

6 Ergebnisse der Bodenuntersuchungen

6.1 Repräsentativität des Erhebungsnetzes

Jan Evers, Martin Buresch, Swen Hentschel

Die BZE des Landes Sachsen-Anhalt mit dem systematischen 8 x 8 km Rasternetz erfasst alle flächenhaft wichtigen Standorts- oder Bestockungseinheiten (BZE I-Bericht, FORSTLICHE LANDESANSTALT SACHSEN-ANHALT 1998). Die prozentualen Baumartengruppenanteile in der BZE-Stichprobe decken sich relativ gut mit den Angaben für den Gesamtwald in Sachsen-Anhalt. Dabei sind die Kiefern- und Eichenbestände in der BZE-Stichprobe leicht unterrepräsentiert, die Buchen und sonstigen Nadelbäume (Küstentanne) überrepräsentiert. Die Fichtenbestände sind jeweils in beiden Verteilungen mit 15 % identisch. Auch die Altersstruktur wird im BZE I-Bericht als ausreichend gut mit der BZE repräsentiert angegeben. Hinsichtlich der Verteilung nach Klimafeuchte und Nährkraftstufen und vor allem deren Kombinationen deckt die BZE knapp 70 % der durch die Standortkartierung erfassten Stamm-Standortsformen ab. Dies liegt in der hohen standörtlichen und klimatischen Vielfalt des Landes Sachsen-Anhalt begründet, zumal auch der Großteil der Standortkonstellation nur geringe Flächenanteile aufweist. Als Fazit werden im BZE I-Bericht nur die häufigeren Bodenformen als ausreichend repräsentativ erfasst für Sachsen-Anhalts kartierte Waldstandorte angesehen.

Im Folgenden wird die Repräsentativität des Stichprobennetzes der BZE II hinsichtlich der vorkommenden Substratgruppen und Trophiestufen in Sachsen-Anhalt geprüft.

6.1.1 Vergleich BZE II und BÜK 1000

Die Bodenübersichtskarte 1:1 Mio (BÜK 1000, BGR 2007) stellt bundesweit flächendeckend die Verbreitung typischer Böden dar. Den 69 bundesweit typisch vorkommenden Böden der BÜK 1000 wurden die in der BZE II verwendeten Substratgruppen zugewiesen. Die sich daraus ergebende Verteilung der Substratgruppen nach den Legenden/Bodeneinheiten der BÜK 1000 bezogen auf die Koordinaten der BZE II-Punkte lässt sich für die Einschätzung der Repräsentativität mit der Verteilung der Substratgruppen nach der BZE II heranziehen. Weiterhin liefert eine Verschneidung der BÜK 1000 mit dem ATKIS-Walddecker die Verteilung aller Flächen der BÜK 1000-Legendeneinheiten für Sachsen-Anhalt und damit eine Abschätzung der flächenhaften Verteilung der BZE II-Substratgruppen in den Wäldern Sachsens-Anhalts.

Die Legendeneinheiten der BÜK 1000 orientieren sich an Regionen, wie z. B. Küstenraum oder Hochgebirge, an der Geländeform sowie den Bodentypen und Ausgangssubstraten. Die Zuweisungen zu bestimmten BZE-Substratgruppen sind teilweise unscharf, wie z. B. zu den BZE-Substratgruppen Grauwacke und Tonschiefer, da diese beiden Substrate in der BÜK 1000 bei den Braunerden mit verschiedenen basenarmen Substraten (z. B. mit Sandstein, Quarzit und Phyllit bzw. Schluffschiefern und Gneis) zusammenstehen. Die Abgrenzung der Sande nach Verlehmungsgraden wie in der BZE II ist ebenfalls nicht eindeutig. Für den Vergleich mit der BÜK 1000 wurden die Substratgruppen verlehmtter und schwach verlehmtter Sand daher zusammengefasst, um die Zuordnung mit den Legendeneinheiten der BÜK zu vereinfachen. Die jeweilige prozentuale Verteilung ist in Tabelle 4 angegeben.

Die große Gruppe der unverlehmtten Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts mit 53 % Anteil in der BZE II findet sich mit 48 % in der BÜK an den BZE-Punkten und mit 47 % flächenbezogen aus der Verschneidung der ATKIS-Waldfläche mit der BÜK 1000 in ähnlichen Größenordnungen wieder. Auch die Anteile der schwach- und verlehmtten Sande sind mit 11 % in der BZE II relativ gut mit den Werten der BÜK (8 und 13 %) vergleichbar. Die Lösslehme sind in der BZE II mit 11 %, in der BÜK 1000 mit 9 und 11 % ebenfalls vergleichbar repräsentiert. Die Anteile der Tonschiefer-Standorte liegen in der ATKIS-BÜK Verschneidung unter den Verteilungen an den BZE-Punkten, die Granite und Grauwacken sind in der BÜK gegenüber der BZE II stärker vertreten. Dies wird durch den Sachverhalt erklärt, dass unterschiedliche Ausgangssubstrate in den BÜK 1000 Einheiten teilweise in einer Legendeneinheit zusammengefasst sind und diese Substrate in der BZE seltener vorkommen (z. B. Granit).

Zusammenfassend ergibt sich zwischen der BZE II und der BÜK 1000 für Sachsen-Anhalt hinsichtlich der Verteilung der Substratgruppen sowohl punkt- als auch flächenbezogen eine relativ gute Übereinstimmung und damit eine gute Repräsentativität des BZE II-Rasters. Abweichungen von wenigen Prozentpunkten können auf den bestehenden Unschärfen bei der Zuordnung der Substratgruppen zu den Legendeneinheiten der BÜK 1000 beruhen.

Tabelle 4: Verteilung [%] der Substratgruppen in der BZE II nach BZE II-Koordinaten auf der BÜK 1000 und nach Flächen aus der Verschneidung mit ATKIS und BÜK 1000 (Basis Substratgruppen zugewiesen auf die BÜK-Legendeneinheiten; Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte; Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand; ToS: Tonschiefer)

Substratgruppe	BZE II [%]	BÜK 1000 an den BZE-Punkten [%]	ATKIS-Verschneidung mit BÜK 1000 [%]
Suv	53	48	47
Ssv/Sve	11	8	13
Loe	10	9	11
ToS	9	9	6
Leh	4	4	6
Org	3	5	3
Grw	3	4	6
Grt	3	8	6
andere	4	5	2

6.1.2 Vergleich BZE II und Standortskartierung

Für diesen Vergleich wird die Verteilung der Trophiestufen an den Profilen der BZE II unter Einbeziehung der Bodenchemie mit der Trophieeinschätzung der Forstlichen Standortskartierung (punkt- und flächenbezogen) gegenübergestellt.

Die prozentuale Verteilung der Trophiestufen aller Polygone der Standortskartierung in den Wäldern Sachsen-Anhalts (Landeszentrum Wald, Halberstadt, Stand 2017) ergibt mit 42 % den Schwerpunkt bei den mittleren, mesotrophen Standorten, gefolgt von den kräftigen, gut mesotrophen Standorten mit 28 % Anteil. Die schwach mesotrophen (ziemlich armen) Standorte liegen nach den Polygonen der Standortskartierung bei 18 %, die eutrophen (reich) und oligotroph (arm) bei jeweils 6 % (Tabelle 5, erste Spalte).

Tabelle 5: *Verteilung [%] der Trophiestufen gemäß der Standortkartierung der Waldfläche Sachsen-Anhalts, den Polygonen der Standortkartierung an den BZE II-Punkten sowie der Trophieeinschätzung an den BZE II-Punkten unter Berücksichtigung der BZE-Bodenchemie*

Trophiestufe	Nach digitaler Standortkarte für Sachsen-Anhalt [%]*	Trophiestufen nach der Standortkarte an den BZE-Punkten** [%]	Trophieeinschätzung an BZE-Punkten mit BZE-Bodenchemie [%]
R-reich (eutroph)	6	3	16
K-kräftig (gut mesotroph)	28	32	20
M-mittel (mesotroph)	42	42	23
Z-ziemlich arm (schwach mesotroph)	18	16	38
A-arm (oligotroph)	6	7	3

* Flächenanteile in %; Auswertung der digitalen Standortkarte; Datensatz (2017)

** nach digitaler Standortkarte (Lage im Polygon); Stand 2017; relative Häufigkeiten in %

Diese Verteilung wird mit den BZE-Punkten in Sachsen-Anhalt gut getroffen, wenn jeweils die Trophiestufe desjenigen Polygons zugrunde gelegt wird, in dem der BZE-Punkt liegt (Tabelle 5, mittlere Spalte). Damit repräsentiert die Verteilung der BZE-Punkte die Verteilung der Trophiestufen in Sachsen-Anhalts Wäldern sehr gut.

Wird dagegen die Verteilung der Trophiestufen an den BZE-Punkten unter Berücksichtigung der bodenchemischen Analyseergebnisse gegenübergestellt, ergibt sich eine sehr abweichende Verteilung (Tabelle 5, Spalte 3): Der Schwerpunkt liegt nun bei den schwach mesotrophen, ziemlich armen Standorten mit 38 %. Die mittleren, mesotrophen Standorte erreichen lediglich 23 % und liegen damit 19 %-Punkte unter den Werten nach der Standortkartierung. Auch die gut mesotrophen Standorte sind bei Berücksichtigung der Bodenchemie mit 20 % deutlich geringer vertreten. Die Einstufung eutroph wurde mit den Analysedaten der BZE II viel häufiger vergeben, die Anteile stiegen auf 16 %.

Die Verteilung der Calciumvorräte an den Trophiestufen der BZE II und der Standortkartierung belegt diesen Sachverhalt beispielhaft (s. Abb. 19). Bei der Standortkartierung decken die vorkommenden Calciumvorräte vor allem im gut mesotrophen und mesotrophen Bereich fast alle vorkommenden Bewertungsbereiche ab. Die Balken selber schneiden mit 50 % aller vorkommenden Calciumvorräte drei Bewertungsbereiche. Die Verteilungen der BZE II sind wesentlich enger. Die Balken schneiden maximal zwei Bewertungsbereiche und die Verteilungen sind deutlich enger. Im gut mesotrophen Bereich der Standortkartierung liegen viele BZE-Punkte dem Calciumvorrat nach deutlich im eutrophen, aber auch im mittelhohen und mittleren Bereich. Im mesotrophen Bereich der Standortkartierung liegt der Median schon im gering-mittleren Bereich, viele BZE-Punkte sind in ihrer Trophieeinschätzung hinsichtlich Calcium überschätzt. Entsprechend höher liegt der

Median bei der BZE II im mesotrophen und niedriger im schwach mesotrophen Bewertungsbereich.

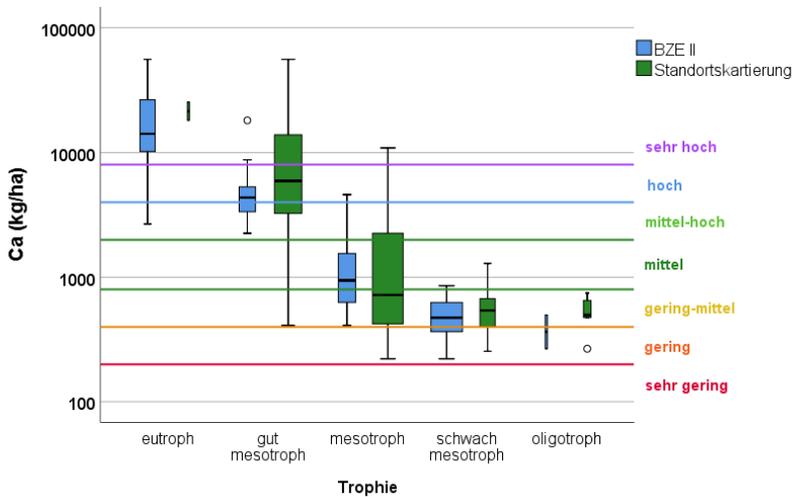


Abbildung 19: Calciumvorräte [kg/ha, logarithmierte Darstellung] an den BZE II-Punkten (Anlagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe) nach Trophiestufen der BZE II und Standortskartierung; die Balkenbreite symbolisiert die Anzahl. Als horizontale Linien sind die Bewertungsbereiche für Calcium nach der AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) angegeben.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem Vergleich der Trophiestufen Standortskartierung versus BZE II, dass häufig mittlere Standorte in der Standortskartierung mit ihren Nährstoffvorräten überschätzt und bessere Standorte unterschätzt wurden. Die Einbeziehung der Bodenchemie in die Trophieeinschätzung ermöglicht grundsätzlich eine gesichertere Differenzierung der Trophiestufen. Insbesondere der höhere Anteil mesotropher Standorte nach der digitalen Standortskarte differenziert sich unter Einbeziehung bodenchemischer Kenngrößen deutlich feiner, was in der BZE II zu einer Umverteilung von mesotrophen zu schwach mesotrophen Standorten führt. Die Absicherung, Überprüfung und Korrektur der Geländeeinschätzung in der Standortskartierung durch bodenchemische Untersuchungen erweist sich als sehr sinnvoll, was auch durch die höheren Anteile eutropher Standorte bei der BZE II im Vergleich zur Standortskartierung gut erkennbar wird.

6.2 Bodenmorphologische Kenngrößen

Jan Evers, Uwe Paar, Jörg Weymar

Eine Zielsetzung im Rahmen der Analyse der BZE II für die Trägerländer der NW-FVA ist es, länderübergreifend Muster zur zeitlichen Veränderung von bodenchemischen Kennwerten aufzuzeigen. Als länderübergreifende Stratifizierungseinheiten wurden daher Substratgruppen und Substrat-Lagerungstypen generiert. Zudem wurde eine Synopse der Hauptmerkmale der Forstlichen Standortkartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer erarbeitet (SCHMIDT et al. 2015). Die Überprüfung der Trophieeinstufungen mit metrischen Größen (z. B. Basenvorräte) anhand der BZE II-Ergebnisse ist bereits erfolgt und wurde gesondert veröffentlicht (EVERS et al. 2013a, EVERS u. PAAR 2013).

6.2.1 Substratgruppen

Durch eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortkartierern, wurde jedem der 388 BZE-Punkte (Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt) eine Substratgruppe zugeordnet (EVERS et al. 2013b). Die Einteilung der länderübergreifenden Substratgruppen erfolgte nach den Merkmalen Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Insgesamt werden 16 Substratgruppen unterschieden (s. Tab. 6).

Tabelle 6: Beschreibung der Substratgruppen der nordwestdeutschen Bundesländer nach EVERS et al. 2013b

Substratgruppe	Substrate	Kriterien/Merkmale/Herkunft
Buntsandstein	reine Sande bis schluffig, lehmige Sande, tlw. mit Tonsteinwechsellagerung	kalkfreie Buntsandsteinformationen
Lösslehm	feinsandig lehmige Schluffe bis schluffig-schwach tonige Lehme	Mächtigkeit > 70 cm (auch Kolluvien); über silikatarmem oder -reichem Ausgangssubstrat; Pleistozän und tlw. Holozän
Basalt/Diabas	überwiegend schluffige Lehme	silikatreiche tertiäre Ergussgesteine und devonische Diabase
Tonschiefer	überwiegend lehmige Tone	z. B. devonische Schieferformationen, Hunsrückschiefer
unverlehnte Sande	Sande und Kiese, Reinsande, schwach schluffige Sande, geringmächtige schluffige Bänder toleriert	Flugsande, Talsande; Wasserabsätze; Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte; Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän
schwach verlehnte Sande	schwach lehmige Sande, schluffige Sande	Geschiebedecksande, Sandlöße; Wasserabsätze > 20 cm Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte, Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän

Substratgruppe	Substrate	Kriterien/Merkmale/Herkunft
verlehnte Sande	verlehnte Sande, schluffige Sande, tonige Sande	Geschiebedecksande, Lösssande; Wasserabsätze > 50 cm Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte, Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän
Grauwacke	sandige bis tonige Lehme	z. B. unterkarbonische Grauwacken, Kulmgrauwacken
Ton(stein)	sandige, schluffige, lehmige Tone bis reine Tone	Röt, tertiäre Tone, Marschen, Beckenablagerungen; hier werden auch schluffige Feinsande toleriert
Kalkstein	überwiegend lehmige Tone bis tonige, schluffige Lehme	z. B. Muschelkalk, Keuper, Jura, Geschiebemergel, Kalkgehalt mindestens c4 (carbonatreich)
Lehm	stark lehmige Sande bis tonige Lehme	Hochflutlehme, Auenlehme, Geschiebelehme; Pleistozän und Holozän
Quarzit	schluffige Lehme; sandige, tonige Schluffe	devonische Quarzite
Zechstein/ Rotliegendes	verlehnte Sande bis tonige Lehme	Perm: Dolomite, Kalksteine bzw. Sandsteine, Konglomerate
Granit	grusig, sandig, schluffige Lehme	Plutonite
Kreidesandstein	schwach verlehnte bis verlehnte Sande	z. B. Hilssandstein, untere Kreidezeit
organisch geprägte Standorte	organisch geprägte Standorte über diversen Substraten	Hochmoortorf, Niedermoortorf, Übergangsmoor bis Quellmoor, auch Anmoor; Spätpleistozän und Holozän

In Sachsen-Anhalt kommen an den 76 BZE-Punkten der BZE II 13 der für Nordwestdeutschland insgesamt nach EVERS et al. (2013b) definierten 16 Substratgruppen vor. Für 39 BZE-Punkte (51 %) wurde die Substratgruppe unverlehnte Sande ausgewiesen. An 8 (11 %) BZE-Punkten ist standörtlich der Lösslehm bestimmend. Bei 7 BZE-Punkten (9 %) bildet Tonschiefer das Ausgangssubstrat. Es folgen die Substratgruppen schwach verlehnter Sand (5 BZE-Punkte, 7 %) und verlehnter Sand (4 BZE-Punkte, 5 %) sowie Lehm (3 BZE-Punkte, 4 %). Mit nur noch jeweils 2 BZE-Punkten sind die Substratgruppen organisch geprägte Standorte (v. a. ehemalige Moore), Grauwacke und Granit vertreten (insgesamt 8 %). Vereinzelt mit jeweils einem BZE-Punkt treten noch die Substratgruppen Grauwacke, Kreidesandstein, Quarz und Zechstein mit insgesamt 5 % Anteil auf (s. Abb. 20).

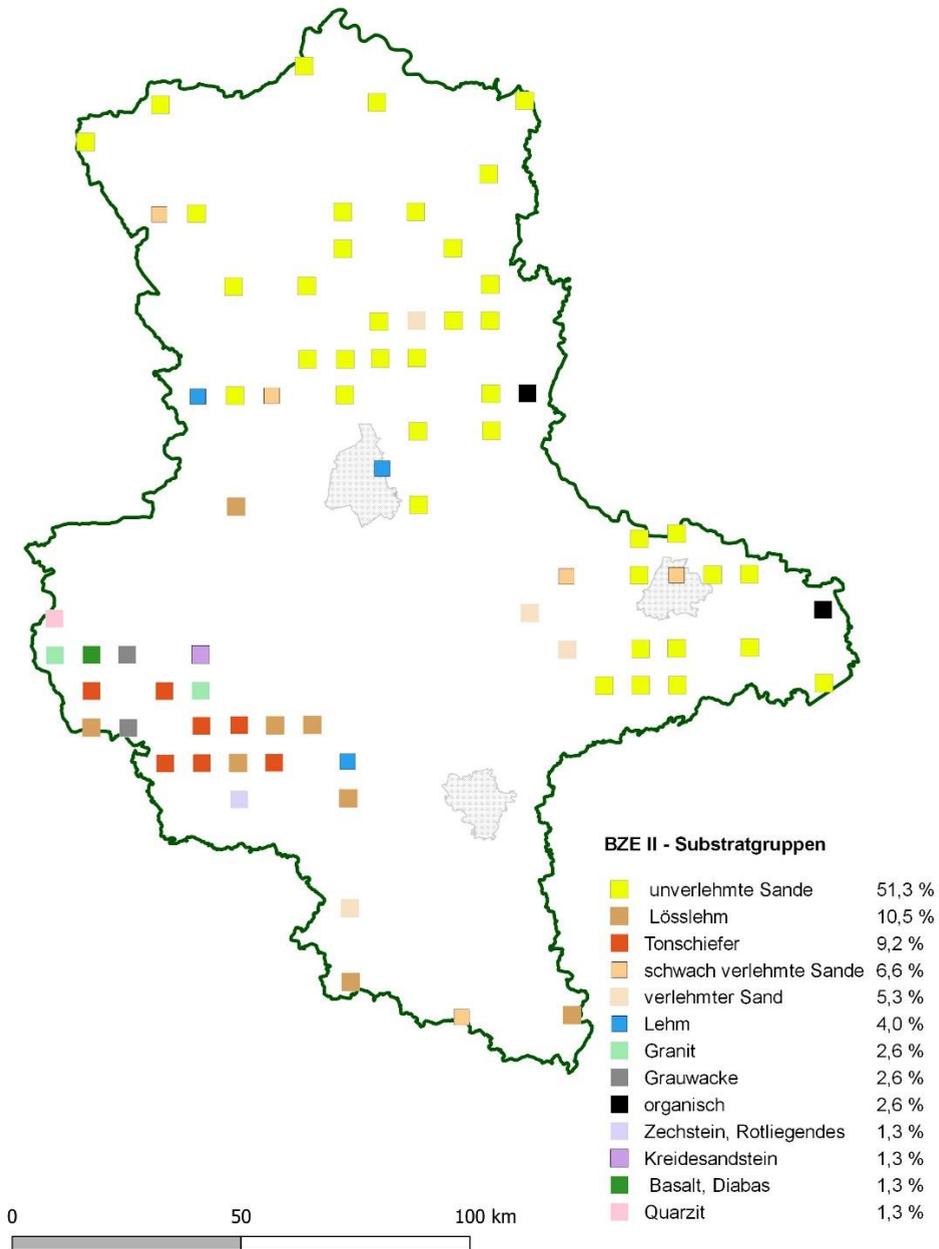


Abbildung 20: Zuordnung der 76 sachsen-anhaltischen BZE II-Punkte zu den Substratgruppen

Die Standorte der unverlehmtten Sande liegen alle im sachsen-anhaltischen Tiefland. Dort befinden sich auch die beiden ehemaligen Moore sowie überwiegend die schwach verlehmtten und verlehmtten Sande sowie die Lehmstandorte. Diese Substratgruppen repräsentieren die für diese Region typischen glazialen und fluvioglazialen Ablagerungen der letzten Eiszeiten mit pleistozänen Decken von Grund- und Endmoränen, Sandern und Talsanden, überwiegend aus der Warthevereisung. Damit gehört das Tiefland zum Altmoränengebiet und ist im Unterschied zur Jungmoräne durch intensiver verwitterte und stärker eingeebnete, eher nährstoffarme, sandige Böden geprägt (SCHWANECKE u. KOPP 1994).

Die in der BZE II vertretenen Festgesteine wie z. B. Tonschiefer, Diabas, Grauwacke, Quarzit und Granit liegen alle im Harz in der Standortsregion Mittelgebirge. In dem schmalen, zur sachsen-anhaltischen Mittelgebirgsregion gehörenden Kyffhäuser entfiel kein Punkt des BZE II-Rasters.

Die zwischen dem Mittelgebirge und Tiefland liegenden BZE-Punkte in der Standortsregion des Hügellandes sind vom Lösslehm und Lehmen geprägt, vereinzelt finden sich auch Sande unterschiedlichen Verlehmungsgrades. Aufgrund der geringen Bewaldung dieses überwiegend landwirtschaftlich genutzten Gebietes hat diese Standortsregion die geringste Anzahl an BZE-Punkten.

6.2.2 Bodentypen

Bodentypen unterscheiden sich nach charakteristischen Horizonten und Horizontfolgen, die spezifische pedogene Prozesse in den Ober- und Unterbodenhorizonten widerspiegeln (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Bodentypen lassen sich nach qualitativen Kriterien in Subtypen mit spezifischer Horizontabfolge untergliedern. Es werden drei Arten von Subtypen unterschieden:

- Normsubtyp
- Abweichungssubtyp
- Übergangssubtyp

Der Normsubtyp wird durch eine charakteristische Horizontabfolge gekennzeichnet, die der regulären Horizontabfolge des Typs entspricht. Abweichungstypen müssen prinzipiell die Horizonte des Typs (bzw. des Normsubtyps) aufweisen, besitzen jedoch zusätzliche abweichende Merkmale. Bei Übergangstypen treten stark ausgeprägte Merkmale anderer Typen hinzu. Zur Bezeichnung von Übergängen können die Namen zweier Typen bzw. eines Typs und eines Abweichungstyps kombiniert werden, wobei der zuletzt genannte die Zuordnung bestimmt. Für die Auswertung wurde der Bodentyp je BZE-Profil auf der Basis der Subtyp-Informationen ggf. bis zur Varietät abgeleitet.

Bei den sachsen-anhaltischen Waldstandorten dominiert mit Abstand der Bodentyp der Braunerde. Insgesamt 59 % der vorkommenden Böden der BZE II in

Sachsen-Anhalt entfallen auf diesen Bodentyp (siehe Abb. 21). Im Tiefland und Mittelgebirge sind jeweils rund zwei Drittel aller Bodentypen der BZE II-Punkte Braunerden, im Hügelland rund 20 %. Vereinzelt sind Podsol-, Gley-, Pseudogley- und Parabraunerde-Braunerden angesprochen worden, doch nur die Podsol-Braunerden kommen im Tiefland häufiger vor. Parabraunerden sind in Sachsen-Anhalts Wäldern mit 10 % vertreten. Sie stellen im Hügelland den am häufigsten vorkommenden Bodentyp und sind mit 2 BZE-Punkten auch im Mittelgebirge vertreten. Podsole (9 %) sind neben den Braunerden im Tiefland typisch, ein Podsol liegt im Harz. Mit 7 % Anteilen in der BZE II sind Pseudogleye ausgewiesen. Dieser Bodentyp kommt in allen drei Wuchsregionen vereinzelt vor. Weitere vorkommende Bodentypen sind Vega-Gleye, Moore, Ranker, Regosole, Fahlerden und ein Tschernosem, die aber mit jeweils 1–3 Punkten in der BZE II Sachsen-Anhalt eher selten sind.

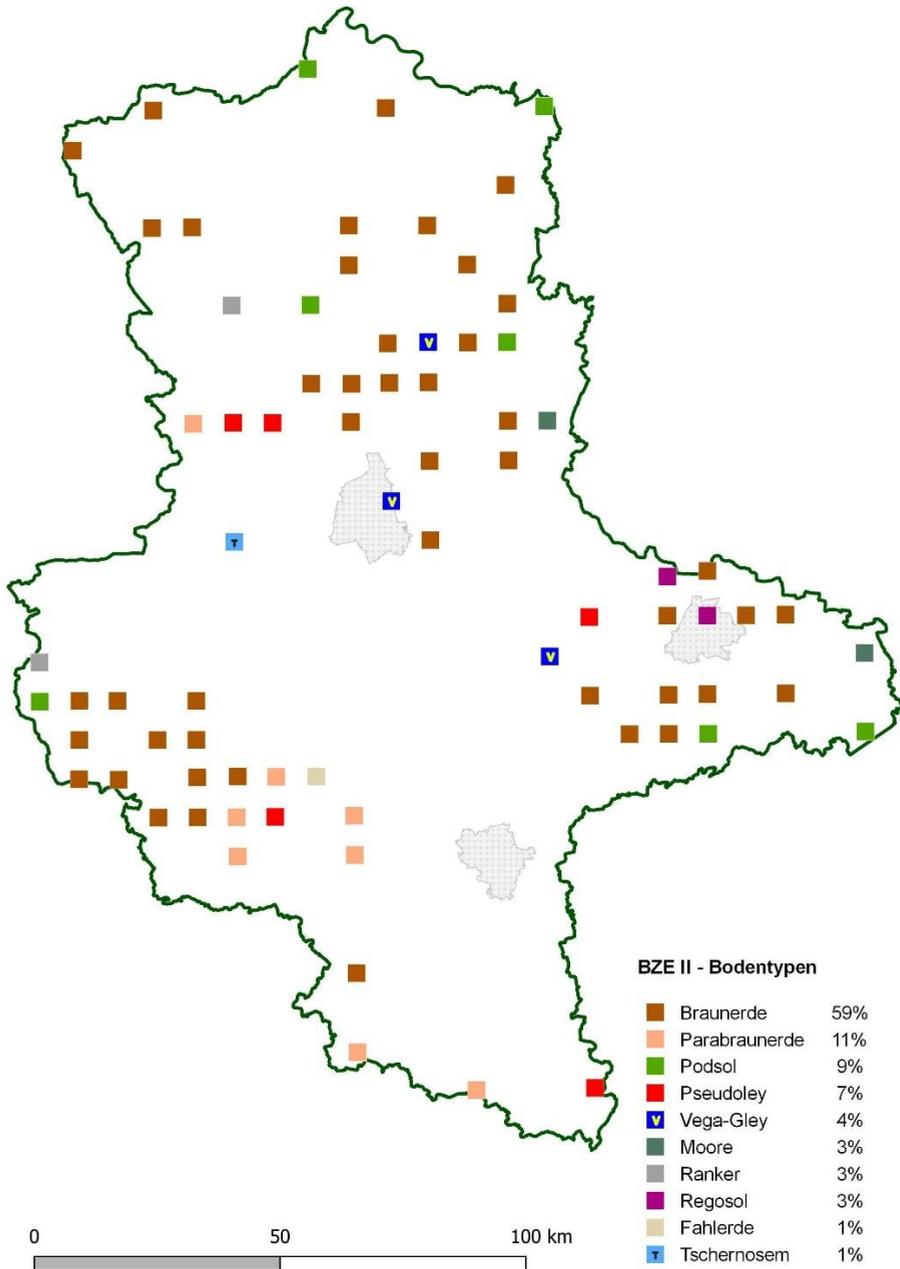


Abbildung 21: Bodentypen der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt (BZE II)

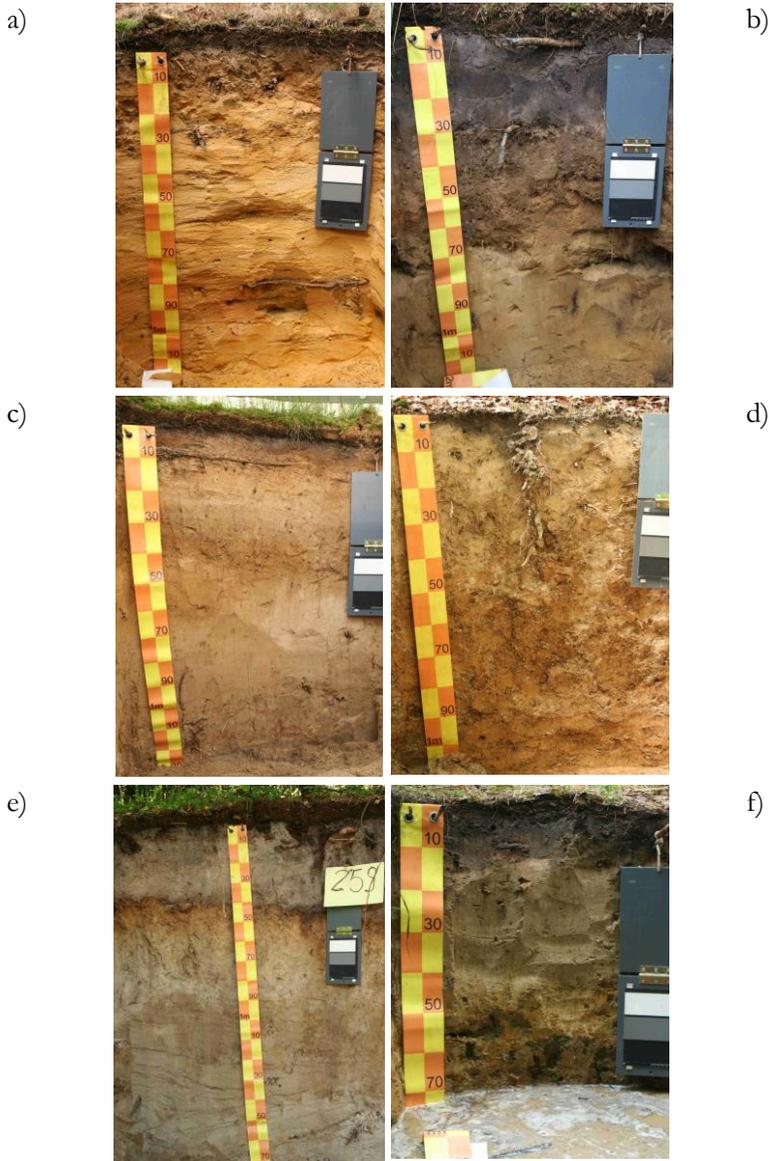


Abbildung 22: Die häufigsten Bodentypen in Sachsen-Anhalt: Braunerde aus Feinsand (Sandstein aus der Oberkreide) (a), Podsol-Braunerde aus Schmelzwasserablagerungen (b), Braunerde aus Terrassen-Flussablagerungen (c), Parabraunerde aus Lösslehm (d), Podsol aus Geschiebedecksand (e), Pseudogley (Fahlerde-Pseudogley) aus Geschiebedecklehm über Moränenablagerungen (f)

6.2.2.1 *Bodentypen nach Substratgruppen*

Ordnet man das Vorkommen von Bodentypen den Substratgruppen zu, so zeigen sich die folgenden Ergebnisse:

Auf 77 % der BZE-Standorte mit unverlehmtem Sand als Substratgruppe sind Braunerden ausgebildet. Weitere 15 % der Standorte dieser Substratgruppe sind durch Podsole gekennzeichnet, ansonsten gibt es noch vereinzelt jeweils einen Pseudogley, einen Ranker und einen Regosol.

In der Substratgruppe Lösslehm dominiert mit 50 % die Parabraunerde, zu jeweils gleichen Teilen gibt es noch Braunerde, Pseudogley, Fahlerde und Schwarzerde als Bodentyp.

Die Substratgruppe Tonschiefer wird durch überwiegend Braunerden geprägt.

In den weiteren Substratgruppen überwiegen insgesamt die Braunerden; es kommt jeweils in diesen Substratgruppen kein Bodentyp auffallend gehäuft vor.

6.2.3 *Humusformen*

Als Humus bezeichnet man die zersetzten und umgeformten Bodenbestandteile pflanzlicher oder tierischer Herkunft. Die organische Substanz kann als Auflagehumus (Humusdecke) dem Mineralboden aufliegen oder im mineralischen Boden verteilt sein. Die Humusdecke lässt sich in die Streulage (L), die Vermoderungslage (Of) und die Humifizierungslage (Oh) unterteilen (HOFMEISTER 2004). Humusformen, die noch keinen durchgehenden Oh mit mehr als 5 mm Mächtigkeit entwickelt haben, heißen Mineralbodenhumusformen. Alle Humusformen, die einen Oh-Horizont mit mehr als 5 mm besitzen, werden als Auflagehumusformen bezeichnet (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Die Einordnung der Humusform erfolgte in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Die Humusform wurde an den acht Satellitenpunkten pro BZE-Punkt erhoben. Auf der Basis dieser Einzelerhebungen wurde für jeden BZE-Punkt eine dominante Humusform abgeleitet. Die Aufnahme erfolgte auf der Ebene Subtyp und Varietät (WELLBROCK et al. 2006, s. Tab. 7).

6.2.3.1 *Verteilungen der Humusformen*

Insgesamt 24 % der sachsen-anhaltischen BZE II-Punkte weisen den Humustyp Mull auf, wobei der Typische Mull auf 6 und der F-Mull auf 16 Punkten vorkamen.

Moder-Standorte haben mit Abstand den größten Anteil mit insgesamt 68 % in Sachsen-Anhalts Wäldern. Davon hat der Graswurzelfilzmoder als Subtyp mit 21 % den höchsten Anteil. Diese Humusform findet sich nur im Tiefland Sachsen-Anhalts (siehe Abb. 23). Es folgt der Typische Moder als Subtyp des Moders mit insgesamt 27 %, wobei die Varietäten feinhumusarmer und feinhumusreicher Moder ungefähr

zu gleichen Anteilen vertreten sind. Mit 16 % Anteilen kommt im Humustyp Moder noch der Subtyp rohhumusartiger Moder in den Varietäten feinhumusreich (11 %) und feinhumusarm (5 %) noch relativ häufig vor. Diese Humusform befindet sich bereits im Übergang zum Humustyp Rohhumus, ist biologisch aber noch aktiver. Der Mullartige Moder als Subtyp im Moder ist mit 4 % vertreten. Diese Humusform kennzeichnet bereits bessere Zersetzungsbedingungen im Übergang zum Mull.

Die ungünstigsten Humusformen im Rohhumus (Subtyp Typischer Rohhumus in den Varietäten feinhumusarm und feinhumusreich) sind in der BZE II in Sachsen-Anhalt auf nur 2 % der ausgeprägt (s. Abb. 23).

In der BZE II kommen noch ein Feuchtmoder, ein Feuchtrohhumus und zwei Standorte mit nicht klassifizierbaren Humusformen vor (ein Erdniedermoor und eine Erstaufforstung).

Gegenüber der Humustypverteilung der BZE II mit 24 % Mull, 68 % Moder und 3 % Rohhumus sowie 5 % anderen Humusformen war die Verteilung zum Zeitpunkt der BZE I deutlich abweichend: Auf den Humustyp Mull entfielen lediglich 8 %, den Moder 58 % und Rohhumus 28 % (andere 6 %). Damit zeigt sich eine deutlich qualitative Verbesserung der Humusformen hin zu den günstigeren Humusformen Moder und Mull.

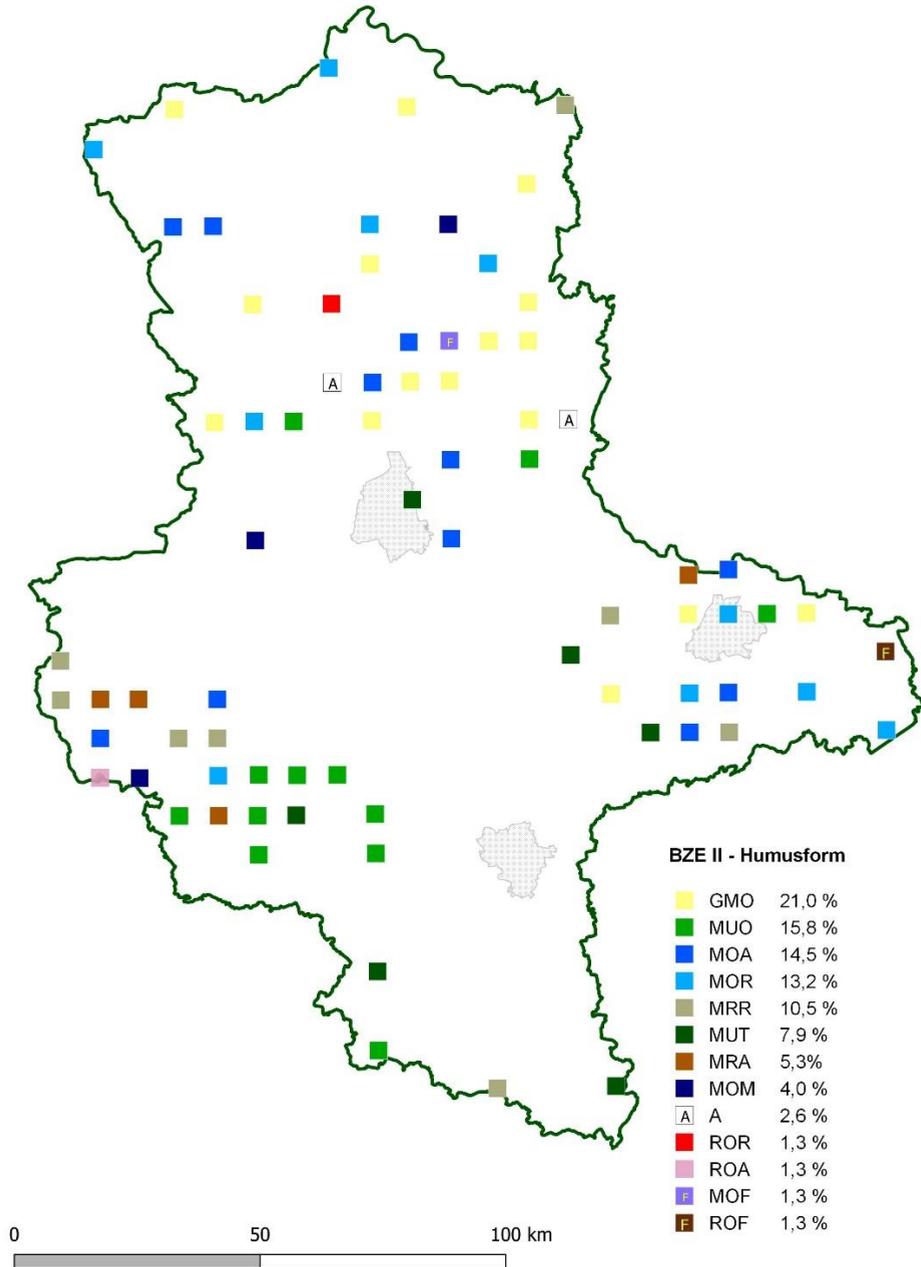


Abbildung 23: Humusform der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt (BZE II), Abkürzungen der Humusformen s. Tab. 7

Bei dem Vergleich nur der BZE-Punkte, bei denen sowohl bei der BZE I als auch bei der BZE II ein Humustyp angesprochen wurde ($n=62$), zeigt sich die in Abb. 24 dargestellte Entwicklung:

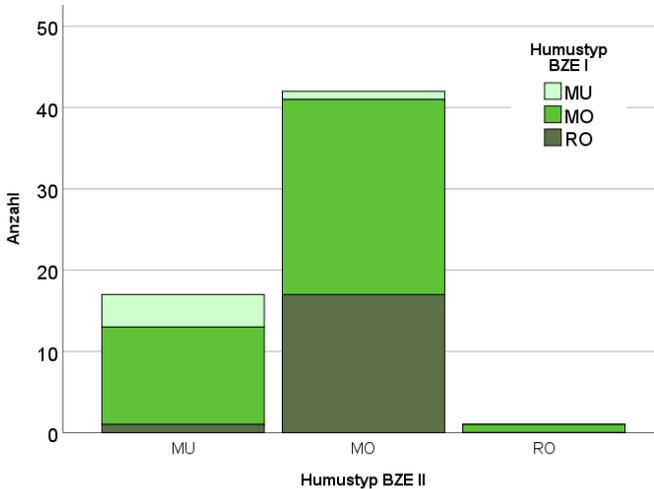


Abbildung 24: Humusform der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt (BZE II), Abkürzungen der Humusformen s. Tab. 7

Die BZE-Punkte, die zum Zeitpunkt der BZE I als Rohhumus angesprochen wurden, entwickelten sich zum Zeitpunkt der BZE II zu Moderhumusformen. Ebenso veränderten sich die damaligen Moderhumusformen in vielen Fällen zum Mull. Verschlechtert haben sich dagegen nur 2 Standorte, ein Standort von Mull zu Moder und einer vom Moder zum Rohhumus.

Die Flugascheinträge hatten keinen erkennbaren Einfluss auf die Verteilung des Humustyps. Im unverlehmten Sand ergab sich in der BZE II unter Flugascheinfluss eine ähnliche Verteilung des Humustyps (Mull 8 %, Moder 92 %, Rohhumus 0 %) wie bei den Standorten des unverlehmten Sandes, die nicht von Flugasche beeinflusst sind (Mull 8 %, Moder 88 %, Rohhumus 4 %). Allerdings wurden in der BZE II deutlich weniger Graswurzelfilzmoder auf Flugasche beeinflussten Standorten (18 % der Moder) des unverlehmten Sandes gefunden als bei von Flugasche unbeeinflussten Standorten (52 % der Moder).

Detailliertere Auswertungen zur zeitlichen Entwicklung auf Ebene des Humussubtyps oder der -varietät zwischen der BZE I und II sind schwierig, da die Humusformansprache in der BZE I nur bedingt mit der der BZE II vergleichbar ist. Der häufigste Subtyp Graswurzelfilzmoder in der BZE II bestand z. B. noch nicht bei der Ansprache in der BZE I. Ein Vergleich der Verteilungen des Humussubtyps zwischen der BZE I und II ist schon aus diesem Grund wenig aussagekräftig.

Tabelle 7: Humusformen (nach WELLBROCK et al. 2006), Legende zu Abb. 23

Typ	Subtyp	Varietät	BZE I	Bedeutung	Bemerkung	
	Kürzel BZE II					
Aeromorphe Humusformen						
MU	MUT		mu, mup, muk, muw	Mull Typischer Mull	Ah basenreich	
	MUO		muf, mus	F-Mull		
MO	MOM	MOA MOR	mou	Mullartiger Moder	Oh locker, bröckelig Oh < 2 cm Oh ≥ 2 cm Sonderform	
	MOT		mot	Typischer Moder		
	GMO		SHGM	Graswurzelfilzmoder		
	TA		ta	Tangel		
	MR	MRA MRR	mor	Rohhumusartiger Moder	Oh unscharf, brechbar Oh < 3 cm Oh ≥ 3 cm	
				- feinhumusarm - feinhumusreich		
	RO	ROT	ROA ROR	rot	Rohhumus Typischer Rohhumus	Oh scharfkantig, brechbar Oh < 4 cm Oh ≥ 4 cm
				- feinhumusarm - feinhumusreich		
HMO			SHHA, SHMO	Hagerhumus	Sonderform	
SRO			SHRO	Streunutzungs-Rohhumus	Sonderform	
Hydromorphe Humusformen (L-, Of-, Oh-Horizonte schmierig feucht, A-Horizonte hydromorph (Sw-Ah, Go-Ah))						
MUF			amu	Feuchtmull	Aa-Horizont, Oh fehlend	
MOF			amo	Feuchtmoder		
ROF			aro	Feuchtrohumus		
AMO			am	Anmoor		
NA = Nicht angesprochen (Humusform konnte nicht bestimmt werden) A = Andere (nicht zu kategorisierende Humusform)						

6.2.3.2 Trockenmasse im Auflagehumus

Die durchschnittliche Trockenmasse des Auflagehumus für alle BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt hat sich von 47,5 t/ha bei der BZE I rechnerisch um 28,5 t/ha auf 71,6 t/ha erhöht (s. Tab. 8). Da in Sachsen-Anhalt 11 BZE-Punkte im BZE II-Raster gegenüber der BZE I hinzukamen, basiert diese rechnerische Differenz auf unterschiedlichen Kollektiven von BZE-Punkten. Exakter für die Beschreibung von Veränderungen der Trockenmasse im Auflagehumus sind die Differenzen nur der BZE-Punkte, die auch in beiden Erhebungen beprobt wurden. Diese Differenz ist in Tabelle 8 angegeben und weist immerhin noch eine Zunahme von 18,0 t/ha im Mittel auf. Die hohen Standardabweichungen spiegeln die weiten Spannen der Trockenmassen im Auflagehumus vom Mull zum Rohhumus der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt wider. Der wesentlich geringere Standardfehler zeigt jedoch, dass der jeweilige Mittelwert als relativ gut belastbar angesehen werden kann. Sowohl die Unterschiede zwischen den Mittelwerten (t-Test) als auch Medianen (Wilcoxon Test) waren signifikant.

Die C/N-Verhältnisse nahmen von der BZE I zur BZE II in den Humustypen Mull, Moder und Rohhumus zu, blieben aber mit Werten zwischen 20–25 im mäßig weiten Bewertungsbereich (s. Tab. 8a). Nur beim Rohhumus wurden in der BZE II weite mittlere C/N-Verhältnisse mit 28 festgestellt. Auch die mittleren C/P-Verhältnisse der genannten Humustypen erhöhten sich von der BZE I zur BZE II und bewegen sich zwischen 300 und 600 im mittleren bis mäßig weiten Bewertungsbereich (nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2016). Signifikante Unterschiede ergaben sich im jeweiligen Gesamtergebnis und beim Humustyp Moder sowie beim C/P-Verhältnis im Mull.

Tabelle 8: Durchschnittliche Trockenmasse des Auflagehumus bei der BZE I und II in Sachsen-Anhalt sowie Veränderungen [t/ha], ***signifikant auf dem 0,1 % Signifikanzniveau

Trockenmasse des Auflagehumus		BZE I	BZE II	Differenz (nur gepaarte Stichprobe)	p
insgesamt	Mittel	47,5	71,6	18,0	***
	Median	42,5	71,2	18,4	***
	n	64	76	62	
	SE	4,5	6,3	4,8	
	SD	35,7	54,9	37,64	

n = Anzahl, SE = Standardfehler des Mittelwertes, SD = Standardabweichung des Mittelwertes

Tabelle 8a: C/N- und C/P-Verhältnisse im Auflagehumus der BZE I und II nach Humustyp in Sachsen-Anhalt (n=Anzahl, fett = signifikante Unterschiede auf 5 % Signifikanzniveau, Mann-Whitney U-Test)

	Mull (n)	Moder (n)	Rohhumus (n)	Andere (n)	Gesamt (n)
C/N BZE I	22 (5)	21 (38)	23 (18)	22 (1)	21 (62)
C/N BZE II	25 (18)	24 (52)	28 (2)	20 (4)	24 (76)
C/P BZE I	303 (5)	322 (37)	477 (18)	501 (1)	369 (61)
C/P BZE II	400 (18)	471 (52)	581 (2)	316 (4)	449 (76)

Die Trockenmasse im Auflagehumus wird i. d. R. von der Baumartenzusammensetzung der jeweiligen Bestände (Bestandestyp) beeinflusst. Mit zunehmendem Anteil von Nadelholz erhöht sich die Trockenmasse (s. Abb. 25): In den von Laubholz bestimmten Bestandestypen Buche, Eiche und sonstiges Laubholz (z. B. Birke, Erle, Roteiche, Ahorn oder Esche) liegen die durchschnittlichen Trockenmassen des Auflagehumus bei der BZE II überwiegend zwischen 20 und 50 t/ha. In den von Nadelholz bestimmten Bestandestypen Kiefer und Fichte dagegen zwischen 80 und 90 t/ha.

Die Trockenmassen im Auflagehumus sind in den Substratgruppen sehr unterschiedlich (s. Abb. 26). Die geringsten Auflagen finden sich auf den besser versorgten Standorten des Lösslehms (Loe) mit durchschnittlich 23 t/ha. Es folgt die Substratgruppe Tonschiefer (ToS) mit 48 t/ha, diese BZE-Punkte liegen im Harz mit teilweiser Fichtenbestockung und mächtigeren Moder-Humusformen. Es gibt unter den Tonschiefer-Standorten jedoch auch F-Mull mit geringeren Auflagemächtigkeiten. Die Auflagen mit der höchsten Trockenmasse finden sich in Sachsen-Anhalt jedoch im Tiefland überwiegend unter Kiefer bei den (un)verlehmten und schwach verlehmten Sanden mit Trockenmassen zwischen 60 und 100 t/ha.

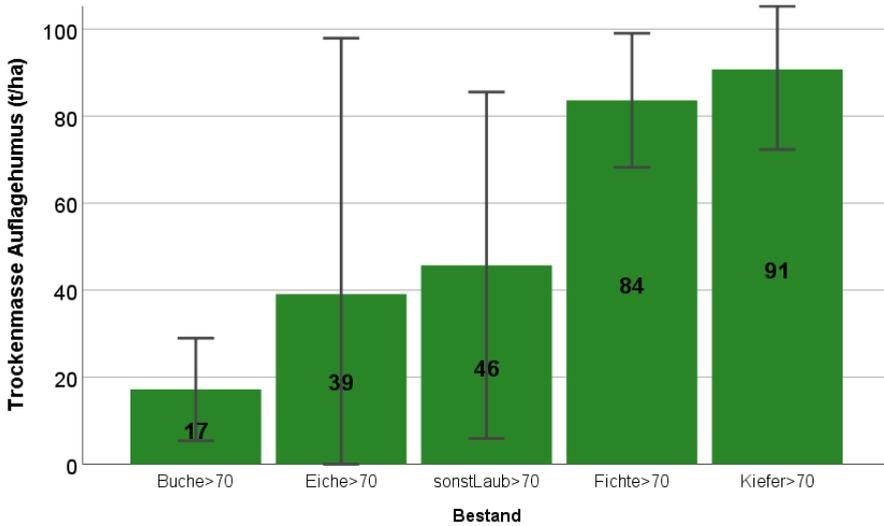


Abbildung 25: Trockenmasse im Auflagehumus [t/ha] bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Bestandestypen (mit $n > 3$ je Typ, eingeblendet sind die Konfidenzintervalle)

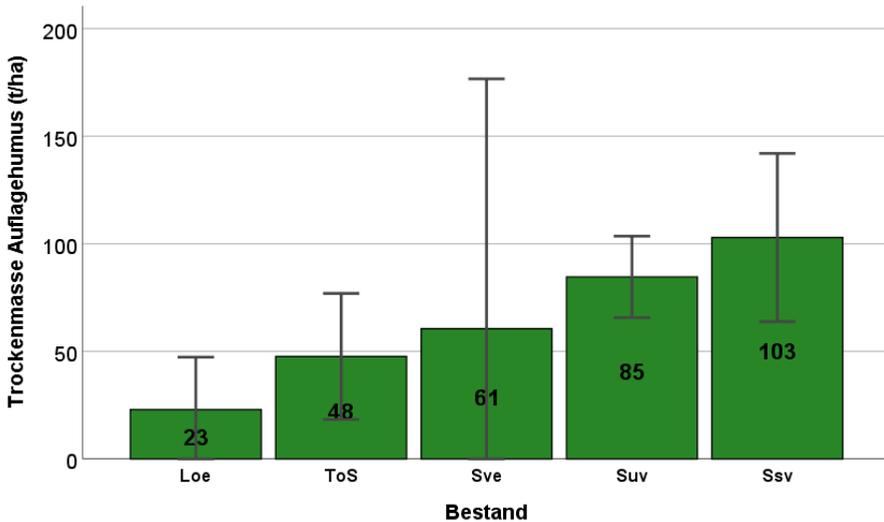


Abbildung 26: Trockenmasse im Auflagehumus [t/ha] bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen mit $n > 3$ (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

6.3 Bodenphysikalische Kenngrößen

Jan Evers, Uwe Paar

Eine zentrale Größe für die Bewertung der Ergebnisse der BZE II ist der jeweilige Elementvorrat im Auflagehumus und Mineralboden von Wäldern. So spielen z. B. der Kohlenstoffvorrat und seine Veränderung eine wichtige Rolle im Klimaschutz. Die Vorräte der wichtigsten Nährelemente im Mineralboden und ihre Veränderung sind außerdem wichtige Indikatoren einer nachhaltigen Nutzung von Wäldern, gerade vor dem Hintergrund von Vollbaumnutzungen und Waldkalkungen.

Definitionsgemäß sind im Mineralboden Korngrößen unter 2 mm Siebdurchmesser als Feinboden und ab 2 mm als Grobboden definiert (AD-HOC ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Bei der Vorratsberechnung ist zunächst der Vorrat des Feinbodens zu bestimmen, der dann multipliziert mit der jeweiligen Elementkonzentration den Elementvorrat ergibt. Der Feinbodenvorrat (t/ha) ergibt sich aus seiner Trockenrohddichte (g/cm^3) abzüglich des Grobbodenanteils (Vol.-%) bezogen auf die jeweilige Schichtmächtigkeit (cm).

Im Rahmen der BZE II wurden die bodenphysikalischen Kenngrößen Trockenrohddichte des Feinbodens und der Grobbodenanteil jeweils gemäß der BZE-Tiefenstufen in den BZE-Profilen Sachsen-Anhalts analytisch bestimmt. (GAFA 2005, 2014). Aus diesen Messdaten und der jeweiligen Schichtmächtigkeit wird der Feinbodenvorrat programmgestützt berechnet und für die Berechnung der Elementvorräte verwendet. Die in der BZE I gemessenen Trockenrohddichten bezogen sich nicht auf die Tiefenstufen, sondern auf die beprobten Bodenhorizonte, außerdem wurden kleinere Steine nicht ausgesiebt. Diese Werte entsprechen eher einer Trockenrohddichte des Gesamtbodens, nicht des Feinbodens wie in der BZE II gefordert. Um Auswertungen auf möglichst einheitlicher Datenbasis mit möglichst genauen und vergleichbaren Messwerten sicherstellen zu können, wurden die in der BZE II gemessenen Trockenrohddichten des Feinbodens und Grobbodenanteile auch für die BZE I verwendet.

6.3.1 *Trockenrohddichten des Feinbodens*

Die Trockenrohddichten des Feinbodens (s. Abb. 27) steigen im Allgemeinen mit zunehmender Bodentiefe kontinuierlich an, unterscheiden sich aber in Abhängigkeit von den Substratgruppen. Die geringsten Trockenrohddichten finden sich beim Tonschiefer und verlehnten Sand mit Werten von unter $1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$ in 0–5 cm. Sie sind Ausdruck der hohen Humusgehalte und des lockeren Mineralbodens direkt unterhalb des Auflagehumus. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Trockenrohddichten des Feinbodens aller Substratgruppen bis auf Werte zwischen $1,4$ – $1,9 \text{ g}/\text{cm}^3$ an. Die Böden in den Substratgruppen der Sande weisen insgesamt höhere Trockenrohddichten auf als die der Lösslehme und Tonschiefer. Absolut die geringsten Trockenrohddichten traten bei den organisch geprägten Standorten mit Werten unter

0,5 g/cm³ auf. Die Böden der Substratgruppen Granit, Grauwacke und Basalt/Diabas liegen mit ihren Trockenrohdichten ungefähr bei dem Werten des Tonschiefers, Quarzit, Lehm, Zechstein und Kreidesandstein eher bei den Sanden mit höheren Trockenrohdichten (nicht dargestellt).

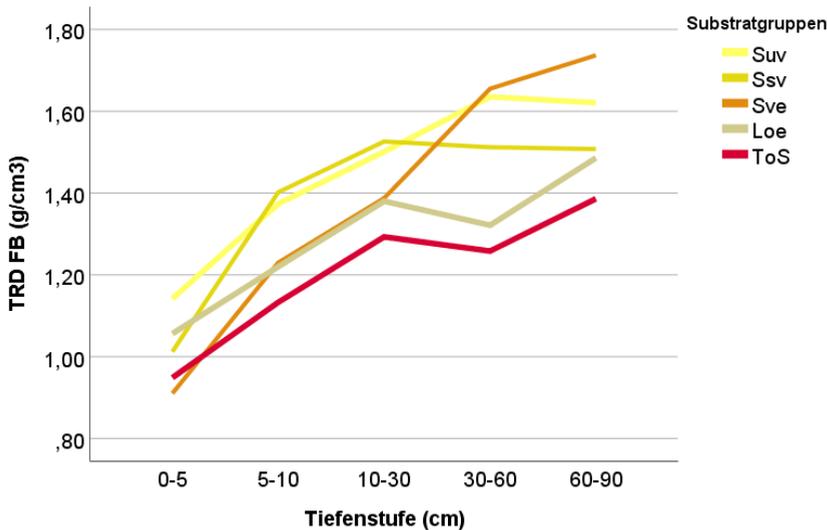


Abbildung 27: Trockenrohdichten des Feinbodens (TRD FB) [g/cm³] in Sachsen-Anhalt nach Tiefenstufen [cm] und Substratgruppen mit $n > 3$ (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer)

6.3.2 Grobbodenanteile

Die Grobbodenanteile in den Substratgruppen organisch geprägte Standorte, der Sande und des Lösslehms sind in allen Tiefenstufen überwiegend gering mit mittleren Werten unter 8 Vol%. Vereinzelt können auch höhere Grobbodenanteile bis maximal 40 Vol% auftreten. Bei den Lehmen und im Kreidesandstein liegen die Grobbodenanteile etwas höher mit mittleren Werten zwischen 5–15 Vol%. In den Substratgruppen Granit und Tonschiefer liegen die Grobbodenanteile im Oberboden bis 30 cm zwischen 10 und 20 Vol%, im Unterboden steigen sie auf 30–40 Vol%, beim Tonschiefer auf 65 % Vol% in 60–90 cm Bodentiefe an. Die Grobbodenanteile in den Substratgruppen Zechstein, Grauwacke Basalt/Diabas und Quarzit haben schon im Oberboden Werte zwischen 10–60 Vol%, im Unterboden sind die Grobbodenanteile häufig noch höher.

6.3.3 Feinbodenvorrat

Entsprechend der unterschiedlichen Trockenrohdichten des Feinbodens, der Grobbodenanteile und der Gründigkeit ergeben sich für die BZE II-Punkte in den jeweiligen Substratgruppen deutliche Differenzierungen hinsichtlich der Feinbodenvorräte (s. Abb. 28).

Die Spanne der mittleren Feinbodenvorräte bis 90 cm Bodentiefe je Substratgruppe reicht von 2000 t/ha bei Quarzit und organisch geprägten Standorten bis zu 14.000 t/ha bei den verlehmtten Sanden. Diese weite Spanne erklärt sich einerseits durch geringe Trockenrohdichten bei den organisch geprägten Standorten und zusätzlich hohen Grobbodenanteilen bei den Substratgruppen Quarzit, Grauwacke, Granit und Tonschiefer, andererseits durch relativ hohe Trockenrohdichten und geringe Grobbodenanteile bei Lösslehm, Sand und Lehm. Die Böden mit hohen Grobbodenanteilen (Quarzit, Grauwacke, Granit und Tonschiefer) haben häufig auch geringe Trockenrohdichten und daher relativ geringe Feinbodenvorräte, wohingegen die Böden mit hohen Trockenrohdichten (z. B. Sande und Lehme) geringe Grobbodenanteile und damit höhere Feinbodenvorräte aufweisen. Diese Unterschiede werden bedeutend bei der Beurteilung von Elementvorräten, die – wie beschrieben – schon aufgrund der unterschiedlichen Feinbodenvorräte in Abhängigkeit vom Substrat sehr verschieden sind.

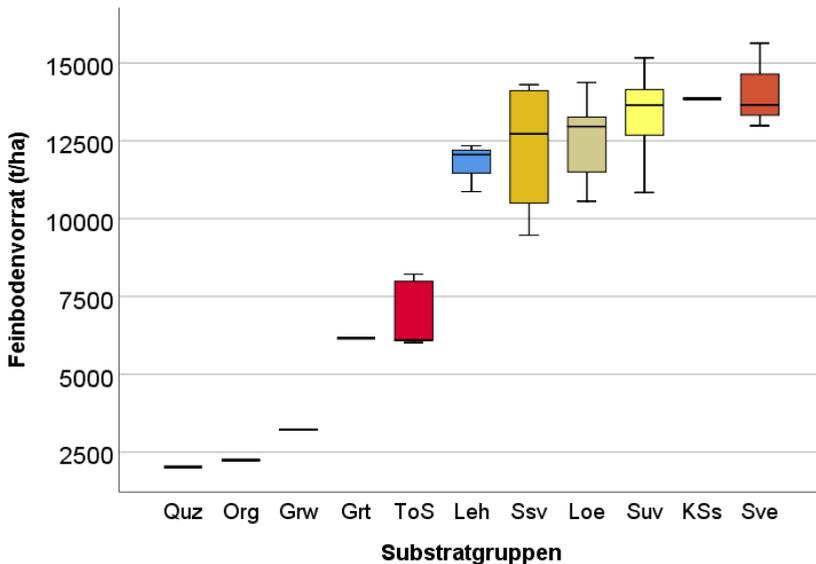


Abbildung 28: Feinbodenvorräte [t/ha] der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe (Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

6.3.4 Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist ein Maß für den pflanzennutzbaren Bodenwassergehalt¹ und eine grundlegende Größe zur Beschreibung des Wasserhaushaltes an den BZE-Punkten. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel und der Beurteilung der Baumarteneignung am jeweiligen Standort ist von entscheidender Bedeutung, wie hoch der für Pflanzen nutzbare Wasserspeicher (nFK) im Boden maximal ist und wie weit er tatsächlich zu Beginn der Vegetationsperiode im Boden gefüllt ist und damit den Pflanzen in der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Die nFK wurde anhand der Feinbodenart, der Trockenrohdichte des Feinbodens, des Grobbodenanteils und des Humusgehalts in Abhängigkeit von der Schichtmächtigkeit für die Tiefenstufen der BZE II programmgestützt (SCHULZE u. EVERS 2013) berechnet. Als Grundlage wurde die Pedotransferfunktion (KA 5, dort Tab. 70, AD HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Wie die Trockenrohdichte und der Grobbodenanteil folgt auch die nFK in Abhängigkeit vom Substrat bestimmten Mustern. In Abbildung 29 ist die mittlere nFK nach den BZE-Tiefenstufen auf Basis des BZE II-Datensatzes für die Substratgruppen in Sachsen-Anhalt dargestellt.

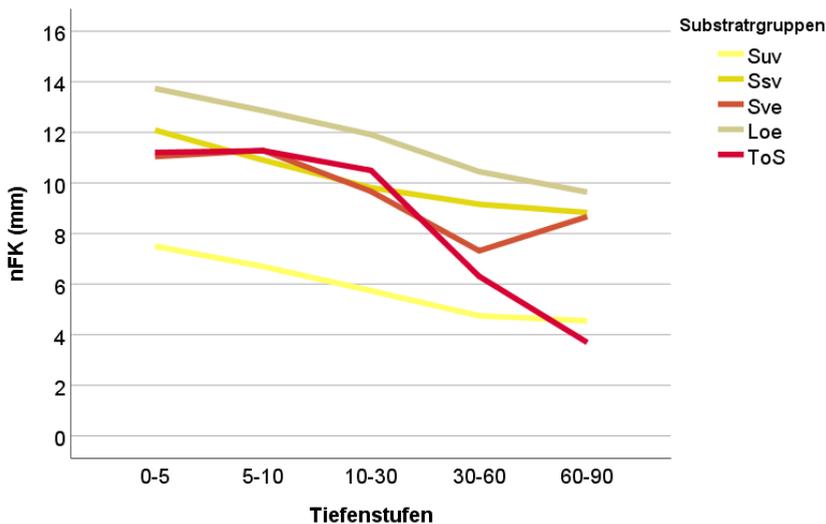


Abbildung 29: Mittlere nutzbare Feldkapazität (nFK) [mm], berechnet nach Stufenmitten der BZE-Tiefenstufen [cm] für die Substratgruppen in Sachsen-Anhalt anhand der BZE II-Daten (nur Substratgruppen mit mind. 4 BZE-Punkten) (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

¹ Die nFK ist die Menge des Bodenwassers, die in Poren mit Äquivalentdurchmesser zwischen 50 μm und 0,2 μm oder bei einer definierten Saugspannung zwischen pF 1,8 und 4,2 gebunden ist. Sie berechnet sich aus der Differenz zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005).

Grundsätzlich nimmt die nFK schichtbezogen mit der Bodentiefe ab, da mit zunehmender Bodentiefe die Trockenrohdichten und Grobbodenanteile zunehmen und die Humusgehalte abnehmen. Die geringste durchschnittliche nFK weist der unverlehmte Sand auf, die höchste der Lösslehm. Dies liegt an der besonderen Korngrößenzusammensetzung des Lösslehms mit relativ wenig Feinporen und Grobporen, aber vielen Mittelporen und dem weitgehend fehlenden Grobboden, sodass dieser verhältnismäßig viel pflanzenverfügbares Wasser speichern kann. Beim unverlehmten Sand dagegen ist das Porenverhältnis besonders ungünstig. Die (schwach) verlehnten Sande und der Tonschiefer liegen mit ihren Werten der nFK zwischen dem Lösslehm und dem unverlehmten Sand.

Für die Beurteilung der Standorte hinsichtlich ihrer Wasserspeicherkapazität ist die nFK bis maximal 90 cm Bodentiefe aufsummiert und nach Substratgruppen getrennt in Abbildung 30 dargestellt. Die mittlere nFK in den Waldböden Sachsen-Anhalts in der BZE II bis 90 cm Bodentiefe liegt mit 115 mm nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) im mittleren Bereich. Die höchsten Werte werden von der Substratgruppe Lösslehm mit durchschnittlich 192 mm erreicht. Diese Standorte sind überwiegend der sehr hohen Bewertungsstufe zugeordnet. Die geringste durchschnittliche nFK hat der Quarzit mit rund 50 mm. Er fällt damit in die sehr geringe Bewertungsstufe. Die Standorte der unverlehmten Sande verteilen sich mit ihrer mittleren nFK bis 90 cm Bodentiefe hauptsächlich im geringen bis mittleren Bereich zwischen 60 und 120 mm, Tonschiefer, Lehm, verlehmt und schwach verlehmt Sand sowie Granit im hohen nFK Bereich zwischen 120–180 mm.

BZE-Punkte mit nFK-Summen von unter 30 mm (sehr geringe Bewertungsstufe) treten im BZE-Kollektiv von Sachsen-Anhalt nicht auf.

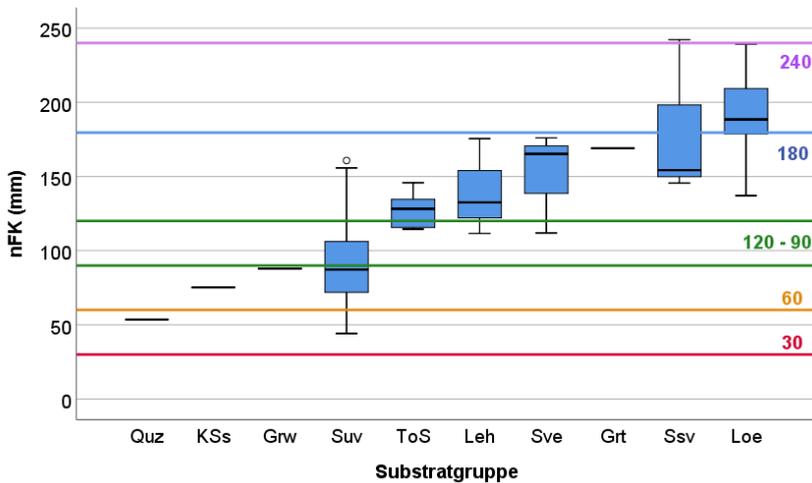


Abbildung 30: Nutzbare Feldkapazität [mm] bis maximal 90 cm Bodentiefe nach Substratgruppen anhand der BZE II-Daten in Sachsen-Anhalt (ohne organisch geprägte Standorte), als Linien sind die Bewertungsgrenzen nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003; s. Tab. 11, S. 148) angegeben (Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

6.4 Bodenmorphologische und bodenphysikalische Kenngrößen im Ländervergleich Nordwestdeutschlands

Jan Evers, Uwe Paar

Da in den nachfolgenden Ergebnisdarstellungen zur Bodenchemie auch die Mittelwerte für die Länder Hessen und Niedersachsen dargestellt sind, wird in diesem Kapitel auf einige grundsätzliche Unterschiede hinsichtlich der Verteilung der Substratgruppen in den Bundesländern und damit ihrer bodenphysikalischen Kenngrößen eingegangen.

Für die Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt insgesamt bilden die Sande mit knapp 40 % das größte Kollektiv. Dabei sind die unverlehmtten Sande mit gut einem Viertel die am häufigsten vorkommende Substratgruppe. Es folgen die Buntsandstein-Standorte mit 13 % und Lösslehme mit 12 %. Mit deutlich geringeren Anteilen schließen sich die Tonschiefer- (8 %), Basalt/Diabas- (6 %) und Kalk-Standorte (5 %) an. Mit jeweils 3 bis 4 %-Anteilen an allen BZE-Punkten in den drei Bundesländern sind die organisch geprägten Standorte sowie die Grauwacke-, Lehm- und Ton(stein)-Standorte trotz regional höherer Bedeutung deutlich seltener. Die Quarzit-, Zechstein(Rotliegendes)-, Granit- und Kreidesandstein-Standorte treten mit jeweils 1 % nur vereinzelt auf (s. Abb. 31).

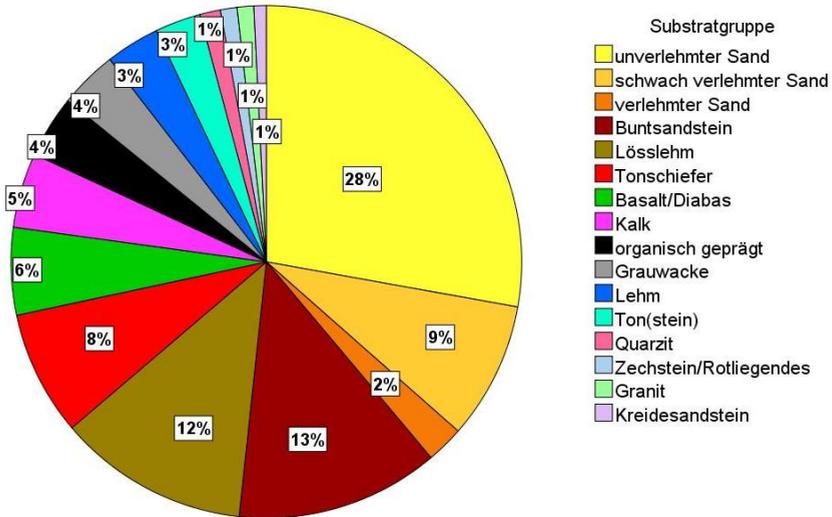


Abbildung 31: Verteilung der BZE-Punkte nach Substratgruppen (Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt)

Die Verteilungen der Substratgruppen im BZE-Kollektiv sind entsprechend der naturräumlich-standörtlichen Verhältnisse in den Bundesländern Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt unterschiedlich.

Der Ländervergleich zeigt Folgendes (s. Tab. 9):

Tabelle 9: *Anzahl und prozentuale Verteilung der BZE II-Punkte auf die Substratgruppen in den Bundesländern*

Substratgruppe	Niedersachsen		Hessen		Sachsen-Anhalt	
	n	%	n	%	n	%
Buntsandstein	10	6	39	28	0	0
Lösslehm	18	11	20	14	8	11
Basalt/Diabas	0	0	20	14	1	1
Tonschiefer	7	4	16	11	7	9
unverlehmter Sand	59	36	8	6	39	51
Ton(stein)	4	2	7	5	0	0
Grauwacke	5	3	7	5	2	3
schwach verlehmter Sand	23	14	5	4	5	7
Quarzit	0	0	4	3	1	1
Lehm	6	4	4	3	3	4
Kalk	14	8	4	3	0	0
Zechstein (Rotliegendes)	0	0	3	2	1	1
verlehmter Sand	4	2	1	1	4	5
Granit	1	1	1	1	2	3
organisch geprägt	13	8	0	0	2	3
Kreidesandstein	2	1	0	0	1	1
Summe	166	100	139	100	76	100

n = Anzahl

In Hessen dominieren die Buntsandstein-Standorte mit gut einem Viertel aller Punkte, in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt jedoch die unverlehmten Sande des Tieflandes, die in Sachsen-Anhalt sogar die Hälfte aller Punkte ausmachen. Buntsandstein kommt bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nicht vor, ist aber in der niedersächsischen BZE II mit zehn Punkten (6 %) vertreten. Nur der Lösslehm ist über alle drei Bundesländer relativ gleichmäßig im BZE-Kollektiv verteilt (11 % jeweils Niedersachsen und Sachsen-Anhalt, 14 % Hessen). Basalt/Diabas-Standorte sind besonders typisch für Hessen. Sie kommen im Rahmen der BZE II in Niedersachsen gar nicht und in Sachsen-Anhalt nur mit einem Punkt vor. Tonschiefer-Standorte haben ihren Schwerpunkt mit 16 Punkten in Hessen, es kommen aber auch jeweils sieben Punkte dieser Substratgruppe in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt vor. Neben den Sanden bilden in Niedersachsen die Lösslehme, Kalk-Standorte und organisch geprägte Standorte regionale Schwerpunkte. In Sachsen-Anhalt sind es neben den Sanden und Lösslehmen die Tonschiefer-Standorte im Harz. Granit-, Kreidesandstein-, Zechstein (Rotliegendes)- und Quarzit-Standorte kommen jeweils

in den drei Bundesländern nur vereinzelt oder gar nicht vor. Mit geringen Anteilen sind die Lehme in jedem Bundesland vertreten. Organisch geprägte Standorte haben ihren Schwerpunkt in Niedersachsen. In Hessen kommen diese Standorte im BZE-Kollektiv gar nicht und in Sachsen-Anhalt zweimal vor.

Die länderspezifischen Muster in der Verteilung der Substratgruppen erklären die Unterschiede zwischen den Ländern in den weiteren Auswertungen.

Im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt gibt es hinsichtlich der durchschnittlichen Trockenrohdichten des Feinbodens in Abhängigkeit der Tiefenstufen länderbezogene Unterschiede (s. Abb. 32): In allen Tiefenstufen sind die Trockenrohdichten in Hessen am geringsten, in Niedersachsen etwas höher (mit Ausnahme der Tiefenstufe 60–90 cm) und in Sachsen-Anhalt mit deutlichem Abstand am höchsten. Diese Abstufung ergibt sich aus der bundeslandspezifischen Verteilung der Substratgruppen, hier vor allem der stärkeren Beteiligung der Sande an den Waldstandorten in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. So fallen in Hessen 11 %, in Niedersachsen 52 % und in Sachsen-Anhalt 63 % auf diese Substratgruppen.

Im Vergleich der Bundesländer Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt weisen die Waldböden Hessens mit Abstand die höchsten Grobbodenanteile auf (s. Abb. 33).

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 0–5 cm sind die Grobbodenanteile in Hessen am höchsten. In den Tiefenstufen 10–30 cm und 30–60 cm sind sie fast doppelt so hoch und in der Tiefenstufe 60–90 cm mehr als doppelt so hoch wie in den Bundesländern Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Auch dies hängt unmittelbar mit der Verteilung der unterschiedlichen Substrate in den Bundesländern zusammen. In Hessen sind die steinigen Mittelgebirgs-Standorte aus Buntsandstein, Basalt/Grauwacke sowie Tonschiefer prägend, in Niedersachsen und vor allem in Sachsen-Anhalt dominieren die weitgehend steinfreien Standorte der Sande und Lösslehme.

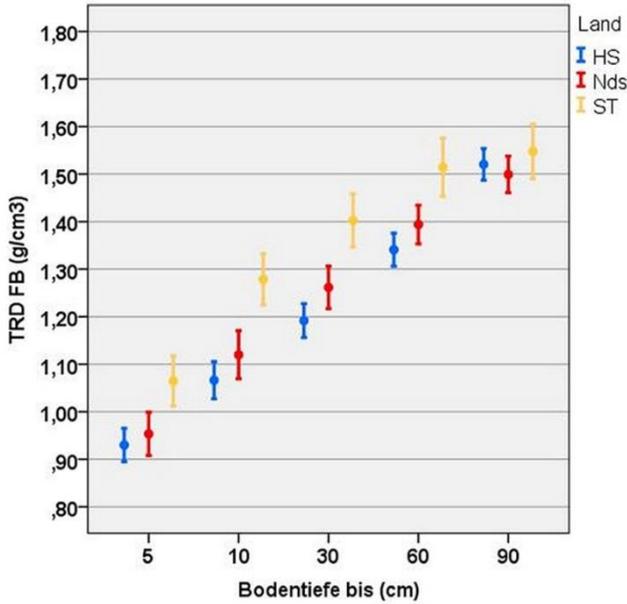


Abbildung 32: Durchschnittliche Trockenrohdichten des Feinbodens (TRD FB) [g/cm³] nach Tiefenstufen [cm] für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

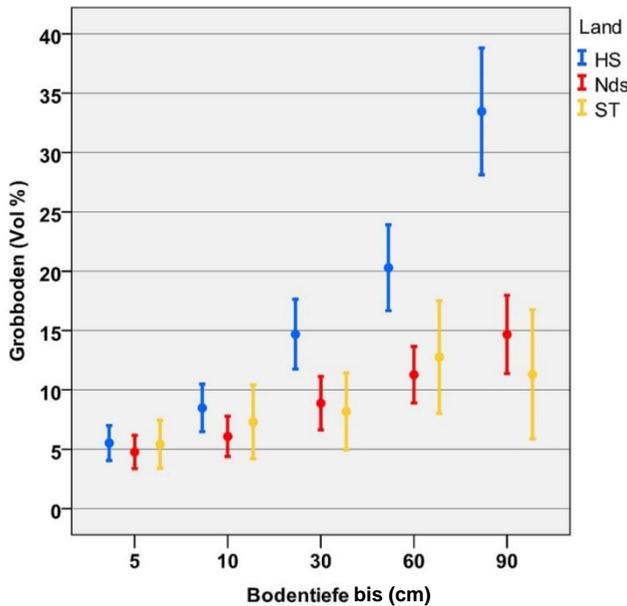


Abbildung 33: Durchschnittliche Grobbodenanteile [Vol.-%] nach Tiefenstufen [cm] für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

Für Hessen ergibt sich der geringste durchschnittliche Feinbodenvorrat in allen Tiefenstufen, es folgt Niedersachsen und dann Sachsen-Anhalt (s. Abb. 34).

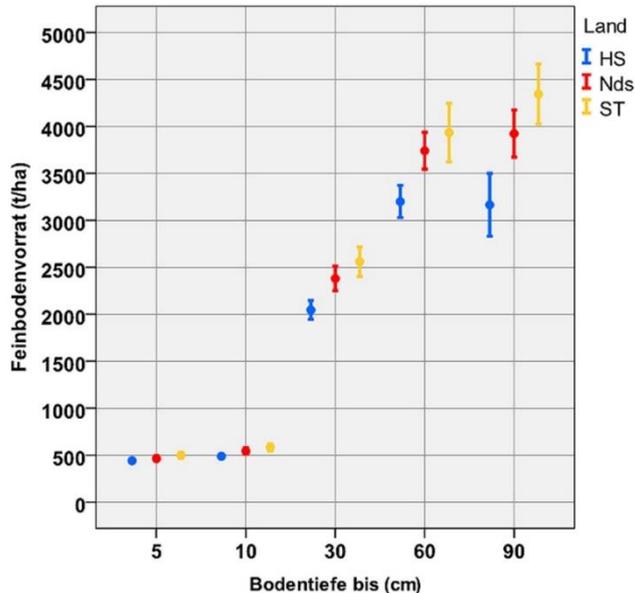


Abbildung 34: Durchschnittlicher Feinbodenvorrat [t/ha] nach Tiefenstufen [cm] für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

In der vergleichenden Auswertung dieser Bundesländer zeigt sich, dass innerhalb der Substratgruppen die durchschnittlichen Feinbodenvorräte gut vergleichbar sind. Die Sande und Lehme haben mit Feinbodenvorräten von 10.000–14.000 t/ha immer die höchsten Werte. Die Feinbodenvorräte nehmen dann über Ton(stein), Buntsandstein, Kalk, Tonschiefer bis hin zur Grauwacke auf rund 4.000 t/ha kontinuierlich ab (s. Abb. 35).

Der durchschnittliche Feinbodenvorrat der Waldböden liegt in Hessen mit 8.500 t/ha deutlich niedriger als in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt mit rund 11.000 t/ha (s. Tab. 10). Aufgrund der unterschiedlichen durchschnittlichen Feinbodenvorräte werden sich die daraus berechneten durchschnittlichen Elementvorräte in den Ländern unterscheiden. Den Boden mit den geringsten Feinbodenvorräten gibt es in Hessen (ein flachgründiger, steinreicher Braunerde-Ranker aus Tonschiefer bei Bischoffen). Der Boden mit den höchsten Feinbodenvorräten ist ein Vega-Gley aus verlehmttem Sand bei Tangerhütte in Sachsen-Anhalt mit 26-mal so hohem Feinbodenvorrat wie der feinbodenärmste Boden in Hessen. Grundsätzlich sind die Spannen zwischen dem leichtesten und schwersten Boden in den drei Bundesländern ähnlich. Die Unterschiede der durchschnittlichen Feinbodenvorräte in den Ländern erklären sich aus der unterschiedlichen Verteilung der Substratgruppen

in den Ländern: In Niedersachsen und Sachsen-Anhalt sind es vor allem die am häufigsten vorkommenden Sande, die aufgrund ihrer hohen Trockenrohdichten und geringen Grobbodenanteile mit 10.000–16.000 t/ha Feinbodenvorrat bis 90 cm Bodentiefe für den höheren Durchschnitt im Vergleich zu anderen Substratgruppen verantwortlich sind. Die Sande sind in Hessen selten, hier kommen hingegen überwiegend Böden mit Buntsandstein, Basalt/Diabas, Lösslehm sowie Tonschiefer vor, die deutlich geringere Feinbodenvorräte zwischen 4.000 und 14.000 t/ha aufweisen (s. Abb. 36).

Bei der Berechnung von Elementvorräten und ihrer Veränderung ist die Kenntnis der zugrunde liegenden Feinbodenvorräte ein wichtiges Kriterium bei der Interpretation, da sich die Feinbodenvorräte zeitlich nicht oder nur unwesentlich ändern können. Weiterhin können Unterschiede von Elementvorräten in den Bundesländern oder auch Regionen wesentlich mit der Ausstattung an Substraten mit unterschiedlichen Feinbodenvorräten zusammenhängen.

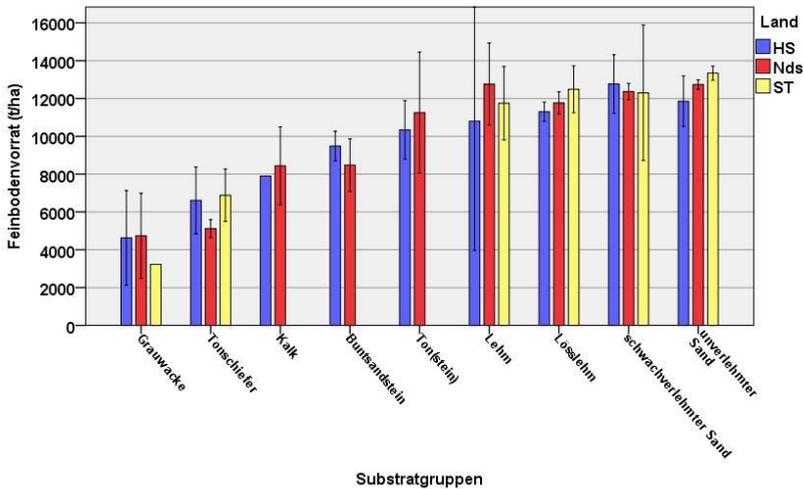


Abbildung 35: Mittlere Feinbodenvorräte [t/ha] in Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST) nach Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe ($n > 3$ je Bundesland, als Streumaß ist das Konfidenzintervall angegeben)

Tabelle 10: Durchschnittliche Feinbodenvorräte [t/ha] bis max. 90 cm Bodentiefe in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt

Feinbodenvorrat	n	Mittel [t/ha]	SD [t/ha]	Median [t/ha]	Min [t/ha]	Max [t/ha]
Niedersachsen	166	10.738	3.271	12.075	918	14.774
Hessen	139	8.501	3.311	8.760	622	14.372
Sachsen-Anhalt	76	11.077	3.844	12.703	1.026	15.631

n = Anzahl, SD = Standardabweichung

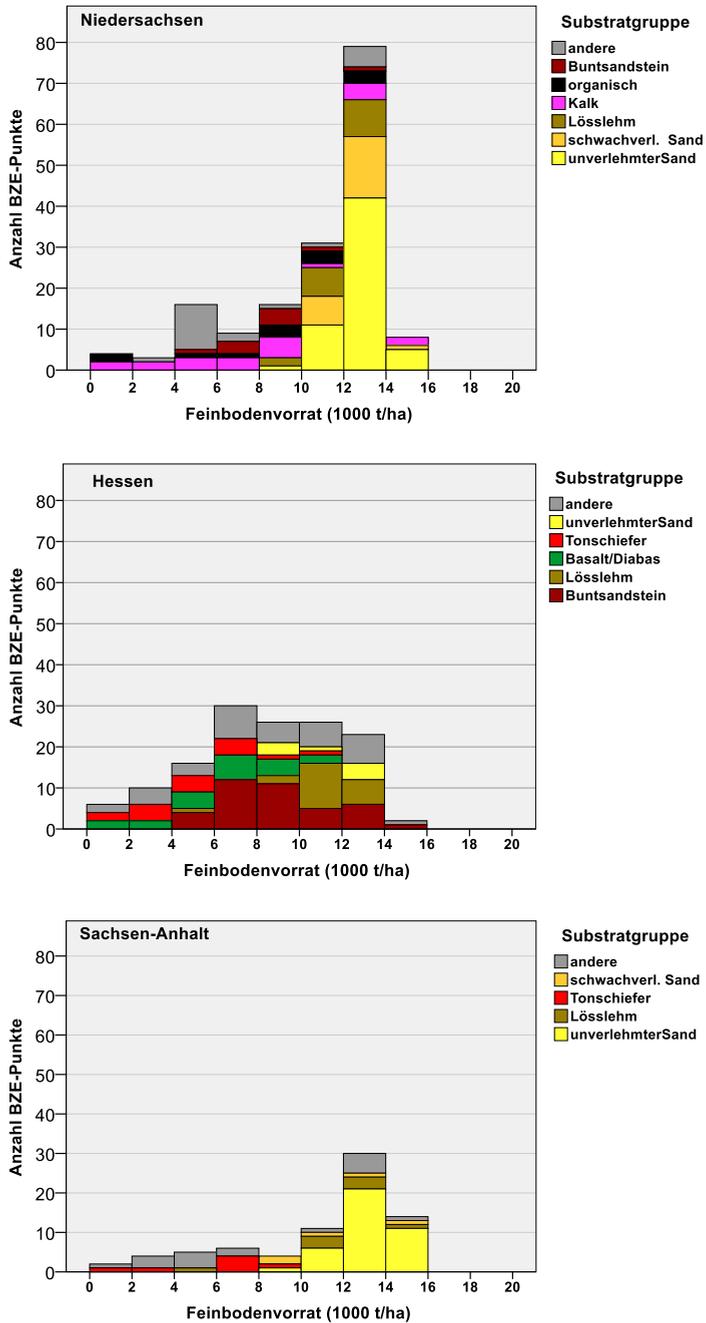


Abbildung 36: Verteilung der Feinbodenvorräte [1.000 t/ha] in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt nach den wichtigsten Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe

6.5 Bodenchemische Kenngrößen im Waldboden Sachsen-Anhalts

Jan Evers, Uwe Paar, Egbert Schönfelder

Die wichtigsten bodenchemischen Kenngrößen für den Auflagehumus und den Mineralboden werden anhand der Referenzwerte für die Bewertung von forstlichen Standorten mit „sehr gering“ bis „sehr hoch“ gemäß Tabelle 11 eingestuft (nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Die Grenzwerte für die verschiedenen Bewertungsbereiche sind als Orientierung mit fließenden Übergängen zu verstehen und nicht als scharfe Trennung. Die farbliche Hinterlegung in den folgenden Abbildungen basiert auf diesen Bewertungsbereichen und soll die Interpretation erleichtern. Die Angaben beziehen sich auf die Auflage und den effektiven Wurzelraum im Mineralboden. Die folgenden Auswertungen basieren auf der Annahme, dass der effektive Wurzelraum mit der am tiefsten einheitlich beprobten Tiefenstufe (60–90 cm) der BZE erfasst wird. Dies trifft für die intensivere Durchwurzelung (mittlere bis extreme Durchwurzelung) i. d. R. zu, nur vereinzelt wurden diese Durchwurzelungsstufen für Grob- und Feinwurzeln in tieferen Bodenschichten im BZE-Kollektiv gefunden. Im Bergland wurde in 90 cm Bodentiefe häufig bereits das anstehende Gestein erreicht, im Tiefland traten unter 90 cm Bodentiefe intensivere Durchwurzelungsstufen nur mit weniger als einem 10 %-Anteil auf. Schwache und vor allem sehr schwache Durchwurzelung konnte aber, sofern das Substrat durchwurzelbar war, auch in tieferen Schichten im Tiefland festgestellt werden. Für die Einschätzung der Standortpotenziale von Waldbäumen sollten gerade im Tiefland auch tiefere Bodenschichten einbezogen werden (EVERS et al. 2015).

Tabelle 11: *Bewertungsrahmen der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) (Ake, Basensättigung und Pufferbereiche: ohne Auflagehumus)*

(eff. Wurzelraum mit Auflagehumus)	sehr gering	gering	gering mittel	mittel	mittel hoch	hoch	sehr hoch
Ake (kmolc/ha)	50	100	250	500	1000	2000	
Basensättigung (%)	7	20	30	50	70	85	
Ca (kg/ha)	200	400	800	2000	4000	8000	
Mg (kg/ha)	50	100	200	500	1000	2000	
K (kg/ha)	200	400	600	800	1200	1600	
C (t/ha)	50		100	200		400	
N (t/ha)	2,5		5,0	10,0		20,0	
C/N	35	25	20	16	12	10	
Pufferbereiche	Fe	Al-Fe	Al	Austauscher	Kohlensäure/Silikat	Carbonat	
pH (H₂O)	3,0	3,8	4,2	5,0	6,2		

6.5.1 *Austauschkapazität*

Die Kenntnis der Kationenaustauschkapazität, kurz Austauschkapazität, spielt bei der standörtlichen Bewertung des Nährstoffhaushaltes von Waldböden eine bedeutende Rolle (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Die Austauschkapazität ist die bestimmende Größe zur Beschreibung von Speicherung und Austausch von pflanzenverfügbaren Nährstoffen (vor allem von Calcium, Magnesium und Kalium) an den negativ geladenen Oberflächen der Tonminerale. Weiterhin werden aus der Austauschkapazität abgeleitete Größen, wie z. B. die Basensättigung, zur Beurteilung des Säure-Basenzustandes herangezogen (BLOCK et al. 2000, RIEK u. WOLFF 2007, EVERS et al. 2013a, EVERS et al. 2013b). Die Austauschkapazität wird bei $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten unter 6,2 als effektive Austauschkapazität (Ake) bestimmt, wobei der Austausch im Perkolat annähernd bei bodeneigenem pH vollzogen wird. Die Kationenkonzentrationen werden im Perkolat gemessen, in Ionenäquivalente umgerechnet und auf die Bodenmenge bezogen. Bei $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten von über 6,2 wird die potenzielle Austauschkapazität (Akt) bestimmt (GAFA 2005, 2014). In den folgenden Auswertungen sind Ake und Akt vereinfachend gemeinsam betrachtet und werden als Austauschkapazität bezeichnet.

Die Austauschkapazität wird stark von der Tonmineralzusammensetzung, dem Humusgehalt und dem pH -Wert des Bodens bestimmt. Hohe Tonmineral- und Humusgehalte führen zu hohen Werten der Austauschkapazität und entsprechend positiver standörtlicher Bewertung. Bei fortgeschrittener Versauerung des Bodens bei $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten unter 4,2 lagern sich Al-Hydroxy-Polymere in die Tonmineral-Zwischenschichten ein. Es kommt langfristig zur Tonmineralzerstörung und damit zu einer Verringerung der Austauschkapazität. Je geringer die Austauschkapazität im Waldboden ist, umso weniger Kationen stehen den Waldbäumen austauschbar zur Verfügung und umso empfindlicher sind diese Waldböden gegenüber Veränderungen durch Säurebelastung oder intensiver Nutzung.

In Abbildung 37 ist die mittlere Austauschkapazität für den Auflagehumus und die Mineralboden-Tiefenstufen der BZE I und II für Sachsen-Anhalt mit Konfidenzintervallen (orange) und Mittelwerten der Länder Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt (rote Kreise) dargestellt.

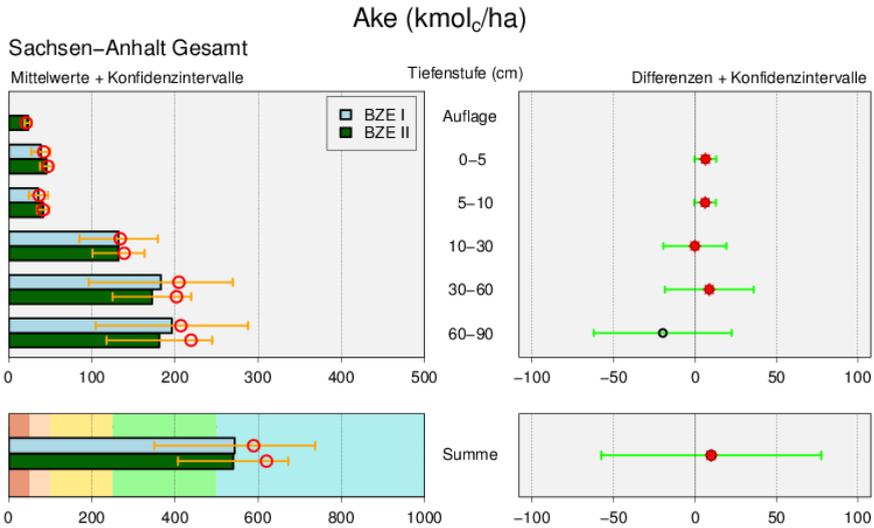


Abbildung 37: Austauschkapazität (Ake) [kmol_o/ha] in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I, (n = 63) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm

Abbildung 38 gibt einen Überblick über den schematischen Aufbau der vorigen und der folgenden Abbildungen mit identischem Layout.

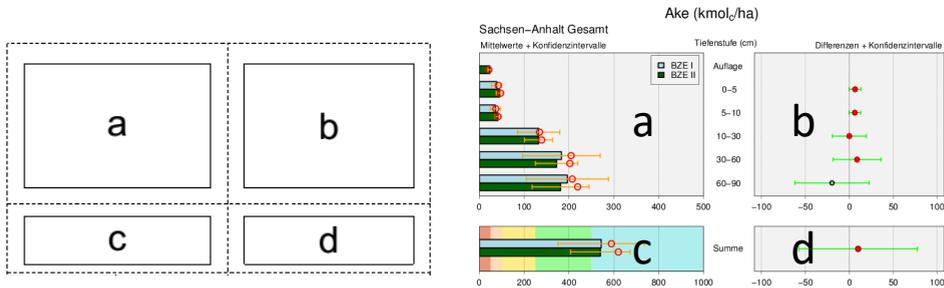


Abbildung 38: Schematischer Aufbau der Abbildungen zu bodenchemischen Kenngrößen am Beispiel der Austauschkapazität (Ake). Die Erläuterungen der Teilgrafiken sind jeweils im Text zu finden.

Im Folgenden werden die Teilgrafiken erläutert:

Teilgrafik a: Mittlerer Vorrat der BZE I (hellblau) und BZE II (dunkelgrün) für die Auflage und die BZE-Tiefenstufen 0–5, 5–10, 10–30, 30–60 und 60–90 cm für Sachsen-Anhalt. In Orange sind die 95 %-Konfidenzintervalle und mit roten Kreisen der Gesamtmittelwert der Länder Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt für die jeweilige Tiefenstufe angegeben.

Teilgrafik b: Bewertung der zeitlichen Unterschiede eines Merkmals zwischen der BZE II und I als mittlere Differenzen (BZE II minus BZE I) für Profile, die bei der BZE I und BZE II mit gleichen (!) Tiefenstufen vorliegen (Schnittmenge beider Inventuren). 95 %-Konfidenzintervall. Roter Stern: signifikant gegen 0 verschieden (5 %-Niveau, Wilcoxon).

Teilgrafik c: Mittlerer Profilverrat (Summe Auflage und aller jeweiligen Tiefenstufen auf Profilebene) aller BZE I- und BZE II-Profile mit 95 %-Konfidenzintervall (orange) und Gesamtmittelwert der Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt (roter Kreis). Farblich hinterlegt sind für den jeweiligen Parameter die Bewertungsstufen nach der Forstlichen Standortsaufnahme (AK Standortskartierung 2003): rot = sehr gering, orange = gering, gelb = gering-mittel, grün = mittel, hellblau = mittel-hoch, dunkelblau = hoch, violett = sehr hoch (s. a. Tab. 11).

Teilgrafik d: Mittlere Unterschiede zwischen der BZE II und BZE I aller bei der BZE I und BZE II beprobten BZE-Punkte auf Profilebene, wenn eine Auflage und jede Tiefenstufe bei der BZE I und II vorhanden sind. 95 %-Konfidenzintervall. Roter Stern: signifikant gegen 0 verschieden (5 %-Niveau, Wilcoxon).

Insgesamt liegt die Austauschkapazität in den Waldböden Sachsen-Anhalts im Mittel aller BZE-Punkte bei der BZE II mit rund 540 kmol_c/ha im Mineralboden nach der Forstlichen Standortsaufnahme (s. Tab. 11, S. 148 in diesem Band) noch im mittelhohen Bewertungsbereich. Damit haben die Waldböden in Sachsen-Anhalt im Vergleich zum Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt die geringste mittlere Austauschkapazität (s. Abb. 37, Teilgrafik c). Dies folgt insbesondere aus den hohen Anteilen von sandigen Standorten in Sachsen-Anhalts Wäldern, die grundsätzlich eine relativ geringe Austauschkapazität aufweisen.

Substratabhängig streuen die Werte der Austauschkapazität summiert auf Profilebene bis maximal 90 cm Bodentiefe von 133 kmol_c/ha in einem Ranker aus sandig lehmigen Schluff mit hohen Grobbodenanteilen zwischen 80–90 Vol% bei Ilsenburg im Ostharz und bis 3.740 kmol_c/ha in einem tiefgründigen Vega-Gley bei Magdeburg aus tonigen Substraten einer Hochflutablagerung. Dies zeigt die große Spanne der Austauschkapazität der forstlichen Waldböden in Sachsen-Anhalt und verdeutlicht, weshalb eine Auswertung nach Substratgruppen sinnvoll ist.

Mit durchschnittlich 23 kmol_c/ha trägt der Auflagehumus etwa 4 % zur gesamten Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe bei. In den oberen Bodentiefen (0–30 cm) sind mit rund 219 kmol_c/ha etwa 40 %, in den mittleren (30–60 cm) und unteren (60–90 cm) Bodenschichten mit jeweils um 175 kmol_c/ha jeweils 30 % der Austauschkapazität des Gesamtbodens bis 90 cm verteilt. Die höchste Austauschkapazität (bezogen auf jeweils 5 cm Bodenschicht) mit 45 kmol_c/ha findet sich vor allem aufgrund hoher Humusgehalte in den oberen 5 cm des Mineralbodens (s. Abb. 37, Teilgrafik a).

Die durchschnittliche Austauschkapazität hat sich in den Tiefenstufen 0–10 cm gegenüber der BZE I um knapp 13 kmol_c/ha erhöht. Dies entspricht einer Zunahme von 16 % bezogen auf die entsprechenden BZE I-Werte (s. Abb. 37, Teilgrafik b). Auch in 30–60 cm gab es eine signifikante Zunahme um 5 %. Diese Zunahmen wirkten sich auch auf die Gesamtprofilsumme der Austauschkapazität aus, hier wurde eine geringfügige Zunahme um 10 kmol_c/ha (+2 %) festgestellt.

6.5.1.1 Austauschkapazität in den Substratgruppen

Die mittlere Austauschkapazität auf Profilebene in den Substratgruppen sachsen-anhaltischer Waldböden ist sehr verschieden. Sie reicht von durchschnittlich 133 kmol_c/ha in einem steinreichen Quarzit im Harz bis zu über 2300 kmol_c/ha im tonhaltigen Lehm. Der Quarzit und die unverlehmten Sande sind mit ihren mittleren Austauschkapazitäten zumeist im gering-mittleren Bewertungsbereich verteilt (Abb. 39, zwischen oranger und unterer grüner Linie). Die Kreidesandsteine, Granite, Basalt/Diabase, Grauwacken und Tonschiefer fallen mit ihren durchschnittlichen Austauschkapazitäten bis 90 cm Bodentiefe in den mittleren Bewertungsbereich (zwischen den grünen Linien).

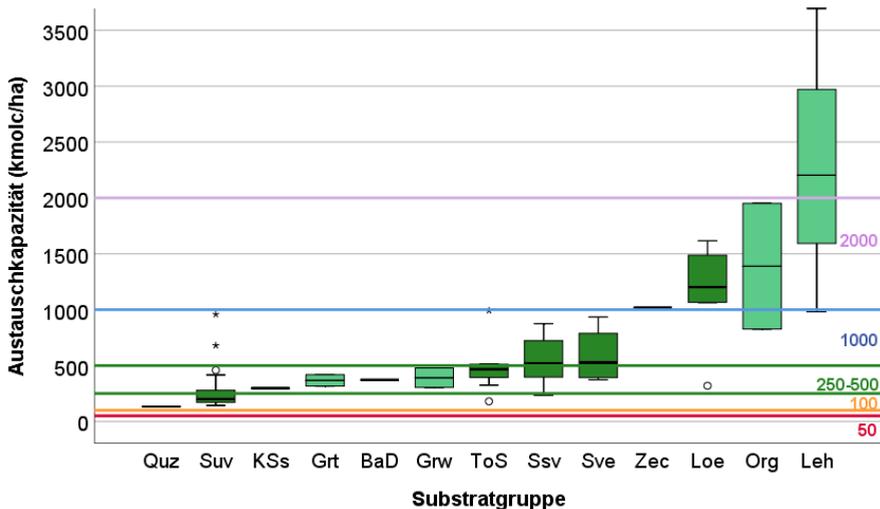


Abbildung 39: Austauschkapazität [kmol_c/ha] im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe bei der BZE II nach Substratgruppen in Sachsen-Anhalts Waldböden (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granite, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148; hellgrün: n<=3, dunkelgrün n>3)

Die BZE-Punkte in den Substratgruppen schwach verlehmt Sand und verlehmt Sand liegen im Durchschnitt mit ihren mittleren Austauschkapazitäten im mittleren, aber auch schon mittel-hohen Bereich (zwischen oberer grüner und blauer Linie), Zechstein, Lösslehm, organisch geprägte Standorte und Lehme befinden sich im hohen Bewertungsbereich (zwischen blauer und pinkfarbener Linie) bis sehr hohen Bereich (Lehme). Dabei sind die Streuungen innerhalb der einzelnen Substratgruppen, vor allem in den besseren Bewertungsstufen, erheblich.

Im Vergleich der fünf wichtigsten Substratgruppen bei Sachsen-Anhalts Waldböden weisen die unverlehmten Sande auf Grund des geringen Tonmineralgehaltes die geringsten Austauschkapazitäten auf. Die höchsten Anteile kommen aus dem Oberboden, was mit den relativ hohen Anteilen organischer Substanz zusammenhängt. Bei den schwach verlehmt Sanden liegen die mittleren Austauschkapazitäten wegen der höheren Lehmgehalte mehr als doppelt so hoch. Dies geht vor allem auf die höheren Lehmgehalte in den Schichten 30–60 und 60–90 cm zurück (vgl. Abb. 40). Diese Substratgruppen übertreffen mit ihrer Austauschkapazität noch den Tonschiefer. Wie beim unverlehmten Sand ist die Austauschkapazitätssumme im Oberboden 0–30 cm am höchsten, was hier ebenfalls mit höheren organischen Anteilen, aber auch mit höheren Anteilen von Tonmineralen begründet werden kann. Die unteren Schichten im Tonschiefer haben wegen der relativ hohen Steingehalte geringere Anteile an der Austauschkapazität. Tonige Böden mit hohen Anteilen an Tonmineralen und geringen Grobbodengehalten kennzeichnen die Lehme, die die höchsten Austauschkapazitäten aufweisen und im Profil gut verteilt vorliegen. Die Anteile des Auflagehumus an der Austauschkapazität sind relativ gering. Sie haben nur auf den ärmeren Standorten mit maximal 9 % nennenswerte Anteile an der gesamten Austauschkapazität im Profil.

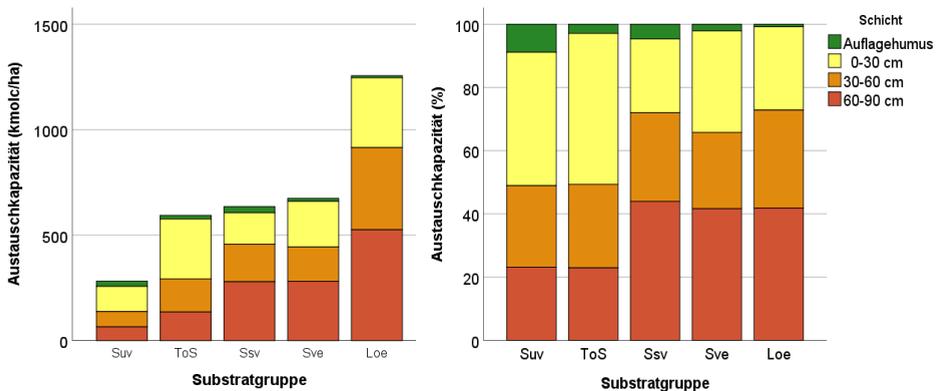


Abbildung 40: Austauschkapazität (Ake) im Auflagehumus und Mineralboden nach Bodenschichten (0–30, 30–60, 60–90 cm) in den Substratgruppen in kmol./ha (links) und % (rechts) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt, dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmt Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmt Sand, ToS: Tonschiefer)

6.5.1.1.1 Unverlehmte Sande

In Abbildung 41 ist die Austauschkapazität für die Substratgruppe unverlehmter Sand dargestellt.

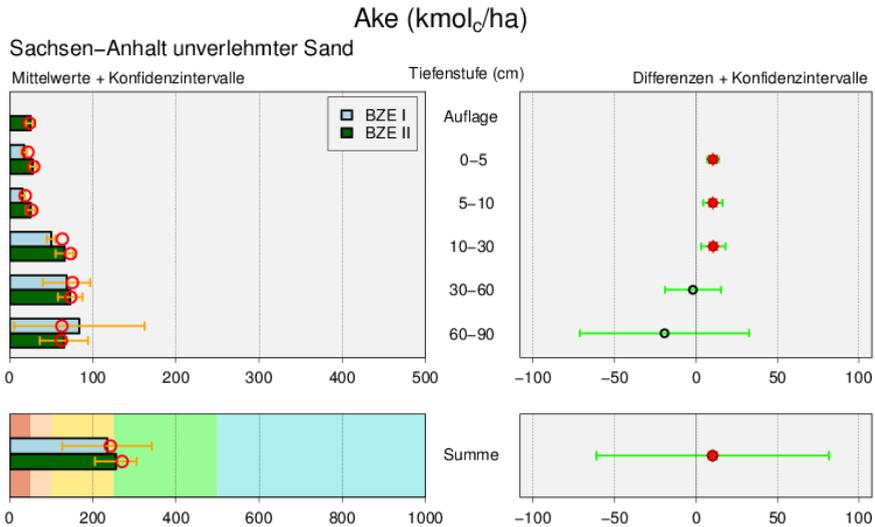


Abbildung 41: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe unverlehmte Sande in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 33) und II (n = 39) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 31) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Mit rund 255 kmol_c/ha Austauschkapazität (summiert bis 90 cm Bodentiefe) liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe unverlehmter Sand noch gerade im mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 41). Dieser Durchschnitt liegt zwischen den mittleren Vergleichswerten in Hessen (220 kmol_c/ha) und Niedersachsen (340 kmol_c/ha) (s. Abb. 41, Teilgrafik c). Die geringste Austauschkapazität in dieser Substratgruppe beträgt 144 kmol_c/ha, die höchste 958 kmol_c/ha (BZE II). Im ersten Fall handelt es sich um eine Braunerde aus aufgeschwemmten Feinsand in der Altmark, beim zweiten um einen Fahlerde-Pseudogley im Flechtinger Forst mit tonigen Beckenablagerungen im Untergrund, die für die ungewöhnlich hohe Austauschkapazität verantwortlich sind.

Die mittlere Zunahme der Austauschkapazität bezogen auf die BZE I auf Profilebene ist mit rund 10 kmol_c/ha (4 %) moderat, jedoch signifikant (s. Abb. 41, Teilgrafik d). Diese Veränderung ergibt sich vor allem aus den relativ hohen Zunahmen in den Tiefenstufen 0–5, 5–10 und 10–30 cm Bodentiefe um insgesamt gut 30 kmol_c/ha, was bezogen auf die BZE I knapp 40 % Zunahme bedeutet.

6.5.1.1.2 Schwach verlehmt Sande

Mit 550 kmol_c/ha Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe schwach verlehmt Sande im mittel-hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität (s. Abb. 42). Damit liegen sie bei mehr als dem Doppelten über den Werten der unverlehmt Sande.

Der geringste Wert in dieser Substratgruppe liegt mit 230 kmol_c/ha bei einer schwach podsoligen Parabraunerde-Braunerde aus Geschiebedecksand in der Nähe von Klötze, der höchste mit 876 kmol_c/ha bei einem Braunerde-Pseudogley mit einer schwach tonigen Moränenablagerung unterlagert bei Haldensleben. Signifikante Veränderungen der Austauschkapazität zwischen den beiden BZE-Zeitpunkten traten nicht auf.

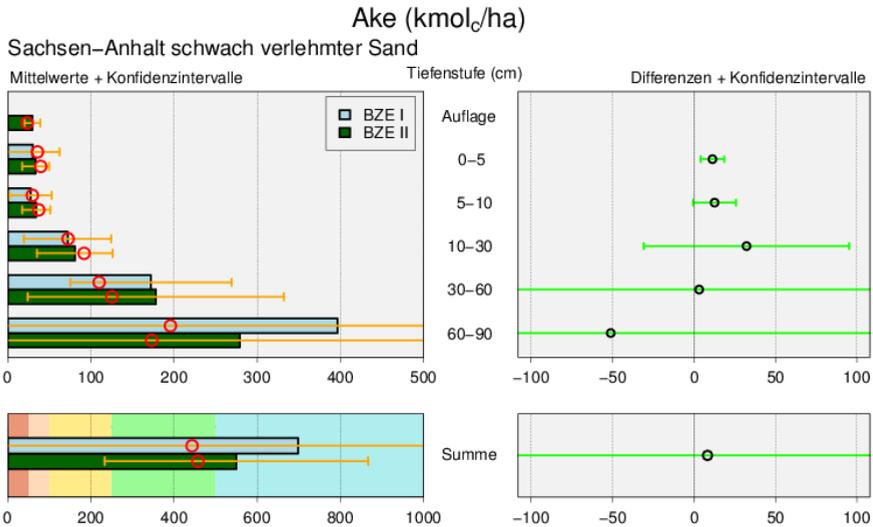


Abbildung 42: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe schwach verlehmt Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 3) und II (n = 5) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 3) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.1.1.3 Verlehmte Sande

Mit rund 590 kmol_e/ha in der BZE II erreichen die verlehmtten Sande innerhalb der Sande die höchste durchschnittliche Austauschkapazität und liegen damit im mittelhohen Bewertungsbereich (s. Abb. 43). Die BZE-Punkte streuen mit zunehmender Bodentiefe im Unterboden bei den Summen der Austauschkapazität erheblich. Dafür sind vor allem unregelmäßig unterlagerte Ton- und Lehmschichten verantwortlich. Dies führt zu teilweise hohen Abweichungen zwischen der BZE I und BZE II in den betreffenden Tiefenstufen, die aber als ungerichtet anzusehen sind. Signifikante Unterschiede konnten nicht nachgewiesen werden.

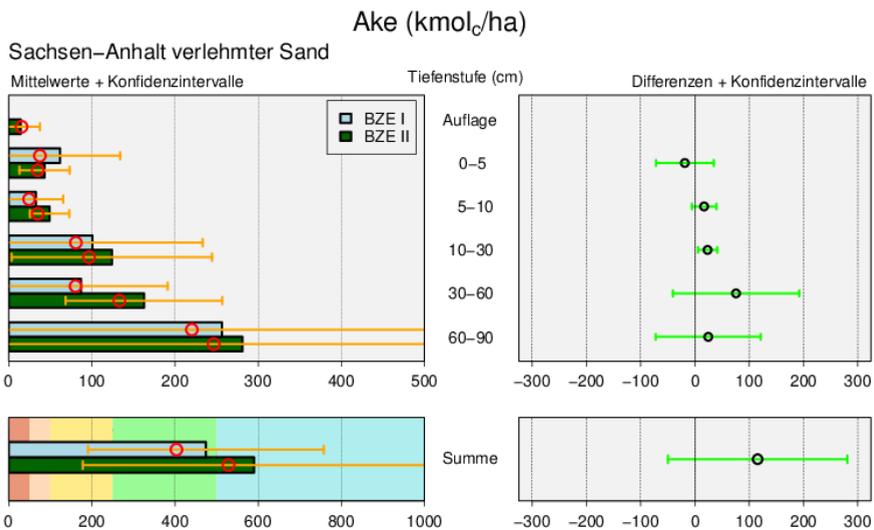


Abbildung 43: Austauschkapazität (Ake) [kmol_e/ha] der Substratgruppe verlehmtte Sande in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ($n = 4$) und II ($n = 4$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 4$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.1.1.4 Lösslehm

Mit 1.180 kmol_c/ha mittlerer Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe Lösslehm schon im hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität (s. Abb. 44). Lösslehm-Standorte verfügen im Mittel über eine mehr als vierfach so hohe Austauschkapazität wie ein durchschnittlicher Standort auf unverlehmten Sand.

Die Spanne der vorkommenden Austauschkapazitäten ist bezogen auf die Profilsummenebene hoch: Der BZE-Punkt mit dem geringsten Wert liegt mit 319 kmol_c/ha im Ostharz, der höchste mit 1.616 kmol_c/ha bei Lutherstadt Eisleben mit freiem Kalk im Unterboden. Signifikante Veränderungen zwischen den beiden BZE-Erhebungen traten bei der Austauschkapazität nicht auf.

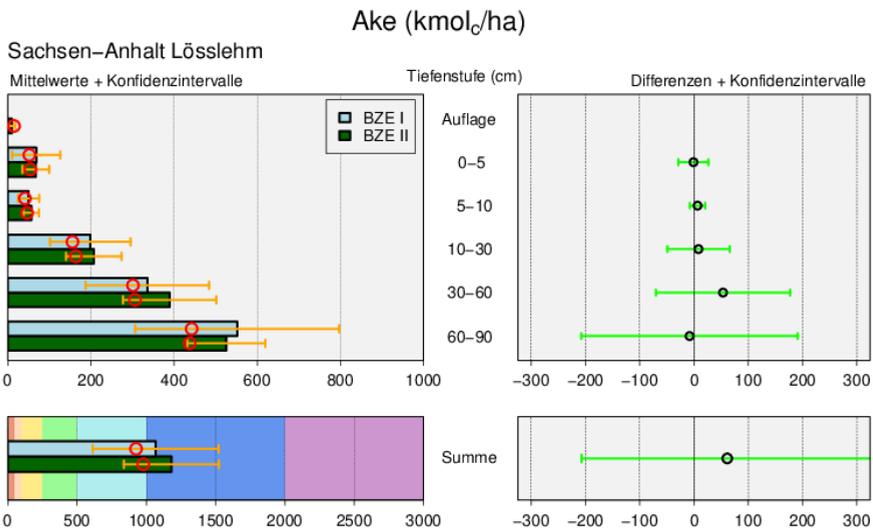


Abbildung 44: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Lösslehm in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ($n = 8$) und II ($n = 8$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 8$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.1.1.5 Tonschiefer

Die mittlere Austauschkapazität der Standorte des Tonschiefers liegt für die BZE II in Sachsen-Anhalt auf Profilebene bei 493 kmol_c/ha . Bei der BZE I waren es 539 kmol_c/ha (s. Abb. 71, Teilgrafik c). Der Tonschiefer liegt damit auf Profilebene im mittleren bis mittel-hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität. Signifikante Veränderungen zur BZE I traten nicht auf.

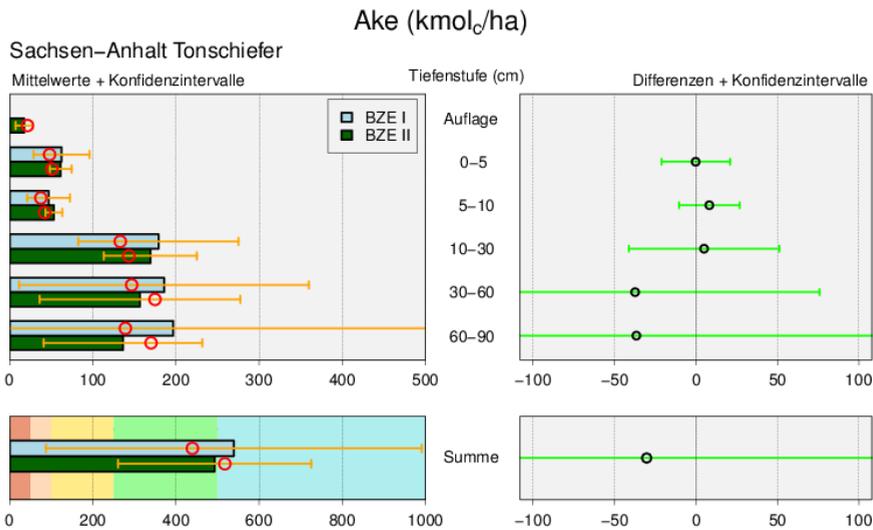


Abbildung 45: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Tonschiefer in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ($n = 6$) und II ($n = 7$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 6$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.1.2 Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität

An der mittleren prozentualen Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität in Abbildung 46 ist erkennbar, dass Aluminium mit Anteilen zwischen 49 und 64 % im Gesamtkollektiv der BZE I in jeder Bodentiefe das bestimmende Kation war (gelbe Balken, linke Grafik). Die Protonen (H) belegen Anteile von 1 bis 15 %. Eisen und Mangan als weitere Kationensäuren nehmen nur sehr geringe Anteile unter 1 % ein. Das häufigste basisch wirkende Kation ist Calcium mit Anteilen an der Austauschkapazität zwischen 21 und 31 %. Deutlich geringere Anteile haben Magnesium (3–6 %) und Kalium sowie Natrium mit Anteilen bis zu 3 %. Die relativ hohen Anteile an basisch wirkenden Kationen im obersten Mineralboden (0–5 cm) können mit Stoffeinträgen wie basischen Stäuben, Kalkungsmaßnahmen, dem Gehalt an organischer Substanz und einer damit verbundenen „Maskierung“ von Al-Kationen sowie der Aufnahme basisch wirkender Kationen aus tieferen Bodenschichten und durch Abgabe über den Streufall erklärt werden, der sogenannten „Basenpumpe“. Die Anteile basischer Kationen fallen bis 30 cm Bodentiefe ab, nehmen darunter aber mit zunehmender Bodentiefe wieder zu und erreichen mit 43 % höhere Anteile als in 0–5 cm (34 %). Im Unterboden bestimmen vor allem die BZE-Punkte im Bergland mit höheren Anteilen von noch relativ wenig verwittertem Material mit hoher Basensättigung, relativ hoher Pufferkapazität und geringer Versauerung die chemischen Bodeneigenschaften.

Im Zeitvergleich (BZE I zu BZE II) zeigt sich im oberen Mineralboden nur eine geringe Veränderung der prozentualen Anteile der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium. Ab 30 cm Bodentiefe verringern sich die Anteile der basischen Kationen insgesamt jeweils um 7 %-Punkte in 30–60 und 60–90 cm Bodentiefe. Entsprechend erhöhten sich die Anteile von Aluminium bis auf 70 % in 30–60 cm in der BZE II.

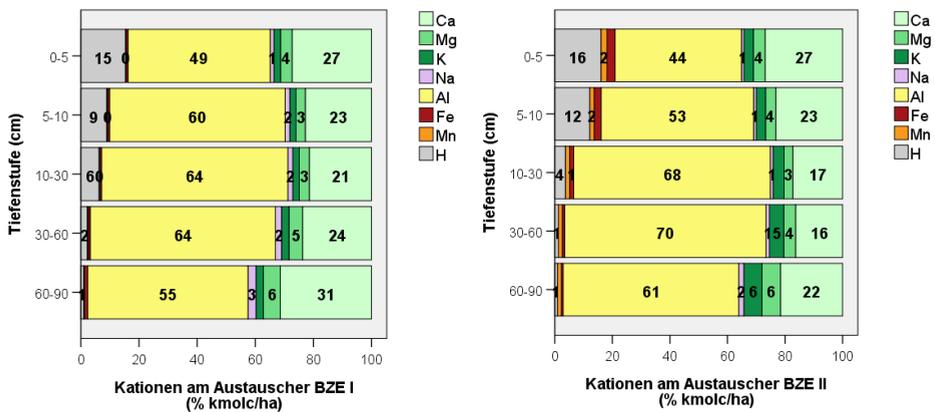


Abbildung 46: Mittlere prozentuale Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität (Ake) der BZE I- (linke Spalte) und BZE II-Punkte (rechte Spalte) in Sachsen-Anhalt

6.5.2 Basensättigung

Die Basensättigung ist ein zentraler Indikator für die Güte des chemischen Bodenzustandes. Sie kennzeichnet die Verfügbarkeit austauschbar gebundener Nährstoffe im Mineralboden und damit wesentlich die Ernährungsbedingungen von Waldbäumen. Die Basensättigung drückt aus, wie hoch der relative Anteil der basischen Nährstoffkationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Vergleich zur Summe aller Kationen ist, die an negativ geladenen Tonmineralen sowie organischer Substanz im Boden gebunden sind. Im Zuge fortschreitender Bodenversauerung werden die an der Pufferung beteiligten basischen Kationen (Mb-Kationen) Calcium, Magnesium und Kalium vom Austauscher durch die sauren Kationen Aluminium, Eisen, Mangan und Wasserstoff-Ionen (Ma-Kationen) verdrängt. Ein starkes Absinken der Basensättigung im Mineralboden ist eine Folge luftbürtiger versauernd wirkender Stoffeinträge.

Eine Basensättigung unter 20 % wird als gering, unter 7 % als sehr gering eingestuft. Diese Werte werden in den am stärksten versauerten Waldböden erreicht. Für Böden mittlerer Nährstoffversorgung ist eine Basensättigung von 30 bis 50 % definiert und bei gut nährstoffversorgten Standorten erreicht die Basensättigung Werte über 50 % (s. Tab. 11, S. 148).

Basensättigungen unter 20 % zeigen an, dass diese Standorte nicht mehr über das Potenzial an austauschbaren Nährstoffen verfügen, welches grundsätzlich bei gegebener Austauschkapazität an vergleichbaren, unbelasteten Waldstandorten zur Verfügung stand. In diesem Milieu wird der Austauscher und die Bodenlösung durch das Kation Aluminium geprägt. Calcium, Magnesium und Kalium liegen in vergleichsweise geringen Anteilen vor. Für Baumwurzeln kann es schwierig werden, unter diesen Bedingungen ausreichend Nährelemente mit den Wurzeln aufzunehmen. Aluminium kann in der Bodenlösung in höheren Konzentrationen zudem toxisch gegenüber Pflanzenwurzeln wirken. Die Bodenlösung ist relativ sauer, Schwermetalle werden gelöst und die Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium mit dem Sickerwasser ausgetragen. Sie gehen damit dem Ökosystem verloren. Allgemein wird dies als ein Zustand angesehen, in dem ein Waldboden wenig elastisch auf weitere Säureinträge reagieren kann, er in seiner Produktivität eingeschränkt und im Hinblick auf Elemententzüge durch intensive Holznutzung, wie beispielsweise Vollbaumnutzung, empfindlich ist. In diesen Fällen können Kompensationsmaßnahmen in Form von Waldkalkungen sinnvoll sein.

Im Folgenden sind die durchschnittlichen Werte der Basensättigung nach Tiefenstufen und Profil mit den jeweiligen Veränderungen zur BZE I für Sachsen-Anhalt insgesamt und getrennt nach Substratgruppen aufgeführt. Für den Auflagehumus wird die Basensättigung nicht angegeben, da im Unterschied zum Mineralboden im Auflagehumus aus methodischen Gründen keine Protonenberechnung erfolgt.

Mit 37 % durchschnittlicher Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe liegen die Waldböden in Sachsen-Anhalt sowohl bei der BZE II als auch bei der BZE I im

mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 47, Teilgrafik c). Summiert und gemittelt über diese Bodentiefe hat sich die Basensättigung in Sachsen-Anhalt nicht verändert. Auch im Mittel über die Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt hat sich die Basensättigung auf Profilebene nicht verändert und fällt mit 36 % ebenfalls in den mittleren Bewertungsbereich.

Die höchsten Werte der mittleren Basensättigung nach Tiefenstufen finden sich mit Werten um 40 % in den Tiefenstufen 0–5 und 60–90 cm. Die durchschnittliche Basensättigung der BZE II fällt in den Tiefenstufen 5–10 cm auf 34 % und in 10–30 cm weiter auf 30 %, steigt in 30–60 cm wieder auf 34 % und in 60–90 cm auf 40 % an (s. Abb. 47, Teilgrafik a). In der BZE I waren diese Werte auf Landesebene ähnlich, es gab zur BZE I keine signifikanten Unterschiede, weder im Gesamtprofil noch in einer Tiefenstufe (Teilgrafiken b und d).

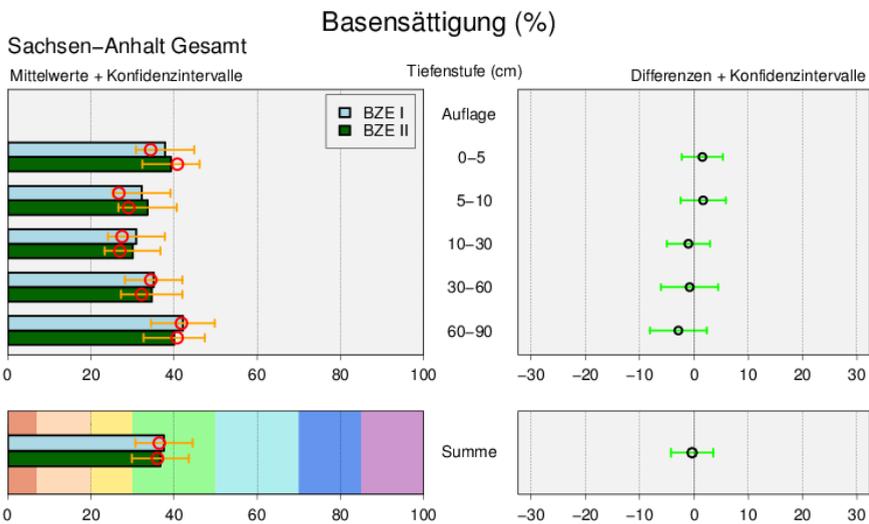


Abbildung 47: Basensättigung [%] in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I, (n = 64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm

Diese Durchschnittswerte bieten nur eine allgemeine Orientierung. Sie hängen stark von der Verteilung der jeweiligen Substrate im Bundesland und der jeweiligen Austauscherbelegung ab. So weisen z. B. die organisch geprägten Standorte (Niedermooere) in Sachsen-Anhalt sehr hohe Werte auf, wogegen die Quarzite, Granite und Grauwachen eher niedrige Basensättigungen haben.

6.5.2.1 Basensättigung nach Substratgruppen

Die Basensättigung in den Mineralböden der wichtigsten Substratgruppen in Sachsen-Anhalts Waldböden zeigt – wie auch in Niedersachsen und Hessen – bei hohen Streuungen in den einzelnen Substratgruppen typische Muster (s. Abb. 48, EVERS et al. 2019, PAAR et al. 2016): Sie liegt im Median mit Werten über das Gesamtprofil im geringen Bewertungsbereich mit 10 % beim Quarzit und Granit, 15 % bei der Grauwacke, 11 % beim Tonschiefer und 17 % beim unverlehmten Sand. Der schwach verlehmt Sand erreicht schon mit 25 % den gering-mittleren Bewertungsbereich. Der verlehmt Sand (54 %) und Lösslehm (65 %) liegt im Median schon im mittel-hohen, die Lehme, Kreidesandsteine, organisch geprägten Standorte und der Zechstein im hohen bis sehr hohen Bewertungsbereich.

Auffällig viele Bewertungsbereiche der durchschnittlichen Basensättigung werden durch BZE-Punkte in den Substratgruppen Lösslehm, verlehmter Sand, Tonschiefer und Lehm abgedeckt. In diesen Substratgruppen ist daher mit einer breiten Spanne an unterschiedlichen Trophiestufen zu rechnen.

Vereinzelte gibt es in einigen Substratgruppen Extreme, die sich z. T. auf Einträge von basischen Stäuben zurückführen lassen. So finden sich in der Substratgruppe unverlehmter Sand z. B. BZE-Punkte mit einer durchschnittlichen Basensättigung von über 60 %, was vermutlich auf diese Einträge zurückgeführt werden kann.

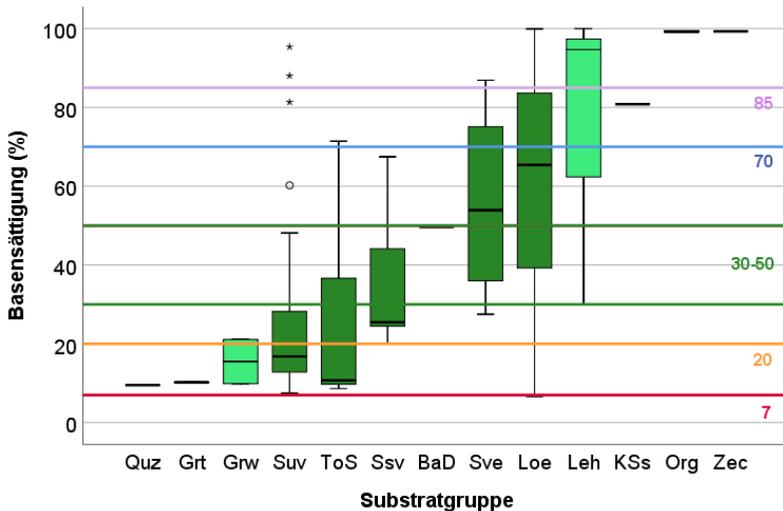


Abbildung 48: Durchschnittliche Basensättigung [%] im Mineralboden bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/ Diabas, Grw: Grauwacke, Grt: Granit, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmt Sand, ToS: Tonschiefer; Zec: Zechstein; Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148; hellgrün: $n \leq 3$, dunkelgrün $n > 3$)

Die Verteilungen der Werte für die Basensättigung in den Bodenschichten 0–30, 30–60 und 60–90 cm (s. Abb. 49) geben noch detailliertere Informationen zu den Substratgruppen: relativ geringe Werte um 20 % Basensättigung kommen durchgängig bis 90 cm Bodentiefe nur in der Substratgruppe unverlehmter Sand vor. Bereits deutlich besser mit Basen ausgestattet ist der schwach verlehmt Sand, vor allem in der Tiefenstufe 60–90 cm mit einem Median im mittleren Bewertungsbereich. Die Standorte der verlehmtten Sande sind noch einmal besser mit Basen versorgt, alle Schichten liegen mit Basensättigungen zumeist über 30 % im mittleren bis mittelhohen Bewertungsbereich. Der Tonschiefer hat im Oberboden bis 30 cm im Vergleich die geringste Basensättigung und liegt hier noch unterhalb der Verteilung des unverlehmten Sandes, die Basensättigungen steigen aber deutlich mit zunehmender Bodentiefe mit Werten über 85 % (Median 67 %) in 60–90 cm an. Hier wird der Einfluss von über die Mineralverwitterung nachgelieferten Basen in unteren Bodenschichten mit höheren Steingehalten erkennbar, vor allem wenn es sich um nährstoffreicheren Tonschiefer handelt. Der Lösslehm weist die höchsten Basenanteile in den Bodenschichten auf, nur der verlehmt Sand hat in 0–30 cm Bodentiefe im Mittel höhere Werte. Wie beim Tonschiefer steigt die Basensättigung mit zunehmender Bodentiefe deutlich. Die häufig beim unverlehmten Sand auftretenden Basensättigungen über 50 % sind auf die Flugascheinträge zurückzuführen.

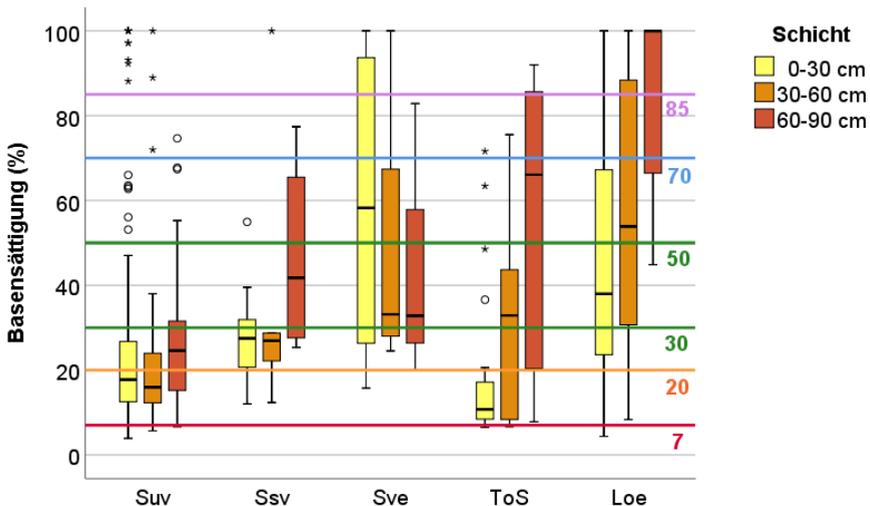


Abbildung 49: Basensättigung [%] im Mineralboden und den Tiefenstufen (0–30, 30–60, 60–90 cm) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148)

6.5.2.1.1 Unverlehmte Sande

Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung hängen bei den Sanden grundsätzlich stark vom Verlehmungsgrad und den Anteilen organischer Substanz ab. Mit 26 % liegen die Werte der durchschnittlichen Basensättigung auf Profilebene in der Substratgruppe unverlehmter Sand bei der BZE II um 11 %-Punkte niedriger als der Durchschnittswert aller BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt. Mit 29 % waren die Werte der durchschnittlichen Basensättigung in der BZE I noch geringfügig höher (s. Abb. 50, Teilgrafik c). Beide Durchschnittswerte fallen in den gering-mittleren Bewertungsbereich. Die höchsten Werte bei der BZE II (31 %) nach Tiefenstufen finden sich in 0–5 cm Bodentiefe. Hier ist der Einfluss organischer Substanz und basischer Staubeinträge am höchsten (s. Abb. 50, Teilgrafik a). Mit zunehmender Bodentiefe sinken die Werte ab und liegen zwischen 23 und 27 %. In 60–90 cm Bodentiefe steigen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung in der BZE II leicht auf 27 %. In der BZE I lag die Basensättigung hier noch bei 32 %.

Im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt weisen die unverlehmten Sande in Sachsen-Anhalt über alle Tiefenstufen hinweg bei vergleichbarer Austauschkapazität deutlich höhere Basensättigungen auf.

Signifikante Veränderungen der Basensättigung traten bei den unverlehmten Sanden nicht auf.

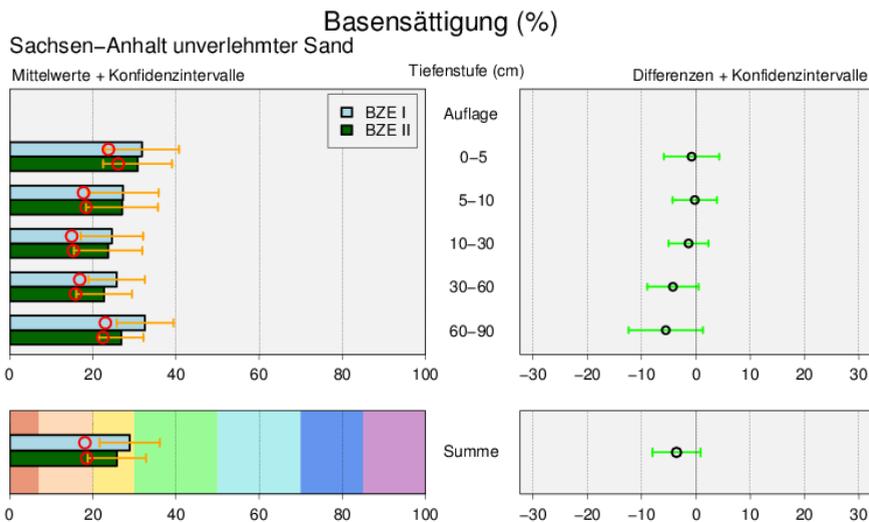


Abbildung 50: Basensättigung [%] der Substratgruppe unverlehmter Sand in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ($n = 33$) und II ($n = 39$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 31$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.2.1.2 Schwach verlehmt Sande

Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung für die BZE-Punkte in der Substratgruppe schwach verlehmt Sande sind in Abbildung 51 dargestellt. Im Mittel liegen die schwach verlehmt Sande mit durchschnittlich 36 % Basensättigung in der BZE II im mittleren Bewertungsbereich und damit deutlich höher als die unverlehmt Sande (26 %, BZE II), aber geringer als die verlehmt Sande (56 %, BZE II) in Sachsen-Anhalt.

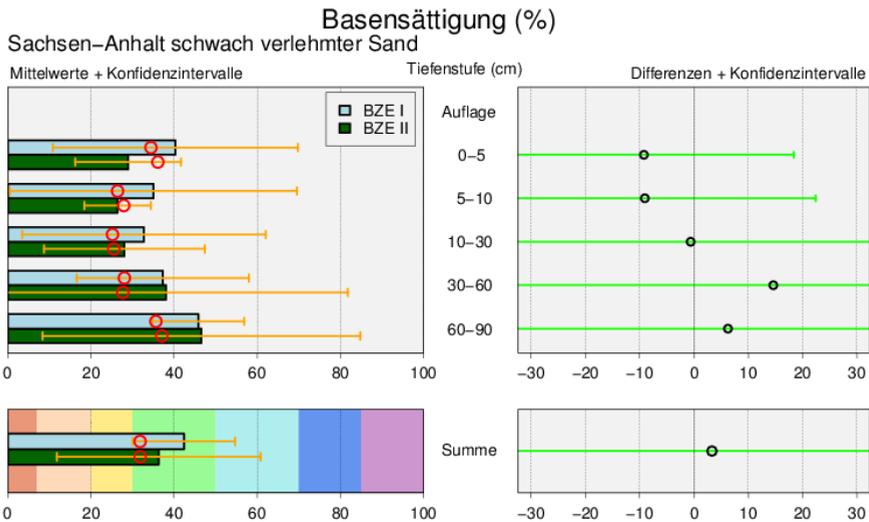


Abbildung 51: Basensättigung [%] der Substratgruppe schwach verlehmt Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 3) und II (n = 5) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 3) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.2.1.3 Verlehmte Sande

Mit durchschnittlich 56 % Basensättigung auf Profilebene liegen die verlehmten Sande über den schwach verlehmten Sanden und dem Mittel Sachsen-Anhalts (37 %) insgesamt (s. Abb. 52). Das Mittel liegt im mittel-hohen Bewertungsbereich. Im Vergleich zur BZE I ist der Mittelwert um 5 %-Punkte gesunken. Signifikante Unterschiede zur BZE I traten weder auf Profil- noch auf Tiefenstufenebene auf.

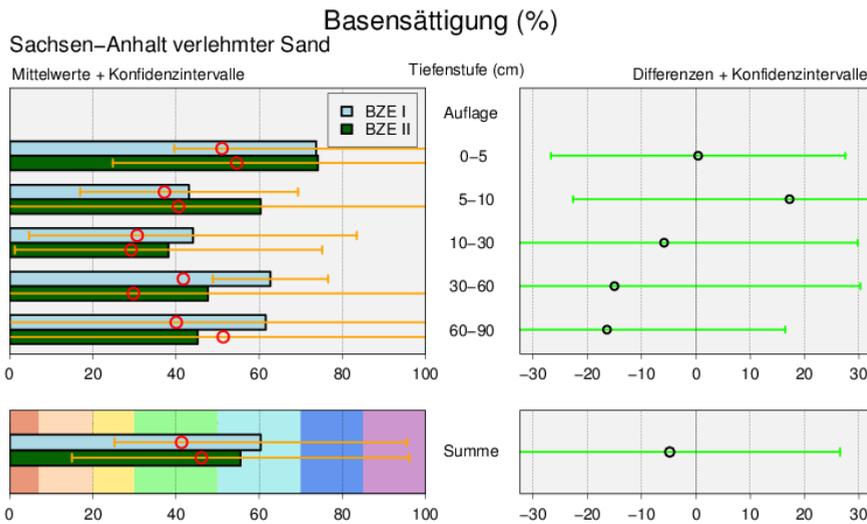


Abbildung 52: Basensättigung [%] der Substratgruppe verlehmte Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ($n = 4$) und II ($n = 4$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 4$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.2.1.4 Lösslehm

Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung an den BZE II-Punkten der Substratgruppe Lösslehm bei 60 % und fällt damit in den mittel-hohen Bewertungsbereich (s. Abb. 53). Die Basensättigung hat seit der BZE I im Mittel auf Profilebene um knapp 6 %-Punkte zugenommen. Dieser Unterschied lässt sich jedoch nicht absichern (s. Abb. 53, Teilgrafik c und d). Mit Ausnahme der Tiefenstufe 10–30 cm Bodentiefe kam es zu leichten Zunahmen, die für 60–90 cm mit +14 % auch signifikant ist. Die durchschnittlichen Basensättigungen beim Lösslehm in den Waldböden Sachsen-Anhalts liegen in allen Tiefenstufen deutlich über dem Mittel der drei Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt.

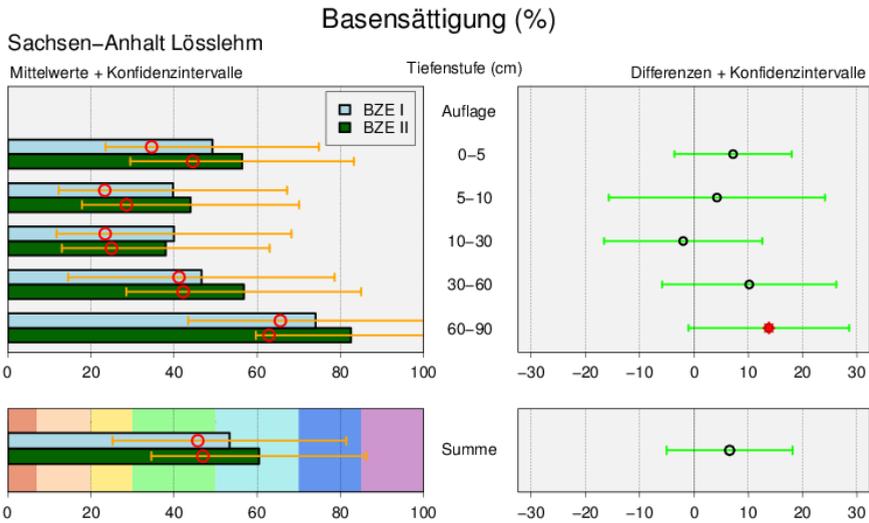


Abbildung 53: Basensättigung [%] der Substratgruppe Lösslehm in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ($n = 8$) und II ($n = 8$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 8$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.2.1.5 Tonschiefer

Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung bei den BZE-Punkten der Substratgruppe Tonschiefer bei der BZE II bei 26 % und fällt damit in den gering-mittleren Bewertungsbereich. Im Mittel der BZE I lagen diese Standorte mit einer durchschnittlichen Basensättigung von 32 % noch im mittleren Bewertungsbereich. Es ergaben sich weder auf Profilebene noch Tiefenstufenebene signifikante Unterschiede zur BZE I.

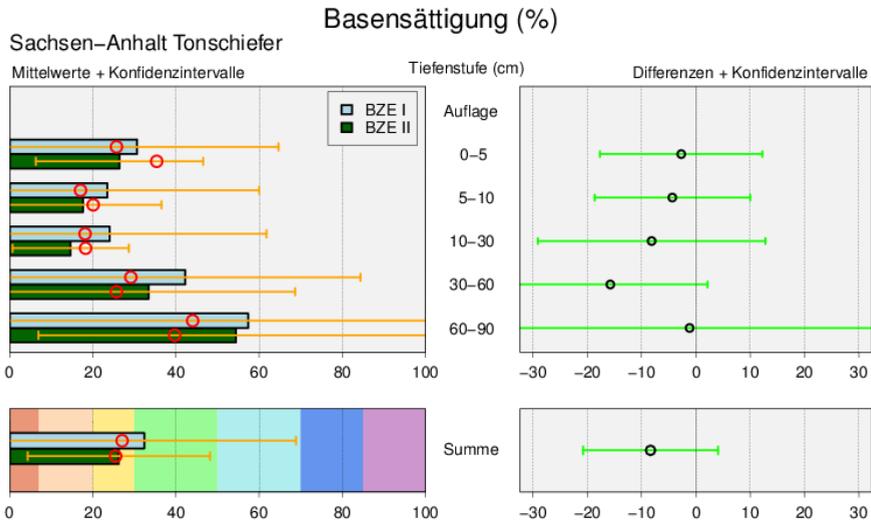


Abbildung 54: Basensättigung [%] der Substratgruppe Tonschiefer in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ($n = 6$) und II ($n = 7$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 6$) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.2.1.6 Basensättigung, Flugasche und Bodenbearbeitung

Für die Substratgruppe unverlehmter Sand ist in der Abb. 55 die Basensättigung in den BZE-Tiefenstufen in den Strata nur Flugascheeinfluss, nur Bodenbearbeitung, sowohl Flugasche als auch Bodenbearbeitung sowie weder Flugasche- noch Bodenbearbeitungseinfluss („keine“) dargestellt.

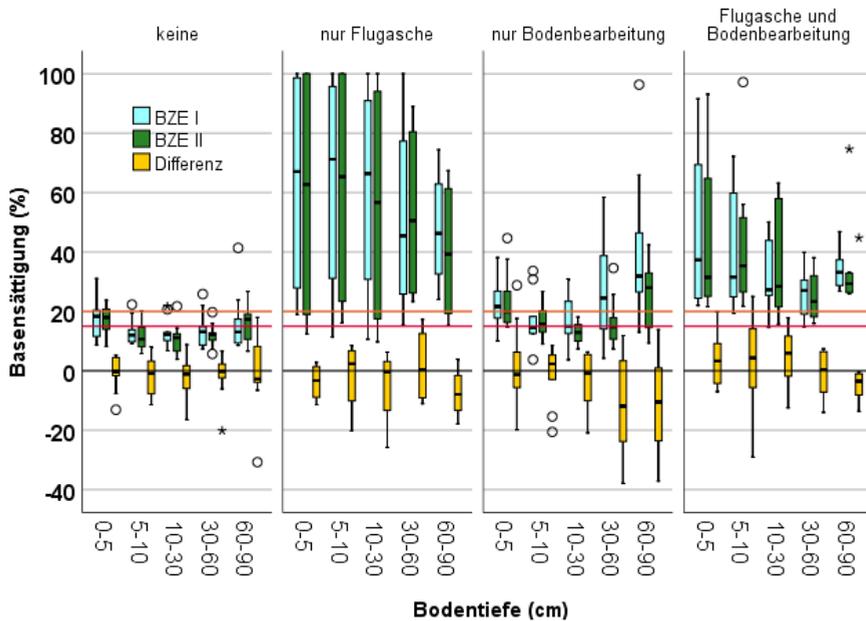


Abbildung 55: Basensättigung [%] der Substratgruppe unverlehmter Sand in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I und II sowie Differenz BZE II - BZE I nach Tiefenstufen in Abhängigkeit von Flugasche (n = 4), Bodenbearbeitung (n = 13), Flugasche und Bodenbearbeitung (n = 8) sowie ohne diese Einflüsse (n = 16), eingezeichnet als Linie 20 % Basensättigung orange und 15 % Basensättigung rot

Im Vergleich der Basensättigung in den Strata wird sehr deutlich, dass Flugasche und Bodenbearbeitung einen erheblichen Einfluss auf die Basensättigung haben, besonders jedoch die Flugasche. Die Werte der Basensättigung liegen im Stratum „nur Flugasche“ in jeder Bodentiefe in mittleren bis hohen Bereichen, besonders im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe werden die höchsten Werte erreicht. Im Stratum „Flugasche und Bodenbearbeitung“ sind die Werte der Basensättigung immer noch höher als im Vergleich zum Stratum „nur Bodenbearbeitung“ und „keine“, wo weder Flugascheeinträge noch Bodenbearbeitungen die Basensättigung beeinflussen. Im letzteren Stratum liegen alle Tiefenstufen unter 20 % Basensättigung (orange Linie), die Tiefenstufen 5–10, 10–30 sowie 30–60 cm sogar unter 15 % (rote Linie). Im Stratum „keine“ streuen die Werte der Basensättigung wenig und sind zwischen der BZE I und BZE II in jeder Tiefenstufe weitgehend gleich geblieben. Im Stratum „nur Bodenbearbeitung“ kam es vor allem in tieferen Bodenschichten zu Abnahmen der Basensättigung.

6.5.3 *Vorräte austauschbarer Calcium-, Magnesium- und Kaliumkationen*

Neben den bodenchemischen Parametern Austauschkapazität und Basensättigung sind die Vorräte der austauschbaren Nährelemente wichtige Indikatoren für die Abschätzung der Nährstoffversorgung der Waldbäume. Die austauschbaren Vorräte dieser Hauptnährelemente sind für die Waldbäume leicht bis mittel verfügbar und bilden die zentrale Versorgungsgrundlage. Die ausreichende Verfügbarkeit dieser Nährelemente in größeren Mengen ist für das Pflanzenwachstum und die Biomassebildung erforderlich. Calcium ist ein wichtiger Baustein für die Zellwände und an zentralen Prozessen, wie z. B. Photosynthese, Atmung und Zellteilung beteiligt. Magnesium spielt als Baustein im Chlorophyll für die Photosynthese eine entscheidende Rolle. Kalium ist für die Osmoregulation in den Zellen notwendig. Alle drei Elemente fördern die Aktivität von Enzymen und steuern die Eiweißsynthese, den Aufbau von Kohlehydraten und die Photosynthese. Die Nährelemente Calcium, Magnesium und vor allem Kalium werden im Zuge der Bodenversauerung durch Aluminium vom Austauscher verdrängt und mit dem Sickerwasser zumeist zusammen mit Sulfat und Nitrat aus dem Hauptwurzelraum ausgewaschen. Neben der Auswaschung und Entzügen mit der Holzernte sind Einträge aus der Luft, Waldkalkungen sowie die Mineralverwitterung bestimmende Größen des Nährstoffhaushalts. Analog zur Austauschkapazität und Basensättigung wurden diese drei Nährelemente für Sachsen-Anhalt übergreifend und nach den Substratgruppen gegliedert ausgewertet. Im vorliegenden Bericht werden nur die wichtigsten Ergebnisse exemplarisch dargestellt.

6.5.3.1 *Calcium*

Calcium hat im Allgemeinen die höchsten Anteile an den basischen Kationen am Austauscher. In Sachsen-Anhalts Waldböden variieren die summierten Vorräte im Wurzelraum bis 90 cm Bodentiefe zusammen mit dem Auflagehumus von 220 kg/ha bis über 55 t/ha. Diese große Spanne ist typisch für das weite Spektrum an Waldstandorten und deckt alle Bewertungsbereiche bis auf den sehr geringen Bewertungsbereich unter 200 kg/ha ab. Im ersten Fall handelt es sich um eine verarmte Braunerde aus Lösslehm mit Tonschiefer und Grauwacke mit Fichte im Ostharz, im zweiten Fall um eine Hochflutablagerung bei Magdeburg mit Stieleiche, Esche, Feldahorn und Pappel. Entsprechend hoch sind auch die Spannen bei den Veränderungen der Vorräte im Vergleich zur BZE I, die räumliche Heterogenität ist teilweise beachtlich. Da der Stichprobenumfang in Sachsen-Anhalt relativ gering ist, können hohe Abweichungen an einem Punkt oder Tiefenstufe zwischen der BZE I und BZE II die rechnerische Differenz auf Landesebene bereits stark beeinflussen. Es wird daher bei den Veränderungen auch der Median genannt, der von hohen Abweichungen weniger beeinflusst wird.

Mit durchschnittlich rund 5.100 kg Calcium je ha (Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe) liegen die sachsen-anhaltischen Waldstandorte im hohen Bewertungsbereich. Zum Zeitpunkt der BZE I lagen die durchschnittlichen Vorräte bei rund 5.660 kg/ha um 11 % höher, der Unterschied zur BZE II ist jedoch nicht signifikant (s. Abb. 56, Teilgrafik c, d).

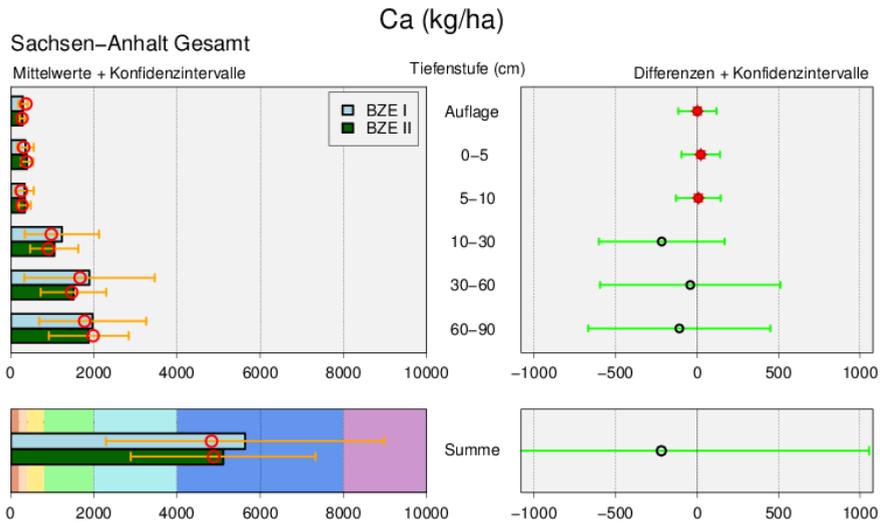


Abbildung 56: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Im Hinblick auf die Veränderungen im Auflagehumus und in den Tiefenstufen zeigen sich eine geringfügige signifikante Zunahme im Auflagehumus und leichte signifikante Zunahmen im Oberboden bis in 10 cm Bodentiefe (+5 % insgesamt bezogen auf die BZE I, s. Abb. 56, Teilgrafik b). Die weiteren Veränderungen im tieferen Mineralboden streuen weit und sind nicht signifikant. Dies liegt vor allem an wenigen Profilen mit sehr hohen und sehr unterschiedlichen Konzentrationen in bestimmten Tiefenstufen zwischen den beiden BZE-Erhebungen. Bei alternativer Betrachtung der Mediane ergibt sich im Auflagehumus und Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe eine Zunahme um 32 % sowie im Mineralboden von 10–90 cm eine Abnahme von 8 % bezogen auf die BZE I, was sich auf Profilebene nahezu ausgleicht (+3 % bezogen auf die BZE I).

Die Calciumvorräte im Auflagehumus und Mineralboden auf Profilebene sind stark von den Substratgruppen abhängig (s. Abb. 57):

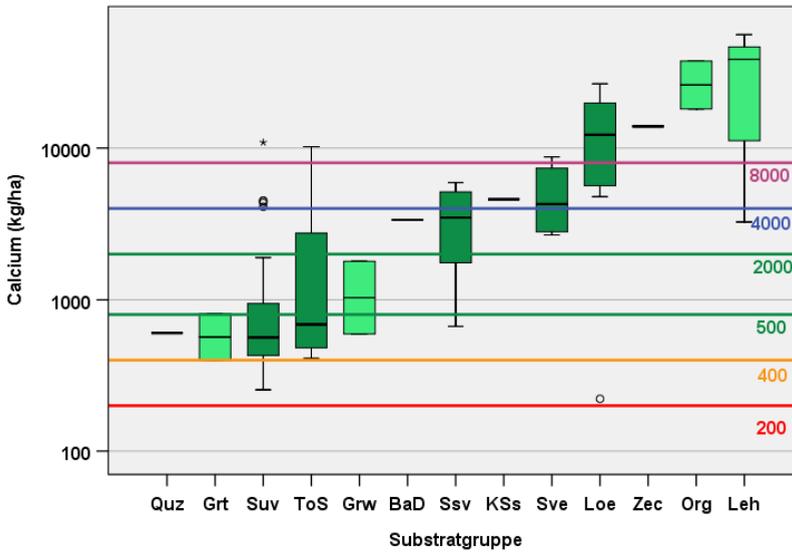


Abbildung 57: Verteilung der austauschbaren Calciumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (Ordinate logarithmisch skaliert) (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; Zec: Zechstein, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148, hellgrün: $n \leq 3$, dunkelgrün $n > 3$)

Die Substratgruppe Quarzit, Granit und überwiegend auch der unverlehmte Sand und Tonschiefer fallen bezüglich der Calciumversorgung in den mittel-geringen Bewertungsbereich. Die Calciumvorräte der BZE-Punkte im Tonschiefer streuen sehr stark, hier kommen auch mit sehr hoch bewertete Calciumvorräte vor. Im mittleren Bewertungsbereich liegen überwiegend die BZE-Punkte der Substratgruppe Grauwacke. Basalt/Diabas und schwach verlehmtter Sand sind mit mittel-hoch bewertet, Kreidesandstein und verlehmtter Sand liegen mit ihrem Schwerpunkt im hohen Bewertungsbereich für Calcium. Lösslehm, Zechstein, organisch geprägte Niedermoor-Standorte und Lehme erreichen Calciumvorräte im sehr hohen Bewertungsbereich über 8.000 kg/ha.

In Abbildung 58 sind die bis 90 cm Bodentiefe summierten Calciumvorräte nach Substratgruppen und Tiefenstufen dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Tiefenstufen 0–5, 5–10 und 10–30 cm zu einer Tiefenstufe zusammengefasst.

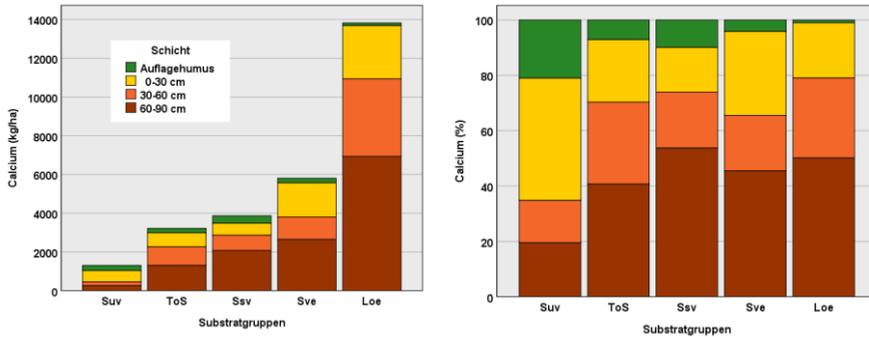


Abbildung 58: Austauschbare Calciumvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen (0–30, 30–60, 60–90 cm) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Die Verteilung der Calciumvorräte in den Tiefenstufen zeigt zwischen den Substratgruppen typische Muster. Bei den Substratgruppen mit eher geringen Vorräten (v. a. unverlehmtter Sand) sind die relativen Anteile an Calcium im Auflagehumus mit Werten bei 20 % am höchsten. Mit zunehmenden Calcium-Gesamtvorräten nehmen die relativen Anteile im Auflagehumus ab, die Substratgruppe Lösslehm weist nur noch 1 %-Anteil Calcium im Auflagehumus am Gesamtvorrat auf. Umgekehrt steigen die relativen Anteile von Calcium in den tieferen Schichten an. Im unverlehmtten Sand sind 19 % der austauschbaren Calciumvorräte in den Tiefenstufen 30–90 cm gespeichert, im Lösslehm sind es 50 %.

Höhere Calciumvorräte bei der BZE II im Vergleich zur BZE I traten auf Gesamtprofilebene beim Lösslehm (+27 %) und den schwach verlehmtten Sanden (+8 %) auf, geringere beim Tonschiefer (-46 %), verlehmtten Sand (-3 %) und unverlehmtten Sand (-12 %). Diese Unterschiede waren jedoch auf Gesamtprofilebene in keinem Fall signifikant und wurden nicht dargestellt.

Signifikante Unterschiede bei den Calciumvorräten gab es im Auflagehumus und Tiefenstufen bei der Substratgruppe unverlehmtter Sand (s. Abb. 59), die sich auf Profilebene jedoch ausgleichen.

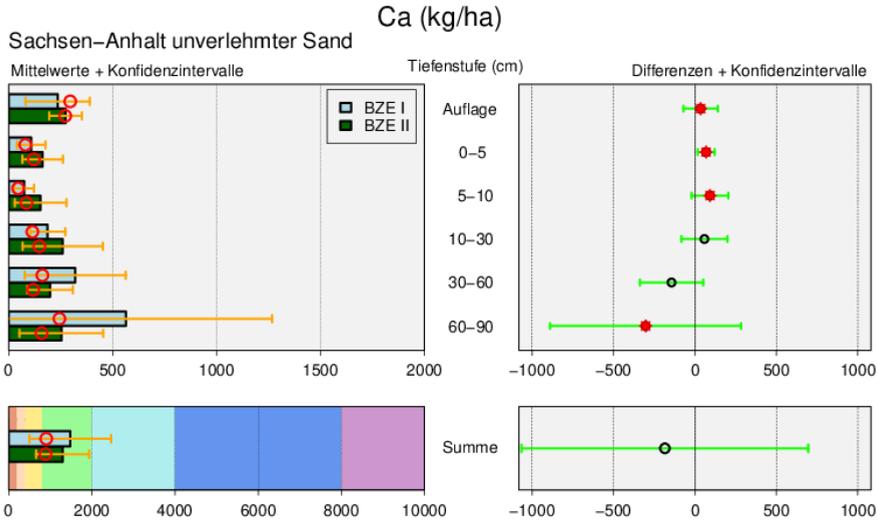


Abbildung 59: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 33$) und II ($n = 39$) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I ($n = 30$) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Bezogen auf die Calciumvorräte der BZE I nahm Calcium im Auflagehumus um 15 %, in den Tiefenstufen 0–5 cm um 63 %, 5–10 cm um 124 % und 10–30 cm um 31 % zu, in den Tiefenstufen 30–60 cm um 45 % und 60–90 cm um 53 % ab. Mit Ausnahme der Tiefenstufen 10–30 cm und 30–60 cm konnten die Unterschiede signifikant abgesichert werden. Demnach stehen im Oberboden bis 30 cm Calciumzunahmen von insgesamt 254 kg/ha Verlusten ab 30 cm Bodentiefe von rund 450 kg/ha Calcium gegenüber. Der Saldo von rund 180 kg/ha Calcium bedeutet bezogen auf das Gesamtprofil der BZE I einen Verlust von 12 %, der nicht signifikant ist. Der Median auf Profilebene liegt bei -7 kg/ha Calcium und bestätigt weitgehend ähnliche Calciumvorräte auf Profilebene zwischen den Erhebungen.

Die Flugascheeinträge in Sachsen-Anhalt beeinflussen die Verteilung der Calciumvorräte erheblich. Dies wird bei der Unterteilung nach Flugascheneinfluss der BZE-Punkte in der Substratgruppe unverlehmter Sand deutlich (Abb. 60).

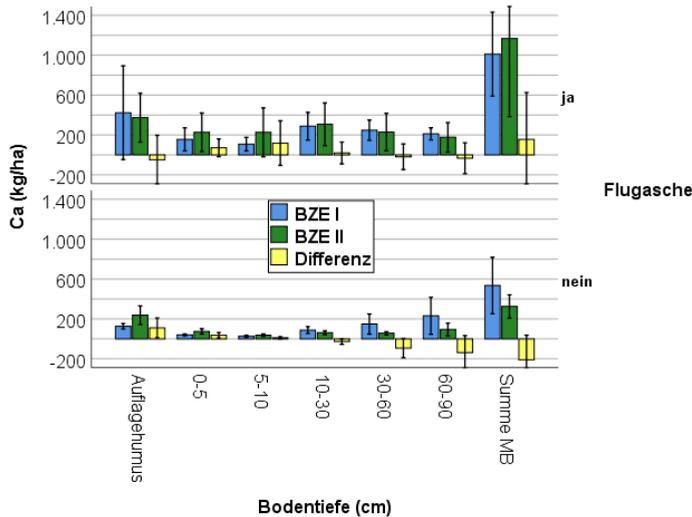


Abbildung 60: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für Flugasche beeinflusste BZE-Punkte (oben, $n = 11$) und unbeeinflusste (unten, $n = 19$), jeweils als Mittelwert für die BZE I, BZE II und Differenz (ohne 2 Extreme)

Auffällig sind die deutlich höheren Calciumvorräte sowohl in der BZE I und BZE II der Flugasche beeinflussten Standorte, vor allem im Auflagehumus und den Tiefenstufen bis 60 cm Bodentiefe. Auf Profilebene erreichen die Flugasche-Standorte mehr als doppelt so hohe Calciumvorräte. Bei den Flugasche-Standorten kommt es in der Tendenz im Auflagehumus zu Calciumverlusten, im oberen Mineralboden zu Zunahmen und leichten Verlusten im Unterboden ab 30 cm Bodentiefe. Bei den von Flugasche unbeeinflussten Standorten zeigen sich dagegen signifikante Zunahmen im Auflagehumus, 0–5 und 5–10 cm Bodentiefe sowie deutliche Abnahmen im Unterboden, signifikant für 60–90 cm Bodentiefe. Die Veränderungen auf Profilebene waren weder in der von Flugasche beeinflussten noch unbeeinflussten Kollektiv signifikant.

6.5.3.2 Magnesium

Magnesium hat im Vergleich zu Calcium deutlich geringere Anteile an den basischen austauschbaren Kationen. So belegt Calcium in Abhängigkeit der Tiefenstufe im Mittel Sachsen-Anhalts 16–27 % der Austauschkapazität, Magnesium dagegen zwischen 3–6 % (vgl. Kap. 6.5.1.2). In Sachsen-Anhalts Waldböden variieren die bis 90 cm Bodentiefe aufsummierten Vorräte von 30 kg bis 7 t/ha. Diese Spanne deckt alle Bewertungsbereiche ab. Die geringsten Magnesiumvorräte finden sich in einer Braunerde in der Substratgruppe unverlehmter Sand bei Tangerhütte östlich der

Colbitz-Letzlinger Heide, die höchsten in der Hochflutablagerung bei Magdeburg, die auch die höchsten Calciumvorräte und höchste Austauschkapazität aufweist.

In Abbildung 61 sind die durchschnittlichen austauschbaren Magnesiumvorräte für Sachsen-Anhalt dargestellt.

Mit rund 590 kg/ha Magnesium in der Humusaufgabe und dem Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe liegen die durchschnittlichen Vorräte in Sachsen-Anhalts Waldböden im mittel-hohen Bewertungsbereich und sind damit deutlich geringer als das Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Hessen (s. Abb. 61, Teilgrafik c). Vor allem in den Bodentiefen ab 30 cm ist der Mittelwert in Sachsen-Anhalt deutlich niedriger als der Drei-Länder-Mittelwert. Dies liegt an den hohen Magnesiumvorräten in Hessens Waldböden, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt sind hinsichtlich der Verteilung Magnesiumvorräte sehr ähnlich.

Insgesamt gab es zwischen beiden BZE-Erhebungen auf Profilebene eine leichte signifikante Zunahme um 5 kg/ha, was bezogen auf den Vorrat der BZE I einer Zunahme von 1 % entspricht. Der Median der Veränderungen lag bei 29 kg/ha deutlich höher, bezogen auf den Median der BZE I entspricht dies einer Zunahme um 18 %. Im Auflagehumus sind zum Zeitpunkt der BZE II mit 44 kg/ha Magnesium rund 8 % des Gesamtvorrates bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Die Magnesiumvorräte im Auflagehumus haben zwischen den beiden BZE-Erhebungen im Mittel für Sachsen-Anhalt um 7 % signifikant zugenommen. Dies ist vor allem auf die Zunahme der Trockenmasse zurückzuführen. Im Oberboden wurden ebenfalls signifikant höhere Vorräte in den Tiefenstufen 0–5 cm (+16 %) und 5–10 cm (+19 %) festgestellt. In 10–30 und 30–60 cm Bodentiefe gab es nur geringfügige, nicht signifikante Veränderungen unter 2 %, in 60–90 cm Bodentiefe nahmen die Magnesiumvorräte signifikant um 2 % bezogen auf den Vorrat der BZE I ab.

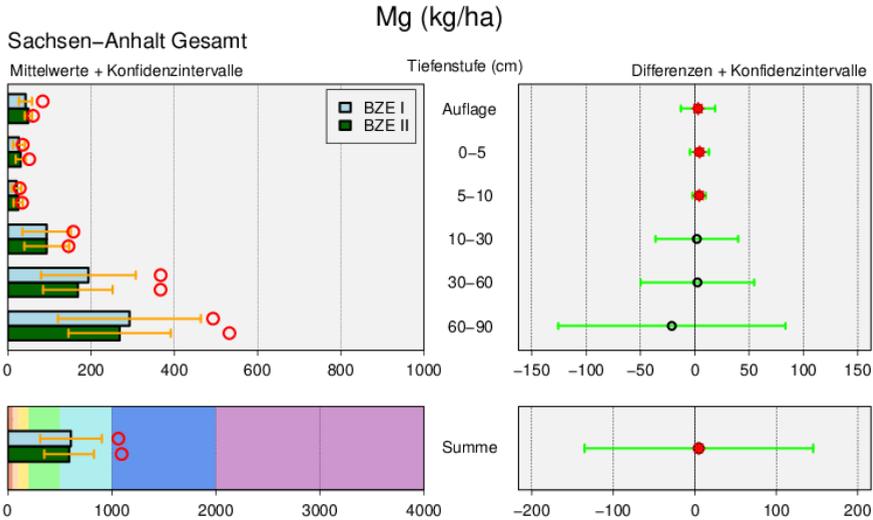


Abbildung 61: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die Magnesiumvorräte zeigen – ähnlich wie die Calciumvorräte – deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von den Substratgruppen:

Die Quarzite, Granite und unverlehmten Sande entfallen mit mittleren 100 kg/ha Magnesiumvorrat im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm in den geringen Bewertungsbereich, wobei einige BZE-Punkte im unverlehmten Sand auch in höheren Bewertungsbereichen liegen. (s. Abb. 62). Deutlich besser sind die Grauwacken und Kreidesandsteine im unteren mittleren Bereich sowie der Tonschiefer und die (schwach) verlehmtten Sande überwiegend im mittleren Bewertungsbereich zwischen 200–500 kg/ha zu bewerten. Die organisch geprägten Standorte und Basalt/Diabas weisen Magnesiumvorräte im mittel-hohen, der Lösslehm, Zechstein und Lehm im hohen bis sehr hohen Bewertungsbereich über 1000 kg/ha Magnesium auf.

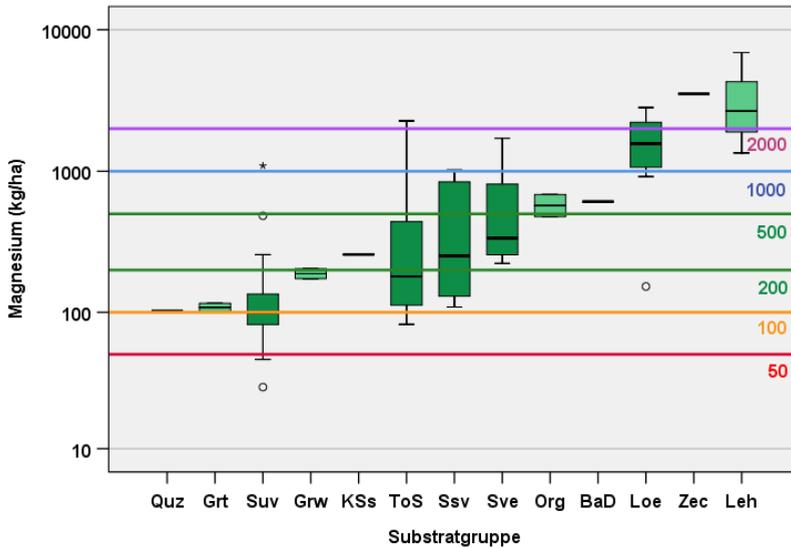


Abbildung 62: Verteilung der austauschbaren Magnesiumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (Ordinate logarithmisch skaliert) (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; Zec: Zechstein, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148, hellgrün: $n \leq 3$, dunkelgrün $n > 3$)

Ähnlich der Verteilung der Calciumvorräte weisen auch die Magnesiumvorräte auf den eher ärmeren Standorten die höchsten Anteile von Magnesium im Auflagehumus auf (s. Abb. 63). Dies betrifft besonders auf die unverlehmtten Sande zu, hier sind 26 % des Magnesiums im Auflagehumus gespeichert. In der Substratgruppe Lösslehm dagegen sind es nur 2 % des Magnesiumvorrats vom Gesamtprofil im Auflagehumus enthalten. Die relativen Anteile des Magnesiumvorrats in den Tiefenstufen 30–90 cm liegen zwischen 50 bis über 80 %, der überwiegende Teil ist in der Tiefenstufe 60–90 cm gespeichert (30–66 %) und damit deutlich stärker als Calcium auf untere Bodenschichten konzentriert.

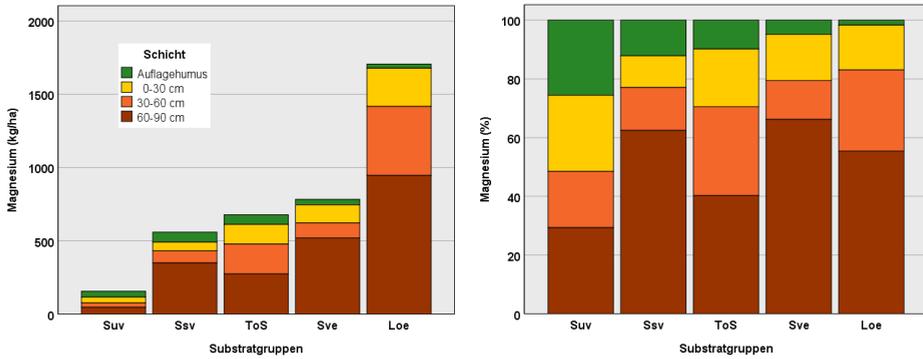


Abbildung 63: Austauschbare Magnesiumvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen (0–30, 30–60, 60–90 cm) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Höhere Magnesiumvorräte bei der BZE II im Vergleich zur BZE I traten auf Gesamtprofilebene beim Lösslehm (+24 %) und verlehmtten Sanden (+5 %) auf, geringere beim Tonschiefer (-15 %), schwach verlehmtten (-10 %) und unverlehmtten Sand (-32 %). Diese Unterschiede waren auf Gesamtprofilebene nur für den unverlehmtten Sand signifikant.

Signifikante Unterschiede im Auflagehumus und den Tiefenstufen bei den Magnesiumvorräten gab es nur bei der Substratgruppe unverlehmtter Sand (s. Abb. 64).

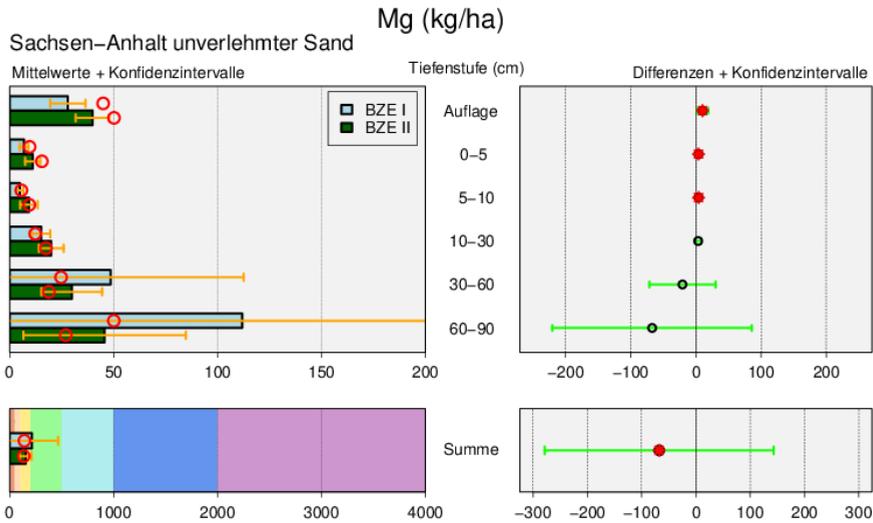


Abbildung 64: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 33$) und II ($n = 39$) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I ($n = 30$) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Im unverlehmten Sand kam es zu signifikanten Zunahmen im Auflagehumus (+36 % bezogen auf die BZE I) sowie den Tiefenstufen 0–5 (+57 %) und 5–10 cm (+82 %). Diesen relativ hohen Zunahmen im Oberboden stehen nicht signifikante und hohe Verluste in den Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm gegenüber. Damit ergibt sich ein auf Profilebene signifikanter Verlust von Magnesium von 32 % bezogen auf die BZE I. Der Median der Veränderungen auf Profilebene liegt dagegen mit 29 kg/ha Magnesium bei einer Zunahme um 38 % bezogen auf den Median der BZE I. Der Median wird als realistischere Einschätzung der Veränderung eingestuft, da extreme Magnesiumverluste einzelner BZE-Punkte den Durchschnitt deutlich vermindern.

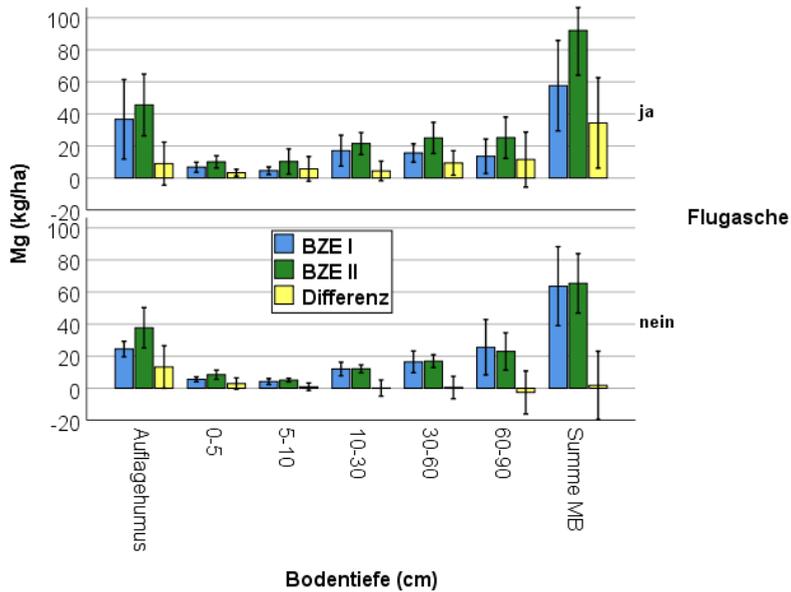


Abbildung 65: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für Flugasche beeinflusste BZE-Punkte (oben, n = 11) und unbeeinflusste (unten, n = 19), jeweils als Mittelwert für die BZE I, BZE II und Differenz (ohne 2 Extreme)

Auffällig sind analog zu Calcium die deutlich höheren Magnesiumvorräte sowohl in der BZE I und BZE II der Flugasche beeinflussten Standorte in der Substratgruppe unverlehmter Sand. Auf Profilebene erreichen die Flugasche-Standorte um 30 % höhere Magnesiumvorräte als die nicht von Flugasche beeinflussten Standorte. Bei den Flugasche-Standorten kommt es im Auflagehumus und allen Tiefenstufen von der BZE I zur BZE II zu höheren Magnesiumvorräten, die im Mineralboden signifikant sind. Die Zunahmen steigen mit zunehmender Bodentiefe und summieren sich auf Profilebene auf eine signifikante Zunahme von 46 % bezogen auf die Profilsomme der BZE I. Im nicht von Flugasche beeinflussten Kollektiv des unverlehmten Sandes kommt es im Auflagehumus ebenfalls zu deutlichen Zunahmen, die im Unterschied zum Flugasche-Kollektiv signifikant sind. Die Veränderungen im Mineralboden sind deutlich geringer und in keinem Fall signifikant. Auf Profilebene ergibt sich auch im nicht von Flugasche beeinflussten Kollektiv eine Zunahme von Magnesium von +17 % bezogen auf die BZE I, die aber ebenfalls nicht signifikant ist.

6.5.3.3 Kalium

Bei Kalium decken die an den BZE-Punkten im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe vorkommenden Vorräte fast das gesamte Spektrum der Bewertungsskala ab. Die Spanne reicht von 120 kg/ha Kalium eines Rankers aus Quarzit im Harz bei Ilsenburg bis 2.880 kg/ha einer Hochflutablagerung bei Magdeburg, die auch schon mit den höchsten Vorräten an Calcium und Magnesium sowie der höchsten Austauschkapazität aufgefallen ist.

Die mittleren Kaliumvorräte und Veränderungen zwischen BZE I und II für Sachsen-Anhalt sind nach Tiefenstufen in Abbildung 66 dargestellt.

Mit 470 kg/ha Kalium bei der BZE I und 756 kg/ha bei der BZE II sind die mittleren Vorräte an Kalium im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe vom gering-mittleren in den mittleren Bewertungsbereich gestiegen. Die Differenz in der Schnittmenge von 266 kg ist signifikant und rechnerisch eine ungewöhnliche Erhöhung des austauschbaren Kaliumvorrates um 54 % bezogen auf die Werte der BZE I (s. Abb. 66, Teilgrafik d).

In der BZE II sind im Auflagehumus mit 65 kg/ha Kalium knapp 9 % des Gesamtvorrates gespeichert. Bezogen auf gleiche Schichtmächtigkeit verteilen sich die Vorräte im Mineralboden im Unterschied zu Calcium und Magnesium relativ gleichmäßig über alle Bodentiefen hinweg (s. Abb. 66, Teilgrafik a).

In allen Tiefenstufen und im Auflagehumus kam es zu signifikanten Zunahmen der Kaliumvorräte von der BZE I zur BZE II. Die Zunahmen im Auflagehumus mit 36 % und 24 % in der Tiefenstufe 0–5 cm bezogen auf die BZE I stehen deutlich hinter den Zunahmen der Tiefenstufe 5–10 cm mit fast 80 % und den tieferen Stufen mit Werten zwischen 56–68 % zurück, sie sind aber alle auffällig hoch.

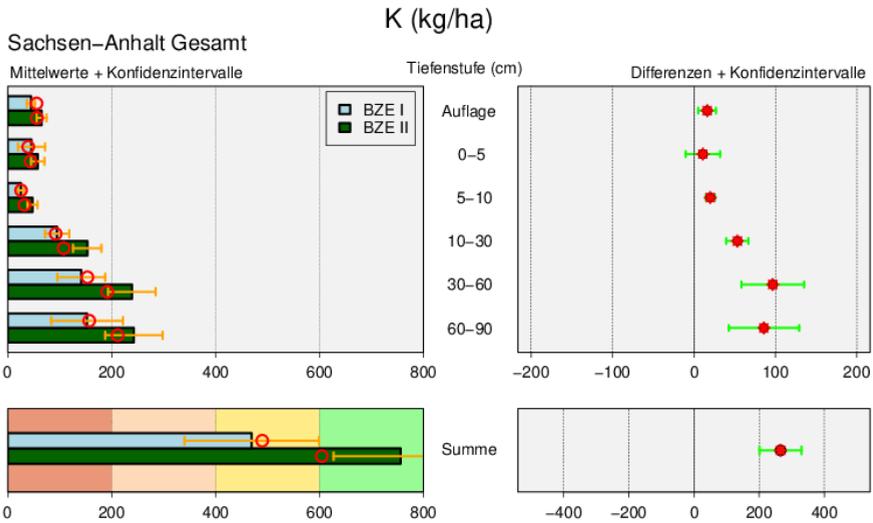


Abbildung 66: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Im Unterschied zu den Calcium- und Magnesiumvorräten liegen die Kaliumvorräte der BZE II in den Substratgruppen deutlich häufiger in den sehr geringen und geringen Bewertungsstufen (s. Abb. 67). Sehr geringe (unter 200 kg/ha) bis geringe Vorräte (zwischen 200–400 kg/ha) Kalium treten beim Quarzit, organisch geprägten Standorten, Basalt/Diabas, Granit und Kreidesandstein auf. Im Median gering-mittlere Vorräte weisen Grauwacke und unverlehmte Sande auf; Tonschiefer, verlehmtter Sand und schwach verlehmtter Sand liegen mit ihren Medianen bereits im mittleren und mittel-hohen Bereich. Zechstein, Lösslehm und Lehm weisen hohe bis sogar sehr hohe Kaliumvorräte auf.

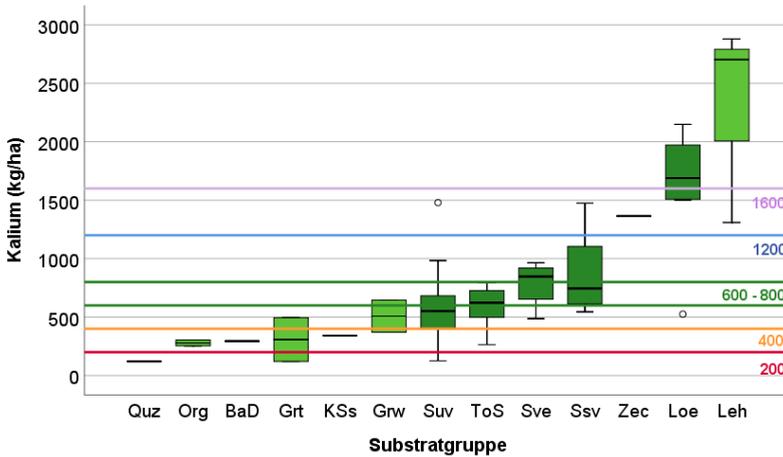


Abbildung 67: Verteilung der austauschbaren Kaliumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Granwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; Zec: Zechstein, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148, hellgrün: $n \leq 3$, dunkelgrün: $n > 3$)

Ähnlich wie Calcium und Magnesium liegt austauschbares Kalium auf den ärmeren Standorten der schwach- und unverlehmtten Sande und des Tonschiefers mit höheren Anteilen um 10 % im Auflagehumus vor, bei den besser versorgten Standorten der verlehmtten Sande und des Lösslehm betragen diese Anteile nur 6 bzw. 3 % (s. Abb. 68). Beim unverlehmtten und verlehmtten Sand sowie bei Lösslehm sind die Kaliumvorräte im Mineralboden annähernd gleich verteilt. Im Tonschiefer nehmen die relativen Anteile mit zunehmender Bodentiefe aufgrund des Skelettanteils ab, beim verlehmtten Sand aufgrund der höheren Lehmenteile zu. Im Unterschied zu Calcium und Magnesium sind im Mittel die relativen Kaliumvorräte im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe wesentlich höher.

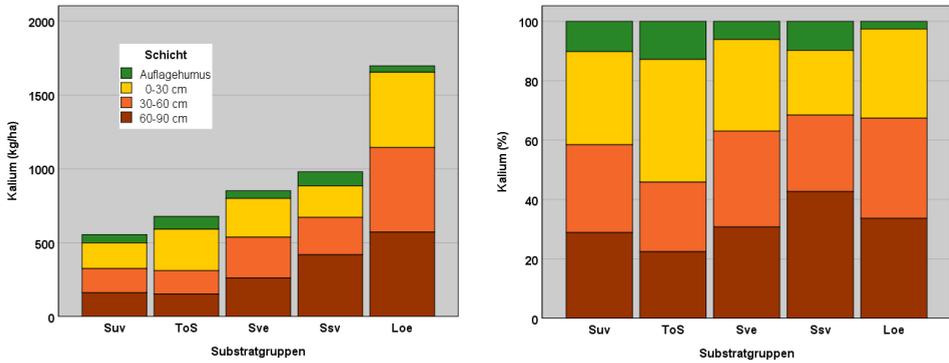


Abbildung 68: Austauschbare Kaliumvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen (0–30, 30–60, 60–90 cm) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Signifikante Veränderungen auf Profilebene ergaben sich für Kalium nur in der Substratgruppe unverlehmtter Sand, hier kam es zu erheblichen signifikanten Zunahmen im Auflagehumus und in allen Tiefenstufen (s. Tab. 69).

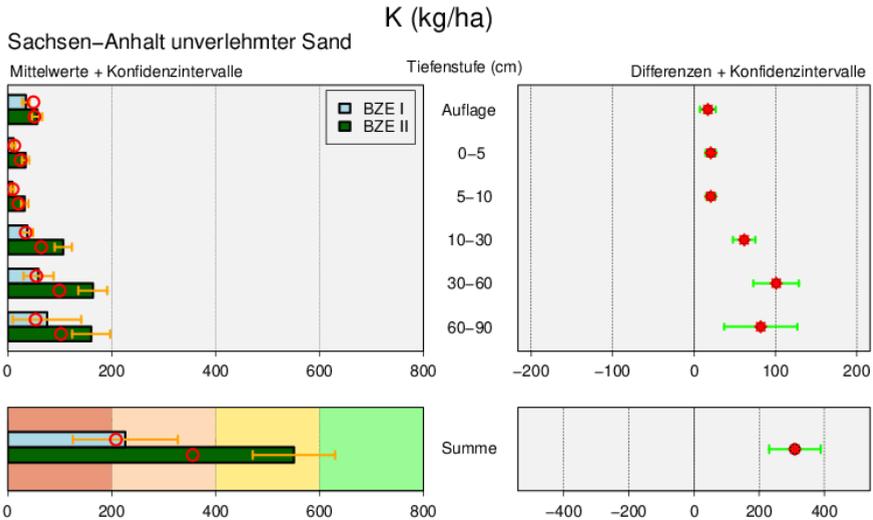


Abbildung 69: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] in den Waldböden Sachsen-Anhalts für die Substratgruppe unverlehmtter Sand als Mittelwert für die BZE I (n = 33) und II (n = 39) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 30) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die Kaliumvorräte nahmen in den Tiefenstufen zwischen 110 % (60–90 cm) bis 225 % (5–10 cm) bezogen auf den Vorrat der BZE I zu und haben sich mit einer Zunahme um rund 310 kg/ha (+128 %) auf Profilebene mehr als verdoppelt.

In der Substratgruppe Lösslehm nahmen die Vorräte in den Tiefenstufen 0–5, 5–10 und 10–30 cm insgesamt um 30 % bezogen auf den Vorrat der BZE I signifikant zu, die Zunahme auf Profilebene um 320 kg (+26 %) ließ sich jedoch nicht absichern.

In allen anderen Substratgruppen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

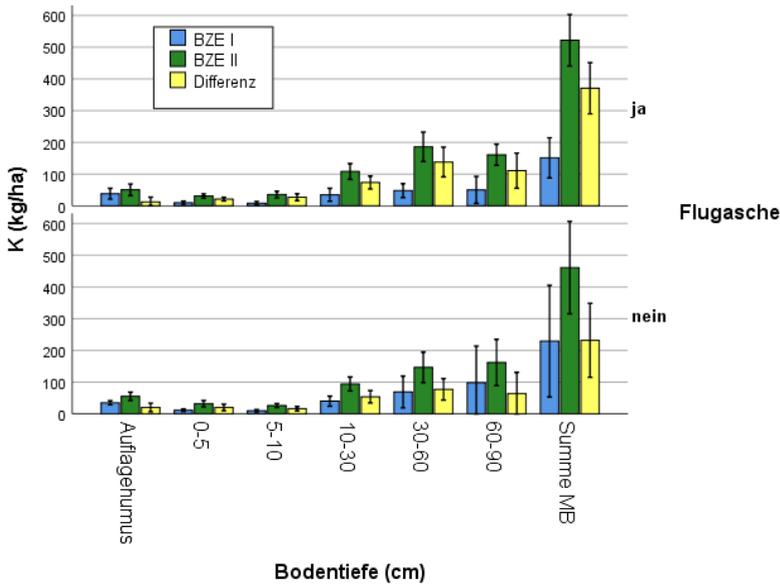


Abbildung 70: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für Flugasche beeinflusste BZE-Punkte (oben, $n = 12$) und unbeeinflusste (unten, $n = 20$), jeweils als Mittelwert für die BZE I, BZE II und Differenz

Im Gegensatz zu den Vorräten von Calcium und Magnesium sind die Kaliumvorräte in der BZE I und BZE II der einzelnen Tiefenstufen zwischen den Flugasche beeinflussten und unbeeinflussten Standorten weniger unterschiedlich. Die Zunahmen an Kalium sind jedoch in den Tiefenstufen im Kollektiv der Flugasche beeinflussten BZE-Punkte höher als im Flugasche unbeeinflussten Kollektiv.

Bei den Flugasche-Standorten kommt es im Auflagehumus und allen Tiefenstufen von der BZE I zur BZE II zu höheren Kaliumvorräten, die im Mineralboden signifikant sind. Die Zunahmen steigen mit zunehmender Bodentiefe und summieren sich auf Profilebene auf eine signifikante Zunahme von 200 % bezogen auf die

Profilsomme der BZE I. Im nicht von Flugasche beeinflussten Kollektiv des unverlehnten Sandes kommt sowohl im Auflagehumus als auch im Mineralboden zu signifikanten Zunahmen, die im Unterschied zum Flugasche-Kollektiv jedoch insgesamt geringer sind. Auf Profilebene ergibt sich im nicht von Flugasche beeinflussten Kollektiv eine Zunahme von Kalium um +94 % bezogen auf die BZE I. Damit verdreifachten sich die Vorräte an Kalium im Kollektiv der Flugasche und verdoppelten sich im Flugasche unbeeinflussten Kollektiv, jeweils von der BZE I zur BZE II bezogen auf Profilebene.

Die unerwartet hohen Zunahmen von Kalium in der BZE II gegenüber der BZE I, vor allem in den unteren Bodenschichten, lassen sich weder ökologisch noch durch anthropogene Einflüsse sinnvoll erklären oder begründen. Kaliumquellen wie z. B. durch Deposition sind in dieser Größenordnung zwischen der BZE I und BZE II in Sachsen-Anhalt flächig nicht belegt. Kaliumzunahmen dieser Größenordnung aus der Mineralverwitterung sind nicht zu erwarten.

Die Laborergebnisse der BZE I aus Sachsen-Anhalt stammen aus dem Labor der Landesanstalt für Forstplanung in Eberswalde, Brandenburg, die Laborergebnisse aus der BZE II aus dem Umweltlabor der NW-FVA (siehe auch Kap. 11). Aus den Ringanalysen zur BZE I sind hinsichtlich Kalium in der Austauschkapazität keine kritischen Abweichungen zwischen den teilnehmenden Laboren ersichtlich (KÖNIG u. WOLFF 1993), allerdings sind die an den Ringanalysen teilnehmenden Labore anonymisiert und nicht alle 13 Labore lieferten Werte zur Austauschkapazität. Es lagen für die Kationen der Austauschkapazität in der BZE I keine Nachweis- und Bestimmungsgrenzen vor.

In Abb. 71 sind alle Konzentrationen von Kalium klassiert in 31 Klassen mit gleicher prozentualer Belegung (Abszisse) nach Tiefenstufen in Stapelbalken nach ihrer Anzahl (Ordinate) im Kollektiv der BZE I und BZE II dargestellt. In allen Tiefenstufenbereichen existieren Messwerte aus der BZE I für Kalium unterhalb der Bestimmungsgrenze der BZE II (0,0026 g/kg) des Umweltlabors der NW-FVA (rote Linie). Dies betrifft insgesamt 16 % aller Messwerte für Kalium in der BZE I. Bei den Messungen in der BZE II wurde diese Bestimmungsgrenze in keinem Fall unterschritten. In der BZE I lagen 57 % aller Messwerte unterhalb einer Konzentration von 0,023 g/kg Kalium, in der BZE II waren es dagegen nur 10 % (blaue Linie). Dieser auffällig höhere Anteil relativ geringer Kaliumkonzentrationen in der BZE I in allen Tiefenstufen gegenüber der Verteilung der BZE II ist ein wesentlicher Grund für die deutlich höheren Vorräte von Kalium in der BZE II.

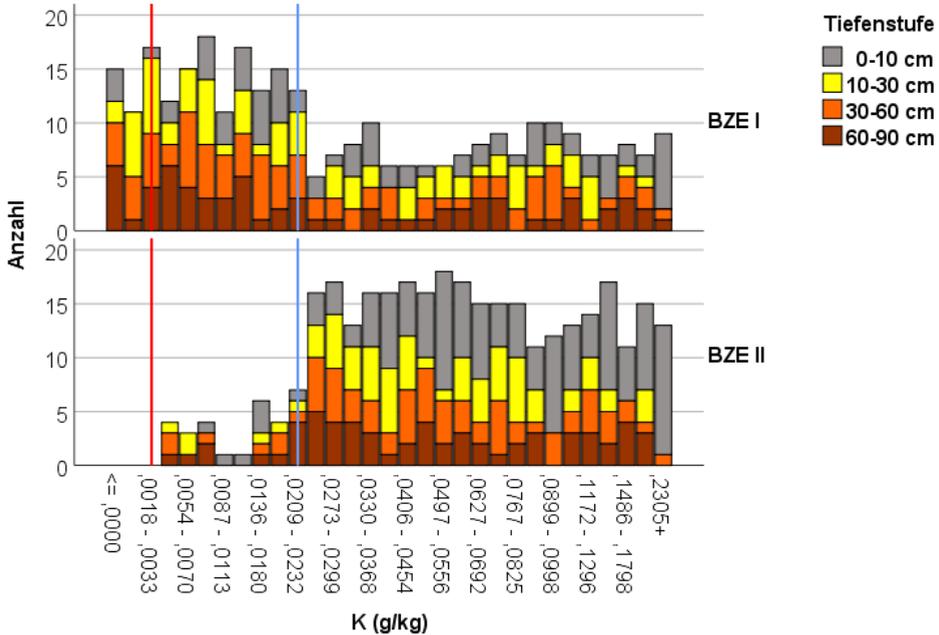


Abbildung 71: Kaliumkonzentrationen [g/kg] klassiert in prozentual gleich besetzte Intervalle der BZE I und BZE II für Sachsen-Anhalt, die Zuordnung der Horizonte der BZE I in Tiefenstufen erfolgte über die Horizontmitte

Aus diesem Grund wurde die Austauschkapazität von 40 Bodenproben aus der BZE I in Sachsen-Anhalt im Umweltlabor der NW-FVA im Januar 2021 nachanalytisiert. Dabei wurden vor allem Proben aus den geringen Konzentrationsbereichen unterhalb von 0,023 g/kg Kalium in der BZE I (blaue Linie), aber auch Proben aus den höheren Konzentrationsbereichen ausgewählt. Die entsprechenden Proben waren im Probenlager der NW-FVA eingelagert.

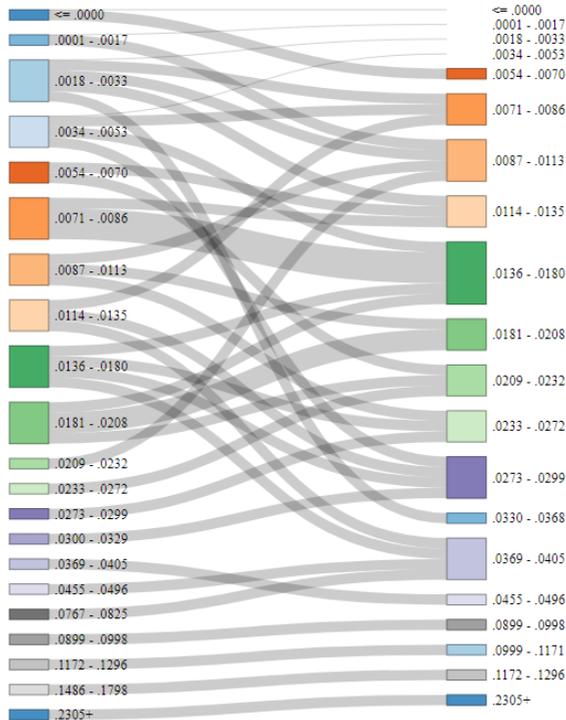


Abbildung 73: Sankey-Plot der Kaliumkonzentrationsbereiche [g/kg] aus der BZE I (links) und der Ergebnisse aus der Nachmessung (rechts) für 40 Proben der Rückstellproben aus der BZE I

6.5.4 Vorräte austauschbarer Protonen, Eisen, Mangan und Aluminium

Bei den Protonen erhöhten sich die Vorräte in der BZE II in den Tiefenstufen 0–5 und 5–10 cm signifikant, bei den anderen Tiefenstufen ergaben sich keine signifikanten Veränderungen, auch nicht auf Ebene des Gesamtprofils. Bei Eisen dagegen erhöhten sich Vorräte in den Tiefenstufen von 0–60 cm signifikant, nicht jedoch signifikant im Gesamtprofil (s. Abb. 74).

Die zeitliche Entwicklung der austauschbaren Ma-Kationen-Vorräte Aluminium und Mangan (Abb. 75) zeigen von der BZE I zur BZE II im Gesamtprofil und den meisten Tiefenstufen deutliche und signifikante Zunahmen.

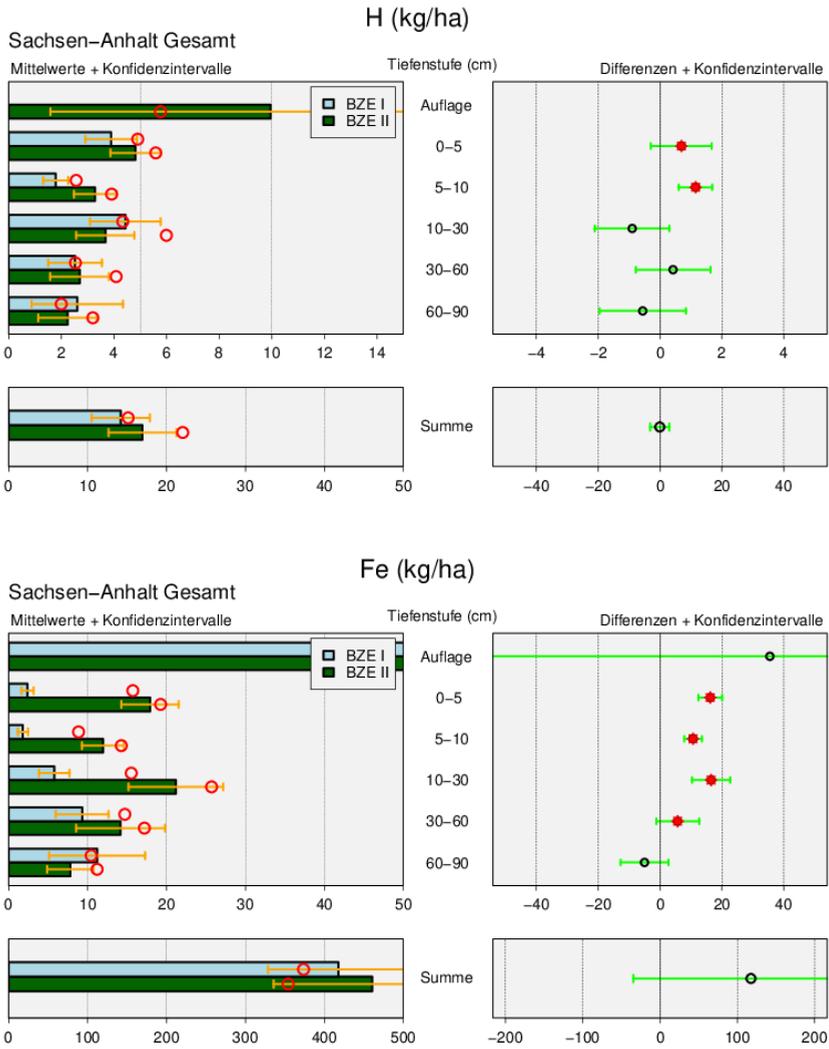


Abbildung 74: Vorräte [kg/ha] von Protonen (oben) und Eisen (unten) in den Waldböden Sachsen-Anhalts Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n=64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

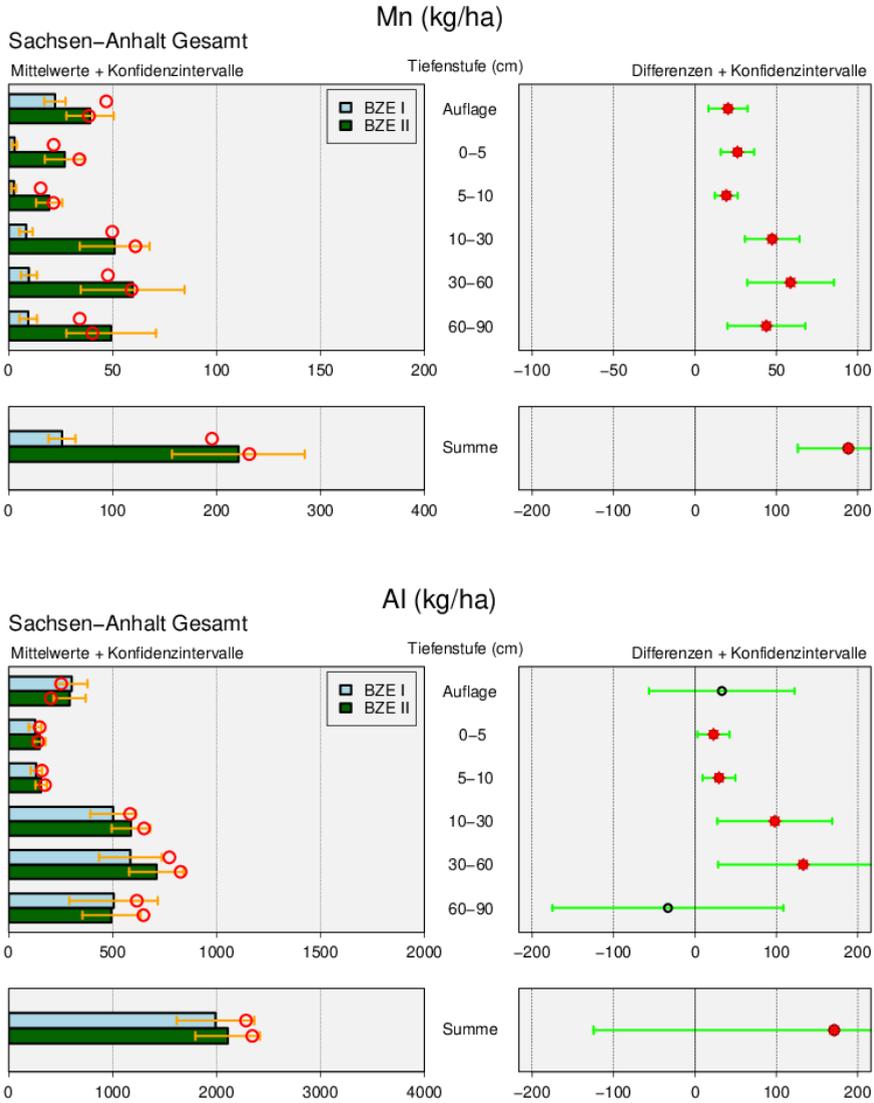


Abbildung 75: Vorräte [kg/ha] von Mangan (oben) und Aluminium (unten) in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n=64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.5 *pH-Werte und Pufferbereiche*

Der pH-Wert eines Bodens gilt als zentraler Indikator für seine chemischen Eigenschaften und kennzeichnet die Eignung des Bodens als Pflanzenstandort und Lebensraum für Bodenorganismen. Im Rahmen des chemischen Analyseprogramms der BZE wurden pH-Werte in wässriger Lösung ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$) und in salzhaltigen Suspensionen ($\text{pH}(\text{KCl})$ und (CaCl_2)) gemessen. Bei der BZE I wurde neben dem $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ nur der $\text{pH}(\text{KCl})$ bestimmt. Daher können im Zeitvergleich nur die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ und $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte dargestellt werden. Der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert gibt die aktuelle Protonenaktivität in der Lösungsphase des Auflagehumus beziehungsweise Mineralbodens an. Die pH-Werte (KCl) und (CaCl_2) erfassen dagegen auch die unterschiedlich stark am Austausch- und an der organischen Substanz gebundene, durch die Salzsuspension gelösten Protonen. Die pH-Werte in Salzlösung liegen daher umso tiefer, je mehr Kationensäuren in einem Medium gebunden sind und gelöst werden konnten (MEIWES et al. 1984).

Die pH-Werte kennzeichnen sogenannte Pufferbereiche (s. Tab. 12), die eine Gliederung des chemischen Bodenzustandes und Rückschlüsse auf die Stabilität der Waldökosysteme zulassen (ULRICH 1981, 1986): Natürliche Waldböden weisen in Abhängigkeit von Ausgangsgestein und Bodenentwicklung verschiedene Puffersysteme auf, die bei Säurebelastung den pH-Wert des Bodens entsprechend ihrer chemischen Kapazität zu puffern vermögen. Auf reicheren Standorten sind dies der Carbonat- und Silikat-Pufferbereich, auf mittleren Standorten der Austausch- und auf ärmeren Standorten der Aluminium-, der Aluminium-/Eisen- sowie bei niedrigsten pH-Werten der Eisen-Pufferbereich. Pufferbereiche sind Indikatoren für resiliente Eigenschaften von Waldböden. Ein Puffersystem puffert bei Protonenzufuhr die Protonen ab und hält damit den pH-Wert der Bodenlösungssystem in einem bestimmten Bereich relativ konstant. Überschreitet die Säurefracht oder die Produktion von Protonen die Pufferrate, sinken die pH-Werte, d. h. der Boden versauert. Das Boden-Bodenlösungssystem kann dann in den folgenden Pufferbereich übergehen. Solange genügend Pufferkapazität zur Verfügung steht, sind die Versauerungsvorgänge teilweise reversibel. Bei abnehmender Säurebelastung und Unterschreitung der Pufferrate erhöht sich der pH-Wert wieder. Wechselt die Säurebelastung im Zeitverlauf, können die Böden zwischen verschiedenen Pufferbereichen wechseln (ULRICH 1983). Die Silikatverwitterung und die damit verbundene Protonenkonsorption findet sowohl bei höheren als auch bei niedrigeren pH-Werten statt, im Silikat-Pufferbereich puffern jedoch nur die Silikate (ULRICH 1981).

In der Regel wird für die Einteilung von Böden in Pufferbereiche der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert herangezogen, beziehungsweise der pH-Wert in Gleichgewichtsbodenlösung. Diese Werte entsprechen im räumlichen Mittel den in der Bodenlösung aktuell vorhandenen pH-Werten (MEIWES et al. 1984).

Tabelle 12: Charakterisierung der Pufferbereiche (nach ULRICH 1981, verändert)

Kohlensäure/Calcium-Carbonat ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) > 6,2$)
<ul style="list-style-type: none"> - Vorherrschende Pufferreaktion: Kalkauflösung - Humusform: Mull, rasche Streuumsetzung - Bodenbildungsprozess: Entkalkung, stabiles Bodengefüge, evtl. ungünstiges Ca/K-Verhältnis, Auswaschung von Calcium - keine Behinderung des Wurzelwachstums oder der Zersetzeraktivität aufgrund bodenchemischer Bedingungen, gute Wachstumsbedingungen aus bodenchemischer Sicht
Kohlensäure-Silikat ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 6,2 und 5,0)
<ul style="list-style-type: none"> - Vorherrschende Pufferreaktion: Verwitterung der primären Silikate unter Freisetzung von Nährstoffkationen - Humusform: Mull und Mullartiger Moder - Bodenbildungsprozess: Verbraunung und Tonverlagerung - optimale Nährstoffverfügbarkeit und ökologisches Optimum aus bodenchemischer Sicht
Austauscher ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 5,0 und 4,2)
<ul style="list-style-type: none"> - Vorherrschende Pufferreaktion: weitere Verwitterung der Restgitter primärer Silikate und Freisetzung von Al-Ionen aus Tonmineralen, Entstehung polymerer Aluminium-Hydroxo-Kationen und Verdrängung von Calcium, Magnesium sowie Kalium vom Austauscher und Auswaschung mit der Bodenlösung - Humusform: Mullartiger Moder und Moder - Rückgang der Austauschkapazität und der biologischen Aktivität, Verbraunung des Bodens - Konkurrenzkraft anspruchsvoller Pflanzenarten geht zurück
Aluminium ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 4,2 und 3,8)
<ul style="list-style-type: none"> - Pufferung: Auflösung der Aluminium-Hydroxo Kationen und sekundärer Tonminerale, Tonzerstörung, Freisetzung von Aluminium-Ionen und Protonen in die Bodenlösung - Humusform: Moder und Rohhumus - Podsoligkeit, geringe Basensättigung - zunehmende Einschränkung der Wuchsleistung durch den bodenchemischen Zustand
Aluminium-Eisen (zwischen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 3,8 und 3,0)
<ul style="list-style-type: none"> - Pufferung: Auflösung von Eisenhydroxiden und Aluminium-Hydroxo Kationen, Mobilisierung von Eisen und Huminstoffen, höhere Anteile von Aluminium, Eisen und Protonen in der Bodenlösung, zunehmender Säurestress - Humusform: schlechte Moderhumusformen, Rohhumus - stärkere Podsoligkeit, Podsolierung - Wachstumsstörungen der Bäume
Eisen ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 3,0$)
<ul style="list-style-type: none"> - Pufferung: über Eisenhydroxidauflösung, hohe Kationensäurekonzentrationen in der Bodenlösung, sehr geringe Basensättigung am Austauscher - Humusform: Rohhumus, Hochmoortorf - starke Podsolierung - mögliche Wachstumsstörungen der Bäume

Bei der Bewertung des aktuellen Säurezustands des Bodens in Reaktion mit dem Bodenwasser erfolgt die Zuordnung nach Pufferbereichen in bestimmten Bodenschichten anhand des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wertes nach ULRICH (1983). Einschränkend ist allerdings, dass der pH -Wert zeitlich schwankt und damit die Interpretation eines einmaligen Messwertes unsicher ist (BLOCK et al. 2000). Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte sind z. B. abhängig von der Verwitterung und Zusammensetzung des Mineralbodens, von Prozessen der mikrobiellen Mineralisierung und Umsetzung organischer Substanz, der Wurzelatmung, vom Niederschlagregime und Säureeinträgen, von Durchlüftung und Temperatur des Bodens sowie der Jahreszeit. Sie schwanken kleinräumig, kurzfristig und saisonal. Da die pH -Werte in salzhaltiger Suspension auch im Boden gespeicherte Kationensäuren einbeziehen, bilden diese pH -Werte auch abgelaufene, historische Versauerungsschübe ab und geben Hinweise auf Säurebelastungen, denen der untersuchte Boden einmal ausgesetzt war. Damit werden bei den pH -Werten in Salzlösung zeitliche und örtliche Schwankungen abgemildert. Die Messung in salzhaltiger Suspension wird daher als Maß für die Amplitude des chemischen Bodenzustandes im Hinblick auf die Protonenbelastung interpretiert (ULRICH 1983). Im Folgenden werden die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - und $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte dargestellt. Der pH -Wert in CaCl_2 liegt nur für die BZE II vor. Er ist in seiner Bedeutung mit dem $\text{pH}(\text{KCl})$ vergleichbar, liegt aber etwas höher.

6.5.5.1 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$

In Abbildung 76 sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte des Auflagehumus und des Mineralbodens nach Tiefenstufen angegeben.

Die durchschnittlichen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der BZE I und BZE II im Mineralboden liegen über alle Tiefenstufen hinweg zwischen 4,4 und 4,9 und befinden sich damit in Sachsen-Anhalt im Austauscher-Pufferbereich (vgl. Tab. 12). Die pH -Wert Spanne reicht von 3,5 bis 8,0. Es kommen damit bis auf den Eisen-Pufferbereich jedoch alle Pufferbereiche vor.

Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der Auflage sind von durchschnittlich 4,6 bei der BZE I auf 4,4 bei der BZE II signifikant um 0,2 pH -Einheiten gesunken. Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in den Tiefenstufe 0–5 und 5–10 cm blieben mit Werten zwischen 4,4–4,5 weitgehend konstant. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Werte kontinuierlich bis knapp unter 5,0 in der Tiefenstufe 60–90 cm an. In der Tendenz gab es leichte Zunahmen, die für die Tiefenstufe 10–30 cm auch signifikant sind. Die wässrige Bodenlösung ist damit gegenüber der BZE I leicht weniger sauer.

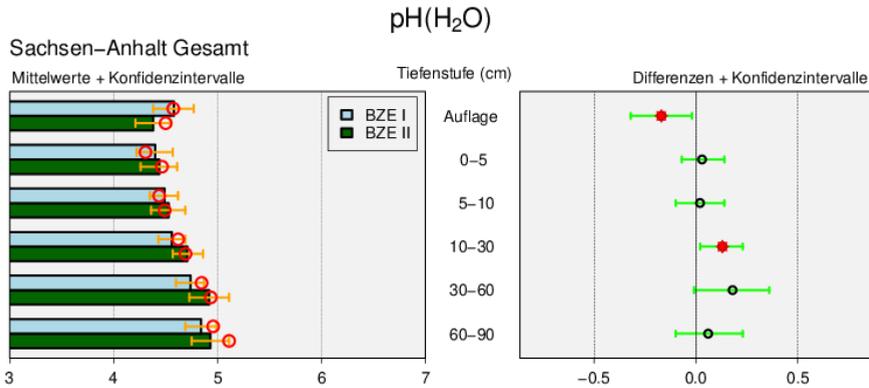


Abbildung 76: pH(H₂O)-Werte in Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Auflagehumus und Tiefenstufen bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die pH(H₂O)-Werte der BZE II sind in Abbildung 104 nach Substratgruppen, Auflagehumus und Tiefenstufen dargestellt. Die Werte unterscheiden sich nach Bodenschicht und Substrat, es gibt aber typische Muster:

Die geringsten pH(H₂O)-Werte finden sich erwartungsgemäß in den Substratgruppen der eher basenarmen Substrate, wie Tonschiefer und den schwach- und unverlehmten Sanden. Die Werte in der Auflage und der Tiefenstufe 0–5 cm befinden sich mit ihrem Median im Aluminium-Pufferbereich, mit zunehmender Bodentiefe steigen die meisten Werte in den Austauscher-Pufferbereich bis pH(H₂O) 5,0 an. Die hohen pH(H₂O)-Werte zwischen 5–6,7 im unverlehmten Sand sind dem Einfluss von Flugasche zuzuschreiben (siehe auch Abb. 79).

Die pH(H₂O)-Werte in den Substratgruppen verlehmt Sand und Lösslehm liegen im Austauscher- und Kohlensäure-Silikat-Pufferbereich, im Niveau deutlich höher als die anderen Substratgruppen. Im verlehmt Sand nehmen die pH(H₂O)-Werte mit zunehmender Bodentiefe ab, im Lösslehm bis 30 cm Bodentiefe, dann steigen sie wieder deutlich an, teilweise bis in den Carbonat-Pufferbereich.

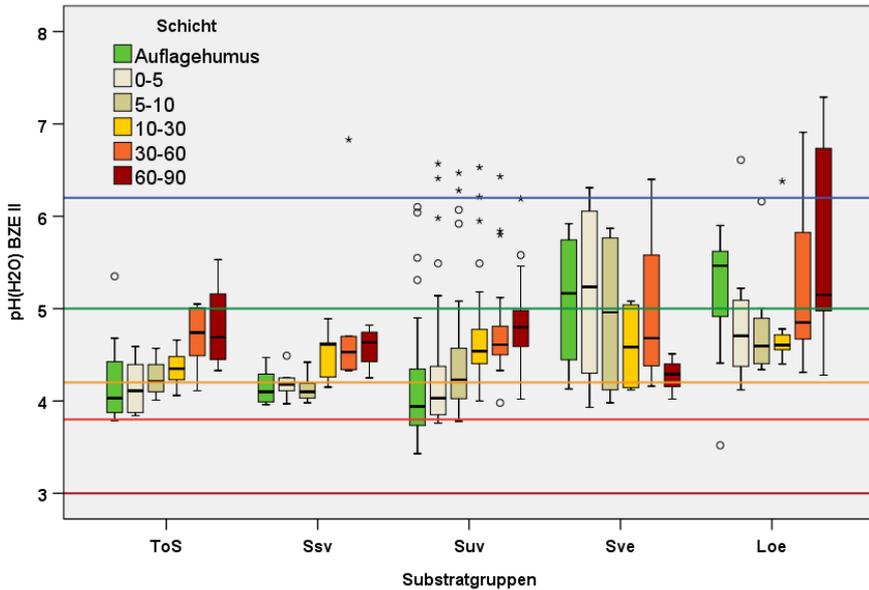


Abbildung 77: $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen und Pufferbereichen (farbige Linien); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer); Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148)

Grundsätzlich steigen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte mit zunehmender Bodentiefe in den Tiefenstufen 10–30, 30–60 und 60–90 cm kontinuierlich an, ein deutlicher Hinweis auf zunehmende Säureneutralisierungskapazität in tieferen Bodenschichten. Dennoch ist auffällig, dass sich die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte über weite Spannen der forstlichen Standorte und Bodentiefen überwiegend in einem relativ engen Wertebereich zwischen 4,2 und 5,0 im Austausch-Pufferbereich befinden. Neben natürlicher Bodenversauerung unter humiden Klimabedingungen ist dies Ausdruck langanhaltender Säureinträge, einer Erschöpfung der Puffersysteme und Nivellierung des bodenchemischen Zustandes.

Im Vergleich zur BZE I sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte bei der BZE II in den meisten Tiefenstufen der Substratgruppen leicht angestiegen (s. Abb. 78). Am deutlichsten ist dies in der Substratgruppe Lösslehm. Signifikant waren diese Veränderungen jedoch in keinem Fall.

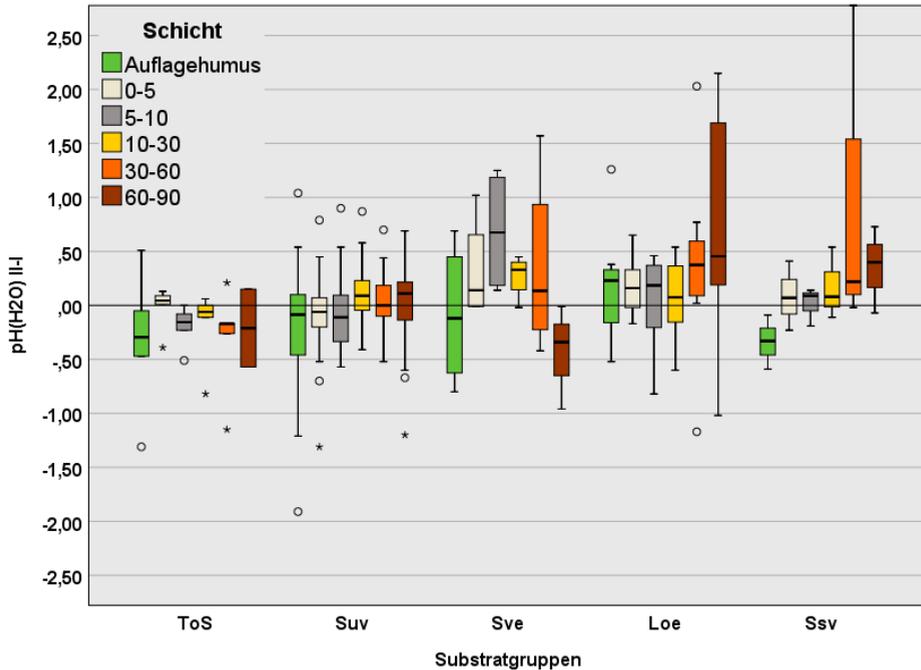


Abbildung 78: Differenzen (BZE II - BZE I) der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten, die sowohl in der BZE I als auch in der BZE II beprobt wurden (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Der Flugascheeinfluss zeigt sich auch bei den $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten. Innerhalb der Substratgruppe unverlehmtter Sand, in der sich die überwiegenden Flugasche beeinflussten BZE-Standorte befinden, sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der Flugasche beeinflussten BZE-Punkte in allen Tiefenstufen höher als bei den unbeeinflussten BZE-Punkten (Abb. 79).

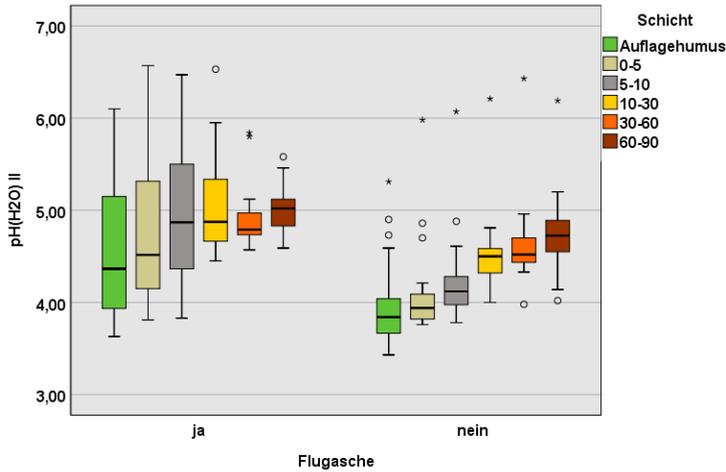


Abbildung 79: $pH(H_2O)$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt in der Substratgruppe unverlehmter Sand und Flugascheeinfluss (ja: n = 12, nein: n = 27)

Die hohen $pH(H_2O)$ -Werte im von Flugasche unbeeinflussten Kollektiv über 6,0 sind auf eine Acker-Erstaufforstung als Folge einer Aufdüngung zurückzuführen.

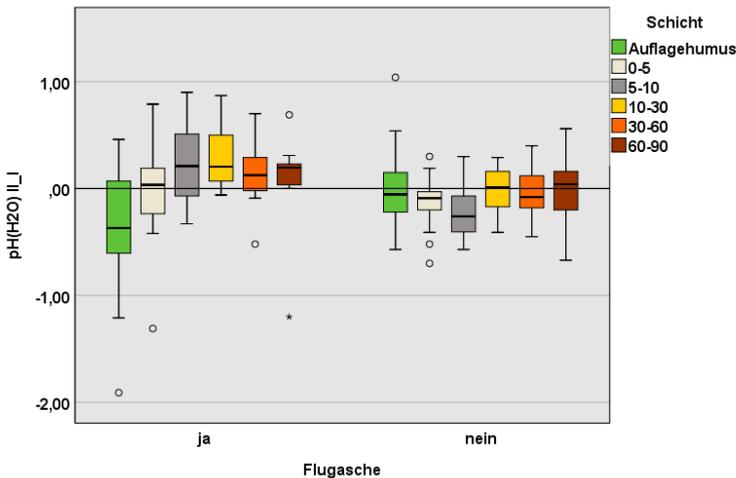


Abbildung 80: Differenzen (BZE II - BZE I) der $pH(H_2O)$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt in der Substratgruppe unverlehmter Sand nach Flugascheeinfluss (ja: n = 12, nein: n = 19)

Im Kollektiv der von Flugasche beeinflussten BZE-Punkte gab es zwischen der BZE I und BZE II eine deutliche Abnahme der $pH(H_2O)$ -Werte im Auflagehumus. Die $pH(H_2O)$ -Werte im Mineralboden dagegen nahmen in der Tendenz zu, in der

Tiefenstufe 10–30 cm auch signifikant. Im von Flugasche unbeeinflussten Kollektiv dagegen blieben die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte weitgehend konstant, im Oberboden kam es zu leichten Abnahmen in der BZE II.

Abbildung 81 zeigt die prozentuale Aufteilung der einzelnen Tiefenstufen im Mineralboden nach Pufferbereichen (nach ULRICH 1981) für die BZE I und BZE II:

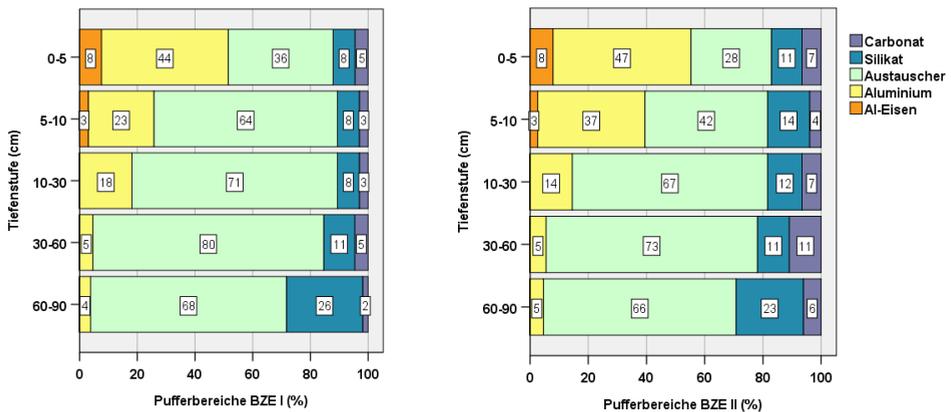


Abbildung 81: Mittlere Häufigkeiten der Pufferbereiche $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ in Prozent (nach ULRICH 1981) in sachsen-anhaltischen Waldböden für die BZE I (linke Spalte) und BZE II (rechte Spalte) nach Tiefenstufen [cm]

Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die summierten Anteile im Carbonat-, Silikat- und Austauscher-Pufferbereich zu und die entsprechenden Anteile im Aluminium- und Eisen-Pufferbereich ab. In der Tiefenstufe 0–5 cm treten Aluminium- und Eisen-Pufferbereich zusammen in gut der Hälfte aller BZE-Punkte auf, diese Anteile gehen mit zunehmender Tiefenstufe auf 4 % in der BZE I bzw. 5 % in der BZE II in der Tiefenstufe 60–90 cm zurück. Unterhalb 5 cm Bodentiefe dominiert in allen Tiefenstufen der Austauscher-Pufferbereich. Der Silikat-Pufferbereich liegt zwischen 8–11 % bis 60 cm Bodentiefe und 26 % in 60–90 cm. Der Carbonat-Pufferbereich ist mit 2–11 % vertreten.

Die Verteilungen zwischen den BZE-Erhebungen unterscheiden sich in höheren Anteilen am Aluminium-Pufferbereich in 0–5 und 5–10 cm Bodentiefe in der BZE II, vor allem in der Tiefenstufe 5–10 cm Bodentiefe. Auf der anderen Seite nahmen die Anteile im Carbonat- und Silikat-Pufferbereich in der BZE II zu Lasten des Austauscher-Pufferbereiches leicht zu.

Im Hinblick auf die Verteilung der Pufferbereiche nach dem $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert zeichnet sich demnach für Sachsen-Anhalt eine leichte Verschlechterung des bodenchemischen Zustandes im Oberboden ab. Die Anteile der ökologisch ungünstig zu beurteilenden Aluminium-Eisen- und Aluminium-Pufferbereiche haben im oberen

Mineralboden zu Lasten der besseren Austauscher- und Silikat-Pufferbereiche zugenommen. Dies betrifft vor allem die schwächeren Standorte des unverlehmten Sandes und Tonschiefers. Verbesserungen zeigen sich aber auch in der Zunahme der günstigeren Carbonat- und Silikat-Pufferbereiche, dies betrifft vor allem den Lösslehm und die (schwach)verlehmten Sande in Sachsen-Anhalt.

6.5.5.2 pH(KCl)

Die pH(KCl)-Werte sind grundsätzlich deutlich geringer als die pH(H₂O)-Werte, da durch den Salzzusatz zusätzlich zu den Protonen in der Bodenlösung Protonen vom Austauscher gelöst werden. Im Mittel von Sachsen-Anhalt liegen die pH(KCl)-Werte des Auflagehumus und der Mineralboden-Tiefenstufen zwischen 0,5 und 0,8 pH-Einheiten unter den entsprechenden pH(H₂O)-Werten (s. Abb. 82).

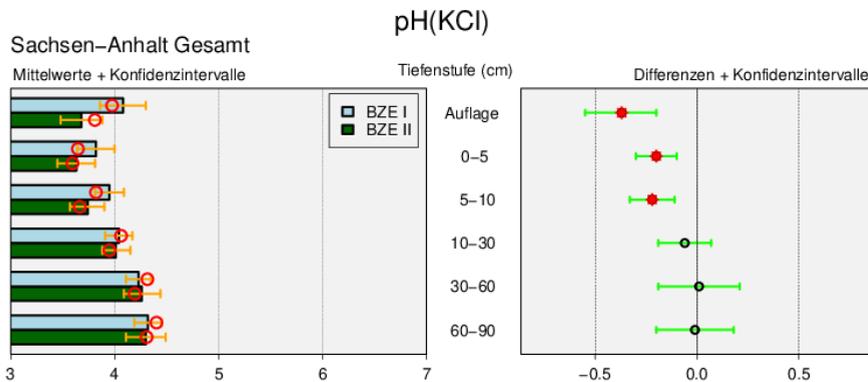


Abbildung 82: pH(KCl)-Werte in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 64) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 62) (rechte Spalte) nach Auflagehumus und Tiefenstufen bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die pH(KCl)-Werte in der Auflage sind von durchschnittlich 4,08 bei der BZE I auf 3,68 in der BZE II signifikant gesunken, ebenfalls signifikant in den Tiefenstufen 0–5 cm und 5–10 cm jeweils um 0,2 pH-Wert-Einheiten. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die pH(KCl)-Werte kontinuierlich an. In der Tiefenstufe 60–90 cm betragen sie bei der BZE II durchschnittlich 4,30.

Die pH(KCl)-Werte nach Substratgruppen sind in Abbildung 83 für den Auflagehumus und die Tiefenstufen dargestellt. Auffällig sind die sehr ähnlichen Werte über eine relativ weite standörtliche Amplitude: Vom Tonschiefer bis zum Lösslehm liegen die Mediane der pH(KCl)-Werte im Mineralboden überwiegend zwischen 3 und 4, also im eher geringen Bereich. Nur in tieferen Bodenschichten unter 30 cm

beim unverlehmten Sand und Lösslehm ab 60 cm Bodentiefe sowie im Auflagehumus beim Lösslehm und verlehmten Sand, hier auch bis 10 cm Bodentiefe, liegen die Werte höher.

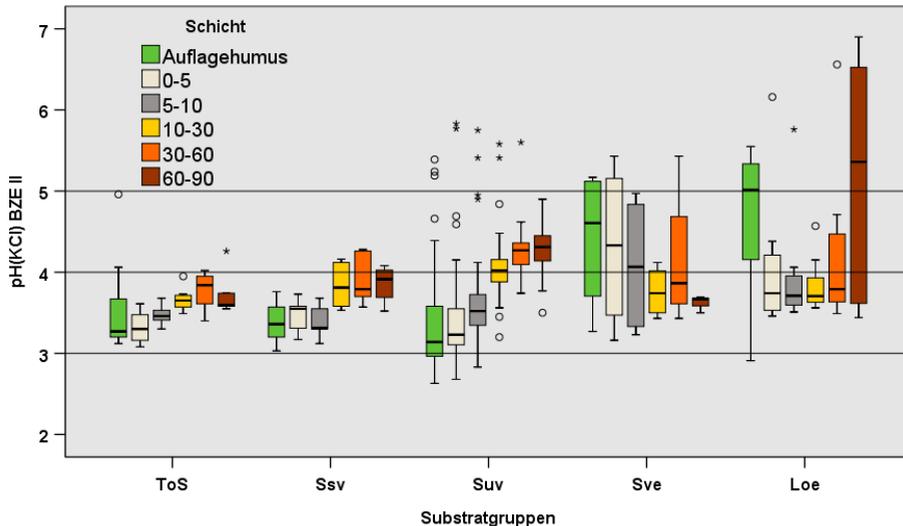


Abbildung 83: $pH(KCl)$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer)

Die $pH(KCl)$ -Werte der BZE II änderten sich im Vergleich zur BZE I in den Substratgruppen und Tiefenstufen relativ wenig (s. Abb. 84). Signifikant geringere Werte im Vergleich zur BZE I gab es nur in der Substratgruppe unverlehmter Sand im Auflagehumus und im Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe. Weitere signifikante Veränderungen kamen nicht vor, in der Tendenz gab es hier geringere $pH(KCl)$ -Werte in der BZE II im Vergleich zur BZE I.

Die Flugasche beeinflussten Standorte innerhalb der Substratgruppe unverlehmter Sand weisen ähnlich wie bei den $pH(H_2O)$ -Werten deutliche höhere $pH(KCl)$ -Werte auf als die von Flugasche nicht beeinflussten. Die Werte waren in der BZE II im Auflagehumus und oberen Mineralboden bis 10 cm in der BZE II geringer, ab 10 cm kaum unterschiedlich zur BZE I. Unterschiede hinsichtlich der pH -Wert Veränderungen gab es zwischen den Kollektiven Flugasche beeinflusst und unbeeinflusst nicht (nicht dargestellt).

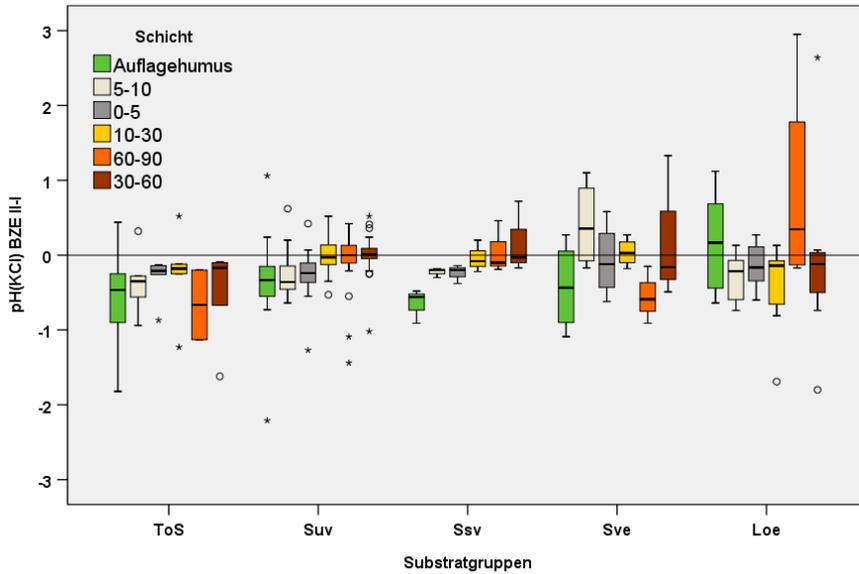


Abbildung 84: Differenzen (BZE II - BZE I) der pH(KCl)-Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten, die sowohl in der BZE I als BZE II beprobt wurden (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

6.5.6 Kohlenstoff

Kohlenstoff (C) ist im Waldboden sowohl im Auflagehumus als auch im Mineralboden enthalten. Hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung ist nur der in der abgestorbenen organischen Substanz gebundene Kohlenstoff von Interesse. Diese besteht aus abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffen sowie deren Umwandlungsprodukten. Lebende Organismen, also die Bodenflora und -fauna oder auch lebende Wurzeln von Waldbäumen, zählen nicht zur organischen Substanz des Bodens. Kohlenstoff kann auch in karbonatischer Form fest in Gesteinen gebunden sein, wie z. B. in Kalk-, Ton- oder Mergelgesteinen. Im Folgenden wird nur der organisch gebundene Kohlenstoff betrachtet.

Die Kohlenstoffvorräte hängen von der Gründigkeit und Dichte des Bodens, dem Steingehalt und vor allem dem Kohlenstoffgehalt ab. In den oberen Bereichen des Mineralbodens sind die Gehalte von Kohlenstoff i. d. R. hoch, der Boden ist dort aber auch relativ locker. In den unteren Bodenschichten ist es umgekehrt. Im Schnitt enthält das obere Drittel des Mineralbodens gut die Hälfte des Kohlenstoffvorrates des gesamten BZE-Profiles bis 90 cm Bodentiefe. Die höchsten Kohlen-

stoffvorräte enthalten Moorböden. Die im Auflagehumus gespeicherten Kohlenstoffvorräte sind ebenfalls sehr variabel und hängen stark von der jeweiligen Baumartenzusammensetzung und den Zersetzungsbedingungen ab.

Die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus in den Waldböden Sachsen-Anhalts liegen zum Zeitpunkt der BZE II mit durchschnittlich 130 t/ha im unteren mittleren Bewertungsbereich. In diesem Durchschnitt sind auch die organisch geprägten Standorte ($n = 2$) einbezogen, ein Erdniedermoor und ein Anmoorgley, die sehr hohe Kohlenstoffvorräte zwischen 630 und 210 t/ha bis 90 cm Bodentiefe speichern. Mit rund 3 % haben die organisch geprägten Standorte im BZE-Kollektiv Sachsen-Anhalts nur einen relativ geringen Anteil. In Hessen kommen diese Standorte nicht in der BZE vor, in Niedersachsen liegt der Anteil bei 8 %. Ohne diese Standorte speichern die Waldstandorte Sachsen-Anhalts im Mittel 118 t/ha Kohlenstoff, davon 24 t/ha im Auflagehumus (20 %) und liegen damit ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich.

Im BZE-Kollektiv sind die organisch geprägten Standorte hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung Sonderstandorte. Grundsätzlich „sacken“ weitgehend trocken-gefallene und/oder entwässerte, bewaldete Moorböden mit der Zeit in sich zusammen. Der Moor-Humuskörper wird mineralisiert, die Dichten nehmen zu, der Kohlenstoffvorrat verringert sich. Um hier korrekte Bilanzen erstellen zu können, müsste der Kohlenstoffvorrat jeweils bis zum Mineralboden bestimmt werden. Werden dagegen feste Tiefenstufen im Zeitvergleich wie bei der BZE von oben beginnend verglichen, ergeben sich aufgrund der zunehmenden Dichten hohe Kohlenstoffzunahmen in den Tiefenstufen, obwohl insgesamt der Kohlenstoffvorrat (bis zur Mineralbodensohle) abgebaut wird. Aus diesem Grund sind bei den Auswertungen zu Veränderungen der Kohlenstoffvorräte zwischen der BZE I und II die organischen Standorte nicht mit einbezogen worden.

In Abbildung 85 sind die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte für alle Waldböden in Sachsen-Anhalt ohne organische Standorte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Gesamtprofil bis 90 cm Bodentiefe dargestellt.

Die Kohlenstoffvorräte in diesem Kollektiv reichen von 52 t/ha in einem Ranker im Mittelharz bis 400 t/ha einer Hochflutablagerung bei Magdeburg, die auch bereits die höchsten Vorräte an Calcium, Magnesium und Kalium sowie die höchste Austauschkapazität aufweist.

Bei der BZE II sind in den oberen 30 cm des Mineralbodens mit 85 t/ha Kohlenstoffvorrat 72 % des gesamten Kohlenstoffs bis 90 cm Bodentiefe einschließlich Auflagehumus gespeichert. In der Tiefenstufe 30–60 cm sind es mit 22 t/ha 19 % und in der Tiefenstufe 60–90 cm mit 11 t/ha 9 %. Dies liegt an den stark abfallenden Kohlenstoff- und den zunehmenden Skelettgehalten mit zunehmender Bodentiefe. Bei der BZE I lagen die prozentualen Anteile relativ ähnlich.

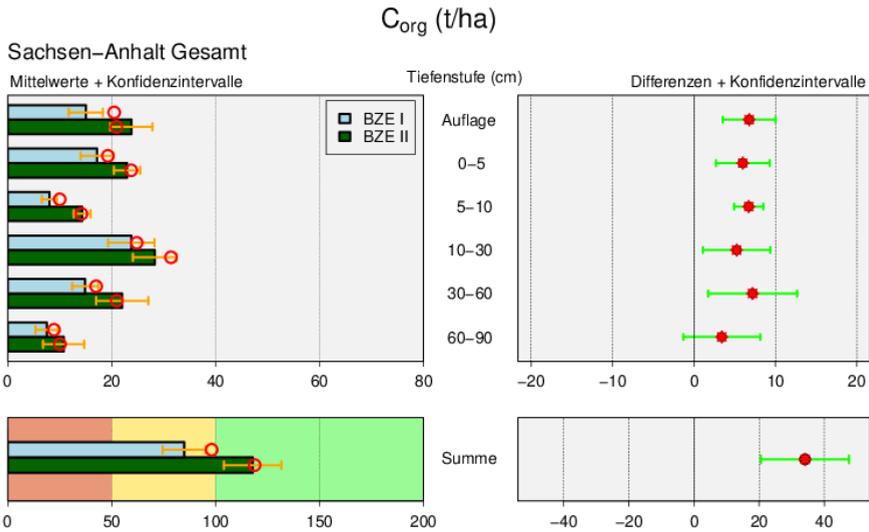


Abbildung 85: Kohlenstoffvorräte [t/ha] in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 63) und II (n = 74) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 61) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150, ohne organisch geprägte Standorte.

Im Vergleich zur BZE I erhöhten sich die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in den Waldböden Sachsen-Anhalts im Auflagehumus und im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe um 34,1 t/ha (+40 %), was rechnerisch einer durchschnittlichen jährlichen Speicherrate von rund 2.440 kg/ha entspricht. Diese Zunahme ist im Auflagehumus, allen Tiefenstufen und auf Profilebene signifikant (s. Abb. 85, Teilgrafik d).

Die Spanne, der auf der jeweiligen Profilebene aufsummierten Veränderung im Kohlenstoffvorrat, ist in Sachsen-Anhalt extrem: sie reicht von um 80 t/ha Kohlenstoff Vorräten auf Profilebene in der BZE I bis zu 300 t/ha Zunahme zwischen der BZE I und BZE II. Bei drei BZE-Punkten mit extremen Abweichungen zwischen den Kohlenstoffvorräten in der BZE I und BZE II konnten die Ursachen erklärt werden. Die Abweichungen sind auf Braunkohlereste, Beprobungsfehler in der BZE I und durch Streifenflug bedingte hohe Variabilität zurückzuführen.

Ohne diese extremen Abweichungen liegt die mittlere Differenz auf Profilebene hinsichtlich des Kohlenstoffvorrates bei 25,4 t/ha (+30 %) und einer rechnerischen jährlichen Zunahme von rund 1800 kg/ha.

Die Zunahmen im Kohlenstoffvorrat sind vor allem im Auflagehumus und im Oberboden bis 10 cm Bodentiefe beträchtlich: im Auflagehumus 7 t/ha (+46 %), im Mineralboden in der Tiefenstufe 0–5 cm 6,1 t/ha (+36 %) und 6 t/ha in 5–10 cm

(+75 %). In den Bodentiefen 10–30 cm lagen die Zunahmen bei 2,5 t/ha (+10 %), in 30–60 cm bei 3,6 (+24 %) und in 60–90 cm bei 1 t/ha (+14 %), jeweils bezogen auf die Vorräte der BZE I.

Die in der BZE I verwendete Methode der Nassveraschung zur Bestimmung von Kohlenstoff gilt grundsätzlich als vergleichbar mit der Elementaranalyse, die in der BZE II Anwendung fand (RIEK et al. 2015). Werden jedoch die Histogramme der in der BZE I und BZE II in Sachsen-Anhalt gemessenen C-Konzentrationen gegenübergestellt, dann zeigen sich deutlich häufiger geringe C-Konzentrationen unterhalb von 3 mg/g im BZE-I Datensatz als in der BZE II (Abb. 86). Diese Messungen treten überwiegend in den Tiefen 30–60 und 60–90 cm, also unteren Tiefenstufen, auf. Derart auffallend und gerichtet höhere C-Konzentrationen in der BZE II in diesen Bodentiefen mit sehr geringen C-Konzentrationen in der BZE I lassen eher methodische Unterschiede als ökologische Prozesse vermuten. Das damals angewendete Verfahren der Nassveraschung wird bei zunehmend geringerer C-Konzentration ungenauer. Je geringer die C-Konzentration, desto höher müssen z. B. die Einwaagen sein, insofern können trotz grundsätzlicher Methodenvergleichbarkeit auch laborspezifische Unterschiede bestehen. Direkte Vergleichsmessungen mit der Elementaranalyse zur damaligen Nassveraschung existieren nicht. Da prozessbedingte C-Zunahmen der gefundenen Größenordnung in den Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm sehr unwahrscheinlich und methodenbedingte Unterschiede sehr wahrscheinlich sind, sollten diese beiden Tiefenstufen mit ihren Kohlenstoffzunahmen aus der Bilanz genommen werden. Damit ergibt sich eine C-Speicherung für Sachsen-Anhalts Waldböden von 20,8 t/ha (+25 %) und einer rechnerischen jährlichen Zunahme von rund 1500 kg/ha.

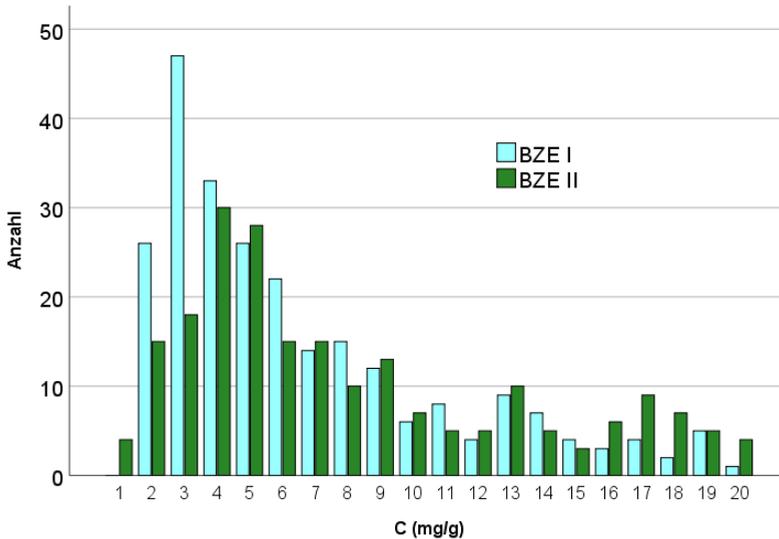


Abbildung 86: Verteilung der Kohlenstoffkonzentrationen [mg/g] im Mineralboden in der BZE I und BZE II unterhalb 20 mg/g, BZE I Horizontmittel, BZE II Tiefenstufenmittel

6.5.6.1 Kohlenstoffvorräte nach Substratgruppen

Wird die Verteilung der Kohlenstoffvorräte getrennt nach Substratgruppen betrachtet, ergibt sich folgendes Bild (s. Abb. 87):

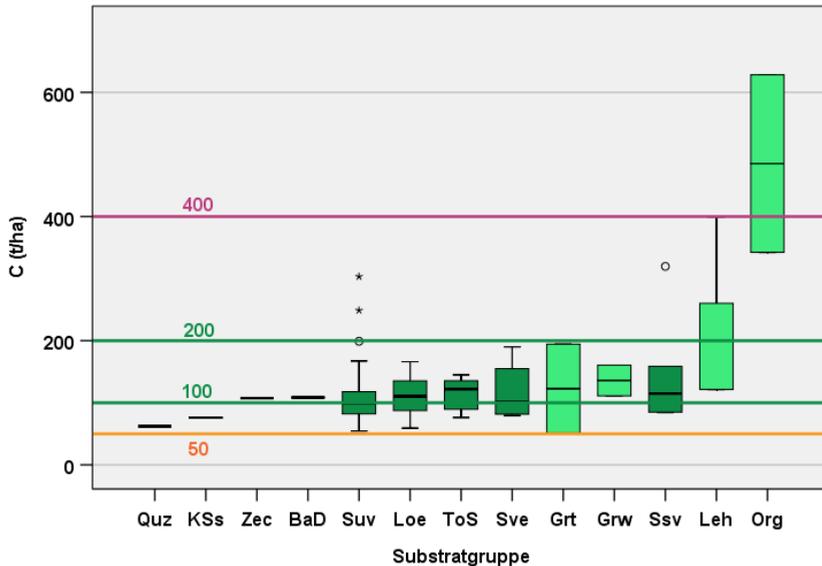


Abbildung 87: Verteilung der Kohlenstoffvorräte [t/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralböden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarz, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; hellgrün: n<4 BZE-Punkte, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148)

Die Verteilung der Kohlenstoffvorräte liegt bei fast allen Substratgruppen im mittleren Bewertungsbereich zwischen 100 und 200 t C/ha. Die höchsten mittleren Kohlenstoffvorräte zwischen 400 und 600 t C/ha weisen die organisch geprägten Standorte auf. Sie liegen mit ihren Kohlenstoffvorräten im sehr hohen Bewertungsbereich und heben sich damit deutlich von den anderen Substratgruppen ab. Die geringsten mittleren Kohlenstoffvorräte finden sich beim Quarz und Kreidesandstein. Von einzelnen Profilen abgesehen ist die Streuung der Kohlenstoffvorräte auf Profilebene bei Weitem geringer als bei den Hauptnährstoffen Calcium, Magnesium und Kalium.

Im Auflagehumus weisen die BZE-Punkte in der Substratgruppe Lösslehm mit rund 9 t/ha Kohlenstoff die geringsten Vorräte auf, die unverlehmtten und schwach verlehmtten Sande mit knapp 30 t/ha dagegen den rund dreifachen Kohlenstoffvorrat. Die BZE-Punkte in den Substratgruppen Tonschiefer und verlehmtte Sande lie-

gen mit 19 und 13 t/ha Kohlenstoff dazwischen (s. Abb. 88). Die jeweiligen Streuungen innerhalb der Substratgruppen sind beträchtlich, dennoch folgen die Kohlenstoffvorräte einem Muster: je reicher die Standorte, desto besser die Humusform und desto geringer die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus. Die relative Verteilung der Kohlenstoffvorräte in den einzelnen Tiefenstufen ist bei den unverlehmten und schwach verlehmten Sanden recht ähnlich: mit jeweils 26 % Anteil am Gesamtprofil hat der Auflagehumus die höchsten Anteile, gefolgt von der Tiefenstufe 30–60 cm mit 21–22 %. Im unteren Mineralboden (30–90 cm) sind nur noch zwischen 19–24 % des gesamten Kohlenstoffs im Profil gespeichert, d. h. der Auflagehumus und der obere Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe speichern den weit überwiegenden Teil von rund 80 %. Beim Tonschiefer ist das ähnlich, hier sind 84 % des Kohlenstoffs im oberen Mineralboden bis 30 cm gespeichert, die Anteile des Auflagehumus sind jedoch mit 16 % geringer. Mit rund 30 % Anteil des Kohlenstoffvorrates im Unterboden und relativ geringen Anteilen im Auflagehumus (8 und 11 %) heben sich Lösslehm und die verlehmten Sande von den anderen Substratgruppen ab.

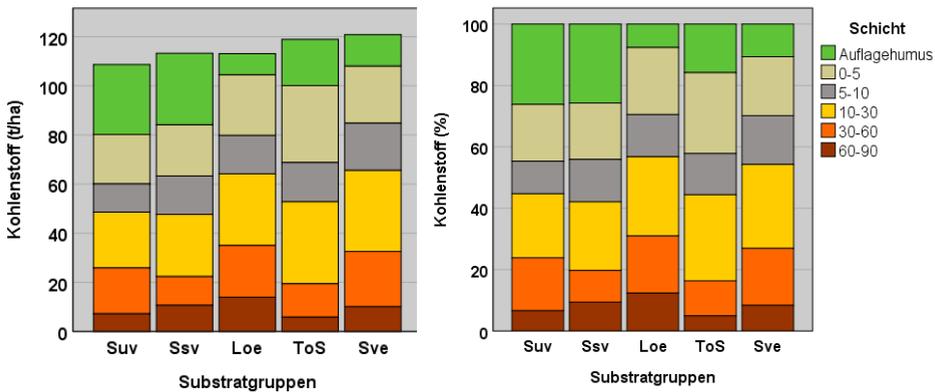


Abbildung 88: Kohlenstoffvorräte bei der BZE II im Auflagehumus und in den Tiefenstufen (0–5, 5–10, 10–30, 30–60, 60–90 cm) nach Substratgruppen in t/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer)

Hinsichtlich der Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden ergaben sich nur in der Substratgruppe unverlehmter Sand deutliche und signifikante Veränderungen (Abb. 89). Insgesamt auf Profilebene nahmen die Kohlenstoffvorräte mit 32,4 t/ha um 46 % bezogen auf den Kohlenstoffvorrat in der BZE I zu, besonders hohe Zunahmen zwischen 70–95 % waren im Oberboden bis 10 cm zu verzeichnen. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 60–90 cm waren alle Unterschiede signifikant. Ohne die Einbeziehung der Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm ergibt sich noch eine Zunahme von 28,1 t/ha.

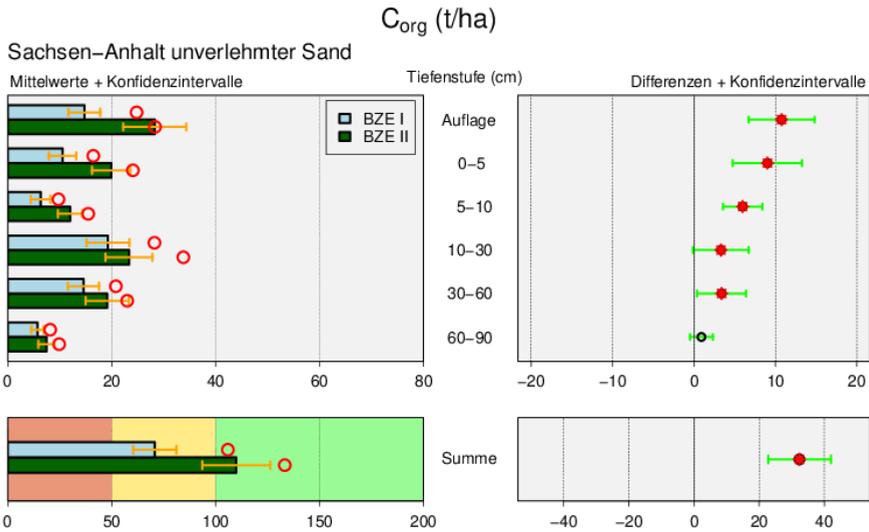


Abbildung 89: Kohlenstoffvorräte [t/ha] in sachsen-anhaltischen Waldböden für die Substratgruppe unverlehmter Sand als Mittelwert für die BZE I (n = 32) und II (n = 39) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 30) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.6.2 Kohlenstoffvorräte und Bestand

Der aufstockende Bestand beeinflusst die Kohlenstoffvorräte ebenfalls. Besonders unter Nadelholz sind höhere Vorräte im Auflagehumus zu erwarten. Dies wird in der Abbildung 90 ersichtlich. Die geringsten Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus fanden sich bei den Laubholzbeständen Eiche (3,9 t/ha), Buche (6,6 t/ha) und sonstigem Laubholz (8,2 t/ha) sowie die höchsten unter Kiefer (30,1 t/ha) und Fichte (32,8 t/ha). Dies steht auch im Zusammenhang mit den Substratgruppen: Je ärmer der Standort, desto höher sind die Anteile des Nadelholzes und damit die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus. Standortbedingt finden sich unter den Laubholzbeständen Substrate mit teilweise hohen Kohlenstoffvorräten (z. B. Buche und Lösslehm), sodass sich die Unterschiede Auflagehumus durch den Bestand wieder angleicht, wenn der Gesamtvorrat (Auflage mit Mineralboden) betrachtet wird.

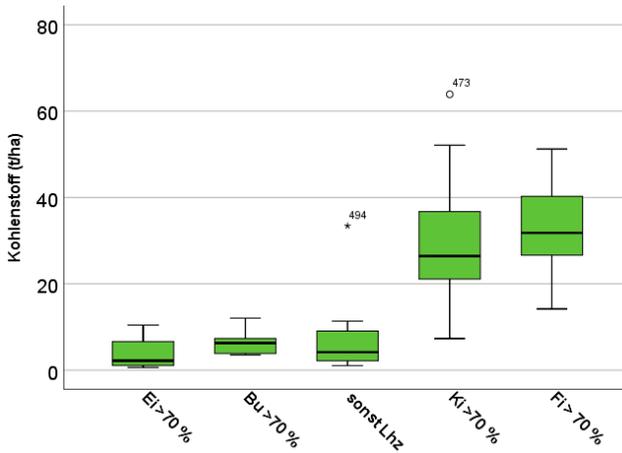


Abbildung 90: Kohlenstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus in Abhängigkeit von der Bestandeszusammensetzung (> 70 = Bestandesanteil größer als 70 %; Ndz = Nadelholz, Lbz = Laubholz)

In Abb. 91 sind die Differenzen der Kohlenstoffvorräte zwischen der BZE I und BZE II für den unverlehmten Sand in Sachsen-Anhalt in Abhängigkeit des Bestandesalters klassiert nach Altersklassen dargestellt. Es handelt sich überwiegend um Kiefernbestände (87 %), einbezogen sind nur BZE-Punkte, die sowohl in der BZE I als auch BZE II bestanden und beprobt wurden.

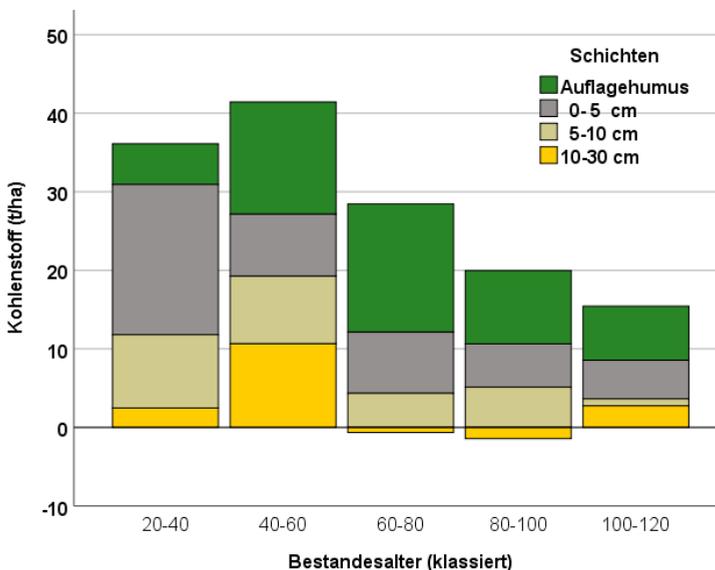


Abbildung 91: Veränderungen der Kohlenstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus und Mineralboden nach Tiefenstufen bis 30 cm Bodentiefe für den unverlehmten Sand nach Bestandesalter, klassiert nach Altersgruppen

Die höchsten Zunahmen an Kohlenstoff zwischen der BZE I und BZE II liegen in den Altersklassen 20–40 und 40–60, die Zunahmen werden absolut mit zunehmendem Bestandesalter geringer. Mit 15 t/ha Kohlenstoff in der Altersklasse 100–120 Jahre werden noch rund 40 % Kohlenstoff im Vergleich zur Altersklasse 40–60 Jahre gespeichert. Die höchsten Speicherraten treten im Auflagehumus und oberen Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe auf, in den unteren Tiefenstufen sind die Speicherraten in der Regel geringer. Sehr hohe Speicherraten wurden in der Tiefenstufe 0–5 cm in der Altersklasse 20–40 sowie im Auflagehumus in den Altersklassen 60–80 und 40–60 Jahren festgestellt.

6.5.7 Stickstoff

Stickstoff (N) als ein wichtiger Makronährstoff ist von Natur aus in Waldökosystemen mit wenigen Ausnahmen nur in geringen Mengen vorhanden und damit zu meist wachstumslimitierend. Stickstoff kommt kaum in Gesteinen vor, reichert sich aber im Laufe der Zeit über Naturereignisse wie Gewitter beziehungsweise biologische Stickstoffbindung aus der Luft mit organischer Substanz im Boden an. In der Pflanzensubstanz ist Stickstoff Hauptnährelement und wird im Waldboden über die Blatt- und Wurzelstreu, das Wurzelwachstum und die bodenbiologische Aktivität angereichert. Durch intensive Streu-, Plaggen- und Holznutzung in der vorindustriellen Zeit sind vielerorts die Stickstoffvorräte in den Wäldern deutlich zurückgegangen. Entsprechende Einschränkungen des Baumwachstums und der Flächenproduktivität waren die Folge. Die unterschiedlich ausgeprägten frühen Stickstoffnutzungen tragen zu einer großen räumlichen Variabilität der Stickstoffvorräte in Waldökosystemen bei. Im Zuge der relativ hohen atmogenen Stickstoffeinträge der letzten Jahrzehnte haben sich die Stickstoffvorräte in den Wäldern gegenüber der vorindustriellen Zeit wieder erholt bzw. erhöht. Dies ging teilweise mit einem merklich erhöhten Zuwachs der Waldbäume einher. Liegen die Stickstoffeinträge über dem Bedarf der Wälder, kann es je nach Standort und Region zu Austrägen mit dem Sickerwasser in das Grundwasser oder zu gasförmigen Verlusten kommen. Der Eintrag von Ammonium-Stickstoff hat eine versauernde Wirkung und der Nitrataustrag führt über einen Verlust an basischen Kationen zu einer Verarmung der Böden und belastet zudem das Grundwasser. Überhöhte Stickstoffeinträge haben weiterhin zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung in der Waldbodenvegetation geführt.

In Abbildung 92 sind die durchschnittlichen Stickstoffvorräte für alle Waldböden in Sachsen-Anhalt nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Gesamtprofil bis 90 cm Bodentiefe dargestellt.

Die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und in den Waldböden Sachsen-Anhalts bis 90 cm Bodentiefe liegen bei der BZE II mit durchschnittlich rund 7,6 t/ha Stickstoff im mittleren Bewertungsbereich nach der Forstlichen Standortsaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003; s. Tab. 11, S. 148). Der Auflagehumus hat mit

1,02 t/ha Stickstoff dabei einen Anteil von 13 %. Im Vergleich zu den Bundesländern Niedersachsen und Hessen liegen die Stickstoffvorräte der BZE II in Sachsen-Anhalt etwas höher. Dies kann analog zum Kohlenstoff vor allem auf die höheren Auflage- und Feinbodenvorräte in Sachsen-Anhalt zurückgeführt werden. Die summierten Stickstoffvorräte der BZE II in Sachsen-Anhalt von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe streuen von 2,7 t/ha bis zu über 42 t/ha Stickstoff. Die geringsten Stickstoffvorräte im BZE-Kollektiv in Sachsen-Anhalt finden sich bei einem Ranker aus Quarzit im Harz bei Ilsenburg, der schon bei Calcium, Magnesium und Kalium auffällig war, die höchsten Stickstoffvorräte in einem Erdniedermoor bei Ziesar im Osten Sachsen-Anhalts.

Ähnlich wie beim Kohlenstoffvorrat sind in den oberen 30 cm Mineralboden mit rund 5 t/ha Stickstoff insgesamt 66 % der Stickstoffvorräte bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Stickstoff ist vor allem in organischer Substanz gebunden, die weit aus überwiegend im oberen Mineralboden mit entsprechend höheren Anteilen vertreten ist (0–5 cm 16 %, 5–10 cm 11 % und 10–30 cm 26 %). Dennoch sind die Anteile der Tiefenstufe 30–60 cm am Stickstoffvorrat mit 21 % und der Tiefenstufe 60–90 cm mit 13 % nicht unbedeutend. Die prozentuale Tiefenverteilung der Stickstoffvorräte war bei der BZE I nahezu identisch.

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 60–90 cm sind in allen Tiefenstufen und im Auflagehumus die Veränderungen im Vergleich zur BZE I signifikant. Der Stickstoffvorrat im Auflagehumus erhöhte sich um 43 % bezogen auf den Vorrat der BZE I. Im oberen Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe kam es analog zum Kohlenstoff ebenfalls zu sehr hohen Zunahmen: 32 % in der Tiefenstufe 0–5 cm und 49 % in 5–10 cm. Im tieferen Mineralboden lagen die Zunahmen zwischen 11 und 24 % bezogen auf den Vorrat in der BZE I. Summiert auf Profilebene berechnet sich ein höherer Stickstoffvorrat von 1460 kg/ha und damit ein prozentualer rechnerischer Zuwachs um 23 % bezogen auf den Vorrat der BZE I.

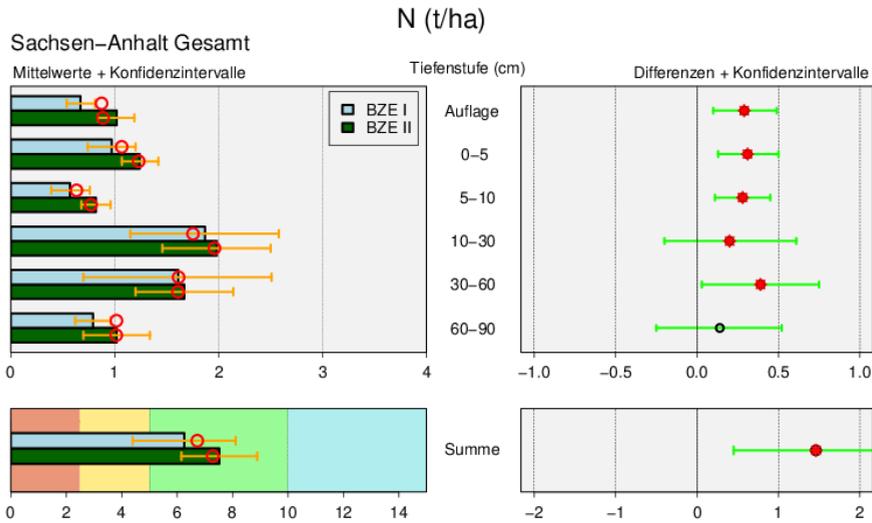


Abbildung 92: Stickstoffvorräte [t/ha] in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Analog zu Kohlenstoff treten auch bei den Stickstoffvorräten extreme Unterschiede zwischen den BZE-Erhebungen auf, die nicht auf Speicherraten, sondern extreme standörtlich Unterschiede zurückgeführt werden müssen. Dies umfasst organisch geprägte Standorte, aber auch Vegaböden und eine Aufschüttung nach Kohleabbau, insgesamt 5 Standorte. Ohne diese Extreme ergibt sich eine mittlere Zunahme von 1150 kg je ha und Jahr, dies entspricht einer jährlichen Zunahme von 82 kg/ha. Diese Zunahme ist dennoch ungewöhnlich hoch.

Die in der BZE I verwendete Methode der N-Bestimmung nach Kjeldahl gilt als vergleichbar mit der Elementaranalyse, die in der BZE II Anwendung fand (HÜBSCH u. NEHRING 1960, RIEK et al. 2015). Werden jedoch die Histogramme der in der BZE I und BZE II in Sachsen-Anhalt gemessenen N-Konzentrationen analog zum Kohlenstoff gegenübergestellt, dann zeigen sich analog zum Kohlenstoff deutlich häufiger geringe N-Konzentrationen unterhalb von 0,4 mg/g im BZE-I Datensatz als in der BZE II (Abb. 93). Diese Messungen treten ebenfalls überwiegend in den Tiefen 30–60 und 60–90 cm, also unteren Tiefenstufen, auf. Derart auffallend und gerichtet höhere N-Konzentrationen in der BZE II in diesen Bodentiefen mit grundsätzlich sehr geringen N-Konzentrationen in der BZE I lassen ebenfalls eher methodische Unterschiede als ökologische Prozesse vermuten. Das Kjeldahl-Verfahren zur N-Bestimmung wird ebenso wie die Nassveraschung für die C-Bestimmung bei zunehmend geringeren N-Konzentration ungenauer. Je geringer die N-Konzentration, desto höher müssen die Einwaagen sein, insofern können trotz

grundsätzlicher Methodenvergleichbarkeit auch laborspezifische Unterschiede auftreten. Direkte Vergleichsmessungen mit der Elementaranalyse zum Kjeldahl-Aufschluss für die BZE I Proben existieren nicht. Da prozessbedingte N-Zunahmen analog zum Kohlenstoff der gefundenen Größenordnung in den Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm sehr unwahrscheinlich und methodenbedingte Unterschiede eher wahrscheinlich sind, sollten diese beiden Tiefenstufen mit ihren Stickstoffzunahmen aus der Bilanz genommen werden. Damit ergibt sich noch eine N-Speicherung für Sachsen-Anhalts Waldböden von 1000 kg/ha (+16 %) und einer rechnerischen jährlichen Zunahme von rund 70 kg/ha, einer immer noch sehr hohen, ungewöhnlichen Zunahme.

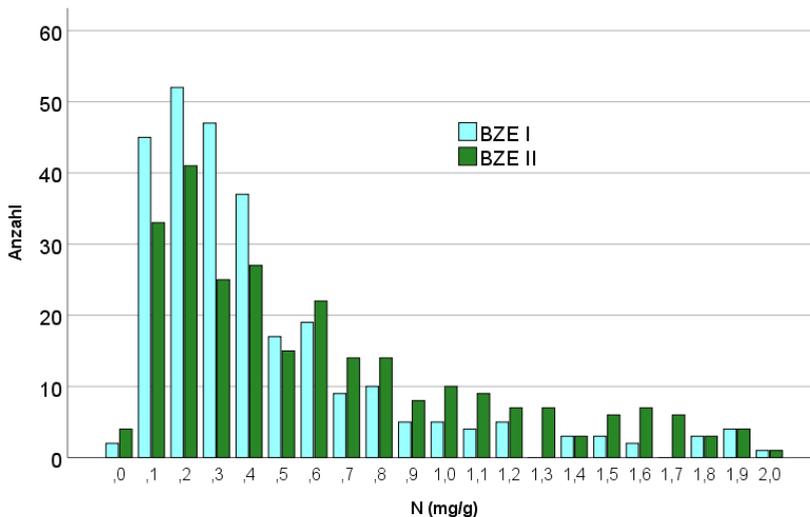


Abbildung 93: Verteilung der Stickstoffkonzentrationen [mg/g] im Mineralboden in der BZE I und BZE II unterhalb von 2 mg/g, BZE I Horizontmittel, BZE II Tiefenstufenmittel

6.5.7.1 Stickstoffvorräte nach Substratgruppen

Die Verteilung der Stickstoffvorräte nach Substratgruppen ist in Abbildung 94 dargestellt.

Die mittleren Stickstoffvorräte der jeweiligen Gesamtprofile nach Substratgruppen fallen analog zur Verteilung beim Kohlenstoff überwiegend in den mittleren Bewertungsbereich zwischen 5 und 10 t/ha. Wie bereits bei den Kohlenstoffvorräten weisen Quarzit und Kreidesandstein sehr geringe Stickstoffvorräte auf, bei den Lehmen und organisch geprägten Standorten treten die höchsten Stickstoffvorräte auf. Der Median der Substratgruppe unverlehmter Sand liegt mit 5 t/ha gerade noch im mittlerem Bewertungsbereich. Die (schwach) verlehnten Sande mit 6,4 t/ha Stickstoff sind etwas besser versorgt.

Insgesamt ähnelt die Spanne der mittleren Stickstoffvorräte bezogen auf die Substratgruppen der Spanne bei den Kohlenstoffvorräten und ist damit wesentlich enger als bei den Nährelementen Calcium, Magnesium und Kalium.

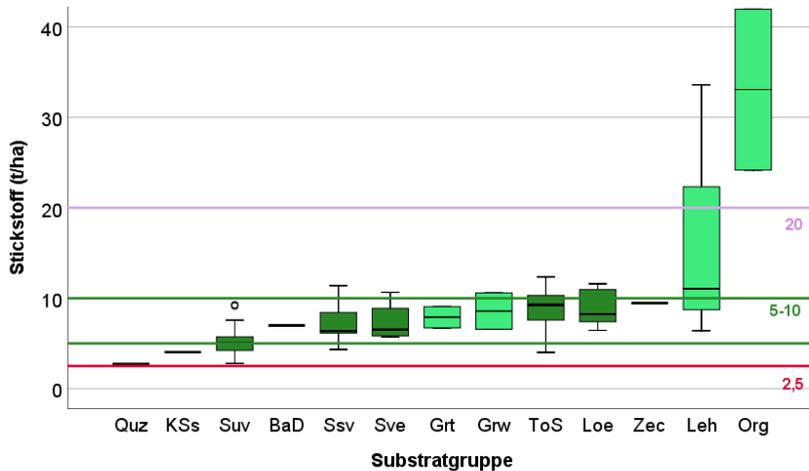


Abbildung 94: Verteilung der Stickstoffvorräte [t/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarz, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; hellgrün: $n < 4$ BZE-Punkte, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148)

Die Verteilung der Stickstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden nach Substratgruppen wird aus Abbildung 95 ersichtlich und ist in den Substratgruppen relativ ähnlich.

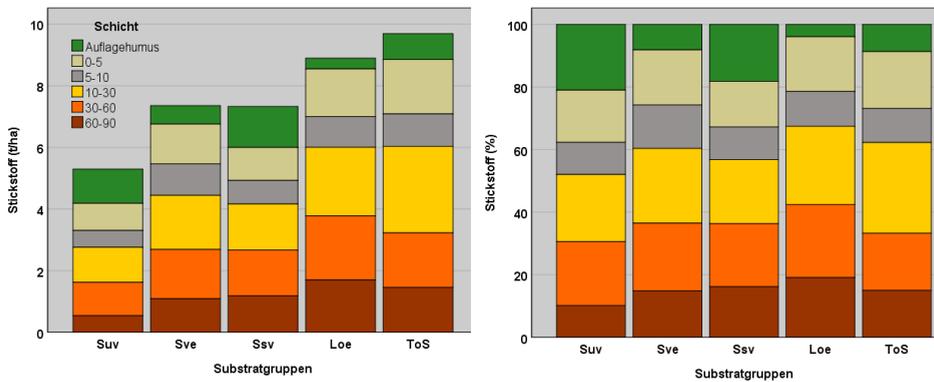


Abbildung 95: Stickstoffvorräte im Auflagehumus und in den Tiefenstufen (0–5, 5–10, 10–30, 30–60, 60–90 cm Bodentiefe) nach Substratgruppen bei der BZE II in Sachsen-Anhalt in t/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Diese Verteilung entspricht ungefähr der von Kohlenstoff. Die höchsten Stickstoffvorräte im Auflagehumus finden sich bei den Substratgruppen unverlehmter Sand und schwach verlehmtter Sand, die geringsten beim Lösslehm. Dieser Befund passt zu der Verteilung der Nährstoffe, je besser ein Substrat versorgt ist, desto geringer sind die Vorräte in der Auflage. Ohne den Auflagehumus ist die Verteilung der Stickstoffvorräte nach Tiefenstufen zwischen den Substratgruppen sehr ähnlich.

Die im BZE-Gesamtkollektiv festgestellten Zunahmen der Stickstoffvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen im Mineralboden bis 60 cm Bodentiefe waren in den Substratgruppen nur in der Tiefenstufe 5–10 cm beim Lösslehm und in der Substratgruppe unverlehmter Sand im Auflagehumus, 0–5 cm und 5–10 cm signifikant. In dieser Substratgruppe gab es in der Tiefenstufe 60–90 cm sogar eine signifikante Abnahme um 20 % bezogen auf den Vorrat der BZE I in dieser Tiefenstufe. Nur für den unverlehmten Sand konnte auf Gesamtprofilebene ein signifikant erhöhter Stickstoffvorrat belegt werden (+1,05 t/ha, +26 %) (s. Abb. 96). In den Tiefenstufen der verschiedenen Substratgruppen traten überwiegend nur Zunahmen im Stickstoffvorrat auf, die ließen sich jedoch nicht statistisch absichern.

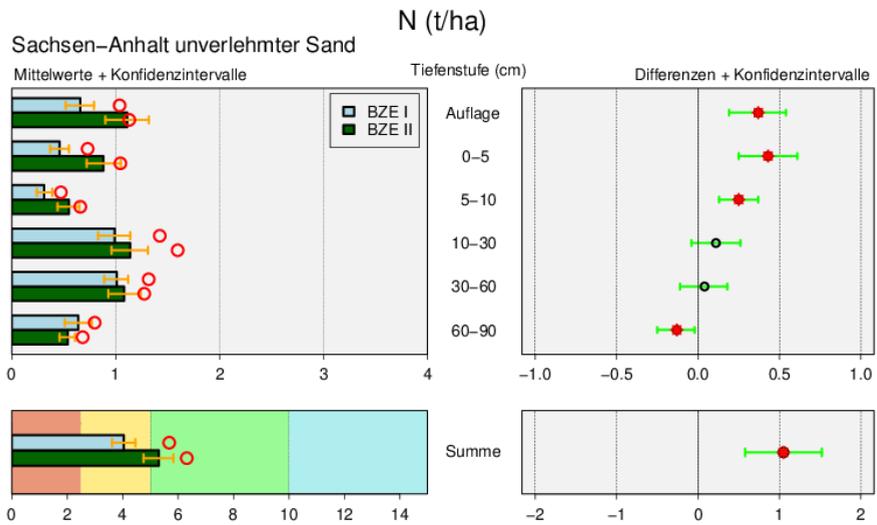


Abbildung 96: Stickstoffvorräte [t/ha] in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 32$) und II ($n = 39$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 30$) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.7.2 Stickstoffvorräte und Bestand

Der Stickstoffvorrat im Auflagehumus wird wie der Kohlenstoffvorrat durch den aufstockenden Bestand beeinflusst. Die Nadelholzbestände mit Fichte und Kiefer von Bestandesanteilen über 70 % liegen bei den 3–4-fachen Stickstoffvorräten im Vergleich zu den Buchen- und Eichenbeständen (s. Abb. 97).

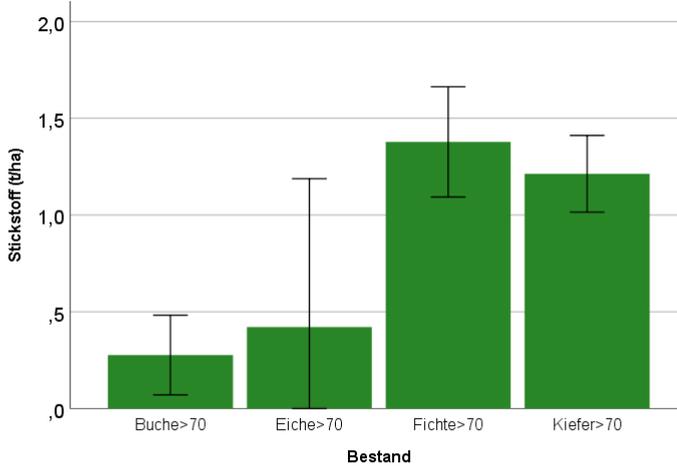


Abbildung 97: Stickstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus in Abhängigkeit von der Bestandeszusammensetzung (> 70 = Bestandesanteil größer als 70 %)

In Abb. 98 sind analog zu Kohlenstoff die Differenzen der Stickstoffvorräte zwischen der BZE I und BZE II für den unverlehmten Sand in Sachsen-Anhalt in Abhängigkeit des Bestandesalters klassiert nach Altersklassen dargestellt.

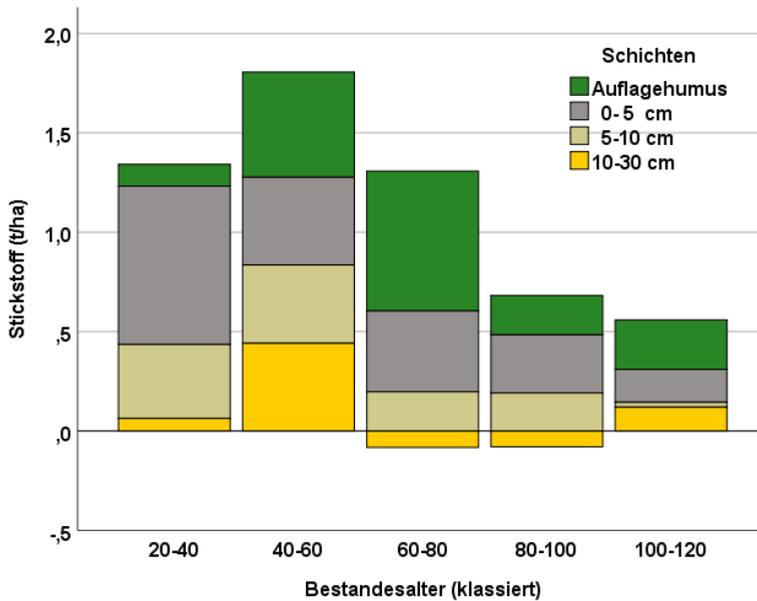


Abbildung 98: Veränderungen der Stickstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus und Mineralboden nach Tiefenstufen bis 30 cm Bodentiefe für den unverlehmten Sand nach Bestandesalter, klassiert nach Altersgruppen

Wie beim Kohlenstoff liegen die höchsten Zunahmen an Stickstoff zwischen der BZE I und BZE II in den Altersklassen 20–40 und 40–60 Jahren, die Zunahmen werden absolut mit zunehmendem Bestandesalter geringer. Im Unterschied zu Kohlenstoff sind die Stickstoffzunahmen in der Altersklasse 60–80 Jahren höher und nur geringfügig geringer als in der Altersklasse 20–40 Jahren. Mit 0,6 t/ha Kohlenstoff in der Altersklasse 100–120 Jahre werden noch rund 35 % Kohlenstoff im Vergleich zur Altersklasse 40–60 Jahre gespeichert. Die höchsten Speicherraten treten im Auflagehumus und oberen Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe auf, in den unteren Tiefenstufen sind die Speicherraten in der Regel geringer. Sehr hohe Speicherraten wurden analog zu Kohlenstoff in der Tiefenstufe 0–5 cm in der Altersklasse 20–40 sowie im Auflagehumus in den Altersklassen 40–60 und 60–80 Jahren festgestellt.

6.5.8 C/N-Verhältnisse

Die C/N-Verhältnisse berechnen sich als Quotient aus Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat (bzw. Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt). Sie sind ein Indikator für die Umsetzungsbedingungen der organischen Substanz. Je enger die Verhältnisse sind, desto höher sind die Humusmineralisations- und -umsetzungsraten und damit die Stickstoffversorgung der Waldbestände. Ein weites C/N-Verhältnis kennzeichnet eine geringe Sättigung mit Stickstoff im Auflagehumus oder Mineralboden und zeigt eine eher geringe biologische Aktivität an. In der Regel wird der Oh-Horizont im

Auflagehumus bewertet, bei Mull-Standorten der Ah-Horizont (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). In Abbildung 99 sind die C/N-Verhältnisse für den Auflagehumus und alle Tiefenstufen sowie für das Gesamtprofil angegeben. Im Vergleich zum Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt sind die C/N-Verhältnisse in Sachsen-Anhalt in der BZE II im Oberboden bis 30 cm etwas enger, im Unterboden ab 30 cm Bodentiefe etwas weiter.

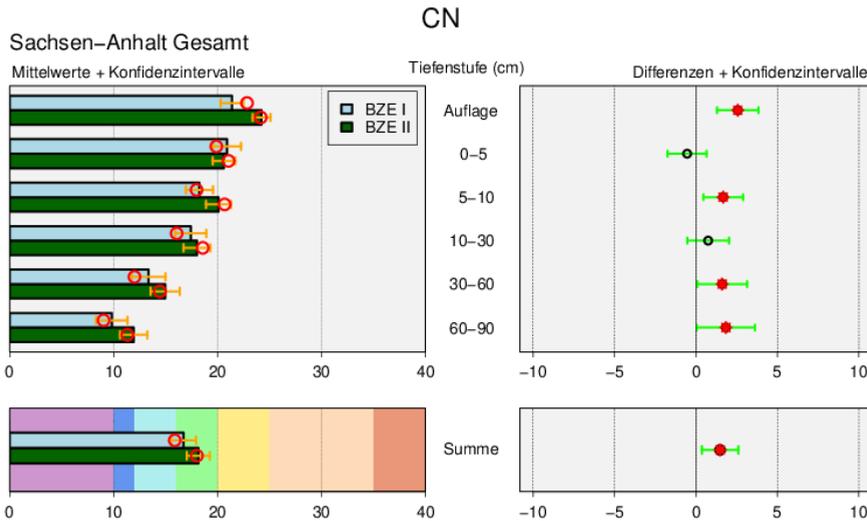


Abbildung 99: C/N-Verhältnisse in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ($n = 66$) und II ($n = 76$) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ($n = 64$) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die durchschnittlichen C/N-Verhältnisse im Auflagehumus der BZE II liegen mit 24 auf der Grenze zwischen dem weiten bis mäßig weiten Bewertungsbereich nach der AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) (s. auch Tab. 11, S. 148) und sind typisch für Waldstreu. Sie haben sich im Vergleich zur BZE I (21) signifikant geweitet und damit verschlechtert. Mit zunehmender Bodentiefe verengen sich die C/N-Verhältnisse bis auf C/N 10 (BZE I) im Unterboden, da die Kohlenstoffvorräte mit zunehmender Bodentiefe relativ stärker abnehmen als die Stickstoffvorräte. Mit Ausnahme der Tiefenstufen 0–5 cm und 10–30 cm erhöhten sich die C/N-Verhältnisse von der BZE I zur BZE II im Mineralboden signifikant um rund 2. Dies geht vor allem auf die deutlich gestiegenen Kohlenstoffvorräte zurück. Die Veränderung ist auch auf Profilebene signifikant (+1,5, s. Abb. 99, Teilgrafik d).

6.5.8.1 C/N-Verhältnisse nach Substratgruppen

Für die einzelnen Substratgruppen sind in Abbildung 100 nur die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus und im oberen Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe angegeben. Die C/N-Verhältnisse der tieferen Bodenschichten unter 10 cm Bodentiefe verringern sich mit zunehmender Bodentiefe auch in den Substratgruppen ähnlich dem Gesamtkollektiv deutlich, lassen sich aber hinsichtlich der Umsetzungsbedingungen nicht sinnvoll interpretieren. Sie sind daher nicht grafisch dargestellt.

Die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus liegen beim schwach- und verlehmtten Sand sowie beim Tonschiefer im mittleren bis mäßigem Bewertungsbereich nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2003 zwischen 20 und 25. Die Verhältnisse haben sich gegenüber der BZE I leicht verschlechtert. Beim unverlehmtten Sand und Lösslehm verschlechterten sich die C/N-Verhältnisse in der BZE II bis in den geringen Bereich zwischen C/N 25–35 deutlich, der Lösslehm war in der BZE I noch im mittleren Bewertungsbereich. Mit zunehmender Bodentiefe verbessern sich die C/N-Verhältnisse beim Lösslehm und Tonschiefer, bei den Sanden sind nur leichte, kaum relevante Veränderungen feststellbar.

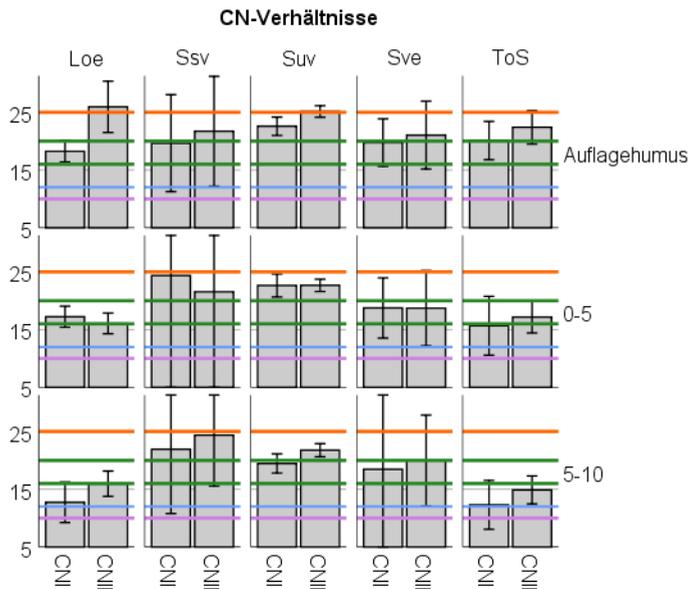


Abbildung 100: C/N-Verhältnisse bei der BZE I und II nach Substratgruppen für den Auflagehumus und die Tiefenstufen 0–5 cm und 5–10 cm in Sachsen-Anhalt mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; die grünen Linien kennzeichnen den mittleren Bewertungsbereich, Werte oberhalb der orangen Linie kennzeichnen den weiten und unterhalb der blauen Linie den engen Bewertungsbereich bzw. sehr engen unterhalb der magentafarbenen Linie; s. Tab. 11, S. 148)

6.5.8.2 C/N-Verhältnisse nach Bestandstypen

Die C/N-Verhältnisse in den Fichten- und Kiefernbeständen sind in der Regel weiter als die in den Laubholzbeständen mit Buche und Eiche. In den Kiefernbeständen sind die C/N-Verhältnisse noch etwas weiter als bei der Fichte. Im Auflagehumus unter den Buchenbeständen haben sich die C/N-Verhältnisse zwischen der BZE I und BZE II erheblich verschlechtert, dies zeigt sich abgeschwächt auch bei der Eiche. Sonst traten nur geringfügige Veränderungen auf.

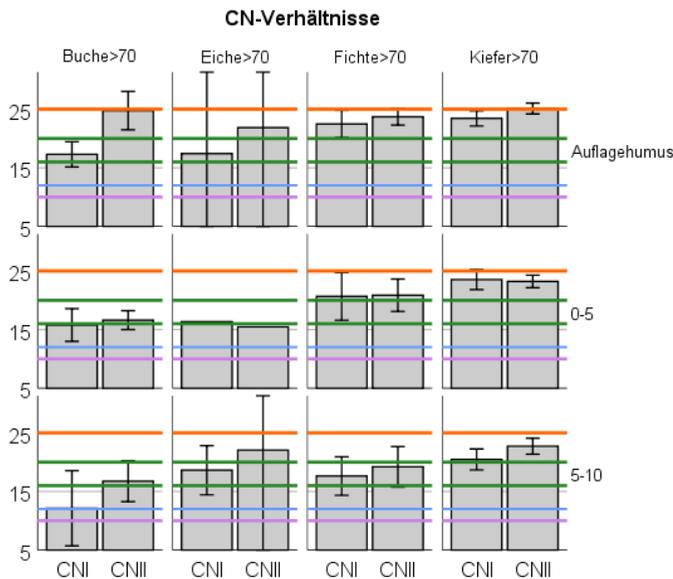


Abbildung 101: C/N-Verhältnisse bei der BZE I und II nach Bestand für den Auflagehumus und die Tiefenstufen 0–5 cm und 5–10 cm in Sachsen-Anhalt mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Sw: unverlehmtter Sand, Svc: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; die grünen Linien kennzeichnen den mittleren Bewertungsbereich, Werte oberhalb der orangen Linie kennzeichnen den weiten und unterhalb der blauen Linie den engen Bewertungsbereich bzw. sehr engen unterhalb der magentafarbenen Linie; > 70 = Bestandesanteil größer als 70 %, s.a. Tab. 11, S. 148)