

7 Flugasche, Düngung, Waldkalkung und Bodenbearbeitung

Jan Evers, Bernd Abrends

Durch den Eintrag von Luftschadstoffen sind aktuell die wirkungsbezogenen Belastungsgrenzen, die Critical Loads (CL) für Versauerung und Eutrophierung, in vielen Wäldern von Sachsen-Anhalt überschritten (HELBIG et al. 2020; SCHAAP et al. 2018). Der Begriff Critical Loads bezeichnet eine Belastungsgrenze für ein ausgewähltes Schutzgut, unterhalb der nach dem bisherigen Kenntnisstand keine schädigenden Effekte zu erwarten sind (SCHULZE et al. 1989). Obwohl die durchschnittliche Stickstoff (N)-Deposition seit 1990er Jahren zurückgegangen ist, zeigen die Waldökosysteme nur eine geringe Reaktion auf die verringerten Eintragsraten (SCHMITZ et al. 2019) und entsprechend werden immer noch große Mengen an Stickstoff in den Waldböden zwischengespeichert (FLECK et al. 2019, BRUMME et al. 2021). Durch nationale und internationale Luftreinhaltemaßnahmen konnten die Sulfat Einträge wesentlich stärker reduziert werden (ENGARDT et al. 2017). Die Auswirkungen der hohen Eintragsraten sind jedoch noch heute allgegenwärtig (RIEK et al. 2021). Die Intensität der Auswirkungen ist jedoch in den einzelnen Regionen des Landes sehr unterschiedlich. So galt z. B. das bedeutende Industriedreieck Leipzig-Halle-Bitterfeld als eines der am stärksten verschmutzten Gebiete Deutschlands. Große Braunkohlekraftwerke und Chemiekombinate emittierten Millionen Tonnen Flugasche und andere gasförmige Verbindungen, die bis heute die ursprünglichen Standortseigenschaften überprägen. Ammoniumchlorid und Lösungsmittel aus der Filmfabrikation, Schwefelkohlenstoff aus der Viskosefaserherstellung und weitere diverse Schadstoffe wie Chlor, Fluor, Chlorwasserstoff, Schwefelwasserstoff und organische Verbindungen kamen hinzu, fehlende Filtertechnik und veraltete Anlagen verschärften die Umweltbelastungen. Emissionen aus Hausbrand, der landwirtschaftlichen Produktion und von Kohlekraftwerken können bei hohen Ausbreitungsreichweiten auch außerhalb von Ballungsräumen weiter entfernte Waldgebiete beeinflussen. Braunkohle mit einem relativ hohen Gehalt an Schwefelverbindungen stellte in der ehemaligen DDR die wichtigste Basis für Energieerzeugung und Chemieproduktion dar. Auskämmungseffekte der überwiegenden Nadelholzbestände aus Kiefer und Fichte erhöhten die Einträge in die Waldbestände zusätzlich (AHRENDTS et al. 2018a, 2020, MILNIK 2013, FÜRST et al. 2009, HOLZ 2007, ENDERS 2007, FRITZ und MAKESCHIN 2007). In Abb. 102 sind die Sedimentationsstaub-Immissionen im Raum Bitterfeld für den Zeitraum 1936–1990 dargestellt. Im Schwerpunkt wurden zwischen 1960 bis 1972 zwischen 20–45 t Staub je Hektar und Jahr emittiert, überwiegend durch Flugascheauswurf der Braunkohlekraftwerke (ALBRECHT 2009).

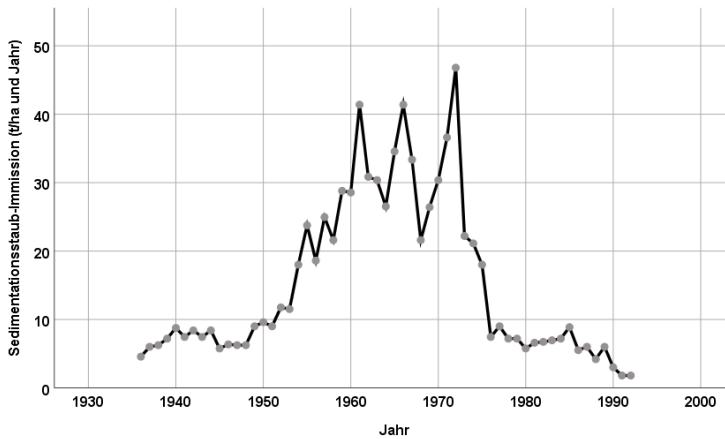


Abbildung 102: Sedimentationsstaub-Immissionen im Raum Bitterfeld zwischen 1932–1992 (nach ALBRECHT 2007, 2009, verändert)

Infolge dieser Einträge traten regional flächenhaftes Absterben, Verlichtungserscheinungen und Zuwachsverluste in den betroffenen Wäldern auf, zumeist handelte es sich um Kiefernbestände. Die Bestandesstrukturen lösten sich auf und dichte Decken von Landreitgras konnten sich ausbreiten. Das Immissionsgeschehen bestimmte in besonders betroffenen Regionen die Praxis der Bestandespflege. Entsprechend beschränkten sich in mittelalten- und alten Beständen die durchgeführten waldbaulichen Maßnahmen auf die Entnahme abgestorbener oder stark geschädigter Kiefern in einem Turnus von 2–5 Jahren. Massenvermehrungen einer Vielzahl von Schadinsekten setzten den Beständen zusätzlich zu. Forstliche Rauchschadenszonen wurden ausgewiesen, die als Basis für gerichtlich durchgesetzte Ausgleichszahlungen der Industriebetriebe an die Forstwirtschaft herangezogen wurden. Die bereitgestellten Finanzmittel wurden für die Sanierung, Wiederaufforstung und Waldpflege aufgewendet (ALBRECHT 2007, ENDERS 2007, BENDIX 2009, 2007). Da die Ausgleichszahlungen in die Jahrespläne der Industriekombinate eingestellt werden konnten, führten sie jedoch nicht zu der beabsichtigten Vermeidung der Schadstoffimmissionen (BENDIX 2007).

Um Waldbestände zu stabilisieren, wurden mehrfach großflächig per Kleinflugzeug erhebliche Mengen an Stickstoff (bis zu 120 kg pro Jahr und Hektar) ausgebracht. Die umfangreichsten Düngungen erfolgten im Raum Bitterfeld in den Jahren 1977–1979 mit einer gedüngten Waldfläche von insgesamt über 11.000 ha. Die Bestände reagierten mit einer Steigerung des Höhenzuwachses und der Nadelmasse, die Absterberaten verminderten sich (BENDIX 2009, KAINZ 2007). In Verbindung mit dem Eintrag der kalkhaltigen Flugasche ergab sich jedoch eine deutliche Überdüngung der Bestände. Neben einer erheblichen Stickstoffübersättigung stellten sich auch bodenchemische Verhältnisse fernab von Zuständen in natürlichen Systemen ein. FÜRST et al. (2009) berichten von pH-Werten zwischen 7–9 in Humusauflagen

von durch Flugasche beeinflussen Waldbeständen. Ohne Flugascheeinfluss würde der pH-Wert bei vergleichbaren Standorten zwischen 3–4 liegen. Die Stoffeinträge, vor allem die alkalischen Flugaschen, veränderten die Streu- und Substratqualität sowie die chemischen Eigenschaften der Oberböden nachhaltig. Neben höheren pH-Werten wurden deutlich erhöhte Vorräte an austauschbarem Calcium und Magnesium im Mineralboden festgestellt. Die Basensättigung in Oberböden der durch Flugasche beeinflussten Standorte –überwiegend unverlehmte Sande– erreichte das Niveau von Carbonatstandorten.

Deutliche Rückgänge der Flugasche und Schwefeleinträge waren erst nach 1990 zu verzeichnen. Obwohl durch Rauchfilter die Flugascheeinträge in den 1980er Jahren zurückgingen, stiegen die Schwefeleinträge über die Kohleverbrennung jedoch noch bis zum Ende der 80er Jahre weiter an. Im Vergleich zu 1991 lagen im Jahr 2018 die Feinstaubeträge bei 30 %, die Schwefeldioxideinträge bei 3 % und die Stickstoffdioxideinträge bei 45 % (ausgewählte Messstationen in Sachsen-Anhalt, LAU 2019).

Wie regional unterschiedlich die Niveaus und die Änderungsraten sein können, zeigt die Abb. 103. Dargestellt ist die Gesamtdeposition von 6 Standorten mit Depositionsmessungen in Kiefernbeständen aus zwei sehr unterschiedlich durch Emissionen belasteten Regionen in Sachsen-Anhalt. Die erste Region liegt nordöstlich von Magdeburg mit Beständen in Colbitz und Dolle. Weitere drei Bestände liegen im Dreiländereck der Bundesländer Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen in Wittenberg und Radis. Die dargestellten Gesamtdepositionen für den Zeitraum von 1985–1989 wurden anhand der Daten von SIMON u. WESTENDORF (1991) mit dem Kronenraumbilanzmodell von ULRICH (1994) ermittelt. Für den Zeitraum von 2000–2015 entstammen die Daten den Modellierungen des Umweltbundesamtes (SCHAAP et al. 2018). Auch wenn die beiden Datensätze nicht einer homogenen Methodik (daher sind die Punkte nicht durch Trendlinien verbunden) entstammen und insbesondere bei der Ermittlung der Stickstoffgesamtdeposition mit hohen Unsicherheiten gerechnet werden muss (vgl. AHRENDTS et al. 2020), zeigen die Daten eindrucksvoll die Größenordnung der Depositionsbelastungen in den 1980er Jahren in Sachsen-Anhalt. Sie können je nach Depositionstyp (Schwefel-Typ, Kalisalz-Typ, Stickstofftyp, Schwefel-Kalk-(Flugaschen-)Typ usw.; vgl. HOFMANN u. HEINSDORF 1990 sehr unterschiedlich ausfallen. So zeigte der Bestand in Wittenberg in der Vergangenheit bei allen Elementen hohe Belastungen durch die unmittelbare Nähe zu chemischen und anderen Produktionsanlagen (u.a. Stickstoffindustrie). Charakteristisch für hohe Belastungen mit Flugaschen aus der Braunkohlenverwertung sind die Bestände in Radis mit sehr hohen Calcium- und Sulfatdepositionen. Demgegenüber sieht man an den Standorten im Raum Colbitz/Dolle an den hohen Kaliumeinträgen in der Vergangenheit den deutlichen Einfluss der Kaliindustrie in dieser Region (z. B. Kaliwerk Zielitz). Die jeweiligen Depositionstypen sind durch unterschiedliche waldschadensverursachende Ausprägungen gekennzeichnet (HOFMANN u. HEINSDORF (1990).

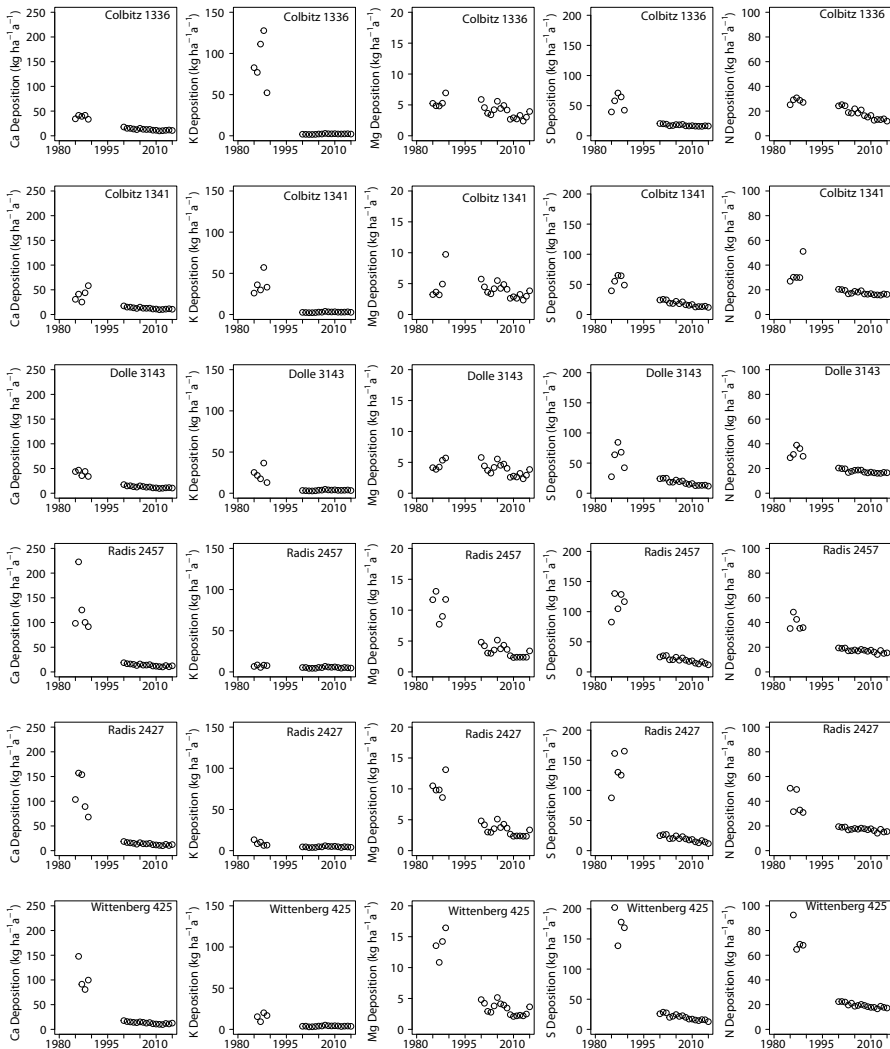


Abbildung 103: Entwicklung der Gesamtdosition von Calcium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg), Schwefel (S) und Stickstoff (N) an 6 Kiefernstandorten in Sachsen-Anhalt (Datengrundlage: SIMON u. WESTENDORFF 1991, SCHAAP et al. 2018, weitere Hinweise siehe Text)

Neben den klassischen Rauchschäden v.a. durch Schwefeldioxid traten seit Beginn der achtziger Jahre erste Anzeichen der neuartigen Waldschäden in der ehemaligen DDR auf. Fichtennadeln färbten sich gelb, die Baumkronen verlichteten sich. Diese Schäden traten im Harz, Thüringer Wald, Vogtland und Westerzgebirge auf und resultierten aus über Ferntransport entstandenen Photooxidantien, die aufgrund der Schwefel- und Stickoxidgehalte eine saure Reaktion aufwiesen (Saurer Regen). An

Standorten mit geringem Basengehalt im Mineralboden konnte teilweise ein akuter Magnesium-, Calcium- und Kaliummangel in den Blattorganen beobachtet werden, so dass in einigen Regionen Deutschlands intensive Bodenschutzkalkungen durchgeführt werden mussten.

In Sachsen-Anhalt sind jedoch vergleichsweise relativ wenig Waldflächen gekalkt worden, insgesamt beträgt die gekalkte Waldfläche 13.000 ha. Das ist die geringste gekalkte Waldfläche im Vergleich der Bundesländer, die Waldkalkungen durchführen. Rheinland-Pfalz oder Niedersachsen kalkten im Vergleich über 600.000 ha (ANDREAE u. JACOB 2018). In Zusammenarbeit mit dem Landeszentrum Wald in Halberstadt (LZW) wurden im Rahmen des Modellvorhabens „Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern“ in verschiedenen Revieren im Harz, der Nordöstlichen Altmark und Letzlingen unter strengen Prüfkriterien Waldkalkungen durchgeführt, um die Wirkung der Kalkung auf Boden, Ernährungszustand und Vegetation zu untersuchen. Da der mögliche Einfluss einer Waldkalkung auf den Mineralboden, den Ernährungszustand und die Vegetation nicht sofort, sondern erst nach mehreren Jahren nachweisbar wird, gibt es noch keine Ergebnisse aus diesen Versuchen in Sachsen-Anhalt (THOMS et al. 2018).

Im Kollektiv der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt wurden insgesamt nur 3 Punkte als gekalkt identifiziert. Entsprechend sind paarweise Auswertungen (gekalkt/ungekalkt) mit diesem Datensatz nicht sinnvoll. Relativ häufig sind jedoch die Folgen ehemaliger Bodenbearbeitung, vor allem der Streifenpflüfung, anzutreffen. Diese Maßnahme wurde an insgesamt 30 (38 %) der Stichprobenpunkte durchgeführt, in 8 Fällen davon in Verbindung mit Flugascheeinträgen. 5 BZE-Punkte sind nur durch Flugascheeintrag gekennzeichnet. Das BZE II Kollektiv umfasst 40 BZE-Punkte die weder durch Kalkung, Bodenbearbeitung oder Flugascheeinfluss beeinflusst wurden. Die Auswirkungen von Flugascheeinträgen auf die bodenchemische Situation der Waldböden werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Die Abbildungen 104–115 zeigen die räumlichen Verteilungen der Vorräte in der BZE II und Veränderungen zur BZE I auf Profilebene für die Elemente Calcium, Magnesium, Kalium, Stickstoff und Kohlenstoff. Des Weiteren wurde die Basensättigung als bodenchemischer Indikator ausgewertet. Die Basensättigung ist ein relativ guter Indikator für die Versauerungsdynamik und für die Ausstattung eines Standortes mit wichtigen Makronährelementen wie Ca^{2+} , Mg^{2+} oder K^+ (HARTMANN u. VON WILPERT 2016, MEESENBERG et al. 2019, SCHULTE-BISPING et al. 2001). Aufgrund der hohen Industriedichte und somit hohen Staub und Stoffeinträgen ist der Ballungsraum Bitterfeld (Chemiedreieck) mit 3 roten Punkten in der räumlichen Darstellung hervorgehoben. Vorwiegend durch Flugasche beeinflusste BZE-Punkte sind mit einem schwarzen Kreuz versehen. In der zugeordneten Balkengrafik sind der Norden Sachsen-Anhalts (nördlich Magdeburg), der Osten im Raum Dübener Heide und Fläming sowie 3 Punkte repräsentativ für den Raum Bit-

terfeld für das jeweilige Element quantitativ dargestellt. Hierbei wurde nur die Substratgruppe der unverlehmten Sande einbezogen, um Effekte des Ausgangssubstrates der Böden bei der Auswertung zu minimieren.

In Abb. 104 sind die für die unverlehmten Sande sehr hohen Calcium-Vorräte in der BZE II im Raum Bitterfeld ersichtlich (Abb. 104, linke Grafik, Abb. 105). Hier war mit dem Kraftwerk Zschornowitz einst eines der größten Braunkohlekraftwerke der Welt in Betrieb, welches nicht nur Strom in das Ballungszentrum um Bitterfeld, sondern auch überregional nach Magdeburg, Berlin, Sachsen und Thüringen lieferte. Es wurde 1992 stillgelegt. Da die BZE I-Beprobung dieser Standorte im November 1992 erfolgte, können die Zunahmen nicht auf dieses Kraftwerk zurückgeführt werden; das Niveau der Bodenvorräte im überregionalen Vergleich jedoch schon. Die durchschnittlichen Calciumvorräte im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm betragen für den unverlehmten Sand im Norden Sachsen-Anhalts sowohl in der BZE I und BZE II jeweils 600 kg Calcium je Hektar, dies entspricht dem Mittel des unverlehmten und ungekalkten Sandes in Niedersachsen (EVERS et al. 2019). Im Osten Sachsen-Anhalts liegen die Calciumvorräte in der BZE I bei rund 1000 kg/ha, welches in Niedersachsen den gekalkten Sanden entspricht (EVERS et al. 2019). Die Calciumvorräte nahmen in dieser Region um rund 20 % bezogen auf die BZE I ab, dies wurde auch in Niedersachsen bei den unverlehmten Sanden festgestellt. Im Raum Bitterfeld liegen die Calciumvorräte in Bereichen der hohen Nährstoffversorgung zwischen 4000–6500 kg/ha Calcium mit Zunahmen über 2000 kg weit über dem, was für die Standorte des unverlehmten Sandes typisch ist.

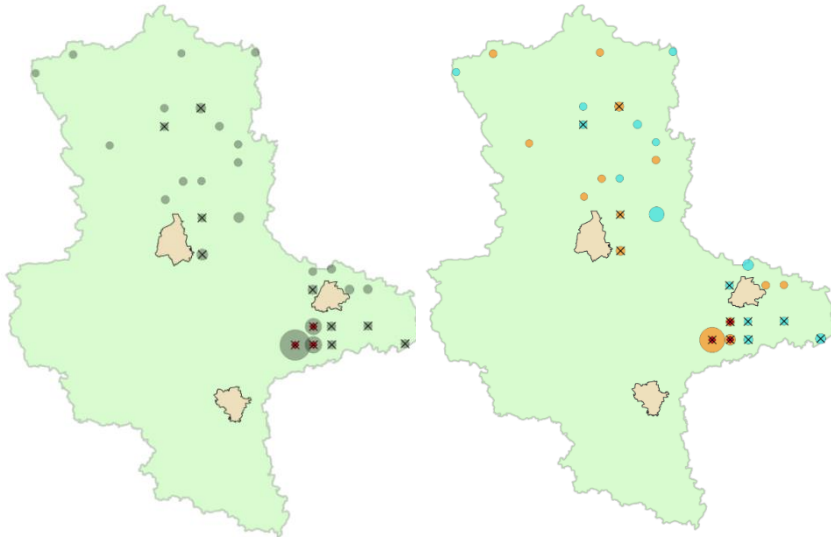


Abbildung 104: Calciumvorräte [kg/ ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Calciumvorräte auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts); die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, x Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Calciumvorräte

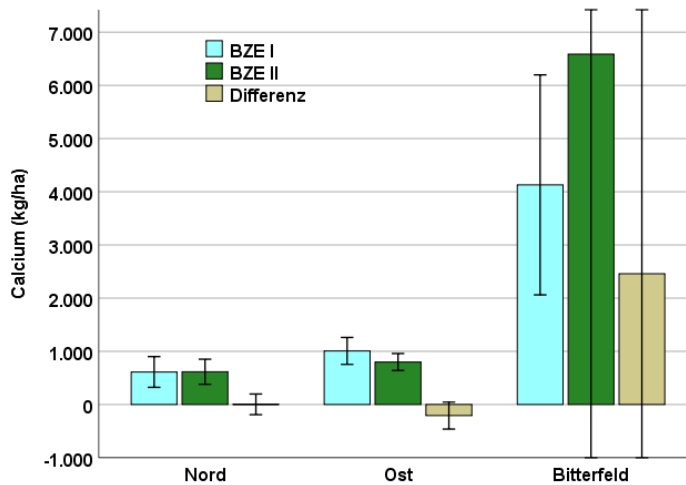


Abbildung 105: Calciumvorräte [kg/ ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Bei Magnesium zeigt sich ein ähnliches Bild, auch hier finden sich die höchsten Magnesiumvorräte und -zunahmen zwischen der BZE I und BZE II beim unverlehmten Sand im Raum Bitterfeld (rote Punkte, Abb. 106). Hier sind die Vorräte zum Zeitpunkt der BZE I mehr als doppelt so hoch, zum Zeitpunkt der BZE II fast dreimal so hoch wie das Mittel der im Norden und Osten (ohne Bitterfeld) gelegenden BZE-Punkte des unverlehmten Sandes (Abb. 107).

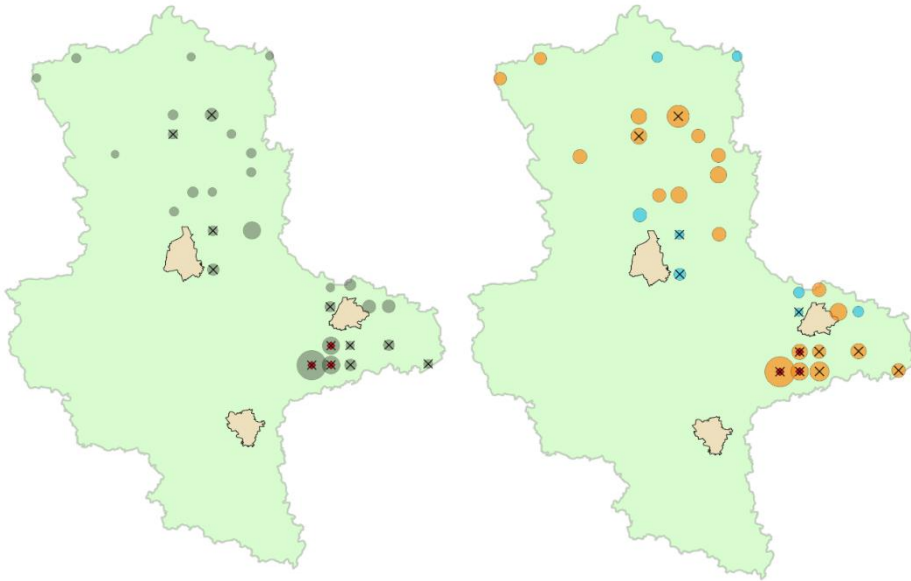


Abbildung 106: Magnesiumvorräte [kg/ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Magnesiumvorräte auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, x Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Magnesiumvorräte

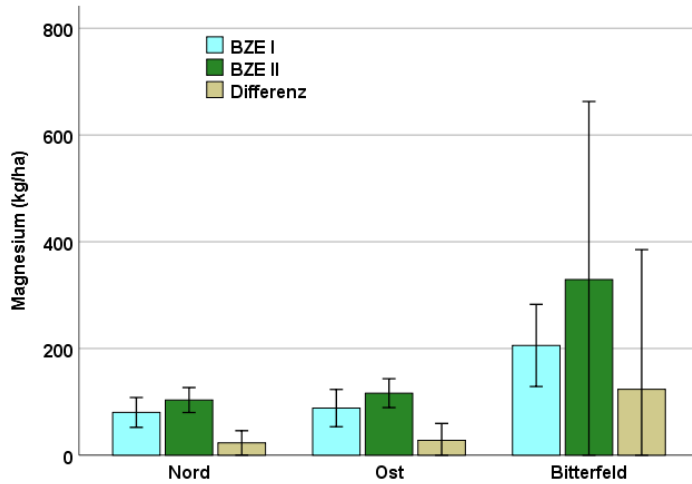


Abbildung 107: Magnesiumvorräte [kg/ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Auch bei den Kaliumvorräten der BZE II und den Veränderungen zur BZE I fällt der Osten Sachsen-Anhalts mit höheren Vorräten und Zunahmen von Kalium auf (Abb. 108 und 109). Neben den BZE-Punkten im Raum Bitterfeld trifft dies auch auf die BZE-Punkte im Fläming zu. Da aber die Zunahmen von Kalium analytisch aufgrund zu geringer Werte in der BZE I sicher deutlich überschätzt sind, wird nicht weiter auf die Differenzen eingegangen (siehe auch Kap. 6.5.3.3). Mit Kaliumvorräten zwischen 460 kg/ha (Norden), 550 kg/ha (Osten) und 730 kg (Raum Bitterfeld) erreicht der unverlehmte Sand doppelt bis fast vierfach so hohe Kaliumvorräte wie die unverlehmten Sande in Niedersachsen mit 200 kg/ha (EVERS et al. 2019).

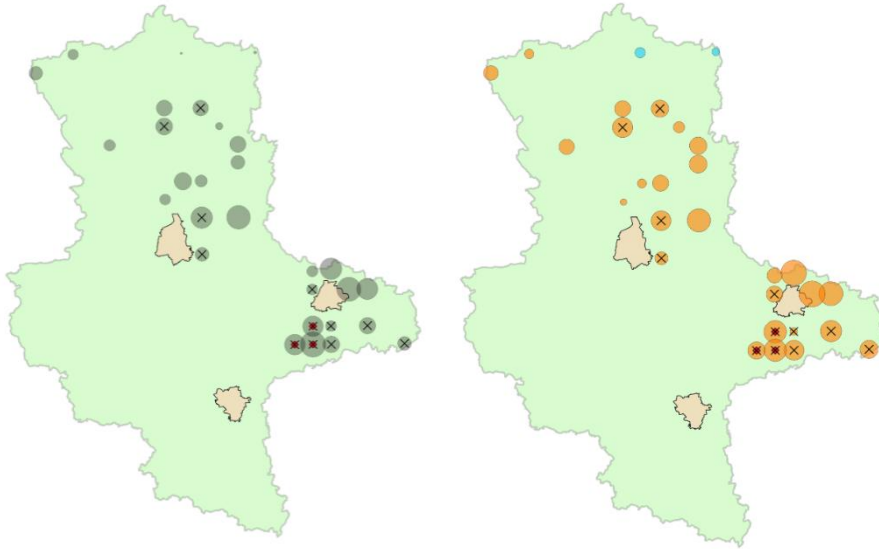


Abbildung 108: Kaliumvorräte [kg/ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Kaliumvorräte auf Profülebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, × Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Kaliumvorräte

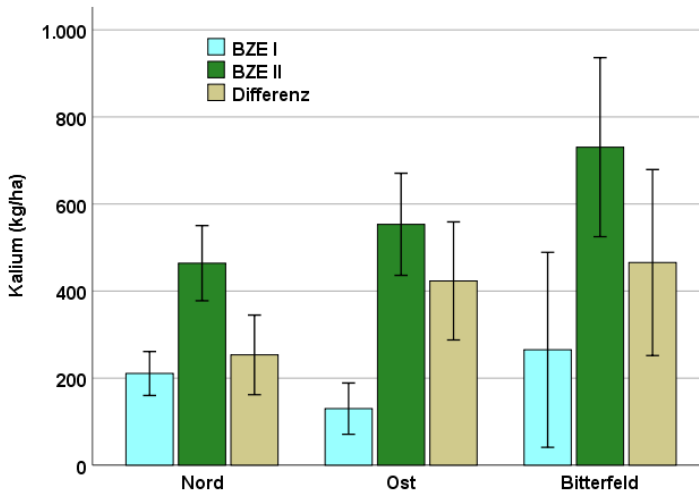


Abb. 109: Kaliumvorräte [kg/ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Die durchschnittliche Basensättigung auf Profilebene ist sowohl im Norden als auch im Osten (ohne Raum Bitterfeld) beim unverlehmten Sand zwischen der BZE I und BZE II leicht gesunken (Abb. 111), liegt aber mit 18 % (Norden) und 25 % (Osten) immer noch deutlich über den Vergleichswerten der BZE II für den unverlehmten Sand in Niedersachsen (ungekalkt 10 %, gekalkt 13 %; EVERS et al. 2019). Im Raum Bitterfeld weisen die Profile durchschnittliche Basensättigungen zwischen 70–80 % auf, dies sind sonst typische Werte für beispielsweise Lehme, Tone und Basalte oder Rheinweiß-Standorte des unverlehmten Sandes im Hessischen Ried (PAAR et al. 2016). Die Basensättigung nahm bei den unverlehmten Sanden in Sachsen-Anhalt von der BZE I zur BZE II häufig ab, bei den flugaschebeeinflussten Standorten kam es eher zu leichten Zunahmen (schwarze Kreuze, Abb. 110).

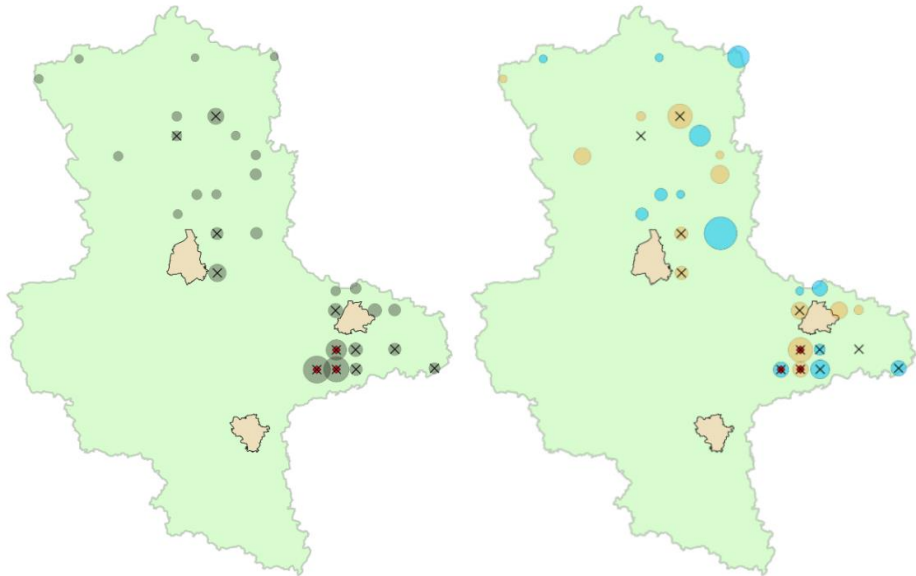


Abbildung 110: Durchschnittliche Basensättigung [%] im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Basensättigung auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, × Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Basensättigung

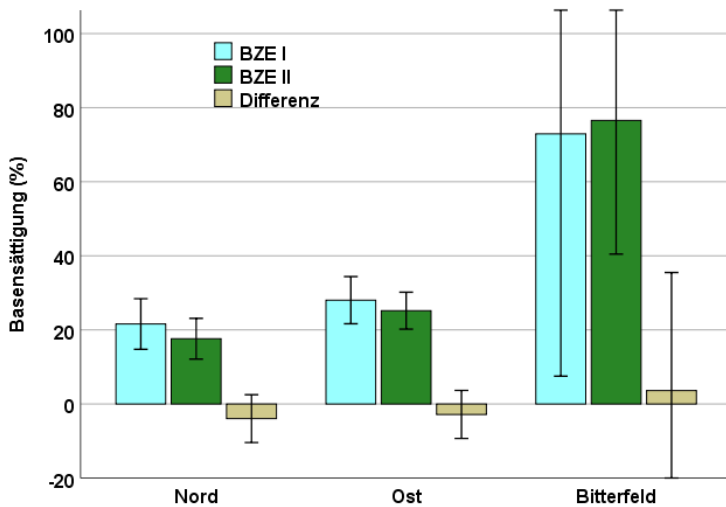


Abbildung 111: Durchschnittliche Basensättigung [%] der BZE I, BZE II und Differenz im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Vergleichbare Muster wie bei Calcium, Magnesium, Kalium und der Basensättigung zeigen sich auch für die Elemente Kohlenstoff und Stickstoff. Relativ hohe Kohlenstoffvorräte sind zwar überall in Sachsen-Anhalt beim unverlehmten Sand zu beobachten, im Osten sind sie aber auffällig höher (Abb. 112 links). Mit rund 110 t/ha liegen die Kohlenstoffvorräte im Osten Sachsen-Anhalts (ohne den Raum Bitterfeld) um 15 t/ha höher als im Norden des Landes. Im Raum Bitterfeld (rote Punkte Abb. 112 links) speichern die drei BZE-Punkte des unverlehmten Sandes 120 t/ha Kohlenstoff bis 90 cm Bodentiefe (Abb. 113). Die Speicherraten zwischen der BZE I und BZE II sind mit 25 t/ha im Norden, 37 t/ha im Osten und 65 t/ha im Raum Bitterfeld sehr unterschiedlich (Abb. 113 rechts). Nur im Norden traten auch Kohlenstoffverluste auf (blaue Punkte). Die regionalen Unterschiede in Sachsen-Anhalt hinsichtlich der Kohlenstoffvorräte bestanden in der BZE I noch nicht, hier lagen die Vorräte zwischen 57 und 74 t/ha auf einem relativ ausgewogenem Niveau (Abb. 113).

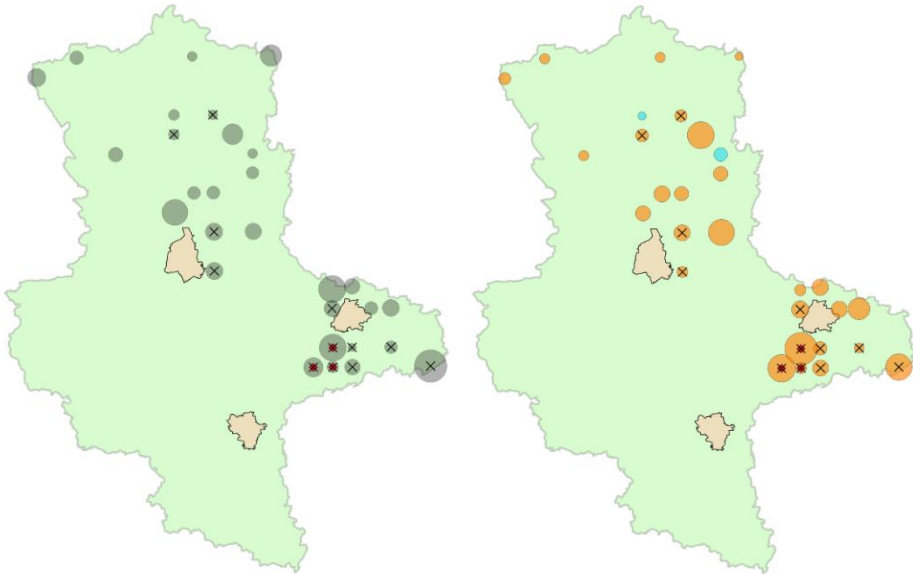


Abbildung 112: Kohlenstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Kohlenstoffvorräte auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, × Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Kohlenstoffvorräte

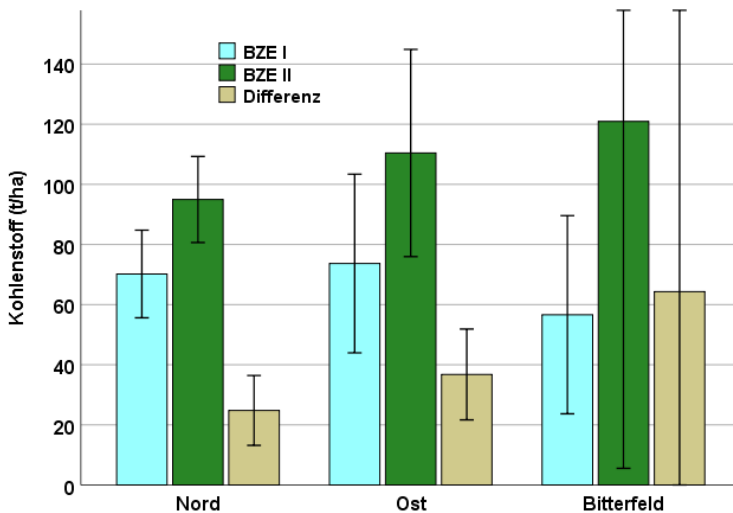


Abbildung 113: Kohlenstoffvorräte [t/ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Die Stickstoffvorräte in der Substratgruppe unverlehmter Sand auf Profilebene zeigen das gleiche Muster wie Kohlenstoff: mit 4600 kg/ha sind sie im Norden des Landes am geringsten, im Osten mit 5400 kg/ha um 17 % höher und im Raum Bitterfeld mit knapp 6400 kg/ha um knapp 30 % höher als im Norden. Die Veränderungen zur BZE I sind im Osten mit knapp 1600 kg/ha um den Faktor 2,7 höher als im Norden, im Raum Bitterfeld mit 2700 kg/ha sogar um den Faktor 4,5. Wie beim Kohlenstoff sind die Stickstoffvorräte zur BZE I bei knapp 4000 kg regional wenig differenziert.

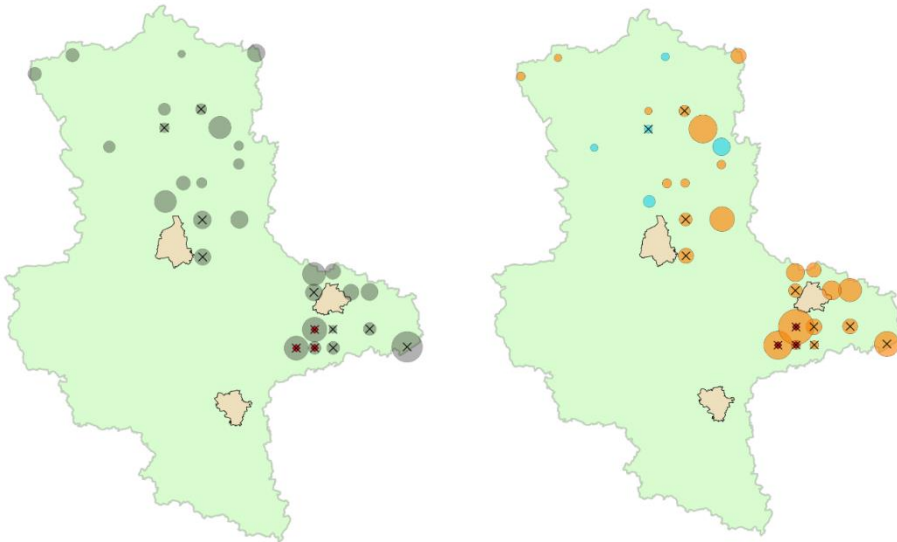


Abbildung 114: Stickstoffvorräte [kg/ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Stickstoffvorräte auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, x Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Stickstoffvorräte

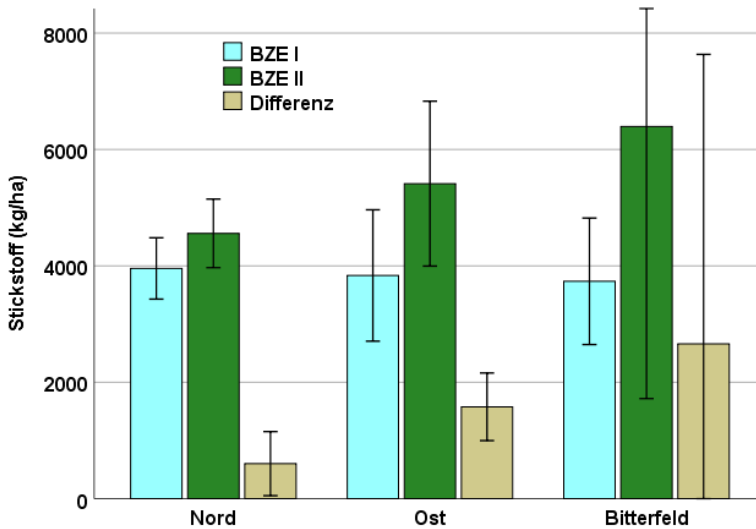


Abbildung 115: Stickstoffvorräte [kg/ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Neben dem Einfluss von Stoffeinträgen (Deposition, Düngung, Kalkung) beeinflussen Bodenbearbeitungen wie Streifenpflug, Vollumbruch oder auch Bodenlockerungen die Vorräte im Mineralboden. Teilweise überlagert sich der Einfluss von Flugasche und Bodenbearbeitung. Am Beispiel von Kohlenstoff und Stickstoff werden im Folgenden die vier Strata (1) weder Flugascheeinfluss noch Bodenbearbeitung („kein Einfluss“) (2) nur Flugascheeinfluss (3) nur Bodenbearbeitung (4) Bodenbearbeitung und Flugascheeinfluss am jeweiligen BZE-Punkt mit ihren Mittelwerten und Streumaßen in Tabelle 13 und Abb. 116 angegeben. Berechnungsgrundlage waren wieder nur die BZE-Punkte innerhalb der Substratgruppe unverlehmter Sand, da relativ ähnliche Bodenverhältnisse bestehen und diese Substratgruppe in Sachsen-Anhalt verhältnismäßig häufig vertreten ist.

Tabelle 13: Durchschnittliche Kohlenstoffvorräte in der BZE I und II sowie Veränderungen [t/ha] auf Profilebene in Sachsen-Anhalt nach Flugasche und Bodenbearbeitung der Substratgruppe unverlehmter Sand (abzüglich eines Extrempunktes)

Kohlenstoffvorrat	[t/ha]	n	Mittel [t/ha]	Median [t/ha]	SD [t/ha]	SF [t/ha]	sig
kein Einfluss	BZE I	9	72,0	72,5	26,5	8,8	
	BZE II	9	86,7	82,7	23,3	7,6	
	BZE II-I	9	14,7	12,9	14,9	5,0	*
nur Flugasche	BZE I	4	53,0	52,8	10,2	5,1	
	BZE II	4	91,1	86,6	24,1	12,1	
	BZE II-I	4	38,1	29,0	28,6	14,3	
nur Bodenbearbeitung	BZE I	9	74,2	62,9	39,7	13,2	
	BZE II	9	114,9	103,8	30,3	10,1	
	BZE II-I	9	40,7	35,3	23,2	7,7	*
Flugasche und Bodenbearbeitung	BZE I	8	70,6	69,7	29,1	10,3	
	BZE II	8	110,6	105,4	49,8	17,6	
	BZE II-I	8	40,0	30,5	31,0	11,0	*
gesamt	BZE I	30	69,7	63,5	29,8	5,4	
	BZE II	30	102,1	95,7	35,0	6,4	
	BZE II-I	30	32,4	27,0	25,8	4,7	*

n = Anzahl, SD = Standardabweichung, SF=Standardfehler, sig=Signifikanzniveau <0,05

Im Vergleich zur mittleren Zunahme von rund 32 t/ha in der Substratgruppe unverlehmter Sand liegen die Zunahmen der nur durch Flugasche beeinflussten BZE-Punkte bei 38,1 t/ha, der nur durch Bodenbearbeitung gekennzeichneten BZE-Punkte bei 40,7 t/ha und der durch beide Faktoren beeinflussten Punkte bei 40,0 t/ha. Im Kollektiv ohne Flugasche und ohne Bodenbearbeitung dagegen liegen die Zunahmen mit rund 15 t/ha deutlich niedriger. Die Kohlenstoffzunahmen streuen jedoch erheblich, vor allem unter dem Einfluss von Flugasche und Bodenbearbeitung (Abb. 116). Kohlenstoffverluste kommen nur im Kollektiv „keine“ vor. Im Kollektiv „Flugasche“ konnte die Zunahme nicht abgesichert werden, in allen anderen Kollektiven sind die Zunahmen signifikant. Zwischen den Kollektiven ergaben sich nur signifikante Unterschiede zwischen dem Kollektiv „keine“ und „nur Bodenbearbeitung“.

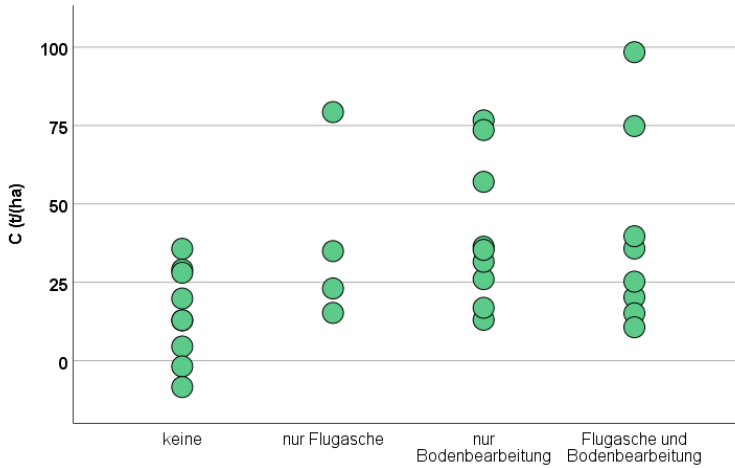


Abbildung 116: Veränderungen der Kohlenstoffvorräte [t/ha] zwischen BZE I und II für die Substratgruppe unverlehmter Sand nach Flugasche und Bodenbearbeitung in Sachsen-Anhalt

Der Einfluss durch Bodenbearbeitung und Flugasche fällt beim Stickstoffvorrat ähnlich aus wie bei den Kohlenstoffvorräten. Die entsprechenden Werte mit ihren Streumaßen sind in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Flugasche in Tabelle 14 und Abb. 117 angegeben. Berechnungsgrundlage waren wie bei Kohlenstoff nur die BZE-Punkte innerhalb der Substratgruppe unverlehmter Sand.

Tabelle 14: Durchschnittliche Stickstoffvorräte in der BZE I und II sowie Veränderungen [t/ha] auf Profilebene in Sachsen-Anhalt nach Flugasche und Bodenbearbeitung der Substratgruppe unverlehmter Sand

Stickstoffvorrat	[t/ha]	n	Mittel [t/ha]	Median [t/ha]	SD [t/ha]	SF [t/ha]	sig
kein Einfluss	BZE I	9	3,88	4,13	0,54	0,18	
	BZE II	9	4,05	4,10	0,83	0,28	
	BZE II-I	9	0,22	0,22	0,66	0,22	
nur Flugasche	BZE I	4	3,88	3,88	0,22	0,51	
	BZE II	4	4,81	4,25	0,55	0,34	
	BZE II-I	4	0,91	0,35	1,48	0,49	
nur Bodenbearbeitung	BZE I	10	4,27	3,76	1,62	0,51	
	BZE II	10	5,62	5,50	1,09	0,34	
	BZE II-I	9	1,32	1,74	1,48	0,49	*
Flugasche und Bodenbearbeitung	BZE I	8	3,77	3,62	1,48	0,52	
	BZE II	8	5,50	5,33	2,08	0,73	
	BZE II-I	8	1,78	1,31	1,24	0,44	*
gesamt	BZE I	31	3,98	3,93	1,19	0,21	
	BZE II	31	5,03	4,58	1,53	0,27	
	BZE II-I	30	1,06	0,81	1,32	0,24	*

n = Anzahl, SD = Standardabweichung, SF=Standardfehler, sig=Signifikanzniveau <0,05

Im Vergleich zur mittleren Zunahme von rund 1 t/ha in der Substratgruppe unverlehmter Sand liegen die Zunahmen der nur durch Flugasche beeinflussten BZE-Punkte mit 0,9 t/ha geringfügig unter diesem Wert. Die nur durch Bodenbearbeitung gekennzeichneten BZE-Punkte weisen mit 1,32 t/ha und der durch beide Faktoren beeinflussten Punkte (mit 1,78 t/ha) deutlich höhere Werte aus. Im Kollektiv ohne Flugasche und ohne Bodenbearbeitung dagegen liegen die Zunahmen mit 0,2 t/ha deutlich niedriger. Wie bei Kohlenstoff streuen auch die Vorratsveränderungen von Stickstoff erheblich, vor allem unter dem Einfluss von Flugasche und Bodenbearbeitung (Abb. 117). Stickstoffverluste kommen im Unterschied zu Kohlenstoff auch im Kollektiv „nur Flugasche“ und „nur Bodenbearbeitung“ vor. Signifikant waren die Zunahmen nur in den Kollektiven mit Bodenbearbeitung und im Gesamtkollektiv. Die Stickstoffzunahmen in den Kollektiven mit Bodenbearbeitung ließen sich gegen die BZE-Punkte ohne Einfluss absichern.

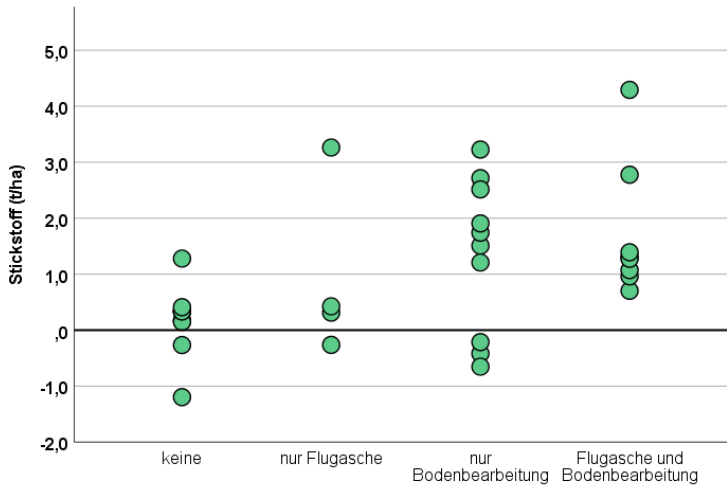


Abbildung 117: Veränderungen der Stickstoffvorräte [t/ha] zwischen BZE I und II für die Substratgruppe unverlehmter Sand nach Flugasche und Bodenbearbeitung in Sachsen-Anhalt

Die signifikanten Unterschiede in Zusammenhang mit der Bodenbearbeitung sind wahrscheinlich auf zwei Einflussfaktoren zurückzuführen. Bei allen Beständen fand die Bodenbearbeitung vor der BZE I statt. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass es direkt nach stärkeren Störungen wie Kahlschlägen, Entnahme größerer Baumgruppen oder Bestandesumbaumaßnahmen mit Bodenbearbeitung (z. B. Grubbern) zu erheblichen Verlusten von Kohlenstoff und Stickstoff kommen kann (HEINSDORF et al. 1986, HORNBECK et al. 1987, BLOCK 2006, HEGG et al. 2004, AHRENDTS et al. 2005). Hierdurch sind die Böden weiter von einem potenziellen Gleichgewichtszustand entfernt. Entsprechend können in der folgenden Bestandesentwicklung höhere Akkumulationsraten auftreten (BORMANN et al. 1995, HEINSDORF et al. 1986). Verstärkt wird dieser Effekt wahrscheinlich durch die hohe Akkumulationsraten in mittelalten Kiefernbeständen (BÖTTCHER u. SPRINGOB 2001, BRINKMANN u. NIEDER 2002). Zurückgeführt werden können diese hohen Speicherraten auf die überproportional hohen Streufalleinträge von Kiefern in diesem Altersabschnitt (AHRENDTS 2008).

Diese Auswertungen zeigen, dass die bodenchemischen Parameter und deren Dynamik teilweise stark durch die atmosphären Einträge in Sachsen-Anhalt beeinflusst wurden. Neben dem Osten des Landes (Landkreise Anhalt-Bitterfeld und Wittenberg) sind die BZE-Punkte im Raum Bitterfeld besonders betroffen. Hier liegen die Calciumvorräte und die Basensättigung deutlich über den Vergleichswerten des unverlehmten Sandes in Niedersachsen. Weiterhin auffällig für diese Region sind hohe Magnesium-, Kalium-, Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Auflagehumus

und Mineralboden. Zwischen der BZE I und BZE II wurden Zunahmen der Calcium- und Magnesiumvorräte vor allem im Raum Bitterfeld, für Kalium, Kohlenstoff und Stickstoff auch im Osten und am höchsten im Raum Bitterfeld festgestellt. Dies kann auf die atmosphärischen Stoffeinträge zurückgeführt werden. Überlagert werden diese Einflüsse durch Bodenbearbeitungen wie z. B. den Streifenpflug, die überall im Osten und häufig auch im Norden des Landes in Wäldern durchgeführt wurden. Auch hier konnten in der BZE höhere Kohlen- und Stickstoffvorräte sowie Zunahmen von der BZE I zur BZE II festgestellt werden.

Die BZE in Sachsen-Anhalt verfügt jedoch für die Absicherung und eine genaue Quantifizierung dieser Zusammenhänge über einen zu geringen Stichprobenumfang. Entsprechend sollten auch insbesondere die Änderungssignale mit großer Vorsicht interpretiert werden. Dennoch zeigen die Auswertungen eindrucksvoll, dass viele Standorte in historisch industriell geprägten Regionen durch sehr hohe anthropogene Stoffanreicherungen gekennzeichnet sind, die teilweise deutlich über dem Niveau naturnaher Systeme liegen dürften.