

# Waldbodenzustandsbericht für Thüringen - Auswertung der BZE II -

Karl Burse<sup>1</sup>, Angela Schlutow<sup>2</sup>, Fabian Stubenrauch<sup>2</sup>,  
Thomas Scheuschner<sup>2</sup>, Hans-Dieter Nagel<sup>2</sup> und Regine  
Weigelt-Kirchner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei Jägerstraße 1, 99856 Gotha

<sup>2</sup> ÖKO-DATA Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH, Hegermühlenstraße 58, 15344 Strausberg



## Vorwort

Die Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) ist eine bundesweite, systematische Stichprobeninventur mit dem Ziel insbesondere chemische Veränderungen durch überwiegend anthropogen bedingte Belastungen im Waldboden zu ermitteln und um daraus Schlüsse für Politik und Praxis ziehen zu können. Die Vernetzung mit anderen Programmen wie z. B. der Waldschadenserhebung (WSE) komplettiert und untermauert gewonnene Ergebnisse.

Die Erstaufnahme der Bodenzustandserhebung (BZE-I) erfolgte in Thüringen im Jahre 1992, nach nunmehr 14 Jahren (2006 und 2007) wurde die Zweitaufnahme mit verfeinerten Aufnahme- und Labormethoden durchgeführt. Die Arbeitsanleitung hierfür wurde durch die Bund-Länder-Arbeitsgruppe BZE-II erarbeitet. Für die Analysierung der Bodenproben liegt das „Handbuch Forstliche Analytik“ (HFA) zu Grunde, welches von dem BMELV-Gutachterausschuss „Forstliche Analytik“ (GAFA) erarbeitet wurde.

Die Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei hatte die Aufgabe die Zweitaufnahme durchzuführen. Die organisatorische Vorbereitung und praktische Durchführung wurde von Herrn J. Schwerhoff bewältigt, ihm zur Seite stand Herr R. Süß, dem neben Beschreibungen, Probenahme und Dateneingabe sowie Datenübermittlung auch die Fotodokumentation oblag, sowie Herr W. Heer, der die Nadel- und Blattprobenentnahme mit den Zapfensteigern der Forstsamtgutberatungsstelle und Darre in Fischbach (FoA Schmalkalden) organisierte. Für das parallel laufende BioSoil-Projekt führten Frau Hannusek-Biermann sowie die Herrn Dr. Reinhardt, Hohnvehlmann und Brandner von der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Referat Bodenkunde und Bodenschutz die Bodenprofilbeschreibungen durch, die auch von der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei genutzt wurden.

Die Thüringer Forstämter unterstützten die Anlage der Bodenprofile.

Alle Proben (Boden, Humus, Nadel/Blatt) wurden von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Abteilung Untersuchungswesen unter Leitung von Herrn Dr. Leiterer analysiert. Für die Ermittlung der Analysenwerte danken wir Herrn Dr. Kießling (Referatsleiter Boden- und Düngemittelanalytik), Herrn Dr. König (Referatsleiter Probenlogistik und Auswertung), Herrn Dr. Schöne (Referatsleiter Futtermitteluntersuchung) sowie den Laborleitern Frau Dr. Kirmse (anorganische Analytik) und Herrn Dr. Paul (Bodenphysik). Die Königswasseraufschlüsse für die

Tiefenstufen 0-5 und 5-10 cm wurden von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) vom Fachbereich 2.4 Boden als Ressource vorgenommen.

Das Institut für Waldökologie und Waldinventuren des Johann Heinrich von Thünen-Institut - Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei stellte die Datenbank zur Verfügung.

Zuletzt sei noch die Firma ÖKODATA genannt, die unter Leitung von Frau Dr. Schlutow die Auswertung der Ergebnisse der BZE-II durchführte.

Allen genannten Personen und Institutionen sei für die Mitwirkung und kollegiale Zusammenarbeit herzlich gedankt.

Gotha, xx. xx. 2010

Karl Burse

Referatsleiter für Standorts- Boden- und Vegetationskunde



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>I. Ziele</b> .....	<b>8</b>
<b>II. Aufnahmemethodik</b> .....	<b>11</b>
1. Erhebungsraster .....	11
2. Punktdokumentation .....	11
3. Probenahme .....	12
<b>III. Analytik</b> .....	<b>13</b>
<b>IV. Ergebnisse</b> .....	<b>15</b>
1. Allgemeine Probepunktdaten .....	15
1.1 Topographie und Relief.....	15
1.2 Temperatur und Niederschlag .....	16
1.3 Bestandstypen .....	17
1.4 Standörtliche Verhältnisse.....	19
1.5 Standortgruppen .....	25
1.6 Ergebnisse der Kronenzustandserfassung (A. Wenzel) .....	28
2. Ergebnisse der Waldzustandserhebung.....	29
2.1 Ergebnisse der Nadel- und Blattanalysen .....	29
2.1.1 Hauptnährelemente.....	33
2.1.2 Spurenelemente.....	54
2.2. Zusammenfassung und Trends im Vergleich von BZE-I zu BZE-II.....	81
<b>3. Kennwerte der organischen Auflage</b> .....	<b>83</b>
3.1 Vorkommende Humusformen in Thüringen.....	83
3.2 Menge und Mächtigkeit der Humushorizonte .....	84
3.3 Chemische Kennwerte der organischen Auflage .....	87
3.3.1 pH-Werte.....	87
3.3.2 Kohlenstoff – C .....	97
3.3.3 Stickstoff – N.....	104
3.3.4 Phosphor – P .....	110
3.3.6 Calcium – Ca .....	116
3.3.7 Magnesium – Mg .....	120
3.3.8 Kalium – K.....	124
3.3.9 Eisen – Fe.....	127
3.3.10 Aluminium – Al.....	131

3.3.11 Mangan – Mn.....	134
3.3.12 Blei – Pb.....	138
3.3.13 Kupfer – Cu.....	141
3.3.14 Zink – Zn.....	144
3.3.15 Cadmium – Cd.....	148
3.3.16 Weitere Schwermetalle und Schadstoffe.....	151
3.3.17 Zusammenfassung zu den Elementgehalten in der organischen Auflage .....	156
<b>4. Kennwerte des Mineralbodens.....</b>	<b>158</b>
4.1 pH-Werte.....	158
4.2 Kationenaustausch .....	168
4.2.1 Kationenaustauscherkapazität – KAK .....	168
4.2.2 Austauschbare Kationen.....	171
4.2.3 Basensättigung .....	184
4.2.4 Austauschbare Vorräte .....	189
4.3 Gehalte an organischer Substanz, Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor im Mineralboden . .....	203
4.3.1 Organische Substanz .....	203
4.3.2 Kohlenstoffgehalt .....	206
4.3.3 Stickstoffgehalt .....	210
4.3.4 C/N – Verhältnis.....	217
4.4 Kationen- und Anionengehalt im wässrigen 1:2 Extrakt.....	220
<b>5. Diskussion, Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>234</b>

## I. Ziele

Die Ziele der BZE-II in Thüringen entsprechen denen der „Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald“, herausgegeben vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), 2. Auflage, November 2006, entnommen. Die Ziele unterscheiden sich naturgemäß nicht grundsätzlich von denen der BZE-I, wurden aber mittlerweile erweitert. Eine Reihe von neuen Fragestellungen, die überregionale Bedeutung haben, lassen sich nur durch die Zusammenarbeit mit den Ländern beantworten, die ein Mosaikstein vom Ganzen sind.

Anlass für die BZE-I war insbesondere die Sorge um eine flächendeckende Nährstoffverarmung und Versauerung der Waldböden durch Eintrag sogenannter Säurebildner aus Luftverunreinigungen in Form von Schwefel- und Stickstoffverbindungen. Entsprechend lautete der Auftrag zur BZE-I:

*„Die BZE soll zuverlässige, flächenrepräsentative und bundesweit vergleichbare Informationen liefern*

*über den aktuellen Zustand der Waldböden und deren Veränderungen im Laufe der Zeit in Verbindung mit dem aktuellen Kronenzustand der Waldbäume ...,*

*für eine bessere Übertragbarkeit der Ergebnisse der Waldbodenforschung auf größere Waldflächen,*

*als Beitrag zur Identifizierung von Ursachen der Veränderung des Bodenzustandes sowie des Einflusses von Depositionen,*

*zur Einschätzung von Gefahren, die sich für den derzeitigen Waldzustand und für die nächste Waldgeneration aus dem Bodenzustand ergeben,*

*zur Einschätzung von Risiken für die Qualität von Grund-, Quell- und Oberflächenwasser*

*zur Planung und Durchführung von notwendigen Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Bodenzustandes sowie des Nährstoffangebotes im Boden und der Nährstoffaufnahme durch die Baumwurzeln.“*

Dieser Auftrag galt auch für die BZE-II. Neue Erkenntnisse, neue politische Anforderungen und neue gesetzliche Aufgaben machten es aber notwendig, in der Zielsetzung der BZE-II neue Aspekte zu berücksichtigen. Die BZE-II soll zuverlässige, flächenrepräsentative und bundesweit vergleichbare Beiträge liefern zu:

- Bodenversauerung (Pufferfunktion)
- Schadstoffbelastung (Filter- Stoffumwandlungsfunktion),
- Stickstoffsättigung (Stoffumwandlungsfunktion),
- Kohlenstoffspeicherung (Stoffumwandlungsfunktion),
- Wasserhaushalt unter veränderten Klimabedingungen,
- Waldböden als natürliche Produktionsgrundlage der Forstwirtschaft (Standortsnachhaltigkeit).

Innerhalb der vorgenannten Themen soll die BZE-II Folgendes leisten:

- Es soll ein Inventar von zentralen Bodeneigenschaften erstellt werden
- Es soll ein Beitrag zum besseren Verständnis ökosystemarer Zusammenhänge geleistet werden, v. a zu den Fragen:
  - Wie wirken verschiedene Bodeneigenschaften auf Waldernährung,
  - Waldwachstum, Kronenzustand und Sickerwasserqualität?
  - Welche Einflüsse sind für die Eigenschaften von Waldböden verantwortlich?
- Es sollen Ergebnisse von Intensiv-Messflächen aus dem Level II-Programm oder anderen Fallstudien mit Hilfe von Schlüsselparametern der BZE auf die Flächen übertragen werden.
- Es sollen Veränderungen von Bodeneigenschaften im Zeitraum zwischen BZE-I und BZE-II aufgedeckt und erklärt werden.
- Aus den Bodeneigenschaften sollen Bewertungen für die Risikoabschätzung sowie für die Planung und Kontrolle von Maßnahmen abgeleitet werden.“

Ergänzend zu den Bodendaten kommen auch die Analysen von Nadeln und Blättern hinzu, um

- den aktuellen Ernährungszustand und die Schadstoffbelastungen (soweit Schadstoffe von Blattorganen gespeichert werden) der Waldbäume dessen Veränderungen im Laufe der Zeit zu charakterisieren, sowie
- die Datenbasis zur Identifizierung der Ursachen von Waldschäden zu verbreitern.



Untersuchungsschwerpunkte der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (Entwurf J. Schwerhoff, TLWJF 2007, in Anlehnung an „Konzeptpapier-2005“, BMVEL)

## **II. Aufnahmemethodik**

### **1. Erhebungsraster**

Grundlage für die Auswahl der Punkte, an denen die Erhebung und Probenahme zur BZE erfolgten, war das Raster der Waldschadenserhebung. Aus diesem Netz wurde jeder 4. Punkt, im Rahmen eines 8 x 8 km Rasters, dessen Grundlage des europäische 16 x 16 km Raster bildet, in die Untersuchung einbezogen. Für Thüringen ergaben sich daraus insgesamt, unabhängig von Eigentumsverhältnissen 98 mit Wald bestandene Punkte, 3 Punkte mehr gegenüber der BZE-I. Unberücksichtigt blieben zum Wald zählende, aber dauerhaft keinen Baumbewuchs aufweisende Flächen, sogenannter Nichtholzboden.

### **2. Punktdokumentation**

Die übergroße Mehrheit der Probepunkte war wieder auffindbar und konnte wieder beprobt werden. Eine geringe Anzahl war durch Wirtschaftsmaßnahmen zerstört, nicht mehr auffindbar (Dickungsstadium), musste notwendigerweise verlegt werden oder wurde, da neu hinzugekommen, neu angelegt. Für die Neuanlagen und nicht auffindbaren und zerstörten Punkte (entsprechen Neuanlage) galt, dass die Stirnseite des Bodenprofils dicht am BZE-Mittelpunkt liegt. Um die Wiederauffindbarkeit der Punkte zu gewährleisten, wurden sie dauerhaft mit Magneten im Boden markiert. Die Bodenprofile, sowie der Bestand wurden fotodokumentarisch festgehalten.

Ansonsten wird auf die „Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald“, 2. Auflage, November 2006, verwiesen.

Ferner wurden 2007/08 an 85 Punkten Vegetationsaufnahmen angefertigt, an 13 Punkten war keine Vegetation vorhanden (Dickung, Dunkelstadium).

Von sämtlichen Proben (Nadel/Blatt, Humus und Boden) wurden Teilmengen im Probenarchiv der Thüringer Standortserkundung archiviert.

### 3. Probenahme

Die Probenahme erfolgte durch ein 2-Mann-Team zwischen April und November der Jahre 2006 und 2007. Die Masse der Profile (51) erreichte eine Tiefe von 140 cm, 33 Profile lagen zwischen 100 – 135 cm, 10 Profile waren tiefer (bis 160 cm), lediglich 4 Profile schwankten zwischen 70 – 90 cm Tiefe. Das bedeutet, dass 96% aller Punkte tiefer als 100 cm beprobt werden konnten.

Die Probenahme erfolgte nach Tiefenstufen (0-5, 5-10, 10-30, 30-60, 60-90, 90-140, 140-200 cm). Dabei wurde bei skeletthaltigen Punkten das Profil entsprechend beprobt. Punkte, die kein Skelett erwarten ließen (z. B. Löss oder Buntsandstein) wurde an vier Satellitenpunkten (Haupt-Himmelsrichtungen) bzw. an acht Satellitenpunkten (einschließlich Neben-Himmelsrichtungen) bis zu einer Tiefe von 90 cm Boden als Mischprobe entnommen, die restlichen Tiefenstufen wurden wiederum am Profil entnommen. Die Tiefenstufen bis 10 cm wurden generell an den Satellitenpunkten beprobt. Die Probemenge lag etwa bei 2 kg Trockenmasse. Die Probenahme für die Bodenphysik (Trockenraumdichte und exakter Skelettgehalt) erfolgte mit Stechzylindern (100 cm<sup>3</sup> oder 250 cm<sup>3</sup>) für Böden die skelettfrei waren und mit dem Densitometer für Böden, wo die Stechzylinder auf Grund des Skelettgehalts nicht mehr eingesetzt werden konnten. Es wurden 500 cm<sup>3</sup> Boden entnommen.

Die Probenahme des Auflagehumus erfolgte volumenrecht mittels Stechrahmen als Mischprobe, grundsätzlich an allen acht Satellitenpunkten. Dabei wurden die 3 Humushorizonte getrennt beprobt, bei Horizontmächtigkeiten unter 1 cm wurden zwei Horizonte zusammengefasst, (z. B. Of + Oh, wenn Oh < 1 cm war).

Die Nadel- und Blattentnahme erfolgte grundsätzlich für die vier Hauptbaumarten (Fichte, Kiefer, Buche, Eiche), dabei wurden je Punkt 3 gesunde Bäume der Kraft'schen Klassen 1 und 2 beprobt. Sofern Nebenbaumarten bestandesbildend waren, wurden sie ebenfalls beprobt. Bei den Nadelbaumarten wurden dem 7. - 15. Quirl der 1. und 2. Nadeljahrgang, der Lärche der Vorjahrestrieb und den Laubbäumen aus der Oberkrone Proben entnommen. Verjüngungen und Kulturen wurden nicht in die Beprobung einbezogen. Den Laubhölzern sowie der Baumart Lärche wurden von Mitte Juli bis Mitte August, also vor dem Einsetzen der Herbstverfärbung, die Blattproben entnommen, den Nadelhölzern in der Winterruhezeit, also je nach Höhenlage zwischen Oktober und Februar.

### III. Analytik

Die Analysierung aller Proben erfolgte durch die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Abteilung Untersuchungswesen mit Ausnahme der KWA Boden TS 0 – 10 cm. Das Labor der TLL nahm an allen Ringanalysen mit sehr guten Ergebnissen teil.

Im Einzelnen wurden folgende Verfahren angewendet:

Allgemeingültige Verfahren für Nadel/Blatt, Humus und Boden

Parameter	Verfahren	Norm
N	Gesamtstickstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)	DIN ISO 13878: 1995
C	org. (und Gesamtkohlenstoff) nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)	DIN ISO 10694 (1996)
Königswasser	Königswasserlösliche Elemente mit AAS u. ICP-OES	HFA A3.3.3
pH-H <sub>2</sub> O	pH-Wert in H <sub>2</sub> O mit Potentiometrie	HFA 3.1.1.2
pH-KCl	pH-Wert in 1N KCl mit Potentiometrie	HFA 3.1.1.4
pH-CaCl <sub>2</sub>	pH-Wert in 0,01 N CaCl <sub>2</sub> mit Potentiometrie	HFA 3.1.1.7
CaCO <sub>3</sub>	org. (und Gesamtkohlenstoff) nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)	DIN ISO 10694 (1996)
Cr	Flammen-AAS	DIN EN 1233.3: 1996-07
Cu	Flammen-AAS	DIN 38406-E7-1:1991-09
Ni	Flammen-AAS	DIN 38406-E11-1:1991-09
Pb	Flammen-AAS	DIN 38406-E6-1:1998-07
Zn	Flammen-AAS	DIN 38406-E8-1:1980-10
Cd	Graphitrohr-AAS	DIN EN ISO 5961:1995-05
Hg	Kaltdampf-AAA	DIN EN 1483:1997-05
As	ICP-MS	DIN EN ISO 17294-2:2005-
Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na,	ICP-OES	DIN EN ISO 11885:1997-

## Spezielle Verfahren

### NADEL-BLATT:

Parameter	Verfahren	Norm
Gewicht	1000-Nadelgewicht, 100-Blattbewicht	HFA B 2.2, 2.3
Trockensubstanz	Trockenschrank	VDLUFA MB BD. III, 3.1
Ca, Na, Mg, K, Mn, Al, Fe, P, Cu, Zn, S, Br, Cl, Si, Sr	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	HAUSMETHODE SOP VI-260-01
Mikrow.-Druckaufschluss	mit HNO <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Gemisch in	HAUSVERFAHREN
Fluorid	ISE nach Schmelzaufschluss	VDLUFA MB VII:1996
Cd, Pb	ICP-MS	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02

### HUMUS:

Parameter	Verfahren	Norm
TM	Trockenschrank	MB VDLUFA BD IA 2.1.1
SRSt>20mm	Siebung/Wägung	HFA 1.3.1
Einwaage/Rückwaage	Einwiegen	VDLUFA MB BD.III, Pkt.2
Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al, H <sup>+</sup>	Ake mit ICP-OES/Potentiometrie	HFA 3.2.1.9

### BODEN:

Parameter	Verfahren	Norm
Grobboden, Feinboden	Massebestimmung	ICP-FORREST MANUAL IIIA
Trockenmasse ges.	Trockenmasse ges.	DIN ISO 11465
Rohdichte trocken	Trockenrohndichte	DIN ISO 11272 (1994)
Grobsand bis Ton	Körnungsanalyse nach KÖHN	MB VDLUFA BD. IC 3.2.1
As	Hydrid-AAS	DIN EN ISO 11969:1996-11
T-Wert, KAK (Na, K, Ca, Mg, Mn)	potentielle Austauschkapazität u. austauschbare Kationen mit F-AAS	DIN 19684/8 (1977)
Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al, H <sup>+</sup> (KAKeff)	Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (Ake) mit ICP-OES/Potentiometrie	HFA 3.2.1.1
1:2 Bodenextrakt	Extraktion mit Wasser 1:2	BZE-Arbeitsanl.: 1994-07
Al, Mn	ICP-MS	DIN EN ISO 17294-2:2005-02
pH-Wert	Potentiometrie	DIN 38404-C5: 1984-01
Sulfat, Nitrat	Ionenchromatographie	EN ISO 10304-1: 1995-04

## **IV. Ergebnisse**

### **1. Allgemeine Probepunktdaten**

Gegenüber der BZE-I sind 3 Punkte in das Rasternetz neu aufgenommen worden (ein Punkt vormals Nichtholzboden (NHB), ein Punkt Ackeraufforstung, ein Punkt lag genau auf Wald/Feldgrenze, durch neue Einmessung konnte er in den Wald verlegt werden). Dadurch erweitern sich die zu beschreibenden Parameter, diese werden für die drei Neuzugänge nicht extra aufgeführt, sondern sind bereits in den allgemeinen Angaben einbezogen.

#### **1.1 Topographie und Relief**

##### **1.1.1 Höhenlage**

Die Masse der Punkte, nahezu 50%, liegen in den Höhenstufen 301 – 400 m NN und 401 – 500 m NN, der rechnerische Durchschnitt liegt dabei bei 445 m NN und sie gehören somit der submontanen Höhenstufe an. Nur drei Punkte liegen unterhalb 200 m NN (Thüringer Becken) und nur ein Punkt liegt oberhalb 800 m NN. Auf den montanen Bereich des Thüringer Gebirges, Frankenwaldes, Oberen Vogtlandes und der Rhön (501 – 1000 m NN) entfallen 30% der Punkte, so dass etwa 20% auf die colline Höhenstufe entfallen.

##### **1.1.2 Hangneigung**

Etwa 25% der Punkte befinden sich in ebenen Lagen ( $< 3^\circ$  Neigung), 13% der Punkte entfallen auf den schwach geneigten Bereich ( $3^\circ - 5^\circ$ ), der standortskundlich mit zum Plateau, also eben, gestellt wird. Der mäßig geneigte Bereich ( $6^\circ - 10^\circ$ ) und der Lehnhangbereich ( $11^\circ - 20^\circ$ ) halten sich mit 24% etwa die Waage, steil geneigt (Lagen über  $20^\circ$  Neigung) hingegen sind 14% der Punkte und über  $45^\circ$  Neigung ist nur bei einem Punkt ermittelt worden.

##### **1.1.3. Hangrichtung**

Wie oben bereits angegeben befinden sich 25% der Punkte in ebener Lage. Punkte, die einer Exposition zugeordnet werden können, weisen am häufigsten (25%) die Punkte in Süd- und Südwest-Richtung, am geringsten (5%) in Ost-Richtung. Der Anteil der restlichen Himmelsrichtungen liegt jeweils um 10%.

## 1.2 Temperatur und Niederschlag

Diese meteorologischen Daten, der Messperiode von 1951 bis 1980, hängen sehr stark von der Höhenlage und von der Lage im Luv oder Lee vom Thüringer Gebirge ab. Die Jahresdurchschnittsniederschläge liegen in Thüringen zwischen 441 mm in Artern und 1340 mm an der Schmücke im Thüringer Wald. Bei einer Zuordnung aller Probepunkte zu einer Niederschlagsgruppierung in 100 mm-Stufen ergibt sich folgende Verteilung:

Tabelle 1: Verteilung der Höhenstufe auf Probepunkte

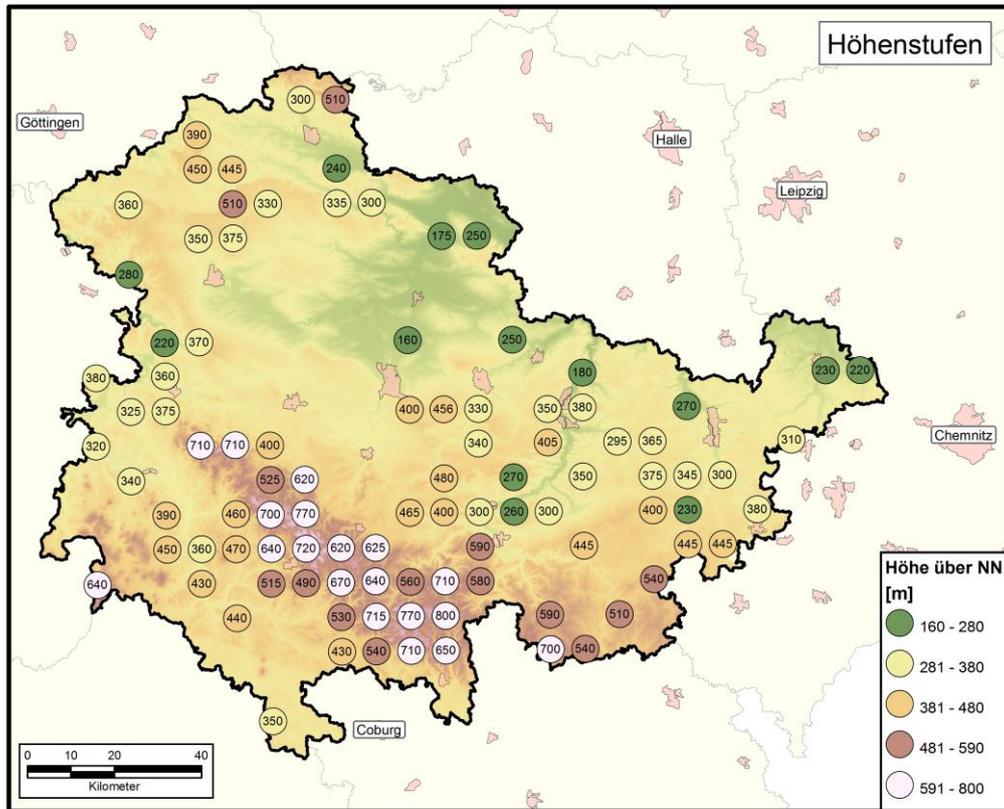
< 500 mm	kein Punkt
501 – 600 mm	24 Punkte
601 – 700 mm	33 Punkte
701 – 800 mm	16 Punkte
801 – 900 mm	8 Punkte
901 – 1000 mm	7 Punkte
1001 – 1100 mm	6 Punkte
1101 – 1200 mm	4 Punkte
> 1200 mm	kein Punkt

Die Temperaturen hängen noch stärker als die Niederschläge von der Meereshöhe ab. Bei einer Gruppierung aller Klimastationen in Thüringen nach 100 m-Höhenstufen errechnen sich folgende Mittelwerte der Jahresdurchschnittstemperaturen:

Tabelle 2: mittlere Temperatur pro Höhenstufe

< 200 m NN	8,4°C (11 Stationen)
201 – 300 m NN	7,9°C (19 Stationen)
301 – 400 m NN	7,6°C (18 Stationen)
401 – 500 m NN	6,8°C (7 Stationen)
501 – 600 m NN	6,5°C (5 Stationen)
601 – 700 m NN	5,9°C (4 Stationen)
701 – 800 m NN	5,1°C (3 Stationen)
801 – 900 m NN	5,0°C (1 Stationen)
> 901 m NN	4,2°C (2 Stationen)

Die Temperaturen stellen nicht den Durchschnittswert für die Höhenstufe dar, sondern dokumentieren nur die Temperaturabnahmetendenz mit zunehmender Meereshöhe.



Karte 1: Höhenstufen

## 1.3 Bestandstypen

### 1.3.1 Baumarten

Die Masse der Punkte (83) bildeten Reinbestände, lediglich 15 Bestände waren Mischbestände. Um die Auswertung, insbesondere für Humus, zu erleichtern, wurden die Mischbestände, in Abhängigkeit vom Anteil der Baumarten, einer Hauptbaumart zugeordnet. Im Einzelnen erfolgte die Zuordnung dergestalt, dass

- die Eschen-Ahorn-Mischbestände zur Esche
- der Hainbuchenbestand zur Eiche
- der Eichen-Kirschenbestand zur Eiche
- die Lärchenbestände zur Kiefer
- die Kiefern-Fichten-Mischbestände zur Kiefer

- die Buchen-Fichten-Mischbestände zur Buche
- die Eichen-Kiefern-Mischbestände zur Eiche sowie
- die Sukzessionsfläche zur Fichte

gestellt wurden. Letztere Fläche deswegen, da der Vorbestand geworfen wurde und die Humusverhältnisse durch die Fichte geprägt waren. Daraus ergibt sich folgende Verteilung nach Hauptbaumarten und eine Veränderung gegenüber der BZE-I:

Tabelle 3: Baumartenverteilung auf BZE- Probepunkte

Baumart	BZE-I	BZE-II	Veränderung
BU	20	18	- 2
EI	8	8	0
ES	4	6	+2
FI	40	43	+3
KI	23	23	0

Die Veränderungen lassen sich durch Katastrophe (Kyrill), Räumung des Oberbestandes und durch Selektion in Mischbeständen sowie durch Bestandszugänge erklären, letztere wiederum kompensieren „Ausfälle“. Im Einzelnen haben sich folgende Veränderungen ergeben:

1 BU >> ES, 1 BU >> FI, 1 EI >> KI, 2 KI >> FI, 1 FI >> KI, 1 FI >> Sukzession (FI).

Im Ergebnis ist allerdings festzustellen, dass keine gravierenden Veränderungen stattgefunden haben, so dass man sagen kann, die Bestandszusammensetzung ist nahezu konstant geblieben.

### 1.3.2 Altersklassen

Lag das Schwergewicht bei der BZE-I auf der 5. (20%) und auf der 2. Altersklasse (17%), so liegt es bei der BZE-II naturgemäß auf der 6. und 3. Altersklasse. Einen deutlichen Unterschied zur BZE-I bildet die 7. Altersklasse, lag die 6. Altersklasse noch bei 10%, so liegt heute die 7. Altersklasse um die Hälfte niedriger. Ansonsten liegen die Anteile für die restlichen Altersklassen in vergleichbaren Bereichen zwischen 13% und 16% für die jüngeren Altersklassen und zwischen 1% und 5% für die Altersklassen ab 7.

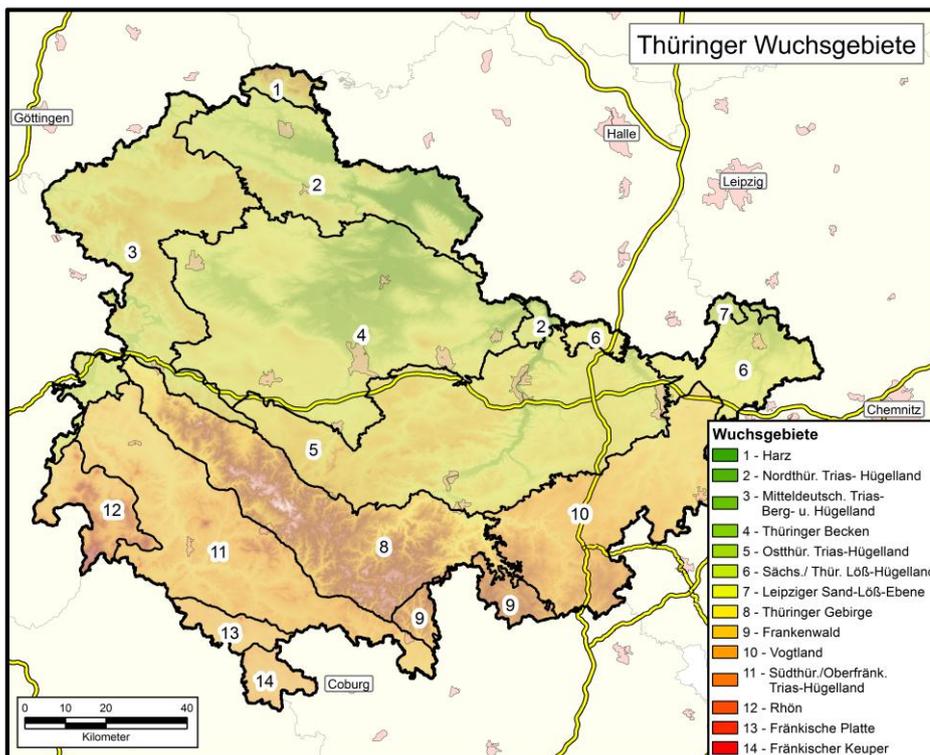
## 1.4 Standörtliche Verhältnisse

### 1.4.1 Wuchsgebiete

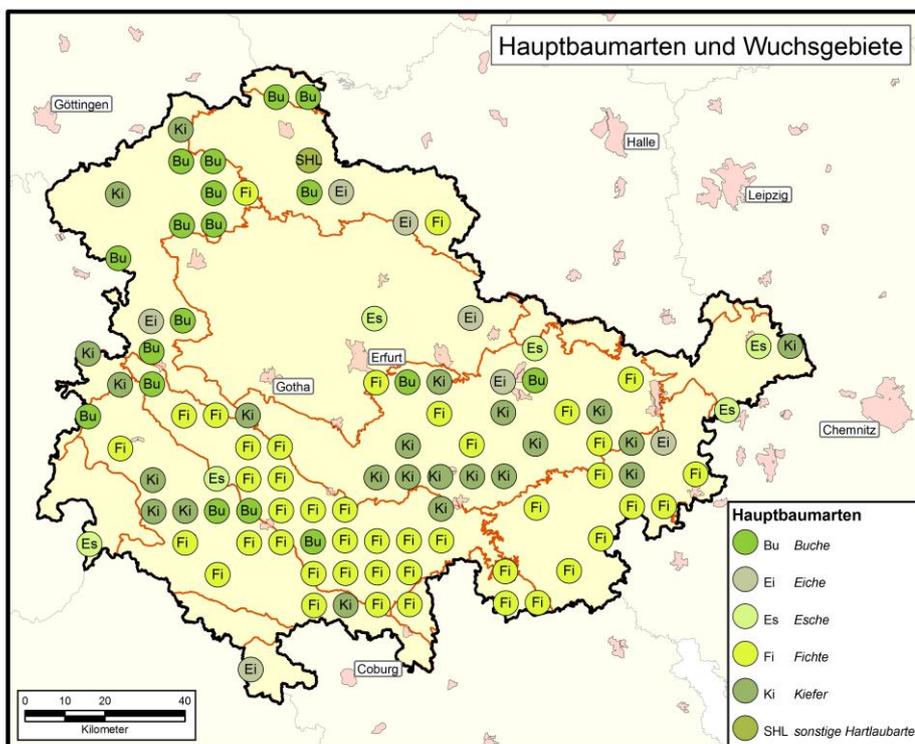
Die Punkte verteilen sich auf die Wuchsgebiete wie folgt, wobei zu den unterstrichenen jeweils ein Punkt gegenüber der BZE-I hinzukam:

Tabelle 4: Wuchsgebiete Thüringens

8	Thüringer Gebirge (53)	23 Punkte
5	Ostthür. Trias-Hügelland (33)	20 Punkte
3	Mitteldeutsches Trias-Berg- u. Hügelland (37)	13 Punkte
11	Südthür.-Oberfränk. Trias-Hügelland (52)	13 Punkte
10	<u>Vogtland (54)</u>	10 Punkte
2	<u>Nordthür. Trias-Hügelland (35)</u>	6 Punkte
9	Frankenwald (57)	4 Punkte
6	<u>Sächsisch-Thür. Löß-Hügelland (31)</u>	3 Punkte
1	Harz (36)	2 Punkte
4	Thüringer Becken (34)	2 Punkte
12	Rhön (51)	1 Punkt
14	Fränkischer Keuper (61)	1 Punkt
7	Leipziger Sandlöß-Ebene (32)	kein Punkt
13	Fränkische Platte (62)	kein Punkt



Karte 2: Hauptbaumarten und Wuchsgebiete



Karte 3: Hauptbaumarten und Wuchsgebiete

## 1.4.2 Substrate

Die geologische Ausgangssituation ist sehr vielgestaltig. Im Einzelnen wurden folgende Ausgangssubstrate ermittelt:

Tabelle 5: Ausgangssubstrate

Holozäne Bildung	1 Punkt
Schlufflehme	12 Punkte
Basalt	1 Punkte
Granit	2 Punkte
Grauwacke	2 Punkte
Porphyr, Konglomerat	14 Punkte
Quarzit	1 Punkt
Sandstein	25 Punkte
Schiefer	23 Punkte
Ton	2 Punkte
Lehm	2 Punkte
Karbonatgestein	18 Punkte

Diese verschiedenen Ausgangsgesteine wurden zu 6 Substratgruppen zusammengefasst, die die Grundlage für die Auswertungen bildeten.

Tabelle 6: Substratgruppen

L	Schlufflehme	13 Punkte
C	Karbonatgesteine	20 Punkte
E	Eutrophe Silikatgesteine	7 Punkte
R	Rotliegendgesteine	14 Punkte
F	Schiefer	22 Punkte
S	Sandsteine	22 Punkte

Zur Gruppe der Schlufflehme (L) wurden alle Lößlehme über 30 cm Mächtigkeit, unabhängig vom Liegenden, gestellt. Auf 5 Flächen bildet Muschelkalk, auf 2 Flächen Buntsandstein, auf je 1 Fläche Liaston und Keuperton den Untergrund. 3 Punkte weisen mehr als 1 m Mächtigkeit auf, so dass der Untergrund im Prinzip keine Rolle mehr spielt, dasselbe gilt für die holozäne Bildung (Niederungsboden).

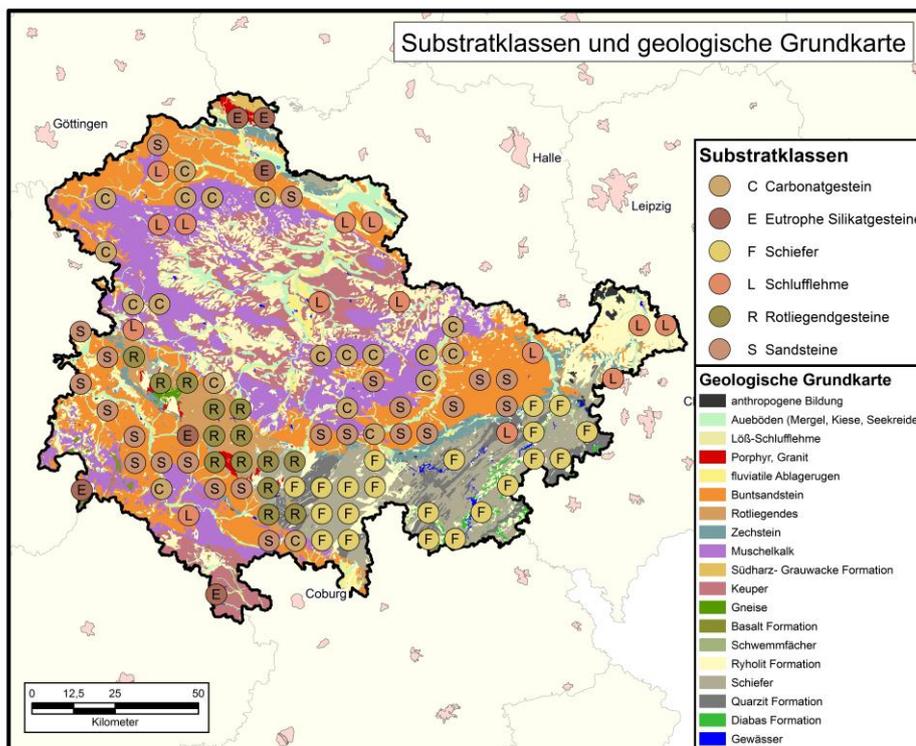
Zur Gruppe der Karbonatgesteine (C) wurden alle Kalkgesteine des Muschelkalks (Unterer und Oberer Muschelkalk, die Kalksteinverwitterungsdecken (Unterer und Mittlerer Muschelkalk) sowie der karbonathaltige Rötton gestellt.

Die Gruppe der eutrophen Silikatgesteine (E) ist recht heterogen. Sie umfasst Basalt, Keuperton, Grauwacke, Porphyrit sowie Buntsandstein. Gemeinsam ist ihnen, dass sie alle zur Nährkraftstufe „kräftig“ gestellt sind und somit eine relativ hohe Basensättigung aufweisen, die sich besonders in der Vegetation niederschlägt.

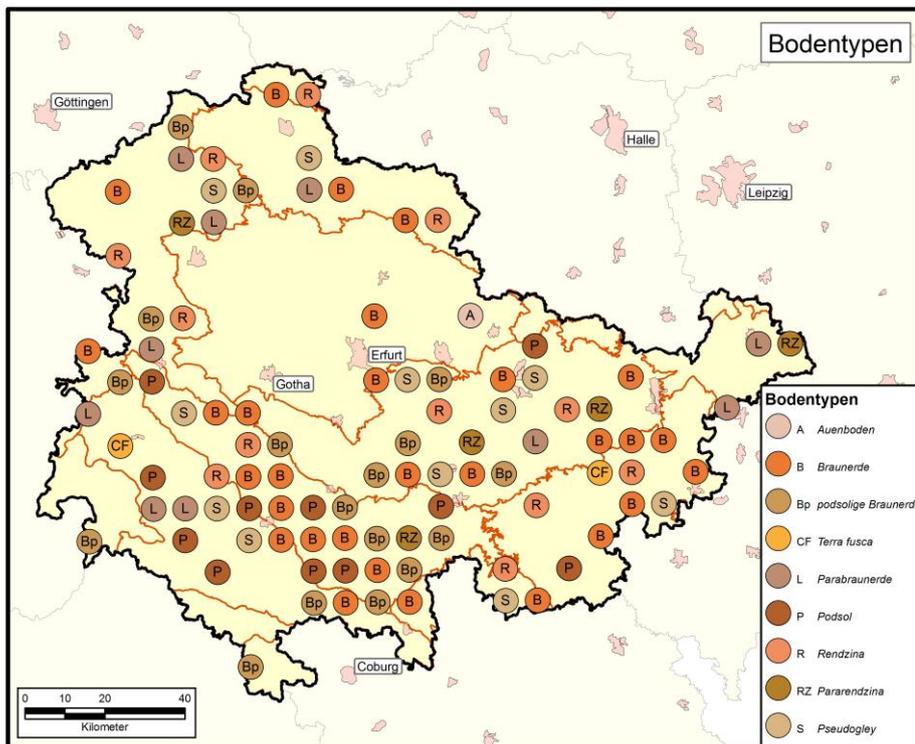
Die Gruppe Rotliegendgesteine (R) umfasst sowohl die Vulkanite, wie die Porphyre (Rhyolite) als auch die Sedimente, hier Konglomerate des Rotliegenden, und die beiden Granitpunkte, auch wenn sie stratigrafisch nicht zum Perm gehören.

Zur Gruppe der Schiefer (F) wurden alle vorpermischen mehr oder weniger geschieferten Gesteine (Tonschiefer, quarzitische Schiefer) sowie Grauwacken und Quarzite gestellt.

Bei der Gruppe der Sandsteine (S) handelt es sich ausschließlich um Buntsandsteine, wobei die Mehrzahl der Punkte (19) auf Mittlerem Buntsandstein zu finden sind. Pedogene Unterschiede, wie Lettenbänder oder Lößearbeitungen in das Sandsteinmaterial blieben dabei unberücksichtigt, wichtig war die mittlere und schlechtere Trophie (M und Z).



Karte 4: Substratklassen und geologische Grundkarte



Karte 5: Bodentypen

### 1.4.3 Bodentypen

Insgesamt wurden 23 Bodentypen und Bodensubtypen ausgeschieden.

Rendzina (12)	Rendzina (RRn)	7 Punkte
	Braunerde-Rendzina (BB-RR)	5 Punkte
Pararendzina (5)	Pararendzina (RZn)	5 Punkte
Braunerde (45)	Braunerde (BBn)	24 Punkte
	schwach podsolige B. (p2BB)	9 Punkte
	mäßig podsolige B. (p3BB)	5 Punkte
	stark podsolige B. (p4BB)3	3 Punkte
	Podsol-Braunerde (PP-BB)	1 Punkt
	Parabraunerde-Braunerde (LL-BB)	2 Punkte
	Pseudogley-Braunerde (SS-BB)	1 Punkt
Parabraunerde (11)	Parabraunerde (LLn)	6 Punkte
	Braunerde-Parabraunerde (LL-BB)	3 Punkte
	Pseudogley-Parabraunerde (SS-LL)	2 Punkte

Podsol (11)	Podsol (PPn)	2 Punkte
	Eisenpodsol (PPE)	5 Punkte
	Braunerde-Podsol (BB-PP)	4 Punkte
Terra fusca (2)	Braunerde-Terra fusca (BB-CF)	2 Punkte
Pseudogley (10)	Pseudogley (SSn)	4 Punkte
	Braunerde-Pseudogley	2 Punkte
	Parabraunerde-Pseudogley (LL-SS)	1 Punkt
	Fahlerde-Pseudogley (LF-SS)	3 Punkte
Gley (2)	Gley (GGn)	1 Punkt
	Auengley (GGa)	1 Punkt

Die Normbraunerde wurde 8x auf Schiefer, 6x auf Sandstein, 4x auf Porphyrit und Konglomerat, 2x auf Granit und je 1x auf Porpyrit, Grauwacke und Basalt gefunden. Die podsoligen Braunerden (p2, p3, p4) kamen 9x auf Sandstein, 7x auf Schiefer und 2x auf Porphyrit und Konglomerat vor. Die nächste Abstufung, die Podsol-Braunerde wurde nur 1x auf Sandstein gefunden, wohingegen die Braunerde-Podsole 2x auf Porphyrit und Konglomerat und je 1x auf Sandstein und Schiefer angesprochen wurden. Die Normpodsole und Eisenpodsole konnten 5x auf Porphyrit und 2x auf Sandstein ermittelt werden. Dabei zeigt sich, dass die Sandsteine am häufigsten zur Podsoligkeit (12x) neigen, gefolgt von Schiefer (9x) und Rotliegendmaterial (8x), der hohe Anteil der Braunerde-Podsole und Podsole auf Rotliegendmaterial (7x) dürfte in erster Linie dem rauen Gebirgsklima geschuldet sein. Die Parabraunerde mit ihren Subtypen findet sich auf tiefgründigem Löss sowie über den verschiedenen Grundgesteinen (Schiefer, Sandstein, Ceratitenschichten und Unterem Muschelkalk). Die Bodentypen der Rendzinen, Terra fuscen und Pararendzinen mit ihren Subtypen lassen sich auf allen Stufen des Muschelkalks nachweisen. Eine Pararendzina hingegen wurde auf Röt gefunden, sie dürfte allerdings neben dem reichen Ausgangsgestein noch mit karbonathaltigen Sickerwässern des Unteren Muschelkalks beeinflusst sein. Die Gruppe der Stauwasserböden ist nur durch die Pseudogleye und deren Subtypen (10x) vertreten. So findet man den Normpseudogley 2x auf Schiefer, je 1x auf Sandstein und den Ceratitenschichten. Weiterhin gehören Fahlerde-Pseudogley (2x tiefgründiger Löss, 1x über Schiefer), Parabraunerde-Pseudogley 1x über Ceratitenschichten und Braunerde-Pseudogley (2x auf Sandstein) in diese Gruppe. Als Seltenheiten sind noch ein Auengley über Schiefer und ein Gley als Niederungsboden mit hohen Seekreideanteilen zu erwähnen. An zwei Punkten, ein Fahlerde-Pseudogley und eine Parabraunerde-Braunerde, konnten Ap-Horizonte von 40 cm bzw. 30 cm Mächtigkeit festgestellt werden.

## 1.5 Standortgruppen

Die standörtliche Einordnung der einzelnen Punkte erfolgte nach der Standortgruppeneinteilung entsprechend der SEA 81-C 3.3

### Klimastufen

Folgende forstliche Klimastufen sind den BZE-Aufnahmepunkten zuzuordnen:

**Tabelle 7: forstliche Klimastufen in Thüringen**

Kff	Sehr feuchte Kammlagen	1 Punkt
Hff	Sehr feuchte Höhere Berglagen	4 Punkte
Hf	Feuchte Höhere Berglagen	2 Punkte
Mff	Sehr feuchte Mittlere Berglagen	7 Punkte
Mf	Feuchte Mittlere Berglagen	8 Punkte
Mm	Mäßig feuchte Mittlere Berglagen	8 Punkte
Uff	Sehr feuchte Untere Lagen	10 Punkte
Uf	Feuchte Untere Lagen	23 Punkte
Uk	Mäßig feuchte, kühle Untere Lagen	6 Punkte
Um	Mäßig trockene Untere Lagen	26 Punkte
Ut	Trockene Untere Lagen	2 Punkte
Utt	Sehr trockene Untere Lagen	1 Punkt

Gegenüber der BZE-I wurden die Klimastufen Uk um 1 Punkt und Um um 2 Punkte bereichert.

Bei Betrachtung der forstlichen Höhenstufen ergibt sich folgendes Bild:

**Tabelle 8: forstliche Höhenstufe und Verteilung auf Probepunkte**

Kammlagen	1 Punkt
Höhere Berglagen	7 Punkte
Mittlere Berglagen	22 Punkte
Untere Lagen	68 Punkte

Die Konzentration der Mittleren und Höheren Berglagen sowie der Kammlage finden sich zwangsläufig im Thüringer Gebirge (21 Punkte), Frankenwald (4 Punkte) Vogtland, hier Oberes Vogtland (3 Punkte), Rhön und Harz (je 1 Punkt).

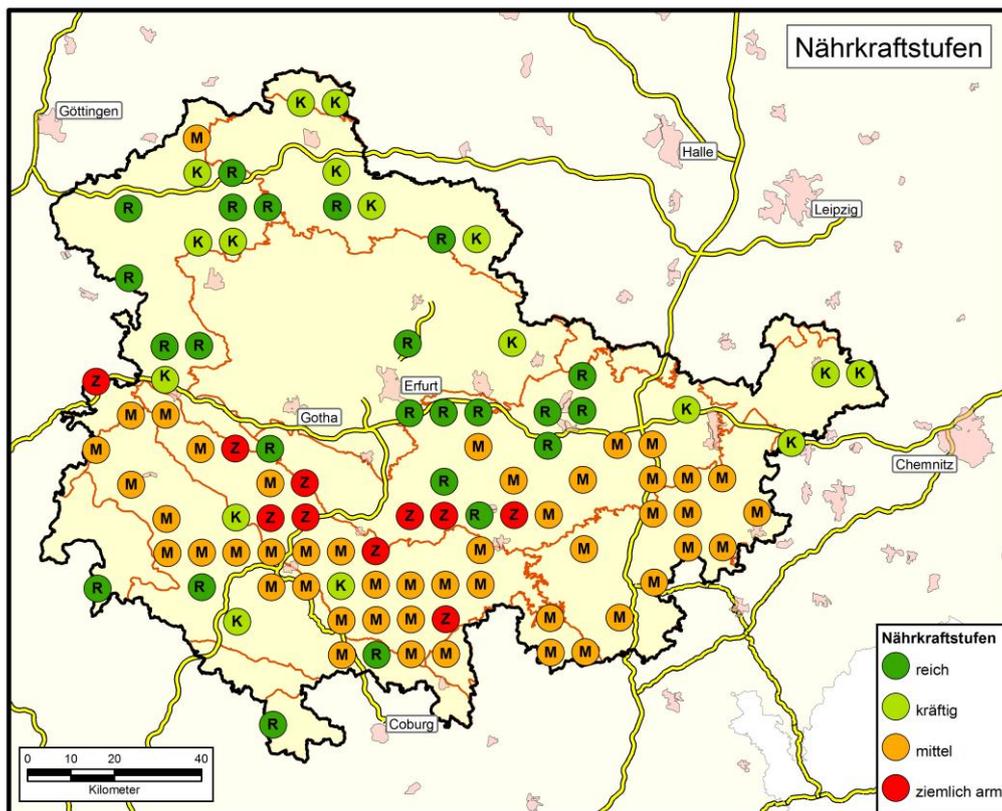
## Nährkraftstufen

Nach der forstlichen 5-stufigen Einteilung in reiche (R), kräftige (K), mittlere (M), ziemlich arme (Z) und arme (A) Standorte ergibt sich folgende Verteilung:

**Tabelle 9: Nährkraftstufe und Verteilung auf Probepunkte**

Nährkraftstufe R	12 Punkte
Untergruppe C	12 Punkte
Nährkraftstufe K	18 Punkte
Nährkraftstufe M	47 Punkte
Nährkraftstufe Z	10 Punkte
Nährkraftstufe A	kein Punkt

Bei der räumlichen Verteilung der Nährkraftstufen fällt auf, dass sich die besser mit Nährstoff versorgten Standorte (Nährkraftstufe R und K) mehrheitlich im zentralen und nördlichen Teil Thüringens (Wuchsgebiet Mitteldeutsches Trias-Berg- und Hügelland, Nordthüringisches Trias-Hügelland, Thüringer Becken und zum Teil Ostthüringer Trias-Hügelland) befinden. Dies ist auf die Verbreitung des Muschelkalks und der Lößdecken zurückzuführen. Die beiden Punkte im Harz repräsentieren nur den Thüringer Anteil, der tatsächlich überwiegend kräftige (K) Standorte enthält. Flächenmäßig überwiegen im gesamten Harz natürlich die mittleren und ziemlich armen Standorte.



Karte 6: Nährkraftstufen

### Wasserhaushalt

Der weitaus meiste Teil der Punkte (90) liegt hinsichtlich des Wasserhaushalts im terrestrischen Bereich, das entspricht 92% der Punkte. Davon zeichnen sich 5 Punkte durch Verdichtung und Nässemerkmale im Unterboden aus. Die meisten Punkte sind dem mäßig frischen Wasserhaushalt zuzuordnen, wohingegen auf die mäßig trockenen Standorte 36 Punkte entfallen. Böden mit Wechselfeuchte finden sich an 7 Punkten und ein Punkt stellt einen Überflutungsstandort dar.

Im Einzelnen ergibt sich folgende Verteilung auf Feuchtestufen:

Tabelle 10: Feuchtestufen und Verteilung auf Probepunkte

(T) 1	frische Standorte	4 Punkte
(T) 2	mäßig frische Standorte	45 Punkte
(T) 2w	mäßig frische Standorte mit Staunässe im Unterboden	5 Punkte
(T) 3	mäßig trockene Standorte	36 Punkte
W2	wechselfrische Standorte	7 Punkte
Ü1	feuchte auenartige Standorte	1 Punkt

## Standortsgruppenübersicht

Die folgende Übersicht stellt einen Auszug aus der Standortsgruppengliederung dar, d.h. alle nicht auftretenden Standortsgruppen wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 11: Standortsgruppenübersicht

	R1	R2	R3	K1	K2	K3	M1	M2	M3	Z2	Z3	WR2	WK2	WM2	ÜR1	Su
<b>Kff</b>								1								1
<b>Hff</b>								1	2		1					4
<b>Hf</b>								1			1					2
<b>Mff</b>					1			3	2		1					7
<b>Mf</b>		1			1			4	1		1					8
<b>Mm</b>								4	3	1						8
<b>Uff</b>		3	1		2			1	3							10
<b>Uf</b>		3	5	1	4		1	5	3		1					23
<b>Uk</b>								2			1			3		6
<b>Um</b>	1	3	4		3	2	1	4	2		2	1	2	1		26
<b>Ut</b>		1			1											2
<b>Utt</b>															1	1
<b>Su</b>	1	11	10	1	12	2	2	26	16	1	8	1	2	4	1	98

### 1.5 Ergebnisse der Kronenzustandserfassung (A. Wenzel)

Der Kronenzustand wurde an allen BZE-Punkten über den Zeitraum von 2006 bis 2008 jährlich angesprochen. Die Erhebung erfolgte nach dem Verfahren der terrestrischen Waldzustandserhebung (WZE) und fand zeitgleich zur regulären Durchführung der WZE statt.

Folgende Tendenzen lassen sich aus den Daten der 98 BZE-Punkte ableiten:

Die mittlere Kronenverlichtung aller Baumarten lag 2006 bei 23 %, 2007 ebenfalls bei 23 % und 2008 bei 22,9 %. Der Anteil deutlicher geschädigter Bäume betrug 35 %, als ungeschädigt galten 23 %.

Die Fichte wies von den Hauptbaumarten die geringsten sichtbaren Schäden auf. Die mittlere Kronenverlichtung bei der Kiefer schwankte im Aufnahmezeitraum von 25,9 % bis 29,2 %. Der Anstieg 2008 ist auf ein starkes Blühverhalten der Kiefer zurückzuführen. Bei der Buche, die häufigste Laubbaumart in Thüringen, sank die mittlere Kronenverlichtung um 4,2 %. Die Eiche verbesserte ihren Kronenzustand von 30,2 % mittlerer Kronenverlichtung auf 26,9 %.

**Tabelle 12: Mittlere Kronenverlichtung der Hauptbaumarten innerhalb der Laufzeit der BZE**

<b>Aufnahmejahr</b>	<b>Fichte</b>	<b>Kiefer</b>	<b>Buche</b>	<b>Eiche</b>
2006	19,4	26,5	26,8	30,2
2007	20,8	25,9	25,0	29,0
2008	20,3	29,2	22,6	26,9

Die starke Abhängigkeit der Schadsymptome vom Alter hat sich auch in den Jahren 2006, 2007 und 2008 bestätigt. Mit zunehmendem Alter weisen die Bäume stärkere Kronenverlichtungen auf. Auf Standorten reicher Trophie sind die Bäume stärker geschädigt als die Bäume auf armer Trophie. Maßgeblichen Einfluss hierauf haben die standortbedingte Verteilung der Baumarten sowie die Altersklassenverteilung der Baumarten.

## **2. Ergebnisse der Waldzustandserhebung**

In diesem Abschnitt werden alle Ergebnisse bzgl. Nadel- und Blattanalysen, Kennwerte der organischen Auflage, Kennwerte des Mineralbodens sowie Beziehungen zwischen Teilkomponenten aufgeführt. Die Darstellung erfolgt in einer vergleichenden Gegenüberstellung von Ergebnissen der BZE -I und der BZE -II.

### **2.1 Ergebnisse der Nadel- und Blattanalysen**

Mit Hilfe der durchgeführten Nadelanalysen ist es möglich, einen Überblick über die Nährstoffversorgung und die Belastungssituation des Baumbestandes im Freistaat Thüringen zu erhalten.

Von insgesamt 60 Probepunkten, dies entspricht ca. 2/3 aller Probepunkte der BZE II, wurden Nadelproben entnommen und analysiert. 1/3 der gesamten Probepunkte der BZE II sind durch Blattproben repräsentiert. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten (Bestandesstruktur- und -charakteristika) an vereinzelt Probepunkten wurden Mischproben entnommen. In einzelnen Fällen entfiel die Probenahme aufgrund zu geringen Bestandesalters. Somit liegen für die Baumart Gemeine Fichte (GFI) 56 Proben, für die Gemeine Kiefer (GKI) 34 Proben, für die Rot-Buche (BU) 31 Proben, für Eiche (EI) 16 Proben und für Gemeine Esche (ES) 14 Proben zur Nadel- und Blattanalyse vor.

Neben den Hauptnährelementen wie Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) wurden auch die Gehalte der Spurenelemente Silicium (Si), Natrium (Na), Mangan (Mn), Aluminium (Al), Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chlor (Cl), Schwefel (S), Brom (Br), Strontium (Sr) und Fluorid ermittelt. Dabei sind Pb, Cd und Br wie die Elemente S und Cl zu den potentiell schädlichen Elementen zu zählen.

Die folgenden Tabellen zeigen mit dem arithmetischen Mittel, dem Median sowie dem Minimum und Maximum die Elementgehalte von 1- und 2 jährigen Fichten- und Kiefernnadeln auf. Die Tabellen 3, 4 und 5 weisen mit den mathematischen Kenngrößen die Elementgehalte von Buchen- Eschen- und Eichenblättern aus.

Tabelle 13: Nadelelementgehalt für Fichte

Element	Nadeljahrgang	arithm. Mittel	Median	Minimum	Maximum
<b>Gemeine Fichte (<i>Picea abies</i>)</b>					
<b>C</b>	1	507,9	507,0	492,0	538,0
	2	506,8	508,0	486,0	524,0
<b>Ca</b>	1	6,0	5,5	2,7	12,7
	2	8,3	7,6	2,2	20,3
<b>Mg</b>	1	1,1	1,1	0,5	1,7
	2	1,0	1,0	0,3	1,7
<b>K</b>	1	4,8	5,1	1,7	7,2
	2	4,2	4,3	1,6	6,4
<b>P</b>	1	1,5	1,5	1,0	2,1
	2	1,3	1,3	0,7	2,4
<b>N</b>	1	14,8	14,4	9,6	18,5
	2	13,9	13,9	10,0	17,9
<b>S</b>	1	1,0	1,0	0,6	1,4
	2	1,0	1,0	0,7	1,4
<b>Si</b>	1	2,7	2,7	1,1	5,2
	2	6,4	6,0	3,1	14,2
<b>Cl</b>	1	530,7	486,5	251,0	1080,0
	2	503,1	456,0	250,0	1640,0
<b>Mn</b>	1	1190,4	911,0	24,9	3240,0
	2	1440,5	1020,0	16,6	3990,0
<b>Fe</b>	1	65,6	66,1	36,5	122,0
	2	82,5	80,2	43,8	209,0
<b>Zn</b>	1	32,6	31,5	17,1	66,2
	2	30,6	27,9	15,8	81,1
<b>Pb</b>	1	0,2	0,2	0,1	0,6
	2	0,3	0,3	0,2	0,7
<b>Cu</b>	1	3,4	3,4	2,6	4,1
	2	3,3	3,3	2,5	4,4
<b>Cd</b>	1	0,1	0,1	0,0	0,4
	2	0,1	0,1	0,0	0,4
<b>Fluorid</b>	1	2,2	1,8	1,8	4,7
	2	2,5	2,2	1,8	4,7
<b>Na</b>	1	51,7	45,1	35,0	129,0
	2	54,8	51,4	35,0	141,0
<b>Br</b>	1	0,1	0,0	0,0	0,7
	2	0,1	0,0	0,0	1,1
<b>Al</b>	1	100,4	96,0	34,3	225,0
	2	152,3	146,0	36,2	414,0
<b>Sr</b>	1	17,9	11,7	2,1	106,0
	2	22,0	13,9	2,0	147,0
<i>C-Si mg/a TS, Cl-Sr mg/ka TS</i>					

Element	Nadeljahrgang	arithm. Mittel	Median	Minimum	Maximum
<b>Wald-Kiefer (<i>Pinus sylvestris</i>)</b>					
<b>C</b>	1	515,6	515,5	497,0	539,0
	2	520,1	517,5	507,0	537,0
<b>Ca</b>	1	3,7	3,6	1,8	6,6
	2	5,6	5,4	3,1	10,0
<b>Mg</b>	1	1,0	1,0	0,6	1,4
	2	0,8	0,8	0,5	1,3
<b>K</b>	1	5,2	5,2	3,3	6,8
	2	4,8	4,9	3,2	6,5
<b>P</b>	1	1,6	1,6	1,1	1,9
	2	1,6	1,5	1,0	1,8
<b>N</b>	1	16,0	15,5	12,9	20,4
	2	16,6	16,0	12,9	23,1
<b>S</b>	1	1,2	1,2	1,0	1,4
	2	1,2	1,2	1,0	1,8
<b>Si</b>	1	0,6	0,4	0,2	3,8
	2	0,9	0,6	0,3	9,4
<b>Cl</b>	1	322,0	305,0	222,0	540,0
	2	307,4	289,5	199,0	425,0
<b>Mn</b>	1	580,6	536,0	21,6	1560,0
	2	888,6	767,5	21,2	2600,0
<b>Fe</b>	1	64,9	61,1	34,1	147,0
	2	93,6	82,5	45,0	218,0
<b>Zn</b>	1	43,7	42,5	24,8	80,5
	2	48,6	47,8	26,5	80,8
<b>Pb</b>	1	0,5	0,4	0,2	1,1
	2	0,6	0,5	0,3	1,0
<b>Cu</b>	1	4,2	4,2	3,5	5,1
	2	4,0	4,0	3,2	5,6
<b>Cd</b>	1	0,2	0,2	0,0	0,3
	2	0,2	0,2	0,0	0,4
<b>Flourid</b>	1	2,1	1,8	1,8	2,9
	2	2,8	2,4	1,8	6,9
<b>Na</b>	1	71,4	60,0	39,9	141,0
	2	97,2	88,7	39,9	195,0
<b>Br</b>	1	0,9	0,9	0,0	2,1
	2	1,9	2,0	0,0	3,8
<b>Al</b>	1	298,1	324,5	23,8	532,0
	2	399,0	384,0	61,9	809,0
<b>Sr</b>	1	5,6	5,2	1,9	16,4
	2	7,9	7,3	2,3	22,5
C-Si mg/g TS, Cl-Sr mg/kg TS					

Tabelle 14: Blattelementgehalte für Rot-Buche

Element	arithm. Mittel	Median	Minimum	Maximum
<b>Rot-Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)</b>				
<b>C</b>	506,3	506,0	497,0	521,0
<b>Ca</b>	9,0	9,5	4,5	13,2
<b>Mg</b>	1,6	1,6	0,9	2,6
<b>K</b>	7,9	8,1	5,9	10,1
<b>P</b>	1,2	1,2	0,8	1,5
<b>N</b>	24,1	24,5	18,9	28,6
<b>S</b>	1,5	1,6	1,3	1,8
<b>Si</b>	4,7	4,7	1,3	11,0
<b>Cl</b>	101,8	95,0	40,0	276,0
<b>Mn</b>	976,8	732,0	31,5	2720,0
<b>Fe</b>	89,3	86,4	55,0	157,0
<b>Zn</b>	27,5	26,5	17,6	47,9
<b>Pb</b>	0,3	0,2	0,2	0,5
<b>Cu</b>	7,0	7,0	5,4	8,2
<b>Cd</b>	0,1	0,1	0,0	0,2
<b>Flourid</b>	2,2	2,2	1,0	3,4
<b>Na</b>	45,6	43,4	35,0	84,6
<b>Br</b>	0,1	0,0	0,0	0,4
<b>Al</b>	84,2	72,2	42,7	240,0
<b>Sr</b>	21,3	16,8	6,9	76,2
C-Si mg/g TS, Cl-Sr mg/kg TS				

Tabelle 15: Blattelementgehalte für Eiche

Element	arithm. Mittel	Median	Minimum	Maximum
<b>Eiche (<i>Quercus spec.</i>)</b>				
<b>C</b>	500,3	499,0	491,0	514,0
<b>Ca</b>	7,5	7,4	4,7	12,5
<b>Mg</b>	1,9	1,9	1,0	2,9
<b>K</b>	9,6	9,3	7,7	12,1
<b>P</b>	1,5	1,5	1,1	2,1
<b>N</b>	27,5	27,8	22,1	30,8
<b>S</b>	1,8	1,8	1,4	2,1
<b>Si</b>	4,4	3,6	1,4	7,6
<b>Cl</b>	180,6	162,0	72,0	291,0
<b>Mn</b>	1420,3	1220,0	67,1	3300,0
<b>Fe</b>	106,1	114,5	57,4	136,0
<b>Zn</b>	20,7	19,6	15,1	28,2
<b>Pb</b>	0,2	0,2	0,1	0,5
<b>Cu</b>	7,6	7,5	6,0	10,7
<b>Cd</b>	0,1	0,1	0,0	0,2
<b>Flourid</b>	2,6	2,5	1,7	4,0
<b>Na</b>	38,2	35,0	35,0	51,7
<b>Br</b>	0,2	0,1	0,0	1,2
<b>Al</b>	58,6	59,8	23,1	97,7
<b>Sr</b>	10,3	9,9	4,4	28,8
C-Si mg/g TS, Cl-Sr mg/kg TS				

Tabelle 16: Blattelementgehalte für Esche

Element	arithm. Mittel	Median	Minimum	Maximum
<b>Gemeine Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>)</b>				
<b>C</b>	471,4	471,0	460,0	481,0
<b>Ca</b>	18,2	19,5	12,0	25,1
<b>Mg</b>	3,7	3,5	2,0	6,5
<b>K</b>	15,2	16,0	10,5	20,3
<b>P</b>	1,7	1,5	1,0	3,7
<b>N</b>	25,2	24,3	21,6	29,2
<b>S</b>	3,3	3,2	2,0	5,6
<b>Si</b>	1,0	0,8	0,4	2,7
<b>Cl</b>	1203,9	1170,0	551,0	2450,0
<b>Mn</b>	57,4	44,2	21,8	138,0
<b>Fe</b>	57,7	55,1	28,6	82,4
<b>Zn</b>	22,7	21,6	16,2	35,5
<b>Pb</b>	0,2	0,2	0,1	0,7
<b>Cu</b>	10,6	10,9	7,0	15,8
<b>Cd</b>	0,0	0,0	0,0	0,1
<b>Flourid</b>	2,3	2,3	1,0	3,5
<b>Na</b>	43,7	42,7	35,0	54,9
<b>Br</b>	4,8	3,5	0,0	21,2
<b>Al</b>	53,0	40,4	7,0	118,0
<b>Sr</b>	74,9	51,5	10,4	299,0
C-Si mg/g TS, Cl-Sr mg/kg TS				

### 2.1.1 Hauptnährelemente

Mangel- bzw. Überschussgrenzwerte werden im Folgenden für Nadel- und Laubbaumarten gesondert aufgeführt. Bei den untersuchten Laubbaumarten Buche, Eiche und Esche werden für die argumentative Bewertung lediglich die Grenzwerte für die Hauptnährelemente sowie für die wichtigsten Spurenelemente nach BERGMANN (2003), FIEDLER (1993), BECHTEL et. al (1993) und dem österreichischem BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2001) zu Grunde gelegt.

### Kohlenstoff – C

Kohlenstoff ist das bedeutendste essentielle Element der Biosphäre. Es ist neben der reinen auch in chemisch gebundener Form anzutreffen. Mit der Fähigkeit komplexe Moleküle zu bilden, weist Kohlenstoff eine sehr große Vielfalt chemischer organischer und anorganischer Verbindungen auf. So sind alle Gewebestrukturen lebender Organismen aus organischen Kohlenstoffverbindungen aufgebaut. Anorganische Verbindungen des Kohlenstoffes sind meist in Carbonatgesteinen anzutreffen (z.B. Eisenspat ( $\text{FeCO}_3$ ) Calcium-Magnesium-Carbonat ( $\text{CaCO}_3$

MgCO<sub>3</sub>). Da Kohlenstoff in ausreichenden Mengen in der Biosphäre zur Verfügung steht, sind Mangelsymptome auszuschließen.

Die Ergebnisse der BZE II zeigen, dass der C-Gehalt von 1-jähriger Nadelsubstanz geringer ist als jener von 2-jährigen Nadeljahrgängen. Weiterhin konnten Unterschiede zwischen den Baumarten Fichte und Kiefer festgestellt werden, indem die Nadeln von Kiefer einen deutlich höheren Gehalt an Kohlenstoff aufweisen. Schon 1-jährige Nadeln der Kiefer (Median Kiefer 1-jährig = 515,5 mg/g TS, Kiefer 2-jährig = 517,5 mg/g TS) sind mit ca. 8,5 mg/g TS reicher an Kohlenstoff als Fichtennadeln (Median Fichte 1-jährig = 507 mg/g TS, Fichte 2-jährig = 508 mg/g TS).

Bei allen Laubbäumen wurde ein geringerer C-Gehalt als bei Nadelbäumen vorgefunden. Mit einem Median von 506 mg/g TS weist die Buche die höchsten Werte der Laubbaumarten, gefolgt von Eiche mit 499 mg/g TS und Esche mit 471 mg/g TS, auf. Ursachen hierfür können in einem jahreszeitlich unterschiedlichen Zeitpunkt des Blattaustriebes gesucht werden.

Niedrige C-Gehalte der Nadeln sind vor allem im südthüringischen Raum anzutreffen. Bei den Laubgehölzen sind niedrige C-Gehalte der Blätter in den nordthüringischen Räumen vorhanden. Eine Abhängigkeit in Bezug auf geologische Substrate konnte nicht gefunden werden.

## **Stickstoff – N**

Stickstoff ist der Hauptbestandteil der Luft (78%) und ebenfalls ein essentielles Element für Wachstums- und Stoffwechselforgänge von Lebewesen. Es wird mittels natürlicher Stickstofffixierung in organischer Substanz gebunden (u. a. Baustein für Proteine, Aminosäuren, Chlorophyll). Im Boden liegen meist mehr als 90 % des gesamten Stickstoffs in Form von organisch gebundenem Stickstoff in lebender und abgestorbener Pflanzen- und Wurzelmasse, Humusstoffen sowie Bodenorganismen vor. Anorganische Stickstoffverbindungen (z.B. Ammonium (NH<sub>4</sub>), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Nitrat (NO<sub>3</sub>)) sind nur in sehr geringer Menge anzutreffen und sind meist anthropogenen Ursprungs.

Demnach treten bei Mangelercheinungen Störungen der Wachstums- und Stoffwechselforgänge auf. Auch durch ein Überangebot von N können Schädigungen (z.B. höhere Krankheits- und Frostempfindlichkeit, höhere Windwurfgefährdung, verzögerter Blütenbeginn und Holzausreifung) eintreten.

Für die Gemeine Fichte werden als Grenze für einen N-Mangel durchschnittlich 13 mg/g TS sowie bei der Gemeinen Kiefer 14 mg/g TS angenommen. Für Buche treten Mangelercheinungen durchschnittlich ab 19 mg/g TS auf. Bei Eiche sind Grenzwerte von 15 mg/g TS und bei Esche mit 16 mg/g TS anzunehmen. An dieser Stelle sei auch auf die Problematik bei zunehmendem Bestandesalter, Fruktifikation, Bestandesstruktur und jahreszeitlicher Schwankung, welche durch die Arbeiten von

FIEDLER et al. (1993), BURSCHEL et al. (1987) und OTTO (1994) beschrieben wurden, verwiesen.

FÜHRER UND BRECHTEL (1993) belegen die Schädigung und negative Beeinträchtigung von Gehölzen sowie Waldökosystemen durch erhöhte atmogene Einträge, welche die Stickstoffsättigung des Forstökosystems überschreiten. HOFMANN, HEINSDORF und KRAUß (1990) präzisieren dies für Kiefernforsten. Demnach stellt sich zum Beginn der Sättigungsphase ein durchschnittlicher Stickstoffgehalt in der Kiefernadel von ca. 1,8 % der TS ein. Kommt es zu weiteren Stickstoffemission so sind schädigende Wirkungen bei der Kiefer auf kräftigen Standorten ab einem N-Gehalt von > 2,35 % TS belegt. Auf ärmeren Standorten (Z = ziemlich arm), treten negative Wirkungen, welche sich durch Zuwachsdefizite äußern können, schon ab einem N-Gehalt von 2 % auf.

Neben der Schädigung der Assimilationsorgane kommt es durch die Anreicherung von Stickstoff in Waldökosystemen ebenso zu einer verstärkten Auswaschung von Nährstoff-Ionen, verschärfter Bodenversauerung, sowie erhöhter Lachgas-Emission führen (Vgl. MOHR et al. 2005).

Es zeigte sich, dass die Ergebnisse des N-Gehaltes aus der BZE I erneut bestätigt werden konnten. Somit weist 1-jährige Nadelmasse im Gegensatz zur 2-jährigen Nabelsubstanz höhere Werte auf. Auch der N-Gehalt in Abhängigkeit der Baumart, liegt im Wesentlichen bei Kiefern-Nadeln wieder höher als bei Fichten-Nadeln (Median Fichte 1-jährig = 14,4 mg/g TS, Fichte 2-jährig = 13,9 mg/g TS; Kiefer 1-jährig = 15,5 mg/g TS, Kiefer 2-jährig = 16,0 mg/g TS). Es fiel auf, dass der N-Gehalt bei 2-jährigen Nadeln im Gegensatz zu 1-jährigen Nadeln von Fichte niedriger liegt. Dies wurde bei Kiefer nicht bestätigt. So war hier ein höherer N-Gehalt 2-jähriger Nadeln zu verzeichnen. Greift man die Überlegungen der BZE I bzgl. des Sachverhaltes der Mangel-Grenze wieder auf, so würde sich bei den beprobten Flächen für Fichte auf ca. 30 % und für Kiefer auf ca. 12 % der Flächen ein N-Mangel ausweisen lassen.

Laubbaumarten weisen im Gegensatz zu den eben beschriebenen Nadelgehölzen höhere Stickstoffgehalte der Assimilationsorgane auf. Insgesamt kann der N-Gehalt für Buche mit 24,5 mg/g TS, für Eiche mit 27,8 mg/g TS und für Esche mit 24,3 mg/g TS angegeben werden. Demnach weisen Eichenblätter die höchsten N-Gehalte auf, wobei die der Buche und Esche sich nicht wesentlich unterscheiden. Auch der Grenzwert von 19 mg/g TS wurde bei allen Probestandorten nicht unterschritten, so dass von einer ausreichenden N-Versorgung der Laubholzbestände im Freistaat Thüringen auszugehen ist.

Insgesamt weisen die Buchenbestände im nordthüringischen und westthüringischen Raum die höchsten Blattspiegelwerte an Stickstoff auf. Bei den Fichtenbeständen sind die höchsten Stickstoff-Nadelspiegelwerte in Ostthüringen sowie im Südostthüringischen Raum des Thüringer Waldes anzutreffen. Auch bei der Kiefer kommen die höchsten Wertigkeiten im mittelthüringischen sowie ostthüringischen Raum vor.

## Phosphor - P

Wie der Stickstoff ist Phosphor ein essentielles Element für Energieumwandlungs- und Stoffwechselprozesse und Vermehrungsvorgänge von lebenden Organismen und kommt überwiegend in organischen Verbindungen (z.B. Nucleinsäuren, Enzymen (ATP) und Phospholipiden) vor. Weiterhin hat P Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Photosynthese bei Pflanzen. Phosphor ist aufgrund seiner unverzichtbaren physiologischen Bedeutung einer der wichtigsten Pflanzennährstoffe. Da die natürlichen Phosphorvorkommen überwiegend in Form von Phosphaten anzutreffen sind und zur Bildung schwer löslicher und damit schwer verfügbarer Verbindungen neigen, gerät Phosphor trotz seines vergleichsweise geringen Bedarfsmengenanteils deshalb meist in die Rolle des „limitierenden Faktors“. Tritt ein P-Mangel ein, so zeigen Pflanzen verschiedene Symptome. Neben kümmerndem Wuchs von Blatt und Spross kann es zu Blattverfärbung, Ausbildung von Nekrosen sowie reduzierter Entwicklung von Blüten, Samen und Früchten kommen.

Die P-Mangelgrenze wird für die Gemeine Fichte durchschnittlich bei 1,30 mg/g TS und für die Gemeine Kiefer bei 1,35 mg/g TS angenommen. Für Buche ist die P-Mangelgrenze bei < 1,5 mg/g TS gegeben. Bei den Laubbaumarten Eiche und Esche stellt sich ein Mangel ab < 1,0 mg/g TS ein. Auch hier sei, wie bereits bei Stickstoff, auf die angeführte und argumentative Problematik des Bestandesalters, der Bestandesstruktur usw. verwiesen. Werden die Annahmen bzgl. der Grenze des P-Mangels zu Grunde gelegt, so würden ca. 43 % der untersuchten Fichtenbestände und ca. 15 % Kiefernbestände unterhalb dieser Grenze liegen und Mangelerscheinungen aufweisen, wobei dies als relativ unwahrscheinlich zu sehen ist. Betrachtet man den P-Gehalt insgesamt, so deutet dieser bei Fichte (1,5 mg/g TS) und Kiefer (1,6 mg/g TS) auf eine ausreichende P-Versorgung von thüringischen Nadelwäldern hin.

Betrachtet man die Ergebnisse der BZE II so kann festgestellt werden, dass die 1-jährigen Nadeln von Fichte einen deutlich höheren P-Gehalt gegenüber den 2-jährigen Nadeln aufweisen. Dieses Phänomen konnte bei den Untersuchungen an Kiefern ebenfalls gefunden werden, wobei hier geringere Konzentrationsunterschiede zwischen den einzelnen Nadeljahrgängen im Gegensatz zur Fichte auftraten. Insgesamt ist der Phosphorgehalt bei den betrachteten Baumarten als gleich zu bewerten.

Die Ergebnisse für die Laubbaumarten insgesamt erbrachten, dass der P-Gehalt der Blattmasse von Buche mit 1,2 mg/g TS unter der Mangelgrenze liegt. Die jeweils gleiche Konzentration an Phosphor wurde in den Blättern von Eiche und Esche gefunden. Diese ist mit 1,5 mg/g TS festzustellen und liegt demnach über der Mangelgrenze. Werden auch hier die Annahmen des P-Mangels zu Grunde gelegt, so müssten 100% der Buchenbestände eine Unterversorgung an Phosphor

aufweisen. Im Gegensatz dazu weisen alle Eichen- und Eschenbeständen eine ausreichende Phosphorversorgung auf.

Die Buchenbestände im nordwestlichen Raum sowie des südwestlichen Thüringer Waldes weisen die höchsten Blattspiegelwerte an Phosphor auf und sind demnach auch bei den geologischen Grundgesteinen Buntsandstein, Schiefer und Rotliegendem am höchsten. Bei der Fichte kommt es ebenfalls auf den Schiefer- und Sandsteinstandorten im Thüringer Gebirge sowie im Frankenwald (Südostthüringen) zu den höchsten Nadelspiegelwerten. Ähnlich verhält es sich bei der Kiefer. So werden auch hier die höchsten Werte auf Schieferstandorten des Thüringer Gebirges, des süd- und ostthüringischen Trias-Hügellandes sowie des Vogtlandes erreicht.

### **Kalium - K**

Kalium kommt aufgrund seiner Reaktionsfreudigkeit in der Natur meist als Kation in Verbindungen vor. Das für Pflanzen essentielle Hauptnährelement ist in seiner Wirkung vielfältig. Besonderen Einfluss hat Kalium auf den Wasserhaushalt von Pflanzen. Es dient als Osmotikum und ist entscheidend beteiligt am Aufbau des Wurzeldruckes im Xylem und des Turgordruckes in den Stomata von Pflanzen. Somit hat Kalium direkten Einfluss auf die Photosyntheseleistung. Ist das Nährelement im ausreichenden Maße vorhanden, so begünstigt es Stoffwechselfvorgänge und erhöht die Frostresistenz der Pflanze. Ein zu starker Überschuss kann u.a. auch Calcium – bzw. Magnesiummangel bewirken. Stellt sich ein Mangel ein, so kommt es aufgrund erhöhter Verdunstung zu Störungen des Wasserhaushaltes.

Symptome, welche auf Mangelercheinungen hinweisen, sind vornehmlich an älteren Blättern zu finden. Typisch sind in diesem Fall Punkt- und Blattrandnekrosen sowie Blattrandchlorosen. Auch die Welketracht kann Anzeichen eines Mangels sein.

Der Grenzwert für Kaliummangelercheinungen ist für Fichte und Kiefer bei 3 mg/g TS anzunehmen. Für die untersuchte Laubbaumart Buche ist die Mangelgrenze mit 10 mg/g TS festzusetzen. Weiterhin wurden Mangelsymptome an Eichen ab 5 mg/g TS sowie bei Eschen ab 6 mg/g TS beobachtet.

Die Ergebnisse der BZE II ergaben, dass die Kaliumgehalte der 1-jährigen Fichten- und Kiefernadeln jeweils deutlich höher lagen als die von den 2-jährigen Nadeljahrgängen (Median Fichte 1-jährig = 5,1 mg/g TS, Fichte 2-jährig = 4,3 mg/g TS; Kiefer 1-jährig = 5,2 mg/g TS, Kiefer 2-jährig = 4,9 mg/g TS). Auch ist festzustellen, dass sich die Kaliumgehalte zwischen Fichte und Kiefer in der 1-jährigen Nadel nicht wesentlich unterscheiden. Starke Unterschiede traten bei den 2-jährigen Nadeljahrgängen auf.

Für die Laubbaumarten ergab sich, dass der in der Blattmasse vorhandene Kaliumgehalt für Buche durchschnittlich 8,1 mg/g TS, für Eiche 9,3 mg/g TS und für Esche 16,0 mg/g TS beträgt. Demnach unterschreiten die Buchenbestände

vollständig die Mangelgrenze. Bei den Beständen von Eiche und Esche wird der Grenzwert bei keinem Standort unterschritten, so dass hier von einer ausreichenden Versorgung mit Kalium auszugehen ist.

Größtenteils liegen die Kaliumgehalte der Nadeln über der Mangelgrenze, so dass von einer guten Kaliumversorgung in den Nadelwäldern des Freistaates Thüringen ausgegangen werden kann, wobei nur ca. 14 % der Fichtenbestände unter dieser Grenze liegen.

Als schlecht versorgte Fichtenbestände sind jene auf den Schieferstandorten des Thüringischen Schiefergebirges und des Frankenwaldes auszuweisen. Sie sind gegenüber den Standorten des Rotliegenden wesentlich schlechter versorgt. Die Kiefernbestände in Südthüringen weisen trotz gleicher Grundgesteinstypologie (Buntsandstein), im Gegensatz zu den Standorten im ostthüringischen Raum, schlechtere Kaliumgehalte in Nadeln auf.

Aufgrund der Blattanalysen ist anzunehmen, dass bei den Buchenwäldern erhebliche Engpässe in der Kaliumversorgung vorliegen. Dies ist wie bei der Phosphorversorgung bei nahezu 100% der Buchenbestände der Fall.

Bei den Buchenbeständen sind hohe Blattspiegelwerte überwiegend auf die nährstoffreicheren Standorte begrenzt. Demnach sind diese hohen Werte bei Carbonatgesteinen, eutrophen Silikatgesteinen sowie Schlufflehmen, vor allem in den Wäldern um Erfurt und Weimar sowie Mühlhausen und Dingelstädt, vorherrschend. Die höchsten Nadelspiegelwerte von Fichten- und Kiefernbeständen begrenzen sich auf den ostthüringischen Raum nahe Rudolstadt und Saalfeld, wobei hier meist Buntsandstein oder Rotliegendes das geologische Ausgangssubstrat bilden. Auch im südlichen Thüringer Wald zeichnen sich vereinzelte Standorte des Buntsandstein und Rotliegenden ebenfalls durch hohe Nadelspiegelwerte aus.

## **Calcium – Ca**

Calcium ist eines der häufigsten Elemente der Erdkruste und kommt aufgrund seiner chemischen Reaktivität natürlich nur in chemisch gebundener Form vor (z.B. Calcit, Calciumcarbonat, Dolomit und Gips). Als essentielles Element von Pflanzen ist es bei dem Aufbau von Blattmasse, bei Stoffwechselfvorgängen (u.a. Photosynthese) sowie der Regulierung von Verlagerungsprozessen verantwortlich. Ebenso wie Kalium steuert es den Turgordruck in den Stomata und somit den Wasserhaushalt der Pflanze. Es wird in älteren Assimilationsorganen (Nadeln) angereichert.

Aufgrund einer ausreichenden Calciumversorgung der Böden sind Mangelerscheinungen sehr selten. Als Mangelgrenze für Nadelbäume kann 2 mg/g TS angenommen werden. Für die Buche ist dieser Grenzwert mit 3 mg/g TS, für Eiche mit 4 mg/g TS und für Esche mit 7 mg/g TS erreicht. Als Mangelgrenze für Waldböden ist nach VON WILPERT (2002) ca. 4,5 g/kg TS anzunehmen.

Die Ergebnisse der BZE II zeigen wie vermutet, dass gegenüber den 1-jährigen Nadeln, die 2-jährigen Nadeljahrgänge höhere Ca-Konzentrationen aufweisen (Median Fichte 1-jährig = 5,5 mg/g TS, Fichte 2-jährig = 7,6 mg/g TS; Kiefer 1-jährig = 3,6 mg/g TS, Kiefer 2-jährig 5,4 mg/g TS). Auch ist festzustellen, dass die Ca-Konzentration von Kiefernadeln deutlich unter denen von Fichtennadeln liegt. Betrachtet man die Ergebnisse in Hinblick auf die Mangelgrenze von 2,0 mg/g TS, so liegen die Werte von Fichte und Kiefer deutlich darüber. Dies ist auch bei den Ca-Konzentrationen der Buchen-Eichen- und Eschenblättern gegeben. Hier sticht der Ca-Gehalt von Blättern der Esche mit 19,5 mg/g TS deutlich heraus (Median Buche = 9,5 mg/g TS; Eiche = 7,4 mg/g TS).

Auf Grundlage der Ergebnisse kann gesagt werden, dass weder bei Fichte noch bei Kiefer Anzeichen von Calciummangel festzustellen ist. Somit sind alle Fichten- und Kiefernbestände des Freistaates Thüringens ausreichend mit Calcium versorgt. Auf den Kalkstandorten in Südthüringen sowie in den Räumen um Gera und Greiz zeigen die Fichten- und Kiefernbestände erwartungsgemäß hohe Ca-Werte. Es fällt jedoch auf, dass die auf paläozoischen Standortstypen stockenden Fichtenbestände im südthüringischen Raum geringer versorgt sind. Bei den Kiefernbeständen in Ostthüringen sind die höchsten Nadelspiegelwerte vorhanden. Diese stocken meist auf Carbonatgesteinen oder Schiefer. Auch in Westthüringen treten hohe Werte auf Standorten des Buntsandsteines und Rotliegendem auf. Auch bei den Buchenbeständen kommen die höchsten Calcium-Blattspiegelwerte auf Standorten des Carbonatgesteins, eutrophen Silikatgesteins und jene der Schlufflehme vor. Lediglich die durch Buntsandstein und Rotliegendes geprägten Buchenstandorte im Thüringer Gebirge weisen die geringsten Werte auf.

### **Magnesium - Mg**

Magnesium gehört wie Calcium zu den Erdalkalimetallen. Aufgrund der chemischen Eigenschaften kommt Magnesium als Mineral meist in gebundener Form vor (z.B. Magnesiumsulfat, Calcium-Magnesium-Carbonat (Dolomit)). Es gehört wie die bereits beschriebenen Stoffe zu den essentiellen Elementen und ist in Pflanzen überwiegend in den Blättern enthalten (ca. 2% der Blattmasse). Es ist zentraler Baustein des Chlorophylls und Motor der Photosynthese.

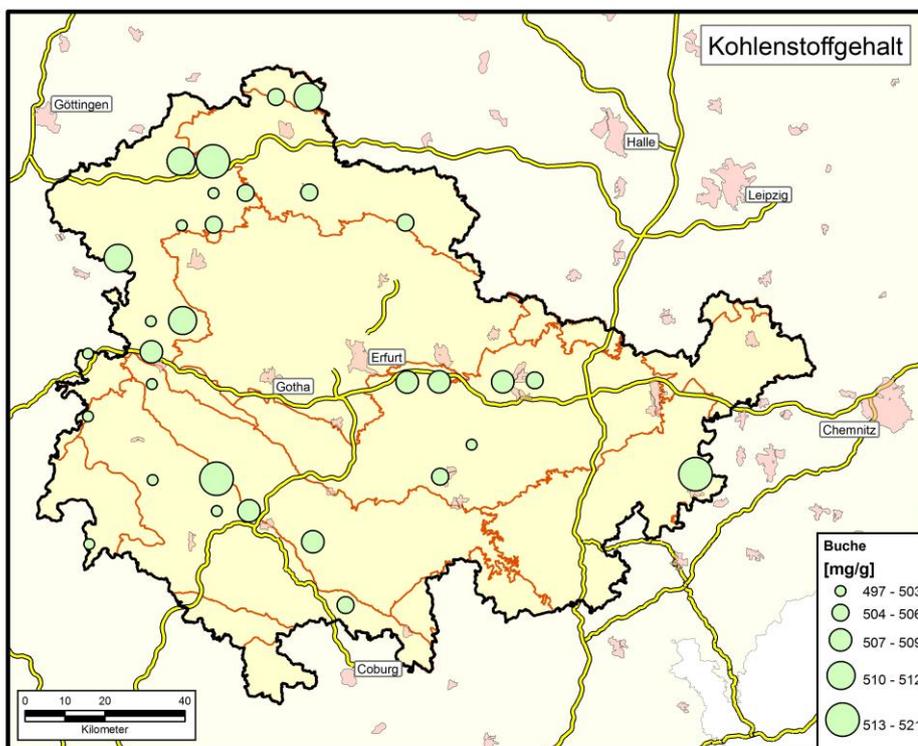
Symptome, welche auf eine nicht ausreichende Mg-Versorgung schließen lassen, sind meist an den Assimilationsorganen zu finden. So kommt es neben Blattnekrosen und - Chlorosen zum Verwelken der Pflanzen. Als Grenze für Mangelerscheinungen ist 0,6 – 0,7 mg/g TS anzugeben. Als Grenzwert für Buche werden 1,5 mg/g TS, für Eiche 1,0 mg/g TS und für Esche 1,4 mg/g TS angenommen.

Aufgrund der Ergebnisse der BZE II kann eingeschätzt werden, dass die Mg-Gehalte der 1-jährigen Nadeln eindeutig über denen der 2-jährigen Nadeljahrgänge liegen (Median Fichte 1-jährig = 1,1 mg/g TS, Fichte 2-jährig = 1,0 mg/g TS; Kiefer 1-jährig

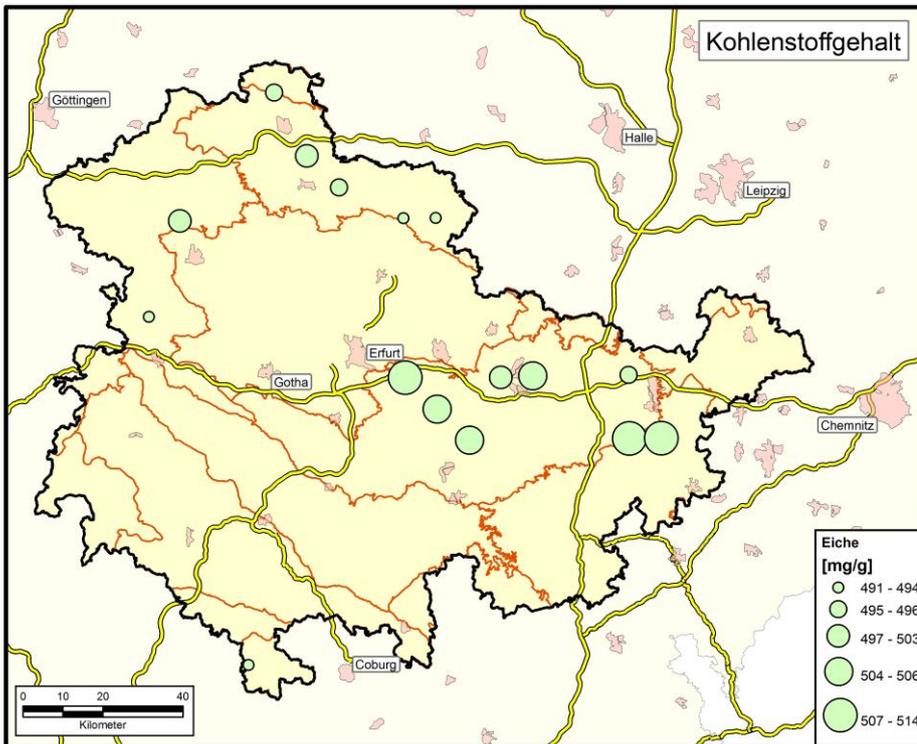
= 1,0 mg/g TS, Kiefer 2-jährig = 0,8 mg/g TS). Weiterhin war ersichtlich, dass sich die Mg-Konzentrationen zwischen den Baumarten Fichte und Kiefer nicht wesentlich unterscheiden. Insgesamt wird die Mangelgrenze von 0,7 mg/g TS deutlich überschritten, so dass von einer ausreichenden Mg-Versorgung der thüringischen Nadelwälder auszugehen ist.

Auch die Ergebnisse der Blattanalysen zeigen auf, dass die Buche insgesamt mit einem Mg-Gehalt von 1,6 mg/g TS über dem angegebenen Grenzwert liegt. Ähnlich verhält es sich bei Eiche und Esche. Hier weisen Eschenblätter mit 3,5 mg/g TS die höchsten Mg-Gehalte auf. Die Mg-Konzentration der untersuchten Eichenblätter ist insgesamt mit 1,9 mg/g TS anzugeben. Auch die Laubgehölze überschritten jeweils die Grenzwerte, so dass auch hier von einer ausreichenden Mg-Versorgung der thüringischen Laubwälder auszugehen ist. Lediglich bei 17% aller Buchenwälder sind Engpässe in der Mg-Versorgung anzunehmen.

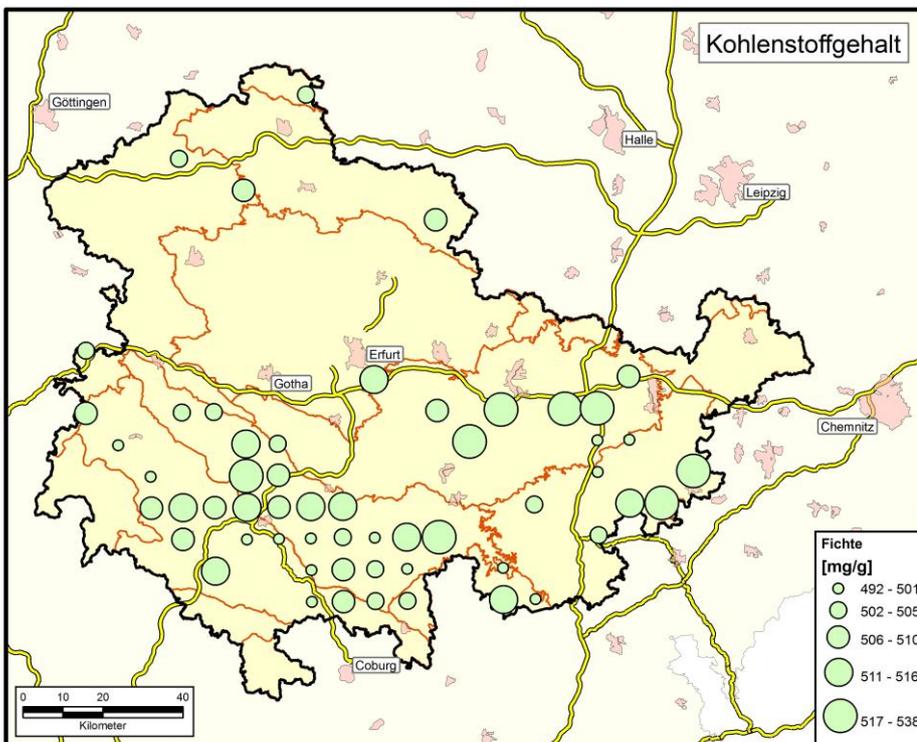
Niedrige Mg-Gehalte in den Nadeln wiesen vor allem die Standorte im Thüringer Gebirge, Frankenwald und Südthüringischen Trias-Hügelland auf. Im ostthüringischen Raum ist für die Baumarten Fichte und Kiefer eine ausreichende Mg-Versorgung gegeben. Die Buchenbestände besitzen aufgrund der eher besseren Standortverhältnisse eine ausreichende Magnesiumversorgung. Auf nährstoffarmen Standorten (Buntsandstein) des Thüringer Gebirges sind ebenfalls niedrige Werte, wie dies auch bei Fichten- und Kiefernbeständen der Fall ist, vorhanden.



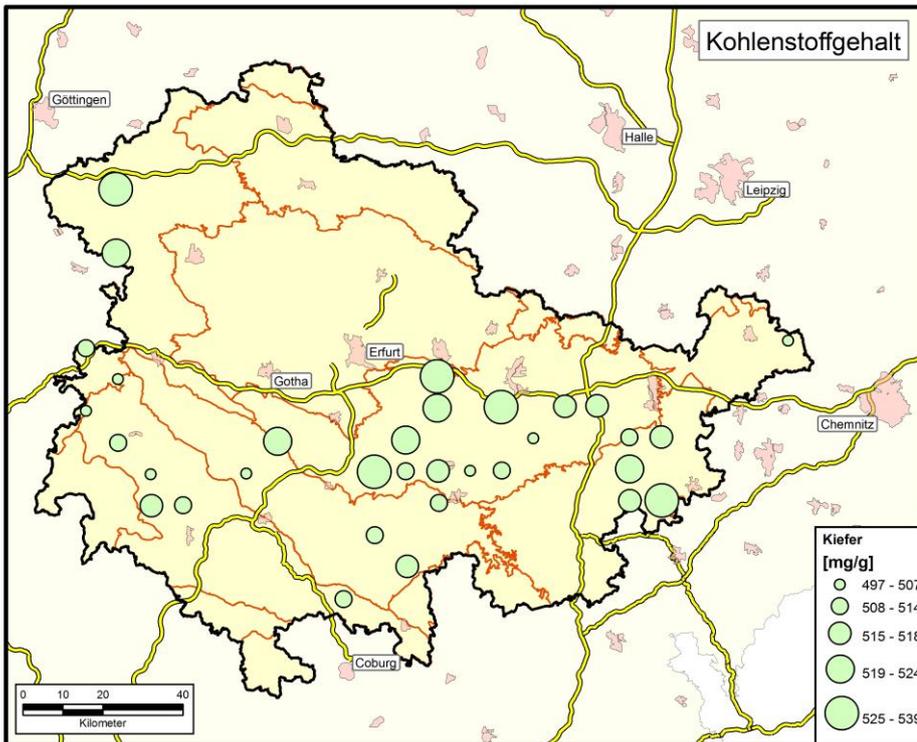
Karte 7.



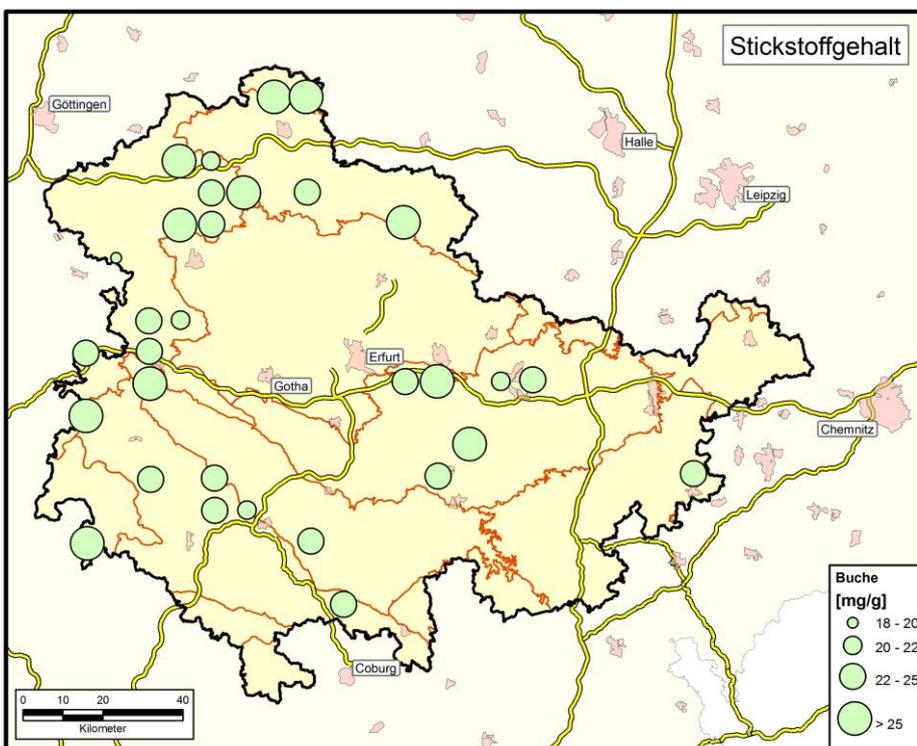
Karte 8.



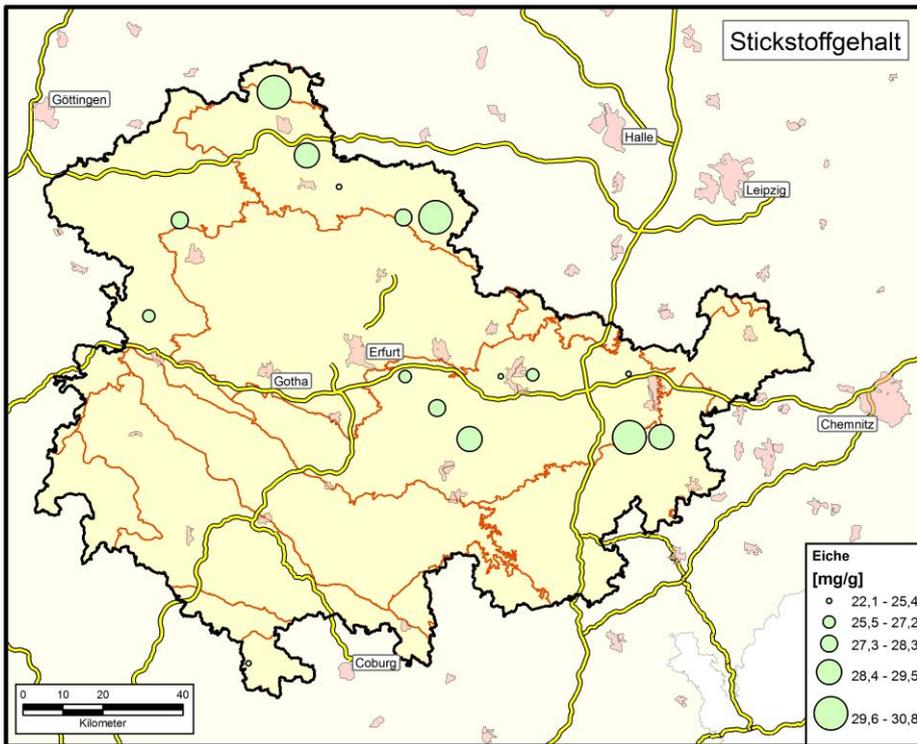
Karte 9.



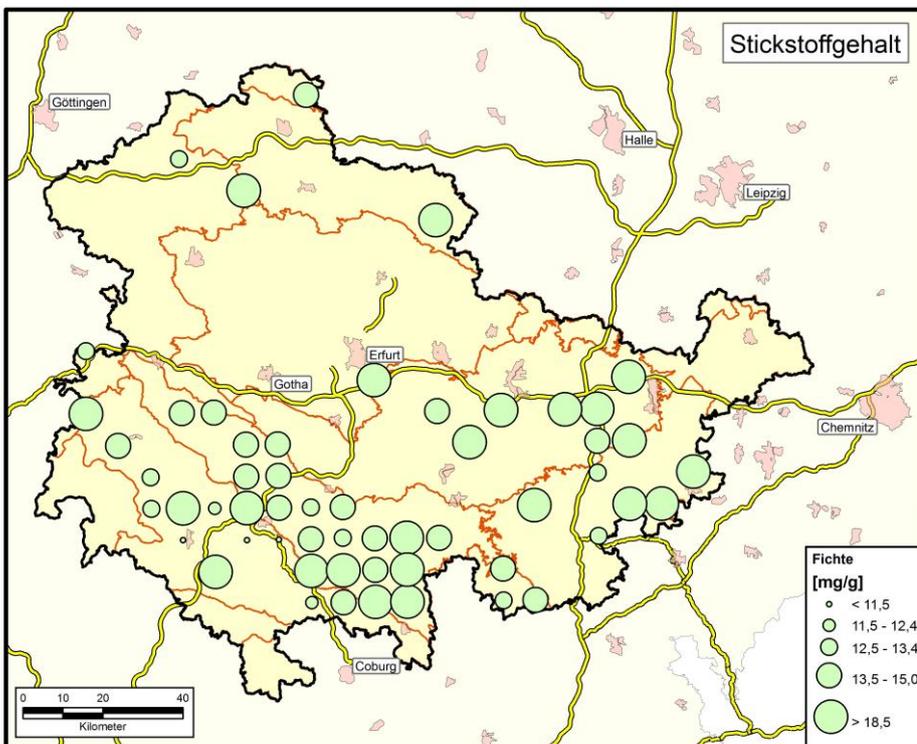
Karte 10.



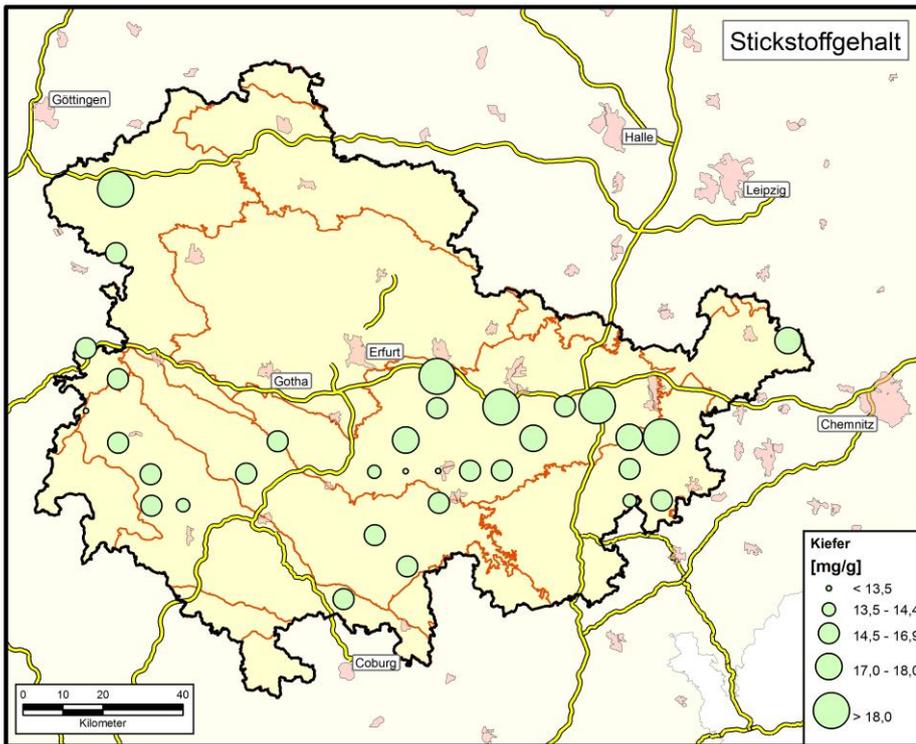
Karte 11.



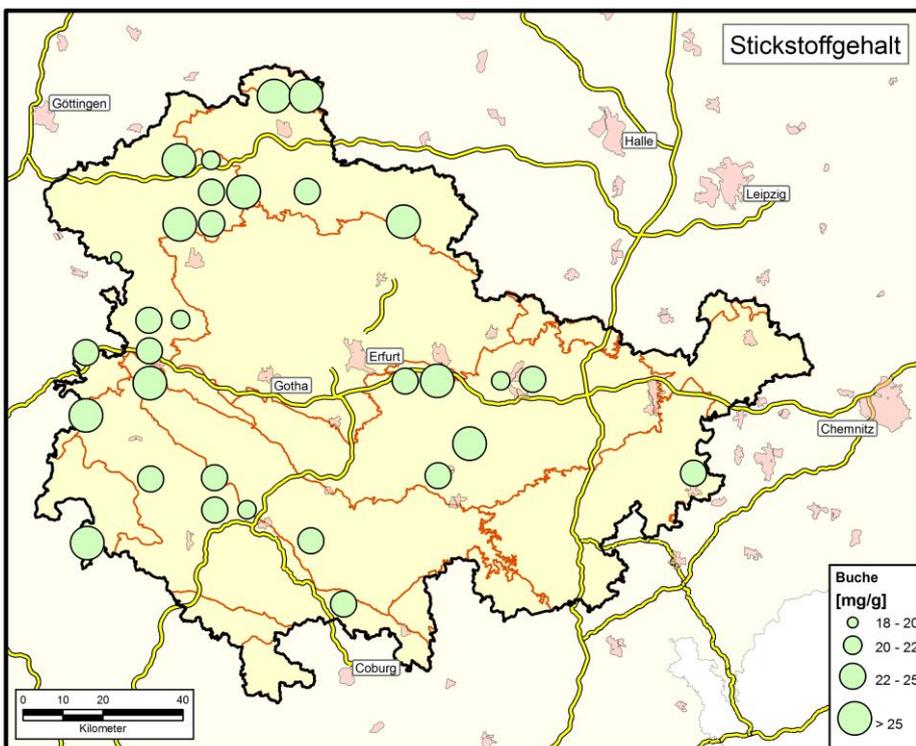
Karte 12.



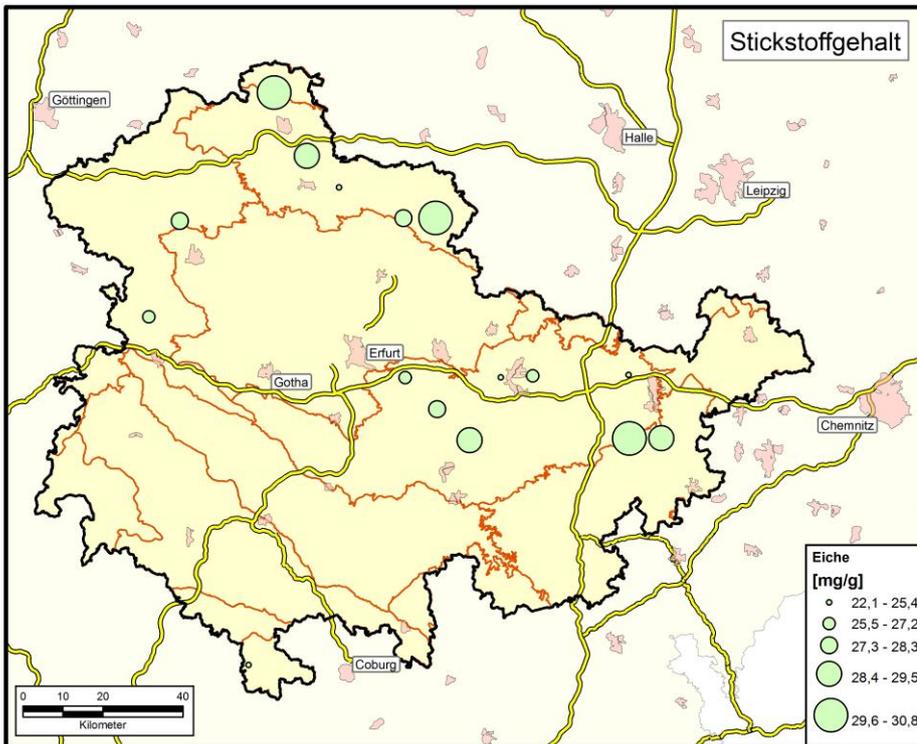
Karte 13.



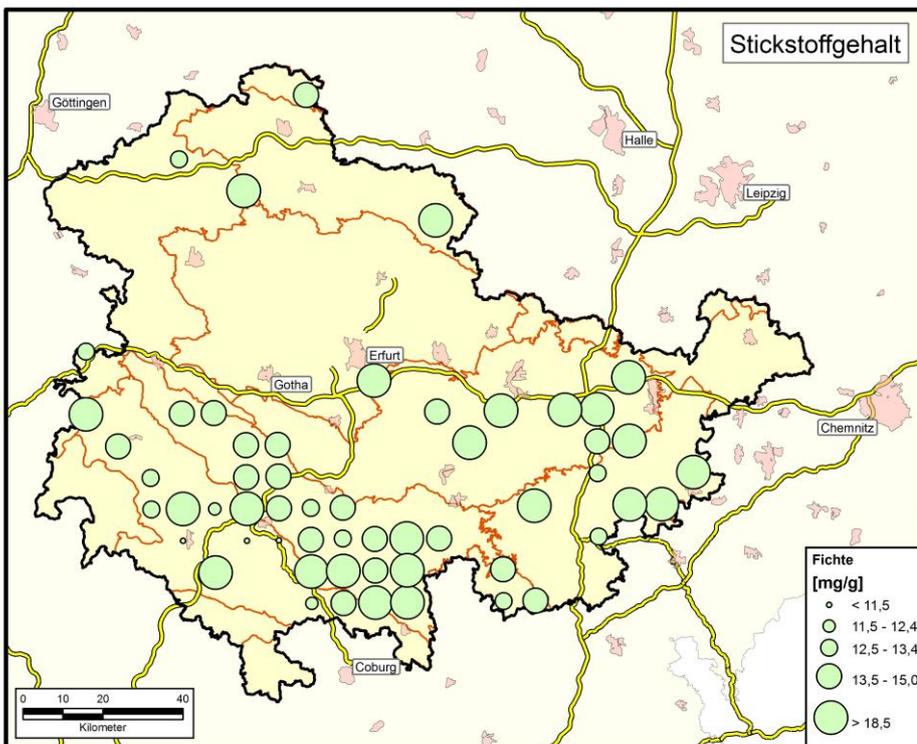
Karte 14.



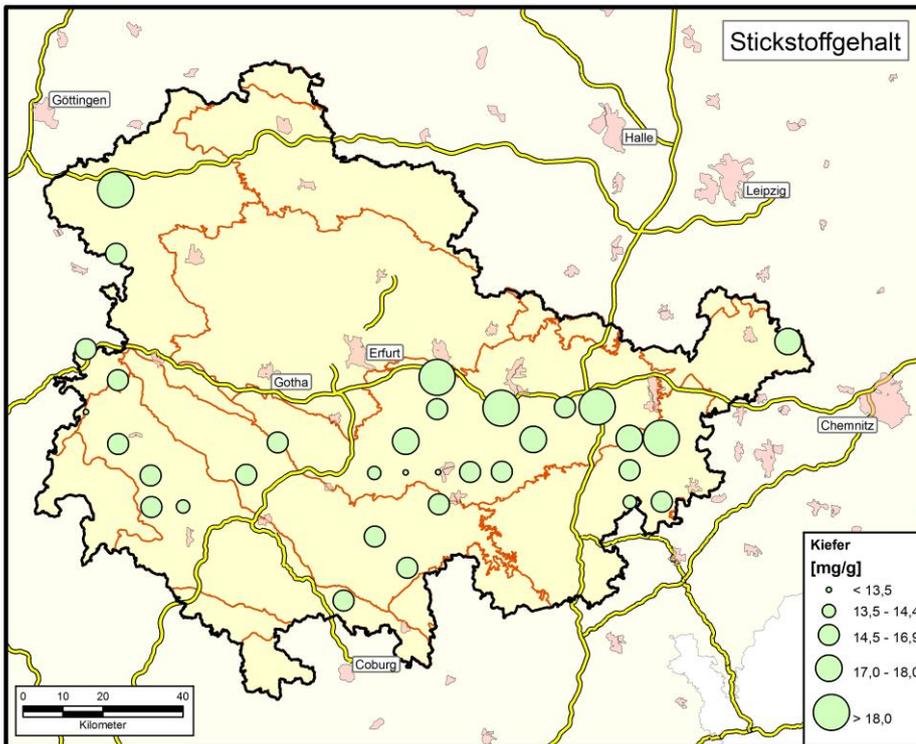
Karte 15.



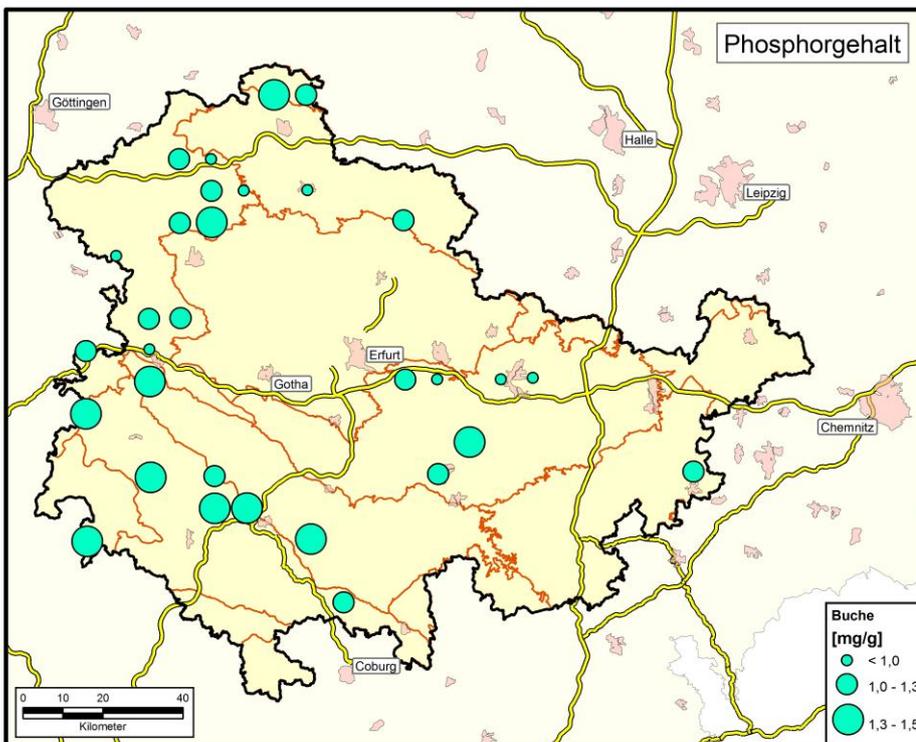
Karte 16.



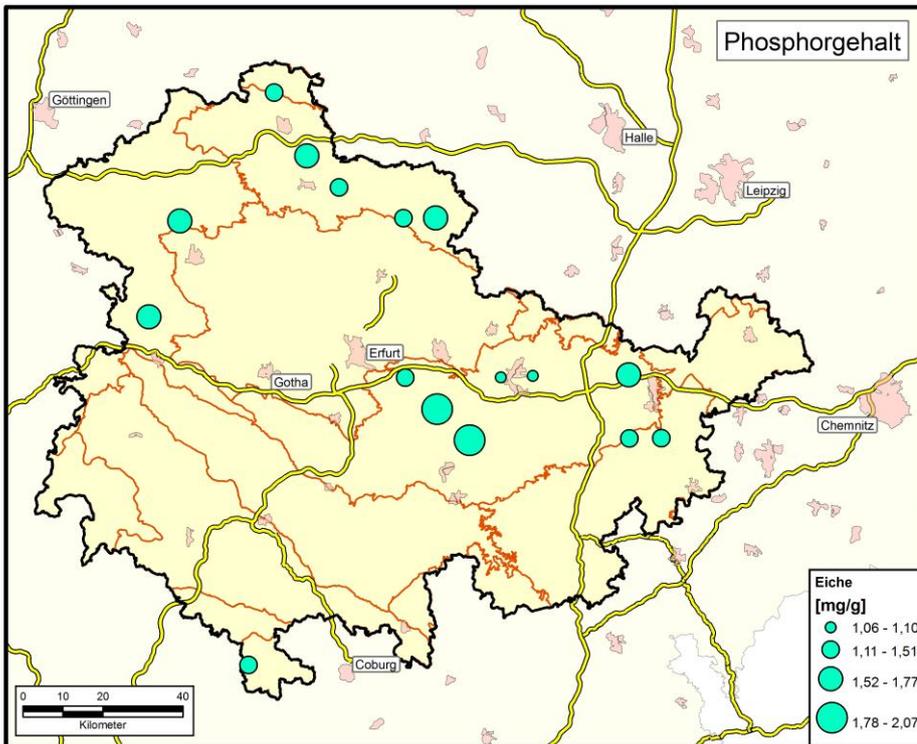
Karte 17.



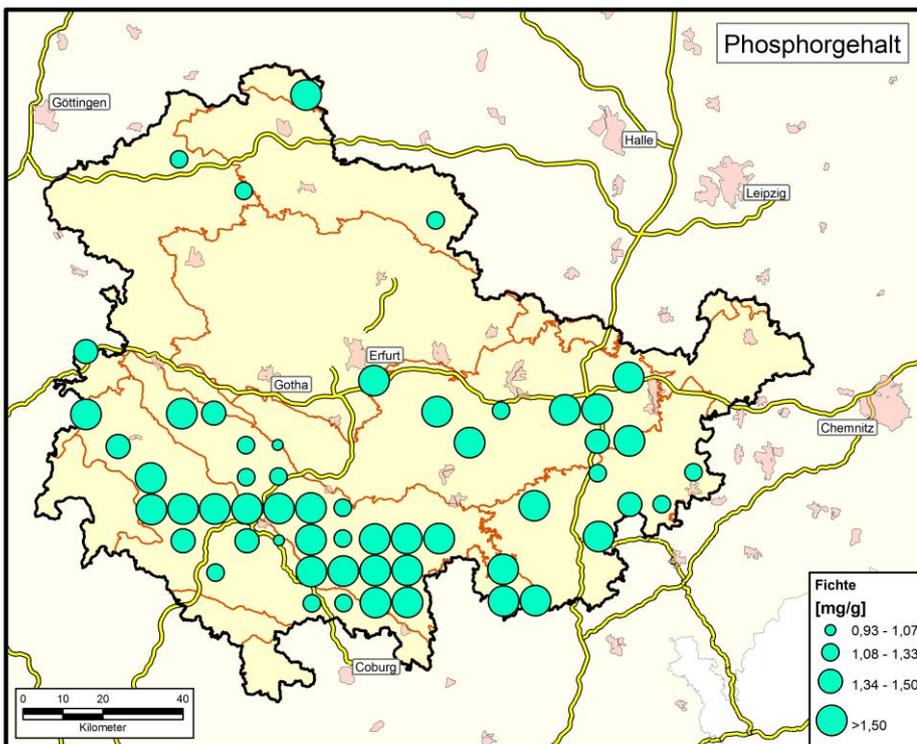
Karte 18.



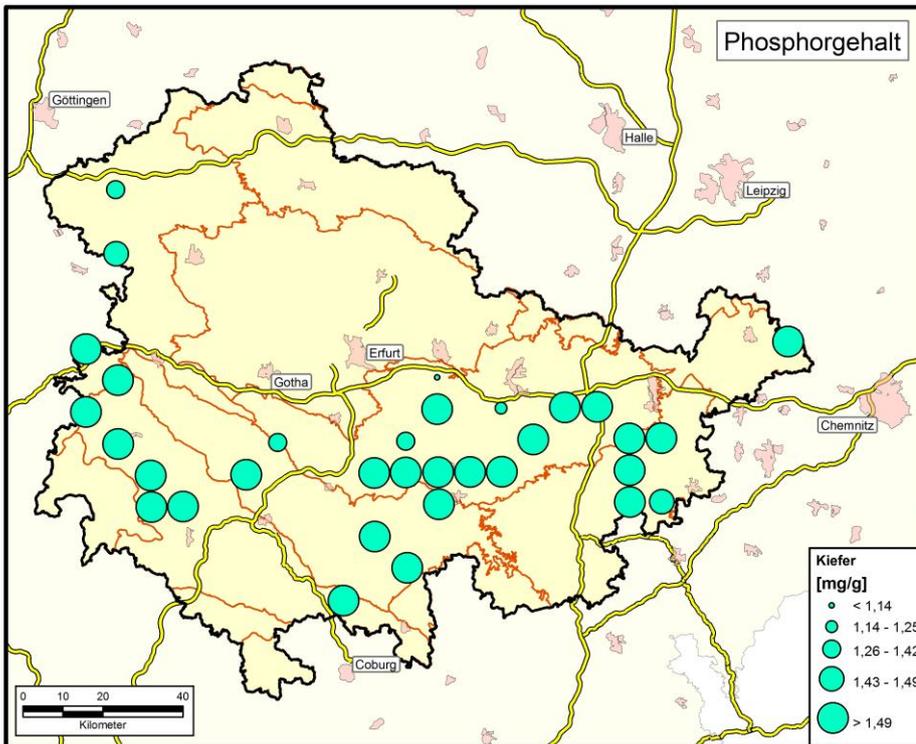
Karte 19.



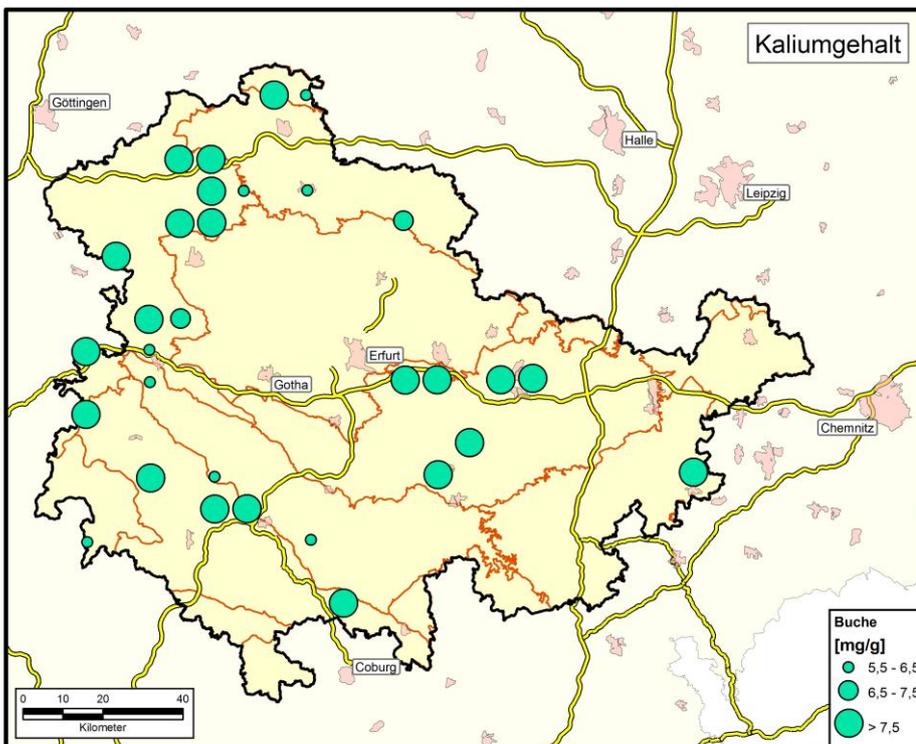
Karte 20.



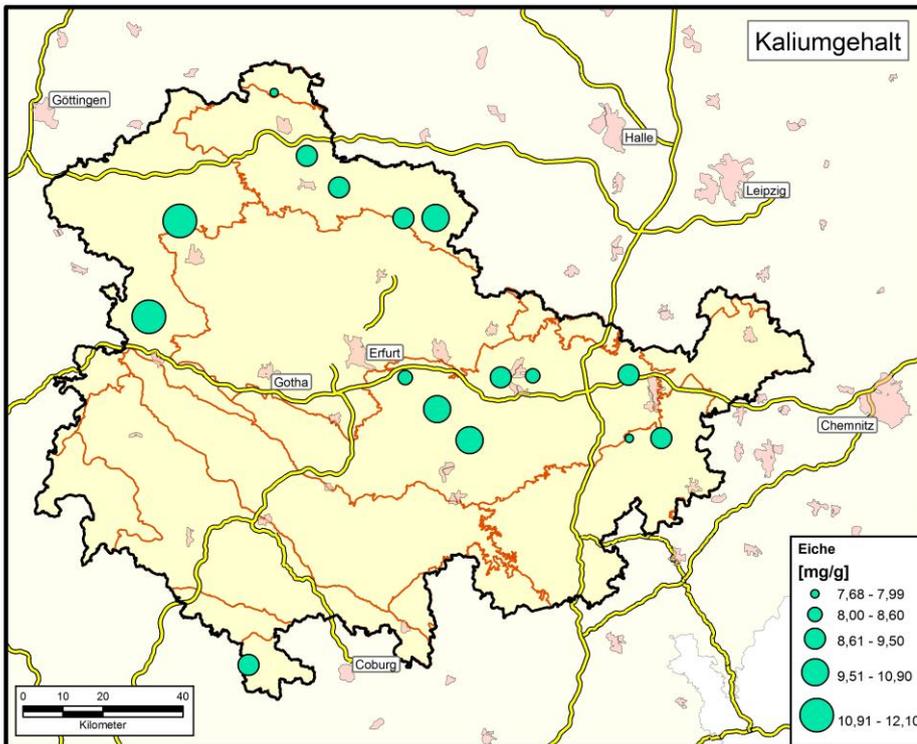
Karte 21.



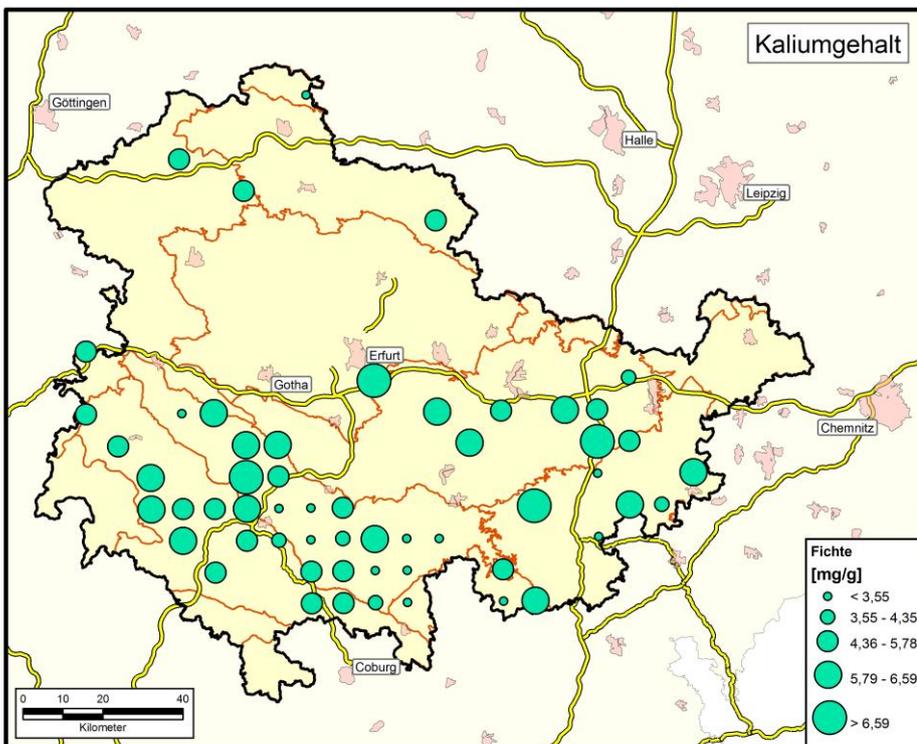
Karte 22.



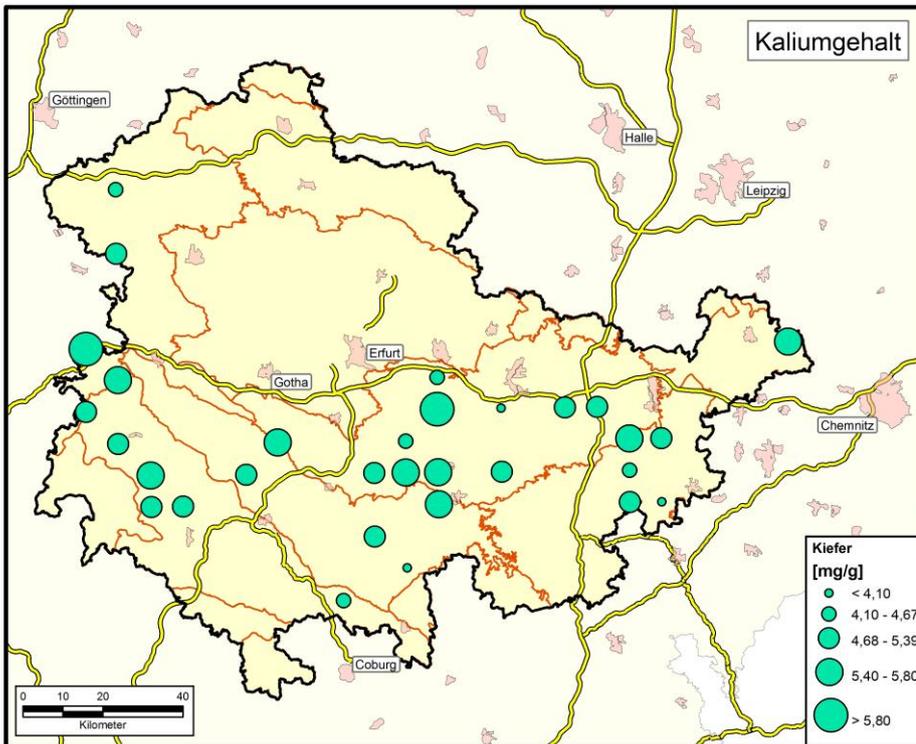
Karte 23.



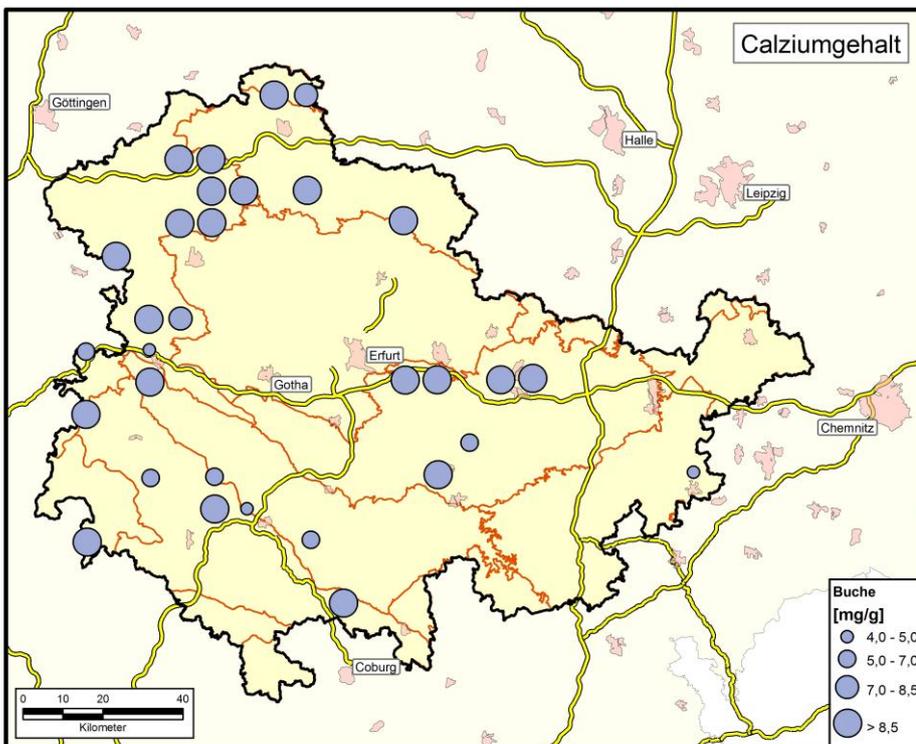
Karte 24.



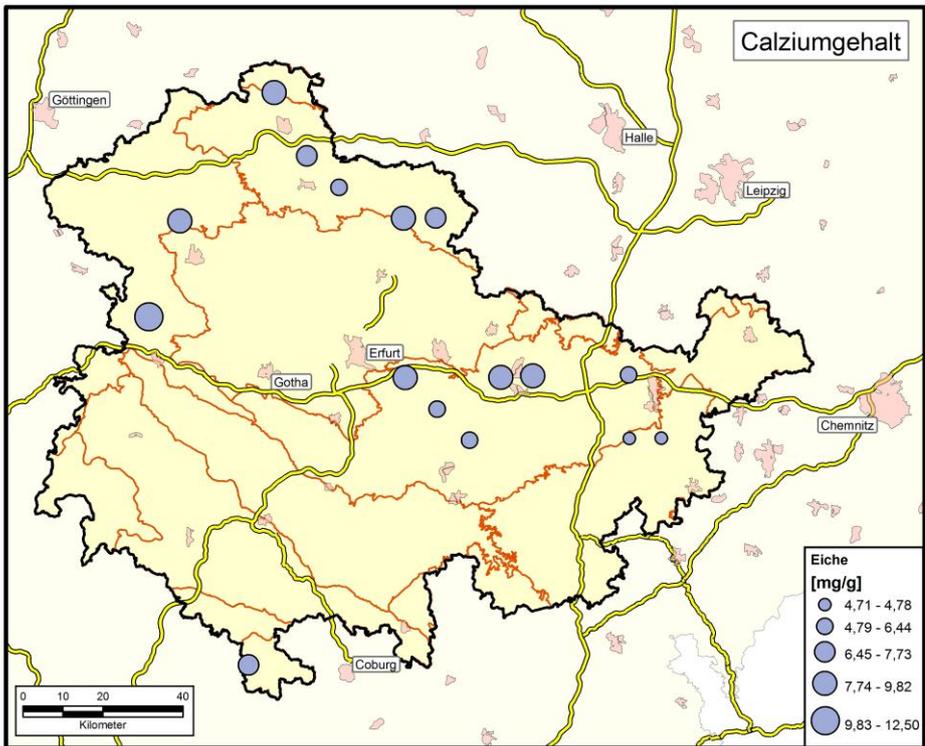
Karte 25.



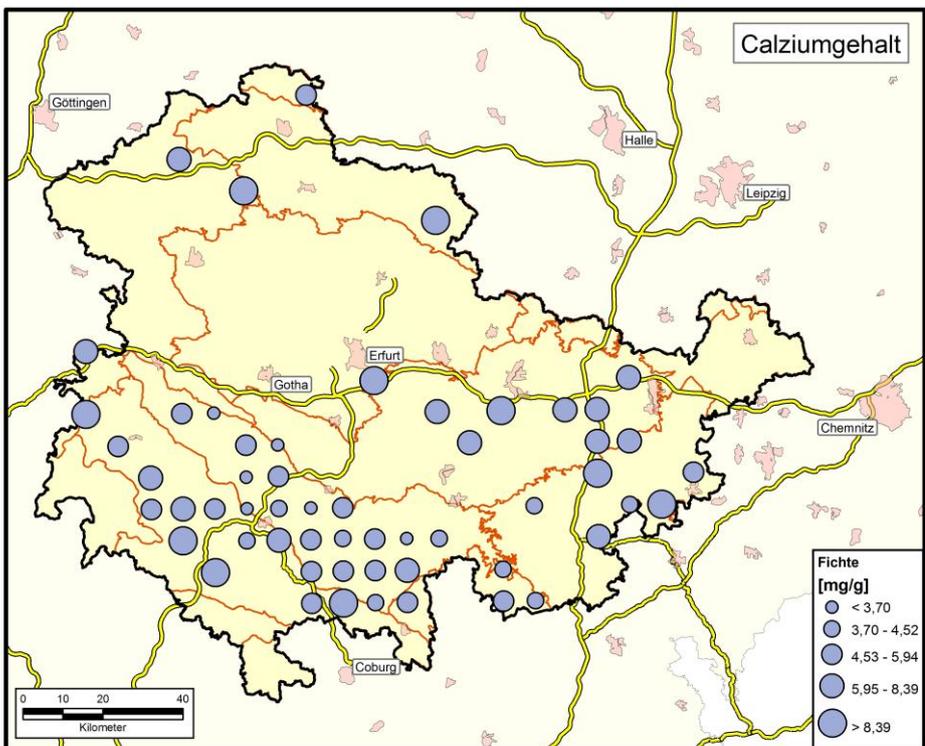
Karte 26.



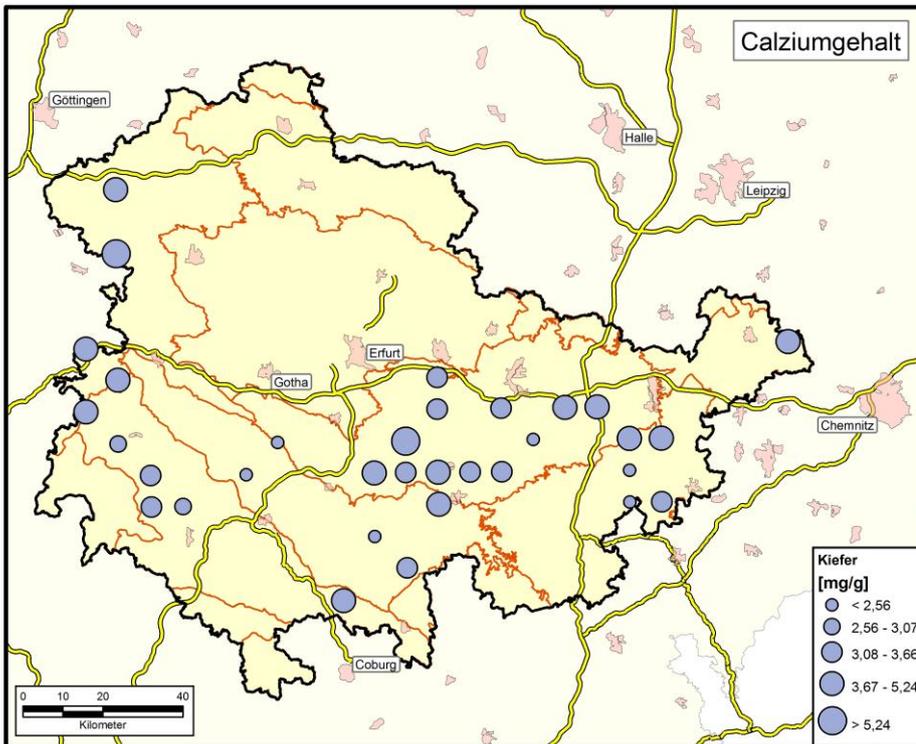
Karte 27.



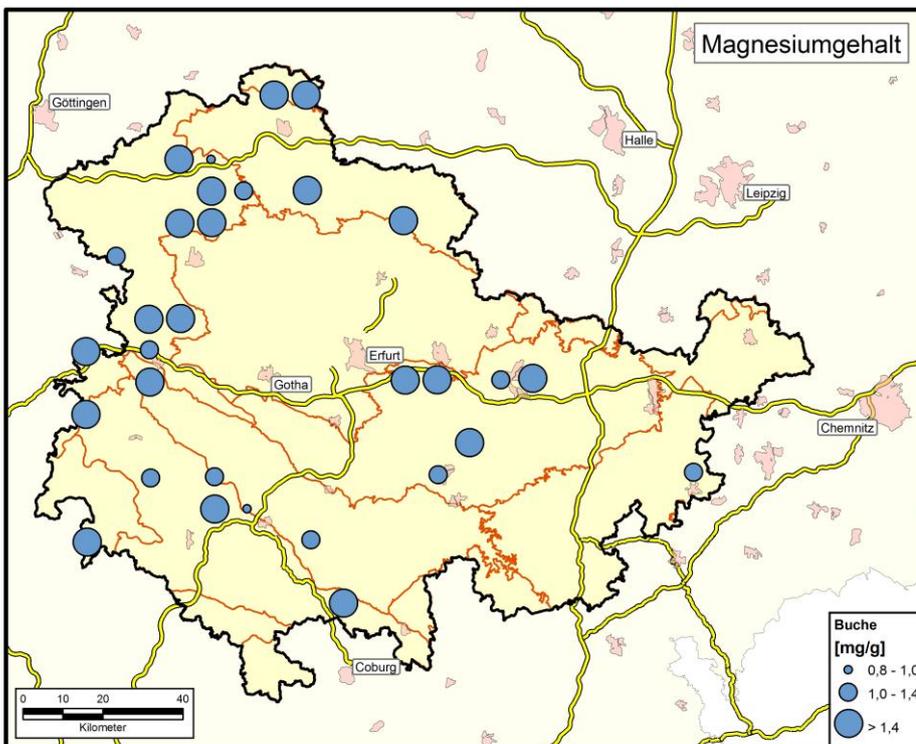
Karte 28.



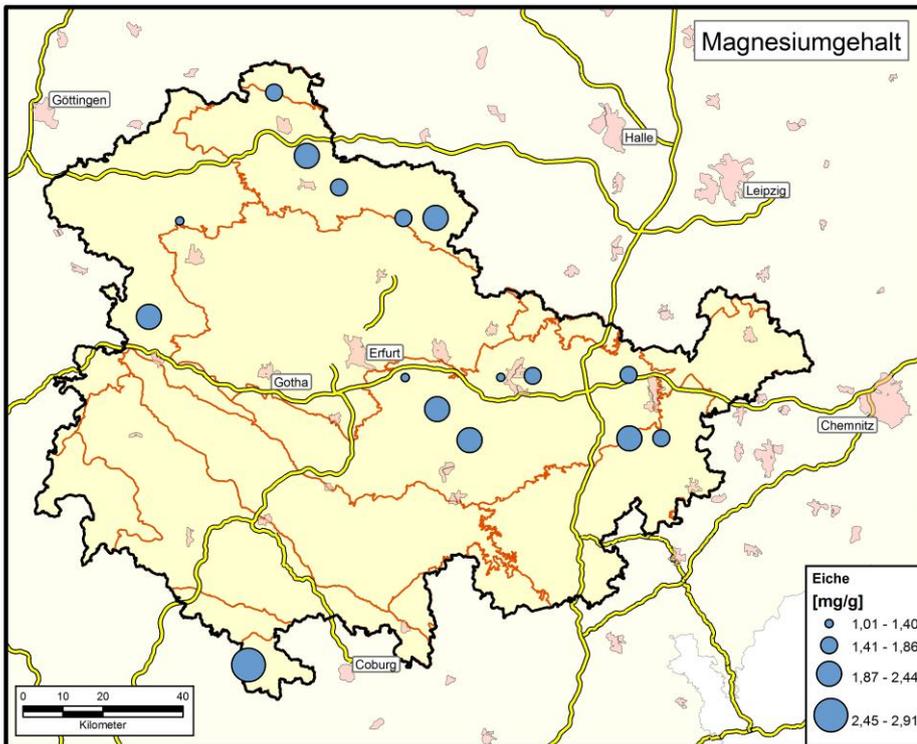
Karte 29.



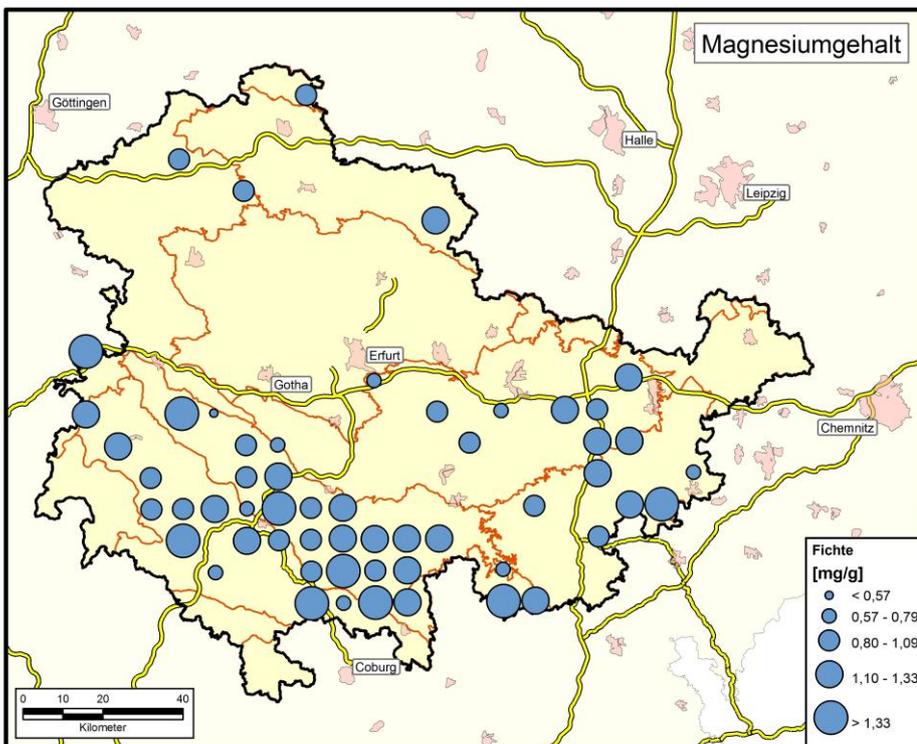
Karte 30.



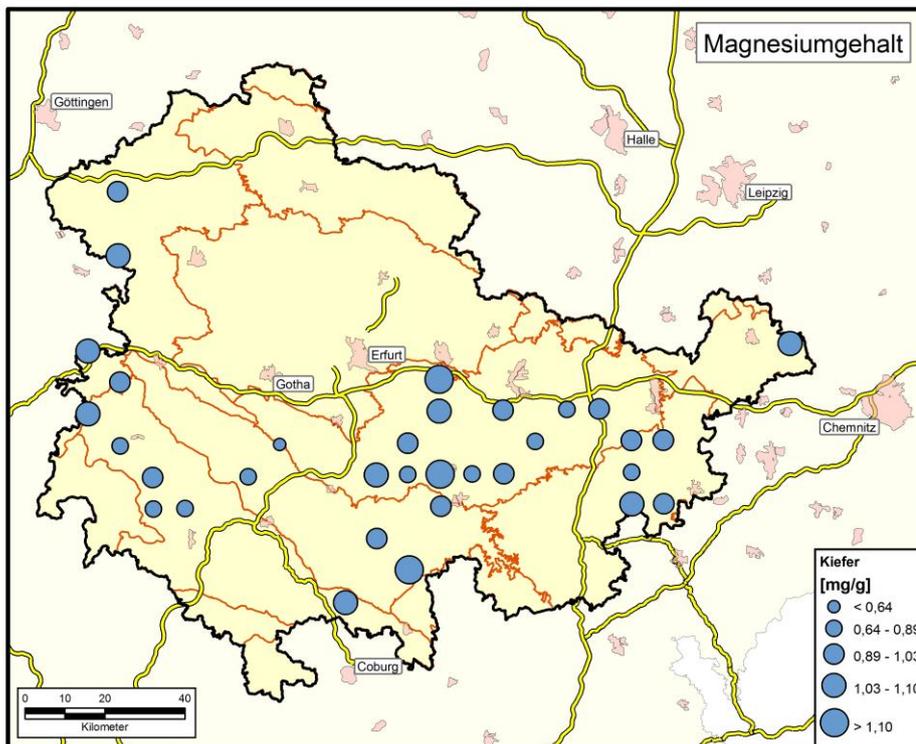
Karte 31.



Karte 32.



Karte 33.



Karte 34.

## 2.1.2 Spurenelemente

### Mangan – Mn

Mangan ist ein in der Natur häufig vorkommendes Element. Es kommt meist nur in verschiedenen chemischen Verbindungen von Mineralien vor. Gebundenes Mangan ist ein essentielles Spurenelement und wichtiger Bestandteil von vielen Enzymen. Es steigert die Verwertung des Vitamin B1. In Pflanzen wird es zur Bildung von Chloroplasten und zur Wasserspaltung benötigt und findet sich im Photosystem-Manganion. Da Mangan häufig in Verbindung mit Eisenerzen vorkommt, sind bei kalkhaltigen Substraten eher geringe Konzentrationen zu finden. Mangelerscheinungen bei Kiefer und Fichte sind bei Grenzwerten  $< 20 \text{ mg/kg TS}$  zu erwarten und äußern sich meist durch Blattchlorosen, welche durch die Dürrfleckenkrankheit diagnostiziert werden können. Bei Buche, Eiche und Kiefer ist der Grenzwert mit  $< 35 \text{ mg/g TS}$  angegeben.

Anhand der Ergebnisse der BZE II wurde die generell bekannte Streuung des Mangangehaltes wiedergespiegelt. Im Allgemeinen weisen 1-jährige Nadeln geringere Mn-Gehalte als 2-jährige Nadeln auf. Die Mn-Konzentration von 1- und 2-jährigen Nadeln der Fichte war deutlich höher als die von Kiefernnadeln (Median Fichte 1-jährig =  $911 \text{ mg/kg TS}$ , Fichte 2-jährig =  $1020 \text{ mg/kg TS}$ ; Kiefer 1-jährig =  $536 \text{ mg/kg}$

TS, Kiefer 2-jährig = 767,5 mg/kg TS). Weiterhin traten Unterschiede der Mn-Gehalte in der Assimilationsmasse der Laubgehölze auf. Somit wiesen Eichenblätter die höchsten Konzentrationen, gefolgt von Buche und Esche, auf (Median Buche = 732 mg/g TS, Eiche, = 1220 mg/g TS, Esche = 44,2 mg/g TS). Vergleicht man die Ergebnisse einzelner Standorte, so fällt auf, dass bei ca. 28 % aller Eschenbestände leichte Manganmängel zu verzeichnen sind. Betrachtet man die Analysen aber insgesamt, so spiegeln die Ergebnisse (Median) überwiegend eine ausreichende Versorgung der Fichten-, Kiefern-, Buchen-, Eichen- und Eschenstandorte in Thüringen wieder.

Fichtennadeln auf Standorten des Buntsandsteines weisen weitaus die höchsten Mn-Werte im Vergleich zu paläozoischen und kalkigen Standorten auf. Regionale Unterschiede sind zwischen den paläozoischen Standorten des Vogtlandes und des Thüringer Gebirges aufgetreten. Somit wiesen die Fichtennadeln bei Standorten im Vogtland höhere Werte als im Thüringer Gebirge auf. Bei den Standorten im Ostthüringischen Trias-Hügelland sind die Mn-Gehalte von Kiefer- und Fichtennadeln durchschnittlich höher als im Südthüringischen Trias-Hügelland. Insgesamt ist einzuschätzen, dass die Fichte sowie die Kiefer auf Kalkstandorten geringere Mn-Gehalte als auf Standorten des Buntsandsteines aufweisen. Betrachtet man die Blattspiegelwerte von Buche, so fallen bei den Beständen im Harz sowie mitteldeutschen Trias-Berg- und Hügelland die höchsten Mn-Blattgehalte auf. In Hinblick auf das geologische Ausgangssubstrat werden bei Standorten eutropher Silikatgesteine sowie Carbonatgesteine hohe Mn-Blattspiegelwerte erreicht.

### **Eisen – Fe**

Eisen ist mengenmäßig ein häufig vorkommendes Element der Erdkruste. Aufgrund der Reaktionsfreudigkeit mit Wasser und Sauerstoff ist reines Eisen wenig stabil, so dass es meist in Legierungen sowie in Verbindung mit anderen Mineralien vorkommt (z.B. Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), Hämatit - Roteisenstein (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Pyrit (FeS<sub>2</sub>)). Als essentielles Element beeinflusst es in pflanzlichen Organismen die Photosynthese sowie die Bildung von Chloroplasten und Kohlenhydraten.

Typische Mangelsymptome an Nadeln treten bei < 20 mg/kg TS auf. Sie äußern sich durch Aufhellungen bzw. Chlorosen der Assimilationsorgane. Auch gedämpftes Pflanzenwachstum sowie Kümmerwuchs von Nadelmasse können die Folgen sein.

Anhand der Ergebnisauswertung der BZE II wurde festgestellt, dass 1-jährige Nadeln geringere Fe-Gehalte als 2-jährige Nadeljahrgänge aufweisen. Insgesamt liegen diese Werte über dem Grenzwert von 20 mg/kg TS, so dass eine ausreichende Fe-Versorgung in Thüringen als gesichert gilt.

1-jährige Fichtennadeln weisen mit dem Median von 66,1 mg/kg TS höhere Werte auf, als dies bei Kiefernadeln (Median Kiefer 1-jährig = 61,1 mg/kg TS) der Fall ist. Anders verhält es sich mit den Fe-Gehalten 2-jähriger Nadelmasse. So weisen

Kiefernadeln mit einem Median von 82,5 mg/kg TS im Durchschnitt höhere Werte als bei Fichtennadeln (Median Fichte 2-jährig = 80,2 mg/kg TS) auf.

Wie zu erwarten, wurden auf kalkigen Standorten und Standorten des Rotliegenden im Verhältnis zu den übrigen Probepunkten niedrigere Eisengehalte vorgefunden. Somit ist von einer besseren Fe-Versorgung in Bereichen des Buntsandsteins sowie von Schiefen auszugehen. Weiterhin fiel auf, dass der ostthüringische und vogtländische Raum, auf Standorten des Buntsandsteins höhere Werte aufweist, als jene Standorte im südthüringischen Raum und Thüringer Gebirge. Auch bei den Buchenbeständen sind die hohen Blattspiegelwerte auf nährstoffärmere Silikatgesteine wie Buntsandstein und Rotliegendes begrenzt. Vor allem im mitteldeutschen Trias Berg- und Hügelland nahe Gerstungen sind hohe Fe-Gehalte in der Blattmasse vorgefunden worden.

### **Kupfer – Cu**

Kupfer ist wie Eisen ein häufig in der Natur vorkommendes Element. Hier ist es meist in chemischen Verbindungen, in Form von Erzen, Mineralen und Gesteinen zu finden (z.B. Kupferkies ( $\text{CuFeS}_2$ ), Kupferschiefer). Als essentielles Element von Pflanzen ist es ähnlich wie Mangan wichtiger Bestandteil von Enzymen und nach SCHACHTSCHABEL (1998) mit entscheidend für den N-Stoffwechsel.

Bei einem Grenzwert von  $< 2$  mg/kg TS ist von Mangelercheinungen an den Nadelgehölzen Fichte und Kiefer auszugehen. Mangelsymptome treten bei Buche bei  $< 5$  mg/kg TS sowie bei Eiche und Esche bei  $< 6$  mg/g TS ein. Symptome für Kupfermangel sind Chlorosen, welche sich durch gelbe bis weißliche Verfärbungen junger Assimilationsorgane äußern können. Auch das Einrollen sowie Absterben des Vegetationspunktes wurde beobachtet, so dass Büscheltriebe auftreten.

Insgesamt kann aufgrund die Ergebnisse der BZE II eingeschätzt werden, dass weder bei Fichte und Kiefer die Grenzwerte unterschritten werden. Somit ist von einer ausreichenden Cu-Versorgung in den Fichten- und Kiefernwäldern des Freistaates Thüringen auszugehen (Median Fichte 1-jährig = 3,4 mg/kg TS, Fichte 2-jährig = 3,3 mg/kg TS; Kiefer 1-jährig = 4,2 mg/kg TS, Kiefer 2-jährig = 4,0 mg/kg TS). Zudem wiesen 1- und 2-jährige Nadeln relativ gleiche Cu-Gehalte auf, wobei Unterschiede zwischen den Baumarten Fichte und Kiefer festgestellt worden sind. Somit liegen die Cu-Gehalte bei Fichte deutlich unter denen von Kiefer. Bei den Laubgehölzen liegen diese deutlich über den Werten der Nadelgehölze. Die höchsten Kupferkonzentrationen sind in Eschenblättern festzustellen, wobei die niedrigeren Kupfergehalte bei Eiche und Buche nicht wesentlich voneinander abweichen (Median Buche = 7,0 mg/kg TS; Eiche = 7,5 mg/kg TS; Esche = 10,9 mg/kg TS). Insgesamt weisen Nadel- sowie Laubwälder eine ausreichende Kupferversorgung auf.

Allgemein ist festzustellen, dass der Kupfergehalt von Nadeln und Blättern auf Kalkstandorten über denen von Standorten des Buntsandsteins liegen. Paläozoisch geprägte Standorte sind mit ihrem Cu-Gehalt zwischen den eben genannten Standorten einzugliedern. Die Baumarten Fichte und Kiefer sind aufgrund der geologischen Gegebenheiten im südthüringischen Raum deutlich schwächer mit Cu versorgt, als dies im ostthüringischen Raum sowie im Thüringer Gebirge der Fall ist.

## **Zink – Zn**

Zink ist als essentielles Spurenelement ebenfalls häufig in der Natur vertreten und kommt meist in Form von chemischen Verbindungen vor (z.B. Zinkacetat ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ), Zinksulfid ( $\text{ZnS}$ )). Es ist für Pflanzen, wie Mangan und Kupfer, wichtiger Bestandteil von Enzymen. Bei zu hohen Konzentrationen können aber auch Schädigungen an Pflanzen auftreten.

Bei Fichte und Kiefer sind als untere kritische Versorgungsgrenze 20 mg/kg TS und als obere Versorgungsgrenze 90 mg/kg TS anzunehmen. Bei den Laubgehölzen Buche, Eiche und Esche sind die kritischen Versorgungsgrenzen 15 mg/kg TS und 90 mg/kg TS. Symptome für einen Zn-Überschuss ähneln denen von Fe- oder Mn-Mangel. Dabei bilden junge Assimilationsorgane Chlorosen auf und vergilben. Die Symptome eines Zn-Mangels äußern sich durch das Einrollen und die Kleinwüchsigkeit junger Blätter und Nadeln sowie Chlorosen und Nekrosen an älteren Assimilationsorganen.

Die Auswertung der Ergebnisse der BZE II erbrachte, dass die Zink-Gehalte bei den Nadelgehölzen höher als die von Laubgehölzen sind. Bei den Nadelgehölzen weist die Kiefer insgesamt höhere Werte als die Fichte auf. Weiterhin auffällig ist der Zn-Gehalt bei Fichtennadeln. So weisen 1-jährige Nadeln höhere Konzentrationen als 2-jährige Nadeljahrgänge auf (Median Fichte 1-jährig = 31,5 mg/kg TS, Fichte 2-jährig = 27,9 mg/kg TS; Kiefer 1-jährig = 42,5 mg/kg TS, Kiefer 2-jährig = 47,8 mg/kg TS).

Die Zinkgehalte der Blattmasse von Buche (26,5 mg/kg TS) sind gegenüber denen von Esche (21,6 mg/kg TS) und Eiche (19,6 mg/kg TS) deutlich höher.

Nach den Ergebnissen der BZE II konnte insgesamt bei den Nadel- und Laubholzbeständen weder ein kritischer Zn-Mangel noch ein Zn-Überschuss festgestellt werden.

Eine gute Zinkversorgung scheint auf Kalkstandorten gegeben zu sein. Buntsandsteingeprägte Standorte sind dem gegenüber als durchschnittlich mit Zink versorgt anzusehen. Bei den durch paläozoische Gesteine geprägten Standorten ist die Versorgung als eher schwach zu charakterisieren. Die Nadelgehölze Fichte und Kiefer sind im ostthüringischen Raum deutlich besser versorgt, als dies in

Südthüringen (südthüringisches Trias-Hügelland) sowie dem Thüringer Gebirge der Fall ist, obwohl in diesen Wuchsgebieten ebenfalls hohe Zn-Werte festgestellt wurden. Bei den Buchenbeständen weisen jene im ostthüringischen Trias-Hügelland nahe Jena und Bad Berka sowie neben denen im südthüringischen Trias-Hügelland die höchsten Zn-Gehalte auf. Auch in der Rhön wurden hohe Blattspiegelwerte ermittelt.

### **Silizium - Si**

Silizium ist als wichtiger Bestandteil des Erdmantels mengenmäßig sehr häufig und tritt in Form von silikatischen Mineralien oder als reines Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) bzw. Quarzsanden auf. Es gilt bei forstlich genutzten Gehölzen als nicht essentiell, wobei Si-Verbindungen in den Zellwänden von Pflanzen und Gehölzen zu finden sind. Bei einigen Pflanzenarten dient es als Stütz- und Gerüstsubstanz der Zellwände (z.B. Schachtelhalm).

Die Ergebnisse der BZE II zeigen, dass bei den Nadelgehölzen die Fichte und bei den Laubgehölzen die Buche die höchsten Si-Gehalte in der Assimilationsmasse aufweisen. Weiterhin zeigte sich, dass die Si-Konzentration mit zunehmendem Nadeljahrgang ansteigt, wobei deutliche Unterschiede zwischen Fichte und Kiefer bestehen und sich diese beim Vergleich der 2-jährigen Nadeln besonders äußert (Median Fichte 1-jährig = 2,7 mg/g TS, Fichte 2-jährig = 6,0 mg/g TS; Kiefer 1-jährig = 0,4 mg/g TS, Kiefer 2-jährig 0,6 mg/g TS).

Mit 4,7 mg/g TS ist der durchschnittliche Si-Gehalt für die Buche anzugeben. Dieser liegt damit deutlich über denen von Eiche (Median = 3,6 mg/g TS) und Esche (Median = 0,8 mg/g TS). Als mögliche Ursache für diese Schwankungen sind substratspezifische Gegebenheiten der Bestände anzuführen. Auch innerhalb der Baumarten treten Unterschiede in Abhängigkeit des Ausgangsgesteins auf.

Somit variieren die Si-Gehalte großräumig. Substratbezogene Differenzierungen sind für die Fichte, aber nicht für die Kiefer offenkundig. Demnach weist die Fichte höhere Si-Gehalte bei Böden auf, welche durch paläozoische Gesteine geprägt sind, als dies bei mesozoischen Gesteinen der Fall ist. Großräumlich gesehen sind die Nadelspiegelwerte von Fichte in Ostthüringen und dem Thüringer Gebirge höher als im südthüringischen Raum. Bei der Kiefer sind keine so gravierenden Unterschiede feststellbar, da hier die Nadelspiegelwerte im gesamten Freistaat ähnlich hohe Werte aufweisen. Die Buchenbestände auf eutrophen Silikatgesteinen im Harz sowie auf Schlufflehm- und Silikatgesteinstandorten im mitteldeutschen Trias-, Berg- und Hügelland haben die höchsten Blattspiegelwerte.

## Schwefel - S

Schwefel ist für alle Organismen ein unentbehrliches Element. Es kommt neben der rein gediegenen, auch in Form von chemischen Verbindungen sulfidischer Mineralien (z.B. Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ), Kupferkies ( $\text{CuFeS}_2$ ) und Zinkblende ( $\text{ZnS}$ )), Sulfaten (z.B. Gips ( $\text{CaSO}_4$ )) und als reines Sulfation vor. Er ist wichtiger Bestandteil von Aminosäuren, Proteinen, Enzymen und Eiweißen. Die Pflanzen nehmen Schwefel meist über die Wurzel in Ionenform auf. Er wird in den Chloroplasten reduziert und es bilden sich u.a. Cysteine.

Als eine anthropogene Quelle für Schwefeloxide sind die Abgase bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle zu nennen, die sich in der Atmosphäre (in Form von  $\text{SO}_2$ ) anreichern und schädigende Wirkung auf Pflanzen haben kann.

Für die Nadelgehölze Fichte und Kiefer ist bei einem Schwefelgehalt von  $> 1,4 \text{ mg/g TS}$  von Schädigungen auszugehen. Für Buche, Eiche und Esche treten Schadsymptome bei Werten  $> 0,8 \text{ mg/g TS}$  auf.

Nach den Ergebnissen der BZE II sind die durchschnittlichen S-Werte für Fichten und Kiefernadeln als annähernd gleich zu beschreiben, wobei auch keine Konzentrationsunterschiede zwischen den Nadeljahrgängen vorkamen (Median Fichte 1-jährig =  $1,0 \text{ mg/g TS}$ , Fichte 2-jährig =  $1,0 \text{ mg/g TS}$ ; Kiefer 1-jährig =  $1,2 \text{ mg/g TS}$ , Kiefer 2-jährig =  $1,2 \text{ mg/g TS}$ ). Insgesamt ist festzustellen, dass der S-Gehalt der Nadeln aller Fichtenbestände unterhalb des Grenzwertes liegt und somit von keiner Schädigung auszugehen ist. Lediglich bei 5 % aller Kiefernbestände wird der Grenzwert überschritten, so dass diese als belastet anzusehen sind.

Für die Laubgehölze sind aufgrund der ausgewerteten Ergebnisse die S-Gehalte der Blattmasse als sehr hoch zu beschreiben (Median Buche =  $1,6 \text{ mg/g TS}$ , Eiche =  $1,8 \text{ mg/g TS}$ , Esche =  $3,2 \text{ mg/g TS}$ ). Würde man die eben beschriebene Schadschwelle von  $> 0,8 \text{ mg/g TS}$  berücksichtigen, so wären alle Laubholzbestände geschädigt. Die Waldschadenserhebung (vgl. Kap. 1.5) weist aber nur 22-30% der Buchen- und Eichenbestände mit Kronenverlichtungen aus. Möglicherweise sind verzögerte Spätfolgen der hohen S-Einträge in der Vergangenheit noch zu erwarten.

Als Trend zeigt sich, dass die Nadelgehölzbestände im ostthüringischen Raum höhere Schwefelwerte aufweisen. Hier treten vor allem die Standorte um die meist industriell geprägten Städte Gera, Altenburg und Greiz/Elsterberg hervor. Exponierte Untersuchungsstandorte sind aufgrund ihrer auskämmenden Wirkung für Luftschadstoffe in den Bereichen des südthüringischen Trias-Hügellandes betroffen. Die niedrigsten Werte kommen in Südthüringen vor. Bei den Buchenbeständen ergeben sich keine regionalen Variabilitäten, so dass für den gesamten Thüringischen Raum von annähernd gleichen S-Gehalten auszugehen ist. Im Vergleich mit der BZE I ist bei den Nadelspiegelwerten von Schwefel ein allgemeiner Rückgang im Freistaat Thüringen zu beobachten. Dieser Trend belegt die erfolgte

Reduzierung von Schwefelemissionen, die auf rechtlichen und technischen Neuerungen auf dem Gebiet des technischen und produktionsintegrierten Umweltschutzes sowie auf einen Rückgang der ansässigen Schwerindustrie (z.B. Abgas- und Rauchgasreinigung, Kfz-Kat, usw.) zurückzuführen ist.

## **Chlor - Cl**

Aufgrund der hohen Reaktionsfreudigkeit kommt Chlor sehr selten in gediegener, meist nur in chemischen Verbindungen in Form von Chloriden bzw. Salzen (z.B. Kaliumchlorid (KCl)) vor. Auch bei Vulkanausbrüchen und der Verbrennung von Biomasse werden chlororganische Verbindungen gebildet.

Ebenfalls ist Chlor, abhängig von seiner Konzentration, als essentielles Element für terrestrische Pflanzen zu beschreiben. Hier hat es positive Wirkung auf osmoregulatorische Vorgänge sowie die Photosynthese von Pflanzen. Elementares Chlor hingegen wirkt sich aufgrund der oxidierenden Wirkung meist negativ auf Assimilationsorgane aus.

Nach BERGMANN (1993) sind Schwellenwerte, bei denen Schadsymptome auftreten, für Nadelgehölze mit 0,3% - 0,5% Cl i.d.TM und für Laubgehölze mit 1,0 % i.d.TM anzugeben.

Die Chlorgehalte der Fichtennadeln sind im Gegensatz zu den Gehalten von Kiefernadeln deutlich höher (Median Fichte 1-jährig = 485,5 mg/kg TS, Fichte 2-jährig = 456,0 mg/Kg TS; Kiefer 1-jährig (305,0 mg/kg TS, Kiefer 2-jährig = 289,5 mg/kg TS). Weiterhin fällt auf, dass der Gehalt 1-jähriger Nadeln bei Fichte und bei Kiefer meist über denen 2-jähriger Nadeljahrgänge liegt. Bei den Laubgehölzen weist die Esche mit durchschnittlich 1117,0 mg/kg TS den höchsten Cl-Gehalt innerhalb der Blätter auf. Mit 95 mg/kg TS besitzt die Buche den geringsten Cl-Gehalt, gefolgt von Eiche mit 162 mg/kg TS.

Fichtenstandorte auf paläozoischen Grundgesteinen weisen aufgrund ihrer topographischen Lage (Gebirgsstandorte > 500 m ü. NN) durchschnittlich niedrige Chlorgehalte in den Nadeln auf. Höhere Werte werden bei den Gebirgsvorländern der Trias-Prägung erreicht. Im industriell geprägten ostthüringischen Raum kommen hohe Cl-Nadelspiegelwerte im Bereich nahe von Schleiz vor. Auch bei der Buche treten hohe Werte im ostthüringischen Raum (Vogtland) nahe von Greiz, sowie im mitteldeutschen Trias- Berg- und Hügelland auf. Die Kiefernstandorte im gesamten Freistaat Thüringen zeigen sehr ähnliche Nadelspiegelwerte, so dass keine regionalen Unterschiede bestehen.

## Blei - Pb

Blei kommt meist in Form von Mineralien bzw. anorganischen Verbindungen (z.B. Cerussit ( $\text{PbCO}_3$ ) Anglesit ( $\text{PbSO}_4$ ) vor und wird von der Pflanze meist über den Bodenpfad nur in geringsten Mengen aufgenommen. Hier ist darauf hinzuweisen, dass Böden von Natur aus zwischen 2 und 60 mg/kg Blei enthalten können. Der überwiegende Teil hoher Bleibelastungen von Böden ist auf anthropogene Ursprünge zurückzuführen. Der Großteil der Immissionen erfolgt über Bleistäube auf dem Luftpfad, welche durch nasse bzw. trockene Deposition in die Böden gelangen. Hauptquellen für Bleistäube sind neben der bleierzeugenden Industrie das Verbrennen von Kohle und Müll. Auch der Autoverkehr (z.B. Tetraethylblei ( $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ ) – Antiklopfmittel) galt in der Vergangenheit als eine der Hauptquellen für Schäden, da die Pflanze bewegliche organisch gebundene Bleiverbindungen leicht und schnell aufnehmen kann.

Die Ergebnisse der BZE II zeigen, dass alle untersuchten Laubgehölze (Bu, Ei, Es) mit durchschnittlich 0,2 mg/kg TS der Blattmasse nur über sehr geringe Bleikonzentrationen verfügen. Ähnlich geringe Bleigehalte sind bei den Nadelgehölzen Fichte und Kiefer zu verzeichnen, wobei die Kiefer gegenüber der Fichte einen höheren Wert aufweist (Median Fichte 1-jährig = 0,2 mg/kg TS, Fichte 2-jährig = 0,3 mg/kg TS; Kiefer 1-jährig = 0,4 mg/kg TS, Kiefer 2-jährig = 0,5 mg/kg TS). Auch der Anstieg der Pb-Konzentration mit zunehmendem Nadelalter ist bei beiden Nadelgehölzen gleichermaßen gegeben.

Im Vergleich zur BZE I zeichnet sich ein Rückgang der Blei-Gehalte innerhalb der Assimilationsmasse von Nadelgehölzen ab. Dieser deutliche Rückgang um mehr als 50% ist u.a. auf die Neuerungen der Automobilbranche, speziell der Abgasreinigung sowie Verbrennungstechnologie zurückzuführen. Trotz dieser Entwicklungen zeichnen sich die in der Nähe zu den Bundesautobahnen gelegenen BZE-Flächen immer noch durch erhöhte Pb- Werte aus, da hier von einer erhöhten Ablagerung bleihaltiger Verbindungen auf Assimilationsorganen durch Aufwirbelungen alter Stäube im Straßenraum auszugehen ist. Auch bei den Industriestandorten im Raum Greiz sowie Ballungszentren im Raum Erfurt und Jena sind erhöhte Pb-Gehalte bei Buche und Eiche gegeben. Im nordthüringischen Raum treten ebenfalls hohe Bleigehalte bei Eiche und Buche auf, wobei im Bereich um Leinefelde gehäuft hohe Bleiwerte bei Buche vorkommen. Diese liegen in direkter Nähe zur neu gebauten A 38 sowie zu der Bundesstraße 247. Auch im Bereich Eisenach nahe der A 4 (mitteldeutsches Trias-, Berg- und Hügelland) sowie nahe Suhl (Thüringer Gebirge) sind erhöhte Bleigehalte bei Buche anzutreffen. Die Fichte weist lediglich im Thüringer Gebirge nahe Suhl, am Autobahndreieck der A 71 und A 73, erhöhte Bleigehalte auf. Auch bei der Kiefer sind hohe Nadelspiegelwerte bei Suhl (Thüringer Gebirge) sowie nahe Eisfeld (Oberfränkisches Trias-Hügelland) anzutreffen. Da diese Probepunkte in der Nähe zu Bundesautobahnen verlaufen, kann hier ein

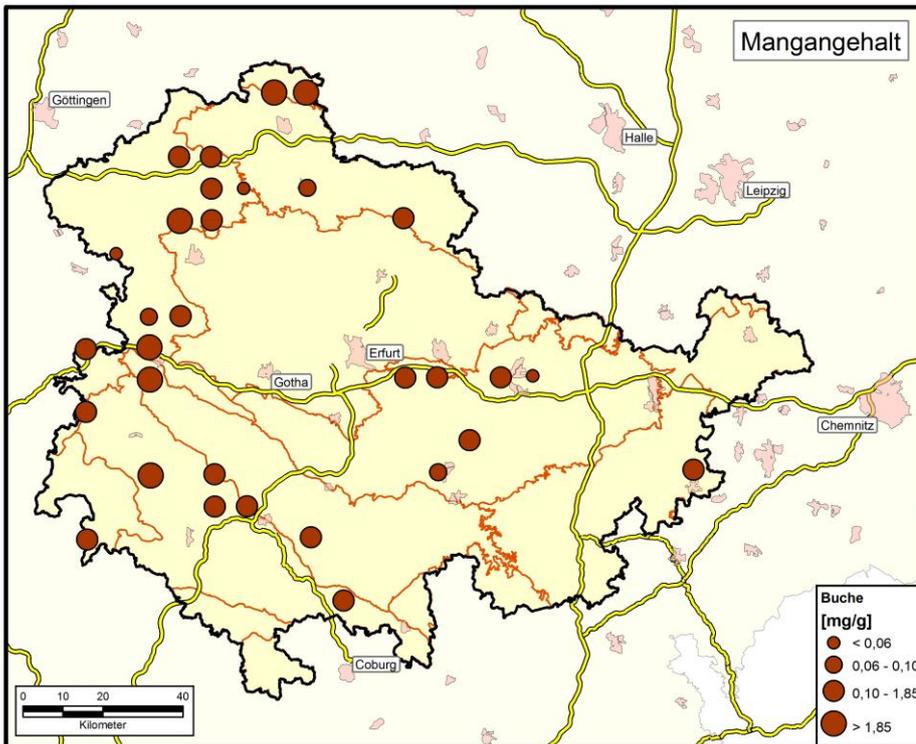
Zusammenhang zwischen erhöhten Nadelspiegelwerten von Blei ausgegangen werden.

### **Cadmium - Cd**

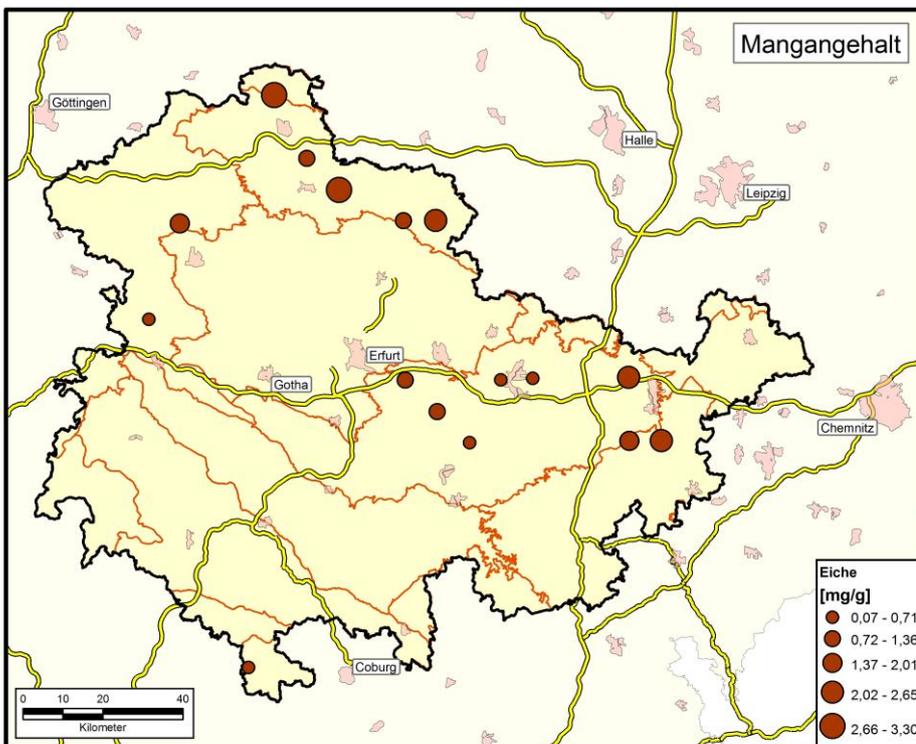
Cadmium kommt in der Natur nur selten vor und wenn, dann in Form von Mineralien wie Erzen (z.B. Otavit ( $\text{CdCO}_3$ )). Der überwiegende Anteil cadmiumhaltiger Verbindungen ist anthropogenen Ursprungs (z.B. Düngung, Klärschlämme) und vor allem in industriereichen Gebieten sowie bei Müllverbrennungsanlagen verbreitet. Nach BERGMANN (1993) ist Cadmium eines der gefährlichsten Schwermetalle und bei relativ niedrigen Konzentrationen bereits toxisch. Dies ist durch die leichte Aufnahme sowie schnelle Verlagerung in oberirdische Pflanzenteile (meist Samen und Früchte) begründet.

Nach WOLFF und RIECK (1996) kann als Grenzwert für Nadel und Laubgehölze ca. 3 mg/kg TS angegeben werden.

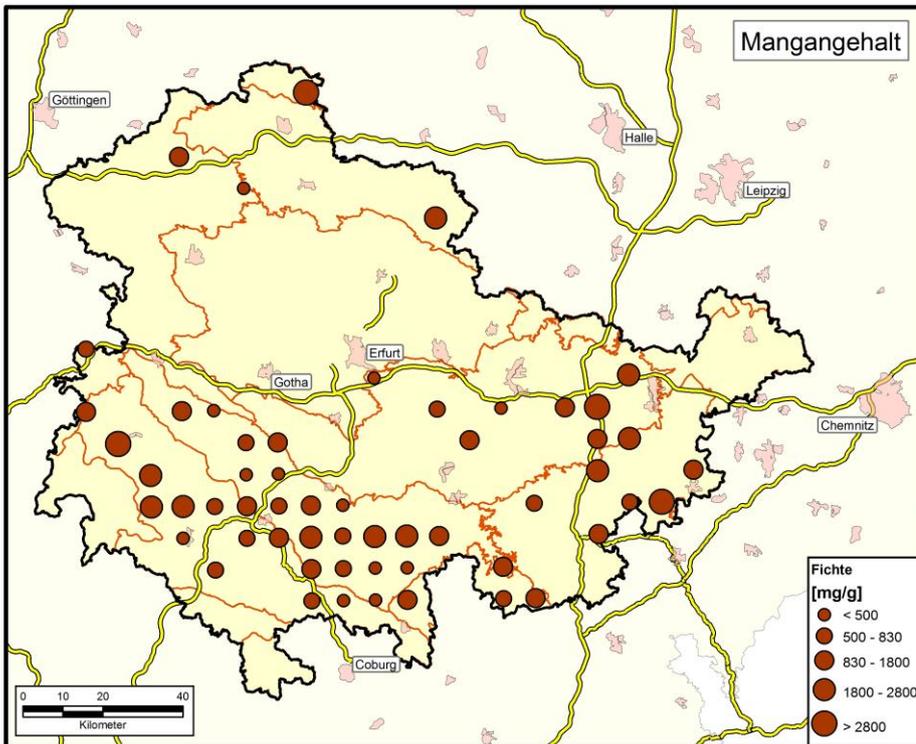
Anhand der Ergebnisse der BZE II ist festzustellen, dass alle untersuchten Baumarten sehr geringe Cadmiumwerte in meist gleicher Höhe oder sogar nicht nachweisbare Cd- Gehalte aufweisen, wie bei der Esche. Ein durchschnittlicher Cd-Gehalt von 0,1 mg/kg TS ist bei den Baumarten Buche, Eiche und Fichte (1- u. 2-jährige Nadeljahrgänge) gegeben. Für die Kiefer (1- und 2-jährige Nadeljahrgänge) wurde der Cd-Gehalt mit durchschnittlich 0,2 mg/kg TS ermittelt und liegt somit deutlich über den eben genannten Werten, jedoch auch weit unter dem Grenzwert. Insgesamt kann festgestellt werden, dass der Cd-Gehalt von Fichtennadeln bei Schieferstandorten höher als bei Standorten des Rotliegenden ist. Im Vergleich der Regionen Thüringens liegen die Cd-Werte von Fichtennadeln in Ostthüringen über den Cd-Gehalten von Südthüringen. Bei der Kiefer stellen sich die höchsten Cd-Gehalte ebenfalls auf Schieferstandorten in Ostthüringen (Vogtland) sowie im Thüringer Gebirge ein. Im Harz sowie der mitteldeutschen und südthüringischen Trias-Hügellandschaft weisen Buchenbestände hohe Cd-Gehalte meist auf nährstoffreichen Standorten (eutrophe Silikatgesteine, Carbonatgesteine, Schlufflehme) auf. Auch in dem industriell geprägten Raum nahe Greiz (Vogtland) sind hohe Cd-Werte bei Buche und bei Eiche anzutreffen. Im nordthüringischen Trias-Hügelland zeigen Eichenbestände ebenfalls hohe Cd-Gehalte.



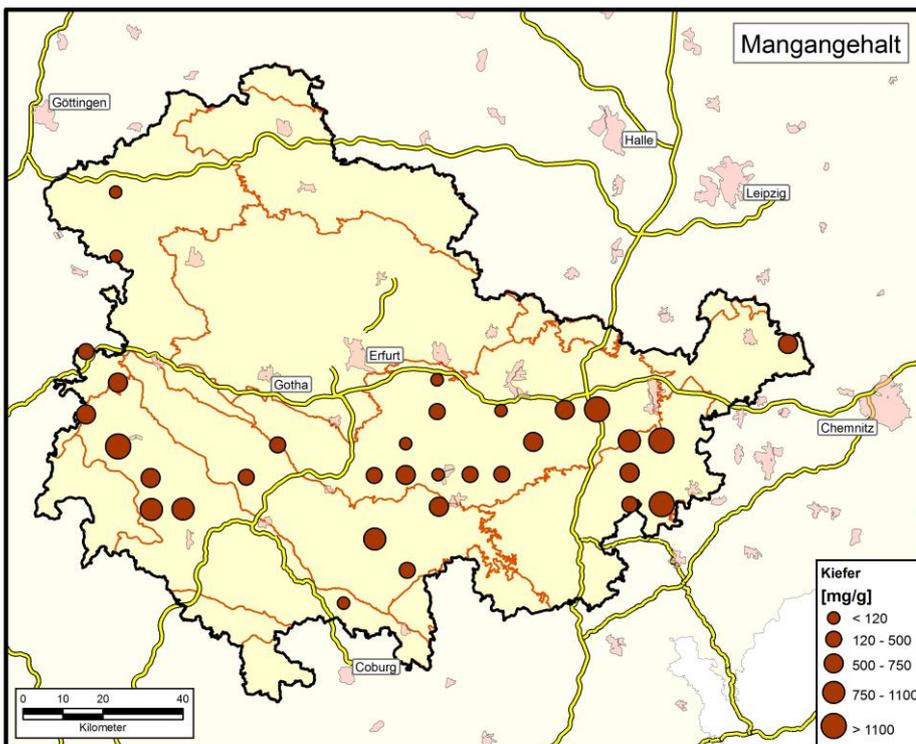
Karte 35.



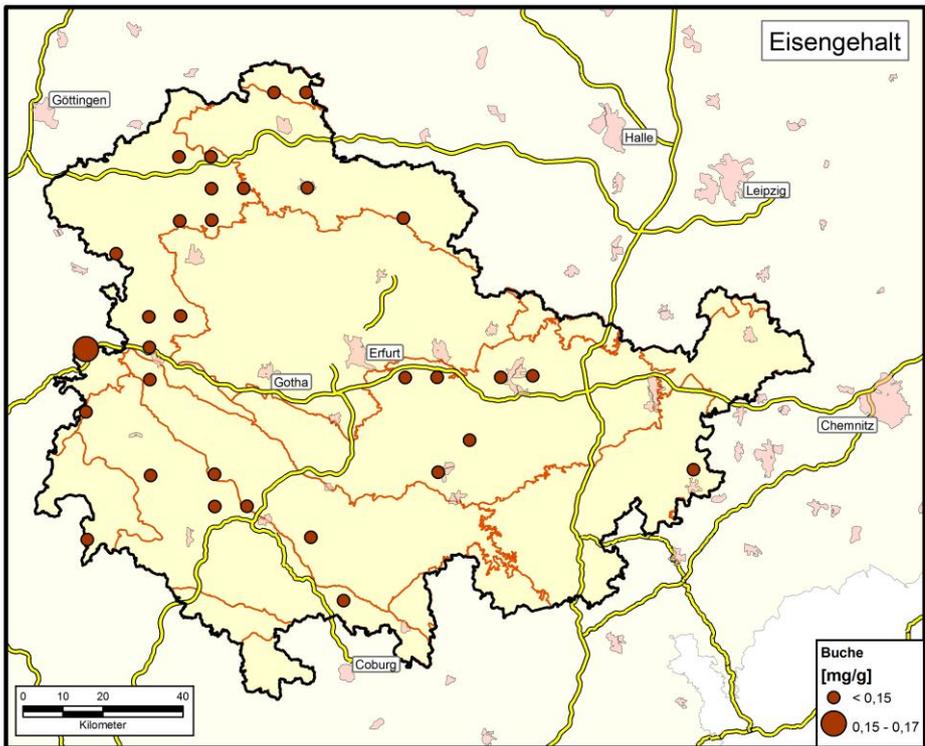
Karte 36.



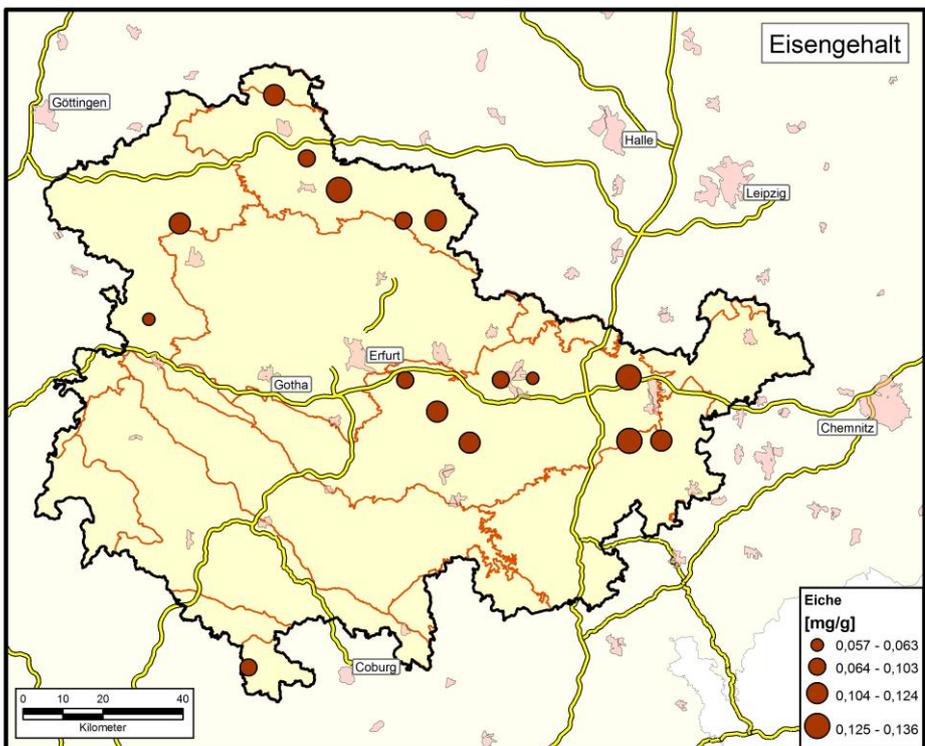
Karte 37.



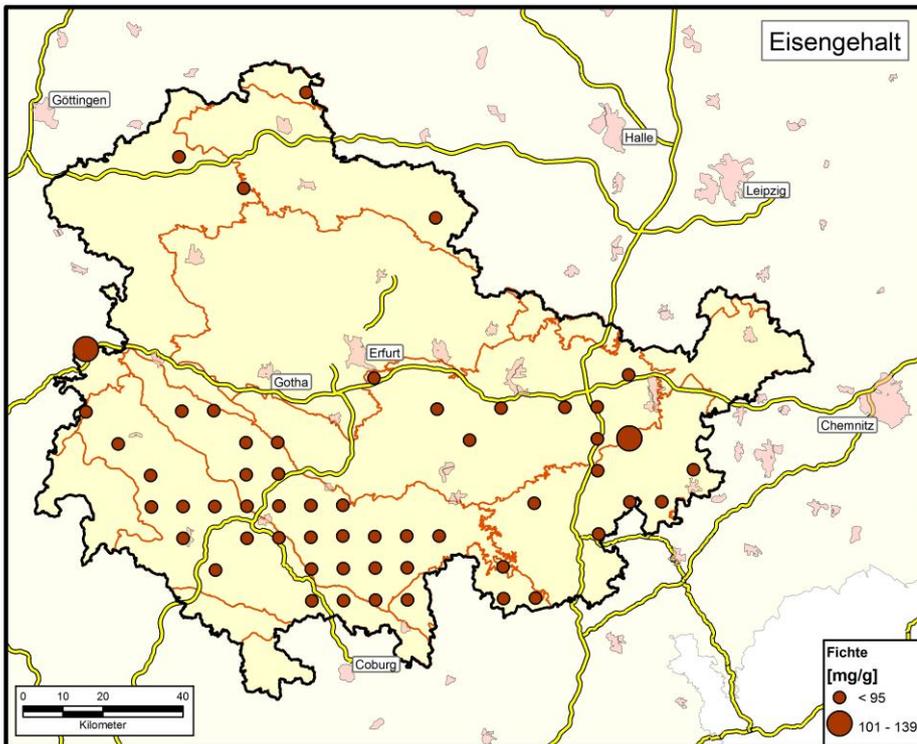
Karte 38.



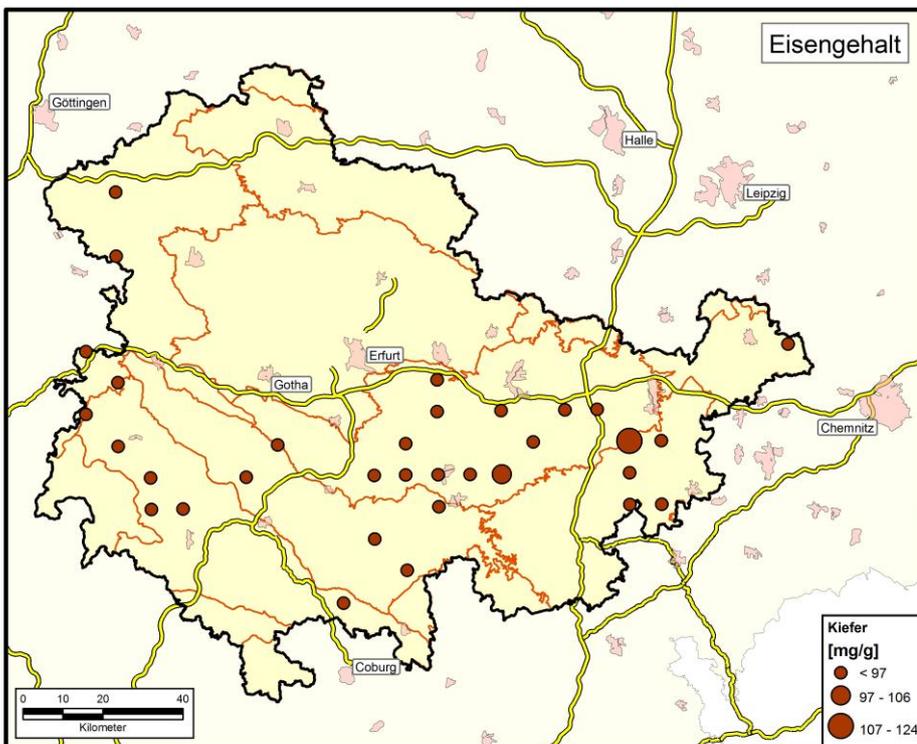
Karte 39.



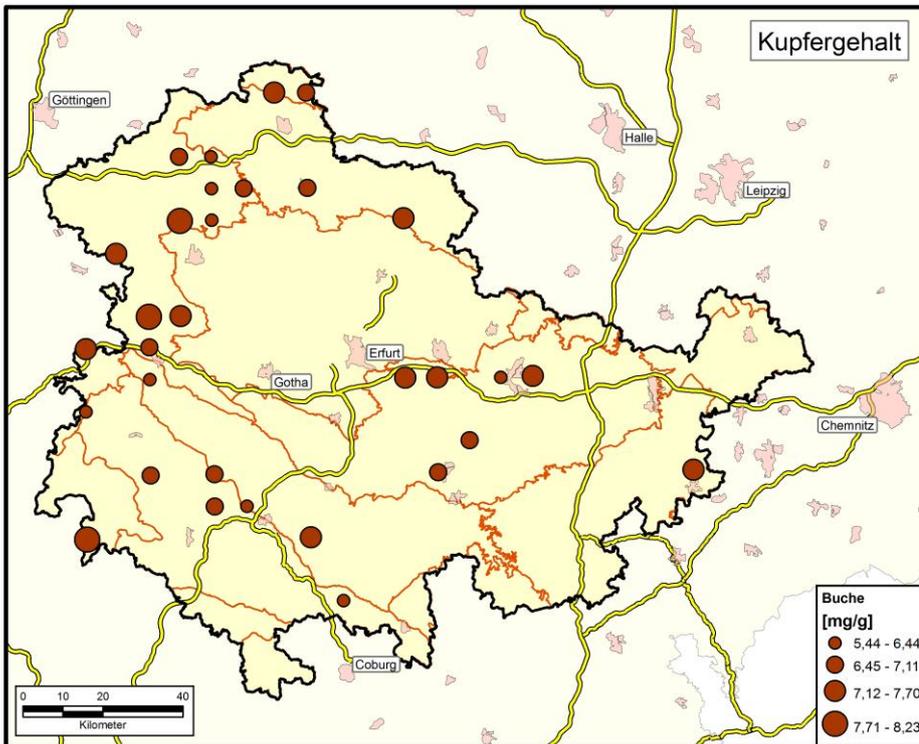
Karte 40.



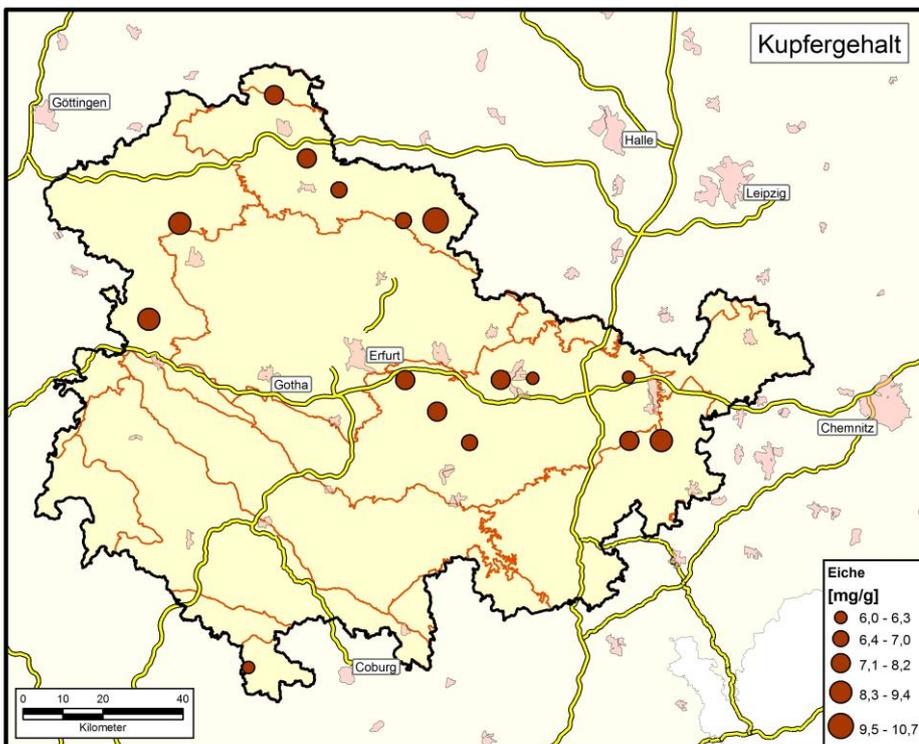
Karte 41.



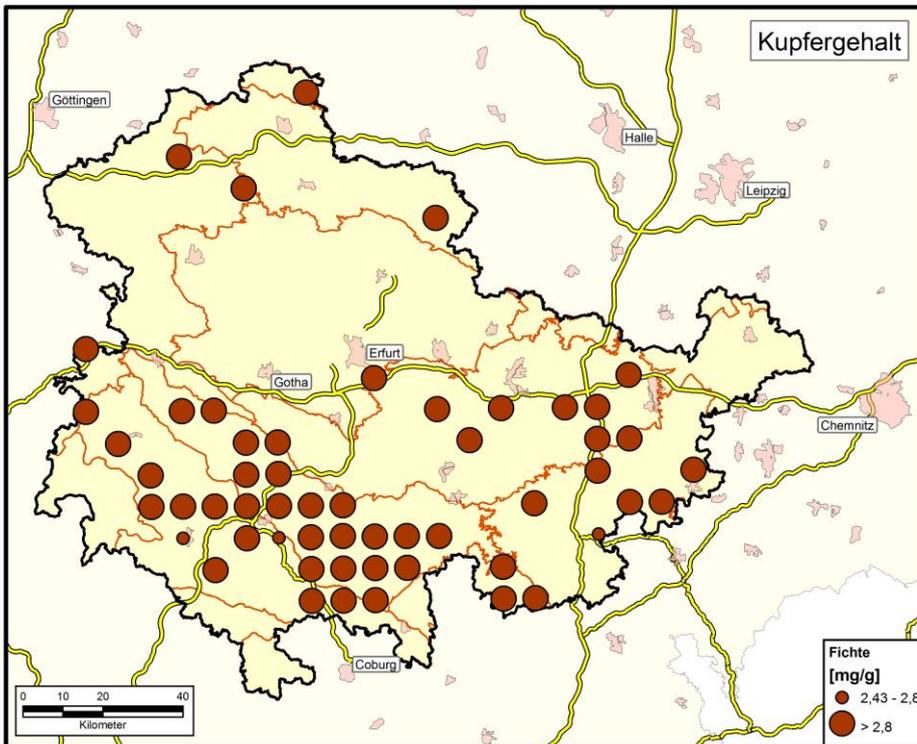
Karte 42.



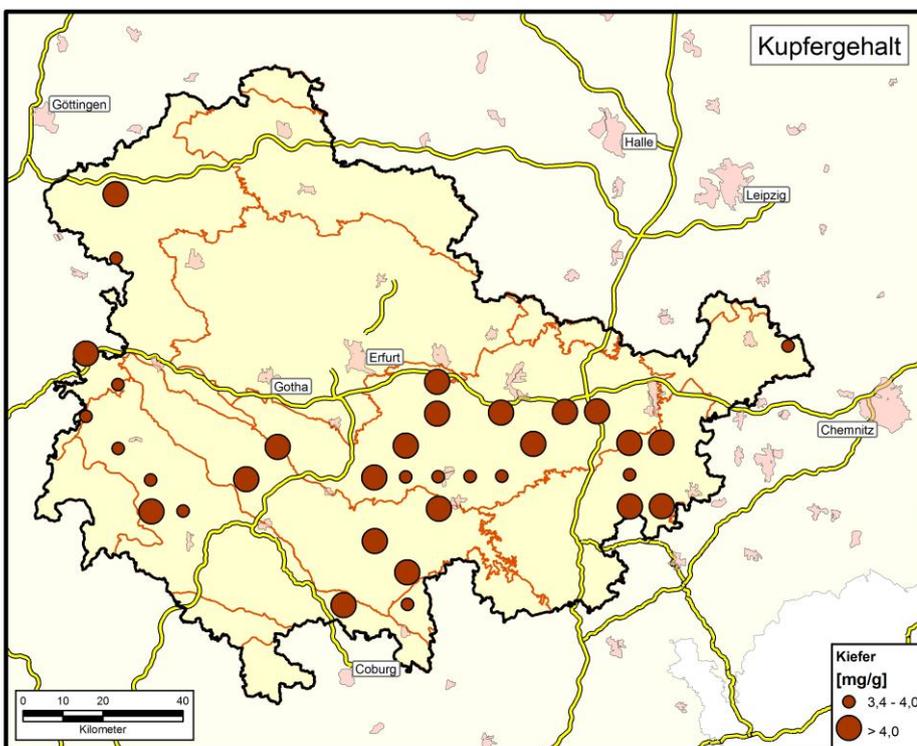
Karte 43.



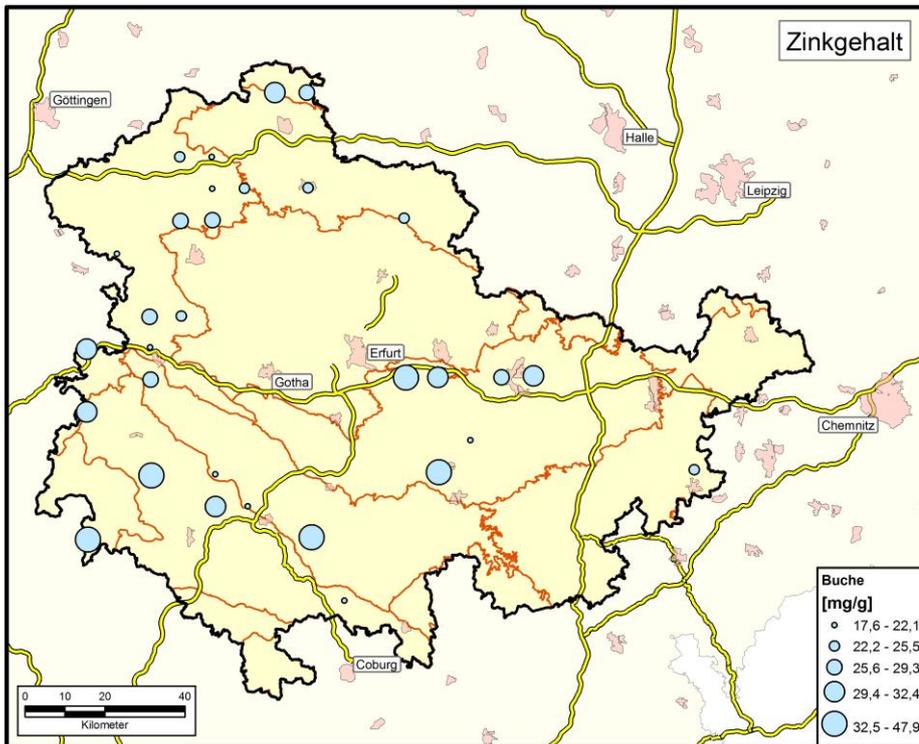
Karte 44.



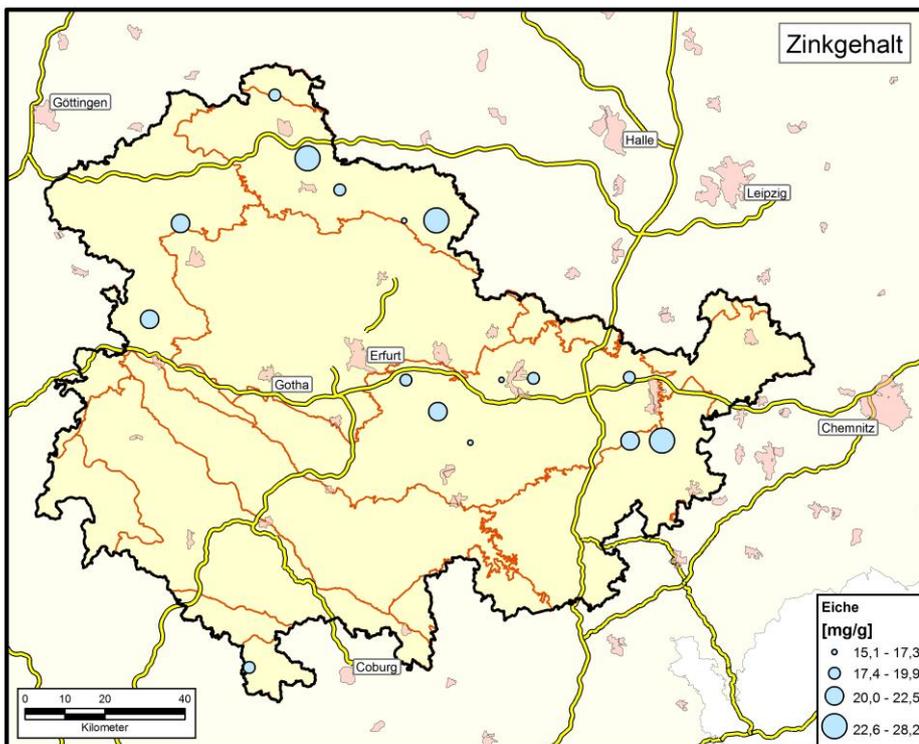
Karte 45.



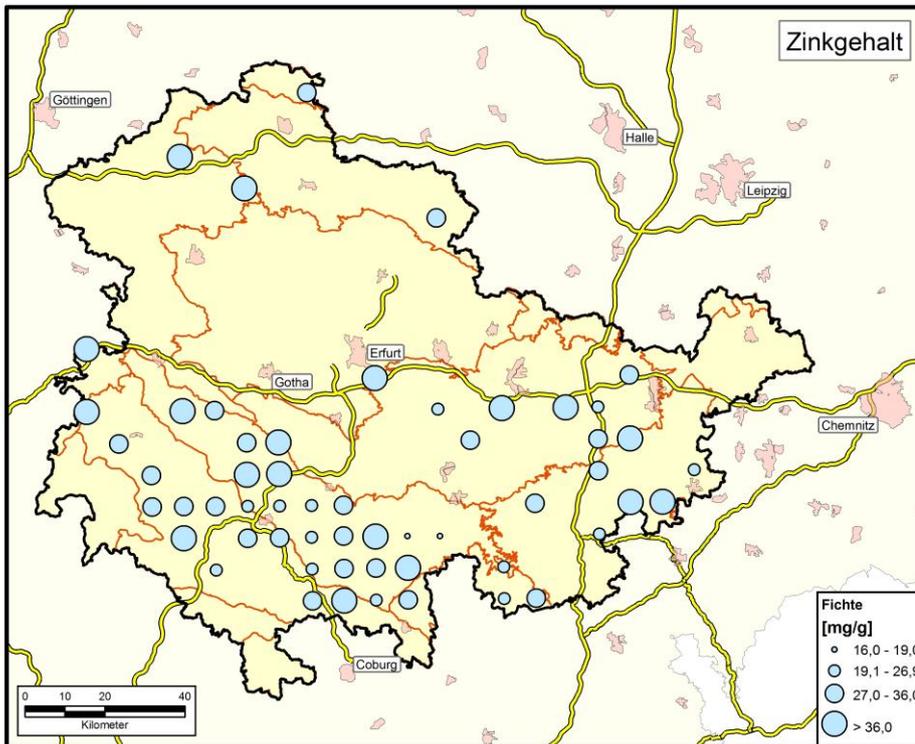
Karte 46.



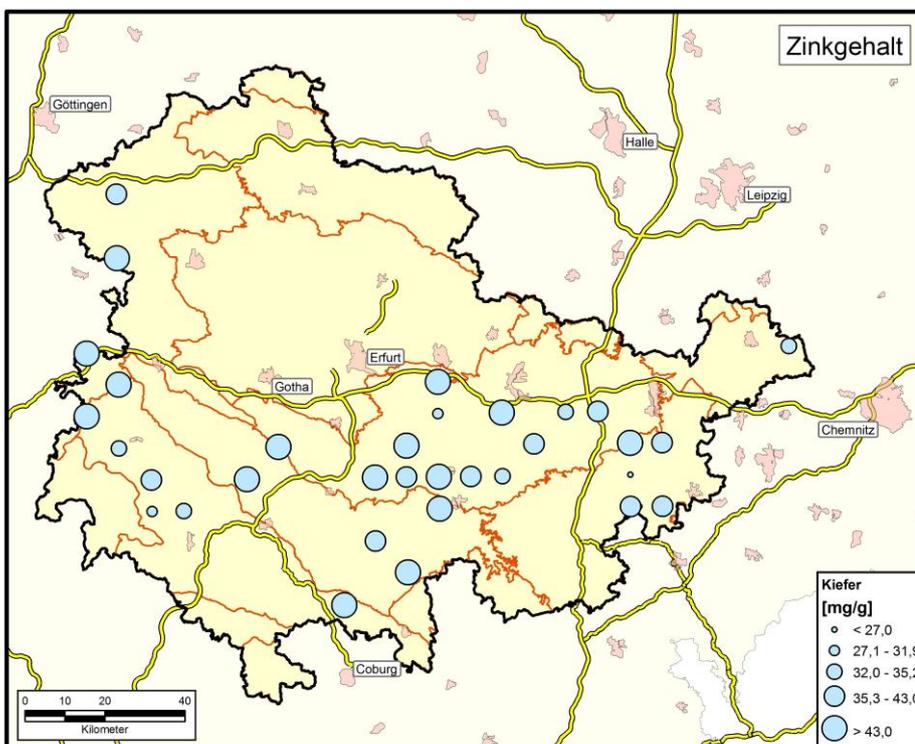
Karte 47.



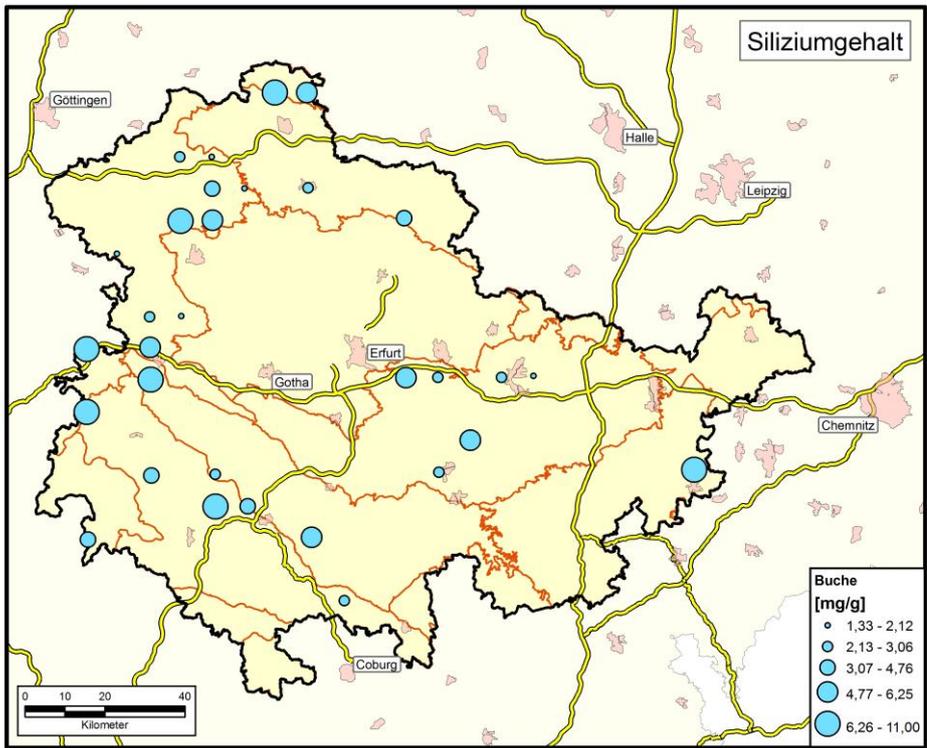
Karte 48.



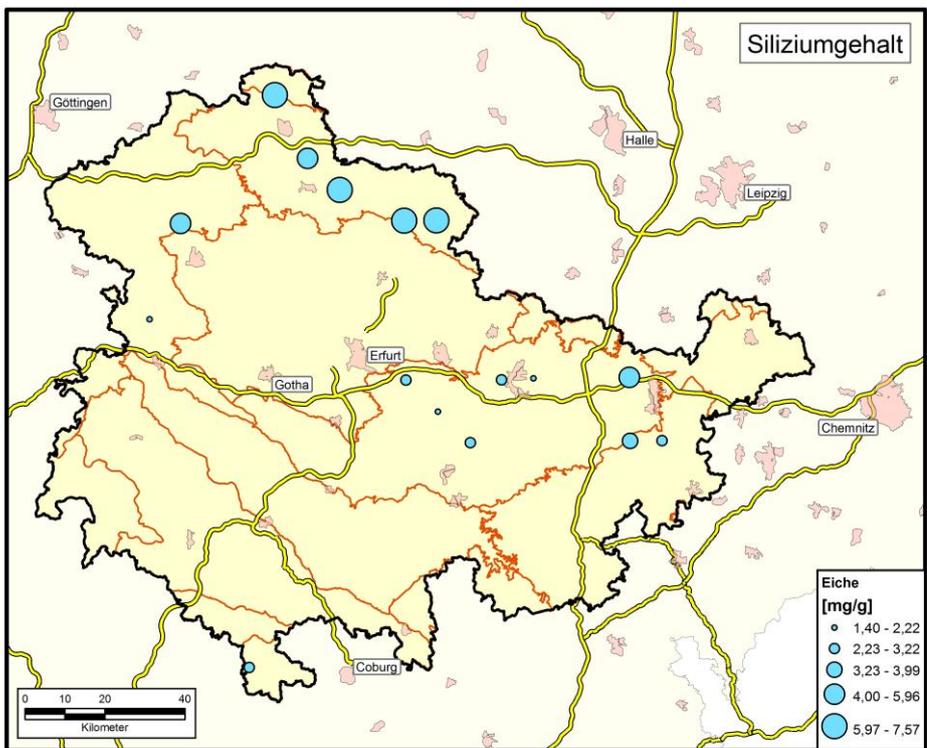
Karte 49.



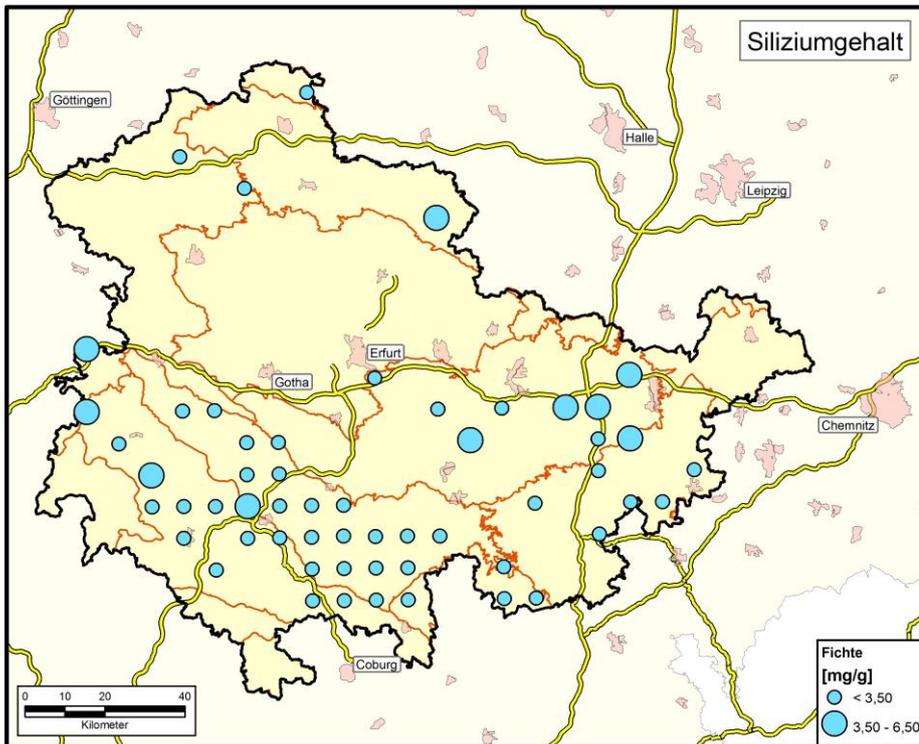
Karte 50.



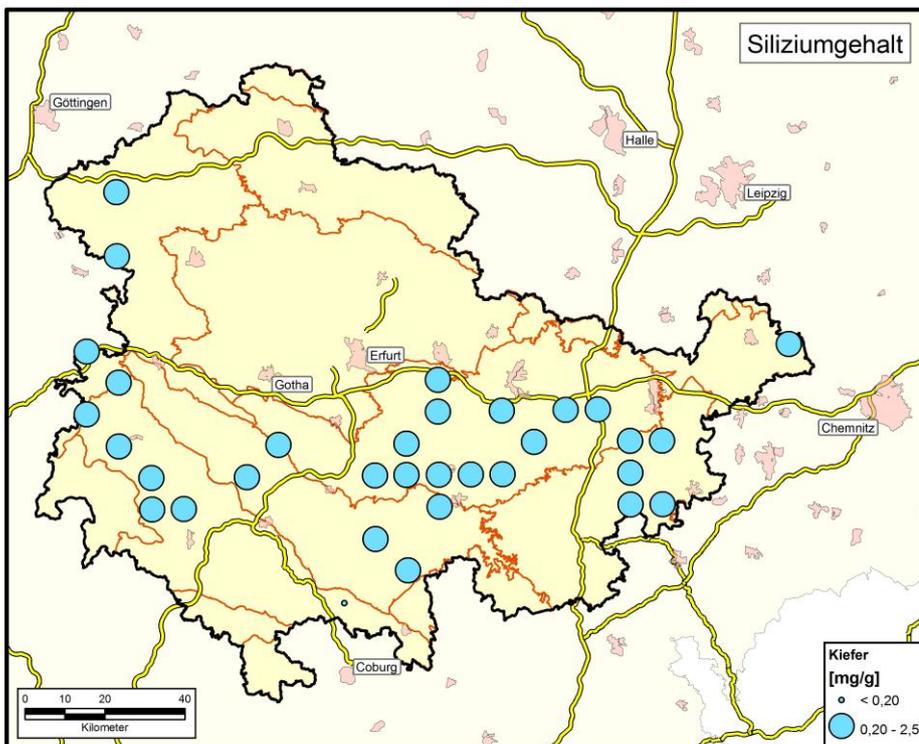
Karte 51.



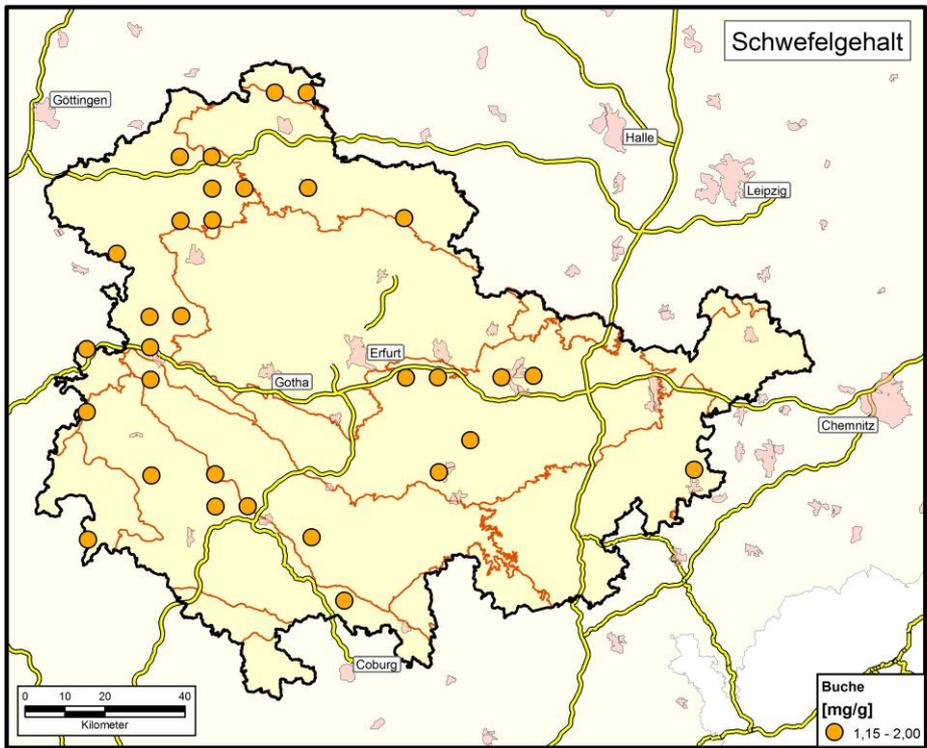
Karte 52.



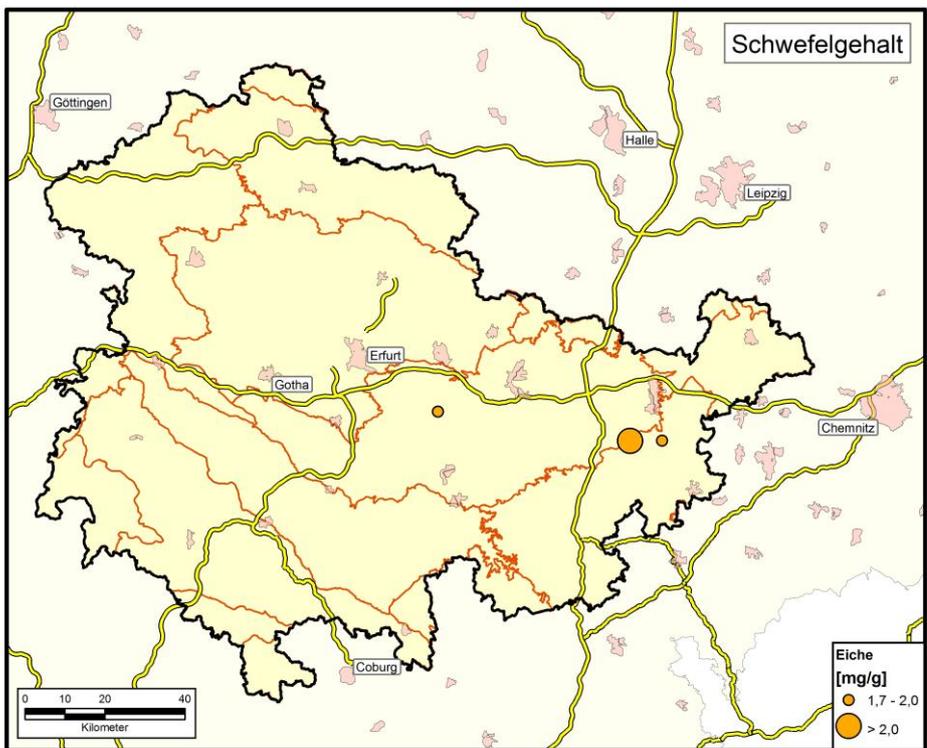
Karte 53.



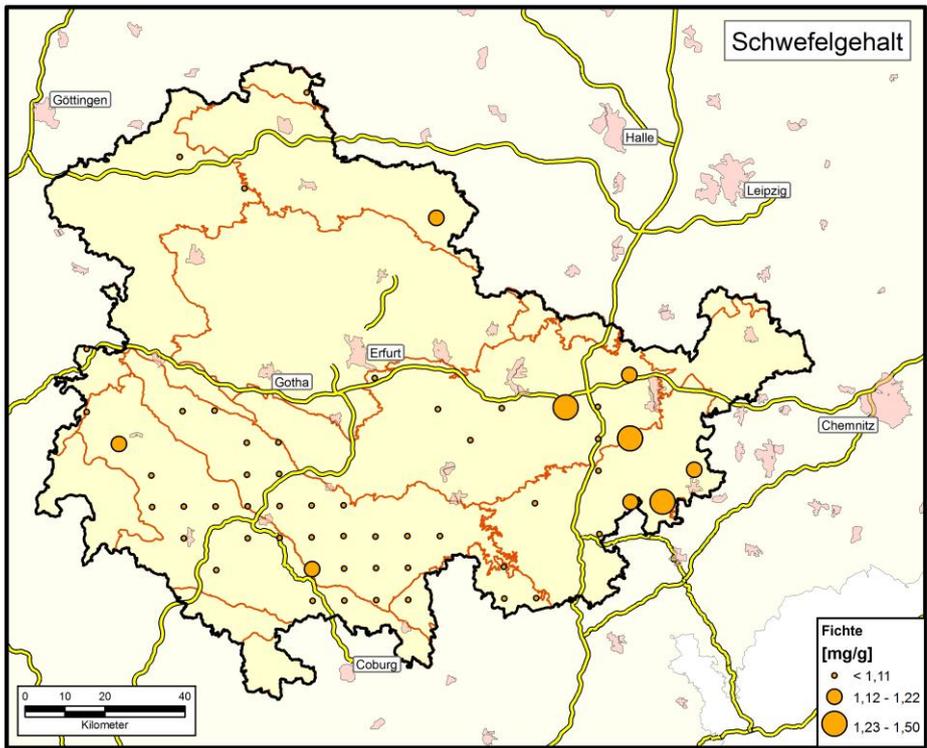
Karte 54.



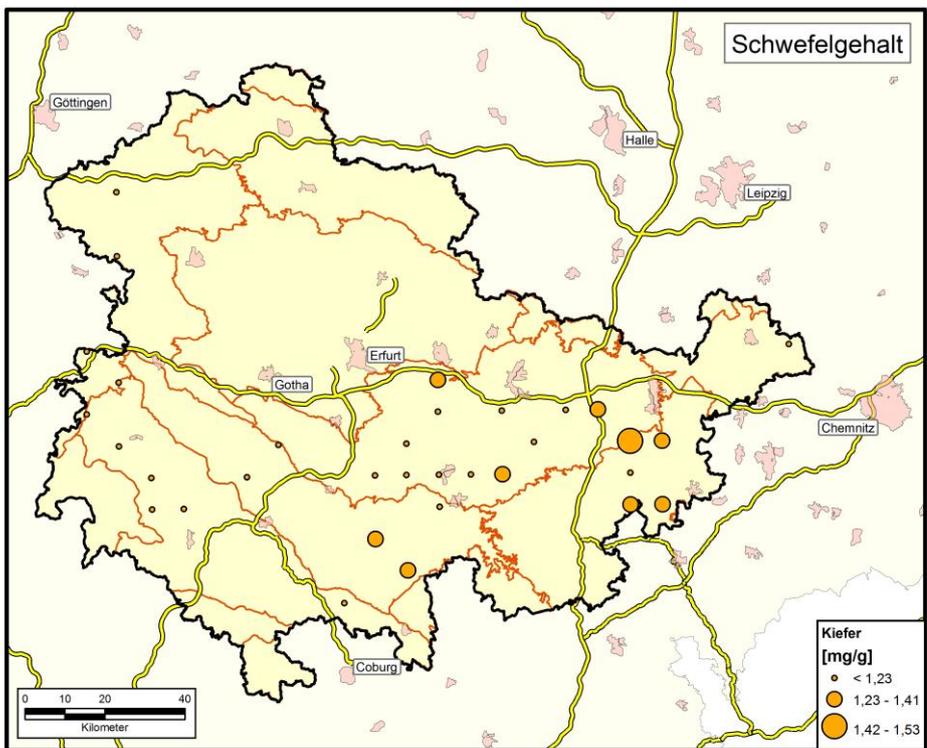
Karte 55.



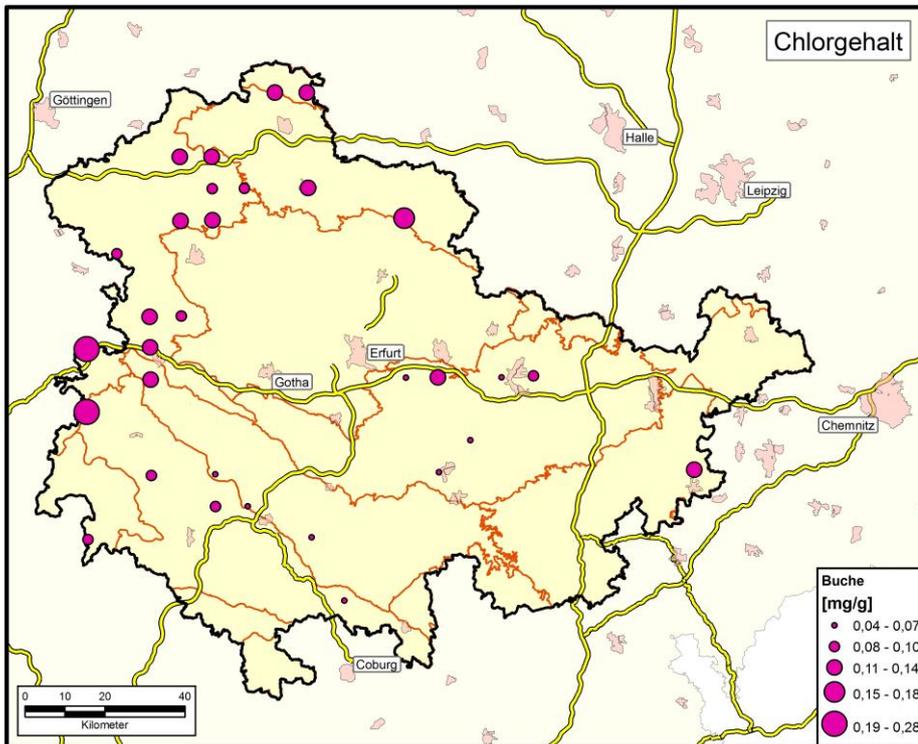
Karte 56.



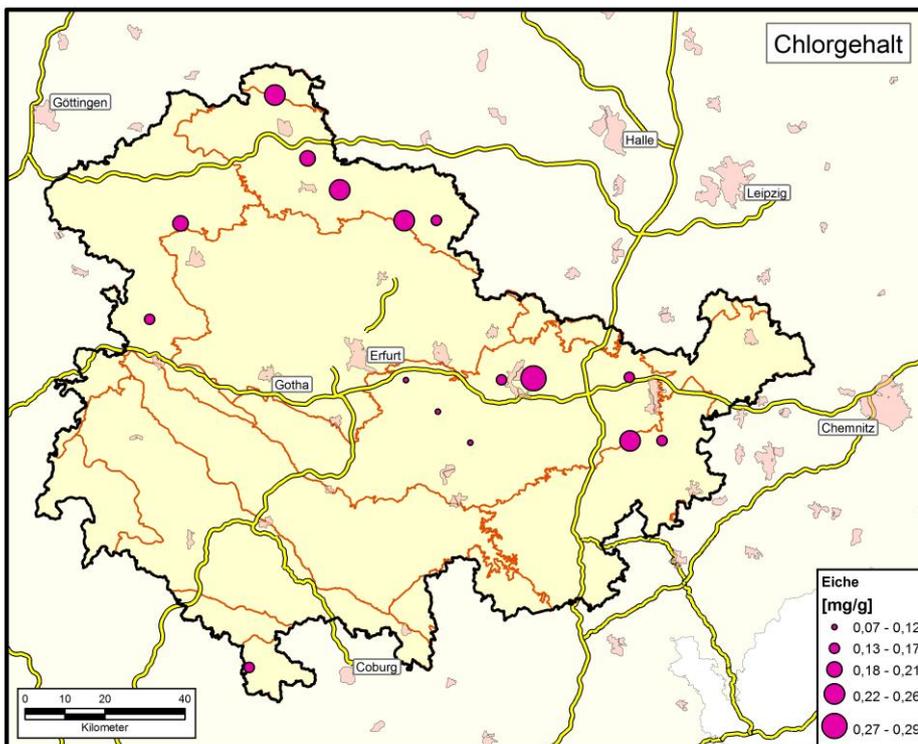
Karte 57.



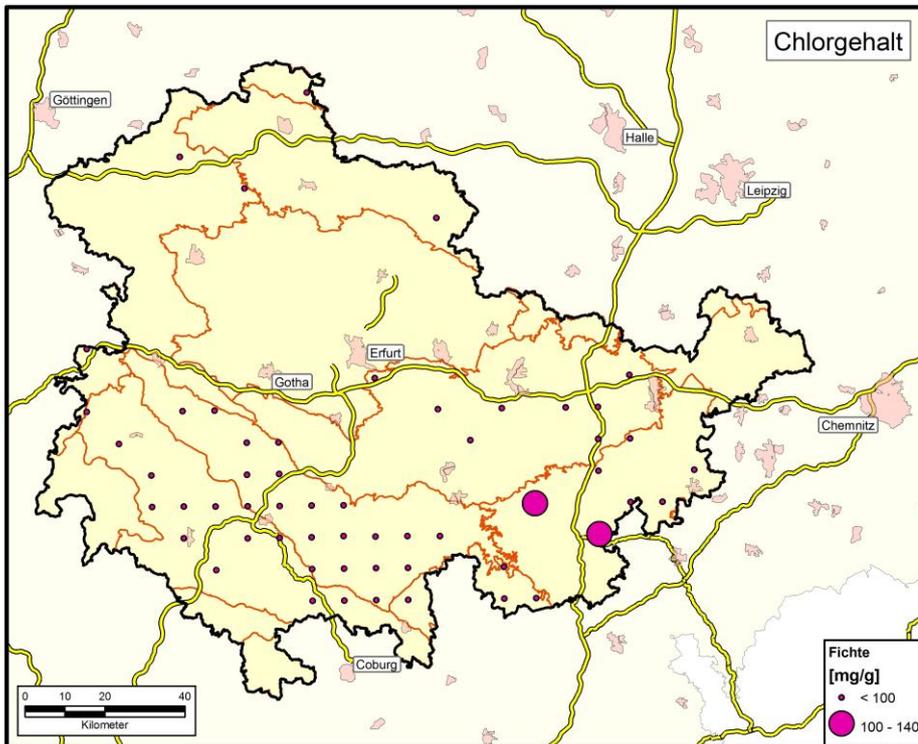
Karte 58.



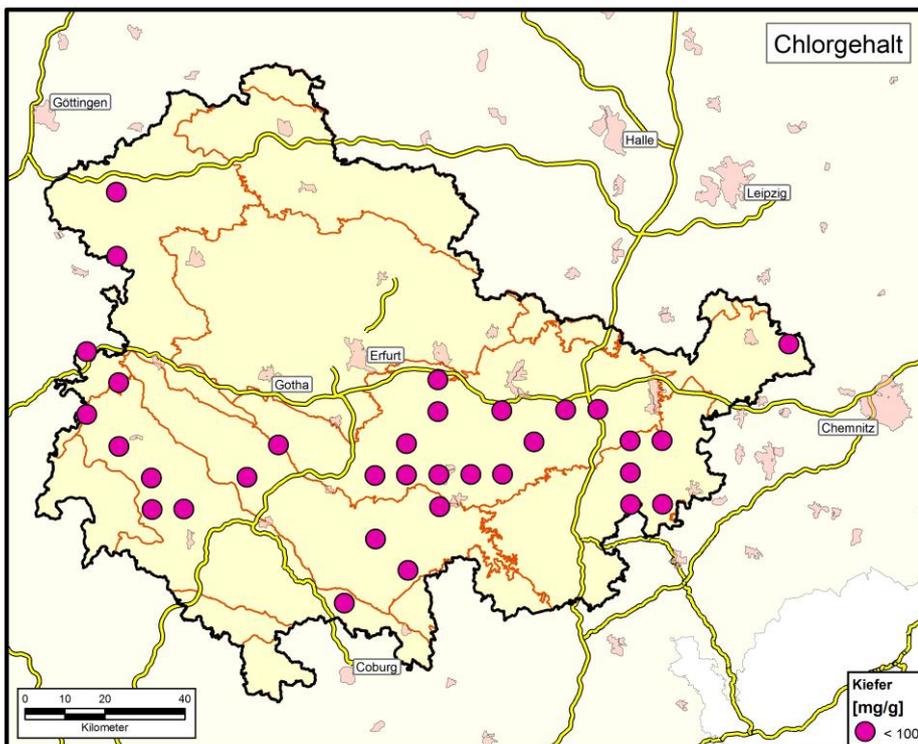
Karte 59.



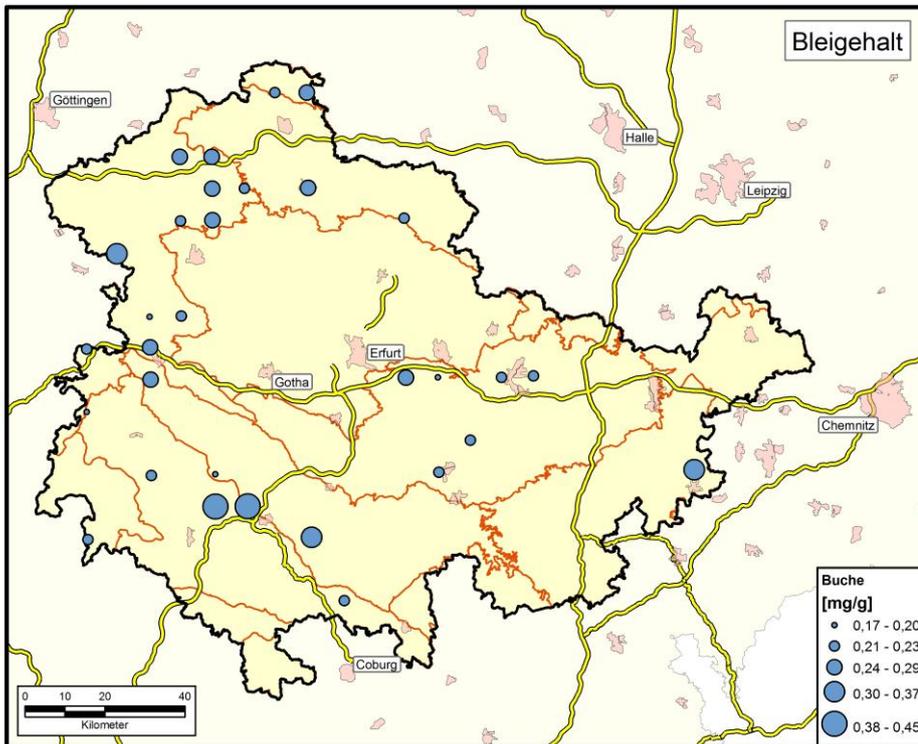
Karte 60.



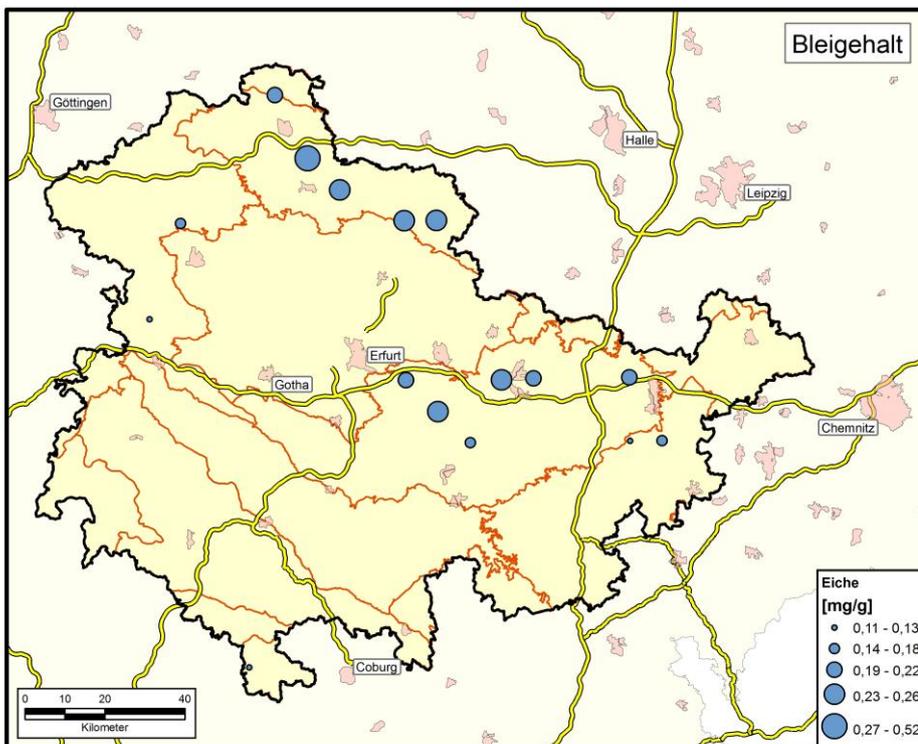
Karte 61.



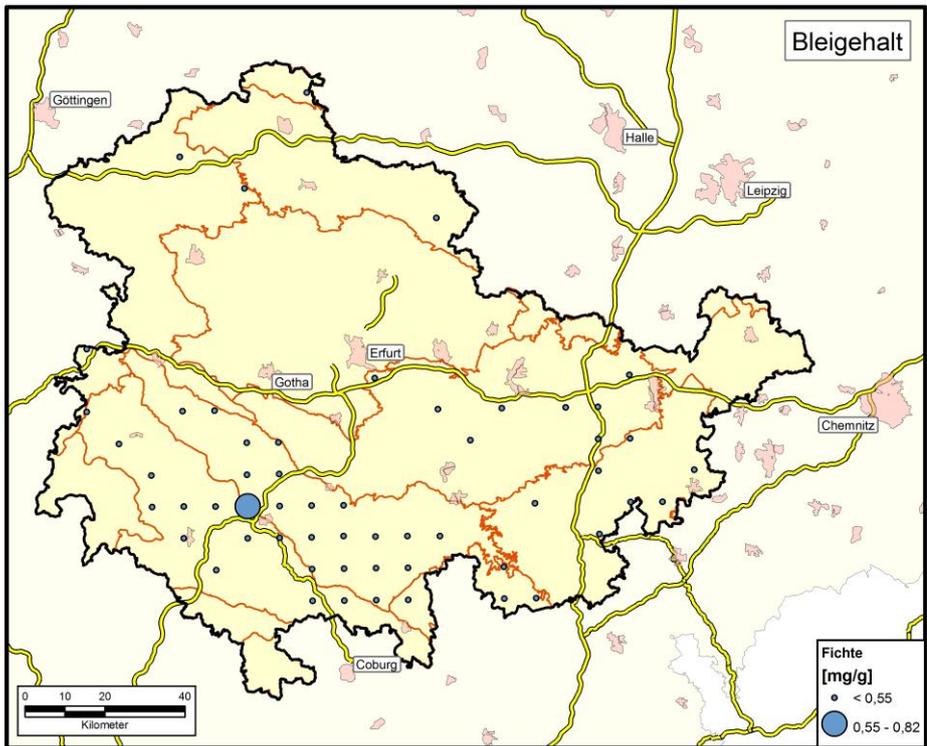
Karte 62.



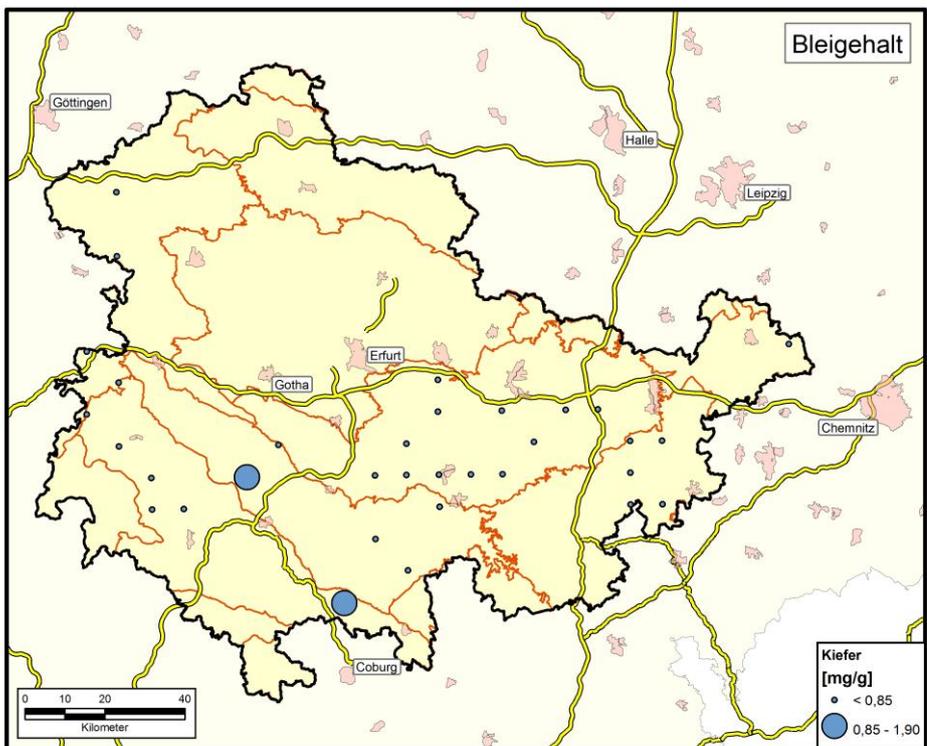
Karte 63.



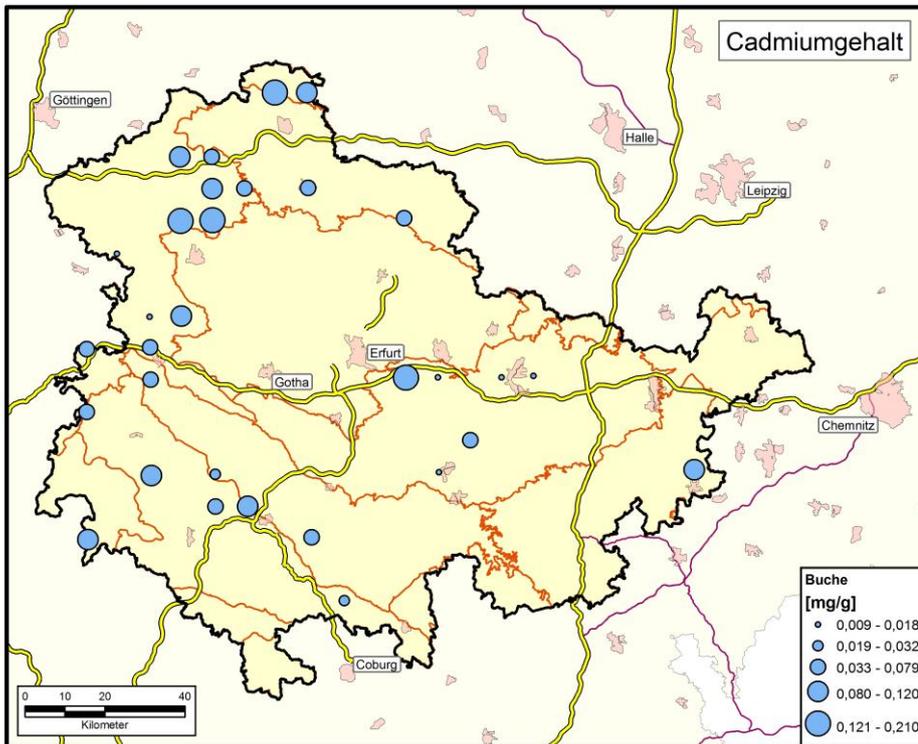
Karte 64.



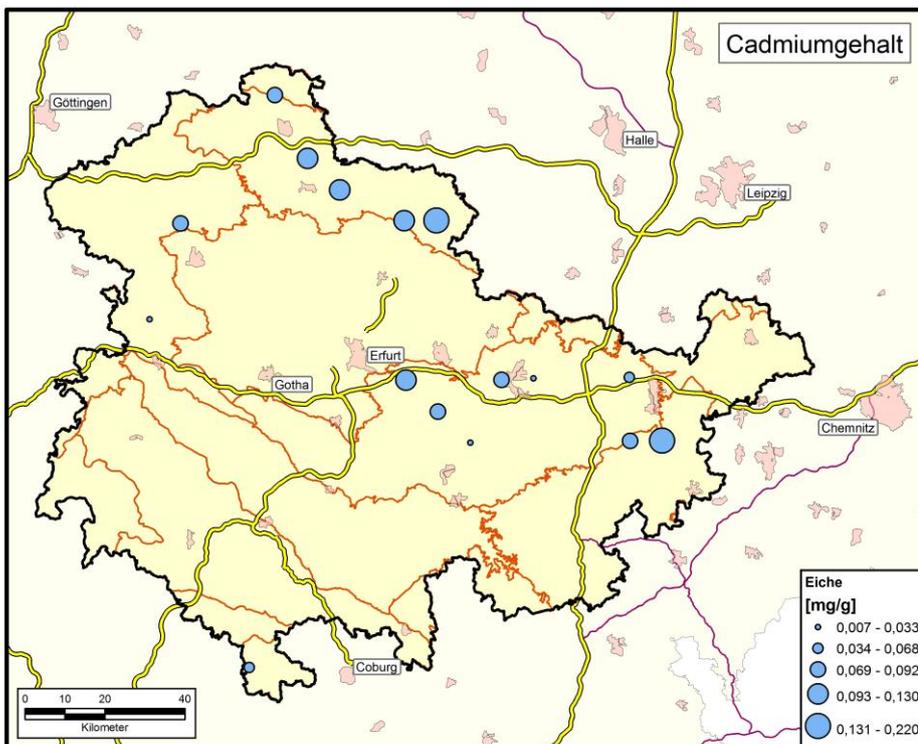
Karte 65.



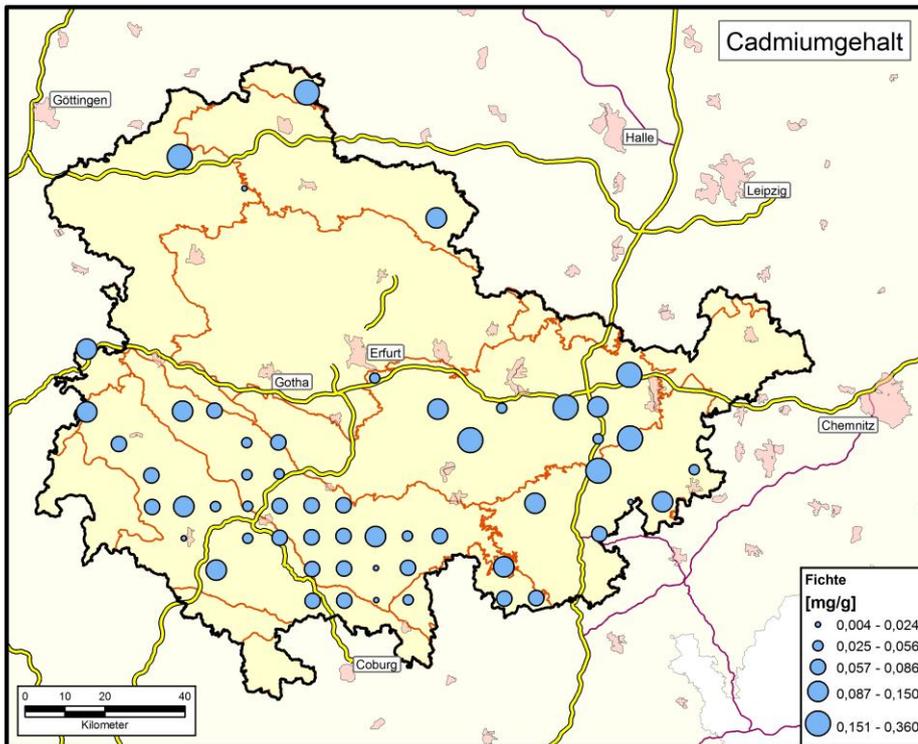
Karte 66.



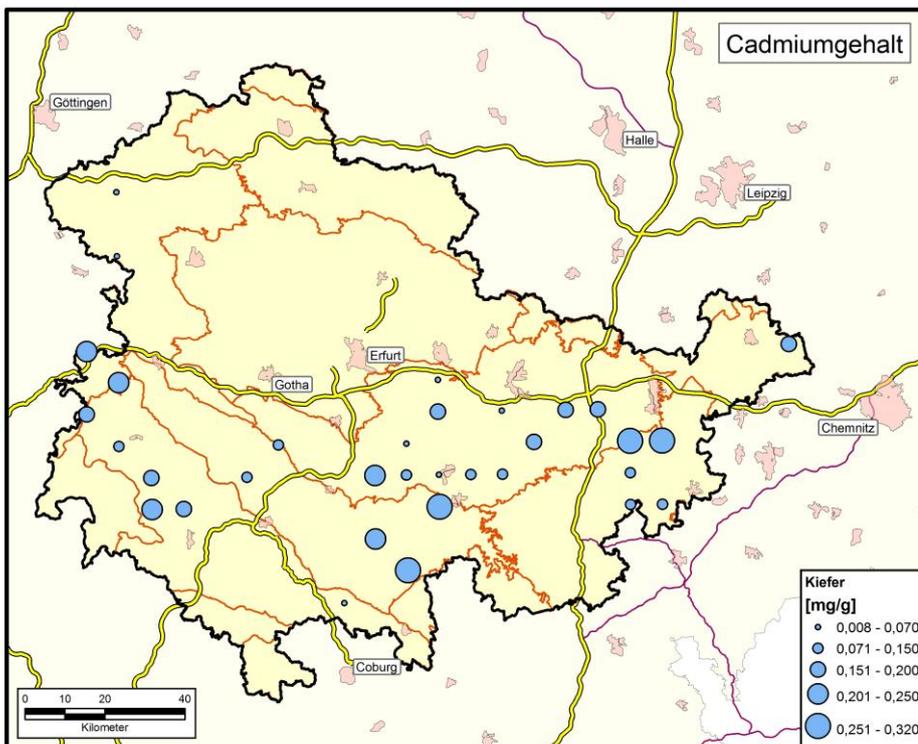
Karte 67.



Karte 68.



Karte 69.



Karte 70.

## 2.2. Zusammenfassung und Trends im Vergleich von BZE-I zu BZE-II

Vergleicht man die Ergebnisse der BZE I und BZE II miteinander (vgl. Abb. 1 und 2), ergeben sich für die Elementgehalte von Fichten- und Kiefernadeln unterschiedliche Trends. Da bei der BZE-I nur Kiefern und Fichten beprobt wurden und auch nicht alle Elemente der BZE-II, können nur die folgenden Gegenüberstellungen zu Trendaussagen bewertet werden.

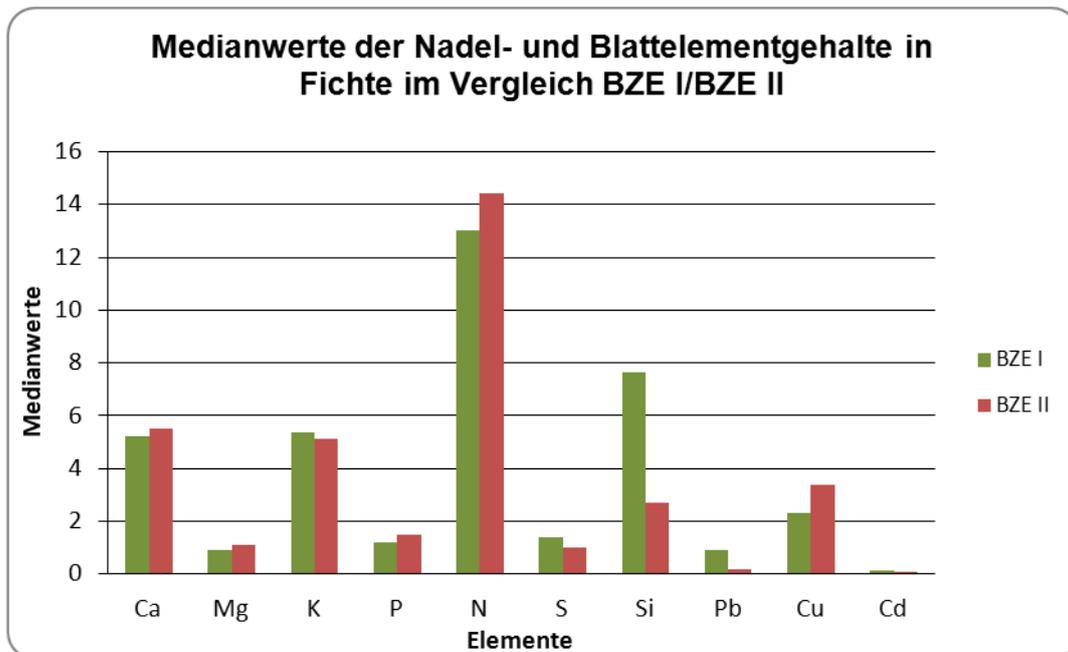


Abbildung 1: vergleichende graphische Darstellung der Medianwerte – Nadelelementgehalte für Fichte (BZE I und BZE II)

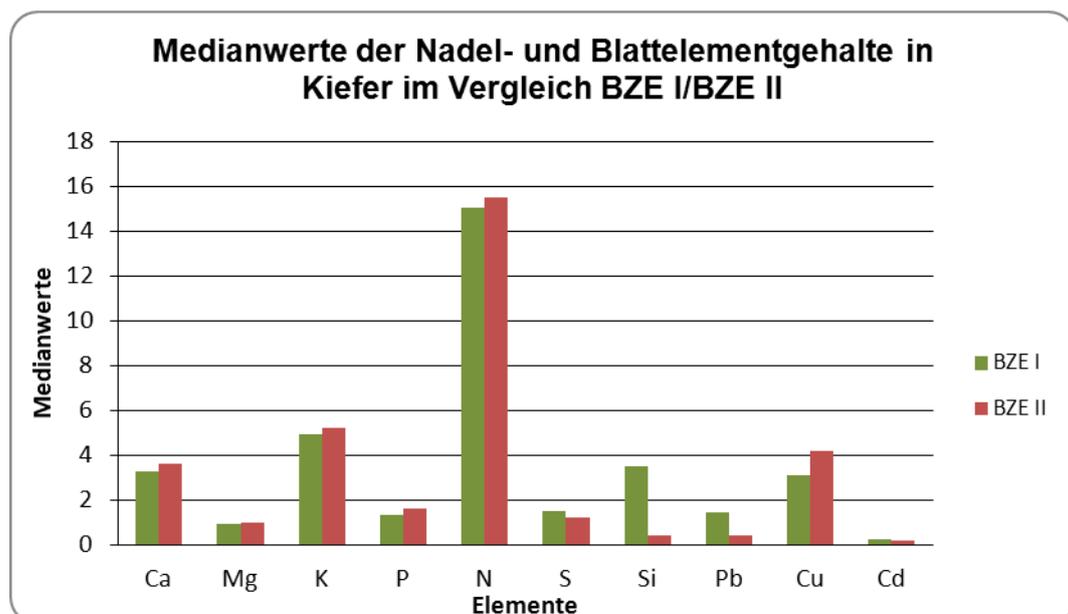


Abbildung 2: vergleichende graphische Darstellung der Medianwerte – Nadelelementgehalte für Kiefer (BZE I und BZE II)

Wie aus Abb. 1 und Abb. 2 ersichtlich, sind für die in Fichten- und Kiefernadeln vorgefundenen Hauptnährelemente Ca, Mg, N, K und P Zunahmen zu verzeichnen. Als eine mögliche Ursache können die in der Vergangenheit durchgeführten Kalkungsmaßnahmen angeführt werden. Diese tragen durch verbesserte Bedingungen bei der Mineralisierung der Streu positiv zur Bereitstellung von Nährstoffen innerhalb der Bodenkrume bei.

Bei den Spurenelementen Si und S sowie dem Schadelement Pb ist ein Rückgang bei beiden Baumarten zu verzeichnen. Hier kann als mögliche Ursache die verbesserten Maßnahmen auf dem Gebiet des technischen Umweltschutzes (z.B. Ab- und Rauchgasreinigung und klopfmittelfreie Kraftstoffe) genannt werden.

Bei den Cu-Gehalten zeigte sich ein deutlicher Anstieg, welcher beide Nadelbaumarten betrifft. Ob der Anstieg auf rein geologische Gegebenheiten an den BZE-Probepunkten zurückzuführen ist bleibt zu prüfen. Es gilt aber als gesichert, dass die zusätzlichen und neu dazugekommenen Probepunkte auf Schieferstandorten mit hohen Cu-Gehalten liegen.

Die Werte für Cadmium sind für Fichte und Kiefer annähernd gleich geblieben.

### 3. Kennwerte der organischen Auflage

#### 3.1 Vorkommende Humusformen in Thüringen

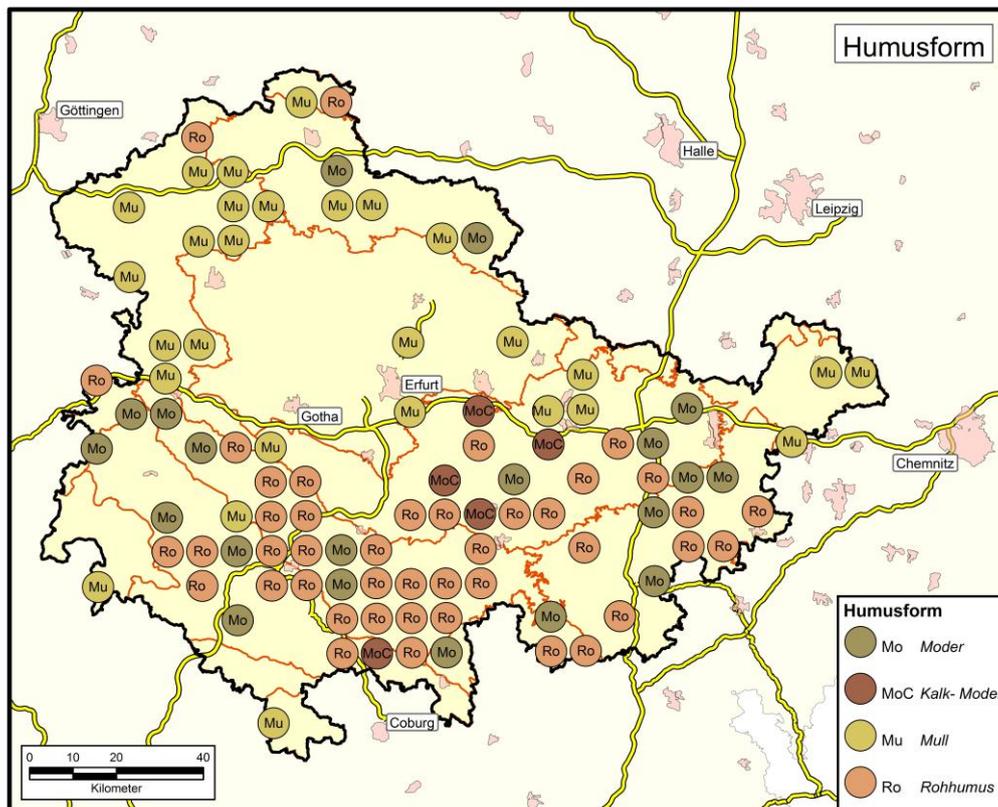
Nach SCHACHTSCHABEL et al. (1998) wird als Humus jene organische Substanz bezeichnet, die beim Absterben von Pflanzen, Pflanzenteilen, Tieren sowie in Form von tierischen und pflanzlichen Ausscheidungsprodukten auf und in den Bodenkörper gelangt und mineralisiert wird. Somit bilden Streureste und Huminstoffe den Humuskörper eines Bodens. Aufgrund von Bioturbation gelangen Humusbestandteile in den Mineraloberboden, so dass dieser zum Teil von Humus durchsetzt ist oder als Auflagehumus dem Mineralboden aufliegt. Weiterhin ist die Art und Mächtigkeit eines Humuskörpers neben den Standortparametern (Boden/Klima/Relief) auch von der vegetationsspezifischen jährlich produzierten Streumenge und -zusammensetzung sowie den Lebensbedingungen für zersetzende Bodenorganismen abhängig.

Der Humuskörper terrestrischer Waldstandorte kann je nach Mächtigkeit und Aufbau in die Humusformen Mull, mullartiger Moder, typischer Moder, rohhumusartiger Moder und Rohhumus untergliedert werden. Bei der BZE II wurden die Humusformen typischer und mullartiger Moder zur Humusform „Moder“ und die Humusformen rohhumusartiger Moder und Rohhumus zur Humusform „Rohhumus“ zusammengefasst. Die Ausweisung von Kalkmoder-Humusformen ist eine für den Freistaat Thüringen selbst gewählte Beschreibung, weil es sich hierbei um eine regionalspezifische Besonderheit handelt.

Dabei beschreibt die Humusform **Mull** gute Streuabbaubedingungen (hohe biologische Aktivität), die in Thüringen auf den Bodentypen Rendzina/Braunerderrendzina, Braunfahlerde/Fahlerde, Terrafusca, Pelosol und eutropher Braunerde zu finden sind. Hier kommt Mull mehrheitlich bei den nährkraftmäßig besser versorgten Laubholzstandorten vor. Als **Kalkmoder**, werden Moderformen auf ausschließlich carbonatgesteinsgeprägten Standorten mit Nadelholzbestockung ausgewiesen. **Moder** finden sich in Thüringen meist auf den von paläozoischen Gesteinen und Buntsandstein dominierten Bodentypen Braunerde und Pseudogley wieder. Auch der **Rohhumus** kommt meist auf den Bodenformen Podsol, Braunerdepodsol und podsolige Braunerde des paläozoisch geprägtes Gesteins und Buntsandsteins vor. Bis zu etwa 70% dieser Humusform ist in Höhenlagen von über 500 m ü. NN auf paläozoisch geprägten Standorten zu finden. Unterhalb von 500 m ü. NN kommt Rohhumus dann meist bei buntsandsteingeprägten Standorten vor. Diese Humusform ist in seiner Existenz stets an Nadelholzbestände gebunden.

Da der Humus u. a. als ein wichtiger Kationenaustauscher den Nährstoff- und Wasserhaushalt reguliert, kann er Hinweise auf die Funktionsfähigkeit

ökosystemarer Stoffkreisläufe (Nährstoffaufnahme/Mineralisierung/Streufall) bieten. Dabei können die C/N- und C/P-Verhältnisse die mikrobiellen Zersetzungsbedingungen beschreiben und zur Beurteilung der stofflichen Qualität und Zusammensetzung organischer Substanz herangezogen werden (Vgl. WOLFF / RIECK 1996).



Karte 71: Humusform

### 3.2 Menge und Mächtigkeit der Humushorizonte

Die Mächtigkeit der organischen Auflage ist vor allem von der Humusform (vgl. Tab.17) sowie der Höhe ü. NN (vgl. Tab.18) abhängig. Da das Klima meist abhängig von der Höhe ist, stellen sich mit zunehmender Höhe eine Erhöhung des Niederschlages sowie ein Temperaturrückgang ein (vgl. Tab.2). Dies führt zu schlechteren Umsatzbedingungen für organische Substanz, so dass sich diese am Waldboden akkumuliert (Immobilisierung).

Tabelle 17: Mächtigkeit der organischen Auflage in Abhängigkeit von der Humusform

Humusform	L				Of				Oh			
	n	median	min	max	n	median	min	max	n	median	min	max
MU	10	4,0	1,5	5,0								
MUF	18	3,4	1,5	6,8	7	2,3	0,5	3,0				
MOC	5	2,5	1,0	4,0	5	2,8	2,0	4,5	2	2,0	1,0	3,0
MM	4	3,5	1,0	4,0	2	3,0	2,5	3,5				
MO	15	2,0	0,5	4,3	17	3,3	1,8	5,0	11	2,5	1,0	4,0
MR	19	2,0	1,0	4,0	20	3,6	1,3	7,0	18	2,1	0,8	6,0
RO	20	1,0	0,5	7,0	22	3,9	2,5	5,5	21	4,0	1,0	6,5

Vergleicht man die Ergebnisse der BZE I und BZE II (Abb. 3) miteinander, ergibt sich für die Aufgabemächtigkeit in Abhängigkeit der Humusform folgender Sachverhalt.

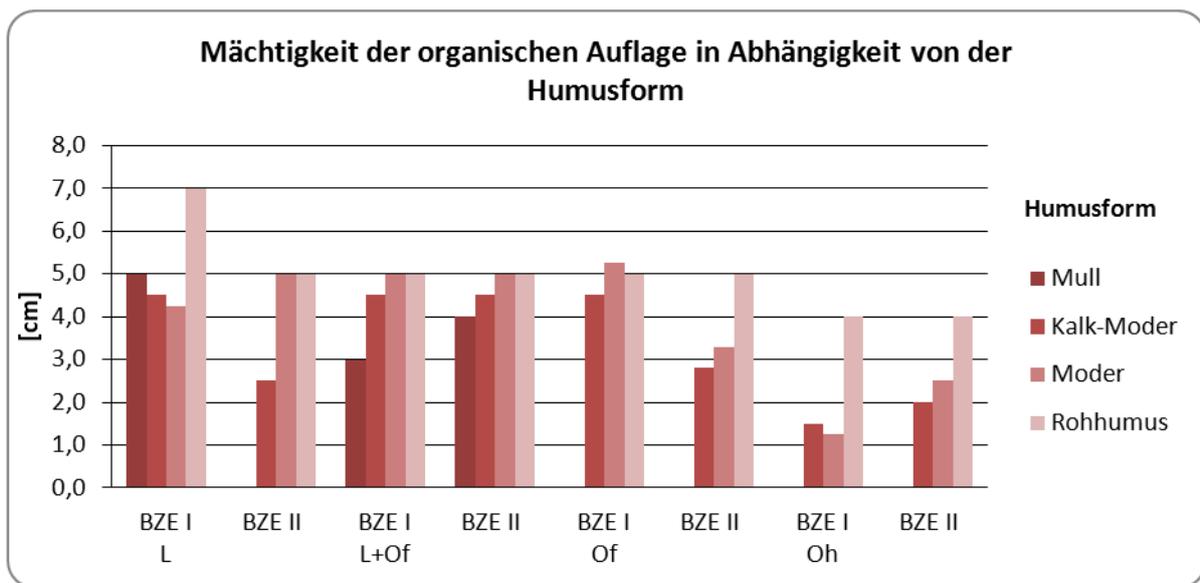


Abbildung 3: Entwicklung der Mächtigkeit der organischen Auflage in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 18: Mächtigkeit der organischen Auflage in Abhängigkeit von der Höhe [m ü NN] (BZE II)

Höhestufe	L				Of				Oh			
	n	med	min	max	n	med	min	max	n	med	min	max
bis 299	15	3,0	1,0	5,5	7	3,8	1,0	5,0	3	3,0	2,3	4,0
300-399	30	3,5	1,0	6,8	22	3,0	0,5	5,5	11	2,0	0,8	5,0
400-499	18	2,0	1,0	7,0	15	4,0	1,8	7,0	9	2,3	1,0	4,0
500-599	10	1,5	0,8	5,0	12	3,5	2,0	5,5	11	2,5	1,0	4,5

<b>600-699</b>	7	1,0	0,5	3,0	7	3,3	3,0	4,0	7	3,0	1,3	5,0
<b>700-800</b>	11	1,0	0,5	2,0	11	3,0	2,0	4,3	11	4,0	1,0	6,5

Für die Auflagemächtigkeit in Abhängigkeit der Höhenstufe ergibt der Vergleich der Ergebnisse der BZE I und BZE II folgendes Bild (vgl. Abb. 4).

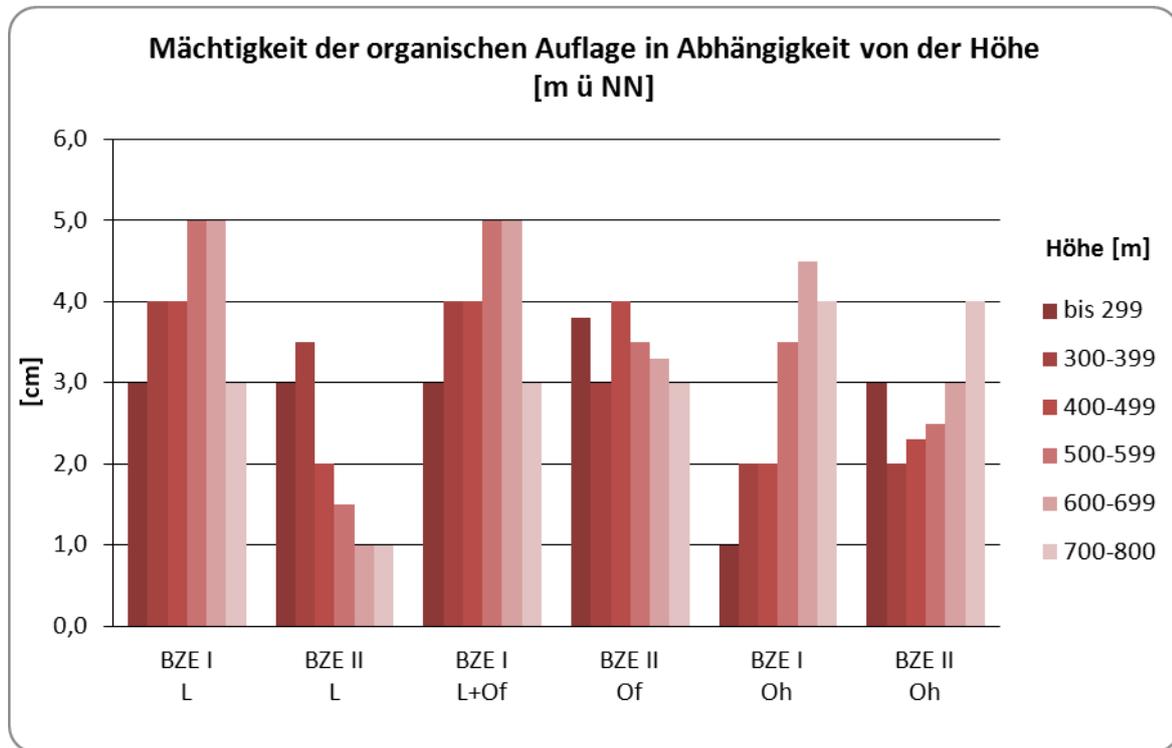


Abbildung 4: Entwicklung der Mächtigkeit der organischen Auflage in Abhängigkeit der Höhe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 19: Auflagemenge organischer Substanz in kg/ha in Abhängigkeit von der Höhenstufe [m ü. NN]

Höhenstufe	L				Of				Oh			
	n	med	min	max	n	med	min	max	n	med	min	max
<b>bis 299</b>	15	14,7	2,6	53,0	7	40,9	10,1	52,7	3	48,9	46,4	93,6
<b>300-399</b>	30	12,0	1,8	28,8	22	45,0	8,7	106,7	11	56,3	20,2	137,4
<b>400-499</b>	18	13,3	3,2	62,9	15	47,3	17,5	150,7	9	55,8	22,3	92,4
<b>500-599</b>	10	6,7	2,9	97,1	12	35,5	13,1	62,6	11	59,2	33,9	136,6
<b>600-699</b>	7	9,0	3,1	25,7	6	52,9	20,6	71,5	7	62,7	46,2	96,5
<b>700-800</b>	11	7,5	3,8	21,7	11	42,5	20,7	75,8	11	77,7	35,3	150,1

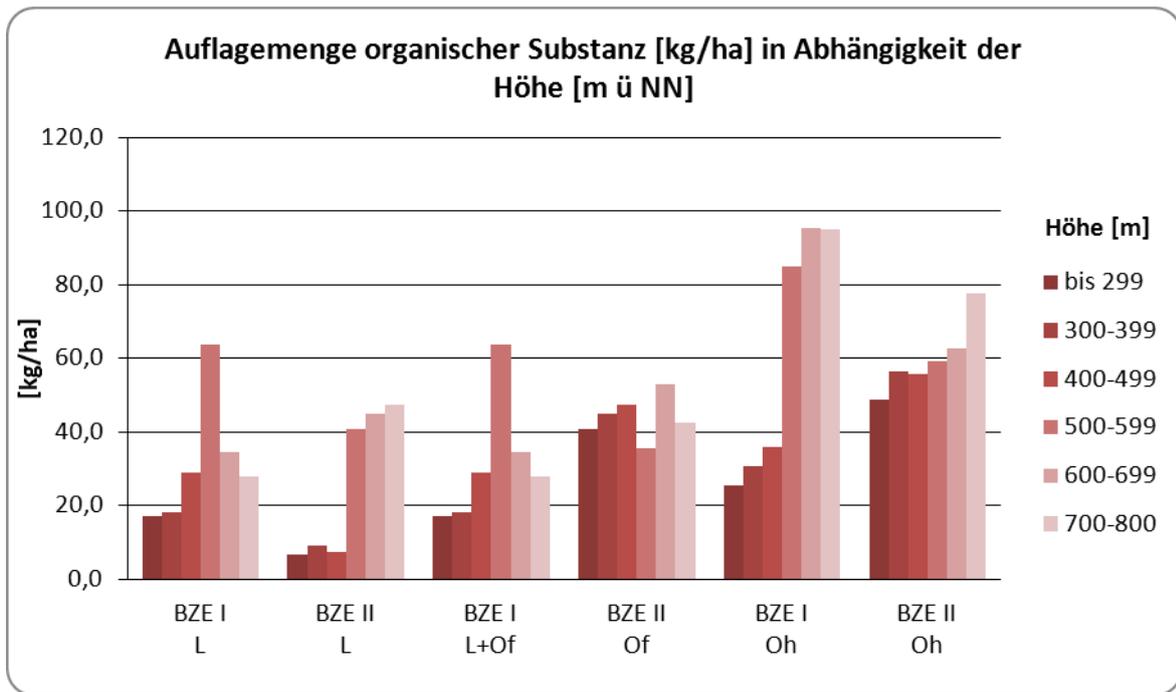


Abbildung 5: Entwicklung der Menge der organischen Auflage in Abhängigkeit der Höhe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3 Chemische Kennwerte der organischen Auflage

Neben den morphologischen Eigenschaften verschiedener Humusformen sind deren chemische Charakteristika ebenfalls bedeutend für die Beschreibung der Funktionsfähigkeit der ökosystemaren Stoffkreisläufe.

#### 3.3.1 pH-Werte

Unter dem Begriff „pH-Wert“ versteht man den negativ dekadischen Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration innerhalb eines definierten Bodens.

Der pH-Wert charakterisiert den Boden in Hinblick auf sein „Pufferungsvermögen“ (vgl. Tab.20).

Tabelle 20: pH-Wert Pufferbereiche

Puffer	Pufferbereich	Beschreibung
Kohlensäure-Carbonat	pH 6,2 bis 8,6	„neutral“
Kohlensäure-Silikat	pH 5,0 bis 6,2	„schwach sauer“
Austauscher	pH 4,2 bis 5,0	„mäßig sauer“
Aluminium	pH 3,0 bis 4,2	„stark sauer“
Eisen	pH < 3,0	„extrem sauer“

Wie bereits im Kapitel III beschrieben, erfolgte die Ermittlung der pH-Werte unter Zuhilfenahme von destilliertem Wasser sowie einer Kaliumchloridlösung. Die im Medium Wasser ermittelten pH-Werte stellen trotz äußerer Einflüsse (z.B. Witterung) eine realistische Größe des aktuellen Säurezustandes dar. Die in Kaliumchloridlösung erhaltenen pH-Werte unterliegen weniger äußeren Einflüssen und liefern demnach eine sicherere Datengrundlage. Nach BURSE (1995) geben diese pH-Werte zudem Auskunft, ob bei vorangegangenen Messungen schon Versauerungstendenzen, insbesondere im OH-Horizont, bestanden haben.

Die Ergebnisse der pH-Werte sind für die BZE II in den nachfolgenden Tabelle dargestellt (vgl. Tab. 21).

**Tabelle 21: mathematische Kenngrößen der pH-Werte aus der organischen Auflage (BZE II)**

Horizonte	pH H <sub>2</sub> O				pH KCl				pH CaCl <sub>2</sub>			
	n	med	min	max	n	med	min	max	n	med	min	max
<b>L</b>	91	5	3,8	7,3	91	4,6	3,1	7,1	91	4,6	3	6,9
<b>Of</b>	74	4,2	3,6	7,4	74	3,6	2,7	7,1	74	3,6	2,9	7
<b>Oh</b>	52	3,9	3,4	5,8	52	3,2	2,5	5,7	52	3,2	2,7	5,7

Stellt man die Ergebnisse der BZE I und BZE II gegenüber so ergibt sich für die mittelfristigen Veränderungen und Versauerungstendenzen der Humusauflage folgendes Bild (Abb. 6).

Da es mit dem pH-Wert (KCl) möglich ist, mittelfristige Veränderungen und Versauerungstendenzen der Humusauflage darzustellen, erscheint es zweckmäßig diesen für die Interpretation heranzuziehen.

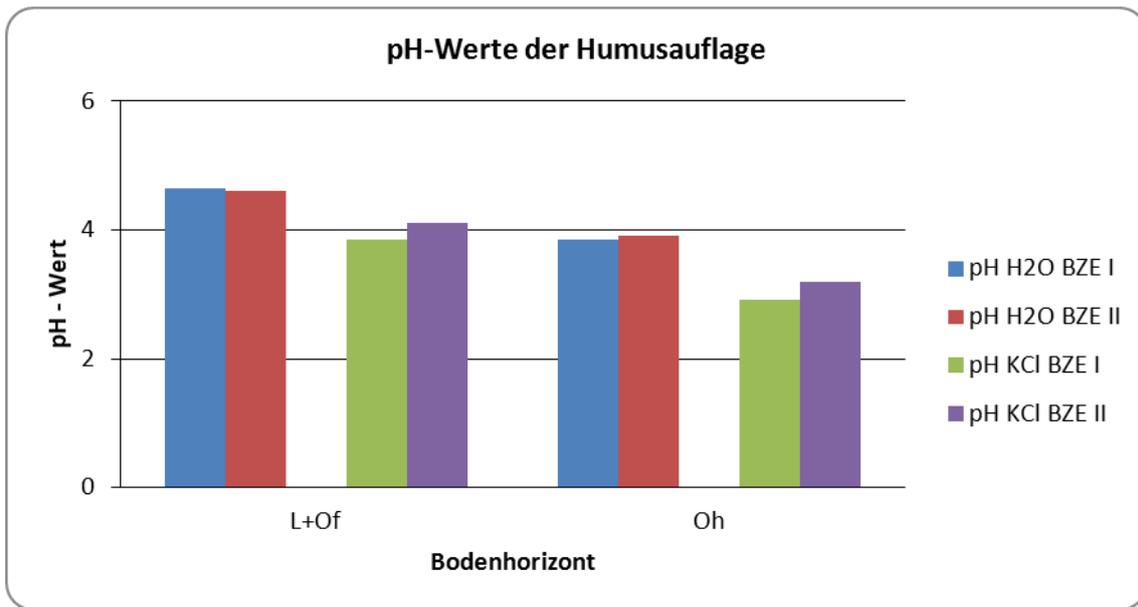


Abbildung 6: Entwicklung pH(KCl)-Werte der Humusauflage von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Aus den Ergebnissen des pH-Wertes (KCl) geht hervor, dass es in den einzelnen Humusschichten insgesamt zu einer Anhebung des pH-Wertes gekommen ist. Dieser Sachverhalt wird bei der Betrachtung der Oh-Schicht besonders deutlich. Weiterhin ist nicht nur ein Anstieg des pH-Wertes (KCl) zu verzeichnen, sondern auch beim pH-Wert (H<sub>2</sub>O) (vgl. Tab 22), welcher den aktuell tatsächlichen Säurezustandes der Humusauflage darstellt. Somit konnte der Fortbestand von Versauerungstendenzen in der Bodenkrume sowie in der Humusauflage nicht mehr bestätigt werden.

Tabelle 22: pH-Werte (H<sub>2</sub>O) der Humusform (BZE II)

Humusformen	pH (H <sub>2</sub> O)											
	L				Of				Oh			
	n	med	min	max	n	med	min	max	n	med	min	max
<b>MU</b>	10	6,3	5,8	6,8								
<b>MUF</b>	18	5,8	4,7	7,3	7	5,3	4,1	7,1				
<b>MOC</b>	5	5,1	4,7	6,0	5	5,9	4,9	7,4	2	5,4	4,9	5,8
<b>MM</b>	4	5,6	4,8	6,2	3	6,1	4,8	6,4				
<b>MO</b>	15	5,0	4,4	6,0	17	4,2	3,8	5,7	11	4,0	3,6	4,8
<b>MR</b>	19	4,8	4,0	5,4	20	4,2	3,6	5,0	18	4,0	3,4	4,4
<b>RO</b>	20	4,5	3,8	5,1	22	4,0	3,6	4,9	21	3,6	3,4	4,5

Tabelle 23: : pH-Werte (KCl) der Humusform (BZE II)

Humusformen	pH (KCl)

	L				Of				Oh			
	n	med	min	max	n	med	min	max	n	med	min	max
<b>MU</b>	10	6,0	5,5	6,6								
<b>MUF</b>	18	5,4	4,1	7,1	7	5,0	3,6	6,7				
<b>MOC</b>	5	4,6	4,3	5,8	5	5,9	4,3	7,1	2	4,9	4,0	5,7
<b>MM</b>	4	5,3	4,0	5,8	3	5,7	4,2	6,0				
<b>MO</b>	15	4,5	3,4	5,4	17	3,5	3,1	5,3	11	3,2	2,8	4,0
<b>MR</b>	19	4,3	3,5	4,9	20	3,5	2,8	4,5	18	3,1	2,7	3,8
<b>RO</b>	20	4,0	3,1	4,6	22	3,3	2,7	4,2	21	3,1	2,5	4,1

Tabelle 24: pH-Werte (CaCl<sub>2</sub>) der Humusform (BZE II)

Humusformen	pH (CaCl <sub>2</sub> )											
	L				Of				Oh			
	n	med	min	max	n	med	min	max	n	med	min	max
<b>MU</b>	10	5,9	5,4	6,5								
<b>MUF</b>	18	5,4	4,1	6,9	7	5,0	3,5	6,7				
<b>MOC</b>	5	4,6	4,4	5,6	5	5,9	4,5	7,0	2	5,0	4,3	5,7
<b>MM</b>	4	5,2	4,1	5,8	3	5,7	4,3	6,0				
<b>MO</b>	15	4,6	3,6	5,3	17	3,7	3,2	5,3	11	3,3	3,0	4,2
<b>MR</b>	19	4,2	3,6	4,9	20	3,6	2,9	4,5	18	3,3	2,8	3,8
<b>RO</b>	20	4,0	3,0	4,6	22	3,5	2,9	4,4	21	3,1	2,7	4,1

Bei der Betrachtung der pH-Werte (H<sub>2</sub>O) wird deutlich, dass die Humusform Mull die höchsten pH-Werte in dem L-Horizont mit 6,3 und 5,8 aufweist (Tab. 22). Damit liegen die Mull-Formen im oberen Silikat-Pufferbereich. Auch die Moder-Formen (mullartiger Moder und Moder) sind mit pH-Werten (H<sub>2</sub>O) von 5,6 und 5,0 in dem L-Horizont noch dem Silikat-Pufferbereich zuzuordnen. Bei mullartigem Moder ist in der Of-Schicht ein Anstieg des pH-Werts um 0,5 Einheiten zu verzeichnen, so dass hier von einer guten biologischen Aktivität und Mineralisierung auszugehen ist. Auch bei der Betrachtung des pH-Wertes (KCl) zeigen sich ähnliche Tendenzen (Tab. 23), so dass die Annahme der guten biologischen Aktivität und Mineralisierung ebenfalls bestätigt werden konnte. Im Gegensatz dazu verhält es sich mit den Of- und Oh-Horizonten des Moders. Hier zeigt sich ein deutlicher Abfall des pH-Wertes in dem

unteren Austauscher-Pufferbereich mit Tendenzen zum Aluminium-Pufferbereich. So kann hier nur von einer mäßigen biologischen Aktivität und Mineralisierung ausgegangen werden.

Die separat beschriebene Humusform Kalkmoder ist in seinem L-Horizont (pH-Wert (H<sub>2</sub>O) von 5,1) sowie in dem Of- und Oh-Horizont (pH-Wert (H<sub>2</sub>O) von 5,9 – 5,4) dem oberen Silikat-Pufferbereich zuzuschreiben. Damit weist auch der Kalkmoder in allen Humusschichten auf gute Bedingungen für eine hohe biologische Aktivität und Streuumsetzung hin. Obwohl die pH-Werte (KCl) in einzelnen Humusschichten etwas niedriger als die pH-Werte (H<sub>2</sub>O) ausfallen, reihen sie sich immer noch in den oberen Silikat-Pufferbereich ein, so dass hier von gleichbleibenden Verhältnissen auszugehen ist.

Die Humusformen Rohhumus und rohhumusartiger Moder haben im Vergleich zu den bereits beschriebenen Humusformen in allen Humushorizonten die niedrigsten pH-Werte. Mit einem pH (H<sub>2</sub>O) von 4,8 und 4,5 liegt der L-Horizont im Austauscher-Pufferbereich, wobei sich die Of- und Oh-Schicht (pH-Wert (H<sub>2</sub>O) von 4,2 – 3,6) jeweils im Aluminium-Pufferbereich befinden. Betrachtet man den für Versauerungstendenzen aussagekräftigeren pH-Wert (KCl) so zeigt sich, dass mit Hilfe von Kalkungs- und Düngungsmaßnahmen die in der L-Horizont sowie Of- und Oh-Horizont anzutreffenden stark bis extrem sauren Verhältnissen (pH-Wert (KCl) von 3,1 – 4,3) aufgewertet werden konnten. Trotz alledem ist bei diesen Humusformen kurz- bis mittelfristig noch eher von schlechten bis stark eingeschränkten Verhältnissen für eine biologische Aktivität und Streuumsetzung, beim Ausbleibenden standortsverbessernder Maßnahmen, auszugehen.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (Abb. 7 und 8) wird deutlich, dass es bei der Humusform Moder zu einem deutlichen Anstieg des pH (H<sub>2</sub>O)-Wertes im L-Of-Horizont, sowie einem geringen Anstieg im Oh-Horizont gekommen ist und dies als Aufwertung sowie positive Entwicklung beschrieben werden kann. Beim Rohhumus ist ein leichter Rückgang des pH(H<sub>2</sub>O)- Wertes im Oh-Horizont zu verzeichnen. Da Rohhumusformen eher niedrige pH-Werte aufweisen, ist diese Entwicklung als ungünstig anzusehen. Die Humusformen Mull und Kalkmoder weisen keine auffälligen Entwicklungen des pH(H<sub>2</sub>O) auf. Auch in Hinblick auf die Ergebnisse des pH(KCl) spiegeln sich die bei pH(H<sub>2</sub>O) beschriebenen Ergebnisse wieder.

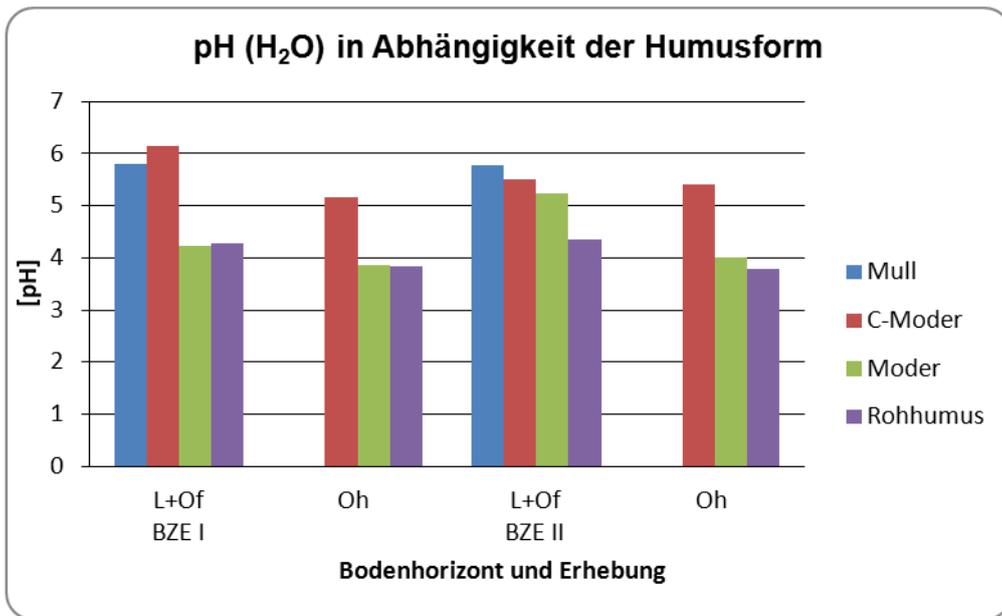


Abbildung 7: Entwicklung pH-Werte der Humusauflage in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

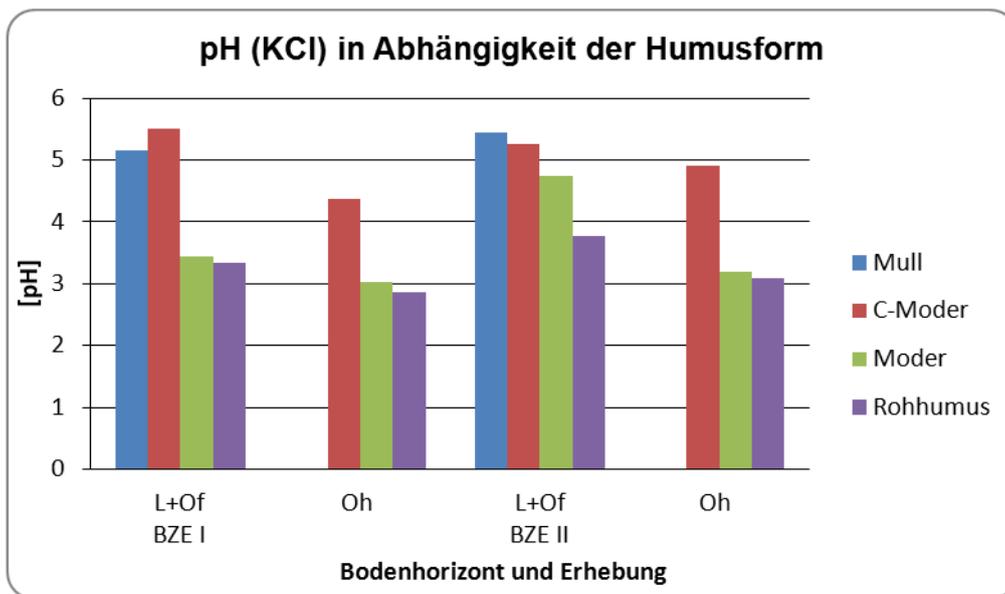


Abbildung 8: Entwicklung pH-Werte der Humusauflage in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Die nachfolgenden Tabellen 25 und 26 schaffen einen Überblick über den prozentualen Anteil der Humusformen und Grundgesteine an den pH-Pufferbereichen.

Tabelle 25: prozentualer Anteil der Humusform an den pH-Pufferbereichen

Humusformen	Humus-schicht	8,6 - >6,2		6,2 - >5,0		5 - >4,2		4,2 - > 3,8		3,8 - >3,0		3 - 2,4	
		H <sub>2</sub> O	KCl										
Mull	L+Of	50	20	50	80								
	Oh												
F-Mull	L+Of	22	24	59	44	15	20	4	8		4		

	Oh												
<b>Kalkmoder</b>	L+Of	20	20	50	40	30	40						
	Oh												
<b>mullartiger Moder</b>	L+Of	14		57	71	29	0		29				
	Oh												
<b>Moder</b>	L+Of			28	9	41	41	28	13	3	38		
	Oh			0		27		45	18	27	73		9
<b>rohhumusartiger Moder</b>	L+Of			10		51	33	26	15	13	38		13
	Oh					11		50		39	61		39
<b>Rohhumus</b>	L+Of			5		50	7	24	29	21	55		10
	Oh					10		29	5	62	48		48
<b>gesamt</b>	L+Of	8	6	27	19	38	23	18	16	9	31		5
	Oh			2	2	15	0	38	8	44	56		35

Tabelle 26: prozentualer Anteil der Humusform an den pH-Pufferbereichen

Humusformen	Humus-schicht	8,6 - >6,2	6,2 - >5,0	5 - >4,2	4,2 -> 3,8	3,8 - >3,0	3 - 2,4
		CaCl <sub>2</sub>					
<b>Mull</b>	L+Of	20	80				
	Oh						
<b>F-Mull</b>	L+Of	24	36	28	8	4	
	Oh						
<b>Kalkmoder</b>	L+Of	20	30	50			
	Oh						
<b>mullartiger Moder</b>	L+Of		71	14	14		
	Oh						
<b>Moder</b>	L+Of		9	38	19	34	
	Oh				18	73	9
<b>rohhumusartiger Moder</b>	L+Of			23	32	41	5
	Oh					61	39
<b>Rohhumus</b>	L+Of			14	24	52	10
	Oh				5	48	48
<b>gesamt</b>	L+Of	6	17	24	19	30	4
	Oh		2	2	6	56	35

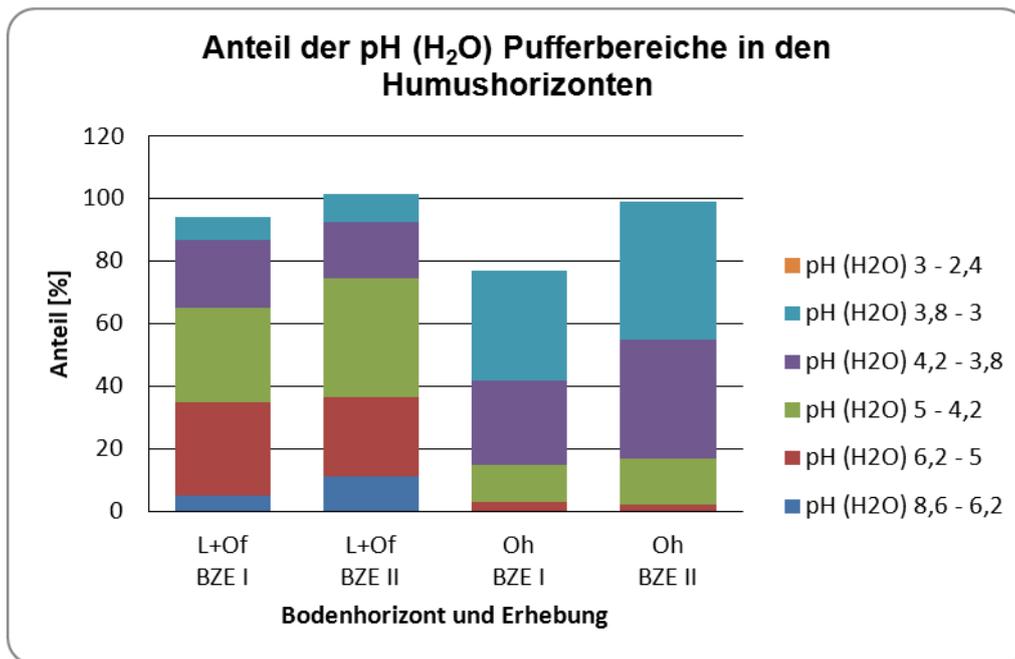


Abbildung 9: Entwicklung der pH (H<sub>2</sub>O)-Pufferbereiche der Humusaufgabe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

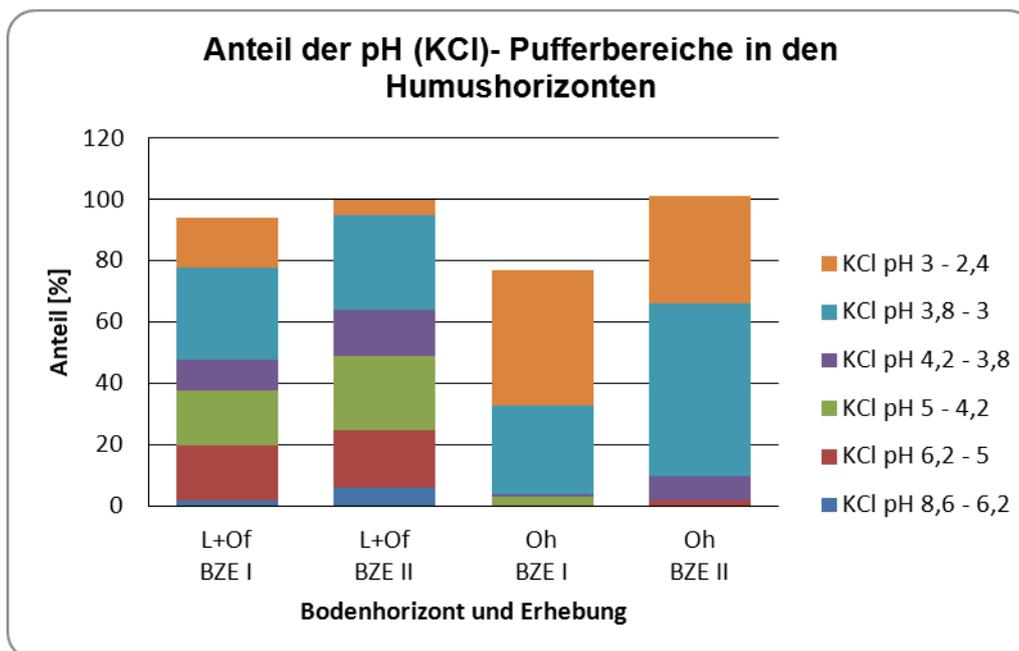


Abbildung 10: Entwicklung der pH (KCl)-Pufferbereiche der Humusaufgabe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Der folgende Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (Abb. 9 und 10) bezieht sich ausschließlich auf die pH (KCl)- Werte, welche für die Beurteilung von mittelfristigen Veränderungen herangezogen werden. Demnach kam es in Abhängigkeit der Humusform in dem L-Of-Horizont zur Verringerung der eher sauren

Pufferbereiche pH (KCl) 3 - 2,4 und pH (KCl) 3,8 - 3 zu Gunsten der Pufferbereiche pH (KCl) 4,2 - 3,8, pH (KCl) 5 - 4,2 und pH (KCl) 8,6 - 6,2. Innerhalb des Oh-Horizontes kam es ebenfalls zur Abnahme des Pufferbereiches pH 3 - 2,4, wobei sich der Anteil des Pufferbereiches pH (KCl) 3,8 – 3 deutlich zunahm. Auch der Pufferbereich pH (KCl) 4,2 – 3,8 weist einen höheren Anteil auf. Aufgrund der Verringerung des prozentualen Anteils von sauren Pufferbereichen am Gesamtpuffer der Humusaufgabe kann hier eine positive Entwicklung im Rückgang von Versauerungserscheinungen festgestellt werden. Diese Tendenzen spiegeln sich auch bei den Ergebnissen in Abhängigkeit des Grundgesteines wider (Tab. 27, 28 und Abb. 11, 12).

Tabelle 27: prozentualer Anteil der Grundgesteine an den pH-Pufferbereichen

Grundgestein	Humus-schicht	8,6 - >6,2		6,2 - >5,0		5 - >4,2		4,2 -> 3,8		3,8 - >3,0		3 - 2,4	
		H <sub>2</sub> O	KCl										
C	L+Of	37	28	52	48	11	21		3				
	Oh			50	50	50			50				
L	L+Of	19	11	69	32		37	13	5		16		
	Oh												
E	L+Of	13		75	75	13	13		13				
	Oh												
S	L+Of			16	9	42	19	26	23	16	49		
	Oh					13		25		63	50		50
R	L+Of			14		54	36	21	4	11	50		11
	Oh					15		46	8	38	62		31
F	L+Of			8	3	53	18	26	29	13	42		8
	Oh					15		45	10	40	60		30
gesamt	L+Of	9	6	28	19	36	24	18	15	9	33		4
	Oh			2	2	15		38	8	44	56		35

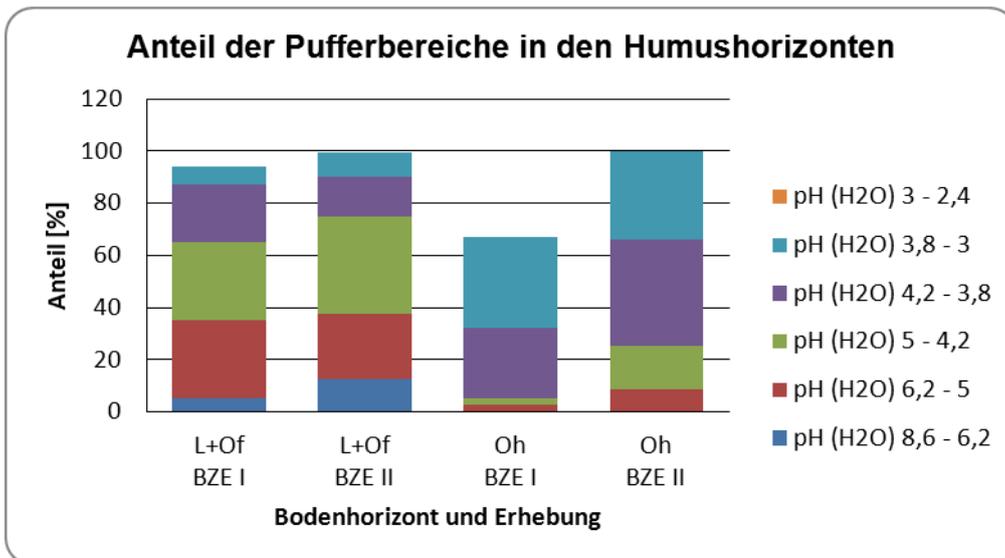


Abbildung 11: Entwicklung der pH (H<sub>2</sub>O)-Pufferbereiche der Humusaufgabe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

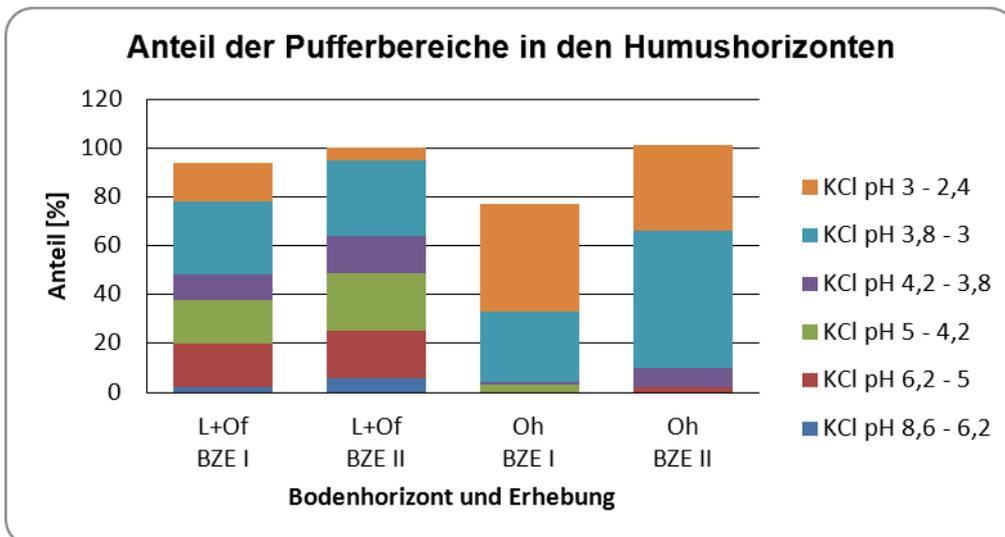


Abbildung 12: Entwicklung der pH (H<sub>2</sub>O)-Pufferbereiche der Humusaufgabe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 28: prozentualer Anteil der Grundgesteine an den pH-Pufferbereichen

Humusformen	Humus-schicht	8,6 - >6,2	6,2 - >5,0	5 - >4,2	4,2 - > 3,8	3,8 - >3,0	3 - 2,4
		CaCl <sub>2</sub>					
C	L+Of	28	41	28	3		
	Oh		50	50			
L	L+Of	11	32	37	5	16	
	Oh						
E	L+Of		63	25	13		
	Oh						
S	L+Of		9	14	30	40	7
	Oh					50	50
R	L+Of			36	14	43	7

	Oh				8	62	31
<b>F</b>	L+Of		3	16	30	49	3
	Oh				10	60	30
<b>gesamt</b>	L+Of	6	17	24	19	30	4
	Oh		2	2	6	56	35

### 3.3.2 Kohlenstoff – C

Bei der Betrachtung der Ergebnisse aus den Tabellen 29 bis 31 wird deutlich, dass die L- und Of-Horizonte deutlich höhere Kohlenstoffgehalte als die Oh-Horizonte haben, was den natürlichen Verhältnissen entspricht.

Betrachtet man die Humusformen einzeln, so ist ein Anstieg des Kohlenstoffgehaltes innerhalb der L- und Of-Horizonte von Mull nach Rohhumus gegeben. Auch bei der Differenzierung nach Baumarten zeigt sich, dass der Kohlenstoffgehalt von L- und Of-Horizonten in Nadelholzbeständen höher als in Laubholzbeständen ausgeprägt ist. Weiterhin konnten Abhängigkeiten des Kohlenstoffgehaltes in Bezug auf Nährkraftstufen ausgewiesen werden. Somit korreliert der Anstieg des Kohlenstoffgehaltes mit sich verschlechternder Nährkraftstufe und Zersetzbarkeit der Nadelstreu. Die Aktivität der Destruenten nimmt mit abnehmender Nährkraft des Bodens, mit sinkender Bodentemperatur, -feuchte und pH-Wert sowie mit zunehmendem Gehalt schwer zersetzbarer Bestandteile in der Streu ab. Es kommt zur Akkumulation von organischer Masse, mithin zum Anstieg des Kohlenstoffgehaltes in der Humusaufgabe.

Die Ergebnisse der Kohlenstoffvorräte spiegeln ähnliche Sachverhalte wider. So ergeben sich auch höhere Kohlenstoffvorräte mit der sich verschlechternden Humusform. Ebenfalls weisen Nadelholzbestände höhere Kohlenstoffvorräte in den L- und Of-Horizonten auf.

Vergleicht man die Ergebnisse der BZE I und BZE II (siehe Abbildung 13 bis 14) miteinander, so zeigt sich, dass insgesamt ein Rückgang des Kohlenstoffgehaltes sowie Kohlenstoffvorrates zu verzeichnen ist. Bei den Kohlenstoffgehalten der Humushorizonte sind unterschiedlich starke Ausprägungen festzustellen. Somit weisen die L- und Of-Horizonte nur einen geringen Rückgang von 41,5 % auf 40,25 % auf, wobei bei dem Oh-Horizont der Rückgang von 33,1 % auf 25,8 % gravierender ausfällt. Auch in Hinblick auf die Humusform ist der Rückgang des Kohlenstoffgehaltes deutlich erkennbar. Lediglich die Humusform Kalkmoder verzeichnet einen Anstieg des C-Gehaltes innerhalb der L- und Of-Horizonte. Ähnliche Tendenzen des Rückganges treten beim Kohlenstoffgehalt in Abhängigkeit zur Baumart auf. Hier sei darauf hingewiesen, dass bei der BZE II erstmalig Oh-Horizonte bei Eichenbeständen aufgenommen wurden.

Auch der Vergleich der Kohlenstoffvorräte zeigt ähnliche Tendenzen auf. Bei der Betrachtung der Humushorizonte ist ein sehr starker Rückgang der Humusvorräte

deutlich erkennbar. Besonders fällt der Rückgang des C-Vorrates (Rückgang um ca. 50%) innerhalb des Oh-Horizontes auf.

Rückgänge aber auch Zuwächse der Kohlenstoffvorräte waren bei verschiedenen Humusformen gegeben. Demnach verzeichneten die Humusformen Mull und Moder Anstiege innerhalb des L- und Of-Horizontes. Bei der Humusform Kalkmoder zeigte sich, dass zwar ein Rückgang des C-Vorrates innerhalb des L- und Of-Horizontes zu verzeichnen war, gleichzeitig sich aber ein Zuwachs innerhalb des Oh-Horizontes einstellte.

Im Zusammenhang einiger Baumarten waren ebenfalls Zunahmen des C-Vorrates innerhalb des Humuskörpers gegeben. Obwohl der C-Vorrat innerhalb des L-Of-Horizontes bei Nadelholzbeständen abnahm, stiegen diese bei den von Buche, Eiche und Esche dominierten Beständen. Innerhalb des Oh-Horizontes kam es bei Kiefern- und Buchenbeständen zu einem deutlichen Anstieg. Auch hier sei das erstmalige Auftreten von C-Vorräten innerhalb des Oh-Horizontes bei Eiche erwähnt.

Als eine mögliche Ursache für den Rückgang der Kohlenstoffgehalte und -vorräte sind hier standortsverbessernde Maßnahmen (z.B. walbautechnische Maßnahmen, Waldkalkung) zu nennen. Da durch die Verbesserung des pH-Wertes und des Basengehaltes durch Kalkung auch die biologische Aktivität des Oberbodens und somit die Mineralisierung gesteigert wird, kann der Abbau der Streu und somit ein Rückgang des C-Gehaltes erfolgen. Auch im Zuge bestandespflgender Maßnahmen (z.B. Läuterung, Z-baumbezogene Durchforstungen) können die Parameter Bodentemperatur und Bodenwasser positiv beeinflusst werden, so dass hier ebenfalls Verbesserungen der biologischen Aktivität und Mineralisierung eintreten können.

Tabelle 29: Kohlenstoffgehalte [%] der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
L+Of	161	16,64	28,96	35,98	40,25	43,65	29,45	48,62
Oh	52	12,56	20,63	23,45	25,81	45,84	34,78	41,42

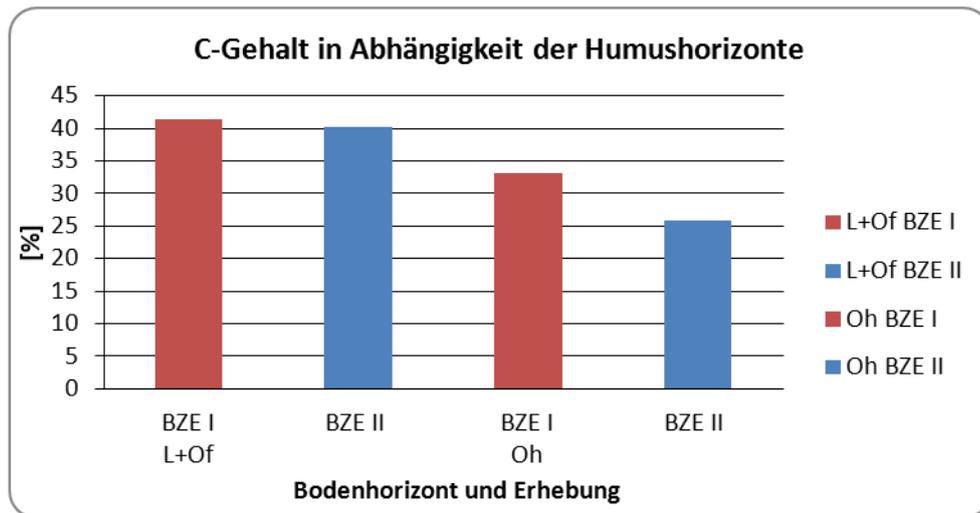


Abbildung 13: Entwicklung des Kohlenstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humushorizonte von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 30: Kohlenstoffgehalte [%] der einzelnen Humusform (BZE II)

Horizonte	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	20,59	34,24					
MO	37	16,64	38,36	46,90	11	17,14	24,910	34,62
CMO	10	31,79	42,25	47,58	2	26,70	27,85	29,00
RO	79	17,70	43,38	48,62	39	12,56	25,80	41,42

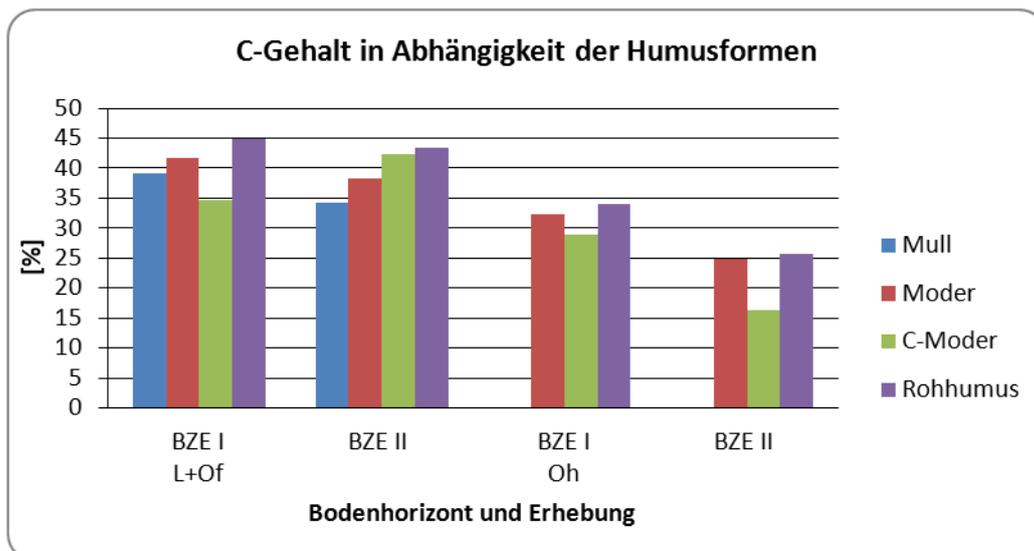


Abbildung 14: Entwicklung des Kohlenstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusformen von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 31: Kohlenstoffgehalte [%] in Abhängigkeit von den Baumarten (BZE II)

Baumart	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
Fi	76	18,00	42,61	48,62	34	13,04	26,10	41,42
Ki	44	17,70	42,05	48,46	14	19,08	27,83	40,60
BU	24	16,64	35,88	45,84	3	12,56	20,64	21,89
Ei	9	17,88	31,69	43,76	1	23,46	23,46	23,46
Es	8	21,02	36,74	38,98				

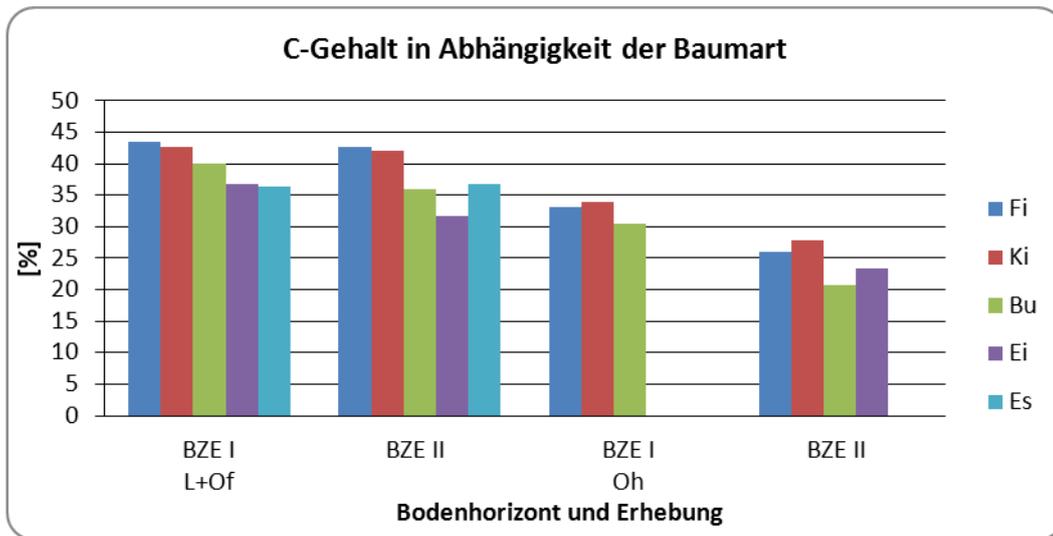


Abbildung 15: Entwicklung des Kohlenstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit der Baumart von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 32: Kohlenstoffgehalte [%] in Abhängigkeit von Nährkraftstufen und Grundgesteinen (BZE II)

Nährkraft Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
R	31	21,02	35,28	48,46	4	26,70	30,20	35,96
K	21	20,59	35,74	47,97	4	12,56	19,07	23,26
M	90	16,64	41,50	48,62	35	13,04	25,80	41,42
Z	19	28,46	44,07	47,58	9	22,60	33,01	39,60
C	25	25,91	42,15	47,97	8	17,49	26,94	40,60
L	14	16,64	38,06	46,75	4	20,64	22,93	26,70
E	7	21,46	41,74	46,26	2	12,56	23,19	33,82
S	44	17,70	40,32	48,42	14	13,04	25,05	38,98
R	29	21,02	42,48	48,62	12	19,08	27,70	41,42
F	41	22,53	39,73	46,90	13	17,14	25,82	39,60

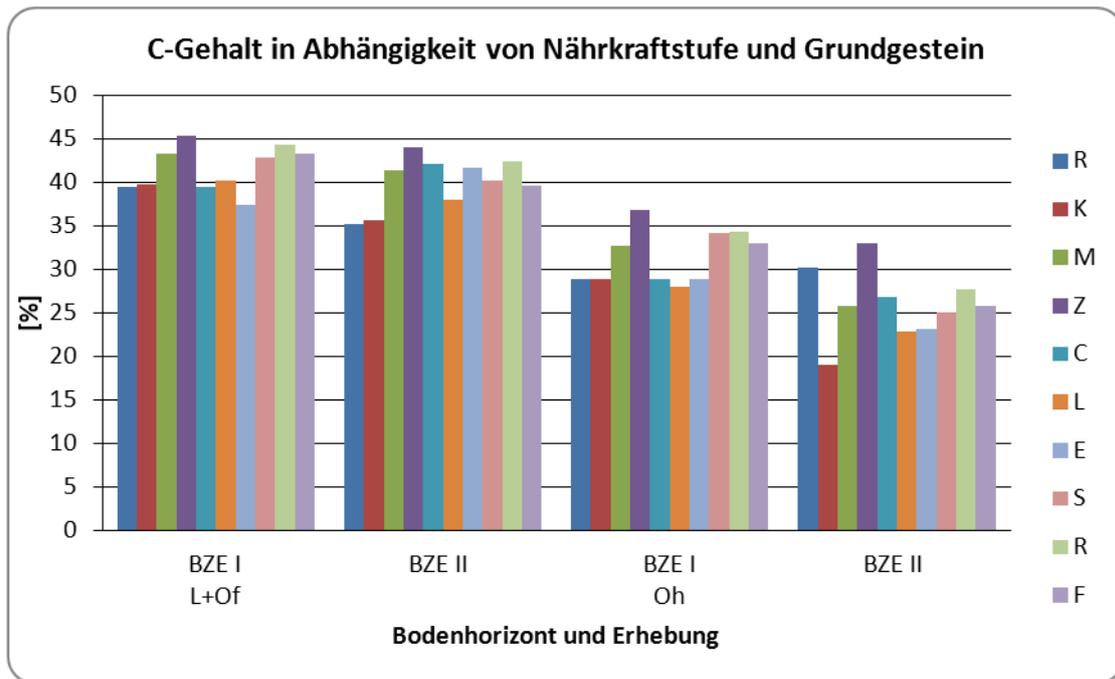


Abbildung 16: Entwicklung des Kohlenstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit der Nährkraftstufe und des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 33: Kohlenstoffvorräte [kg/ha] der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	529,47	2585,37	5577,48	9228,15	14580,85	23623,33	55368,59
Oh	52	551,88	2127,46	5762,57	10239,35	13229,68	20829,99	41827,90

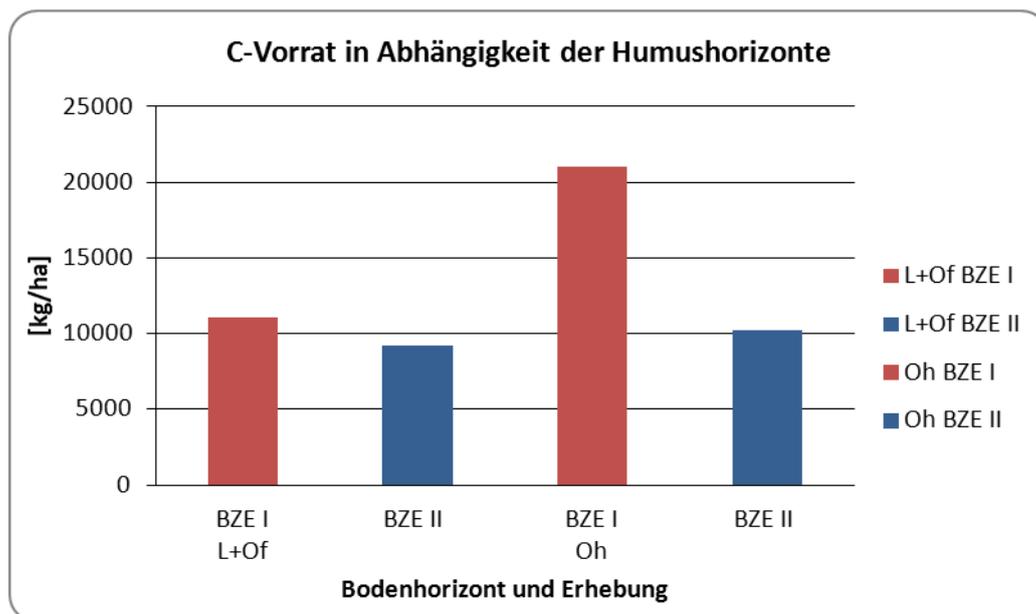


Abbildung 17: Entwicklung des Kohlenstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 34: Kohlenstoffvorräte [kg/ha] nach Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
<b>MU</b>	<b>35</b>	612,85	5240,00	35700,67				
<b>MO</b>	<b>39</b>	650,08	9650,80	24319,26	<b>11</b>	551,88	6481,18	21472,70
<b>CMO</b>	<b>10</b>	1108,17	3918,64	17963,53	<b>2</b>	10453,82	13908,99	17364,15
<b>RO</b>	<b>81</b>	529,47	15678,11	55368,59	<b>39</b>	1068,43	12963,87	41827,90

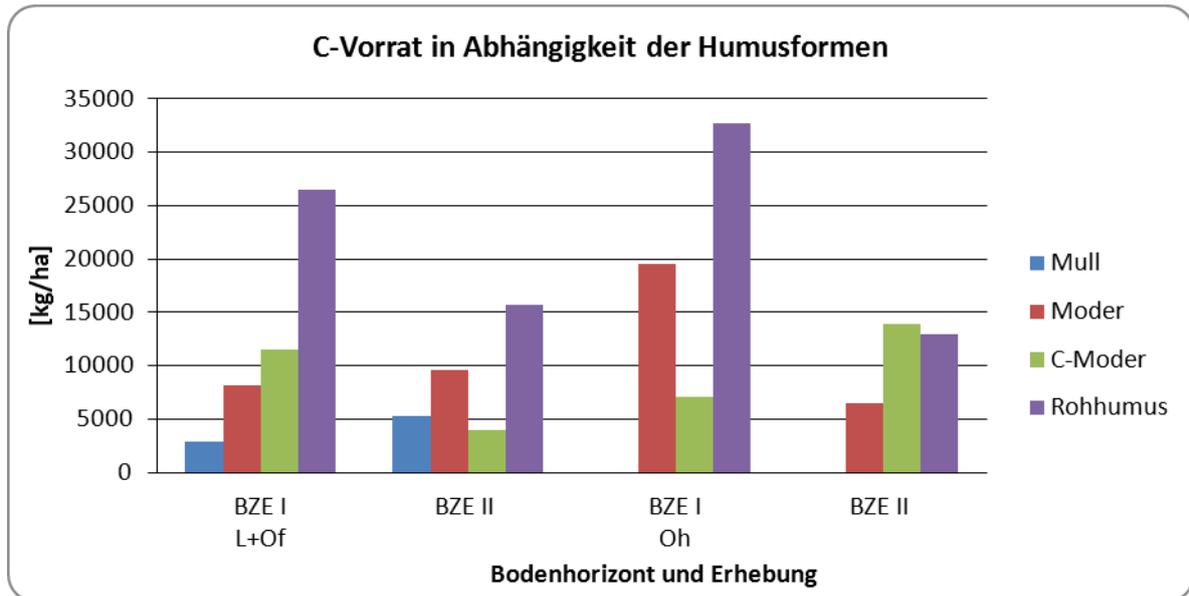


Abbildung 18: Entwicklung des Kohlenstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 35: Kohlenstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit von den Baumarten (BZE II)

Baumart	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
<b>Fi</b>	<b>78</b>	529,47	6738,44	30572,03	<b>34</b>	7366,38	19847,13	55368,59
<b>Ki</b>	<b>46</b>	551,88	8178,48	37895,39	<b>14</b>	2158,12	23563,56	44779,12
<b>BU</b>	<b>26</b>	612,85	4148,90	21271,61	<b>3</b>	9650,80	14330,44	21125,75
<b>Ei</b>	<b>9</b>	1095,82	5240,00	8866,19	<b>1</b>	16692,88	16692,88	16692,88
<b>Es</b>	<b>8</b>	551,88	2164,06	6090,00				

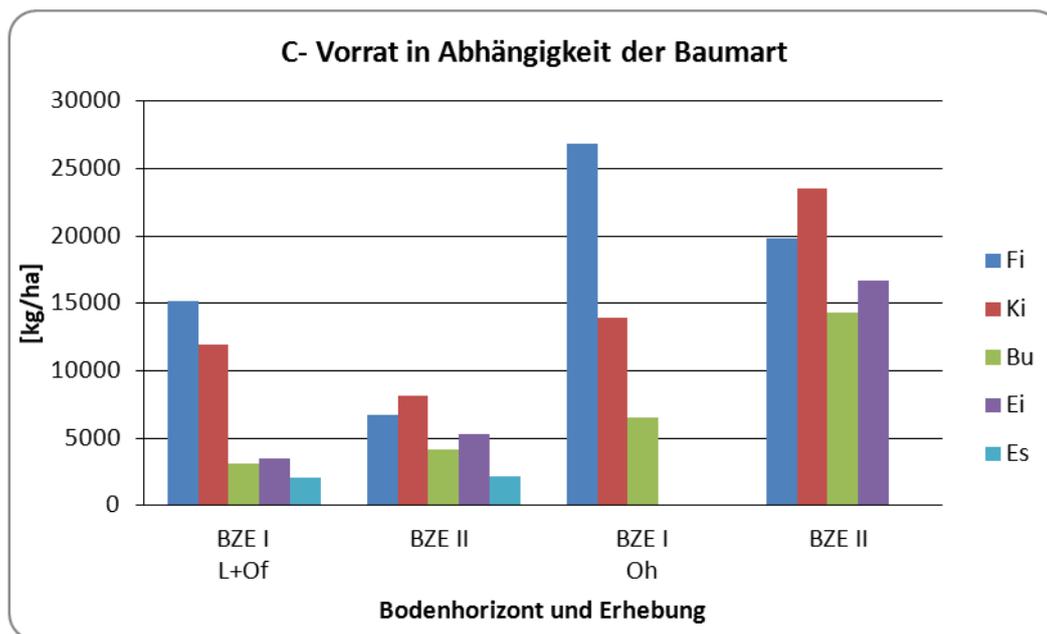


Abbildung 19: Entwicklung des Kohlenstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Baumart von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 36: Kohlenstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit von den Grundgesteinen (BZE II)

Grundgestein	L+Of			Oh				
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
<b>C</b>	<b>26</b>	929,74	5649,65	37895,39	<b>7</b>	9386,98	16752,06	24319,26
<b>L</b>	<b>18</b>	561,86	5887,60	20088,82	<b>1</b>	17364,15	17364,15	17364,15
<b>E</b>	<b>7</b>	612,85	3976,71	30572,03	<b>2</b>	14330,44	25253,99	36177,53
<b>S</b>	<b>42</b>	1068,43	6171,70	31741,17	<b>8</b>	7366,38	16692,88	41827,90
<b>R</b>	<b>29</b>	1108,17	8250,00	24590,49	<b>12</b>	9228,15	23930,45	44779,12
<b>F</b>	<b>43</b>	529,47	5542,06	36902,83	<b>13</b>	12919,30	18965,11	55368,59

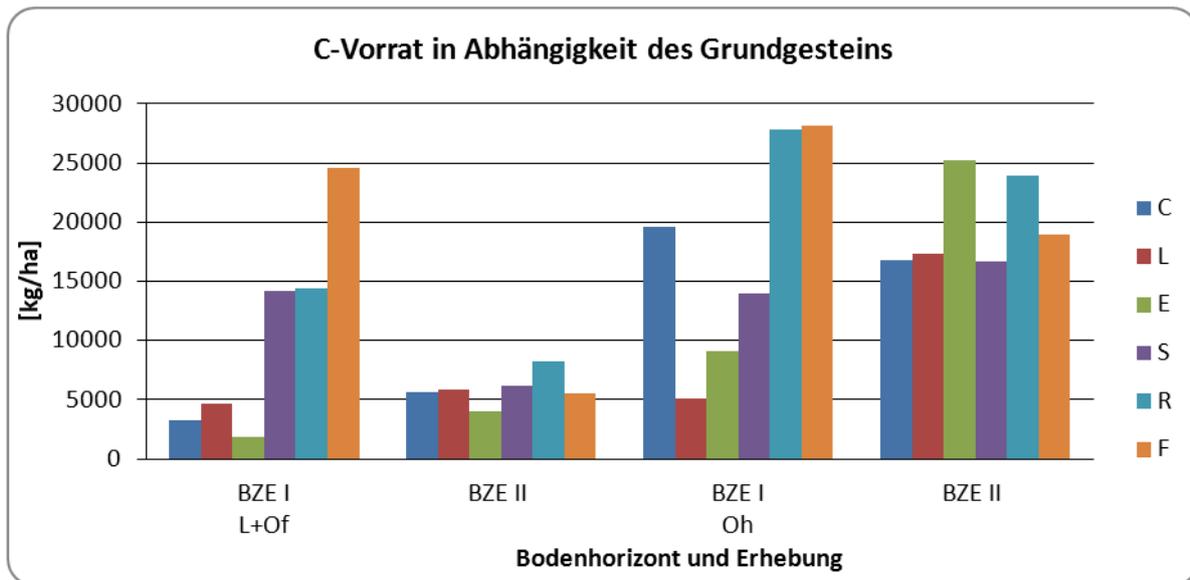


Abbildung 20: Entwicklung des Kohlenstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.3 Stickstoff – N

Mineralischer Stickstoff geogenen Ursprungs ist meist nicht oder nur in Spuren im Boden vorhanden. Einige Pflanzenarten, die N-Verbindungen aus der Luft fixieren können, haben eine Anreicherung von N in der Humusschicht bewirkt, wovon die meisten Pflanzen ihren N-Bedarf decken.

Zusätzlich zur natürlichen N-Anreicherung im Humus haben anthropogene N-Einträge aus Luftverunreinigungen durch Industrie und Verkehr zu einer weiteren Erhöhung der N-Gehalte geführt. Damit entstand ein Risiko, dass unter bestimmten Standortbedingungen Nährstoffungleichgewichte, Versauerung des Oberbodens, Schädigung von Mykorrhizen sowie erhöhte Frost- und Windwurfanfälligkeit der Waldbäume und Nitratbelastungen des Grundwassers auftreten.

Die Tabelle 37 bis 42 zeigen somit die Ergebnisse des Stickstoffgehaltes und der Stickstoffvorräte der Humusformen und Humushorizonte auf. Die Abbildungen 21 bis 26 stellen den direkten Vergleich zwischen BZE I und BZE II her.

Die Ergebnisse der Analysen des Stickstoffgehaltes innerhalb der Humushorizonte lassen erkennen, dass die Werte (Median L-u. Of-Horizont = 1,37; Oh-Horizont = 1,18) nicht wesentlich auseinander liegen. In Abhängigkeit von der Humusform zeigt sich, dass der Stickstoffgehalt mit sich ändernder Humusform von Mull über Kalkmoder bis hin zum Rohhumus zunimmt. Auch bei der Betrachtung der Stickstoffvorräte ist dieser Trend festzustellen. Innerhalb des Humuskörpers weist der Oh-Horizont mit ca. 450 N kg/ha höhere N-Vorräte als bei dem L- und Of-Horizont (355 N kg/ha) auf. Auch mit zunehmender Verschlechterung der Humusform sind Anstiege des N-Vorrates innerhalb des Oh-Horizontes zu verzeichnen.

Unterschiede im Stickstoffvorrat ergeben sich auch in Hinblick auf Baumarten und Grundgesteine. Insgesamt weisen Nadelholzbestände größere Vorräte als Laubholzbestände auf, wobei hier die größten Vorräte binnen des Oh-Horizontes akkumuliert sind. Insbesondere sind hier die von Fichte und Eiche dominierten Bestände zu nennen, welche jeweils Vorräte von über 800 N kg/ha besitzen. Betrachtet man den N-Vorrat in Abhängigkeit des Grundgesteins, so ist festzustellen, dass auf eher nährstoffärmeren bzw. sauren Grundgesteinen (S, R, F) höhere N-Vorräte innerhalb des Humuskörpers vorkommen. Demnach wird auf sauren Gesteinen deutlich mehr Stickstoff gespeichert als dies bei eutrophen Gesteinen der Fall ist. Speziell der Oh-Horizont weist hier hohe Werte auf. Auch dies ist auf die Hemmung der Mineralisierung aufgrund ungünstigerer Bedingungen für die Humusdestruenten zurückzuführen.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II wird deutlich, dass insgesamt ein Rückgang des Stickstoffgehaltes sowie Stickstoffvorrates zu verzeichnen ist.

Hier handelt es sich um einen durchschnittlichen Rückgang von 0,2 Werteeinheiten. Demnach ist der Stickstoffgehalt der Humushorizonte zwischen den Jahren 1996 und 2009 als nur geringfügig rückläufig zu beschreiben. Ähnlich verhält es sich beim Stickstoffgehalt der Humusformen. Bei den Humusformen Mull, Kalkmoder und Moder nahmen die Werte innerhalb des L-Of-Horizontes sowie im Oh-Horizontes deutlich ab, wobei sich die Gehalte von Rohhumus nur sehr geringfügig veränderten. Betrachtet man den Stickstoffvorrat, so ist dieser innerhalb des Humuskörpers, speziell im Oh-Horizont um fast 50% zurückgegangen, wobei er sich innerhalb des L-Of-Horizontes nur wenig rückläufig veränderte. Auch innerhalb der Humusformen sind extreme Veränderungen zu beobachten. Somit ist bei Kalkmoder und Rohhumus ein Rückgang des N-Vorrates innerhalb der Humushorizonte festzustellen. Bei Moder fällt der deutliche Anstieg (ca. 50%) innerhalb des Oh-Horizontes auf. Im Zusammenhang einiger Baumarten stellten sich ebenfalls Abnahmen des N-Vorrates innerhalb des Humuskörpers ein. Bei den von Fichte und Kiefer dominierten Beständen kam es im L-Of-Horizont zum Rückgang der N-Vorräte, wobei die Buchen- und Eichenbestände einen Vorratszuwachs zu verzeichnen haben. Auch innerhalb des Oh-Horizontes nahm der N-Vorrat bei Eichenbeständen sowie der von Kieferbeständen stark zu. Rückläufige Vorratsentwicklungen liegen bei Fichten- und Buchenbeständen innerhalb des Oh-Horizontes vor.

Dieser Trend resultiert zum einen aus den verbesserten Nährstoffdargeboten (vgl. Kap. 3.3.2), aber auch aus den Rückgängen anthropogener N-Einträge seit ca. 1993.

Tabelle 37: Stickstoffgehalte [%] der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
L+Of	161	0,66	1,04	1,27	1,37	1,46	1,65	2,15
Oh	52	0,64	0,86	1,12	1,18	1,25	1,41	1,56

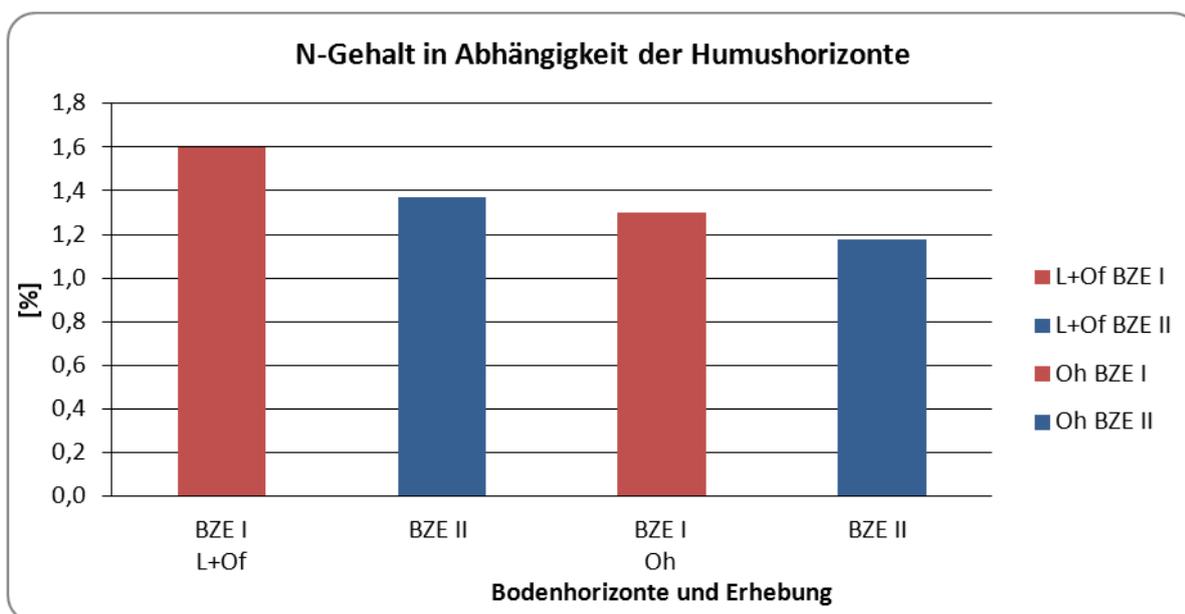


Abbildung 21: Entwicklung des Stickstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 38: Stickstoffgehalte [%] der Humusform (BZE II)

Horizonte	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	0,77	1,22	1,88				
MO	37	0,68	1,39	2,15	11	0,88	1,25	1,56
CMO	10	0,98	1,305	1,40	2	1,01	1,07	1,12
RO	79	0,66	1,46	2,04	39	0,64	1,15	1,50

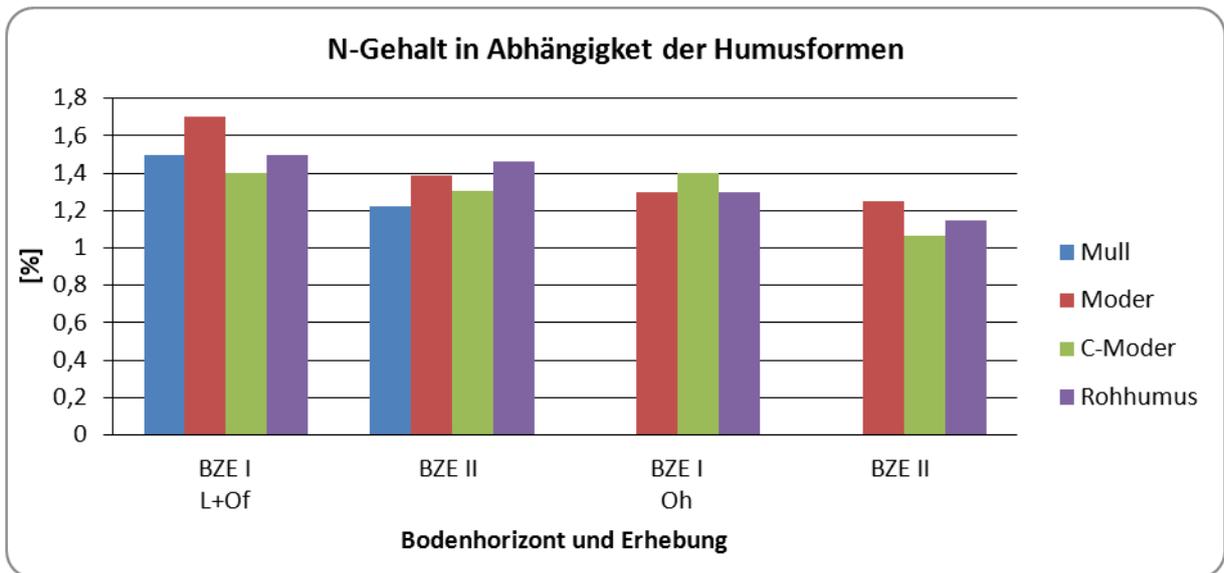


Abbildung 22: Entwicklung des Stickstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 39: Stickstoffvorräte [kg/ha] der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	22,7	105,88	209,35	355,39	612,22	848,68	2403,76
Oh	52	0,00	86,33	247,80	450,74	576,83	864,05	2046,31

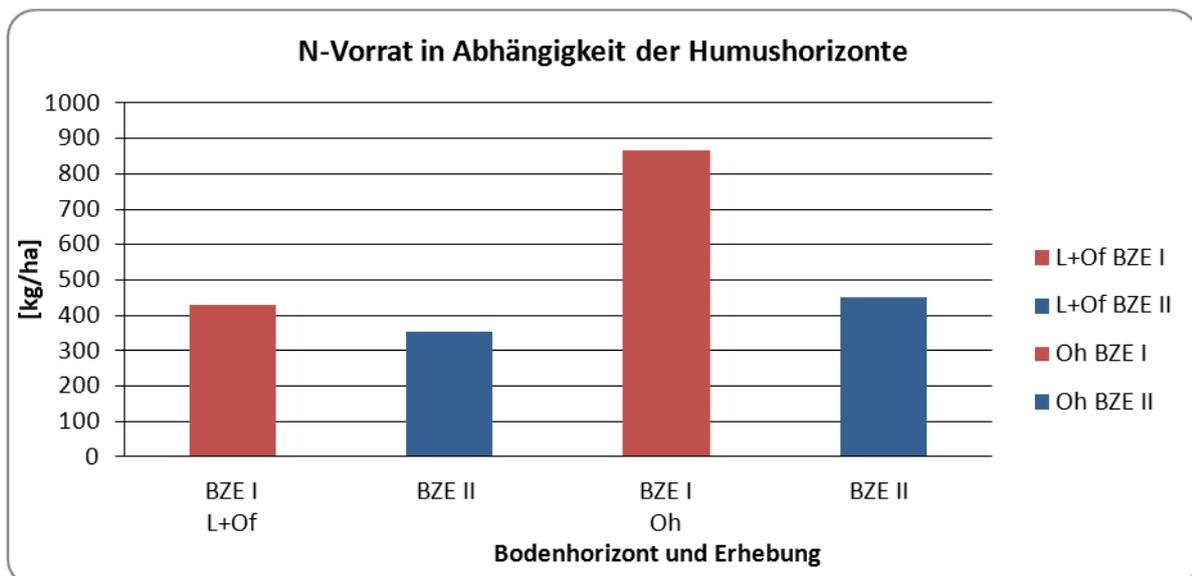


Abbildung 23: Entwicklung des Stickstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 40: Stickstoffvorräte [kg/ha] nach Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	47,86	153,07	619,94				
MO	39	25,11	256,39	982,08	11	371,02	673,40	1169,89
CMO	10	35,74	143,61	683,48	2	381,11	496,65	612,18
RO	81	22,70	412,04	1543,39	39	297,19	812,37	2403,76

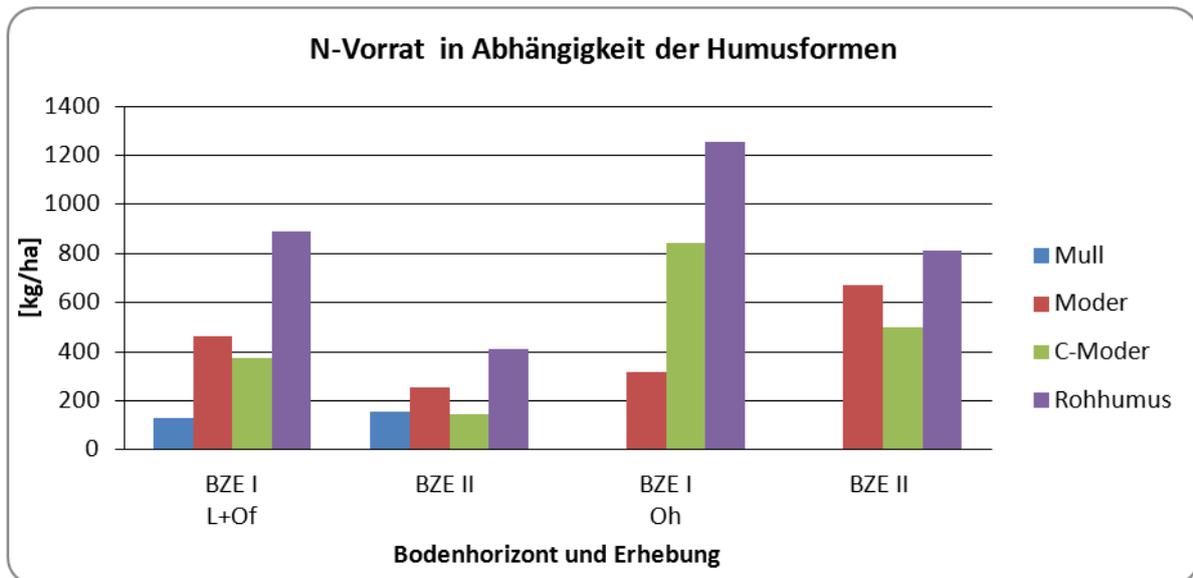


Abbildung 24: Entwicklung des Stickstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 41: Stickstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Baumart (BZE II)

Baumart	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
Fi	76	22,70	290,70	1543,39	34	297,19	811,10	2403,76
Ki	44	25,11	288,34	1430,84	14	98,19	715,54	1552,19
BU	24	32,50	233,44	864,86	3	43,82	295,17	650,51
Ei	9	49,68	250,54	450,46	1	848,10	848,10	848,10
Es	6	25,11	97,82	273,31				

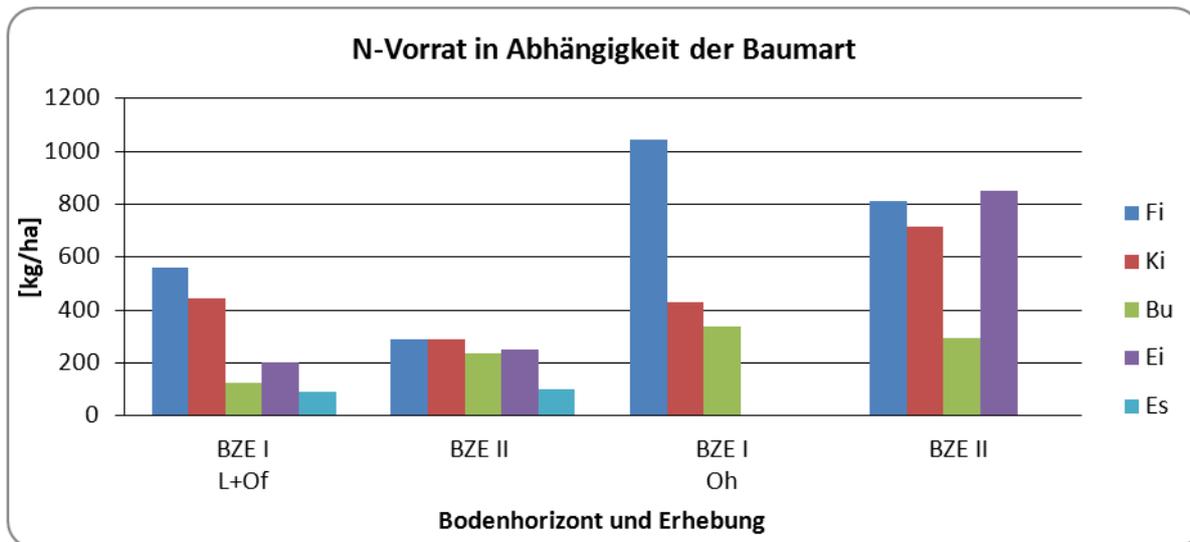


Abbildung 25: Entwicklung des Stickstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Baumart von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 42: Stickstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit von den Grundgesteinen (BZE II)

Grundgestein	L+Of			Oh				
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
<b>C</b>	<b>26</b>	44,62	218,90	1197,22	<b>7</b>	324,71	727,15	1169,89
<b>L</b>	<b>18</b>	23,22	252,15	828,45	<b>1</b>	612,18	612,18	612,18
<b>E</b>	<b>7</b>	32,50	210,87	1543,39	<b>2</b>	759,90	1047,95	1336,01
<b>S</b>	<b>42</b>	49,68	278,36	955,78	<b>8</b>	297,19	744,44	2046,31
<b>R</b>	<b>29</b>	35,74	321,80	973,54	<b>12</b>	304,53	964,92	1707,98
<b>F</b>	<b>43</b>	22,70	179,56	1430,84	<b>13</b>	533,47	800,32	2403,76

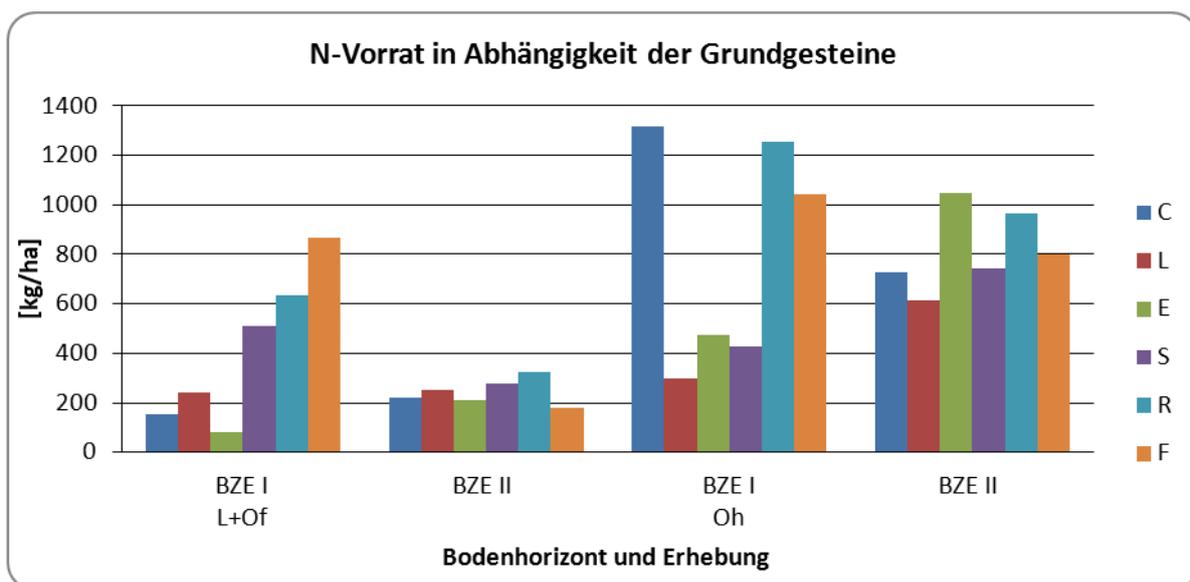


Abbildung 26: Entwicklung des Stickstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Grundgesteine von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.4 Phosphor – P

Phosphor ist wie Kohlenstoff und Stickstoff ein wichtiges Nährelement für Assimilations-, Reifungs- und Wachstumsprozesse von Pflanzen und wird bevorzugt aufgenommen. Da es nach WOLFF und RIECK (1996) in alkalischen Bereichen (Carbonatpuffer) zur Bildung von schwer löslichen Calciumphosphaten sowie in stark saurem Milieu ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 4$ ) zu schwer löslichen Aluminium- und Eisenphosphaten kommt, wird Phosphor meist bei mäßig sauren Verhältnissen ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  ca. 4-6) von Pflanzen aufgenommen. In diesem Bereich ist ein großer Anteil der Phosphate an Sesquioxide gebunden und stellt somit eine wesentliche Quelle des pflanzenverfügbaren Bodenphosphats dar.

Die Tabelle 43 bis 48 zeigen die Analyseergebnisse des Phosphorgehaltes und der Phosphorvorräte der Humusformen und Humushorizonte auf. Die Abbildungen 27 bis 32 stellen den direkten Vergleich zwischen BZE I und BZE II dar.

Tabelle 43: Phosphorgehalte [%] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
L+Of	161	0,001	0,010	0,021	0,029	0,037	0,060	0,200
Oh	52	0,003	0,008	0,025	0,036	0,043	0,068	0,160

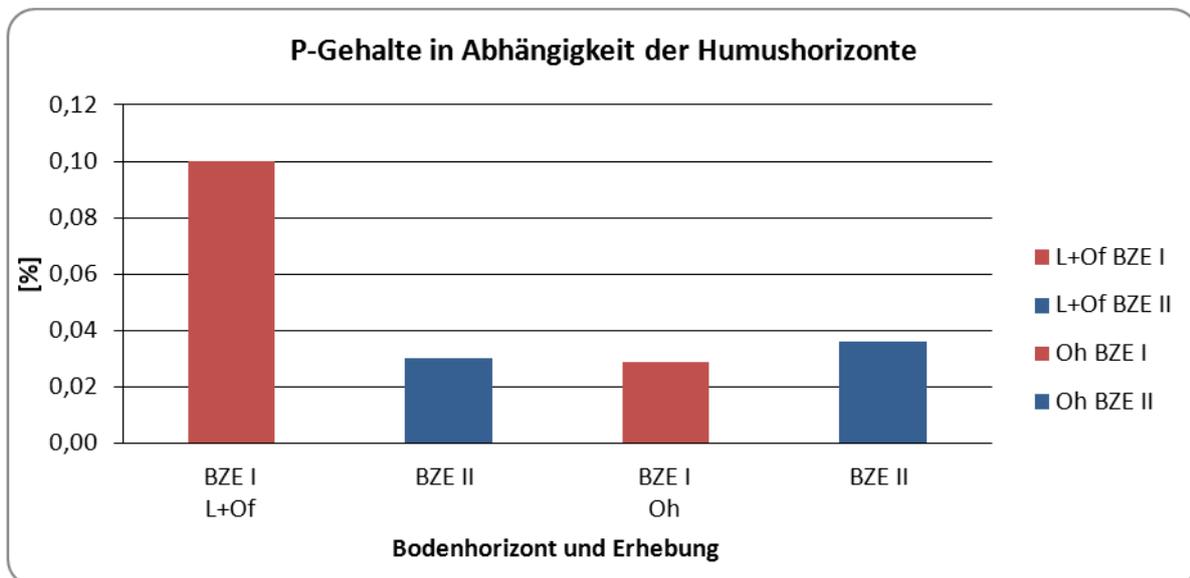


Abbildung 27: Entwicklung des Phosphorgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 44: Phosphorgehalte [%] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Horizonte	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
<b>MU</b>	<b>35</b>	0,009	0,060	0,200				
<b>MO</b>	<b>37</b>	0,004	0,024	0,110	<b>11</b>	0,024	0,056	0,084
<b>CMO</b>	<b>10</b>	0,006	0,021	0,074	<b>2</b>	0,024	0,027	0,029
<b>RO</b>	<b>79</b>	0,001	0,019	0,100	<b>39</b>	0,016	0,038	0,109

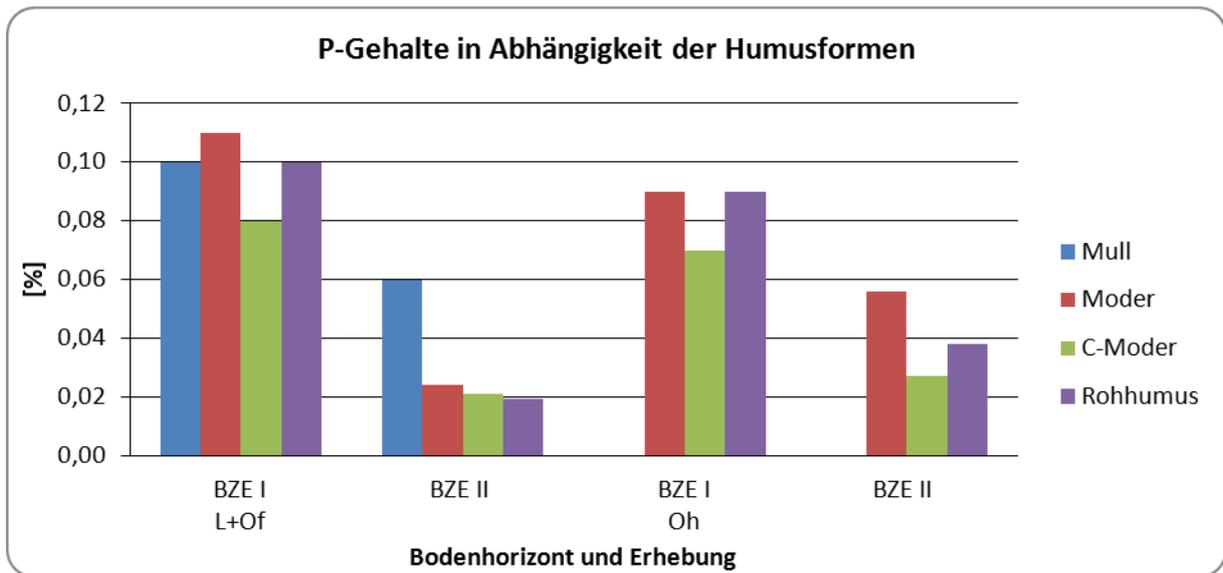


Abbildung 28: Entwicklung des Phosphorgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 45: Phosphorvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
<b>L+Of</b>	<b>165</b>	1,61	5,58	14,12	22,07	35,97	51,19	149,70
<b>Oh</b>	<b>52</b>	1,89	5,95	15,17	26,98	33,80	60,03	118,57

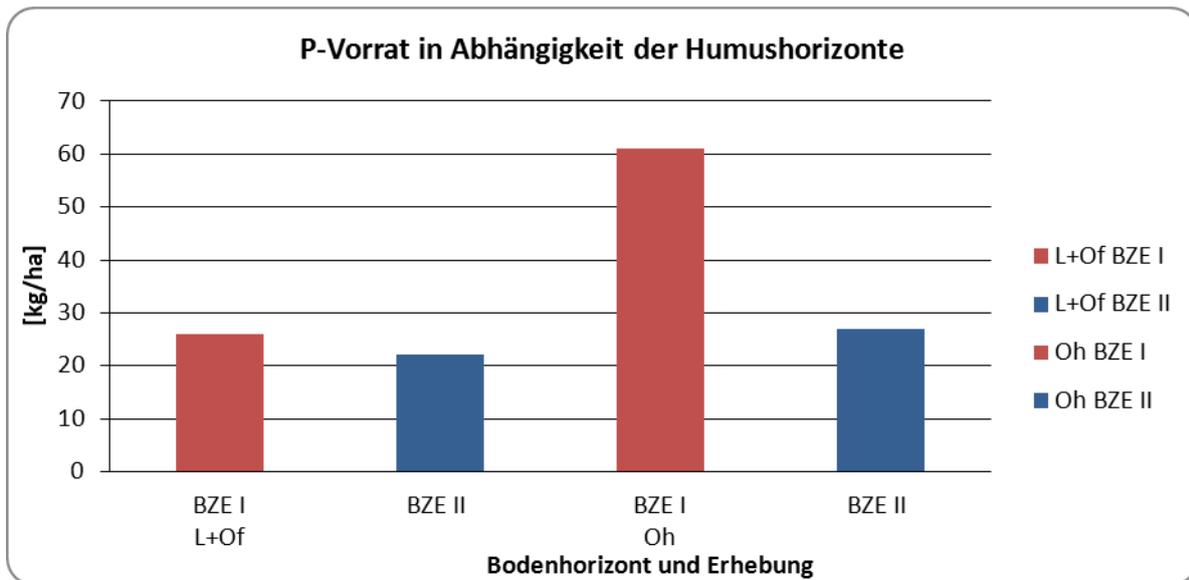


Abbildung 29: Entwicklung des Phosphorvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 46: Phosphorvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	2,43	11,26	32,61				
MO	39	1,89	15,39	57,72	11	19,45	54,22	65,74
CMO	10	1,86	5,76	24,51	2	19,30	22,88	26,47
RO	81	14,67	46,37	149,70	39	14,67	46,37	129,98

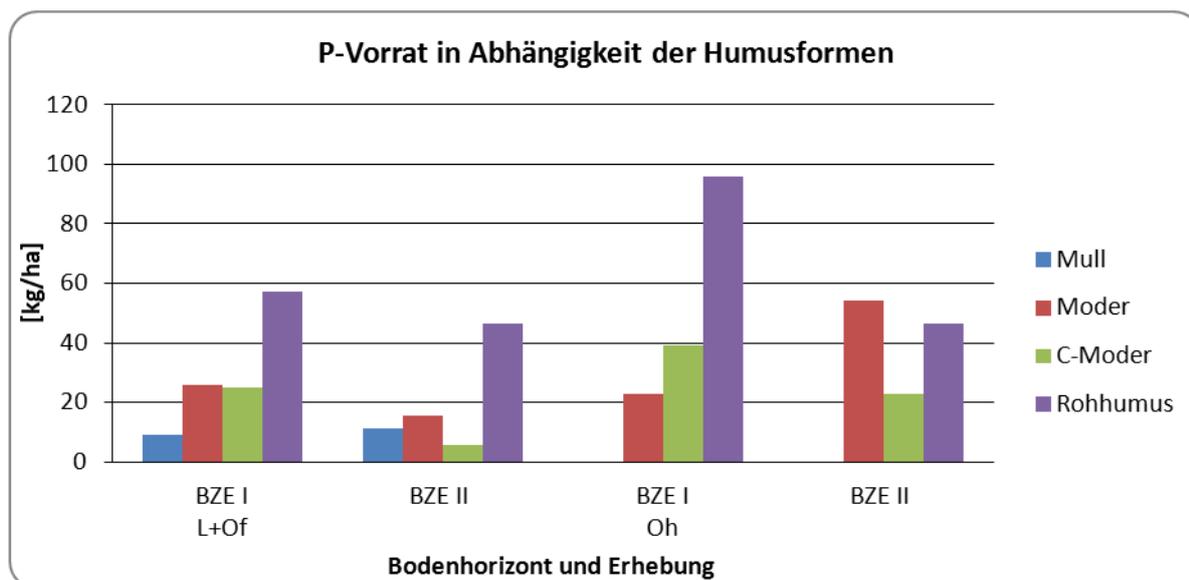


Abbildung 30: Entwicklung des Phosphorvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 47: Phosphorvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Baumarten (BZE II)

Baumart	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
Fi	76	1,61	20,73	149,70	34	14,67	47,65	129,98
Ki	44	1,86	17,51	86,75	14	7,40	38,19	94,74
BU	24	2,43	2,43	2,43	3	36,39	54,78	77,22
Ei	9	3,43	15,47	31,52	1	59,34	59,34	59,34
Es	6	1,89	9,97	18,00				

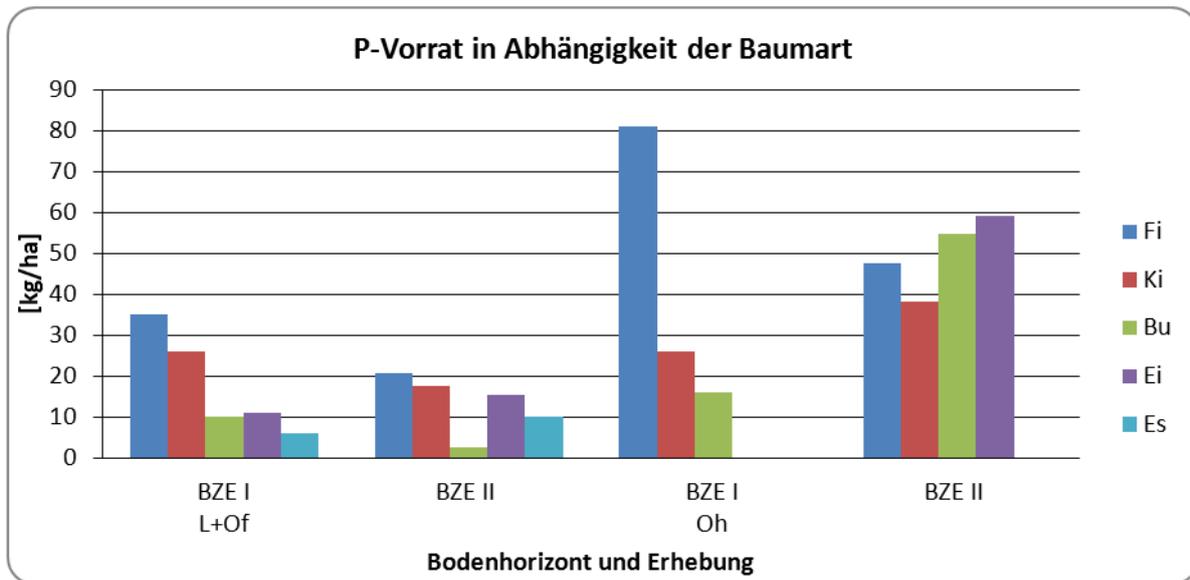


Abbildung 31: Entwicklung des Phosphorvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Baumart von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 48: Phosphorvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Baumarten (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	26	2,43	14,72	61,01	7	25,05	36,32	119,86
L	18	1,61	18,38	109,18	1	26,47	26,47	26,47
E	7	3,30	17,87	149,70	2	67,19	72,20	77,22
S	42	3,40	17,89	78,47	8	14,92	43,77	129,98
R	29	1,86	20,96	67,84	12	14,67	64,49	106,15
F	43	1,78	11,63	86,75	13	31,29	54,19	118,57

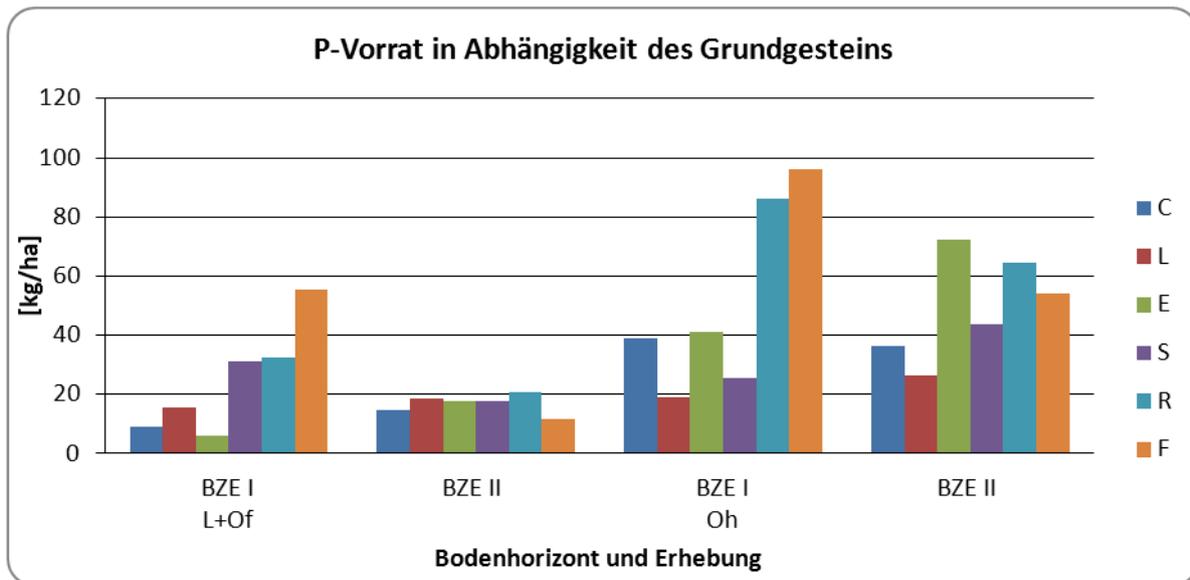


Abbildung 32: Entwicklung des Phosphorvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.5 C/N- und C/P-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis wird im Allgemeinen als Indikator für die biologische Aktivität sowie als Maßstab der Humusqualität herangezogen. Sind engere C/N-Verhältnisse in der Humusaufgabe vorhanden, so ist von günstigen Bedingungen für die Bioverfügbarkeit des Stickstoff auszugehen. Folglich sind auch höhere Mineralisationsraten mit engerem C/N-Verhältnis gegeben. Weiterhin überwiegt bei engen C/N-Verhältnissen meist der Huminsäureanteil in der organischen Auflage, so dass sich auch eine höhere Austauscherkapazität des Bodens einstellen kann. Demnach können mit C/N-Verhältnissen  $< 20$  günstige Zersetzungsbedingungen charakterisiert werden. Steigt das C/N-Verhältnis über 25, so ist dies Indiz für einen gehemmten Streuabbau, wodurch verstärkt Humus akkumuliert wird (Vgl. WOLFF und RIECK 1996).

Sinkt das C/N-Verhältnis jedoch unter einen bodenspezifischen Mindestwert (10-15 in Abhängigkeit von der Basensättigung), dann wird, bei günstigen Temperaturen und Feuchte, der gesamte N-Eintrag aus Streufall und anthropogenen Quellen im Humus mineralisiert. Eine Akkumulation kann nach Sättigung des Kationenaustauschers nicht mehr stattfinden, so dass es zu einem erhöhten Nitrataustrag mit dem Sickerwasser kommt. Damit verbunden ist immer auch ein erhöhter Austrag basischer Kationen, was zur Versauerung und zu Nährstoffungleichgewichten führen kann.

Die folgenden Tabelle 49 und 50 zeigen die Ergebnisse der C/N- Verhältnisse der Humusformen und Humushorizonte auf. Die Abbildung 33 stellt den direkten Vergleich zwischen BZE I und BZE II dar.

Tabelle 49: C/N-Verhältnis in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	Anzahl	Min	Med	Max
Mull	35	18,11	25,64	39,35
Moder	48	14,04	23,00	68,97
C-Moder	12	23,76	27,40	46,62
Rohhumus	118	16,75	26,23	72,68

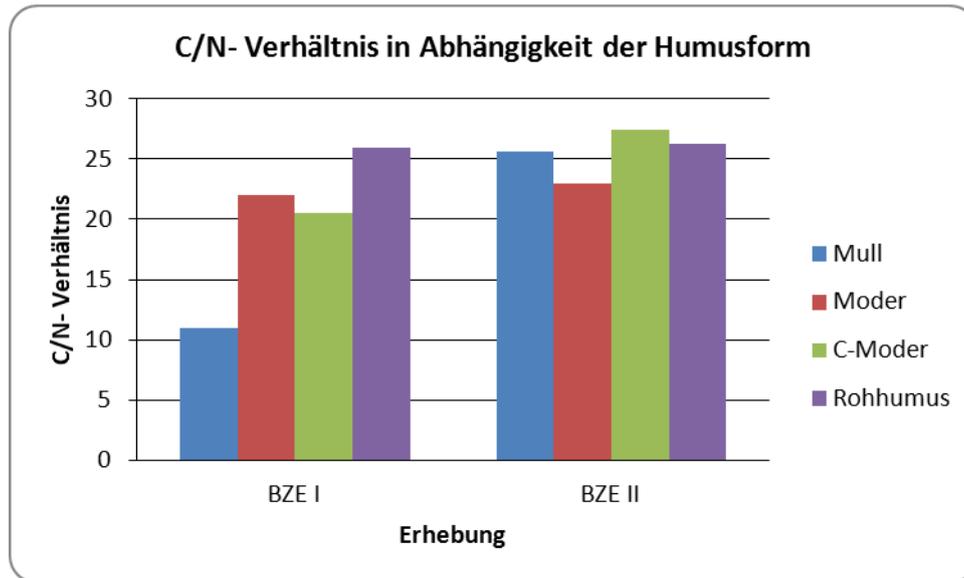


Abbildung 33: Entwicklung des C/N-Verhältnisses in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 50: Prozentualer Anteil der Humusformen an der C/N-Abstufung nach BKA (BZE II)

Humusform	Humusqualität:				
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	C/N-Verhältnis:				
	>26	25-21	20-16	15-10	<10
Mull	45,71%	31,43%	22,86%		
Moder	33,33%	39,58%	22,92%	4,17%	
C-Moder	66,67%	33,33%			
Rohhumus	50,85%	33,90%	14,41%		

Die Erhöhung der C/N-Verhältnisse resultiert aus den abnehmenden N-Einträgen aus anthropogenen Quellen. Durch die zunehmenden C/N-Verhältnisse hat sich die Gefahr übermäßiger Nitratanreicherung im Grundwasser bei gleichzeitiger Versauerung verringert. Der starke Anstieg des C/N-Median bei Mull und Kalkmoder ist auf den Anteil von Nadelholzbeständen auf basenreichen (z.T. kalkreichen) Böden

zurück zu führen. Bei nachlassenden N-Einträgen aus der Luft überwiegt nunmehr auf diesen Standorten der Einfluss des sehr hohen C/N-Verhältnisses in der Nadelstreu von 40 (Fichte) bis 115 (Lärche) (SCHACHTSCHABEL et al. 1998). Insgesamt hat diese Entwicklung zur Stabilisierung der Wälder und zur Regenerierung naturnaher Standortverhältnisse beigetragen.

### 3.3.6 Calcium – Ca

Calcium ist als basisch wirkendes Kation bedeutend für die Puffereigenschaften bzw. Azidität des Bodens. Als ein Nährelement für Pflanzen ist Calcium ein wichtiger Inhaltsstoff der organischen Humusaufgabe. Die Relation zwischen der im Mineralboden und Humusaufgabe verfügbaren Calciumgehalte und -vorräte kann zur Ermittlung einer möglichen Nährstoffentkopplung herangezogen werden. Kommt es aufgrund von pH-Wertabsenkungen (Bodenversauerung) zu einer reduzierten biologischen Aktivität, sind Humusakkumulationen in der organischen Auflage die Folge, welche zur Entkopplung der Nährstoffkreisläufe und somit ebenfalls zur Anreicherung von Nährelementen in der Humusaufgabe führen. Demnach können sich auch Nährstoffengpässe mit zunehmender Versauerungsproblematik einstellen. Somit kann die Relation zwischen den in der Humusaufgabe und Mineralboden verfügbaren Ca-Gehalte als Parameter für den Grad dieser Entkopplung dienen (Vgl. WOLFF und RIECK 1997).

Die Tabellen 51 bis 52 zeigen die Ergebnisse der Calciumvorräte und Calciumgehalte der Humusformen und Humushorizonte auf. Die Abbildung 34 bis 35 stellen den direkten Vergleich zwischen BZE I und BZE II dar.

Die Ergebnisse bzgl. des Calciumgehaltes lassen erkennen, dass innerhalb des Humuskörpers der L-Of-Horizont mit durchschnittlich 6130 mg/kg einen deutlich höheren Ca-Gehalt als der Oh-Horizont (4805 mg/kg TS) aufweist. Beim Vergleich der verschiedenen Humusformen weisen Mull und Kalkmoder den höchsten Calciumgehalt gegenüber Moder und Rohhumus auf. Hier tritt die Humusform des Kalkmoders (Median L-Of-Horizont = 12900 mg/kg TS, Oh-Horizont = 21805 mg/kg TS) besonders hervor. Der Ca-Gehalt innerhalb des L-Of-Horizontes fällt von Moder zu Rohhumus ab, wobei er in dem Oh-Horizont ansteigt. Betrachtet man die Ergebnisse in Abhängigkeit geologischer Verhältnisse so zeigt sich, dass der Calciumgehalt der Humusaufgabe wesentlich durch das anliegende Grundgestein beeinflusst wird. Somit werden die höheren Ca-Gehalte bei basischen und nährstoffreichen Grundgesteinen (C, L, E) und eher niedrige Gehalte bei schwer verwitterbaren silikatischen und nährstoffärmeren Grundgesteinen (R, F, S) angetroffen.

Weiterhin zeigte sich, dass ebenfalls der Kalkmoder das höchste Reservoir an Calcium in der Humusaufgabe aufweist. Mit einem Ca-Vorrat von insgesamt ca. 330

kg/ha schneidet die Humusform Moder gegenüber Rohhumus und Mull besser ab. Die geringen Vorräte bei Mull sind auf die geringen Auflagemengen zurückzuführen.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II, so fällt auf, dass der Calciumgehalt in Abhängigkeit der Humushorizonte zwar im L-Of-Horizont rückläufig ist, dafür aber im Oh-Horizont anstieg. Bei der Betrachtung der Humusformen tritt ebenfalls der bei den Humushorizonten festgestellte Sachverhalt auf. Innerhalb des L-Of-Horizontes ist lediglich bei Mull ein deutlicher rückläufiger Trend zu erkennen. Im Moder stieg der Ca-Gehalt in allen Horizonten an, was auf die vorrangige Kalkung dieser Standorte zurückzuführen ist. Alle übrigen Humusformen erfuhren in dem L+Of-Horizont keine wesentlichen Veränderungen. Bei den Humusformen Moder, Kalkmoder und Rohhumus sind hingegen im Oh-Horizont deutliche Anstiege des Ca-Gehaltes nachweisbar. Auch im Vergleich der Grundgesteine ist der Calciumgehalt zwischen den Jahren 1996 und 2009 im L-Of-Horizont im Allgemeinen rückläufig, während im Oh-Horizont steigende Tendenzen vorhanden sind.

Der Vergleich der Calciumvorräte zeigte, dass es innerhalb der L-Of-Humusschicht zu keinen auffälligen, wohl aber im Oh-Horizont zu deutlichen Veränderungen gekommen ist. Demnach weist der Oh-Horizont bei Kalkmoder einen deutlichen Rückgang auf. Für die Dekompostierung der sauren Nadelstreu an diesen Standorten besteht ein so hoher Basenbedarf, dass die Ca-Vorräte von den Destruenten angebraucht werden. Bei Moder trat ein deutlicher Anstieg des Ca-Vorrates infolge von Kalkungsmaßnahmen und nachlassenden Einträgen versauernder Schwefel- und Stickstoffeinträge auf.

Tabelle 51: Calciumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	280,00	2163,00	4306,00	6130,00	8768,0	13540,00	95400,00
Oh	52	630,00	1332,00	3020,00	4805,00	5636,50	11270,00	51800,00

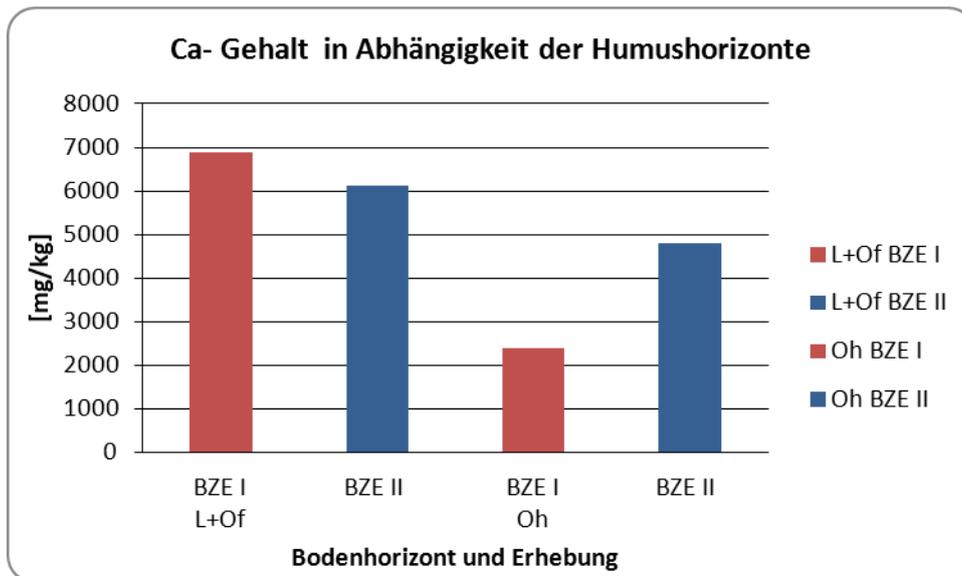


Abbildung 34: Entwicklung des Calciumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 52: Calciumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	1190	8350	35100				
MO	39	870	6710	95400	11	880	3390	51800
CMO	10	5230	12900	79300	2	2510	21805	41100
RO	81	280	4430	91800	39	630	5010	36200

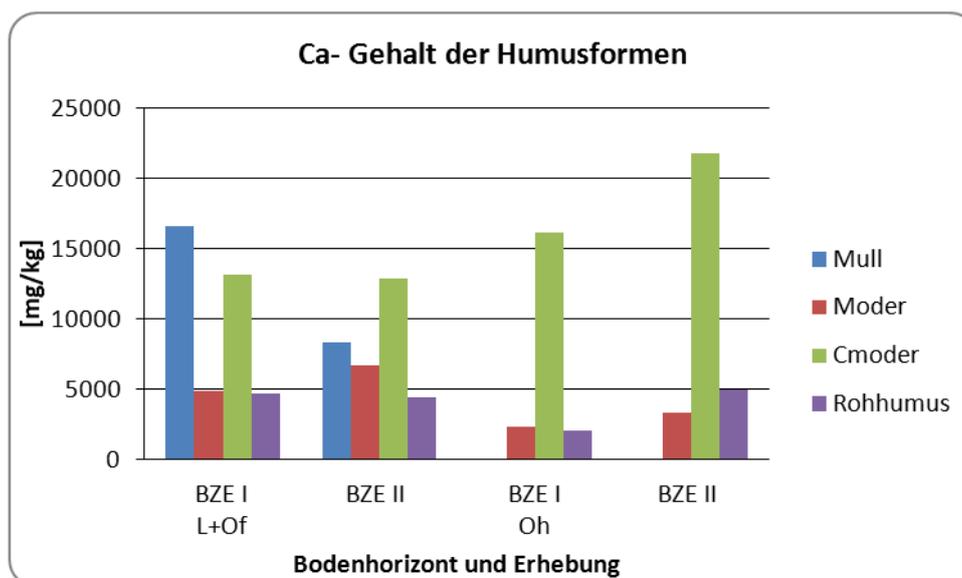


Abbildung 35: Entwicklung des Calciumgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 53: Calciumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	1190	7520	79300	2	21808		
L	19	2630	8660	23900				
E	8	4080	7595	13300				
S	43	690	5600	91800	16	1280	3365	15000
R	28	580	2875	95400	13	710	5150	51800
F	38	280	4680	73400	21	630	4240	36200

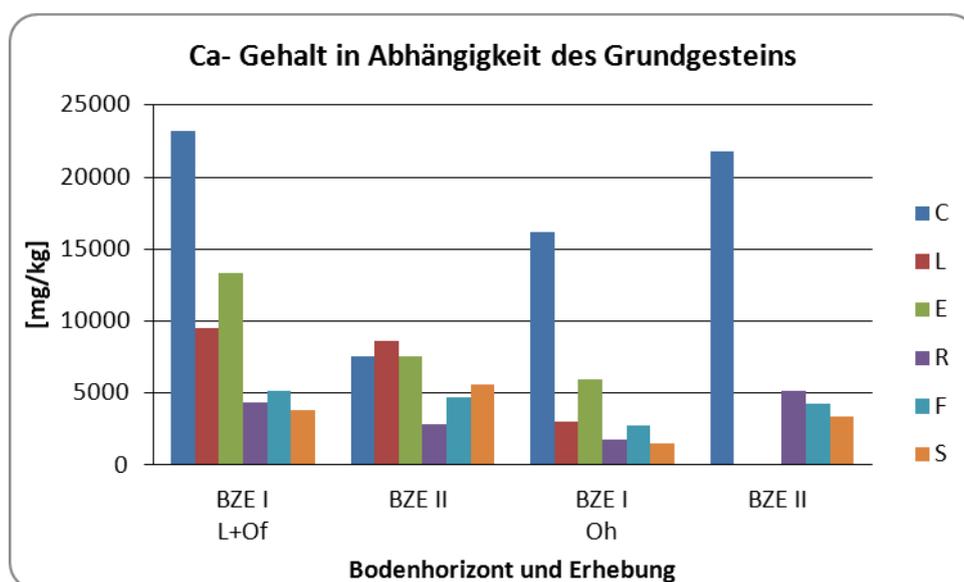


Abbildung 36: Entwicklung des Calciumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 54: Calciumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	19,47	119,70	1222,88				
MO	39	7,82	169,73	7460,28	11	2,74	165,74	3416,73
CMO	10	60,94	298,94	4426,53	2	133,28	717,46	1301,64
RO	81	4,43	124,89	5461,18	39	3,50	154,58	2075,71

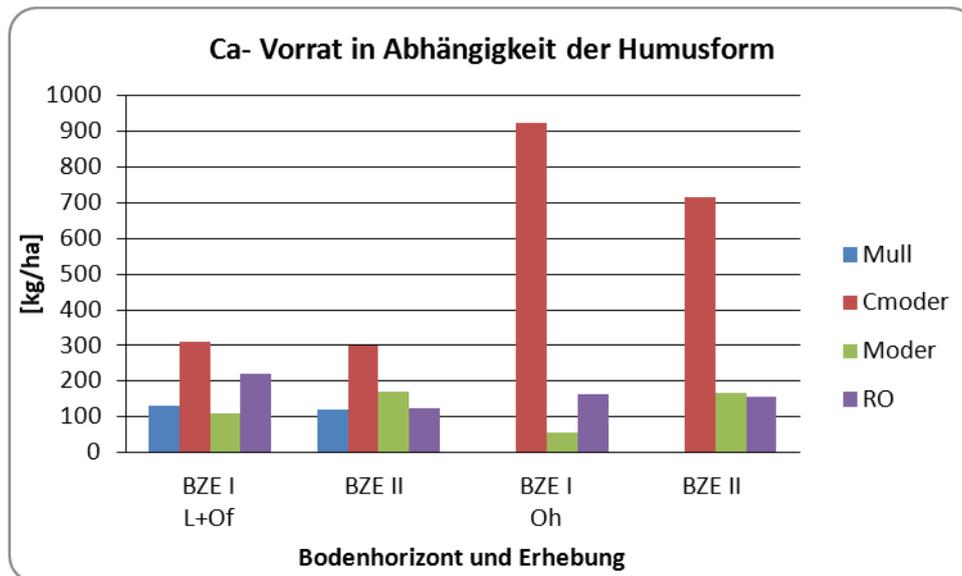


Abbildung 37: Entwicklung des Calciumvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.7 Magnesium – Mg

Magnesium ist wie Calcium ein basisch wirkendes Kation und wird als Nährelement ebenfalls von der Pflanze aufgenommen. Da es wie Calcium die Puffereigenschaften bzw. Bodenazidität des Bodens beeinflusst, ist es ebenfalls als ein wichtiger Inhaltsstoff der organischen Humusaufgabe anzusehen.

Die Tabelle 55 bis 56 zeigen die BZE-II-Ergebnisse der Magnesiumvorräte und Magnesiumgehalte der Humusformen und Humushorizonte auf. Die Abbildungen 38 bis 39 stellen den direkten Vergleich zwischen BZE I und BZE II her. Die Ergebnisse bzgl. des Magnesiumgehaltes lassen erkennen, dass innerhalb des Humuskörpers im Wesentlichen keine Unterschiede zwischen dem L-Of-Horizont und dem Oh-Horizont bestehen. Beim Vergleich der verschiedenen Humusformen weisen Mull und Kalkmoder den höchsten Magnesiumgehalt vor Moder und Rohhumus auf. Auch hier ist die Humusform des Kalkmoders (Median L-Of-Horizont = 2035 mg/kg TS, Oh-Horizont = 2155 mg/kg TS) besonders dominierend. Der Mg-Gehalt innerhalb des L-Of-Horizontes fällt von Moder zu Rohhumus ab, wobei er im Oh-Horizont ansteigt.

Betrachtet man die Ergebnisse des Magnesiumgehaltes und -vorrates in Abhängigkeit geologischer Verhältnisse und der Humusform, so zeigen sich Parallelen zu den bereits beschriebenen Ergebnissen von Calcium. Demnach werden die höheren Mg-Gehalte bei basischen und nährstoffreichen Grundgesteinen (C, L, E) und eher niedrige Gehalte bei silikatischen und nährstoffärmeren Grundgesteinen (R, F, S) angetroffen. Auch den größten Mg-Vorrat weist hier die Humusform Kalkmoder auf. Die Humusformen Moder und Rohhumus besitzen im Durchschnitt mit insgesamt ca. 70 kg/ha einen vergleichbaren Mg-Vorrat. Die

geringen Vorräte bei Mull sind womöglich auch auf die geringen Auflagemengen zurückzuführen.

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II zeigt sich, dass der Magnesiumgehalt der Humushorizonte im Durchschnitt anstieg. Bei der Betrachtung der Humusformen Kalkmoder, Moder und Rohhumus sind ebenfalls Zunahmen innerhalb des L-Of-Horizontes feststellbar. Lediglich bei Mull ist ein leicht rückläufiger Trend zu erkennen. Neben den gleich bleibenden bis ansteigenden Mg-Gehalten von Moder und Rohhumus ist bei Kalkmoder ein Rückgang innerhalb des Oh-Horizontes zu verzeichnen. In Abhängigkeit des Grundgesteins erfahren die silikatischen und nährstoffärmeren Gesteine Zuwächse, wobei dies bei dem alkalischen Karbonat-Gestein („C“) nicht zu beobachten ist.

Mit der Gegenüberstellung der Magnesiumvorräte kann verdeutlicht werden, dass es bei der Kalkmoder-Form im Allgemeinen zu einem Abfall der Vorräte gekommen ist. Im Gegensatz dazu verzeichnet die Humusform Moder leichte und die Humusform Mull fehlende Zuwächse. Der Mg-Vorrat von Rohhumus ist innerhalb des L-Of-Horizontes als gleichbleibend und bei dem Oh-Horizont als abfallend zu charakterisieren. Die Gründe für diese Trends sind die gleichen wie bei den Trends der Calcium-Gehalte und –Vorräte (Kap. 3.3.6).

Tabelle 55: Magnesiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	220	556	914	1210	1792	2864	8600
Oh	52	270	520	785	1145	1422	2597	4380

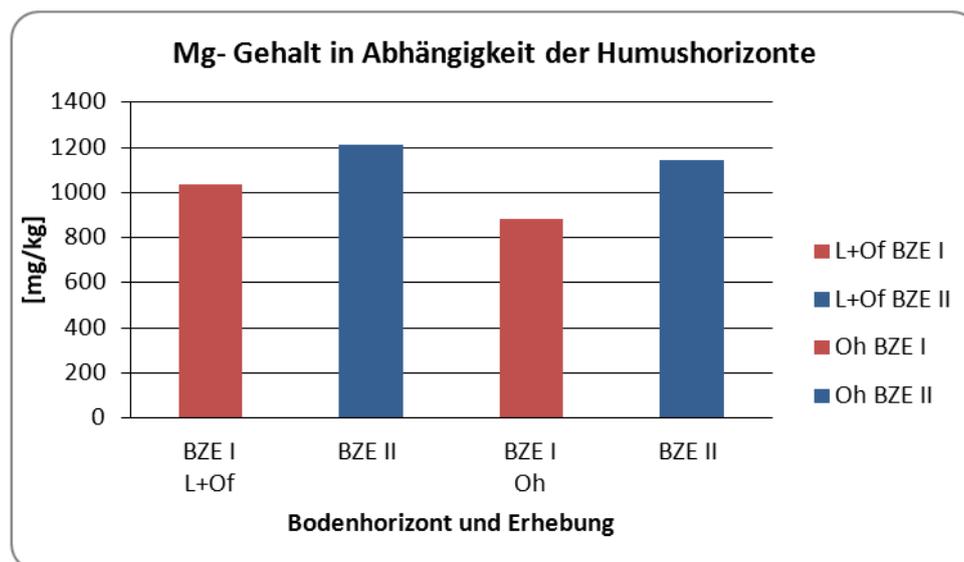


Abbildung 38: Entwicklung des Magnesiumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 56: Magnesiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	480	1520	8400				
MO	39	430	1280	7040	11	450	830	4150
CMO	10	640	2035	8600	2	1410	2155	2900
RO	81	220	1020	6030	39	1100	270	4380

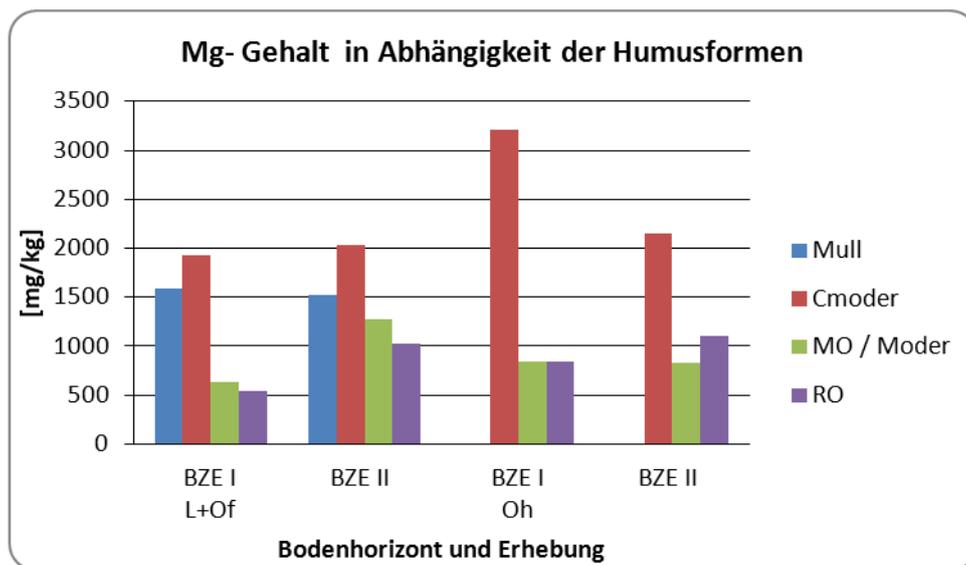


Abbildung 39: Entwicklung des Magnesiumgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 57: Magnesiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	480	1800	8600	2			
L	19	430	1380	4230				
E	8	800	1260	8400				
S	43	300	810	6030	16	270	710	3630
R	28	280	1120	7040	13	280	1290	2930
F	38	220	1385	4670	21	480	1510	4380

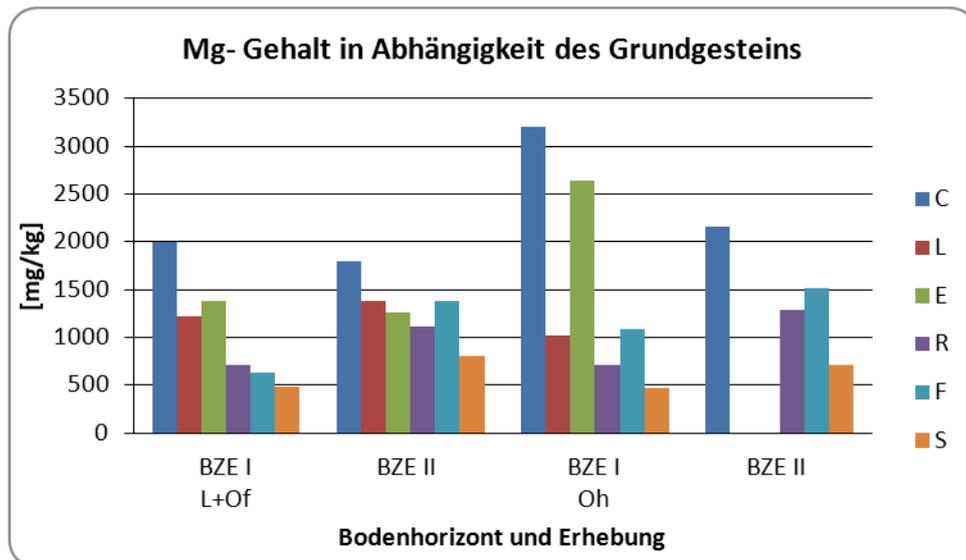


Abbildung 40: Entwicklung des Magnesiumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 58: Magnesiumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	3,28	21,92	275,24				
MO	39	4,27	33,33	299,06	11	4,04	37,16	369,27
CMO	10	5,54	40,75	480,05	2	74,87	83,36	91,84
RO	81	1,29	37,58	643,58	39	2,14	32,78	335,45

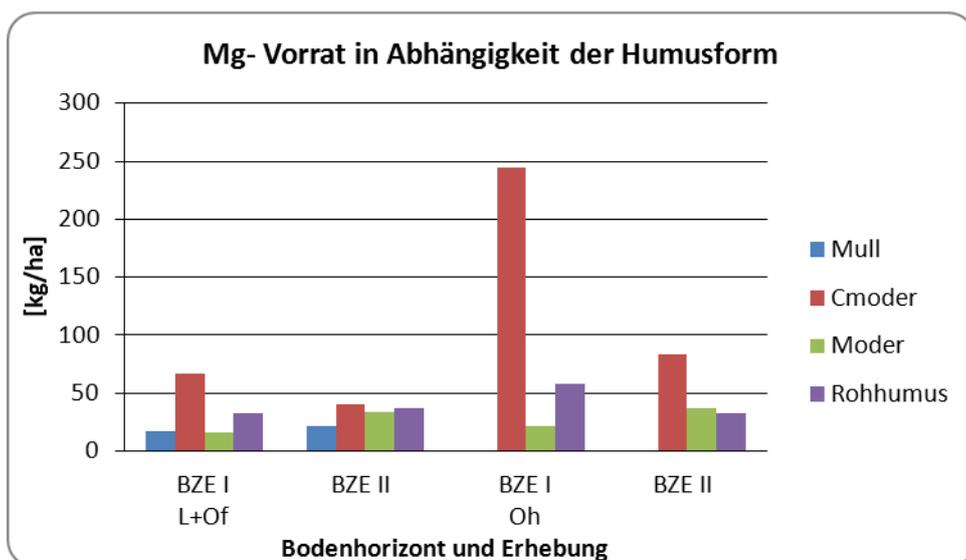


Abbildung 41: Entwicklung des Magnesiumvorrats [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.8 Kalium – K

Die Tabellen 59 bis 60 repräsentieren die Ergebnisse der BZE II hinsichtlich der Kaliumvorräte und Kaliumgehalte der Humusformen und Humushorizonte. Die Abbildungen 42 bis 43 stellen Trends von BZE I zu BZE II dar.

Die Ergebnisse der Analyse des Kaliumgehaltes zeigen, dass innerhalb des Humuskörpers Unterschiede zwischen dem L-Of-Horizont und dem Oh-Horizont bestehen. Demnach weisen die Humusformen Mull und Kalkmoder den höchsten Kaliumgehalt vor Moder und Rohhumus auf. Auch hier ist die Humusform des Kalkmoders (Median L-Of-Horizont = 2050 mg/kg TS, Oh-Horizont = 2300 mg/kg TS) besonders dominierend. Der K-Gehalt innerhalb des L-Of-Horizontes fällt von Moder zu Rohhumus ab, wobei er im Oh-Horizont ansteigt. Der Einfluss des Grundgesteins ist beim Kaliumgehalt entscheidend. Demnach werden die höheren K-Gehalte bei basischen und nährstoffreichen Grundgesteinen (C, L, E) und eher niedrige Gehalte bei silikatischen und nährstoffärmeren Grundgesteinen (R, F, S) angetroffen. Auch bei Vergleichen des K-Vorrates in bezug auf die Humusform ist der Kalkmoder dominierend. Die Humusformen Moder und Rohhumus weisen die niedrigsten Kaliumvorräte auf. Die geringen Vorräte bei Mull sind womöglich auch auf die geringen Auflagemengen zurückzuführen.

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II zeigt sich, dass der Magnesiumgehalt der Humushorizonte anstieg. Bei der Betrachtung der Humusformen Kalkmoder und Rohhumus sind ebenfalls Zunahmen offenkundig. Auch die Humusform Moder verzeichnet einen Anstieg innerhalb des L-Of-Horizontes, wobei im Oh-Horizont ein Rückgang deutlich wird. Lediglich bei Mull ist ein rückläufiger Trend zu erkennen. In Abhängigkeit des Grundgesteins erfahren die silikatischen und nährstoffärmeren Gesteine Zuwächse, wobei dies bei alkalischen Gesteinen (C und L) nicht zu beobachten ist. Dies ist darin begründet, dass vorrangig auf den Standorten basenärmerer Grundgesteine kaliumhaltige Dünger ausgebracht wurden. Mit der Gegenüberstellung der Magnesiumvorräte kann verdeutlicht werden, dass es bei den Humusformen Kalkmoder und Rohhumus im Allgemeinen zu einem Abfall der Vorräte gekommen ist. Im Gegensatz dazu verzeichnet die Humusform Moder leichte Zuwächse. Die Vorräte von Mull haben sich nicht verändert.

Tabelle 59: Kaliumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	260,0	750,0	940,0	1130,0	1410,0	2282,0	6060,0
Oh	52	470,0	720,0	800,0	910,0	1209,5	1791,0	5620,0

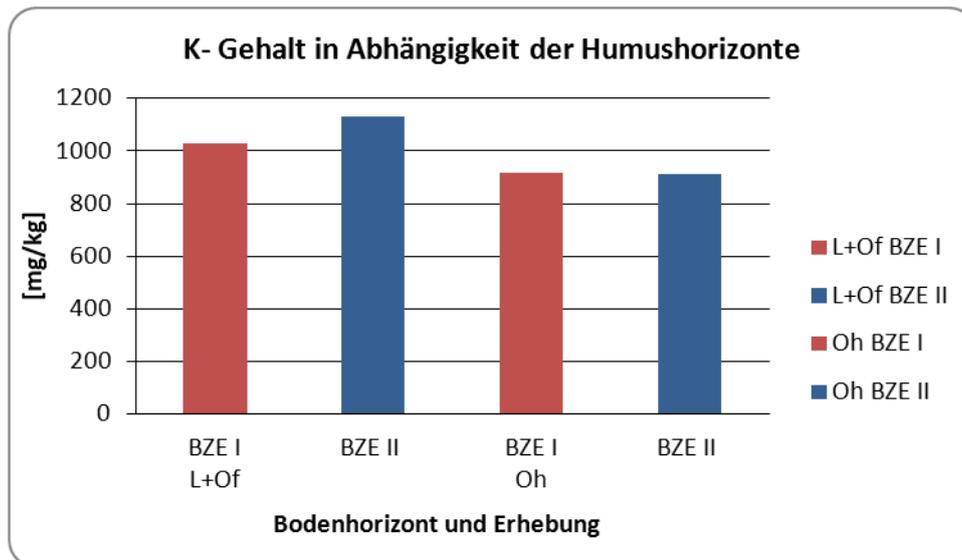


Abbildung 42: Entwicklung des Kaliumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 60: Kaliumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	490	1520	3870				
MO	39	280	2230	6060	11	480	770	3440
CMO	10	820	2050	4830	2	720	2300	3880
RO	81	260	950	4030	39	470	1060	5620

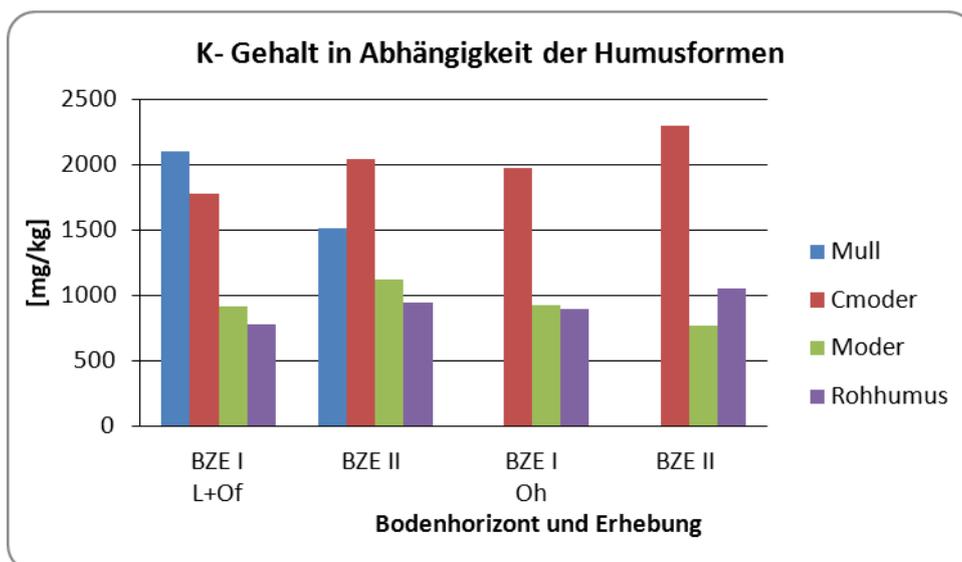


Abbildung 43: Entwicklung des Kaliumgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 61: Kaliumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	770	1410	4830	2	720	2300	3880
L	19	380	1410	4230				
E	8	820	1630	1820				
S	43	550	1080	6060	16	470	805	1740
R	28	40	955	2860	13	620	1320	3440
F	38	260	1005	2780	21	480	920	5620

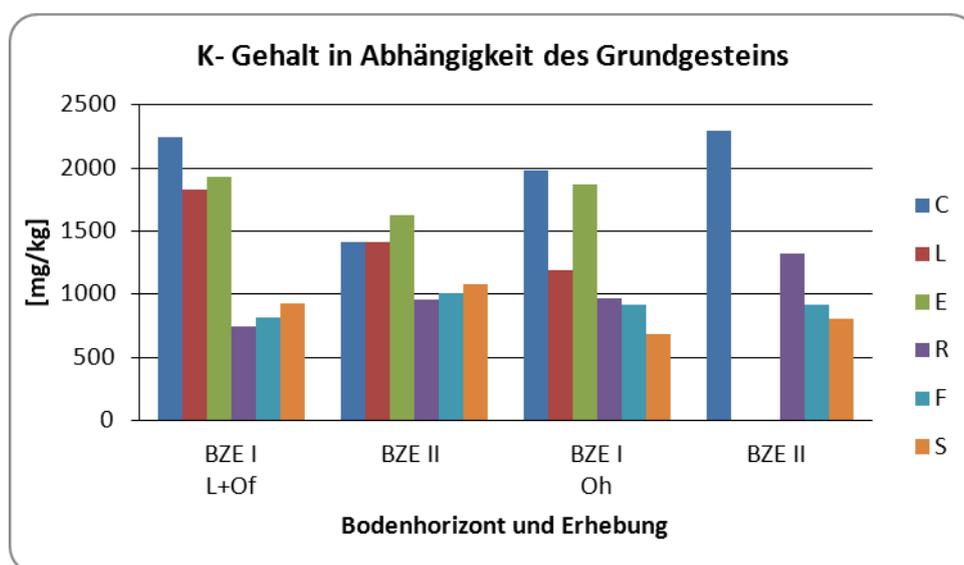


Abbildung 44: Entwicklung des Kaliumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 62: Kaliumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	5,08	19,93	134,83				
MO	39	2,41	29,67	272,52	11	3,20	41,22	226,90
CMO	10	7,79	21,59	269,61	2	38,23	80,56	122,88
RO	81	1,29	35,36	430,12	39	3,31	43,27	322,25

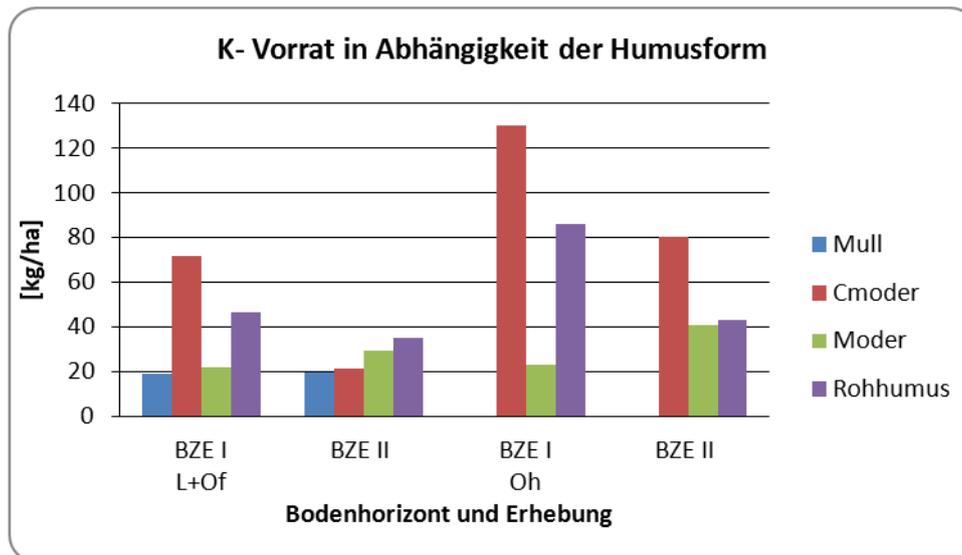


Abbildung 45: Entwicklung des Kaliumvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.9 Eisen – Fe

Die Analysen des Eisengehaltes (vgl. Tab.62 bis 63) zeigen, dass innerhalb des Humuskörpers der L-Of-Horizont einen durchschnittlich höheren Fe-Gehalt als der Oh-Horizont besitzt. Die Humusformen Mull und Moder weisen im L-Of-Horizont den höchsten Eisengehalt auf, wobei er bei Kalkmoder und Rohhumus als gleich hoch anzusehen ist. Insgesamt weist der Rohhumus die niedrigsten Fe-Gehalte auf. Mit einem Gehalt von über 12000 mg/kg stellt die Humusform Kalkmoder das größte Eisenvorkommen innerhalb des Oh-Horizontes.

In Abhängigkeit des Grundgesteins kommen bei den mit Buntsandstein geprägten Standorten die niedrigsten Eisengehalte im Humuskörper vor. Alle basischen und nährstoffreichen Grundgesteine (C, L, E) sowie Schiefer (F) weisen deutlich höhere Werte auf. Bei den Vergleichen des Fe-Vorrates fällt die Humusform Kalkmoder mit einem durchschnittlichen Vorrat von ca. 538 kg/ha besonders auf. Mit nur insgesamt 79 kg/ha besitzt die Humusform Mull die geringsten Fe-Vorräte.

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.46 bis 47) zeigt sich, dass der Eisengehalt innerhalb der L-Of-Horizonte anstieg, aber bei den Oh-Horizonten merklich abfiel. Ähnlich verhält es sich mit den Fe-Gehalten bei den verschiedenen Humusformen. Demnach erfahren Rohhumus, Moder und Mull Zunahmen des Fe-Gehaltes innerhalb des L-Of-Horizontes, wobei er bei Kalkmoder abfällt. Der Fe-Gehalt ist im Oh-Horizont bei jeder Humusform, außer bei Kalkmoder, abnehmend. In Abhängigkeit des Grundgesteins verzeichnen Standorte mit basischen und nährstoffreichen Gesteinen (C und E) Vorratszuwächse. Obwohl auch die silikatischen und nährstoffärmeren Gesteine Zuwächse verzeichnen können, beschränken sich diese auf den L-Of-Horizont. Der Eintrag versauernder Schwefel-

und Stickstoffverbindungen aus anthropogenen Quellen haben vor der BZE I zu einem Absinken der pH-Werte auf fast allen Waldstandorten Thüringens geführt. Damit einher ging eine erhöhte Freisetzungsrates von Eisen aus den mineralischen Bodenkolloiden. Durch Aufnahme in die Vegetation und anschließendem Streufall gelangten die erhöhten Mengen an Eisenverbindungen schließlich in den L-Horizont des Humuskomplexes. Hier bilden sie durch Reaktion mit organischen Säuren metallorganische Komplexe, insbesondere, wie in Kap. 3.3.6 aufgezeigt, bei Anwesenheit nunmehr wieder erhöhter Mengen von Calcium. Diese Komplexe sind nicht wanderungsfähig und reichern sich deshalb immer weiter in der oberen Humusschicht an.

Mit der Gegenüberstellung der Eisenvorräte kann verdeutlicht werden, dass es bei den Humusformen Kalkmoder und Rohhumus im Allgemeinen zu einem Abfall der Vorräte gekommen ist. Im Gegensatz dazu verzeichnet die Humusform Mull und Moder leichte Zuwächse.

Tabelle 63: Eisengehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	490,0	1512,0	3234,0	4890,0	7724,0	12780,0	30200,0
Oh	52	380,0	1595,0	3515,5	5585,0	8588,0	13850,0	24500,0

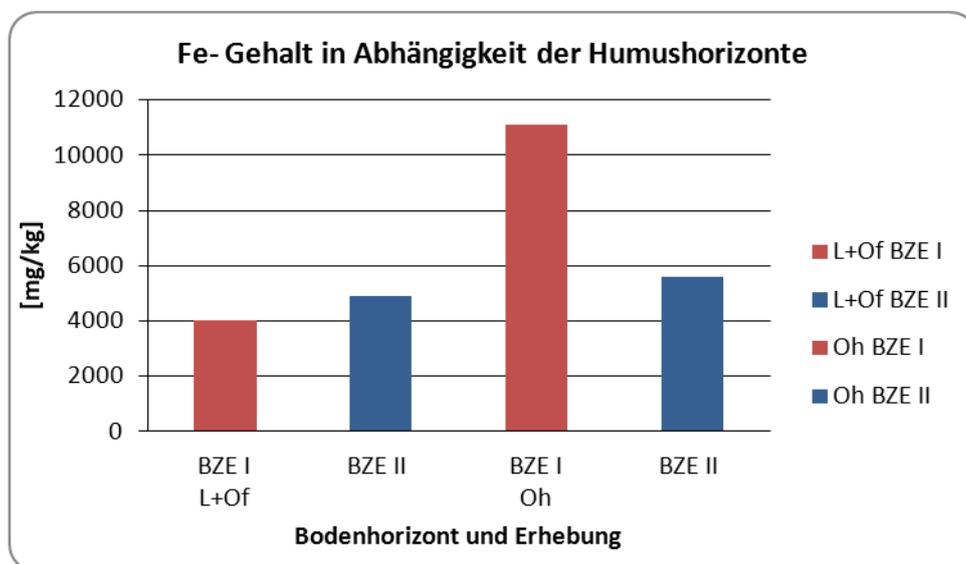


Abbildung 46: Entwicklung des Eisengehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 64: Eisengehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	660	6980	30200				
MO	39	740	5500	27500	11	570	5910	19800
CMO	10	810	4485	8580	2	10000	12250	14500
RO	81	490	4390	28600	39	380	4890	24500

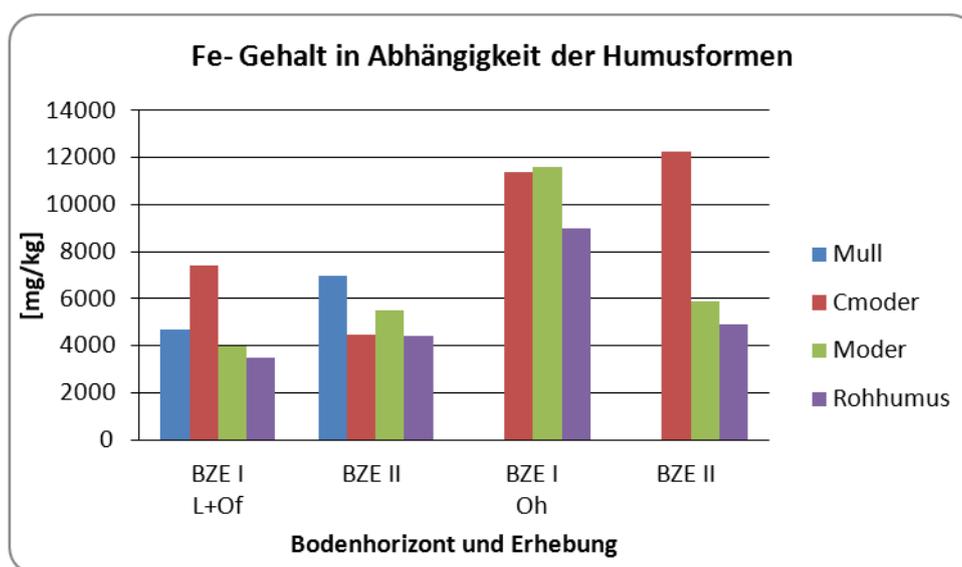


Abbildung 47: Entwicklung des Eisengehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 65: Eisengehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	690	5480	19600	2	10000	12250	14500
L	19	700	4520	27500				
E	8	820	10095	30200				
S	43	490	3910	21800	16	710	4750	13300
R	28	750	6685	26700	13	380	2680	16500
F	38	840	5140	28600	21	720	6540	24500

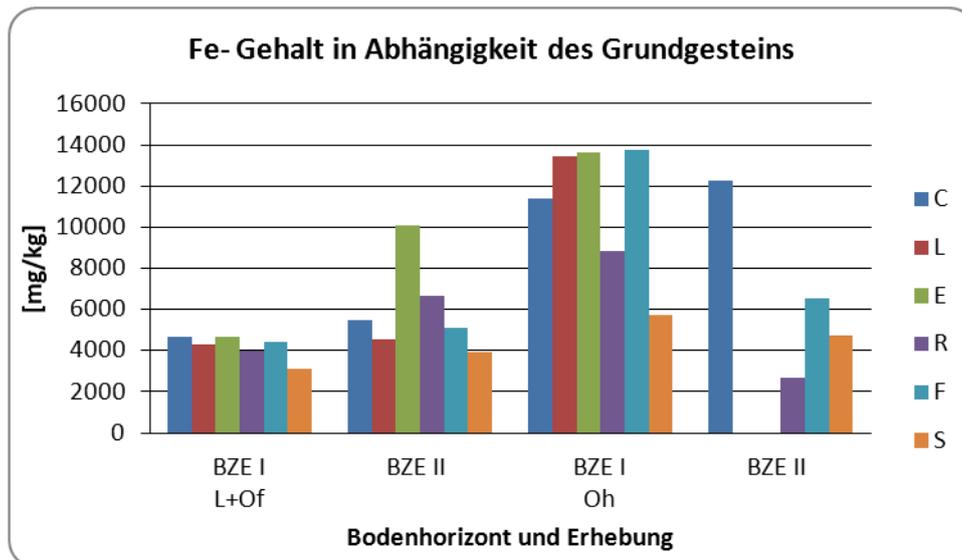


Abbildung 48: Entwicklung des Eisengehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 66: Eisenvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	3,07	79,57	667,55				
MO	39	8,23	140,84	2029,43	11	6,31	250,08	1761,80
CMO	10	3,28	43,71	431,91	2	489,22	495,11	531,00
RO	81	2,09	160,65	2221,93	39	1,96	216,89	1975,17

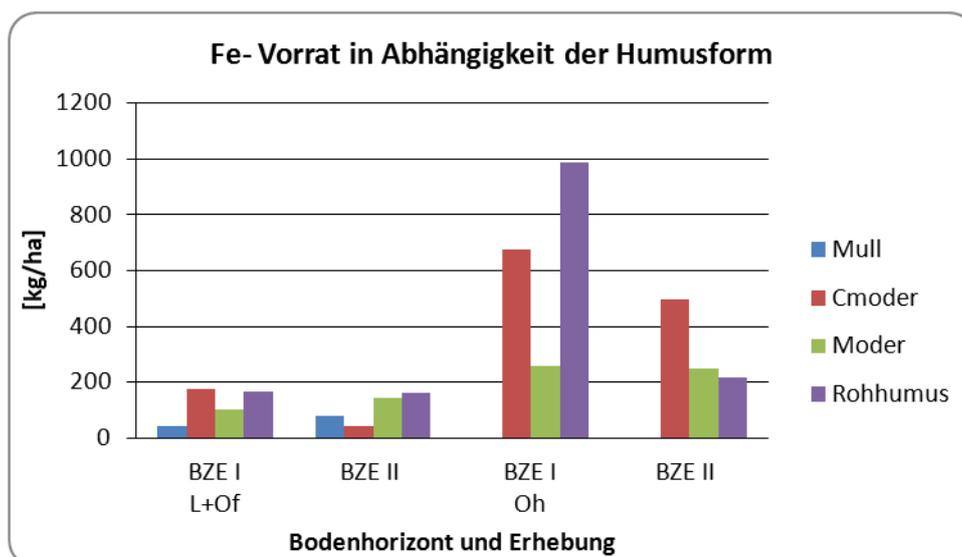


Abbildung 49: Entwicklung des Eisenvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.10 Aluminium – Al

Die Aluminiumgehalte (vgl. Tab.67 bis 68) zeigen durchschnittlich einen gleichen Al-Gehalt innerhalb der Horizontenabfolge. Insgesamt weist der Mull den niedrigsten Al-Gehalt (ca. 4060 mg/kg TS), gefolgt von Rohhumus (ca. 6020 mg/kg TS) auf. Mit einem Gehalt von über 15000 mg/kg stellt die Humusform Kalkmoder das größte Aluminiumvorkommen. Diese Werte resultieren aber nur aus 2 Probepunkten, weshalb die Statistik für den Kalkmoder unsicher ist.

In Abhängigkeit des Grundgesteins kommen bei den aus Schiefer entstandenen Böden die höchsten Aluminiumgehalte im Humuskörper vor (8860 mg/kg), gefolgt von Rotliegendem (5225 mg/kg) und Buntsandstein (5005 mg/kg). Alle basischen und nährstoffreichen Grundgesteine (C, L, E) weisen deutlich niedrigere Werte auf (3710-4370 mg/kg), wobei die beiden C-Standorte mit Nadelholz und Kalkmoder aus der Statistik ausgeschlossen wurden, da hier der Einfluss der sauren Nadelstreu den Einfluss des basischen Grundgesteins überlagert. Bei den Vergleichen des Al-Vorrates ist deshalb auch die Humusform Kalkmoder mit einem durchschnittlichen Vorrat von ca. 473 kg/ha dominierend. Mit insgesamt nur 62 kg/ha besitzt die Humusform Mull die geringsten Al-Vorräte.

Im Vergleich von BZE I und BZE II (vgl. Abb.50 bis 51) zeigt sich, dass der Aluminiumgehalt innerhalb der L-Of-Horizonte etwas anstieg und bei den Oh-Horizonten merklich abfiel. Betrachtet man die verschiedenen Humusformen so ist festzustellen, dass Mull einen nahezu gleichbleibenden Al-Gehalt aufweist. Rohhumus und Moder verzeichneten leichte Zuwächse innerhalb des L-Of-Horizontes, wobei der Al-Gehalt innerhalb des Oh-Horizontes abnahm. Umgekehrt verhält es sich mit der Humusform Kalkmoder. Hier sind ein deutlicher Rückgang (ca. um 40 %) im L-Of- Horizont und ein leichter Anstieg im Oh-Horizont festzustellen.

In Abhängigkeit des Grundgesteins sind bei allen Standorten, außer bei der von Kalkstein (C), Zunahmen des Al-Gehaltes in den ersten beiden Humushorizonten (L und Of) sowie Abnahmen innerhalb des Oh-Horizontes gegeben.

Mit der Gegenüberstellung der Humusformen hinsichtlich der Aluminiumvorräte zeigt sich, dass es bei den Humusformen Kalkmoder und Rohhumus im Allgemeinen zu einem Abfall der Vorräte gekommen ist. Bei Moder kann die Al-Vorratssituation als weitestgehend gleichbleibend beschrieben werden. Im Gegensatz dazu verzeichnet die Humusform Mull leichte Zuwächse.

Eine Erhöhung der Aluminiumgehalte ist i. d. R. die Folge von abnehmenden pH-Werten. Wird durch Versauerung der Austausch-, Aluminium- oder Aluminium-Eisen-Puffer wirksam, geht Al aus der Festphase des Mineralbodens in die Lösung über, wird von den Pflanzenwurzeln aufgenommen und gelangt über den Streufall in die Humusschicht. Der Trend zeigt die nachlassende Wirkung der durchgeführten Kalkungen auf den sorptionsschwächeren Böden in den letzten Jahren.

Tabelle 67: Aluminiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	440,0	1092,0	2250,0	3330,0	5420,0	8942,0	20200,0
Oh	52	380,0	1105,5	2203,0	3545,0	5125,0	7773,0	16600,0

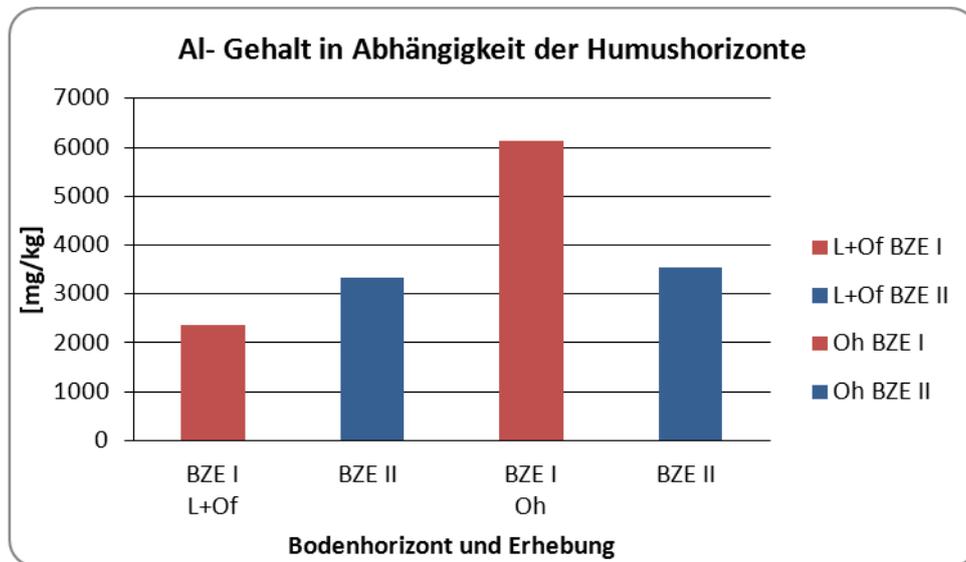


Abbildung 50: Entwicklung des Aluminiumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 68: Aluminiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	440	4060	16100				
MO	39	670	3950	20200	11	450	3250	13700
CMO	10	960	3810	9590	2	6450	11278	16100
RO	81	450	2530	16900	39	380	3490	16600

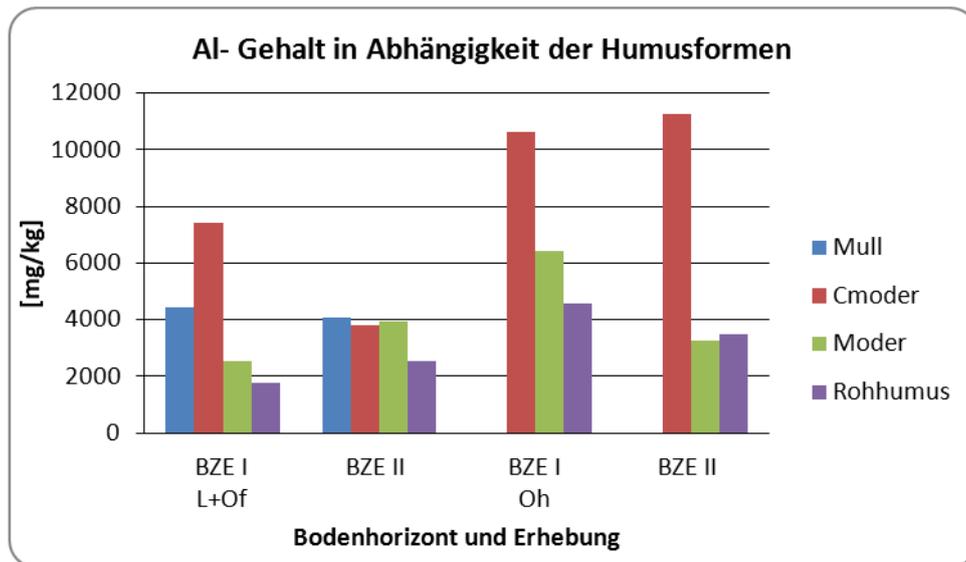


Abbildung 51: Entwicklung des Aluminiumgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 69: Aluminiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	580	4370	16100	2	6450	11275	16100
L	19	440	3710	14100				
E	8	790	4315	16100				
S	43	500	2320	20200	16	580	2685	8020
R	28	450	3305	14200	13	380	1920	13700
F	38	800	3650	13300	21	450	5210	16600

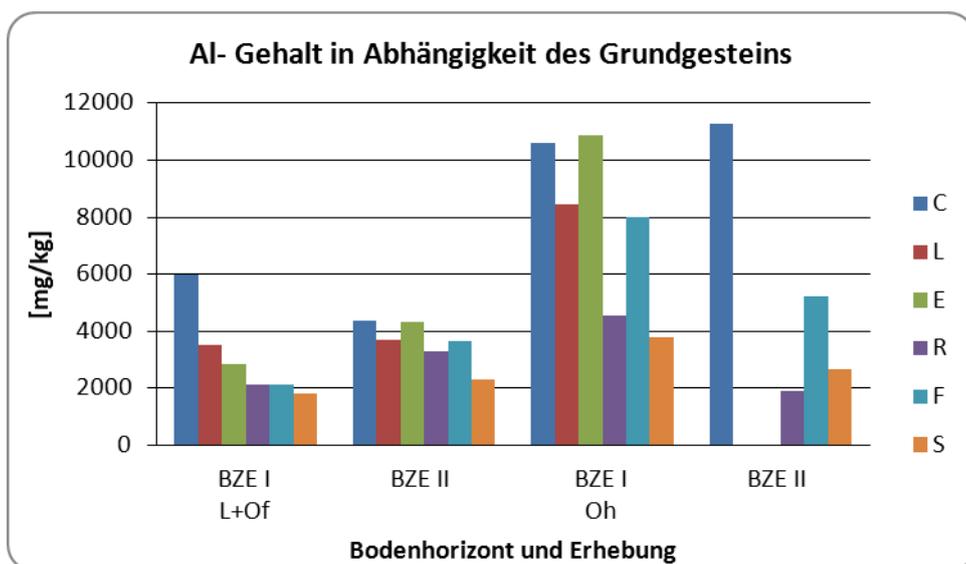


Abbildung 52: Entwicklung des Aluminiumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 70: Aluminiumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	1,85	62,40	296,79				
MO	39	7,16	92,63	1017,09	11	4,98	131,51	1005,47
CMO	10	3,43	46,64	423,67	2	342,50	426,19	509,89
RO	81	2,43	99,69	1226,88	39	1,96	131,09	1397,39

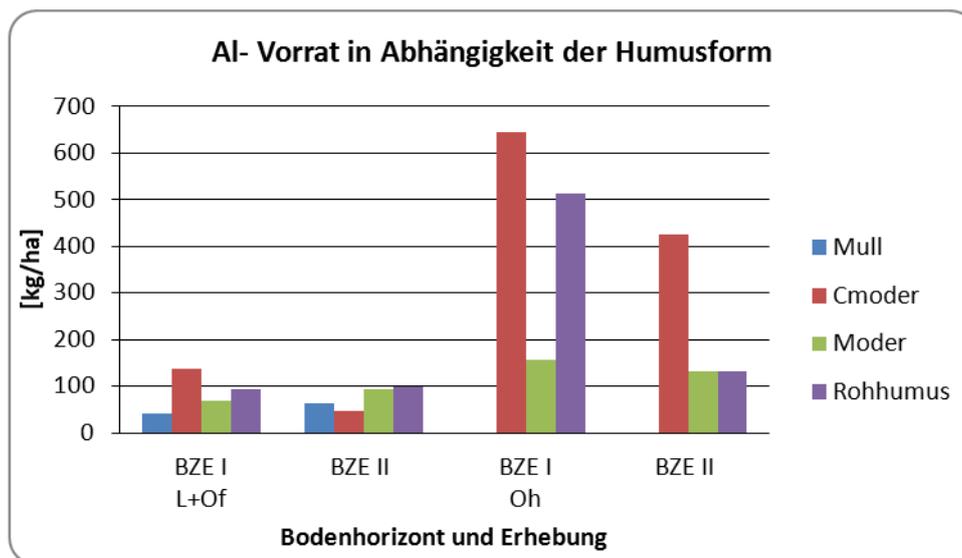


Abbildung 53: Entwicklung des Aluminiumvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.11 Mangan – Mn

Die Analysen des Mangangehaltes (vgl. Tab.70 bis 71) zeigen, dass der Humuskörper durchschnittlich einen höheren Mn-Gehalt innerhalb des L-Of-Horizontes als im Oh-Horizont besitzt. Die Humusformen Mull und Moder weisen im L-Of-Horizont den höchsten Mangangehalt auf, wobei Kalkmoder die geringsten Mn-Wert innerhalb des L-Of- und Oh-Horizont aufweist. Somit zeigt der Kalkmoder auch insgesamt den niedrigsten Mn-Gehalt (ca. 435 mg/kg TS). Mit einem Gehalt von über 1180 mg/kg stellt die Humusform Mull den größten Mn-Gehalt innerhalb des Humuskörpers.

In Abhängigkeit des Grundgesteins kommen bei dem silikatischen nährstoffarmen Grundgestein Buntsandstein (S) mit ca. 971 mg/kg TS sowie carbonatischen und nährstoffreichen Grundgestein Kalkstein (C) mit nur 546 mg/kg TS die niedrigsten Werte vor. Deutlich höhere Werte sind bei den eutrophen und silikatischen Grundgesteinen (E) mit durchschnittlich 2186 mg/kg TS gegeben.

Bei den Vergleichen des Mn-Vorrates ist die Humusform Moder mit einem durchschnittlichen Vorrat von ca. 35 kg/ha dominierend. Mit nur insgesamt ca. 13 kg/ha besitzt die Humusform Mull die geringsten Mn-Vorräte, wobei Kalkmoder mit ca. 14 kg/ha einen ähnlich niedrigen Wert aufweist.

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.54 bis 55) zeigt sich, dass der Mangengehalt innerhalb der Humushorizonte anstieg. Ähnlich verhält es sich mit den Mn-Gehalten der Humusformen. Demnach erfahren alle betrachteten Humusformen (Mull, Moder, Kalkmoder und Rohhumus) Zunahmen innerhalb des gesamten Humuskörpers. In Abhängigkeit des Grundgesteins verzeichnen alle Standorte, außer von Schlufflehm (L), einen Anstieg des Mn-Gehaltes. Aufgrund fehlender Daten können keine genaueren Angaben für eutrophe Silikatgesteine getroffen werden. Mit der Gegenüberstellung der Manganvorräte kann verdeutlicht werden, dass es bei den Humusformen Mull und Moder im Allgemeinen zu einem Anstieg der Vorräte gekommen ist. Im Gegensatz dazu verzeichnen die Humusformen Kalk- Moder und Rohhumus insgesamt einen leichten Rückgang.

Tabelle 71: Mangangehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	22,60	201,80	371,40	595,00	1035,00	1974,80	7058,00
Oh	52	53,00	113,85	256,40	349,00	560,55	1421,80	3234,00

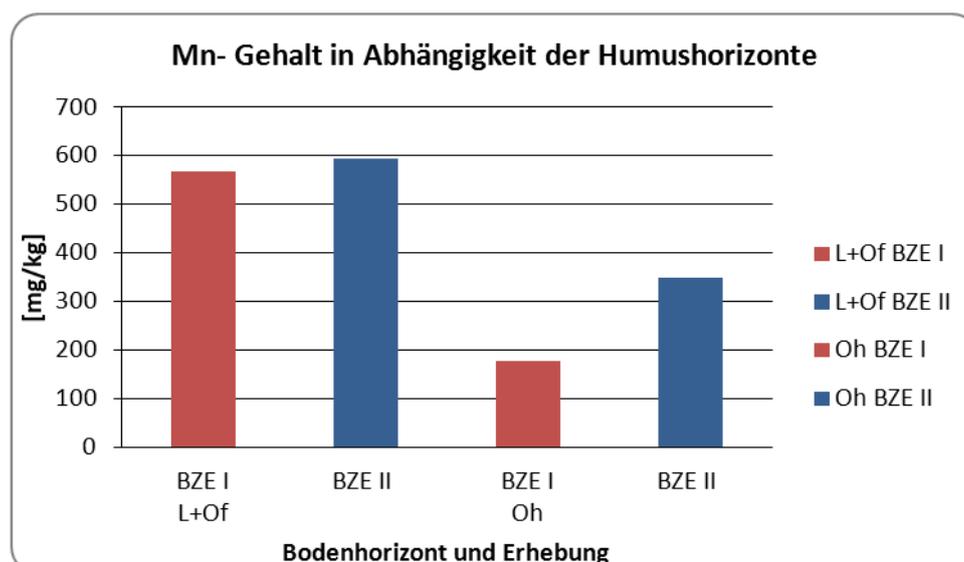


Abbildung 54: Entwicklung des Mangangehaltes [mg/kg] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 72: Mangangehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	108,00	1187,00	7058,00				
MO	39	90,90	752,00	2970,00	11	134,00	351,00	2050,00
CMO	10	86,10	243,00	959,00	2	68,00	192,00	316,00
RO	81	22,60	437,00	6915,00	39	53,00	395,00	3234,00

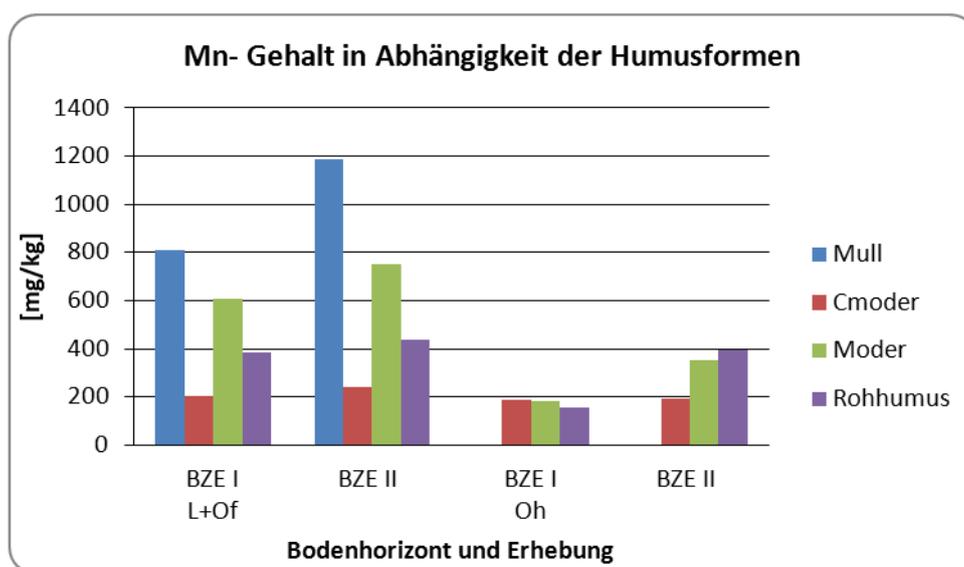


Abbildung 55: Entwicklung des Mangangehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 73: Mangangehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	86,10	354,00	4144,00	2	68,00	192,00	316,00
L	19	117,00	1072,00	7058,00				
E	8	56,300	2186,50	3656,00				
S	43	78,10	657,00	2897,00	16	87,20	314,00	1453,00
R	28	42,30	329,50	3528,00	13	53,00	791,00	3234,00
F	38	22,60	854,50	6915,00	21	117,00	338,00	3119,00

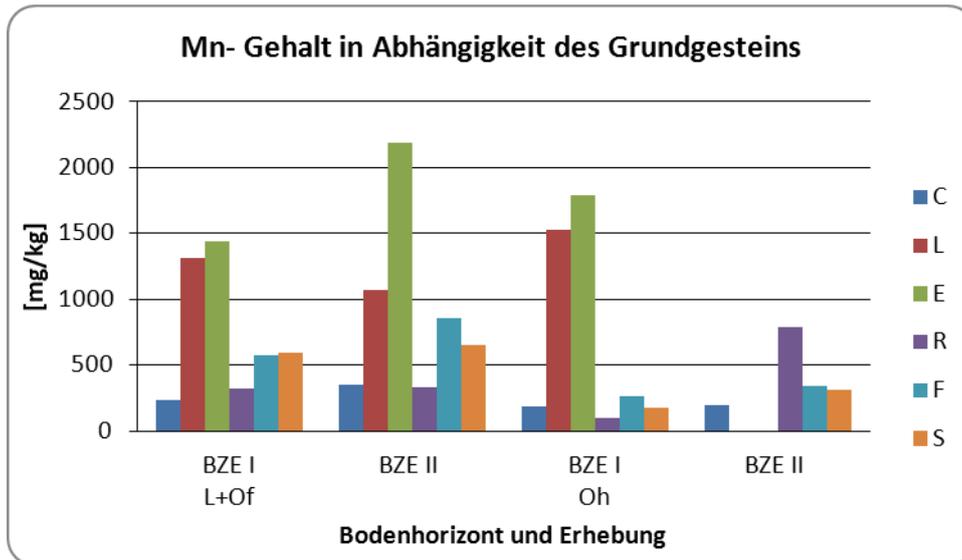


Abbildung 56: Entwicklung des Mangangehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 74: Manganvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	0,72	13,15	147,61				
MO	39	0,60	22,21	225,24	11	1,09	13,15	113,49
CMO	10	0,33	7,47	47,62	2	3,61	6,81	10,01
RO	81	0,84	13,37	286,25	39	1,30	14,63	417,02

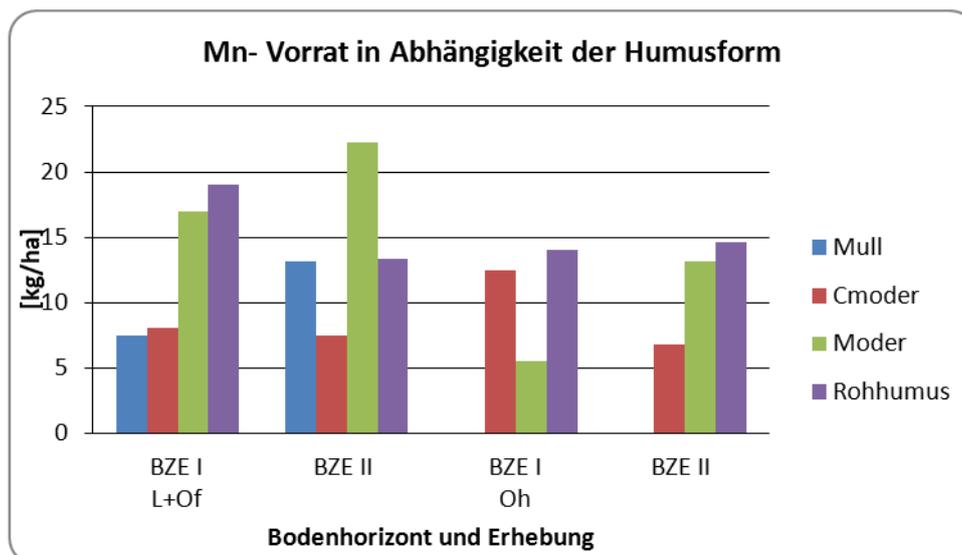


Abbildung 57: Entwicklung des Manganvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.12 Blei – Pb

Die Analysen des Bleigehaltes (vgl. Tab.75 bis 76) zeigen, dass der Humuskörper durchschnittlich einen ca. 4mal höheren Pb-Gehalt innerhalb des L-Of-Horizontes als im Oh-Horizont besitzt. Die Humusformen Mull und Moder weisen im L-Of-Horizont den höchsten Bleigehalt auf, wobei Kalkmoder den geringsten Pb-Wert innerhalb des L-Of- Horizont aufweist. Mit einem Gehalt von jeweils über 160 mg/kg stellen die Humusformen Moder und Rohhumus den größten Pb-Gehalt innerhalb des Humuskörpers. Bei durchschnittlich nur 22,90 mg/kg TS zeigt Mull insgesamt den niedrigsten Pb-Gehalt.

In Abhängigkeit des Grundgesteins kommen bei Schlufflehmen (L) sowie Kalkstein die niedrigsten Werte innerhalb der L-Of-Schicht vor. Deutlich höhere Wert waren bei den eutrophen und silikatischen Grundgesteinen (E) gegeben, wobei Schiefer (F) und Rotliegendgesteine (R) mit jeweils über 50 mg/kg TS doppelt so hoch liegen. Auch innerhalb des Oh-Horizontes stellen Schiefer- und Rotliegendgesteine die höchsten Gehalte. Rohhumus ist mit einem durchschnittlichen Vorrat von ca. 8,5 kg/ha die am höchsten belastete Humusform. Mit nur insgesamt ca. 0,38 kg/ha besitzt die Humusform Mull die geringsten Pb-Vorräte. Das kann auf die geringen Streumächtigkeiten zurückgeführt werden.

Im Vergleich von BZE I und BZE II (vgl. Abb.57 bis 58) zeigt sich, dass der Bleigehalt innerhalb der Humushorizonte insgesamt als rückläufig zu beschreiben ist. Ähnlich verhält es sich mit den Pb-Gehalten der Humusformen. Demnach erfahren alle betrachteten Humusformen (Mull, Moder, Kalkmoder und Rohhumus) Abnahmen, wobei Kalkmoder geringe Zunahmen innerhalb des Oh-Horizontes aufweist. In Abhängigkeit des Grundgesteins verzeichnen insgesamt alle Standorte einen Rückgang des Pb-Gehaltes. (Aufgrund fehlender Daten sind keine genaueren Angaben für eutrophe Silikatgesteine möglich.)

Mit der Gegenüberstellung der Bleivorräte zeigt sich, dass es nur bei der Humusform Mull zu einem leichten Anstieg der Vorräte gekommen ist. Im Gegensatz dazu verzeichnen die Humusformen Kalkmoder und Rohhumus insgesamt einen deutlichen Rückgang. Moder ist hinsichtlich seines Pb-Vorrat als weitestgehend gleichbleibend zu charakterisieren. Diese Tendenz folgt mit Zeitverzögerung der Ablösung bleihaltiger durch bleifreie Kraftstoffe.

Tabelle 75: Bleigehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	4,57	11,28	22,16	30,70	49,46	87,66	296,00
Oh	52	19,80	85,90	125,55	139,00	153,17	205,35	283,00

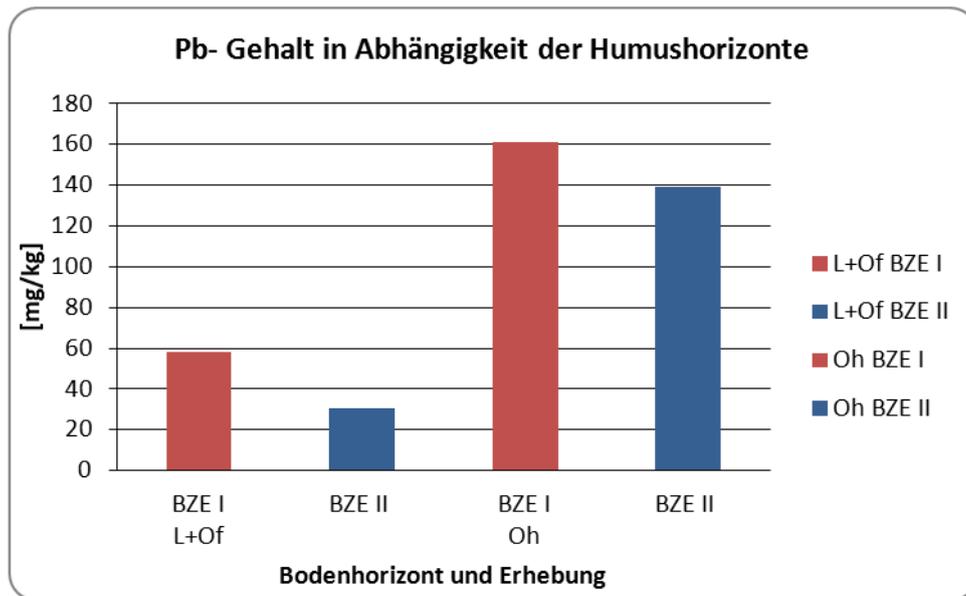


Abbildung 58: Entwicklung des Bleigehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 76: Bleigehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	5,60	22,90	216,00				
MO	39	5,27	35,50	198,00	11	82,50	132,10	269,00
CMO	10	5,90	12,35	61,20	2	99,90	119,40	138,90
RO	81	4,61	16,20	296,00	39	19,80	145,00	283,00

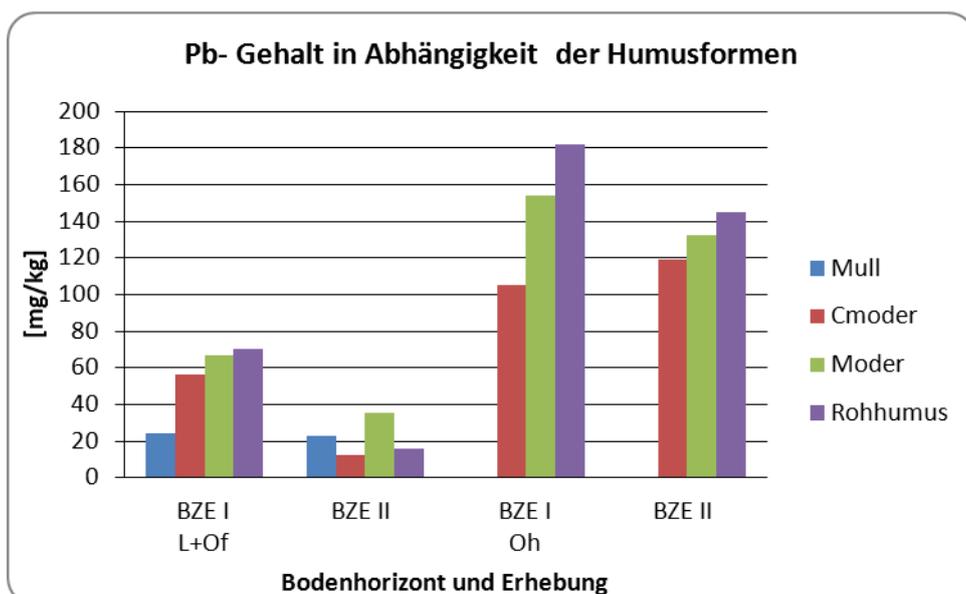


Abbildung 59: Entwicklung des Bleigehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 77: Bleigehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	5,90	22,90	216,00	2	99,9	119,40	138,90
L	19	5,60	21,90	101,30				
E	8	9,41	25,00	82,40				
S	43	4,57	25,90	107,00	16	37,80	91,65	220,00
R	28	10,20	56,15	296,00	13	19,80	145,00	283,00
F	38	7,10	51,10	180,00	21	94,60	153,00	252,00

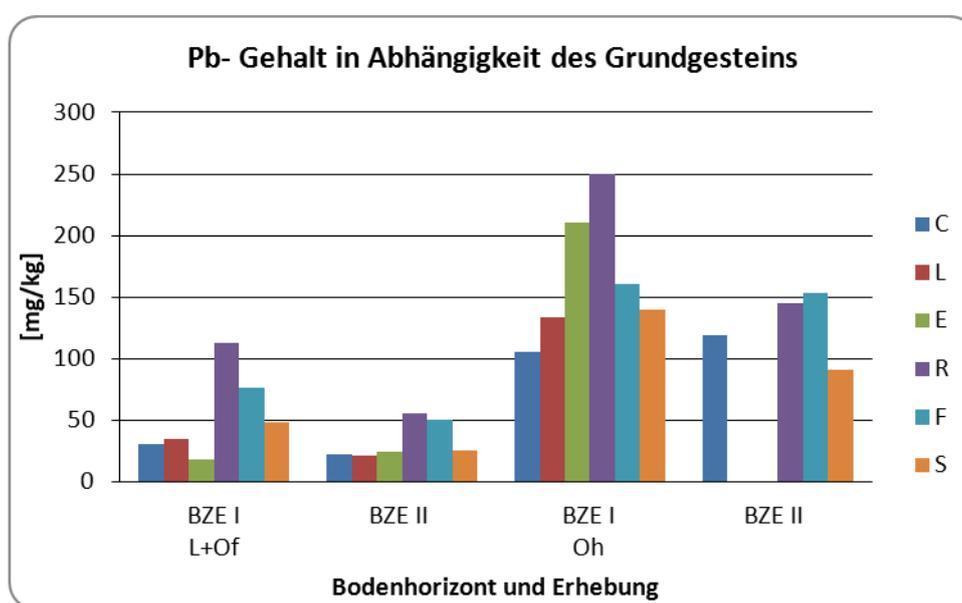


Abbildung 60: Entwicklung des Bleigehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 78: Bleivorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	0,02	0,38	7,53				
MO	39	0,05	1,10	8,41	11	0,41	5,45	19,11
CMO	10	0,04	0,28	3,19	2	4,40	4,85	5,30
RO	81	0,01	1,26	21,55	39	0,23	7,38	27,21

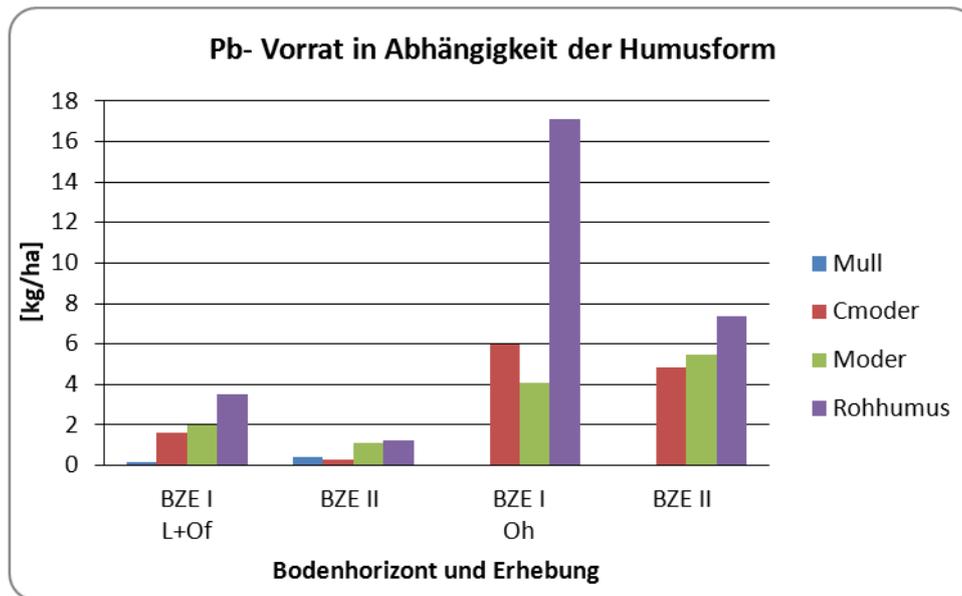


Abbildung 61: Entwicklung des Bleivorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.13 Kupfer – Cu

Mit einem Gehalt von über 29 mg/kg stellt die Humusform Kalkmoder den größten Cu-Gehalt innerhalb des Humuskörpers. Bei durchschnittlich nur 12,1 mg/kg TS zeigt Mull insgesamt den niedrigsten Cu-Gehalt.

Die Ergebnisse (vgl. Tab.79 bis 80) zeigen weiterhin, dass innerhalb des Humuskörpers der L-Of-Horizont durchschnittlich einen höheren Cu-Gehalt als der Oh-Horizont besitzt. Die Humusform Mull weist im L-Of-Horizont den höchsten Kupfergehalt auf, gefolgt von Kalkmoder und Moder mit Werten in etwa gleicher Höhe. In Abhängigkeit des Grundgesteins kommen bei Buntsandsteinen (S) weitaus die niedrigsten Werte innerhalb der L-Of-Schicht vor. Deutlich höhere Werte waren bei carbonatischen Grundgesteinen (C) sowie Schlufflehmen (L) gegeben, wobei Schiefer (F) ebenfalls zu dieser Klasse gehört. Auch innerhalb des Oh-Horizontes stellen Schiefer- und Kalkgesteine die höchsten Werte.

Bei der Gegenüberstellung des Cu-Vorrates der Humusformen ist Rohhumus mit einem durchschnittlichen Vorrat von ca. 1 kg/ha führend. Mit nur insgesamt ca. 0,2 kg/ha besitzen die Humusformen Mull und Kalkmoder die geringsten Kupfer-Vorräte. Dies kann u.a. auf die geringe Streuauflage zurückgeführt werden.

Im Vergleich von BZE I und BZE II (vgl. Abb.61 bis 62) zeigt sich, dass der Kupfergehalt innerhalb der Humushorizonte insgesamt als rückläufig zu beschreiben ist. Ähnlich verhält es sich mit den Cu-Gehalten in Abhängigkeit der Humusform und des Grundgesteins. Somit erfahren alle betrachteten Humusformen und Grundgesteine Abnahmen. Auch bei der Gegenüberstellung der Kupfervorräte zeigen sich deutliche Rückgänge zwischen den Jahren 1996 und 2009. Bei der Humusform Moder besteht Grund zur Annahme, dass einer Verlagerung des Kupfers

ausgehend vom L-Of-Horizont in den Oh-Horizont stattgefunden hat. Demnach entspricht der Zuwachs innerhalb des Oh-Horizontes dem Rückgang im L-Of-Horizont.

Diese rückläufige Tendenz ist dem Rückgang kupferhaltiger Stäube durch verbesserte Filtertechnik in der Industrie und dem Rückgang des Einsatzes kupferhaltiger Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft zu verdanken.

Tabelle 79: Kupfergehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	3,86	6,99	9,09	10,60	12,16	16,64	49,20
Oh	52	5,50	9,21	13,37	15,55	18,89	21,90	33,70

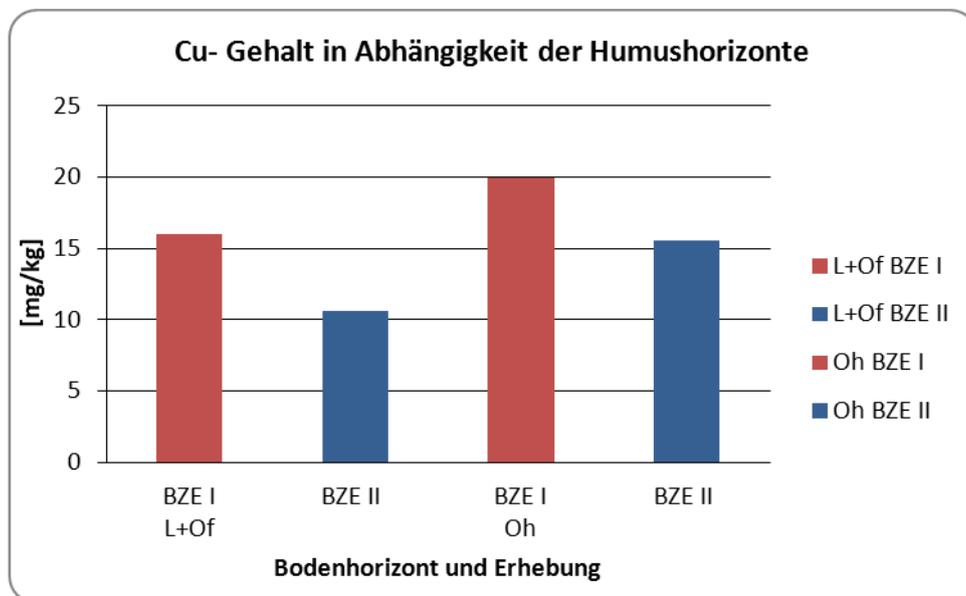


Abbildung 62: Entwicklung des Kupfergehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 80: Kupfergehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	6,69	12,10	49,20				
MO	39	3,86	10,30	25,90	11	9,00	15,40	27,00
CMO	10	7,00	10,60	15,20	2	15,60	18,50	21,40
RO	81	4,61	9,49	23,90	39	5,50	15,50	33,70

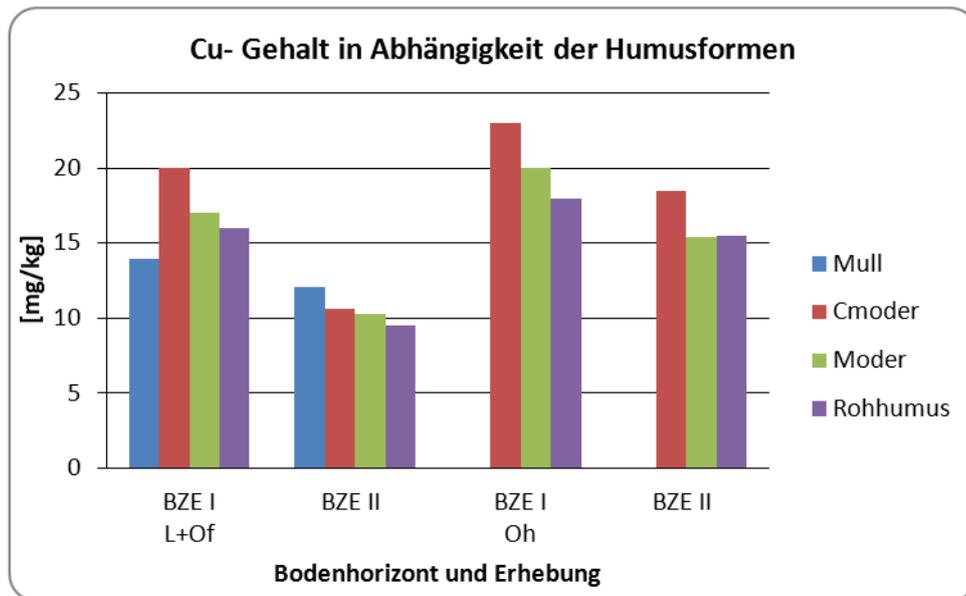


Abbildung 63: Entwicklung des Kupfergehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 81: Kupfergehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	7,00	12,70	49,20	2	15,60	18,50	21,40
L	19	6,45	11,80	21,30				
E	8	8,23	11,35	23,40				
S	43	3,99	7,88	23,90	16	5,50	9,86	33,70
R	28	3,86	10,20	24,50	13	8,50	12,60	25,30
F	38	5,02	11,55	23,30	21	21,10	19,80	27,00

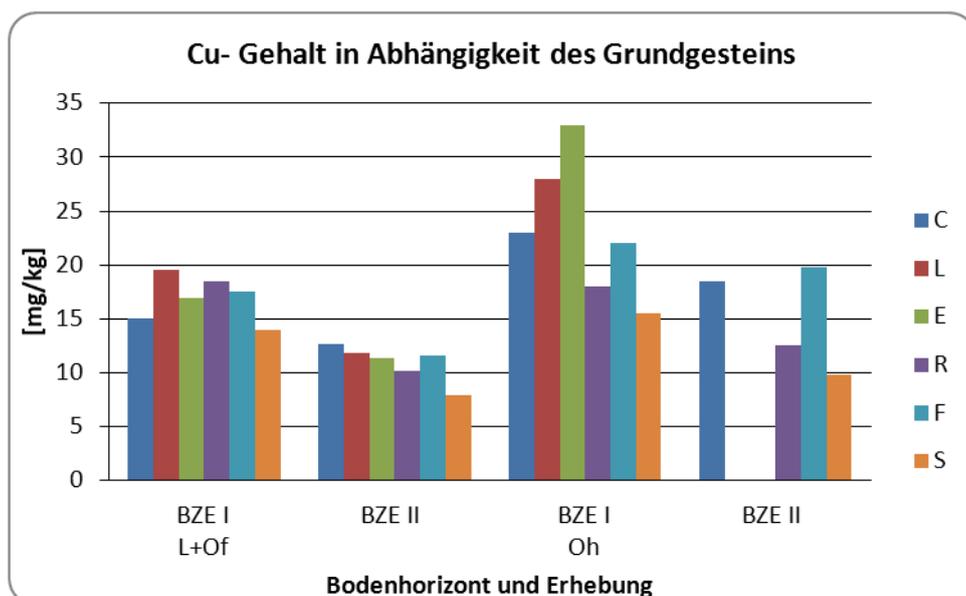


Abbildung 64: Entwicklung des Kupfergehaltes [%] in Abhängigkeit Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 82: Kupfervorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	0,03	0,20	1,71				
MO	39	0,03	0,27	1,86	11	0,03	0,70	2,40
CMO	10	0,02	0,20	0,79	2	0,68	0,75	0,83
RO	81	0,01	0,34	2,92	39	0,02	0,73	4,17

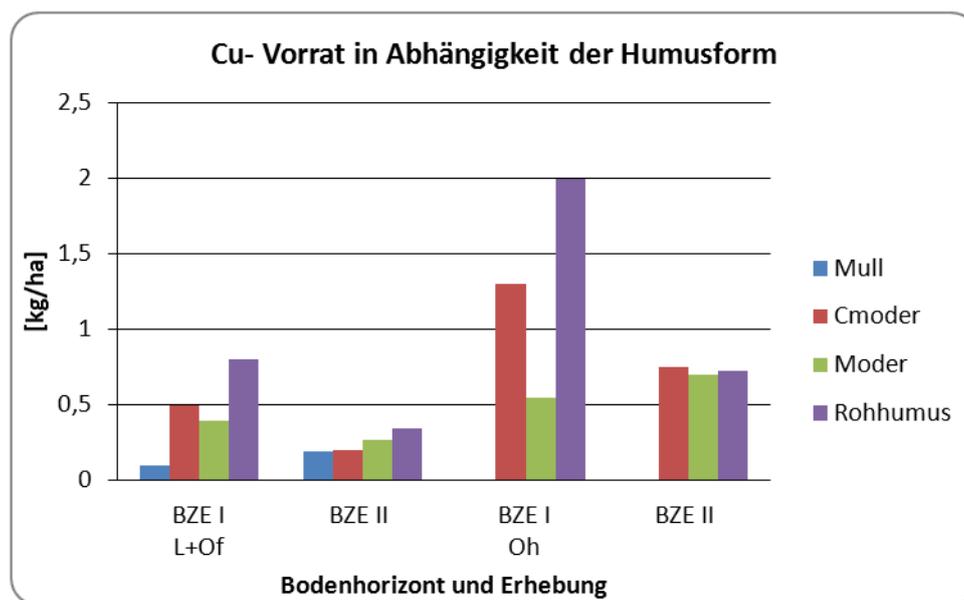


Abbildung 65: Entwicklung des Kupfervorrates [kg/ha] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.14 Zink – Zn

Die analysierten Zinkgehalte (vgl. Tab.83 bis 84) zeigen, dass innerhalb des Humuskörpers der L-Of-Horizont durchschnittlich einen höheren Zn-Gehalt als der Oh-Horizont aufweist. Ähnlich verhält es sich bei den Humusformen Rohhumus und Moder, welche ebenfalls höhere Zn-Gehalte im L-Of-Horizont zeigen. Entgegengesetzt ist dies bei Kalkmoder der Fall.

Mit einem Gehalt von über 170 mg/kg stellt die Humusform Kalkmoder den größten Zn-Gehalt innerhalb des gesamten Humuskörpers. Bei durchschnittlich nur 62,8 mg/kg TS zeigt Mull insgesamt den niedrigsten Zn-Gehalt.

In Abhängigkeit des Grundgesteins kommen bei Kalkstein die höchsten Werte innerhalb der Humusaufgabe vor. Von Buntsandstein geprägte Standorte zeigen die geringsten Werte des Zn-Gehaltes innerhalb des Humuskörpers.

Bei der Gegenüberstellung des Zn-Vorrates ist die Humusform Kalkmoder mit einem durchschnittlichen Vorrat von jeweils ca. 5,5 kg/ha dominierend. Mit nur insgesamt

ca. 0,94 kg/ha besitzt die Humusform Mull die geringsten Zn-Vorräte. Es ist anzunehmen, dass diese geringen Zinkvorräte aufgrund der geringen Streumächtigkeiten von Mull entstehen.

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.65 bis 66) zeigt sich, dass der Zinkgehalt innerhalb der Humushorizonte insgesamt als leicht rückläufig zu beschreiben ist. Ähnlich verhält es sich mit den Zn-Gehalten der Humusformen. Demnach erfahren alle betrachteten Humusformen Abnahmen. Auch in Abhängigkeit des Grundgesteins verzeichnen alle Standorte insgesamt einen Rückgang. (Aufgrund fehlender Daten sind jedoch keine genaueren Angaben für eutrophe Silikatgesteine und Schlufflehme möglich.)

Im Vergleich der Zinkvorräte zeigt sich, dass es nur bei den Humusformen Mull zu einem leichten Anstieg der Vorräte gekommen ist. Im Gegensatz dazu verzeichnet die Humusform Kalkmoder und Rohhumus insgesamt einen deutlichen Rückgang. Die Humusform Moder zeigt trotz seines Rückgangs im L-Of-Horizont einen deutlichen Anstieg des Zn-Vorrates innerhalb des Oh-Horizontes. Die Abnahme der Zn-Gehalte im Humus korrespondiert mit dem Rückgang zinkhaltiger Stäube aus der Industrie.

Tabelle 83: Zinkgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	25,20	44,86	53,14	60,10	65,50	77,38	213,00
Oh	52	24,90	36,89	43,35	50,05	57,43	67,41	123,80

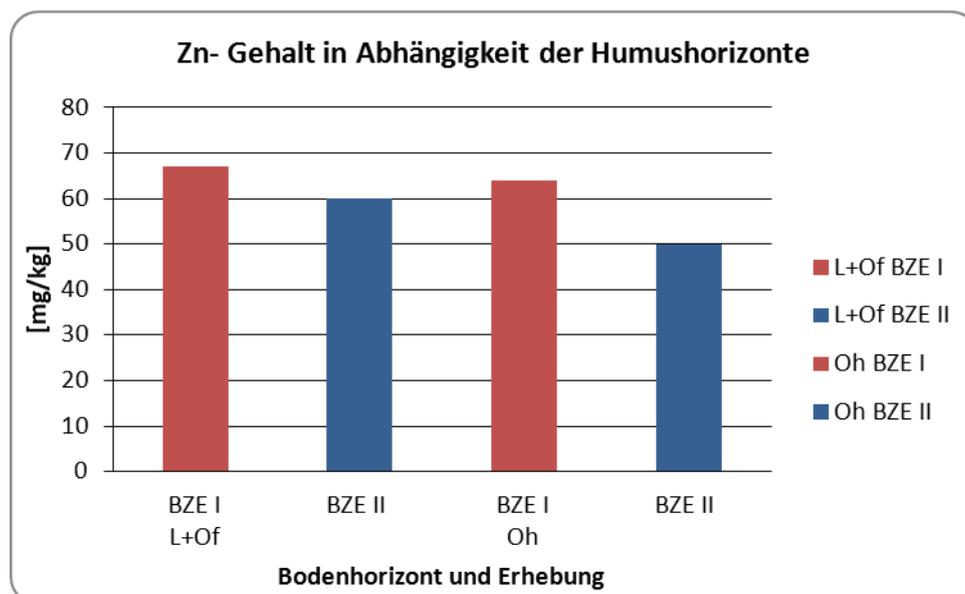


Abbildung 66: Entwicklung des Zinkgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 84: Zinkgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	36,60	52,80	213,00				
MO	39	28,60	59,10	93,00	11	38,30	50,20	85,10
CMO	10	53,00	67,55	96,40	2	86,20	105,00	123,80
RO	81	25,20	57,80	138,00	39	24,90	48,00	123,00

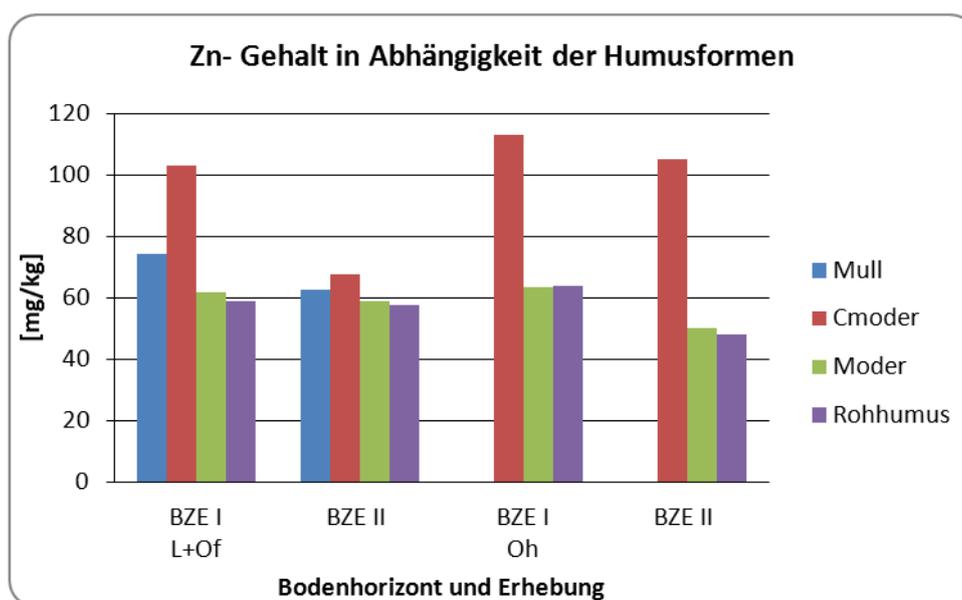


Abbildung 67: Entwicklung des Zinkgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 85: Zinkgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	52,20	69,80	213,00	2	86,20	105,00	123,80
L	19	36,60	58,50	85,40				
E	8	52,10	61,15	110,00				
S	43	25,20	48,40	77,80	16	24,90	37,75	116,00
R	28	28,60	59,55	95,10	13	36,30	45,70	59,00
F	38	35,80	56,25	138,00	21	39,60	56,40	123,00

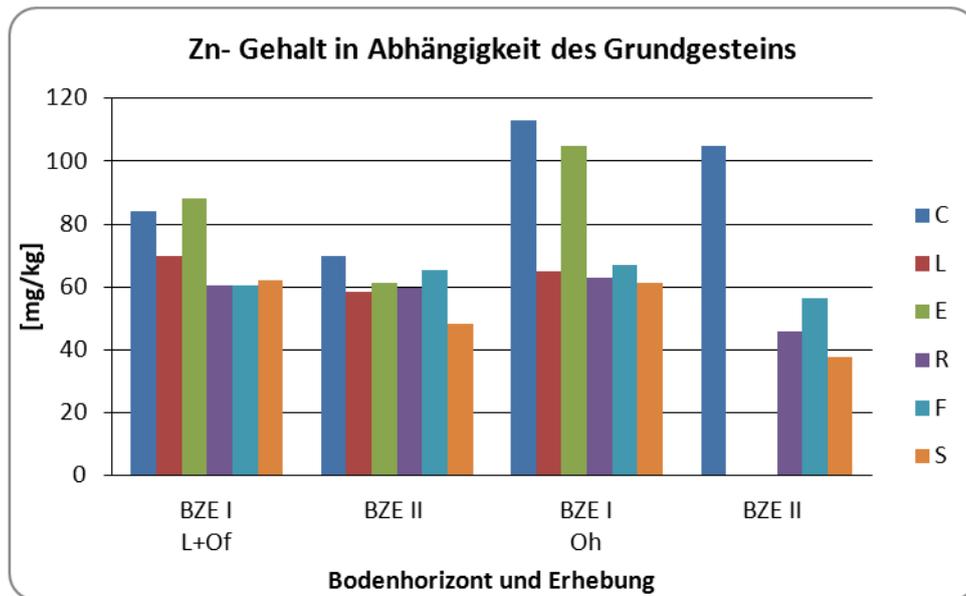


Abbildung 68: Entwicklung des Zinkgehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 86: Zinkvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	0,15	0,94	7,42				
MO	39	0,24	1,36	8,12	11	0,15	2,87	5,97
CMO	10	0,21	1,25	4,67	2	3,92	4,25	4,58
RO	81	0,08	1,89	11,17	39	0,08	2,34	14,35

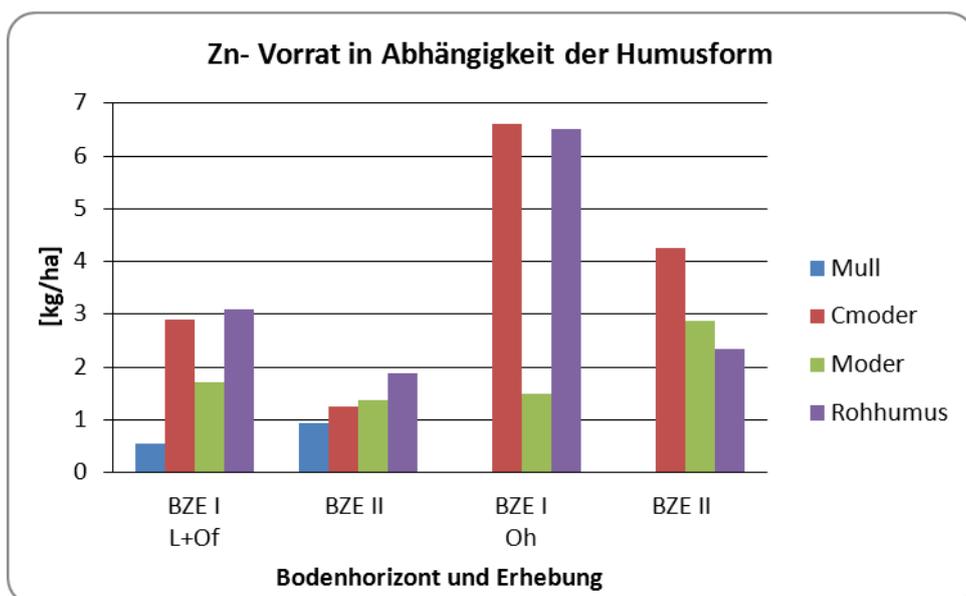


Abbildung 69: Entwicklung des Zinkvorrates [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.15 Cadmium – Cd

Die Analysen des Cadmiumgehaltes (vgl. Tab.87 bis 88) zeigen, dass innerhalb des Humuskörpers der L-Of-Horizont durchschnittlich einen höheren Cd-Gehalt als der Oh-Horizont besitzt. Die Humusform Moder weist im L-Of-Horizont den höchsten Cadmiumgehalt auf, wobei Mull und Rohhumus ein fast gleicher Wert zukommt.

Mit einem Gehalt von 2,17 mg/kg TS stellt die Humusform Kalkmoder den größten Cd-Gehalt innerhalb des gesamten Humuskörpers. Bei durchschnittlich nur 0,37 mg/kg TS zeigt Mull insgesamt den niedrigsten Cd-Gehalt.

In Abhängigkeit des Grundgesteins kommen bei Buntsandsteinen (S) weitaus die niedrigsten Werte innerhalb der L-Of-Schicht sowie der Oh-Schicht vor. Ein deutlich höherer Wert war bei carbonatischen Grundgesteinen (C) sowie Schiefer (F) auch innerhalb des Oh-Horizontes gegeben. Mit durchschnittlich insgesamt 2,275 mg/kg TS besitzen Kalkgesteine (C) die höchsten Cd-Gehalte.

Bei der Gegenüberstellung des Cd-Vorrates ist die Humusform Rohhumus mit einem durchschnittlichen Vorrat von ca. 29 g/ha führend. Mit nur insgesamt ca. 5 g/ha besitzt die Humusform Mull die geringsten Cadmium-Vorräte. Dies kann u.a. auf die geringe Streuauflage zurückgeführt werden.

Der Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.69 bis 70) zeigt, dass der Cadmiumgehalt innerhalb der Humushorizonte insgesamt als leicht rückläufig zu beschreiben ist. In Abhängigkeit der Humusform wurden deutliche Veränderungen beim Kalkmoder festgestellt. Demnach sind Abnahmen des Cd-Gehaltes innerhalb des L-Of-Horizontes und Zunahmen im Oh-Horizont gegeben. Bei allen anderen Humusformen waren keine oder nur geringfügige Reduktionen festzustellen. Ähnlich verhält es sich auch in Abhängigkeit des Grundgesteins. Somit erfahren alle Standorte, außer denen von Kalkstein (C) und Schiefer (F), einen leichten Rückgang bzw. Stagnation des Cd-Gehaltes im gesamten Humuskörper.

Auch bei der Gegenüberstellung der Cadmiumvorräte zeigen sich deutliche Rückgänge bei der Humusform Rohhumus. Der dargestellte Trend der Zunahme der Cd-Gehalte und -vorräte im Kalkmoder sowie im Oh-Horizont von Kalkgesteinen auf nur 2 Standorten kann nicht auf eine gesicherte Statistik gegründet werden. Erstmals wurde auch in der Humusform Mull Cadmium nachgewiesen.

Während der Rückgang des Einsatzes von cadmiumhaltigen Phosphatdüngern in der Landwirtschaft besonders in Böden auf basenarmen Grundgesteinen zu einer Reduzierung des Cadmiumgehaltes im Humus geführt hat, erzeugen die basenreichen Grundgesteine aufgrund ihres höheren Cadmiumgehaltes selbst ständig einen natürlichen Nachschub durch Verwitterung.

Tabelle 87: Cadmiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
L+Of	165	0,080	0,250	0,334	0,380	0,440	0,574	2,290
Oh	52	0,140	0,230	0,299	0,325	0,383	0,580	2,920

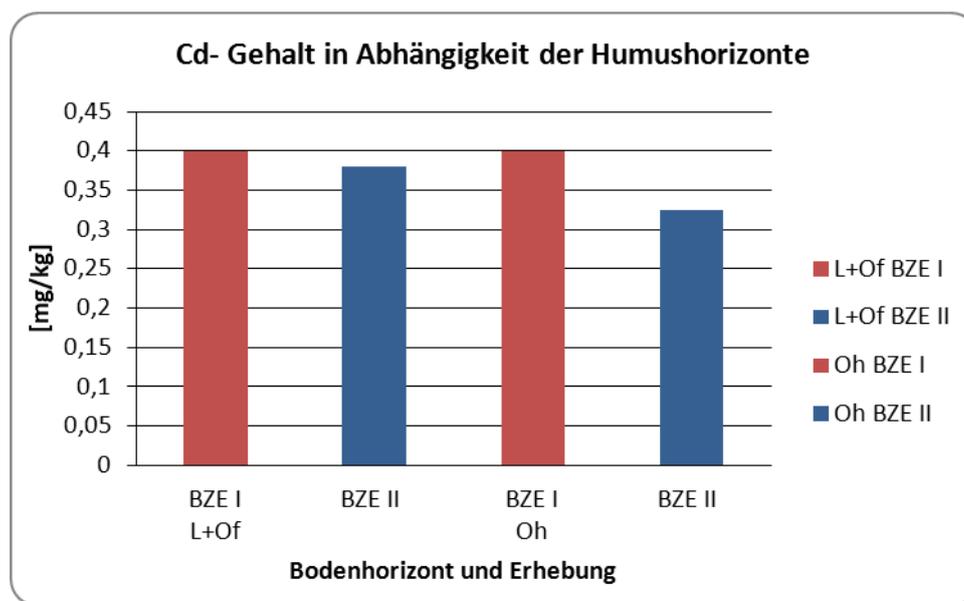


Abbildung 70: Entwicklung des Cadmiumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 88: Cadmiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	0,080	0,370	1,090				
MO	39	0,170	0,430	0,750	11	0,180	0,310	0,40
CMO	10	0,140	0,325	2,290	2	0,850	1,885	2,920
RO	81	0,190	0,380	1,210	39	0,140	0,330	0,830

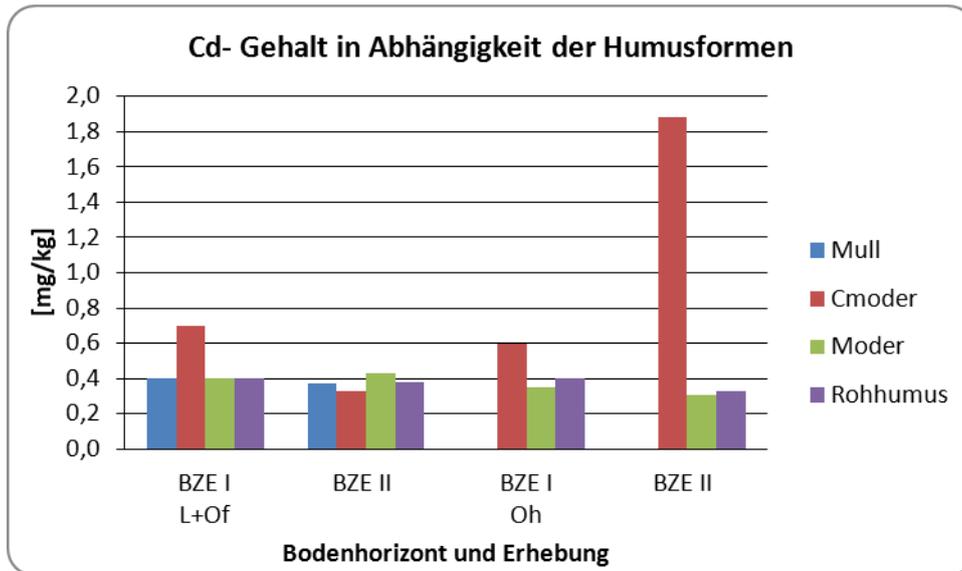


Abbildung 71: Entwicklung des Cadmiumgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 89: Cadmiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of			Oh				
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
C	29	0,140	0,400	2,290	2	0,850	1,885	2,920
L	19	0,080	0,390	0,660				
E	8	0,260	0,370	0,490				
S	43	0,170	0,360	0,840	16	0,210	0,315	0,580
R	28	0,170	0,375	0,840	13	0,180	0,400	0,680
F	38	0,200	0,435	1,210	21	0,140	0,310	0,830

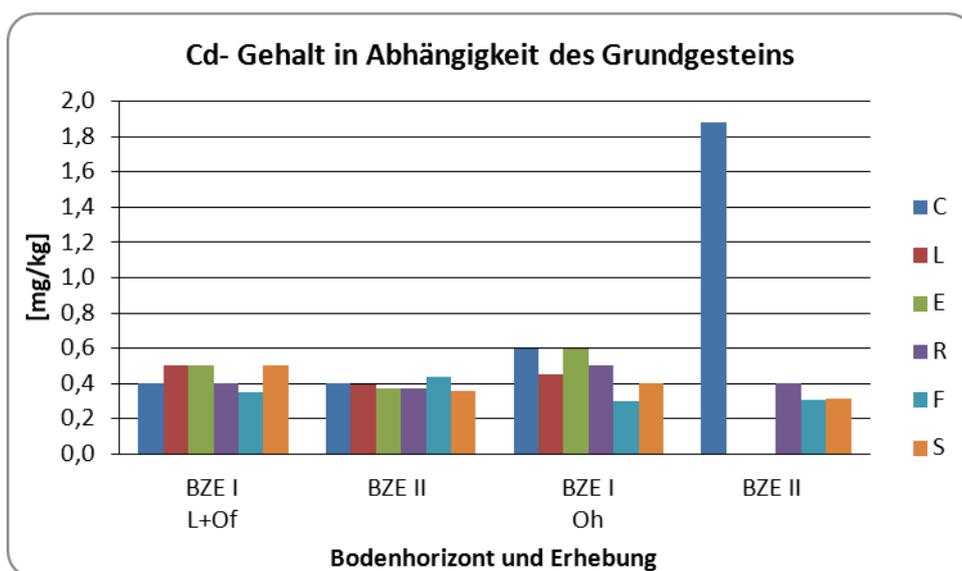


Abbildung 72: Entwicklung des Cadmiumgehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 90: Cadmiumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
MU	35	0,0005	0,0053	0,0388				
MO	39	0,0012	0,0113	0,0617	11	0,0006	0,0133	0,0383
CMO	10	0,0004	0,0133	0,0573	2	0,0269	0,0910	0,1551
RO	81	0,0005	0,0138	0,1592	39	0,0009	0,0158	0,0717

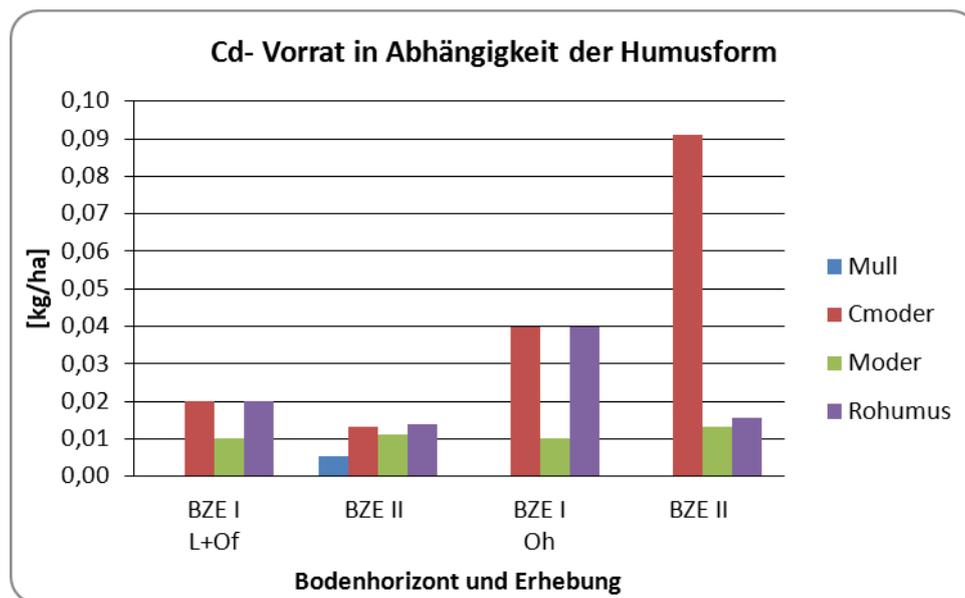


Abbildung 73: Entwicklung des Cadmiumvorrates [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.16 Weitere Schwermetalle und Schadstoffe

Im Rahmen der durchgeführten Analyseverfahren wurden die Probepunkte auf weitere Schadstoffe bzw. Schwermetalle untersucht und den Ergebnissen der BZE I gegenüber gestellt (vgl. Abb.74 bis 77).

Die Ergebnisse weiterer Schwermetall- und Schadstoffgehalte (vgl. Tab.91 bis 94) zeigen, dass innerhalb des Humuskörpers der L-Of-Horizont durchschnittlich einen höheren Gehalt als der Oh-Horizont besitzt. Die Humusform Rohhumus weist im L-Of-Horizont meist sehr hohe Werte auf. Innerhalb des Oh-Horizontes dominieren ebenfalls Rohhumus und Kalkmoder. Insgesamt weist die Humusform Kalkmoder die größten Werte von weiteren Schwermetall- und Schadstoffgehalten auf. Mull zeigt insgesamt die niedrigsten Gehalte von Schadstoffen.

In Abhängigkeit des Grundgesteins kommen bei Buntsandsteinen (S) weitaus die niedrigsten Werte innerhalb der L-Of-Schicht sowie der Oh-Schicht vor. Deutlich

höhere Werte waren bei carbonatischen Grundgesteinen (K) sowie Schiefer (F) und Rotliegendem (R) gegeben. Die Chrom-, Nickel-, Quecksilber- und Arsengehalte waren bei Kalkgestein mit insgesamt 39,55 mg/kg TS Cr, 20,66 mg/kg TS Ni, 0,933 mg/kg TS Hq und 20,97 mg/kg TS Ar immer am höchsten. Weiterhin waren bei Chrom, Nickel und Arsen die Schiefergesteine und bei Quecksilber die Gesteine des Rotliegenden dominierend.

Buntsandsteine führen insgesamt die kleinsten Gehalte an Schwermetallen und Schadstoffen. Bei der Gegenüberstellung des Schadstoff- und Schwermetallvorrates ist die Humusform Kalkmoder mit insgesamt den höchsten Vorräten ebenfalls dominierend. Die Humusform Mull weist die geringsten Vorräte auf. Dies kann u.a. auf die geringe Streuauflage zurückgeführt werden.

Warum die Humusform Kalkmoder jeweils die höchsten Vorräte und Gehalte an Schwermetallen und Schadstoffen aufweist, könnte durch geogene Vorbelastungen erklärt werden. Hier sind die durch Seekreide geprägten Standorte aufgrund ihrer hohen Werte besonders hervorzuheben. Andererseits sind 2 Probepunkte nicht ausreichend für eine gesicherte Statistik.

**Tabelle 91: Cadmiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humushorizonte (BZE II)**

Horizonte	Anzahl	Verteilung Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Median	65%	85%	Max
<b>Chrom (Cr)</b>								
<b>L+Of</b>	<b>165</b>	1,980	7,468	9,00	11,600	14,360	19,040	111,000
<b>Oh</b>	<b>52</b>	9,000	11,660	15,295	18,550	21,390	27,645	56,800
<b>Nickel (Ni)</b>								
<b>L+Of</b>	<b>165</b>	1,200	4,280	5,294	6,520	8,380	11,400	79,600
<b>Oh</b>	<b>52</b>	1,700	4,965	6,083	8,825	10,700	14,280	43,600
<b>Quecksilber (Hq)</b>								
<b>L+Of</b>	<b>165</b>	0,046	0,092	0,134	0,176	0,250	0,370	11,600
<b>Oh</b>	<b>52</b>	0,140	0,322	0,418	0,452	0,521	0,594	1,850
<b>Arsen (As)</b>								
<b>L+Of</b>	<b>165</b>	0,190	0,789	1,672	2,605	4,068	7,058	28,800
<b>Oh</b>	<b>52</b>	0,060	6,785	11,280	12,750	16,545	20,400	27,700

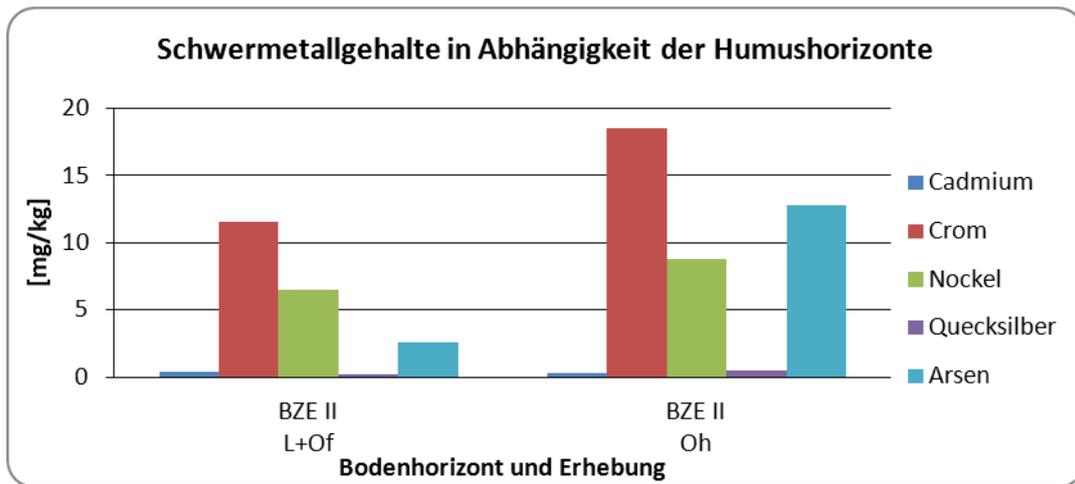


Abbildung 74: Entwicklung Schwermetall- und Schadstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit des Humushorizontes von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 92: Cadmiumgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
<b>Chrom (Cr)</b>								
MU	35	2,490	14,700	111,000				
MO	39	2,000	11,500	25,400	11	9,890	16,600	56,800
CMO	10	2,000	9,150	23,100	2	24,600	27,050	29,500
RO	81	1,980	10,800	27,400	39	9,000	18,500	55,100
<b>Nickel (Ni)</b>								
MU	35	2,400	6,320	79,600				
MO	39	1,200	5,810	23,600	11	5,00	7,240	25,300
CMO	10	1,500	7,565	13,600	2	8,690	13,095	17,500
RO	81	1,200	6,850	21,600	39	1,700	9,080	43,600
<b>Quecksilber (Hg)</b>								
MU	35	0,0490	0,110	6,040				
MO	39	0,0600	0,189	0,810	11	0,295	0,823	1,350
CMO	10	0,0630	0,118	0,930	2	0,140	0,408	0,720
RO	81	0,0460	0,225	11,600	39	0,250	0,457	1,850
<b>Arsen (As)</b>								
MU	35	0,00	3,270	28,800				
MO	39	0,190	2,430	12,300	11	3,790	11,400	20,400
CMO	10	0,510	1,995	8,440	2	13,100	16,3500	19,600
RO	81	0,360	2,560	22,300	39	0,066	12,900	27,700

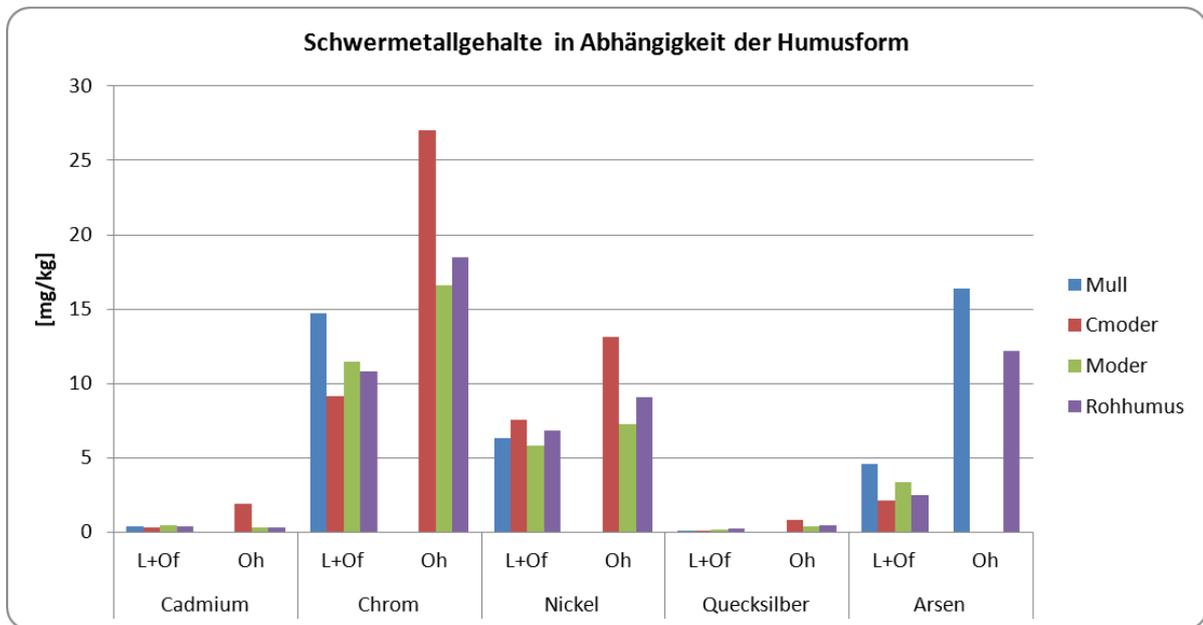


Abbildung 75: Entwicklung Schwermetall- und Schadstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 93: Schwermetall- und Schadstoffgehalte [mg/kg] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grundgestein	L+Of			Oh				
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
<b>Chrom (Cr)</b>								
<b>C</b>	<b>29</b>	2,00	12,50	42,30	<b>2</b>	24,60	27,05	29,50
<b>L</b>	<b>19</b>	5,36	13,80	24,40				
<b>E</b>	<b>8</b>	5,60	16,25	111,00				
<b>S</b>	<b>43</b>	2,00	10,00	19,90	<b>16</b>	9,25	14,75	31,50
<b>R</b>	<b>28</b>	1,98	11,50	24,40	<b>13</b>	9,00	14,30	56,80
<b>F</b>	<b>38</b>	3,00	11,45	27,40	<b>21</b>	12,20	22,20	55,10
<b>Nickel (Ni)</b>								
<b>C</b>	<b>29</b>	1,50	7,23	34,00	<b>2</b>	8,69	13,10	17,50
<b>L</b>	<b>19</b>	2,50	6,16	16,40				
<b>E</b>	<b>8</b>	2,40	7,55	79,60				
<b>S</b>	<b>43</b>	1,20	5,84	11,60	<b>16</b>	2,50	7,65	14,00
<b>R</b>	<b>28</b>	1,20	6,46	23,60	<b>13</b>	2,20	8,53	21,20
<b>F</b>	<b>38</b>	2,26	6,83	20,80	<b>21</b>	1,70	9,00	43,60
<b>Quecksilber (Hg)</b>								
<b>C</b>	<b>29</b>	0,063	0,110	6,040	<b>2</b>	0,295	0,823	1,350
<b>L</b>	<b>19</b>	0,049	0,153	0,468				
<b>E</b>	<b>8</b>	0,079	0,113	0,296				
<b>S</b>	<b>43</b>	0,030	0,183	0,458	<b>16</b>	0,250	0,381	0,670
<b>R</b>	<b>28</b>	0,460	0,205	11,600	<b>13</b>	0,290	0,490	1,850
<b>F</b>	<b>38</b>	0,084	0,278	0,610	<b>21</b>	0,140	0,457	1,060

Arsen (Ar)								
<b>C</b>	<b>29</b>	0,198	4,620	28,800	<b>2</b>	13,100	16,350	19,600
<b>L</b>	<b>19</b>	0,350	2,140	8,740				
<b>E</b>	<b>8</b>	0,800	3,365	7,080				
<b>S</b>	<b>43</b>	0,190	1,900	6,970	<b>16</b>	3,790	7,185	22,100
<b>R</b>	<b>28</b>	0,3610	2,465	9,050	<b>13</b>	0,066	12,200	17,900
<b>F</b>	<b>38</b>	0,420	3,070	22,300	<b>21</b>	8,040	19,300	27,700

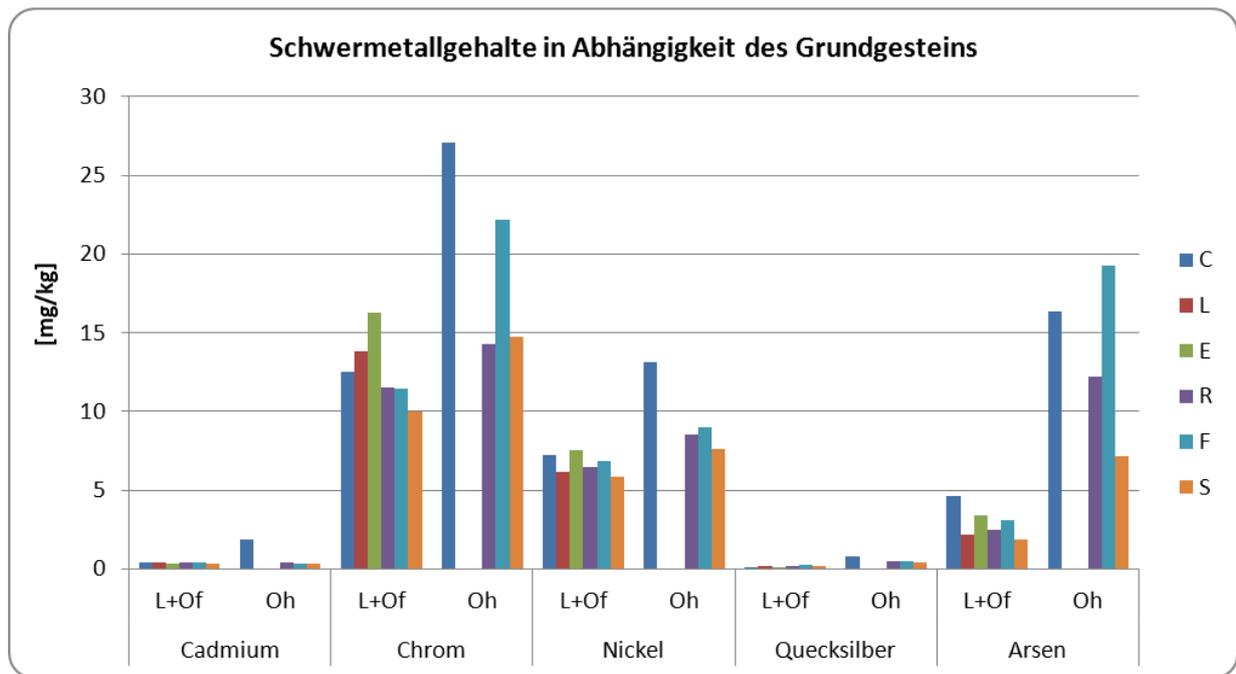


Abbildung 76: Entwicklung Schwermetall- und Schadstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 94: Schwermetall- und Schadstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusformen (BZE II)

Humusform	L+Of				Oh			
	Anzahl	Min	Med	Max	Anzahl	Min	Med	Max
<b>Chrom (Cr)</b>								
<b>MU</b>	<b>35</b>	0,0116	0,2439	1,2823				
<b>MO</b>	<b>39</b>	0,0156	1,6469	142,4913	<b>11</b>	0,0312	5,0981	96,0101
<b>CMO</b>	<b>10</b>	0,1828	1,6776	73,4803	<b>2</b>	3,9318	17,9760	32,0203
<b>RO</b>	<b>81</b>	0,0088	1,2039	104,3086	<b>39</b>	0,06515	2,5625	52,3078
<b>Nickel (Ni)</b>								
<b>MU</b>	<b>35</b>	0,0096	0,1050	0,7164				
<b>MO</b>	<b>39</b>	0,0128	0,1701	5,0799	<b>11</b>	0,0226	0,2217	9,3425
<b>CMO</b>	<b>10</b>	0,0084	0,2576	6,5287	<b>2</b>	0,6506	1,1289	1,6072
<b>RO</b>	<b>81</b>	0,0059	0,2133	5,5927	<b>39</b>	0,0143	0,2553	4,6695

Quecksilber (Hg)								
<b>MU</b>	<b>35</b>	0,0002	0,0018	0,1038				
<b>MO</b>	<b>39</b>	0,0007	0,0069	0,0977	<b>11</b>	0,0007	0,0168	0,1191
<b>CMO</b>	<b>10</b>	0,0005	0,0046	0,0289	<b>2</b>	0,0362	0,0439	0,0516
<b>RO</b>	<b>81</b>	0,0002	0,0094	0,6419	<b>39</b>	0,0010	0,0200	0,2498
Arsen (As)								
<b>MU</b>	<b>35</b>	0,0000	0,0505	1,0034				
<b>MO</b>	<b>39</b>	0,0039	0,2722	8,1755	<b>11</b>	0,0719	1,8356	29,0698
<b>CMO</b>	<b>10</b>	0,0030	0,1384	3,6453	<b>2</b>	6,9561	7,9783	9,0006
<b>RO</b>	<b>81</b>	0,0008	0,3938	14,4648	<b>39</b>	0,0164	3,0612	38,7134

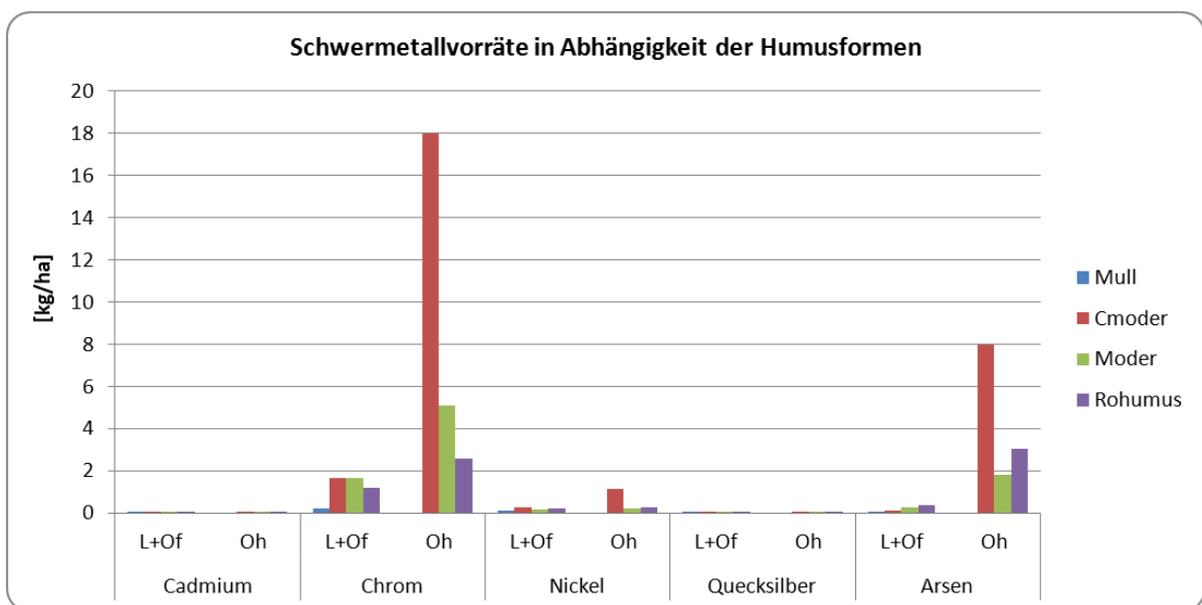


Abbildung 77: Entwicklung Schwermetall- und Schadstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 3.3.17 Zusammenfassung zu den Elementgehalten in der organischen Auflage

In den Tabellen 95 und 96 stellen die Zahlen Rangfolgen dar, wobei die größte Zahl die höchsten Gehalte und die kleinste Zahl die niedrigsten Gehalte charakterisiert.

Tabelle 95 : Rangfolge der Gehalthöhe für die Humusformen

Humus-horizont	Humusform	Ca	Mg	K	Fe	Mn	Al	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	As
L+Of	L-Mull	4	5	5	5	5	5	5	4	6	6	5	4	6	6
	F-Mull	3	1	3	3	2	4	1	1	1	3	1	1	5	1
	mullartiger Moder	6	4	6	6	6	6	6	5	5	5	6	6	4	5
	Moder	1	2	1	2	4	1	2	3	2	4	3	2	2	4
	Rohhumus-artiger Moder	5	3	2	4	3	2	4	6	4	1	4	5	1	2
	Rohhumus	2	6	4	1	1	3	3	2	3	2	2	3	3	3
Oh	L-Mull	4	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5
	F-Mull	5	4	4	3	4	3	4	5	4	5	4	3	4	4
	mullartiger Moder														
	Moder	2	1	2	2	3	1	3	2	1	3	1	4	2	3
	Rohhumus-artiger Moder	3	2	3	1	2	2	2	3	3	1	3	2	1	1
	Rohhumus	1	3	1	4	1	4	1	1	2	2	2	2	1	3

Die Humusform Mull und mullartiger Moder haben im L-Of-Horizont sowie im Oh-Horizont die größten Elementgehalte aufzuweisen. Bei Moder fällt der Elementgehalt in den beiden Humushorizonten gering aus und liegt somit noch niedriger als der von Rohhumus und rohumusartigem Moder. Im Vergleich zur BZE I ist es somit zu einer Verringerung des Elementgehaltes bei Moder gekommen.

Tabelle 96: Rangfolge der Gehalthöhe für die Humusformen über den Grundgesteinen

Humus-horizont	Grund-gestein	Ca	Mg	K	Fe	Mn	Al	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	As
L+Of	C	2	5	2	1	5	2	6	5	5	1	3	3	1	3
	L	6	3	3	5	4	5	2	4	6	5	1	1	5	4
	E	4	1	4	6	2	6	1	1	1	3	2	6	6	1
	R	1	6	6	2	3	3	4	6	4	6	4	2	2	6
	F	5	2	5	3	1	4	5	3	3	4	5	5	4	5
	S	3	4	1	4	6	1	3	2	2	2	6	4	3	2
Oh	C	1	3	2	1	5	1	5	4	4	1	3	2	1	4
	L	5	2	3	4	4	4	2	3	5	3	5	3	5	5
	E														
	R	4	1	4	5	1	5	4	5	2	5	1	4	3	3
	F	2	5	5	3	3	2	3	1	1	4	4	5	4	2
	S	3	4	1	2	2	3	1	2	3	2	2	1	2	1

Betrachtet man den Elementgehalt der Humusform in Abhängigkeit des Grundgesteins, so zeigt sich, dass Schlufflehme in beiden Humushorizonten die höchsten Gehalte aufweisen. Auch die Humusformen auf Rotliegendem weisen in dem L-Of-Horizont hohe Elementgehalte, vor allem bei Mg, K und den Metallen Zn und Cd auf. Bei den Humusformen der Carbonatgesteine sind ebenfalls hohe Werte im L-Of-Horizont, vor allem bei den Metallen Mn, Cu, Zn und Pb gegeben, wobei der Elementgehalt, außer von Mn und Cu, im Oh-Horizont eher niedrig ist. Die Schieferstandorte zeichnen sich durch hohe Gehalte von Kalium und Schwermetallen (Cd, Cr, Ni, und Hg) in beiden Humushorizonten aus. Die Gruppe der auf Sandstein vorhandenen Humusformen weisen die geringsten Werte auf.

Im Vergleich zur BZE I ging der Elementgehalt bei Humusformen auf Carbonatgesteinen zurück, wobei er bei denen auf Schlufflehm zunahm. Bei den Sandsteinen sind erneut die niedrigsten Gehalte aufgetreten, so dass hier von eher gleichbleibenden Gegebenheiten auszugehen ist.

## 4. Kennwerte des Mineralbodens

### 4.1 pH-Werte

Die pH-Werte wurden in destilliertem Wasser  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  sowie in einer Kaliumchloridlösung  $\text{pH}(\text{KCl})$  ermittelt.

In Auswertung der Messergebnisse (vgl. Tab.97 bis 100) ist festzustellen, dass bei beiden Messverfahren mit zunehmender Bodentiefe ein Anstieg der pH-Werte erfolgt. Weiterhin zeigte sich, dass die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte mit durchschnittlich 0,6 Einheiten über jenen von  $\text{pH}(\text{KCl})$  liegen. Dieser Sachverhalt konnte bei dem Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II bestätigt werden. Insgesamt ist bei den pH-Werten  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  und  $\text{pH}(\text{KCl})$  ein Anstieg der Messwerte vom Jahr 1996 zum Jahr 2009 zu verzeichnen (vgl. Abb.78 bis 80). Somit ist eine langsame Erholung der in vergangenen Jahrzehnten versauerten Böden feststellbar.

Tabelle 97: Verteilung der Gesamthäufigkeit der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - Werte im Mineralboden

<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	<b>Verteilung der Gesamthäufigkeit</b>							
<b>Tiefenstufe</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Min</b>	<b>15%</b>	<b>35%</b>	<b>Med</b>	<b>65%</b>	<b>85%</b>	<b>Max</b>
<b>0-5</b>	98	3,50	3,90	4,00	4,20	4,71	7,09	8,00
<b>5-10</b>	98	3,70	4,00	4,10	4,25	4,51	7,25	8,10
<b>10-30</b>	98	3,90	4,20	4,40	4,60	4,81	7,80	8,30
<b>30-60</b>	98	4,00	4,38	4,51	4,70	5,30	8,20	8,50
<b>60-90</b>	96	3,90	4,34	4,60	4,90	5,50	8,30	8,70
<b>90-140</b>	84	4,00	4,50	4,80	5,18	6,52	8,40	8,90

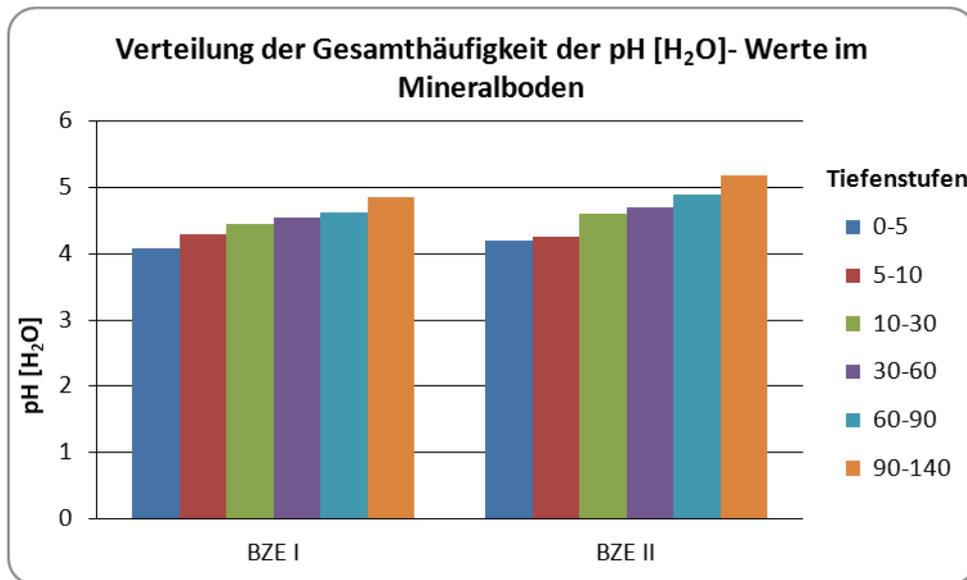


Abbildung 78: Entwicklung des pH (H<sub>2</sub>O) in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 98: Verteilung der Gesamthäufigkeit der pH(KCl)- Werte im Mineralboden

pH (KCl)	Verteilung der Gesamthäufigkeit							
	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%
0-5	98	2,90	3,20	3,30	3,50	3,71	6,59	7,60
5-10	98	3,00	3,30	3,50	3,60	3,80	6,95	7,60
10-30	98	3,20	3,60	3,80	3,95	4,30	7,25	7,80
30-60	98	3,60	3,80	4,00	4,20	4,50	7,40	8,00
60-90	96	3,30	3,80	4,09	4,30	4,60	7,60	8,40
90-140	84	3,60	3,80	4,10	4,35	4,80	7,66	8,10

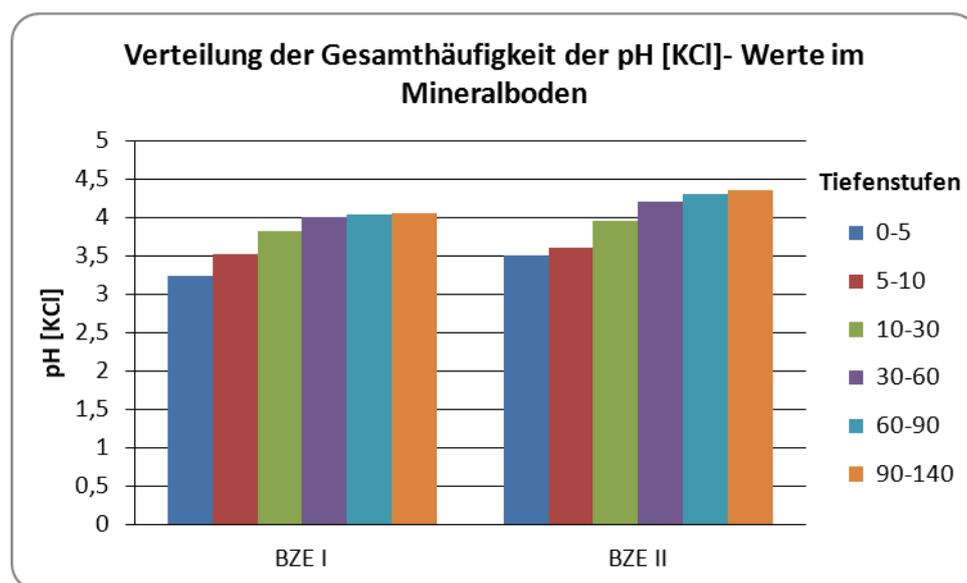


Abbildung 79: Entwicklung des pH (KCl) in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Vergleicht man die Ergebnisse der Tiefenstufen des Gesamtdatenkollektives, so zeigt sich, dass nur selten die pH-Bereiche pH(H<sub>2</sub>O) von 5,0 bis 7,0 und pH(KCl) von 4,5 bis 6,5 belegt werden. Die meisten Probepunkte befinden sich im pH-Bereich des Aluminium- und Austauscherpuffers (Tab. 82). Dieser Sachverhalt ist, wie aus Tabelle 81 ersichtlich, substratspezifischen Gegebenheiten geschuldet.

Tabelle 99: pH(H<sub>2</sub>O)-Bereiche der Tiefenstufe [cm] in Abhängigkeit vom Grundgestein

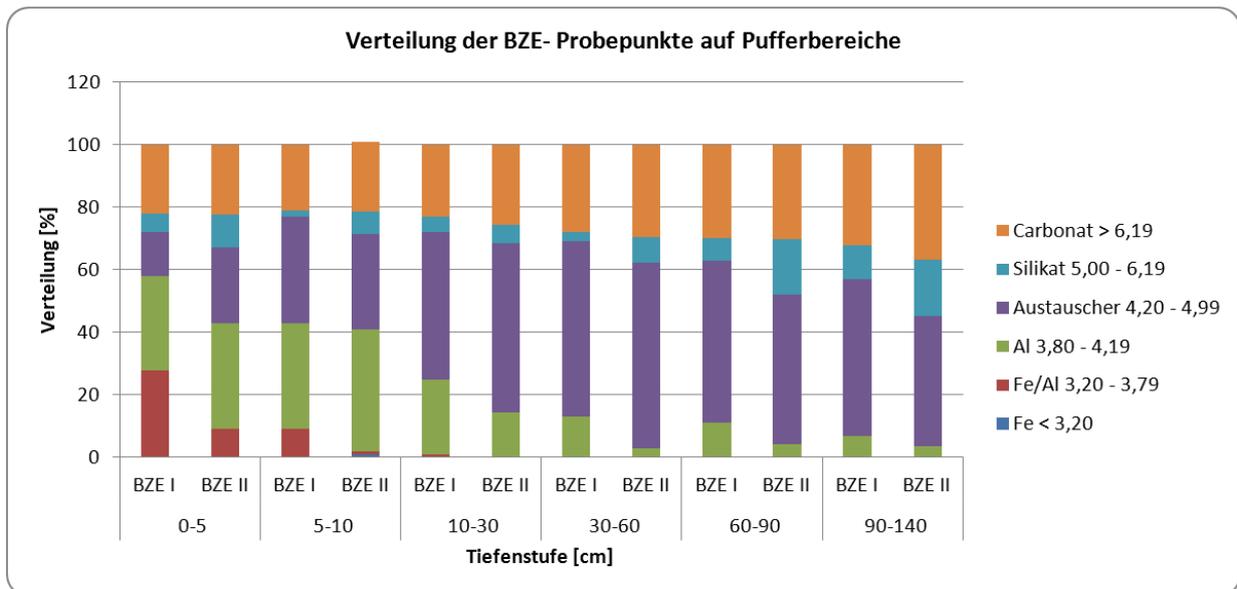
Grund-gestein	Tiefenstufe					
	0-5	5-10	10-30	30-60	60-90	90-140
<b>C</b>	5,0 - 8,0	5,5 - 8,1	6,2 - 8,3	7,7 - 8,5	7,7 - 8,7	8,0 - 8,9
<b>L</b>	4,2 - 7,5	4,2 - 7,7	4,3 - 7,8	4,4 - 7,9	4,8 - 8,3	5,1 - 8,4
<b>E</b>	3,9 - 4,9	4,1 - 4,8	4,3 - 4,7	4,3 - 4,8	4,3 - 5,2	4,4 - 7,9
<b>R</b>	3,5 - 4,2	3,7 - 4,5	3,9 - 4,9	4,4 - 4,8	4,4 - 4,9	4,4 - 4,8
<b>F</b>	3,7 - 4,1	3,8 - 4,1	4,0 - 4,2	4,0 - 4,2	4,1 - 4,6	4,4 - 5,1
<b>S</b>	3,7 - 5,3	3,9 - 4,5	4,1 - 4,9	4,1 - 4,8	3,9 - 6,1	4,0 - 6,5

Tabelle 100: Verteilung der BZE-Probepunkte auf Pufferbereiche [%]

Pufferbereich	Tiefenstufe						
	pH (H <sub>2</sub> O)	0-5	5-10	10-30	30-60	60-90	90-140
<b>Fe</b>	< 3,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Fe/Al</b>	3,20 - 3,79	9,18	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Al</b>	3,80 - 4,19	33,67	38,78	14,29	3,06	4,17	3,57
<b>Austauscher</b>	4,20 - 4,99	24,49	30,61	54,08	59,18	47,92	41,67
<b>Silikat</b>	5,00 - 6,19	10,20	7,14	6,12	8,16	17,71	17,86
<b>Carbonat</b>	> 6,19	22,45	22,45	25,51	29,59	30,21	36,90

Betrachtet man die Ergebnisse der beiden Tabellen 87 und 88 im Zusammenhang, so zeigt sich, dass eher silikatisch geprägte Grundgesteine (Buntsandstein (S), Rotliegendes (R) und Schiefer (F)) in den oberen 10 cm des Mineralbodens innerhalb des Fe/Al- und dem Al-Pufferbereich liegen. Die Gruppe der silikatisch-nährstoffreichen sowie carbonatischen Grundgesteine (eutrophe Silikatgesteine (E) und Schlufflehme (L)) kann dem Austauscher- und Silikatpuffer zugeordnet werden. Carbonatische Grundgesteine ( C ) sind in allen Tiefenstufen ausschließlich dem Carbonat-Pufferbereich zugehörig.

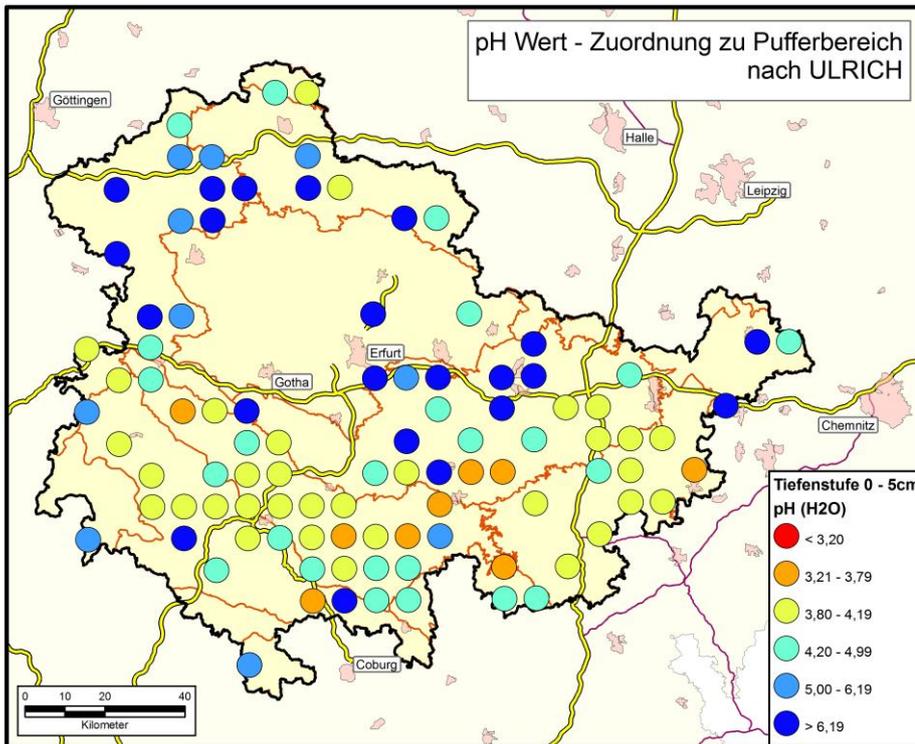
Gleichzeitig zeigt der Vergleich der Tiefenstufen (Abb. 80) aber auch, dass die oberen Mineralbodenhorizonte deutlich sauer sind als die tieferen.



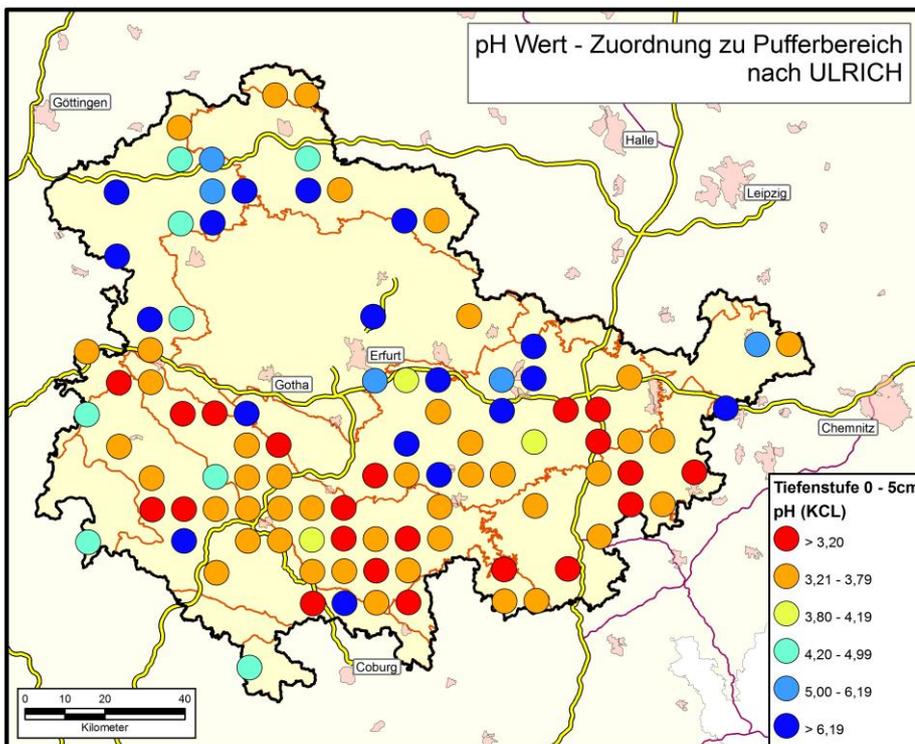
**Abbildung 80: Entwicklung der Verteilung der Pufferbereiche in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II ist ein deutlicher Rückgang bei dem Fe/Al- Pufferbereich und gleichzeitig ein Anstieg bei dem Al- und Austauscherpufferbereich in den oberen 30 cm des Mineralbodens festzustellen. Auch in den tiefer liegenden Bodenschichten ist eine Zunahme des Austauscher-Puffers aber auch des Carbonat- und Silikat-Puffers zu verzeichnen.

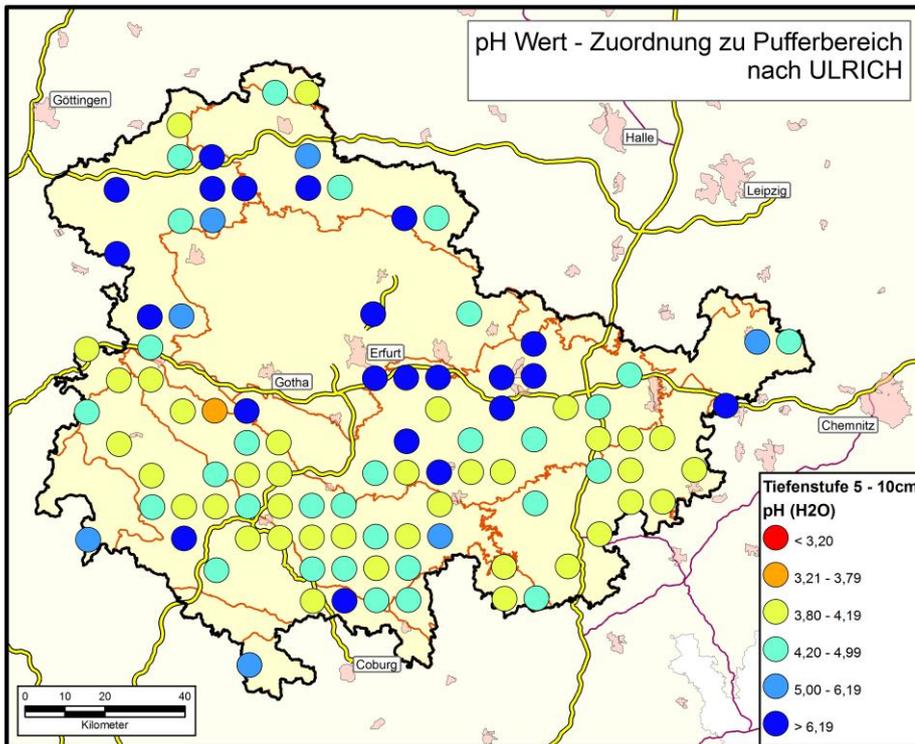
Dies deutet auf die Abnahme versauernder Einflüsse hin.



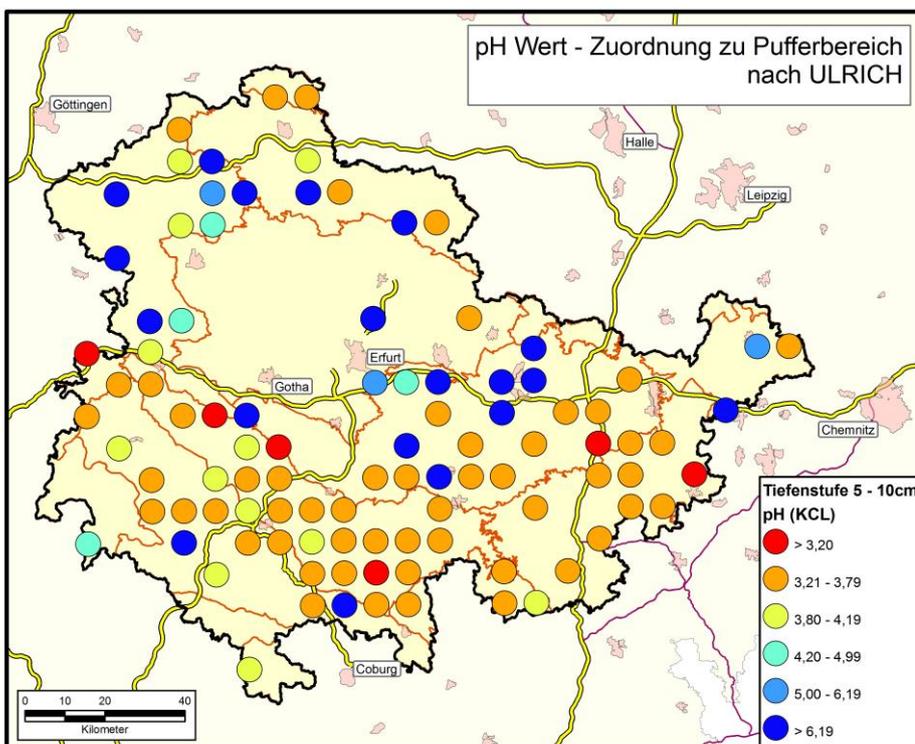
Karte 72.



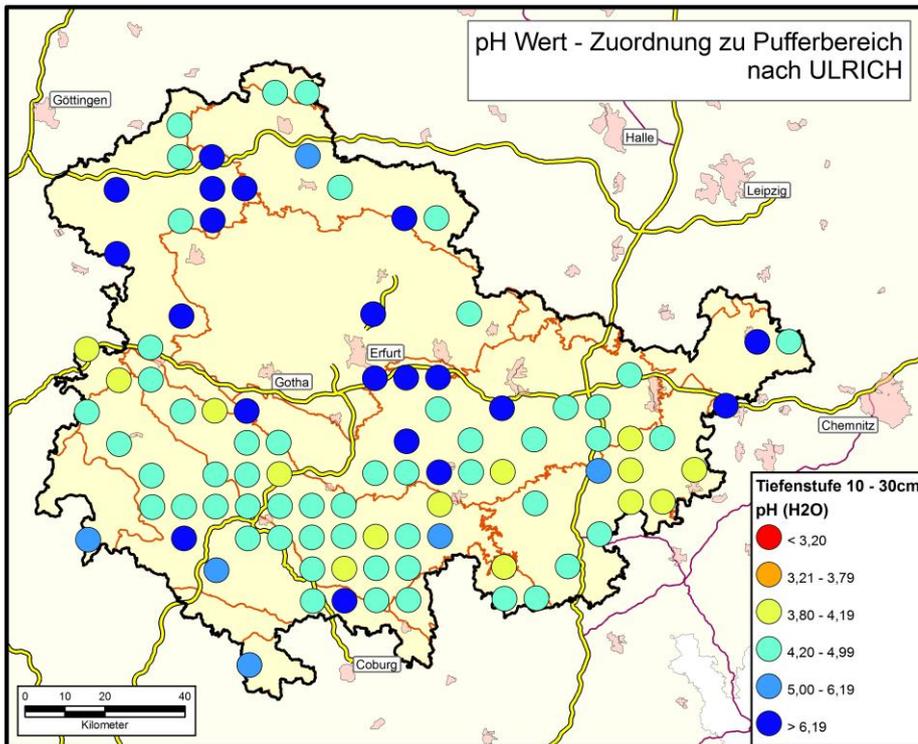
Karte 73.



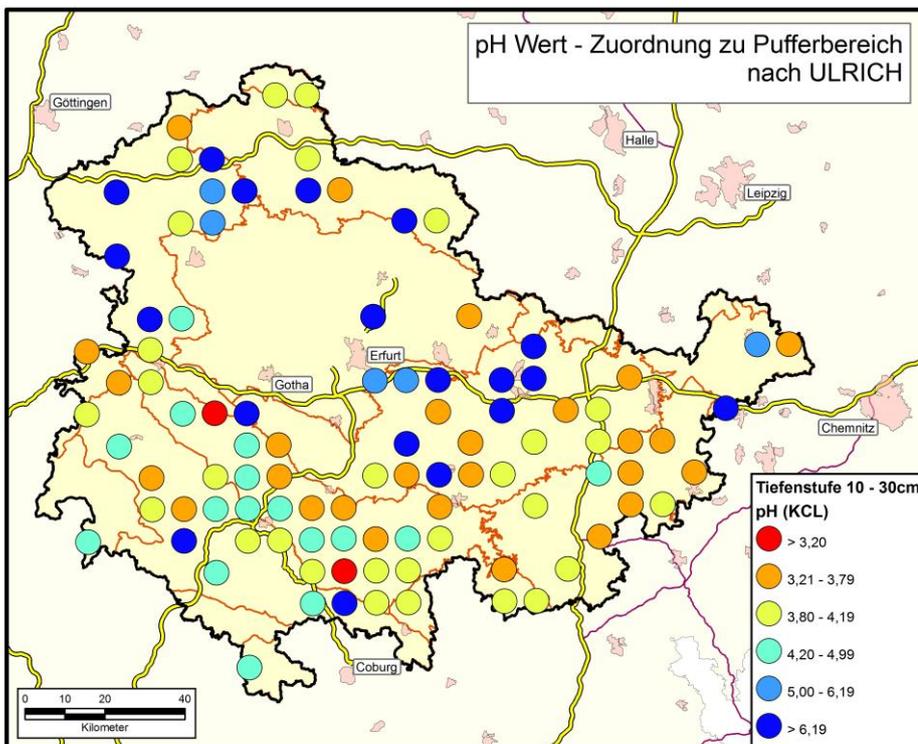
Karte 74.



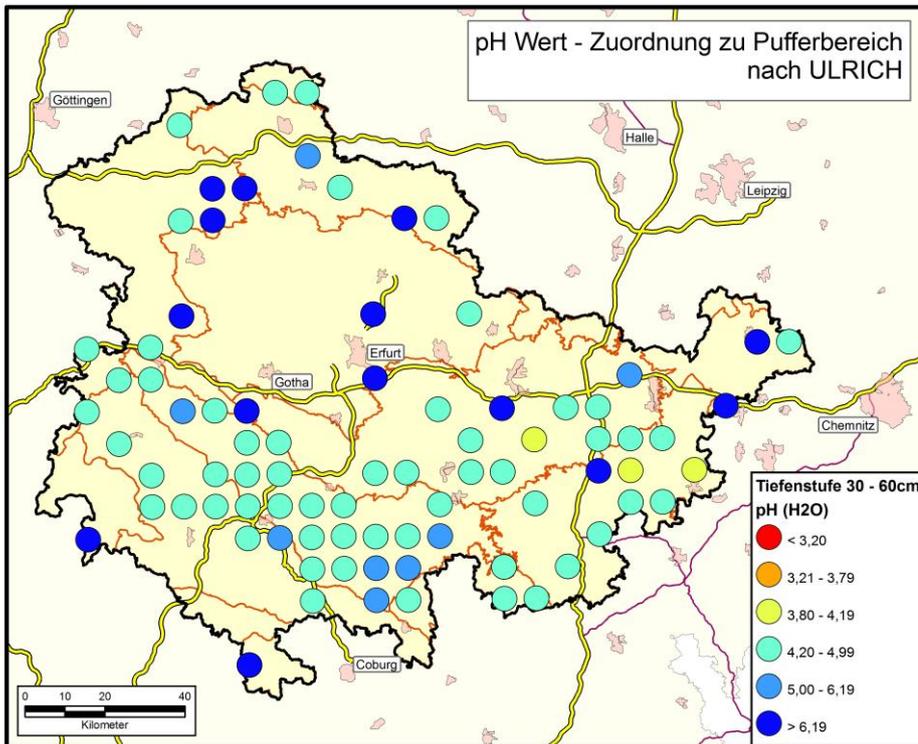
Karte 75.



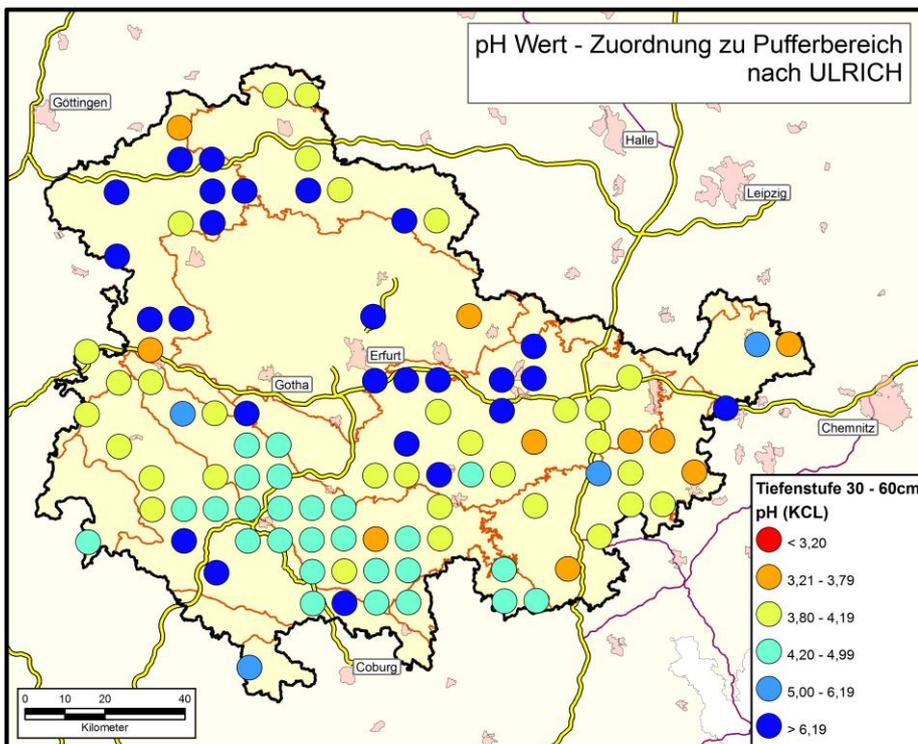
Karte 76.



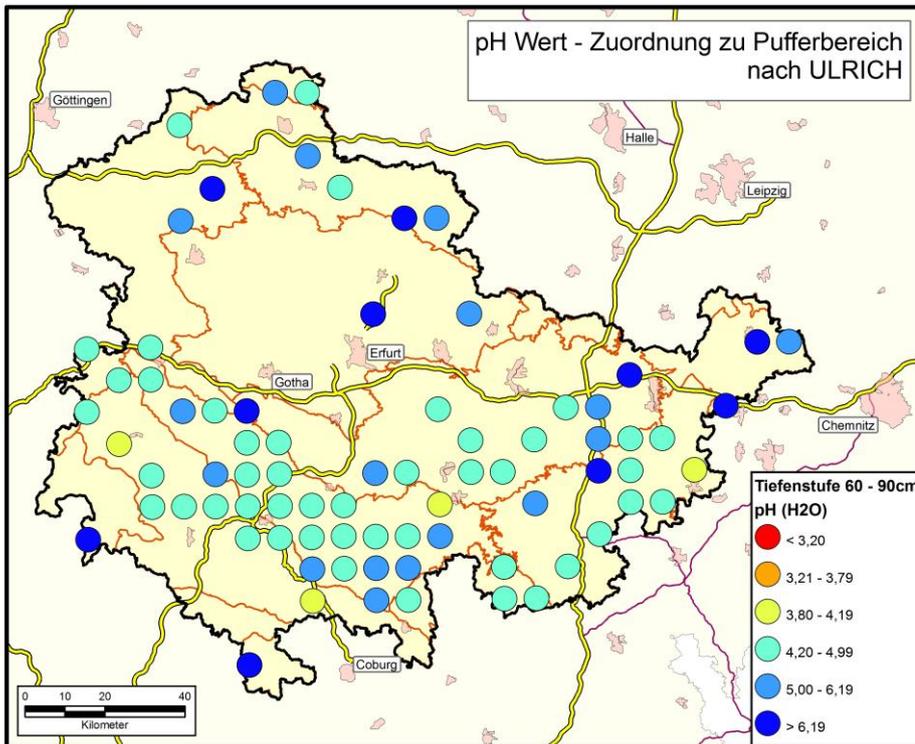
Karte 77.



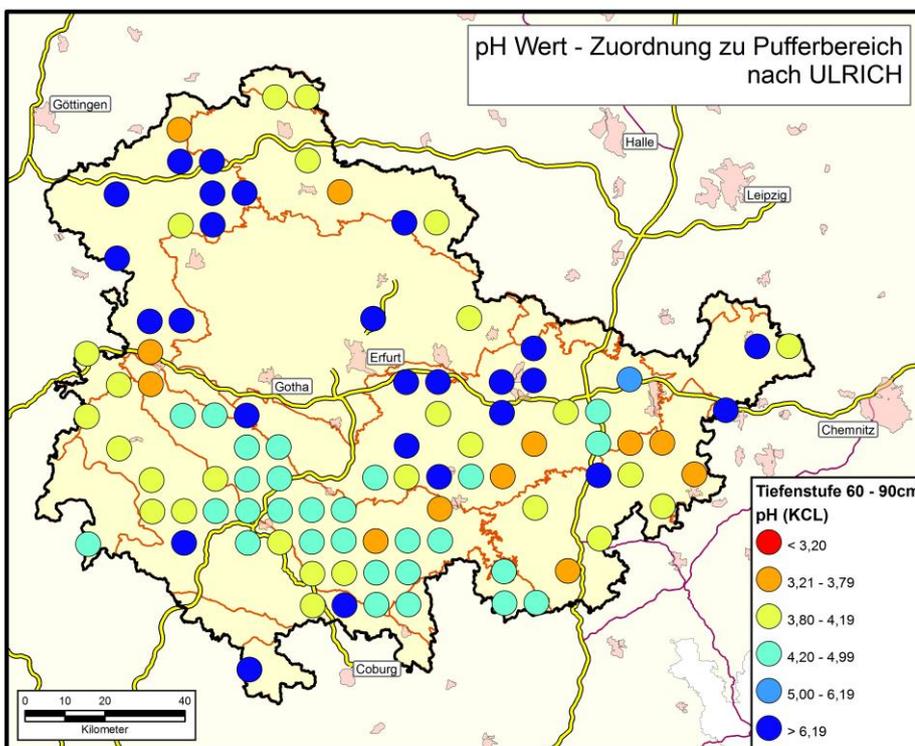
Karte 78.



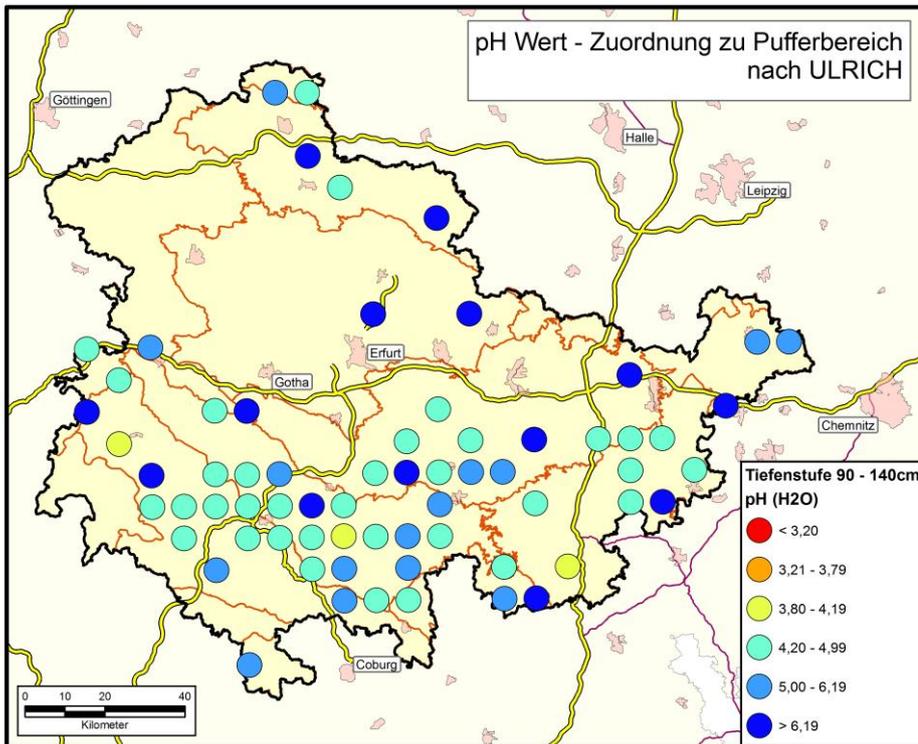
Karte 79.



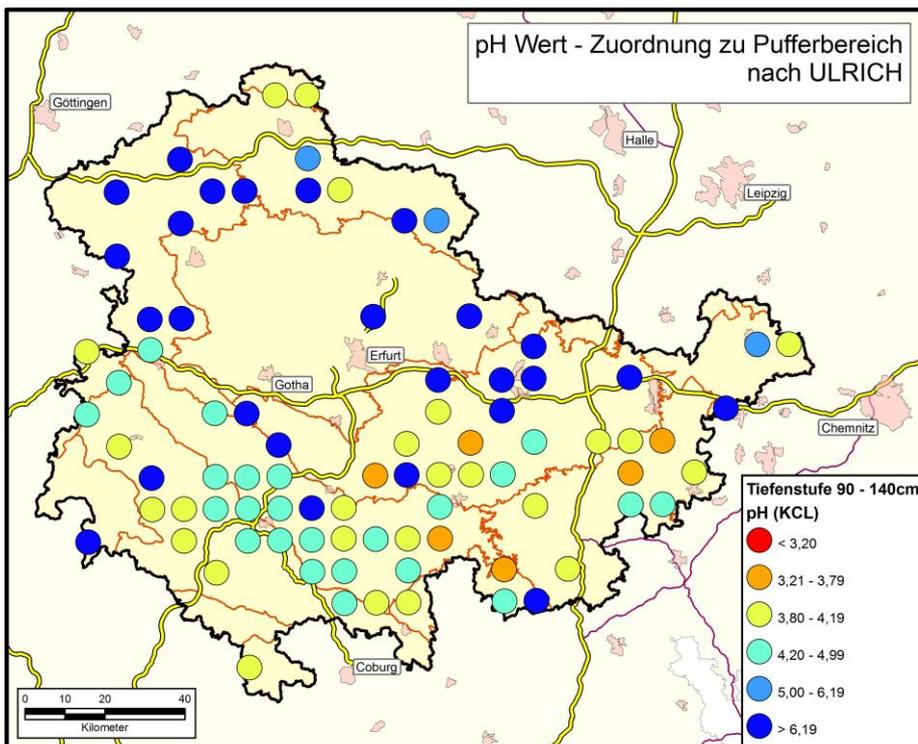
Karte 80.



Karte 81.



Karte 82.



Karte 83.

## 4.2 Kationenaustausch

Unter dem Begriff Kationenaustausch versteht man den Austausch oberflächennaher, an Bodenpartikeln bzw. Kolloiden gebundenen Kationen mit der sie umgebenden Bodenlösung. Tonminerale, Humus, einige eisen- und aluminiumhaltige Mineralien fungieren dabei als Austauscher. Sie weisen meist negative Ladungen auf, an die sie Kationen des Bodenwassers locker binden und somit Auswaschungen von Nährstoffen reduzieren. Demnach beruht der Kationenaustausch auf einem dynamischen Gleichgewicht zwischen den Kationen der Bodenlösung und negativ geladenen Bodenpartikeln. Austauschbare Kationen können neben Kationenbasen wie Ca, Mg, K und Na auch in die Kationensäuren Al, Fe, Mn und H sein. Das Maß für die Fähigkeit zum Kationenaustausch ist die Kationenaustauschkapazität (KAK).

Nach SCHACHTSCHABEL et al. (1998) bezeichnet man die KAK bei pH-Werten von 7 – 7,5 gewöhnlich als potentielle KAK ( $A_{k_{pot}}$ ). Dies sind die höchsten pH-Werte, welche beim Vorhandensein von  $CaCO_3$  erreicht werden können, so dass sich die Ermittlung der  $KAK_{pot}$  ausschließlich auf carbonathaltige Böden bezieht. Alle diejenigen KAKs, welche bei einem definierten bzw. jeweiligen pH-Wert wirksam sind, werden als effektive Austauschkapazität ( $KAK_{eff}$ ) bezeichnet und beziehen sich auf carbonatfreie Böden.

### 4.2.1 Kationenaustauscherkapazität – KAK

Die bei carbonatfreien Mineralbodenproben untersuchte effektive KAK (vgl. Tab.101 und 102) hat eine große Streubreite und reicht von ca. 7 bis 245  $\mu\text{mol l}^{-1}/\text{g}$ . Weiterhin ist ersichtlich, dass sich die höchsten  $KAK_{eff}$ -Werte in den obersten Tiefenstufen des Mineralbodenkörpers einstellen. Dieser Sachverhalt kann womöglich auf höhere Humusgehalte und somit bessere Austauscher-Eigenschaften des Oberbodens (Tiefenstufe 0-5 und 5-10) zurückgeführt werden.

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb. 81 und 82) zeigt sich, dass die Werte der effektiven KAK zwischen den Jahren 1996 und 2009 sich in etwa verdoppelt haben, wobei sich eine Abnahme mit zunehmender Bodentiefe ergibt.

Tabelle 101: Effektive Kationenaustauscherkapazität ( $KAK_{eff}$ ) [ $\mu\text{mol IÄ/g}$ ] (BZE II)

$KAK_{eff}$		Verteilung der Gesamthäufigkeit							
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
1	0-5	74	23,80	58,00	98,00	124,00	144,00	182,00	245,00
2	5-10	74	11,90	48,00	71,00	93,00	116,00	148,00	238,60
3	10-30	73	15,90	40,00	55,00	70,00	86,00	127,00	175,60
4	30-60	78	16,00	30,00	43,00	57,00	68,00	88,00	245,70
5	60-90	68	11,80	23,00	40,00	45,00	66,00	98,00	206,20
6	90-140	64	7,600	21,00	37,00	42,00	58,00	83,00	146,50

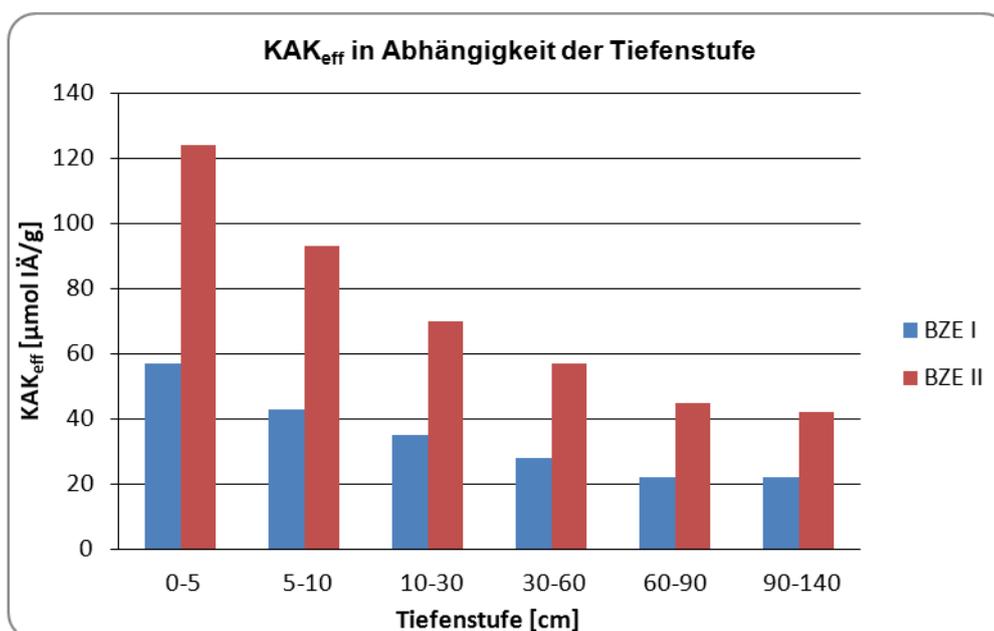


Abbildung 81: Entwicklung der  $KAK_{eff}$  in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Die bei carbonathaltigen Mineralbodenproben untersuchte potenzielle KAK (Tabellen ) bietet im Vergleich zur effektiven KAK deutlich höhere Werte. Auch hier reicht die Streuung von ca. 23 bis 680  $\mu\text{mol IÄ/g}$ . Die höchsten Werte sind innerhalb der Tiefenstufe 30-90 cm und die niedrigsten in der Tiefenstufe 5-30 cm vertreten.

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (Abb. ) zeigt sich, dass die Werte der potenziellen KAK zwischen den Jahren 1996 und 2009 in den Tiefenstufen 0-30 cm sich ca. um die Hälfte verringert hat, wobei Zunahmen in den Tiefenstufen 60-140 cm zu verzeichnen sind.

Dieser Sachverhalt kann womöglich auf Verlagerungsprozesse in den Oberbodenhorizonten oder auf Messfehler zurückgeführt werden.

Tabelle 102: potentielle Kationenaustauscherkapazität ( $AK_{pot}$ ) [ $\mu\text{mol IÄ/g}$ ] (BZE II)

$AK_{pot}$		Verteilung der Gesamthäufigkeit							
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
1	0-5	5	74,00	126,8	189,6	231,0	305,1	374,2	403,6
2	5-10	5	78,40	123,7	170,1	194,4	240,3	323,0	401,3
3	10-30	10	44,90	114,4	141,4	185,0	210,5	501,9	655,5
4	30-60	15	31,80	115,3	162,7	274,6	502,9	627,7	712,4
5	60-90	12	25,00	135,7	177,7	321,7	482,2	559,9	682,9
6	90-140	16	22,90	114,1	192,8	218,6	454,7	525,3	585,0

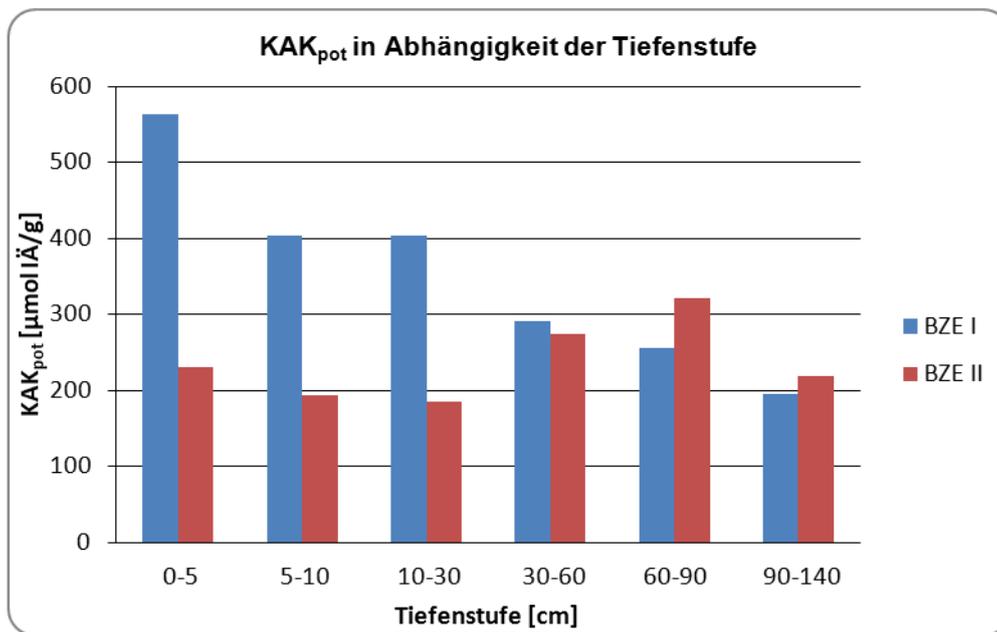


Abbildung 82: Entwicklung der  $KAK_{pot}$  in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Insgesamt ist festzustellen, dass von Carbonatgestein geprägte Standorte aufgrund ihres hohen Anteils an Kationenbasen (v.a. Ca) eine hohe Austauschkapazität haben. Auch auf den von eutrophen Silikatgesteinen und Schlufflehmen dominierten Standorten sind relativ hohe Werte anzutreffen. Über eine geringe bis mittlere Austauschkapazität verfügen v.a. saure Substrate, wie dies bei Schiefer und von Rotliegendem geprägten Standorten gegeben ist. Die niedrigsten Werte werden auf Böden des Buntsandsteins erreicht.

## 4.2.2 Austauschbare Kationen

Obwohl die Gesamtaustauscherkapazität ein wichtiges Maß für die Fähigkeit des Austausches von Kationen ist, so können hieraus jedoch keine Aussagen darüber abgeleitet werden, in welchem Verhältnis austauschbare Kationen an der Austauschkapazität beteiligt sind. Deshalb sind in den folgenden Tabellen 103 und 104 die Verteilung der Gesamthäufigkeit austauschbarer Kationen sowie der prozentuale Anteil gegenüber der Gesamtaustauschkapazität aufgeführt.

Tabelle 103 : Verteilung der Gesamthäufigkeit der austauschbaren Kationen [ $\mu\text{mol IÄ/g}$ ] (BZE II)

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
<b>Calcium - Ca</b>									
1	0-5	79	0,30	4,61	8,12	14,50	23,37	68,76	370,30
2	5-10	79	0,20	1,47	3,19	5,10	7,74	28,20	378,80
3	10-30	83	0,20	0,90	2,17	3,30	6,82	42,85	636,80
4	30-60	93	0,20	0,58	1,60	2,50	5,68	72,08	694,40
5	60-90	80	0,20	0,30	1,27	2,90	11,40	66,77	659,70
6	90-140	80	0,20	0,40	1,83	4,80	18,84	101,32	574,30
<b>Magnesium - Mg</b>									
1	0-5	79	0,80	1,97	3,13	4,40	9,47	19,20	68,20
2	5-10	79	0,20	1,07	1,60	2,40	4,17	9,80	72,20
3	10-30	83	0,20	0,50	0,90	1,40	2,63	6,37	54,90
4	30-60	93	0,20	0,48	0,70	1,20	2,52	8,98	77,70
5	60-90	80	0,20	0,30	0,80	1,45	5,57	24,31	83,00
6	90-140	80	0,20	0,30	1,50	4,30	10,94	39,26	87,30
<b>Kalium - K</b>									
1	0-5	79	0,20	1,00	1,40	1,70	2,40	4,43	12,50
2	5-10	79	0,20	0,70	1,00	1,20	1,57	2,56	6,50
3	10-30	83	0,20	0,60	0,80	1,10	1,60	3,47	9,20
4	30-60	93	0,20	0,60	1,00	1,30	1,78	3,30	8,60
5	60-90	80	0,20	0,50	1,00	1,35	1,80	3,12	11,20
6	90-140	80	0,20	0,60	0,97	1,45	1,87	2,90	9,40
<b>Natrium - Na</b>									
1	0-5	79	0,20	0,20	0,30	0,40	0,40	0,60	1,50
2	5-10	79	0,20	0,2	0,20	0,30	0,40	0,50	1,80
3	10-30	83	0,20	0,20	0,20	0,30	0,40	0,60	1,30
4	30-60	93	0,20	0,20	0,20	0,20	0,30	0,60	1,20
5	60-90	80	0,20	0,20	0,20	0,20	0,30	0,60	1,70
6	90-140	80	0,10	0,20	0,20	0,20	0,34	0,70	2,30

<b>Verteilung der Gesamthäufigkeit</b>									
<b>Code</b>	<b>Tiefenstufe</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Min</b>	<b>15%</b>	<b>35%</b>	<b>Med</b>	<b>65%</b>	<b>85%</b>	<b>Max</b>
<b>Aluminium - Al</b>									
<b>1</b>	<b>0-5</b>	79	0,2	7,75	34,78	56,3	88,82	120,13	195,3
<b>2</b>	<b>5-10</b>	79	0,2	20,45	44,01	60,8	85,19	124,73	184,4
<b>3</b>	<b>10-30</b>	83	0,2	16,33	35,92	44,7	66,16	92,7	143,2
<b>4</b>	<b>30-60</b>	93	0,2	5,64	26,7	32,9	51,34	64,78	119,3
<b>5</b>	<b>60-90</b>	80	0,2	9,25	18,9	27,75	37,44	61,71	99
<b>6</b>	<b>90-140</b>	80	0,2	1,41	10,1	20,95	28,05	45,1	70,5
<b>Eisen - Fe</b>									
<b>1</b>	<b>0-5</b>	79	0,2	0,2	1,23	2,2	3,97	6,41	19
<b>2</b>	<b>5-10</b>	79	0,2	0,27	0,9	1,4	2,4	4,13	15,8
<b>3</b>	<b>10-30</b>	83	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	2,31	9,3
<b>4</b>	<b>30-60</b>	93	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	1,44	7,6
<b>5</b>	<b>60-90</b>	80	0,2	0,2	0,2	0,2	0,44	1,2	5,5
<b>6</b>	<b>90-140</b>	80	0,2	0,2	0,2	0,2	0,24	0,9	7,5
<b>Mangan - Mn</b>									
<b>1</b>	<b>0-5</b>	79	0,2	0,2	0,43	1	2,45	5,4	30,3
<b>2</b>	<b>5-10</b>	79	0,2	0,2	0,5	1	1,97	3,23	18,8
<b>3</b>	<b>10-30</b>	83	0,2	0,2	0,5	0,7	1,33	2,17	11,2
<b>4</b>	<b>30-60</b>	93	0,2	0,2	0,2	0,4	0,7	1,2	5,5
<b>5</b>	<b>60-90</b>	80	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	1,12	5,8
<b>6</b>	<b>90-140</b>	80	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,9	2,7
<b>Wasserstoff - H</b>									
<b>1</b>	<b>0-5</b>	79	0,2	0,44	3,56	4,6	6,35	11,88	39,1
<b>2</b>	<b>5-10</b>	79	0,2	0,2	1,33	2,1	3,24	6,4	15,6
<b>3</b>	<b>10-30</b>	83	0,2	0,2	0,2	0,2	0,83	1,84	8,9
<b>4</b>	<b>30-60</b>	93	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,9	9,2
<b>5</b>	<b>60-90</b>	80	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,72	12,6
<b>6</b>	<b>90-140</b>	80	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,52	7

Tabelle 104 : Verteilung der Gesamthäufigkeit der austauschbaren Kationen [%] (BZE II)

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
<b>Calcium – Ca</b>									
1	0-5	79	0,22	2,88	8,04	12,53	16,72	44,86	93,34
2	5-10	79	0,16	2,20	4,32	5,36	9,14	20,96	94,39
3	10-30	83	0,18	1,43	3,22	4,49	8,76	35,24	97,15
4	30-60	93	0,17	1,22	2,85	5,16	9,04	39,36	98,30
5	60-90	80	0,34	1,11	3,19	7,03	14,04	53,63	98,14
6	90-140	80	0,51	1,57	3,96	9,00	23,97	62,97	98,85
<b>Magnesium – Mg</b>									
1	0-5	79	1,15	2,06	3,34	4,34	7,08	11,91	29,22
2	5-10	79	0,43	1,32	2,47	3,28	4,11	6,70	37,56
3	10-30	83	0,18	0,84	1,71	2,49	3,26	5,10	31,26
4	30-60	93	0,18	0,87	1,55	2,37	2,96	5,98	55,85
5	60-90	80	0,23	0,97	1,62	2,68	4,45	21,57	42,94
6	90-140	80	0,53	0,136	3,02	7,10	14,64	32,42	54,47
<b>Kalium – K</b>									
1	0-5	79	0,15	0,99	1,48	1,71	2,39	3,51	6,13
2	5-10	79	0,34	0,86	1,27	1,58	1,93	3,37	7,89
3	10-30	83	0,14	0,94	1,38	1,73	2,25	3,30	7,52
4	30-60	93	0,23	0,87	1,84	2,33	2,66	3,34	6,67
5	60-90	80	0,23	1,14	1,99	2,64	2,86	3,97	6,45
6	90-140	80	0,24	0,96	1,89	2,56	2,95	4,34	10,00
<b>Natrium – Na</b>									
1	0-5	79	0,12	0,20	0,27	0,33	0,39	0,57	1,40
2	5-10	79	0,13	0,20	0,29	0,35	0,43	0,65	1,85
3	10-30	83	0,13	0,23	0,35	0,39	0,51	0,72	2,13
4	30-60	93	0,12	0,26	0,39	0,52	0,63	0,86	2,52
5	60-90	80	0,14	0,32	0,46	0,56	0,67	1,02	3,43
6	90-140	80	0,14	0,36	0,50	0,56	0,71	1,25	2,63
<b>Aluminium – Al</b>									
1	0-5	79	0,12	3,83	21,47	48,32	65,12	78,71	89,89
2	5-10	79	0,13	8,41	68,30	76,00	81,14	88,20	95,62
3	10-30	83	0,15	8,96	69,51	79,71	86,51	92,52	97,19
4	30-60	93	0,12	3,72	69,44	81,75	87,37	92,56	96,64
5	60-90	80	0,14	7,80	44,43	78,45	85,54	92,29	96,49
6	90-140	80	0,14	0,84	9,36	55,70	75,68	89,30	95,37

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
<b>Eisen – Fe</b>									
1	0-5	79	0,12	0,51	1,64	2,82	3,52	5,51	11,45
2	5-10	79	0,11	0,41	1,28	1,79	3,23	5,69	13,67
3	10-30	83	0,11	0,25	0,40	0,79	1,30	3,27	9,52
4	30-60	93	0,12	0,27	0,39	0,52	0,85	2,51	8,62
5	60-90	80	0,12	0,29	0,48	0,69	0,98	1,98	4,72
6	90-140	80	0,14	0,25	0,45	0,67	0,92	1,79	17,99
<b>Mangan – Mn</b>									
1	0-5	79	0,12	0,26	0,61	0,84	1,76	3,73	25,83
2	5-10	79	0,12	0,34	0,63	1,16	1,84	3,38	22,87
3	10-30	83	0,13	0,32	0,72	1,19	1,59	2,54	16,62
4	30-60	93	0,17	0,37	0,65	0,83	1,23	1,80	4,37
5	60-90	80	0,12	0,35	0,55	0,82	1,09	2,03	4,74
6	90-140	80	0,13	0,36	0,53	0,75	1,13	1,68	3,66
<b>Wasserstoff – H</b>									
1	0-5	79	0,12	0,67	2,32	3,52	6,43	12,24	36,75
2	5-10	79	0,11	0,34	1,28	2,62	3,89	7,97	39,56
3	10-30	83	0,13	0,20	0,37	0,62	1,02	3,08	8,18
4	30-60	93	0,12	0,25	0,34	0,47	0,69	1,34	14,77
5	60-90	80	0,14	0,27	0,43	0,49	0,73	1,48	15,33
6	90-140	80	0,14	0,34	0,46	0,58	0,88	1,70	9,49

## Calzium – Ca

Aufgrund seiner chemischen Wertigkeit ( $\text{Ca}^{2+}$ ) wird Calzium bevorzugt am Austausch er eingetauscht. Weiterhin kann Calzium infolge seines relativ reichlichen Vorkommens als eines der vorherrschenden basischen Kationen angesehen werden. In Abhängigkeit verschiedener geologischer Ausgangssubstrate ist sein Gehalt ebenso breit gestreut. Die höchsten Werte werden in den Tiefenstufen 0-30 cm erreicht.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II so zeigt sich, dass es zwischen den Jahren 1996 und 2009 insgesamt zu einem Anstieg der Ca-Kationengehalte gekommen ist. Der Gehalt austauschbarer Ca-Kationen nimmt mit zunehmender

Tiefe bis 90 cm ab, jedoch bis 140 cm wieder leicht zu, wie dies auch bereits bei der BZE I festgestellt wurde.

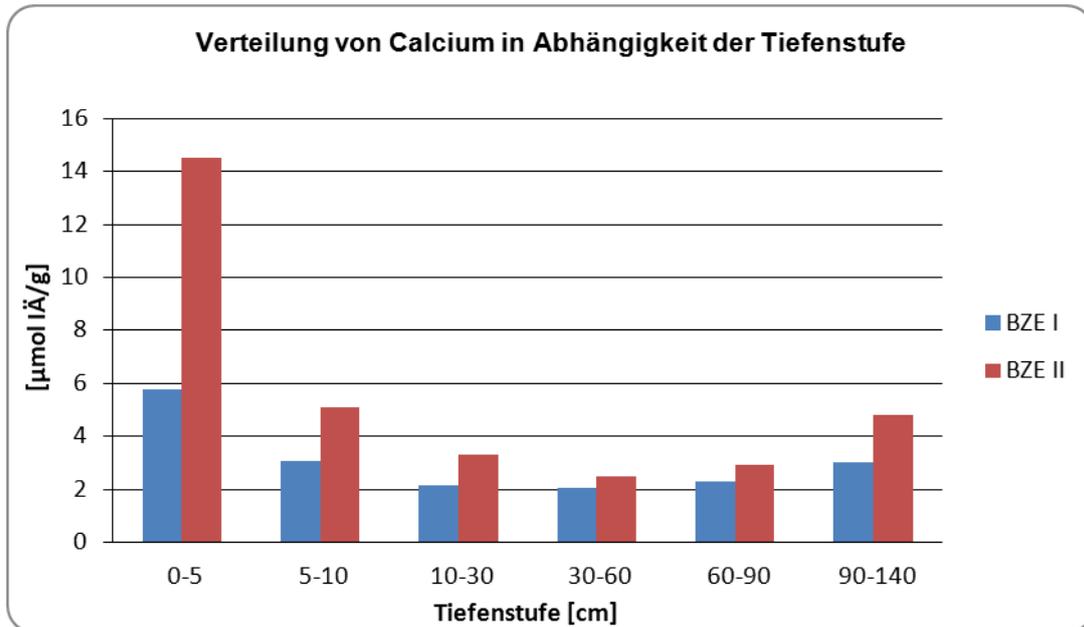


Abbildung 83: Entwicklung der Verteilung von Calcium in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

## Magnesium – Mg

Trotz der gleicher chemischen Wertigkeit wie Calcium, wird Magnesium ( $Mg^{2+}$ ) aufgrund seiner niedrigeren Bindungsenthalpie leichter vom Austauscher absorbiert und gelöst. Auch der Gehalt an austauschbarem Magnesium weist eine große Streuung auf. Es sind Werte von  $0,18 \mu\text{mol IÄ/g}$  –  $54,47 \mu\text{mol IÄ/g}$  gemessen worden. Die durchschnittlich höchsten Werte werden in der Tiefenstufe 0-5 cm erzielt. In den anschließenden Tiefenstufen 5-60cm fällt der Mg-Gehalt weiter ab, bevor er wieder ansteigt und in der Tiefenstufe 90-140 cm ähnliche Werte wie in Stufe 0-5 cm erreicht. .

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II so zeigt sich, dass es zwischen den Jahren 1996 und 2009 insgesamt zu einem Anstieg der Mg-Kationen gekommen ist und im Tiefenstufenverlauf ebenfalls vorhergehende Tendenzen (BZE I) widerspiegelt, obwohl 2009 in der Tiefenstufe 60-90 cm der Mg-Gehalt von 1996 unterschritten wird. Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass es bis in eine Tiefe von 60 cm zu einer Abnahme des Mg-Gehaltes kommt, bevor dieser wieder ansteigt.

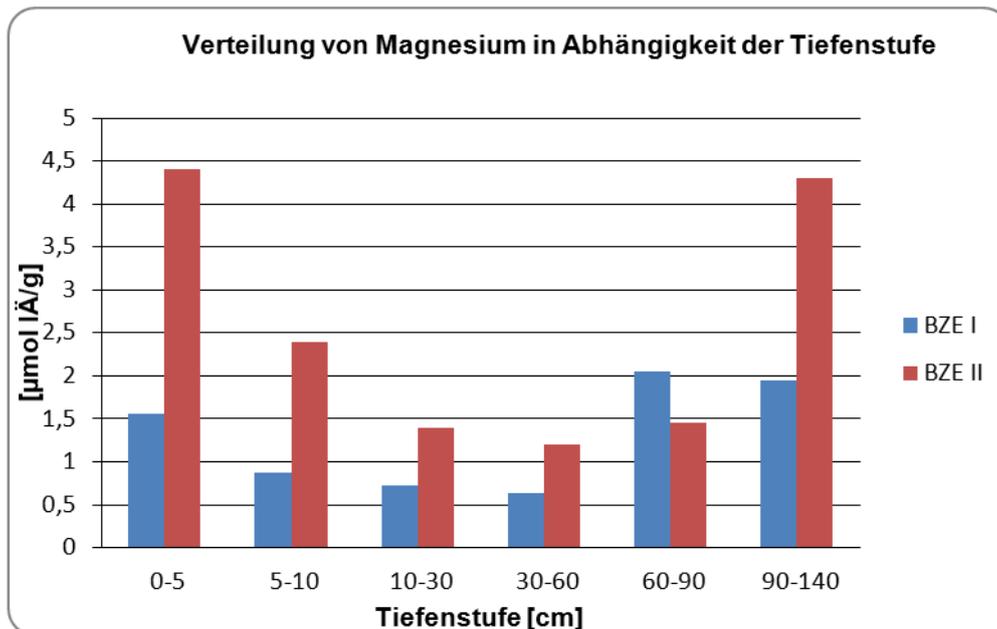


Abbildung 84: Entwicklung der Verteilung von Magnesium in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Nach BENECKE (1990) kann die Summe der Anteile von austauschbaren Calcium und Magnesium, ähnlich wie die Basensättigung für die Beurteilung der Elastizität von Substraten in Hinblick auf die Säuretoxizität herangezogen werden. Als Klassifizierung gilt:

Tabelle 105: Klassifikation der prozentualen Anteile von Ca und Mg nach BENECKE (1990)

< 5 %	Sehr geringe Elastizität
5 % - 15 %	Geringe Elastizität
15 % - 50 %	Hohe Elastizität
> 50 %	Sehr hohe Elastizität

Es zeigt sich, dass in allen Tiefenstufen etwa 10% aller BZE-Probepunkte eine sehr geringe, 40 % ein geringe und ca. 10 % eine hohe Elastizität gegenüber der Säuretoxizität aufweisen. Daneben weisen ca. 25 % aller Tiefenstufen auf sehr hohe Elastizitäten hin.

Tabelle 106: Austauschbares Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) in % (BZE II)

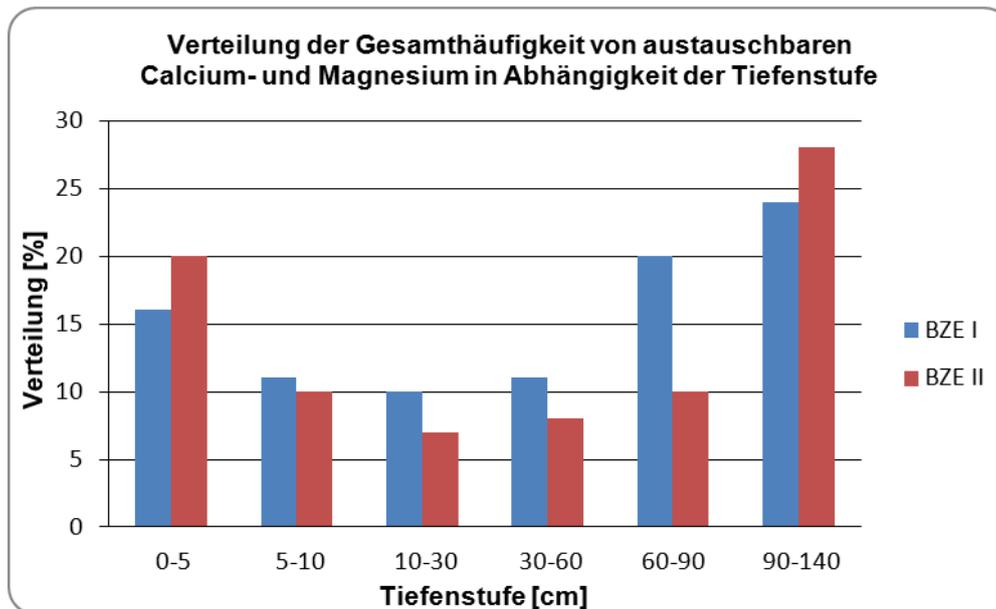
Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
Calcium (Ca) + Magnesium (Mg)									
1	0-5	79	1,00	9,00	15,00	20,00	37,00	73,00	97,00
2	5-10	79	1,00	4,00	8,00	10,00	14,00	40,00	97,00
3	10-30	82	1,00	3,00	5,00	7,00	15,00	62,00	99,00
4	30-60	92	1,00	3,00	5,00	8,00	17,00	92,00	99,00
5	60-90	80	1,00	3,00	6,00	10,00	28,00	86,00	99,00
6	90-140	80	1,00	3,00	11,00	28,00	54,00	96,00	99,00

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Grundgesteine kann die für den Freistaat Thüringen aufgestellte Gliederung übernommen und bestätigt werden.

Tabelle 107: Elastizität gegenüber Säuretoxizität in Abhängigkeit des Grundgesteins

Carbonatgestein	Sehr hohe Elastizität	> 90 %
Eutrophe Silikatgesteine Schluffleheme	Hohe Elastizität	20 % – 50 %
Buntsandstein	geringe Elastizität	8 % – 15 %
Rotliegendes Schiefer	Sehr geringe Elastizität	~ 5 %

Betrachtet man die Ergebnisse der BZE I und BZE II im Vergleich, so fällt auf, dass in den Tiefenstufen 0-5 cm und 90-140 cm geringe Zunahmen der Werte zu verzeichnen sind, wobei sich in den übrigen Tiefenstufen unterschiedlich starke Abnahmen einstellten.

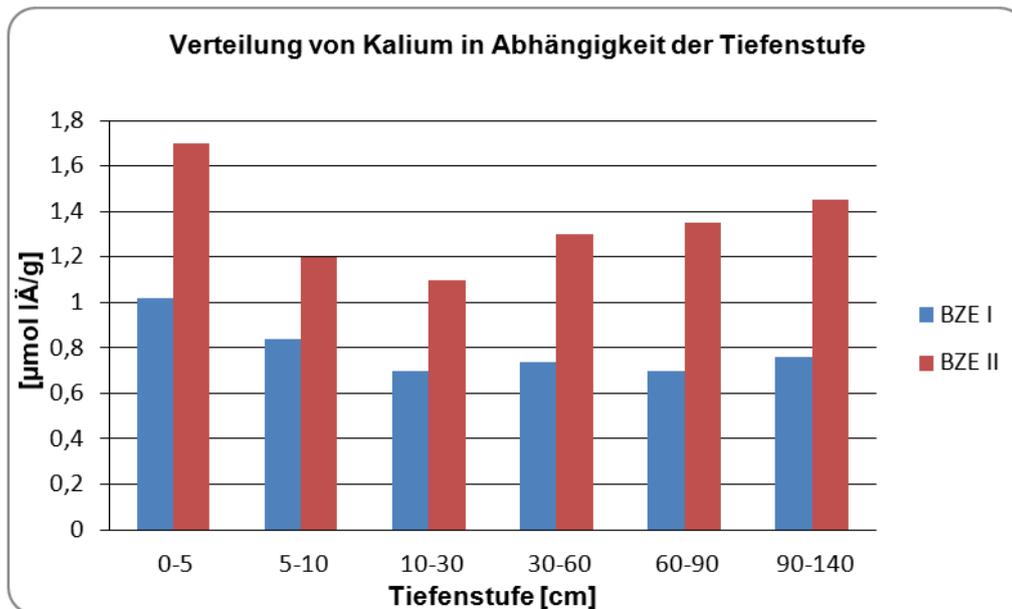


**Abbildung 85: Entwicklung der Verteilung der Gesamthäufigkeit von Magnesium und Calcium in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**

## Kalium – K

Kalium ist aufgrund seiner chemischen Wertigkeit ( $K^+$ ) reaktionsfreudig und sehr leicht vom Austauscher lösbar. Demnach hat es geringeren Einfluss auf die Austauscherkapazität als Magnesium und Calcium. Der Gehalt an Kalium schwankt zwischen  $0,20 \mu\text{mol IÄ/g}$  und  $12,50 \mu\text{mol IÄ/g}$ . Somit weist der Gehalt austauschbarer Kalium-Kationen geringere Schwankungen als Ca und Mg auf. Dies spiegelt sich auch in den Medianwerten wider. Demnach reichen diese von  $1,10 \mu\text{mol IÄ/g}$  bis  $1,70 \mu\text{mol IÄ/g}$ . Die durchschnittlich höchsten Werte werden in der Tiefenstufe 0-5 cm erzielt. Die Werte fallen bis zur Tiefenstufe 10-30 und steigen danach allmählich wieder an.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II so zeigt sich, dass es zwischen den Jahren 1996 und 2009 insgesamt zu einem deutlichen Anstieg der K-Kationen gekommen ist. Trotz des Anstieges des K-Kationen-Gehaltes können die im Jahr 1996 aufgezeigten Tendenzen in der Tiefenstufenfolge bestätigt werden.



**Abbildung 86: Entwicklung der Verteilung von Kalium in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**

## Natrium – Na

Ähnlich wie Kalium ist Natrium ( $\text{Na}^+$ ) ein einwertiges basisches Kation und aufgrund seiner Reaktionsfreudigkeit leicht vom Austauschler lösbar. Es hat im Vergleich zu allen anderen basischen Kationen die geringste Bindungsenthalpie, so dass es am leichtesten austauschbar und nur in geringer Konzentration in Mineralböden vertreten ist. Der Gehalt austauschbarer Natrium-Kationen kann aufgrund des Wertebereiches von  $0,1 \mu\text{mol IÄ/g}$  bis  $2,30 \mu\text{mol IÄ/g}$  als gering schwankend charakterisiert werden, das findet sich ebenfalls bei den Medianwerten ( $0,2 \mu\text{mol IÄ/g}$  –  $0,4 \mu\text{mol IÄ/g}$ ). Die durchschnittlich höchsten Werte werden in der Tiefenstufe 0-5 cm erzielt. Mit zunehmender Tiefenstufe sinkt der Natriumgehalt, wobei er in den Tiefenstufen 5-30 cm sowie in den Tiefenstufen 30-140 cm gleiche Werte aufweist.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II so zeigt sich, dass es insgesamt zu einem Anstieg der Na-Kationen gekommen ist. War es bei der BZE I die Tiefenstufe 90-140 cm, welche die höchsten Werte aufwies, so ist es im Rahmen der BZE II nun die Tiefenstufe 0-5 cm.

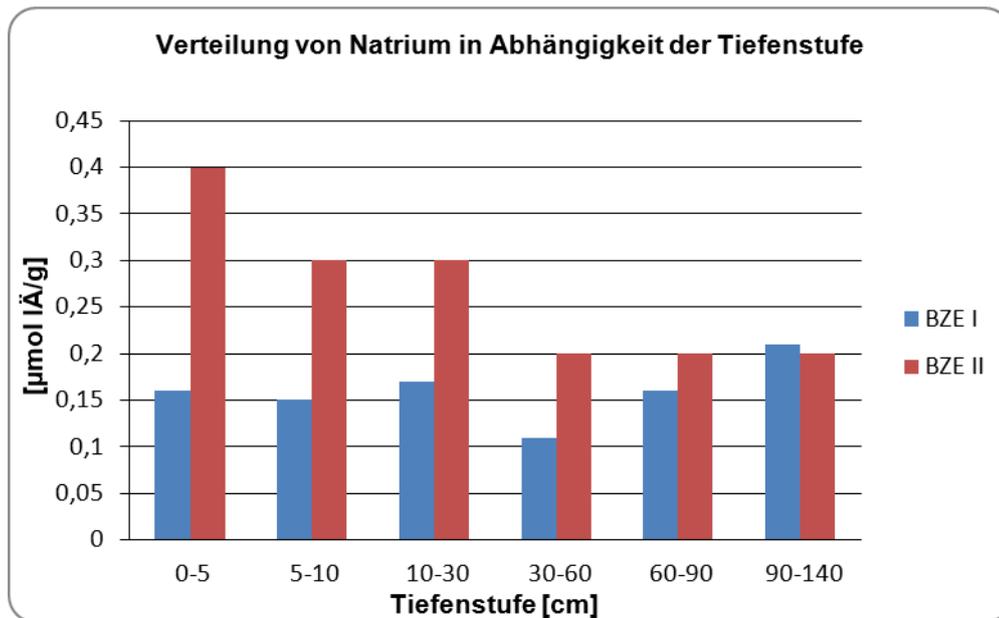


Abbildung 87: Entwicklung der Verteilung von Natrium in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

## Aluminium – Al

Als dreiwertiges Ion ist Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) im Boden weit verbreitet. Diese Kationensäure kann bei zu hoher Konzentration u.a. für eine reduzierte Calciumaufnahme und daraus entstehende Schädigungen verantwortlich sein. Neben Eisen ist es das in sauren und silikatisch geprägten Substraten am häufigsten vertretene Kation, wobei es bei schwach sauren Verhältnissen ( $> \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) 5,5$ ) nach BERGMANN (1993) nur selten vorkommt. Bei Werten  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 4,5$  sind massive Konzentrationserhöhungen die in der Bodenlösung zu erwarten, weil in diesem Pufferbereich Aluminium aus dem Festkörper des Bodens gelöst wird (ebenda). Wird es nun von Pflanzen aufgenommen, kann dies zu toxischen Wirkungen führen. Wird es über den Streufall in die Humusschicht transportiert, bestehen aufgrund seiner Ladungsenthalpie große Bindungskräfte zum Austausch, so dass Aluminium vor allem basische Kationen vom Ton-Humuskomplex verdrängt. Es kommt zur Akkumulation im Oberboden bei gleichzeitigem Basenverlust.

Der Gehalt austauschbarer Aluminium-Kationen ist starken Schwankungen unterzogen, welche sich in einem Wertebereich von  $0,20 \mu\text{mol IÄ/g}$  bis  $195,30 \mu\text{mol IÄ/g}$  zeigt. Dieser Sachverhalt findet sich ebenfalls bei den Medianwerten ( $20,95 \mu\text{mol IÄ/g} - 60,80 \mu\text{mol IÄ/g}$ ). Die durchschnittlich höchsten Werte werden in der Tiefenstufe 5-30 cm erzielt. Mit zunehmender Tiefenstufe sinkt der Aluminiumgehalt weiter ab, bis er in der Tiefenstufe 90-140 cm die geringsten Werte erreicht.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II, so ist insgesamt ein Anstieg der Al-Kationen festzustellen. Trotz des Anstieges des Al-Kationen-Gehaltes können

die bereits bei der BZE I aufgezeigten Tendenzen innerhalb der Tiefenstufenfolge bestätigt werden.

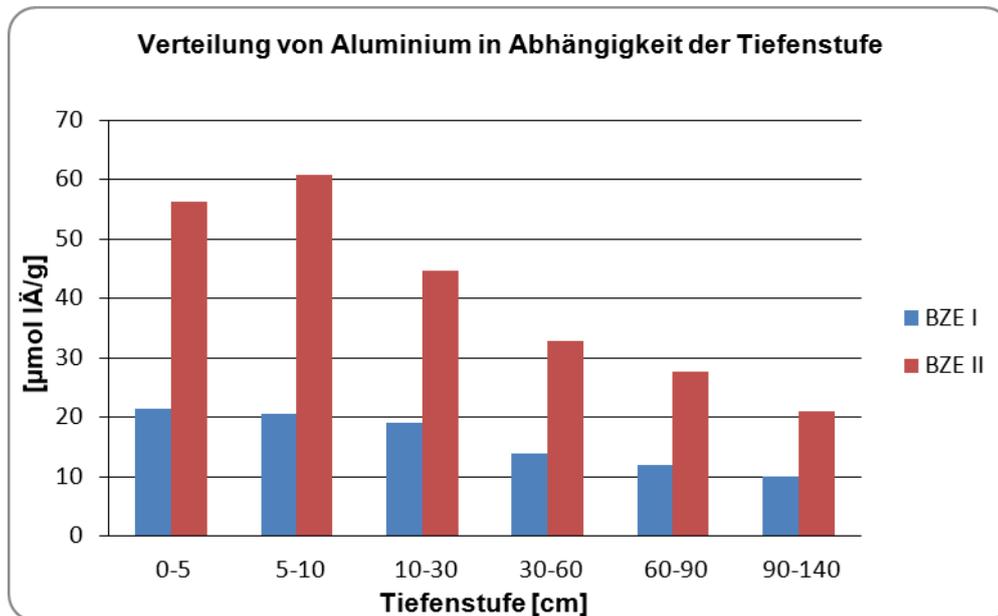


Abbildung 88: Entwicklung der Verteilung von Aluminium in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

## Mangan – Mn

Mangan ist aufgrund seiner chemischen Wertigkeit ( $Mn^{2+}$ ) zwar reaktionsfreudig, aber nicht so stark wie Aluminium am Kationenaustausch beteiligt. Obwohl diese Kationensäure eine höhere Ladungsenthalpie als andere basische Kationen aufweist, ist es doch nur gering in Austauschprozesse involviert. Die Manganverfügbarkeit ist vom Boden-pH abhängig und auf carbonatreichen Standorten reduziert (Vgl. BERGMANN 1993). Der Gehalt an Mangan schwankt zwischen  $0,20 \mu\text{mol IÄ/g}$  und  $30,3 \mu\text{mol IÄ/g}$ . Demnach weist der Gehalt austauschbarer Mangan-Kationen eine geringere Schwankung als Aluminium auf. Die Medianwerte reichen von  $0,2 \mu\text{mol IÄ/g}$  bis  $1 \mu\text{mol IÄ/g}$ . Im Oberboden, den Tiefenstufen 0-10 cm werden die durchschnittlich höchsten Mn-Werte erreicht. Diese Werte fallen mit zunehmender Tiefe weiter ab.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II so zeigt sich, dass es zwischen den Jahren 1996 und 2009 insgesamt zu einem deutlichen Anstieg der Mn-Kationen gekommen ist. Vor allem in den Tiefenstufen 0-10 cm verdreifachten sich die Werte. Auch in den folgenden Tiefenstufen wurden die Werte mehr als verdoppelt.

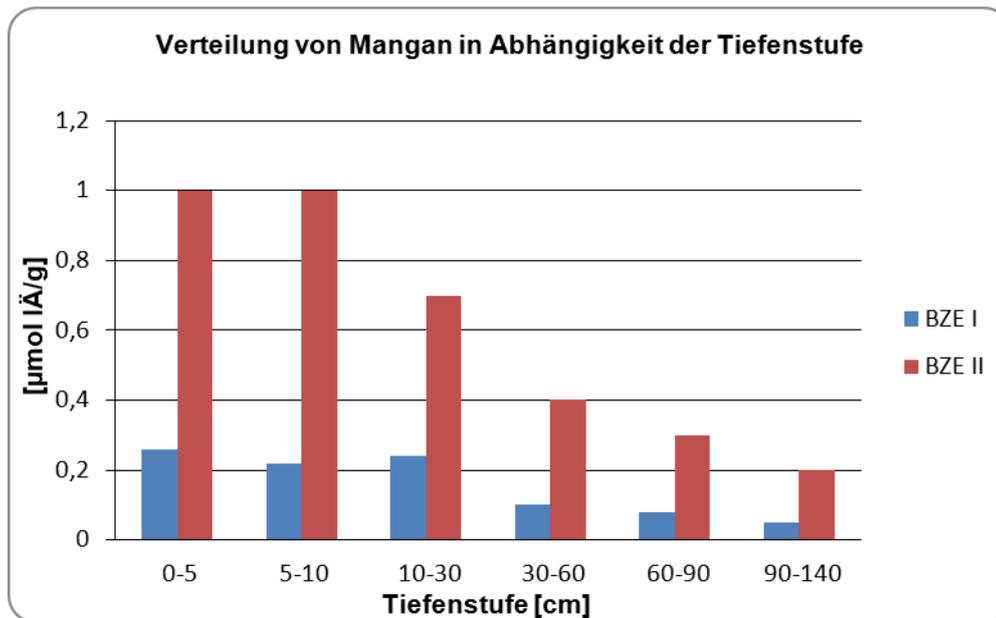


Abbildung 89: Entwicklung der Verteilung von Mangan in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

## Eisen – Fe

Eisen kann als dreiwertiges sowie zweiwertiges Ion - abhängig von der Belüftungssituation im Boden - vorhanden sein. Unter aeroben Bedingungen liegt Eisen meist als Eisen-3-Oxid-Verbindung vor, welche eine geringe Löslichkeit aufweist. Neben Aluminium ist es in sauren und silikatisch geprägten Substraten ein sehr häufig vertretenes Kation. Nach SCHACHTSCHABEL et al. (1998) ist bei Werten  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 3,5$  von einer Konzentrationserhöhung in der Bodenlösung auszugehen, da im Aluminium-Eisen-Pufferbereich vorrangig Eisen aus dem Festkörper des Bodens in die Lösung ausgetauscht wird. Der Gehalt austauschbarer Eisen-Kationen ist mäßigen Schwankungen unterzogen, welche sich in einem Wertebereich von  $0,2 \mu\text{mol IÄ/g}$  bis  $19 \mu\text{mol IÄ/g}$  und den Medianwerten ( $0,2 \mu\text{mol IÄ/g}$  –  $2,2 \mu\text{mol IÄ/g}$ ) widerspiegeln. Die durchschnittlich höchsten Werte werden in den oberen Schichten des Bodens erreicht und nehmen mit zunehmender Tiefenstufe weiter ab.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II, so zeigt sich insgesamt ein Anstieg der Fe-Kationen. Insgesamt haben sich die Werte pro Tiefenstufe mehr als verdreifacht.

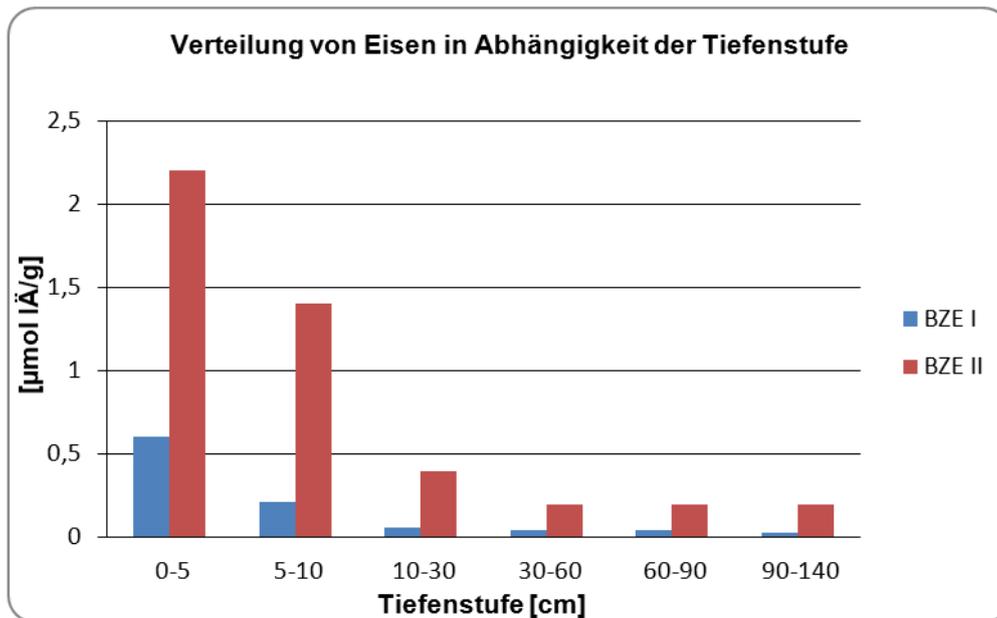


Abbildung 90: Entwicklung der Verteilung von Eisen in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

## Wasserstoff – H

Der einwertige Wasserstoff ( $H^+$ ) ist aufgrund seiner Ladungsenthalpie und Reaktionsfreudigkeit die am stärksten am Kationenaustausch beteiligte Kationensäure. Der Gehalt austauschbarer H-Kationen schwankt und ist für den Median mit dem Wertebereich von  $0,20 \mu\text{mol IÄ/g}$  bis  $4,60 \mu\text{mol IÄ/g}$  anzugeben. Die größten Gehalte werden im Oberboden der Tiefenstufe 0-5 cm erreicht und sinken zur Tiefenstufe 10-30 cm rasch ab. Ab der Tiefenstufe 30 cm treten keine weiteren Veränderungen im H-Gehalt auf.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II, so sind keine gravierenden Veränderungen im Gehalt austauschbarer H-Ionen eingetreten.

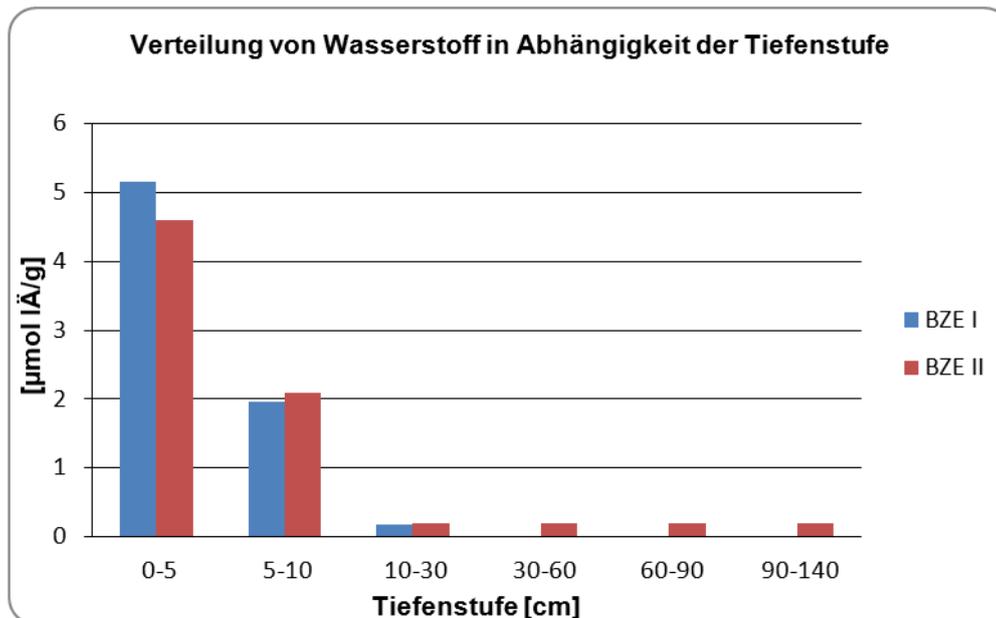


Abbildung 91: Entwicklung der Verteilung von Wasserstoff in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 4.2.3 Basensättigung

Nach WOLFF und RIECK (1997) charakterisiert die Basensättigung die Bodenfestphase hinsichtlich der Menge austauschbar gebundener basischer Kationen (Ca, Mg, K, Na) sowie Kationensäuren und beschreibt somit den Säure-Basenzustand eines Bodens (vgl. Tab.108 und 109). Demnach können Rückschlüsse auf chemische Prozesse der Lösungsphase gezogen und Standortseinschätzungen, unter Berücksichtigung des Ausgangssubstrats, in Bezug auf Säuretoxizität und Nährstoffmangel gemacht werden. Da bei konstantem pH-Wert im Solum unterschiedliche Basensättigungsgrade vorliegen können, scheint die Basensättigung ein geeigneterer Indikator für eine Bodenversauerung als der pH-Wert zu sein. Weiterhin gilt für alle Böden und Tiefenstufen gleichermaßen, dass die Gesamtheit basischer Kationen im überwiegenden Anteil durch Ca, gefolgt von Mg und K gestellt werden. Natrium ist kein Pflanzennährstoff und somit von untergeordneter Bedeutung.

In Hinblick auf das geologische Ausgangssubstrat können 3 Gruppen unterschieden werden. Gruppe 1 (Kalkböden) wird durch Kalksteinböden, die Gruppe 2 (eutrophe Böden) durch eutrophe Silikatgestein- und Schlufflehm Böden sowie die Gruppe 3 (saure Böden) durch Schiefer-, Rotliegend- und Sandsteinböden charakterisiert.

Tabelle 108: Basensättigung [%] in Abhängigkeit von Grundgestein und Tiefenstufe (BZE II)

Grundgesteine	Tiefenstufe [cm]					
	0-5	5-10	10-30	30-60	60-90	90-140
<b>Carbonatgestein (C)</b>	30,00	5,00	30,00	89,00	69,00	90,00
<b>Eutrophe Silikatgesteine (E)</b>	24,00	12,00	6,00	5,00	5,00	41,00
<b>Schlufflehme (L)</b>	75,00	29,00	37,00	58,00	84,00	91,00
<b>Schiefer (F)</b>	19,00	10,00	8,00	8,00	10,00	13,00
<b>Rotliegendes (R)</b>	20,00	10,00	8,00	8,00	11,00	32,00
<b>Buntsandstein (S)</b>	27,00	13,00	8,00	9,00	20,00	37,00

In Kalksteinböden sind in tieferen Bodenschichten (Tiefenstufe 30 – 140 cm) Basensättigungswerte von mindestens 60% gegeben. Die oberen Bodenschichten (Tiefenstufe 0-5, 5-10 und 10-30 cm) hingegen besitzen ein niedrigeres Niveau. Bei der Gruppe 2 werden neben der Tiefenstufe 0-5 cm hauptsächlich in tieferen Bodenschichten (Tiefenstufe 60-90 und 90-140 cm) höhere Basensättigungsverhältnisse angetroffen. Obwohl es zwischen Tiefenstufe 0-5 cm und 5-10 cm zu einem deutlichen Abfall der Basensättigung kommt, so steigt er zumindest bei Schlufflehmen mit zunehmender Bodentiefe wieder an, wobei die Basensättigung eutropher Silikatgesteine erst ab Tiefenstufe 90-140 sprunghaft ansteigt. Bei den in Gruppe 3 zusammengefassten silikatischen und sauer geprägten Böden zeigen sich keine solchen extremen Schwankungen. Auch hier fällt die Basensättigung im Oberboden (Tiefenstufe 0-5 cm) bis in die Tiefenstufe 30-60 cm ab, um anschließend wieder zuzunehmen. Die eindeutig größten Veränderungen innerhalb dieser Gruppe sind bei Buntsandstein gegeben.

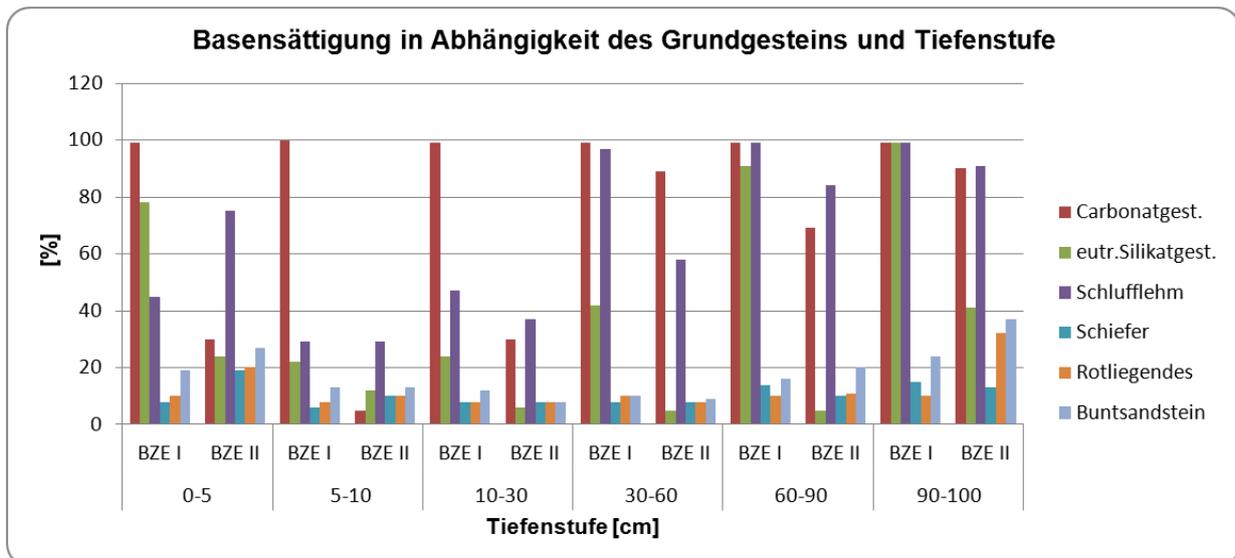


Abbildung 92: Entwicklung der Basensättigung in Abhängigkeit des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Im Vergleich der Ergebnisse der BZE I und BZE II zeigt sich, dass die Basensättigung der basenreichen Substrate (Carbonatgestein, eutrophe Silikatgesteine und Schlufflehme) abfallende Tendenzen insbesondere in den oberen Tiefenstufen aufweisen, während bei allen basenärmeren geologischen Substraten (Schiefer, Buntsandstein und Rotliegendem) die Basensättigungen als insgesamt zunehmend zu bewerten sind (vgl. Abb. 92).

Obwohl der leichte Anstieg der Basensättigung im Oberboden der basenarmen Grundgesteine durch abnehmende Versauerungstendenzen erklärt werden kann, bleiben die doch meist drastischen Rückgänge der Basensättigung v.a. bei eutrophen Silikatgestein und Carbonatgestein unbeantwortet.

Weiterhin soll die Sättigung von Kationensäuren (%) am Austausch beschrieben werden. Hierbei wurde auf die Darstellung von Carbonatgesteinsböden verzichtet.

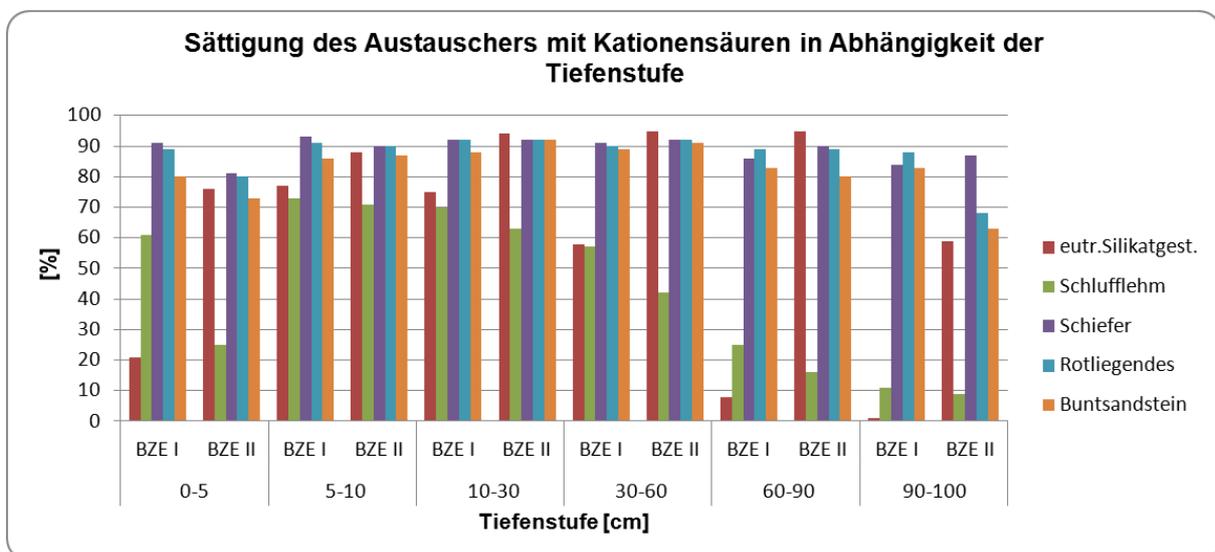
Tabelle 109: Sättigung des Austauschers mit Kationensäuren (%) (BZE II)

Grundgesteine	Tiefenstufe [cm]					
	0-5	5-10	10-30	30-60	60-90	90-140
<b>Eutrophe Silikatgesteine (E)</b>	76	88	94	95	95	59
<b>Schlufflehme (L)</b>	25	71	63	42	16	9
<b>Schiefer (F)</b>	81	90	92	92	90	87
<b>Rotliegendes (R)</b>	80	90	92	92	89	68
<b>Buntsandstein (S)</b>	73	87	92	91	80	63

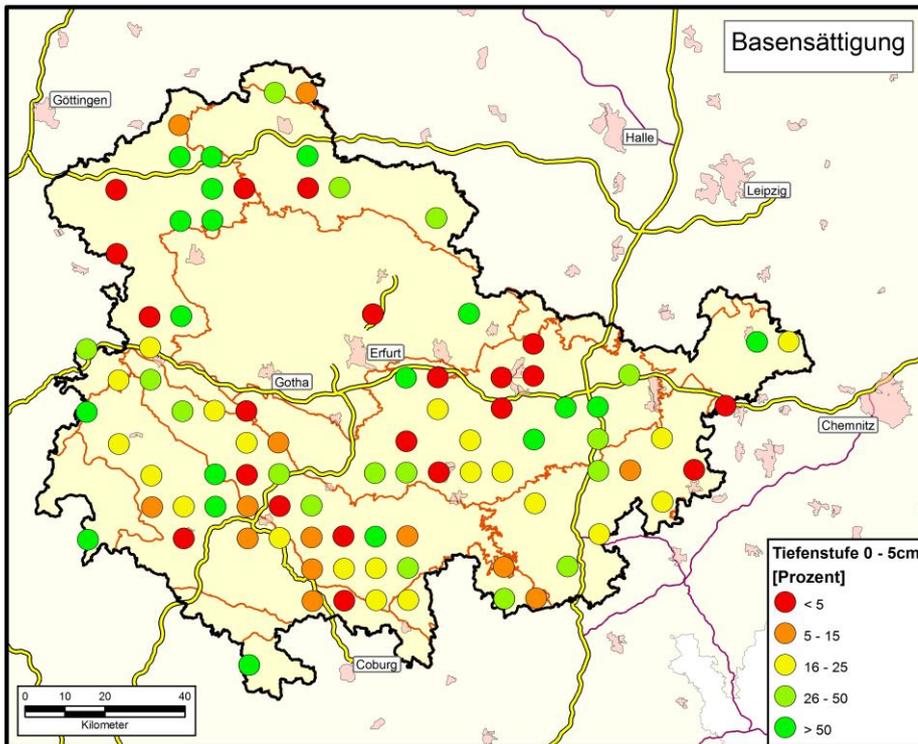
Es zeigt sich eine deutliche Differenzierung der Messergebnisse, so dass auch für deren Bewertung wieder eutrophe Silikatgesteine und Schlufflehme zur Gruppe der eutrophen Böden und Schiefer, Rotliegendes und Buntsandsteine zur Gruppe saurer Böden zugeordnet werden können. Bei der Gruppe der sauren Böden wird der Austauscher in sehr hohem Maße durchgängig mit säurebildenden Kationen belegt. Hier verhält es sich bei Schiefer und Rotliegendem je Tiefenstufe auch annähernd gleich. Ähnlich hohe Werte zeigen sich auch bei eutrophen Silikatgesteinen, wobei die Schlufflehme die mit Abstand geringsten Werte bzgl. der Austauschersättigung mit Kationensäuren aufweisen.

Im Vergleich der Ergebnisse der BZE I und BZE II zeigt sich, dass es insgesamt nur bei eutrophen Silikatgesteinen zu einer Zunahme der Sättigung von säurebildenden Kationen gekommen ist (vgl. Abb. 93). Dieser Sachverhalt deckt sich auch mit den eher rückläufigen Ergebnissen der Basensättigung. Weiterhin fällt auf, dass es bei Schieferstandorten zu keinen wesentlichen Veränderungen gekommen ist, so dass hier von gleichbleibenden Verhältnissen ausgegangen werden kann. Bei allen weiteren Gesteinstypen kam es zur Abnahme der Kationensäuresättigung am Austauscher.

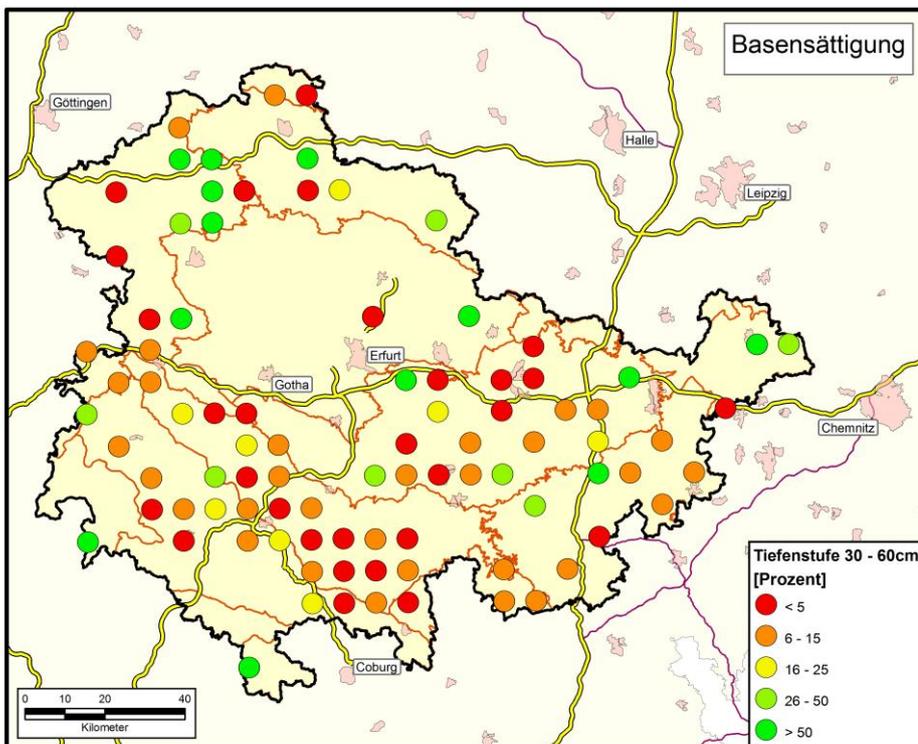
Bei den Ausgangsgesteinen Rotliegendes und Buntsandstein können u.a. Bodenschutzkalkungen sowie waldbauliche Maßnahmen als Gründe für ein Absinken der Werte angesehen werden.



**Abbildung 93: Entwicklung der Sättigung des Austauschers mit Kationen in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**



Karte 84.



Karte 85.

#### 4.2.4 Austauschbare Vorräte

Aufgrund bodenchemischer Prozesse gelangen einzelne Hauptnähr- und Spurenelemente vom Austauscher in die ihn umgebende Bodenlösung, so dass diese von Pflanzen aufgenommen werden können. Da die im Bodenwasser gelösten Kationen nicht den gesamten Vorrat an pflanzenverfügbaren Kationen repräsentieren, wurden die austauschbaren Vorräte für einzelne Bodenschichten ermittelt. Abweichend von der Nomenklatur geschah dies für die Tiefenstufen von 0 bis 30 cm, für 30 bis 60 cm, für 60 bis 90 cm und 90 bis 140 cm.

In der Tabelle 110 wird die Verteilung der Stoffvorräte, in Abhängigkeit der definierten Tiefenstufen, für alle BZE-Probepunkte dargestellt.

Tabelle 110: Verteilung der Gesamthäufigkeit austauschbarer Vorräte [kg/ha]

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
<b>Calcium – Ca</b>									
1	0-30	76	13	108	235	373	689	1837	39424
2	30-60	75	12	47	113	189	356	2684	58446
3	60-90	61	12	43	118	248	1360	4494	46452
4	90-140	25	46	130	772	2523	4504	18439	69831
<b>Magnesium – Mg</b>									
1	0-30	76	11	30	49	87	161	302	2202
2	30-60	75	4	15	30	57	81	346	3399
3	60-90	61	9	15	32	88	285	1328	4002
4	90-140	25	14	100	317	1016	2235	3875	4619
<b>Kalium – K</b>									
1	0-30	76	23	86	125	161	219	399	2567
2	30-60	75	25	69	124	185	219	448	1412
3	60-90	61	28	87	144	233	301	525	1957
4	90-140	25	133	185	330	386	457	761	2738
<b>Natrium – Na</b>									
1	0-30	76	11	16	19	21	27	42	153
2	30-60	75	6	15	18	19	28	44	113
3	60-90	61	7	19	21	25	29	58	177
4	90-140	25	16	33	36	45	56	128	370
<b>Aluminium – Al</b>									
1	0-30	76	9	777	1124	1434	1935	2741	5765
2	30-60	75	1	288	850	1138	1599	2165	5346
3	60-90	61	4	378	759	1009	1377	1900	3586
4	90-140	25	13	21	364	562	1145	2270	4074

<b>Mangan - Mn</b>									
<b>1</b>	<b>0-30</b>	76	12	21	45	92	147	248	1448
<b>2</b>	<b>30-60</b>	75	5	20	26	45	70	116	616
<b>3</b>	<b>60-90</b>	61	8	23	25	30	58	144	585
<b>4</b>	<b>90-140</b>	25	21	33	41	41	44	107	373

<b>Verteilung der Gesamthäufigkeit</b>									
<b>Code</b>	<b>Tiefenstufe</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Min</b>	<b>15%</b>	<b>35%</b>	<b>Med</b>	<b>65%</b>	<b>85%</b>	<b>Max</b>
<b>Eisen – Fe</b>									
<b>1</b>	<b>0-30</b>	76	16	28	72	92	144	282	745
<b>2</b>	<b>30-60</b>	75	3	20	22	23	34	180	387
<b>3</b>	<b>60-90</b>	61	8	23	24	25	51	214	627
<b>4</b>	<b>90-140</b>	25	12	24	38	42	42	105	666
<b>Wasserstoff – H</b>									
<b>1</b>	<b>0-30</b>	76	0,46	1,72	2,83	4,90	6,69	11,91	85,42
<b>2</b>	<b>30-60</b>	75	0,12	0,66	0,75	0,80	0,85	2,53	34,50
<b>3</b>	<b>60-90</b>	61	0,30	0,73	0,85	0,90	0,90	2,08	54,10
<b>4</b>	<b>90-140</b>	25	0,42	1,13	1,42	1,50	1,50	3,20	17,50

### **Austauschbare Calciumvorräte**

Die Calciumvorräte zeigen insgesamt einen großen Wertebereich. Dieser schwankt zwischen wenigen kg/ha bis hin zu mehreren t/ha. Die größten Vorräte an Ca stellen sich in der Tiefenstufe 90-140 cm ein. Innerhalb der Tiefenstufen 30-90 cm waren die geringsten Vorräte an Ca vertreten.

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb. 94), so zeigt sich, dass es zwischen den Jahren 1996 und 2009 zu einem sehr geringen Rückgang des Ca-Vorrates in den Tiefenstufen 0 bis 90 cm gekommen ist. Insgesamt kann von gleichbleibenden Ca-Vorräten gesprochen werden.

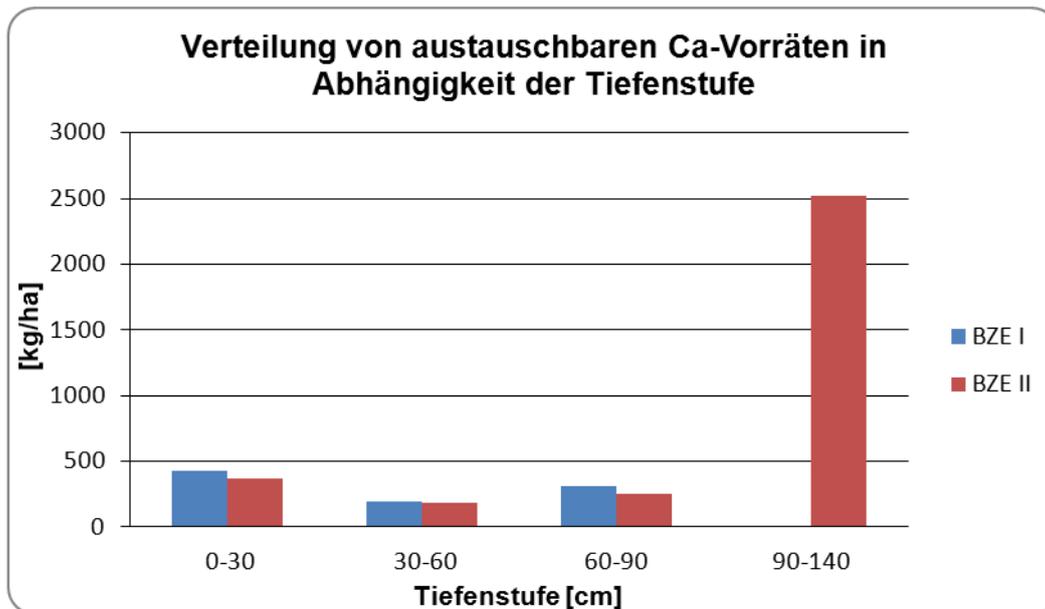
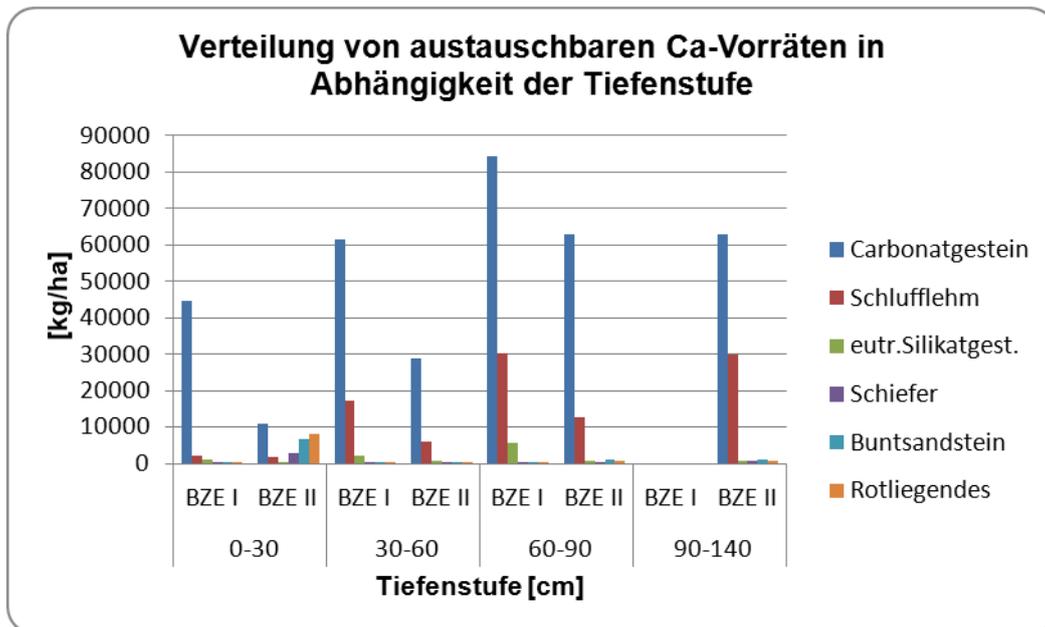


Abbildung 94: Entwicklung der Verteilung von austauschbaren Ca-Vorräten in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 111: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grund- gestein	Tiefenstufe											
	0-30 cm			30-60 cm			60-90 cm			90-140 cm		
	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
C	3033	10848	39424	10801	28738	87836	17310	63071	87836	27160	63071	87836
L	37	1934	23252	52	5966	68926	69	12696	114396	69	29718	114396
E	279	399	503	571	573	690	571	573	3302	571	573	8026
F	13	226	2740	34	387	5553	55	472	16338	55	751	39181
S	57	319	6597	172	520	14251	212	994	14251	212	1190	14251
R	40	222	8197	56	425	49170	73	660	49170	73	660	82364

Die Schwankung des Wertebereiches von Calcium folgt substratspezifischen Gegebenheiten (vgl. Tab.111). Demnach verfügen Böden des Carbonatgesteins im Allgemeinen über die höchsten Ca-Vorräte an austauschbarem Calcium, welche mit zunehmender Tiefenstufe noch weiter ansteigen. Sie betragen in jeder Tiefenstufe mehr als 10 t/ha. Schlufflehme weisen deutlich geringere Ca-Vorräte als Carbonatgesteine auf. Auch hier ist eine Zunahme der Vorräte mit größerer Tiefe gegeben. Da Schlufflehme meist nur Auflagedecken über carbonathaltigen Ausgangsgesteinen darstellen, sind auch hier in größeren Tiefen hohe Ca-Vorräte zu erwarten. Dies wird auch durch den in der Tiefenstufe 90-140 cm maximal erreichten Vorrat von 114 t/ha verdeutlicht. Unter den Silikatgesteinen haben die mit Buntsandstein und Rotliegendem geprägten Standorte die höheren Ca-Gehalte. Mit Abstand die niedrigsten Vorräte finden sich bei Schiefer.



**Abbildung 95: Entwicklung der Verteilung von austauschbaren Ca-Vorräten in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**

Der Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.95) ergibt, dass es zwischen den Jahren 1996 und 2009 insgesamt zu einem Rückgang des Ca-Vorrates in allen betrachteten Tiefenstufen gekommen ist.

### **Austauschbare Magnesiumvorräte**

Magnesium ist neben Calcium eines der wichtigsten basischen Kationen für die Pflanzenernährung und ist bezogen auf seinen Vorrat mengenmäßig nach denen von Calcium einzustufen.

Die Magnesiumvorräte zeigen wie bei Calcium insgesamt einen großen Wertebereich auf und schwanken zwischen wenigen kg/ha bis hin zu mehreren t/ha. Auch hier sind die größten Mg-Vorräte in der Tiefenstufe 90-140 cm und die niedrigsten Mg-Vorräte in der Tiefenstufe 30-60 cm zu finden.

Die Ergebnisse von BZE I und BZE II zeigen im Vergleich (vgl. Abb.96), dass es zwischen den Jahren 1996 und 2009 zu einem sehr geringen Anstieg des Mg-Vorrates in den Tiefenstufen 0 bis 90 cm gekommen ist. Insgesamt kann aber von annähernd gleichbleibenden Mg-Vorräten gesprochen werden.

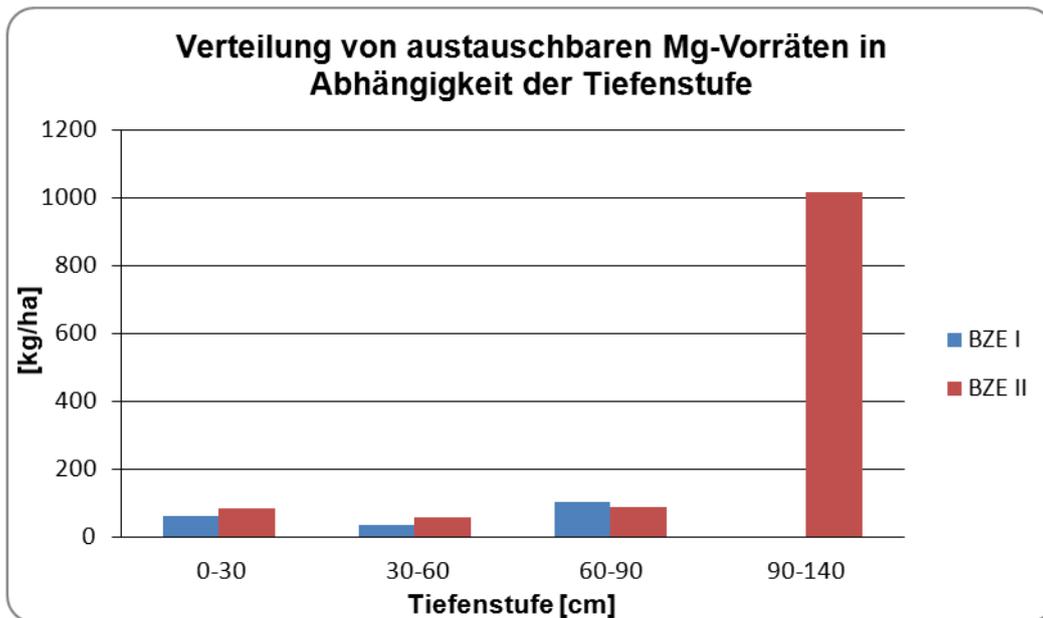


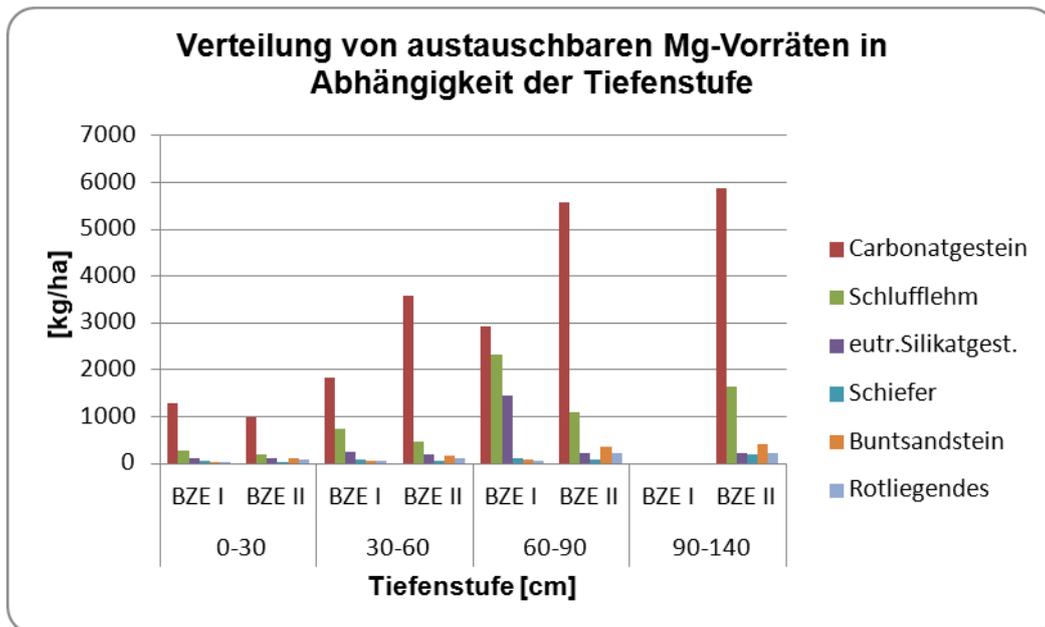
Abbildung 96: Entwicklung der Verteilung von austauschbaren Mg-Vorräten in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Betrachtet man die austauschbaren Magnesiumvorräte in Abhängigkeit des Grundgesteins so stellt sich folgender Sachverhalt dar (vgl. Tab.100).

Tabelle 112: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grund- gestein	Tiefenstufe											
	0-30 cm			30-60 cm			60-90 cm			90-140 cm		
	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
C	525	990	1120	986	3584	4183	986	5580	6715	986	5880	10312
L	21	179	2156	24	459	2274	57	1091	5994	57	1645	8222
E	70	120	188	124	193	207	193	207	590	193	207	880
F	11	34	2202	23	63	4923	35	89	7623	35	200	12141
S	25	119	2134	36	177	5533	95	346	5533	95	405	5533
R	30	72	544	40	120	1526	50	227	3772	50	227	8391

Auch hier entfallen die größten Mg-Vorräte auf Standorte des Carbonatgesteins, welche mit zunehmender Tiefenstufe ansteigen. Schlufflehme weisen zwar deutlich geringere Mg-Vorräte als Carbonatgesteine auf, verzeichnen in größeren Tiefen aber noch adäquate Vorräte. Dieser Sachverhalt ist ebenfalls jenen Gegebenheiten geschuldet, wie sie bei den austauschbaren Calciumvorräten beschrieben wurden. Unter den Silikatgesteinen haben die mit Buntsandstein und eutrophen Silikatgestein geprägten Standorte die höheren Mg-Gehalte. Mit Abstand die niedrigsten Vorräte finden sich bei Schiefer.



**Abbildung 97: Entwicklung der Verteilung von austauschbaren Mg-Vorräten in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**

Anhand des Vergleiches zwischen BZE I und BZE II (vgl. Abb.97) lässt sich feststellen, dass es bei den Carbonatgesteinen sowie Buntsandsteinen insgesamt zu Vorratszuwächsen gekommen ist. Bei allen übrigen Gesteinstypen sind Rückgänge des Mg-Vorrates in allen Tiefenstufen zu beobachten.

### **Austauschbare Kaliumvorräte**

Die Kaliumvorräte zeigen insgesamt eine große Wertespanne auf.

Bezüglich der vertikalen Verteilung der K-Vorräte ist festzustellen, dass mit zunehmender Tiefe auch die Vorräte ansteigen. Die größten K-Vorräte sind in der Tiefenstufe 90-140 cm anzutreffen.

Im Vergleich der BZE I zu den Ergebnissen von BZE II (Abb. 98) zeigt in den Jahren 1996 und 2009 einen deutlichen Anstieg des K-Vorrates in den Tiefenstufen 0 bis 90 cm. Waren zum Zeitpunkt der BZE I, bei zunehmender Tiefenstufe eher abnehmende Tendenzen der Vorräte zu verzeichnen, so verhält es sich zum Zeitpunkt der BZE II entgegengesetzt. Somit konnte sich in der Tiefenstufe 30-90 cm der K-Vorrat mehr als verdoppeln.

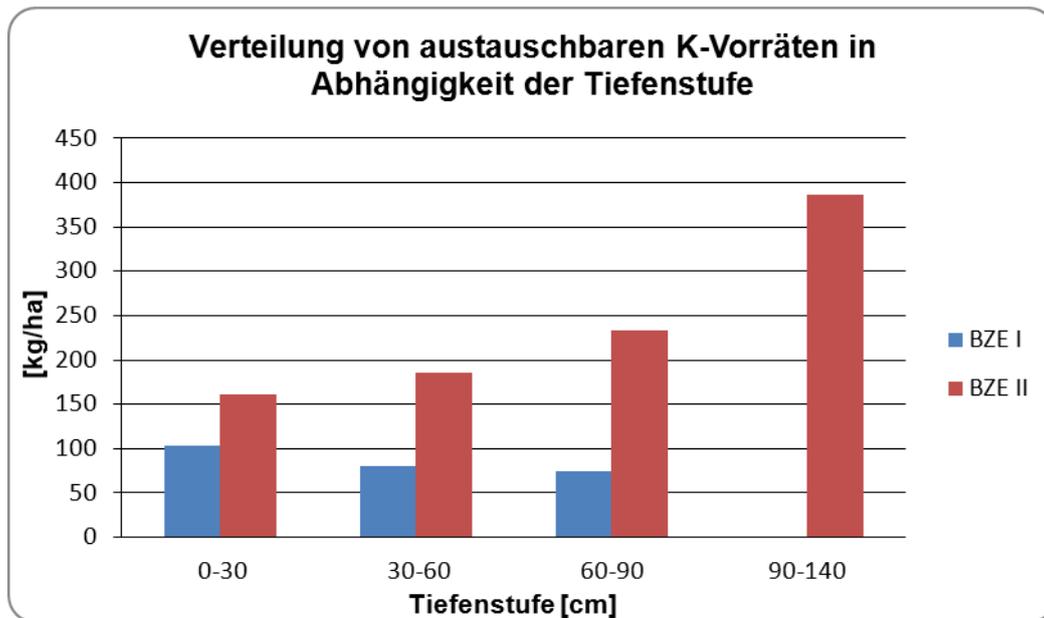


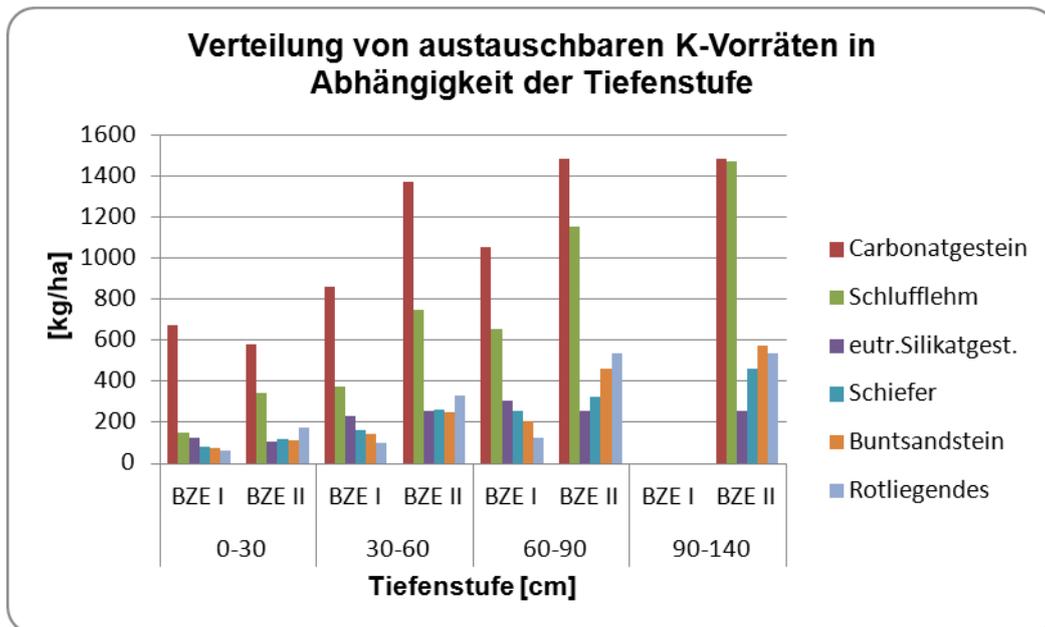
Abbildung 98: Entwicklung der Verteilung von austauschbaren K-Vorräten in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Die Tabelle 113 stellt die austauschbaren Kaliumvorräte in Abhängigkeit des Grundgesteins dar.

Tabelle 113: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grund- gestein	Tiefenstufe											
	0-30 cm			30-60 cm			60-90 cm			90-140 cm		
	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
C	168	580	817	535	1377	1487	854	1487	1855	1296	1487	1855
L	106	343	2567	122	749	2614	377	1155	2849	377	1473	3415
E	55	107	319	182	256	682	182	256	1565	182	256	1998
S	23	114	707	48	251	1327	76	460	1810	76	576	1810
F	60	116	836	143	265	1744	230	325	3702	230	463	6440
R	98	172	540	186	330	1016	250	539	1554	250	539	2375

Wie aus der Tabelle 113 ersichtlich, entfallen die größten K-Vorräte auf Standorte des Carbonatgesteins, welche mit zunehmender Tiefenstufe ansteigen. Die bei Schlufflehen vorkommenden K-Vorräte nehmen mit zunehmender Tiefenstufe ebenfalls zu, so dass im Vergleich zu den Carbonatgesteinen auch hier adäquate Vorräte zu verzeichnen sind. Dieser Sachverhalt ist ebenfalls auf jene Gegebenheiten zurück zu führen, wie sie bei den austauschbaren Calcium- und Magnesiumvorräten beschrieben wurden. Bei der Gruppe der Silikatgesteine zeigen die von Rotliegendem geprägten Standorte die höheren K-Vorräte. Mit Abstand die niedrigsten Vorräte finden sich bei eutrophen Silikatgesteinen.



**Abbildung 99: Entwicklung der Verteilung von austauschbaren K-Vorräten in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**

Vergleicht man zwischen den Ergebnissen der BZE I und BZE II (vgl. Abb.99), so lässt sich feststellen, dass die Kaliumvorräte bei Schlufflehm, Schiefer, Buntsandstein und Rotliegendem in jeder Tiefenstufe Zuwächse zu verzeichnen haben. Bei den Carbonatgesteinen kann trotz der geringfügigen Rückläufigkeit des K-Vorrates in der Tiefenstufe 0-30 cm insgesamt von einem Anstieg der Vorräte ausgegangen werden (siehe Tiefenstufe 30 bis 140 cm). Bei den eutrophen Silikatgesteinen unterliegt der Kaliumvorrat je Tiefenstufe Schwankungen. Es ist eine Abnahme der K-Vorräte in den Tiefenstufen 0-30 cm und 60-90 cm zu verzeichnen. Lediglich die Tiefenstufe 30-60 cm weist geringe Vorratszuwächse an Kalium auf.

### **Austauschbare Aluminiumvorräte**

Die vertikale Verteilung der Al-Vorräte zeigt, dass mit zunehmender Tiefe auch die Vorräte abnehmen. Demnach sind die größten Al-Vorräte in der Tiefenstufe 0-30 cm anzutreffen.

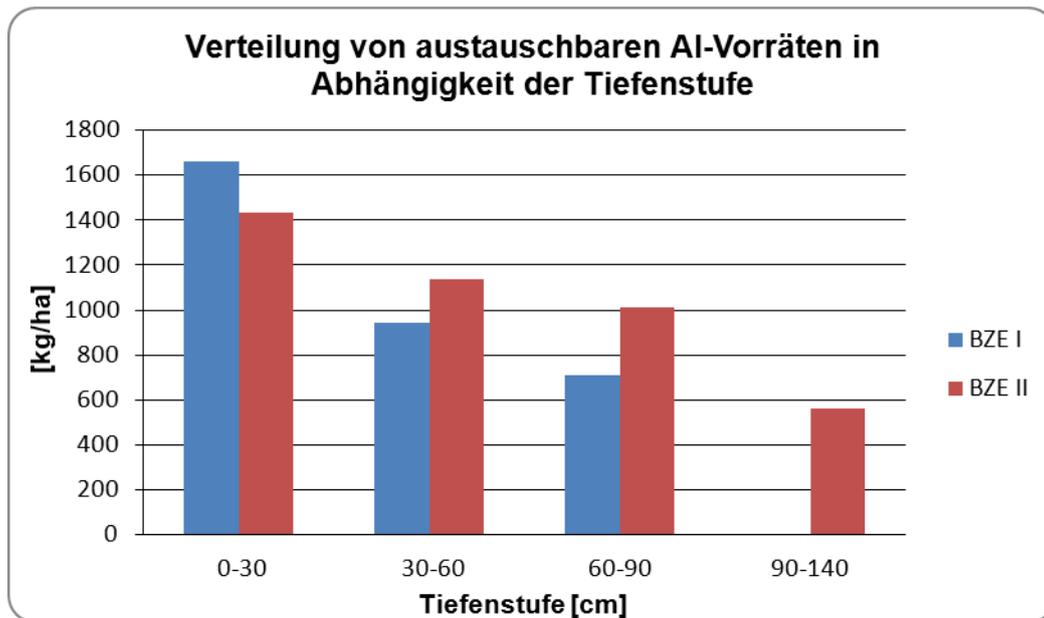


Abbildung 100: Entwicklung der Verteilung von austauschbaren K-Vorräten in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.100) ist festzustellen, dass es zwischen den Jahren 1996 und 2009 zu einem deutlichen Anstieg des Al-Vorrates in den Tiefenstufen 30 bis 90 cm und zur Abnahme in der Tiefenstufe 0-30 cm gekommen ist.

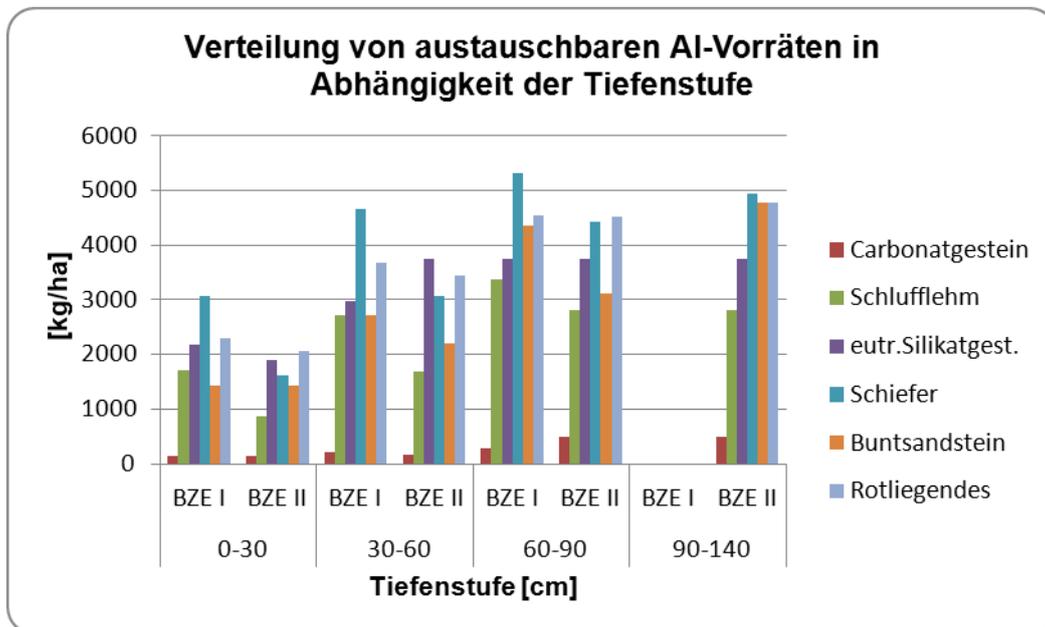
Stellt man die austauschbaren Aluminiumvorräte in Abhängigkeit des Grundgesteins dar, so ergeben sich folgende Gradienten (Tabelle 102).

Tabelle 114: Austauschbare Aluminiumvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Grund- gestein	Tiefenstufe											
	0-30 cm			30-60 cm			60-90 cm			90-140 cm		
	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
C	9	146	2948	35	153	4424	35	495	6005	35	495	6524
L	13	856	2301	15	1680	5502	19	2802	8792	31	2802	9354
E	1090	1909	2508	2539	3751	7346	3298	3751	7346	3492	3751	7346
S	384	1430	4673	688	2213	8422	1066	3126	10385	1157	4790	10385
F	443	1616	3235	644	3074	5930	644	4439	8321	644	4932	10724
R	729	2060	5765	741	3441	7934	741	4527	9427	741	4769	9427

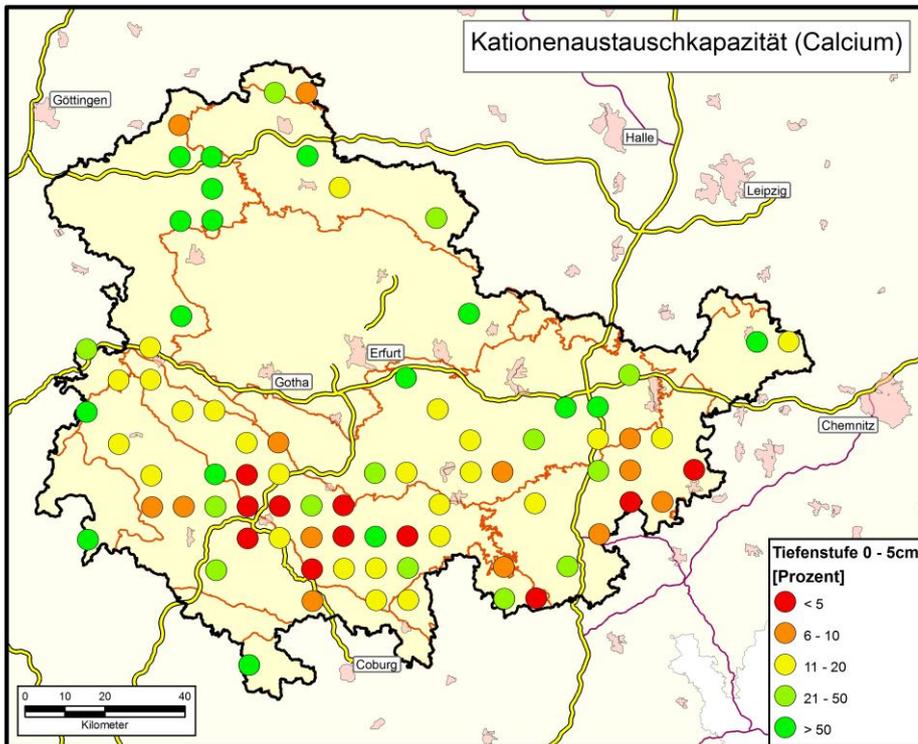
Es kann für alle Grundgesteinstypen ein Zuwachs der Al-Vorräte mit zunehmender Tiefenstufe festgestellt werden. Weiterhin wird deutlich, dass die größten Al-Vorräte eher auf silikatisch geprägte Standorte entfallen. Demnach weisen die Grundgesteine des Rotliegenden die höchsten Al-Vorräte, gefolgt von Schiefer- und

Buntsandsteinstandorten, auf. Bei den eutrophen Silikatgesteinen sind ebenfalls hohe Al-Vorräte zu verzeichnen. Hier treten jedoch schon ab Tiefenstufe 30-60 cm keine weiteren Zuwächse mehr auf, so dass sich ein konstanter Vorrat von 3751 kg/ha einstellt. Mit Abstand die niedrigsten Vorräte finden sich bei Carbonatgesteinen.

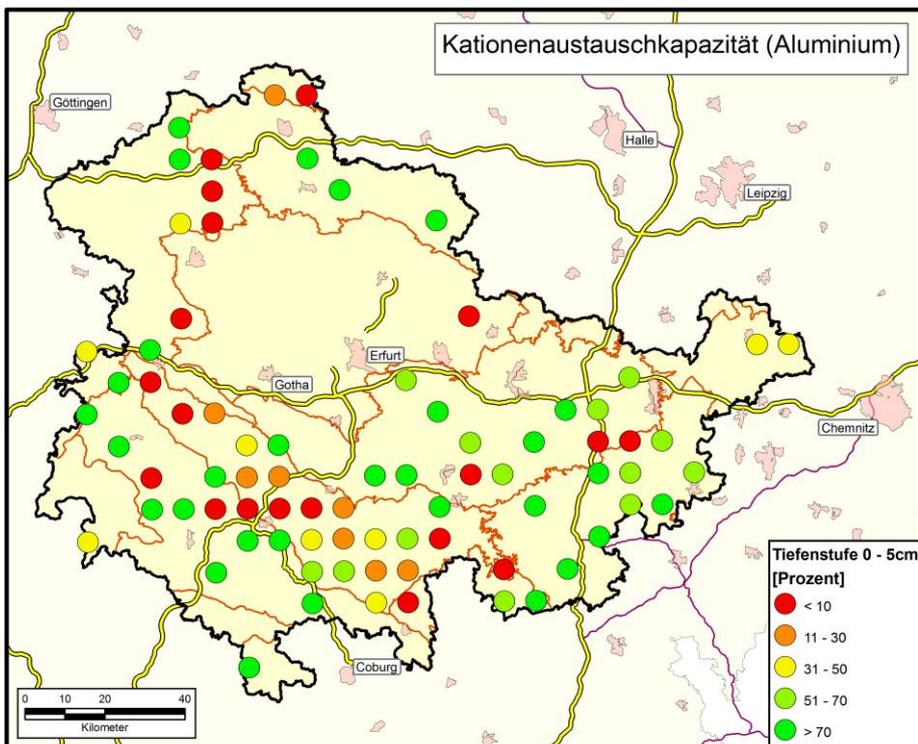


**Abbildung 101: Entwicklung der Verteilung von austauschbaren Al-Vorräten in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**

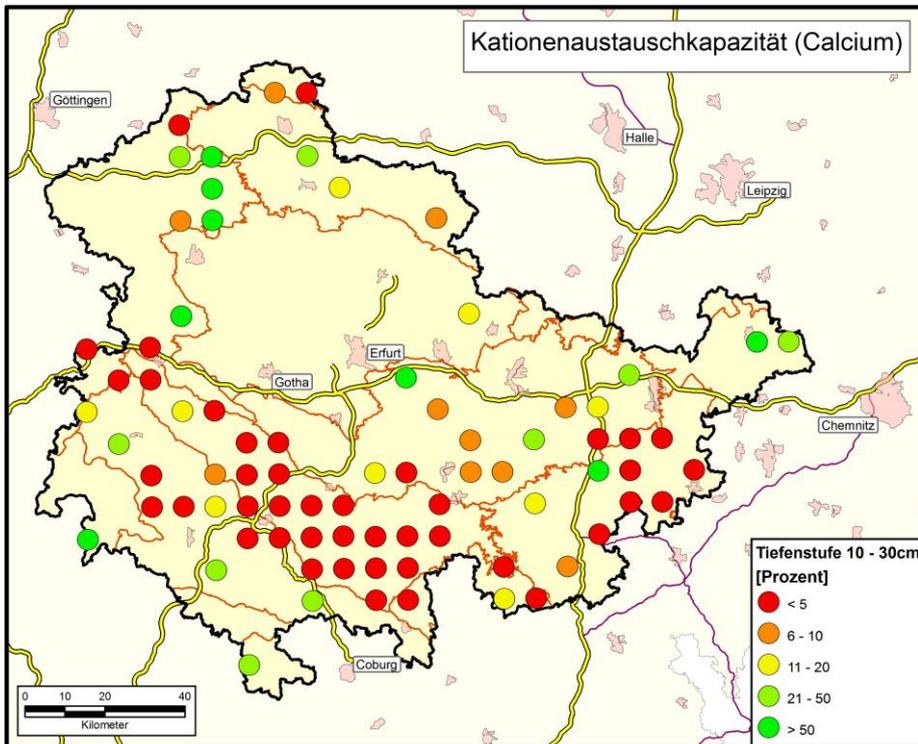
Vergleicht man zwischen den Ergebnissen der BZE I und BZE II (vgl. Abb.101), so lässt sich feststellen, dass die Aluminiumvorräte bei Schlufflehm, Schiefer, Rotliegendem und Buntsandstein in jeder Tiefenstufe abgenommen haben. Bei den eutrophen Silikatgesteinen sind diese Entwicklungen jedoch gegenläufig. Obwohl auch in der Tiefenstufe 0-30 cm der Vorrat rückläufig ist, kommt es in der Tiefenstufe 30-60 cm zu einem Vorratszuwachs, welcher in der folgenden Tiefenstufe stagniert und gehalten wird. Auch die Carbonatgesteine zeigen mit zunehmender Tiefenstufe einen Vorratszuwachs. Dies wird besonders deutlich in der Tiefenstufe 90-140 cm.



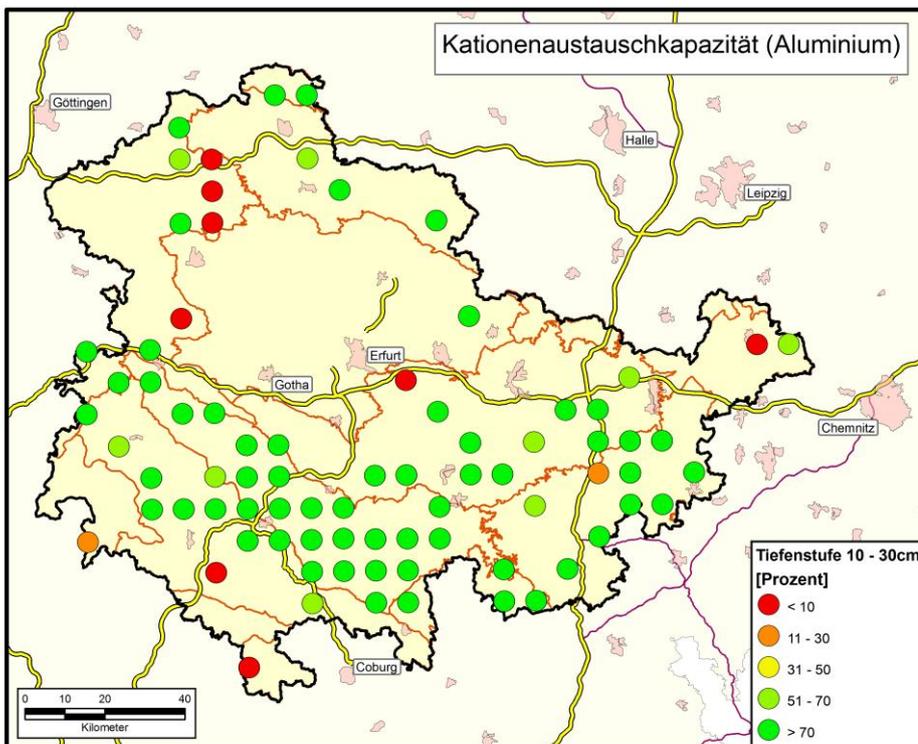
Karte 86.



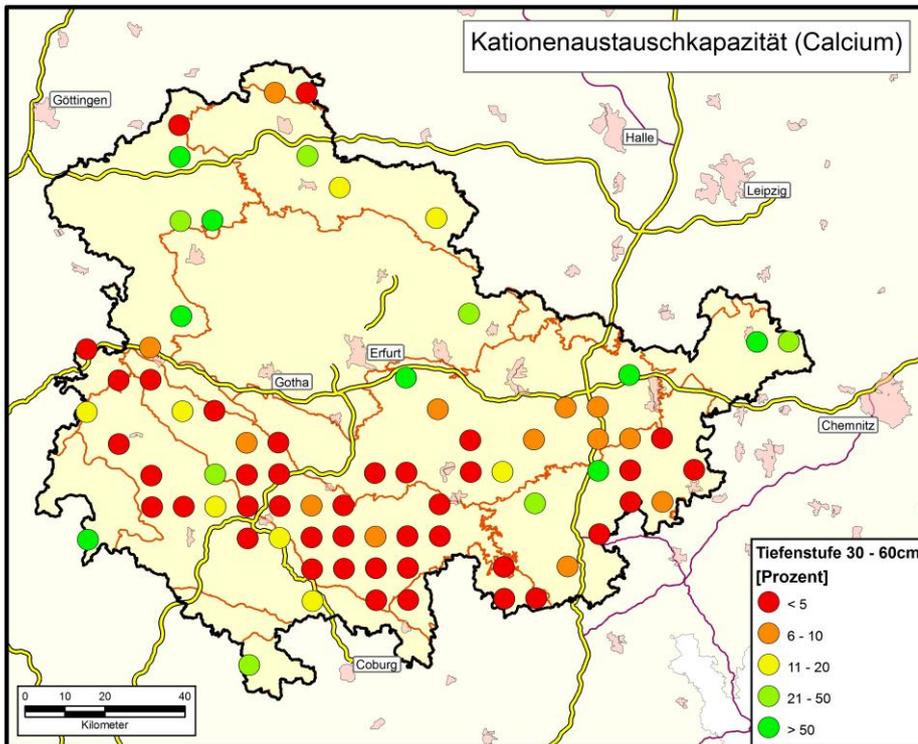
Karte 87.



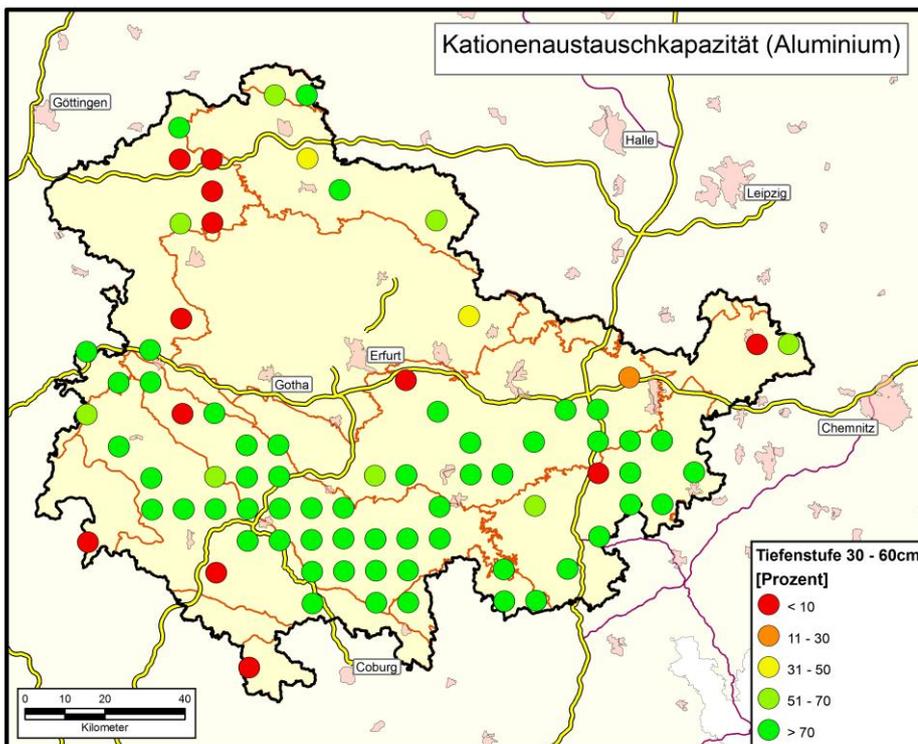
Karte 88.



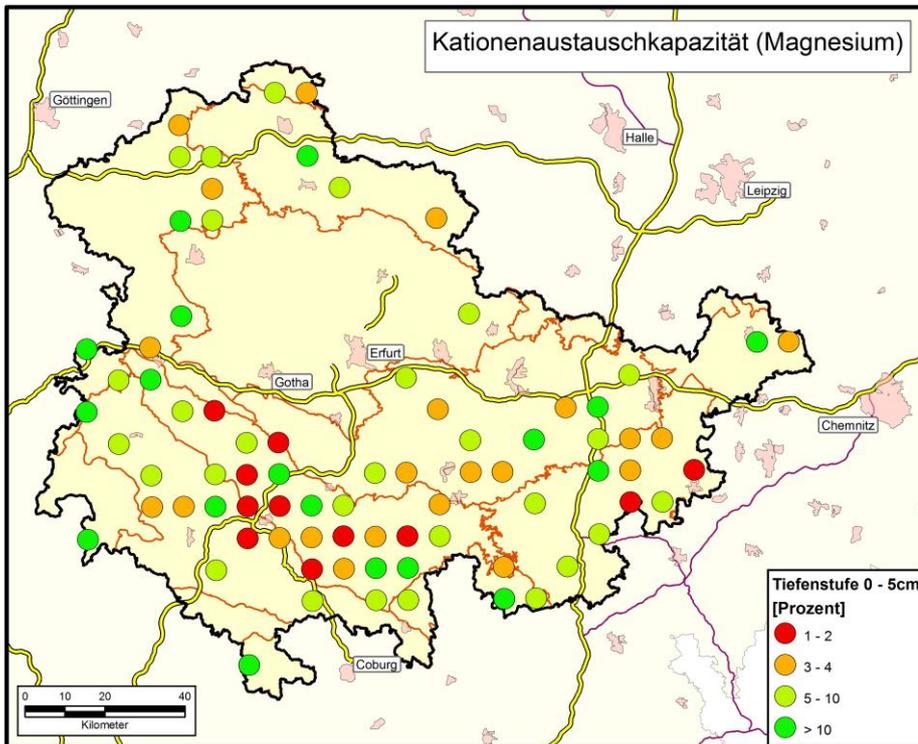
Karte 89.



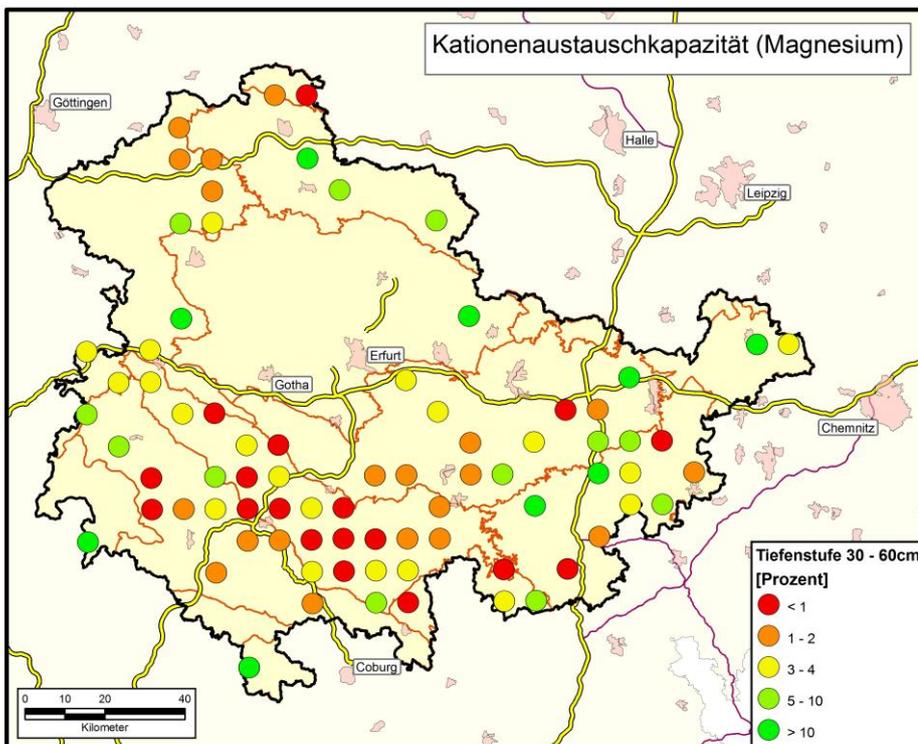
Karte 90.



Karte 91.



Karte 92.



Karte 93.

## 4.3 Gehalte an organischer Substanz, Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor im Mineralboden

### 4.3.1 Organische Substanz

Organische Substanzen, welche zum überwiegenden Teil in den Auflagehorizonten des Mineralbodens vorhanden sind, werden im Zuge von bodenphysikalischen Vorgängen sowie biologischer Aktivitäten des Edaphons (Bioturbation) in tiefere Schichten des Mineralbodens transportiert. Der Gehalt an organischer Substanz pro Tiefenstufe ist aus der Tabelle 115 ersichtlich.

Tabelle 115: Gehalt organischer Substanz [%] in Abhängigkeit der Tiefenstufe des Mineralbodens

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
Organische Substanz									
1	0-5	98	1,62	4,48	7,63	8,97	11,49	15,21	23,71
2	5-10	98	0,81	2,18	3,56	4,88	6,13	9,48	18,84
3	10-30	103	0,28	0,98	1,61	2,57	3,68	5,36	14,95
4	30-60	114	0,22	0,41	0,70	1,00	1,46	3,16	12,93
5	60-90	99	0,00	0,21	0,34	0,48	0,71	1,71	7,69
6	90-140	99	0,02	0,12	0,21	0,31	0,44	0,90	5,57

Mit zunehmender Tiefe nimmt auch der Gehalt an organischer Substanz ab. Auch im Vergleich zu den Ergebnissen der BZE I bestätigen und wiederholen sich die Tendenzen bei gleichzeitigem Anstieg des Gehaltes organischer Substanzen insgesamt (vgl. Abb.102).

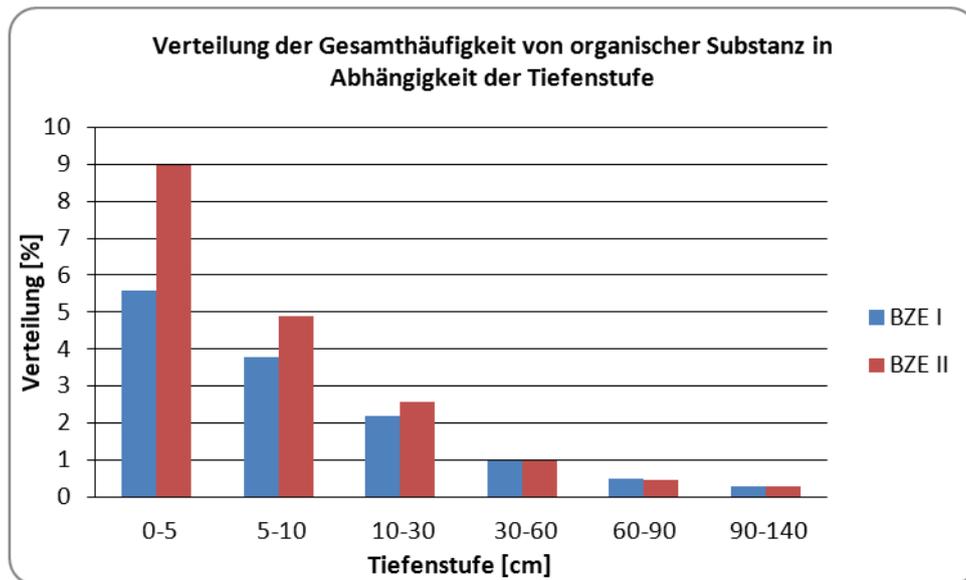


Abbildung 102: Verteilung der Gesamthäufigkeit von organischer Substanz in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Es besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Gehalt organischer Substanz in Abhängigkeit der Humusform und Tiefenstufe (vgl. Tab. 116).

Tabelle 116: Gehalt an organischer Substanz im Mineralboden [%] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Code	Tiefenstufe	Mull			Kalkmoder			Moder			Rohhumus		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
1	0-5	3,55	9,71	23,71	8,40	11,16	12,12	3,48	8,81	17,71	1,62	7,84	21,84
2	5-10	2,17	5,70	18,84	3,84	7,36	8,93	1,24	3,64	15,43	0,81	3,81	11,57
3	10-30	1,07	2,88	10,05	0,98	3,69	4,24	0,72	1,84	14,95	0,28	2,03	12,79
4	30-60	0,47	1,21	5,45	0,97	1,43	2,71	0,33	0,57	12,12	0,22	0,78	12,93
5	60-90	0,10	0,60	3,47	0,00	0,72	1,60	0,22	0,45	6,67	0,09	0,36	7,69
6	90-	0,07	0,46	1,53	0,26	0,67	1,41	0,05	0,26	5,57	0,02	0,21	2,00

Demnach haben die Humusformen Mull und Kalkmoder bis in eine Tiefe von 140 cm durchschnittlich höhere Gehalte an organischer Substanz als die Humusformen Moder und Rohhumus. Innerhalb des Oberbodens (Tiefenstufen 0-10 cm) besitzen alle Humusformen etwa gleiche Werte, ab Tiefenstufe 10-30 cm jst der Gehalt organischer Substanz jedoch deutlich geringer.

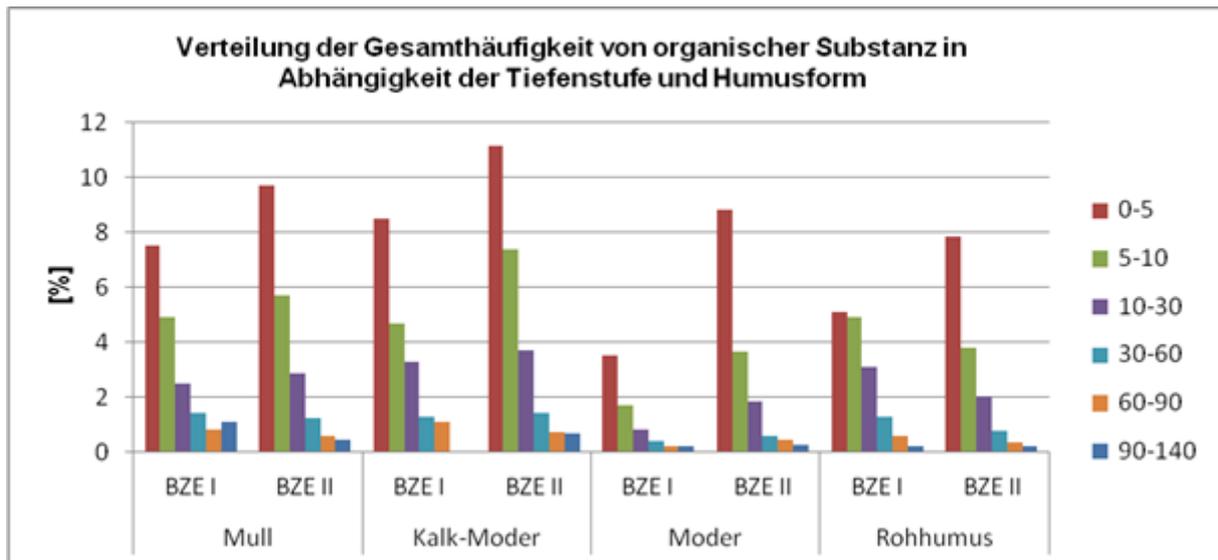


Abbildung 103: Entwicklung der Verteilung der Gesamthäufigkeit von organischer Substanz in Abhängigkeit der Tiefenstufe und der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.103) miteinander, so ist festzustellen, dass bei den Humusformen Mull, Kalkmoder und Moder bis in die Tiefenstufe von 30 bis 60 cm ein Anstieg der Gehalte organischer Substanz zu verzeichnen ist. Bei Rohhumus ist dies nur in der Tiefenstufe von 0 bis 5 cm nachweisbar. Alle anderen Tiefenstufen zeigen einen eher rückläufigen Trend.

Der Gehalt organischer Substanz ist abhängig von der Höhenlage (vgl. Tab.117).

Tabelle 117: Gehalt an organischer Substanz im Mineralboden [%] in Abhängigkeit der von der Höhenlage (BZE II)

Code	Tiefenstufe	planar (<300 m ü. NN)				collin-submontan (300-500 m ü. NN)				montan (>500 m ü. NN)			
		n	Min	Med	Max	n	Min	Med	Max	n	Min	Med	Max
1	0-5	15	3,8	7,5	17,4	51	1,6	8,4	23,7	32	5,8	11,9	21,8
2	5-10	15	0,8	3,3	14,4	51	1,2	3,6	18,8	32	2,6	7,8	15,4
3	10-30	15	0,5	1,8	8,3	55	0,3	1,8	10,1	33	0,8	4,3	14,9
4	30-60	18	0,3	0,8	5,4	60	0,2	0,7	4,7	35	0,5	2,3	12,9
5	60-90	16	0,1	0,4	3,2	49	0	0,3	2,7	32	0,2	1	7,7
6	90-140	17	0,1	0,3	1,5	52	0	0,2	1,2	29	0,1	0,5	5,6

Demnach weisen jene Probestellen die höchsten Gehalte auf, welche sich in montanen Höhenlagen befinden. Mit abnehmender Höhe verringert sich auch der Gehalt organischer Substanz hin zu den Höhenstufen collin-submontan und planar. Für alle betrachteten Höhenstufen ist festzustellen, dass mit zunehmender Tiefenstufe des Mineralbodens der Gehalt an organischer Substanz abnimmt.

Beim Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (Abb. 104) stellt sich heraus, dass es in der collin-submontanen sowie der montanen Höhenstufe zu Zuwächsen des Organikagehaltes bis in eine Tiefenstufe von 30 cm gekommen ist. In den tiefer liegenden Mineralbodenschichten stagniert oder fällt der Gehalt organischer Substanzen.

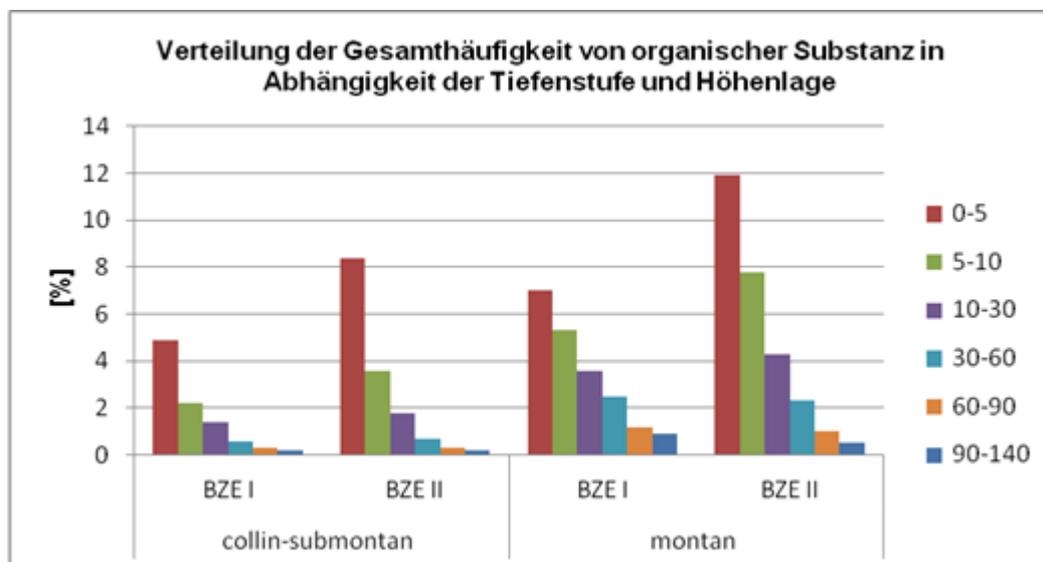


Abbildung 104: Verteilung der Gesamthäufigkeit von organischer Substanz in Abhängigkeit der Tiefenstufe und der Höhenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 4.3.2 Kohlenstoffgehalt

Der Kohlenstoffgehalt von Mineralböden steht im direkten Zusammenhang mit dem Gehalt an organischer Substanz im Boden.

Demnach geht aus den Analysen hervor, dass mit zunehmender Tiefe auch der Gehalt an Kohlenstoff abnimmt (vgl. Tab.118). Dies wurde auch im Vergleich zu den Ergebnissen der BZE I bestätigt, so dass sich die dort beschriebenen Tendenzen bei der BZE II wiederholen (vgl. Abb.105).

Tabelle 118: Kohlenstoffgehalt [%] in Abhängigkeit der Tiefenstufe des Mineralbodens

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
C-Gehalt									
1	0-5	98	0,94	2,60	4,43	5,20	6,66	8,82	13,75
2	5-10	98	0,47	1,27	2,07	2,83	3,55	5,50	10,93
3	10-30	103	0,16	0,57	0,93	1,49	2,13	3,11	8,67
4	30-60	114	0,13	0,24	0,41	0,58	0,85	1,83	7,50
5	60-90	99	0,00	0,12	0,20	0,28	0,41	0,99	4,46
6	90-140	99	0,01	0,07	0,12	0,18	0,26	0,52	3,23

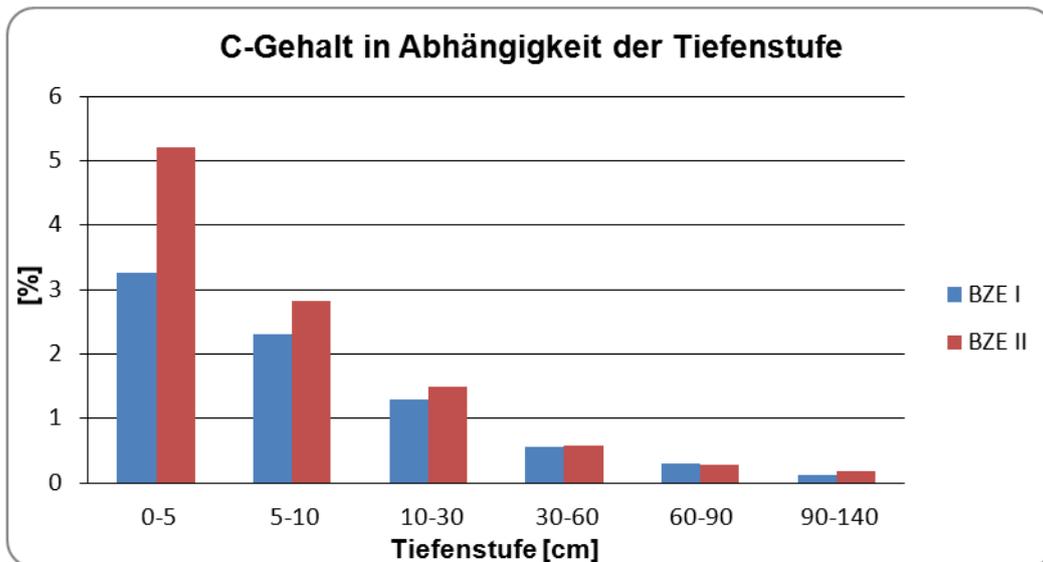


Abbildung 105: Entwicklung des Kohlenstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Vergleicht man den Gehalt von Kohlenstoff in Abhängigkeit der Humusform und Tiefenstufe (vgl. Tab.119) so ergibt sich, dass die Humusformen Mull und Kalkmoder bis in eine Tiefe von 1,40 m durchschnittlich höhere Gehalte von Kohlenstoff als die Humusformen Moder und Rohhumus aufweisen.

Tabelle 119: Gehalt an Kohlenstoff im Mineralboden [%] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Code	Tiefenstufe	Mull			Kalkmoder			Moder			Rohhumus		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
1	0-5	2,06	5,63	13,75	4,87	6,47	7,03	2,02	5,11	10,27	0,94	4,55	12,67
2	5-10	1,26	3,31	10,93	2,23	4,27	5,18	0,72	2,11	8,95	0,47	2,21	6,71
3	10-30	0,62	1,67	5,83	0,57	2,14	2,46	0,42	1,07	8,67	0,16	1,18	7,42
4	30-60	0,27	0,70	3,16	0,56	0,83	1,57	0,19	0,33	7,03	0,13	0,46	7,50
5	60-90	0,06	0,35	2,01	0,00	0,42	0,93	0,13	0,26	3,87	0,05	0,21	4,46
6	90-140	0,04	0,27	0,89	0,15	0,39	0,82	0,03	0,15	3,23	0,01	0,12	1,16

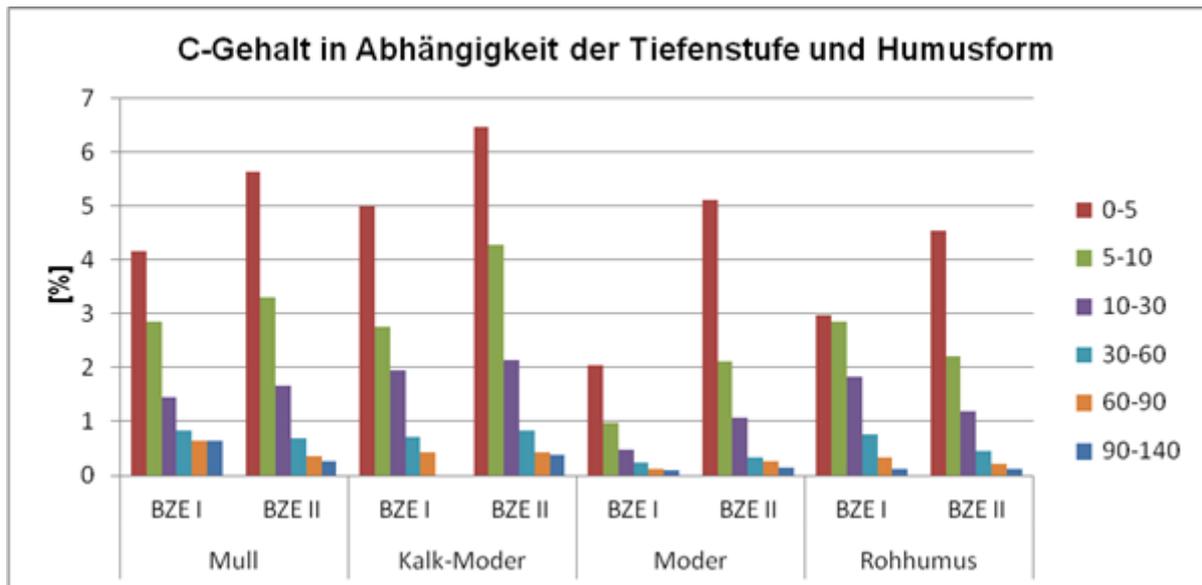


Abbildung 106: Entwicklung des Kohlenstoffgehaltes [%] in Abhängigkeit der Tiefenstufe und Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II ist festzustellen, dass bei den Humusformen Mull, Kalkmoder und Moder bis in die Tiefenstufe von 30 bis 60 cm ein Anstieg der C-Gehaltes zu verzeichnen ist. Bei Rohhumus ist dies nur in der Tiefenstufe von 0 bis 5 cm nachweisbar. Alle anderen Tiefenstufen zeigen einen eher rückläufigen Trend.

Auch bei den Kohlenstoffvorräten spiegelt sich jener Sachverhalt, wie der bereits bei den Ergebnissen des C-Gehaltes beschriebenen wurde, wider.

Demnach ist eine Abnahme der Kohlenstoffvorräte mit zunehmender Tiefenstufe feststellbar (vgl. Tab.120).

Tabelle 120: Kohlenstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der der Tiefenstufe (BZE II)

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
<b>C-Vorrat</b>									
1	0-5	98	0,94	2,60	4,43	5,20	6,66	8,82	13,75
2	5-10	98	0,47	1,27	2,07	2,83	3,55	5,50	10,93
3	10-30	103	0,16	0,27	0,93	1,49	2,13	3,11	8,67
4	30-60	114	0,13	0,24	0,41	0,58	0,85	1,83	7,5
5	60-90	99	0,0	0,12	0,20	0,28	0,41	0,99	4,46
6	90-140	99	0,01	0,07	0,12	0,18	0,26	0,52	3,23

Von BZE I zu BZE II (vgl. Abb.107) ist ein deutlicher Zuwachs der C-Vorräte in den Tiefenstufen 0 bis 90 cm feststellbar. In der tiefer liegenden Mineralbodenschicht zeigt sich ein leichter Rückgang der Vorräte.

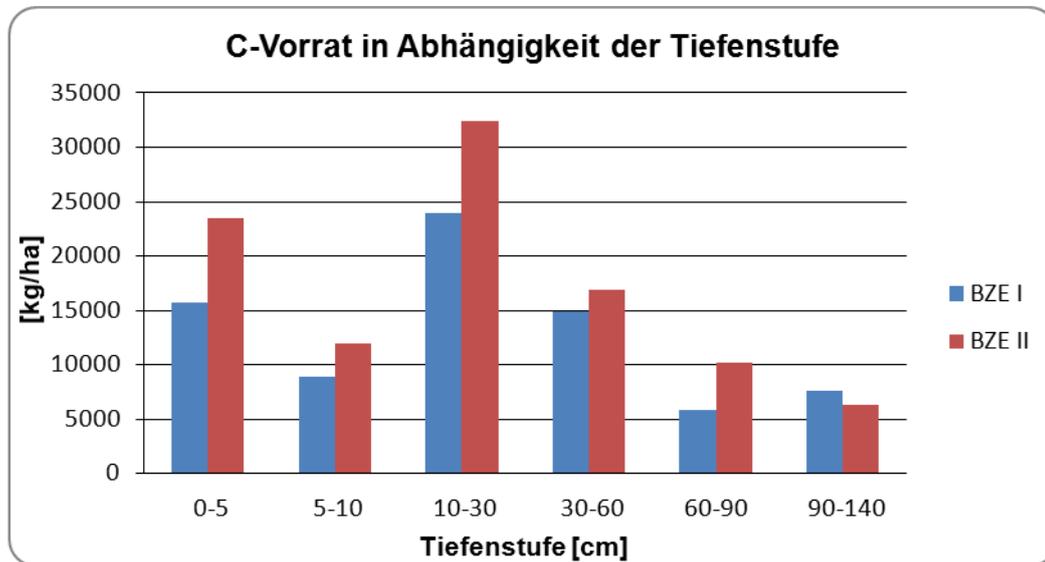


Abbildung 107: Entwicklung des Kohlenstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Tiefenstufe und Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Tabelle 121: Kohlenstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Tiefenstufe	Buntsandstein	Schiefer	Rotliegendes	Schlufflehme	Eutr. Silikatgestein	Carbon.-Gesteine
0-5	24510,0	21869,0	26272,5	19089,0	111778,0	23133,0
5-10	11408,0	11968,0	9928,0	13185,0	-	12488,0
10-30	29927,0	44000,0	33442,0	24960,0	71882,0	32984,0
30-60	16080,0	15645,0	31185,0	18580,5	80649,0	11778,0
60-90	13206,0	11988,0	9481,5	7980,0	-	9060,0
90-140	4970,0	3725,0	-	7000,0	-	8229,0
<b>Ges. Mi</b>	497,0	20680,0	1136,0	1190,0	61218,0	745,0
<b>Med.</b>	17447,0	14627,0	17451,0	14880,0	74168,0	14672,0
<b>Max</b>	107272,0	387000,0	198855,0	73360,0	96036,0	108192,0

Gegenüber der BZE I zeigt die BZE II (vgl. Abb.108), dass bei den silikatischen Grundgesteinen Buntsandstein, Rotliegendes und Schiefer Vorratszuwächse in allen Tiefenstufen zu verzeichnen sind. Obwohl die Messdaten für eutrophe Silikatgesteine nicht vollständig vorliegen, so zeigt sich auch hier eine Vorratszunahme in den dargestellten Tiefenstufen. Bei den eher basischen Grundgesteinen Schlufflehm und Carbonatgestein ist ein rückläufiger Trend des C-Vorrates zu beobachten.

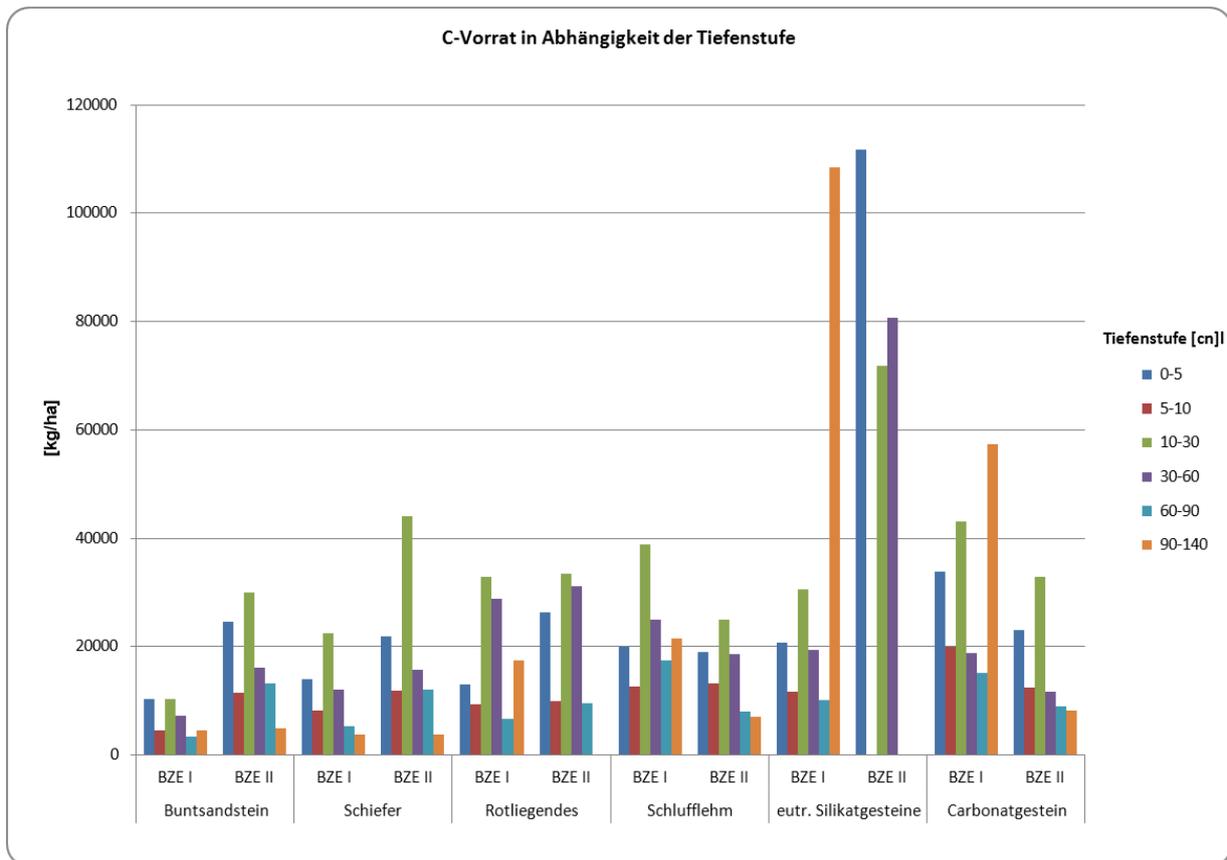


Abbildung 108: Entwicklung des Kohlenstoffvorräte [kg/ha] in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

### 4.3.3 Stickstoffgehalt

Da auch der Stickstoffgehalt sowie die Stickstoffvorräte im Mineralboden ebenso von den Gehalten organischer Substanz abhängen, sind auch hier Parallelen zu den oben bereits beschriebenen Ergebnissen erkennbar. Demnach zeigen sich Abnahmen der N-Werte mit zunehmender Bodentiefe (vgl. Tab.122).

Tabelle 122: N-Gehalt [%] in Abhängigkeit der Tiefenstufe des Mineralbodens

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
N-Gehalt									
1	0-5	98	0,03	0,13	0,24	0,31	0,38	0,50	0,96
2	5-10	98	0,02	0,06	0,12	0,17	0,24	0,34	0,84
3	10-30	103	0,01	0,03	0,8	0,11	0,15	0,21	0,44
4	30-60	114	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,15	0,43
5	60-90	99	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,08	0,21
6	90-140	94	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,18

Mit zunehmender Tiefe nimmt auch der Gehalt an Stickstoff ab. Dies wurde auch im Vergleich zu den Ergebnissen der BZE I bestätigt (vgl. Abb.109). Weiterhin trat ein Anstieg des N-Gehaltes in den ersten beiden Tiefenstufen (0-10 cm) sowie in der Tiefenstufe 90-140 cm auf, wobei die Tiefenstufen 10-90 cm keine Veränderungen aufzeigen.

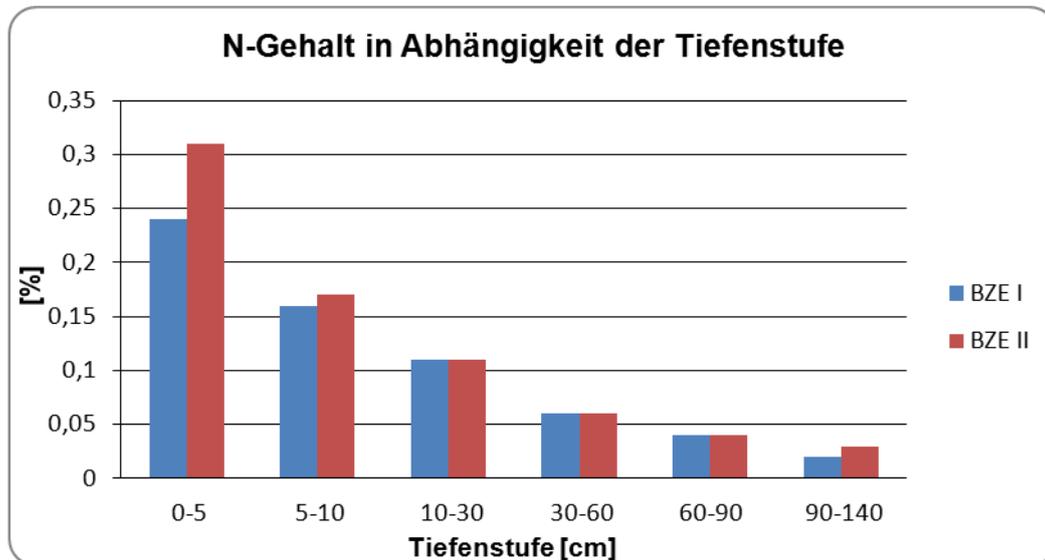


Abbildung 109: Entwicklung des Stickstoffgehalt [%] in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Die Abhängigkeit des N-Gehaltes von der Humusform und Tiefenstufe zeigt Tabelle 123.

Tabelle 123: N-Gehalt [%] des Mineralbodens in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Code	Tiefenstufe	Mull			Kalkmoder			Moder			Rohhumus		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
1	0-5	0,19	0,43	0,96	0,24	0,45	0,49	0,08	0,30	0,57	0,03	0,24	0,64
2	5-10	0,09	0,26	0,84	0,12	0,31	0,38	0,03	0,15	0,43	0,02	0,13	0,34
3	10-30	0,05	0,14	0,44	0,11	0,16	0,22	0,02	0,08	0,44	0,01	0,08	0,28
4	30-60	0,03	0,07	0,30	0,04	0,08	0,10	0,02	0,04	0,43	0,01	0,05	0,27
5	60-90	0,01	0,04	0,18	0,02	0,04	0,05	0,01	0,04	0,21	0,01	0,05	0,19
6	90-	0,01	0,03	0,07	0,01	0,03	0,08	0,01	0,04	0,18	0,01	0,03	0,11

Demnach haben die Mineralbodenhorizonte unter Mull und Kalkmoder bis in eine Tiefe von 30 cm durchschnittlich höhere N-Gehalte als unter den Humusformen

Moder und Rohhumus. Ab der Tiefenstufe 30-60 cm stellen sich bei allen Humusformen in etwa gleiche Werte ein.

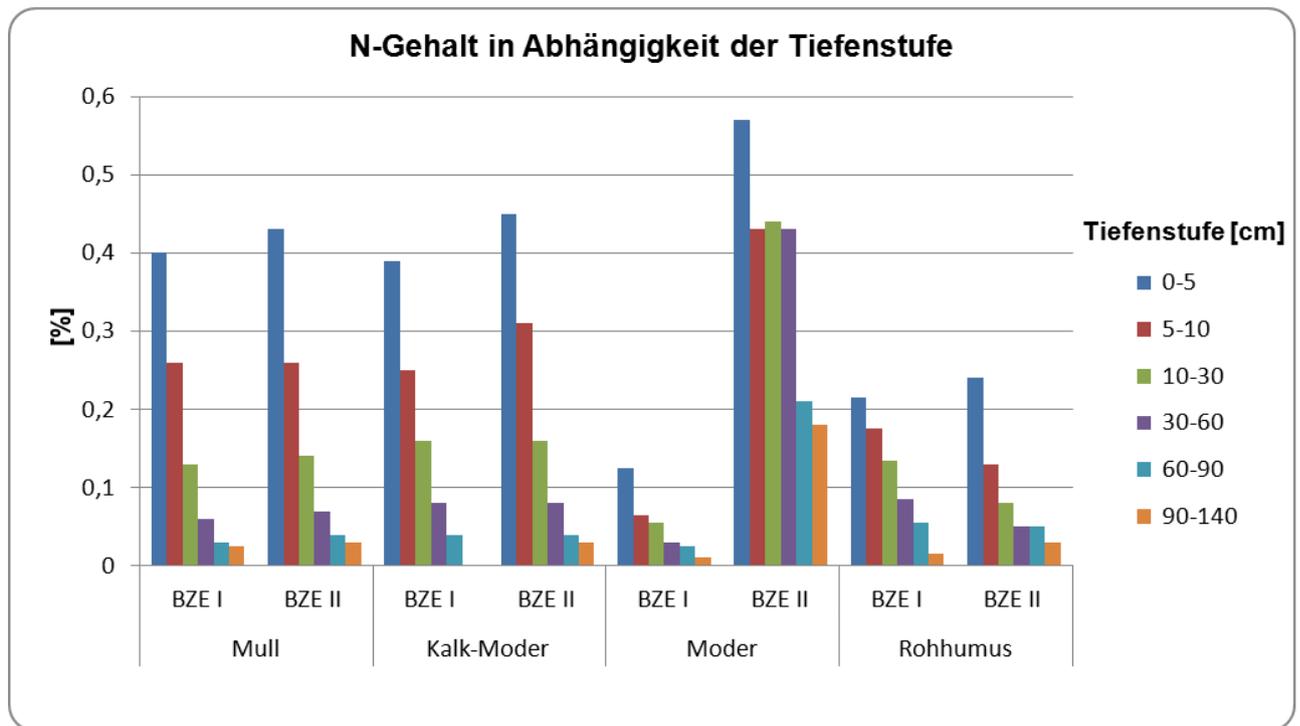


Abbildung 110: Entwicklung des Stickstoffgehalt [%] in Abhängigkeit der Tiefenstufe und der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Im Mineralboden unter den Humusformen Mull, Kalkmoder und Moder ist bis in eine Tiefe von 140 cm ein Anstieg des N-Gehaltes von BZE I zu BZE II zu verzeichnen. Unter Rohhumus ist dies nur in der Tiefenstufe von 0 bis 5 cm nachweisbar. Alle anderen Tiefenstufen zeigen einen eher rückläufigen Trend.

Betrachtet man den Stickstoffgehalt in Abhängigkeit des geologischen Ausgangssubstrates so ergibt sich ein deutlicher Zusammenhang (vgl. Tab.124):

Tabelle 124: Stickstoffgehalt [%] in Abhängigkeit des Grundgesteins (BZE II)

Tiefenstufe	Buntsandstein	Schiefer	Rotliegendes	Schlufflehme	Eutr. Silikatgestein	Carbon-Gesteine
0-5	0,35	0,37	0,27	0,29	0,41	0,29
5-10	0,17	0,23	0,16	0,15	0,26	0,16
10-30	0,10	0,15	0,11	0,11	0,13	0,10
30-60	0,06	0,07	0,06	0,06	0,09	0,04
60-90	0,05	0,05	0,03	0,03	0,09	0,03
90-140	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03

Höhere N-Gehalte kommen bei eutrophen Silikatgesteinen, Schlufflehen, Carbonatgesteinen und sogar Schiefen aufgrund der höheren Kationenaustauschkapazität vor, was meist mit der an diesen Standorten vorgefundenen Humusformen Mull, Kalkmull und Moder korreliert. Obwohl bei den Grundgesteinen Buntsandstein und Rotliegendes meist Rohhumus oder rohhumusartiger Moder anzutreffen sind, stellen sich auch hier annähernd gleiche Werte ein.

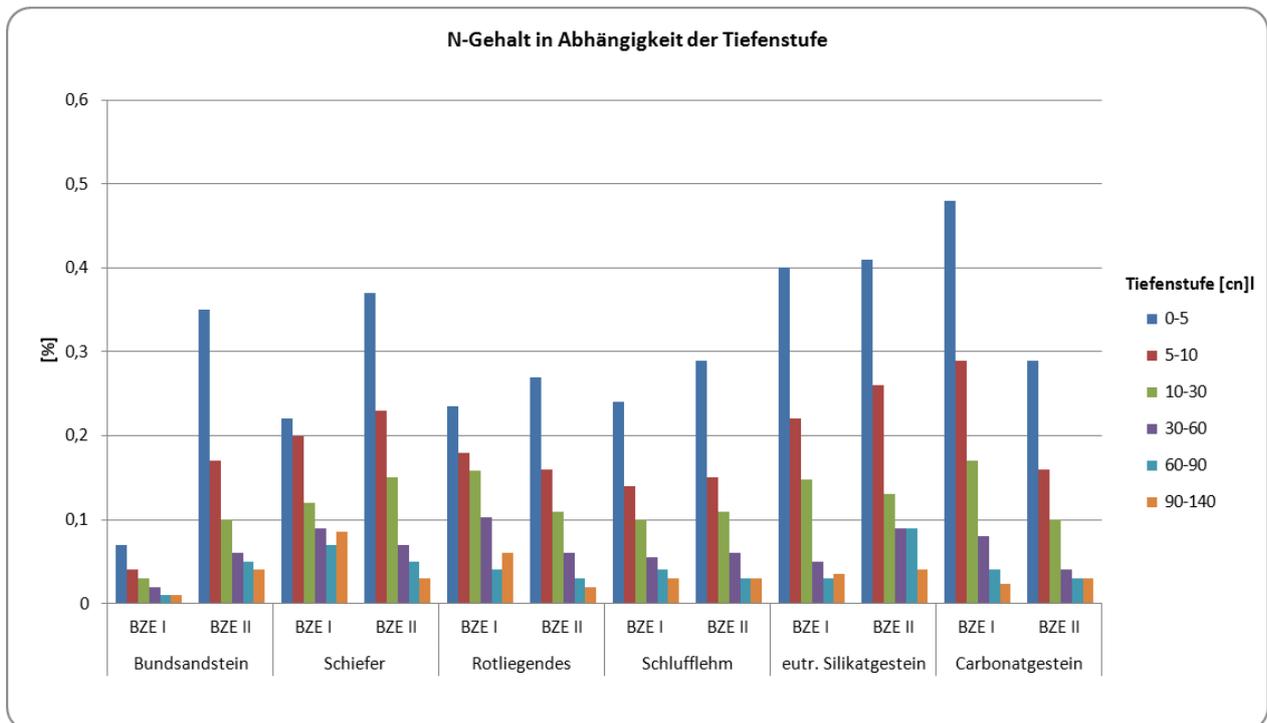


Abbildung 111: Entwicklung des Stickstoffgehalt [%] in Abhängigkeit der Tiefenstufe und des Grundgesteins von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Im Vergleich zu den Ergebnissen BZE I zeigt die BZE II (vgl. Abb.111), dass lediglich bei Buntsandstein eine Zunahme der N-Gehalte über alle Tiefenstufen hinweg auftritt. Auch bei den anderen Grundgesteinstypen sind Zunahmen des N-Gehaltes vorhanden. Diese beziehen sich jedoch nur auf die erste und ggf. die zweite Tiefenstufe. Die Entwicklung der Werte tieferer Bodenschichten zeigen stets rückläufige Trends des N-Gehaltes an. In Hinblick auf die Stickstoffvorräte zeigt sich ein ähnliches Bild, wie es sich bei den Stickstoffgehalten abzeichnete (vgl. Tab.125).

Tabelle 125: N-Vorrat [kg/ha] in Abhängigkeit der Tiefenstufe des Mineralbodens (BZE II)

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
<b>N-Vorrat</b>									
1	0-5	95	156	529	1192	1533	1754	2608	10030
2	5-10	72	88	301	503	780	1165	1482	2760
3	10-30	106	286	884	1715	2432	3133	5199	9072
4	30-60	132	177	612	1344	1806	2609	4569	18447
5	60-90	86	149	447	845	1310	1788	2877	7434
6	90-140	51	140	423	700	840	1190	1748	5960

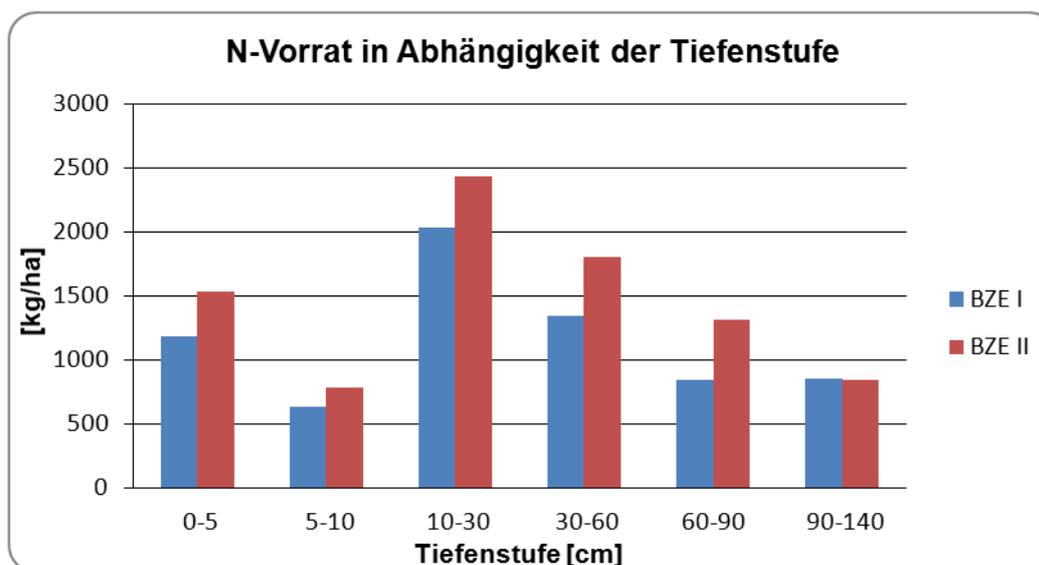


Abbildung 112: Entwicklung des Stickstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Die Ergebnisse der BZE II zeigen einen allgemeinen gleichmäßigen Anstieg der N-Vorräte zwischen den Jahren 1996 und 2009, wobei sich die Vorratszuwächse gleichmäßig über alle Tiefenstufen verteilen (vgl. Abb.112).

Tabelle 126: N-Vorrat [kg/ha] in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Code	Tiefenstufe	Mull			Kalkmoder			Moder			Rohhumus		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
1	0-5	767	1927	10030	1596	1710	3724	372	1376	5301	156	1095	3348
2	5-10	448	1261	2760	1012	1229	1426	189	457	1176	88	480	1904
3	10-30	1060	2744	8288	1936	3820	6292	702	1804	9072	286	1880	5992
4	30-60	1116	2304	8025	2520	3453	3861	302	1224	18447	177	1605	15015
5	60-90	426	1278	6936	1632	1704	1788	453	1359	7434	149	876	4128
6	90-140	247	1438	6160	0	0	0	700	1815	4260	344	730	5960

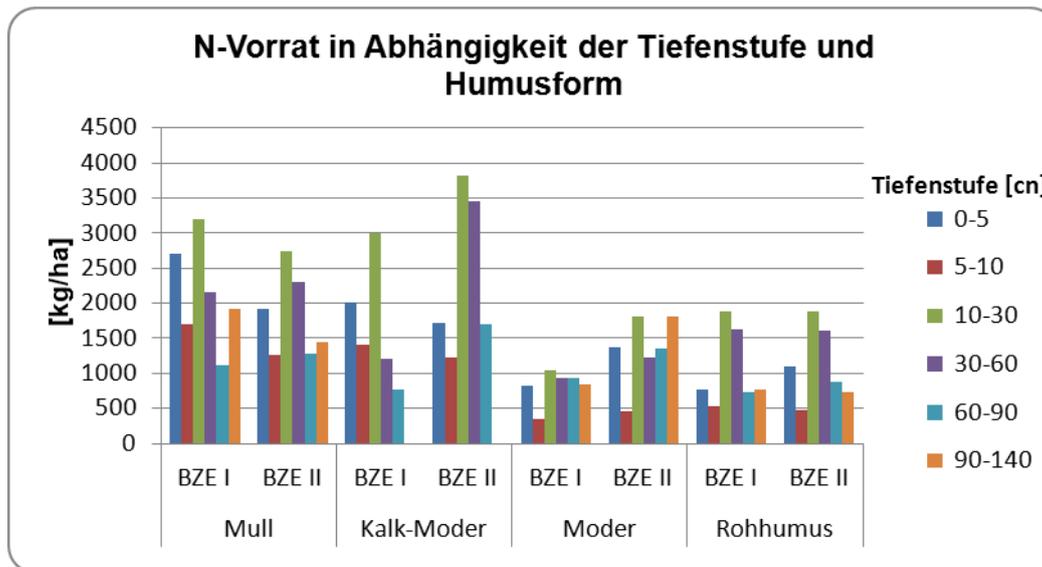


Abbildung 113: Entwicklung des Stickstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Tiefenstufe und Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Die Mineralböden unter den Humusformen Mull und Kalkmoder haben im Vergleich zu Moder und Rohhumus insgesamt höhere N-Vorräte. In Bezug auf die vertikale Verteilung sind in den Tiefenstufen 0-5 cm und 10-60 cm die höchsten Werte unter Mull und Kalkmoder anzutreffen. Dieser Sachverhalt ist auch bei den Humusformen Moder und Rohhumus gegeben. Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.113) zeigt sich insgesamt, dass Mineralböden unter Kalkmoder und Moder Vorratszuwächse in fast allen Tiefenstufen zu verzeichnen haben, wobei es sich unter Mull gegenteilig verhält. Hier ist insgesamt von einem Vorratsrückgang zu sprechen. Ein Vorratszuwachs bei Rohhumus beschränkt sich auf die Tiefenstufen 0-5 cm und 60-90 cm.

Mineralböden besitzen unter Moderformen geringere N-Vorräte als unter Rohhumusformen, dies leitet sich aus der Abhängigkeit zwischen Stickstoffvorrat im Mineralboden und der Höhenlage ab. Da der überwiegende Teil der Rohhumusformen, im Gegensatz zu den Moderformen, in montanen Höhenstufen gefunden wurden, konnten sich hier mehr organische Substanzen und somit Stickstoff im Bodenkörper anreichern (vgl. Tab.127).

Tabelle 127: N-Vorrat [kg/ha] in Mineralböden in Abhängigkeit der Tiefenstufe und der Höhenlage (BZE II)

Code	Tiefenstufe	planar (<300 m ü. NN)			collin-submontan (300-500 m ü. NN)			montan (>500 m ü. NN)		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
1	0-5	216	1256	3230	156	1241	10030	525	1752	5301
2	5-10	88	672	2346	88	552	2700	408	1254	2760
3	10-30	286	1908	8288	286	1853	8096	1104	2912	9072
4	30-60	298	2040	8151	259	2010	18447	177	1344	15015
5	60-90	149	1278	6936	258	894	3600	151	1827	7434
6	90-140	140	840	4970	284	994	5960	745	745	745

Tabelle 128: N-Vorrat [kg/ha] der Humusform in Abhängigkeit Höhenlage (BZE II)

Tiefenstufe	planar (<300 m ü. NN)			collin-submontan (300-500 m ü. NN)			montan (>500 m ü. NN)		
	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
<b>Mull</b>	140	1656	8288	0	1563	10030	1560	2111	6840
<b>Kalkmoder</b>	0	0	0	894	1936	6292	0	0	0
<b>Moder</b>	224	680	1510	189	1233	5600	531	2912	18447
<b>Rohhumus</b>	0	329	2604	0	665	5960	151	2025	15015

Es wird deutlich, dass die Höhenlage einen Einfluss auf den N-Vorrat hat. So nimmt mit steigender Höhe auch der N-Vorrat zu (vgl. Tab.128). Betrachtet man die planare Höhenstufe, so stellen die Mineralböden unter Mullformen die höchsten N-Vorräte. In der collin-submontanen Höhenstufe sind es Mineralböden unter Kalkmoderformen mit den höchsten N-Vorräten. Ab einer Höhe von über 500 m ü. NN dominieren die Moderformen.

Beim Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.114) stellt sich heraus, dass es in der collin-submontanen sowie der montanen Höhenstufe insgesamt zu rapiden Vorratsverlusten gekommen ist. Weiterhin zeigt sich, dass in der montanen Höhenstufe im Allgemeinen höhere Vorratswerte als in der collin-submontanen Höhenstufe vorhanden sind.

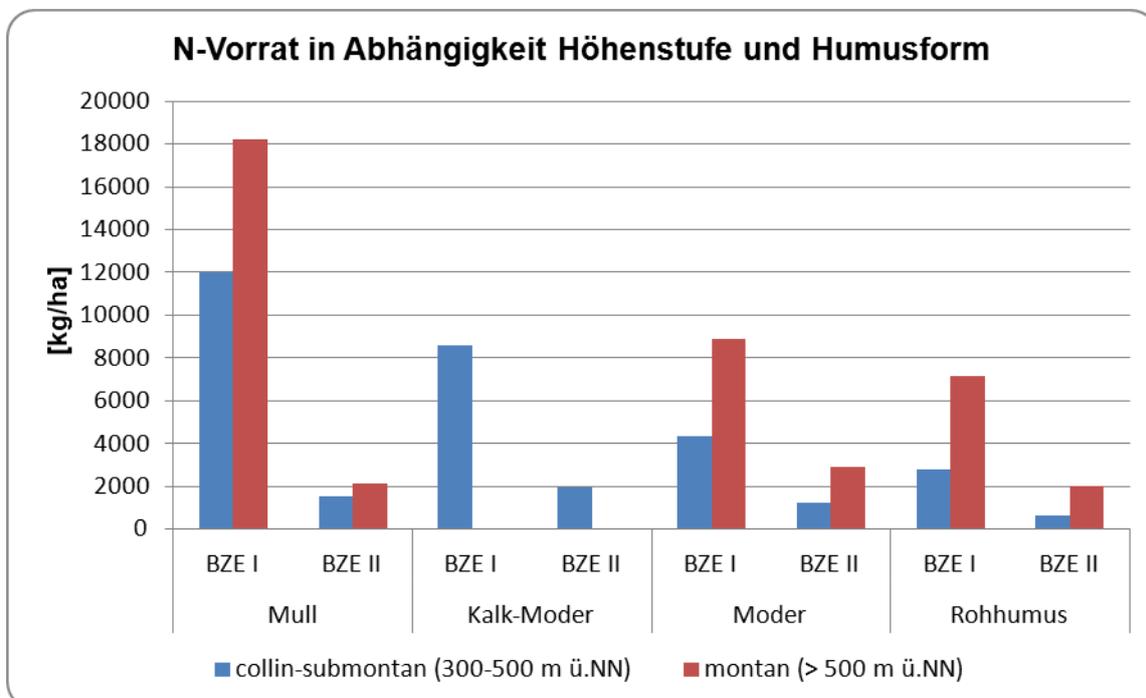


Abbildung 114: Entwicklung des Stickstoffvorrates [kg/ha] in Abhängigkeit der Höhenstufe und Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

#### 4.3.4 C/N – Verhältnis

Nach WOLFF und RIECK (1996) beschreibt das C/N- Verhältnis die Zersetzbarkeit organischer Auflagen sowie der oberen 10 cm des Mineralbodens und kann somit als Indikator für die biologische Bodenaktivität und als Maßstab für die Humusqualität herangezogen werden. Demnach stehen engere C/N-Verhältnisse für günstigere Bedingungen für die Bioverfügbarkeit des Stickstoffes sowie höhere Mineralisationsraten. Auch der Anteil an Huminsäuren organischer Substanzen überwiegt bei engen C/N-Verhältnissen, so dass sich eine höhere Austauscherkapazität des Mineralbodens einstellt. Somit ist bei C/N-Verhältnissen < 20 von günstigen und bei C/N-Verhältnissen > 25 von ungünstigen Zersetzungsbedingungen auszugehen.

Das C/N-Verhältnis im Mineralboden nimmt mit zunehmender Tiefenstufe ab (vgl. Tab.129). Von Interesse als Indikator sind aber nur die Tiefenstufen 0-10 cm. Im Median wird ein C/N-Verhältnis von 20 nicht überschritten. Schließt man die Quantile 35% und 65% in die Betrachtungen mit ein, so würde sich das C/N-Verhältnis ebenfalls unter dem Wert von 20 bewegen.

Tabelle 129: C/N-Verhältnis in Abhängigkeit der Tiefenstufe des Mineralbodens (BZE II)

Verteilung der Gesamthäufigkeit									
Code	Tiefenstufe	Anzahl	Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
C/N-Verhältnis									
1	0-5	98	10,84	13,35	15,33	18,03	19,68	23,86	34,80
2	5-10	98	9,76	12,86	14,62	16,78	18,72	24,35	34,00
3	10-30	103	5,18	10,43	12,53	14,40	15,73	20,72	36,00
4	30-60	114	2,60	7,66	9,67	10,92	13,00	16,00	32,00
5	60-90	97	0,00	4,82	8,20	10,00	11,40	17,80	31,50
6	90-140	94	0,50	3,00	6,00	8,00	10,00	14,50	36,00

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II zeigt sich eine Abnahme der C/N-Verhältnisse in den Tiefenstufen. Da bodenbiologische Prozesse meist in den obersten Schichten des Mineralbodens von Bedeutung sind, wurde das C/N-Verhältnis nur bis in eine Tiefe von 10 cm vergleichend dargestellt. Die Messwerte der BZE II wurden in Hinblick auf die Vollständigkeit bis zur Tiefenstufe 6 aufgeführt.

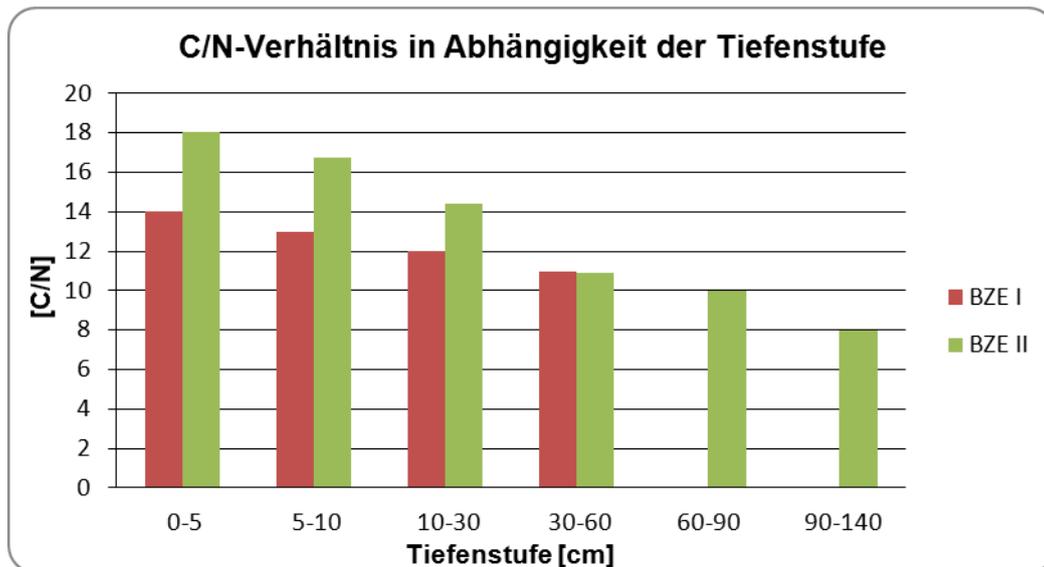


Abbildung 115: Entwicklung des C/N-Verhältnisses in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Betrachtet man das C/N-Verhältnis des Mineraloberbodens in Abhängigkeit von der darüber liegenden Humusform (vgl. Tab.130) so zeigt sich, dass bei Humusformen des Kalkmoders untypische Werte in größerer Tiefenstufe einsetzen. Dies liegt in dem geringen Stichprobenumfang für Kalkmoder begründet.

Auch bei den Humusformen (ausgenommen Kalkmoder) bestätigen sich die bereits gewonnen Erkenntnisse. Somit nimmt auch hier mit zunehmender Tiefe das C/N-Verhältnis ab. Insgesamt weist der Mineraloberboden unter Mull die engsten C/N-Verhältnisse auf.

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.116) sind Erhöhungen des C/N-Wertes in den Tiefenstufen 0-10 cm zu verzeichnen. Unter Rohhumus überschreiten die C/N-Werte sogar den Indikatorwert von 20, so dass hier von keinen günstigen Bedingungen mehr auszugehen ist, was aber für Rohhumus typisch und natürlich ist.

Tabelle 130: C/N-Verhältnis im Mineraloberboden in Abhängigkeit der Humusform (BZE II)

Code	Tiefenstufe	Mull			Kalkmoder			Moder			Rohhumus		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
1	0-5	10,84	13,91	16,54	12,16	14,91	20,29	14,45	18,95	25,63	13,21	20,57	34,80
2	5-10	9,76	12,96	18,58	13,63	14,03	18,58	12,48	17,69	28,67	11,75	20,57	34,00
3	10-30	10,00	12,40	19,43	5,18	11,18	15,73	7,50	14,52	28,33	6,75	16,54	36,00
4	30-60	6,00	10,14	16,75	9,33	12,83	17,44	4,00	10,08	16,35	2,60	13,00	32,00
5	60-90	2,00	9,67	31,50	0,00	18,00	23,25	1,86	9,22	20,00	1,14	9,75	26,50
6	90-	4,00	9,00	24,00	10,25	14,33	36,00	1,17	6,20	17,94	0,50	5,85	23,20

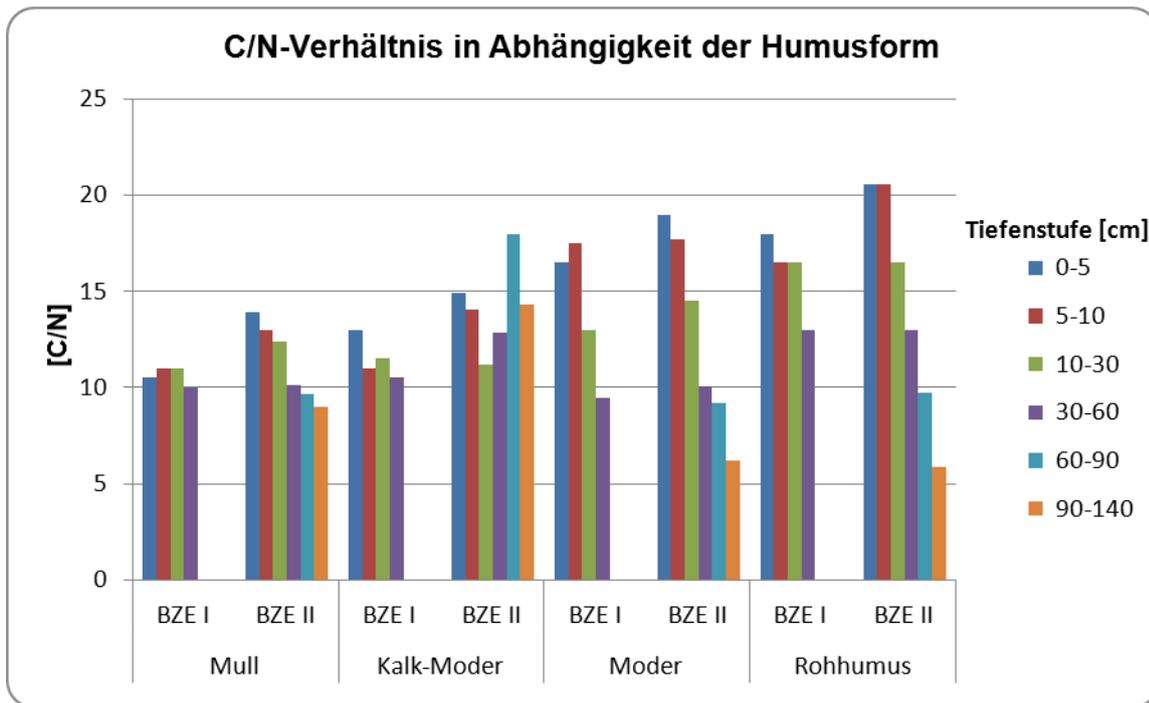
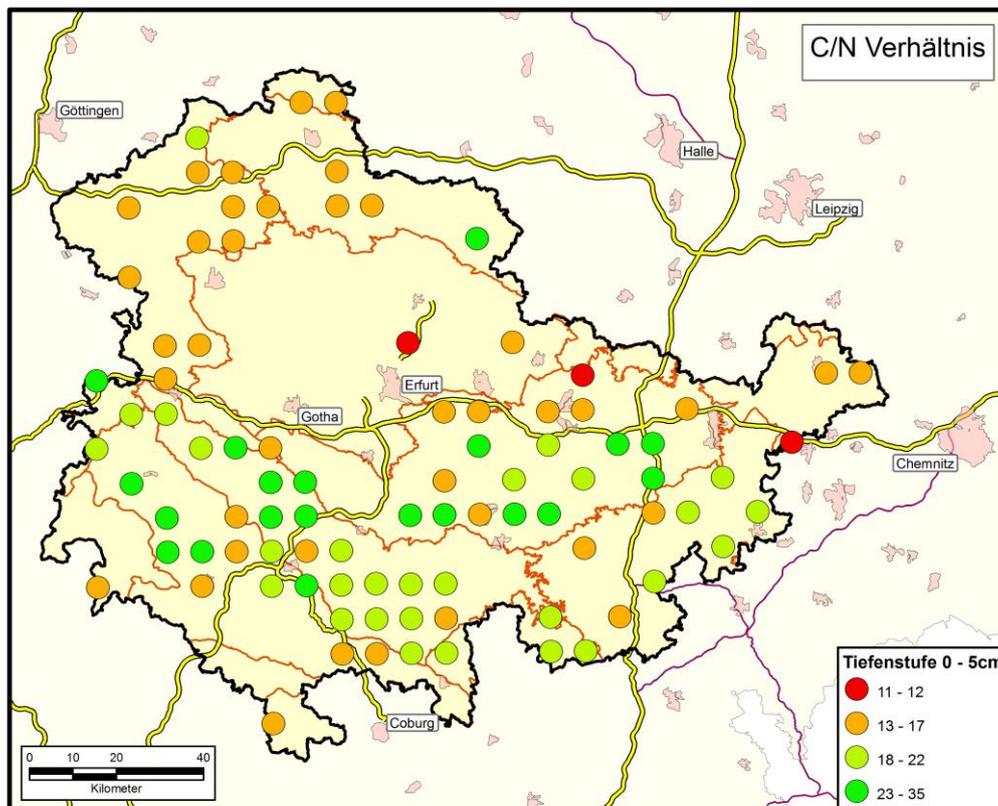


Abbildung 116: Entwicklung des C/N-Verhältnisses in Abhängigkeit der Humusform von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane



Karte 94.

#### 4.4 Kationen- und Anionengehalt im wässrigen 1:2 Extrakt

Um einen Überblick über die in der Bodenlösung enthaltenen An- und Kationen von organischen, anorganischen und organo-mineralischen Substanzen geben zu können, wurde die Bestimmung in einem wässrigen 1:2 Extrakt durchgeführt. Weiterhin ist bei diesem Verfahren zu berücksichtigen, dass es durch Maßnahmen der Bodenvorbehandlung (Trocknung und folgende Lösungsaufbereitung) zur Mobilisierung organischer Substanz kommen kann (Vgl. MEIWES et al (1984)). Demnach wurden für die Auswertung nur Bodenproben von weniger als 2% organischer Substanz (Kohlenstoffgehalt) berücksichtigt. Somit stellt die Tabelle 131 die Anzahl jener Bodenproben dar, welche die eben genannten Anforderungen erfüllen.

**Tabelle 131: Verteilung der Bodenproben in Gesamtübersicht und des auswertbaren wässrigen 1:2 Extraktes in Abhängigkeit der Tiefenstufe**

Tiefenstufe	Anzahl der Proben		
	insgesamt	1:2 Extrakt	% Anteil
<b>0-5</b>	98	0	0
<b>5-10</b>	98	0	0
<b>10-30</b>	103	0	0
<b>30-60</b>	114	0	0
<b>60-90</b>	99	93	93,9
<b>90-140</b>	99	0	0

Somit wird nur in der Tiefenstufe von 60 cm bis 90 cm dieses Kriterium erfüllt, so dass hier auf die in der Bodenlösung enthaltenen An- und Kationengehalte eingegangen wird.

Die folgenden Tabellen 132 und 133 stellen die aus der Bodenlösung ermittelten Gehalte von organischen, anorganischen und organo-mineralischen Substanzen sowie den pH-Wert dar. Diese sind auf das Gesamtdatenkollektiv sowie auf die in Thüringen wesentlich vorkommenden Substratgruppen bezogen.

Tabelle 132: Gehalte [mg/l] im wässrigen 1:2 Extrakt für die Tiefenstufe 60 cm bis 90 cm

	Tiefenstufe	Verteilung der Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
<b>Na</b>	60-90	0,30	1,27	1,75	2,34	3,02	4,11	12,90
<b>K</b>	60-90	0,21	0,56	1,29	1,83	2,46	4,83	10,30
<b>Mg</b>	60-90	0,18	0,50	0,81	1,10	1,78	4,55	45,70
<b>Ca</b>	60-90	0,49	1,56	3,28	4,69	9,43	36,70	674,00
<b>Al</b>	60-90	0,01	0,13	0,29	0,42	0,76	1,74	12,10
<b>Mn</b>	60-90	0,00	0,00	0,08	0,20	0,48	1,38	4,69
<b>Fe</b>	60-90	0,01	0,01	0,03	0,06	0,13	0,30	1,13
<b>NO3</b>	60-90	0,20	0,30	0,70	1,30	1,91	4,36	20,80
<b>SO4</b>	60-90	0,30	4,38	7,42	9,10	14,68	31,14	1580,00
<b>pH</b>	60-90	4,00	4,32	4,60	4,80	5,68	8,00	8,35

Tabelle 133: Gehalte [mg/l]- Median im wässrigen 1:2 Extrakt für die Tiefenstufe 60 cm bis 90 cm in Abhängigkeit des Grundgesteins

	Tiefenstufe	Bunt-Sandstein	Schiefer	Rot-liegendes	Schluff-Lehme	eutr. Silikat-Gesteine	Carbonat-Gesteine
<b>Na</b>	60-90	2,785	1,72	1,65	3,3	1,785	2,20
<b>K</b>	60-90	1,78	1,99	1,69	1,64	1,315	2,23
<b>Mg</b>	60-90	1,275	0,81	0,9	1,75	0,975	1,25
<b>Ca</b>	60-90	4,74	2,38	3,37	12,9	3,89	5,42
<b>Al</b>	60-90	0,4065	0,76	0,807	0,2105	0,7705	0,41
<b>Mn</b>	60-90	0,1144	0,272	0,335	0,010345	0,628	0,32
<b>Fe</b>	60-90	0,093	0,05	0,05	0,0705	0,09	0,03
<b>NO3</b>	60-90	1,1	0,7	0,6	1,5	1,8	0,90
<b>SO4</b>	60-90	9,2	7,1	8,2	10,75	9,5	25,70
<b>pH</b>	60-90	4,75	4,8	4,7	7,11	4,9	4,70

Die Gehalte von **Natrium (Na)** schwanken im Allgemeinen zwischen 0,30 und 12,90 mg/l in der Bodenlösung. Hinsichtlich des Grundgesteins ist festzustellen, dass Standorte des Rotliegenden und Schiefer die niedrigsten Werte, gefolgt von eutrophen Silikat-Gesteinen, aufweisen.

**Kalium (K)** ist in der Bodenlösung mit einer Konzentrationsschwankung von 0,21 bis 10,30 mg/l vorhanden. Die höchsten Gehalte finden sich bei Standorten von Carbonatgestein und Schiefer wieder.

Bei **Magnesium (Mg)** schwankt der Gehalt zwischen 0,18 und 45,70 mg/l, wobei die niedrigsten Werte bei Standorten auf Schiefer und Rotliegendem auftreten. Überraschend fallen die hohen Mg-Gehalte bei Buntsandstein-Standorten auf.

**Calcium (Ca)** schwankt in seinem Gehalt zwischen 0,49 und 674,00 mg/l. Demnach ist es mit einem mittleren Gehalt von 4,69 mg/l das in der Bodenlösung am häufigsten vorkommende anorganische Kation. Obwohl von hohen Gehalten bei Carbonatgesteins-Standorten ausgegangen werden kann, wurde dies hier nicht bestätigt. Demnach wiesen Schlufflehme die höchsten Werte (12,90 mg/l) auf. Überraschend fallen auch hier die hohen Werte bei Buntsandstein auf.

Der Gehalt von **Aluminium (Al)** schwankt innerhalb der Bodenlösung zwischen 0,01 und 12,10 mg/l und ist im Durchschnitt mit 0,42 mg/l anzugeben. Erwartungsgemäß treten hohe Konzentrationen bei Silikatgesteinen, insbesondere bei Schiefer, Rotliegendem und eutrophen Silikatgesteinen auf. Dem gegenüber wurden geringe Werte bei Standorten von Schlufflehm und Carbonatgestein angetroffen.

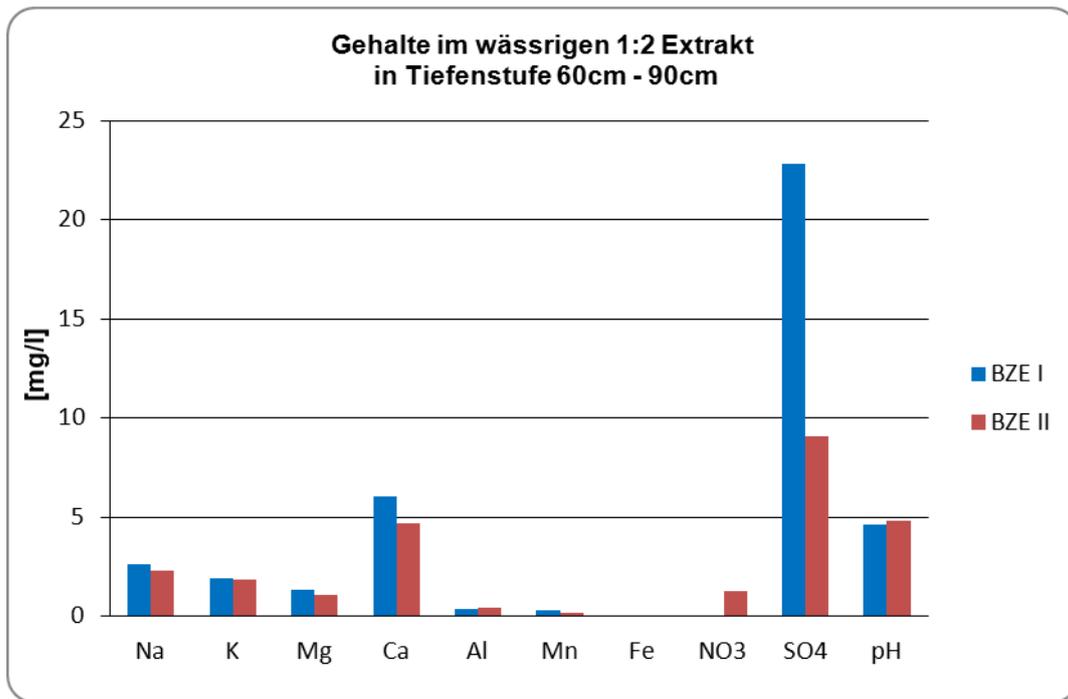
**Mangan (Mn)** ist mit einem durchschnittlichen Gehalt von 0,20 mg/l in der Bodenlösung bei definierter Tiefenstufe vorhanden. In Abhängigkeit des Grundgesteines sind die niedrigsten Werte auf Buntsandstein und Schlufflehm vorhanden.

Auch **Eisen (Fe)** ist ähnlich wie Mangan und Aluminium nur in geringen Gehalten in der Bodenlösung vorhanden. Der durchschnittliche Gehalt ist mit 0,06 mg/l anzugeben und steht in Abhängigkeit vom pH-Wert. Dieser ist durchschnittlich mit 4,8 pH(H<sub>2</sub>O) für die definierte Tiefenstufe festzusetzen, so dass der Eisenpufferbereich (pH < 3,0) nicht erreicht wird. Durch hohe Werte zeichnen sich Standorte des Buntsandsteins sowie der eutrophen Silikatgesteine aus. Erfahrungsgemäß wurden auf Standorten des Carbonatgesteins die niedrigsten Werte angetroffen.

Der **Nitratgehalt (NO<sub>3</sub>)** ist für die Tiefenstufe 60 cm bis 90 cm mit durchschnittlich 1,30 mg/l anzugeben. Höhere Gehalte sind meist bei BZE-Probepunkten zu finden bei denen landwirtschaftliche Nutzflächen in unmittelbarer Nähe angrenzen. In Abhängigkeit des Grundgesteins zeichnen sich Rotliegend- und Schieferstandorte durch geringe Werte aus.

Der Schwefelgehalt in Form von **Sulfat (SO<sub>4</sub>)** unterliegt einem großen Schwankungsbereich von 0,30 bis 1580,00 mg/l und ist durchschnittlich mit 9,10 mg/l in der Bodenlösung bei definierter Tiefenstufe (60 cm – 90 cm) vorhanden. Wie bei Nitrat sind auch hier die niedrigsten Schwefelgehalte auf Rotliegend- und Schieferstandorten zu verzeichnen. Mit durchschnittlich über 25 mg/l sind die von Carbonatgestein geprägten Standorte auffällig. Bei BZE-Probepunkten im ostthüringischen Raum, welcher starker industriell geprägt ist, sind tendenziell höhere Werte anzutreffen.

Bei der vergleichenden Auswertung von BZE I und BZE II (vgl. Abb.117) konnten nur die Ergebnisse der Tiefenstufe 60 cm bis 90 cm gegenübergestellt werden.



**Abbildung 117: Entwicklung der Gehalte im wässrigen 1:2 Extrakt in Abhängigkeit der Tiefenstufe von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane**

Demnach zeigt sich, dass es insgesamt zu einem Abfall der Stoffgehalte innerhalb des wässrigen 1:2 Extraktes der Tiefenstufe 60 cm bis 90 cm gekommen ist. Bei Sulfat ist ein deutlicher Rückgang zu bemerken, welcher mehr als 50 % beträgt. Dies kann u.a. auf den Rückgang der Industriestandorte vor allem in Ostthüringen sowie ein verbessertes produktionsintegriertes Umwelt- und Abfallmanagement zurückgeführt werden.

Auch im Vergleich der Ergebnisse in Abhängigkeit des Grundgesteins ist festzustellen, dass es zwischen der BZE I und BZE II insgesamt zu einem Rückgang des Sulfatgehaltes gekommen ist (vgl. Abb.118 und 119). Weiterhin verzeichnet Buntsandstein Anstiege bei dem Natrium- und Calciumgehaltes, wobei diese bei Carbonat-Gesteinen abnehmen. Bei den Al-Gehalten zeigen alle Grundgesteine außer Buntsandstein einen Anstieg. Obwohl der Nitratgehalt bei Buntsandstein, Schluff-Lehm und eutrophen Silikatgestein ansteigt, so fällt dieser bei allen übrigen Grundgesteinstypen ab. Der Eisengehalt ist annähernd gleich geblieben.

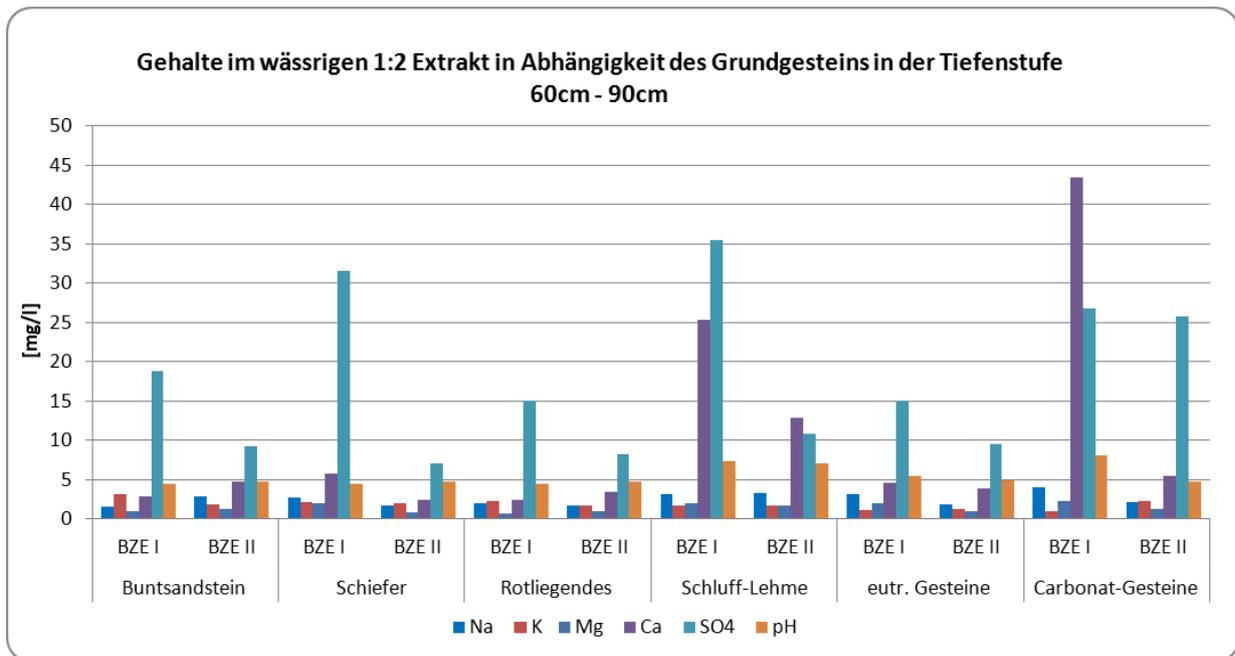


Abbildung 118: Entwicklung der Gehalte im wässrigen 1:2 Extrakt in Abhängigkeit des Grundgesteins in der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

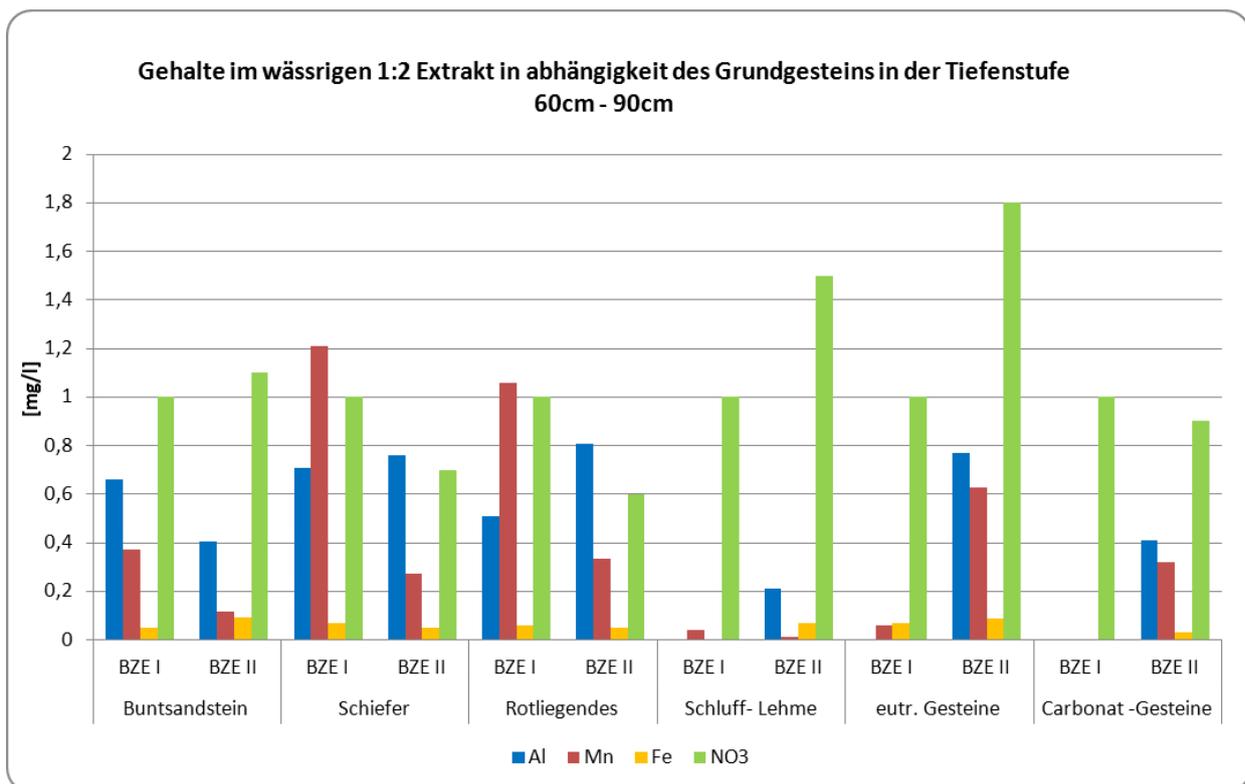


Abbildung 119: Entwicklung der Gehalte im wässrigen 1:2 Extrakt in Abhängigkeit des Grundgesteins in der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Mit Hilfe der Substrat- bzw. Stoffkonzentrationen des wässrigen 1:2 Extraktes, lässt sich die Bodenazidität beurteilen, so dass der Aziditätsgrad als Maß für den Versauerungszustand des Bodens herangezogen werden kann.

$$\frac{H^+ + Al^3 + Mn^2 + Fe^3}{Na^2 + K^+ + Mg^2 + Ca^2 + H^+ + Al^3 + Mn^2 + Fe^3}$$

Formel 1: Aziditätsgrad nach ULRICH (1988)

Demnach kann der Aziditätsgrad für die Tiefenstufe 60 cm bis 90 cm im Mittel bei ca. 13,7 % festgestellt werden (vgl. Tab.134).

Tabelle 134: Aziditätsgrad für die Tiefenstufe 60 cm – 90 cm

Tiefenstufe	n	Verteilung der Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
<b>60-90</b>	92	0,000	0,015	0,049	0,137	0,225	0,345	0,681

Die eher nährstoffärmeren Substrate Rotliegendes und Schiefer sind am stärksten versauerungsgefährdet (vgl. Tab.135). Auch die eutrophen Silikat-Gesteine weisen mit einem Aziditätsgrad von ca. 22,5 % auf Versauerungstendenzen hin. Überraschend ist der Aziditätsgrad bei Buntsandstein, welcher in etwa die gleichen Werte wie der von Carbonat-Gestein aufweist und demnach nur gering versauerungsgefährdet erscheint. Dies bleibt zu prüfen.

Tabelle 135: Aziditätsgrad in Abhängigkeit des Grundgesteins

Grundgestein	Tiefenstufe 60-90		
	Min	Med	Max
<b>Rotliegendes</b>	0,010	0,254	0,383
<b>Schiefer</b>	0,004	0,279	0,601
<b>Buntsandstein</b>	0,000	0,126	0,467
<b>Schluff-Lehm</b>	0,001	0,030	0,191
<b>eutr. Silikat-Gesteine</b>	0,013	0,224	0,389
<b>Carbonat-Gesteine</b>	0,005	0,127	0,681

Im Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.120 und 121) zeigt sich, dass es nur zu geringen Änderungen des Aziditätsgrades gekommen ist. Dieser ist als leicht rückläufig zu beschreiben, so dass von einer geringen Minderung der Versauerungsgefährdung in der Tiefenstufe von 60 cm bis 90 cm auszugehen ist.

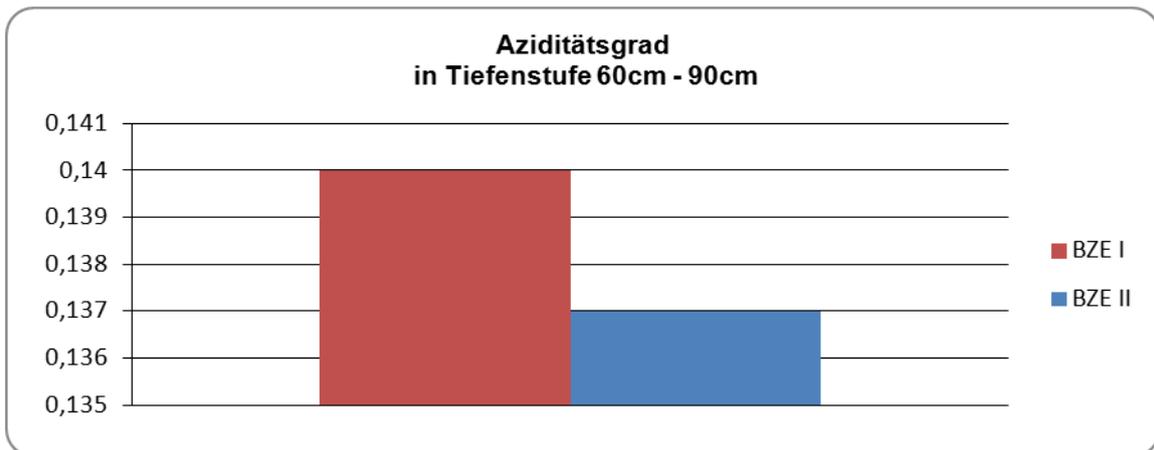


Abbildung 120: Entwicklung des Aziditätsgrades in Abhängigkeit der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

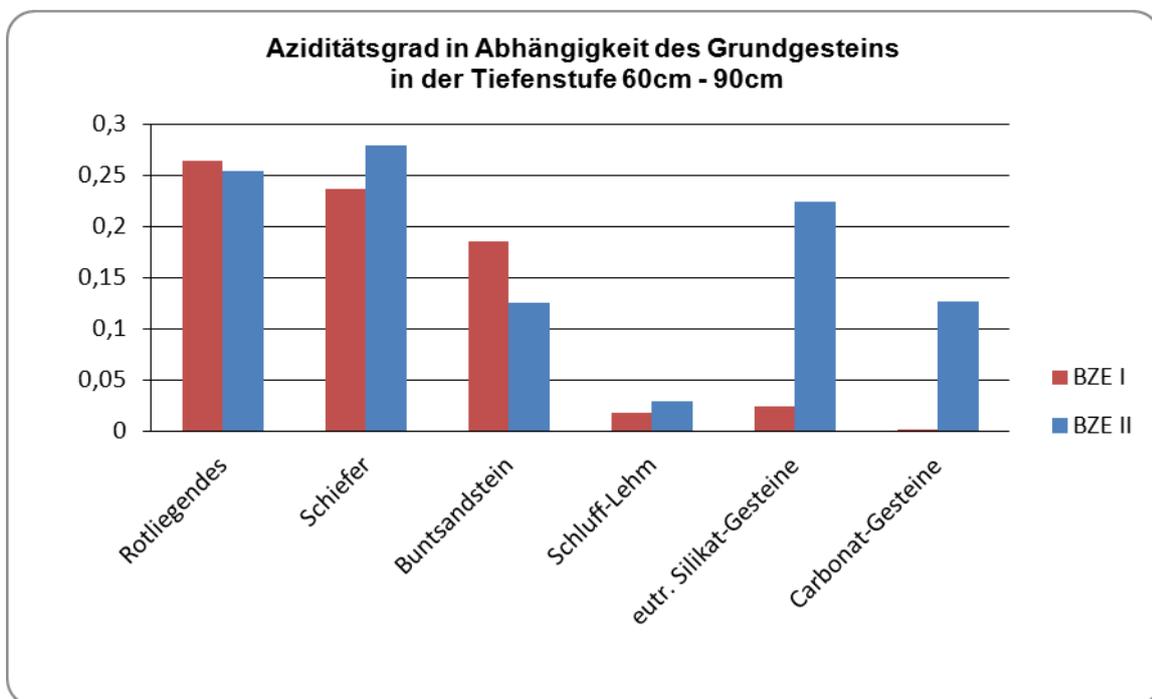
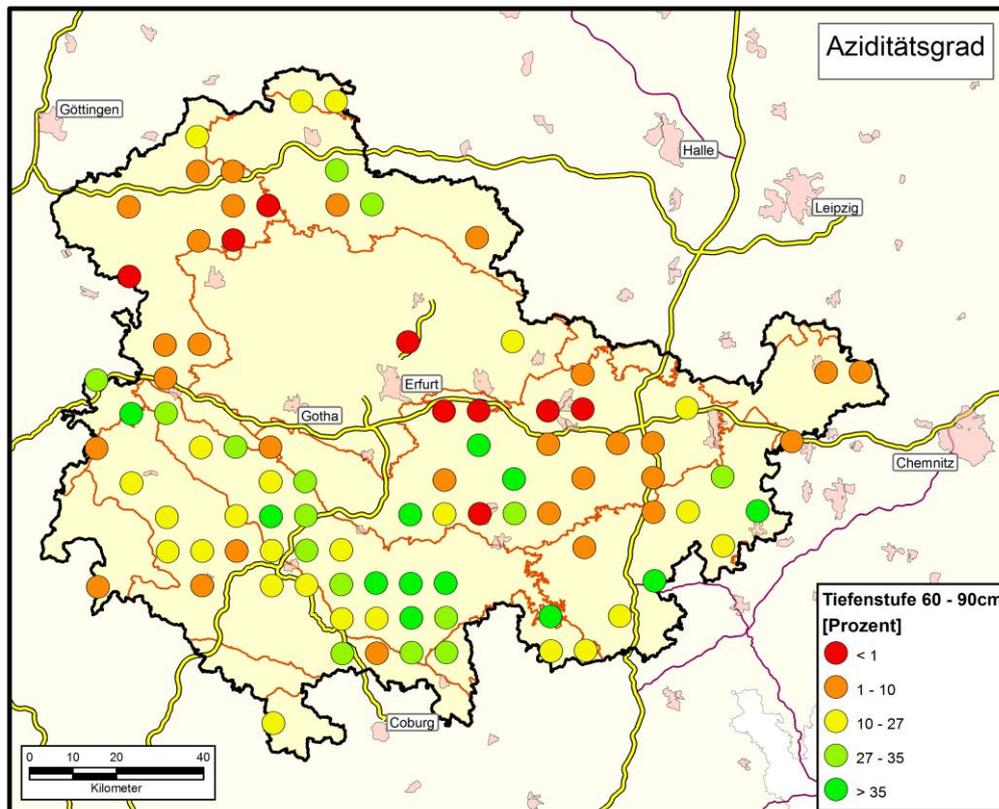


Abbildung 121: Entwicklung des Aziditätsgrades in Abhängigkeit des Grundgesteins in der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

In Abhängigkeit des Grundgesteines ist festzustellen, dass der Aziditätsgrad sich bei Buntsandstein und Rotliegendem verbessert hat, so dass hier die Versauerungsgefährdung abnahm. Bei allen weiteren Grundgesteinstypen stellte sich ein Anstieg der Azidität und somit ein Anstieg der Versauerungsgefährdung ein. Weiterhin unterliegen Pflanzen sowohl dem Einfluss einer erhöhten Azidität als auch anderen schädigenden Einflüssen, die auf das Wachstum von Wurzel, Blatt und Spross negativ wirken können. Ein wesentlicher Weiser für die Aluminiumgefährdung der Wurzeln von Fichte und Buche ist das molare Ca/Al-Verhältnis nach ROST-SIEBERT (1985). Davon ausgehend besteht bei einem Verhältnis von  $> 1$  für

Fichtenwurzeln keine Gefährdung, zwischen 0,3 und 1 eine zunehmende, zwischen 0,1 und 0,3 eine starke und unter 0,1 eine sehr starke Toxizität. Nach SVERDRUP u. WARFVINGE (1993) ist die Empfindlichkeit der Kiefer der der Fichte gleichzusetzen. Bei der Buche und Eiche tritt bei einem Verhältnis von  $< 0,1$  eine starke, zwischen 0,1 und 0,6 eine geringe und bei einem Verhältnis von  $> 0,6$  keine Gefährdung ein.



Karte 95.

Die Ergebnisse für das Ca/Al-Verhältnis sowie das Ca+K+Mg/Al-Verhältnis sind in den Tabellen 136 und 137 wiedergegeben. Das Ca+K+Mg/Al-Verhältnis kann auch als Basenkapazität/Aluminium-Verhältnis (Bc/Al-Verhältnis) bezeichnet werden und schließt neben Calcium die basischen Kationen Kalium und Magnesium mit ein. Demnach liefert dieses Verhältnis einen weiteren Überblick über mögliche Aluminiumtoxizitäten für Pflanzenwurzeln.

Tabelle 136: Ca/Al-Verhältnis für die Tiefenstufe 60 cm – 90 cm

Tiefenstufe	n	Verteilung der Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
60-90	92	0,203	0,601	1,586	3,773	12,395	84,690	9112,242

Tabelle 137: Bc/Al-Verhältnis für die Tiefenstufe 60 cm – 90 cm

Tiefenstufe	n	Verteilung der Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
60-90	92	0,429	1,761	3,732	7,136	26,727	96,477	10171,084

Es zeigt sich, dass das Ca/Al-Verhältnis einer sehr starken Schwankung unterliegt. Etwa 27 % aller BZE-Probepunkte unterschreiten den Quotienten von 1, so dass hier von einer unterschiedlich starken Aluminiumtoxizität auszugehen ist. Davon ist bei ca. 24 % von einer zunehmenden und bei 3 % von einer starken Aluminiumtoxizität in der Tiefenstufe von 60 cm bis 90 cm auszugehen. Sie sind überwiegend den Grundgesteinstypen des Rotliegenden, des Schiefers und des Buntsandsteins zuzuordnen. Dies wird u.a. auch durch die Ergebnisse der Tabellen 138 und 139 deutlich, bei denen die Grundgesteine Rotliegendes und Schiefer die niedrigsten Werte aufweisen.

Tabelle 138: Ca/Al-Verhältnis in Abhängigkeit des Grundgesteins

Grundgestein	Tiefenstufe 60-90		
	Min	Med	Max
Rotliegendes	0,351	1,580	95,300
Schiefer	0,257	0,902	255,178
Buntsandstein	0,489	5,573	9112,242
Schluff-Lehm	1,587	22,079	1620,143
eutr. Silikat-Gesteine	0,587	4,066	89,073
Carbonat-Gesteine	0,203	3,562	2022,445

Tabelle 139: Ca-K-Mg/Al-Verhältnis in Abhängigkeit des Grundgesteins

Grundgestein	Tiefenstufe 60-90		
	Min	Med	Max
Rotliegendes	1,568	2,551	104,876
Schiefer	0,615	2,526	294,141
Buntsandstein	0,991	10,404	10171,084
Schluff-Lehm	4,100	38,856	1725,293
eutr. Silikat-Gesteine	1,606	8,058	93,050
Carbonat-Gesteine	0,429	6,699	4065,799

Der Vergleich der Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.122 und 124) ergibt, dass das Ca/Al-Verhältnis im Durchschnitt um mehr als 50 % zurückgegangen ist. Trotz des Rückgangs, welcher nicht unterschätzt werden sollte, ist bis zu diesem Zeitpunkt von keiner toxischen Aluminiumkonzentration im Mineralboden auszugehen. Lediglich bei Buntsandstein-Standorten konnte sich ein Anstieg des Ca/Al-Verhältnisses einstellen. Warum es zu solch rapiden Veränderungen gekommen ist, kann nicht hinreichend geklärt werden. Fehlerquellen, welche sich bei der Datenerhebung einstellen können, sollten als mögliche Ursache nicht ausgeschlossen werden.

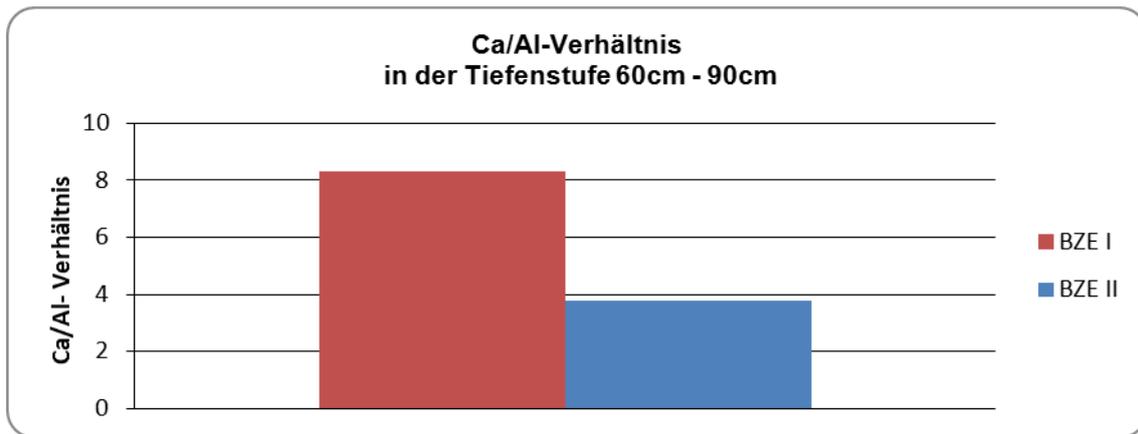


Abbildung 122: Entwicklung des Ca/Al-Verhältnisses in Abhängigkeit der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

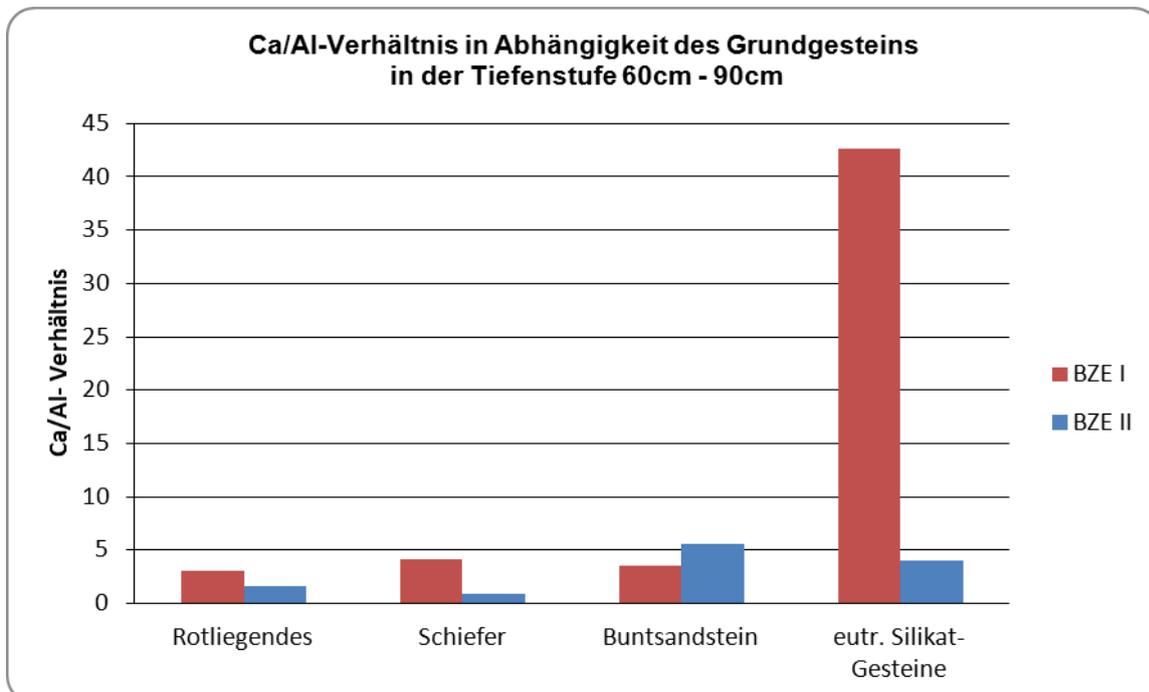


Abbildung 123: Entwicklung des Ca/Al-Verhältnisses in Abhängigkeit des Grundgesteins in der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

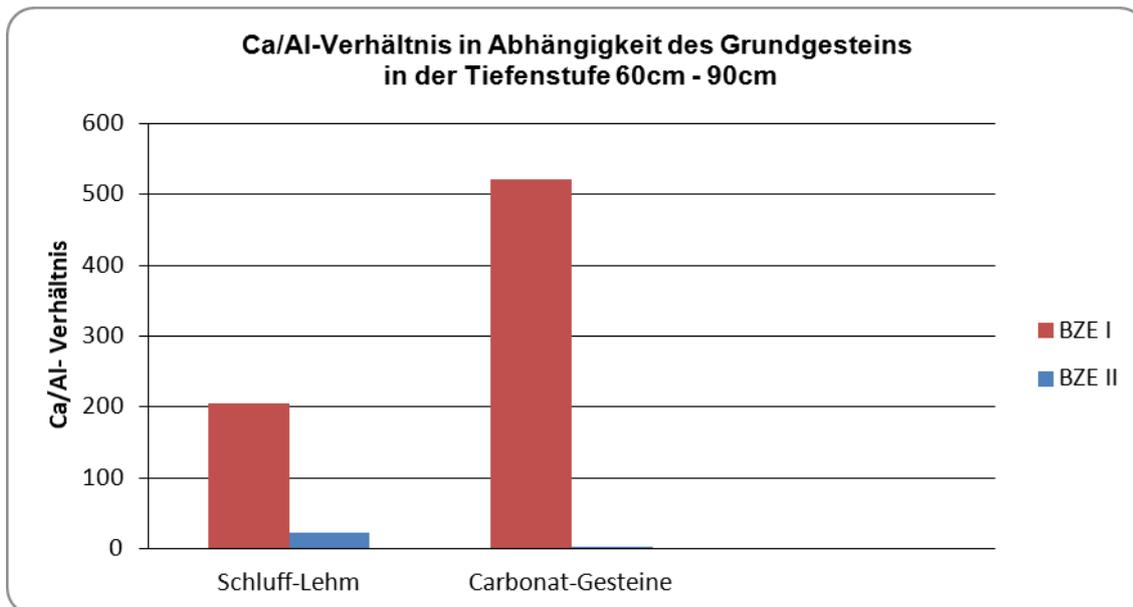


Abbildung 124: Entwicklung des Ca/Al-Verhältnisses in Abhängigkeit des Grundgesteins in der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

Mit Hilfe der Verhältnisse von  $\text{SO}_4$  und  $\text{NO}_3^-$  Anionen zur gesamten Kationenäquivalentsumme (KÄS), können Rückschlüsse auf deren Beteiligung an Prozessen der Bodenversauerung gezogen werden und sind nachfolgend in den Tabellen 140 und 141 dargestellt.

Tabelle 140:  $\text{SO}_4/\text{KÄS}$ -Verhältnis für die Tiefenstufe 60 cm – 90 cm

Tiefenstufe	n	Verteilung der Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
60-90	92	0,002	0,044	0,189	0,270	0,321	0,588	0,950

Tabelle 141:  $\text{NO}_3/\text{KÄS}$ -Verhältnis für die Tiefenstufe 60 cm – 90 cm

Tiefenstufe	n	Verteilung der Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
60-90	92	0,001	0,005	0,014	0,017	0,031	0,083	0,0423

Da durchschnittlich sehr niedrige Quotienten erreicht wurden, ist an dieser Stelle davon auszugehen, dass der  $\text{SO}_4^-$  und  $\text{NO}_3^-$  Gehalt in der Bodenlösung im Wesentlichen von Immissionen bzw. Depositionen in Thüringischen Wäldern herrührt und geogene Quellen (z.B. Gipsstandorte als  $\text{SO}_4$ -Lieferant) in den BZE-Probestellen nicht erfasst und damit auszuschließen sind.

Das Verhältnis von Basenkapazität (Bc) und Stickstoff (N) (vgl. Tab.142) ist ein wichtiger Indikator für Nährstoffungleichgewichte in der Wurzelzone.

Tabelle 142: Bc/N-Verhältnis für die Tiefenstufe 60 cm – 90 cm

Tiefenstufe	n	Verteilung der Gesamthäufigkeit						
		Min	15%	35%	Med	65%	85%	Max
60-90	92	0,469	7,087	17,274	37,840	59,526	158,158	1108,349

Nährstoffgleichgewichte stellen sich für Buche und Eiche bei einem Bc/N-Verhältnis von >0,7 ein, Fichte und Kiefer benötigen ein Bc/N-Verhältnis von >0,9, um optimale Wachstumsbedingungen zu haben (UBA 1996).

Demnach ist die Kapazität basischer Kationen in der Tiefenstufe von 60 cm bis 90 cm bis auf wenige Ausnahmen ausreichend, um Anione wie Nitrat (NO<sub>3</sub>) abzupuffern.

Auch in Abhängigkeit des Grundgesteins lassen sich die Ergebnisse bewerten (vgl. Tab.143 und 144).

Tabelle 143: SO<sub>4</sub>/KÄS-Verhältnis in Abhängigkeit des Grundgesteins

Grundgestein	Tiefenstufe 60-90		
	Min	Med	Max
Rotliegendes	0,054	0,253	0,655
Schiefer	0,002	0,219	0,635
Buntsandstein	0,026	0,285	0,788
Schluff-Lehm	0,028	0,184	0,687
eutr. Silikat-Gesteine	0,055	0,310	0,345
Carbonat-Gesteine	0,005	0,732	0,950

Tabelle 144: NO<sub>3</sub>/KÄS-Verhältnis in Abhängigkeit des Grundgesteins

Grundgestein	Tiefenstufe 60-90		
	Min	Med	Max
Rotliegendes	0,002	0,023	0,162
Schiefer	0,001	0,016	0,175
Buntsandstein	0,001	0,016	0,280
Schluff-Lehm	0,004	0,016	0,091
eutr. Silikat-Gesteine	0,009	0,056	0,156
Carbonat-Gesteine	0,001	0,018	0,423

Betrachtet und vergleicht man die Ergebnisse von BZE I und BZE II (vgl. Abb.125 und 126), so zeigt sich bei dem  $\text{SO}_4/\text{KÄS}$ -Verhältnis und  $\text{NO}_3/\text{KÄS}$ -Verhältnis in der Tiefenstufe von 60 cm bis 90 cm ein rückläufiger Trend. Aufgrund der eher negativen Auswirkungen von Sulfat- und Nitrat-Verbindungen ist hier ein Rückgang als positiv zu bewerten. Als eine Ursache sind die verbesserten technischen Eigenschaften von Verbrennungsmotoren von Lastkraft- und Personenkraftwagen, so dass hier von einer Reduktion der  $\text{NO}_3$  -Verbindungen auszugehen ist. Auch bei Sulfat verhält es sich ähnlich.

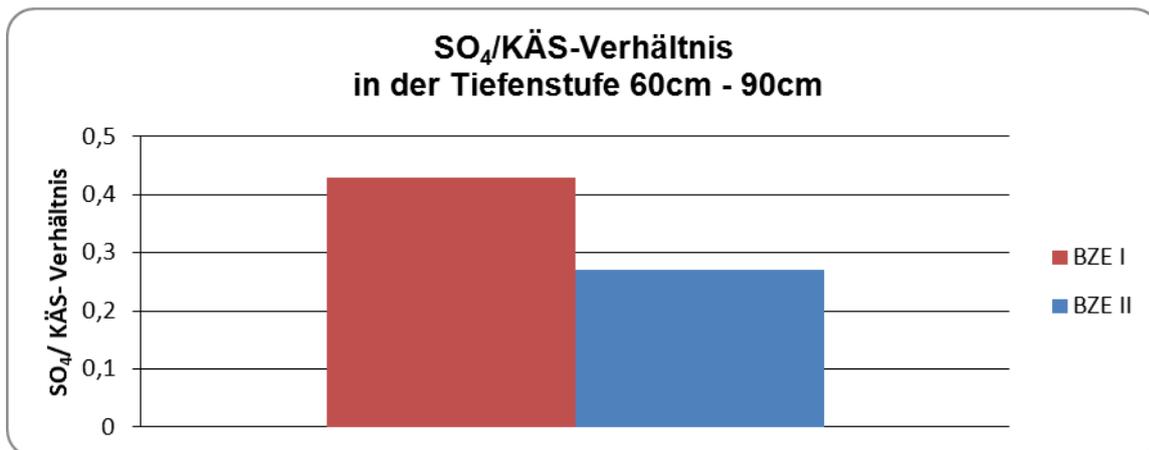


Abbildung 125: Entwicklung des  $\text{SO}_4/\text{KÄS}$ -Verhältnisses in Abhängigkeit der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

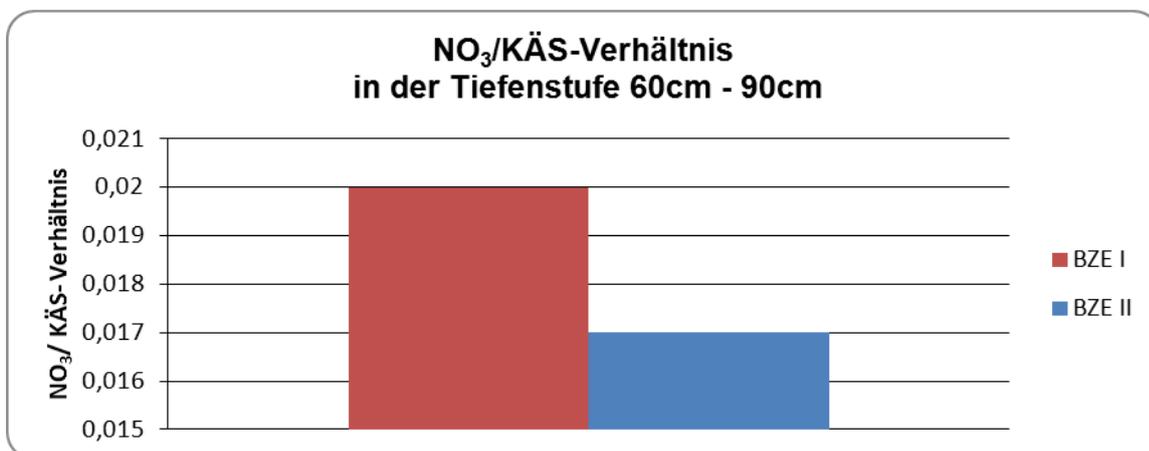


Abbildung 126: Entwicklung des  $\text{NO}_3/\text{KÄS}$ -Verhältnisses in Abhängigkeit der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

In Abhängigkeit des Grundgesteines erbrachte der Vergleich zwischen BZE I und BZE II (vgl. Abb.127 und 128) ebenfalls einen deutlichen Rückgang der Werte bei dem  $\text{SO}_4/\text{KÄS}$ -Verhältnis. Dies spiegelt die Entwicklungen der Schwefelmissionen wieder, welche im Laufe der letzten Jahre deutlich verringert werden konnten, da Emittenten wie Großfeuerungsanlagen filtertechnisch nachgerüstet wurden und private Haushalte mit Kohleheizung deutlich zurückgegangen sind.

Die Ergebnisse des  $\text{NO}_3/\text{KÄS}$ -Verhältnisses zeigen, dass bei den silikatisch und nährstoffärmeren Grundgesteinen Schiefer und Buntsandstein sich geringere Werte gegenüber der BZE I eingestellt haben. Bei dem Grundgestein des Rotliegenden sind die Werte als gleichbleibend zu betrachten, wobei sie bei den nährstoffreichen und basischen Standorten Schluff-Lehm, Carbonat-Gestein und eutrophen Silikat-Gesteinen ansteigen.

Ursache hierfür kann darin begründet sein, dass Austauschprozesse in basenreichen Böden noch lange nach dem Eintrags-Pik zeitverzögert stattfinden, wohingegen in basenärmeren Böden die ohnehin geringere Kationenaustauschkapazität bereits voll ausgeschöpft war und in der Erholungsphase daher schneller auf nachlassende Belastungen reagiert.

Dieser Sachverhalt könnte aber auch den Nitrifikationsprozessen im Mineralboden geschuldet sein, welche durch die Erhöhung der Bodenazidität bzw. durch die Erhöhung von Ammoniumeinträgen aus angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen verursacht werden. Da die Erhöhung der Bodenazidität auch eine Erhöhung der Nitrifikation zur Folge hat, können die Entwicklungen des  $\text{NO}_3/\text{KÄS}$ -Verhältnisses im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus der Abbildung 127 erklärt werden.

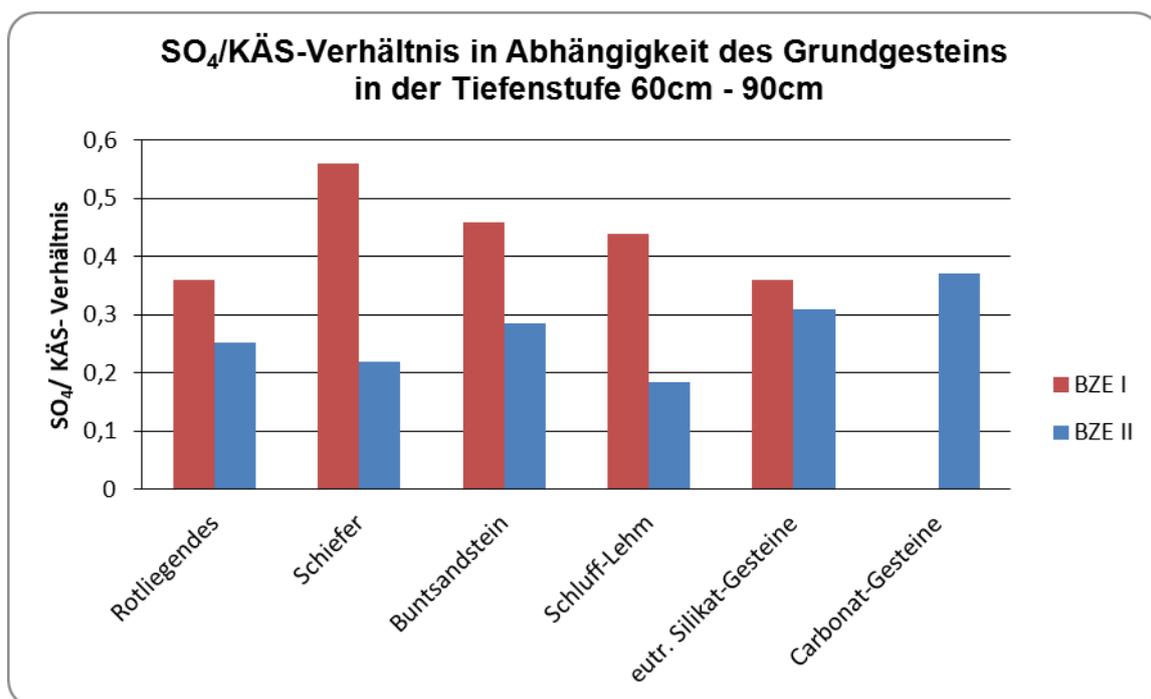


Abbildung 127: Entwicklung des  $\text{SO}_4/\text{KÄS}$ -Verhältnisses in Abhängigkeit des Grundgesteins in der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

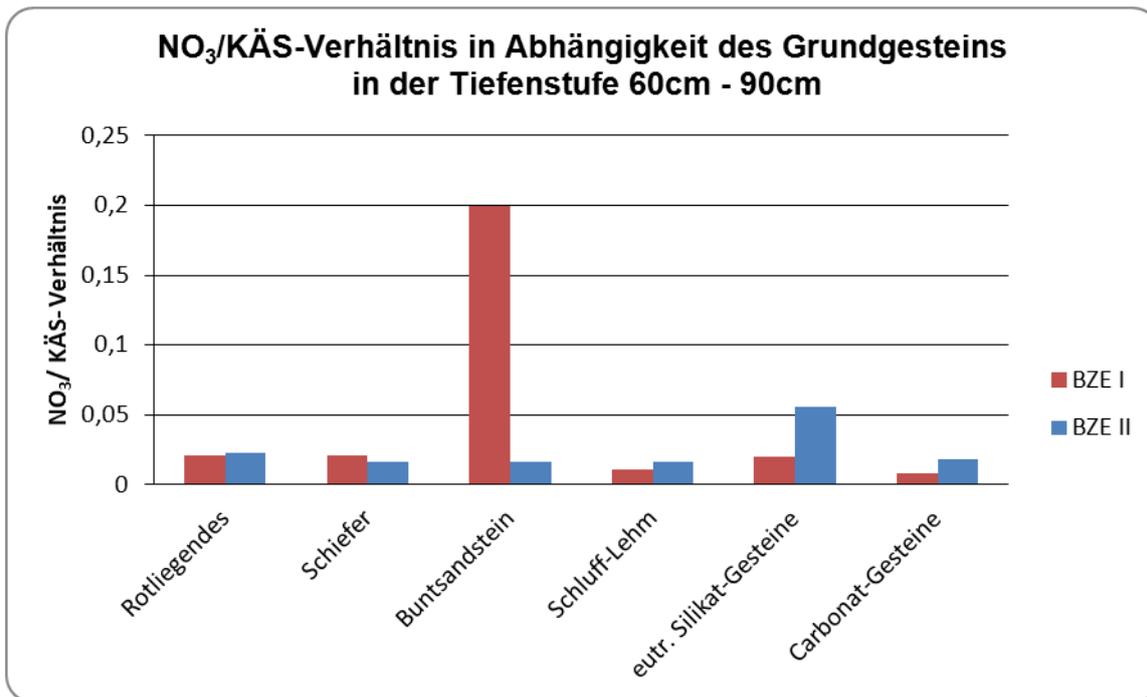


Abbildung 128: Entwicklung des NO<sub>3</sub>/KÄS-Verhältnisses in Abhängigkeit des Grundgesteins in der Tiefenstufe 60 cm – 90 cm von BZE I zu BZE II, jeweils durch Vergleich der Mediane

## 5. Diskussion, Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Nach WOLFF und RIECK (1997) ist bei dem Erlangen von wissenschaftlichen Erkenntnissen im Rahmen der Ökosystemforschung prinzipiell die induktive und die deduktive Untersuchungsmethoden zu unterscheiden. Die induktive Methode versucht, aus den Analysebefunden spezifischer Einzelfälle und daraus hervorgehenden Fallstudien auf die Ganzheit eines speziell betrachteten Systems zu schließen, wobei die dabei erlangten Erkenntnisse nur eingeschränkt auf anderen Systeme übertragbar sind. Dem gegenüber stehen die deduktiven Methoden, welche durch das Prinzip der repräsentativen Zufallsstichprobe (Rasternetzbezug) grundsätzliche Gesetzmäßigkeiten aufzeigen. Durch die breite Variabilität des Untersuchungsprobenkollektives können großräumige Muster sowie Strukturen und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern erkannt und darauf aufbauend Modelle entwickelt werden.

Bei der Bodenzustandserhebung für Thüringen handelt es sich um ein deduktives Untersuchungsprogramm, so dass eine wechselseitige Verifizierung der auf verschiedenen Integrationsebenen erlangten Erkenntnisse möglich ist. Hierbei sind die erlangten Erkenntnisse und getroffenen Aussagen als großräumliche Muster und Gesetzmäßigkeiten zu sehen, welche für die BZE-Stichprobe allgemeine Gültigkeit

besitzen, wobei im Einzelfall auch unterschiedlich starke Abweichungen bestehen können.

Im Rahmen der Bodenzustandserhebung BZE II wurde im Freistaat Thüringen an 98 Punkten des bestehenden 8 x 8 km Rasters bodenchemische Parameter sowie Nadel- und Blattanalysen aufstockender Baumarten (Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Esche) erhoben.

### **Nadel- und Blattanalysen**

Um Hinweise zur Ernährungssituation und Schadstoffbelastung von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Esche zu bekommen, wurde der Elementgehalt von den Assimilationsorganen der an den Probepunkten vorhandenen Baumarten bestimmt.

Der in der Assimilationsmasse von Laub- und Nadelbaumarten enthaltene Gesamtgehalt von Haupt- und Spurenelementen wurde nach WELLBROCK (2006) an ungewaschenen Proben ermittelt, so dass methodisch bedingte Unterschiede bei den Elementgehalten zu erwarten sind bzw. waren. Somit muss bei den Elementen Pb, Cu, Cd, Fe, Al und Na davon ausgegangen werden, dass ein großer Anteil nicht im Inneren der Assimilationsorgane gespeichert ist, sondern der Nadel- und Blattoberfläche anhaften (Vgl. WOLFF und RIECK 1997). Auch Mg und K werden über Stäube in Forstbestände eingetragen, so dass sie ebenfalls an der Epidermis bzw. Kutikula von Nadeln und Blättern anhaften können. Berücksichtigt man diesen Sachverhalt, so ist eine Bewertung der physiologischen Bedeutung des Elementgesamtgehaltes von Assimilationsorganen nicht immer eindeutig möglich. Auch andere Parameter wie Baumalter, Vitalität und Wachstum können Auswirkungen auf Nadel- und Blattspiegelwerte haben.

Für die Nadelspiegelwerte von Fichte und Kiefer erbrachte der Vergleich von BZE I und BZE II insgesamt einen Anstieg der essentiellen Nährelemente Ca, Mg, P, N sowie des Spurenelements Cu und gleichzeitig einen Abfall bei den teilweise schädigend wirkenden Elementen Si, S, Pb und Cd, so dass hier von einer allgemein besseren gesundheitlichen Konstitution des Baumbestandes ausgegangen werden kann, als dies bei der BZE I zutraf. Die Zuwächse des N-Gehaltes von Fichten- und Kiefernadeln sind in Korrelation mit den vorhandenen Datenreihen der N-Deposition der in Thüringen betriebenen Messstationen als gleichbleibend zu bewerten. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass es jahreszeitliche sowie jährliche Unterschiede zwischen der N-Deposition geben kann (Vgl. CHMARA 1999). Als positiv zu bewerten ist der Rückgang von Schwefel-, -Blei- und Cadmiumgehalten, wobei die Verringerung der Schwefeldepositionen durch die bis jetzt durchgeführten Waldzustandsberichte des Freistaates Thüringens ebenfalls bestätigt werden konnten (Vgl. Waldzustandsbericht Thüringen 1999, 2000, 2001, 2002).

Bei Beständen an Hauptverkehrswegen (Bundesautobahn A 4, A 71, A 73 und A 38) sind immer noch erhöhte Bleigehalte nachweisbar, wobei die hohen Bleigehalte im nordthüringischen Trias-Hügelland nahe des Kyffhäusergebirges auf andere

anthropogene Einflüsse zurückgeführt werden können. Nach SCHACHTSCHABEL et al. (1998) kommen stark erhöhte Bleigehalte u. a. auf anthropogen belasteten Auenböden im Harzvorland infolge des jahrhundertlang betriebenen Erzbergbaus sowie Erosionsprozessen vor. Demnach sind erhöhte Bleiwerte auch im Einzugsbereich der Flüsse Wipper, Zorge und Helme anzunehmen, so dass die gemessenen und erhöhten Bleigehalte an den nahe dieser Auenstandorte gelegenen Probepunkte mit dem sekundären Staubeintrag aus dem Harzvorland begründet werden können.

Der bei Fichte zu beobachtende eher geringe Abfall des Kaliumgehaltes kann mehrere Ursachen haben. Demnach kann der nachweisliche Rückgang von Maßnahmen der Bodenschutzkalkung zwischen den Jahren 1997 und 2007 (von 12700 ha auf 900 ha) eine mögliche Ursache sein, obwohl die Kalkungsmaßnahmen in den Jahren 2008 und 2009 wieder erhöht wurden. Auch der drastische Rückbau von Groß- wie auch Kleinf Feuerungsanlagen sowie eine verbesserte und effizientere Filtertechnik könnte ebenso für den Rückgang von Kaliumgehalten im Freilandniederschlag sowie auf der Oberfläche von Assimilationsorganen verantwortlich sein.

Für die Laubbaumarten Buche, Eiche und Esche zeichnen sich aufgrund fehlender Datenreihen bis zum jetzigen Zeitpunkt keine interpretierbaren Trends ab.

Inwieweit das geologische Grundgestein Einfluss auf die Elementgehalte der Nadel- und Blattmasse hat, bleibt noch genauer zu prüfen. Es fällt aber auf, dass erhöhte Cu- und Mn-Gehalte auf Schieferstandorten sowie auf jenen des Rotliegenden nicht nur bei Nadel-, sondern auch bei Laubgehölzen auftreten.

### **Humus- und Mineralbodenanalysen**

Neben der Ermittlung von Elementgehalten und Elementvorräten der Humushorizonte und Tiefenstufen wurden auch andere chemische Parameter wie z.B. die Basensättigung und pH-Wert erhoben. Die für die Berechnung der Elementvorräte notwendige Ermittlung der Feinbodenmenge wurde unter Laborbedingungen durchgeführt, so dass unterschiedliche Genauigkeiten aufgrund der Trockenraumdichte sowie des Skelettgehaltes ausgeschlossen werden können. Hier sei lediglich auf die Problematik der Berechnungen tiefenstufenweiser Elementvorräte aus horizontweise beprobten Profilen erwähnt. Demnach wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse herabgesetzt, da hier verallgemeinernd von einer fast gleichbleibenden bzw. linearen Verteilung innerhalb der Horizonte ausgegangen wird, was so meist in der Natur nicht zutrifft (Vgl. WOLFF und RIECK 1997).

Die im Rahmen von **Humusanalysen** der BZE II ermittelten Ergebnisse zeigen, dass es Zusammenhänge sowie Wechselwirkungen zwischen der Humusform und des Grundgesteines sowie zwischen Humusform und Baumarten bestehen. Demnach sind unter Berücksichtigung gleicher geologischer Ausgangssubstrate in

Laubholzbeständen eher die Humusformen Mull und Moder anstelle von Moder und Rohhumus in Nadelholzbeständen anzutreffen, wobei bei gleicher Baumart sich auf nährstoffreicheren Substraten (z.B. Schlufflehme, Carbonatgesteine) ebenfalls günstigere Humusformen als auf nährstoffarmen Substraten (z.B. Sandstein, Rotliegendes) ausbilden und vorkommen.

Von 1996 bis 2009 kam es bei den Humusformen Moder und Rohhumus zur deutlichen Verbesserung des pH-Wertes in allen Humushorizonten. Auch bei den Mull- und Kalkmoderformen war ein leichter Anstieg des pH-Wertes zu verzeichnen, so dass sich insgesamt eine positiv zu bewertenden Entwicklung abzeichnet und davon ausgegangen werden kann, dass sich die thüringischen Waldbestände von den in der Vergangenheit stärkeren und anthropogen bedingten Säuredeposition langsam wieder erholen.

Elementgehalte und -Vorräte der Humusaufgabe zeigen, dass es im Allgemeinen zu einem Anstieg von Gehalten der basischen Kationen Magnesium und Kalium gekommen ist. Calcium erfuhr leichte Rückgänge, wobei diese durch den Rückgang der Bodenschutzkalkungen erklärt werden kann. Ebenso weisen die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte leichte Abnahmen auf. Neben den rückläufigen anthropogenen Einträgen von Stickstoff und Kohlenstoff können diese Entwicklungen auch durch die Umsetzung waldbaulicher Maßnahmen und deren Auswirkung auf Bodentemperatur, -feuchte und -pH, mithin auf die Mineralisierung erklärt werden. Als positiv zu bewerten sind die Entwicklungen bei Aluminium-, Eisen- und Bleigehalten. Vor allem die Humusform des Moders und Rohhumus zeigten trotz leichter Anstiege im L-Of-Horizont sehr deutliche Rückgänge von Eisen- und Aluminiumvorräten im Oh-Horizont. Demnach kann hier von einer eintretenden Verbesserung der Moder- und Rohhumusstandorte gesprochen werden. Auch durch die positive Entwicklung der pH-Werte sowie den Anstieg der Basensättigung von eher nährstoffärmeren Substraten (Buntsandstein, Rotliegendes, Schiefer) im oberen Mineralbodenhorizont (Tiefenstufe 0 – 5 cm) können diese Entwicklungen des Eisen- und Aluminiumgehaltes untermauert werden. Insgesamt zeichnet sich eine deutliche Verringerung der Bleigehalte in allen Humushorizonten sowie Humusformen ab, welche sich u.a. durch den Einsatz veränderter Kraftstoffgemische (Antiklopfmittel) in der Automobilbranche erklären lassen. Somit verzeichnen die an den Hauptverkehrswegen der Bundesautobahn gelegenen Probepunkte, im Vergleich zu den übrigen Probepunkten in Thüringen, höhere Werte. Auch die erhöhten Bleigehalte im nordthüringischen Trias-Hügelland sind mit sekundären Staubeinträgen aus dem Harzvorland (Erzbergbau) erklärbar. Bei den Elementen Kupfer und Zink sind im Allgemeinen Rückgänge der Gehalte in Abhängigkeit der Humushorizonte und Humusformen feststellbar und als Verbesserung der Standortverhältnisse anzusehen. Demnach kommt es bei allen Humusformen nicht mehr zur Überschreitung der nach TYLER (1992) beschriebenen Orientierungswerte für Schwermetallkonzentrationen mit schädigender Wirkung auf die Bodenatmung, die biochemische Aktivität, die Mikroflora, die Makrofauna und die

Stickstoffumsetzung im Humus. Dies ist vor allem bei Kupfer nunmehr gegeben, so dass der als schädigend anzusehende Orientierungswert unterschritten wird.

Das für die Beschreibung der Humusqualität und biologischen Aktivität herangezogene C/N-Verhältnis weist insgesamt einen Anstieg auf, wobei dieses Phänomen durch die allgemeinen Rückgänge der Stickstoffeinträge, sowie in Abhängigkeit von erhöhten Basensättigungen durch einen möglichen erhöhten N-Austrag über das Sickerwasser erklärt werden kann. Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass sich diese Entwicklungen des Kohlenstoff- und Stickstoffgehaltes in Verbindung veränderter C/N-Verhältnisse zur Stabilisierung der Waldökosysteme sowie zur Regenerierung naturnaher Standortverhältnisse beitragen und somit positiv zu bewerten sind.

Die **Mineralbodenanalysen** beinhalteten neben der Ermittlung von Elementgehalten und -vorräten auch Erhebungen von chemischen Parametern wie pH-Wert, Austauscherkapazität und Basensättigung innerhalb von definierten Tiefenstufen des Mineralbodens, welche sich in Abhängigkeit vom geologischen Ausgangssubstrat deutlich unterscheiden können.

Mit Hilfe der chemischen Parameter ist es auch möglich, die in Thüringen vorkommenden Mineralböden anhand der pH(H<sub>2</sub>O)-Werte in Pufferbereiche zu klassifizieren. Demnach können die Mineralböden neben den Standorten des Carbonatgesteins mit durchschnittlichen pH-Werten > 6 (schwach alkalisch bis schwach sauer) sowie eutropher Silikatgesteine und Schlufflehme mit durchschnittlichen pH-Werten zwischen 4,5 – 6 (schwach bis mäßig sauer) auch in die Standorte nährstoffarmer Silikatgesteine und Schiefer mit durchschnittlichen pH-Werten von < 5 (mäßig bis stark sauer) unterschieden werden.

Weiterhin zeigte sich ein typischer vertikaler pH-Wert-Gradient. Somit kommt es mit zunehmender Tiefe zum Anstieg des pH-Wertes.

Ansonsten weisen die Mineralböden im Hinblick auf die pH-Werte ähnliche Veränderungen auf, wie sie schon bei der Humusaufgabe festgestellt werden konnten. Obwohl es in den obersten Bereichen des Mineralbodens (Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm) zu keinen wesentlichen Veränderungen kam, waren in den tiefer liegenden Bereichen des Mineralbodens Anstiege des pH-Wertes zu verzeichnen. Die Entbasung durch versauernde Fremdstoffeinträge konnte offensichtlich gestoppt werden, so dass die Freisetzungsrates basischer Kationen aus dem Grundgestein wieder zur Auffüllung der Kationenaustauscherkapazität in den tieferen Bodenschichten führt. Dadurch kam es auch zur Verringerung des Anteils der beteiligten Al- und Fe-Pufferbereiche überwiegend zu Gunsten des Austauscherpuffers auch in den oberen Mineralbodenschichten. Demnach spricht dies auch für eine langsame Erholung der thüringischen Waldbestände von den in den Vergangenheit sehr hohen Säuredepositionen.

Bei den Untersuchungen bzgl. der Austauscherkapazität wurden ebenfalls Anstiege festgestellt. Obwohl es zu einem Anstieg der basischen Kationen Kalium, Calcium und Magnesium im oberen Mineralboden gekommen ist, war ein Abfall der potenziellen Austauscherkapazität in einer Tiefe von 0 bis 30 cm zu verzeichnen, die sich jedoch in größerer Tiefe stabilisieren und sogar wieder ansteigen konnte. Ob dies durch einen Rückgang der Bodenschuttkalkung oder durch Verlagerungsprozesse der basischen Kationen aus dem Oberboden zurückgeführt werden kann, bleibt noch zu prüfen. Zunahmen hingegen sind bei der effektiven Austauscherkapazität in jeder Tiefenstufe gegeben, wobei sie in den oberen Mineralbodenschichten deutlich höher anstieg.

Die Auswertung der Basensättigung zeigt, dass es bei den nährstoffreichen und meist besser mit basischen Kationen versorgten Standorten der Carbonatgesteine und eutrophen Silikatgesteine zu einem deutlichen Abfall in allen Tiefenstufen gekommen ist. Ob es sich hier um einen allgemeinen Trend oder um Langzeitwirkungen von anthropogen hervorgerufenen bodenversauernden oder lokal begrenzten Einträgen handelt, kann nicht abschließend geklärt werden. Bei den nährstoffärmeren Standorten auf Schiefer, Buntsandstein und Rotliegendem treten hingegen Verbesserungen der Basensättigung auf.

Auch bei den austauschbaren Vorräten kam es aufgrund des allgemeinen Anstieges insbesondere der Kationenvorräte ebenfalls zu einem Zuwachs. Vor allem bei den nährstoffreicheren Standorten (Carbonatgestein, eutrophe Silikatgesteine und Schlufflehme) sind größere Vorräte an basischen Kationen (Mg, Ca, K) als bei den nährstoffärmeren Standorten (Schiefer, Rotliegendes und Buntsandstein) feststellbar, während sich dies bei den Aluminiumvorräten gegenläufig verhält.

Das ermittelte C/N- Verhältnis spiegelt die Entwicklungen der höheren Vorräte von Stickstoff und Kohlenstoff wider, wobei der Stickstoffgehalt langsamer stieg als der Kohlenstoffvorrat. Das C/N-Verhältnis weist insgesamt einen Anstieg auf, wobei dies durch die allgemeinen Rückgänge der Stickstoffeinträge, sowie in Abhängigkeit von erhöhten Basengehalten durch einen möglichen erhöhten N-Austrag über das Sickerwasser erklärt werden kann. Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass sich diese Entwicklungen des Kohlenstoff- und Stickstoffgehaltes in Verbindung veränderter C/N-Verhältnisse zur Stabilisierung der Waldökosysteme sowie zur Regenerierung naturnaher Standortverhältnisse beitragen und somit positiv zu bewerten sind. Der von WOLFF und RIECK (1997) beschriebene Grenzwert von 20 wird im Durchschnitt nicht überschritten, so dass weiterhin von günstigen Verhältnissen für die Bioverfügbarkeit sowie Austauscherkapazität auszugehen ist. In Hinblick auf die Humusformen stellen sich bei Moder und Rohhumus höhere C/N-Verhältnisse als bei Mull und Kalkmoder ein, was als typisch für diese Humusformen anzusehen ist.

Bei der Betrachtung des Aziditätsgrades sowie der  $\text{SO}_4/\text{KÄK}$ - und  $\text{NO}_3/\text{KÄK}$ -Verhältnisse bilden sich ebenfalls die bereits bei den Mineralanalysen beschriebenen Entwicklungen ab. Demnach kam es zu einem deutlichen Rückgang von

Kationensäuren und der damit verbundenen Erholung der durch Versauerung beeinträchtigten Böden.

Abschließend kann gesagt werden, dass sich insgesamt die Ernährungssituation der Gehölze sowie der chemische Zustand des Bodens im Vergleich von BZE I zu BZE II verbessert hat, was auf die rückläufigen Entwicklungen bei den versauernden Depositionen zurück zu führen ist.

Die sich aus diesen Bewertungen ergebenden Maßnahmen werden durch Wolff und Rieck (1997) beschrieben und sollten auch zukünftig weiter verfolgt werden, so dass die Waldökosysteme auch auf längere Sicht vor schädlichen Einwirkungen geschützt und somit vor negativen Veränderungen bewahrt werden können.

## Literaturverzeichnis

BERGMANN, W. (1993):

Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen – Entstehung, visuelle und analytische Diagnose, 3. Auflage, 835 S.

BÜTTNER, G, GEHRMANN, J., ULRICH, B. (1987):

Untersuchungen zum Stand der Bodenversauerung wichtiger Waldstandorte im Land Nordrhein-Westfalen, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme / Waldsterben Göttingen, Reihe B, Bd. 4, 233 S.

BÜTTNER, G. (1997):

Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) in Niedersachsen 1990-1991. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt. Bd 122

BURSE, K.D., SCHRAMM, H.-J. (1996):

Waldbodenzustandsbericht für Thüringen, Mitteilungen der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Heft 10/1996

CHMARA, I. (1999):

Immissionsökologische Untersuchungen an den Wald- und Hauptmessstationen in Thüringen, Mitteilungen der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.), Heft 15, 107 S.

FIEDLER, H.-J., LYR, H., TRANQUILLINI, W. (1992):

Physiologie und Ökologie der Gehölze, Gustav Fischer Verlag Jena, 620 S.

KELLER, M., EVEQUOZ, R., HELDSTAB, J., KESSLER, H. (1995):

Luftschadstoff – Emissionen des Straßenverkehrs 1950 – 2010, Schriftenreihe Umwelt Nr. 255, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 420 S.

HESSISCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.) (1993):

Bericht der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt, Abteilung Forsthydrologie; Projekt forstlich-ökologisches Beweissicherungsverfahren im Raum der Startbahn 18 West des Frankfurter Flughafens, Untersuchungsprogramm innerhalb des Wasserrechtsverfahrens;

HOFMANN, G., HEINSDORF, D., KRAUß, H.H. (1990):

Wirkung atmosphärischer Stickstoffeinträge auf Produktivität und Stabilität von Kiefern-Forstökosystemen, Beitr. Forstwirtsch. 24 (2)

HÜTTL, R. (1985):

Neuartige Waldschäden und Nährelementversorgung von Fichten (*Picea abies* Karst.) in Südwestdeutschland, Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 16, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br., 195 S.

HÜTTL, R. (1991):

Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika, Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 28, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br., 440 S.

MEIWES, K.J., KÖNIG, N., KHANA, P.K., PRENZEL, J., ULRICH, B. (1984):

Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme / Waldsterben, Göttingen, Bd. 7

MOHR, K., MEESENBURG, H., DÄMMGEN, U. (2005):

Die Stickstoff-Belastung von Waldökosystemen: Wirkungen, Wirkungspfade, offene Fragen, Gesamtkonzept; Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 279, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), 10 S.

OTTO, H.-J. (1994):

Waldökologie, Eugen Ulmer GmbH & Co., 301 S.

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2004):

Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern, 59 S.

SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G., HARTGE, K.H., SCHWERTMANN, U. (1998):

Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 494 S.

SVERDRUP H, WARFVINGE P (1993):

The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio. Reports in Ecology and Environmental Engineering, 1993:2.

THÜRINGER MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN, UMWELT UND NATURSCHUTZ (Hrsg.)(2009):

Forstbericht 2009, 104 S.

THÜRINGER MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, NATURSCHUTZ UND UMWELT (Hrsg.) (2002):

Waldzustandsbericht 2002, 28 S.

THÜRINGER MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, NATURSCHUTZ UND UMWELT (Hrsg.) (2001):

Waldzustandsbericht 2001, 26 S.

THÜRINGER MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, NATURSCHUTZ UND UMWELT (Hrsg.) (2000):

Waldzustandsbericht 2000, 38 S.

TYLER, G. (1992):

Critical Concentrations of Heavy Metals in the Mor Horizon of Swedish Forests, SNV-Report 4078, Solna

WELLBOCK, N. (2006):

Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II), Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen, 2. Auflage, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), X-65 S.

WÖHLER, I. (1996):

Standortsabhängige und statusbeschreibende Muster in Streu und Humus von Waldökosystemen, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Georg-August-Universität Göttingen, Reihe A, Bd. 132, 396 S.

WOLFF, B., RIECK, W. (1997):

Deutscher Waldbodenbericht 1996, Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987 – 1993 (BZE); Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELF), 144 S.

ZIECHMANN, W., MÜLLER-WEGNER, U. (1990):

Bodenchemie, BI-Wissenschaftsverlag Mannheim/ Wien/ Zürich; 326 S.