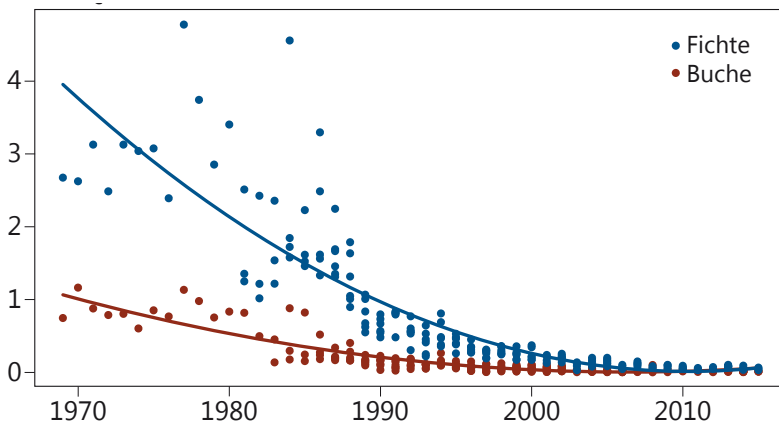


# Entwicklung der Bodenversauerung auf Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland

Nils König, Heike Fortmann, Henning Meesenburg und Egbert Schönfelder

Der Eintrag von Säure in die Waldökosysteme ist im Vergleich zu den 1970er und 1980er Jahren deutlich zurückgegangen. Dies zeigen die Säureeinträge (Protonen) in Fichten- und Buchenflächen des intensiven Monitorings der Länder Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (siehe Abb. unten). Die Einträge in die Fichtenbestände sind deutlich höher als die in die Buchenbestände.

Säureeintrag (Protonen)  $\text{kmol}_c/\text{ha}$



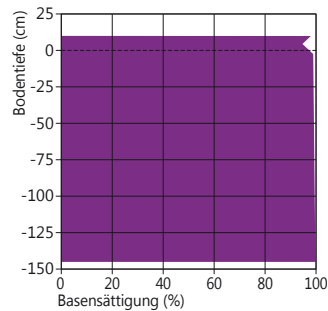
Säureeintrag (Protonen) mit der Kronentraufe auf Buchen- (rot) und Fichten- (blau) Monitoring-Flächen der NW-FVA seit 1968

Im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings der NW-FVA wurden in den letzten 50 Jahren auf 47 Flächen die Einträge von Nähr- und Schadstoffen sowie deren Austräge mit der Bodenlösung gemessen. Hierzu wurden Bodeninventuren durchgeführt und die Bodenproben hinsichtlich ihres Versauerungszustandes untersucht. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Wirkung und zum Verbleib der eingetragenen Säuren und die Wirkung von Kalkungsmaßnahmen werden im Folgenden dargestellt.

## Bodenversauerung

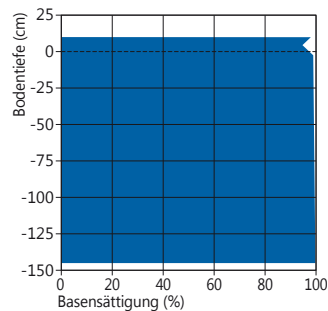
Um den Versauerungszustand von Böden zu beschreiben, werden verschiedene bodenchemische Indikatoren untersucht. Der pH-Wert in wässriger Bodensuspension ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ ) kennzeichnet den aktuellen Säurezustand, während der pH-Wert in Salzlösung ( $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ ) die potenzielle Versauerung widerspiegelt. Mit der Bestimmung der austauschbaren Kationenbasen Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium sowie den Kationensäuren Aluminium, Eisen, Mangan und Protonen können ebenfalls Aussagen zum Versauerungsgrad des Bodens gemacht werden. Dabei stellt das Verhältnis der basischen Kationen zur Gesamtsumme der austauschbaren Kationen (AK) die Basensättigung (BS) dar: je geringer die Basensättigung, desto höher ist der Versauerungsgrad. Bei einer Basensättigung unter 20 % besteht das Risiko, dass vermehrt toxische Aluminiumionen in die Bodenlösung abgegeben werden und dort Baumwurzeln und Mikroorganismen schädigen.

Die 47 Flächen des Intensiven Forstlichen Monitorings wurden zunächst auf Basis des Tiefenverlaufs der Basensättigung den fünf Versauerungs- bzw. Basensättigungstypen nach Kölling zugeordnet. Typ 1 beschreibt die Böden mit nahezu vollständiger Basensättigung über die gesamte Profiltiefe, zum Typ 5 gehören alle Flächen mit tiefgründiger Versauerung und einer Basensättigung unter 20 % über die gesamte Profiltiefe. Die Typen 2-4 beschreiben die fortschreitende Versauerung mit der Bodentiefe (siehe Abbildungen rechts).

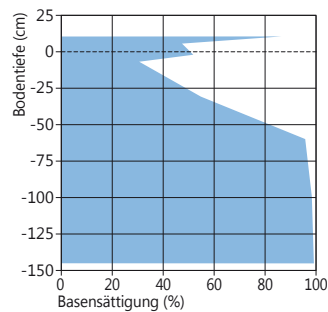


Versauerungstypen  
nach Kölling 1999, Kölling et al. 1996

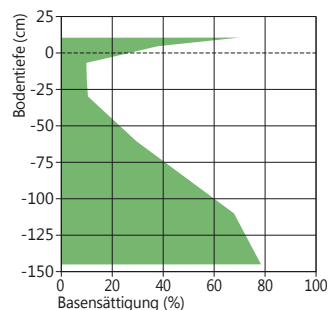
**sehr basenreich (Typ 1+)**  
Gleichmäßig hohe Basensättigung von > 80 % im gesamten Profil mit hohem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, keine Bodenversauerung



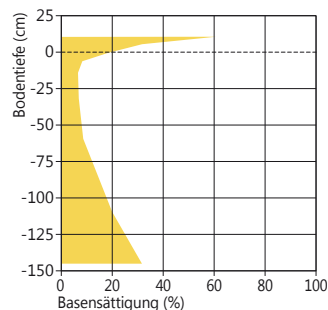
**sehr basenreich, geringes Kaliumangebot (Typ 1-)**  
Gleichmäßig hohe Basensättigung von > 80 % im gesamten Profil mit hohem Calcium-, Magnesium- und geringem Kaliumvorrat (< 400 kg/ha Kalium), keine Bodenversauerung



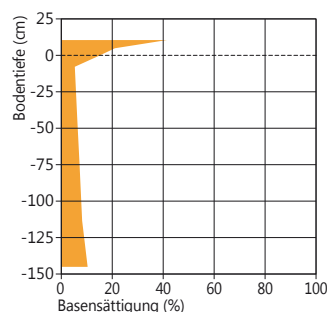
**basenreich (Typ 2)**  
Hohe Basensättigung mit hohem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, leichte Versauerung im Oberboden



**mittelbasisch (Typ 3)**  
Mittlere Basensättigung mit mittlerem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, stärkere Versauerung im Oberboden



**basenarm (Typ 4)**  
Geringe Basensättigung mit geringem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, tieferreichende Bodenversauerung, Anstieg der Basensättigung von > 20 % erst in 1 m Tiefe



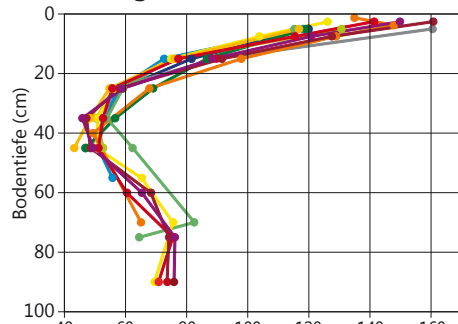
**sehr basenarm (Typ 5)**  
Gleichmäßig geringe Basensättigung von < 20 % mit geringem Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat, tiefreichende Bodenversauerung

# Entwicklung der Bodenversauerung auf Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland

Ordnet man die 47 Intensivmonitoringflächen diesen Versauerungstypen zu, so entfallen drei Flächen auf Typ 1, fünf Flächen auf Typ 2, sieben Flächen auf Typ 3, zwei Flächen auf Typ 4 und 30 Flächen auf Typ 5. Zehn dieser Flächen wurden ein- oder mehrmals gekalkt. Die 30 Intensivmonitoringflächen des Versauerungstyps 5 sind in der Regel basenarme Standorte mit geringer Austauschkapazität und gehören vorrangig den Substratgruppen unverlehmter Sand, schwach verlehmter Sand, Buntsandstein und Quarzit an. Ein typisches Beispiel ist die Fichtenfläche im Solling (SLF1, Südniedersachsen) mit übertragbaren Ergebnissen für Hessen.

Diese Fläche ist sehr homogen, was am sehr ähnlichen Verlauf der Austauschkapazität (Abb. rechts, oben links) mit der Bodentiefe zu den verschiedenen Beprobungszeitpunkten und -orten zu erkennen ist. Die Basensättigung (Abb. rechts, oben rechts) hat mit der Zeit über die gesamte Bodentiefe deutlich abgenommen und ist erst in den letzten Jahren wieder leicht angestiegen. Mit der Abnahme der Basensättigung verändert sich das chemische Bodenmilieu. Der Anteil von Aluminium an der Austauschkapazität nimmt zu, die Nährstoffe (u. a. Calcium, Magnesium) werden mit dem Sickerwasser ausgetragen und gehen dem Ökosystem verloren. Diese Entwicklung spiegelt sich in der Zunahme von austauschbarem Aluminium (Abb. rechts, Mitte links) und der Abnahme von austauschbarem Calcium (Abb. rechts, Mitte rechts) auf der Fichtenfläche im Solling (SLF1) wider.

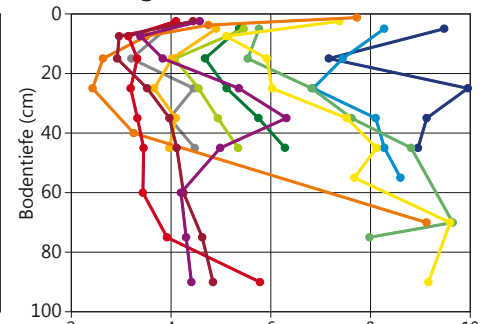
Austauschkapazität (mmol<sub>c</sub>/kg), Solling Fichte



Zeitliche Entwicklung der Austauschkapazität mit der Bodentiefe von 1968-2010

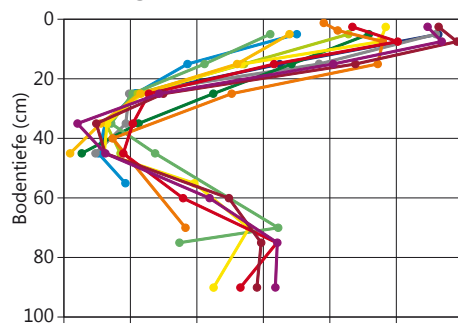
— 1968 — 1977 — 1981 — 1985 — 1990 — 2001  
— 1973 — 1979 — 1983 — 1987 — 1995 — 2010

Basensättigung (%), Solling Fichte



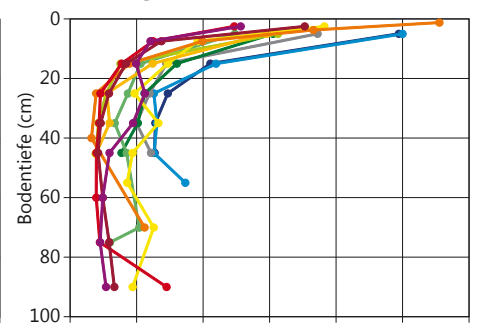
Zeitliche Entwicklung der Basensättigung mit der Bodentiefe von 1968-2010

Aluminium (mmol<sub>c</sub>/kg), Solling Fichte



Zeitliche Entwicklung des Gehalts an austauschbarem Aluminium mit der Bodentiefe von 1968-2010

Calcium (mmol<sub>c</sub>/kg), Solling Fichte



Zeitliche Entwicklung des Gehalts an austauschbarem Calcium mit der Bodentiefe von 1968-2010

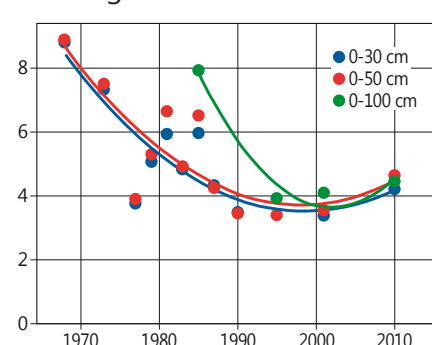
Noch deutlicher ist die Entwicklung der Basensättigung zu erkennen, wenn für verschiedene Bodentiefen (0-30 cm, 0-50 cm, 0-100 cm) die mittlere Basensättigung betrachtet wird (Abb. unten links). Eine Ursache für die Abnahme der Basensättigung ist der Verlust an austauschbarem Calcium, dessen Vorräte im Oberboden (0-50 cm) wie auch im Unterboden (50-100 cm) deutlich abgenommen haben. Seit etwa dem Jahr 2000 deutet sich ein Anstieg der Calciumvorräte im Oberboden an, während der Unterboden weiter an Calcium zu verarmen scheint (Abb. unten rechts).



Bodenprobenahme

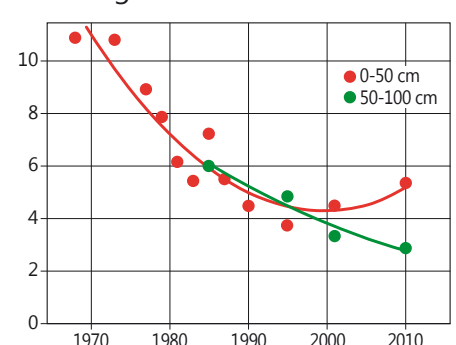
Foto: J. Evers

Mittlere Basensättigung (%), Solling Fichte



Veränderung der mittleren Basensättigung für die Bodentiefe 0-30, 0-50 und 0-100 cm

Calciumvorräte (kmol<sub>c</sub>/ha), Solling Fichte

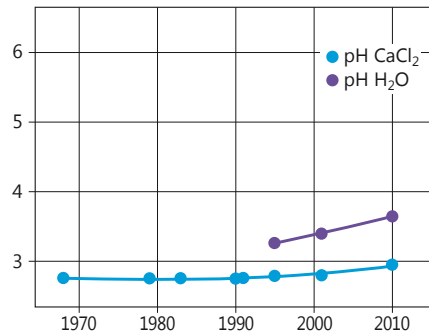


Veränderung der austauschbaren Calciumvorräte für die Bodentiefe 0-50 und 50-100 cm

# Entwicklung der Bodenversauerung auf Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland

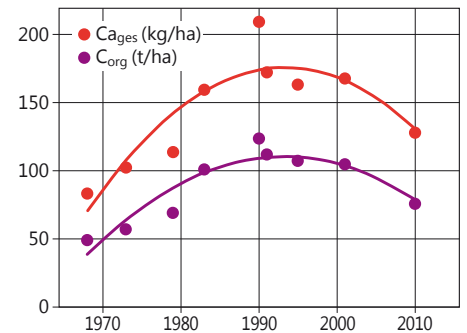
Im Auflagehumus ist der pH-Wert (H<sub>2</sub>O) im Zeitraum 1995-2010 angestiegen (Abb. links). Dies geht einher mit der Abnahme des Auflagehumusvorrats auf der Fläche, der in der Phase der Versauerung zugenommen hatte (Abb. rechts). Diese Ergebnisse sind in ähnlicher Form auch auf den übrigen Flächen des Versauerungstyps 5 festzustellen. Wegen der größeren Inhomogenität anderer Versuchsflächen sind die Tendenzen jedoch nicht immer so klar erkennbar oder es liegen nicht so lange Zeitreihen vor. Betrachtet man die 14 ungekalkten Flächen des Versauerungstyps 5 mit niedrigen Calciumvorräten, auf denen mehr als eine Inventur durchgeführt wurde, gemeinsam, so ergibt sich für eine Reihe von Flächen eine signifikante Abnahme des austauschbaren Calciumvorrates in den vergangenen Jahrzehnten seit 1966 im Oberboden (durchgezogene Linien in roten bis orangenen Farbtönen). Die Abnahme des austauschbaren Calciums im Mineralboden scheint im letzten Jahrzehnt gestoppt zu sein, auf einigen der Flächen ist sogar eine leichte Erholung zu erkennen (Abb. unten).

pH-Werte im Auflagehumus, Solling Fichte



Veränderung der pH-Werte im Auflagehumus in Wasser (H<sub>2</sub>O) und Calciumchlorid (CaCl<sub>2</sub>)

Calcium- und Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus, Solling Fichte



Veränderung der Calcium-Vorräte (Ca<sub>ges</sub>) und der Vorräte an organischem Kohlenstoff (C<sub>org</sub>) im Auflagehumus

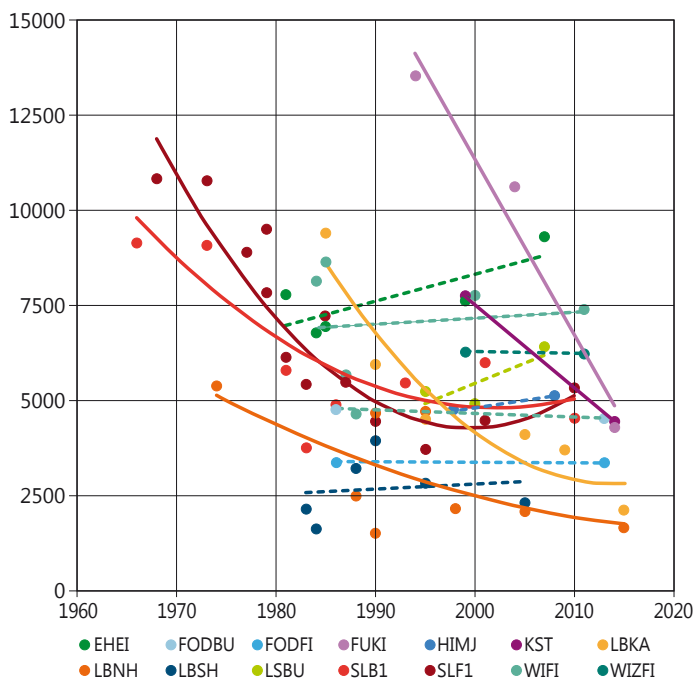
Bei vielen Flächen, deren Zeitreihen erst Mitte der 1980er Jahre oder noch später beginnen, ist in den letzten Jahrzehnten hingegen keine signifikante Veränderung zu erkennen.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass die Versauerung auf schwach versorgten Standorten bis um das Jahr 2000 fortgeschritten ist und erst nach dem drastischen Rückgang der Säureeinträge die Calciumverluste gestoppt wurden. Auf einigen Standorten scheint eine langsame Erholung der Calciumvorräte und damit auch der Basensättigung stattzufinden. Diese Entwicklung muss weiter beobachtet werden.

## Kalkung

Auf zehn Monitoringflächen wurden verschiedene Kalkungsmaßnahmen durchgeführt, um den Einfluss der Kalkung auf die Versauerungsindikatoren pH-Wert, Basensättigung, austauschbare Calciumvorräte u. a. zu untersuchen.

Calciumvorräte in 0-50 cm Bodentiefe (mol<sub>c</sub>/ha)



Veränderung der austauschbaren Calciumvorräte für die Bodentiefe 0-50 cm auf 14 Flächen des Versauerungstyps 5. Durchgezogene Linien: signifikante Veränderung. Gestrichelte Linien: keine signifikante Veränderung.

EHEI = Ehrhorn Eiche, FODBU= Fürth im Odenwald Buche, FODFI = Fürth im Odenwald Fichte, FUKI = Fuhrberg Kiefer, HIMJ = Hils Mulde jung Fichte, KST = Königstein Fichte, LBHN = Lange Bramke Nordhang Fichte, LBSH = Lange Bramke Südhang Fichte, LSBU = Lüss Buche, SLB1 = Solling Buche, SLF1 = Solling Fichte, WIF1 = Wingst Fichte, WIZFI = Witzenhausen Fichte



Bodenprobenahme

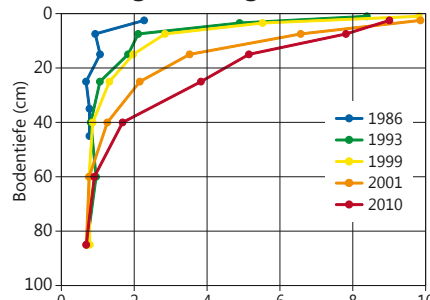
Foto: J. Evers

# Entwicklung der Bodenversauerung auf Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland

Am deutlichsten kann die Wirkung der Kalkung auf einer Buchenfläche im Solling belegt werden, die mit 30 t je Hektar gekalkt wurde. Innerhalb von 25 Jahren stieg die Basensättigung im Oberboden auf bis zu 90 % an und änderte sich bis in eine Bodentiefe von 60 cm (Abb. rechts). Der pH-Wert ( $\text{CaCl}_2$ ) stieg von 3,2 auf 5,4 in den obersten Zentimetern des Mineralbodens an (Abb. rechts). Damit einher gingen ein Abbau des Auflagehumus und eine Anreicherung von organischem Kohlenstoff im Oberboden.

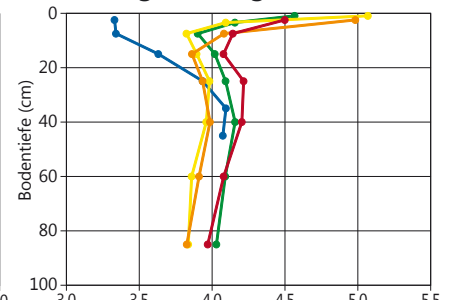
Zwar ist eine Kalkung mit 30 t je Hektar extrem; sie zeigt aber deutlich die Trends auf, die

Basensättigung (%), Solling Buche gekalkt



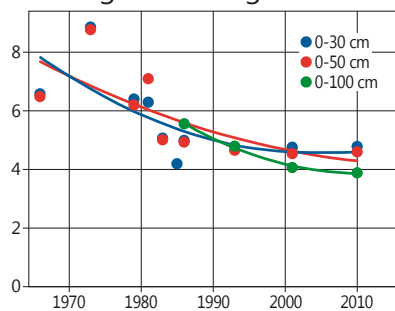
Verlauf der Basensättigung (BS) mit der Bodentiefe von 1986-2010, Kalkung: 30 t je Hektar

pH-Wert ( $\text{CaCl}_2$ ), Solling Buche gekalkt



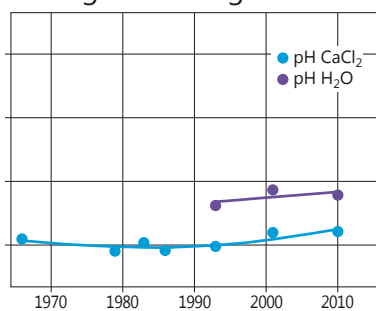
Verlauf des pH ( $\text{CaCl}_2$ )-Wertes mit der Bodentiefe von 1986-2010, Kalkung: 30 t je Hektar

Basensättigung (%), Solling Buche ungekalkt



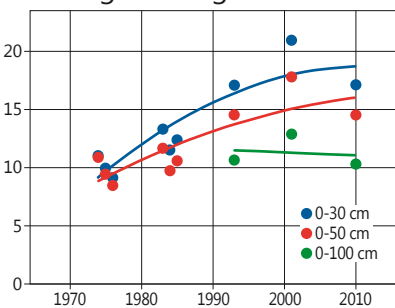
Veränderung der mittleren Basensättigung (BS) für die Bodentiefen 0-30, 0-50 und 0-100 cm

pH-Wert, Solling Buche ungekalkt



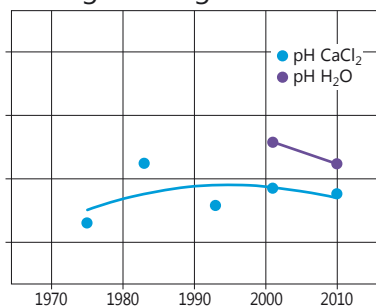
Veränderung der pH-Werte im Auflagehumus

Basensättigung (%), Solling Buche gekalkt



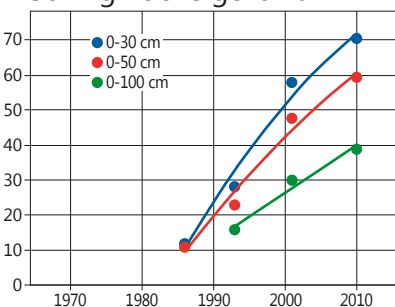
Veränderung der mittleren Basensättigung (BS) für die Bodentiefen 0-30, 0-50 und 0-100 cm, zweimal gekalkt mit je 4 t je Hektar

pH-Wert, Solling Buche gekalkt



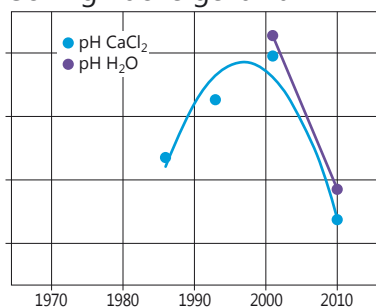
Veränderung der pH-Werte im Auflagehumus, zweimal gekalkt mit je 4 t je Hektar

Basensättigung (%), Solling Buche gekalkt



Veränderung der mittleren Basensättigung für die Bodentiefen 0-30, 0-50 und 0-100 cm, gekalkt mit 30 t je Hektar

pH-Wert, Solling Buche gekalkt



Veränderung der pH-Werte im Auflagehumus, gekalkt mit 30 t je Hektar

grundsätzlich auch bei geringeren Kalkmengen eintreten.

In den Abbildungen links sind die Entwicklungen der Basensättigung im Mineralbodenprofil und die des pH-Wertes im Auflagehumus auf drei Buchenflächen im Solling dargestellt. Die erste Fläche wurde nicht gekalkt, die zweite mit 2 x 4 t je Hektar und die dritte mit 30 t je Hektar. Es zeigt sich deutlich die Wirkung der Kalkung: die ungekalkte Fläche versauerte weiter und zeigt eine abnehmende Basensättigung auf unter 5 %, die sich erst in den letzten 10 Jahren mit leicht ansteigendem pH-Wert stabilisierte. Die mit 2 x 4 t je Hektar gekalkte Fläche zeigt eine leicht ansteigende Basensättigung auf bis zu 20 % im Oberboden und einen steigenden pH-Wert im Auflagehumus. 30 Jahre nach der letzten Kalkung scheinen jedoch beide Indikatoren wieder leicht abzunehmen. Die mit 30 t je Hektar gekalkte Fläche zeigt eine drastisch erhöhte Basensättigung bis in größere Bodentiefen. Der pH-Wert im Auflagehumus steigt zwischenzeitlich auf Werte um pH 6 an und hat nach 30 Jahren fast schon wieder den Ausgangszustand erreicht. Die Bodenschutzkalkung in den Partnerländern der NW-FVA wird in der Regel mit 3 t je Hektar durchgeführt, der Kalkungsturnus variiert. Die mit 2 x 4 t je Hektar gekalkte Fläche kommt von den Versuchsvarianten der Praxiskalkung am nächsten. Der Auflagehumusvorrat hat auf dieser Fläche abgenommen und ist auf der extrem gekalkten Fläche auf die Hälfte reduziert (ohne Abbildung).

Die Tiefenwirkung der Kalkung hängt stark vom Bodensubstrat ab. Auf sandigen Böden mit geringer Austauschkapazität wie der Eichenfläche GDEI in der Görhde ist nach 2-maliger Kalkung der austauschbare Calciumvorrat bis in 1 m Bodentiefe angestiegen und nimmt im Oberboden schon wieder ab (ohne Abbildung).

Insgesamt kann der Kalkung eine positive Wirkung in Bezug auf eine Rückführung der Bodenversauerung sowie einer Verlagerung des organischen Kohlenstoffs vom Auflagehumus in den oberen Mineralboden zugesprochen werden.