

Bodenzustandserhebung

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

Jan Evers und Uwe Paar

Hessens Waldböden sind infolge der jahrzehntelangen Säureinträge belastet. Filter- und Regulationsfunktionen der Böden sind gestört, erhebliche Säuremengen in den Böden gespeichert und Nährstoffe mit dem Sickerwasser ausgetragen. Durch die sauren Einträge wurde 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 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 Hessen 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 beiden BZE Erhebungen in Hessen sind dieselben 139 repräsentativen Rasterpunkte des 8 km x 8 km Level I Netzes der Forstlichen Umweltkontrolle beprobt worden. Bei der zweiten Erhebung 2007 sind dieselben Parameter wie bei der ersten Erhebung 1992 erfasst worden. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sind auch dieselben Methoden bzw. vergleichbare Methoden verwendet worden.

Zentrales Anliegen der BZE ist es, den aktuellen Bodenzustand und die Veränderungen zur ersten Erhebung zu ermitteln, Ur-



Lößlehm über Buntsandstein

Foto: H. Kasel

sachen für diese Veränderungen zu identifizieren und hinsichtlich ihrer ökologischen Relevanz zu bewerten. Zudem sollen die Wirkungen von Maßnahmen zum Schutz der Waldböden und den darin ablaufenden Prozessen vertieft werden. Dies trägt dazu bei, eine verbesserte Grundlage für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung zu schaffen. Daran kann die weitere Planung und weitere 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 die Zusammensetzung der Bodenlösung im Mineralboden ist die Basensättigung. Aus ihr lassen sich die direkte Verfügbarkeit von Nährstoffen im Mineralboden und damit die Ernährungsbedingungen der Waldbäume ableiten. Die Basensättigung drückt aus, wie hoch der relative Anteil der Nährelemente Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Vergleich zu der Gesamtsumme der Kationen mit zusätzlich Aluminium, Eisen, Mangan und Wasserstoff-Ionen ist, die an den negativ geladenen Tonmineralen und der organischer Substanz (Austauscher) gebunden sind. Im Zuge fortschreitender Bodenversauerung werden die an der Pufferung beteiligten „basischen“ Kationen Calcium, Magnesium und Kalium vom Austauscher im Wesentlichen durch „saures“ Aluminium verdrängt. Eine geringe Basensättigung im Mineralboden ist in erheblichem Maße eine Folge luftbürtiger, versauernd wirkender Stoffeinträge. Eine Basensättigung von weniger als 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, 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 notwendigen 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 Nutzung wie beispielsweise Vollbaumnutzung empfindlich ist. In diesen Fällen können Kompensationsmaßnahmen in Form von Waldkalkungen sinnvoll sein.

Die Waldböden in Hessen sind wenig einheitlich. Entsprechend unterschiedlich ist ihre Belastbarkeit hinsichtlich der Säureinträge zu bewerten: Kalk-, Basalt- und Diabasstandorte sind z. B. aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung in der Lage, hohe Säuremengen abzupuffern, arme Buntsandsteine sind in der Regel diesbezüglich viel empfindlicher. Um dieser Standortvielfalt Rechnung zu tragen, wurden die 139 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 Pufferkapazitäten gegenüber luftbürtigen Säureinträgen bestimmt. In den folgenden Grafiken wird die mittlere Basensättigung von BZE I und BZE II und ihre zeitliche Veränderung (1992 gegenüber 2008), gegliedert nach Kalkung und Substratgruppe dargestellt. In der linken Grafik sind jeweils die Tiefenstufen der

Bodenzustandserhebung

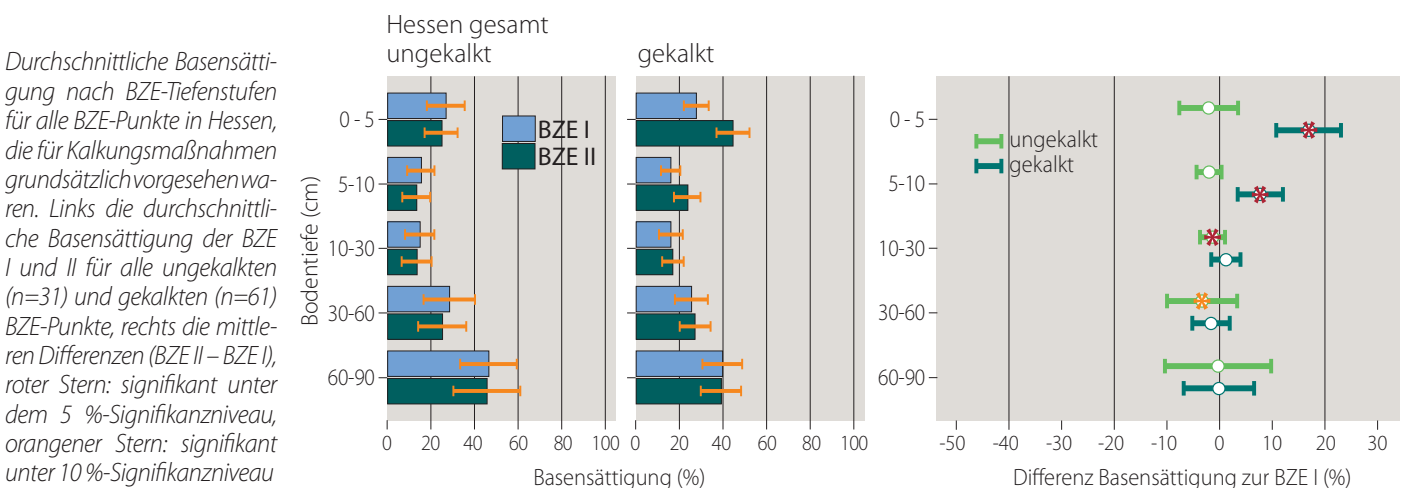
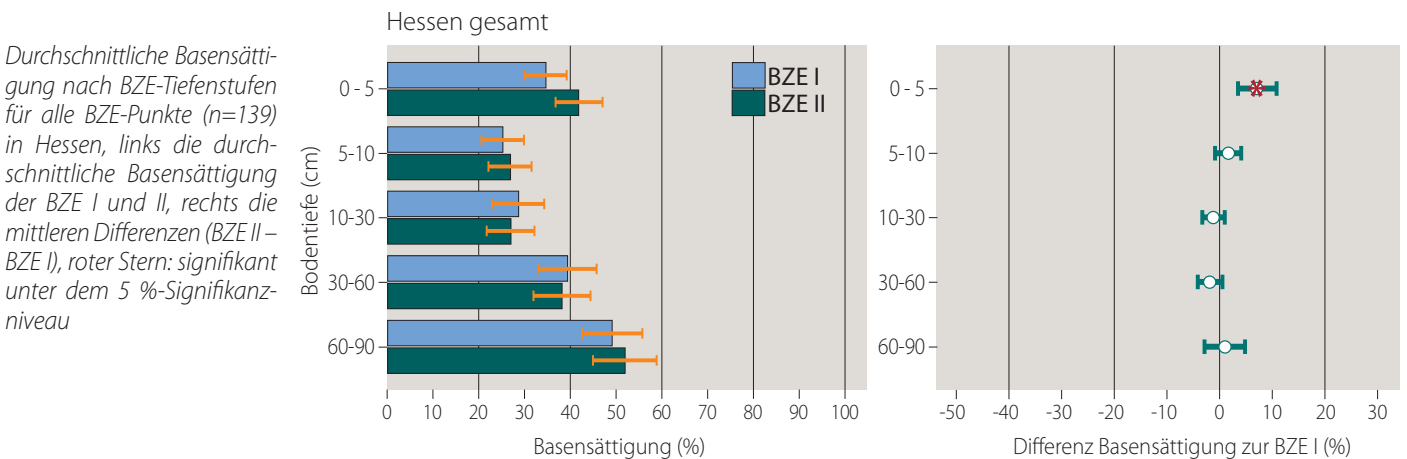
BZE als Y-Achse und die Basensättigung auf der X-Achse abgebildet. Die Mittelwerte der Basensättigung der jeweiligen Tiefenstufe sind für die BZE I hellblau und für die BZE II dunkelblau, in orange ist als Streuungsmaß das 95 % Konfidenzintervall für den Mittelwert als Balken angegeben. Das bedeutet, 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 entsprechenden 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 Hessens Waldböden liegen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung in den einzelnen Tiefenstufen mit Werten zwischen 20 und 50 % im mittleren Bereich. Viele Waldböden verfügen in tieferen Bodenschichten über ausreichende Nährstoffe und Pufferkapazität, was sich in den relativ hohen Werten der Basensättigung mit 50 % in der Bodenschicht zwischen 60 und 90 cm, aber auch mit 40 % zwischen 30 und 60 cm widerspiegelt. Die höheren Werte der Basensättigung der Tiefenstufe 0-5 cm im Vergleich zu den Tiefenstufen bis 30 cm Bodentiefe lassen sich durch die Einarbeitung organischer Substanz durch die Bodenwühler, Wurzelstreu und Einwaschung mit dem Sickerwasser in Waldböden erklären. Dies erhöht die Austauschkapazität und meist auch die Basensättigung. Das durchschnittliche Niveau der Basensättigung der BZE II liegt in

0-5 cm Bodentiefe bei rund 40 % im mittleren Bereich und ist im Vergleich zur BZE I um 7 %-Punkte signifikant höher. Dies lässt sich mit den durchgeführten Waldkalkungsmaßnahmen und dem Rückgang der luftbürtigen Säureeinträge erklären. Mit zunehmender Bodentiefe sinkt die Basensättigung um über 10 % Punkte und steigt unter 30 cm Bodentiefe bis 60 cm wieder auf das Niveau der Tiefenstufe zwischen 0-5 cm an.

Die Waldkalkungen in Hessen wurden auf Standorten aus basenarmen Silikatgesteinen (Ausnahme Sande) und Lößlehmen durchgeführt, basenreiche Substrate wie Muschelkalk, Basalt und Diabas sowie Tone wurden nicht gekalkt. Um den Einfluss der Kalkung auf die Veränderung der Basensättigung prüfen zu können, sind in der folgenden Grafik nur die prinzipiell in der Kalkungsplanung vorgesehenen Substrate einbezogen worden. Dies sind v. a. Waldstandorte mit bestimmendem Buntsandstein, Lößlehm, Tonschiefer und Grauwacke. Gegenübergestellt sind die gekalkten und nicht gekalkten BZE-Punkte dieses Kollektivs.

Der Kalkungseinfluss auf die Basensättigung zeigt sich sehr deutlich: die gekalkten Standorte erreichen in der Tiefenstufe 0-5 cm eine um durchschnittlich 16 % Punkte, in 5-10 cm eine um 8 % Punkte höhere Basensättigung als die ungekalkten Standorte. Beide Ergebnisse sind signifikant. Unterhalb von 10 cm Bodentiefe bleibt die durchschnittliche Basensättigung bei den gekalkten Standorten im Mittel konstant. Bei den ungekalkten Standorten dagegen zeichnet sich im Trend eine abnehmende Basensättigung bis 60 cm Bodentiefe ab, die zwar gering, aber für 10-30 cm und 30-60 cm Bodentiefe signifikant ist. Damit zeigt sich insgesamt für die bisher ungekalkten, aber in die Kalkungsplanung einbezogenen Standorte eine zuneh-



Bodenzustandserhebung

mende Tiefenversauerung. Dies ist insofern problematisch, da diese Standorte im intensiv durchwurzelt Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe bereits kritische Werte für die Basensättigung um 15 % aufweisen. Bei den gekalkten Standorten ist die kritische Grenze von 20 % Basensättigung nur zwischen 10-30 cm Bodentiefe unterschritten (17 % Basensättigung). 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.

Die bisher dargestellten Mittelwerte sind Durchschnittswerte für alle Waldböden Hessens. Um von diesen allgemeinen Mittelwerten konkreter typische Waldstandorts-Einheiten in Hessen beschreiben zu können, sind die Auswertungen zur Basensättigung auf Ebene der wichtigsten Substratgruppen durchgeführt worden. Diese Einheiten bieten ein differenziertes Bild der standörtlichen Vielfalt der Waldböden in Hessen, lassen Belastungsmuster erkennen und sind Grundlage für die Beurteilung von möglichen Kompensationsmaßnahmen.

Die bedeutendste Substratgruppe in Hessen ist der **Buntsandstein**. Diese Substratgruppe ist typisch für rund 40 % der hessischen Waldfläche. Sie wird von kalkfreien Buntsandsteinformationen geprägt. 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 oberen Bodenschichten gefährdet. Dies zeigt sich deutlich an den mittleren Werten der Basensättigung in der Abbildung unten.

Im ungekalkten Kollektiv fallen die besonders geringen durchschnittlichen Werte der Basensättigung auf. Sie liegen deutlich unterhalb des Mittels für Hessen und im Hauptwurzelraum auch unter der kritischen Grenze von 20 %. Teilweise werden auch Werte unter 10 % erreicht. Sie haben sich zudem seit der BZE I in allen Tiefenstufen deutlich verschlechtert, was für die Tiefen 5-10 cm, 10-30 cm und 30-60 cm signifikant ist. Die höhere Basensättigung in der obersten Tiefenstufe 0-5 cm ist eine Folge der Mineralisation aus dem Auflagehumus, der Tätigkeit der Bodenwühler und Ausdruck des Nährstoffkreislaufes. Im Kollektiv der gekalkten BZE-Punkte dieser Substratgruppe liegen die durchschnittlichen Basensättigungen zum Zeitpunkt der BZE I auf ähnlichem Niveau wie die Werte der ungekalkten BZE-Punkte. Die nun neu ermittelten Werte in der BZE II zeigen einen deutlichen Anstieg der durchschnittlichen Basen-

sättigungen in allen Tiefenstufen nach der Kalkung, die bis in 60 cm Bodentiefe abgesichert sind. Bis 10 cm Bodentiefe liegt die durchschnittliche Basensättigung nach der Kalkung im unkritischen Bereich. Von 10-60 cm Bodentiefe herrschen durchschnittlich jedoch auch im gekalkten Kollektiv immer noch kritische Zustände vor.

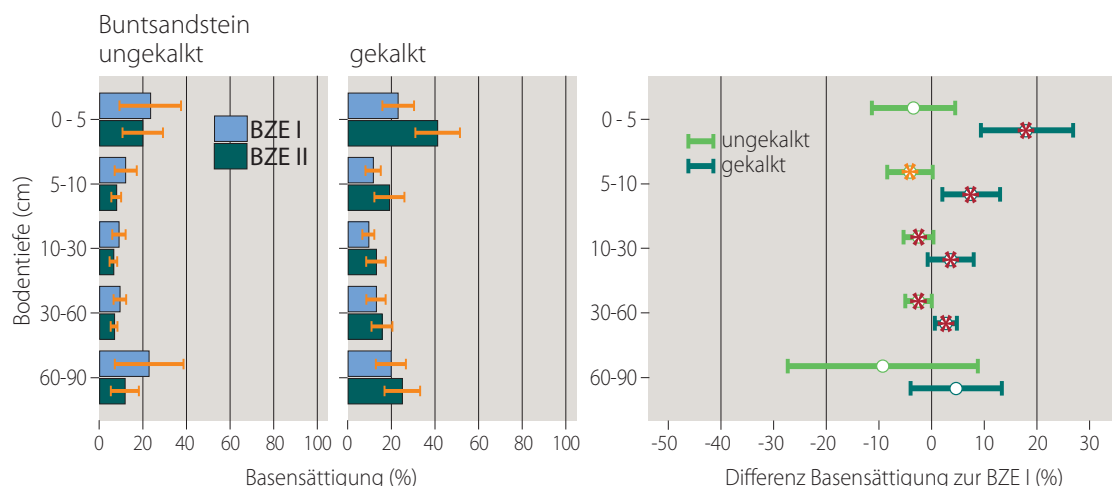
Für die wichtigste Substratgruppe in Hessen zeigt sich damit sehr klar, dass die Folgen der Versauerung kritische Zustände verursachen und sich ohne Gegenmaßnahmen weiter bis in tiefe Bodenschichten verstärken. Die Waldkalkung wirkt in allen Bodenschichten diesem Prozess entgegen und verbessert im oberen Bodenbereich die Verhältnisse soweit, dass durchschnittlich unkritische Zustände erreicht werden. Den ungekalkten Waldstandorten der Substratgruppe Buntsandstein sollte bei der weiteren Kalkungsplanung höchste Priorität eingeräumt werden.



Substratgruppe Buntsandstein

Foto: H. Kasel

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe Buntsandstein in Hessen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II für alle ungekalkten (n=11) und gekalkten BZE-Punkte (n=28), rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I), roter Stern: signifikant unter dem 5 %-Signifikanzniveau, orangener Stern: signifikant unter 10 %-Signifikanzniveau



Bodenzustandserhebung

Ein weiterer typischer Waldstandort mit ungefähr 15 % Flächenrepräsentanz ist der Substratgruppe **Basalt/Diabas** zuzuordnen. Diese silikatreichen, überwiegend aus schluffigen Lehmen bestehenden Parabraun- und Braunerden sind neben den Kalken die reichsten Waldstandorte Hessens.

Entsprechend überdurchschnittlich hoch sind die mittleren Basensättigungen: mit durchschnittlich über 50 % Basensättigung in allen Tiefenstufen sind diese Waldstandorte besonders basenreich und damit gut mit Nährstoffen ausgestattet. Diese Standorte verfügen über eine hohe Pufferkapazität gegenüber Bodenversauerung. Konsequenterweise sind diese Waldstandorte in Hessen aus der Kalkung ausgenommen. In 5-10 cm (signifikant) und 10-30 cm Bodentiefe hat sich die Basensättigung zwar im Vergleich zur BZE I verschlechtert, ist aber noch immer auf hohem Niveau und damit unkritisch. Die (signifikante) Verbesserung in 60-90 cm ist möglicherweise auf genauere Analysemethoden zurückzuführen, ökologisch ist sie nicht relevant. Bei den **Kalkstandorten**, die auf 3 % der Waldfläche Hessens vorkommen, sind die Werte der Basensättigung noch höher. Hier liegen die Werte der Basensättigung in jeder Tiefenstufe bei nahezu 100 %, relevante Veränderungen zwischen den beiden BZE Erhebungen traten nicht auf (Ergebnisse nicht grafisch dargestellt).

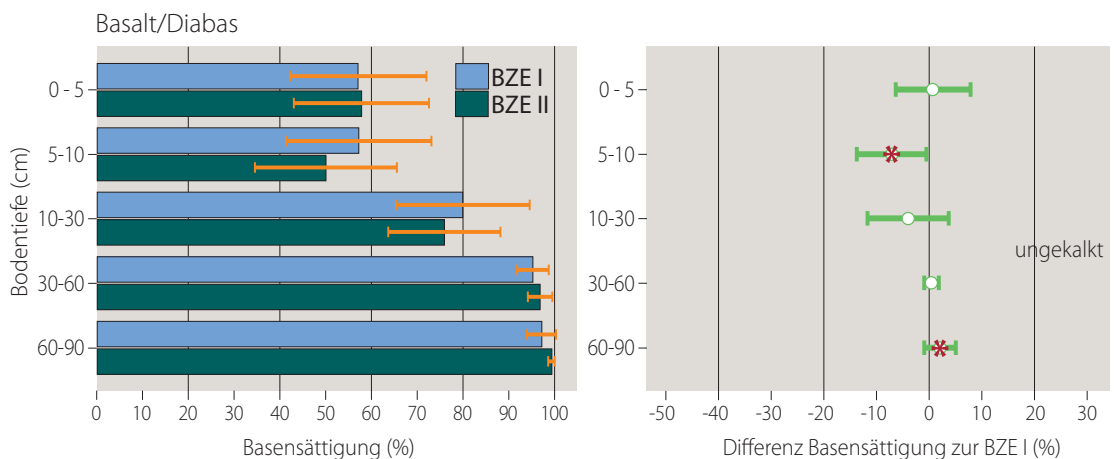
Reine Lößlehmdecken prägen ca. 4 % der hessischen Waldfläche. Die Substratgruppe **Lößlehm** wurde in der BZE etwas weiter gefasst als in der Standortkartierung, auch vom Lößlehm bestimmte, mächtige Deckschichten über verschiedensten Ausgangssubstraten fallen in diese Gruppe. In der BZE II umfasst die Substratgruppe Lößlehm 14 % der BZE II Punkte. Lößlehm sind fruchtbare Standorte und meist ackerbaulich genutzt. Sie sind auch wertvolle Waldstandorte, vor allem, weil

sie mittel bis gut nährstoffversorgt sind und über ein großes Wasserspeichervermögen verfügen. Lösslehm sind allerdings empfindlich gegenüber Säureeinträgen, weshalb sie in Kalkungsmaßnahmen einbezogen wurden.

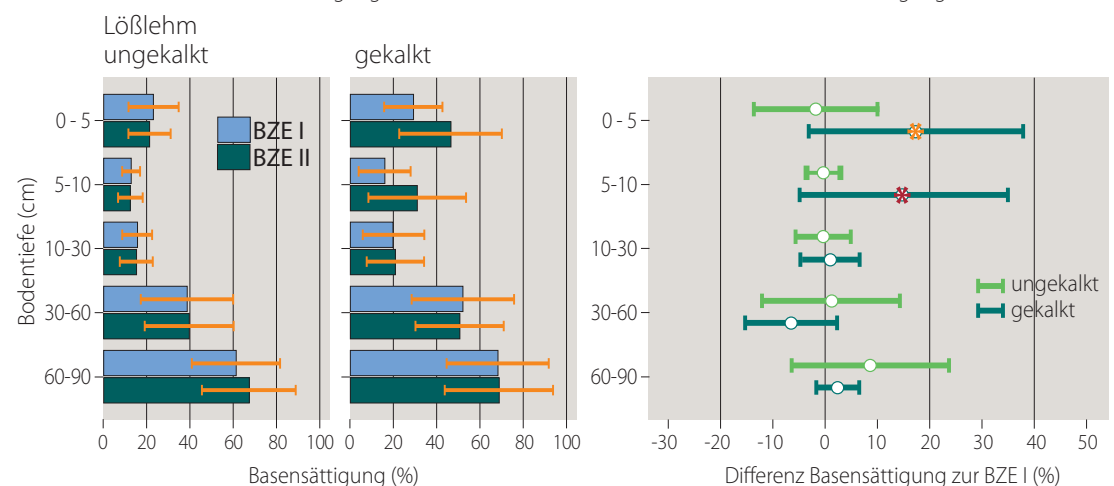
Die Empfindlichkeit gegenüber Säureeinträgen bildet sich an der Verteilung der Basensättigung über die Tiefenstufen im Vergleich der BZE I und II deutlich ab. Im oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe erreichen auch ungekalkte Lößlehm im Mittel durch die Bodenversauerung Werte unter 20 % Basensättigung. Sie haben sich im Gegensatz zu den Waldstandorten auf Buntsandstein in den weiteren Tiefen jedoch nicht verschlechtert, was sicherlich neben dem allgemeinen Rückgang der Säureeinträge auch auf die besonderen hohen Vorratsreserven an basischen Kationen im unteren Mineralboden mit Werten zwischen 40-70 % Basensättigung zurückzuführen ist. Bei den ungekalkten Lößlehmstandorten hat es im oberen Mineralboden keine Verbesserung gegeben, dies wurde nur durch die Waldkalkungen bis in 10 cm Bodentiefe erreicht. Auch auf Lößlehm war die Waldkalkung demnach eine sinnvolle kompensatorische Maßnahme.

Mit gut 10 % Flächenanteil ist in Hessen die Substratgruppe **Tonschiefer** noch relevant. Mit teilweise hohen Steinanteilen und verschiedensten mineralischen Zusammensetzungen deckt sie standörtlich weite Amplituden ab. In der Regel ist der anstehende Tonschiefer eher ärmer ausgeprägt und wurde somit in Hessen in die Kalkungsmaßnahmen einbezogen. Alle Tonschiefer-Standorte sind im BZE-Kollektiv gekalkt worden. Die weiten Konfidenzintervalle für die mittleren Basensättigungen in den Tiefenstufen (orange Linien) sind unter anderem Ausdruck für die große Heterogenität dieser Standorte. Generell sind auch die Tonschieferstandorte im Oberboden teilweise

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe Basalt/Diabas in Hessen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II (n=20), rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I), roter Stern: signifikant unter dem 5 %-Signifikanzniveau

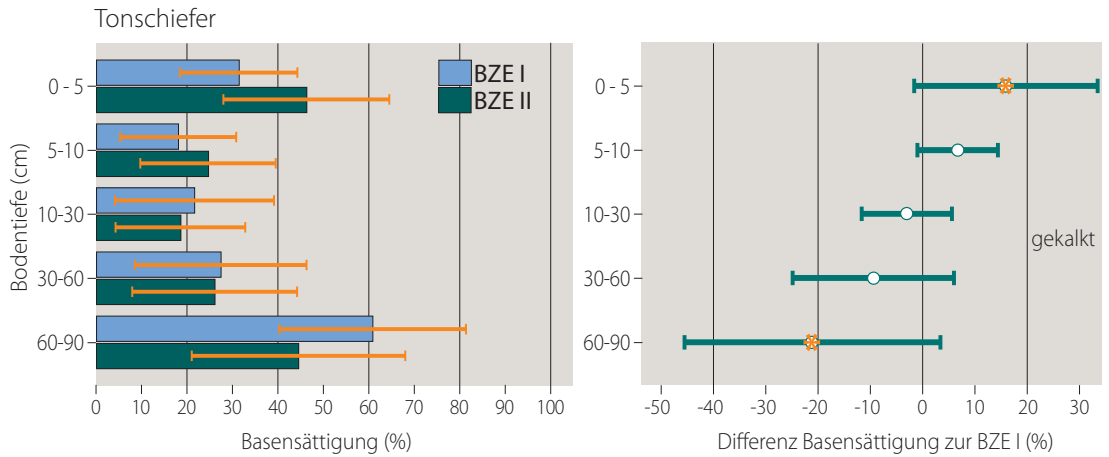


Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe Lößlehm in Hessen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II für alle ungekalkten (n=12) und gekalkten BZE-Punkte (n=8), rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I), roter Stern: signifikant unter dem 5 %-Signifikanzniveau, orangener Stern: signifikant unter 10 %-Signifikanzniveau

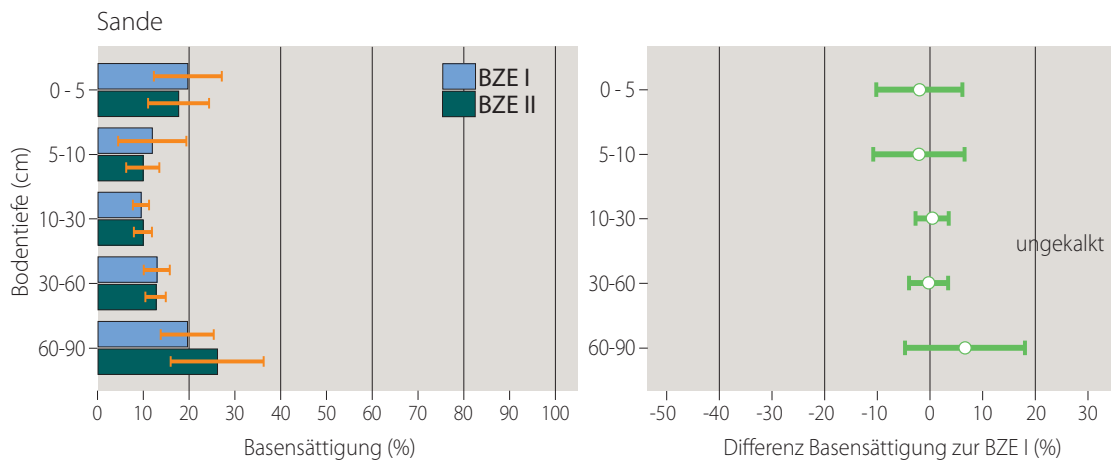


Bodenzustandserhebung

Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe Tonschiefer in Hessen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II (n=14), rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I), orangener Stern: signifikant unter 10 %-Signifikanzniveau



Durchschnittliche Basensättigung nach BZE-Tiefenstufen für alle BZE-Punkte in der Substratgruppe Sande in Hessen. Links die durchschnittliche Basensättigung der BZE I und II (n=12), rechts die entsprechenden mittleren Differenzen (BZE II – BZE I)



unter 20 % Basensättigung und zeigen damit deutliche Spuren einer Versauerung. Im Oberboden bis 10 cm Bodentiefe hat sich der Zustand auffallend verbessert, unterhalb dieser Tiefe verringerten sich die Werte der durchschnittlichen Basensättigung jedoch. Dies kann im Oberboden auf die Wirkung der Kalkung, im Unterboden auf ein weiteres Fortschreiten einer Versauerung zurückgeführt werden.

Ähnliche Muster zeigen sich auch bei der Substratgruppe **Grauwacke**, die auf ca. 5 % der Waldfläche in Hessen vorkommt. Im Unterschied zum Tonschiefer ist die Grauwacke insgesamt ärmer und damit dem Buntsandstein ähnlich, hat aber im Unterschied zum Buntsandstein deutlich höhere Werte der Basensättigung im Unterboden zwischen 60-90 cm. Die Grauwackestandorte sind ebenfalls gekalkt worden und zeigen Verbesserungen der durchschnittlichen Basensättigungen zwischen der BZE I und BZE II, die sich aber aufgrund der geringen Stichprobenzahl nicht absichern lassen (Ergebnisse nicht grafisch dargestellt).

In der Substratgruppe **Sande** sind alle reinen und schwach verlehnten Sande zusammengefasst, die ca. 7 % der Waldstandorte in Hessen repräsentieren. Dies sind z. B. nährstoffarme Terrassen- und Flugsande im Rhein-Maingebiet. Die Sande sind bis in tiefe Bodenschichten gering mit Nährstoffen versorgt. Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung liegen meist unter 20 % und sind mit der Substratgruppe Buntsandstein vergleichbar. Die Sande haben sich hinsichtlich der durchschnittlichen Basensättigung gegenüber der BZE I nicht wesentlich verändert.

Die genannten Substratgruppen umfassen über 90 % aller Waldböden in Hessen. Vereinzelt vorkommende Substrate wie z. B. Tonstein, Zechstein, Rotliegendes oder Rheinweiß kommen zwar im BZE-Kollektiv vor, sind aber aufgrund der geringen Stichprobenzahl und Heterogenität als Substratgruppe nicht sinnvoll auswertbar.

Die ersten Ergebnisse der BZE I zeigen, dass viele Waldstandorte aufgrund der luftbürtigen Säureinträge kritische Zustände aufwiesen. Neben Luftreinhaltemaßnahmen sind zur Entlastung der Böden Waldkalkungen durchgeführt worden. Die BZE II zeigt, dass für die gekalkten Standorte die Ziele der Bodenschuttkalkung erreicht wurden: 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 Buntsandstein, haben sich die bodenchemischen Verhältnisse hingegen weiter verschlechtert, hier sollten Kalkungsmaßnahmen erste Priorität haben. Reiche, gut nährstoffversorgte Waldstandorte auf Basalt oder Muschelkalk haben sich hinsichtlich der durchschnittlichen Basensättigung kaum verändert, dies gilt auch für arme Sande. Auf mittel nährstoffversorgten Standorten wie Lößlehmen, Tonschiefer- oder Grauwackestandorten sind zur Verbesserung des chemischen Zustandes im Oberboden Kalkungen sinnvoll, aber aufgrund der hohen Nährstoffreserven im Unterboden weniger dringend. Die Ergebnisse der BZE decken sich mit denen der Untersuchungen zu den Stoffeinträgen und -bilanzen, die auf Standorten mit basenarmem Silikatgestein eine Säurebelastung ausweisen, die oberhalb der Säurepufferraten der Böden liegen. Insofern liefern die beiden Untersuchungsansätze ein in sich stimmiges Bild. Wenn auch in der Luftreinhaltepolitik und in der Waldbewirtschaftung große Erfolge zur Entlastung der Waldböden erzielt worden sind, sind doch weitere Maßnahmen erforderlich, um die Belastung der Waldökosysteme auf ein tolerierbares Maß zu verringern.