

Bodenzustandserhebung

Bodenzustandserhebungen (BZE I und BZE II) – Wie hat sich der Bodenzustand in Niedersachsens Waldböden verändert?

Jan Evers und Uwe Paar

Die ursprüngliche, nahezu vollständige Bewaldung Niedersachsens wurde vom Mittelalter bis in die Neuzeit stark durch Umwandlung in Landwirtschafts- und Siedlungsflächen vermindert. Die ehemals vorherrschenden Laubmischwälder wurden intensiv genutzt: Waldweide, Streunutzung, massiver Holzbedarf im Berg- und Schiffbau, für Glashütten, Erz- und Salzgewinnung, Köhlerei sowie für die Brennholznutzung haben zu hohen Nährstoffzügen und zur Entkopplung der Nährstoffkreisläufe im Wald geführt. Holz war zu dieser Zeit der wichtigste Baustoff und Energieträger, die Waldfläche ging bis auf 10 % zurück. Für die langfristige Bodenentwicklung hatte dies entsprechende Folgen. Teilweise entwickelten sich sogar große Wanderdünen, die für Siedlungen und landwirtschaftliche Flächen zur Bedrohung werden konnten. Durch die Einführung einer geregelten und nachhaltigen Forstwirtschaft erholten sich die stark beeinträchtigten Waldböden. Verarmte, waldfreie Gebiete wurden erneut bewaldet, wie z. B. in der Lüneburger Heide. Auf den stark degradierten Böden konnte nur mit der Pionierbaumart Kiefer aufgeforstet werden. Der Wald bedeckt heute mit rund 1,2 Millionen Hektar wieder 24 % der Landesfläche. Die Wiederaufforstungen der Kahlschläge in Folge des 1. und 2. Weltkrieges, die Reinbestandswirtschaft der 1960er Jahre sowie die großflächigen Aufforstungen nach den verheerendem Sturmwurf 1972 ließen überwiegend ein-



Plaggen-Eschboden mit typischem Anreicherungshorizont organischer Substanz im Oberboden durch ehemalige Ausbringung von Stalleinstreu und landwirtschaftlicher Nutzung bei Osnabrück im Nordwesten Niedersachsens
Foto: T. Heinkele

förmige Reinbestände aus Nadelholz entstehen. Mittlerweile ist die Waldbewirtschaftung auf standörtlicher Grundlage langfristiges Ziel waldbaulichen Handelns in Niedersachsen. Dabei steht die Entwicklung von stabilen, artenreichen und gesunden Mischwäldern im Vordergrund. Dies bedeutet unter anderem Laub- und Mischwaldvermehrung, verbesserter Bodenschutz und standortgemäße Baumartenwahl, die Abkehr von der großflächigen Kahlschlagswirtschaft, die Übernahme geeigneter natürlicher Waldverjüngung und die ökosystemverträgliche Wildbewirtschaftung sowie den Einsatz schonender Bewirtschaftungsverfahren. Dies lässt langfristig eine Verbesserung und Erholung der Waldböden erwarten.

Niedersachsens Waldböden sind neben den historisch bedingten Störungen zusätzlich durch jahrzehntelange Säureinträge belastet. Infolgedessen sind die Filter- und Regulationsfunktionen vieler Böden gestört, erhebliche Säuremengen im Boden gespeichert und Nährstoffe mit dem Sickerwasser ausgetragen. Durch die sauren Einträge wurde zudem die bodenwühlende Fauna beeinträchtigt, was die Bildung von Humusaufgaben und damit die Versauerung des Mineralbodens verstärkt hat. Andererseits hat die Belastung der Waldböden vor allem mit Schwefelsäure auf Grund der Luftreinhaltemaßnahmen der letzten Jahrzehnte deutlich nachgelassen. Viele Waldstandorte sind gekalkt worden, um die sauren Einträge zu kompensieren. Der Eintrag von säurewirksamem luftbürtigem Stickstoff ist jedoch immer noch hoch. An vielen Waldstandorten in Niedersachsen ist die aktuelle Säurebelastung für den Waldboden immer noch höher, als durch die natürlichen ökosysteminternen Prozesse abgepuffert werden kann. Viele Waldböden sind tiefgründig versauert und an Calcium und Magnesium verarmt, die Magnesium- und Calciumversorgung dieser Waldbestände ist schlecht.

Bei der ersten BZE in Niedersachsen 1990/1991 sind insgesamt 210 BZE-Punkte im Raster der damaligen Unterstichprobe der Waldzustandserhebung und der EU aufgenommen worden. Bei der zweiten BZE in 2007 sind die 169 repräsentativen Rasterpunkte des 8 km x 8 km Level I Netzes der Forstlichem Umweltkontrolle beprobt worden. Insgesamt gehören zum Kollektiv der BZE I und II 267 Punkte, von denen 112 BZE-Punkte in beiden Erhebungen enthalten sind. Bei der zweiten Erhebung 2007 sind dieselben Parameter wie bei der ersten Erhebung 1990/1991 erfasst worden. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sind auch dieselben Methoden bzw. vergleichbare Methoden verwendet worden.

Zentrales Anliegen der BZE 2007 ist es, den aktuellen Bodenzustand und die Veränderungen zur ersten Erhebung 1990/91 zu ermitteln, Ursachen für diese Veränderungen zu identifizieren und hinsichtlich ihrer ökologischen Relevanz zu bewerten. Die Wirkungen von Maßnahmen zum Schutz der Waldböden sollen evaluiert sowie die Kenntnisse über die Waldböden vertieft werden. Damit verbessert sich die Grundlage für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. Schließlich kann daran die weitere Planung und Durchführung von notwendigen Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Bodenzustandes sowie des Nährstoffangebotes im Waldboden anknüpfen.

Ein Maß für die Güte des chemischen Zustandes und ein Indikator für die chemische Zusammensetzung der Bodenlösung im Mineralboden ist die Basensättigung. Aus ihr lässt sich die

Bodenzustandserhebung

Verfügbarkeit von Nährstoffen im Mineralboden und damit die Ernährungsbedingungen der Waldbäume ableiten. Die Basensättigung drückt aus, wie hoch der Anteil der basischen Nährelemente Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium an der Summe der austauschbaren Kationen ist, die an den negativ geladenen Tonmineralen und an der organischen Substanz (Austauscher) gebunden sind. Im Zuge fortschreitender Bodenversauerung werden die an der Pufferung beteiligten „basischen“ Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium vom Austauscher durch die „sauen“ Kationen Aluminium, Eisen, Mangan und Wasserstoffionen verdrängt. Eine geringe Basensättigung im Mineralboden ist in erheblichem Maße eine Folge luftbürtiger versauernd wirkender Stoffeinträge. Eine Basensättigung unterhalb von 20 % gilt als gering. 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 wird es schwierig, unter diesen Bedingungen ausreichend Nährelemente mit den Wurzeln aufzunehmen. Aluminium wirkt in der Bodenlösung in höheren Konzentrationen zudem toxisch gegenüber Pflanzenwurzeln. Die Bodenlösung ist relativ sauer, Schwermetalle werden gelöst und die Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium werden 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 ist in seiner Produktivität eingeschränkt und im Hinblick auf Elemententzüge durch intensive Holznutzung wie beispielsweise Vollbaumnutzung empfindlich. In dieser Situation können Kompensationsmaßnahmen in Form von Waldkalkungen sinnvoll sein.

In allen folgenden Grafiken wird die mittlere Basensättigung von BZE I und BZE II in den beprobten Tiefenstufen beider Erhebungen und ihre zeitliche Veränderung (1990 gegenüber 2007), gegliedert nach Kalkung und Substratgruppe, dargestellt.

In der linken Grafik sind jeweils die beprobten Tiefenstufen als Y-Achse und die Basensättigung auf der X-Achse abgebildet. Die Mittelwerte der Basensättigung der jeweiligen Tiefenstufe sind für die BZE I hellblau und für die BZE II dunkelblau, in orange ist als Streuungsmaß das 95 %-Konfidenzintervall für den Mittelwert als Balken angegeben. Das bedeutet, dass der wahre Mittelwert mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit im Bereich des orangenen Balkens liegt. Weite Konfidenzintervalle kennzeichnen eine breite Variabilität dieses Parameters und/

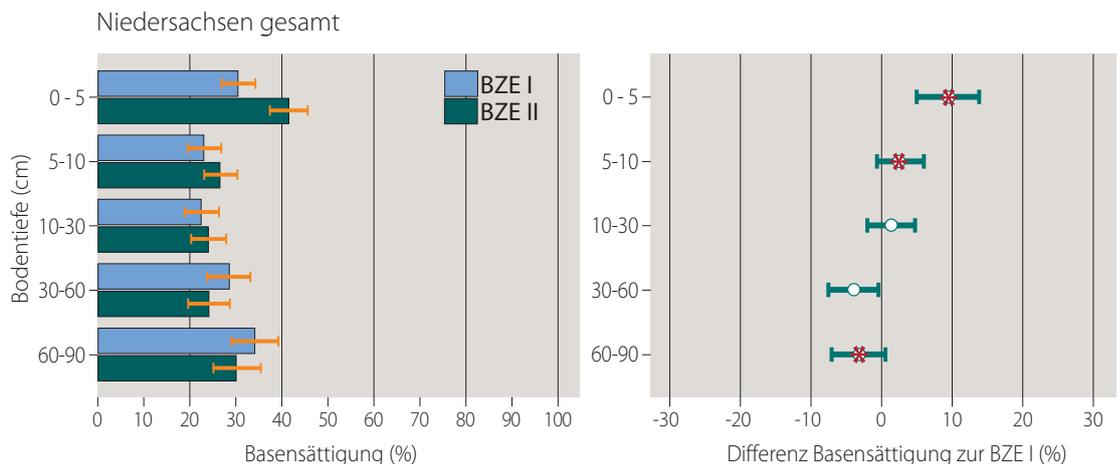
oder eine geringe Stichprobenzahl. In der rechten Grafik sind die mittleren Differenzen der jeweiligen Tiefenstufe (Basensättigung BZE II abzüglich Basensättigung BZE I identischer BZE-Punkte und Tiefenstufen) mit dem entsprechendem 95 %-Konfidenzintervall dargestellt. Ein roter Stern bedeutet, dass der Mittelwert mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit gegen Null (keine Veränderung) abgesichert und mit dieser Wahrscheinlichkeit nicht zufällig ist.

In Niedersachsens Waldböden liegen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung bei der BZE I und II in den einzelnen Tiefenstufen mit Werten zwischen 20 und 40 % in mittleren Größenordnungen. Die höheren Werte der Basensättigung der Tiefenstufe 0-5 cm erklären sich aus dem höheren Gehalt an organischer Substanz, der über Einwaschung, Wurzelstreu und die aktive Einarbeitung durch Bodenwühler entstanden ist. Dadurch werden die Austauschkapazität und auch die Basensättigung erhöht. In der anschließenden Tiefenstufe 5-10 cm ist die durchschnittliche Basensättigung deutlich geringer, hier lässt der Einfluss durch organische Substanz bereits nach. Ab 30 cm steigen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung mit zunehmender Bodentiefe dann wieder an, was auf umfangreichere Nährstoffreserven und Pufferkapazität mit zunehmenden Bodentiefen zurückzuführen ist. Im Vergleich zu Hessen und auch Sachsen-Anhalt sind die mittleren Basensättigungen in Niedersachsen geringer, vor allem in Bodentiefen unter 30 cm.

Im Vergleich zur durchschnittlichen Basensättigung zum Zeitpunkt der BZE I hat sich bei der BZE II die durchschnittliche Basensättigung in den oberen Tiefenstufen signifikant verbessert, und zwar um knapp 10 %-Punkte in der Tiefenstufe 0-5 cm und 3 %-Punkte in 5-10 cm. Dies lässt sich mit den durchgeführten Waldkalkungsmaßnahmen und dem Rückgang der luftbürtigen Säureinträge erklären. In 10-30 cm Bodentiefe gab es kaum Veränderungen. In 30-60 cm und 60-90 cm verringerte sich die durchschnittliche Basensättigung jeweils um 3-4 %-Punkte im Vergleich zur BZE I, in der Tiefenstufe 60-90 cm signifikant. Dies kann mit einer fortschreitenden Versauerung in der Tiefe erklärt werden, die vor allem bei nicht gekalkten Standorten zu erwarten ist.

Waldkalkungen wurden in Niedersachsen seit den 1980er Jahren vorwiegend im Landeswald, aber auch im Privatwald großflächig durchgeführt. Schon vor der BZE I sind daher viele BZE-Punkte gekalkt worden. Um den Einfluss der Kalkung auf die Veränderung der Basensättigung prüfen zu können,

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in Niedersachsen, links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I (n=202) und BZE II (n=168), rechts die mittleren Differenzen (BZE II – BZE I, n=110), roter Stern: signifikant unter dem 5 %-Signifikanzniveau



Bodenzustandserhebung

sind in der Grafik (Seite 24) die durchschnittlichen Basensättigungen der gekalkten und nicht gekalkten BZE-Punkte gegenübergestellt. Durch Kalkstein geprägte Standorte und Sonderstandorte (z. B. Moore) sind in dieser Auswertung ausgenommen.

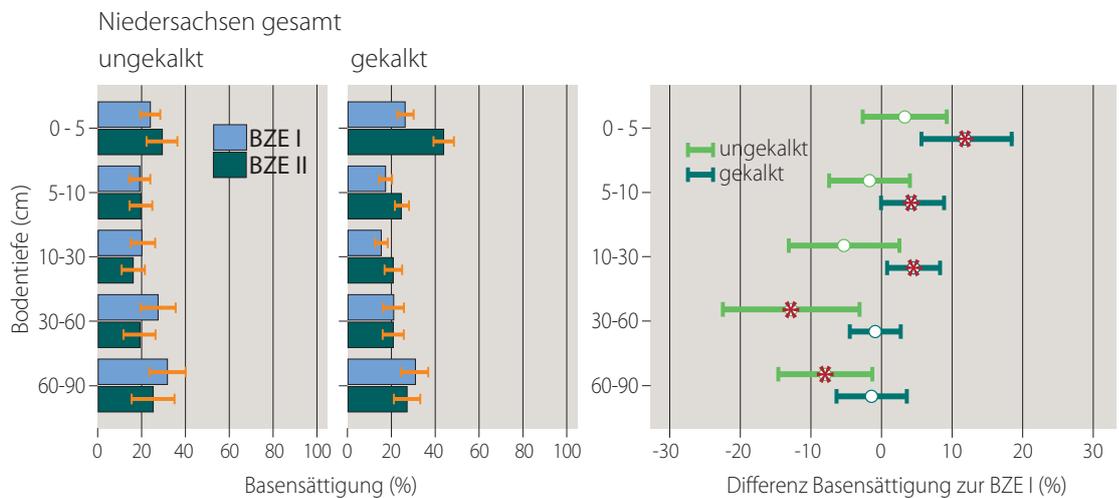
Der Einfluss der Kalkung auf die Basensättigung zeigt sich sehr deutlich: Die gekalkten Standorte erreichen bei der BZE II in den Tiefenstufen 0-5 cm eine um durchschnittlich 12 %-Punkte, in 5-10 cm eine um 4 %-Punkte und in 10-30 cm eine um 5 %-Punkte signifikant höhere Basensättigung als die ungekalkten Standorte. In den anschließenden Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm verändert sich die durchschnittliche Basensättigung im Kollektiv der gekalkten BZE-Punkte nur geringfügig und nicht signifikant. Bei den ungekalkten BZE-Punkten dagegen hat die durchschnittliche Basensättigung in den Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm um 13 %- und 8 %-Punkte signifikant abgenommen, was als deutliches Anzeichen einer weiteren Tiefenversauerung angesehen werden kann.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Bodenschutzkalkung den Bodenzustand in den oberen 30 cm verbessert und eine weitere Tiefenversauerung verhindert hat. Die Basensättigung der ungekalkten BZE-Punkte veränderte sich in den oberen 30 cm des Mineralbodens kaum, die leichte (nicht signifikante) Verbesserung in 0-5 cm und die Verschlechterung in 10-30 cm kann mit dem Rückgang der Säureinträge in Verbindung gebracht werden.

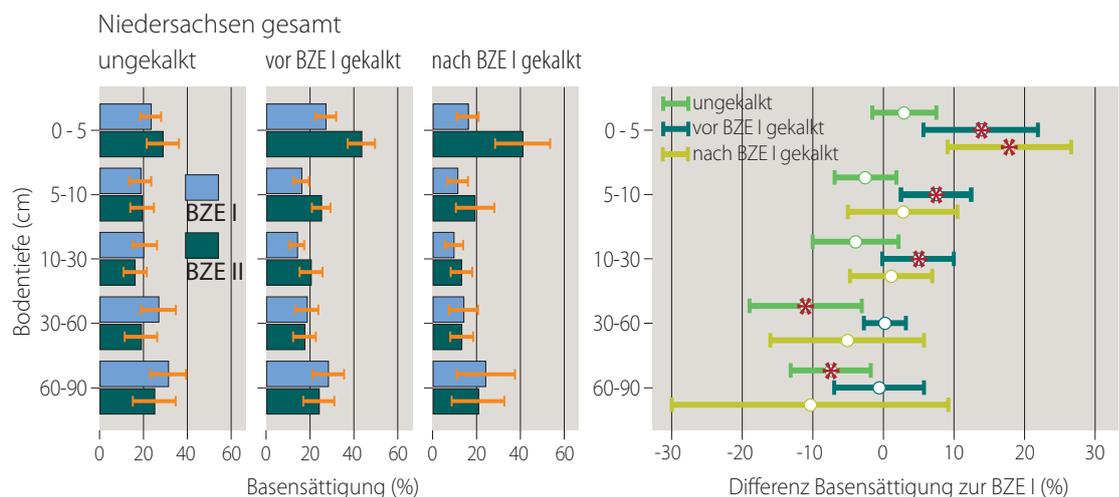
Bodenschutzkalkungen wirken mittel- bis langfristig, da der Kalk in Wäldern nicht wie in der Landwirtschaft in den Mineralböden eingearbeitet wird und es sich um mild wirkende Kalke handelt, die sich langsam lösen. Da einige BZE-Punkte schon vor der BZE I gekalkt worden sind, sollte sich bei diesen Standorten eine höhere Basensättigung zeigen als bei denen, die zum Zeitpunkt der BZE I noch ungekalkt waren und erst zwischen den Erhebungen erstmalig gekalkt wurden.

Die BZE-Punkte, die bereits vor der BZE I gekalkt wurden, haben bereits zum Zeitpunkt der BZE I eine um durchschnittlich 4 %-Punkte höhere Basensättigung in 0-5 cm Bodentiefe als die erst nach der BZE I gekalkten BZE-Punkte, was schon bei der BZE I den Einfluss der vorhergegangenen Kalkung anzeigt. Die Wirkung der Kalkung im Mineralboden reicht bei den bereits vor der BZE I gekalkten BZE-Punkten zudem deutlich tiefer: Bis 30 cm sind die durchschnittlichen Werte der Basensättigung in diesem Kollektiv signifikant erhöht, in den oberen Tiefenstufen stärker als in den unteren. Bei den BZE-Punkten, die erst zwischen den beiden BZE-Erhebungen gekalkt wurden, erhöhte sich die Basensättigung nur in 0-5 cm signifikant. Die durchschnittliche Basensättigung im Unterboden unter 30 cm Bodentiefe im Kollektiv der vor der BZE I gekalkten BZE-Punkten verschlechterte sich nicht weiter, wohingegen zum Zeitpunkt der BZE II sich im Kollektiv der zwischen den BZE-Erhebungen gekalkten BZE-Punkten geringere Werte der Basensättigung einstellten. Diese Veränderungen sind

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für gekalkte und nicht gekalkte BZE-Punkte in Niedersachsen (ohne Kalk- und Sonderstandorte). Links die durchschnittliche Basensättigung für alle ungekalkten (BZE I: n=61; BZE II: n=47) und gekalkten (BZE I: n=116; BZE II: n=92) BZE-Punkte, rechts die mittleren Differenzen (BZE II – BZE I, ungekalkt n=27; gekalkt n=67), roter Stern: signifikant unter dem 5 %-Signifikanzniveau



Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in Niedersachsen. Links die durchschnittliche Basensättigung für alle ungekalkten (BZE I: n=62; BZE II: n=47), vor der BZE I (BZE I: n=84; BZE II: n=55) und nach der BZE I (BZE I: n=13; BZE II: n=13) gekalkten BZE-Punkte, rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I, ungekalkt n=27, vor BZE I gekalkt n=50, nach BZE I gekalkt n=6), roter Stern: signifikant unter dem 5 %-Signifikanzniveau



Bodenzustandserhebung

zwar nicht signifikant, aber im Gesamtbild sehr plausibel. Damit zeigt sich im Vergleich der beiden BZE-Erhebungen und dem Kalkungszeitpunkt, dass die Kalkung langfristig wirkt und nicht wie früher befürchtet nur kurzfristige Effekte erzielt.

Die Waldböden in Niedersachsen sind sehr verschieden. Entsprechend ihrer naturräumlich bedingten Eigenschaften reagieren Waldböden unterschiedlich empfindlich auf Belastungen und Störungen. Die ärmeren Sande im niedersächsischen Tiefland oder die Quarzite im Harz sind geringer mit Nährstoffen ausgestattet und versauern daher leichter als die reicheren Lößstandorte der Berglandschwelle oder im Weserbergland mit relativ hohen Pufferpotenzialen. Grauwacken oder auch teilweise Tonschiefer im Harz können trotz mittlerer Nährstoffausstattung teilweise auch kritische Werte für die Basensättigung aufweisen. Um dieser Standortvielfalt Rechnung zu tragen, wurden alle 267 BZE-Punkte einheitlichen Substratgruppen zugeordnet, die hinsichtlich ihrer Standortmerkmale und ihres Pufferpotenzials vergleichbare Einheiten bilden. Das zentrale Gliederungsmerkmal dieser Einteilung ist das jeweilige Ausgangssubstrat, welches wesentlich die chemischen Eigenschaften und damit die Pufferkapazitäten gegenüber Säureinträgen bestimmt. Die oben angeführten Ergebnisse sind Durchschnittswerte für alle Waldböden in Niedersachsen. Um die Veränderungen typischer Waldböden in Niedersachsen analysieren und besser bewerten zu können, sind die BZE-Punkte nach Substratgruppen gegliedert und ausgewertet worden. Diese Einheiten bieten ein differenziertes Bild der standörtlichen Vielfalt der Waldböden in Niedersachsen, lassen Belastungsmuster erkennen und sind Grundlage für die Beurteilung von möglichen Kompensationsmaßnahmen.

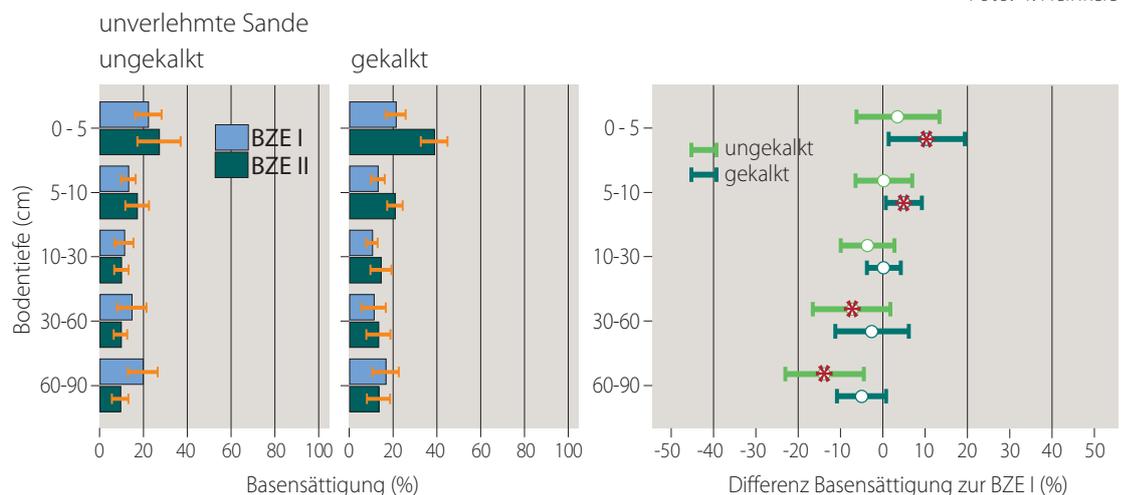
Die meistverbreitete Substratgruppe in Niedersachsen sind die **unverlehmten Sande**. Diese Substratgruppe repräsentiert 36 % der BZE II-Punkte und ist typisch für Waldstandorte im niedersächsischen Tiefland. Sie wird von glazialen und fluvioglazialen Ablagerungen der letzten Eiszeiten geprägt. Vorherrschende Bodenarten sind Sande, als Bodentypen dominieren ärmere Sand-Braunerden, Podsol-Braunerden und Podsole. Aufgrund ihrer geringen Nährstoffvorräte sind unverlehmte Sande besonders empfindlich gegenüber Säureinträgen. Dies zeigt sich deutlich an den mittleren Werten der Basensättigung in der Abbildung unten. Die BZE-Punkte in der Substratgruppe der unverlehmten Sande zählen allgemein zu den Waldstandorten mit den geringsten Nährstoffvorräten. Dies gilt für die unverlehmten Sande in Niedersachsen in besonderem Maße, da sie im Vergleich zu den unverlehmten Sanden in Sachsen-Anhalt und Hessen noch geringere durchschnittliche Werte für die Basensättigung aufweisen. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 0-5 cm in beiden Kollektiven und der Tiefenstufe 5-10 cm im Kollektiv der gekalkten BZE-Punkte liegen die durchschnittlichen Basensättigungen bei der BZE II unterhalb des kritischen Wertes von 20 % und befinden sich damit im geringen Bewertungsbereich. Durch die Waldkalkung konnte eine erhebliche und signifikante Verbesserung in 0-5 cm Bodentiefe um 10 %-Punkte und 5 %-Punkte in 5-10 cm erreicht werden. In den anschließenden Tiefenstufen gab es im gekalkten Kollektiv der unverlehmten Sande nur geringfügige Veränderungen zur BZE I, in 60-90 cm verschlechterte sich die durchschnittliche Basensättigung um 5 %-Punkte, jedoch nicht signifikant. Im Kollektiv der ungekalkten unverlehmten Sande veränderte sich die Basensättigung in den oberen 30 cm Bodentiefe nur un-

ten Nährstoffvorräten. Dies gilt für die unverlehmten Sande in Niedersachsen in besonderem Maße, da sie im Vergleich zu den unverlehmten Sanden in Sachsen-Anhalt und Hessen noch geringere durchschnittliche Werte für die Basensättigung aufweisen. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 0-5 cm in beiden Kollektiven und der Tiefenstufe 5-10 cm im Kollektiv der gekalkten BZE-Punkte liegen die durchschnittlichen Basensättigungen bei der BZE II unterhalb des kritischen Wertes von 20 % und befinden sich damit im geringen Bewertungsbereich. Durch die Waldkalkung konnte eine erhebliche und signifikante Verbesserung in 0-5 cm Bodentiefe um 10 %-Punkte und 5 %-Punkte in 5-10 cm erreicht werden. In den anschließenden Tiefenstufen gab es im gekalkten Kollektiv der unverlehmten Sande nur geringfügige Veränderungen zur BZE I, in 60-90 cm verschlechterte sich die durchschnittliche Basensättigung um 5 %-Punkte, jedoch nicht signifikant. Im Kollektiv der ungekalkten unverlehmten Sande veränderte sich die Basensättigung in den oberen 30 cm Bodentiefe nur un-



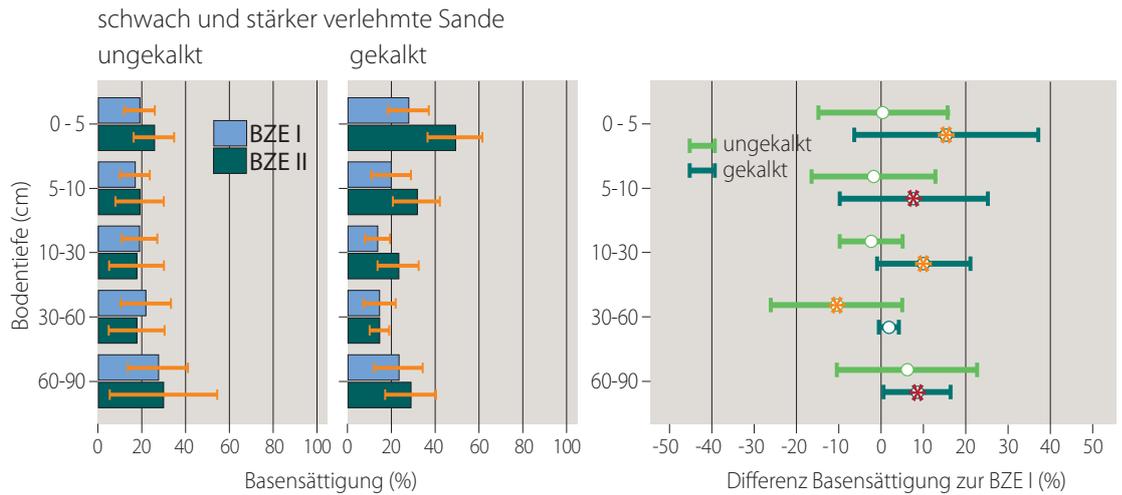
Mächtiger Podsol aus unverlehmtem Sand in der Lüneburger Heide
Foto: T. Heinkele

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe unverlehmte Sande in Niedersachsen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II für alle ungekalkten (BZE I: n=25; BZE II: n=29) und gekalkten (BZE I: n=35; BZE II: 31) BZE-Punkte, rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I, ungekalkt n=15, gekalkt n=22), roter Stern: signifikant unter 5 %-Signifikanzniveau



Bodenzustandserhebung

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe schwach und stärker verlehnte Sande in Niedersachsen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II für alle ungekalkten (BZE I: n=20; BZE II: n=9) und gekalkten (BZE I: n=24; BZE II: 18) BZE-Punkte, rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I, ungekalkt n=12, gekalkt n=6), roter Stern: signifikant unter 5 %-Signifikanzniveau, orangener Stern: signifikant unter 10 %-Signifikanzniveau



wesentlich, verschlechterte sich jedoch erheblich in 30-60 cm um 7 %-Punkte und in 60-90 cm um 14 %-Punkte, beide Veränderungen waren signifikant. Damit zeigt sich für die bisher ungekalkten unverlehnten Sande eine zunehmende Tiefenversauerung. Dies ist insofern problematisch, da diese Standorte im intensiv durchwurzelten Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe bereits überwiegend kritische Werte der Basensättigung zwischen 10-20 % aufweisen. Dass sich bei den ungekalkten Standorten die Basensättigung in den oberen Tiefenstufen nicht deutlicher verschlechtert hat, kann mit dem Rückgang der Säureeinträge in Verbindung gebracht werden.

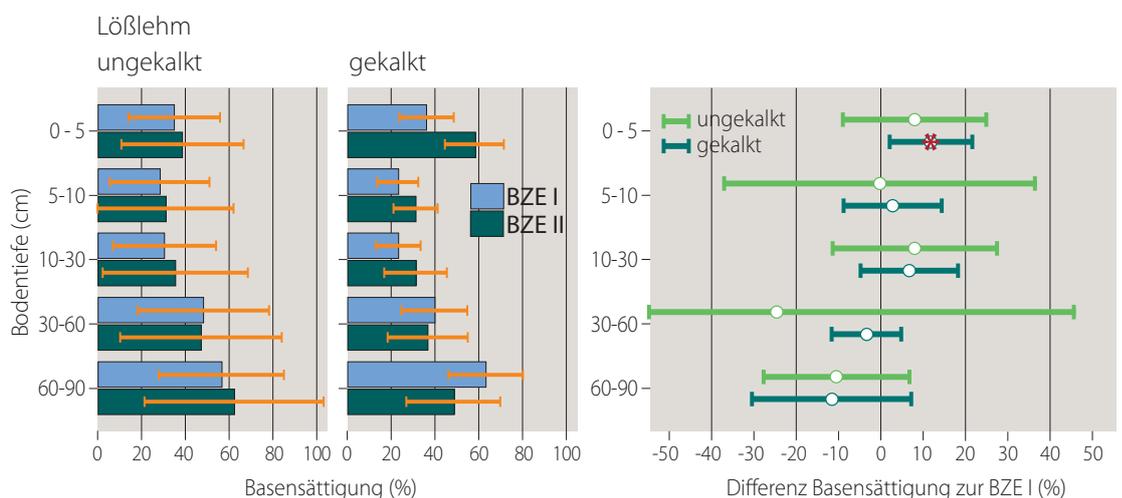
Nach den unverlehnten Sanden ist die Substratgruppe der **schwach und stärker verlehnten Sande** die zweithäufigste in Niedersachsen. Diese Substratgruppe hat 16 % Anteil an den BZE II-Punkten in Niedersachsen und ist wie die Substratgruppe der unverlehnten Sande typisch für das Tiefland. Häufige Standorte sind verlehnte Grundmoränen und verlehnte Standorte in Niederungen und Auen.

Mit durchschnittlichen Werten zwischen 15 und 50 % Basensättigung fallen die schwach und stärker verlehnten Sande in den geringen bis mittleren Bewertungsbereich. Der höhere Verlehungsgrad dieser Waldböden bildet sich in höheren durchschnittlichen Basensättigungen gegenüber der Substratgruppe der unverlehnten Sande ab. Dies betrifft vor allem die Tiefenstufe 60-90 cm. Hier liegen die Werte der BZE II in den schwach und stärker verlehnten Sanden bei rund 30 % Basen-

sättigung, bei den unverlehnten Sanden nur bei rund 10 %. Dennoch liegen in mittleren Bodenschichten zwischen 5 und 60 cm Bodentiefe auch bei den schwach und stärker verlehnten Sanden kritische Werte unter 20 % Basensättigung vor, die sich im ungekalkten Kollektiv weiter verschlechterten. Dies ist signifikant für die Tiefenstufe 30-60 cm. Im gekalkten Kollektiv dieser Substratgruppe sind die Basensättigungen bei der BZE II in allen Tiefenstufen im Vergleich zur BZE I höher, in 30-60 cm Bodentiefe nur sehr gering und nicht signifikant. Damit zeigen sich auch in diesem Kollektiv dieselben Muster wie in der Substratgruppe der unverlehnten Sande hinsichtlich der weiteren Tiefenversauerung im ungekalkten Kollektiv, jedoch deutlich abgeschwächt.

Mit 11 % Anteil an den BZE II-Punkten ist die Substratgruppe **Lößlehm** nach den Sanden die dritthäufigste Substratgruppe in Niedersachsen. Die Substratgruppe Lößlehm wurde in der BZE etwas weiter gefasst als in der Standortkartierung. Auch vom Lößlehm bestimmte, mächtige Deckschichten über verschiedensten Ausgangssubstraten wurden dieser Substratgruppe bei der BZE zugeordnet. Lößlehme sind fruchtbare Standorte und meist ackerbaulich genutzt. Sie sind auch wertvolle Waldstandorte, vor allem, weil sie mittel bis gut nährstoffversorgt sind und große Wassermengen speichern können. Lößlehme sind allerdings empfindlich gegenüber Säureeinträgen, weshalb sie in Niedersachsen und Hessen in Kalkungsmaßnahmen einbezogen wurden.

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe Lößlehm in Niedersachsen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II für alle ungekalkten (BZE I: n=10; BZE II: n=7) und gekalkten (BZE I: n=22; BZE II: 17) BZE-Punkte, rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I, ungekalkt n=4, gekalkt n=13), roter Stern: signifikant unter 5 %-Signifikanzniveau



Bodenzustandserhebung

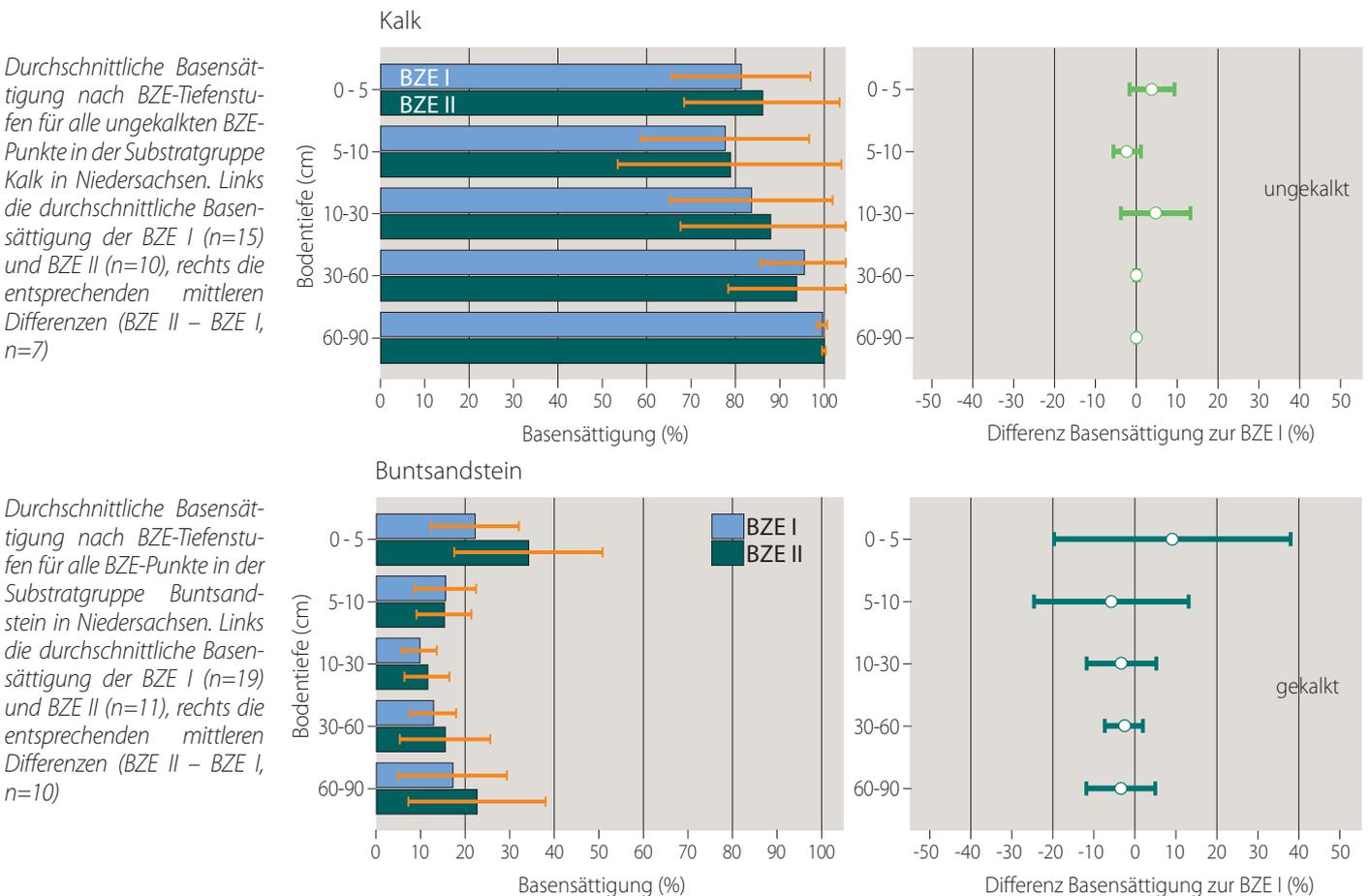
Die mittleren Basensättigungen der BZE-Punkte in der Substratgruppe Lößlehm liegen alle im mittleren bis hohen Bewertungsbereich. Die durchschnittliche Basensättigung nimmt mit zunehmender Bodentiefe zu und erreicht die höchsten Werte in der Tiefenstufe 60-90 cm. Die weiten Konfidenzintervalle kennzeichnen eine hohe Heterogenität der Standorte bezüglich der Basensättigung und eine geringere Aussagekraft des Mittelwertes. Bei der Betrachtung der Einzelpunkte liegen bei der BZE II 60 % der BZE-Punkte im überwiegenden Tiefenbereich unter 10 cm Bodentiefe unter 20 % Basensättigung und damit im kritischen Bereich. Dies erfordert bei der Beurteilung von Kompensationsmaßnahmen dieser Substratgruppe eine differenziertere Betrachtung auf standörtlicher und bodenchemischer Grundlage. Die Veränderungen der durchschnittlichen Basensättigungen zwischen der BZE I und BZE II streuen ebenfalls weit. Signifikant ist die Verbesserung im gekalkten Kollektiv in der Tiefenstufe 0-5 cm, dort stieg die durchschnittliche Basensättigung um 12 %-Punkte an. Leichte, nicht signifikante Verbesserungen gab es bis 30 cm Bodentiefe in beiden Kollektiven, aber deutlicher im gekalkten Kollektiv. Die Waldkalkung hatte bei den entsprechenden BZE-Punkten positive Effekte im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe, hinzu kommt die entlastende Wirkung der zurückgegangenen Säureeinträge.

Die BZE-Punkte in der Substratgruppe der **Kalke** sind mit 8 %-Anteil in der BZE II vertreten. Sie weisen insgesamt die höchsten Werte für die Basensättigung aus und verfügen über eine hohe Pufferkapazität gegenüber Säureeinträgen. Diese Standorte liegen im niedersächsischen Bergland, vor allem im Weserbergland. Sie sind in der Regel nicht gekalkt worden. Erwartungsgemäß liegen die durchschnittlichen Basensätti-

gungen im hohen Bewertungsbereich. Relativ am geringsten sind die Durchschnittswerte bei weiten Streuungen im oberen Mineralboden. Die Werte nehmen mit zunehmender Bodentiefe bis auf nahezu 100 % in der Tiefenstufe 60-90 cm zu. Dort streuen dann die Werte nur noch gering. Signifikante und nennenswerte Änderungen zwischen den BZE-Erhebungen bezüglich der Basensättigung traten nicht auf.

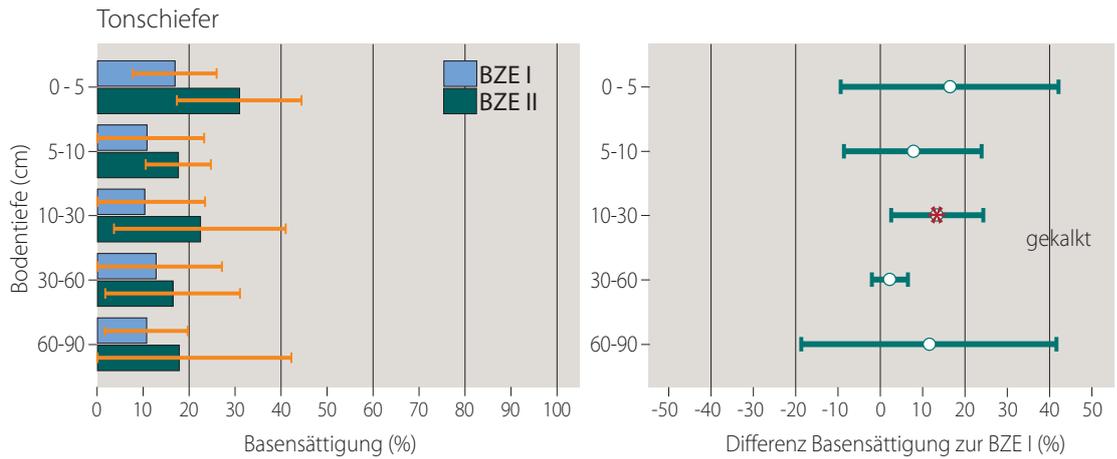
Eine weitere typische Substratgruppe im niedersächsischen Bergland ist der **Buntsandstein**, der insgesamt mit 6 % an der BZE II vertreten ist. Vorherrschende Bodenarten sind Sande mit unterschiedlichem Verlehmungsgrad. Als Bodentyp dominiert die Braunerde. Vor allem die ärmere Ausprägung dieser Substratgruppe ist besonders empfindlich gegenüber Säureeinträgen, aber auch die besser versorgten Standorte dieser Gruppe sind in den oberen Bodenschichten gefährdet. Mit Ausnahme von 2 BZE-Punkten im BZE I-Raster sind alle BZE-Punkte dieser Substratgruppe gekalkt worden und mit den durchschnittlichen Basensättigungen nach Tiefenstufen in der Abbildung unten dargestellt.

Mit Ausnahme der Tiefenstufen 0-5 cm und 60-90 cm im Kollektiv der BZE II liegen die durchschnittlichen Basensättigungen im Hauptwurzelraum unterhalb des kritischen Grenzwertes von 20 %. Wie bei den Lößlehmen kennzeichnen die weiten Konfidenzintervalle die hohe Standortsheterogenität dieses Kollektivs. Der überwiegende Anteil der BZE-Punkte in der Substratgruppe Buntsandstein ist bereits vor der BZE I gekalkt worden. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass die durchschnittlichen Basensättigungen der BZE I in Niedersachsen höher sind als vergleichbare Standorte in Hessen. Dort zeigte sich zudem eindeutig eine weitere Verschlechterung der ungekalkten und eine weitere Verbesserung der gekalk-



Bodenzustandserhebung

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe Tonschiefer in Niedersachsen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II (n=6), rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I, n=5), roter Stern: signifikant unter 5 %-Signifikanzniveau



ten BZE-Punkte in der Substratgruppe Buntsandstein. Auffällig in Niedersachsen ist die Verbesserung der Basensättigung in der obersten Tiefenstufe 0-5 cm bei der BZE II, die sich jedoch nicht statistisch absichern lässt. Im Vergleich der Mittelwerte der BZE-Erhebungen (linke Grafik) hat sich die Situation durchschnittlich leicht verbessert. Im Kollektiv der BZE-Punkte, die in beiden Erhebungen beprobt wurden (rechte Grafik) zeichnet sich jedoch unterhalb von 5 cm Bodentiefe eher eine leichte Verschlechterung für alle Tiefenstufen ab. Für gesicherte und klarere Aussagen sind bei der Heterogenität dieser Substratgruppe höhere Stichprobennzahlen erforderlich. Grundsätzlich liegen in der Substratgruppe Buntsandstein nach wie vor kritische Zustände im Mineralboden vor, damit sind Kompensationsmaßnahmen in dieser Substratgruppe erforderlich.

Ähnlich zu bewerten sind die BZE-Punkte in den Substratgruppen Grauwacke (3 %-Anteil am BZE II-Kollektiv) und Granit (1 %), die auf Grund der geringen Stichprobennzahl nicht gesondert dargestellt werden.

Mit 4 % Anteil an den BZE-Punkten der BZE II ist in Niedersachsen noch die Substratgruppe **Tonschiefer** bedeutsam. Mit teilweise hohen Steinanteilen und verschiedensten mineralischen Zusammensetzungen weist diese Gruppe standörtlich eine große Heterogenität auf. Die Tonschiefer-Standorte liegen alle im niedersächsischen Harz. In der Regel ist der anstehende Tonschiefer im Harz eher ärmer ausgeprägt. Es haben sich Braunerden ausgebildet. Alle Tonschiefer-Standorte im BZE-Kollektiv sind gekalkt worden.

Die weiten Konfidenzintervalle für die mittleren Basensättigungen in den Tiefenstufen (orange Linien) sind unter anderem Ausdruck für die große Heterogenität dieser Standorte. Die durchschnittlichen Basensättigungen der Tonschiefer-Standorte lagen zum Zeitpunkt der BZE I bis 90 cm Bodentiefe unter 20 % Basensättigung und zeigten damit deutliche Spuren einer Versauerung. Nach den Waldkalkungen hat sich der Zustand in allen Tiefenstufen deutlich verbessert, signifikant ist dies für die Bodentiefe 10-30 cm. Im Unterschied zu den Tonschiefer-Standorten in Hessen und Sachsen-Anhalt, die eine durchschnittliche Basensättigung zwischen 40-60 % im Unterboden aufweisen, sind die niedersächsischen Tonschiefer-Standorte deutlich ärmer.

Die genannten Substratgruppen umfassen rund 85 % aller Waldböden in Niedersachsen. Vereinzelt im BZE-Kollektiv vorkommende Substrate wie z. B. Tonstein, Kreidesandstein,

Mergel oder Diabas sind aufgrund der geringen Stichprobennzahl und Heterogenität als Substratgruppen nicht sinnvoll auswertbar. Dies trifft auch auf Standorte zu, die wesentlich durch organische Substanz geprägt sind, wie Moore, Brüche oder auch Standorte mit übererdeten mächtigen Humusauf-lagen. Diese Standorte sind mit 8 %-Anteil im BZE II-Kollektiv nicht selten; infolge der hohen Gehalte an organischer Substanz sind bei diesen Böden nachteilige Wirkungen von saurem Aluminium von untergeordneter Bedeutung.

Fazit

Die Ergebnisse der BZE I zeigten, dass viele Waldstandorte aufgrund der luftbürtigen Säureeinträge kritische Zustände aufwiesen. Neben Luftreinhaltemaßnahmen sind zur Entlastung der Böden umfangreiche Waldkalkungen durchgeführt worden. Die BZE II zeigt nun, dass für die gekalkten Standorte die Ziele der Bodenschutzkalkung erreichbar sind: Schutz des Waldbodens vor weiterer Versauerung, Verhinderung einer in die Tiefe fortschreitenden Versauerung und die Verbesserung des chemischen und biologischen Bodenzustandes. Auf ungekalkten ärmeren Standorten, vor allem bei der Substratgruppe der unverlehmten Sande, haben sich die bodenchemischen Verhältnisse hingegen weiter verschlechtert, hier sollten Kalkungsmaßnahmen erste Priorität haben. Reiche, gut nährstoffversorgte Waldstandorte z. B. auf Muschelkalk haben sich hinsichtlich der durchschnittlichen Basensättigung kaum verändert. Auf mittel nährstoffversorgten Standorten wie Lößlehmen, Tonschiefer- oder Grauwacke-Standorten sind zur Verbesserung des bodenchemischen Milieus im Oberboden Kalkungen ebenfalls sinnvoll, da auch bei diesen Standorten kritische Zustände hinsichtlich der Basensättigung vorherrschen. Die Ergebnisse der BZE decken sich mit den Untersuchungen auf Flächen des Intensiven Monitorings. Die dort ermittelten Stoffeinträge und -bilanzen weisen auf Standorten mit basenarmem Silikatgestein eine Säurebelastung aus, die die Säurepufferraten der Waldböden übersteigt. Beide Untersuchungsansätze liefern ein stimmiges Bild. Auch wenn in der Luftreinhaltepolitik und in der Waldbewirtschaftung bereits große Erfolge zur Entlastung der Waldböden erzielt wurden, sind weitere Maßnahmen erforderlich, um die Belastung der Waldökosysteme auf ein tolerierbares Maß zu verringern. Eine wichtige politische Maßnahme ist die Verminderung der hohen säurebildenden Stickstoffeinträge.