welchen Beitrag kann die Waldbodenkalkung zur Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit der Waldböden leisten und dadurch Abflussspitzen verringern und Hochwassergefahren mindern?*
- (x) *Welchen Einfluss hat die Kalkung auf die Trinkwasserqualität?*
- (xi) *Welchen Beitrag kann die Waldbodenkalkung zur Förderung der Biodiversität von Waldstandorten leisten?*

Aus den übergeordneten Fragestellungen ergeben sich verschiedene Forschungshypothesen:

Hypothese 1 (zu (i) und (ii))

Die Kohlenstoffsequestrierung in der ober- und unterirdischen Biomasse (sowohl in der krautigen Vegetation als auch im Baumbestand) wird als Folge der Waldbodenkalkung gesteigert.

Hypothese 2 (zu (iii))

In den ersten Jahren nach Kalkung dominiert der Abbau von Auflagehumus die Kohlenstoffbilanz. Langfristig führt der Umbau von Auflagehumus in Mineralbodenhumus und die Bildung von stabilen Calciumhumaten jedoch zu einer Steigerung der Kohlenstoffspeicherung im Waldboden.

Hypothese 3 (zu (iv) und (v))

Mit der kalkungsbedingten Entsauerung des Bodens geht eine Vertiefung des Hauptwurzelaumes einher (Meiwes et al. 2013; Schäffer et al. 2001).

Hypothese 4 (zu (vi))

Eine Vertiefung des physiologisch aktiven Wurzelraums nach Waldkalkungen führt zu einer mittel- bis langfristigen Stabilisierung der Waldernährung und der Wasserversorgung. Verbesserte Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit werden zu einer geringeren Sensitivität des Baumwachstums gegenüber Extremereignissen wie Trockenjahren und ihren Folgewirkungen führen.

Hypothese 5 (zu (vii) und (ix))

Sowohl eine Erhöhung des Mineralbodenhumusvorrats als auch eine porenreichere Bodenstruktur in Folge von Kalkung (Schack-Kirchner & Hildebrand 1998) führen zu einer Steigerung des Wasserspeicher- sowie des Infiltrationsvermögens der Waldböden. Das würde neben einer Vertiefung des Hauptwurzelaumes entscheidend zur nachhaltigen Wasserversorgung der Waldbestände und damit zu deren Stabilisierung gegenüber Witterungsextremen beitragen (siehe H4). Durch die Kalkung verläuft die Abflussbildung in bewaldeten Wassereinzugsgebieten langfristig gleichmäßiger und es ist eine Kappung von Hochwasserspitzen zu erreichen.

Hypothese 6 (zu (viii))

Es wird aufgrund der bisherigen Ergebnisse davon ausgegangen, dass trotz der hohen Treibhausgaspotentiale von N₂O und CH₄ diese aufgrund der geringen Flussraten die durch die Kalkung ausgelöste langfristige Kohlenstoffsequestrierung durch Mineralbodenhumusbildung nicht übersteuern.

Vorgehensweise

Bestehende Kalkungsversuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) und der Forstlichen Versuchs- und Versuchsanstalt Baden-Württemberg (FVA BW) bildeten die Basis für die wissenschaftliche Bearbeitung des Themenkomplexes Bedeutung der Waldbodenkalkung für die CO₂-Bindung, die Anpassung an den Klimawandel und die Sicherung von Ökosystemdienstleistungen. Der Zuständigkeitsbereich der beiden beteiligten Forstlichen Versuchsanstalten erstreckt sich von Baden-Württemberg bis Schleswig-Holstein und umfasst somit die wichtigsten in Deutschland vertretenen Bodenformen und Belastungssituationen, bei denen die Bodenschutzkalkung als Maßnahme zur Kompensation der Säureeinträge in Frage kommt.

Neben Laborexperimenten zur Identifikation und Quantifizierung von durch Kalkung ausgelösten Transport- und Umsetzungsprozessen im Boden, wurden Messungen und Experimente auf der Feldskala und Modellierungen des Bodengas- und Wasserhaushaltes als Bilanzierungsgrundlage durchgeführt.

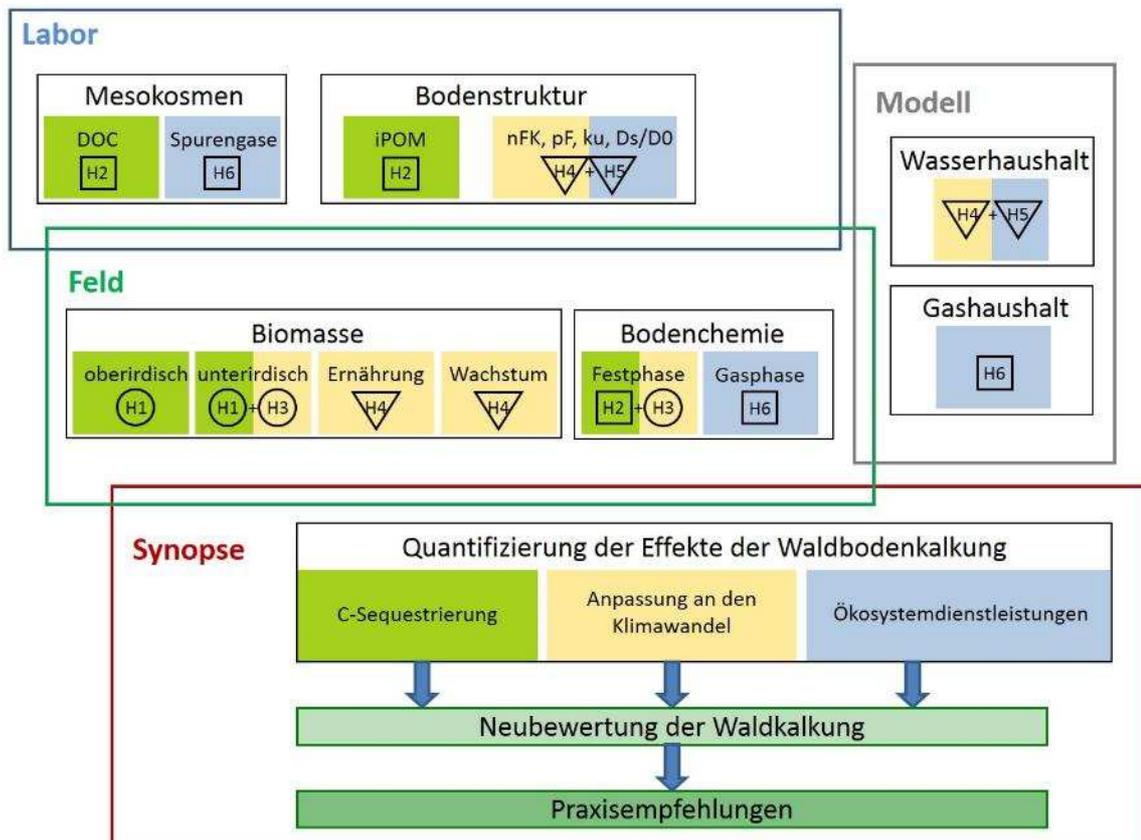


Abbildung 1: Struktur der Arbeitspakete. Grüne Felder = Arbeiten zu „C-Sequestrierung“, gelbe Felder = Arbeiten zu „Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel“, blaue Felder = Arbeiten zu „Ökosystemdienstleistungen“; H1 bis H6 bezieht sich auf die zu prüfenden Hypothesen; die Umrandung der Hypothesenbezeichnung symbolisiert die Institution, die die entsprechende Hypothese prüft: Quadrat = TU Berlin, Kreis = NW-FVA, Dreieck = FVA BW.

2. Stand der Technik

Das Vorhaben baut auf dem Stand des Wissens zu Projektbeginn (2017) auf, der im Folgenden beschrieben wird. Seit den 1980er Jahren wird die Waldbodenkalkung als so genannte Bodenschutzkalkung auf anthropogen versauerten Standorten durchgeführt. Als Ziele wurden neben der Entsauerung der Böden die Stabilisierung der Waldbestände durch Erhöhung des Nährstoffbindungsvermögens der Böden, eine Verbesserung der Ernährung und Vitalität der Bestände (Mindrup et al. 2001; von Wilpert et al. 2000) und eine Vertiefung der Wurzelsysteme formuliert (Ulrich 1986). Sowohl die Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel wie auch die Fragen der Kohlenstoffbindung in den Waldökosystemen standen jedoch nicht oder nur bedingt im Mittelpunkt der Betrachtungen (Beese & Meiwes 1995). Die Bindung des Kohlenstoffs im Auflagehumus wurde insofern berücksichtigt, als die Applikation von Branntkalk explizit ausgeschlossen wurde, mit der in den 1950er Jahren versucht wurde, den im Auflagehumus gebundenen Stickstoff dem Baumbestand durch Anregung der Mineralisierung der organischen Substanz verfügbar zu machen (Wittich & Mitscherlich 1963).

Wenn auch in Deutschland seit den 1980er Jahren 3,6 Millionen ha Waldbodenfläche gekalkt worden sind (Andreae & Jacob 2018), so besteht doch weiterhin ein hoher Kalkungsbedarf. Einerseits gibt es noch viele stark versauerte Standorte, die bisher nicht gekalkt worden sind, andererseits reicht auf einmal gekalkten Standorten die bisher applizierte Kalkmenge häufig nicht aus, um die luftbürtigen Säureeinträge sowie die in den Böden durch langjährig hohe, atmogene Belastung gespeicherten Säuremengen zu kompensieren (Meiwes et al. 1980; Karl Josef Meiwes et al. 2011; Thoms et al. 2018). Dies wird unterstützt durch die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen. Zum einen sind die Calciumbilanzen von Waldökosystemen auf basenarmem Silikatgestein häufig negativ (Block et al. 2013). Zum anderen zeigen die Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald für nicht gekalkte, schwach nährstoffversorgte Standorte eine Abnahme der Calcium- und Magnesiumvorräte sowie eine weitere Abnahme der Basensättigung im Unterboden (Evers et al. 2019). Kalkung wirkt dem entgegen und erhöht die Kationenaustauschkapazität der Waldböden, wie z.B. Johnson et al. (2010) durch Vergleich des bodenchemischen Zustandes gekalkter und ungekalkter Standorte nach 23 Jahren zeigen konnten. Hinzu kommt, dass die Entsauerung tieferer Bodenhorizonte durch Kalkapplikation auf die Bodenoberfläche mehrere Jahrzehnte dauern kann (Meiwes 1995) und, je nach Standort, erst eine zweimalige Bodenschutzkalkung zu einer verstärkten Tiefenverlagerung der basischen Kationen führt (Thoms et al. 2018).

Angesichts des sich ändernden Klimas tritt im Zusammenhang mit der Bodenschutzkalkung die Frage der stabilen Bindung von Kohlenstoff und von Treibhausgasen in den Waldböden und in den Beständen verstärkt ins Zentrum des Interesses (Evers et al. 2008; Paradelo et al. 2015). Mit der Kalkung wird an verschiedenen

Stellen auf den Kohlenstoffkreislauf des Waldes Einfluss genommen. Betroffen sind die Bindung und der Umsatz des Kohlenstoffs in den oberirdischen Teilen der Vegetation (Kraut-, Strauch- und Baumschicht), in den Wurzelsystemen sowie in der organischen Substanz des Auflagehumus und des Mineralbodens. Es gibt Hinweise, dass der Zuwachs der Bäume durch Kalkung zunimmt (Jonard et al. 2010). Es ist zu erwarten, dass sich auf anthropogen versauerten Standorten mit der Verbesserung des bodenchemischen Zustandes auch die Wachstumsbedingungen wieder verbessern; damit wäre eine höhere Bindung von Kohlenstoff in den Baumbeständen, aber auch in der krautigen Vegetation verbunden. Im Gegensatz zur Kohlenstoffspeicherung im oberirdischen Bestand nach Kalkung existieren sehr wenige Untersuchungen zur Wirkung der Kalkung auf die unterirdische Kohlenstoffspeicherung in den Pflanzenwurzeln. Organischer Kohlenstoff wird dem Boden über den Streufall und die Wurzelstreu zugeführt. Im Rahmen der Streuzersetzung wird anfangs viel Kohlenstoff von den Mikroorganismen veratmet. Gleichzeitig kommt es im Rahmen der Humifizierung zur Bildung relativ stabiler, organischer Bodensubstanz, dem Humus. Der Kohlenstoff aus der oberirdischen Streu wird, sofern er nicht veratmet wird oder im Auflagehumus verbleibt, in Form von gelöstem und partikulärem Kohlenstoff in den Mineralboden eingetragen (Aldinger 1987). Der im Bodenwasser gelöste (DOC = dissolved organic carbon) und partikuläre (POM = particulate organic matter) Kohlenstoff ist ein wichtiger Bestandteil der Ökosystemkohlenstoffbilanz (Kindler et al. 2011). Nach Kalkung erfolgt die Einmischung des Kohlenstoffs in den Mineralboden verstärkt auch durch die Bioturbation, da die bodenwühlende Fauna durch die Kalkung gefördert wird (Wolters et al. 1995). Der Kohlenstoffvorrat nimmt nach Kalkung in der Humusaufgabe ab, im Mineralboden hingegen zu; insgesamt ist eine Zunahme der Kohlenstoffvorräte im Boden zu verzeichnen (Evers et al. 2019; Grüneberg et al. 2019; Paar et al. 2016). Die organische Substanz im Boden besteht nicht aus stabilen, chemisch klar abgrenzbaren Bestandteilen, sondern „stellt ein Kontinuum sich nach und nach zersetzender organischer Verbindungen dar“ (Lehmann & Kleber 2015). Der CO₂-Austrag aus dem Boden wird von der heterotrophen Respiration sowie von der Wurzelrespiration angetrieben. Wenn die Waldbodenkalkung langfristig zum Umbau von Auflagehumus in Mineralbodenhumus führt, ist auch zu erwarten, dass sie den Stickstoffkreislauf in Waldökosystemen stabilisieren und die Stickstoffspeicherung deutlich steigern kann (Schüler 1995).

Klimarelevante Spurengase wie N₂O und CH₄ haben ein um Größenordnungen höheres Treibhausgaspotential als CO₂. Von einem Einfluss der Kalkung auf die Spurengasflüsse ist auszugehen, da sowohl die CH₄- als auch die N₂O-Produktion und -Konsumption der Waldböden mikrobielle Prozesse sind, die von pH und Basenverfügbarkeit beeinflusst werden. Bei N₂O deutet sich eine Steigerung der Emissionen durch Kalkung an, bei CH₄ sind die bisherigen Ergebnisse unklar (Hug & von Wilpert 2001). Es wird aufgrund der bisherigen Ergebnisse davon ausgegangen, dass trotz der hohen Treibhausgaspotentiale von N₂O und CH₄ diese aufgrund der geringen Flussraten die durch die Kalkung ausgelöste langfristige Kohlenstoffsequestrierung durch Mineralbodenhumusbildung nicht übersteuern.

Für die Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel steht neben der Erhöhung der Kohlenstoffbindung in der ober- und unterirdischen Biomasse die Frage im Vordergrund, inwieweit mit der Waldbodenkalkung eine Vertiefung der Fein- und Grobwurzelsysteme erreicht wird. Dies ist vor allem bei Fichte als Flachwurzler von besonderer Bedeutung (Jentschke et al. 2001; Meiwes et al. 2013). Eine Vertiefung des physiologisch aktiven Wurzelraums nach der Waldkalkung führt zu einer mittel- bis langfristigen Stabilisierung der Waldernährung. Auch Nährelemente, die nicht im Dolomitkalk enthalten sind, wie Kalium und Phosphor, werden aufgrund der erhöhten Feinwurzelichte vermutlich für die Waldbäume besser verfügbar (Gradowski & Thomas 2008).

Eine Vertiefung des Wurzelsystems führt jedoch nicht nur zu einer Erhöhung des für die Bäume erreichbaren Wasser- und Nährstoffangebotes, sondern wahrscheinlich auch zu einem geringeren Sturmwurfisiko (Braun et al. 2003), sofern das Grobwurzelsystem mit vitalen Starkwurzelsenkern ausgestattet ist (Eichhorn 1992). Dies ist angesichts der verheerenden Sturmereignisse der letzten Jahrzehnte von überragender Bedeutung für die Kontinuität von Waldökosystemen und die Ertragssicherheit in der Forstwirtschaft. Vom verringerten Sturmwurfisiko gibt es eine Rückkopplung zur Kohlenstoffbindung im Boden, die umso stabiler ist, je seltener sturmwurfbedingte Freilagen auftreten.

Sowohl eine Erhöhung des Mineralbodenhumusvorrats als auch eine porenreichere Bodenstruktur in Folge von Kalkung (Schack-Kirchner & Hildebrand 1998) lassen erwarten, dass damit das Wasserspeichervermögen der Waldböden gesteigert wird. Ein höheres Wasserspeichervermögen trägt neben einer Vertiefung des Hauptwurzelraums entscheidend zur Vergleichmäßigung der Wasserversorgung der Waldbestände und damit zu deren Stabilisierung gegenüber Witterungsextremen bei. Der Gebietswasserhaushalt wird durch eine nach Kalkung verbesserte Infiltration von Niederschlägen in den Boden und eine steigende Wasserhaltekapazität der Böden günstig beeinflusst. Durch die Kalkung verläuft die Abflussbildung in bewaldeten Wassereinzugsgebieten vermutlich langfristig gleichmäßiger und es ist eine Kappung von Hochwasserspitzen zu erwarten.

Vor dem Hintergrund der Kohlenstoffspeicherung und des Klimawandels sind bei der Steuerung von Bodenschutzkalkungen vier Aspekte zu berücksichtigen: die Entwicklung des Säure-Base-Zustandes der Standorte, die Kohlenstoffbindung im Boden, die Tiefendurchwurzelung zur Verringerung des Risikos von Sturmwurf-schäden und Trockenstress sowie die Stabilisierung der Bodenaggregate und die damit verbundene höhere Wasserinfiltrationskapazität, die zu einer Erhöhung der Wasserretention im Boden und zu einer Verringerung des Risikos von Überschwemmungen in Flussniederungen führt.

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die beschriebenen Arbeiten wurden von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, der Forstlichen Versuchs- und Versuchsanstalt Baden Württemberg und dem Fachgebiet Bodenkunde der Technischen Universität Berlin in enger Kooperation durchgeführt. Die drei Institutionen bringen Expertise in den Bereichen Bodenchemie, Stoffhaushalt, Bodenphysik, Wasserhaushalt und Waldernährung mit. Die beteiligten Forstlichen Versuchsanstalten stehen in engem Kontakt zu den Forstbetrieben und Ministerien der Trägerländer Baden-Württemberg, Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Diese Kontakte ermöglichen die Übertragung der Ergebnisse in die forstliche Praxis.

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)

Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt ist eine gemeinsame Dienststelle der Länder Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. In ihrem Zuständigkeitsbereich liegt eine Waldfläche von 2,7 Mio. Hektar. Ihre Kernaufgaben sind langfristiges Monitoring, angewandte Forschung, Wissenstransfer und Beratung für alle Waldbesitzarten.

Forstliche Versuchs- und Versuchsanstalt Baden-Württemberg (FVA BW)

Die FVA BW hat in Baden-Württemberg die gesetzliche Aufgabe, der Forst- und Holzwirtschaft rationelle Möglichkeiten zur Erfüllung der vielfältigen Funktionen des Waldes aufzuzeigen und die ökologischen Beziehungen zwischen Wald und Umwelt zu untersuchen. Eine der Kernkompetenzen ist daher die Konzeption und Einrichtung von Monitoringsystemen für den Wald sowie die Analyse der gewonnenen Daten, welche u. a. Grundlagen für forst- und umweltpolitische Entscheidungen, aber auch für die Erarbeitung von Konzepten und Strategien für eine multifunktionale Waldbewirtschaftung bilden.

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Bodenkunde

Die chemisch ausgerichtete Professur für „Bodenkunde“ ist eine der fünf Strukturstellen im Institut für Ökologie an der Technischen Universität Berlin. Zur Grundausstattung des Fachgebietes gehören zwei Wissenschaftlerstellen und drei Stellen für chemisch-technische Mitarbeiter/innen. Das Fachgebiet verfügt über ein sehr gut ausgestattetes Labor für chemische Boden- und Pflanzenanalysen. Bodenphysikalische Messungen sind im Labor des Nachbarfachgebietes „Standortkunde und Bodenschutz“ (Prof. Wessolek) möglich.

Gemeinsame Nutzung von Versuchsflächen

Grundlage für die Untersuchungen auf der Feldskala waren Waldkalkungsexperimente. Gut dokumentierte Versuchsanlagen aus den 1980er Jahren erlauben Aussagen über mittel- bis langfristige Wirkungen der Waldkalkung. Der Zuständigkeitsbereich der beiden beteiligten Forstlichen Versuchsanstalten erstreckt sich in einem Nord-Süd-Transekt von Schleswig-Holstein bis Baden-Württemberg und ermöglicht somit den Zugriff auf Versuchsanlagen, die einen großen Teil der Standortbreite in Deutschland abdecken.

Die Untersuchungen fanden auf bestehenden Fichten- und Buchenversuchsflächen statt, die je aus einer gekalkten und einer ungekalkten Parzelle bestehen. Das Untersuchungsprogramm gliederte sich in Arbeiten auf 6 Intensiv- und 10 Extensivflächen sowie für einzelne Untersuchungen auf 19 weiteren Flächen der NW-FVA. Auf den Extensivflächen und den zusätzlichen Flächen umfasste das Arbeitsprogramm im Wesentlichen Inventuruntersuchungen, während auf den Intensivflächen zusätzlich Erhebungen mit engem Prozessbezug zu Kohlenstoffflüssen sowie dem Bodenwasserhaushalt durchgeführt wurden.

Die für die drei Themenbereiche und zur Prüfung der Hypothesen notwendigen Arbeiten wurden schwerpunktmäßig an der jeweils betreuenden Institution durchgeführt. Es gab allerdings auch gemeinsame Aktivitäten: Die Bodenbeprobung auf den Versuchsflächen wurde von den wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter:innen der drei Institutionen gemeinsam durchgeführt. Außerdem wurden ertrags- und vegetationskundliche Inventuren sowie Sickerwasser- und Gasanalysen und die Erhebung des Waldernährungszustands von den beiden forstlichen Versuchsanstalten auf den eigenen Versuchsflächen durchgeführt und die Daten ausgetauscht. Ferner nahm und analysierte die NW-FVA auf allen Versuchsflächen volumengerechte Bodenproben zur Bestimmung der Feinwurzelbiomasse. Das Konzept förderte die Zusammenarbeit zwischen den wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

1.1. Einfluss der Kalkung auf die bodenchemischen Eigenschaften

Die Kalkung führte zu einer signifikanten Erhöhung des pH-Werts und der Basensättigung im Boden, die auf den Nadelwaldflächen bis in 30 cm Bodentiefe größer ausfiel als auf den Laubwaldflächen (**Abbildung 2** und **Abbildung 3**). Mit der Bodentiefe nahm die Wirkung kontinuierlich ab.

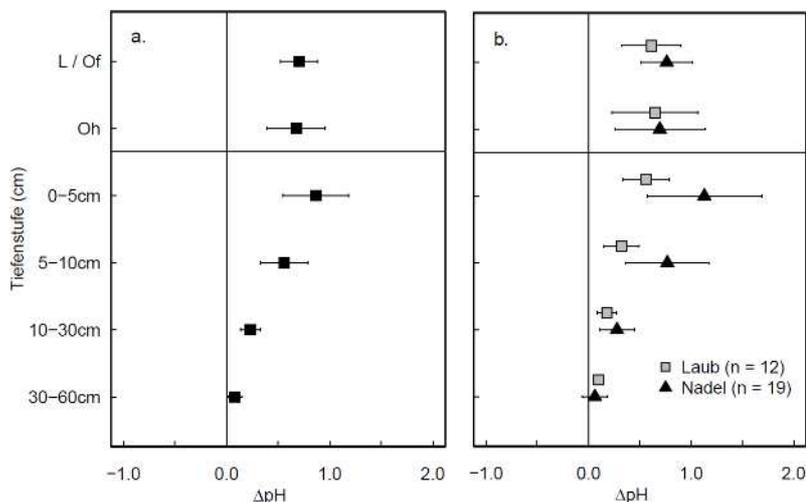


Abbildung 2: Mittlere ($\pm 95\%$ t-Test-Konfidenzintervall) Differenz des pH-Werts zwischen Kalk- und Kontrollparzelle in der Humusauflage und bis 60 cm Mineralbodentiefe für (a) alle Standorte (Humus: $n=30$; Mineral $n=29$) und (b) getrennt nach Waldtypen (Laub, Nadel).

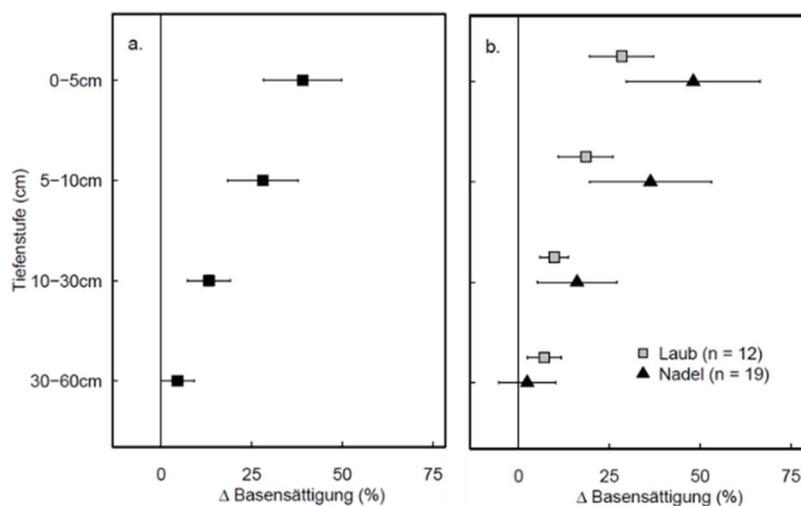


Abbildung 3: Mittlere ($\pm 95\%$ t-Test-Konfidenzintervall) Differenz der Basensättigung zwischen Kalk- und Kontrollparzelle in 0 bis 60 cm Bodentiefe für (a) alle Standorte ($n=29$) und (b) getrennt nach Waldtypen (Laub, Nadel).

Die Differenz sowohl des pH-Werts (**Abbildung 4**) als auch der Basensättigung (**Abbildung 5**) zwischen Kalk- und Kontrollparzelle hing positiv von der Kalkdosierung (ausgedrückt als Säureneutralisierungskapazität, SNK) ab.

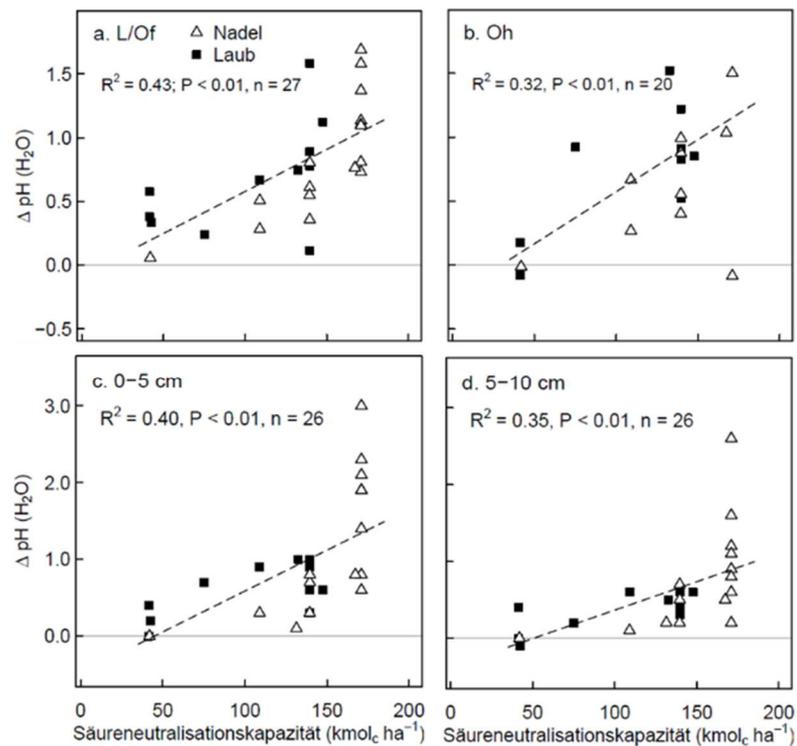


Abbildung 4: Differenz des Humusauflage- und Mineralboden-pH-Werts zwischen Kalk- und Kontrollparzelle in Abhängigkeit von der Kalkdosierung (SNK) in den Humusauflagehorizonten (a) L/O_f, (b) O_h und den Mineralbodentiefenstufen (c) 0-5 cm und (d) 5-10 cm. Es gab keine signifikanten Beziehungen zwischen ΔpH und SNK unterhalb der Bodentiefe von 10 cm.

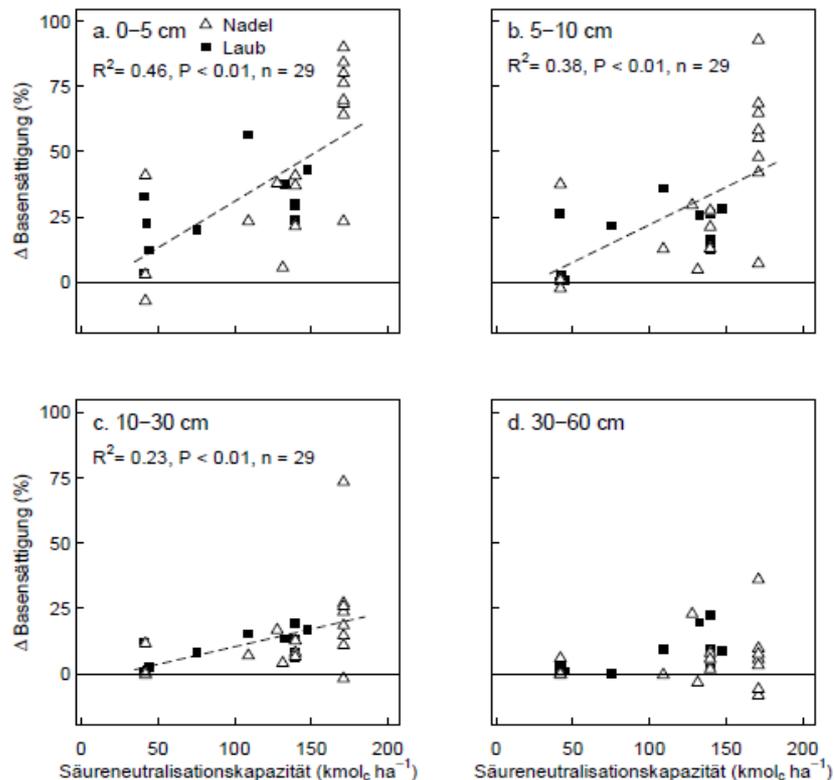


Abbildung 5: Differenz der Basensättigung zwischen Kalk- und Kontrollparzelle in Abhängigkeit von der Kalkdosierung (SNK) in den Mineralbodentiefenstufen (a) 0-5 cm, (b) 5-10 cm, (c) 10-30 cm und (d) 30-60 cm.

Die Trockenrohddichte des Feinbodens wurde durch die Kalkung nur in 0-5 cm signifikant verringert (**Abbildung 6**), sie nahm von $1,068 \text{ g cm}^{-3}$ auf $1,001 \text{ g cm}^{-3}$ ab, was einer Reduzierung um 6,8 % entspricht.

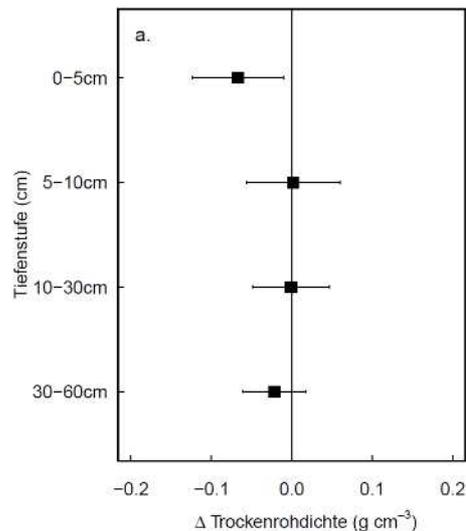


Abbildung 6: Mittlere ($\pm 95\%$ t-Test-Konfidenzintervall) Differenz der Trockenrohddichte zwischen Kalk- und Kontrollparzelle im Mineralboden bis 60 cm Bodentiefe für alle Standorte ($n=29$).

Unabhängig von der Kalkung hat sich der Bodenzustand im Laufe der Zeit verbessert. Sowohl auf den Kontroll- als auch den Kalkparzellen kam es im Mineralboden (bis 60 cm) zu einer signifikanten Zunahme des pH-Werts; in der Humusauflage gab es hingegen keine Veränderung (**Abbildung 7**).

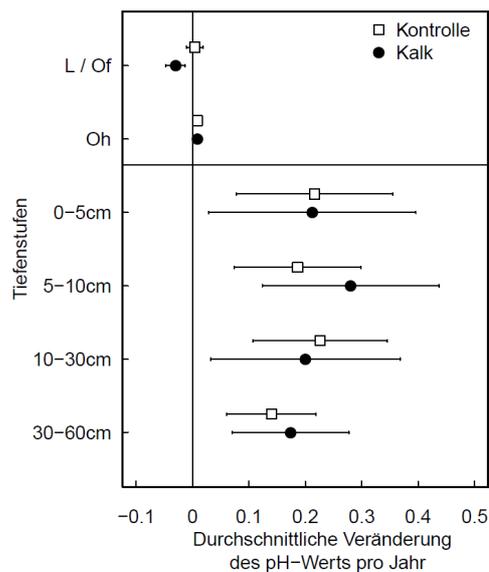


Abbildung 7: Mittlere ($\pm 95\%$ t-test Konfidenzintervall) Veränderung des pH-Werts (H_2O) pro Jahr in der Humusauflage ($n=15$) und dem Mineralboden ($n=10$). Dies ist die durchschnittliche Steigung des pH-Werts über die Zeit für die jeweilige Fläche. Mineralboden: eine Fläche mit vier Messzeitpunkten, drei Flächen mit drei Messzeitpunkten und sechs Flächen mit zwei Messzeitpunkten. Humusauflage: zwei Flächen mit fünf Messzeitpunkten, zwei Flächen mit vier Messzeitpunkten, acht Flächen mit drei Messzeitpunkten und drei Flächen mit zwei Messzeitpunkten.

1.2. Kohlenstoffsequestrierung (NW-FVA)

1.2.1. Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse

Zuwachs der oberirdischen Baumbiomasse

Der Kalkungseffekt auf die Baumbiomasse wird anhand des jährlichen Zuwachses bewertet, umgerechnet in die jährliche Zunahme des Kohlenstoffvorrats in der oberirdischen Baumbiomasse. Die Ergebnisse beruhen auf den ertragskundlichen Untersuchungen auf den Buchen- und Fichtenversuchsflächen der NW-FVA. Innerhalb der betrachteten ca. 30-jährigen Zuwachperiode, beginnend in den 1980er Jahren, sind nur geringfügige Schwankungen des mittleren Zuwachses zwischen $1,91$ und $3,30 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf den 16 Versuchsflächen zu verzeichnen (**Abbildung 8**). **Abbildung 8** Sowohl auf den Buchen- als auch auf den Fichtenflächen der NW-FVA sind die Zuwächse auf den Kalkparzellen (Buche: $3,04 \pm 0,31 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, Fichte: $2,84 \pm 0,31 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) kontinuierlich höher als auf den Kontrollparzellen (Buche: $2,73 \pm 0,34 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, Fichte: $2,55 \pm$

0,31 Mg C ha⁻¹ a⁻¹). Insgesamt schwanken die Zuwächse zwischen 2,50 und 3,30 Mg C ha⁻¹ a⁻¹ bei der Buche und zwischen 1,91 und 3,3 Mg C ha⁻¹ a⁻¹ bei der Fichte.

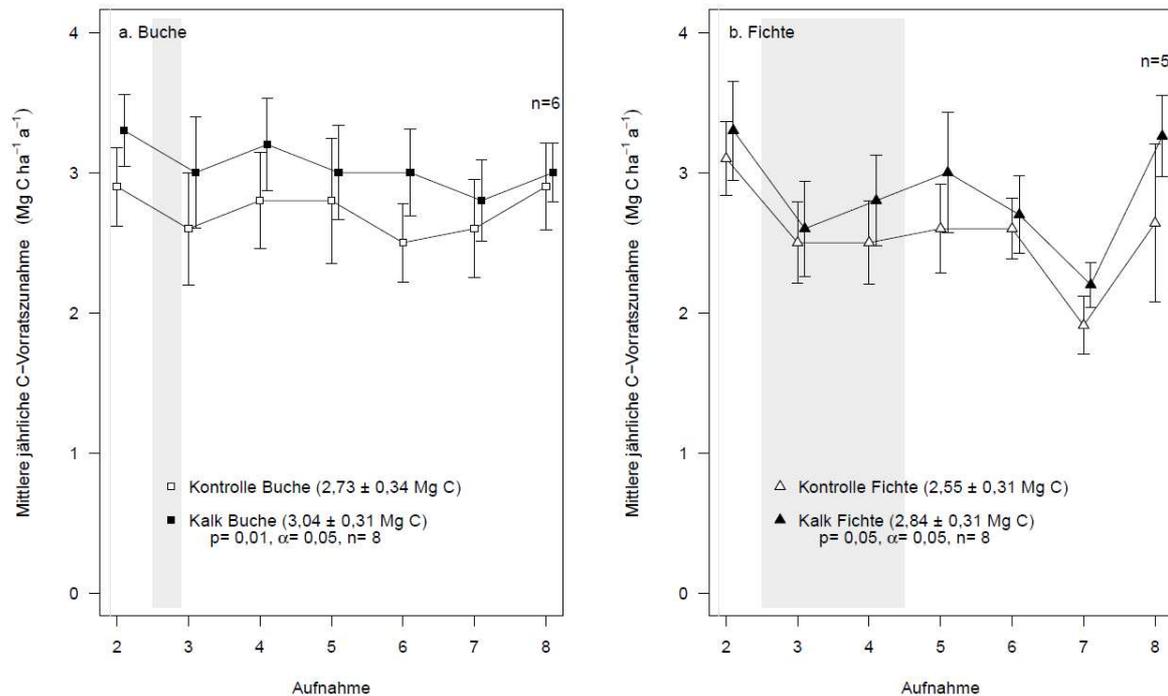


Abbildung 8: Jährliche Zunahme des Kohlenstoffvorrats in der oberirdischen Baumbiomasse (Mittelwert \pm Standardfehler) auf den (a) Buchen- ($n=8$) und (b) Fichten- ($n=8$) Versuchsflächen der NW-FVA mit ertragskundlichen Auswertungen. Die vertikal verlaufende hellgraue Linie zeigt den Zeitpunkt der ersten Kalkung vor der zweiten Aufnahme. Der grau-schattierte Bereich repräsentiert den Zeitraum der zweiten Kalkung, die je nach Versuchsfläche zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten stattgefunden hat. Die Abstände der Aufnahmen betragen im Mittel 5 Jahre und die Aufnahmezeitpunkte liegen zwischen den Jahren 1985-2018. In die achte Aufnahme sind nicht alle Flächen eingegangen.

Um das Wachstum und die Differenzen zwischen Kalk und Kontrolle bewerten zu können, ist es essentiell, den Ausgangszustand der Flächen zu betrachten. Dieser ist in Form des mittleren Kohlenstoffvorrats in Mg ha⁻¹ in **Tabelle 1** Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. dargestellt. Dabei wird deutlich, dass sowohl die Buchen- als auch die Fichtenflächen zu Beginn der Aufnahmen bereits geringere mittlere Kohlenstoffvorräte auf den Kontrollparzellen im Vergleich zu den Kalkparzellen aufwiesen. Für die Buche sind die C-Vorräte der Kontrollparzellen signifikant geringer ($p=0,02$, $\alpha=0,05$). Da folglich bereits vor der Kalkung Unterschiede in der Bestandesstruktur bestanden, wurden die jeweiligen Bestände der Kalk- und Kontrollparzellen basierend auf den ersten beiden ertragskundlichen Aufnahmen einer Ertragsklasse zugeordnet und die entsprechenden zu erwartenden Volumenzuwächse aus den Ertragstafeln für Buche und Fichte abgelesen. Diese erwartbaren Zuwächse wurden mit den real gemessenen durchschnittlichen Zuwächsen verglichen, wobei im Laufe der Zeit entstandene Unterschiede im Bestockungsgrad bei der statistischen Auswertung ebenfalls berücksichtigt wurden.

Tabelle 1: Mittlerer Kohlenstoffvorrat [Mg ha⁻¹] \pm Standardfehler der oberirdischen Baumbiomasse auf den Buchen- und Fichtenflächen der NW-FVA ($n=16$) bei der 1. Aufnahme in den 1980er Jahren.

	Buche ($p=0,02$, $\alpha=0,05$, $n=8$)	Fichte ($p=0,71$, $\alpha=0,05$, $n=8$)	Alle Baumarten ($p=0,19$, $\alpha=0,05$, $n=16$)
Kalk	109,72 \pm 8,35	79,60 \pm 8,79	94,66 \pm 7,03
Kontrolle	102,37 \pm 8,26	77,43 \pm 8,13	89,90 \pm 6,46
Δ^1	7,35 \pm 2,35	2,16 \pm 5,82	4,76 \pm 3,10

¹ Differenz zwischen Kalk und Kontrolle

Für alle Baumarten liegen die gemessenen Kohlenstoffzunahmen auf den Kalkparzellen über den erwartbaren Kohlenstoffzunahmen, auf den Kontrollparzellen bestehen kaum Unterschiede (**Tabelle 2**). Bei der Buche sind die gemessenen Kohlenstoffzunahmen auf den Kalkparzellen geringfügig größer als die erwartbaren; auf den Kontrollparzellen sind dagegen geringere Kohlenstoffzunahmen gemessen worden als zu erwarten war. Die Fichtenbestände auf den Kalkparzellen zeigten deutlich größere gemessene als erwartbare Kohlenstoffzunahmen. Auf den Kontrollparzellen liegen die gemessenen Kohlenstoffzunahmen nur leicht über den erwartbaren Kohlenstoffzunahmen.

Tabelle 2: Differenz zwischen erwarteten und gemessenen mittleren jährlichen Kohlenstoffzunahmen [$\text{Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] \pm Standardfehler der oberirdischen Baumbiomasse auf den Buchen- und Fichtenflächen der NW-FVA ($n=16$).

	Buche ($p=0,04$, $\alpha=0,05$, $n=8$)	Fichte ($p=0,04$, $\alpha=0,05$, $n=8$)	Alle Baumarten ($p=0,003$, $\alpha=0,05$, $n=16$)
	Δ^1	Δ^1	Δ^1
Kalk	$-0,06 \pm 0,24$	$-0,3 \pm 0,22$	$-0,19 \pm 0,13$
Kontrolle	$0,13 \pm 0,24$	$-0,05 \pm 0,22$	$0,02 \pm 0,13$

¹ Differenz zwischen erwarteter und gemessener C-Zunahme

Kumulierte Zuwächse der oberirdischen Baumbiomasse

Um zu untersuchen, ob sich die erste und zweite Kalkung unterschiedlich auf die Zuwächse auswirkten, wurden die Zunahmen im Kohlenstoffvorrat kumuliert über einen Zeitraum von 10 Jahren nach der 1. Kalkung (1980er Jahre) und nach der 2. Kalkung (1990er Jahre) betrachtet (**Abbildung 9**). Die Buchenflächen zeigen eine signifikante Steigerung der Zuwächse nach Kalkung ($p=0,04$, $\alpha=0,05$) und ferner zeigt sich, dass die Zuwächse nach der 2. Kalkung signifikant höher sind im Vergleich zur 1. Kalkung ($p=0,008$, $\alpha=0,05$). Auf den Fichtenflächen hingegen sind keine signifikanten Unterschiede nach den Kalkungen erkennbar. Auch der Vergleich zwischen den beiden Zeiträumen zeigt keine signifikanten Unterschiede.

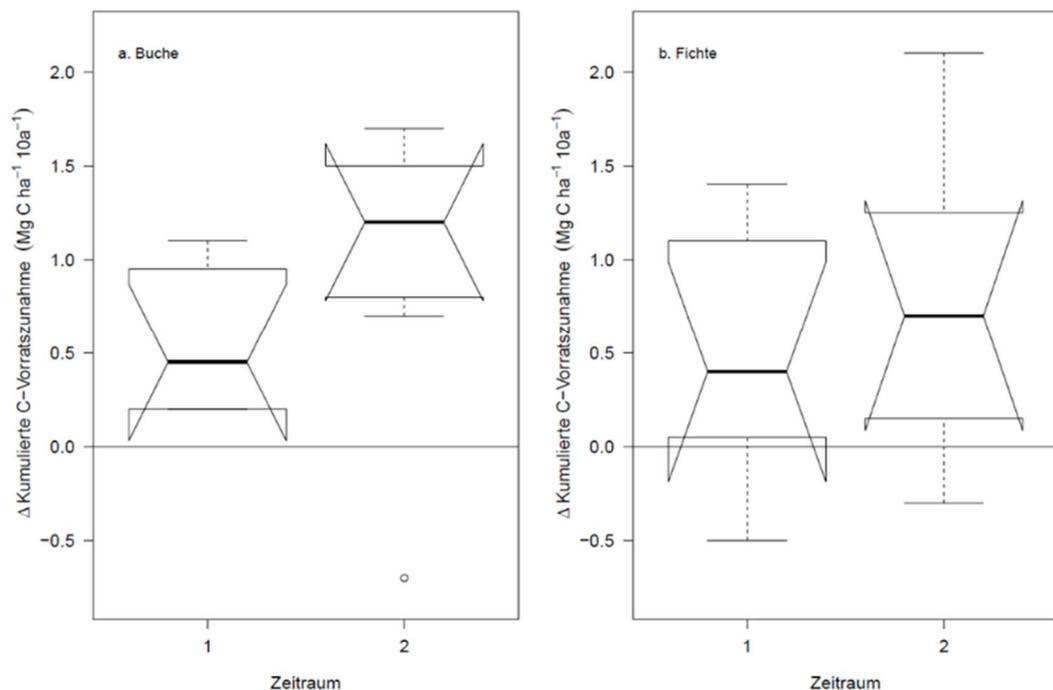


Abbildung 9: Differenz der über einen Zeitraum von 10 Jahren nach der Kalkung kumulierten Kohlenstoffvorratszunahmen zwischen Kalk- und Kontrollparzelle auf den (a) Buchen- ($n=8$) und (b) Fichten- ($n=8$) Versuchsflächen der NW-FVA mit ertragskundlichen Auswertungen.

Der Feinbodenvorrat, der Bodenkohlenstoffgehalt und das C/N-Verhältnis im Oberboden (0-10 cm Bodentiefe) sind mit dem Kohlenstoffvorrat in der Baumbiomasse der Kontrollparzellen bzw. der Differenz des Kohlenstoffvorrates zwischen Kalk- und Kontrollparzelle korreliert (**Tabelle 3**). Je höher der Feinbodenvorrat auf den Kontrollparzellen, desto geringer ist die Zunahme im Kohlenstoffvorrat in der Baumbiomasse auf den Kontrollparzellen über die Zeit. Auf Kalkung reagieren diese feinbodenreichen Standorte jedoch mit einer starken Zunahme im Kohlenstoffvorrat. Bei hohen Kohlenstoffgehalten im Oberboden der Kontrollparzellen fallen die kalkungsbedingten Kohlenstoffzunahmen ($\Delta \text{C-Vorrat}$) signifikant geringer aus. Auf Standorten mit weiten C/N-Verhältnissen sind durch Kalkung höhere Kohlenstoffvorratszunahmen zu beobachten.

Tabelle 3: Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten von Variablen, die die mittlere jährliche Kohlenstoffvorratszunahme in $\text{Mg C ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ der Baumbiomasse auf den Kontrollparzellen innerhalb der betrachteten Periode (Anfang 1980er Jahre bis 2015 bzw. 2018) sowie die Differenz der jährlichen Kohlenstoffvorratszunahme zwischen Kalk- und Kontrollparzellen regulieren ($n=16$). Die Bodeneigenschaften sind von den Kontrollparzellen und beziehen sich auf 0-10 cm Tiefe.

	C-Vorratszunahme (Kontrolle)	Δ C-Vorratszunahme (Kalk-Kontrolle)
Niederschlag (mm j^{-1})	0,41	-0,16
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	0,00	0,04
Höhe ü. NN (m)	0,14	-0,05
N-Deposition (kg N ha^{-1})	-0,17	-0,23
Ton (%)	0,09	0,17
Sand (%)	-0,13	0,49
Feinbodenvorrat (Mg ha^{-1})	-0,58 *	0,50 §
C-Gehalt (g kg^{-1})	0,04	-0,52**
C/N	-0,25	0,48 §
KAK _{eff} ($\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$)	0,22	-0,28
Basensättigung (%)	0,05	-0,44
pH (H_2O)	-0,43	0,14
Summe SNK	-0,01	0,13
Δ C Gehalt (g Kg^{-1})	-0,13	0,18
Δ pH (H_2O)	-0,24	-0,29
Δ Basensättigung (%)	0,32	-0,20

KAK_{eff}: Effektive Kationenaustauschkapazität

§ marginal signifikant ($p > 0,05$ bis $0,1$)

* $p \leq 0,05$

** $p \leq 0,01$

Status-quo des Kohlenstoffvorrats in der Baumbiomasse

Der aktuelle Kohlenstoffvorrat in der Baumbiomasse wurde anhand der Daten der zuletzt durchgeführten ertragskundlichen Aufnahme auf den 16 Kalko-Versuchsflächen der NW-FVA (Buche) und der FVA BW (Fichte) unter Verwendung der baumartenspezifischen Biomassefunktionen von Vonderach et al. (2018) ermittelt. Dabei wurde sowohl der Kohlenstoffvorrat für alle Baumarten bestimmt als auch stratifiziert nach Buche und Fichte. Das Baumalter der Buche lag je nach Fläche zwischen 106 und 139 Jahren und das der Fichte abhängig von der Fläche zwischen 67 und 128 Jahren. Unter Verwendung eines gemischten linearen Modells (LME) ergaben sich weder für Buche noch für Fichte noch für beide Baumarten zusammen signifikante Unterschiede in den Kohlenstoffvorräten zwischen Kalk und Kontrolle (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: Mittlerer Kohlenstoffvorrat (Mg ha^{-1}) \pm Standardfehler in der oberirdischen Baumbiomasse, der bei der letzten ertragskundlichen Aufnahme (2015-2018) für die Kalko-Versuchsflächen (NW-FVA & FVA BW) ermittelt wurde. Die Unterschiede zwischen Kalk und Kontrolle sind nicht signifikant.

	Buche ($n=8$)	Fichte ($n=8$)	Alle Baumarten ($n=16$)
Kalk	153,2 \pm 14,5	141,0 \pm 11,6	147,1 \pm 9,1
Kontrolle	142,1 \pm 11,7	143,7 \pm 7,6	142,9 \pm 6,7
Δ^1	11,1 \pm 7,6	-2,7 \pm 15,7	4,2 \pm 8,8

¹ Differenz zwischen Kalk und Kontrolle

Bodenvegetation

Ähnlich wie in der Baumschicht, hat die Kalkung auch auf den aktuellen Kohlenstoffvorrat der Strauch- und der Krautschicht (bis 100 cm Höhe) keinen Einfluss (**Abbildung 10**). Der Kohlenstoffvorrat der Moosschicht ist auf den gekalkten Parzellen hingegen signifikant geringer als auf den ungekalkten (**Abbildung 11**).

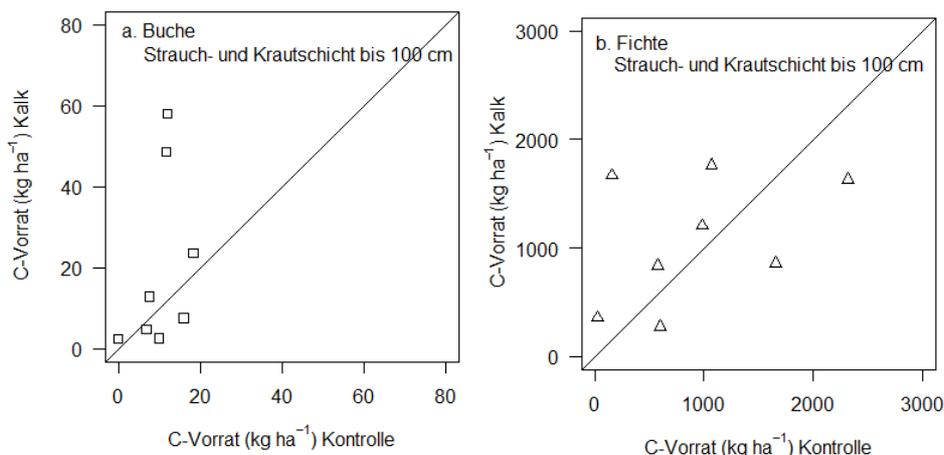


Abbildung 10: Kohlenstoffvorrat (kg ha^{-1}) der Strauch- und der Krautschicht (bis 100 cm Höhe) auf den a) Buchen- ($n=8$) und b) Fichten- ($n=8$) Versuchsfeldern. Die unterschiedliche Skalierung der Achsen ist zu beachten.

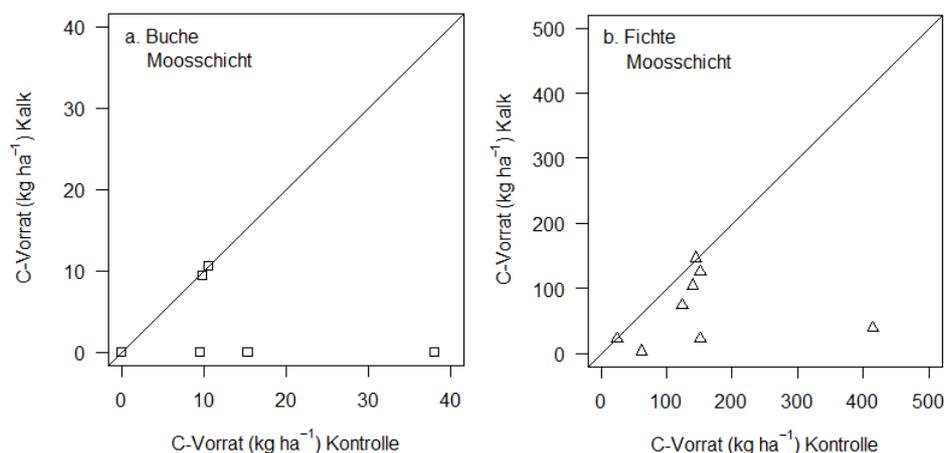


Abbildung 11: Kohlenstoffvorrat (kg ha^{-1}) der Moosschicht auf den a) Buchen- ($n=8$) und b) Fichten- ($n=8$) Versuchsfeldern. Die unterschiedliche Skalierung der Achsen ist zu beachten.

Die Baumart (Buche, Fichte) hat einen größeren Einfluss auf den Kohlenstoffvorrat der Kraut- und der Strauchschicht (bis 100 cm Höhe) (**Tabelle 5:** Kohlenstoffvorrat (kg ha^{-1}) der Strauch- und Krautschicht bis 100 cm in Abhängigkeit der Behandlung ($p=0,244$) und der Baumart ($p<0,001$) auf allen 16 Kalko-Versuchsfeldern.) sowie der Moosschicht (**Tabelle 6:** Kohlenstoffvorrat (kg ha^{-1}) der Moosschicht in Abhängigkeit der Behandlung ($p=0,00424$) und der Baumart ($p<0,001$) auf allen 16 Kalko-Versuchsfeldern.) als die Kalkung. Der Kohlenstoffvorrat der Bodenvegetation ist auf den Fichtenflächen signifikant größer als auf den Buchenflächen.

Tabelle 5: Kohlenstoffvorrat (kg ha^{-1}) der Strauch- und Krautschicht bis 100 cm in Abhängigkeit der Behandlung ($p=0,244$) und der Baumart ($p<0,001$) auf allen 16 Kalko-Versuchsfeldern.

	Buche ($n=8$)	Fichte ($n=8$)	Alle Baumarten ($n=16$)
Kalk	$20,0 \pm 7,7$	$1073,9 \pm 207,7$	$546,9 \pm 169,1$
Kontrolle	$10,3 \pm 2,0$	$923,6 \pm 271,7$	$466,9 \pm 176,4$
Δ^1	$9,7 \pm 7,2$	$150,3 \pm 268,5$	$80,0 \pm 131,0$

¹ Differenz zwischen Kalk und Kontrolle

Tabelle 6: Kohlenstoffvorrat (kg ha^{-1}) der Moosschicht in Abhängigkeit der Behandlung ($p=0,00424$) und der Baumart ($p<0,001$) auf allen 16 Kalko-Versuchsfeldern.

	Buche ($n=8$)	Fichte ($n=8$)	Alle Baumarten ($n=16$)
Kalk	$2,5 \pm 1,6$	$67,3 \pm 18,8$	$34,9 \pm 12,4$

Kontrolle	10,4 ± 4,4	151,6 ± 41,1	81,0 ± 27,0
Δ^1	-7,9 ± 4,8	-84,3 ± 44,1	-46,1 ± 23,6

¹ Differenz zwischen Kalk und Kontrolle

1.2.2. Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse

Größe und Einflussfaktoren des Kohlenstoffvorrats in der Feinwurzelbiomasse der Kontrollparzellen

Der mittlere Kohlenstoffvorrat der Feinwurzelbiomasse beträgt auf den Kontrollparzellen $7,1 \pm 1,0 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Humusauflage bis 60 cm Bodentiefe), weist jedoch eine starke Streuung zwischen den 15 Kalkungsversuchsflächen auf. Auf den Kontrollparzellen liegen 31 % der Feinwurzelkohlenstoffvorräte in den Humushorizonten, 28 % in den oberen 10 cm des Mineralbodens und 41 % in 10-60 cm Bodentiefe vor (**Abbildung 12a**). In der Humusauflage der Kontrollparzellen ist eine hohe Variabilität der Feinwurzelkohlenstoffvorräte zu beobachten (**Abbildung 12a**). Obwohl beide Baumarten ähnliche Feinwurzelbiomassevorräte im Boden (Humusauflage bis 60 cm Bodentiefe) aufweisen (Buche: $7,5 \pm 1,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$; Fichte: $6,6 \pm 1,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$), ist der Kohlenstoffvorrat in den Feinwurzeln auf den Fichtenflächen in 10-30 cm Bodentiefe signifikant geringer (**Abbildung 12b**).

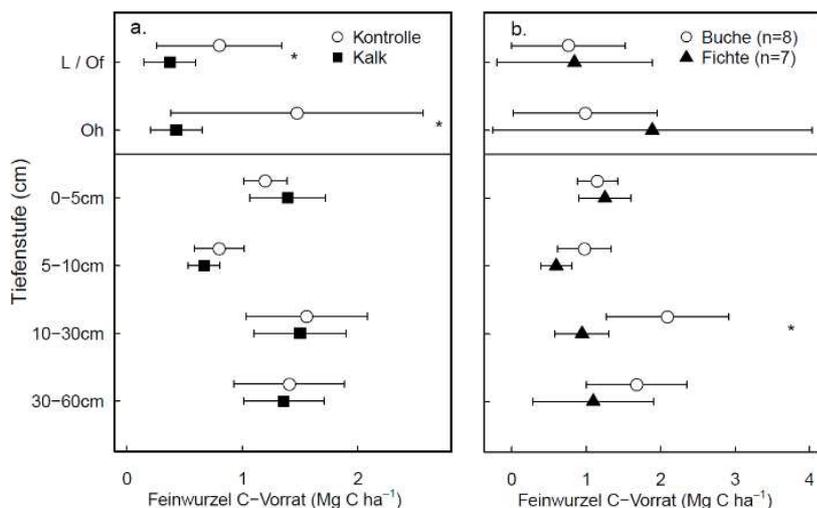


Abbildung 12: Mittlerer ($\pm 95\%$ t-Test-Konfidenzintervall) Kohlenstoffvorrat in der Feinwurzelbiomasse in der Humusauflage und bis 60 cm Mineralbodentiefe (a) getrennt nach der Behandlung (Kalk, Kontrolle) und (b) getrennt nach der Baumart (Buche, Fichte). Sterne zeigen statistische Signifikanz bei einem gemischten linearen Modell, $p < 0,05$.

Die Variabilität der Feinwurzelbiomasse auf den Kontrollparzellen kann weder durch klimatische Faktoren (Niederschlag, Temperatur, Höhenlage), noch durch die meisten Eigenschaften des Bestandes (mittlere Grundfläche, Grundfläche pro Hektar, Grobwurzelbiomasse) erklärt werden (**Tabelle 7**). Nur die Anzahl von Bäumen pro Hektar ist positiv mit der Feinwurzelbiomasse korreliert: Wenig bestockte Bestände zeigen eine geringe, dicht bestockte Bestände eine hohe Feinwurzelbiomasse. Auch einige der untersuchten Bodeneigenschaften (Ton- bzw. Sandgehalt, Gehalt von austauschbarem Aluminium) wirken sich nicht auf die Feinwurzelbiomasse aus, wohingegen der Boden-pH-Wert und die Basensättigung einen großen Einfluss haben.

Tabelle 7: Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten von Variablen, die den Kohlenstoffvorrat in der Feinwurzelbiomasse in verschiedenen Bodentiefen in den Kontrollparzellen regulieren ($n=15$).

	L/O _f	O _h	0-5 cm	5-10 cm	10-30 cm	30-60 cm
Niederschlag (mm a^{-1})	0,28	0,23	0,52*	0,23	0,20	0,47§
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	-0,46§	-0,47§	-0,27	0,04	0,22	-0,21
Höhe ü. NN (m)	0,15	0,25	0,20	-0,33	-0,54*	0,00
N-Deposition (kg N ha^{-1})	-0,24	-0,36	-0,24	-0,02	0,07	-0,23
Bestandeseigenschaften der Kontrollparzellen						
Dichte (Bäume ha^{-1})	0,32	0,18	0,47§	0,21	0,49§	0,30
Grundfläche pro Hektar ($\text{cm}^2 \text{ ha}^{-1}$)	0,07	0,34	0,16	-0,06	-0,20	0,11
Grundfläche pro Baum ($\text{cm}^2 \text{ Baum}^{-1}$)	-0,13	0,08	-0,12	-0,07	-0,37	-0,09
Grobwurzelbiomasse (kg ha^{-1}) †	-0,24	-0,14	-0,21	0,27	0,08	0,12
Bodeneigenschaften der Kontrollparzellen						
Ton (%)	-	-	-0,22	-0,15	-0,28	-0,05
Sand (%)	-	-	0,16	0,05	0,22	0,16
C:N	0,10	0,66*	0,25	0,19	0,42	0,32
Effektive Kationenaustauschkapazität ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	-0,51	0,66*	0,07	-0,16	-0,24	-0,28
Aluminium ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	-0,07	0,08	0,02	-0,05	-0,06	-0,08

Basensättigung (%)	-0,17	-0,41	-0,54*	-0,54*	-0,36	-0,65**
pH (H ₂ O)	-0,65**	-0,59*	-0,45§	-0,25	-0,16	0,28

§ p ≤ 0,1; * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01

In der Humusaufgabe zeigen sinkende pH-Werte (H₂O) im L/O_r-Horizont exponentiell ansteigende Kohlenstoffvorräte in der Feinwurzelbiomasse an. Besonders bei pH-Werten von unter 4,5 im L/O_r-Horizont steigt der Kohlenstoffvorrat in der Feinwurzelbiomasse deutlich an (**Abbildung 13**).

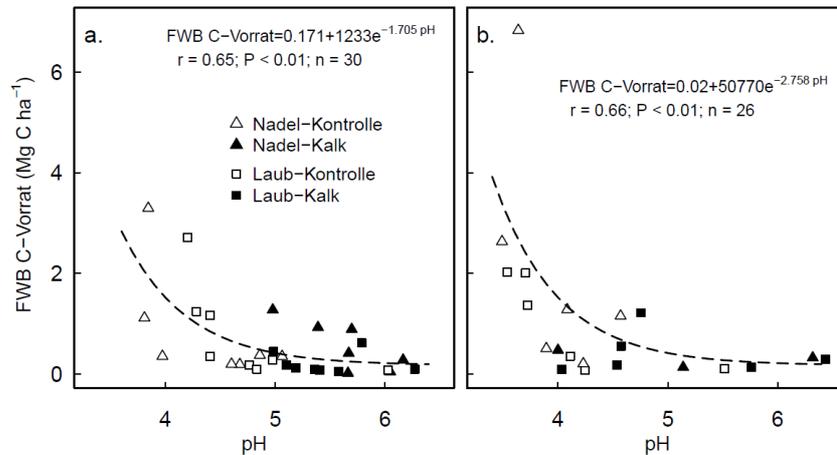


Abbildung 13: Beziehung zwischen dem pH-Wert der Humusaufgabe und dem Feinwurzelkohlenstoffvorrat der Horizonte (a) L/O_r und (b) O_h.

In den meisten Bodentiefen des Mineralbodens (0-5, 5-10, 30-60 cm) weisen die Kohlenstoffvorräte in der Feinwurzelbiomasse einen negativen Zusammenhang mit der Basensättigung auf (**Abbildung 14**).

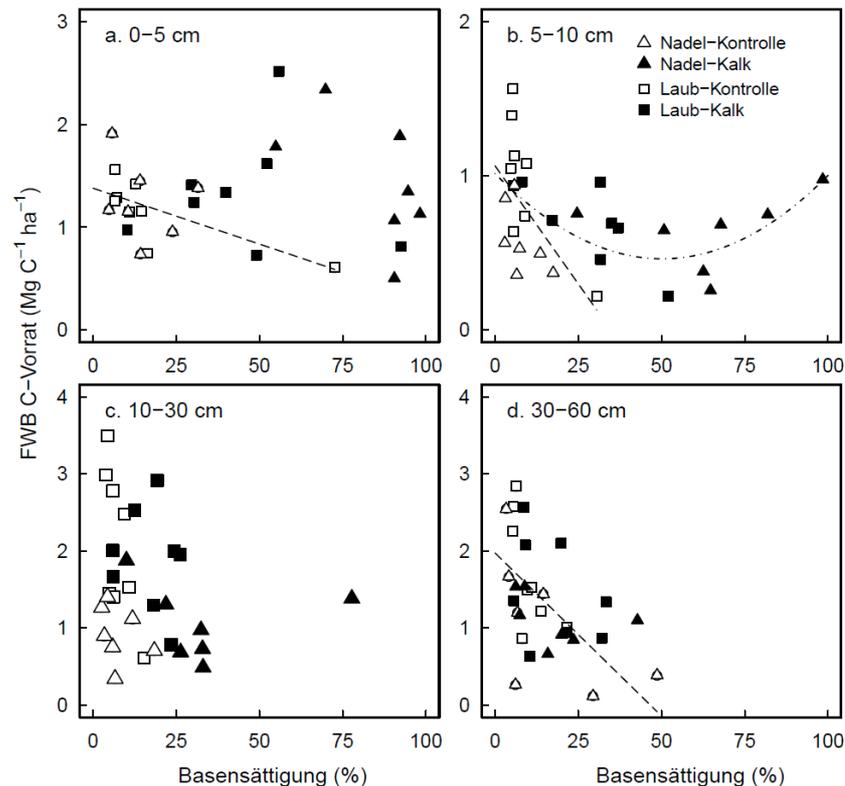


Abbildung 14: Beziehung zwischen Basensättigung und dem Feinwurzelkohlenstoffvorrat der Mineralbodentiefenstufen (a) 0-5 cm, (b) 5-10 cm, (c) 10-30 cm und (d) 30-60 cm. Regressionsgeraden (-kurven) zeigen einen signifikanten Zusammenhang für die Kontrolle.

Größe und Einflussfaktoren der kalkungsbedingten Änderungen des Kohlenstoffvorrats in der Feinwurzelbiomasse

Betrachtet man beide Baumarten (Buche und Fichte) zusammen, haben Kalkungsmaßnahmen keine Auswirkungen auf die Kohlenstoffvorräte in den Feinwurzeln über das Gesamtprofil (Humusaufgabe bis 60 cm Bodentiefe), wohingegen in der Humusaufgabe eine signifikante Abnahme zu sehen ist (**Abbildung 15a**). Die Verluste sind vor allem im O_h-Horizont zu beobachten, wenn auch mit einer hohen Variabilität. Nur die Buchenbestände weisen über das gesamte Bodenprofil (Humusaufgabe bis 60 cm Bodentiefe) eine signifikante

Abnahme der Feinwurzelbiomasse auf (-20%; $-1,5 \pm 0,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$, **Abbildung 15b**). Bei der Betrachtung einzelner Tiefenstufen ist nur in 5-10 cm Bodentiefe eine signifikante Abnahme zu beobachten. Auf den Fichtenflächen gibt es keine signifikanten Veränderungen im Kohlenstoffvorrat der Feinwurzelbiomasse, weder im Gesamtprofil noch in einzelnen Tiefenstufen (**Abbildung 15b**).

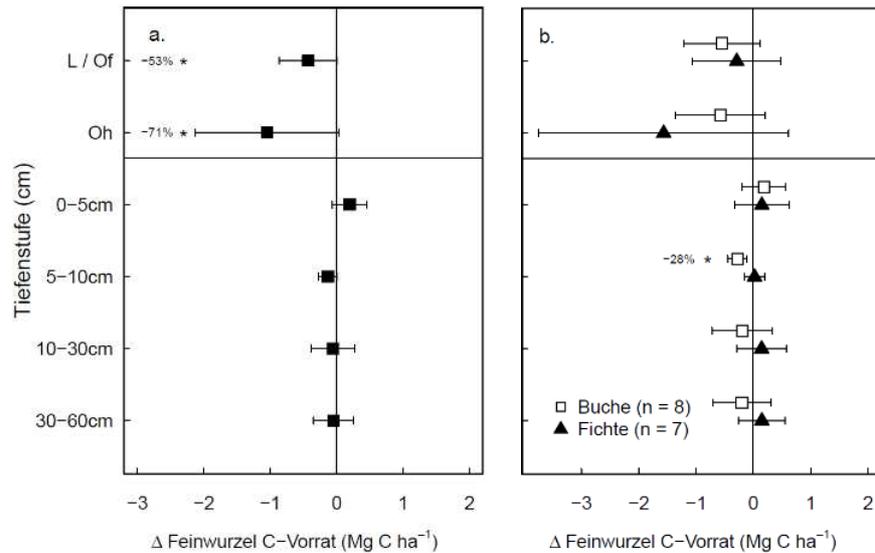


Abbildung 15: Differenz des mittleren ($\pm 95\%$ t-Test-Konfidenzintervalls) Feinwurzelkohlenstoffvorrats zwischen Kalk- und Kontrollparzelle (a) insgesamt ($n=15$) und (b) stratifiziert nach Baumart. Sterne zeigen statistische Signifikanz bei einem gemischten linearen Modell, $p < 0,05$.

Die beobachteten kalkungsbedingten Veränderungen im Kohlenstoffvorrat der Feinwurzelbiomasse werden in erster Linie von einer Kombination der Faktoren Boden-pH-Wert, Basensättigung sowie dem Feinwurzelkohlenstoffvorrat in der Kontrollparzelle beeinflusst (**Tabelle 8**). Im Gegensatz dazu haben weder die ausgebrachte Kalkmenge (außer in der Tiefenstufe 5-10 cm) noch die Änderungen des Feinbodenhumusvorrats Auswirkungen auf die Differenz des Feinwurzelkohlenstoffvorrats zwischen Kalk- und Kontrollparzelle.

Tabelle 8: Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten von Variablen, die die Differenz des Feinwurzelkohlenstoffvorrats zwischen Kalk- und Kontrollparzelle in verschiedenen Bodentiefen regulieren ($n=15$).

	L/Of	Oh	0-5 cm	5-10 cm	10-30 cm	30-60 cm
Klima- und Standortseigenschaften						
Niederschlag (mm a^{-1})	-0,25	-0,34	-0,28	-0,13	-0,35	-0,46§
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	0,01	0,54§	0,40	-0,01	-0,22	0,28
Höhe ü. NN (m)	0,28	-0,24	-0,18	0,32	0,22	-0,10
Säureneutralisierungskapazität (kmolc ha^{-1})	-0,17	-0,37	0,18	0,73**	0,14	0,40
N-Deposition (kg N ha^{-1})	0,26	0,37	0,11	-0,24	-0,06	0,53*
Bestandeseigenschaften der Kontrollparzellen						
Dichte (Bäume ha^{-1})	-0,41	-0,23	0,49§	0,03	-0,15	0,30
Grundfläche pro ha ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	0,00	-0,36	-0,18	0,07	-0,04	-0,34
Grundfläche pro Baum ($\text{cm}^2 \text{Baum}^{-1}$)	0,31	-0,13	-0,60*	-0,07	0,11	-0,42
Grobwurzelbiomasse (kg ha^{-1}) †	0,31	0,19	-0,35	-0,56*	0,06	-0,41
Bodeneigenschaften der Kontrollparzellen						
Ton (%)	-	-	-0,26	-0,23	0,60*	0,05
Sand (%)	-	-	0,38	0,40	-0,53§	-0,15
Feinwurzel C-Vorrat (Mg C ha^{-1})	-0,73**	-0,94**	-0,08	-0,76**	-0,44	-0,66**
Boden C-Vorrat (Mg C ha^{-1})	-0,37	-0,52§	-0,30	-0,27	0,18	0,29
Boden oder Humus C/N	-0,32	-0,60*	0,13	0,07	-0,69**	-0,37
Effektive Kationenaustauschkapazität (Ake) (mmolc kg^{-1})	0,55	0,50	-0,32	-0,03	0,44	0,12
Basensättigung (%)	0,25	0,30	0,35	0,44§	0,34	0,60*
pH (H_2O)	0,59*	0,61*	0,29	-0,15	0,23	0,55*
Differenz der Bodeneigenschaften zwischen Kalk- und Kontrollparzelle						
Δ C-Vorrat	0,27	0,55*	0,00	-0,06	0,02	0,01
Δ pH (H_2O)	-0,60*	0,30	-0,03	0,45§	-0,11	-0,15
Δ Basensättigung	-0,25	-0,50	0,00	0,51§	-0,09	-0,15
Δ TRD	-	-	-0,08	-0,36	-0,20	-0,09
Δ Ake	-0,47	0,43	-0,28	0,43	0,05	-0,04

§ $p \leq 0,1$; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$

Standorte mit hohen Feinwurzelkohlenstoffvorräten auf den Kontrollparzellen zeigen auf den gekalkten Parzellen große Kohlenstoffvorratsverluste, während Standorte mit geringen Kohlenstoffvorräten auf den Kontrollparzellen nur geringe bis keine Kohlenstoffvorratsverluste in der Feinwurzelbiomasse aufweisen (**Abbildung 16**). Die Aussage gilt für das Gesamtprofil, besonders für die Humusaufgabe, aber auch für den Mineralboden mit Ausnahme der Tiefenstufe 0-5 cm.

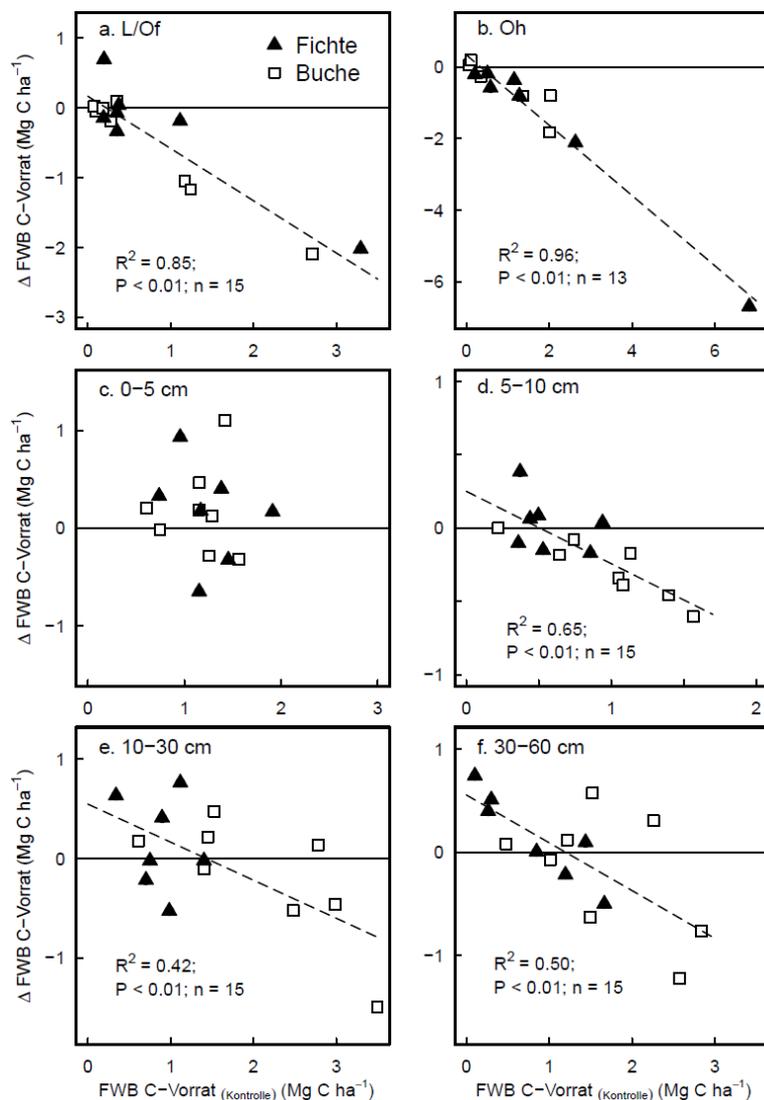


Abbildung 16: Beziehung zwischen der Differenz in den Feinwurzelkohlenstoffvorräten zwischen Kalk- und Kontrollparzelle und den Feinwurzelkohlenstoffvorräten auf der Kontrollparzelle. Regressionsgeraden zeigen einen signifikanten Zusammenhang.

Außerdem war kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von Oberboden- (0-10 cm) zu Unterboden- (30-60 cm) Feinwurzelkohlenstoffvorrat und dem pH-Wert oder der Basensättigung im Oberboden festzustellen, was darauf hindeutet, dass es keine eindeutigen Anzeichen für eine Umverteilung der Wurzeln gibt (Vertiefung oder Verflachung der Wurzelsysteme).

Zuwachs der Grobwurzelbiomasse

Der Zuwachs der Grobwurzelbiomasse wurde anhand des Brusthöhendurchmessers mit den Biomassefunktionen von Bolte et al. (2004) ermittelt und in die jährliche Zunahme des Kohlenstoffvorrats in der Grobwurzelbiomasse umgerechnet. Da die Grobwurzelbiomasse nicht direkt, sondern über den Brusthöhendurchmesser ermittelt wurde, müssten die anfänglichen Unterschiede und die sich im Laufe der Zeit ergebenden Unterschiede in der Bestockung zwischen Kalk und Kontrolle bei der Berechnung der Grobwurzelbiomasse berücksichtigt werden, um Aussagen zum Kalkungseffekt treffen zu können. Das kann allerdings nicht auf die gleiche Art und Weise wie für die Baumbiomasse bzw. deren Zuwächse umgesetzt werden (siehe 1.2.1. Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse). Deshalb sind die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten.

Die Kalkparzellen zeigten bei der aktuellsten Aufnahme (8. Aufnahme) einen jährlichen Zuwachs von $0,60 \pm 0,18 \text{ Mg C ha}^{-1}$, wohingegen die Kontrollparzellen einen jährlichen Zuwachs von $0,46 \pm 0,13 \text{ Mg C ha}^{-1}$ verzeichneten. Über die gesamte Zuwachsperiode betrachtet, war die mittlere Kohlenstoffvorratszunahme der Grobwurzelbiomasse auf den gekalkten Parzellen mit $0,43 \pm 0,23 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ signifikant höher ($p=0,0034$, $\alpha=0,05$) als auf den ungekalkten, die eine mittlere Kohlenstoffvorratszunahme von $0,38 \pm 0,21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aufwiesen.

Stratifiziert nach den Baumarten Buche ($n=8$) und Fichte ($n=8$) betragen die mittleren Zuwächse der Grobwurzelbiomasse über die gesamte Zuwachsperiode hinweg für die Buchenflächen auf den gekalkten Parzellen $0,24 \pm 0,18 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und auf den ungekalkten $0,20 \pm 0,18 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und sind nicht signifikant unterschiedlich (**Abbildung 17**). Auf den Fichtenflächen zeigten die Kalkparzellen über die gesamte Zuwachsperiode mit $0,62 \pm 0,27 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ signifikant höhere mittlere Zuwächse ($p=0,0075$, $\alpha=0,05$) als die Kontrollparzellen ($0,56 \pm 0,23 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$).

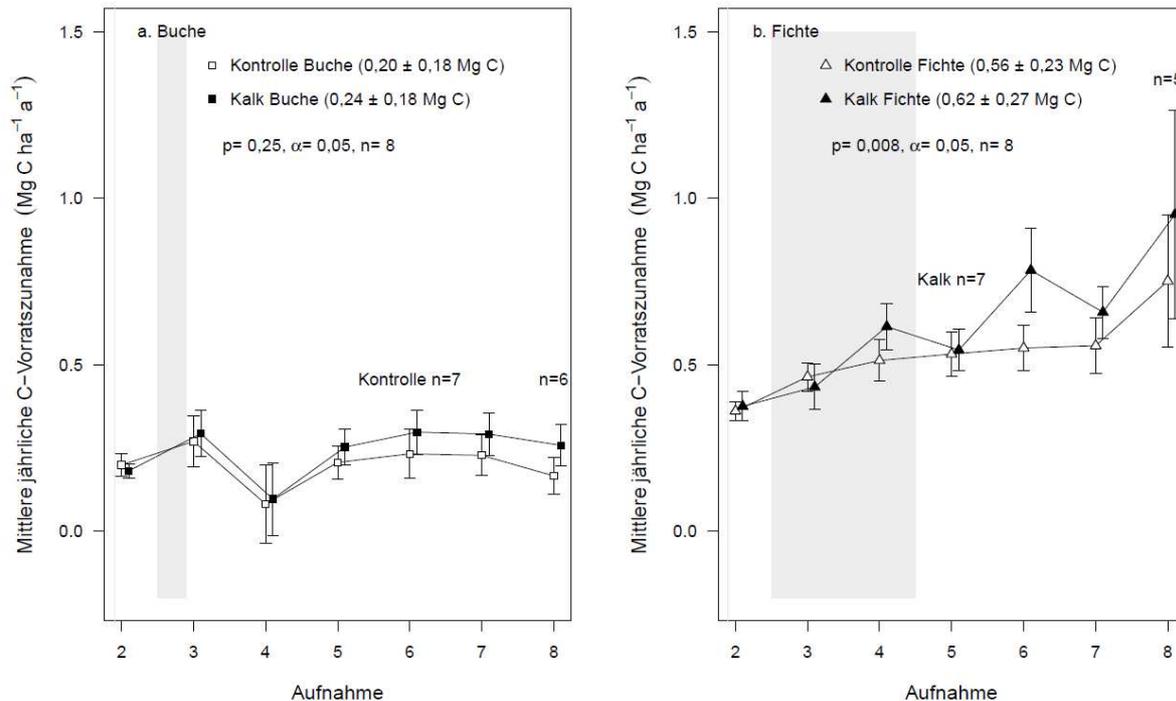


Abbildung 17: Jährliche Zunahme des Kohlenstoffvorrats der Grobwurzelbiomasse (Mittelwert \pm Standardfehler) auf den (a) Buchen- ($n=8$) und (b) Fichten- ($n=8$) Versuchsfeldern der NW-FVA mit ertragskundlichen Auswertungen. Die vertikal verlaufende hellgraue Linie zeigt den Zeitpunkt der ersten Kalkung. Der grau-schattierte Bereich repräsentiert den Zeitraum der zweiten Kalkung, die je nach Versuchsfeld zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten stattgefunden hat. Die Abstände der Aufnahmen betragen im Mittel 5 Jahre und die Aufnahmezeitpunkte liegen zwischen den Jahren 1985-2018.

1.2.3. Kohlenstoffvorrat und Säure-Basenzustand des Bodens

Größe und Einflussfaktoren der organischen Kohlenstoffvorräte im Boden auf den Kontrollparzellen

Die Versuchsfelder wiesen eine hohe Variabilität in den organischen Kohlenstoffvorräten im Boden auf. Sie lagen zwischen 49 und 366 Mg C ha^{-1} (Humusaufgabe bis 60 cm Bodentiefe). Der Kohlenstoffgehalt ist in der Humusaufgabe am größten und nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab (**Abbildung 18a**). Auf den Kontrollparzellen verteilen sich 23% des gesamten Kohlenstoffvorrats in der Humusaufgabe, 27% in den oberen 10 cm des Mineralbodens ($0-10 \text{ cm}$) und die verbleibenden 50% unterhalb von 10 cm Bodentiefe ($10-60 \text{ cm}$) (**Abbildung 18b**). Auf den Fichtenversuchsfeldern wurden etwa 38% mehr Kohlenstoff bis 60 cm Bodentiefe gespeichert als auf den Buchenversuchsfeldern (Fichte: $157 \pm 37 \text{ Mg C ha}^{-1}$; Buche: $97 \pm 19 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Die größten Unterschiede zwischen den Baumarten zeigen sich in den Humushorizonten L/O_f und unterhalb von 10 cm Bodentiefe (**Abbildung 18c**).

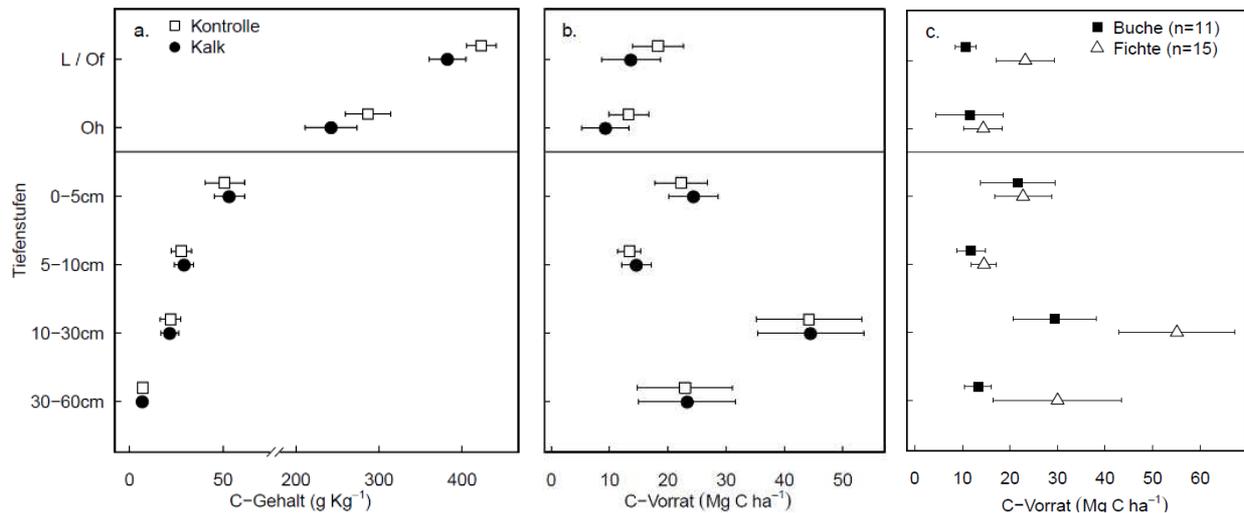


Abbildung 18: (a) Mittlerer (\pm 95% t-Test-Konfidenzintervall) Kohlenstoffgehalt und (b) mittlerer (\pm 95% t-Test-Konfidenzintervall) Kohlenstoffvorrat auf den Kontroll- und Kalkparzellen sowie (c) mittlerer (\pm 95% t-Test-Konfidenzintervall) Kohlenstoffvorrat auf den auf den Kontrollparzellen der Buchen- und Fichtenversuchsflächen in der Humusauflage und bis 60 cm Mineralbodentiefe (Humusauflage $n=28$; Mineralboden $n=26$).

In den Humusauflagehorizonten wurden die Kohlenstoffvorräte weitgehend durch die Stickstoffdeposition und den pH-Wert beeinflusst. So zeigte die Stickstoffdeposition eine signifikant positive Korrelation mit dem Kohlenstoffvorrat im L/O_f-Horizont (**Tabelle 9**), wobei dieser Zusammenhang nur auf den Fichtenversuchsflächen zu beobachten war. Ein exponentieller, negativer Zusammenhang war zwischen dem Kohlenstoffvorrat in der Humusauflage und dem pH-Wert zu beobachten, wobei insbesondere im L/O_f-Horizont hohe Kohlenstoffvorräte im pH-Wertbereich von 3,5 bis 4,5 zu verzeichnen waren.

Tabelle 9: Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten von Variablen, die den Kohlenstoffvorrat in verschiedenen Bodentiefen der Kontrollparzellen regulieren (Humusauflage $n=28$; Mineralboden $n=26$).

	L/O _f	O _h	0-5 cm	5-10 cm	10-30 cm	30-60 cm
Niederschlag (mm a ⁻¹)	-0,10	-0,21	0,11	0,07	0,14	0,29
Temperatur (°C)	-0,26	-0,06	-0,16	-0,24	-0,37	-0,31
Höhe ü. NN (m)	-0,23	-0,26	-0,10	-0,06	0,32	0,13
N-Deposition (kg N ha ⁻¹)	0,41*	0,31	0,30	0,38	0,13	0,26
Ton (%)	-	-	0,49	0,51	0,62*	0,23
Sand (%)	-	-	-0,62*	-0,56*	-0,43	-0,35
C/N	-0,01	0,65**	-0,05	0,11	0,13	0,32
Basensättigung (%)	0,07	0,07	-0,07	-0,33	-0,38	-0,48*
pH (H ₂ O)	-0,79**	-0,67**	-0,27	-0,29	-0,41*	-0,63**
Fe-Dithionit	-	-	0,60*	0,39	0,45	0,43
Al-Oxalat	-	-	0,69**	0,37	0,48	0,74**
Fe-Oxalat	-	-	0,70**	0,64**	0,43	0,69**

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$

Die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden wurden in erster Linie durch die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens und nicht durch klimatische Variablen wie Temperatur, Niederschlag oder Höhenlage bestimmt (**Tabelle 9**). Einen großen Einfluss auf den Kohlenstoffvorrat hatte die Bodentextur. Dies zeigte sich in den signifikant negativen Korrelationen zwischen dem Kohlenstoffvorrat und den Sandgehalten in 0-5 cm und 5-10 cm Bodentiefe sowie in der positiven Korrelation mit dem Tongehalt in 10-30 cm Bodentiefe. Im Unterboden (30-60 cm) wies der Kohlenstoffvorrat einen ähnlichen exponentiellen Rückgang mit dem Bodentextur auf wie in den Humushorizonten. Der Kohlenstoffgehalt des Bodens korrelierte außerdem sowohl in den gekalkten als auch in den Kontrollparzellen stark mit der Trockenrohdichte des Bodens (in 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Bodentiefe) (**Abbildung 19**). Die Trockenrohdichte nahm mit abnehmendem Kohlenstoffgehalt zu. Dieser Trend war jedoch in 30-60 cm Bodentiefe nicht erkennbar.

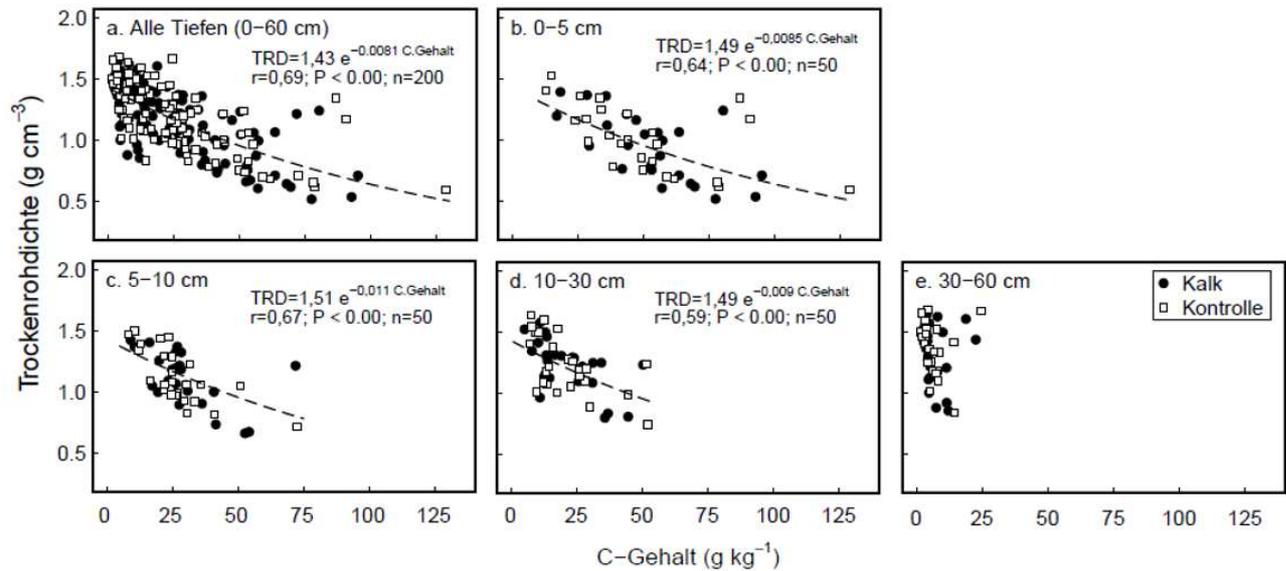


Abbildung 19: Beziehung zwischen der Trockenrohdichte und den Bodenkohlenstoffgehalten in (a) 0-60 cm, (b) 0-5 cm, (c) 5-10 cm, (d) 10-30 cm und (e) 30-60 cm Mineralbodentiefe (n=26). Regressionsgeraden zeigen einen signifikanten Zusammenhang.

Größe und Einflussfaktoren der kalkungsbedingten Änderungen der organischen Kohlenstoffvorräte im Boden

Über das gesamte Bodenprofil (Humusauflage bis 60 cm Bodentiefe) betrachtet waren die Kohlenstoffvorräte auf den gekalkten ($127 \pm 25 \text{ Mg C ha}^{-1}$; Mittelwert \pm SE) und den Kontrollparzellen ($132 \pm 25 \text{ Mg C ha}^{-1}$) vergleichbar (**Abbildung 18b**). In der Humusauflage verringerte die Kalkung den Kohlenstoffvorrat allerdings signifikant um $34 \pm 12 \%$ (entspricht $8,6 \pm 3,7 \text{ Mg C ha}^{-1}$; **Abbildung 20a**), was eine Verringerung sowohl des Kohlenstoffgehalts ($-8,8 \pm 2,4 \%$) als auch der Humustrockenmasse ($-26,1 \pm 6,7 \%$) widerspiegelt. Geringfügig signifikante ($p=0,055$) Zunahmen der Kohlenstoffvorräte konnten in den obersten 10 cm des Mineralbodens beobachtet werden. Sowohl die Buchen- als auch die Fichtenversuchsflächen wiesen ähnliche Kohlenstoffverluste in der Humusauflage auf (Buche: $-8,1 \pm 4,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$; Fichte: $-8,9 \pm 5,7 \text{ Mg C ha}^{-1}$) (**Abbildung 20b**). Im Gegensatz zu den Fichtenbeständen wiesen die Buchenbestände eine signifikante Zunahme des Kohlenstoffvorrats im Oberboden (0-5 cm) auf ($4,9 \pm 4,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$; **Abbildung 20b**).

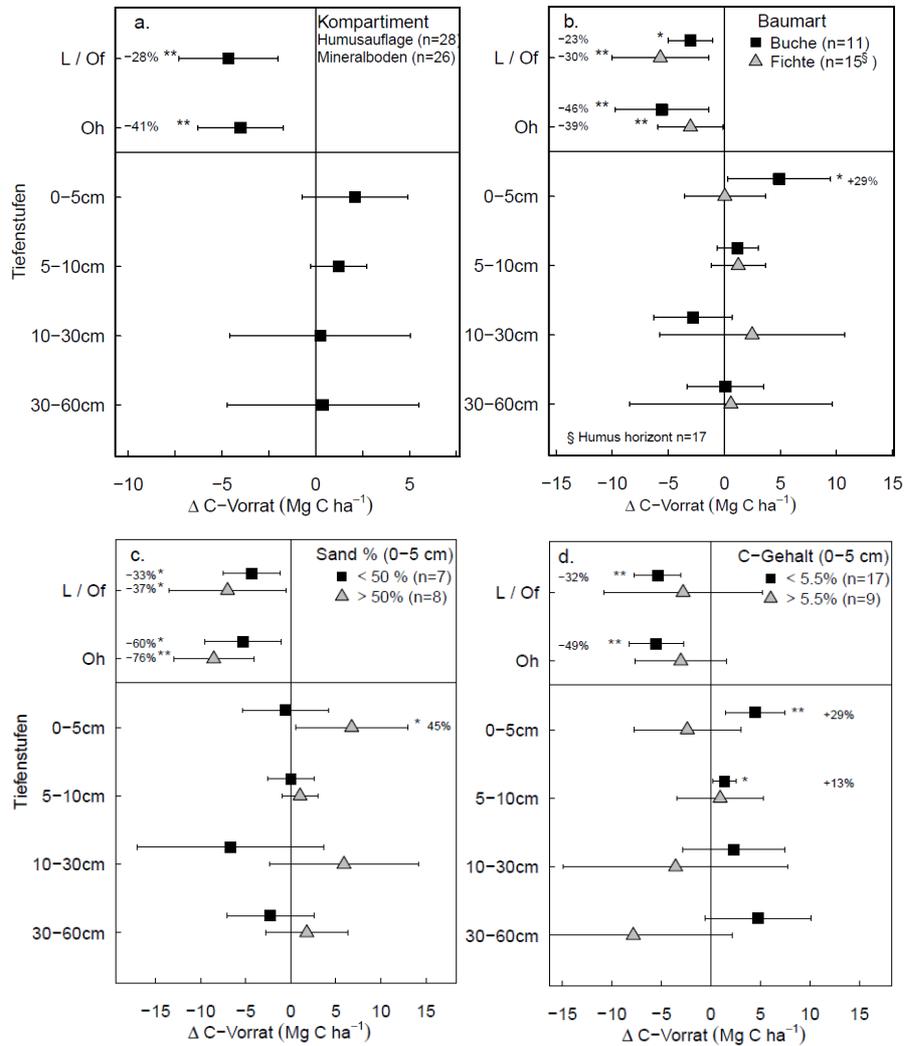


Abbildung 20: Mittlere Differenz des Kohlenstoffvorrats (\pm 95% t-Test-Konfidenzintervall) zwischen Kalk- und Kontrollparzelle in der Humusauflage bis 60 cm Bodentiefe für (a) alle Flächen und stratifiziert nach (b) Baumart, (c) Sandanteil in 0-5 cm und (d) C-Gehalt in 0-5 cm Bodentiefe der Kontrollparzelle.

Die Rückgänge im Kohlenstoffvorrat der Humusauflage wurden weitgehend durch pH-Wertänderungen getrieben (**Abbildung 21**), wobei die Kohlenstoffvorratsverluste im L/Of-Horizont bis zu -58 ± 9 % betragen, wenn sehr saure Standorte gekalkt wurden und der pH-Wert um $\sim 1,5$ erhöht wurde ($n=4$). Entsprechend wiesen die Kalkungsmengen (Säureneutralisierungskapazität), die für die pH-Wertveränderungen verantwortlich sind, eine negative lineare Beziehung zu den Kohlenstoffvorratsveränderungen auf, was darauf hindeutet, dass höhere Kalkungsmengen zu größeren Kohlenstoffverlusten führen (**Tabelle 10**).

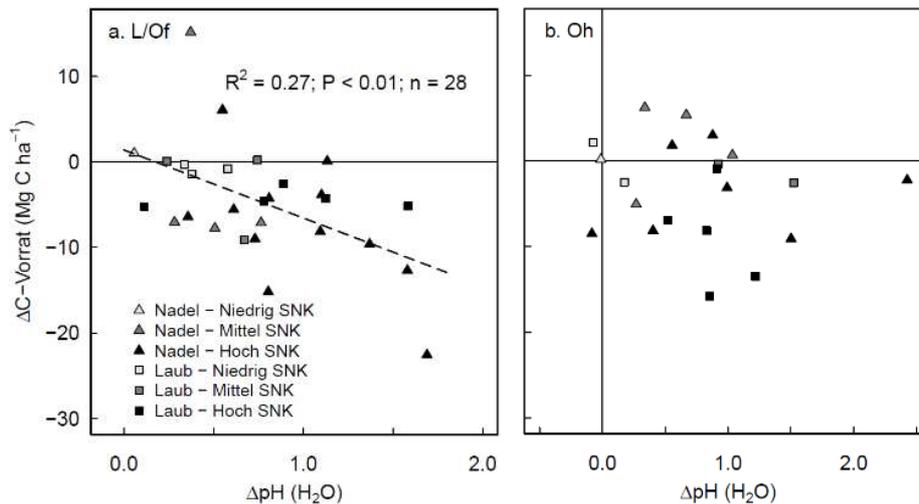


Abbildung 21: Differenz des Kohlenstoffvorrats zwischen Kalk- und Kontrollparzelle im (a) L/O_x-Horizont und (b) O_x-Horizont in Abhängigkeit der Differenz des pH-Werts zwischen Kalk- und Kontrollparzelle.

Der Sandgehalt im oberen Mineralboden (0-5 cm) hat einen deutlichen Einfluss auf die Veränderungen der Kohlenstoffvorräte durch Kalkung (**Abbildung 20c**). Während auf Standorten mit hohen Sandgehalten (> 50 %) eine Zunahme des Kohlenstoffvorrats vor allem in den Tiefenstufen 0-5 cm und 10-30 cm zu beobachten war, zeigten sich auf Standorten mit geringen Sandgehalten (< 50 %) kaum Änderungen des Kohlenstoffvorrats bzw. eine Abnahme in der Tiefenstufe 10-30 cm. Auf Standorten mit höheren Sandgehalten war allerdings in den Humushorizonten eine stärkere Abnahme der Kohlenstoffvorräte zu beobachten.

Die Veränderungen des Kohlenstoffvorrats hingen ebenfalls vom Kohlenstoffgehalt im oberen Mineralboden (0-5 cm) der Kontrollparzelle ab (**Abbildung 20d, Tabelle 10**). Auf Versuchsflächen mit niedrigen Kohlenstoffgehalten (< 5,5 % in 0-5 cm) auf der Kontrollparzelle nahm der Kohlenstoffvorrat durch Kalkung zu, während er auf Flächen mit hohen Kohlenstoffgehalten (> 5,5 % in 0-5 cm) auf der Kontrollparzelle abnahm. Dieses Muster war in 0-5 cm, 10-30 cm und 30-60 cm Bodentiefe zu beobachten. Auf Standorten mit niedrigen Kohlenstoffgehalten auf der Kontrollparzelle waren die Zunahmen der Kohlenstoffvorräte im Mineralboden (0-60 cm) signifikant von Null verschieden ($12,8 \pm 10,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Diesen Zunahmen stehen Kohlenstoffverluste in den Humushorizonten ($-10,6 \pm 3,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$) gegenüber. Umgekehrt wiesen die Standorte, die hohe Kohlenstoffgehalte (> 5,5 % in 0-5 cm) in den Kontrollparzellen aufwiesen, in keiner Bodentiefe signifikante Veränderungen des Kohlenstoffvorrats auf, wobei es tendenziell zu Kohlenstoffverlusten im gesamten Profil kam (Humusaufgabe bis 60 cm Bodentiefe; $-18,4 \pm 18,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$, entsprechend $10 \pm 5 \%$; $p=0,08$).

Tabelle 10: Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten von Variablen, die die Differenz des Kohlenstoffvorrats zwischen Kalk- und Kontrollparzelle in verschiedenen Bodentiefen regulieren. (Humusaufgabe n=28; Mineralboden n=26)

	L/O _f	O _h	0-5 cm	5-10 cm	10-30 cm	30-60 cm
Klima- und Standort-Eigenschaften						
Niederschlag (mm a ⁻¹)	0,29	0,13	0,13	-0,27	-0,01	-0,22
Temperatur (°C)	0,06	-0,28	0,24	0,24	0,30	0,16
Höhe ü. NN (m)	0,05	-0,10	0,00	-0,35§	-0,14	-0,21
Säureneutralisierungskapazität (kmolc ha ⁻¹)	-0,44 *	-0,46 *	-0,06	-0,30	0,06	0,13
N-Deposition (kg N ha ⁻¹)	0,04	0,29	-0,35§	0,11	-0,38§	-0,33§
Bodeneigenschaften von Referenzflächen						
Ton (%) †	-	-	-0,41	0,11	-0,36	-0,42
Sand (%) †	-	-	0,31	-0,18	0,53§	0,41
C-Vorrat (Mg C ha ⁻¹)	-0,38 *	-0,06	-0,42*	-0,04	-0,28	-0,27
C:N	-0,00	0,03	0,02	0,19	0,14	0,07
Basensättigung (%) ‡	0,11	0,04	-0,19	0,02	0,03	0,17
pH (H ₂ O)	0,14	-0,16	-0,13	0,07	-0,21	0,02
Fe-Oxalat (g kg ⁻¹) †	-	-	-0,42	-0,19	-0,56*	-0,34
Al-Oxalat (g kg ⁻¹) †	-	-	-0,52§	-0,13	-0,67**	-0,46§
Fe-Dithionit (g kg ⁻¹) †	-	-	-0,38	-0,05	-0,29	-0,27
Veränderung von Bodeneigenschaften						
Δ pH (H ₂ O)	-0,42*	-0,35	-0,05	-0,25	-0,27	-0,12
Δ Basensättigung ‡	-0,23	-0,40	0,17	-0,24	-0,16	-0,17
Δ Fe-Oxalat (g kg ⁻¹) †	-	-	-0,07	0,59**	-0,10	0,03
Δ Al-Oxalat (g kg ⁻¹) †	-	-	0,12	0,36	0,28	0,32
Δ Fe-Dithionit (g kg ⁻¹) †	-	-	-0,31	0,01	-0,02	-0,17

§ p ≤ 0,1; * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; † n=15, ‡ n=11 in Humushorizonten

Auf einem Teil der Versuchsflächen sind die Kohlenstoffvorräte in verschiedenen Zeitintervallen zwischen 1990 und 2019 quantifiziert worden. In der Humusauflage nahmen die Kohlenstoffvorräte mit der Zeit signifikant zu, allerdings nicht im L/O_t-Horizont der gekalkten Parzellen (**Abbildung 22a**). Das führte zu einer signifikant geringeren jährlichen Zunahme der Kohlenstoffvorräte im L/O_t-Horizont auf den gekalkten im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Differenz Kalk-Kontrolle: $-0,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden haben sich weder in den gekalkten noch in den Kontrollparzellen mit der Zeit signifikant verändert, allerdings ist die Differenz der jährlichen Kohlenstoffvorratsveränderung in 5-10 cm Bodentiefe zwischen den gekalkten und den Kontrollparzellen signifikant positiv, d.h. es kommt zu einer relativen jährlichen Zunahme der Kohlenstoffvorräte auf den gekalkten Parzellen (**Abbildung 22b**).

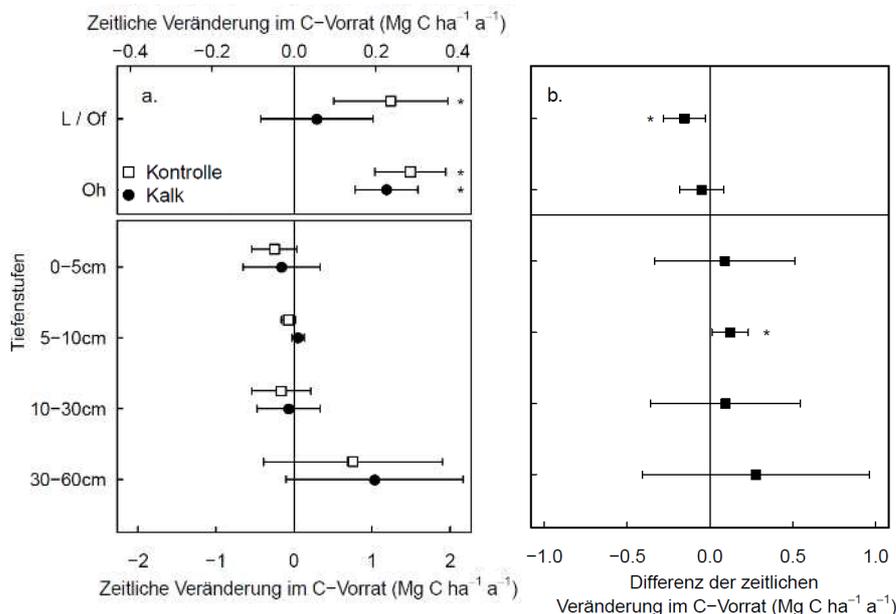


Abbildung 22: (a) Mittlere ($\pm 95\%$ t-test Konfidenzintervall) Veränderung im Kohlenstoffvorrat pro Jahr und (b) Differenz der Veränderung im Kohlenstoffvorrat pro Jahr zwischen Kontroll- und Kalkparzelle in der Humusauflage ($n=17$) und dem Mineralboden ($n=13$). Mineralboden: zwei Flächen mit zwei Messzeitpunkten, neun Flächen mit drei Messzeitpunkten und zwei Flächen mit vier Messzeitpunkten. Humusauflage: zwei Flächen mit zwei Messzeitpunkten, fünf Flächen mit drei Messzeitpunkten, sechs Flächen mit vier Messzeitpunkten und vier Flächen mit fünf Messzeitpunkten.

Auswirkungen der Kalkung auf die Treibhausgasflüsse zwischen Boden und Atmosphäre auf drei Buchenversuchsflächen

Die Treibhausgasflüsse zwischen Boden und Atmosphäre wurden auf drei Intensivflächen der sechs Kalko-Buchenversuchsflächen gemessen (Dassel 4227, Göhrde 157 und Sellhorn 34). Alle drei Standorte wurden im August/September 2020 frisch gekalkt, so dass die meisten Messungen die kurzfristigen Auswirkungen der Kalkung auf die Treibhausgasflüsse aus dem Boden widerspiegeln. Am Standort Dassel 4227 wurden jedoch vor der Kalkung drei Proben genommen, um festzustellen, ob die langfristigen Auswirkungen der Kalkung noch vorhanden sind. Während bei den CO_2 - (**Abbildung 23a**) und N_2O -Flüssen (**Abbildung 23b**) vor der Wiederholungskalkung keine signifikanten Unterschiede festzustellen waren, gab es jedoch sehr ausgeprägte Unterschiede bei den CH_4 -Flüssen (**Abbildung 23c**): die Methanaufnahme des Bodens war in den gekalkten Parzellen doppelt so hoch wie in den Kontrollparzellen.

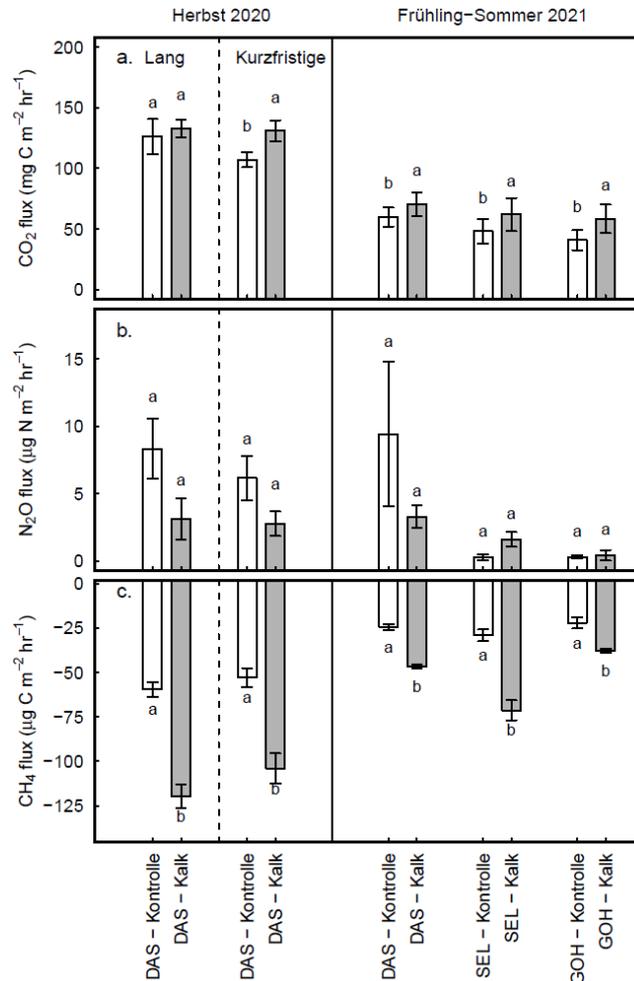


Abbildung 23: Flüsse der Treibhausgase (a) CO₂, (b) N₂O und (c) CH₄ zwischen Boden und Atmosphäre auf den Kalk- und Kontrollparzellen der drei niedersächsischen Intensivflächen mit Buche (n=3).

Nach der Kalkung waren die CO₂-Flüsse aus dem Boden der gekalkten Parzellen an allen drei Standorten signifikant höher (32±13 %) als der Kontrollparzellen (**Abbildung 23a**). Am Standort Dassel 4227, wo die THG-Flüsse unmittelbar nach der Kalkung im Herbst 2020 intensiv gemessen wurden, waren die CO₂-Flüsse im Boden in den gekalkten Parzellen etwa zwei bis drei Wochen nach der Kalkung durchgängig höher, was mit feuchteren Bodenbedingungen zusammenfiel (**Abbildung 24a**).

Die N₂O-Flüsse aus dem Boden wurden durch die Kalkung nicht signifikant beeinflusst (**Abbildung 23b**). Wie für die N₂O-Flüsse typisch, war eine große räumliche Heterogenität zu beobachten, wobei die meisten Hauben extrem niedrige N₂O-Emissionen aufwiesen, während einige wenige Hauben hohe Emissionen verzeichneten, insbesondere in Dassel 4227 (**Abbildung 24c**).

Die Methanaufnahme des Bodens in den gekalkten Parzellen war an allen drei Standorten im Durchschnitt doppelt so hoch wie in der Kontrolle (**Abbildung 23c**). Am Standort Dassel 4227 reagierte die Methanaufnahme nicht auf die erneute Kalkung (**Abbildung 24b**) und blieb in den gekalkten Parzellen durchweg höher, selbst als die Temperaturen im Spätherbst sanken (**Abbildung 24d**).

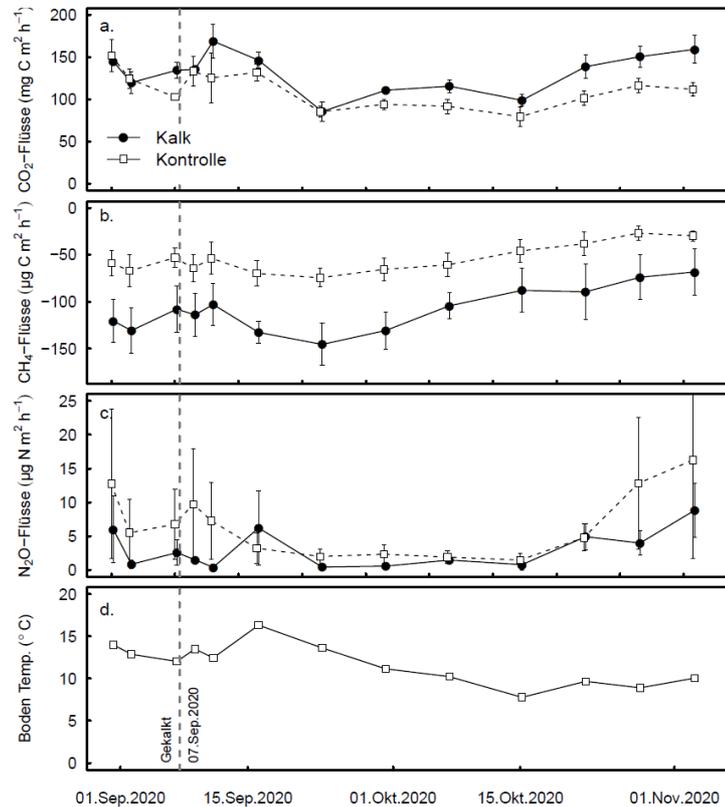


Abbildung 24: Mittlere (\pm 95% t-test Konfidenzintervall) Flüsse der Treibhausgase (a) CO₂, (b) CH₄ und (c) N₂O zwischen Boden und Atmosphäre sowie (d) die Bodentemperatur auf der Buchenversuchsfläche Dassel 4227 vor und unmittelbar nach der Kalkung im Herbst 2020.

1.3. Bodenvegetation in Nordwestdeutschland (NW-FVA)

1.3.1. Kalkungswirkung auf die Moosschicht

Die Artenzahl der Moosschicht wurde nicht signifikant durch die Kalkung beeinflusst (**Abbildung 25**). Der Waldtyp hatte hingegen einen großen Einfluss auf die Artenzahl. Die Artenzahl der Moosschicht war in den untersuchten Nadelwäldern signifikant größer als in den Laubwäldern. Wenn man die vier Baumarten getrennt betrachtet fällt auf, dass die meisten Moose in den untersuchten Fichtenbeständen vorkamen.

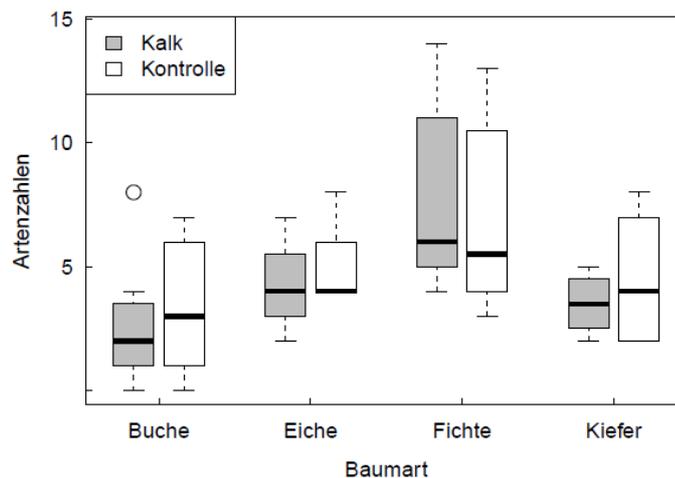


Abbildung 25: Artenzahl der Moosschicht in Abhängigkeit von der Behandlung und der Baumart.

Die Baumart hatte einen größeren Einfluss auf den Deckungsgrad als die Kalkung (**Abbildung 26**). Auch unter Berücksichtigung der Baumart gab es keinen Einfluss der Kalkung auf den Deckungsgrad der Moosschicht. Der Deckungsgrad der Moosschicht war in den untersuchten Nadelwäldern höher als in den Laubwäldern. Der Deckungsgrad der Moosschicht war in den untersuchten Fichtenbeständen am größten.

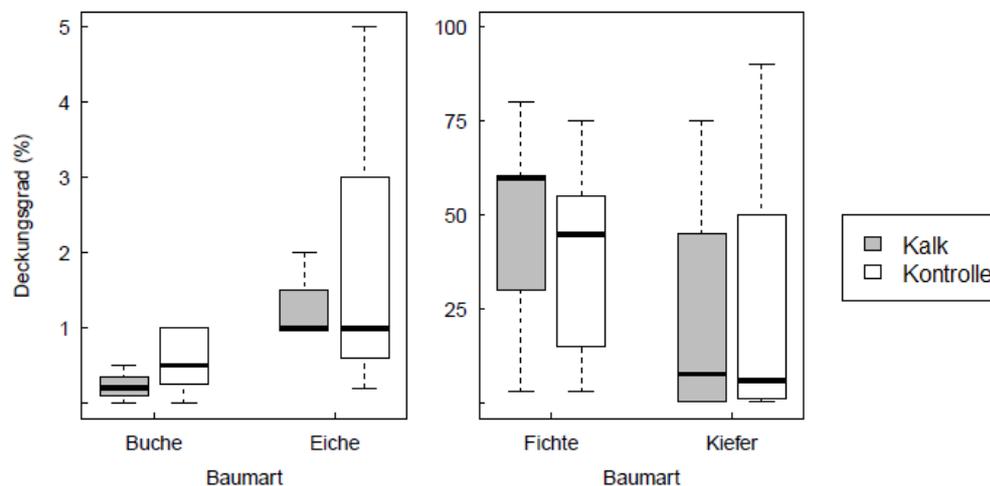


Abbildung 26: Deckungsgrad (%) der Mooschicht in Abhängigkeit von der Behandlung und der Baumart. Die stark unterschiedliche Skalierung der y-Achse für die Laub- (links) und die Nadelbaumarten (rechts) ist zu beachten.

Die Flächen wurden mit unterschiedlichen Mengen Kalk behandelt, so dass sich die Frage ergibt, ob die applizierte Kalkmenge einen negativen Effekt auf die Artenzahl und den Deckungsgrad in der Mooschicht hatte. Für die Auswertung der Frage kann sowohl die Säureneutralisierungskapazität als auch die Basensättigung auf den Kalkparzellen herangezogen werden. Die Artenzahl in der Mooschicht war, entgegen der Erwartung, positiv mit der Säureneutralisierungskapazität korreliert (**Abbildung 27a**; $R^2=0.302$, $p=0.006791$). Die Basensättigung der Kalkparzellen hatte hingegen keinen Einfluss auf die Artenzahl der Mooschicht. Die Säureneutralisierungskapazität sowie die Basensättigung auf den Kalkparzellen hatten keinen signifikanten Einfluss auf den Deckungsgrad der Mooschicht. Allerdings gab es eine Tendenz zu geringen Deckungsgraden bei hoher Säureneutralisierungskapazität und hoher Basensättigung (**Abbildung 27b und c**). Der nicht signifikante Effekt der Säureneutralisierungskapazität und der Basensättigung auf den Deckungsgrad war erwartungsgemäß negativ in der Mooschicht.

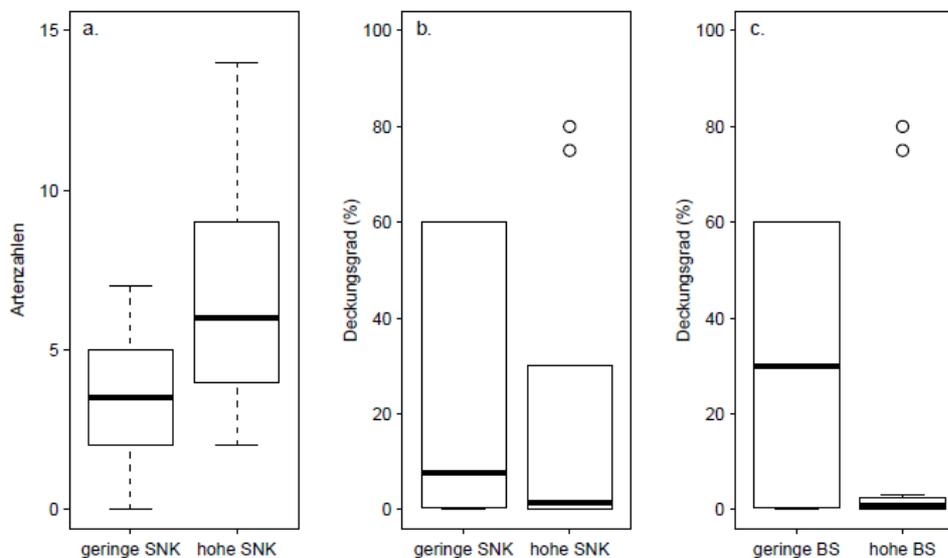


Abbildung 27: (a) Artenzahl und (b) Deckungsgrad der Mooschicht auf Kalkparzellen mit geringer ($21-75 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1}$, $n=12$) und hoher ($133-171 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1}$, $n=10$) Säureneutralisierungskapazität (SNK) sowie (c) Deckungsgrad der Mooschicht auf Kalkparzellen mit geringer ($0-20 \%$, $n=10$) und hoher ($>20 \%$, $n=12$) Basensättigung.

1.3.2. Kalkungswirkung auf die Kraut- und Strauchschicht

In der Krautschicht kamen auf den gekalkten Parzellen signifikant mehr Arten vor als auf den ungekalkten Parzellen (**Abbildung 28**). Die Unterschiede sind auf die Krautschicht der Nadelwaldversuchsflächen zurückzuführen. Die Kalkung hatte auf den Fichtenflächen einen signifikanten und auf den Kiefernflächen einen tendenziellen ($n=4$; $p=0,0767$) Einfluss auf die Artenzahl der Krautschicht. In den Laubwäldern hatte die Kalkung keinen signifikanten Einfluss auf die Artenzahl.

Der Waldtyp hatte einen großen Einfluss auf die Artenzahl der Krautschicht. Die Artenzahl war in den untersuchten Nadelwäldern signifikant größer als in den Laubwäldern. Wenn man die vier Baumarten getrennt betrachtet fällt auf, dass die Buchenbestände signifikant weniger Arten in der Krautschicht hatten als die anderen drei Baumarten.

Die Artenzahl der Strauchschicht unterschied sich unabhängig von der Baumart nicht durch die Kalkung.

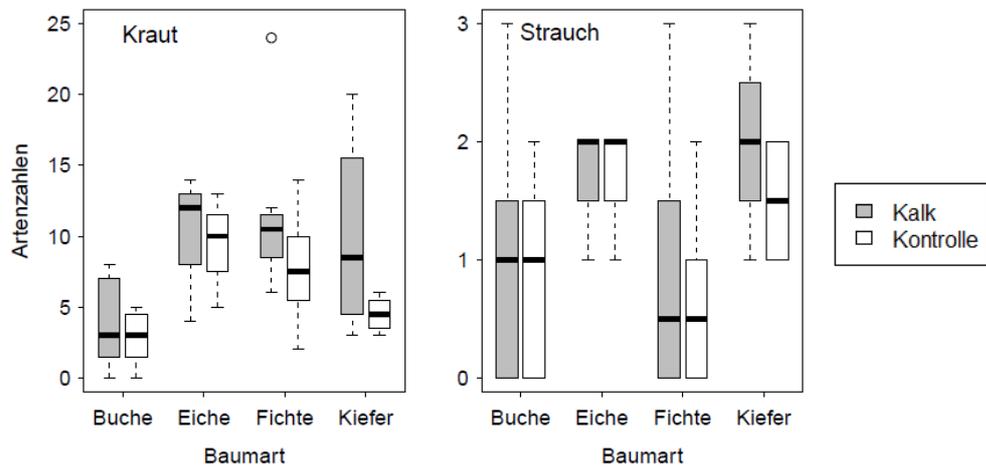


Abbildung 28: Artenzahl der Kraut- (links), und Strauchschicht (rechts) in Abhängigkeit von der Behandlung und der Baumart.

Die Baumart hatte einen größeren Einfluss auf den Deckungsgrad der Kraut- und der Strauchschicht als die Kalkung (**Abbildung 29**). Nur in den Eichenbeständen (N=3) war der Deckungsgrad der Strauchschicht auf den gekalkten Parzellen signifikant geringer als auf den ungekalkten. In der Krautschicht gab es auch unter Berücksichtigung der Baumart keinen Einfluss der Kalkung auf den Deckungsgrad. Der Deckungsgrad der Krautschicht war in den untersuchten Nadelwäldern höher als in den Laubwäldern; in der Strauchschicht verhielt es sich umgekehrt. Der Deckungsgrad der Krautschicht war in den untersuchten Kiefernbeständen am größten und der Deckungsgrad der Strauchschicht in den Eichenbeständen.

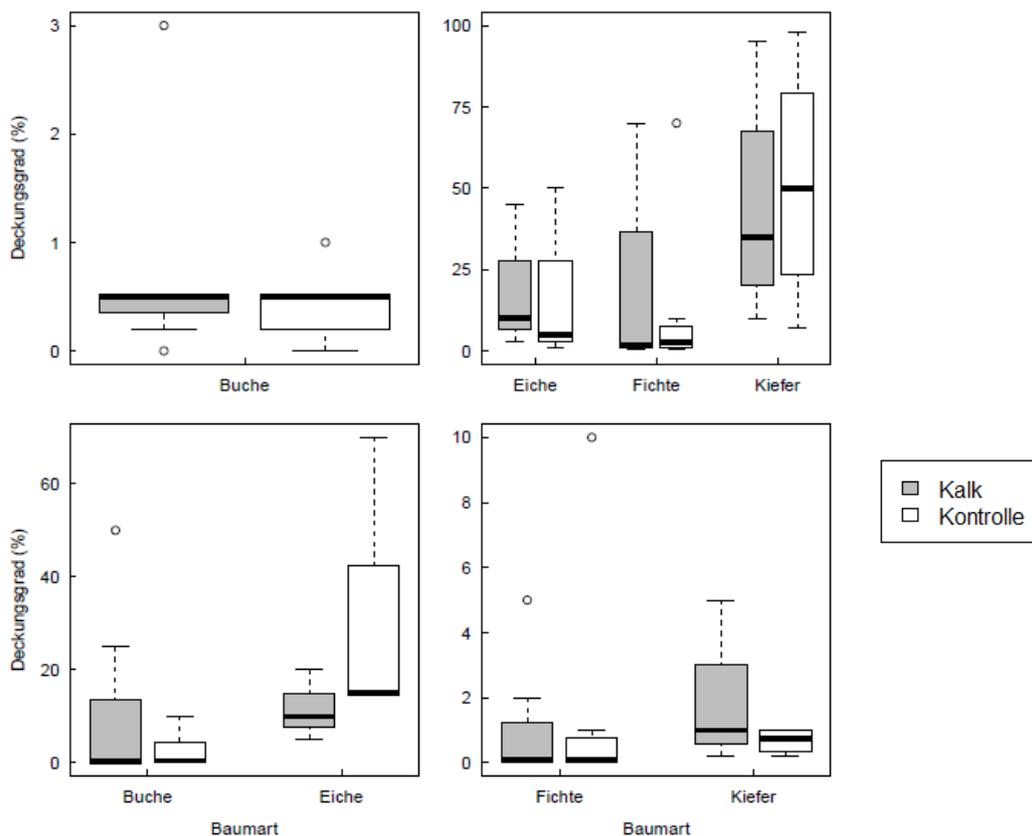


Abbildung 29: Deckungsgrad (%) der Kraut- (oben) und Strauchschicht (unten) in Abhängigkeit von der Behandlung (Kalk, Kontrolle) und der Baumart (Buche, Eiche, Fichte, Kiefer). Die stark unterschiedliche Skalierung der y-Achse für die vier Baumarten ist zu beachten.

Die Flächen wurden mit unterschiedlichen Mengen Kalk behandelt, so dass sich die Frage ergibt, ob die applizierte Kalkmenge einen positiven Effekt auf die Artenzahl und den Deckungsgrad in der Krautschicht hatte. Weder die Säureneutralisierungskapazität noch die Basensättigung der Kalkparzellen hatte allerdings einen Einfluss auf die Artenzahl und den Deckungsgrad in der Krautschicht. Es gab jedoch eine Tendenz zu hohen Deckungsgraden bei hoher Säureneutralisierungskapazität in der Krautschicht (**Abbildung 30**). Der nicht signifikante Effekt der Säureneutralisierungskapazität auf den Deckungsgrad war erwartungsgemäß positiv in der Krautschicht.

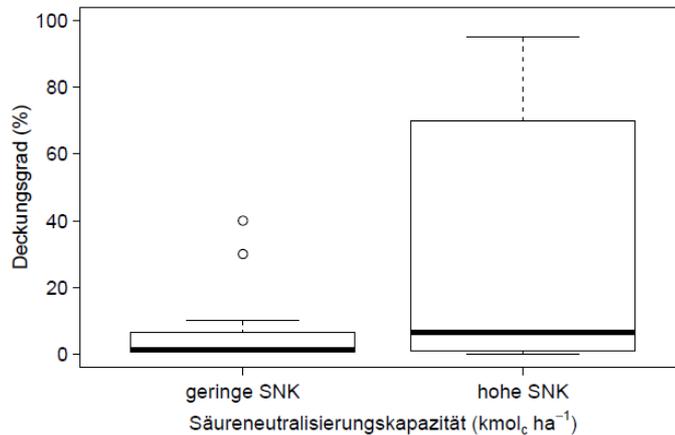


Abbildung 30: Deckungsgrad der Krautschicht auf Kalkparzellen mit geringer (21-75 kmol_c ha⁻¹, n=12) und hoher (133-171 kmol_c ha⁻¹, n=10) Säureneutralisierungskapazität.

Wenn man die verschiedenen Einflussfaktoren miteinander vergleicht (mittels AIC), zeigt sich, dass die Baumart den größten Einfluss auf die Artenzahl der Moos-, Kraut- und Strauchschicht hatte. Der Einfluss der Baumart auf die Artenzahl war größer als der Einfluss der Kalkung auf die Artenzahl. Außer der Baumart hatte keiner der untersuchten Parameter einen signifikanten Einfluss auf den Deckungsgrad der Moos- und Krautschicht.

Zusätzlich zu der Betrachtung der Artenzahl bietet auch die Analyse der Ellenberg'schen Zeigerwerte (Ellenberg & Leuschner 2010) Informationen über die Kalkungswirkung auf die Krautschicht. Die Kalkung hatte keinen Einfluss auf den Licht- und den Feuchtezeigerwert. Hingegen hatte die Baumart einen signifikanten Einfluss auf den Lichtzeigerwert: Buche < Fichte < Eiche < Kiefer. Am häufigsten kamen Halbschattenpflanzen (L5) vor. Tiefschattenpflanzen (L1) und Lichtpflanzen (L8) kamen hingegen selten vor. Volllichtpflanzen (L9) kamen gar nicht vor. Die Buche unterschied sich signifikant von den anderen Baumarten im L-Zeigerwert. Auf Buchenflächen kamen mehr Schattenpflanzen vor als auf den anderen Flächen. Auf Kiefernflächen kamen hingegen die meisten Arten vor, die zwischen Halbschatten- und Halblichtpflanzen stehen (L6). Es kamen am häufigsten Frischezeiger (F5) vor.

Die Kalkung hatte erwartungsgemäß einen signifikanten Einfluss auf den Reaktions- und den Nährstoffzeigerwert. Auf den gekalkten Parzellen kamen mehr Arten mit einem hohen Reaktions- und Nährstoffzeigerwert vor, auf den ungekalkten Parzellen mehr Arten mit einem geringen Reaktions- und Nährstoffzeigerwert (**Abbildung 31**). Arten, die zwischen Starksäure- und Säurezeigern stehen (R2), kamen auf den Kontrollparzellen häufiger vor als auf den Kalkparzellen. Arten, die zwischen Säure- und Mäßigsäurezeigern stehen (R4) kamen hingegen auf den Kalkparzellen häufiger vor als auf den Kontrollparzellen. Es kam lediglich ein Starksäurezeiger (R1) auf einer Kontrollparzelle vor (*Calluna vulgaris*) und kein Basen- und Kalkzeiger (R9). Auch in der Gruppe der Arten, die zwischen Schwachsäure-/Schwachbasenzeiger und Basen-/Kalkzeiger stehen (R8) kam nur eine Art (*Torilis japonica*) auf einer Kalkparzelle vor. Betrachtet man die Baumarten getrennt, ergaben sich nur für die Eichenflächen (N=3) signifikante Unterschiede in der Reaktionszahl zwischen Kalkung und Kontrolle.

Die Nährstoffzahl reagierte stärker auf die Kalkung als die Reaktionszahl. Stickstoffarme Standorte anzeigende Arten (N3) kamen auf den Kontrollparzellen häufiger vor als auf den Kalkparzellen. Arten, die mäßig stickstoffreiche bis stickstoffreiche Standorte anzeigen (N6), kamen hingegen auf den Kalkparzellen häufiger vor als auf den Kontrollparzellen. Es kam lediglich eine Art auf einer Kontrollparzelle vor, die stickstoffärmste Standorte anzeigt (*Calluna vulgaris*). Auf vier Kalkparzellen kam *Urtica dioica* als Anzeiger für übermäßig stickstoffreiche Standorte (N9) vor. Betrachtet man die Baumarten getrennt, ergaben sich nur für die Kiefern- (N=4) und die Eichenflächen (N=3) signifikante Unterschiede in der Nährstoffzahl zwischen Kalkung und Kontrolle.

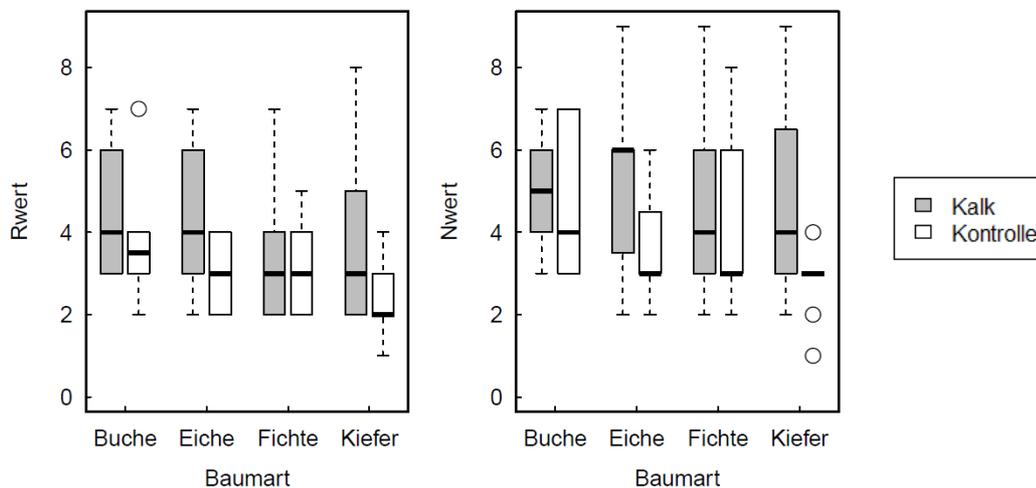


Abbildung 31: R- und N-Weigerwert nach Ellenberg und Leuschner (2010) der Krautschicht in Abhängigkeit von der Behandlung (Kalk, Kontrolle) und der Baumart (Buche, Eiche, Fichte, Kiefer).

Wenn es zu Veränderungen der Artenzusammensetzung durch die Waldkalkung kommt, könnte auch naturverjüngungshemmende Vegetation verstärkt aufkommen. Auf 19 der 22 Versuchsflächen kommt potenziell naturverjüngungshemmende Vegetation vor. Auf drei dieser Flächen betrifft das nur die gekalkte Parzelle, auf vier nur die Kontrollparzelle, auf den restlichen Flächen kommt auf beiden Parzellen potenziell naturverjüngungshemmende Vegetation vor.

Es handelt sich insgesamt um zehn Pflanzenarten, die alle, bis auf eine Ausnahme, sowohl auf gekalkten als auch auf Kontrollparzellen vorkommen. Einzige Ausnahme ist die Besenheide (*Calluna vulgaris*), die nur auf einer Kontrollparzelle vorkommt. Vier Gräser kommen jeweils nur auf einer gekalkten und einer Kontrollparzelle vor (*Calamagrostis epigejos*, *Calamagrostis villosa*, *Deschampsia cespitosa*, *Molinia caerulea*), allerdings ist auffällig, dass die Deckungsgrade auf den gekalkten Parzellen durchgängig höher sind als auf den Kontrollparzellen. Der Adlerfarn (*Pteridium aquilinum*) kommt ausschließlich auf zwei Kiefernflächen am Standort Michelstadt im hessischen Odenwald vor und dort jeweils auf der gekalkten und der Kontrollparzelle. Die Deckungsgrade sprechen nicht für einen Effekt der Kalkung; auf einer Fläche ist der Deckungsgrad auf der gekalkten, auf der anderen auf der Kontrollparzelle höher. Die Drahtschmiele (*Deschampsia flexuosa*) kommt zwar auf wesentlich mehr Flächen vor als der Adlerfarn, allerdings ist auch hier keine Beeinflussung durch die Kalkung festzustellen, da sie zum einen ähnlich häufig auf Kontrollparzellen (n=13) wie auf gekalkten Parzellen (n=10) vorkommt, zum anderen der Mittelwert und die Spannweite der Deckungsgrade sehr ähnlich sind. Auch das Vorkommen der Brombeerarten (*Rubus fruticosus* agg.) scheint nicht durch die Kalkung beeinflusst zu werden. Sie kommen auf vier gekalkten und drei Kontrollparzellen vor und die Deckungsgrade sind ähnlich und durchgängig gering (max. 0,5 %). Im Gegensatz dazu wird das Vorkommen der Himbeere (*Rubus idaeus*) stark durch die Kalkung beeinflusst. Sie kommt auf acht gekalkten, aber nur auf einer Kontrollparzelle vor. Auf sechs der gekalkten Parzellen ist der Deckungsgrad gering (max. 0,5 %), auf zwei gekalkten Parzellen nimmt er allerdings Werte von 5 bzw. 25 % an. Die Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*) kommt zwar gleich häufig auf gekalkten wie auf Kontrollparzellen vor (jeweils 12 Parzellen), allerdings zeigt sich die Wirkung der Kalkung im Deckungsgrad. Die Kalkung reduziert den Deckungsgrad der säuretoleranten Heidelbeere von im Mittel 26 % auf den Kontrollparzellen (max. 95 %) auf 15 % auf den gekalkten Parzellen (max. 60 %).

Beim Vergleich der Baumarten fällt vor allem die Buche auf. Nur auf vier der sieben Buchenflächen kommen insgesamt drei potenziell naturverjüngungshemmende Arten mit einem Deckungsgrad von 0,1 bis 0,5 % vor. Hingegen kommt auf allen Fichten- (7 Arten), Kiefern- (8 Arten) und Eichenflächen (5 Arten) potenziell naturverjüngungshemmende Vegetation vor.

1.4. Synopse (alle Partner)

Die Synopse ist das Ergebnis der gemeinsamen skalenübergreifenden Auswertung der disziplinären Projektergebnisse und bearbeitet die übergeordneten Fragestellungen der drei Bereiche Kohlenstoffsequestrierung in Waldökosystemen (H1, H2), Anpassungsfähigkeit von Waldökosystemen an den Klimawandel (H3, H4, H5) und Sicherung und Stärkung der Ökosystemdienstleistungen von Wäldern (H5 und H6) (siehe Forschungsfragen und Hypothesen in I.1).

Ziel der Synopse ist eine Neubewertung der Waldbodenkalkung unter Berücksichtigung heute sichtbarer Umweltveränderungen wie größerem Trockenstress, häufigeren Starkregenereignissen und einer höheren Sturmwurfgefährdung in vielen Regionen Deutschlands. Als Grundlage für die Neubewertung dienen zum einen die aus den Untersuchungen auf den Versuchsflächen, im Labor und im Modell gewonnenen Erkenntnisse, zum anderen eine Literaturstudie, die an der NW-FVA erstellt wurde. Sie enthält einen Überblick über alle relevanten Arbeiten zum Themenkomplex Kohlenstoffspeicherung nach Waldbodenkalkung und diskutiert

die Ergebnisse vor dem Hintergrund der hier aufgeworfenen Fragestellungen. Einen Überblick über die Projektergebnisse liefert die grafische Zusammenfassung (**Abbildung 32**). Eine ausführliche Diskussion der Projektergebnisse findet in der noch zu veröffentlichenden Synopse statt.

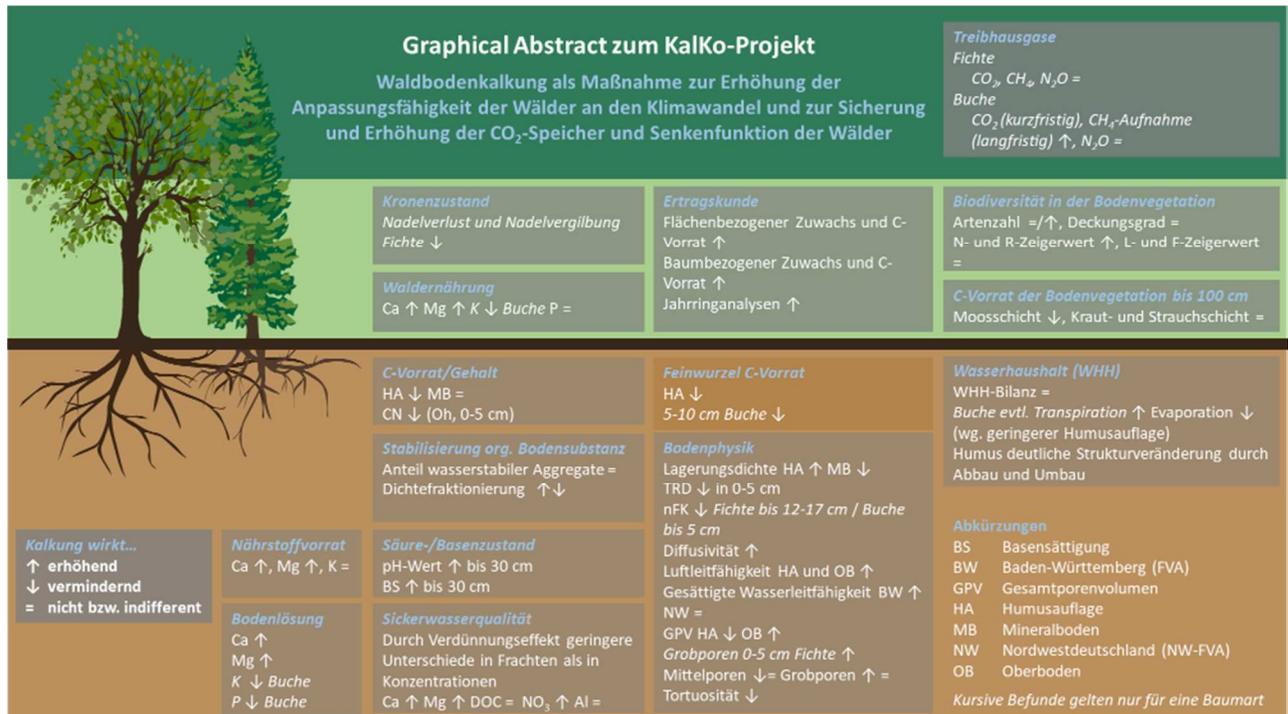


Abbildung 32: Zusammenfassender Überblick über die Projektergebnisse

Synopsenteile der NW-FVA

AP 4.1 Literaturstudie

An der NW-FVA wurde eine Literaturstudie erstellt, die einen Überblick über alle relevanten Arbeiten zum Themenkomplex Kohlenstoffspeicherung nach Waldbodenkalkung enthält und die Ergebnisse vor dem Hintergrund der hier aufgeworfenen Fragestellungen diskutiert. Sie dient dazu, den bisherigen Kenntnisstand zur Waldbodenkalkung zusammenzufassen, die dort vorhandenen Hinweise zu klimarelevanten Effekten der Kalkung herauszuarbeiten und Ansätze für eine Neubewertung der Waldbodenkalkung abzuleiten. Die Literaturstudie bezieht sich auf alle drei Themenbereiche der Synopse. Mit Hilfe einer Metaanalyse wurden die Literaturquellen ausgewertet und somit ein weiterer Erkenntnisgewinn neben den experimentellen Arbeiten erzielt. Diese Art der Literaturlauswertung geht damit über die im Rahmen von Doktorarbeiten durchgeführten Literaturstudien hinaus.

AP 4.2 Quantifizierung der Effekte der Waldbodenkalkung

AP 4.2.1 Kohlenstoffsequestrierung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollte der Frage nachgegangen werden, ob die Waldbodenkalkung die Kohlenstoffsequestrierung in Waldökosystemen nachhaltig steigern kann. Grundlage hierfür waren die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur ober- (AP 1.1) und unterirdischen Biomasse (AP 1.2) sowie zur Kohlenstoffspeicherung im Mineralboden (AP 1.3). Im Einzelnen wurden folgende Fragen zu diesem Komplex bearbeitet:

- (i) *Welchen Einfluss hat die Waldbodenkalkung mittel- bis langfristig auf die oberirdische Biomassenproduktion?*

Sowohl auf den Fichten- als auch auf den Buchenversuchsflächen ist der Zuwachs auf den gekalkten Parzellen größer als auf den ungekalkten. Auf den Fichtenversuchsflächen führt die Waldbodenkalkung langfristig zu einer Steigerung des Wachstums, auf den Buchenversuchsflächen bleibt das Wachstum auf den Kontrollparzellen hinter dem erwartbaren Zuwachs zurück und die Waldbodenkalkung stabilisiert das Wachstum auf dem zu erwartenden Niveau.

Auf die Biomasseproduktion der Kraut- und der Strauchschicht (bis 100 cm Höhe) hat die Waldbodenkalkung hingegen keinen signifikanten Einfluss. Die Biomasse der Moosschicht wird durch die Kalkung auf den Fichtenversuchsflächen signifikant reduziert, auf den Buchenversuchsflächen jedoch nicht verändert.

Die Hypothese, dass die Kohlenstoffsequestrierung in der oberirdischen Biomasse (sowohl in der krautigen Vegetation als auch im Baumbestand) als Folge der Waldbodenkalkung gesteigert wird, kann somit nur für den Baumbestand, nicht aber für die Bodenvegetation bestätigt werden.

(ii) *Welchen Einfluss hat die Waldbodenkalkung mittel- bis langfristig auf die unterirdische Biomassenproduktion?*

Die Feinwurzelbiomasse wurde durch die Waldbodenkalkung auf den Fichtenversuchsflächen nicht signifikant verändert, auf den Buchenversuchsflächen hat sie jedoch, entgegen der Erwartungen, signifikant abgenommen. Die Abnahme geht hauptsächlich auf Veränderungen in der Humusaufgabe zurück. Durch die kalkungsbedingt verbesserten bodenchemischen Eigenschaften ist die Nährstoffverfügbarkeit gesteigert und somit der Bedarf eines großen Feinwurzelsystems zur Erschließung limitierter Nährstoffvorräte verringert. Die Bäume investieren folglich verstärkt in die oberirdische anstelle der unterirdischen Biomasse.

Die Grobwurzelbiomasse wurde durch die Waldbodenkalkung auf den Fichtenversuchsflächen signifikant vergrößert, auf den Buchenversuchsflächen blieb sie jedoch gleich.

Die Hypothese, dass die Kohlenstoffsequestrierung in der unterirdischen Biomasse als Folge der Waldbodenkalkung gesteigert wird, kann so nicht bestätigt werden. Lediglich die Grobwurzelbiomasse auf den Fichtenversuchsflächen hat durch die Waldbodenkalkung zugenommen. Die Feinwurzelbiomasse auf den Buchenversuchsflächen hat hingegen durch die Waldbodenkalkung abgenommen.

(iii) *Welchen Einfluss hat Waldbodenkalkung auf die Kohlenstoffdynamik der Waldböden?*

Über das gesamte Bodenprofil (Humusaufgabe bis 60 cm Bodentiefe) betrachtet hatte die Waldbodenkalkung keinen Einfluss auf die Kohlenstoffvorräte. In der Humusaufgabe verringerte die Kalkung den Kohlenstoffvorrat allerdings signifikant, was eine Verringerung sowohl des Kohlenstoffgehalts als auch der Humustrockenmasse widerspiegelt. Die Fichten- und die Buchenversuchsflächen wiesen ähnliche Kohlenstoffverluste in der Humusaufgabe auf. Im Gegensatz zu den Fichtenversuchsflächen kam es auf den Buchenversuchsflächen zu einer signifikanten Zunahme des Kohlenstoffvorrats im Oberboden (0-5 cm).

Der kalkungsbedingt verringerte Kohlenstoffvorrat in der Humusaufgabe wurde weitgehend durch pH-Wertveränderungen getrieben. Entsprechend wiesen die Kalkungsmengen (Säureneutralisierungskapazität), die für die pH-Wertveränderungen verantwortlich sind, eine negative, lineare Beziehung zu den Kohlenstoffvorratsveränderungen auf, was darauf hindeutet, dass höhere Kalkungsmengen zu größeren Kohlenstoffverlusten führen.

Der Sandgehalt im oberen Mineralboden (0-5 cm) hatte einen deutlichen Einfluss auf die Veränderung der Kohlenstoffvorräte durch Kalkung. Während auf Standorten mit hohen Sandgehalten (> 50 %) eine Zunahme des Kohlenstoffvorrats zu beobachten war, zeigte sich auf Standorten mit geringen Sandgehalten (< 50 %) kaum eine Änderung des Kohlenstoffvorrats bzw. eine Abnahme in der Tiefenstufe 10-30 cm. Auf Standorten mit höheren Sandgehalten war allerdings in den Humushorizonten eine stärkere Abnahme der Kohlenstoffvorräte zu beobachten.

Die Veränderung des Kohlenstoffvorrats hing außerdem vom Kohlenstoffgehalt im oberen Mineralboden (0-5 cm) der Kontrollparzelle ab. Auf Versuchsflächen mit niedrigen Kohlenstoffgehalten auf der Kontrollparzelle (< 5,5 % in 0-5 cm) nahm der Kohlenstoffvorrat durch Kalkung zu, während er auf Flächen mit hohen Kohlenstoffgehalten auf der Kontrollparzelle (> 5,5 % in 0-5 cm) abnahm.

Auf einem Teil der Versuchsflächen sind die Kohlenstoffvorräte in verschiedenen Zeitintervallen zwischen 1990 und 2019 quantifiziert worden. In der Humusaufgabe nahmen die Kohlenstoffvorräte mit der Zeit zu, allerdings im L/O_r-Horizont der gekalkten Parzellen am wenigsten. Das führte zu einer signifikant geringeren jährlichen Zunahme der Kohlenstoffvorräte im L/O_r-Horizont auf den gekalkten im Vergleich zu den Kontrollparzellen. Schwierigkeiten bei der Trennung von Humusaufgabehorizonten könnten den zeitlichen Trend allerdings beeinflusst haben. Die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden haben sich weder auf den gekalkten noch auf den Kontrollparzellen mit der Zeit signifikant verändert.

Die Hypothese, dass in den ersten Jahren nach Kalkung der Abbau von Auflagehumus die Kohlenstoffbilanz dominiert, kann nur eingeschränkt bestätigt werden. Zwar waren die Kohlenstoffvorräte in der Humusaufgabe der gekalkten Parzellen geringer als der ungekalkten, aber auch auf den gekalkten Parzellen kam es im Laufe der Zeit zu einer Zunahme im Auflagehumus, wenn auch weniger ausgeprägt als auf den Kontrollparzellen. Der zweite Teil der Hypothese, dass langfristig der Umbau von Auflagehumus in Mineralbodenhumus und die Bildung von stabilen Calciumhumaten zu einer Steigerung der Kohlenstoffspeicherung im Waldboden führt, wird nur eingeschränkt durch die Ergebnisse unterstützt. Der Kalkungseffekt ist stark standortsabhängig, wobei der Sandgehalt und der Kohlenstoffgehalt im oberen Mineralboden der Kontrollparzelle eine wichtige Rolle zu spielen scheinen.

2. Verwertung

Mit dem Vorhaben wurden die Grundlagen geschaffen, um die Steuerung von Kalkungsmaßnahmen im Wald auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen basieren und auch Aspekte des Klimaschutzes und der Anpassung an den Klimawandel berücksichtigen zu können. Bezüglich der Beratung der forstlichen Praxis kommt dem Vorhaben nicht nur im Zuständigkeitsbereich der beteiligten Forstlichen Versuchsanstalten (FVA BW und NW-FVA) eine hohe Bedeutung zu; die Projektergebnisse werden auch in anderen Bundesländern als Orientierung bei den dort implementierten Programmen der Waldbodenkalkung Berücksichtigung finden. Darüber hinaus liefern die Ergebnisse unserer Arbeit Beiträge zur Vervollständigung / Präzisierung der nationalen Kohlenstoffinventare.

Im Rahmen der Ausarbeitung von Empfehlungen für Politik und Praxis werden einerseits Hinweise zur Steuerung der Waldbodenkalkung unter Berücksichtigung vor allem der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung gegeben, andererseits werden Leitfäden und Merkblätter zur Anwendung der Kalkung im Wald erstellt. Ferner wurden und werden die Ergebnisse auf einschlägigen Tagungen und Fortbildungsveranstaltungen, die von den forstlichen Versuchsanstalten durchgeführt werden, sowohl der wissenschaftlichen als auch der forstwirtschaftlichen Praxis bekannt gemacht. Daneben wurden und werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Öffentlichkeit in wissenschaftlichen und anderen Fachzeitschriften zugänglich gemacht.

Nicht zuletzt dienen die Versuchsfelder des beantragten Projekts als Forschungsplattform für weitere Fragestellungen bezüglich der Effekte der Waldbodenkalkung auf diverse Prozesse.

3. Erkenntnisse von Dritten

Während der Durchführung des Vorhabens sind unseres Wissens nach auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen keine wesentlichen Erkenntnisse erarbeitet worden.

4. Veröffentlichungen

Jansone L, von Wilpert K und Hartmann P. 2020. Natural recovery and liming effects in acidified forest soils in SW Germany. *Soil Systems* 4: 1-35.

Puhlmann H, Hartmann P, Mahlau L, von Wilpert K, Huber A, Moos J H, Jansone L und Drews L. 2021. Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung in den Wäldern Baden-Württembergs – Evaluierung der Umsetzung und der Wirksamkeit des Kalkungsprogramms in den Jahren 2010 bis 2019. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 104. 286 S.

Geplant:

Hartmann et al: Effects of forest liming on soil physical properties

van Straaten O, Kulp L, Zederer D P, Talkner U. Effects of forest liming on soil carbon sequestration in mature German forests

Talkner U, Mittelberg H, Schmidt M. Der Einfluss der Bodenschutzkalkung auf die Bodenvegetation in nord-westdeutschen Wäldern

Synopse und Literaturstudie in Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme

III. Literaturverzeichnis

- Aldinger, E., 1987: Elementgehalte im Boden und in Nadeln verschieden stark geschädigter Fichten-Tannen-Bestände auf Praxiskalkungsflächen im Bundsandstein-Schwarzwald. Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwig-Universität Freiburg.
- Andreae, H. & F. Jacob, 2018: Medizin für den Wald-(Boden): Forstliche Bodenschutzkalkung - Ein bundesdeutscher Überblick 2.0.
- Bárdossy, A., 2005: Mögliche Entwicklungen der Hochwasserextreme in den nächsten Jahrzehnten. Bd. 5 in: Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg (2005): Dezentraler Hochwasserschutz in kleinen bewaldeten Einzugsgebieten: Beiträge zum Kolloquium am.
- Beese, F.O. & K.J. Meiwes, 1995: 10 Jahre Waldkalkung - Stand und Perspektiven. Allgemeine Forstzeitschrift 17: 946–949.
- Block, J., M. Greve & G. Schüler, 2013: Ohne Kalkung keine nachhaltige Forstwirtschaft. Holz-Zentralblatt 361–362.
- Bolte, A., T. Rahmann, M. Kuhr, P. Pogoda, D. Murach & K. Gadow, 2004: Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). Plant and Soil 264: 1–11.
- Braun, S., C. Schindler, R. Volz & W. Flückiger, 2003: Forest damages by the storm 'Lothar' in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition. Water, Air, & Soil Pollution 142: 327–340.
- Eichhorn, J., 1992: Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen in Hessen. FORST UND HOLZ 47: 555–559.
- Ellenberg, H. & C. Leuschner, 2010: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Bd. 8104. Utb.
- Evers, J., I. Dammann, N. König, U. Paar, V. Stüber, A. Schulze, M. Schmidt, E. Schönfelder & J. Eichhorn, 2019: Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen. Göttingen University Press.
- Evers, J., I. Dammann, A. Noltensmeier & R.-V. Nagel, 2008: Auswirkungen von Bodenschutzkalkungen auf Buchenwälder (*Fagus sylvatica* L.). Beiträge aus der NW-FVA 3: 21–50.
- Gradowski, T. & S.C. Thomas, 2008: Responses of *Acer saccharum* canopy trees and saplings to P, K and lime additions under high N deposition. Tree Physiology 28: 173–185.
- Grüneberg, E., I. Schöning, W. Riek, D. Ziche & J. Evers, 2019: Carbon Stocks and Carbon Stock Changes in German Forest Soils. Bd. 237, S. 167–198 in: N. Wellbrock & A. Bolte (Hrsg.), Status and Dynamics of Forests in Germany. Cham: Springer International Publishing.
- Hug, R. & K. von Wilpert, 2001: Ansätze für ein Monitoring von klimarelevanten Spurengasflüssen an Level II-Standorten. Berichte Freiburger Forstliche Forschung 33: 157–166.
- Jentschke, G., M. Drexhage, H.-W. Fritz, E. Fritz, B. Schella, D.-H. Lee, F. Gruber, J. Heimann, M. Kuhr, J. Schmidt, S. Schmidt, R. Zimmermann & D.L. Godbold, 2001: Does soil acidity reduce subsoil rooting in Norway spruce (*Picea abies*)? Plant and Soil 237: 91–108.
- Johnson, K., F.N. Scatena & Y. Pan, 2010: Short- and long-term responses of total soil organic carbon to harvesting in a northern hardwood forest. Forest Ecology and Management 259: 1262–1267.
- Jonard, M., F. André, P. Giot, F. Weissen, R. Perre & Q. Ponette, 2010: Thirteen-year monitoring of liming and PK fertilization effects on tree vitality in Norway spruce and European beech stands. European Journal of Forest Research 129: 1203–1211.
- Kindler, R., J. Siemens, K. Kaiser, D.C. Walmsley, C. Bernhofer, N. Buchmann, P. Cellier, W. Eugster, G. Gleixner, T. Grünwald, A. Heim, A. Ibrom, S.K. Jones, M. Jones, K. Klumpp, W. Kutsch, K.S. Larsen, S. Lehuger, B. Loubet, R. McKenzie, E. Moors, B. Osborne, K. Pilegaard, C. Rebmann, M. Saunders, M.W.I. Schmidt, M. Schrupf, J. Seyfferth, U. Skiba, J.-F. Soussana, M.A. Sutton, C. Tefs, B. Vowinckel, M.J. Zeeman & M. Kaupenjohann, 2011: Dissolved carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance. Global Change Biology 17: 1167–1185.
- Lehmann, J. & M. Kleber, 2015: The contentious nature of soil organic matter. Nature 528: 60–68.
- Meiwes, K. J., P.K. Khanna & B. Ulrich, 1980: Retention of sulphate by an acid brown earth and its relationship with the atmospheric input of sulphur to forest vegetation. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 143: 402–411.
- Meiwes, Karl Josef, J. Ackermann, M. Mindrup & V. Stüber, 2011: GIS-gestützte Planung und Dokumentation von Bodenschutzkalkungen im Wald. AFZ-DerWald 21: 32–34.
- Meiwes, K.J., 1995: Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. Water, Air, & Soil Pollution 85: 143–152.
- Meiwes, K.J., Noltensmeier, Axel & Mindrup, M., 2013: Kalkungsversuche: Wirkung von oberflächiger Kalkung und Vollumbruch mit Kalkeinmischung auf Boden, Kultur und Jungbestand sowie auf das Feinwurzelnwachstum von Fichte. Jahrestagung der AFSV vom 11.-14.9.2013 im Solling.
- Mindrup, M., K.J. Meiwes & V. Wolters, 2001: Mikrobiologische Eigenschaften des Auflagehumus unter Douglasie und Kiefer in Nordwestdeutschland. FORST UND HOLZ 56: 363–365.

- Paar, U., J. Evers, I. Dammann, N. König, A. Schulze, M. Schmidt, E. Schönfelder, B. Scheler, T. Ullrich & J. Eichhorn, 2016: Waldbodenzustandsbericht für Hessen - Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). (Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 15). S. 466. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen.
- Paradelo, R., I. Virto & C. Chenu, 2015: Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202: 98–107.
- Schack-Kirchner, H. & E.E. Hildebrand, 1998: Changes in soil structure and aeration due to liming and acid irrigation. *Plant and Soil* 199: 167–176.
- Schäffer, J., V. Geißen, R. Hoch & K. v. Wilpert, 2001: Waldkalkung belebt Böden wieder. *Allgemeine Forstzeitschrift* 56: 1106–1109.
- Schüler, G., 1995: Waldkalkung als Bodenschutz. *Allgemeine Forstzeitschrift* 50: 430–433.
- Stocker, T., 2014: *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge university press.
- Thoms, C., M. Buresch, M. Mindrup, H. Sennhenn-Reulen, U. Talkner, J. Eichhorn, M. Greve, J. Hannemann, P. Hartmann, M. Haßdenteufel, L. Jansone, C. Krüger, W. Riek & A. Russ, 2018: Abschlussbericht des vom BMEL geförderten Modellvorhabens zur Förderung von „Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern“ S. 182. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
- Ulrich, B., 1986: Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105: 421–435.
- von Wilpert, K., D. Zirlwagen & M. Kohler, 2000: To what extent can silviculture enhance sustainability of forest sites under the immission regime in Central Europe? *Water, Air, & Soil Pollution* 122: 105–120.
- Wittich, W. & G. Mitscherlich, 1963: Düngungsversuche in älteren Beständen des Forstamtes Lutter am Barenberge. *Aus dem Walde* 6: 7–50.
- Wolters, V., K. Ekschmitt & G. Scholle, 1995: 10 Jahre Waldschutzkalkung-Wirkung auf Bodenorganismen und biologische Umsatzprozesse. *Allgemeine Forstzeitschrift* 17: 936–941.