

Bleifrei? – Die Belastung der Böden Bayerns vor 25 Jahren und heute (LWF)

Alfred Schubert, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Zusammenfassung

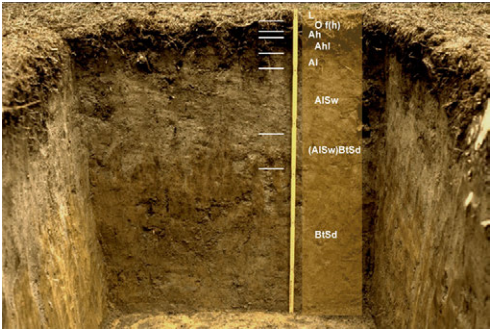
Es werden die unterschiedlichen Bleigehalte von bayerischen Waldböden und deren Veränderung innerhalb von fünfzehn Jahren zwischen Erst- und Zweitbeprobung anhand von vier ausgewählten Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) vorgestellt. Teilweise deutliche Veränderungen zeigen die organischen Auflagen der Waldböden. Diese sind im Zusammenhang mit den Bleigehalten der Blätter und Nadeln der Bäume auf den BDF zu sehen, die als Streu die organischen Auflagen der Waldböden aufbauen. Die zwanzigjährigen Zeitreihen der Blatt-Nadelgehalte von Blei zeigen auf den BDF deutliche Abnahmen, die sich auch in den organischen Auflagen der BDF widerspiegeln.

Bleigehalte von Waldböden

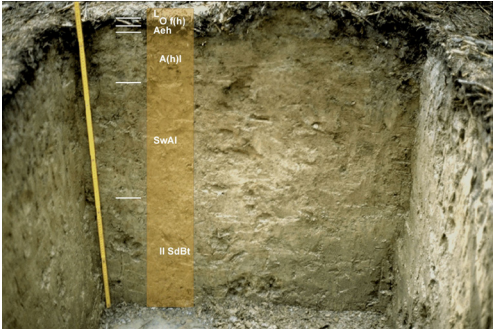
Exemplarisch für die 77 Wald-BDF der LWF werden im Folgenden vier BDF mit unterschiedlichen Standorts- und Immissionsbedingungen vorgestellt.

Einleitend werden beispielhaft drei BDF mit Fichtenbestand und den Humusformen Moder bis Rohhumus einander gegenüber gestellt. Dabei handelt es sich um die BDF Zusmarshausen, München und Fichtelberg. Die folgenden drei BDF-Steckbriefe charakterisieren diese in zusammengefasster Form.

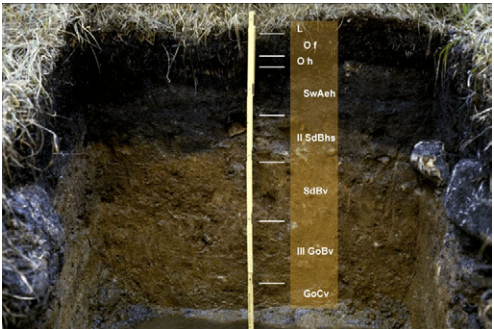
Tab. 1: Bodendauerbeobachtungsflächen-Steckbrief Zusmarshausen.

Forstamt : - Zusmarshausen	Waldort : - IX Scheppacher Forst, 28. Brunnengehau, b ²
Forstliches Wuchsgebiet : - WG 12 (Tertiäres Hügelland) - WB 7 (Mittelschwäbisches Schotterriedel - und Hügelland)	Relief : - Höhe ü. NN.: 525 m - Hangneigung: 2° - Hanglage: Oberhang - Exposition: Ost-Südost
Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur : - 7,5 °C	Mittlere Jahresniederschlagssumme : - 750 mm
Vegetation : - Hainsimsen - Buchenwald (Luzulo - Fagetum)	Bestand : - Fi-Bestand (38 jährig 1979)
 <p>Bodenprofil mit Horizontierung</p>	L, Of(h) (5 cm); Humusaufgabe aus Fi.- Streu Ah (2 cm); sehr stark humoser, schwach steiniger, stark toniger Schluff Ahl (5 cm); stark humoser, tonverarmter, schwach steiniger, stark toniger Schluff Al (5 cm); mittel humoser, tonverarmter, schwach steiniger, stark toniger Schluff AISw (25 cm); schwach humoser, tonverarmter, stauwasserleitender, schwach steiniger, stark toniger Schluff (AISw)BtSd (15 cm); tonreicher, teils wasserstauender, schwach steiniger, stark schluffiger Ton BtSd (50 cm +); tonreicher, wasserstauender, schwach steiniger, stark schluffiger Ton
Substrat : - Quartärer Lößlehm (,L) Standortseinheit : - Mäßig wechselfeuchter grauer Feinlehm, stark toniger Schluff (UT4) über stark schluffigem Ton (Tu4)	Bodentyp (KA 5) : - Parabraunerde - Pseudogley Bodentyp (FAO) : - Stagnic Lixisol Humusform : - Moder

Tab. 2: Bodendauerbeobachtungsflächen-Steckbrief München.

<p>Forstamt :</p> <ul style="list-style-type: none"> - München 	<p>Waldort :</p> <ul style="list-style-type: none"> - X Sauschütt, 3⁴
<p>Forstliches Wuchsgebiet :</p> <ul style="list-style-type: none"> - WG 13 (Schwäbisch - Bayerische Schotterplatten - und Altmoränenlandschaft) - WB 2 (Münchner Schotterebene) - TWB 1 (Südliche Münchner Schotterebene) 	<p>Relief :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Höhe ü. NN.: 605 m - Hangneigung: 0,5° - Hanglage: Ebene - Exposition: Nord-Nordwest
<p>Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 7 °C 	<p>Mittlere Jahresniederschlagssumme :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1100 mm
<p>Vegetation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hainsimsen - Buchenwald (Luzulo - Fagetum) 	<p>Bestand :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fi-Kie-Bestand (66 jährig 1972)
 <p>Bodenprofil mit Horizontierung</p>	<p>L, Of(h) (6 cm); Humusauflage aus Fi.- Streu</p> <p>Aeh (2 cm); sehr stark humoser, podsolierter, schwach steiniger, schluffiger Lehm</p> <p>A(h) (20 cm); mittel humoser, tonverarmter, schwach steiniger, stark toniger Schluff</p> <p>SwAl (40 cm); schwach humoser, tonverarmter, stauwasserleitender, schwach steiniger, stark toniger Schluff</p> <p>II SdBt (40 cm +); tonreicher, wasserstauender, schwach steiniger, mittel schluffiger Ton</p>
<p>Substrat :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Quartärer Lößlehm (,L) <p>Standortseinheit :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Frischer tiefgründiger Feinlehm, stark toniger Schluff (Ut4) über mittel schluffigem (Tu3) 	<p>Bodentyp (KA 5) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - schwach podsolige Pseudogley - Parabraunerde <p>Bodentyp (FAO) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stagnic Alisol <p>Humusform :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moder

Tab. 3: Bodendauerbeobachtungsflächen-Steckbrief Fichtelberg.

<p>Forstamt :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fichtelberg 	<p>Waldort :</p> <ul style="list-style-type: none"> - I Ochsenkopf, 21. Greinerschieb, ⁴
<p>Forstliches Wuchsgebiet :</p> <ul style="list-style-type: none"> - WG 8 (Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald) - WB 3 (Fichtelgebirge) 	<p>Relief :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Höhe ü. NN.: 941 m - Hangneigung: 20° - Hanglage: Oberhang - Exposition: Nordwest
<p>Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 5 °C 	<p>Mittlere Jahresniederschlagssumme :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1200 mm
<p>Vegetation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reitgras-Fichtenwald (Calamagrostio-Picetum) 	<p>Bestand :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fi-Bestand (38 jährig 1994)
 <p>Bodenprofil mit Horizontierung</p>	<p>L, Of, Oh (11 cm); Humusauflage aus Fi.- Streu</p> <p>SwAeh (15 cm); sehr stark humoser, podsolierter, stauwasserleitender, schwach steiniger, stark lehmiger Sand</p> <p>II SdBhs (15 cm); stark humoser, oxidreicher, wasserstauender, schwach steiniger, mittel lehmiger Sand</p> <p>SdBv (20 cm); schwach humoser, verbraunter, wasserstauender, schwach steiniger, mittel lehmiger Sand</p> <p>III GoBv (20 cm); schwach humoser, verbraunter, grundwasserbeeinflusster, oxidierter, mittel steiniger, mittel lehmiger Sand</p> <p>GoCv (10 cm +); sehr schwach humoser, grundwasserbeeinflusster, oxidierter, mittel steiniger, schwach lehmiger Sand</p>
<p>Substrat :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Variskischer Granit (G2) <p>Standortseinheit :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mäßig hangfeuchter, grusiger, stark lehmiger Sand (Sl4) über mittel lehmigem Sand (Sl3) 	<p>Bodentyp (KA 5) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - podsoliger Pseudogley-Hanggley <p>Bodentyp (FAO) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dystric Gleysol <p>Humusform :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rohhumus

In der folgenden Abbildung sind die drei BDF mit ihrem Tiefenprofil der Bleigehalte dargestellt. Die Abbildung zeigt die Werteverteilungen über die Bodentiefe, beginnend bei der Humusauflage bis zum Unterboden/Ausgangsgestein. Die Mittellinie bildet den Tiefengradienten der Medianwerte in den einzelnen Bodenhorizonten ab. Die Wertestreuungen in den einzelnen Horizonten sind als Boxplots dargestellt. Die Werte der ersten Bodenbeprobung sind blau, die der zweiten in grün abgebildet. Im Gegensatz zur zweiten Bodenprobenahme mit 18 Probenahmepunkten auf der Fläche mit einer Tiefe von in der Regel 1 Meter, wurden bei der ersten Probenahme 12 Probenahmepunkte auf der Fläche bis zu einer Tiefe von 30 Zentimeter beprobt und diese zu 4 Mischproben vereint. Die anschließenden Werte von 30 Zentimeter bis zu 1 Meter stammen vom Bodenprofil der BDF.

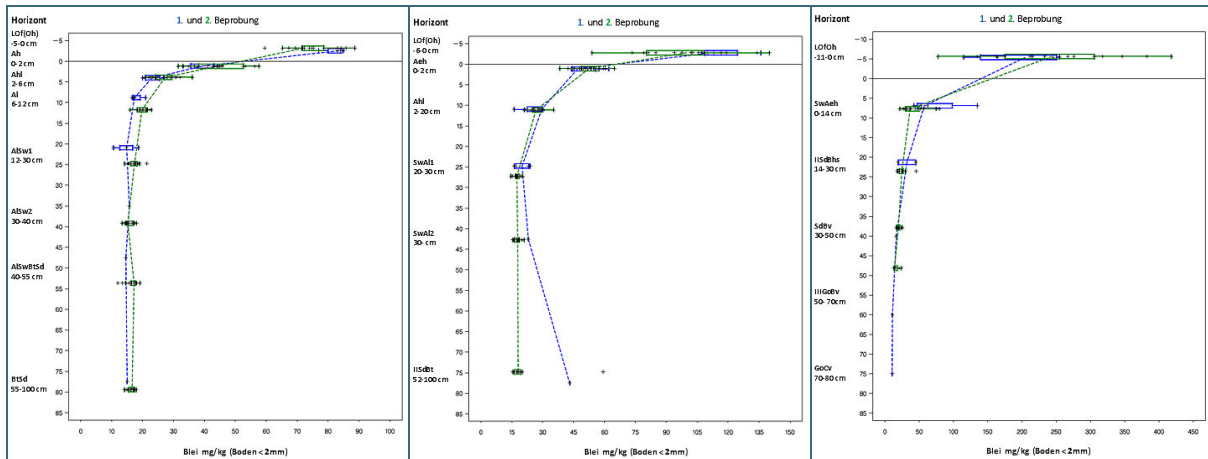


Abb. 1: Tiefengradienten der Bleigehalte über die Bodenhorizonte der BDF Zusmarshausen (links), München (Mitte), Fichtelberg (rechts). Blau sind die Werte der ersten, grün die der zweiten Beprobung abgebildet.

Der Vergleich der drei BDF zeigt erstens fast gleichlaufende Gradienten von hohen Gehalten in den organischen Auflagen und den humosen mineralischen Oberböden zu geringen Gehalten in den mineralischen Unterböden. Die hohen Gehalte im Bereich der Oberböden lassen sich nicht durch die Gehalte der geologischen Ausgangssubstrate erklären. Für die Gehalte der Oberböden können folglich nur Einträge, wahrscheinlich überwiegend aus der Atmosphäre verantwortlich gemacht werden. Das Blei gelangt direkt oder anhaftend an den Oberflächen der fallenden Nadeln auf den Boden.

Zweitens steigen in den Oberböden die Bleigehalte von Zusmarshausen über München nach Fichtelberg deutlich an. Auch die Mächtigkeit der Auflagen steigt in dieser Richtung an, verbunden mit einer Änderung der Humusform von Moder bei Zusmarshausen bis zum Rohhumus bei Fichtelberg.

Drittens zeichnen sich Veränderungen zwischen den beiden Probenahmeterminen in erster Linie in den organischen Auflagen ab, mit der Ausnahme des Unterbodenwerts der BDF München. Ob diese Werte der BDF München reell sind oder fehlerhafte Ausreißer, muss noch geprüft werden.

Im nächsten Schritt werden die Oberböden genauer betrachtet. Zu erkennen sind Ab- und Zunahmen der Bleigehalte in den Bodenhorizonten. Dafür können Eintragsänderungen, Verlagerungen, Probenahme- und Analyseeffekte verantwortlich sein. Die Zuordnung, bzw. der Ausschluss einzelner Effekte ist schwierig. Die Laboranalytik hat sich im Laufe des Untersuchungszeitraums stark gewandelt, dabei wurde allerdings streng darauf geachtet vergleichbare Methoden zu verwenden. Dieser Einfluss ist aber nicht ganz auszuschließen, spielt aber wahrscheinlich nur eine untergeordnete Rolle. Dagegen ist der Probenahmeeffekt gerade in Bodenbereichen mit starken Gehaltsänderungen eine nicht zu vernachlässigende Größe. Verdächtig sind in diesem Zusammenhang unterschiedlich mächtige Horizonte bei den jeweiligen Probenahmen. Die Effekte des Eintrags und der Verlagerung, die im Zentrum des Interesses liegen, sind daher nur schwer einzuschätzen, da sich alle Effekte überlagern können.

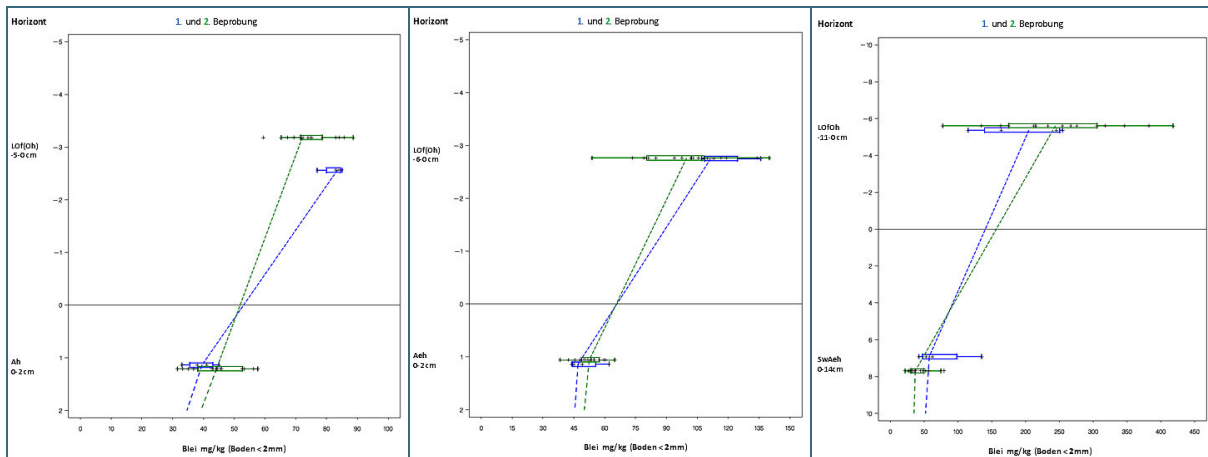


Abb. 2: Tiefengradienten der Bleigehalte im Oberbodenbereich der BDF Zusmarshausen (links), München (Mitte), Fichtelberg (rechts). Blau sind die Werte der ersten, grün die der zweiten Beprobung abgebildet.

Ungeachtet dieser Schwierigkeiten ist aber auffällig wie unterschiedlich die Bleigehalte in den Auflagen sind. Bei den BDF Zusmarshausen und München deutet sich eine mehr oder weniger deutliche Ab- bei der BDF Fichtelberg eine Zunahme an.

Hier ermöglicht die differenziertere Probenahme bei der ersten Wiederholungsbeprobung (siehe oben) sich auch die organische Auflage noch einmal näher zu betrachten.

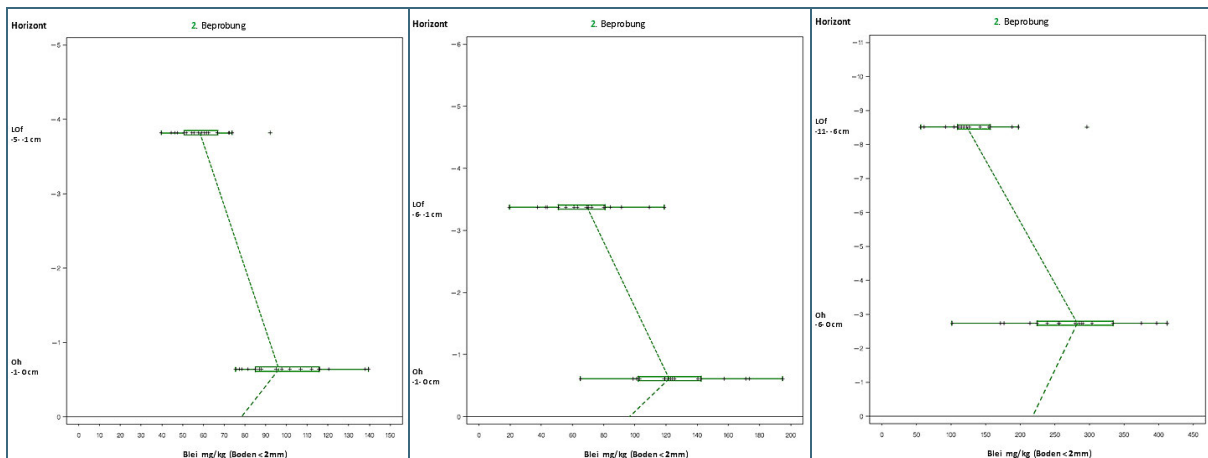


Abb. 3: Tiefengradienten der Bleigehalte in den organischen Auflagen der BDF Zusmarshausen (links), München (Mitte), Fichtelberg (rechts). Grün sind die Werte der zweiten Beprobung abgebildet.

Zu sehen ist die nahezu synchrone Zunahme von der L und Of Lage zur Oh Lage der organischen Auflage. Von dort nehmen die Bleigehalte zu den darunter liegenden Ah Horizonten ab. Die höchsten Bleigehalte der vorgestellten Böden finden sich somit in den Oh Lagen der organischen Auflagen. Dort ist das Blei angereichert und damit relativ fest an die organische Substanz gebunden. Das dürfte auch ein Aufkonzentrationseffekt durch den Abbau der organischen Substanz sein.

In der L und Of Lage wird die organische Streu der Nadeln vergleichsweise rasch abgebaut und landet danach in den darunter liegenden Horizonten, hier vor allem in der Oh Lage, die im Gegensatz dazu längere Zeiträume für den Abbau- und die Mineralisation benötigt. Die niedrigeren Bleigehalte können abgesehen von einer geringeren Aufkonzentration auch von abnehmenden Bleieinträgen her rühren. Das Verbot von Blei im Benzin und die dadurch zurückgehende Bleibelastung der Umwelt lässt diesen Schluss zu.

Das Messprogramm der Nadel- Blattgehalte von ausgewählten Bäumen auf den Wald-BDF der LWF kann hier weitere Informationen liefern. Abgebildet sind die mit einer Linie verbundenen Bleiwerte und als gestrichelte Gerade die gerechnete lineare Regression als Trend. Die Linien roter Farbe beziehen sich auf Nadelwerte des ersten Nadeljahrgangs. Die grünen Linien beziehen sich auf die Werte des dritten Nadeljahrgangs vom siebten Quirl des beprobten Baumes.

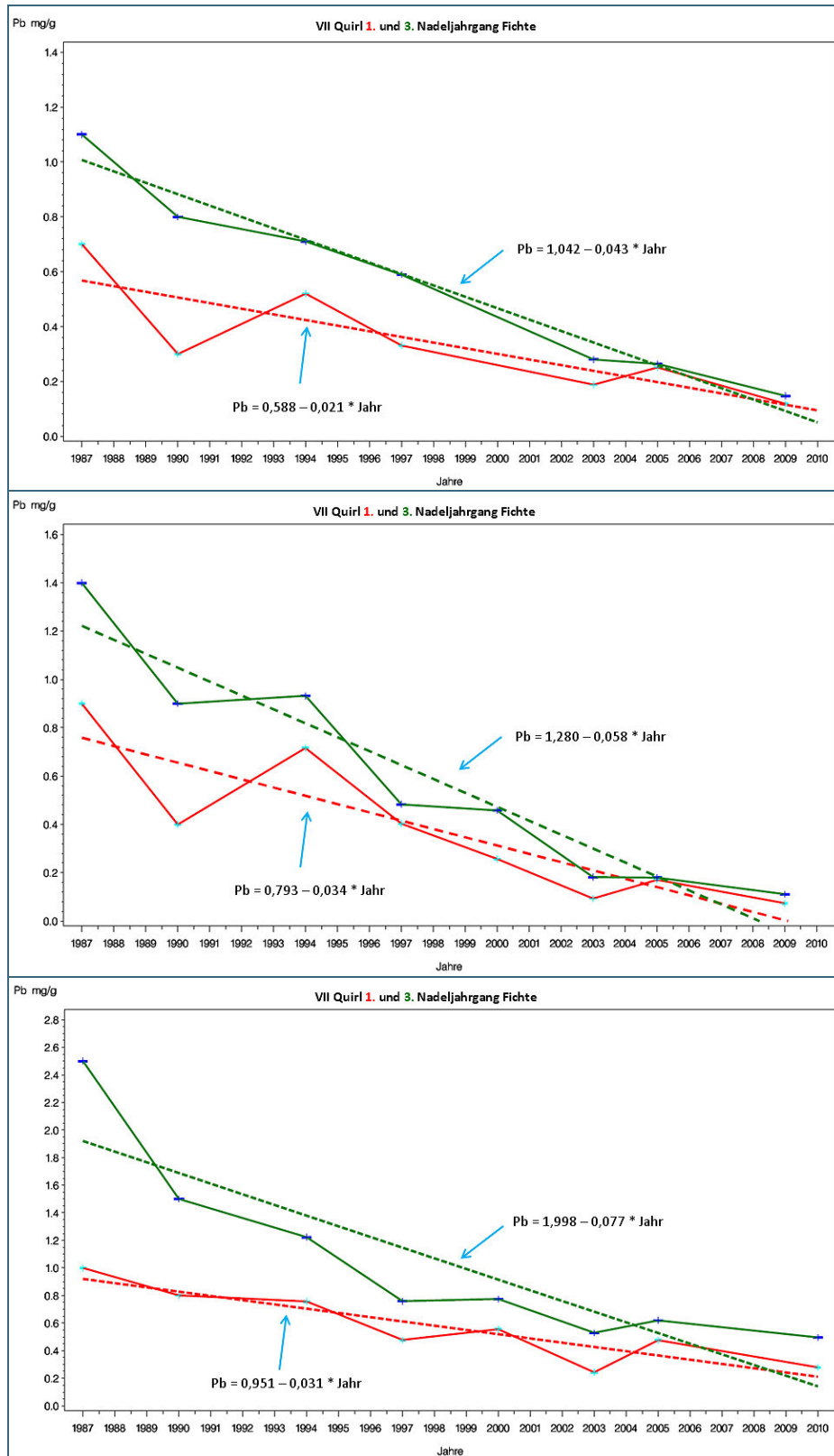


Abb. 4: Bleigehalte und Regressionswerte der Nadeln ausgewählter Bäume auf den BDF Zusmarshausen (oben), München (Mitte), Fichtelberg (unten) im Untersuchungszeitraum 1987 - 2010. Rot sind die Werte des ersten, grün die des dritten Nadeljahrgangs vom siebten Quirl des Baumes abgebildet.

Sehr deutlich ist die sehr ähnliche Abnahme der Bleigehalte der Nadeln der beprobten Bäume auf allen drei BDF ausgeprägt. Die Abnahme beim ersten Nadeljahrgang ist dabei auffallend geringer als beim dritten Nadeljahrgang. Mit zunehmendem Alter findet eine Aufkonzentration statt. Die drei BDF unterscheiden sich aber bei den Bleigehalten zum Startpunkt der Zeitreihe. Die Gehalte steigen von der BDF Zusmarshausen über die BDF München nach der BDF Fichtelberg an. Zum Ende des Untersuchungszeitraums gleichen sie sich jedoch weitgehend an. Nur bei der BDF Fichtelberg liegen sie noch etwas höher. In den letzten Jahren des Untersuchungszeitraumes nehmen die Werte auf niedrigem Niveau nur noch schwach ab, bzw. pendeln dort mit geringen Schwankungen.

Die Frage stellt sich, ob die gezeigten Beispiele einen allgemeinen Trend repräsentieren oder zufällig ähnliche Reaktionen zeigen. Einen Aufschluss dazu gibt die Auswertung der Bleigehalte aller 31 Wald-BDF mit beprobten Fichten.

Die Werte zeigen, dass der oben vorgestellte Trend sich auch in der Summe aller Fichten-BDF widerspiegelt. Deutlich wird auch die Schwankungsbreite der Bleigehalte in den einzelnen Jahren. Werte von z. B. Inventuren, die in geringer Zahl und in zeitlich größeren Abständen erhoben werden, können nur befriedigend interpretiert werden, wenn sie in derartige Zeitreihen eingebunden werden können.

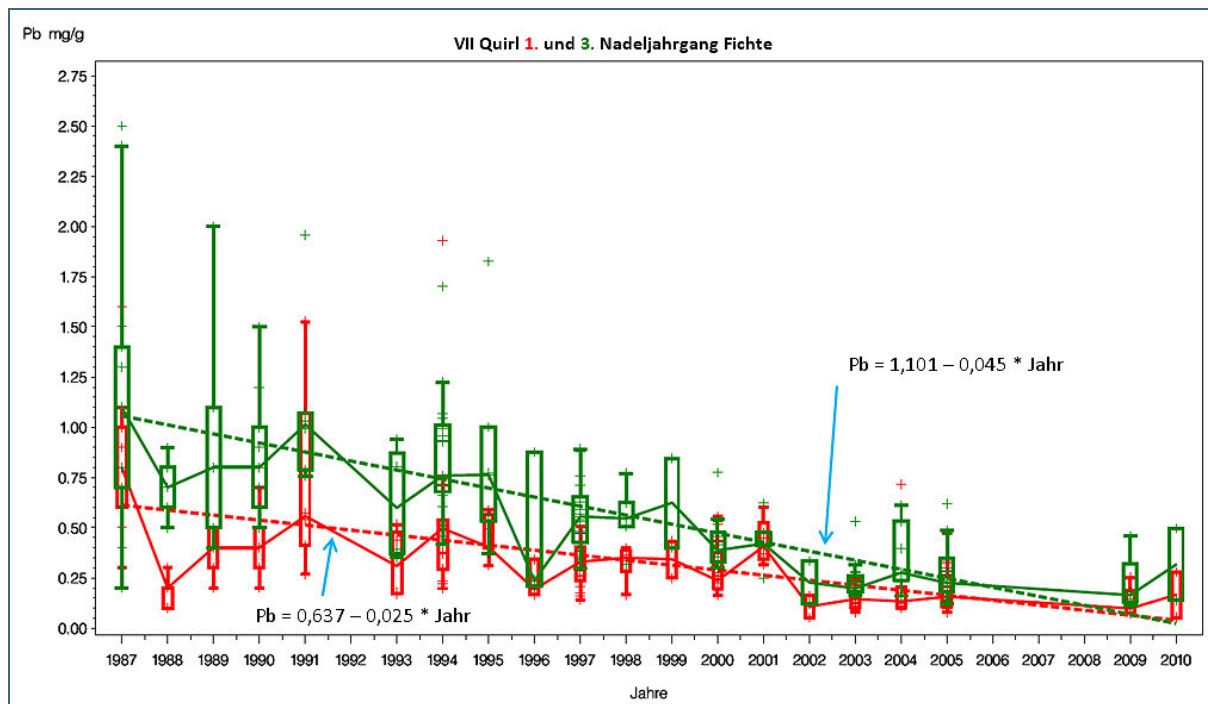


Abb. 5: Bleigehalte und Regressionswerte der Nadeln ausgewählter Bäume auf allen Wald-BDF mit Fichte im Untersuchungszeitraum 1987 - 2010. Rot sind die Werte des ersten, grün die des dritten Nadeljahrgangs vom siebten Quirl der Bäume abgebildet.

Die Größe und Gewichte der jährlich neu wachsenden Nadeln sind wie die Elementgehalte der Nadeln von einem Jahr zum anderen nicht konstant. Sie sind maßgeblich von Standortsfaktoren wie der Witterung und des Fruktifikationsverhaltens abhängig. Der Bezug der schwankenden Elementgehalte in den Nadeln zu den Nadelgewichten ermöglicht eine weiterreichende Interpretation der Ergebnisse, da Konzentrations- bzw. Verdünnungseffekte der Elemente in den Nadeln ersichtlich werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen werden die Bleigehalte in der folgenden Auswertung mit den 100-Nadelgewichten verrechnet.

Die Abnahme der Bleigehalte im Untersuchungszeitraum ist so massiv, dass die vorhandenen Konzentrationsschwankungen diesen Trend nur leicht modifizieren, aber nicht verändern können.

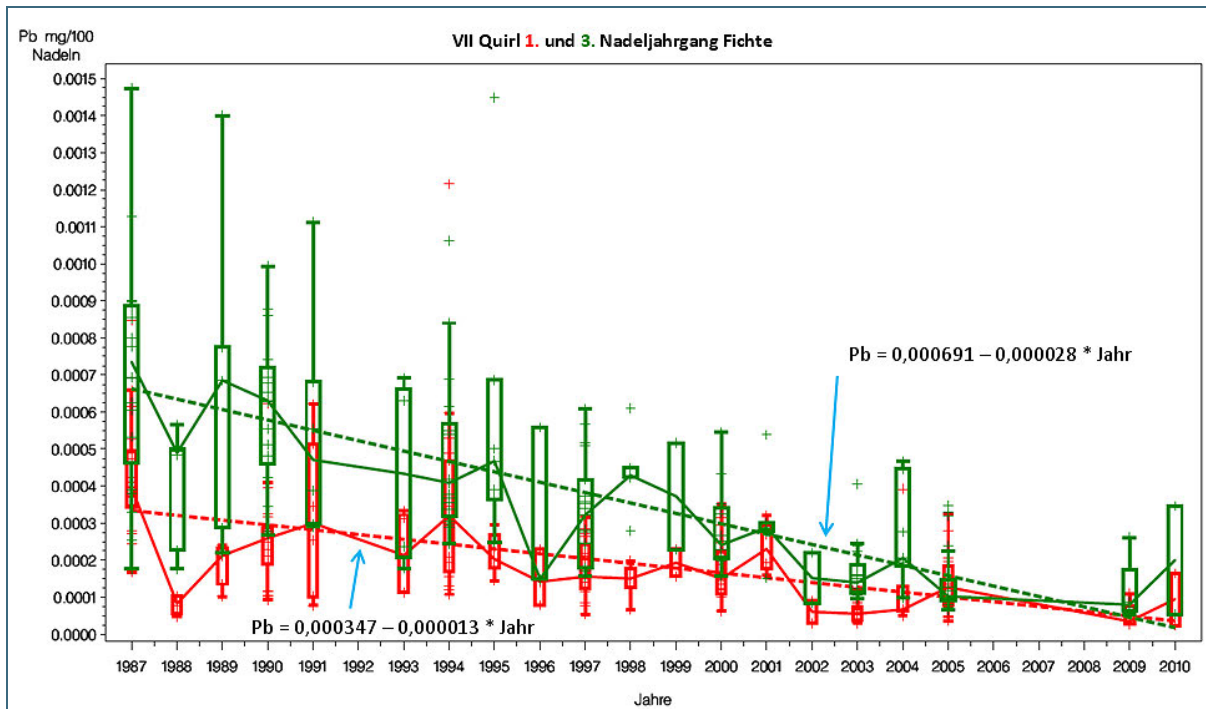


Abb. 6: Bleigehalte pro Gewicht von 100 Nadeln und Regressionswerte der Nadeln ausgewählter Bäume auf allen Wald-BDF mit Fichte im Untersuchungszeitraum 1987 - 2010. Rot sind die Werte des ersten, grün die des dritten Nadeljahrgangs vom siebten Quirl der Bäume abgebildet.

Abschließend stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob sich auf Wald-BDF mit Laubholzbestockung dieser deutliche Trend ebenfalls beobachten lässt. Dazu werden beispielhaft alle Daten von 12 BDF mit der Baumart Buche ausgewertet. Der jährliche Laubfall lässt hier keinen Vergleich mit älteren Jahrgängen zu. Möglich ist allerdings der Vergleich der Bleigehalte von Blättern aus der Lichtmit denen aus der Schattkrone.

Auch bei den Blättern der Buchen ist der Trend der Bleigehaltsabnahme vergleichbar deutlich ausgeprägt wie bei den Fichtennadeln. Die Gehalte der Blätter aus der Lichtkrone unterscheiden sich kaum von denen der Schattkrone. Auch der Bezug der Bleigehalte zu den 100 Blattgewichten zeigt vergleichbare Ergebnisse wie oben bei den Fichtennadeln dargestellt (nicht abgebildet).

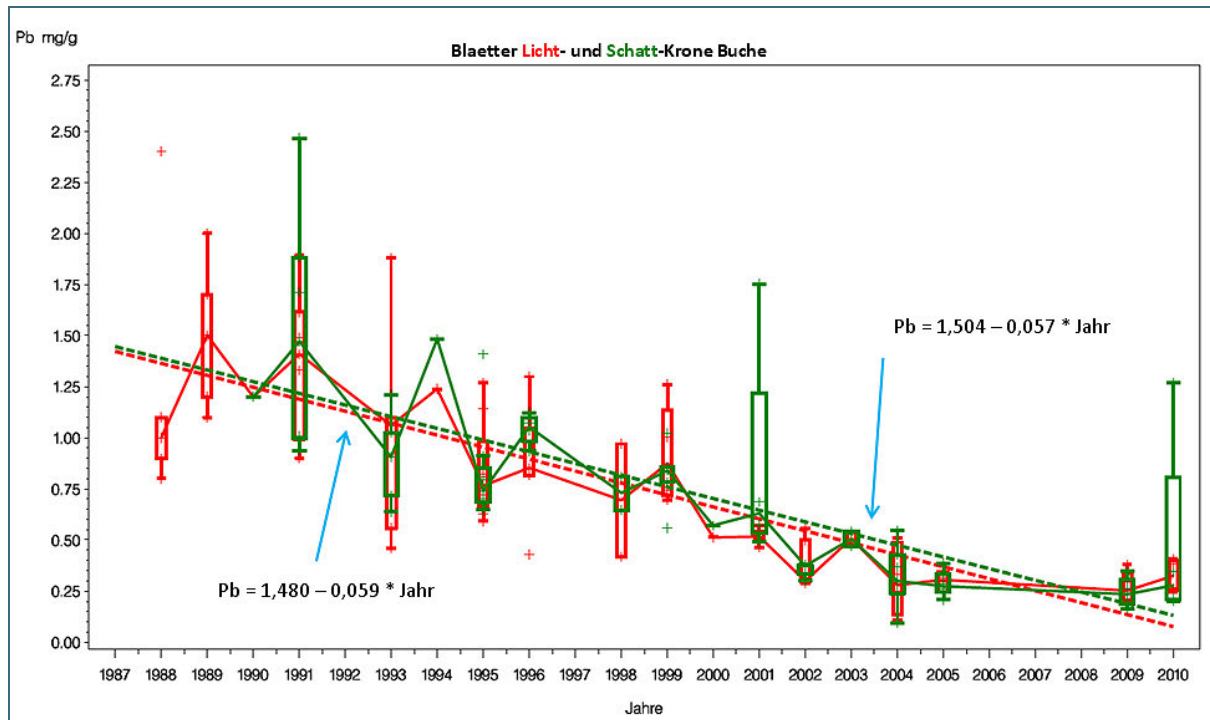
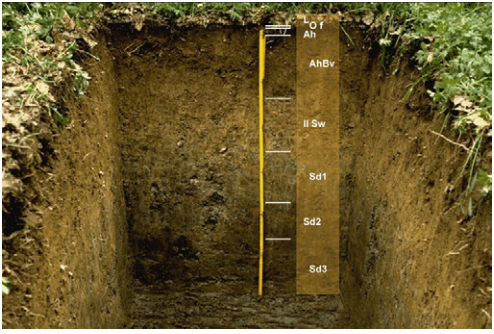


Abb. 7: Bleigehalte der Blätter ausgewählter Bäume auf allen Wald-BDF mit Buche im Untersuchungszeitraum 1987 - 2010. Rot sind die Werte der Blätter aus der Licht-, grün die der Blätter von der Schattkrone abgebildet.

Zusammenfassend zeigt diese Auswertung der Nadel-Blattgehalte, dass sich dieser Trend der Abnahme der Bleigehalte auch in den Bleigehalten der organischen Auflagen wiederfinden sollte. Damit ist der Rückgang der Bleigehalte in den Auflagehorizonten bei den Wald-BDF Zusmarshausen und München erklärbar. Die Verhältnisse der BDF Fichtelberg sind nicht so klar zu interpretieren. Hier macht sich die Bleigehaltsabnahme der jungen Streu noch nicht in der Gesamtauflage bemerkbar. Dafür ist im Wesentlichen die Humusform Rohhumus verantwortlich mit ihrer mächtigen Oh-Lage, in der die Gehalte immissionsbedingt aus der Vergangenheit sehr hoch sind.

Um das Bild abzurunden, wird abschließend im Vergleich zu den oben präsentierten BDF die Wald-BDF Dinkelsbühl mit Laubholzbestockung und der Humusform mullartiger Moder vorgestellt. Der Steckbrief der Fläche charakterisiert die BDF in komprimierter Form.

Tab.4: Bodendauerbeobachtungsflächen-Steckbrief Dinkelsbühl.

Forstamt : - Dinkelsbühl	Waldort : - XVIII Baudenhard, 6. Hühnerschlag, 99 ¹
Forstliches Wuchsgebiet : - WG 5 (Fränkischer Keuper und Albvorland) - WB 8 (Südliches Albvorland)	Relief : - Höhe ü. NN.: 445 m - Hangneigung: 6° - Hanglage: Mittelhang - Exposition: West-Südwest
Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur : - 7,5 °C	Mittlere Jahresniederschlagssumme : - 700 mm
Vegetation : - Waldlabkraut - Eichen - Hainbuchenwald (Galio sylvatici - Carpinetum betuli)	Bestand : - Ei-Bi-Hbu-Li-Bestand (118 jährig 1984)
	L, (Of) (1-2 cm); Humusauflage aus Ei.- Bir.- Hb.- Li.- Streu Ah (2 cm); sehr stark humoser, schwach steiniger, mittel schluffiger Ton AhBv (30 cm); mittel humoser, verbraunter, schwach steiniger, mittel schluffiger Ton II Sw (20 cm); sehr schwach humoser, stauwasserleitender, schwach steiniger, schwach schluffiger Ton Sd1 (20 cm); wasserstauender, schwach steiniger, schwach schluffiger Ton Sd2 (15 cm); wasserstauender, mittel steiniger, schwach schluffiger Ton Sd3 (20 cm +); wasserstauender, schwach steiniger, schwach schluffiger Ton
Substrat : - Lias (l) (Amaltheenton) Standortseinheit : - Wechselfeuchter Schichtlehm, mittel schluffiger Ton (Tu3) über schwach schluffigem Ton (Tu2)	Bodentyp (KA 4) : - Braunerde - Pseudogley Bodentyp (FAO) : - Stagni-Dystric Cambisol Humusform : - Mullartiger Moder

In der folgenden Abbildung ist das Tiefenprofil der Bleigehalte über alle Bodenhorizonte und daneben im Oberbodenbereich dargestellt.

Im Vergleich zu den drei oben beschriebenen Bodenprofilen von Zusmarshausen, München und Fichtelberg zeigen sich Ähnlichkeiten, aber auch deutliche Unterschiede. Ähnlich ist der Tiefenverlauf der Bleigehalte mit den höchsten Werten im Oberbodenbereich und abnehmenden Gehalten zum Unterboden hin. Allerdings finden sich hier die höchsten Bleiwerte im Ah Horizont, in der darüber liegenden organischen Auflage sind sie deutlich niedriger. Dies ist ein charakteristisches Merkmal der Humusformen Mull bis mullartiger Moder, bei denen im Auflagehorizont nur die Lagen L und geringmächtig die Lage Of anzutreffen sind. Die Oh Lage fehlt hier ganz, die bei den ersten drei BDF die höchsten Bleigehalte hatte. Der Ah Horizont tritt bei der BDF Dinkelsbühl an dessen Stelle. Der zweite Unterschied liegt bei den relativ hohen Bleigehalten in den unteren Bodenhorizonten. Das geologische Ausgangssubstrat der Bodenbildung, hier der Amaltheenton enthält vergleichsweise mehr Blei mit hoher Streuung der Werte in den einzelnen Horizonten.

Auffällig ist aber auch bei dieser BDF der Rückgang der Bleigehalte in der organischen Auflage auf vergleichsweise niedrigem Niveau. Die abnehmenden Bleigehalte der Laubstreu im Untersuchungszeitraum machen sich hier bemerkbar.

Auffallend sind zudem die deutlichen Gehaltsunterschiede in den mittleren und unteren Mineralbodenhorizonten zwischen den zwei Probenahmen. Eine plausible Erklärung welche Ursache innerhalb des Untersuchungszeitraumes dafür verantwortlich sein könnte fehlt derzeit noch. Eine Nachanalyse von Rückstellprobenmaterial der Erstbeprobung bringt hier vorrausichtlich die Antwort.

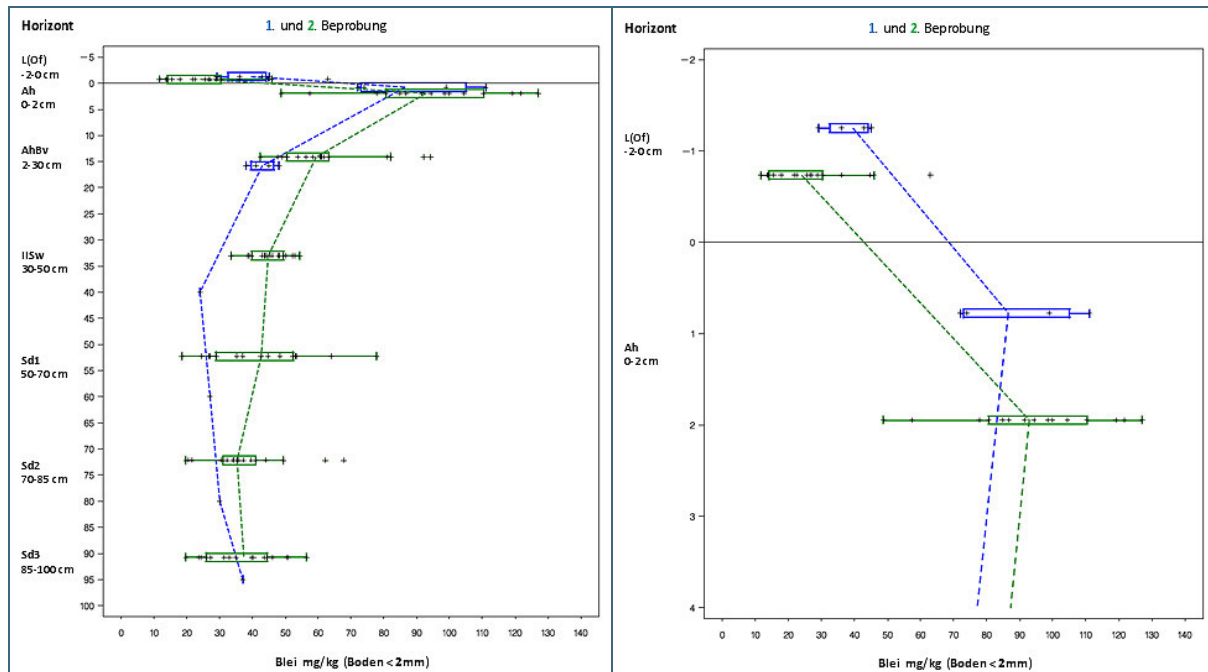


Abb. 8: Tiefengradienten der Bleigehalte im gesamten Bodenprofil (links) und im Oberbodenbereich (rechts) der BDF Dinkelsbühl. Blau sind die Werte der ersten, grün die der zweiten Beprobung abgebildet.

Die vier beispielhaft ausgewählten Wald-BDF Zusmarshausen, München Fichtelberg und Dinkelsbühl zeigen anhand der Bleigehalte von der Erst- und Zweitbeprobung einen mehr oder weniger deutlichen Trend einer Bleigehaltsabnahme in den organischen Auflagehorizonten. Diese korrespondieren mit den Bleigehaltsabnahmen der Nadel- und Laubstreu der aufstockenden Bäume der BDF. Die wesentliche Ursache hierfür ist auf die deutlich zurückgegangenen Bleieinträge nach dem Bleiverbot im Benzin zurückzuführen.

Die großen Unterschiede der Bleigehalte in den Oberböden der vier Wald-BDF geben auch Hinweise auf frühere und noch bestehende Belastungsgebiete in Bayern.

Schließlich werden hier auch die Unterschiede in den Bleigehalten der geologischen Ausgangssubstrate der Bodenbildung aufgezeigt. Diese haben aber dem Anschein nach nur sehr geringe Auswirkungen auf die markant höheren Bleigehalte in den Oberböden der BDF.

Literatur

SCHUBERT, A. (2002): Bayerische Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen. –Bodenuntersuchungen-. Forstliche Forschungsberichte, München 2002, Nr. 187, 232 S.

SCHUBERT, A. (2004): Bayerische Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen. –Nadel- Blattuntersuchungen-. Ergebnisse ausgewählter Nadel- und Blattuntersuchungen von Bayerischen Waldboden-Dauerbeobachtungs-Flächen. Materialien der LWF Nr. 10, Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising 2004, 74 S.

Bleifrei? – Die Bleibelastung der Böden Bayerns vor 25 Jahren und heute (LfU)

Walter Olbricht, Universität Bayreuth; Peter Spörlein, Bayerisches Landesamt für Umwelt

1 Einleitung und Problemstellung

Den Schwerpunkt der Bodendauerbeobachtung am LfU bilden die überwiegend 1986/1987 eingerichteten, sogenannten Basis-Bodendauerbeobachtungsflächen (Basis-BDF) auf Sonderstandorten (Naturschutz-, Wasserschutzgebiete, Ballungsräume).

Hauptziel der Bodendauerbeobachtung ist es, Veränderungen in unseren Böden zu detektieren.

Informationen zur Einrichtung und zur Grundinventur sowie zu ersten Auswertungsansätzen anhand von vier Beispielflächen finden sich in SCHILLING (1994) und SCHILLING (1997). Weitergehende Auswertungen finden sich darüber hinaus in SCHILLING et al. (2005).

Derzeit verfügt das LfU über 60 Basis-BDF, an denen bisher in ca. 10 jährigem Turnus eine Merkmalsdokumentation der Bodenmatrix, z. B. anhand der Gehalte organischer und anorganischer Schadstoffe erfolgte. Aus den 25 Jahren Bodendauerbeobachtung am LfU liegen demzufolge für nahezu alle Basis-BDF die Ergebnisse von zwei Beprobungen vor (siehe Abb. 1).

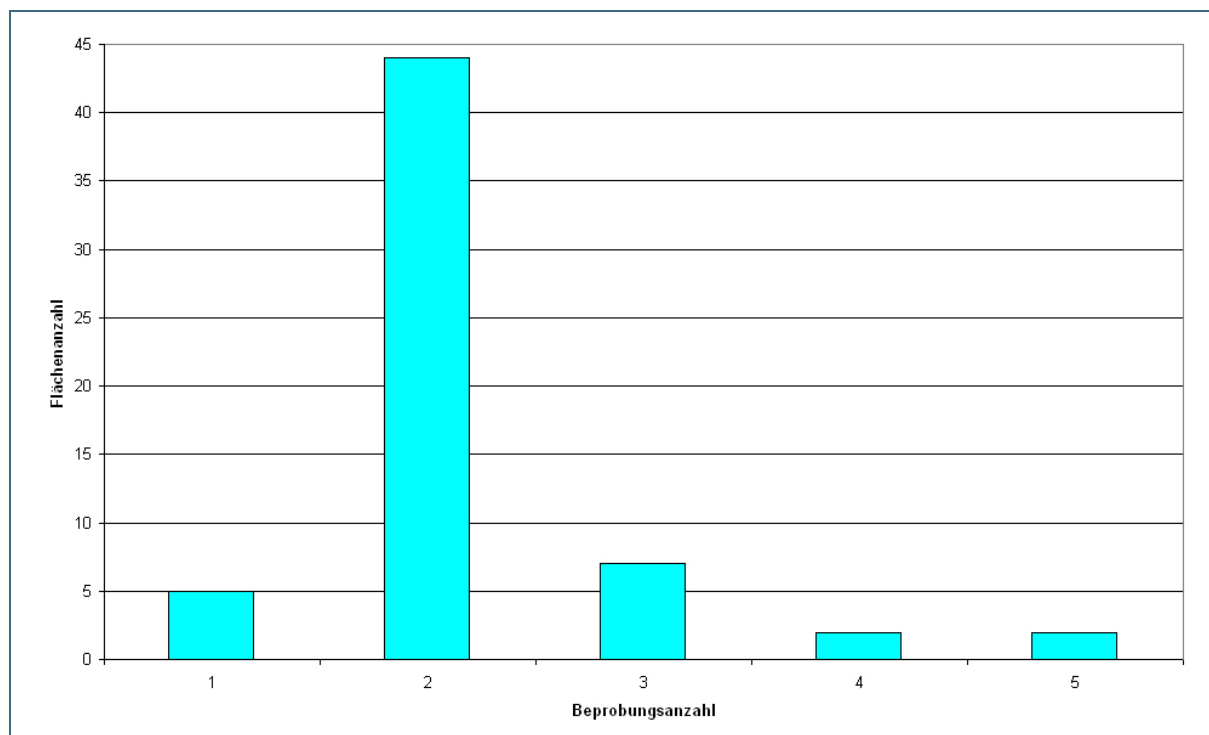


Abb. 1: Anzahl der vorliegenden Beprobungen pro Basis-BDF

Mit diesen zwei Punkten auf der Zeitachse lassen sich erste Trends allenfalls erahnen. Eine solide, verlässliche und vor allem flächenscharfe Trendanalyse ist aber noch nicht möglich, wie z.B. auch die Untersuchungen der Schweizerischen Nationalen Bodenbeobachtung (DESAULES et al., 2006) zeigen.

Ziel der folgenden Auswertungen ist es, trotz dieser noch „dünnen“ Datengrundlage bei den Basis-BDF anhand des Beispielparameters Blei geeignete statistische Auswertungsmethoden zu bestimmen

und damit Aussagen über Bleivorratsveränderungen in den letzten 25 Jahren und die zugrundeliegenden möglichen Einflussfaktoren zu treffen.

Da flächenscharfe Aussagen derzeit nicht möglich sind, erfolgt als erste Näherung eine Gesamtbeurteilung von erster und zweiter Probenahme über alle Flächen.

2 Material und Methoden

2.1 Probenahme

Die Bodenprobenahme erfolgte i. d. R. im Abstand von ca. 10 Jahren. Hierzu wurden nach einem bundeseinheitlichen Schema (BARTH et al., 2000) bis 30 cm Bodentiefe volumen- und horizontbezogen drei Mischproben entnommen. Weitere Details zur Probenahme finden sich in SCHILLING (1994). Die Erstbeprobung erfolgte vorrangig 1986/87, die Wiederholbeprobungen in verschiedenen Jahren.

2.2 Probenaufbereitung und Analytik

Nach Siebung < 2 mm wurden Proben bis 1992 auf ihre Bleikonzentrationen (mg/kg TS) im Totalaufschluss nach RUPPERT (1987), jüngere im Mikrowellenaufschluss (KLINGER, 2005) untersucht.

Nach KLINGER (2005) sind beide Methoden vergleichbar, so dass diese Änderung in der Aufschlussmethode keinen Bruch in den Daten herbeiführt.

2.3 Datenaufbereitung

Um Flächen hinsichtlich ihres Stoffbestands untereinander vergleichen zu können, ist die Heranziehung von reinen Konzentrationsangaben nicht ausreichend. Hierzu müssen Stoffvorräte verwendet werden, die die jeweiligen Mächtigkeiten und Lagerungsdichten berücksichtigen.

Die zugrundeliegenden Daten finden sich in Anhang 1, notwendige Berechnungen wurden wie folgt durchgeführt:

- a) Der Bleivorrat bis 30 cm Bodentiefe wurde nach Formel 1 berechnet.

Formel 1:

$$Pb\text{-Vorrat bis 30 cm [kg / ha]} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Pb\text{-Konzentration}_i \text{ [mg / kg TS]} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Trockenrohdichte}_i \text{ [g / cm}^3\text{]} \times \text{Mächtigkeit}_i \text{ [cm]} \times \frac{(100 - \text{Skelettgehalt}_i \text{ [%]})}{100}}{10}$$

- b) Die Bleivorratsänderung bis 30 cm Bodentiefe wurde nach Formel 2 bestimmt:

Formel 2:

$$Pb\text{-Vorratsänderung bis 30 cm [kg / ha]} = Pb\text{-Vorrat [kg / ha]}_{\text{Pr obenahmezeitpunkt 2}} - Pb\text{-Vorrat [kg / ha]}_{\text{Pr obenahmezeitpunkt 1}}$$

Als mögliche Einflussgrößen wurden folgende Parameter als unabhängige Variablen in die statistische Betrachtung einbezogen:

Gauß-Krüger-Koordinaten (Rechts-, Hochwert); Nutzung; Geländehöhe; Trockenheitsindex und Jahresdurchschnittstemperatur sowie durchschnittlicher Jahresniederschlag entsprechend dem Klimaatlas von Bayern nach KNOCH (1952); ökologischer Feuchtegrad (AG BODEN, 1994); pH-Wert (CaCl₂) nach DIN 19684-1; Bodenart (Sand-, Schluff-, und Tongehalt) nach DIN 19683-2; organischer Kohlenstoff (Elementaranalyse).

Die Berechnung des Kohlenstoffvorrats bis 30 cm Bodentiefe erfolgte entsprechend Formel 3.

Formel 3:

$$\text{Corg - Vorrat bis 30 cm [kg / ha]} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Corg - Konzentration}_i [\%] \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Trockenrohdichte}_i [\text{g / cm}^3] \times \text{Mächtigkeit}_i [\text{cm}] \times 1000 \times \frac{(100 - \text{Skelettgehalt}_i [\%])}{100}$$

Die Veränderung des Kohlenstoffvorrats bis 30 cm Bodentiefe wurde analog Formel 2 bestimmt.

Um die Bodenart und den pH-Wert berücksichtigen zu können, wurden diese beiden Parameter für die Betrachtungstiefe von 30 cm nach Formel 4 und Formel 5 berechnet:

Formel 4:

$$\text{Gehalt (Sand, Schluff, Ton) bis 30 cm [\%]} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Gehalt (Sand, Schluff, Ton)}_i [\%] \times \text{Mächtigkeit}_i [\text{cm}]}{\sum_{i=1}^n \text{Mächtigkeit}_i [\text{cm}]}$$

Formel 5:

$$\text{pH [-] bis 30 cm} = -\log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{-\text{pH}_j} [c \text{ H}_3\text{O}^+] \times \text{Mächtigkeit}_j [\text{cm}] \right)}{\sum_{i=1}^n \text{Mächtigkeit}_i [\text{cm}]} \right)$$

Die Veränderung des pH-Werts bis 30 cm Bodentiefe wurde analog Formel 2 bestimmt.

2.4 Statistik

Es geht vor allem darum, die Bleivorratsveränderung zu analysieren und zu den verschiedenen erhobenen potentiellen Einflussvariablen in Beziehung zu setzen. Problematisch ist dabei, dass einerseits die Daten außerordentlich komplex sind und viele wechselseitige Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Einflussvariablen bestehen und dass andererseits die Datenbasis sehr schmal (43 Flächen) und zudem noch unausgewogen (bei den Kohlenstoffdaten gibt es bei 18 Flächen keine Werte) ist.

Daher ist ein sehr vorsichtiges deskriptives und zudem weitgehend exploratives Vorgehen angezeigt. Hauptziel ist es dabei, Auffälligkeiten jeder Art hervortreten zu lassen und sicherzustellen, dass nichts Wesentliches übersehen wird. Das Vorgehen ähnelt in dieser Hinsicht einer medizinischen Generaluntersuchung (Check up) oder einem TÜV-Check bei einem Kraftfahrzeug. Auch dort geht es ja weniger darum, etwas schon Bekanntes endgültig zu bestätigen, sondern eben gerade durch möglichst viele Untersuchungen noch unbekannte Probleme zu finden bzw. deren Vorliegen auszuschließen. Entsprechend stehen hier weniger konfirmatorische statistische Methoden (Tests), sondern viel mehr explorative Techniken der Datenanalyse im Vordergrund.

Für die folgenden statistischen Betrachtungen wurden die Programme S-PLUS 2000 und IBM SPSS Statistics 19 verwendet.

2.4.1 Datengrundlage

2.4.1.1 Bereinigung

Aufgrund der abzuarbeitenden Gesamtflächenzahl sowie begrenzter Probenahme- und Analysekapazitäten fanden die Wiederholungsbeprobungen in verschiedenen Jahren also zu höchst unterschiedlichen Zeitpunkten (siehe Anhang 1) statt.

Um einheitliche Probenahmezeitpunkte und damit identische Zeiträume zwischen den Probenahmen zu erhalten, bietet es sich an, die Zeitpunkte via Kalibrierungskurven zu normieren.

Wie Abb. 1 zeigt, liegen bei je zwei Flächen vier bzw. fünf Beprobungen vor, die als mögliche Kalibrierungsstandorte herangezogen werden könnten. Aufgrund der geringen Flächenanzahl und der sehr divergierend verlaufenden Vorratskurven, lassen sich diese dahingehend aber nicht nutzen.

Um trotzdem einigermaßen vergleichbare Differenzen zu erhalten, wurde die ursprüngliche Datengrundlage (n = 52 Flächen; 60 Flächen abzüglich fünf bis dato nur einmal beprobter und drei, von denen keine vollständigen Bleianalysen vorlagen) wie folgt eingeschränkt (siehe Anhang 1):

a) Zwischen erstem und zweitem Wert sollen 10 bis einschließlich 15 Jahre liegen, wobei die Startwerte auf die Jahre 1986/1987 beschränkt sind. Dadurch entfallen sechs Flächen (Ifd. Nr.: 35, 46, 49-52).

b) Falls ein dritter Messwert zeitlich besser liegt als der (echte) zweite und somit das Kriterium a erfüllt, wird dieser dritte verwendet (Ifd. Nr.: 4, 7, 15).

c) Eine erste Übersicht über die Daten zeigt darüber hinaus, dass einige Datenpunkte hinsichtlich der Werte für die Probenahme 1 und 2 (Pb1, Pb2 in Anhang 1) und der Vorratsänderung (Delta_Pb in Anhang 1) völlig aus dem Rahmen fallen. Da dies die Ergebnisse stark verzerren könnte, wurden drei weitere Flächen für die statistische Auswertung außer Betracht gelassen (Ifd. Nr.: 10, 11, 48).

2.4.1.2 2.4.1.2 Klassifizierung

Die interessierende abhängige Variable ist die Veränderung des Bleivorrats (Delta_Pb). Die unabhängigen Variablen lassen sich in zwei Gruppen zusammenfassen:

(1) Geographische Variablen (Rechtswert, Hochwert, Höhe)

Diese wirken vornehmlich über die geographische Position ein.

(2) Physikalische Variablen (Nutzung, Trockenheitsindex, Jahresdurchschnittstemperatur, Jahresdurchschnittsniederschlag, oekologischer_Feuchtegrad, Kohlenstoff- und pH-Werte der Probenahme 1 und 2 (Corg1, Corg2; pH1, pH2), Bodenart (Sand, Schluff, Ton) und die Bleivorräte der Probenahme 1 (Pb1)

Diese wirken möglicherweise durch ihren physikalischen Beitrag.

Natürlich sind alle Variablen stark miteinander verbunden, so dass sich ihre Auswirkungen weder innerhalb noch zwischen den obengenannten Gruppen wirklich trennen lassen werden.

Wir werden im Folgenden untersuchen, wie diese Variablen sich auf die Bleivorratsveränderung auswirken.

2.4.2 Analysemethoden

2.4.2.1 Bleivorratsänderung

2.4.2.1.1 Deskriptive Statistik

Als Einstieg in die statistische Datenanalyse wurden für die Vorratsänderungen (Delta_Pb) folgende deskriptive Parameter berechnet: Anzahl, Minimum, Maximum, Mittelwert, Median, Standardabweichung, oberes und unteres Quartil.

Darüber hinaus erfolgte die Darstellung der Vorratsänderungen als Boxplot.

2.4.2.1.2 Wilcoxon-Vorzeichenrangtest und t-Test

Als statistische Testverfahren für die Analyse der Vorratsänderungen wurden flankierend auch der einseitige t-Test und der einseitige Wilcoxon-Vorzeichenrangtest herangezogen.

Diese beiden Tests dienen hier zur Prüfung des Symmetriezentrums einer Verteilung, wobei der t-Test annähernd eine Normalverteilung voraus setzt, während der Wilcoxon-Vorzeichenrangtest auch bei verteilungsunabhängigen Stichproben verwendet werden kann (SACHS, 1992).

2.4.2.2 Einflussgrößen der Bleivorratsänderung

2.4.2.2.1 Scatterplotmatrix

Eine einfache graphische Betrachtung von Bleivorratsänderung und unabhängigen Variablen via Scatterplot (Streudiagramm) ermöglicht es, einen ersten Eindruck von eventuell vorhandenen Einflüssen zu gewinnen. Werden mehrere Scatterplots zusammen dargestellt, entsteht eine Scatterplotmatrix. Die Plots unterhalb der mit den Variablen beschrifteten Diagonale sind die in den Achsen gespiegelten Scatterplots oberhalb dieser Diagonale. Durch interaktives Hervorheben einzelner Datenpunktgruppen während einer Datenanalyse am Computer (sogenanntes Brushing) kann man gut die Beziehungen zwischen den Variablen erforschen. Als Beispiel werden weiter unten einige Ausschnitte einer solchen Computersitzung gezeigt.

2.4.2.2.2 Regressionsbaum

Insbesondere bei vielen unabhängigen Variablen (Einflussfaktoren) können Regressionsbäume eine Hilfe zur Auswahl der relevantesten sein. Diese Technik wird weiter unten an einem konkreten Beispiel erläutert (vgl. Kapitel 3.2.1.). Genaueres findet man etwa in BREIMAN et al. (1984).

Regressionsbäume können wichtige Fingerzeige geben, dürfen in ihrer Aussagekraft aber keinesfalls überschätzt werden, da sie stark von verschiedenen Einstellungsparametern (z.B. Knotenzahl, -reinheit, Aufsplittungskriterium) abhängen können. Hier werden sie lediglich als Hilfsmittel zum Aufspüren relevanter Einflussgrößen eingesetzt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Bleivorratsänderungen

Die deskriptive Statistik der Bleivorratsänderungen listet Tabelle 1 auf.

Kennzahl	Wert
Minimum	-20.46
Unteres Quartil	-2.65
Mittel	1.90
Median	0.28
Oberes Quartil	7.99
Maximum	25.70
Anzahl	43
Standardabweichung	9.40

Tab 1:
Deskriptive Statistik der Bleivorratsänderungen (Delta_Pb [kg/ha])

Den Boxplot der Bleivorratsänderungen stellt Abbildung 2 dar.

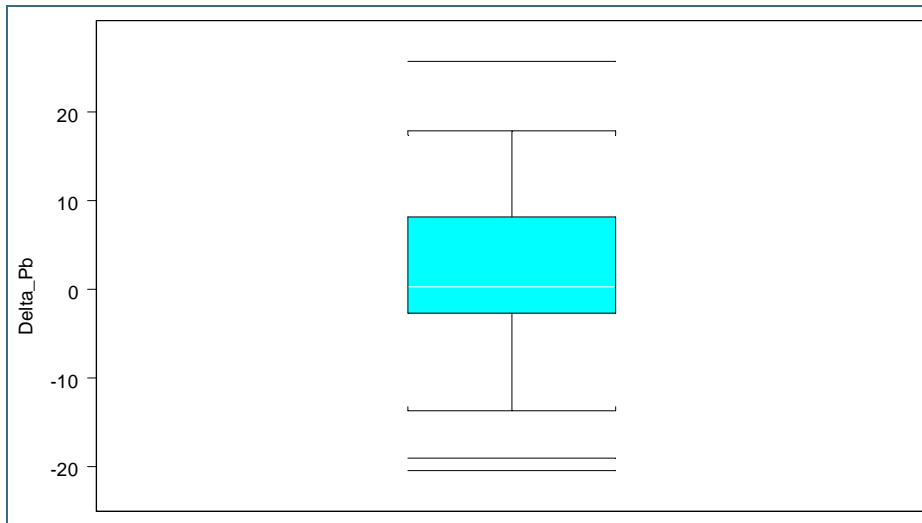


Abb. 2:
Boxplot der Bleivorratsänderungen
(Delta_Pb [kg/ha])

Testet man die Nullhypothese, dass der Median bzw. der Mittelwert 0 ist, so liefert der einseitige Wilcoxon-Vorzeichenrangtest einen P-Wert von 0.17 und der einseitige t-Test einen P-Wert von 0.096, was zwar nicht signifikant ist, aber eine Tendenz andeutet (auf dem 10 %-Niveau). Insgesamt haben also die Bleivorräte in der betrachteten Bodentiefe bis 30 cm tendenziell nicht ab-, sondern wohl eher zugenommen. Eine dramatische Änderung liegt aber nicht vor.

3.2 Einflussgrößen der Bleivorratsänderung

3.2.1 Vorstudie anhand der geographischen Variablen

Abbildung 3 stellt die Scatterplotmatrix der geographischen Variablen dar.

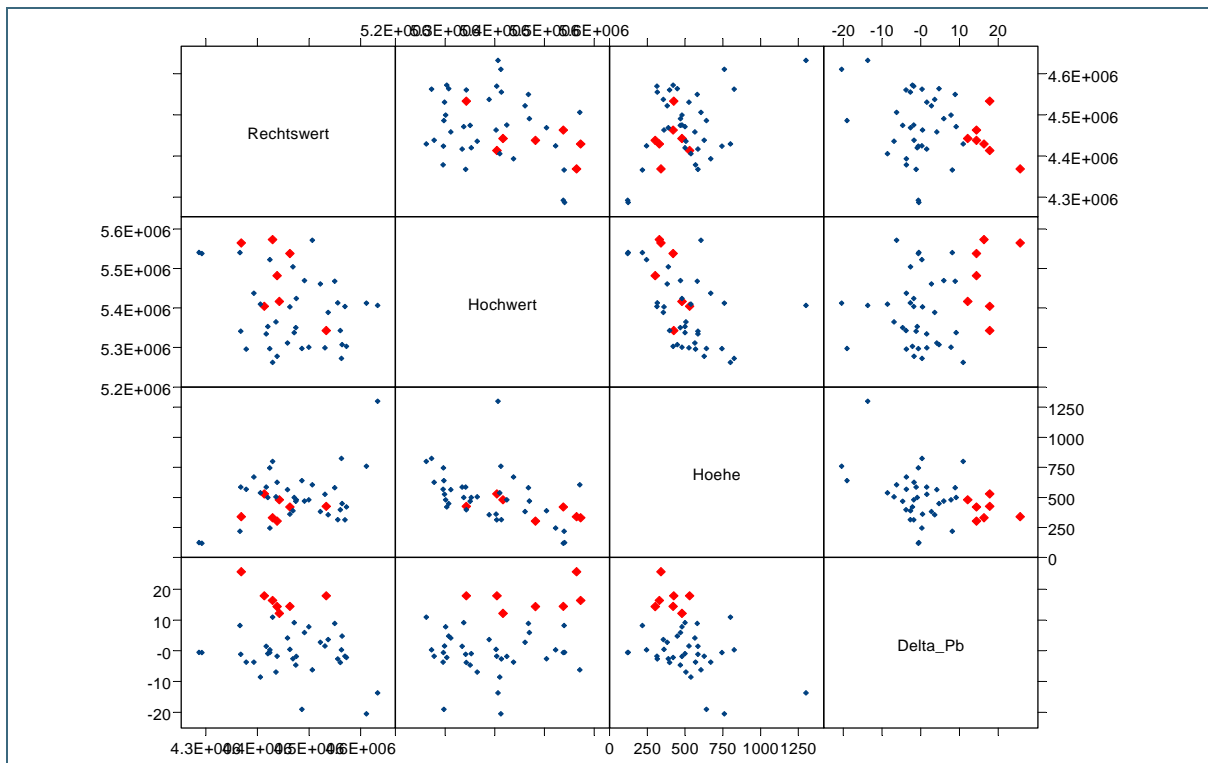


Abb. 3: Scatterplotmatrix der Bleivorratsänderung (Delta_Pb [kg/ha]) und der geographischen Variablen (Rechtswert [m], Hochwert [m], Hoehe [m]); beispielhaft rot markiert die sieben stärksten Zunahmen (> 11 kg/ha)

Darin sind – nur als ein Beispiel für viele derartige Betrachtungen – die sieben Punkte mit besonders starker Zunahme (> 11 kg/ha) rot markiert. Man sieht, dass diese eher zu niedrigen Höhen (Teilplot Hoehe vs Delta_Pb) gehören und bevorzugt im Nordwesten Bayerns (Teilplot Hochwert vs Rechtswert) auftreten.

Ein Hochwertprofil, in das zusätzlich zur Verdeutlichung eine glättende Kurve (gleitendes Mittel mit Bandbreite 60000) eingetragen ist (Abb. 4), und ein Höhenprofil, in das zusätzlich zur Verdeutlichung eine glättende Kurve (gleitendes Mittel mit Bandbreite 200) eingetragen ist, bestätigen dies (Abb. 5).

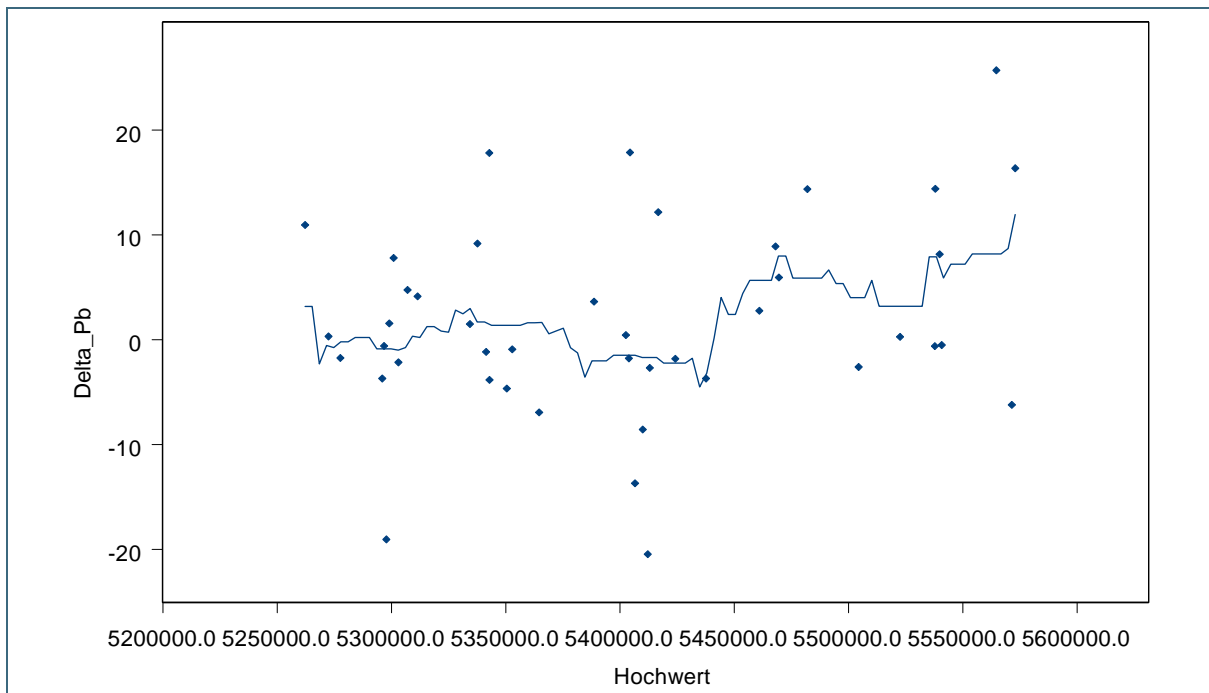


Abb. 4: Hochwertprofil mit gleitendem Mittel

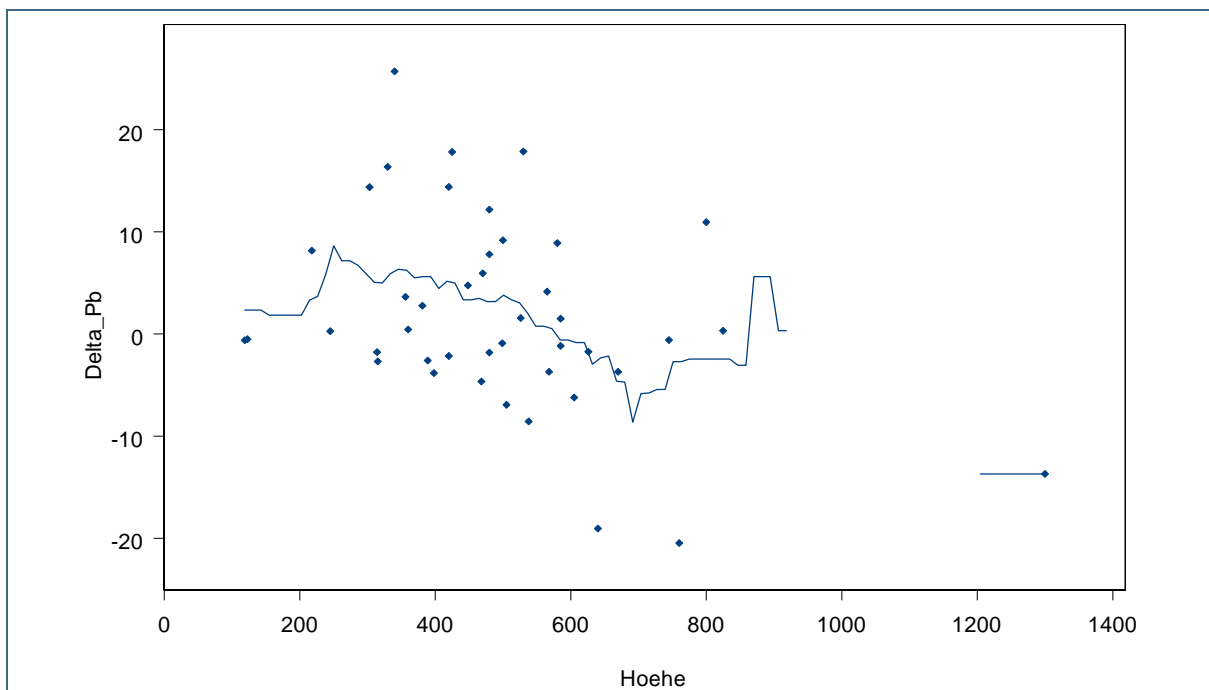


Abb. 5: Höhenprofil mit gleitendem Mittel

Die Darstellung als Regressionsbaum (Abb. 6) bestätigt ebenfalls diese Resultate.

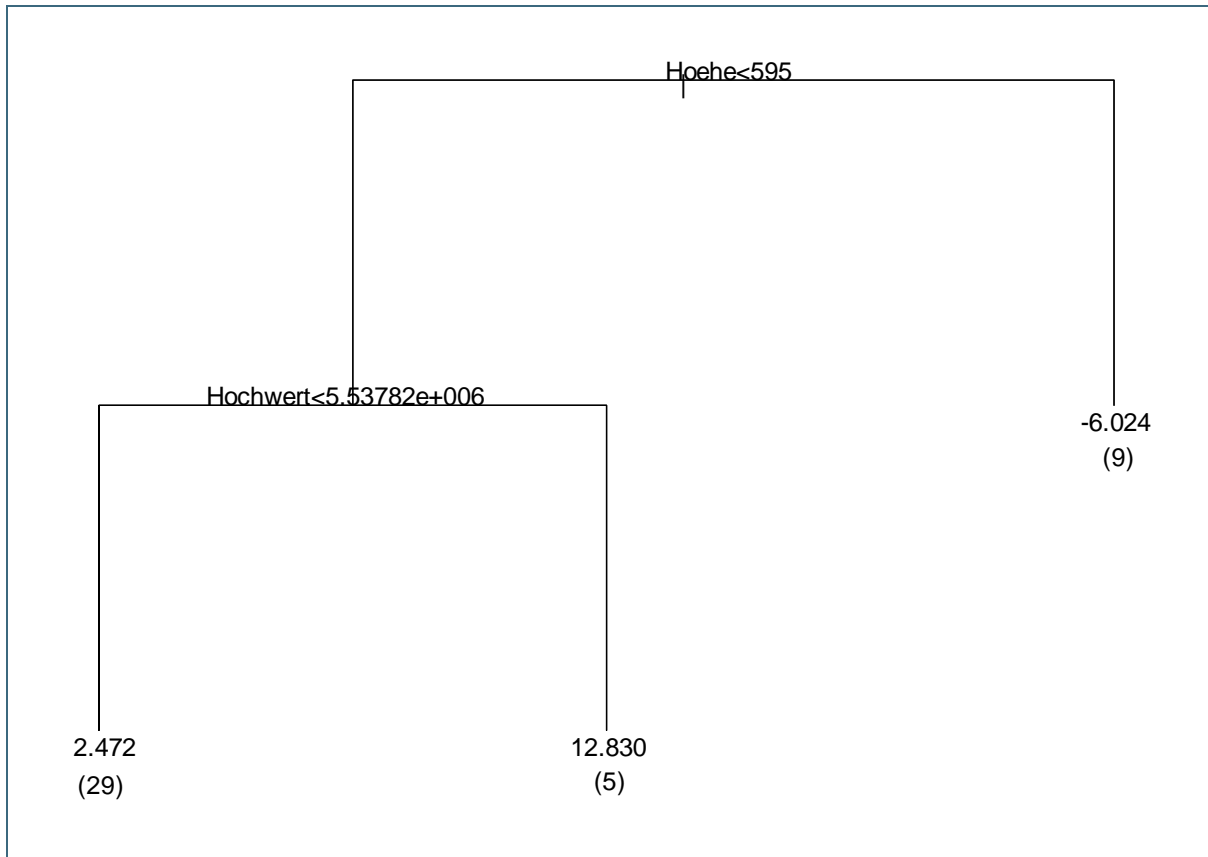


Abb. 6: Regressionsbaum für die geographischen Variablen

Für Abbildung 6 wurde die Vorgabe gemacht, dass die Vorratsveränderungen (Delta_Pb) durch einen Baum mit höchstens drei Endknoten aus den unabhängigen Variablen Rechtswert, Hochwert und Hoehe vorhergesagt werden sollten. Die Baumdarstellung besagt nun, dass man zunächst überprüft, ob Hoehe einen Wert von mehr als 595 [m] hat. Ist dies der Fall, lautet die Vorhersage für Delta_Pb - 6.024 [kg/ha]. Ist dies nicht der Fall, unterscheidet man weiter nach dem Hochwert. Für Stellen mit Hochwert < 5537820 (und Hoehe < 595 [m]) lautet der Vorhersagewert 2.472 [kg/ha], für die restlichen 12.830 [kg/ha].

Diese Baumstruktur ist in Abbildung 7 nochmals von anderer Warte dargestellt – nämlich als Partitionierung der zweidimensionalen Ebene der benutzten Variablen Hoehe und Hochwert durch entsprechende achsenparallele Rechtecke. Dem roten Rechteck entsprechen Werte mit Hoehe > 595 [m]. Das grüne Rechteck entspricht dem ersten Endknoten und das blaue dem zweiten. Man kann nun die Zahlen zu den Endknoten in Abbildung 6 auch leichter verstehen: Die Zahl in Klammern gibt an, wie viele Datenpunkte in dem entsprechenden Rechteck liegen, und der Wert selbst gibt den Mittelwert hinsichtlich der Zielvariablen (Delta_Pb) an. Beispielsweise gibt es neun Datenpunkte mit Hoehe > 595 [m], der Mittelwert ihrer Delta_Pb-Werte ist -6.024 [kg/ha]. Diesen Mittelwert benutzt man als Vorhersage oder Approximationswert für den ganzen Bereich.

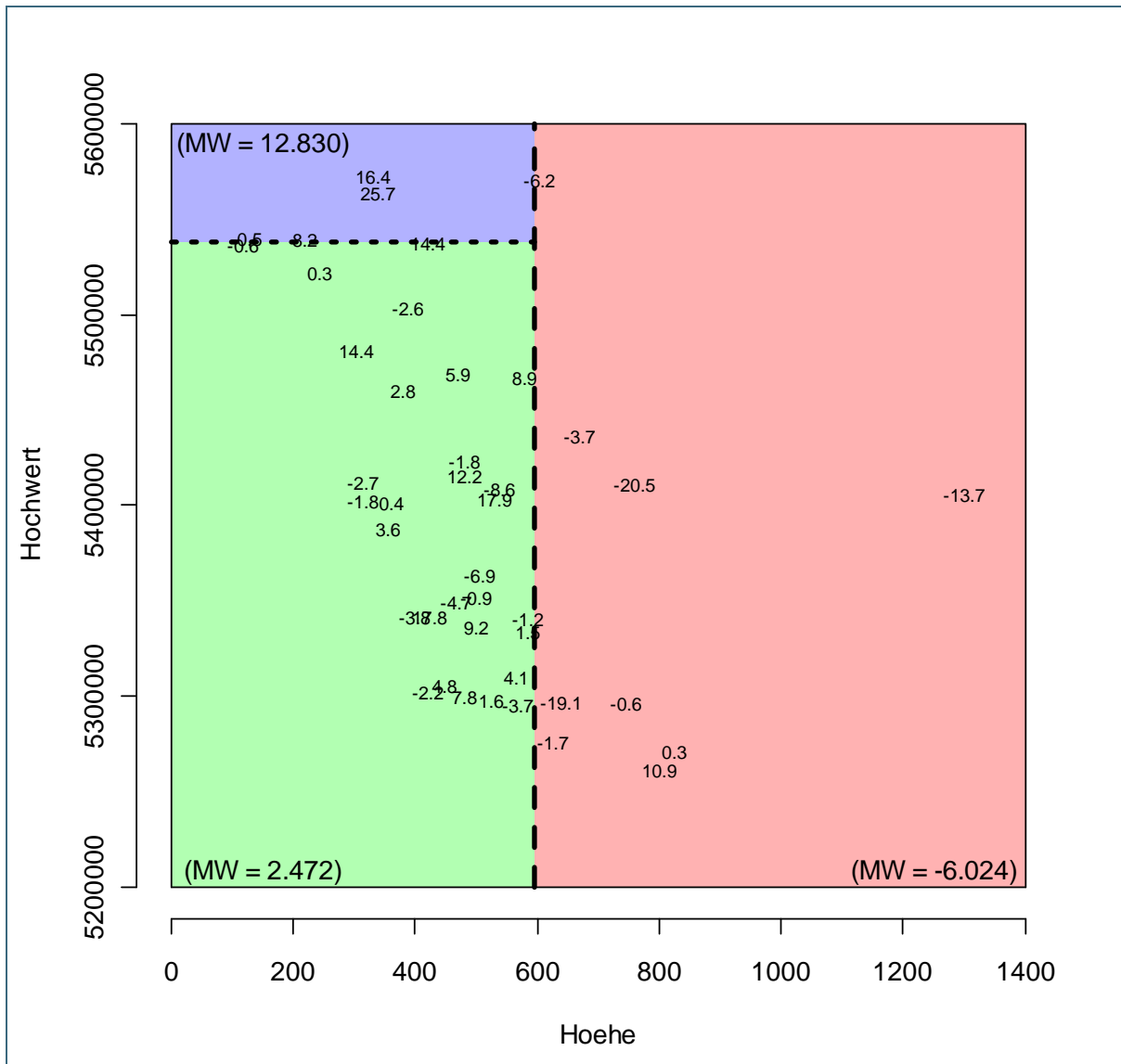


Abb. 7: Partitionierung durch den Baum aus Abbildung 6

Noch einmal anders ausgedrückt, werden die Datenpunkte durch eine Treppenfunktion approximiert, wie das in Abbildung 8 gezeigt ist. Hier entspricht etwa die rote Fläche dem roten Rechteck aus Abbildung 7 bzw. dem rechten Endknoten aus Abbildung 6.

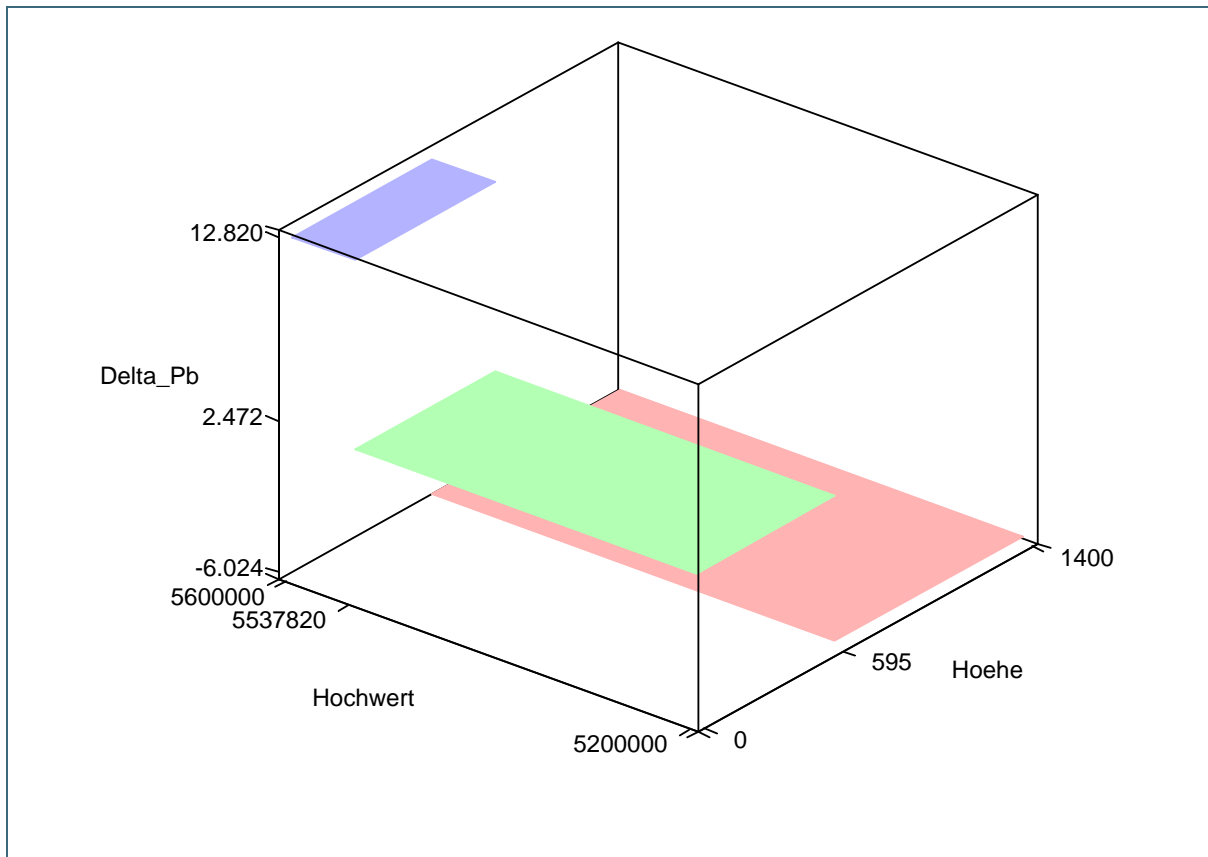


Abb. 8: Approximation der Datenpunkte durch den Baum als Treppenfunktion

Natürlich ist dies ein recht grobes Vorgehen. Zudem stellt sich die Frage, warum gerade dieser Baum ausgewählt wurde. Idealerweise möchte man nämlich die „beste“ Partitionierung bzw. die „beste“ Approximation bzw. den „besten“ Baum finden. Das ist aber im Allgemeinen nicht möglich. Als Ausweg geht man folgendermaßen vor: Man wählt als Gütekriterium die Summe der Abweichungsquadrate (also das aus der Regression bekannte Kleinste-Quadrate-Kriterium). Dann rechnet man für jede unabhängige Variable und für jeden möglichen Aufspaltungspunkt zwischen zwei beobachteten Werten dieser Variable die Mittelwerte der abhängigen Variable für die entstandene Zweiteilung aus. Diese Mittelwerte wählt man als Stufenwerte für eine approximierende Treppenfunktion an die Daten und berechnet die Residuenquadratsumme. Diejenige unabhängige Variable und denjenigen Aufspaltungspunkt, die die kleinste Residuenquadratsumme liefern, wählt man als erste Unterteilung. Anschließend wendet man auf die beiden gefundenen Teilbereiche rekursiv das gleiche Verfahren an. Die Technik wird daher auch als „rekursives Partitionieren“ bezeichnet.

Im vorliegenden Beispiel zeigte sich, dass die erste Aufspaltung hinsichtlich der Variablen Hoehe und bei 595 [m] erfolgen sollte. Als zweites wurde die Variable Hochwert einbezogen; der Rechtswert wurde (bei 3 Knoten) gar nicht benutzt. Es soll keinesfalls behauptet werden, dass ein spezieller Baum hier optimal wäre. Aber durch das Arbeiten mit den Bäumen erhält man doch einen Einblick in die Struktur des Datensatzes und die Relevanz der jeweiligen Variablen. Für genauere Beschreibungen hierzu sei nochmals auf BREIMAN et al. (1984) verwiesen.

In unserem Beispiel stimmen die Ergebnisse aus der Baumanalyse gut mit den schon gefundenen Resultaten aus den Scatterplots überein. Zugleich verdeutlichen diese Betrachtungen die Schwierigkeit des Datensatzes: Die Effekte von Hoehe und Hochwert lassen sich nicht richtig trennen, da die niederen Höhen nun einmal im Norden Bayerns liegen.

3.2.2 Geographische und physikalische Variablen

Im Folgenden werden alle unabhängigen Variablen auf ihren Einfluss bei der Bleivorratsänderung untersucht.

Ein Hauptproblem dabei ist, dass die Situation wegen der vielen Variablen und der wenigen Daten sehr unübersichtlich ist. Ein weiteres Problem liegt darin, dass die Kohlenstoffdaten nur von 21 und die Bodenarten nur bei 39 Flächen vorliegen. Andererseits scheinen gerade diese Variablen durchaus Einfluss auszuüben, wie in den folgenden Ausführungen ersichtlich wird.

Abbildung 9 zeigt den Regressionsbaum für alle Variablen, wobei die Fallzahl aufgrund von Datenlücken beim Kohlenstoffvorrat auf 21 begrenzt ist.

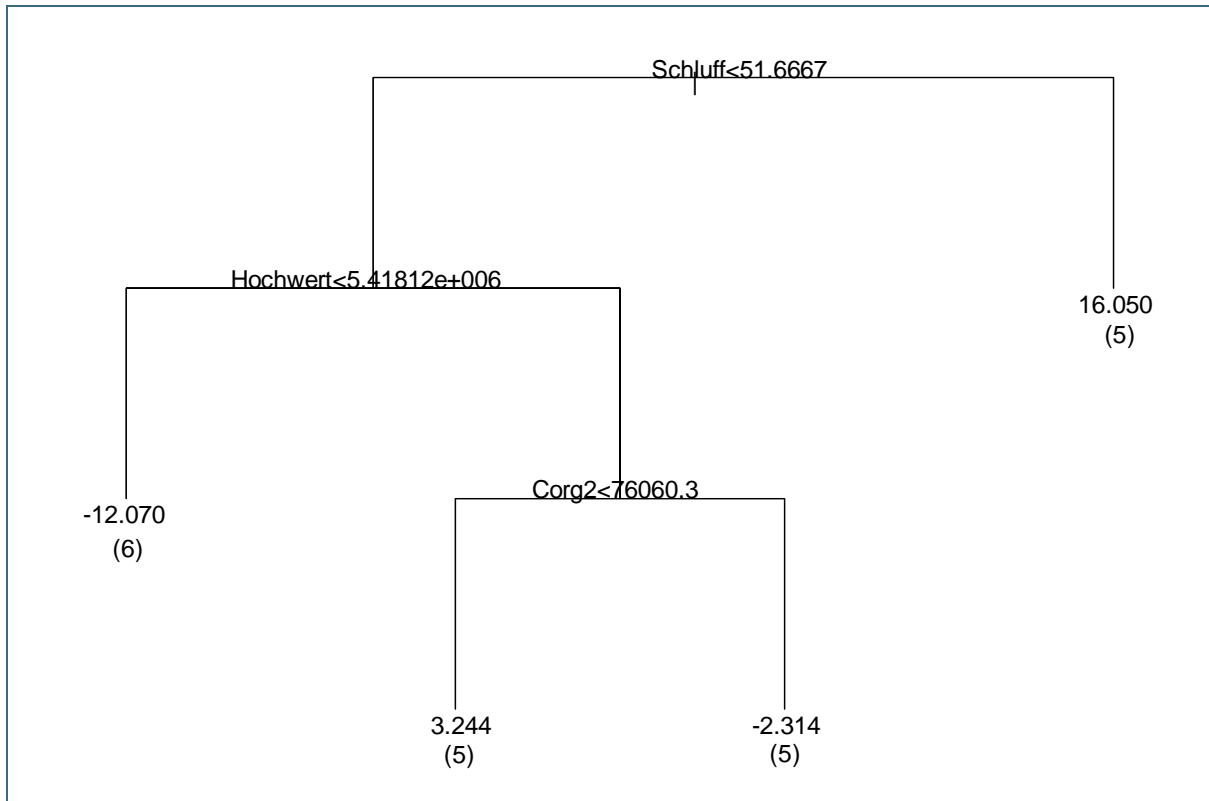


Abb. 9: Regressionsbaum unter Einbeziehung aller Variablen (21 Datenpunkte)

Lässt man die Werte des Kohlenstoffvorrats weg und erhöht dadurch die Fallzahl auf 39, so ergibt sich folgender Regressionsbaum (Abb. 10).

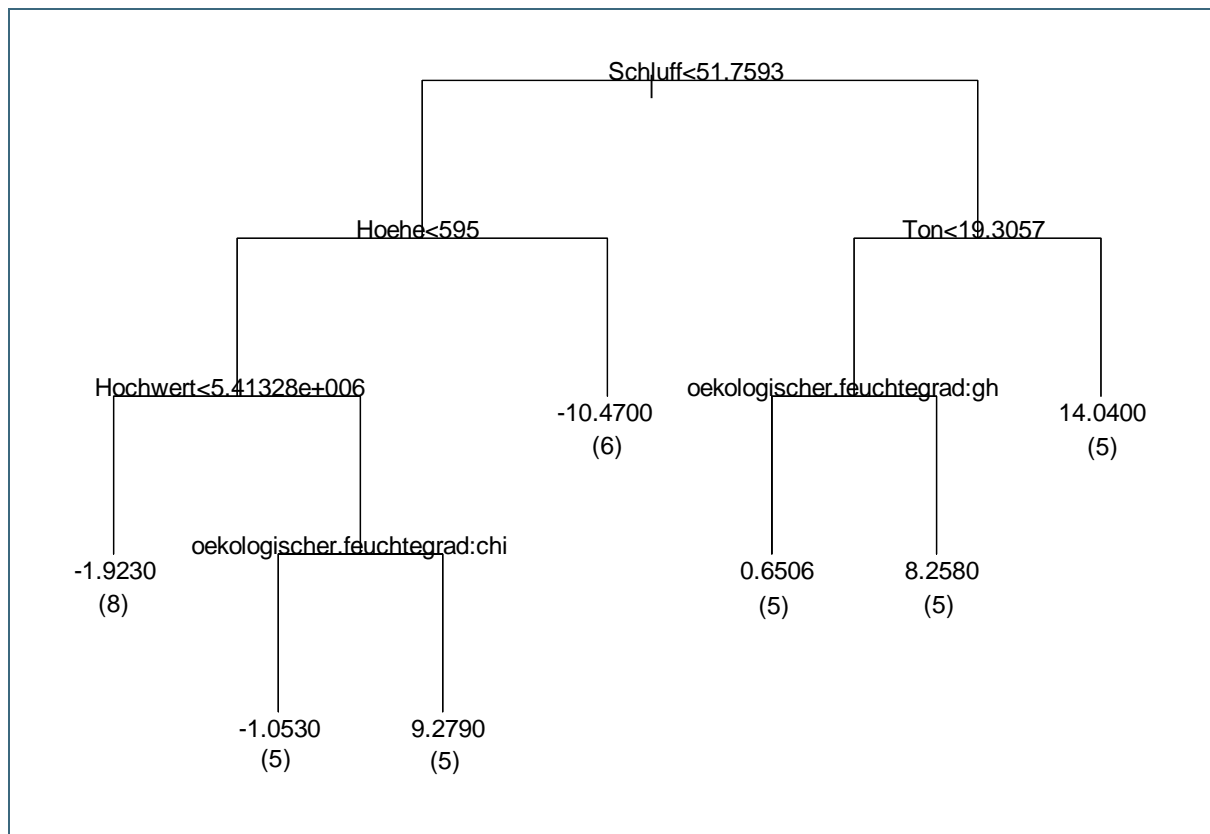


Abb. 10: Regressionsbaum unter Auslassung der Kohlenstoffdaten (39 Datenpunkte) (Zur Abkürzung ist darin der oekologische_Feuchtegrad wie folgt bezeichnet: 3.1: a, 3.2: b, 4.1: c, 4.3: d, 5.1: e, 5.2: f, 5.3: g, 5.4: h, 6.1: i, 7.1: j.)

Wird auch die Bodenart (Variablen Sand, Schluff, Ton) außer acht gelassen und somit die maximale Fallzahl von 43 genutzt, entsteht der Regressionsbaum aus Abbildung 11.

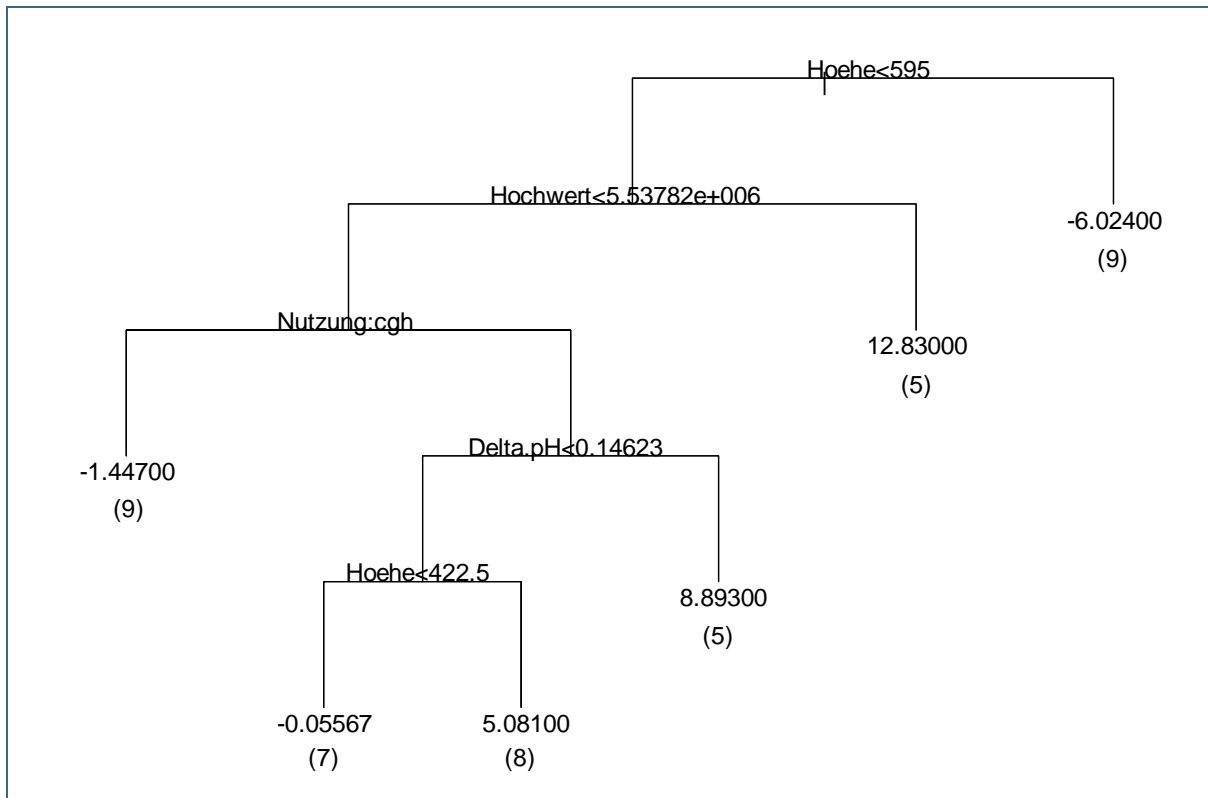


Abb. 11: Regressionsbaum ohne Berücksichtigung von Kohlenstoffvorrat und Bodenart (43 Datenpunkte) (Zur Abkürzung ist darin die Nutzung wie folgt bezeichnet: BG (Graslandbrache): a, FL (Laubwald): b, FM (Mischwald): c, FN (Nadelwald): d, GI (Wiese): e, GS (Streuweise): f, OH (Heide): g, OT (Hutung): h, OU (ungenutztes Moor): i.)

In allen Fällen ergeben sich je nach Einstellungsparametern auch andere Bäume, jedoch sind die Variablen Schluff, Hochwert, Hoehe und Corg2 fast immer mitbeteiligt. Man sollte daher zwar keinesfalls auf einen speziellen Baum abstellen, kann aber diese Variablen als besonders interessant ansehen.

Eine Darstellung dieser Variablen in der Scatterplotmatrix verdeutlicht diese Auffälligkeiten (Abb. 12).

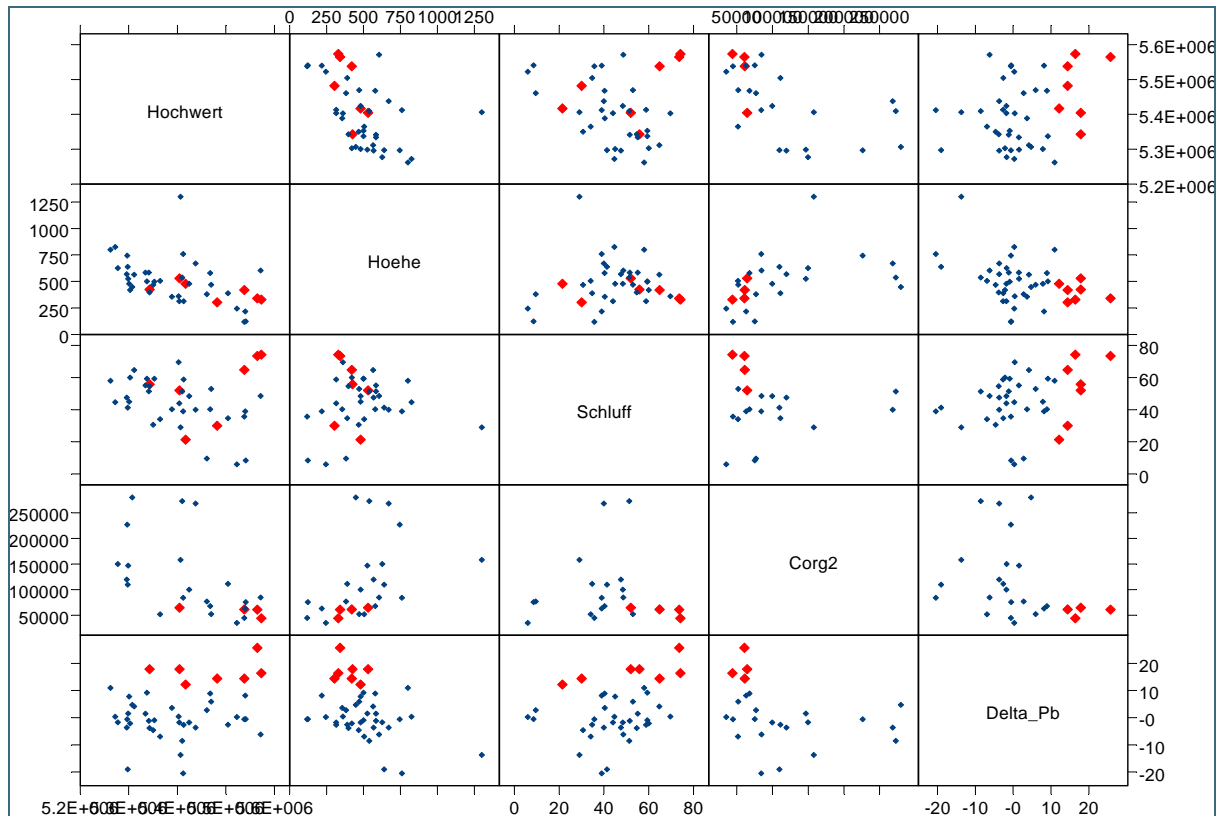


Abb. 12: Scatterplotmatrix der Bleivorratsänderung (Delta_Pb [kg/ha]) und der „interessanten“ Variablen (Schluff [%], Hochwert [m], Höhe [m] und Corg2 [kg/ha]); beispielhaft rot markiert die sieben stärksten Zunahmen (> 11 kg/ha)

Auch in dieser Scatterplotmatrix sind beispielhaft die sieben Punkte mit besonders starker Zunahme (> 11 kg/ha) rot markiert. Standorte mit deutlicher Zunahme der Bleivorräte haben ersichtlich alle:

- niedrige Corg2-Werte, wobei Corg2 und Corg1 sehr stark korreliert sind,
- relativ hohe Schluff-Werte,
- eher niedrige Höhenwerte.
- eher niedrige Rechtswerte (vgl. Abb. 3),
- eher hohe Hochwerte.

Angesichts der Beziehungen zwischen den Variablen ist es allein aus den statistischen Zusammenhängen nicht möglich, Ursache-Wirkungszusammenhänge zu bestimmen. Aus naturwissenschaftlicher Sicht mag man zu der Ansicht neigen, dass die „geographischen“ Variablen (Höhe, Hochwert) die Sachverhalte eher beschreiben und die „physikalischen“ (Corg2, Schluff) sie eher erklären. Dies muss aber nicht zwingend so sein.

Des Weiteren ist festzustellen, dass Zunahmen des Bleivorrats vor allem bei Flächen mit geringem Niederschlag zu finden sind (Abb. 13).

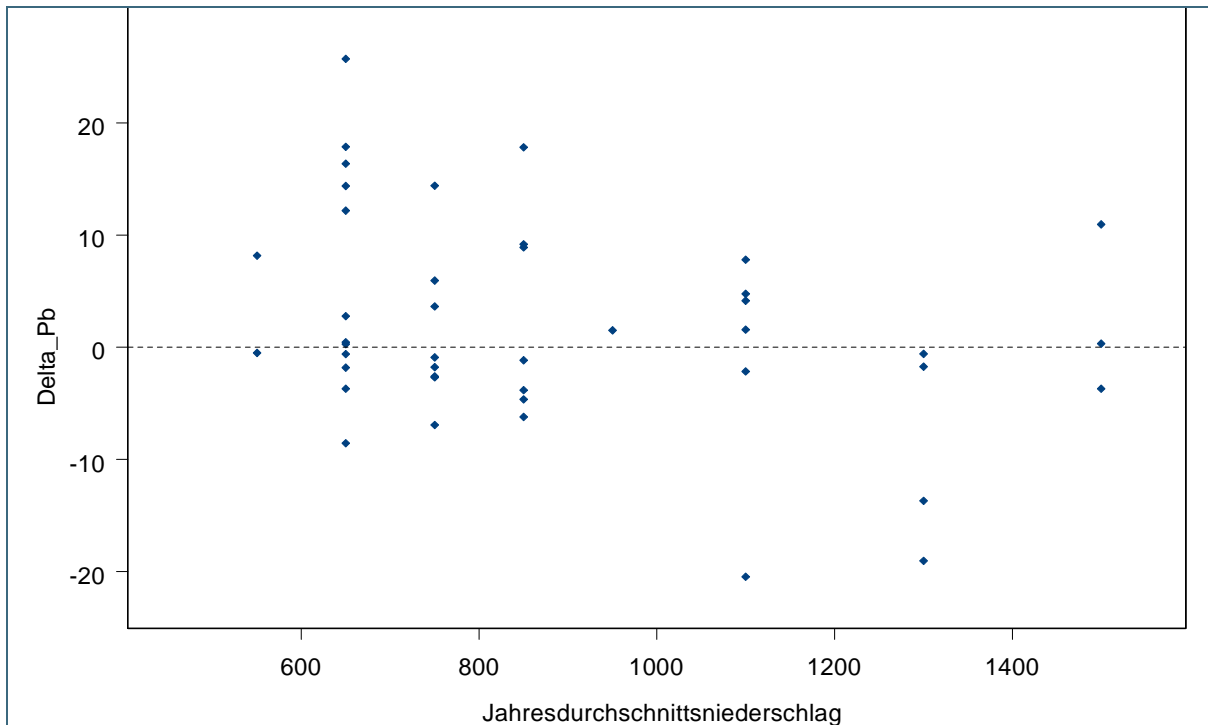


Abb. 13: Zusammenhang zwischen Bleivorratsänderung (Delta_Pb, [kg/ha]) und Niederschlag [mm]

Die Vermutung, dass auch die Nutzung einen Einfluss auf Bleivorratsänderungen hat, bestätigt Abbildung 14.

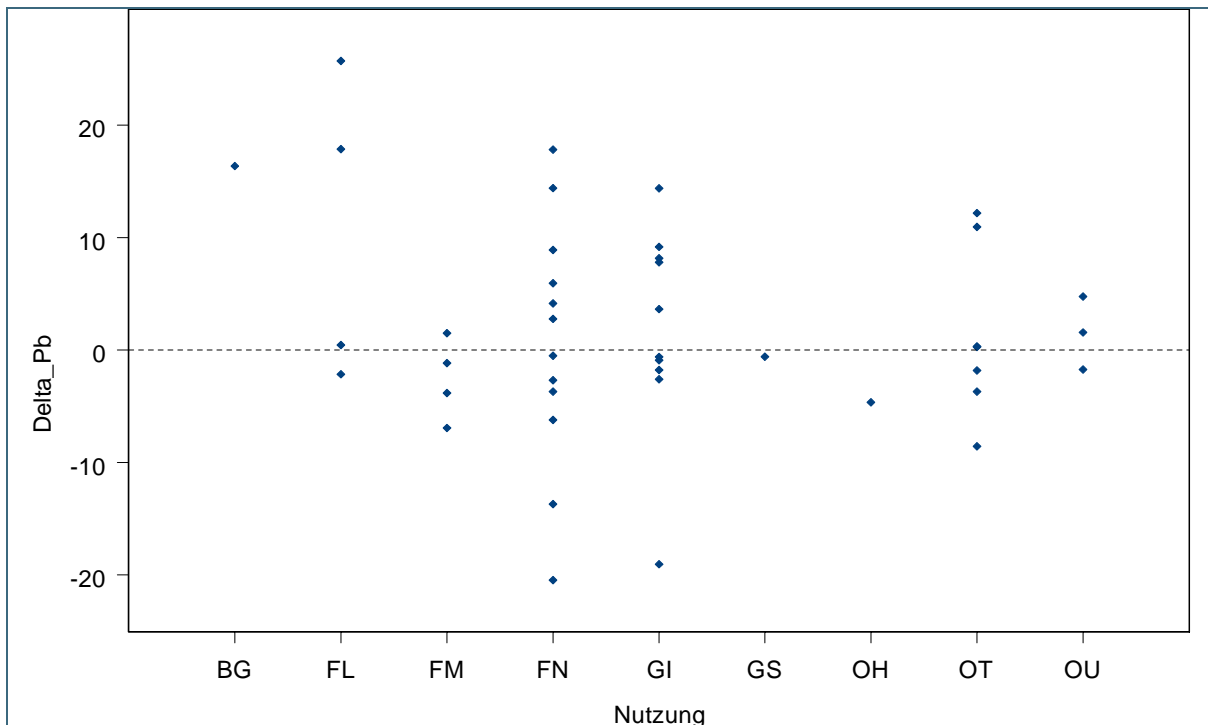


Abb. 14: Zusammenhang zwischen Bleivorratsänderung (Delta_Pb [kg/ha]) und Nutzung (BG: Graslandbrache, FL: Laubwald, FM: Mischwald, FN: Nadelwald, GI: Wiese, GS: Streuwiese, OH: Heide, OT: Hutung, OU: ungenutztes Moor)

Es zeigt sich, dass die mit einem n größer vier belegten Nutzungsarten Laubwald (FL) und Wiese (GI) tendenziell mit Zunahmen des Bleivorrats (Delta_Pb [kg/ha]) einhergehen.

Abschließend zeigt Abbildung 15 noch einmal Nutzungsart, geographische Position und Ausmaß der Bleivorratsänderung im Zusammenhang.

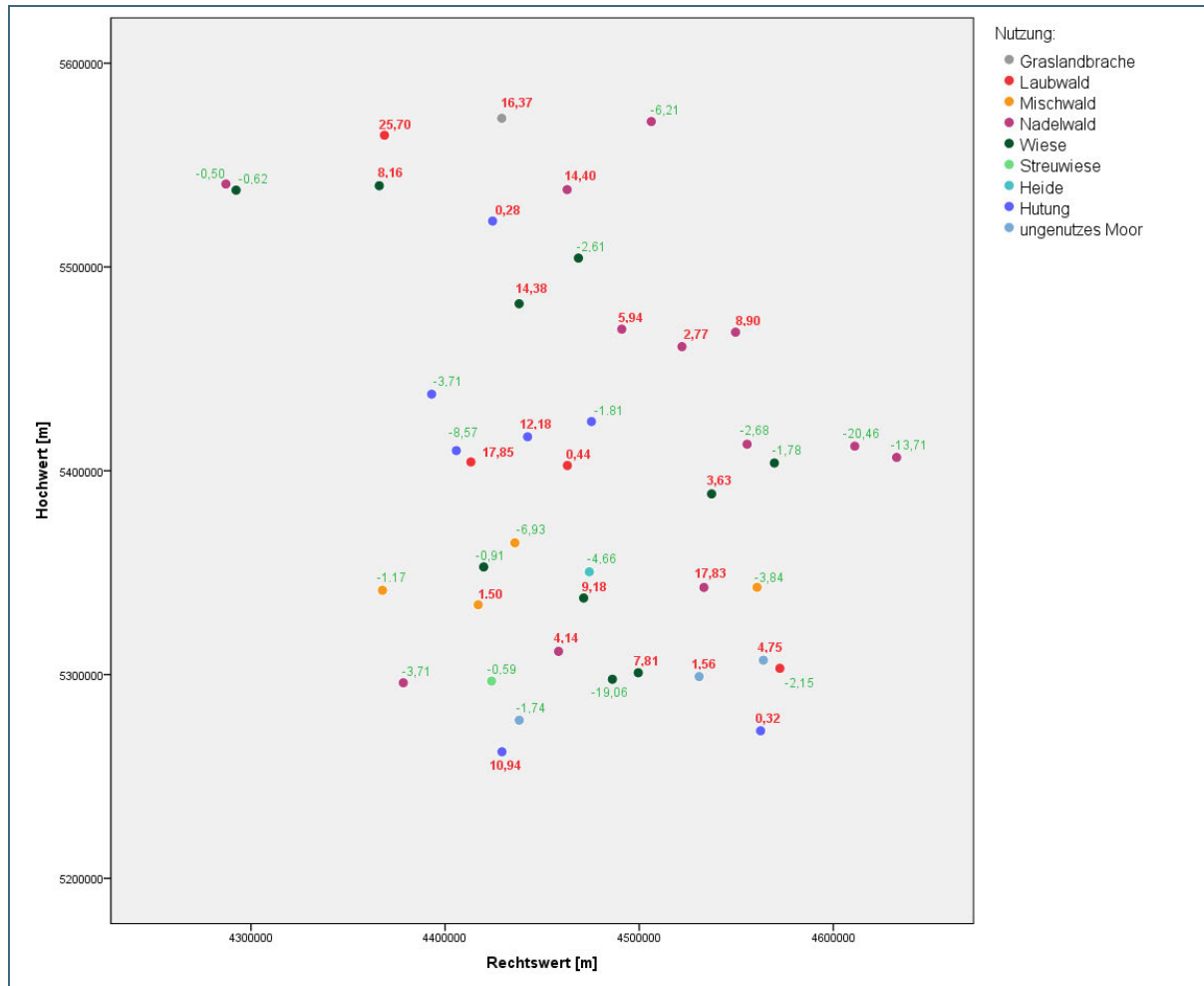


Abb. 15: Bleivorratsänderungen in Abhängigkeit von Nutzung (BG: Graslandbrache, FL: Laubwald, FM: Mischwald, FN: Nadelwald, GI: Wiese, GS: Streuwiese, OH: Heide, OT: Hutung, OU: ungenutztes Moor) und geographischer Position (Rechts- und Hochwert [m])

Es wird deutlich, wie schwierig es ist, die einzelnen Einflüsse sinnvoll voneinander zu trennen. Eindeutige Resultate sind aufgrund der derzeit vorhandenen Datengrundlage deshalb noch nicht zu erwarten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zwei Datenpunkte auf der Zeitachse von nur einem Ort lassen noch keine eindeutigen und belastbaren Aussagen über Vorratsänderungen zu. Um solche Änderungen definitiv erkennen zu können, muss zunächst das durch natürliche Faktoren (z. B. Flächeninhomogenität) und Artefakte (z.B. Probe-, Aufbereitungs- und Analysenfehler) verursachte Rauschen bestimmt werden, wozu weitere Datenpunkte auf der Zeitachse oder eventuell von weiteren Orten notwendig sind.

Dennoch lassen sich auch hier Aussagen treffen, wenn die Daten aller Flächen gemeinsam mit geeigneten statistischen Methoden analysiert werden. Im vorliegenden Fall hat sich die explorative Datenanalyse mittels Scatterplotmatrizen und Regressionsbäumen bewährt. Dabei werden diese beiden

Methoden in interaktiver Weise mit unterschiedlichen Einstellungen verwendet, um dadurch Besonderheiten oder einen roten Faden in den Daten zu entdecken.

Demzufolge lässt sich auf Basis der vorliegenden, noch „dünnen“ Datengrundlage über die Bleivorratsänderung in Bayern dennoch folgende Aussage festhalten:

(1) Insgesamt sind die Zunahmen wohl eher stärker als die Abnahmen. Dramatische Änderungen haben sich aber nicht ergeben.

Hinsichtlich der Einflussfaktoren ist die Lage noch komplizierter. Hier sollte versucht werden, mittels explorativer statistischer Techniken, alle Auffälligkeiten möglichst sichtbar zu machen und nichts Wesentliches zu übersehen. Die Vorgehensweise ist analog einer medizinischen Generaluntersuchung (Check up) oder einer TÜV-Untersuchung von Kraftfahrzeugen. Es geht nicht unbedingt darum, auf jeden Fall etwas Spektakuläres aufzufinden, sondern vor allem um eine gründliche Prüfung aller Eventualitäten. Ein negativer Befund ist darum auch keineswegs „wertlos“, sondern im Gegenteil ein durchaus „handfestes“ Resultat, da er es ermöglicht, Krankheiten oder Mängel auszuschließen. Zudem ist laufende Überwachung nötig, um Indizien für Probleme frühzeitig erkennen zu können. Aus dieser Perspektive ergeben sich folgende Resultate:

(2) Eindeutige und durchschlagende Einflussfaktoren lassen sich auf der Basis der betrachteten Daten (noch) nicht abgrenzen.

(3) Hinsichtlich der geographischen Variablen scheint es ein Nordsüd- (im Norden stärkere Zunahmen) und ein Westost- (im Westen deutlichere Zunahmen) sowie ein Höhengefälle (Abnahmen bei größeren Höhen) zu geben.

(4) Hinsichtlich der physikalischen Variablen könnten Schluff und Corg₂ als mögliche Einflussfaktoren eine Rolle spielen, wobei die Standorte mit Zunahmen niedrigere Kohlenstoff- und relativ hohe Schluffwerte aufweisen. Ferner kommen starke Zunahmen bei viel Niederschlag nicht vor.

Der vorliegende Bericht soll die Untersuchungen an diesen Daten nicht abschließen. Er versteht sich vielmehr als Zwischenbericht in einem fortlaufenden Prozess. Eine weiterführende Frage wäre vor allem auch ein Abgleich mit Bleiimmissionsdaten bzw. der Nutzungshistorie. Hier gibt insbesondere auch die Lage der Ballungsgebiete/Industriegebiete/Verkehrswege in Bayern Grund zu naheliegenden Vermutungen.

Auf der methodischen Seite zeigt sich der Wert kontinuierlichen und umfassenden Bodenmonitorings unter Benutzung effizienter statistischer Datenauswertung. Dieser Wert liegt nicht so sehr darin, retrospektiv spektakuläre Rettungsaktionen zu starten oder Erklärungsversuche zu geben, wenn etwas aus dem Ruder gelaufen ist, sondern umgekehrt prospektiv durch laufende Überwachung und Analyse dabei zu helfen, dass dies verhindert oder zumindest frühzeitig erkannt werden kann. Bodenmonitoring steht damit in einer Reihe mit anderen Frühwarnsystemen - wie etwa den Vorsorgeuntersuchungen in der Medizin und den regelmäßigen Inspektionen in der Technik -, die in modernen Gesellschaften immer stärker an Bedeutung gewinnen, weil sie helfen hohe und vermeidbare Schäden zu verringern.

Literatur

AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart. 392 S.

BARTH, N., BRANDTNER, W. CORDESEN, E., DANN, T., EMMERICH, K.-H., FELDHAUS, D., KLEEFISCH, B., SCHILLING, B., UTERMANN, J. (Ad hoc AG Bodendauerbeobachtung der LABO) (2000): Boden-Dauerbeobachtung, Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen. - Rosenkranz et al. (Hrsg.): Erg. Handbuch Bodenschutz, 9152, 32. Lfg. XI/00; Erich Schmidt Verlag. Berlin.

BREIMAN, L., FIEDMAN, J., OLSHEN, R., STONE, C. (1984): Classification and Regression Trees. Wadsworth. Boca Raton.

DESAULES, A., SCHWAB, P., KELLER, A., AMMAN, S., PAUL, J., BACHMANN, H.-J. (2006): Anorganische Schadstoffgehalte in Böden der Schweiz und Veränderungen nach 10 Jahren - Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung 1985-1999. NABO-Bibliographie Nr. 138. Zürich. 139 S.

DIN ISO 10694: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse). Beuth-Verlag. Berlin.

DIN 19683-2: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen - Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat. Beuth-Verlag. Berlin.

DIN 19684-1:1977-02: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau; Chemische Laboruntersuchungen, Bestimmung des pH-Wertes des Bodens und Ermittlung des Kalkbedarfs. Beuth-Verlag. Berlin.

KLINGER, R. (2005): Der Mikrowellenaufschluß als richtungsweisendes Totalaufschlußverfahren in der geochemischen Analytik. Zeitschr. Umweltchem Ökotox 17 (3) S. 151-158. ecomed-Verlag. Landsberg.

KNOCH, K. (1952): Klima-Atlas von Bayern (1:1 000 000).– 83 Bl., mit Erl.: 23.S., Bad Kissingen.

RUPPERT, H., SCHMIDT, F. (1987): Natürliche Grundgehalte und anthropogene Anreicherungen von Schwermetallen in Böden Bayerns. GLA-Fachberichte 2. München. 97 S.

SACHS, L. (1992): Angewandte Statistik. – Anwendung statistischer Methoden. 7. Aufl. Berlin. Heidelberg. New-York. Tokio (Springer-Verlag).

SCHILLING, B. (1994): Boden-Dauerbeobachtungsflächen des Bayerischen Geologischen Landesamtes. GLA Fachberichte, 11. München. 60 S.

SCHILLING, B. (1997): Wiederholungsuntersuchungen an Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern GLA Fachberichte, 14. München. S. 48-91.

SCHILLING, B., QUINGER, J., HAMMERL, J., HOLZNER, G., MAHLER, CH. (2005): Intensiv-Boden-Dauerbeobachtung am Bayerischen Landesamt für Umwelt unter Einbeziehung von Ergebnissen aus den Untersuchungen der Basis-Boden-Dauerbeobachtung. GLA Fachberichte, 23. München. 54 S.

Humusgehalte Bayerns – Humuszehrung oder Humusmehrung?

Robert Beck, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Einleitung und Zielsetzung

Die Bedeutung des Humus liegt in der komplexen Beeinflussung nahezu aller Bodeneigenschaften und -funktionen. Der Humus stellt eine langsam fließende Nährstoffquelle für die Pflanze dar. Die Intensivierung der landwirtschaftlichen Bodenbewirtschaftung und die fortschreitende Klimaerwärmung können zum Humusabbau führen, mit allen bekannten negativen Folgen.

Um eine langfristige Entwicklung der Humusversorgung in Bayern zu ermitteln, werden seit 1986 im Rahmen des Boden-Dauerbeobachtungs-Programms regelmäßig Humusuntersuchungen auf ausgewählten, repräsentativen, landwirtschaftlich genutzten Flächen durchgeführt.

Material und Methoden

Lage und Nutzung der BDF zeigt Abbildung 1. Die Auswahl der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) erfolgte unter Berücksichtigung der Repräsentanz für Klima, Böden und Nutzungen in Bayern.

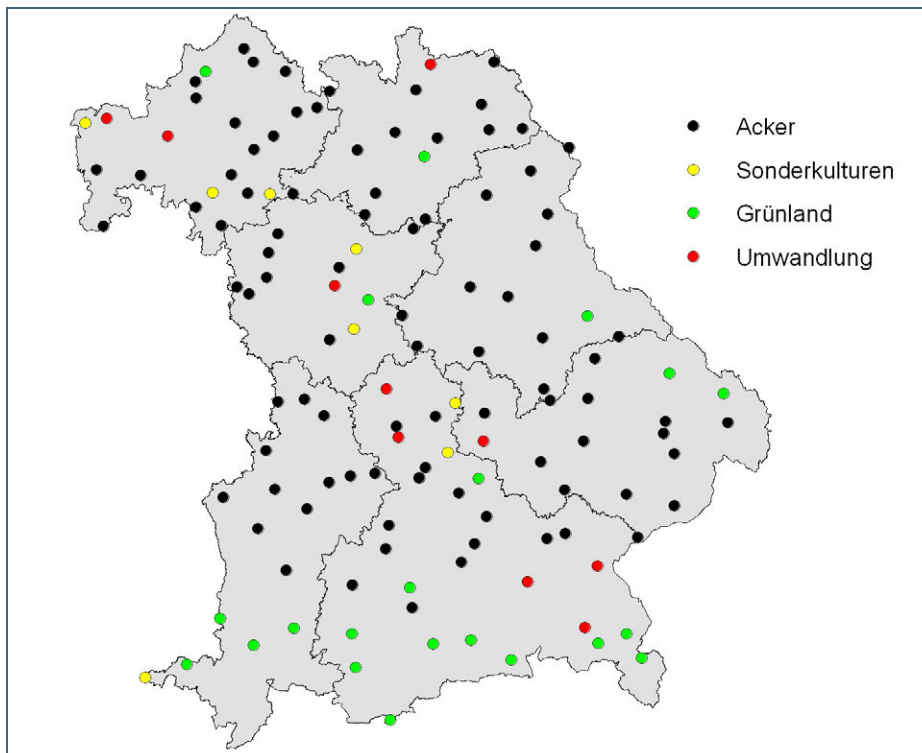


Abb. 1:
Lage und Nutzung der
BDF Stand 2011.

Die BDF liegen auf Praxisbetrieben und werden betriebsüblich bewirtschaftet. Die Parzellengröße beträgt 1000 m².

Nach ihrer Nutzung wurden 92 Acker-, 21 Grünland- und 8 Sonderkulturen untersucht.

Die Probenahme erfolgte jeweils im Frühjahr vor der Ausbringung des organischen Düngers.

Zwischen 1986 und 2011 wurden die BDF jeweils viermal beprobt.

Von jeder BDF wurden vier repräsentative Mischproben vom Oberboden (Acker 0 - 15 cm; Grünland 0 - 10 cm) gezogen. Jede Mischprobe wurde luftgetrocknet, zerkleinert, auf 2 mm gesiebt, homogenisiert, fein gemahlen und auf 0,5 mm gesiebt.

Analytik

Die Bestimmung des Gesamtkohlenstoff (C_t) und Gesamtstickstoff (N_t) erfolgte nach der Dumas Methode. Der anorganische Kohlenstoff (C_{Carbonat}) wurde mit der Scheibler-Methode bestimmt. Der organische Kohlenstoff wurde nach der Gleichung $C_{\text{org}} = C_t - C_{\text{Carbonat}}$ berechnet.

Zeitliche Veränderungen der Analysewerte auf den jeweiligen BDF und Signifikanzen wurden über lineare Regression und t-Test berechnet.

Ergebnisse und Diskussion

Die Humusmonitoring-Ergebnisse deuten auf eine Abnahme der mittleren Corg-Gehalte um etwa 2 - 3 % in den Acker- und Grünlandböden zwischen 1986 und 2007 hin (vgl. Abb. 2).

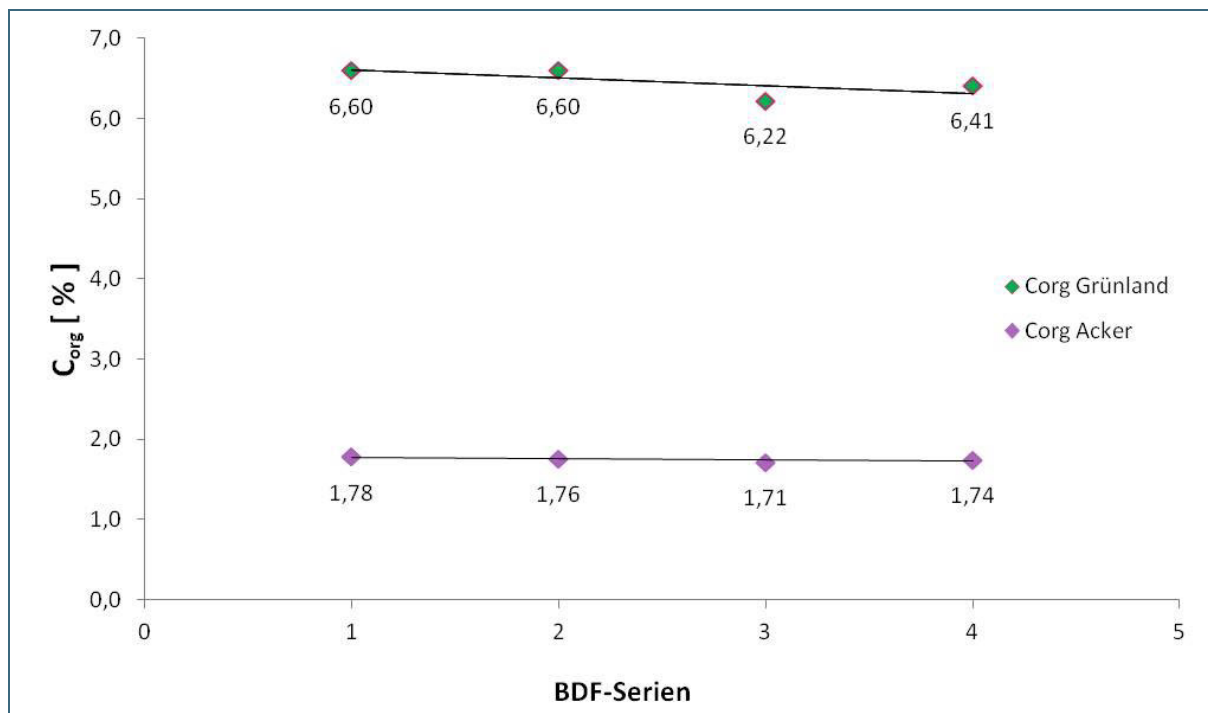


Abb. 2: Mittlere Corg -Gehalte der vier Beprobungsserien (Acker- und Grünland-BDF).

Dagegen ist beim durchschnittlichen N_t -Gehalt keine abnehmende Tendenz erkennbar.

Sowohl die Acker- als auch die Grünlandböden weisen demzufolge einen Abfall des Corg/ N_t - Verhältnisses auf.

Fruchtfolge und Düngung sind die Hauptursache für die beobachteten Humusveränderungen.

Die Ackernutzung in Bayern in den letzten fünfzig Jahren ist vor allem von einem Rückgang des Getreide- und Klee/Luzerne-Anteils und einem Anstieg des Silomais- und Rapsanteils geprägt. Die abnehmende Bedeutung des Stallmistes zugunsten der Güllewirtschaft, der niedrige Anteil der Zwischenfrüchte und das Abfahren von Stroh charakterisieren die organische Düngung der Acker-BDF in diesem Zeitraum.

Ein hoher Anteil von humuszehrenden Früchten (Silomais, Hackfrüchte) in der Fruchtfolge und unzureichende organische Düngung können die humusschützende Wirkung der Tonfraktion überlagern. Das bedeutet, dass auch mittlere und schwere Ackerböden bei ungünstiger Bewirtschaftung vom Humusabbau betroffen sind (vgl. Abb. 3).

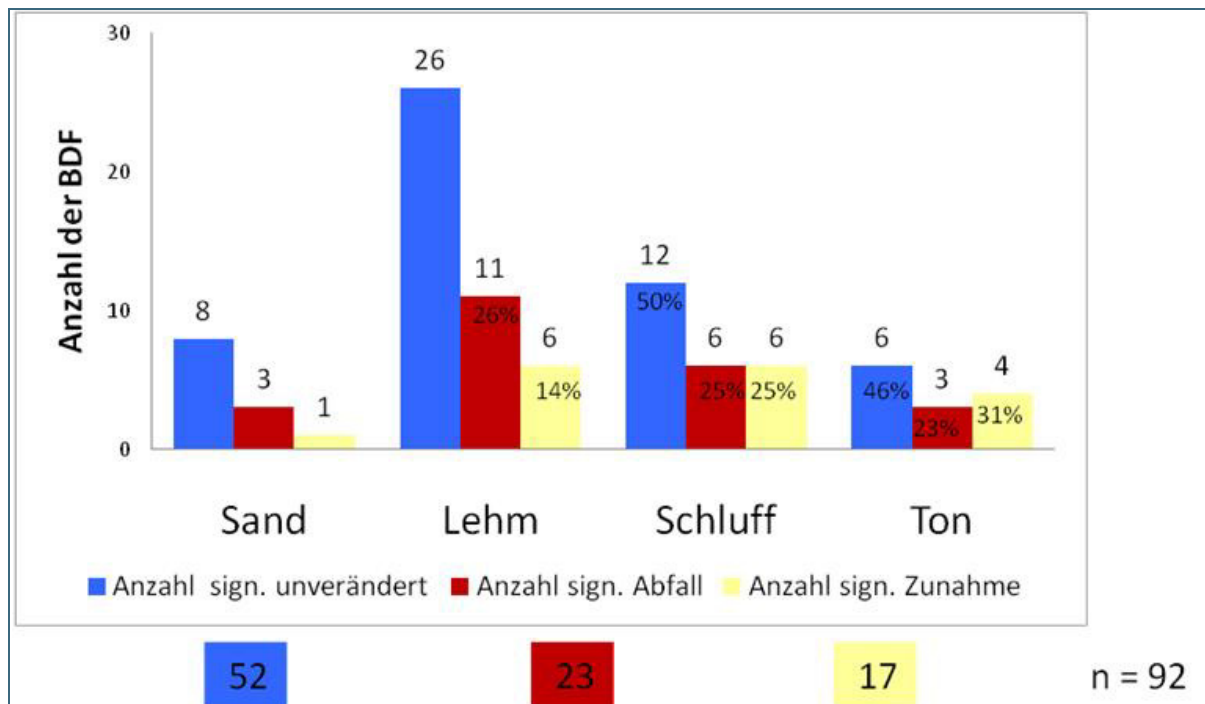


Abb. 3: Einfluss der Bodenart auf den Anteil der BDF mit signifikanter Corg Zu- und Abnahme.

Wegen der komplexen Zusammenhänge und der fehlenden Klimadaten in unmittelbarer Nähe zu den BDF Standorten konnte ein Klimaeffekt auf die Humusgehalte in Bayern weder nachgewiesen noch ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse des Humusmonitoring in Bayern stehen im Einklang mit denen in Österreich, Belgien, Frankreich und England.

Bei gleichbleibender oder sogar abnehmender Zufuhr von organischer Substanz, insbesondere organischem Kohlenstoff, ist in Bayern mit negativen Folgen für die Humusversorgung landwirtschaftlich genutzter Böden zu rechnen.

Neben einer standortgerechten vielfältigen Fruchtfolge sind Stroheinarbeitung, Zwischenfruchtanbau zur Gründüngung und die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern, insbesondere Stallmist, bewährte Mittel, die eine ausreichende Versorgung des Bodens mit organischer Substanz sicherstellen.

Humusgehalte in den Böden Bayerns – Mehrung oder Zehrung?

Alfred Schubert, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Zusammenfassung


Es werden die unterschiedlichen Vorräte und Gehalte des organischen Kohlenstoffs am Bodenprofil einer ausgewählten bayerischer Waldboden-Dauerbeobachtungsfläche (BDF) und deren Veränderung innerhalb von fünfzehn Jahren zwischen Erst- und Zweitbeprobung vorgestellt. Vorräte des organischen Kohlenstoffs, stellvertretend für alle anderen erhobenen Elemente im BDF Projekt sind absolute Werte und damit prädestiniert für Vergleiche z.B. innerhalb von Zeitreihen. Die Probleme bei der Interpretation von Vorratsänderungen werden diskutiert. Eine Abschätzung realistischer Veränderungen zeigt die Größenordnung mit denen bei Zu- oder Abnahme des organischen Kohlenstoffs zu rechnen ist.

Organische Kohlenstoffvorräte von Waldböden

Beispielhaft für die 77 Wald-BDF der LWF werden im Anschluss die Vorräte des organischen Kohlenstoff in den einzelnen Bodenhorizonten der BDF Geisenfeld 1 mit den Werten der Erst- und der Zweitbeprobung vorgestellt und die Zusammenhänge von den Gehalten des organischen Kohlenstoffs mit den Lagerungsdichten und den Horizontmächtigkeiten dargestellt.

Zu Beginn wird die BDF Geisenfeld 1 anhand ihres zusammenfassenden Steckbriefes vorgestellt.

Tab. 1: Bodendauerbeobachtungsflächen-Steckbrief Geisenfeld 1.

Forstamt : - Geisenfeld	Waldort : - VI Hög, 8. Wilder Holler, a ¹
Forstliches Wuchsgebiet : - WG 12 (Tertiäres Hügelland) - WB 8 (Oberbayerisches Tertiärhügelland)	Relief : - Höhe ü. NN.: 425 m - Hangneigung: 6° - Hanglage: Oberhang - Exposition: Nordwest
Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur : - 7,5 °C	Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur : - 7,5 °C
Vegetation : - Hainsimsen - Buchenwald (Luzulo - Fagetum)	Bestand : - Kie-Fi-Ta-Bestand (45 jährig 1983)
 <p>Bodenprofil mit Horizontierung</p>	L, Of(h) (4 cm); Humusaufgabe aus Ki.- Fi.- Ta.- Streu A(h)e (6 cm); stark humoser, posolierter, mittel steiniger, reiner Sand Bsh (4 cm); mittel humoser, oxidreicher, sehr schwach steiniger, schwach toniger Sand Bv1 (20 cm); schwach humoser, verbraunter, sehr schwach steiniger, schwach toniger Sand Bv2 (30 cm); verbraunter, schwach steiniger, reiner Sand Bv3 (20 cm); verbraunter, sehr schwach steiniger, schwach toniger Sand Bv4 (20 cm +); verbraunter, sehr schwach steiniger, reiner Sand
Substrat : - Miozäne Sande (mio) Standortseinheit : - Mäßig frische, reine bis schwachtonige podsolierte Sande (Ss, St2)	Bodentyp (KA 4) : - Podsol - Braunerde Bodentyp (FAO) : - Podzol Humusform : - Moder

In der folgenden Abbildung ist die BDF mit ihrem Tiefenprofil der Vorräte an organischem Kohlenstoff dargestellt. Die Abbildung zeigt die Werteverteilung über die Bodentiefe, von der Humusaufgabe bis zum Unterboden, bzw. dem Ausgangsmaterial der Bodenbildung. Die Werteverteilungen sind als Boxplot Diagramme dargestellt. Die Mittellinie bildet den Tiefengradienten der Medianwerte in den einzelnen Bodenhorizonten ab. Die Wertestreuungen in den einzelnen Horizonten sind als Boxplots dargestellt. Rechts von der Grafik sind die Median- und Mittelwerte der Vorräte der einzelnen Horizonte in Tonnen pro Hektar aufgelistet. In blau sind die Werte der Erst-, in grün die der Zweitbeprobung dargestellt. Jeweils rechts davon sind die Differenzen zwischen den Werten der Erst- und Zweitbeprobung als Zu- und Abnahmen im Beprobungszeitraum von 15 Jahren aufgelistet. In den letzten zwei Zeilen sind Summen über alle Horizonte zu finden.

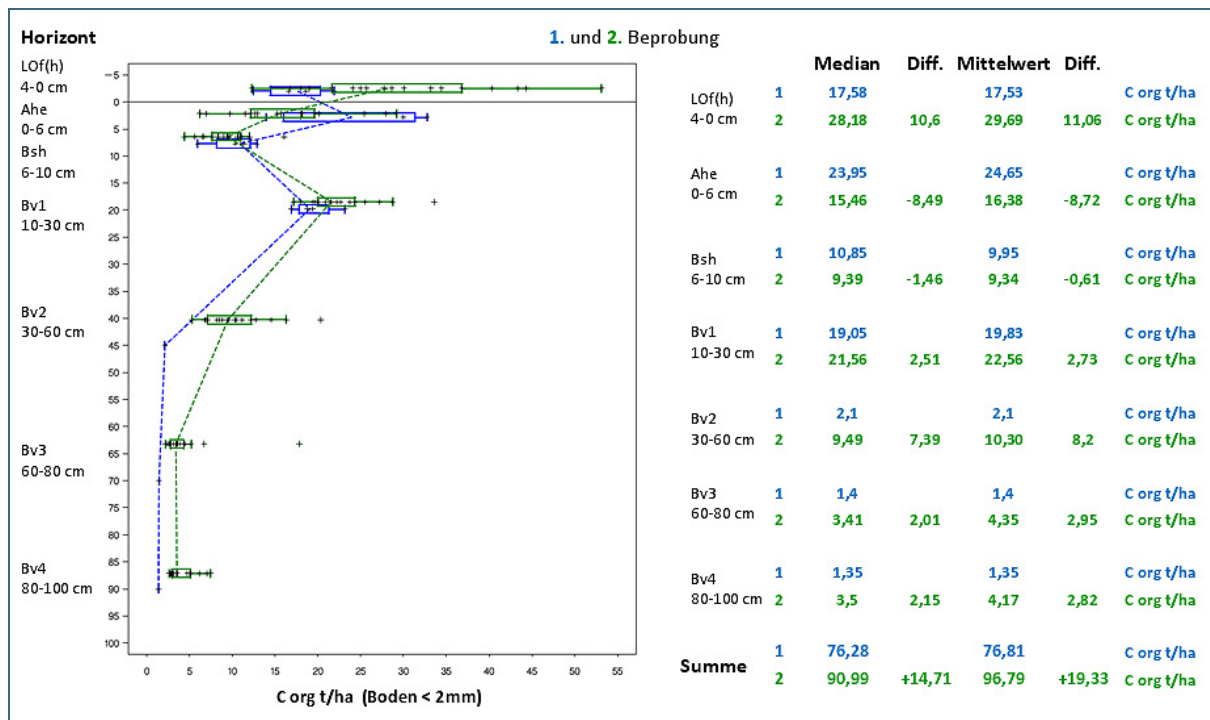


Abb. 1: Tiefengradienten der Kohlenstoffvorräte über die Bodenhorizonte der BDF Geisenfeld 1 (links) und die jeweiligen Vorratswerte als Median und Mittelwert mit den Differenzen zwischen Erst- und Zweitbeprobung (rechts). Blau sind die Werte der ersten, grün die der zweiten Beprobung abgebildet.

Die Vorräte an organischem Kohlenstoff in den Horizonten lassen sich in drei Bereiche aufteilen. Den Auflagehorizont mit deutlicher Zunahme innerhalb von 15 Jahren, die zwei obersten Mineralbodenhorizonte mit mehr oder weniger starker Abnahme und die darunterliegenden Bodenhorizonte mit teilweise deutlichen Zunahmen.

Diese Verteilung wirft mehrere Fragen auf. Ist die Zunahme auf eine erhöhte Streuzufuhr oder die noch nicht abgeschlossene Erholung von starken Nutzungseingriffen bis zur Streunutzung in der Vergangenheit oder beides zurückzuführen? Dies wären plausible Erklärungsansätze. Oder sind das Resultate der Bodenprobenahme von unterschiedlichen Abgrenzungen der Auflage vom Mineralboden bei den zwei Probenahmen? Dafür besteht der Verdacht bei unterschiedlichen Horizontmächtigkeiten. Oder ist die Verteilung ein Resultat unterschiedlicher Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Analyseverfahren bei den zwei Beprobungen? Verdächtig sind in diesem Zusammenhang die Unterschiede in den untersten drei Bodenhorizonten.

Wenig realistisch sind jedenfalls die Größenordnungen der Zunahme in der Summe über alle Horizonte, die beim Median einen jährlichen Zuwachs von rund 1 t/ha und beim Mittelwert von 1,3 t/ha an organischem Kohlenstoff bedeuten würde. Die Bodenentwicklung seit der letzten Eiszeit mit rund 10.000 Jahren hat zu einem Ausgangswert der Kohlenstoffvorräte von rund 75 - 76 t/ha bei der Erstbeprobung geführt. Die Zunahme in den letzten 15 Jahren von rund 15 - 20 t/ha ist damit als sehr extrem einzustufen. Selbst katastrophale Sturm- oder Hagelereignisse zwischen den Beprobungen könnten diesen Zuwachs durch außergewöhnlich hohe Streuzufuhr nur annähernd verursacht haben. Zudem könnten solche Extremereignisse sich im Wesentlichen nur auf die organische Auflage des Bodens auswirken. Messungen des Streufalls an den Bayerischen Waldklimastationen über rund 10 Jahre geben durchschnittliche Werte für den jährlichen Eintrag der Kohlenstoffvorräte durch den Streufall (Blätter/Nadeln, Zweige und Früchte) in einer Größenordnung von 2 t/ha an. Der Anteil der Blätter/Nadeln trägt ca. 2/3 zum Eintrag bei. Abhängig von Wuchsgebiet, Standort und Baumart liegen die Werte zwischen 1 - 3 t/ha und schwanken in den einzelnen Jahren innerhalb dieser Spannen zum Teil erheblich. Da für die Bilanzierung der Vorräte an organischem Kohlenstoff im Boden nur die Feinbodenfraktion (< 2 mm) untersucht wurde, kann die Vorratzzunahme zwischen den beiden Probenahmen nur auf eine Teilfraktion der Streu bezogen werden.

Die Relation zwischen Eintrag von organischem Kohlenstoff und dessen Abbau und Mineralisation ist, was die Größenordnungen anbelangt, hier sehr fraglich.

Um darauf Antworten zu finden, muss man sich die Eingangsgrößen der Vorratsberechnung ansehen. Der Vorrat an organischem Kohlenstoff berechnet sich aus dem Gewicht der Feinbodenfraktion (< 2 mm) der Bodenprobe, dem Probenvolumen, der Mächtigkeit des beprobten Horizontes und dem Gehalt des organischen Kohlenstoffs in der Feinbodenfraktion des Horizontes nach der Formel:

Vorrat Corg = (Gewicht / Probenvolumen) * Mächtigkeit * Corg.

Die Größe (Gewicht / Probenvolumen) wird als Lagerungsdichte oder Synonym als Trockenrohdichte (TRD) bezeichnet.

Im Idealfall sollten sich im Vergleich der Probenahmen die Lagerungsdichten und Horizontmächtigkeiten mit Ausnahme der humosen Auflage nicht verändert haben. Für die Vorratsveränderungen wären dann im Wesentlichen die veränderten Gehalte verantwortlich. Allerdings ist davon auszugehen, dass die beprobten Flächen nicht 100 % homogen sind und die Parameter einer Streuung unterliegen, die auch mit hohen Probenzahlen nicht gänzlich erfasst werden. Zudem können Prozesse wie Quellen und Schrumpfen, oder Verdichtung z. B. durch Befahrung nicht ausgeschlossen werden. Gerade die Oberbodenbereiche sind hier als empfindlich anzusehen.

In der folgenden Abbildung sind die Tiefenverläufe der TRD und der Gehalte des organischen Kohlenstoffs gegenübergestellt.

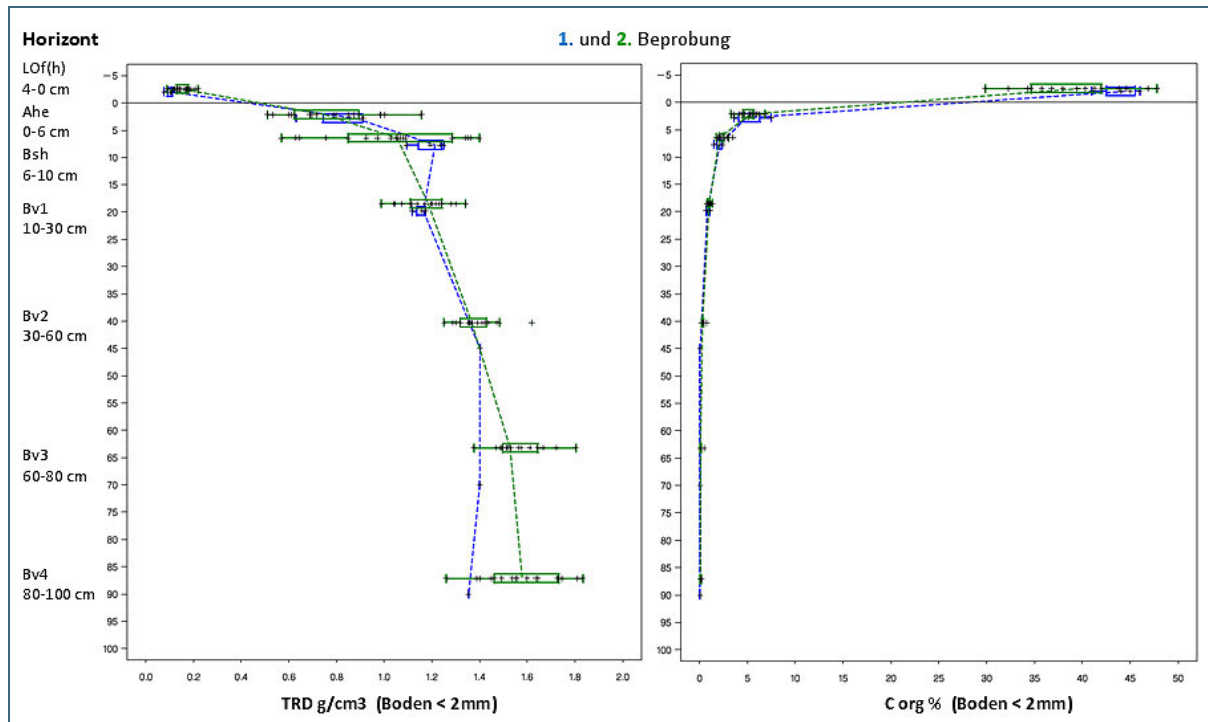


Abb. 2: Tiefengradienten der Trockenrohichte (TRD) (links) und der Gehalte der organischen Substanz (rechts) über die Bodenhorizonte der BDF Geisenfeld 1. Blau sind die Werte der ersten, grün die der zweiten Beprobung abgebildet.

Bei den Werten der Tiefengradienten der Abbildung 2 wird deutlich, dass Unterschiede in den Horizontmächtigkeiten, den Lagerungsdichten und den Gehalten des organischen Kohlenstoffes zwischen den beiden Probenahmen bestehen.

Bei gleichen Horizontmächtigkeiten müssten die Boxplots genau übereinander liegen. Eine wesentliche Ursache für die Unterschiede ist hier in den unterschiedlichen Probenahmeverfahren zwischen Erst- und Zweitbeprobung zu sehen. Im Gegensatz zur zweiten Bodenprobenahme mit 18 Probenahmepunkten auf der Fläche mit einer Tiefe von in der Regel 1 Meter, wurden bei der ersten Probenahme 12 Probenahmepunkte auf der Fläche bis zu einer Tiefe von 30 Zentimeter beprobt und diese zu 4 Mischproben vereint. Die anschließenden Werte von 30 Zentimeter bis zu 1 Meter stammen vom Bodenprofil der BDF. Dies hat deutliche Auswirkungen auf die Vorräte, wenn man einzelne Horizonte miteinander vergleicht. In der Summe über das ganze Bodenprofil sollten diese Unterschiede allerdings keine sehr große Rolle spielen, gleiche Gesamttiefe vorausgesetzt. Die deutlichen Differenzen der Gesamtvorräte an organischem Kohlenstoff zwischen den Beprobungen können daher vor allem über Veränderungen der Lagerungsdichte und oder der Gehalte zustande kommen.

Bei den Gehalten sehen wir bei den Tiefengradienten bis auf die organische Auflage nur sehr geringe Unterschiede zwischen den beiden Probenahmen. Die Werte der Zweitbeprobung sind in allen Horizonten bis auf die der Auflage tendenziell etwas höher, was aber nicht einfach durch eine Zunahme über alle Bodenbereiche innerhalb von 15 Jahren erklärt werden kann. Dafür könnten Unterschiede in der Analytik der beiden Probenahmeterminen, besonders in der Verbesserung der Nachweisgrenzen bei der Zweitbeprobung bei geringen Gehalten verantwortlich sein. Dieser Effekt macht sich vor allem in den Unterbodenhorizonten bemerkbar. Dies soll noch durch Nachanalysen von Rückstellproben der Erstbeprobung geklärt werden. Schließlich muss noch die deutliche Abnahme der Gehalte des organischen Kohlenstoffes in der organischen Auflage diskutiert werden. Eine derart starke Abnahme der Kohlenstoffgehalte in der zugeführten Streu ist nicht plausibel. Die einzig wahrscheinliche Ursache da-

für kann nur ein Beprobungseffekt sein. Einen Hinweis dafür liefern die Horizontmächtigkeiten der beiden obersten Bodenhorizonte. Die Horizontmächtigkeit der organischen Auflage wuchs von 4 cm bei der Erstbeprobung auf 5 cm bei der Zweitbeprobung an, die Horizontmächtigkeit des darunter liegenden Mineralbodenhorizontes Ahe verringerte sich von 6 cm bei der Erstbeprobung auf 5 cm bei der Zweitbeprobung. Voraussichtlich wurde die Grenze zwischen Auflage und Mineralboden zwischen Erst- und Zweitbeprobungen um ca. 1 cm versetzt gezogen. Dabei wurde bei der Zweitbeprobung der organischen Auflage ein höherer Anteil an Mineralboden beprobt und dadurch der Gehalt an organischem Kohlenstoff deutlich gesenkt. Dies zeigt wie gerade dieser Übergangsbereich mit seinem extrem steilen Gehaltsgradienten äußerst empfindlich auch kleine Unterschiede bei der Probenahme aufzeigt. Einen zweiten Hinweis liefern die Werte der Lagerungsdichten in diesen zwei betrachteten Horizonten. Höhere Mineralbodenanteile müssen auch zu höheren Lagerungsdichten führen, da das spezifische Gewicht der Mineralbodenpartikel deutlich über denen der organischen Substanz liegt. Dies zeigen die Werte der Zweitbeprobung in der Auflage und umgekehrt im darunterliegenden Mineralbodenhorizont Ahe.

Damit ist der schwierigste Bereich der Vorratsberechnung angesprochen. Bekanntermaßen sind die Probenahme und die Messung bodenphysikalischer Parameter, wie die der Lagerungsdichte sehr arbeits- und zeitaufwendig. Zudem kommt die Standardbestimmung der Lagerungsdichte mit Hilfe von Stechrahmen schon ab Bodenskelettgehalten von 15 - 20 % an ihre Grenzen. Auf der vorgestellten BDF mit sehr schwach steinigem, schwach tonigem Sand bis reinem Sand (siehe oben, BDF Steckbrief) findet man fast ideale Verhältnisse für die Bestimmung der Lagerungsdichte vor. Trotzdem sind in den Tiefengradienten der Lagerungsdichte bei den zwei Beprobungen deutliche Unterschiede zu erkennen. Bei den vier Horizonten im Oberbodenbereich wurden bei beiden Beprobungen vergleichbare Probenahmeverfahren angewandt. Bei den drei Unterbodenhorizonten unterscheiden sich die Probenahmeverfahren dagegen deutlich. Auffällig ist im Oberbodenbereich die Differenz der Werte im Bsh Horizont. Die Schwankungsbreite bei der Horizontmächtigkeit ist hier sehr ausgeprägt, ebenso die der Gehalte an organischem Kohlenstoff. Bei den zwei untersten Horizonten ist der Unterschied der Werte ebenfalls sehr deutlich. Während der Tiefengradient der Lagerungsdichte bei der Zweitbeprobung einen Verlauf mit kontinuierlicher Zunahme mit der Tiefe aufweist, der auch den Erwartungen entspricht, zeigt der Tiefengradient der Erstbeprobung auffällige Schwankungen auf. Die sind nicht von vornherein als fehlerhaft einzuordnen, da Schichtungen und, oder Anreicherungs- oder Verarmungshorizonte dafür verantwortlich sein können, die vielleicht bei der Zweitbeprobung nicht richtig erfasst worden sind. Entscheidend ist, dass Unterschiede der Lagerungsdichte in diesen Größenordnungen zumindest in den Unterbodenhorizonten nicht durch natürliche oder menschlich verursachte Einwirkungen im Zeitraum von 15 Jahren zu erklären sind.

Da alle drei Faktoren der Vorratsberechnungen Veränderungen aufweisen und die oben diskutierten Einflüsse alle als Verursacher in Frage kommen, wird die Interpretation der Ergebnisse schwierig. Eine Möglichkeit um hier mehr Klarheit zu bekommen, ist einen Blick auf die Einflussgröße jedes einzelnen Faktors auf den Vorrat des organischen Kohlenstoffs zu werfen. Die folgende Tabelle zeigt dies am Beispiel der Vorratsmittelwerte der Bodenprofilhorizonte.

Horizont	Beprobung	Mittelwert t/ha			Differenz t/ha
		TRD	H-Mä	C org	
LOf(h)	1	17,59			
	2	29,69			12,16
	Anteil Veränd.	+54 %	+25 %	-11 %	68 %
Ahe	1	24,65			
	2	16,38			-8,27
	Anteil Veränd.	-6 %	-24 %	-2 %	-32 %
Bsh	1	9,95			
	2	9,34			-0,61
	Anteil Veränd.	-16 %	+1 %	+12 %	-3 %
Bv1	1	19,83			
	2	22,56			2,73
	Anteil Veränd.	+1 %	-1 %	+15 %	15 %
Bv2	1	2,1			
	2	10,3			8,2
	Anteil Veränd.	-1 %	-21 %	+412 %	390 %
Bv3	1	1,4			
	2	4,35			2,95
	Anteil Veränd.	+12 %	+11 %	+187 %	210 %
Bv4	1	1,35			
	2	4,17			2,82
	Anteil Veränd.	+17 %	+28 %	+162 %	207 %
Summe	1	76,81			
	2	96,79			19,98

Tab. 2:
Die Kohlenstoffvorräte der BDF Geisenfeld 1 als Mittelwert mit den Differenzen zwischen Erst- und Zweitbeprobung und die Anteile der Faktoren Trockenrohdichte, Horizontmächtigkeit und Gehalt an organischem Kohlenstoff an der Veränderung der Vorräte in Prozent. Blau sind die Werte der ersten, grün die der zweiten Beprobung abgebildet, gelb sind die Faktoren mit dem größten Einfluss hervorgehoben.

Die Zahlen machen deutlich, welche Faktoren in welchen Horizonten bestimmend für die Veränderung verantwortlich sind. Damit wird die Interpretation und Fehlersuche bei unplausiblen Ergebnissen wesentlich erleichtert.

Die untersten drei Horizonte im Bodenprofil scheiden wegen der extremen und damit unplausiblen Gehalterhöhung aus der Betrachtung und Kalkulation der Vorräte aus, bis die Nachanalyse von Rückstellproben aus der Erstbeprobung weitere Ergebnisse liefert. Aus dem Tiefenverlauf der Gehalte des organischen Kohlenstoffs in der Grafik der Abbildung 2 wird das so nicht ersichtlich.

So bleiben noch die obersten vier Horizonte für einen Vorratsvergleich übrig. Die vergleichbare Teufe liegt dann bei 30 cm Mineralbodentiefe. Die folgende Tabelle zeigt dies am Beispiel der Vorratsmittelwerte der Bodenprofilhorizonte.

Horizont	Beprobung	Mittelwert	Differenz
		t/ha	
LOf(h)	1	17,59	
	2	29,69	11,96
Ahe	1	24,65	
	2	16,38	-8,27
Bsh	1	9,95	
	2	9,34	-0,61
Bv1	1	19,83	
	2	22,56	2,73
Summe	1	71,96	
	2	77,97	6,01

Tab. 3:
Die Kohlenstoffvorräte der BDF Geisenfeld 1 als Mittelwert mit den Differenzen zwischen Erst- und Zweitbeprobung bis 30 cm Mineralbodentiefe. Blau sind die Werte der ersten, grün die der zweiten Beprobung abgebildet.

Betrachtet man diese Zahlen, so ist in der Bilanz innerhalb von 15 Jahren der Vorrat an organischem Kohlenstoff um ca. 6 t/ha angestiegen. Das sind rund 0,4 t/ha im Jahr. Diese Werte erscheinen zwar selbst für den Oberbodenbereich immer noch als hoch, nähern sich aber realistischeren Größenordnungen an wie zuvor über das ganze Bodenprofil betrachtet. Auch hier ist noch abzuwarten ob die Nachanalyse der Rückstellproben die Kohlenstoffgehalte der Erstbeprobung noch verändert und wenn, dann vermutlich etwas nach oben und damit die Vorratsdifferenz weiter reduziert. An den Faktoren Horizontmächtigkeit und Lagerungsdichte lässt sich allerdings nachträglich nichts mehr korrigieren und damit sind auch die Grenzen der Korrekturen und Verbesserungen im BDF Programm aufgezeigt.

Da die weiteren Untersuchungen zur Kohlenstoffanalyse noch ausstehen, muss an dieser Stelle ein erster Schlusstrich bei der BDF Geisenfeld 1 bei der Vorratsbilanzierung gezogen werden.

Das Beispiel zeigt am Untersuchungsparameter organischer Kohlenstoff, mit welchen Problemen man bei der Arbeit von Vorratsvergleichen konfrontiert werden kann. Die Ergebnisse müssen umfangreich hinterfragt und interpretiert werden. Das Beispiel zeigt aber auch, dass man diesen Schwierigkeiten nicht vollkommen hilflos gegenüber steht, sondern diese durch die umfangreichen Informationen aus dem BDF Programm auch eingeschränkt und bearbeitet werden können.

Man hat vor 25 Jahren beim Start des ehrgeizigen BDF Programms in weiten Bereichen Neuland betreten. Viele der Probleme und Schwächen des ursprünglichen Programms zeigen sich erst in den letzten Jahren, in denen man mit den Wiederholungsbeprobungen und Vergleichen innerhalb der Zeitreihen begonnen hat.

Daraus resultierend, muss das Vorgehen bei den nächsten Beprobungszyklen an diese Herausforderungen angepasst werden. Die Ergebnisse aus dem Bereich von Bodeninventuren liefern inzwischen zusätzliche Vergleichszahlen und durch die weiter steigende Zahl der BDF Ergebnisse bekommt das BDF Programm eine Richtschnur für reelle Größenveränderungen. Hinzu kommt, dass z. B. der Wissensstand zum organischen Kohlenstoff in Böden in vielen Bereichen noch unzureichend ist. Als ein Beispiel seien hier die unterschiedlichen Fraktionen des organischen Kohlenstoffs und deren Alter genannt. Das sind Bereiche an denen derzeit intensiv gearbeitet wird, vor allem mit BDF Probenmaterial und deren Ergebnisse nicht nur für das BDF Programm wesentliche Informationen liefern werden.

Literatur

SCHUBERT, A. (2002): Bayerische Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen. –Bodenuntersuchungen- Forstliche Forschungsberichte, München 2002, Nr. 187, 232 S.

KLEIN, D. und C. SCHULZ (2011): Wälder und Holzprodukte als Kohlenstoffspeicher. Eine Betrachtung für Bayern. LWFaktuell 85, Freising 2011, S. 40-43.

25 Jahre Bodendauerbeobachtung in Bayern – Nutzen und Grenzen?

Anmerkungen aus Sicht des Bayerischen Landesamtes für Umwelt

Bernd Schilling, Bayerisches Landesamt für Umwelt

1 Einleitung

In Bayern wurden seit Mitte der Achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts neue Wege bei Bodenuntersuchungen eingeschlagen. Damals hatte man festgestellt, dass allein mit einer einmaligen Bodenzustandserhebung viele Fragen des Bodenschutzes nicht zu beantworten waren. Deshalb wurden sogenannte Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) eingerichtet. Dabei haben sich nutzungsabhängig die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (ehemals: Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau), die Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (ehemals: Bayerische Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt) und das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) (ehemals: Bayerisches Geologisches Landesamt) die Aufgabe geteilt. Während die LfL seit 1985 landwirtschaftliche Praxisflächen (Acker, Grünland, Sonderkulturen) und die LWF forstwirtschaftliche Flächen beobachtet, richtete das LfU ab 01. April 1986 auf sogenannten Sonderstandorten (Ballungsräume, Naturschutzgebiete) diese Langzeitbeobachtungsflächen ein.

2 Ziele

Die drei Behörden haben ihre Ziele und Vorgehensweisen so abgestimmt, dass sich die Einzelergebnisse gegenseitig ergänzen.

So richtete die LfL ein besonderes Augenmerk auf Einflüsse von Bewirtschaftungsmaßnahmen, die LWF auf die Nährstoffversorgung und die Wuchsleistungen von Bäumen und das LfU auf den Eintrag von luftgetragenen Schadstoffen. Wie in Bayerns BDF die Standortauswahl, die Einrichtung, die Probenahme und die Analytik zu erfolgen hat, wurde in dem Arbeitsheft des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen und des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (LBP, FVA & GLA, 1990) zusammengefasst. Bundesweit folgte ein Arbeitsheft der Sonderarbeitsgruppe „Informationsgrundlagen Bodenschutz“ der Umweltministerkonferenz (SAG, 1991), das die Grundlage für ein abgestimmtes Vorgehen bei der Bodendauerbeobachtung in ganz Deutschland bildete. Die wichtigsten Ziele waren hierbei:

- Feststellen der gegenwärtigen Merkmale und Eigenschaften von Böden sowie ihrer Belastungen an boden- und landschaftsrepräsentativen Standorten.
- Langfristige Ermittlung von Bodenveränderungen infolge standort-, belastungs-, nutzungs- und bewirtschaftungsspezifischer Einflüsse durch periodische Untersuchungen des Bodenzustands und/oder durch Bilanzierung des Stoffhaushaltes der Böden. Aus den Veränderungen soll die Empfindlichkeit von Böden ermittelt und die zukünftige Entwicklung prognostiziert werden, um im Sinne des Vorsorgeprinzips rechtzeitig Maßnahmen zum Schutz des Bodens und seiner vielfältigen Funktionen ergreifen zu können.
- Einrichtung von Versuchsflächen zur Entwicklung von Auswertemodellen.
- Einrichtung von Referenzflächen für regionale Belastungen.

Diese Vorgaben bilden auch heute noch die Leitlinien für ein länderübergreifend abgestimmtes Vorgehen bei der Bewertung der Ergebnisse der Bodendauerbeobachtung.

3 Probleme

Die wichtigsten Probleme bei der Bodendauerbeobachtung entstehen in erster Linie durch den Wechsel:

- beim Personal: Das Wissen in vielen Bereichen der Bodendauerbeobachtung geht verloren, wenn Sachbearbeiter oder Probenehmer andere Aufgaben zugewiesen bekommen.
- bei der Bewirtschaftung auf landwirtschaftlichen Flächen (z.B. Umbruch von Grünland, pfluglose Verfahren statt Pflug), da diese Bewirtschaftungsänderungen sich auf die Ergebnisse auswirken.
- bei der Probenahme: Erkenntnisse aus den Auswertungen haben zu Änderungen in der Probenahmemethodik geführt. Dies wirkt sich natürlich auf die Ergebnisdaten aus.
- bei der Analytik: Analyseverfahren verändern sich im Laufe der Zeit aufgrund neuer Erkenntnisse. Dem muss Rechnung getragen werden. Es kann aber auch beim Vergleich der Messdaten dazu führen, dass Korrekturfaktoren eingesetzt werden müssen.

Insgesamt ist bei der Bodendauerbeobachtung im besonderen Maße auf eine lückenlose Dokumentation der Tätigkeiten zu achten, um die Probleme durch den Wechsel in den verschiedenen o. g. Teilbereichen minimieren zu können.

4 Nutzen

Die Ergebnisse der Bodendauerbeobachtung sind für den Bodenschutz von besonderem Wert. So wurden bundesweit BDF eingerichtet, die anhand der flächenrepräsentativen Erhebung von Daten den Schwankungsbereich von Stoffgehalten im Boden mit einer Genauigkeit abbilden, die kein anderes Bodenschutzprogramm wie z.B. die bundesweite Bodenzustandserhebung erreicht. Mit der Untersuchung von Bodenproben über lange Zeiträume kann die Bodendauerbeobachtung Antworten auf verschiedenste Fragestellungen geben:

- So stellt die Bodendauerbeobachtung eine wichtige Datenquelle für nationale und internationale Datenanfragen dar, die für länder- und nationenübergreifende, qualitativ hochwertige Datenauswertungen wie z.B. die Bestimmung von Hintergrundwerten verwendet werden.
- Bei evtl. Schadensfällen kann die BDF über die an archivierten „Altproben“ rekonstruierte Belastungshistorie als Referenzfläche und zur Beweissicherung dienen. Zum Beispiel konnte im Raum Burghausen durch Untersuchung von zwei nahe gelegenen BDF nachgewiesen werden, dass perfluorierte Tenside (PFT) schon 1986 im Boden vorhanden waren und dass die Konzentrationen im Laufe der Zeit zugenommen haben (SPÖRLEIN & HANGEN, 2009). Bereits kurz nach der Einrichtung der BDF waren beim Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 durch vergleichende Messungen vor (Rückstellproben) und nach dem Ereignis bayernweit regional differenzierte Aussagen zur Radionuklidbelastung landwirtschaftlich genutzter Böden möglich. Darüber hinaus konnte mit den BDF aufgrund vorliegender Bewirtschaftungsdaten auch rasch mit einem Monitoring der Ernteprodukte und Wirtschaftsdünger reagiert werden.
- Die Wirksamkeit von eingeleiteten Maßnahmen kann überprüft werden. So wurde in Deutschland Ende der achtziger Jahre des letzten Jahrtausends bleifreies Benzin eingeführt. Diese Abnahme des Eintrags konnte über die auf allen 132 landwirtschaftlichen BDF durchgeführten Immissionsmessungen und über die Konzentrationen der austauschbaren Ionen im Boden schon 1994 an den BDF des LfU sowie in den Nadeln und organischen Auflagen der jüngsten Untersuchungen der LWF nachgewiesen werden. Die Immissionsmessungen zeigten auch zeitnah den Rückgang der Schwefel-Einträge v. a. auch in grenznahen Gebieten nach der po-

litischen Wende 1989 und in der Folge des Einbaus von Filtern in tschechischen Braunkohlekraftwerken.

- Ähnlich wie bei Vorsorgeuntersuchungen im medizinischen Bereich stellt auch die Bodendauerbeobachtung ein wichtiges Werkzeug der Prävention für evtl. schädliche Bodenveränderungen dar. Bei der Vorsorgeuntersuchung wünscht man sich, dass das Ergebnis kein positiver Befund ist bzw. dass man eine sich abzeichnende Krankheit noch rechtzeitig erkennt und entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten kann. In gleicher Weise müssen durch eine Bodendauerbeobachtung Fehlentwicklungen rechtzeitig erkannt werden, damit gegengesteuert werden kann. Denn die Gesundung eines wirklich „kranken“ Bodens ist im Vergleich zu den Kompartimenten Wasser und Luft in den seltensten Fällen erreichbar. Wird anhand des Ergebnisses einer Vorsorgeuntersuchung noch kein akuter Handlungsbedarf erkannt, bedeutet dies aber nicht, dass sie eingestellt werden kann.

5 Grenzen

Obwohl die Bodendauerbeobachtung räumlich und zeitlich hoch auflösende Daten bietet, können mit ihr (noch) nicht alle Fragestellungen des Bodenschutzes ausreichend beantwortet werden. So sind zum Beispiel:

- die periodischen Untersuchungen noch zu weit gestreckt (i. d. R. ca. 10 Jahre). In der Folge stehen oft noch nicht genügend Daten aus zeitlich unterschiedlich durchgeführten Beprobungsaktionen zur Verfügung, um klare und v. a. flächenscharfe Trends erkennen zu können. Grundsätzlich ist es notwendig, zumindest an ausgewählten BDF das „Rauschen“ der Ausprägungen der beobachteten Parameter (verursacht durch externe Einflüsse wie z.B. die Witterung, durch unvermeidbare Probenahme- und Laborfehler) anhand von eng hintereinanderliegenden Beprobungsterminen einschätzen zu können. Daher beprobt z.B. das LfU diese ausgesuchten Flächen alle drei Jahre.
- eindeutige allgemeine Trends nur schwer zu erkennen, da sich diverse Einflüsse regional unterschiedlich ausgeprägt überlagern können (z.B. Änderung von Klima, Bewirtschaftung, Immissionen),
- Personal-, Probenahme und Analytikwechsel auch in Zukunft nicht auszuschließen. Dieser dadurch potentiell entstehende Informationsverlust kann am Besten durch eine präzise Beschreibung der Arbeiten aufgefangen werden. Am LfU hat sich beispielsweise die Erstellung sogenannter SOP's (Standard Operating Procedures) bewährt.
- geeignete Auswertemethoden noch nicht ausgereift genug, um möglichst alle Indizien für Veränderungen im Boden möglichst schnell zu entdecken. Daher sollte vor allem auch bundesweit nach einer einheitlich Vorgehensweise bei der Bewertung von Vergleichsdaten gesucht werden.

6 Schlussfolgerungen

Bei der Fachtagung haben sich zwei Hauptkenntnisse für eine zielorientierte Fortführung der Bodendauerbeobachtung herauskristallisiert:

- Bodendauerbeobachtung ist mit Ausnahme von einzelnen, sehr spezifischen Dauerfeldversuchen bislang die einzige Möglichkeit, Veränderungen im Boden zu erkennen. Das frühe Erkennen (Diagnose) ist von größter Bedeutung für die Einleitung von Gegenmaßnahmen.
- Der Klimawandel lässt sich gerade wg. der langjährigen und mit hohem Aufwand und Kosten verbundenen, systematischen Wetteraufzeichnungen der letzten 150 Jahre prognostizieren. Beim Boden, einem sehr komplexen Medium sind es derzeit 25 Jahre Beobachtung. Für fundierte Aussagen ist ein noch deutlich längerer Beobachtungszeitraum mit ggf. kürzeren Beprobungsintervallen notwendig.

Literatur

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR BODENKULTUR UND PFLANZENBAU, BAYERISCHE FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT & BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (LBP, FVA, GLA) (1990): Bodendauerbeobachtungsflächen in Bayern – Standortauswahl, Einrichtung, Probenahme und Analytik. – Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen und Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, 44 S.

SONDERARBEITSGRUPPE „INFORMATIONSGRUNDLAGE BODENSCHUTZ“ (SAG) (1991): Bodendauerbeobachtungsflächen. - Arbeitshefte, 1. München. 56 S.

SPÖRLEIN, P & HANGEN, E. (2009): Boden-Dauerbeobachtung – ein Archiv für die Zukunft. - Bodenschutz, 3/09. Marburg. 77-79.