Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Waldböden in Deutschland

Ausgewählte Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung

bmel.de

Liebe Leserinnen und Leser,

die gute Nachricht vorweg: Unseren Waldböden geht es gut. Das belegen die vor Ihnen liegenden Ergebnisse der zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE) deutlich. Das umfangreiche Gemeinschaftswerk wurde durch das Thünen-Institut für Waldökosysteme im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft in Zusammenarbeit mit den zuständigen Länderanstalten sowie mit Unterstützung weiterer Bundeseinrichtungen und Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern von Universitäten und Hochschulen erarbeitet. Zum ersten Mal können wir nicht nur über den Zustand der Waldböden berichten, sondern auch über Veränderungen gegenüber der ersten Erhebung aus dem Zeitraum 1987 bis 1993.

Die Ergebnisse sind durchweg positiv. Unsere Waldböden sind dabei, sich von den hohen Einträgen von Luftschadstoffen zu erholen. Die Böden sind weniger sauer und besser mit basischen Nährelementen versorgt. Der Anteil der Waldfläche, auf der kritische Eintragsraten von Stickstoff überschritten werden, hat sich deutlich verringert. Insgesamt sind die Bäume besser ernährt als noch vor 25 Jahren.

Die Verbesserung des Bodenzustands im Wald ist für den Klima- und Umweltschutz von besonderer Bedeutung. Der Wald, die Waldbewirtschaftung und die Verwendung von Holzprodukten leisten einen ganz entscheidenden Beitrag zur Minderung der Treibhausgase und tragen nennenswert dazu bei, die ambitionierten Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen. Aber unser Wald ist nicht nur ein großer Klimaschützer. Er bietet gleichzeitig Arbeit und Einkommen, insbesondere in den ländlichen Regionen. Er ist Heimat für viele geschützte Tiere und Pflanzen und gleichzeitig wichtiger Erholungsraum.

Ihr

Christian Schmidt MdB
Bundesminister für Ernährung und Landwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

1.	Monitoring Waldböden – Wissen für gesunde Wälder	4
2.	Vielfalt der Waldböden	9
3.	Waldböden – weniger sauer als vor zwanzig Jahren	14
4.	Waldernährung – Buche, Eiche, Fichte und Kiefer gut versorgt?	20
5.	Stickstoffeinträge in Wäldern – weiterhin eine Herausforderung	24
6.	Klimaschützer Wald – Waldböden speichern Kohlenstoff	28
7.	Waldböden binden Schwermetalle und organische Schadstoffe	33
8.	Von der Bodenprobe zum Ergebnis	36
9.	Grundlage der Broschüre und weitere Informationen	40
10.	Abbildungsverzeichnis	41

1.

Monitoring Waldböden – Wissen für gesunde Wälder

Die Beobachtung des Waldes über einen langen Zeitraum liefert Daten und Informationen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. Nur wer weiß, wie sich das komplexe Ökosystem Wald entwickelt, kann es nachhaltig nutzen und bewahren. Waldböden spielen aufgrund ihrer vielfältigen Funktionen eine Schlüsselrolle im Naturhaushalt des Waldes. Für ihren Schutz benötigen Politik, Waldbesitzerinnen und Waldbesitzer, Forstverwaltungen und Wissenschaft eine solide Datengrundlage. Die Bodenzustandserhebung liefert umfassende Informationen über den Zustand unserer Waldböden. Mit der zweiten Erhebung lassen sich erstmals auch Aussagen über ihre Entwicklung in den letzten 20 Jahren treffen.

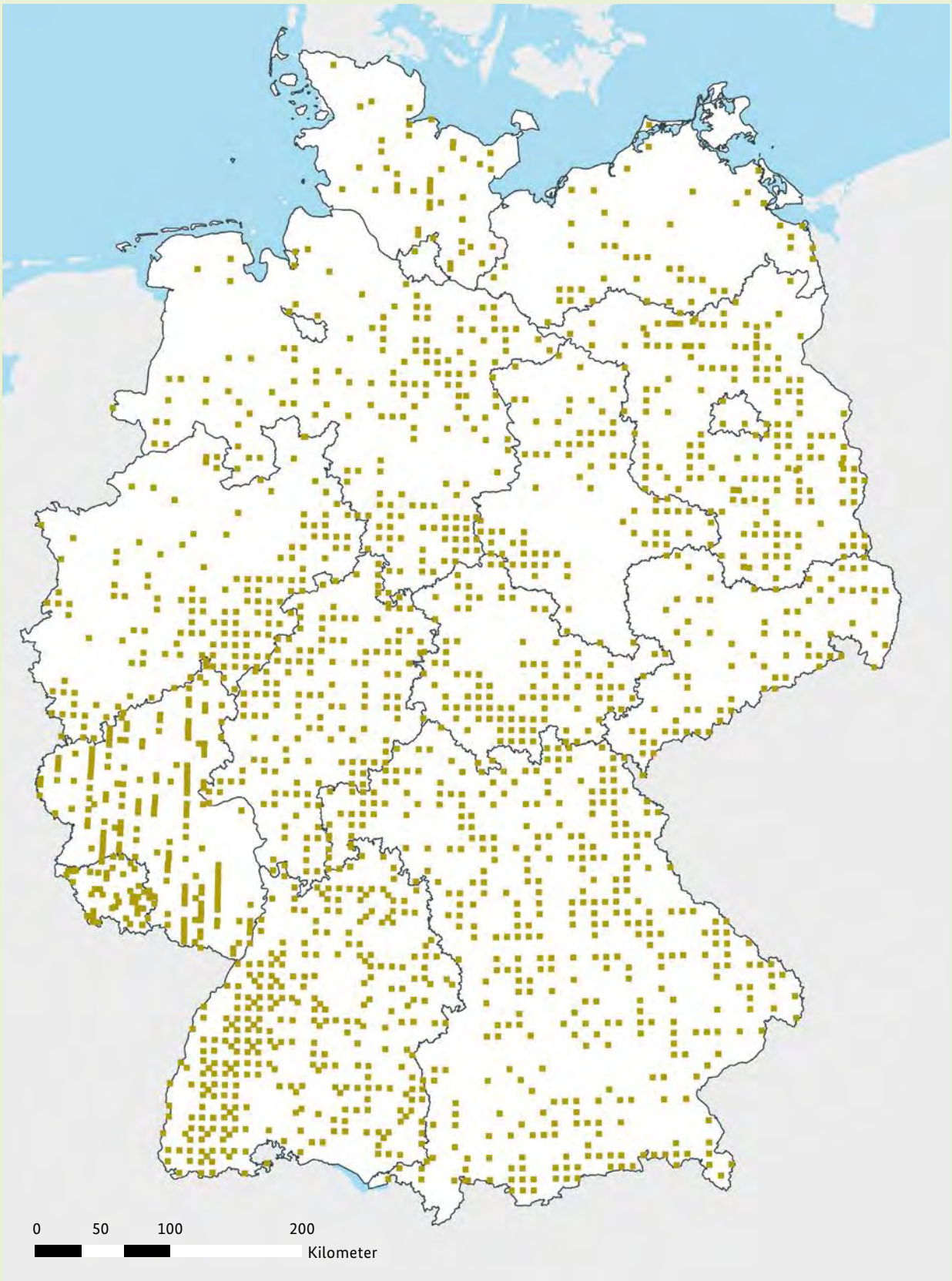
Für vitale Wälder und stabile Waldökosysteme sind Böden elementar. Sie sind nicht nur Produktionsgrundlage der Forstwirtschaft, sondern spielen auch im Naturhaushalt eine wesentliche Rolle und erfüllen zahlreiche Schutzfunktionen. Waldböden versorgen die Bäume mit Nährstoffen, puffern Schadstoff- und Säureeinträge und liefern sauberes Trinkwasser. Zudem sind sie Lebensraum für eine vielfältige Bodenlebewelt. Nicht zuletzt speichern Waldböden Kohlenstoff und tragen zum Klimaschutz bei. Im Zuge einer nachhaltigen Waldwirtschaft sind daher ihr Schutz und ihre Pflege von großer Bedeutung.

Wir leben in einer Zeit rascher Umweltveränderungen. Klimawandel und Einträge von Schadstoffen wirken sich auch auf die Gesundheit unserer Wälder und Waldböden aus. Wie es den Waldböden geht, haben Bund und Länder im Rahmen der bundesweiten Bodenzustandserhebung an rund 1900 Stichprobenpunkten untersucht. Im Mittelpunkt standen vielfältige Fragestellungen. Zu den wichtigsten gehörten:

- → Wie viel Kohlenstoff speichern die Waldböden?
- → Wie hat sich die Bodenversauerung entwickelt?
- → Wie belastet sind die Böden durch Schwermetalle?
- → Und – sind im Boden genügend Nährstoffe für das Baumwachstum verfügbar?

Die vorliegenden Ergebnisse liefern Antworten auf diese Fragen. Die flächenrepräsentativen Informationen spiegeln den Einfluss des Klimawandels auf Waldböden, der Stoffeinträge durch den Menschen und die bodenchemischen Bedingungen für das Waldwachstum wider. Dadurch helfen sie, mögliche Risiken für Waldböden zu erkennen und in ihrer Bedeutung einzuschätzen. Forstverwaltungen, Waldbesitzerinnen und Waldbesitzer und die Politik können auf ihrer Grundlage forstliche Maßnahmen

Abbildung 1: Erhebungspunkte der Bodenzustandserhebung



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

rechtzeitig einleiten und politische Entscheidungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung und den Klimaschutz treffen.

Prozesse im Boden laufen sehr langsam ab. Dennoch sind Böden nicht statisch, sondern unterliegen Änderungen. Daher sind regelmäßig wiederkehrende Erhebungen erforderlich, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu gelangen. Bund und Länder untersuchten im Zeitraum von 1987 bis 1993 das erste Mal die Waldböden. Die Außenaufnahmen zur zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald erfolgten in den Jahren 2006 bis 2008.

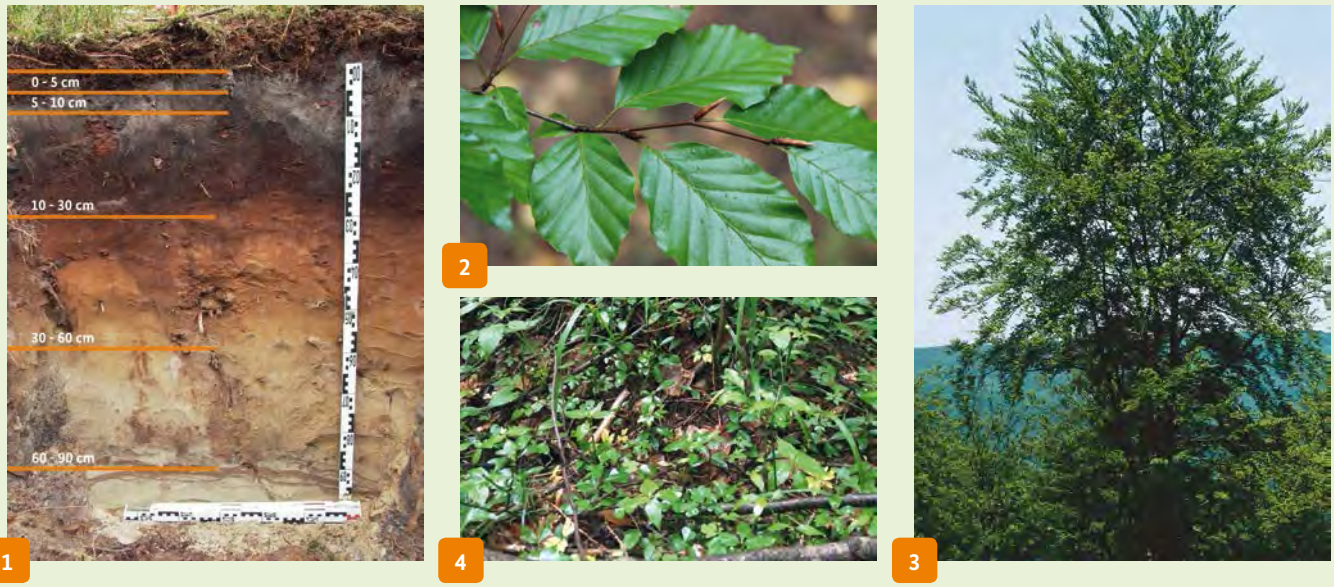
Die Bodenzustandserhebung ist Teil des forstlichen Umweltmonitorings, das seit Mitte der 1980er Jahre aufgebaut wurde. Das deutschlandweite forstliche Umweltmonitoring ist ein abgestimmtes System aus wiederholten Übersichtserhebungen auf einem systematischen Stichprobennetz wie der Boden- und Waldzustandserhebung (BZE und WZE) und dem intensiven forstlichen Monitoring (Level II). Eingebunden in ein internationales Informationsnetzwerk liefert es Daten und Bewertungsgrundlagen für Forst- und Umweltpolitik zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der Wälder in Deutschland und Europa. Angaben über die im Waldboden gespeicherten Kohlenstoffvorräte werden benötigt, um die entsprechenden Berichtspflichten im Rahmen der Klimarahmenkonvention erfüllen zu können.

Welche Kenngrößen untersucht die Bodenzustandserhebung im Wald?

Bund und Länder haben im Rahmen der bundesweiten Bodenzustandserhebung weit mehr als den Bodenzustand untersucht. Neben der Bodenchemie und der Bodenphysik in unterschiedlichen Tiefen der Waldböden wurden der Baumbestand an den Stichprobenpunkten, der Kronenzustand der Bäume, der Ernährungszustand der Bäume und die Bodenvegetation aufgenommen.

Hierbei entstand ein einmaliger Datenpool zum Zustand und zur Veränderung von Waldböden sowie ausgewählter Waldmerkmale. Die Auswertungsergebnisse wurden als Buch publiziert[1]. Die vorliegende Broschüre gibt einen Überblick über ausgewählte Ergebnisse. Der Fokus liegt dabei auf Themen wie Versauerung, Stickstoffstatus, Kohlenstoffspeicherung und Belastung der Waldböden mit Schwermetallen und organischen Spurenstoffen sowie dem Ernährungszustand der Waldbäume. Außerdem wird der Frage nachgegangen, wie sich Maßnahmen zur Stabilisierung der Waldökosysteme, wie Bodenschutzkalkungen und der naturnahe Waldbau, auf den Zustand der Böden ausgewirkt haben.

Abbildung 2: Erhebungsparameter der Bodenzustandserhebung



1 Wellbrock, N.; Bolte, A.; Flessa, H. (Hrsg.), Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008, Thünen Report Nr. 43, 2016

Den Boden im Blick – nachhaltiger Bodenschutz

Boden ist eine nicht-erneuerbare Ressource, die immer knapper wird. Für die Landwirtschaft und für die Ernährungssicherung spielt der Boden die entscheidende Rolle als Produktionsgrundlage. Über 90 Prozent der weltweiten Lebensmittelproduktion hängen unmittelbar vom Boden ab. Für die Produktion des nachwachsenden Rohstoffs Holz, den Naturhaushalt und den Klimaschutz sind Waldböden von zentraler Bedeutung. In Deutschland bedecken Wälder etwa ein Drittel der Landesfläche.

Der Schutz unserer Böden ist lebensnotwendig. Das Ziel der Bundesregierung ist es, die Nutzung der Böden durch die Land- und Forstwirtschaft nachhaltig zu gestalten. Deshalb engagiert sich Deutschland national und international für den Bodenschutz auch unter den Bedingungen des Klimawandels.

In Deutschland ist der Bodenschutz durch das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) geregelt. Das Gesetz hat den Zweck, die Leistungen des Bodens für zukünftige Generationen zu sichern. Die im Bundeswaldgesetz und den Waldgesetzen der Länder geregelte Erhaltung und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder umfasst auch den schonenden Umgang mit dem Waldboden.

5

1 **Bodenzustand:** Entnahme von Bodenproben im Auflagehumus und in fünf Tiefenstufen des Mineralbodens. Analyse von Stickstoff, Kohlenstoff, Nährstoffen, Bodenreaktionen, Schwermetallen und organischen Schadstoffen sowie bodenphysikalischen Kenngrößen.

2 **Ernährungssituation der Waldbäume:** Untersuchung von Nadel- und Blattproben der vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche auf Nährstoffgehalte.

3 **Kronenzustand:** Aufnahme der Dichte und Farbe der Belaubung und der Benadelung der Baumkronen.

4 **Bodenvegetation:** Kartierung der Bodenvegetation an den Stichprobenpunkten.

5 **Bestand:** Aufnahme des Baumbestandes an den Stichprobenpunkten.

Abbildung 3: **Braunerde aus Sandstein:** Die Bodenbildung hängt vom Klima und dem Ausgangsgestein ab, aus dem sich der Boden entwickelt. Bis sich ein Zentimeter Boden bildet, vergehen mindestens 100 Jahre.

***Waldböden** sind eine nicht-erneuerbare Ressource. Die Erhaltung ihrer Leistungsfähigkeit ist von zentraler Bedeutung für Mensch und Natur.*

Abbildung 4: **Wissenschaftler schauen in den Boden hinein:** Sie bestimmen unter anderem den Bodentyp, den Kohlenstoffgehalt, die pH-Werte der Böden und viele weitere Parameter.

32 % der Landesfläche Deutschlands sind mit Wald bedeckt. Das sind 11,4 Mio. Hektar. Schon aufgrund ihres Flächenanteils sind Waldböden von zentraler Bedeutung für den Naturhaushalt und Klimaschutz.

2. Vielfalt der Waldböden

Es können Jahrtausende vergehen, bis sich aus totem Gestein an der Erdoberfläche lebendige Böden entwickeln. Unsere Böden sind im Wesentlichen seit dem Ende der letzten Eiszeit entstanden. Bei der Bodenbildung greifen physikalische, chemische und biologische Prozesse ineinander: der Wechsel von Frost und Wärme im Zusammenwirken mit Wasser in seinen verschiedenen Erscheinungsformen und in der Natur vorkommenden schwachen Säuren lässt das Gestein verwittern. Sauerstoff oxidiert eisenhaltige Mineralien, was den Böden ihre bräunliche Farbe verleiht. Pflanzen fassen Fuß, dringen mit ihren Wurzeln in Klüfte und Spalten ein, lösen Nährstoffe aus dem Gestein. Abgestorbene Pflanzenteile sammeln sich auf der Erdoberfläche an, werden von Tieren, Pilzen und Mikroorganismen zerkleinert, gefressen, verdaut, chemisch zerlegt, in Humusstoffe umgewandelt. So entsteht mit der Zeit eine Humusauflage. Im Boden lebende Tiere, wie zum Beispiel Regenwürmer, vermischen die organischen und mineralischen Bodenbestandteile und verfrachten Humus in den unter der Humusauflage liegenden oberen Bodenhorizont. Dieser erhält dadurch eine dunklere Farbe. Diese Bodenbildungsprozesse dauern bis heute an; besonders gut können sie im Gebirge auf Gletschervorfeldern oder auf neu angeschwemmtem Schlick und Sand an Wasserläufen beobachtet werden.

Seit die Menschen in der Jungsteinzeit begannen, Böden ackerbaulich zu nutzen, haben sie in diese Vorgänge verändernd eingegriffen. Zunächst wurden die am einfachsten zu bearbeitenden und fruchtbarsten Böden in klimatisch für den Ackerbau günstigen Gebieten unter den Pflug genommen. Weniger günstige Lagen verblieben dem Wald. Dies prägt bis heute die Verteilung von Wald und Feld in unserem Land und erklärt, warum Waldböden i.d.R. weniger fruchtbar sind als Ackerböden. In der Zeit starken Bevölkerungswachstums im Hochmittelalter wurden zunehmend auch weniger fruchtbare und schwierig zu bearbeitende Böden in Hanglagen und klimatisch weniger günstigen Gebieten in Acker- und Weideland überführt. Ab dem 19. Jahrhundert, als die Fortschritte in der Landwirtschaft die Produktivität erhöhten und verbesserte Verkehrsverbindungen Nahrungsmittelimporte ermöglichten, wurden vor allem solche Flächen von der Landwirtschaft aufgegeben und wieder aufgeforstet. Deswegen findet man in unseren Waldböden nicht nur das Ergebnis ungestörter Bodenbildung seit den Eiszeiten, sondern auch Spuren früherer Acker- und Weidenutzung.

Abbildung 5: Vielfalt der Waldböden

Die Vielfältigkeit der Waldböden Deutschlands spiegelt sich in unterschiedlich entwickelten Bodenprofilen wider. Durch die Anordnung und Charakteristik der Bodenhorizonte innerhalb der Bodenprofile lassen sich verschiedene Bodentypen ableiten.

1 Parabraunerde | 2 Terra fusca | 3 Podsol | 4 Braunerde

Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

5 Ranker

6 Pseudogley

1 Die **Parabraunerde** gehört zur Bodenklasse der Lessivés. Sie entstehen auf kalkhaltigen sowie auf quarz- und silikatreichen Sedimenten wie Löss, Geschiebemergel oder Glazialschotter. Typisch für diese Böden ist, dass Tonteilchen aus dem Oberboden ausgewaschen werden und sich im Übergangshorizont anreichern. Parabraunerden sind weit verbreitet und vielfältig.

2 **Terra fusca** ist dem Lateinischen entlehnt und bedeutet „braune Erde". Der Bodentyp gehört zu der Bodenklasse der Terrae Calcis. Sie entstehen, wenn Kalkgestein, Dolomit oder Mergel über Jahrtausende verwittern. Hierdurch reichern sich Ton- und Eisenverbindungen als Lösungsrückstände an, die durch Oxidation verbraunen. Die Böden sind aufgrund ihres hohen Tongehalts schwer bearbeitbar und werden somit häufig als Waldstandorte genutzt.

3 Das Wort **Podsol** stammt aus dem russischen Sprachgebrauch und bedeutet übersetzt „Aschebodden". Diese Böden entstehen meist auf sauren Ausgangsgesteinen wie Buntsandstein, Granit oder auf Flugsanden. Charakteristisch für den Podsol ist ein ausgebleichter, aschgrauer Horizont, aus dem Nährstoffe ausgewaschen wurden.

4 Der Bodentyp **Braunerde** bildet eine eigene Bodenklasse. Es sind die häufigsten Böden Deutschlands, da sie aus einer breiten Palette von Ausgangsgesteinen entstehen können. Je nach Ausgangsgestein variieren die Eigenschaften der Braunerden allerdings beträchtlich. Abhängig vom Nährstoff- und Wasserhaushalt sind Braunerden leistungsfähige Waldböden.

5 **Ranker** leitet sich von Rank (österr. Berghalde, Steilhang) ab. Er ist ein flachgründiger und nährstoffarmer Boden, der aus kalkarmen bis kalkfreien Ausgangsgesteinen, wie Sandstein oder Granit entstehen. Dieser Bodentyp gehört zur Bodenklasse der Ah-C-Böden. Er ist typisch für die Hanglagen der Mittelgebirge und wird daher oft als Waldstandort genutzt.

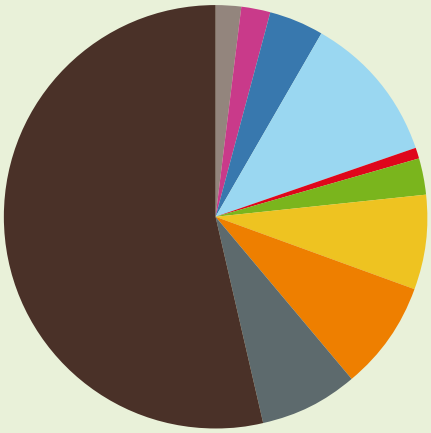
6 Der **Pseudogley** gehört zur Bodenklasse der Stauwasserböden. Es ist ein Boden, der unter dem Einfluss eines periodischen Wechsels von Vernässung und Austrocknung entsteht. Dieser Bodentyp ist in Deutschland weit verbreitet und wird aufgrund seiner ausgeprägten Vernässung im Frühjahr bevorzugt als Waldstandorte genutzt.

Ein durchschnittlicher Boden besteht zu etwa 45 % seines Volumens aus mineralischen Partikeln wie Sand und Ton, etwa zur Hälfte aus Luft und Wasser und zu rund fünf bis 10 % aus Pflanzenwurzeln, Lebewesen und Humus. Die Anteile dieser Bestandteile ändern sich im Zuge der Bodenbildung langsam und unterliegen außerdem kürzeren zeitlichen Schwankungen, zum Beispiel in Abhängigkeit von der Witterung und den Jahreszeiten. Sie unterscheiden sich auch je nach Standort, so dass Boden nicht gleich Boden ist. Im Gegenteil – Deutschlands Böden sind sehr vielfältig. Je nach Ausgangsgestein, Oberflächenbeschaffenheit der Landschaft, Klima, Vegetation und Nutzung entstehen verschiedene Böden mit ganz unterschiedlichen Eigenschaften. Diese Bodeneigenschaften beeinflussen auch ihre Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen und ihre Eignung als Waldstandort.

Die Bodenentwicklung beginnt in der Regel an der Oberfläche des Gesteins und schreitet im Laufe der Zeit zur Tiefe fort, wobei Lagen entstehen, die sich in ihren Eigenschaften unterscheiden und als Bodenhorizonte bezeichnet werden. Der Profilaufbau eines Bodens, also die Abfolge und Charakteristik von Bodenhorizonten, sowie seine Entstehungsgeschichte bilden in Deutschland die Grundlage der Bodensystematik. In dieser Systematik werden entsprechend ihres Entwicklungsstands und der Ausprägung der Bodenhorizonte verschiedene Bodenklassen unterschieden. Bei der Bodenzustandserhebung wurden u. a. eine Beschreibung der Böden am Stichprobenpunkt und eine Zuordnung zu Bodenklassen vorgenommen. Nach bestimmten Horizonten und Horizontabfolgen können innerhalb dieser Bodenklassen unterschiedliche Bodentypen ausgewiesen werden.

Abbildung 6: Anteile der Bodenklassen innerhalb der Stichprobe der Bodenzustandserhebung

Dargestellt sind Bodenklassen entsprechend der Bodensystematik der Bundesrepublik Deutschland. Die Kriterien zur Definition sind der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) entnommen.

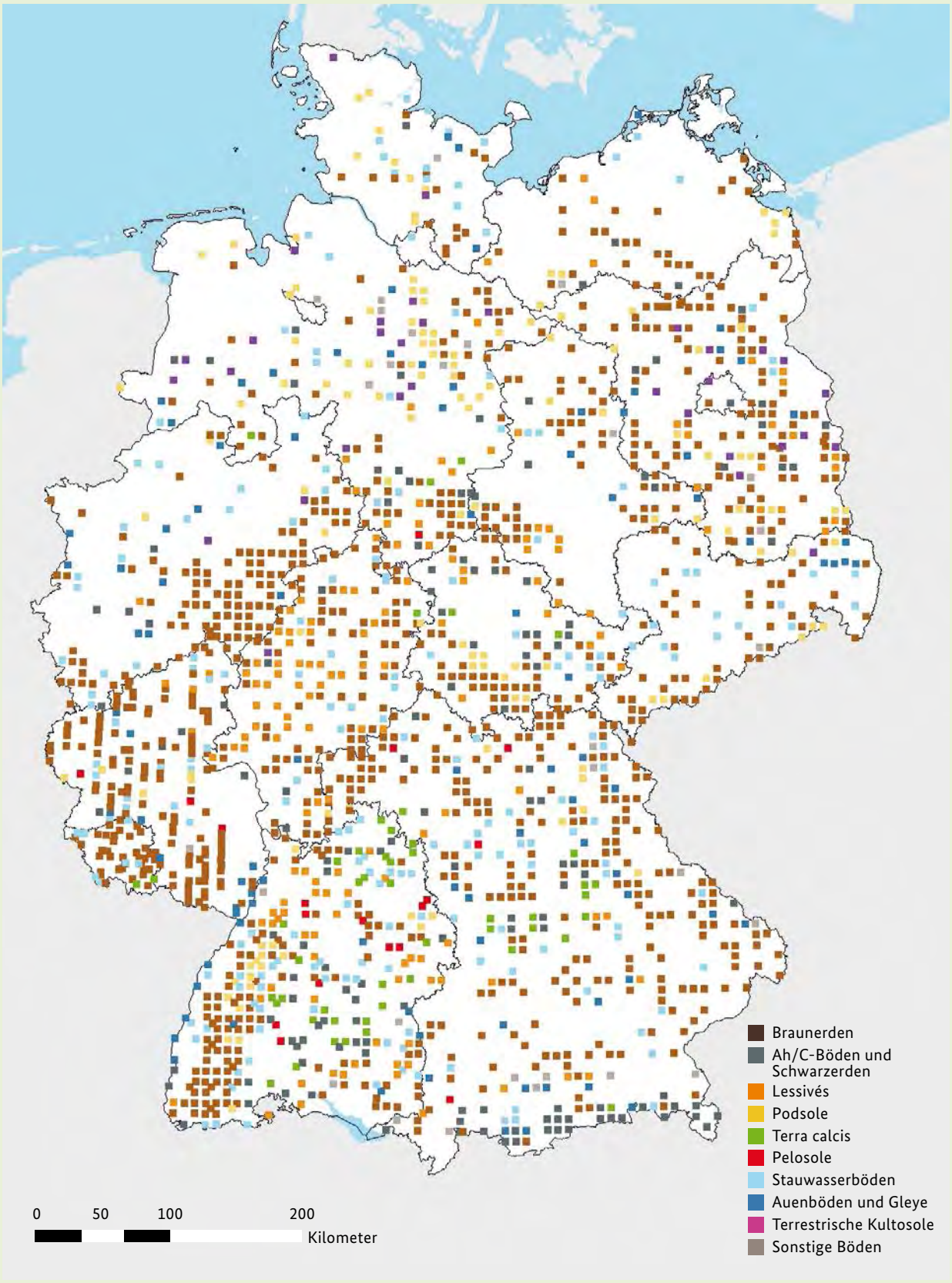


Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Horizont – Schicht – Tiefenstufe

Beim genauen Betrachten eines Bodenprofils, das heißt eines senkrechten Schnitts von der Erdoberfläche durch den gesamten Boden bis zum darunter liegenden Gestein, können wir von oben nach unten eine Abfolge von **Bodenhorizonten** beobachten, die sich durch Farbe, Struktur und Zusammensetzung unterscheiden. Umgangssprachlich würde man von unterschiedlichen Schichten sprechen; indessen ist dieser Begriff in der Bodenkunde den Fällen vorbehalten, wo Material durch mechanische Prozesse, wie zum Beispiel durch einen Erdrutsch, verlagert und als **Schicht** am Ort seines jetzigen Vorkommens abgelagert wurde. Bodenhorizonte hingegen sind an Ort und Stelle durch bodenbildende Prozesse aus dem vor Ort vorhandenen Ausgangsgestein entstanden. Bei der Bodenzustandserhebung wird der Boden unabhängig von den Horizontgrenzen in **Tiefenstufen** eingeteilt (0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, usw.).

Abbildung 7: Regionale Verteilung der Bodenklassen innerhalb der Stichprobe der Bodenzustandserhebung



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

3.

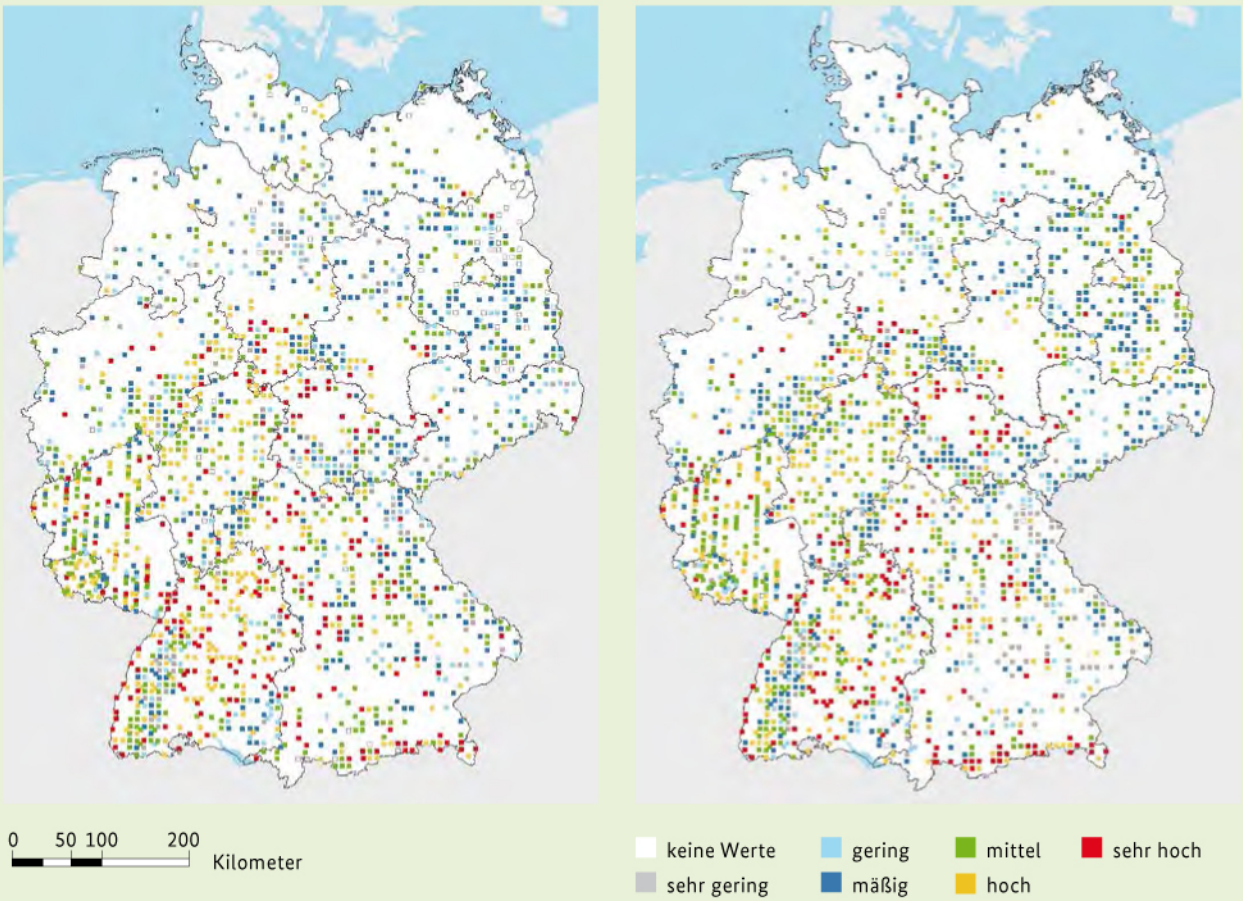
Waldböden – weniger sauer als vor zwanzig Jahren

Der Zustand der Waldböden hat sich im Hinblick auf die Bodenversauerung seit der ersten Bodenzustandserhebung langsam verbessert. Maßnahmen wie Luftreinhaltung und die Stabilisierung der Böden durch Bodenschutzkalkung wirken gegen die Versauerung der Böden.

Die Ursachen für saure Waldböden sind unterschiedlich. Einerseits ist die Bodenversauerung ein natürlicher Prozess der Verwitterung. Dieser verläuft stetig und sehr langsam ab. Zum anderen hat der Mensch die Versauerung der Böden in der Vergangenheit beschleunigt und verstärkt. Mit der Industrialisierung gelangten versauernd wirkende Luftverunreinigungen in die Waldböden. In den 1960er bis 1990er Jahren war die Luftverschmutzung besonders stark. Bei Verbrennungsprozessen entstehende Schwefel- und Stickstoffverbindungen trugen zur Versauerung von Waldböden bei. Erste politisch unterstützte und geförderte Maßnahmen zur Luftreinhaltung ergriff man ab den 1980er Jahren. Entschwefelungsanlagen von Kraftwerken und die Einführung geregelter Katalysatoren für Kraftfahrzeuge verbesserten die Luftqualität und führten zu einer geringeren Belastung der Böden. Vor allem die Belastung mit Schwefeldioxid hat seither stark abgenommen. Eine weitere flankierende Maßnahme zur Pufferung von Säureeinträgen ist die Bodenschutzkalkung. Im Privat- und Körperschaftswald kann sie im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ gefördert werden. Seit den 1980er Jahren wurden in vielen Regionen Deutschlands Bodenschutzkalkungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung zeigen, dass Luftreinhaltung und flankierende forstliche Maßnahmen, wie Bodenschutzkalkung und der Umbau

Abbildung 8: pH(H_2O)-Wert im Auflagehumus (links) und im Mineralboden in 0-5cm Tiefe (rechts)



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

von Nadel- in Laub- und Mischwald, die Waldböden positiv beeinflussten. Insgesamt sind die Böden vor allem in den obersten Tiefenstufen weniger sauer als noch zu Beginn der 1990er Jahre. Wurde bei der ersten Bodenzustandserhebung noch eine flächendeckende Oberbodenversauerung und Basenverarmung festgestellt, so war dies bei der zweiten Bodenzustandserhebung nicht mehr der Fall. Der Bodenzustand hat sich leicht verbessert. Insbesondere gekalkte Standorte und jene mit Laubbaumbestockung zeigen eine Erholung.

Die Bodenzustandserhebung liefert eine Vielzahl von bodenchemischen Kennwerten, die die Versauerung und Nährstoffversorgung im Boden beschreiben. In ihrer Gesamtheit zeichnen sie ein umfassendes Bild. Eine Auswahl der Kennwerte wird hier vorgestellt.

pH-Werte leicht angestiegen

Der pH-Wert ist ein Maß für den Säurezustand und beschreibt die Säurestärke im Boden. Je niedriger der pH-Wert, desto saurer. Der Auflagehumus der Böden hat im Mittel einen pH(H_2O)-Wert von 4,6. In der ersten Tiefenstufe des Mineralbodens sind die pH-Werte im Mittel etwas niedriger als im Auflagehumus und nehmen mit zunehmender Bodentiefe zu (Abbildung 9, links). Seit der ersten Bodenzustandserhebung sind die pH-Werte über das gesamte Profil gestiegen, d. h. die Böden haben begonnen, sich zu erholen. Im Auflagehumus ist der Anstieg am höchsten. Die Änderungsraten des pH(H_2O) liegen bei 0,014 pro Jahr im Auflagehumus und bei 0,011 pro Jahr in 0 bis 5 cm Bodentiefe.

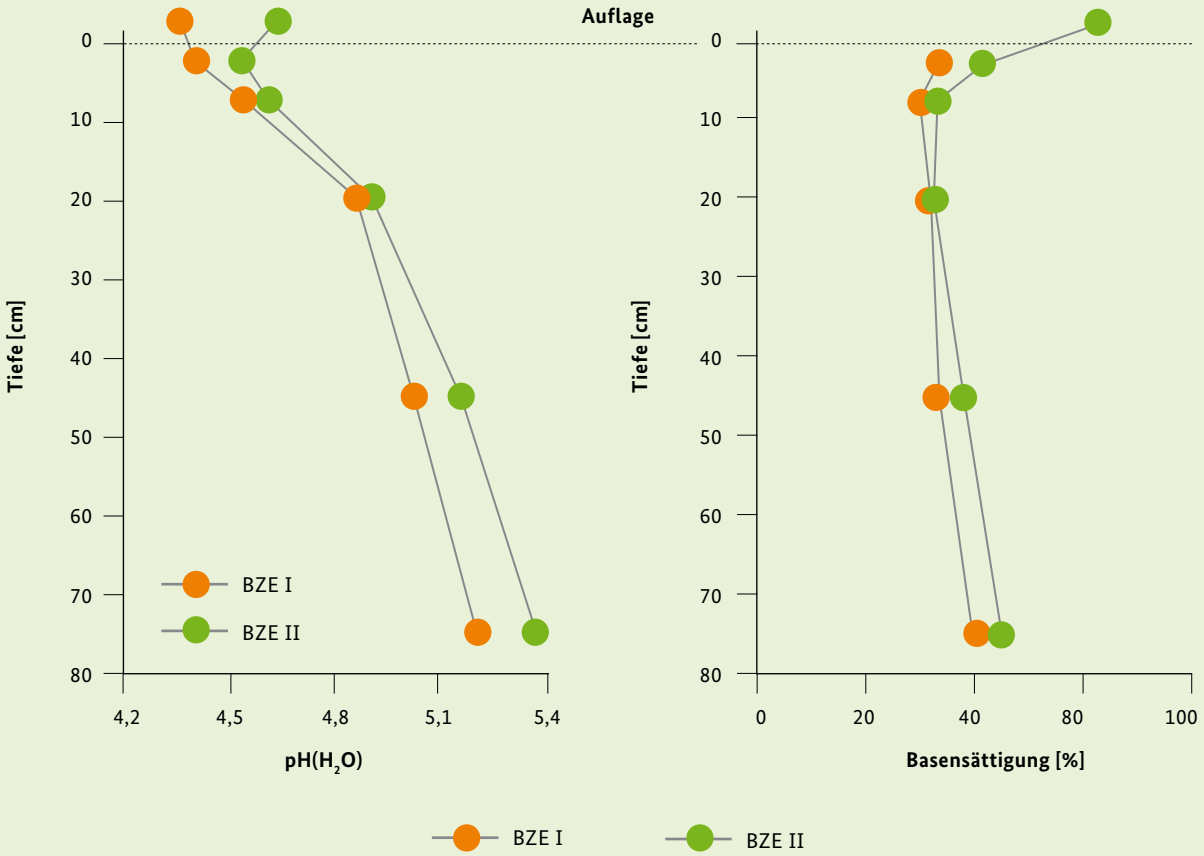
Basensättigung – Nährstoffe und ihre Verfügbarkeit

Das Säure- und Basenverhältnis des Bodens bestimmt maßgeblich die Verfügbarkeit von Nährstoffen im Boden und somit die Ernährung der Waldbäume. Hierbei spielt die Basensättigung des Bodens eine zentrale Rolle. Dieser Kennwert stellt den Anteil basisch wirkender Kationen wie Calcium-, Magnesium-, Kalium- und Natrium-Kationen am Austauscher dar. Austauscher sind Humusstoffe und Tonmineralien, an die diese Kationen, aber auch Aluminium-, Eisen-, Mangan-Ionen, Protonen und wasserlöslich vorliegende Schwermetallionen durch elektrostatische Kräfte relativ lose gebunden sind, so dass sie leicht in die Bodenlösung übergehen und von Pflanzenwurzeln aufgenommen werden können. Je höher die Basensättigung ist, desto mehr basisch wirkende Kationen belegen die Austauscher und desto höher ist die Fähigkeit des Bodens, Säurebelastungen zu puffern und desto mehr Nährstoffe wie Calcium, Magnesium und Kalium sind für die Vegetation verfügbar.

Die Basensättigung der Waldböden ist in der Auflage mit 68 % am höchsten, geht in den oberen 5 cm des Mineralbodens bis auf 41 % zurück, um in der Tiefenstufe von 10 bis 30 cm auf ihr niedrigstes Niveau abzusinken (Abbildung 9, rechts). Darunter steigt sie mit zunehmender Bodentiefe wieder an. Insgesamt hat sich die mittlere Basensättigung gegenüber der ersten Bodenzustandserhöhung über das gesamte Profil erhöht.

Abbildung 9: Tiefenverlauf des Status der pH(H_2O)-Werte (links) und der Basensättigung (rechts) zum Zeitpunkt der ersten und zweiten Bodenzustandserhebung im Auflagehumus und im Mineralboden

Dargestellt sind die gesamten Stichproben inkl. Moor und organisch geprägte Standorte zu beiden Inventurterminen



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Bodenversauerung und ihre Folgen für Wälder

Der natürliche Säuregehalt von Waldböden wird durch die Art des Ausgangsgesteins bestimmt und durch Klima und Vegetation beeinflusst. Die allmähliche Versauerung des Oberbodens ist Teil der natürlichen Bodenbildung. Viele Waldböden in Deutschland sind jedoch durch den Eintrag von säurebildenden Luftschadstoffen übermäßig versauert.

Wenn Böden zu sauer sind, zieht das verschiedene Konsequenzen nach sich. Eine betrifft die Baumernährung. Mit sinkendem pH-Wert gehen den Böden Nährstoffe wie Calcium, Magnesium und Kalium verloren. Ihr Vorhandensein ist jedoch wichtig für das Wachsen der Bäume. Je höher der Anteil dieser sogenannten Basenkationen im Boden ist, desto geringer ist der Anteil von Säurekationen wie Aluminium, Eisen, Mangan und Protonen. Ein Zuviel z. B. von Aluminium im Boden kann toxisch auf die Baumwurzeln wirken.

Zudem beeinträchtigen saure Böden die Aktivität der Bodenorganismen. Eine hohe Bodenaktivität gilt als Indikator für die Vielfalt einer funktionierenden Lebensgemeinschaft von Bodenorganismen und die Intensität des Stoffumsatzes im Boden. Hohe Bodenaktivität sorgt für ein gutes Recycling der Nährelemente und für Bodenfruchtbarkeit.

Saure Böden wirken sich auch auf die Biodiversität aus. In der Vegetation treten dann eher säureverträgliche Arten auf, was mit einem Verlust von Arten einhergehen kann. Andererseits bieten saure und nährstoffarme Waldstandorte auch Lebensraum für auf solche Verhältnisse spezialisierte, seltene Organismen.

Bodenschutzkalkungen – positive Auswirkungen auf Säurezustand und Nährstoffverfügbarkeit

In der Vergangenheit hatten viele Waldböden zum Teil einen kritischen Säuregrad erreicht. Deswegen wurden Bodenschutzkalkungen durchgeführt, um die Gesundheit des Bodens und des Waldes wiederherzustellen. Die Bodenschutzkalkung soll aktuelle und vergangene Säureeinträge kompensieren. Bei der Bodenschutzkalkung wird karbonathaltiges, i.d.R. dolomitisches Material meist oberflächig auf Waldböden aufgebracht.

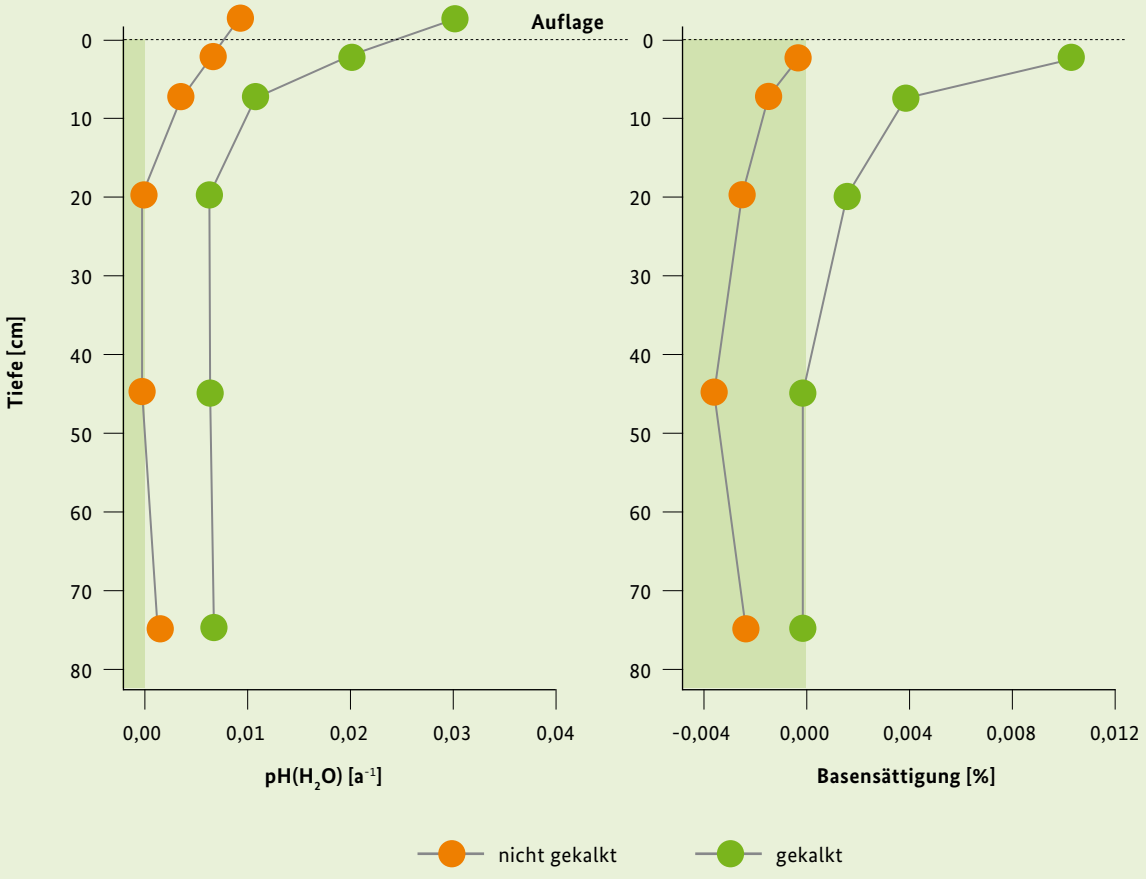
Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung zeigen, dass die Bodenschutzkalkung einen deutlichen Einfluss auf die Nährstoffverfügbarkeit hat und gleichzeitig der Versauerung des Oberbodens entgegenwirkt. So sind die Vorräte von austauschbarem Calcium und Magnesium bis in eine Bodentiefe von 30 cm auf den gekalkten Standorten höher. Weiterhin weisen die gekalkten Standorte sowohl höhere pH-Werte als auch höhere Basensättigungen auf. Seit der ersten Bodenzustandserhebung nahmen die pH-Werte bis in 10 cm Bodentiefe sowohl für gekalkte als auch für ungekalkte Standorte zu. In tieferen Tiefenstufen zeigt sich bei ungekalkten Standorten keine Änderung, während die pH-Werte auf gekalkten Standorten auch unterhalb 10 cm Bodentiefe gestiegen sind. Auch die Basensättigung in den oberen Tiefenstufen ist auf den gekalkten Standorten besser als auf vergleichbaren ungekalkten Standorten. Die Bodenschutzkalkung ist somit ein wirksames Instrument zum Schutz der Waldböden vor Säureeinträgen.

Kriterien zur Kalkung

Nicht alle Waldböden bedürfen der Kalkung. Zu den Auswahlkriterien für versauerungsempfindliche Flächen gehören in der Regel ein niedriger pH-Wert und eine geringe Basensättigung unterhalb bestimmter Schwellenwerte. Die Länder haben solche Flächen identifiziert und abgegrenzt. Solche Flächen kommen grundsätzlich für eine Bodenschutzkalkung in Frage. Ausschlusskriterien können zum Beispiel Naturschutzziele sein, die einer Kalkung entgegenstehen.

Abbildung 10: Tiefenverlauf der jährlichen Änderungen der pH(H_2O)-Werte (links) und der Basensättigung (rechts) nach der Bodenschutzkalkung zum Zeitpunkt der zweiten Bodenzustandserhebung im Auflagehumus und im Mineralboden

Der Datensatz bezieht sich ausschließlich auf die von den Ländern ausgewiesene Kulisse versauerungsempfindlicher Standorte



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

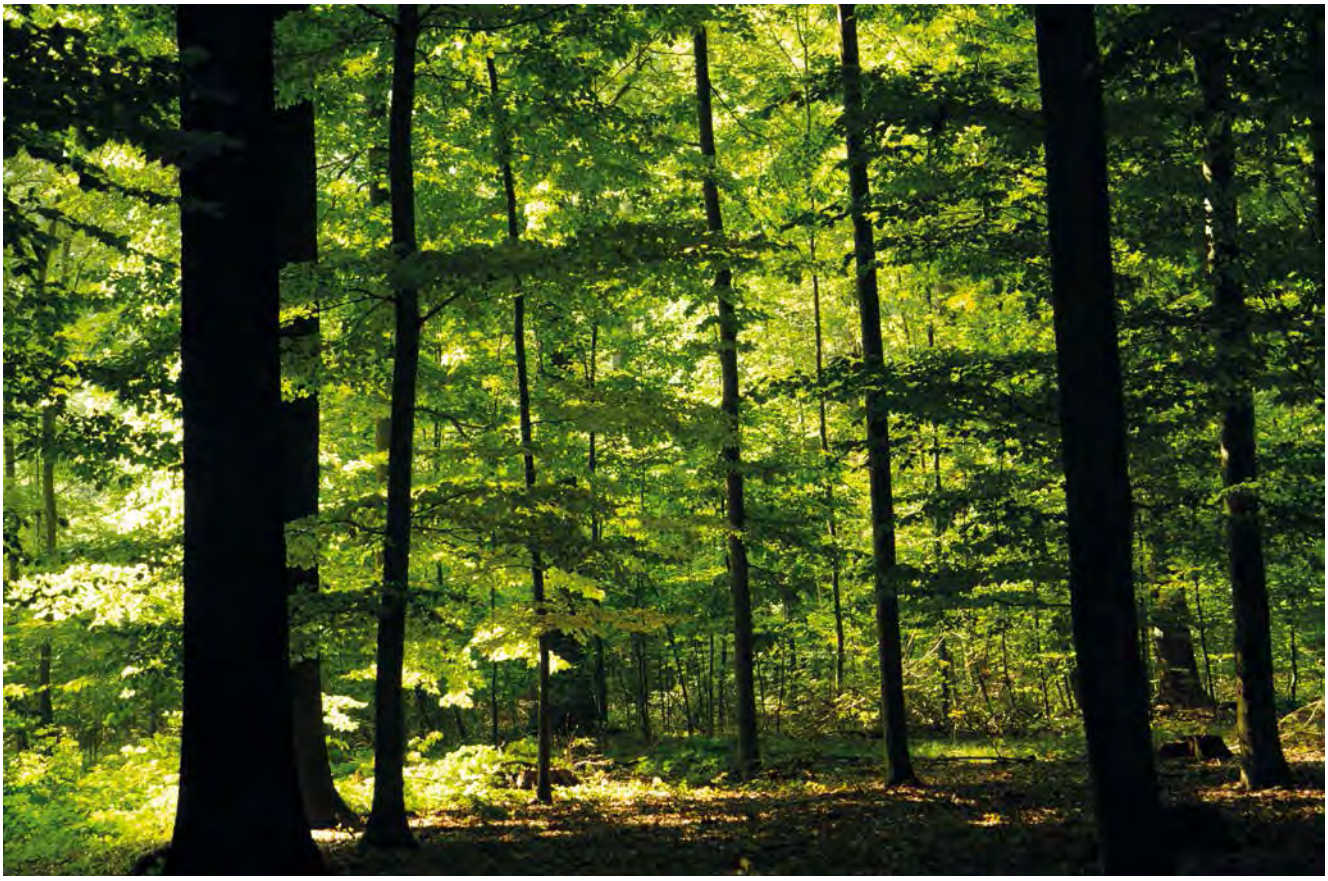


Abbildung 11: Intakte Waldböden sind grundlegend für vitale und stabile Waldökosysteme

Abbildung 12: Braunerde-Ranker aus Flaserschiefer

Insgesamt sind Waldböden *vor allem in den obersten Tiefenstufen weniger sauer. Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung belegen die Schutzwirkung der Bodenschutzkalkung.*

4. Waldernährung – Buche, Eiche, Fichte und Kiefer gut versorgt?

Blatt- und Nadelanalysen zeigen, wie gut oder schlecht Bäume mit Nährstoffen versorgt sind. Die Ergebnisse bestätigen: Bodenschutz- und Luftreinhaltemaßnahmen haben sich positiv ausgewirkt. Die Stickstoffgehalte spiegeln jedoch eine anhaltende Überversorgung mit Stickstoff wider.

Wie Menschen brauchen auch Bäume lebenswichtige Nährstoffe. Für ihre Vitalität und ihr Wachstum ist eine ausgewogene Versorgung mit den Hauptnährelementen Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium wichtige Voraussetzung. Am besten lässt sich die Ernährungsdiagnose anhand der chemischen Analyse von Blättern und Nadeln stellen. Im Rahmen der Bodenzustandserhebung wurden neben Bodenproben auch Nadel- und Blattproben der Hauptbaumarten auf die wichtigsten Nährelemente untersucht.

Aus dem Vergleich der Daten mit der ersten Bodenzustandserhebung lassen sich Aussagen zur Wirksamkeit von Luftreinhaltemaßnahmen und durchgeführten forstlichen Maßnahmen wie dem Waldumbau und der Bodenschutzkalkung treffen.

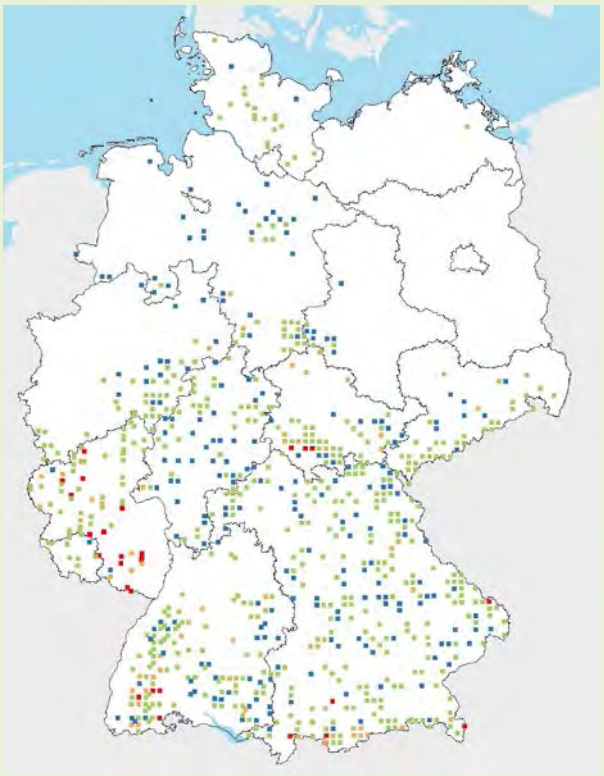
Stickstoff – oft zu viel des Guten

An etwa der Hälfte der Probepunkte sind Kiefer und Eiche mit Stickstoff überversorgt, Fichte und Buche an etwa einem Viertel der Inventurpunkte. Stickstoffmangel kommt kaum noch vor (Abbildung 14). Bei allen vier Hauptbaumarten haben die Stickstoffgehalte in Blättern und Nadeln in den letzten 20 Jahren zugenommen.

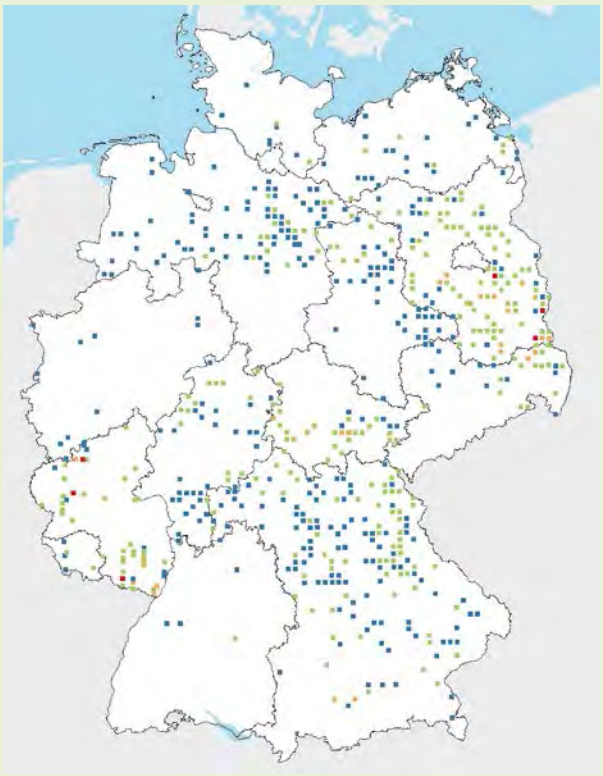
Abbildung 13 (oben): Gewinnung von Probematerial für die Blattanalyse aus einer Buchenkrone

Abbildung 14: Anteile von Mangel-, Normal- und Überschussernährung für Stickstoff bei Fichte, Kiefer, Buche und Eiche an den Inventurpunkten

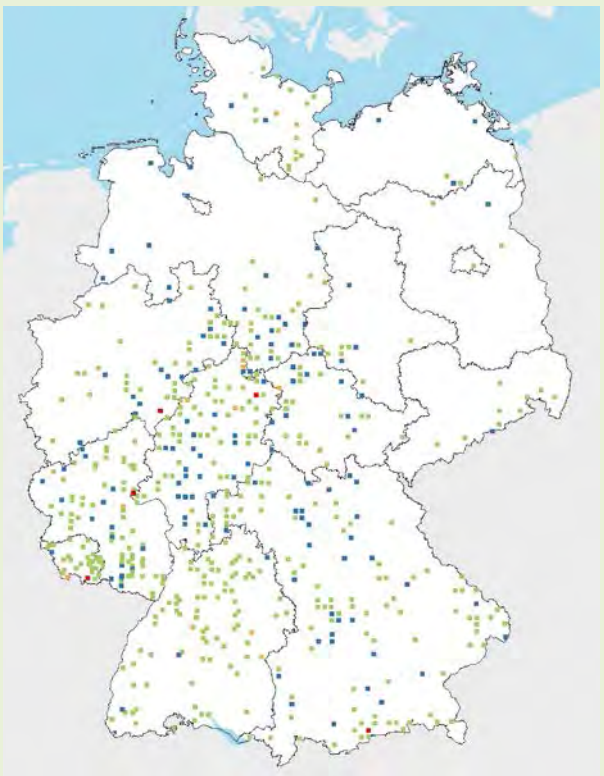
Stickstoffgehalte in Fichtennadeln



Stickstoffgehalte in Kiefernnadeln



Stickstoffgehalte in Buchenblättern



Stickstoffgehalte in Eichenblättern

0 50 100 200 Kilometer

Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Bewertungsklassen nach Göttlein (2015):

- Symptombereich
- Normalbereich
- Lat. Mangelbereich
- Luxusbereich

Phosphor – Mangel bei fast allen Hauptbaumarten

Die Ernährung mit Phosphor ist bei Fichte und Kiefer überwiegend normal. Phosphormangel tritt dennoch bei allen vier untersuchten Baumarten auf, wobei dieser am stärksten bei der Buche (an 60 % der Punkte) ausgeprägt ist, gefolgt von der Eiche (38 %), sowie der Fichte (20 %) und der Kiefer (18 %).

Kalium – unverändert stabil

Die Ernährung mit Kalium ist auf den meisten Waldstandorten normal bis sehr gut. Am besten sind Kiefer und Eiche mit Kalium versorgt; Fichte und Buche sind jeweils auf rund einem Viertel der Inventurpunkte unterversorgt. Die Kaliumernährung hat sich in den letzten 20 Jahren kaum verändert. Nur bei der Fichte sind Zunahmen der Kaliumgehalte zu beobachten. Bei wiederholt gekalkten Fichten- und Buchenbeständen ist eine Verringerung der Kaliumgehalte in Nadeln und Blättern zu beobachten.

Calcium – Ernährung hat sich verbessert

Die Calciumernährung liegt bei Fichte, Kiefer, Buche und Eiche an mindestens der Hälfte der Inventurpunkte im Normalbereich. Am besten ist die Fichte versorgt – rund 50 % der Inventurpunkte befinden sich im luxuriösen Bereich. Bei Buche und Eiche befinden sich jeweils 17 % der Inventurpunkte im latenten Mangelbereich. Über alle vier Baumarten hinweg haben die Calciumgehalte in den letzten 20 Jahren zugenommen. Die Ernährungssituation der Baumarten spiegelt die Standortseigenschaften wider. Auf Kalkverwitterungsböden sind die Calciumgehalte in Nadeln und Blättern erwartungsgemäß am höchsten. Bestehende Defizite konnten durch Kalkung gemildert werden.

Magnesium – Gehalte variieren je nach Baumart

Die Ernährung mit Magnesium ist bei allen Baumarten überwiegend normal bis luxuriös. Ein latenter Magnesiummangel tritt bei Kiefer, Buche und Eiche an etwa einem Viertel der Inventurpunkte auf. Bei Fichte und Buche haben die Magnesiumgehalte zugenommen. Alle vier Baumarten reagieren auf Bodenschutzkalkungen mit verbesserten Magnesiumgehalten in den Nadeln und Blättern. Defizite lassen sich also durch Kalkungsmaßnahmen mindern.

Luftreinhaltemaßnahmen erfolgreich – geringere Schwefel- und Bleigehalte

Der Vergleich der Schwefel- und Blei-Gehalte in den Blättern und Nadeln der Bäume von der ersten und zweiten Bodenzustandserhebung zeigt, dass sich die Maßnahmen der Luftreinhaltung positiv ausgewirkt haben. Die Analyse der Nadeln und Blätter von Fichte, Kiefer und Buche zeigt signifikant geringere Schwefelgehalte im Vergleich zur ersten Bodenzustandserhebung. Die Reduktion der Schwefel-Emissionen durch den Einsatz von Entschwefelungsanlagen seit den späten 1980er Jahren hatte also einen deutlichen Effekt auf die Schwefelgehalte in den Blattorganen der Bäume.

Auch die Analyse von Blei zeigt deutlich niedrigere Gehalte in den Nadeln von Fichte und Kiefer. Die Maßnahmen zur Verringerung der Blei-Emissionen haben somit zu einer deutlichen Reduzierung der Bleigehalte in den Nadeln von Fichte und Kiefer geführt.

Abbildung 15: Buchenblätter. Die Untersuchung von Blättern und Nadeln zeigt, wie gut oder schlecht Bäume mit Nährstoffen versorgt sind.

Blatt- und Nadelanalysen sind ein grundlegender Baustein in der Waldzustandsdiagnose. Ihre Ergebnisse ermöglichen die Betrachtung des Zusammenspiels von Boden und Baum. Die Erfolge von Luftreinhaltung und Bodenschutzkalkung spiegeln sich in geringeren Schwefel- und Bleigehalten in Nadeln und Blättern sowie einer verbesserten Calcium- und Magnesiumernährung der Bäume wider.

5.

Stickstoffeinträge in Wäldern – weiterhin eine Herausforderung

An vielen Erhebungspunkten der Bodenzustandserhebung überschreitet Stickstoff die kritischen Eintragsraten. Darauf weist ein Überangebot an Stickstoff in den Nadeln und Blättern der Bäume hin.

Stickstoff ist ein essentieller Baustein des Lebens und als Nährstoff für Pflanzen unentbehrlich. Wälder unserer Breiten sind an sich von Natur aus stickstofflimitiert – und in ihrem Nährstoffbedarf an Stickstoffmangel angepasst. Diese Stickstoffknappheit verschärfte sich durch eine über Jahrhunderte andauernde Nutzung durch den Menschen. Insbesondere die Streuentnahme begrenzte die Verfügbarkeit von Stickstoff im Waldboden. Dieser Zustand hat sich jedoch stark gewandelt. Dem Mangel folgte Überfluss. Seit mehreren Jahrzehnten sind die Wälder von erhöhten Stickstoffeinträgen aus der Luft betroffen. Verbrennungsprozesse sowie die Nahrungsmittelproduktion und Tierhaltung erzeugen Stickstoffoxide (NO_x) und Ammoniak (NH_3). Durch den erhöhten Eintrag vor allem von Ammoniak bzw. den daraus gebildeten Ammoniumverbindungen wird der natürliche Stoffkreislauf der Waldökosysteme empfindlich gestört.

Ein Zuviel an Stickstoff hat Folgen: Einerseits versauern und verarmen Waldböden an wichtigen anderen Nährstoffen. Andererseits verändert sich durch ein Überangebot an Stickstoff die Artenzusammensetzung der Waldvegetation. Pflanzenarten, die ihren Nährstoffbedarf an einen Stickstoffmangel angepasst haben, werden von Stickstoff liebenden Arten verdrängt. Zudem kann aus Waldböden mit zu hohem

Stickstoffgehalt Nitrat ausgewaschen werden und in das Grundwasser gelangen. An Stickstoff übersättigte Waldböden wirken sich auch negativ auf das Klima aus, indem Treibhausgase wie Lachgas (Distickstoffoxid) freigesetzt werden.

Anhand der Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung lassen sich Aussagen zum langfristigen Gefährdungspotenzial von Stickstoff in Waldböden und zu Status und Veränderung des Stickstoffvorrats und zur Stickstoffverfügbarkeit für Pflanzen und Mikroorganismen treffen.

Gefährdungspotenzial vorhanden – an vielen Standorten Überangebot an Stickstoff

Bodenversauerung, Eutrophierung und Nährstoffungleichgewichte sind langfristige und indirekte Schadeffekte. Zur Abschätzung des langfristigen Gefährdungspotenzials wurden im Rahmen der Bodenzustandserhebung standortspezifische kritische Eintragsraten, sogenannte Critical Loads, berechnet. Die nach einer einfachen Massenbilanz-Methode berechneten Critical Loads für überdüngenden Stickstoff betragen im Durchschnitt 17 kg Stickstoff je Hektar und Jahr. Dies stimmt gut mit den in der Literatur veröffentlichten empirischen Critical Loads überein, die mit 5 bis 10 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr für Nadelwald und 15 bis 20 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr für Laubwald angegeben werden.

Die kritischen Eintragsraten für eutrophierenden Stickstoff werden an vielen Erhebungspunkten der Bodenzustandserhebung überschritten. Seit 1990 hat sich die Situation jedoch deutlich verbessert.

Abbildung 16: Braunerde-Gley aus Flussablagerungen über Sandstein

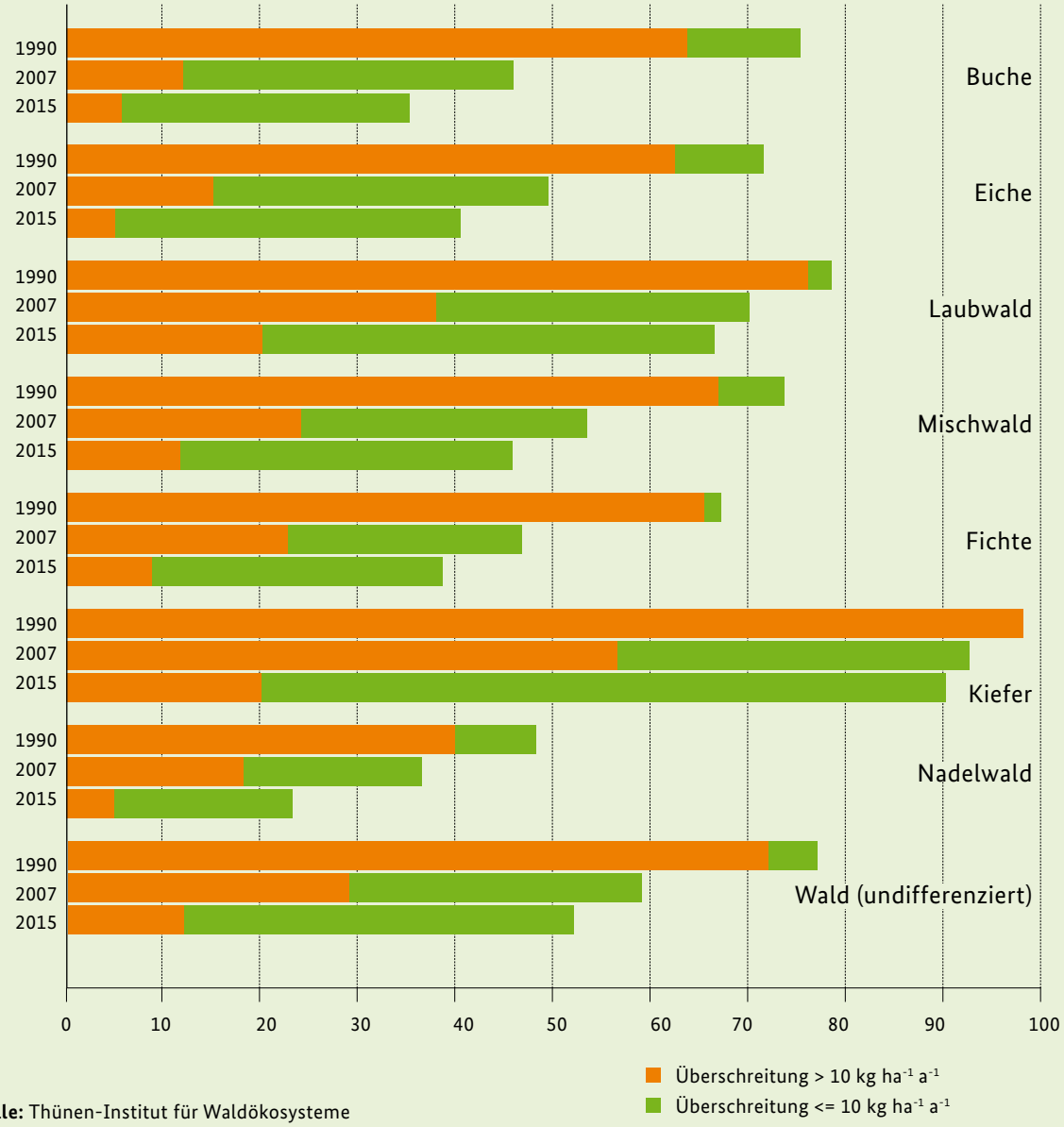
Critical Loads

Critical Loads sind naturwissenschaftlich begründete Belastungsgrenzen für die Einträge eines oder mehrerer Stoffe. Unterhalb dieser Belastungsgrenzen kommt es nach dem bisherigen Stand des Wissens langfristig (100 Jahre) nicht zu schädlichen Auswirkungen auf empfindliche Elemente der Umwelt.

Empirische Critical Loads werden von Beobachtungen abgeleitet.

Bei der einfachen Massenbilanz-Methode werden den Einträgen des betrachteten Stoffs die Aufnahme und Festlegung im Ökosystem sowie die tolerierbaren (unschädlichen) Austräge gegenübergestellt.

Abbildung 17: Gefährdung durch Überschreitung der kritischen Eintragsraten für eutrophierenden Stickstoff nach Bestockungstyp und Gefährdungsstufe für die Jahre 1990, 2007 und 2015



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Im Jahr 1990 wurden die kritischen Eintragsraten für überdüngenden Stickstoff an 77 % aller Inventurpunkte überschritten, 2007 zum Zeitpunkt der zweiten Bodenzustandserhebung waren es 59 % aller Inventurpunkte und 2015 noch 52 % der Inventurpunkte. Starke Überschreitungen nahmen überproportional ab, so dass im Jahr 2015 vorwiegend Überschreitungen um bis zu 10 kg Stickstoff je Hektar und Jahr vorkommen.

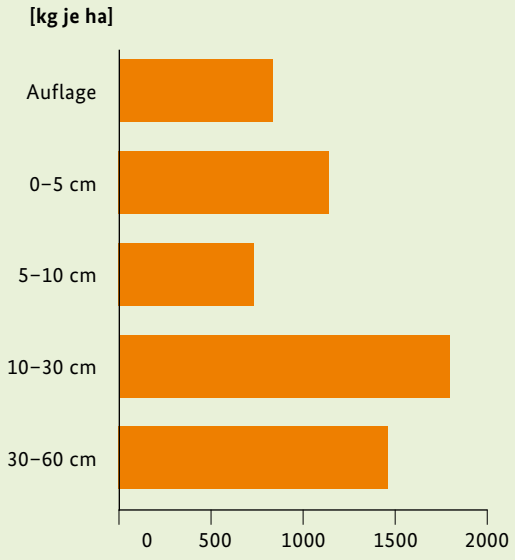
Stickstoffvorrat im oberen Mineralboden angestiegen

Die Stickstoffvorräte im Boden bis in eine Tiefe von 60 cm liegen bei rund 6 Tonnen pro Hektar. Nach den Maßstäben der forstlichen Standortbewertung entspricht dies dem mittleren Bewertungsbereich. Die Vorräte zeigen eine für Waldböden typische Tiefenverteilung von der Bodenoberfläche bis in 60 cm Tiefe. Im Oberboden bis 30 cm sind 64 % (3,84 Tonnen) des Vorrats im Hauptwurzelraum gebunden. In den Auflagen sind mit etwa 0,8 Tonnen Stickstoff 14 % des Gesamtvorrats

Der Eintrag von Stickstoff stellt weiterhin eine Herausforderung dar. Stickstoff überdüngt rund die Hälfte der Waldfläche Deutschlands. Zwar hat der Anteil der Waldfläche, auf dem kritische Eintragsraten von Stickstoff überschritten werden, seit 1990 abgenommen. Dennoch ist eine weitere Minderung der Stickstoffeinträge erforderlich, damit große Teile der Waldfläche vor überdüngenden Stickstoffeinträgen geschützt sind.

Abbildung 18: Stickstoffvorräte

Stickstoffvorräte [kg je ha] einschließlich Moor- und organisch geprägter Standorte



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Abbildung 19: Humusschicht mit darunter liegendem Mineralboden: Der Humus hat eine essentielle Bedeutung für den Boden. Er sorgt für eine krümelige Bodenstruktur, speichert Wasser und gleicht Temperaturschwankungen aus. Außerdem ist er ein beständiger Nährstofflieferant für das Bodenleben und die Waldvegetation.

fixiert. Im Vergleich zur ersten Bodenzustandserhebung nahmen die Stickstoffvorräte bundesweit und bezogen auf alle Tiefenstufen (bis 60 cm Tiefe) ab. In den Auflagen waren keine Veränderungen erkennbar. Während im oberen Mineralboden (bis 10 cm) der Stickstoffvorrat zunahm, ging dieser in den Tiefenstufen darunter zurück. Dies könnte u. a. an einer gesteigerten Stickstoffaufnahme des Baumbestands, an höheren Nitratausträgen mit dem Sickerwasser oder an gasförmigen Stickstoffausträgen liegen. Welche Anteile diese Vorgänge an der festgestellten Verringerung des Stickstoffvorrats haben, bedarf der weiteren Untersuchung.

Abbildung 20: Frische Streuauflage aus Ahornlaub

6.

Klimaschützer Wald – Waldböden speichern Kohlenstoff

In den Wäldern Deutschlands sind etwa 2,5 Mrd. Tonnen Kohlenstoff gespeichert. Über die Hälfte davon befindet sich in Waldböden. Die Erhaltung der Wälder – in Deutschland und auch weltweit – ist eine wirksame Maßnahme zur Stabilisierung des Klimas.

Wälder spielen eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Bäume nehmen Kohlenstoffdioxid aus der Luft auf und fixieren es durch die Photosynthese in ihrer ober- und unterirdischen Biomasse. Doch nicht nur Bäume, sondern vor allem die Waldböden binden viel Kohlenstoff. Über fallendes Laub, Nadeln, Rinde und Äste sowie Wurzelausscheidungen und abgestorbene Wurzeln gelangt dieser in den Boden. Die Pflanzenreste sind Nahrung für Bodenorganismen. Tiere, Pilze und Mikroorganismen wandeln einen Teil der zugeführten Biomasse über ihren Stoffwechsel in Humusstoffe um. Regenwürmer und andere im Boden wühlende Tiere arbeiten diesen Humus in den Mineralboden ein, wodurch dieser sich mit organischem Kohlenstoff anreichert.

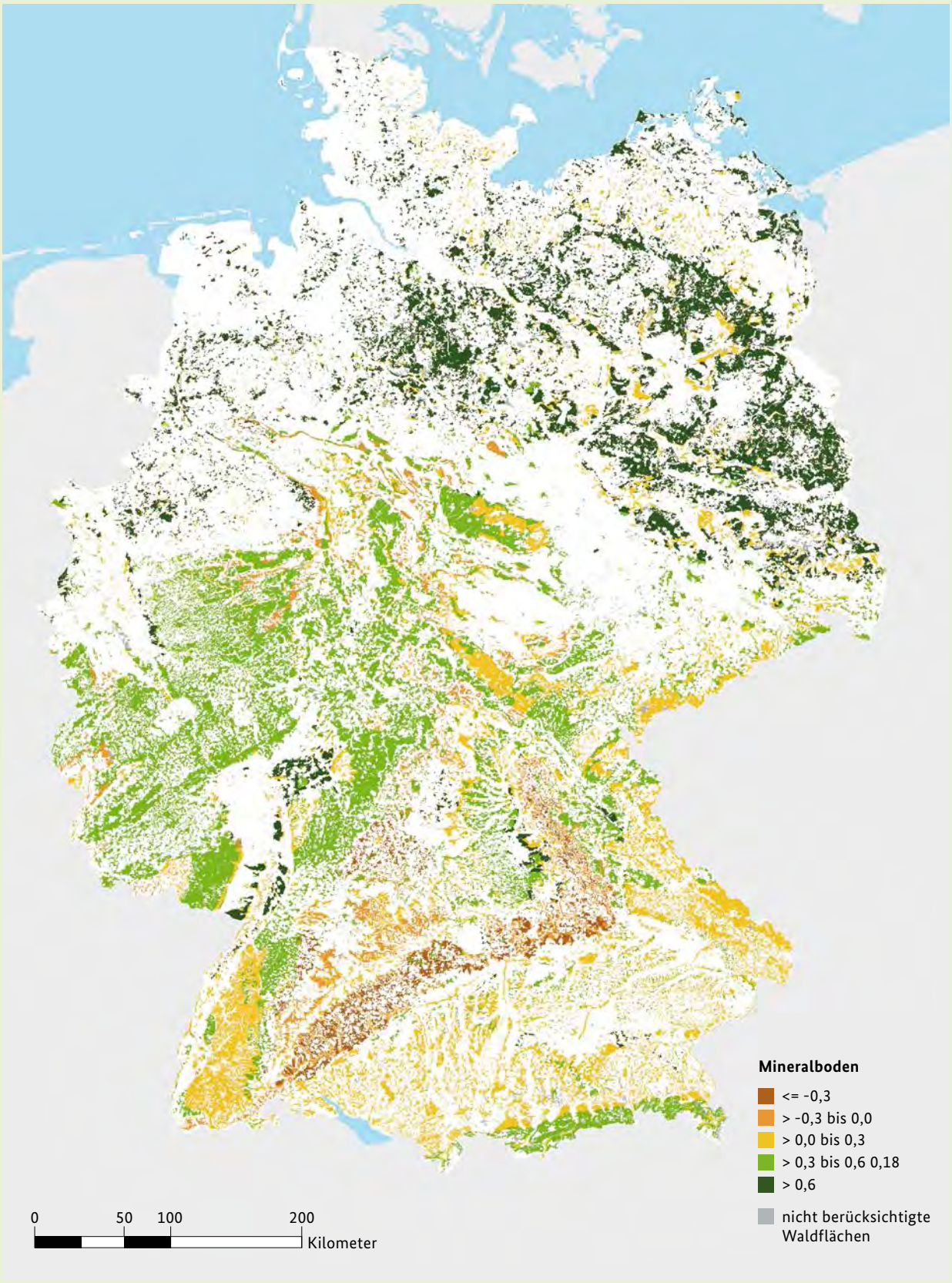
Die ober- und unterirdische Biomasse sowie das Totholz enthalten 1.169 Mio. Tonnen Kohlenstoff (BWI[3]). Diese Menge wird durch die im Auflagehumus und Mineralboden gespeicherten Kohlenstoffvorräte jedoch noch übertroffen. Die zum Zeitpunkt der zweiten Bodenzustandserhebung abgeschätzten Kohlenstoffvorräte in Auflagehumus und Mineralboden bis in 90 cm Tiefe belaufen sich auf rund 1.321 Mio. Tonnen Kohlenstoff (im Mittel rund 119 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar). Fast zwei Drittel davon sind im Auflagehumus und im Oberboden (0–30 cm) gespeichert.

Mit der Wiederholung der Bodenzustandserhebung liegt ein mit der ersten Bodenzustandserhebung vergleichbarer Datensatz vor, was eine Abschätzung

Abbildung 21: Räumliche Verteilung der Kohlenstoffvorratsänderungen zwischen beiden Inventuren im Auflagehumus [t C je ha und Jahr]

Quelle: Grüneberg E., Höhle J., Ziche D., Wellbrock N. (2015), Kohlenstoffspeicherung in Deutschlands Waldböden. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 6 S., Thünen à la carte 2, DOI:10.3220/CA1439878372000, 17.11.2016

Abbildung 22: Räumliche Verteilung der Kohlenstoffvorratsänderungen im Mineralboden in 0–30 cm Tiefe [t C je ha und Jahr]



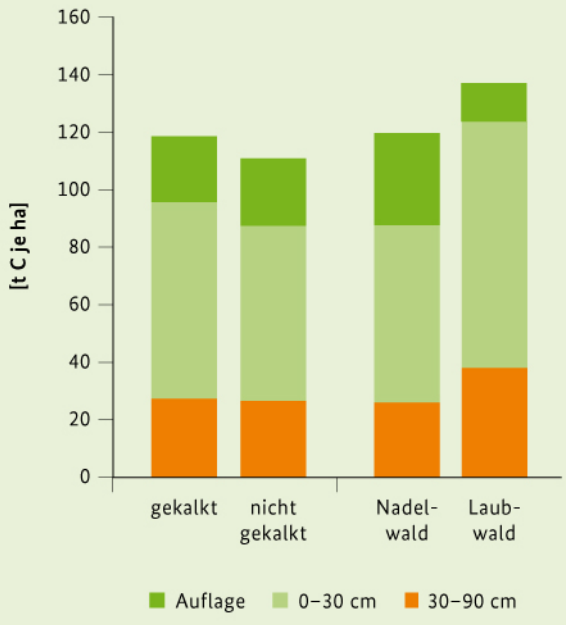
Quelle: Grüneberg E., Höhle J., Ziche D., Wellbrock N. (2015), Kohlenstoffspeicherung in Deutschlands Waldböden. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 6 S., Thünen à la carte 2, DOI:10.3220/CA1439878372000, 17.11.2016

der jährlichen Änderungsraten der organischen Kohlenstoffvorräte von Waldböden erlaubt. Für den Zeitraum zwischen 1990 und 2006 ergibt sich für den Auflagehumus und den Mineralboden bis in eine Tiefe von 90 cm eine jährliche Zunahme der Kohlenstoffvorräte von 0,75 Tonnen pro Hektar. Besonders der Mineralboden in den oberen 30 cm zeichnet sich durch besonders hohe positive Änderungsraten aus. Diese oberen 30 cm sind maßgeblich für die Berichterstattung zur Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll. Die jährliche Zunahme des Kohlenstoffvorrats in diesen oberen 30 cm Mineralboden wird auf rund 0,4 Tonnen Kohlenstoff je Hektar geschätzt.

Bundesweit lassen sich die stärksten Kohlenstoffzunahmen im norddeutschen Tiefland verzeichnen. Dieses trifft sowohl für die Vorräte im Auflagehumus als auch für die Mineralbodenvorräte in 0–30 cm Tiefe zu. Außerhalb des Tieflands wurden vergleichbare Zunahmen der Mineralbodenvorräte nur im nördlichen Bereich des Oberrheinischen Tieflands und der Rhein-Main-Ebene festgestellt. Im Bereich der Berg- und Hügelländer sind überwiegend jährliche Abnahmeraten der Kohlenstoffvorräte von über 0,26 Tonnen pro Hektar im Auflagehumus zu verzeichnen. Als Ausnahme erscheint das gesamte Alpenvorland, wo die im Auflagehumus gespeicherten Kohlenstoffvorräte jährlich zum Teil um mehr als 0,18 Tonnen pro Hektar zugenommen haben. Die Mineralbodenvorräte weisen in der Region der Berg- und Hügelländer überwiegend leichte Zunahmen auf.

Abbildung 23: Kohlenstoffvorräte

Kohlenstoffvorräte [t C je ha] im Auflagehumus und im Mineralboden zum Zeitpunkt der zweiten Bodenzustandserhebung für gekalkte und nicht gekalkte versauerungsempfindliche Standorte (links) sowie für Nadel- und Laubwald (rechts) auf Böden aus basenarmen Lockergesteinen.



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Welche Faktoren beeinflussen die Kohlenstoffvorräte von Waldböden?

Die Kohlenstoffdynamik in Waldböden wird von unterschiedlichen Faktoren gesteuert. Neben klimatischen, bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften hat auch die Bewirtschaftung einen Einfluss auf die Kohlenstoffvorräte in Böden. Die Wahl der Baumart oder Waldbewirtschaftungspraktiken wie Drainage, Durchforstung, Holzernte oder Kalkung können die Speicherung von Kohlenstoff im Boden oder seine Freisetzung beeinflussen. Die Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung belegen, dass die Bodenschutzkalkung oder eine Erhöhung des Laubwaldanteils zu einer Verlagerung von Kohlenstoffvorräten aus der Auflage in den Mineralboden führen. Der in den Mineralboden verlagerte Kohlenstoff liegt dann zumeist in stabileren Bindungsformen vor, die den Abbau durch Mikroorganismen erschweren. Daneben weisen die Ergebnisse auf einen positiven Einfluss der Stickstoff(N)Depositionen auf den Umsatz von Bodenkohlenstoff in Wäldern hin.

Die Bodenzustandserhebung liefert die Datenbasis zur Schätzung der Kohlenstoffvorräte in Waldböden. Auflagehumus und Mineralboden (bis 90 cm Tiefe) enthalten mehr als 53 % des gesamten Kohlenstoffvorrats der Wälder Deutschlands. Auf die ober- und unterirdische Biomasse entfallen rund 46 %, auf Totholz 1 %. Die Daten zu Biomasse und Totholz stammen aus der BWI.

Wälder binden CO_2

In die Kohlenstoffbilanz-Rechnung gehen zusätzlich zu den Kohlenstoffvorräten des Bodens und des abgestorbenen Pflanzenmaterials, die mit der Bodenzustandserhebung im Wald ermittelt werden, der Kohlenstoffvorrat der lebenden Biomasse und des Totholzes ein. Letztere erhebt die Bundeswaldinventur. Die gesamte Speicherleistung des Waldes wird schließlich aus diesen sogenannten Kohlenstoff-Pools ermittelt.

Zudem sind Holzprodukte ein Kohlenstoffspeicher. Sie verlängern die Speicherung des Kohlenstoffs, der bereits in den Bäumen gebunden war, über ihre Nutzungsdauer bis zur abschließenden energetischen Nutzung oder dem biologischen Abbau des Abfallholzes. Über die Speicherwirkung hinaus tragen Holzprodukte durch Substitutionseffekte (Ersatz energieintensiverer fossiler Rohstoffe und Energieträger) zur Reduktion von Treibhausgasemissionen bei.

Ob der Wald als Kohlenstoff-Senke wirkt, hängt von seiner Speicherleistung ab. Eine Kohlenstoffsenke ist er, wenn er mehr Kohlendioxid aufnimmt als er abgibt. Je mehr CO_2 in Form von Kohlenstoff dauerhaft gespeichert ist, desto weniger wird die Atmosphäre belastet. Verliert der Wald hingegen mehr CO_2 als er aufnimmt, dann ist er eine Kohlenstoff-Quelle.

Ein Wald, der nicht intakt ist, könnte unter anderem seine Klimaschutzfunktion nicht mehr so gut erfüllen. Ein wichtiger Ansatz zur Stabilisierung und Vitalisierung der Bestände und zur Erhaltung der Waldfunktionen ist die Baumartenmischung. Der großangelegte und kostenintensive Waldumbau dient dazu, die Wälder und damit ihre Kohlenstoff-Senkenfunktion zu erhalten.

Veränderungen der Waldfläche, das Wachstum der Bäume und die Bewirtschaftung der Wälder beeinflussen seine Speicherleistung. Deutschland hat sich mit der Unterzeichnung der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll dazu verpflichtet, jährlich über diese Veränderungen zu berichten.

Mit dem Beschluss zur Einrichtung des Waldklimafonds unterstreicht die Bundesregierung die Bedeutung unserer Waldökosysteme sowie die positiven Effekte einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung und Holzverwendung für den Schutz des Klimas. Durch die Förderung aus dem Waldklimafonds soll das CO_2-Minderungs-, Energie- und Substitutionspotenzial von Wald und Holz weiter optimiert sowie die notwendigen Maßnahmen zur Anpassung der deutschen Wälder an den Klimawandel unterstützt werden.

Nähere Infos unter www.waldklimafonds.de

7.

Waldböden binden Schwermetalle und organische Schadstoffe

Schwermetalle und organische Schadstoffe werden im Mineralboden an die organische Substanz oder Tonminerale gebunden. Dies verhindert ihre Verlagerung ins Grundwasser. Wenn sich Schwermetalle und organische Schadstoffe in Waldböden anreichern, können sie zu einer Gefahr für Mensch und Umwelt werden. Erstmals wurden im Rahmen der Bodenzustandserhebung organische Schadstoffe in Waldböden untersucht.

Schwermetalle sind in Spuren in fast allen Waldböden enthalten. Häufig kommen sie schon von Natur aus im Ausgangsgestein vor. In welcher Konzentration Schwermetalle im Boden vorkommen, ist jedoch neben dem Ausgangsgestein von der Bodenbildung und den vom Menschen verursachten Schwermetalleinträgen abhängig. Durch Industrieemissionen und Autoabgase gelangen Schwermetalle über die Luft in Waldböden. Der sogenannte Auskämmeffekt des Waldes verstärkt die Einträge vor allem im Oberboden. Neben den Schwermetallbelastungen der Industrie tragen auch der bis ins Mittelalter zurückreichende Erzbergbau und das damit verbundene Metallhüttenwesen regional zu Belastungen in den Böden bei, wie z. B. im Harz, im Rheinischen Schiefergebirge oder im Erzgebirge.

Die Bodenzustandserhebung hat Waldböden auf Gehalte von Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink untersucht. Einige der Elemente, wie Kupfer und Zink, sind in niedrigen Konzentrationen essentielle Nährstoffe für Pflanzen und Tiere. Andere wiederum, wie Blei, Cadmium oder Quecksilber, wirken schon in geringen Konzentrationen ausschließlich giftig.

Schwermetallbelastung – Waldböden in gutem Zustand

Die Waldböden in Deutschland befinden sich im Hinblick auf die Schwermetallbelastung in einem guten Zustand. Für einen Großteil der Waldböden liegt der Schwermetallgehalt im Mineralboden unterhalb der Vorsorgewerte der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung.

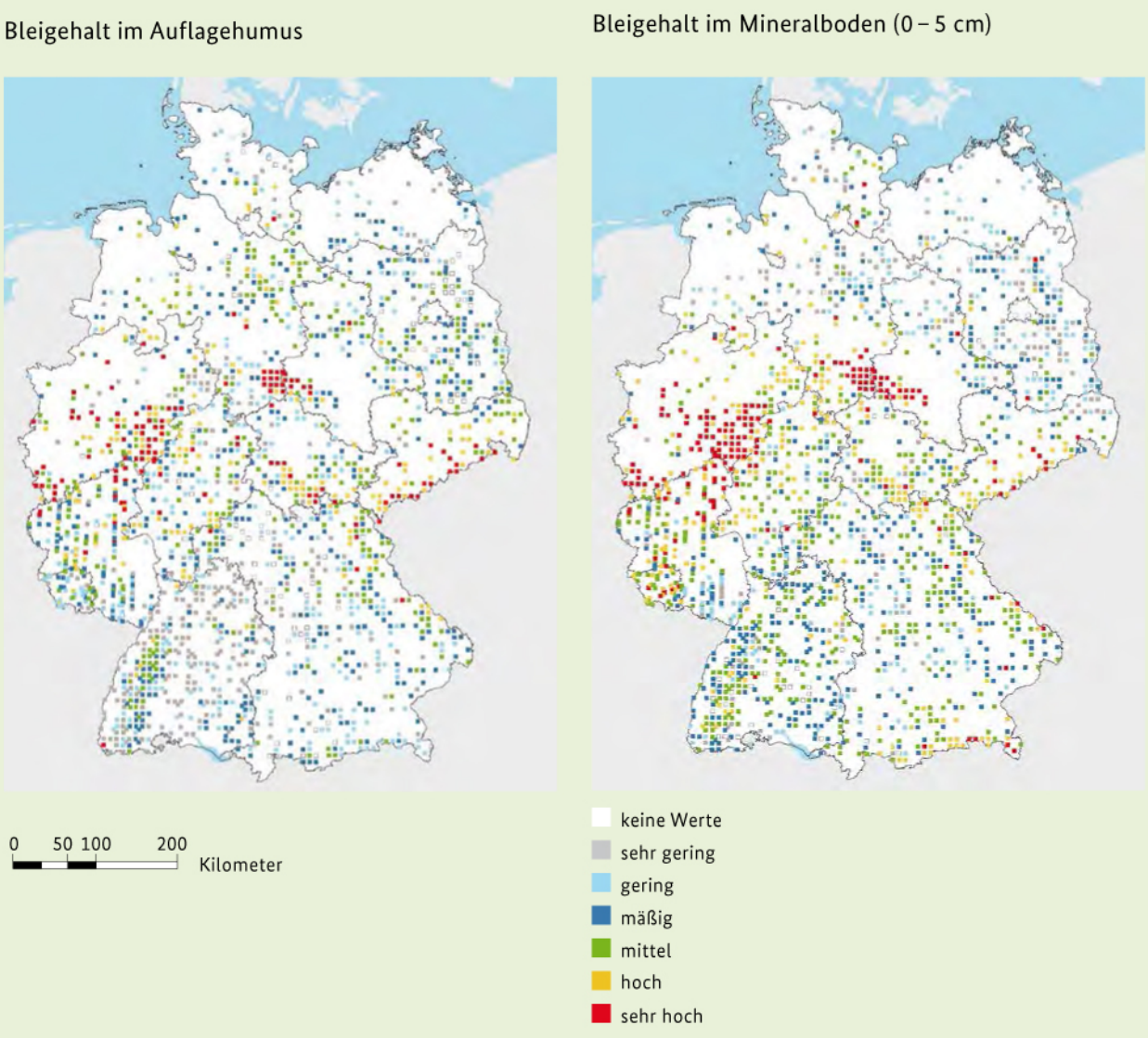
Lediglich durch Arsen und Blei werden die Vorsorgewerte auf 13 % der Waldfläche für Arsen und auf 22 % für Blei überschritten. Diese Belastungen treten vor allem im Erzgebirge (Arsen und Blei), im Harz und dem Rheinischen Schiefergebirge (Blei) auf. Gründe dafür sind sowohl die Bergbauaktivitäten der zurückliegenden Jahrhunderte als auch erhöhte Einträge aus der Luft.

Naturbedingte Schwermetallgehalte teilweise durch Einträge aus der Luft überprägt

Schwermetallgehalte der Waldböden in Deutschland werden sowohl durch den naturbedingten Grundgehalt des Ausgangsgesteins als auch durch Einträge aus der Luft bestimmt. Besonders in den Oberböden können die Einträge aus der Luft die naturbedingten Grundgehalte an Schwermetallen im Boden überlagern. Überprägungen lassen sich für die Elemente Blei, Cadmium und Quecksilber nachweisen. Bei Arsen und Kupfer ist dies weniger stark der Fall. Die Elemente Nickel, Chrom und Zink werden in ihren Gehalten hauptsächlich durch den Grundgehalt im Ausgangsgestein bestimmt.

Die höchsten Schwermetallgehalte sind auf Tongesteinen, Karbonatgesteinen sowie basischen und intermediären Magmatiten und Metamorphiten zu finden. Terrassen- und Schotterablagerungen, Sande und mächtige sandige Deckschichten sowie Geschiebemergel und -lehme weisen eher geringe Schwermetallgehalte auf. Dementsprechend sind die Mittelgebirge stärker von durch das Ausgangsgestein bedingten erhöhten Schwermetallgehalten betroffen als die von Lockergesteinen dominierten Tieflagen. In den Mittelgebirgen kommt es zudem durch den Auskämmeffekt der Wälder zu verstärkten Einträgen aus der Luft, so dass sich vor allem für Blei deutlich erhöhte Vorräte in den Auflagen und im Mineralboden belegen lassen. Dies ist vor allem eine Folge der jahrzehntelangen Verwendung von bleihaltigem Kraftstoff.

Abbildung 24: Bleigehalt im Auflagehumus (links) und im oberen Mineralboden (0-5 cm) (rechts)



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Schwermetalleintrag aus der Luft hat abgenommen

Der Eintrag der Schwermetalle über die Luft hat in den letzten 20 Jahren abgenommen. Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung zeigen, dass die Schwermetalle aus dem Auflagehumus in den Mineralboden verlagert bzw. eingelagert wurden. Dies führte zu einer Abnahme des Schwermetallgehalts im Auflagehumus. Dieser Effekt wird durch die Bodenschutzkalkung tendenziell verstärkt. Die Kalkung bewirkt eine Verlagerung von Humus und der daran gebundenen Schwermetalle von der Auflage in den oberen Mineralboden.

Organische Schadstoffe in Waldböden – Datengrundlage verbessert

Über die Belastung unserer Wälder mit organischen Schadstoffen war bisher wenig bekannt. Die zweite Bodenzustandserhebung nutzte die Möglichkeit, die Datengrundlage zu verbessern. An 474 Stichprobenpunkten wurden Bodenproben genommen und auf organische Schadstoffe untersucht.

Seit Anfang des vergangenen Jahrhunderts gelangten zunehmend organische Schadstoffe in die Umwelt. Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Dioxine und Furane, die bei Verbrennungsprozessen entstehen, finden sich ebenso in Waldböden wie polychlorierte Biphenyle (PCB), die früher als Isolieröl in elektrischen Kondensatoren und Transformatoren und als Weichmacher in Lacken und Kunststoffen dienten. Auch DDT, ein in der Bundesrepublik Deutschland seit 1972 verbotenes, in der ehemaligen DDR noch bis 1990 zugelassenes Insektizid, und seine Umwandlungsprodukte lassen sich heute noch nachweisen.

Bis auf die PAK, die in geringem Umfang auch durch natürliche Prozesse entstehen, sind alle diese Stoffe technischen Ursprungs. PAK und PCB werden im Wesentlichen durch die Luft in Wälder eingetragen. Chlorierte Kohlenwasserstoffe (z. B. DDT, Lindan) sind hingegen durch direkte Anwendung in Wälder gelangt. Aufgrund ihrer langen Halbwertszeiten und ihrer hohen Affinität zu organischen Substanzen haben sie sich in Waldböden angereichert.

Seit 1970 wurden die Emissionen von PAK und ihre Verwendung durch umweltpolitische Maßnahmen stark eingeschränkt. Grund war die hohe Toxizität dieser Substanzen. Dies betrifft die Bereiche Großfeuerungsanlagen oder Kraftfahrzeuge.

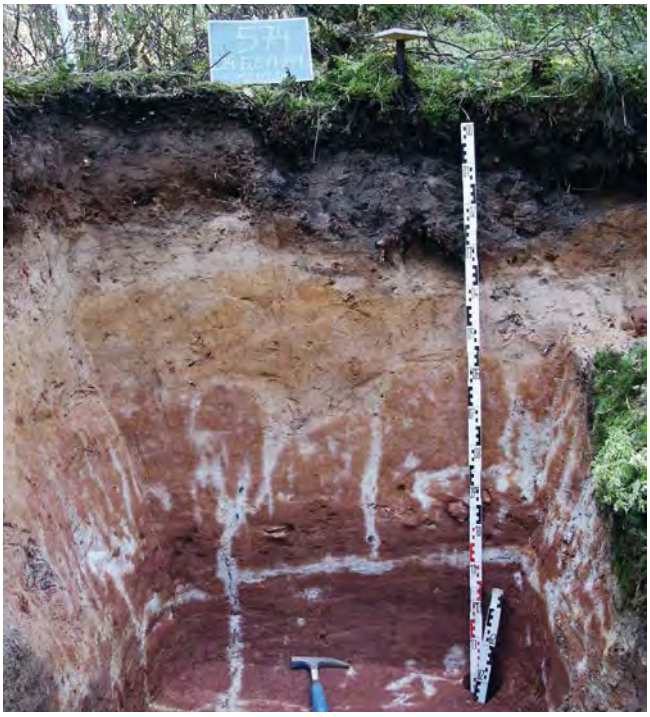


Abbildung 25: Pseudogley-Podsol aus Sandstein

Konzentrationen unterschreiten Referenzwerte für Spielplätze

In der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) gibt es keine spezifischen Vorsorgewerte oder Gefahren-bezogene Werte (Prüf-/Maßnahmenwerte) für Waldböden. Die an den Standorten der zweiten Bodenzustandserhebung gemessenen Konzentrationen unterschreiten jedoch deutlich die strengen Prüf-/Maßnahmenwerte, die für einige dieser Stoffgruppen für Spielplätze festgelegt wurden. Generelle Vorsorgewerte, d. h. ohne Differenzierung nach Bodennutzung, wurden lediglich in drei Proben bei PAK und zwei Proben bei den PCB überschritten.

Generell werden organische Schadstoffe im Mineralboden vor allem an die organische Bodensubstanz gebunden und damit ihre Verlagerung in das Grundwasser verhindert. Daher sollten alle Maßnahmen ergriffen werden, um eine Verlagerung der organischen Substanz, an die viele Stoffe gebunden sind, zu vermeiden.

Der Schwermetalleintrag aus der Luft hat in den letzten 20 Jahren abgenommen. Gleichzeitig fand eine Verlagerung der Schwermetalle von der Humusauflage in den oberen Mineralboden statt.

8.

Von der Bodenprobe zum Ergebnis

Für die zweite Bodenzustandserhebung haben Teams in ganz Deutschland an rund 1900 Stichprobenpunkten Bodenproben gewonnen und viele Gelände- und Bestandsmerkmale erfasst. Bis daraus eine verlässliche Datenbasis über den heutigen Zustand unserer Waldböden entstand, arbeiteten Bund und Länder sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen eng zusammen.

Noch bevor Bodenproben im Wald gewonnen werden, beantworten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler viele methodische Fragen. Welches Stichprobenraster ist sinnvoll? Welche Bodenparameter sollen aufgenommen werden? Wie sichert man die Vergleichbarkeit der Daten? Dies sind nur einige der vielschichtigen Fragestellungen. Das BMEL, das Thünen-Institut für Waldökosysteme und die für die Bodenzustandserhebung zuständigen Länderanstalten entwickelten gemeinsam das aufwendige Inventurverfahren.

Inventurdesign – Stichprobennetz im Wald

Die bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald ist eine systematische Stichprobenerhebung. Das Stichprobennetz erstreckt sich über die gesamte Waldfläche (11,4 Mio. Hektar) Deutschlands. Beprobt wurden rund 1900 Inventurpunkte der Holzbodenfläche. Dies ist die dauernd zur Holzerzeugung bestimmte Fläche.

Die Inventurpunkte liegen in einem Raster von mindestens 8 x 8 Kilometer. Diese Rastergröße ist notwendig, um auf Bundesebene räumlich differenzierte und flächenrepräsentative Aussagen treffen zu können. Länderspezifische Fragestellungen erforderten vielfach eine regionale und thematische Verdichtung des Basisnetzes, wie auf 4 x 4 Kilometer (z. B. Sachsen) oder 4 x 2 Kilometer (z. B. Saarland). Darüber hinaus wurde die Bodenzustandserhebung an das 16 x 16 Kilometer-Raster der europaweiten

Waldzustandserhebung gekoppelt, was Auswertungen der Daten auf europäischer Maßstabsebene ermöglicht.

Probenahme – mehr als 50.000 Humus-, Mineralboden-, Blatt- und Nadelproben

An den Inventurpunkten führten die beteiligten Länderinstitutionen eine umfassende bodenkundliche Profilansprache durch. Dies erfolgte an einem Bodenprofil, d. h. einem senkrechten Schnitt von der Erdoberfläche durch den Boden, am Inventurpunkt. In der Regel wird das Bodenprofil an der senkrecht abgestochenen Rückwand einer Bodengrube untersucht. Von der Bodenart über Humusgehalt, Grundwasserstand und Ausgangsgestein bestimmten Teams von Fachleuten mehr als 66 Parameter am Bodenprofil und im Gelände. Um die Bodengrube herum führten die Teams an acht Satellitenpunkten Bohrungen durch und gewannen Probematerial von der Humusauflage bis in mehrere Bodentiefen. Zudem wurden an den Punkten des europäischen 16 x 16 Kilometer-Rasters (Level I), das eine Unterstichprobe der Bodenzustandserhebung darstellt, Bodenprofilansprachen und Beprobungen für das von der EU geförderte BioSoil-Projekt durchgeführt. An diesen Inventurpunkten wurden auch Proben für die Untersuchung

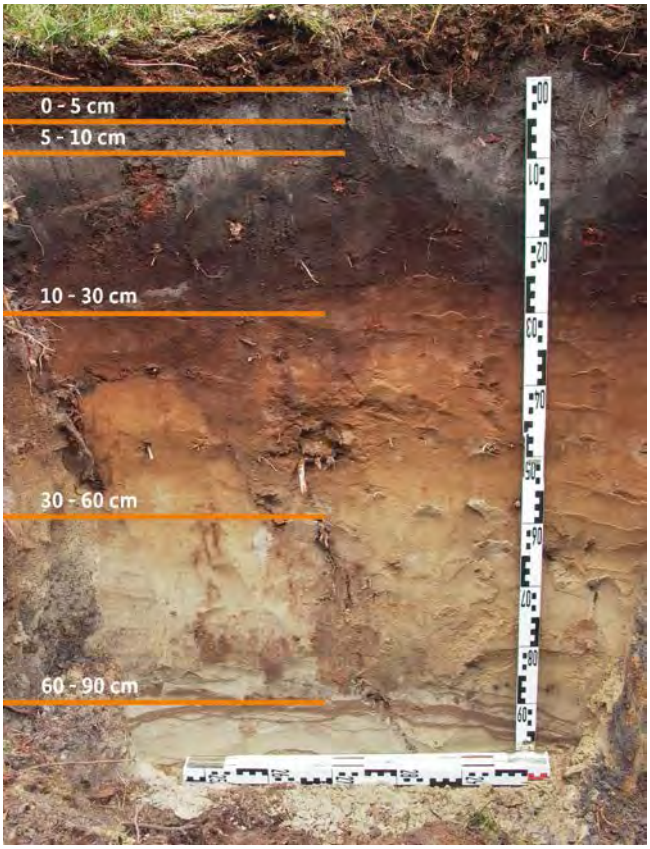
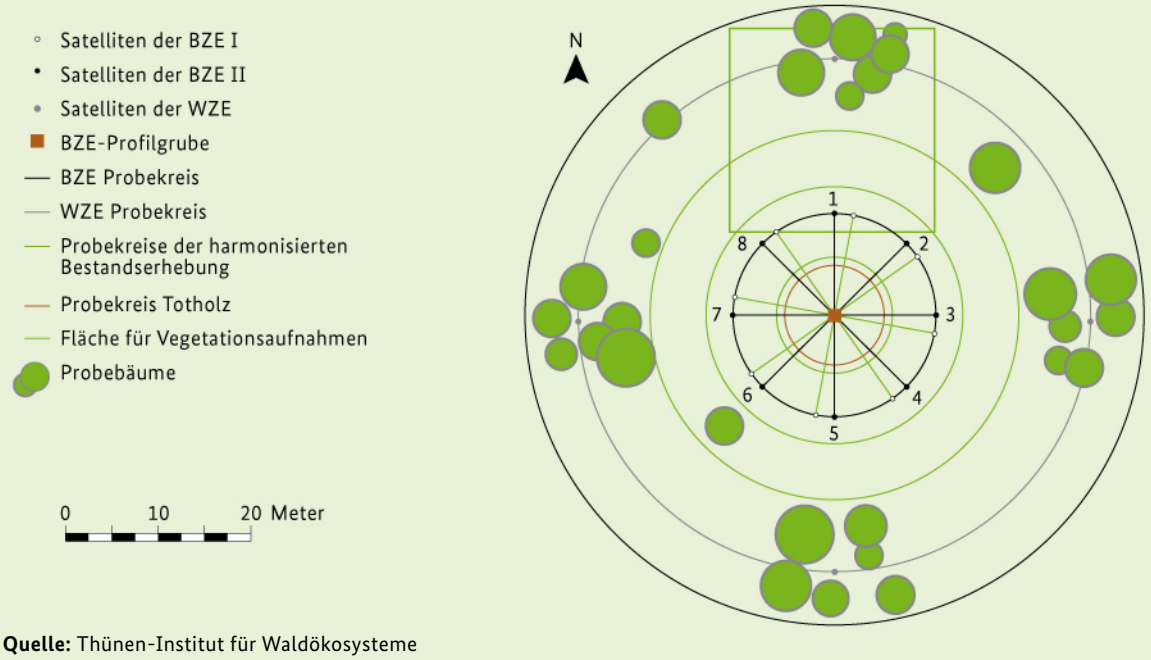


Abbildung 26: Bodenprofil (Podsol) mit eingezeichneten Tiefenstufen: An den Aufnahmepunkten legten Inventurmitarbeiter im Mittelpunkt eine bis zu 2 Meter tiefe Bodengrube an. Hier erfolgte eine Profilansprache nach einem bundesweit einheitlichen Verfahren.

Abbildung 27: Aufnahmen an einem Inventurpunkt der Bodenzustandserhebung



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme

der organischen Schadstoffe im Rahmen der zweiten Bodenzustandserhebung genommen. Um Informationen über den Ernährungszustand der Bäume zu erhalten, gewannen die Inventurteams zusätzlich zu den Bodenproben Nadel- und Blattproben von den Bäumen.

Zudem führten die Teams eine Reihe anderer Aufnahmen durch, wie zur Bestockung, Bodenvegetation und dem Kronenzustand der Bäume. Letzterer dient im Rahmen der Waldzustandserhebung als Weiser für die Vitalität der Wälder.

Vom Wald ins Labor

Nach der Probenaufbereitung wie etwa Trocknen, Sieben und Wiegen wurden die Proben im Labor analysiert. Die Länder bestimmten in ihren Labors zahlreiche chemische Elemente und bodenchemische Parameter. Vom pH-Wert und der Basensättigung über den Gehalt von organischem Kohlenstoff, Stickstoff und Nährelementen (K, Mg, Ca) sowie Schwermetallen in Bodenproben bis hin zu Nährelementgehalten in Nadeln und Blättern wurde eine riesige Menge an Einzelwerten ermittelt. Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung führte im Auftrag des Umweltbundesamtes die Untersuchung der Bodenproben auf Organika durch. Schwermetalle wurden arbeitsteilig durch die Länder und die Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe analysiert. Die Verfahren der Probenahme und Analyse sind bundesweit vereinheitlicht und in der Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen der Bodenzustandserhebung sowie im Handbuch Forstliche Analytik dokumentiert. Ein einheitliches und durchgeführtes Qualitätssicherungskonzept stellte die hohe Qualität der im Labor erhobenen Daten sicher.

Auswertung der Daten – interdisziplinärer Ansatz

Eine Besonderheit der zweiten Bodenzustandserhebung ist ihr interdisziplinärer Ansatz. Neben der Zusammenarbeit mit den Ländern wertete das Umweltbundesamt den Gehalt organischer Schadstoffe in Waldböden aus. Die Bundesanstalt für Geologie

Abbildung 28: Analysevorbereitungen im Bodenphysiklabor

Abbildung 29: Lagerung der Bodenproben im Kühlraum bei 4° Grad Celsius

und Rohstoffe führte Untersuchungen zu Hintergrundgehalten von Schwermetallen durch. Insgesamt fand die bundesweite Auswertung in Kooperation mit 35 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Thünen-Instituts, der Länderanstalten, Universitäten und anderen Institutionen statt. Die Länder brachten hierbei Erfahrungen aus ihren eigenen, auf Landesebene durchgeführten Auswertungen ein. Denn der Datenzusammenführung und Auswertung auf Bundesebene waren umfassende Qualitätskontrollen der Daten und Auswertungen auf Länderebene vorausgegangen. Die Länder haben ihre Ergebnisse in eigenen Berichten veröffentlicht.

Vor der bundesweiten Auswertung koordinierten Wissenschaftler des Thünen-Instituts für Waldökosysteme das Datenmanagement der umfangreichen Einzeldaten. Dazu gehören die Qualitätssicherung der Daten, ihre Harmonisierung und die Aufbereitung der Datensätze. Zum Beispiel mussten Rohdaten aus der Beprobung der Bodenhorizonte in einheitliche Tiefenstufen des Bodens umgerechnet werden. Als die Datenbasis erstellt und geprüft war, folgten statistische Hochrechnungen und Auswertungen. Ihre Ergebnisse zeigen ein umfassendes Bild über den Zustand und die Veränderung der Waldböden in Deutschland.

Gemeinschaftsprojekt von Bund und Ländern

Die Bodenzustandserhebung ist ein von Bund und Ländern gemeinsam getragenes Projekt im Rahmen des forstlichen Umweltmonitorings. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft hat das Thünen-Institut für Waldökosysteme mit der Bundesinventurleitung beauftragt. Das Thünen-Institut für Waldökosysteme entwickelt zusammen mit Vertretern der Länder die Aufnahme- und Erhebungsmethodik, nimmt das bundesweite Datenmanagement wahr und wertet die Ergebnisse bundesweit aus.

Im Rahmen der zweiten Bodenzustandserhebung wurden rund 443 Laborparameter an mehr als 50.000 Humus-, Mineralboden-, Blatt- und Nadelproben untersucht.

9. Grundlage der Broschüre und weitere Informationen

Publikationen

Wellbrock, N.; Bolte, A.; Flessa, H. (eds) (2016), Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 550 S., Thünen Report 43,

ISSN 2196-2324
ISBN 978-3-86576-161-3
DOI:10.3220/REP1473930232000
urn:nbn:de:gbv:253-201609-dn057211-6

Wellbrock, N.; Aydin, C.-T.; Block, J.; Bussian, B.; Deckert, M.; Diekmann, O.; Evers, J.; Gauer J.; Gehrmann, J.; Kölling, C.; König, N.; Liesebach, M.; Martin, J.; Meiwes, K.-J.; Milbert, G.; Raben, G.; Riek, W.; Schäffer, W.; Schwerhoff, J.; Ullrich, T.; Utermann, J.; Volz, H.-A., Weigel, A. & Wolff, B. (2006), Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. Hrsg. BMELV. Berlin. 413 S.

Grüneberg, E.; Höhle, J.; Ziche, D.; Wellbrock, N. (2015), Kohlenstoffspeicherung in Deutschlands Waldböden. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 6 S., Thünen à la carte 2, DOI:10.3220/CA1439878372000

Internet

www.bmel.de/

www.thuenen.de/de/wo/arbeitsbereiche/waldmonitoring/bodenzustandserhebung/

10.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erhebungspunkte der Bodenzustandserhebung 5
Abbildung 2: Erhebungsparameter der Bodenzustandserhebung 6
Abbildung 3: Braunerde aus Sandstein 8
Abbildung 4: Wissenschaftler schauen in den Boden hinein 8
Abbildung 5: Vielfalt der Waldböden 10
Abbildung 6: Anteile der Bodenklassen innerhalb der Stichprobe der Bodenzustandserhebung 12
Abbildung 7: Regionale Verteilung der Bodenklassen innerhalb der Stichprobe der Bodenzustandserhebung 13
Abbildung 8: pH(H_2O)-Wert im Auflagehumus (links) und im Mineralboden in 0-5cm Tiefe (rechts) 15
Abbildung 9: Tiefenverlauf des Status der pH(H_2O)-Werte (links) und der Basensättigung (rechts) zum Zeitpunkt der ersten und zweiten Bodenzustandserhebung im Auflagehumus und im Mineralboden 16
Abbildung 10: Tiefenverlauf der jährlichen Änderungen der pH(H_2O)-Werte (links) und der Basensättigung (rechts) nach der Bodenschutzkalkung zum Zeitpunkt der zweiten Bodenzustandserhebung im Auflagehumus und im Mineralboden 18
Abbildung 11: Intakte Waldböden sind grundlegend für vitale und stabile Waldökosysteme 19
Abbildung 12: Braunerde-Ranker aus Flaserschiefer 19
Abbildung 13: Gewinnung von Probematerial für die Blattanalyse aus einer Buchenkrone 20
Abbildung 14: Anteile von Mangel-, Normal- und Überschussernährung für Stickstoff bei Fichte, Kiefer, Buche und Eiche an den Inventurpunkten. 21
Abbildung 15: Buchenblätter. Die Untersuchung von Blättern und Nadeln zeigt, wie gut oder schlecht Bäume mit Nährstoffen versorgt sind. 23
Abbildung 16: Braunerde-Gley aus Flussablagerungen über Sandstein 25
Abbildung 17: Gefährdung durch Überschreitung der kritischen Eintragsraten für eutrophierenden Stickstoff nach Bestockungstyp und Gefährdungsstufe für die Jahre 1990, 2007 und 2015 26
Abbildung 18: Stickstoffvorräte [kg je ha], einschließlich Moor- und organisch geprägter Standorte 27
Abbildung 19: Humusschicht mit darunter liegendem Mineralboden 27
Abbildung 20: Frische Streuauflage aus Ahornlaub 27
Abbildung 21: Räumliche Verteilung der Kohlenstoffvorratsänderungen zwischen beiden Inventuren im Auflagehumus [t C je ha und Jahr] 29
Abbildung 22: Räumliche Verteilung der Kohlenstoffvorratsänderungen im Mineralboden in 0–30 cm Tiefe [t C je ha und Jahr] 30
Abbildung 23: Kohlenstoffvorräte [t C je ha] im Auflagehumus und im Mineralboden zum Zeitpunkt der zweiten Bodenzustandserhebung für gekalkte und nicht gekalkte versauerungsempfindliche Standorte (links) sowie für Nadel- und Laubwald (rechts) auf Böden aus basenarmen Lockergesteinen 31
Abbildung 24: Bleigehalt im Auflagehumus (links) und im oberen Mineralboden (0–5 cm) (rechts) 34
Abbildung 25: Pseudogley-Podsol aus Sandstein 35
Abbildung 26: Bodenprofil (Podsol) mit eingezeichneten Tiefenstufen 37
Abbildung 27: Aufnahmen an einem Inventurpunkt der Bodenzustandserhebung 37
Abbildung 28: Analysevorbereitungen im Bodenphysiklabor 38
Abbildung 29: Lagerung der Bodenproben im Kühlraum bei 4° Grad Celsius 39

HERAUSGEBER
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)
Rochusstraße 1, 53123 Bonn

BEARBEITUNG
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
Referat 535: Sigrid Strich
Thünen-Institut für Waldökosysteme:
Dr. Nicole Wellbrock, Dr. Erik Grüneberg

KONZEPTION UND TEXTENTWURF
Ursula Schmidt, Berlin

STAND
November 2016

GESTALTUNG
design.idee, Büro für Gestaltung, Erfurt

DRUCK
BMEL

BILDNACHWEIS
Seite 1: Carola Vahldiek/Fotolia.com
Seite 3: BMEL/photothek.net/Michael Gottschalk
Seite 4: lichtbildmaster/Fotolia.com,
Seite 6: Thomas Heinkele (links), Erik Grüneberg (Mitte oben),
Petra Dühnelt (Mitte unten), NW-FVA (rechts)
Seite 7: Erik Grüneberg
Seite 8: Ernst Segatz (links), Erik Grüneberg (rechts)
Seite 9: Christian Schwier/Fotolia.com
Seite 10: Helmut Rieger, Hermann Buberl, Thomas Heinkele,
Hermann Buberl (Reihenfolge von links nach rechts)
Seite 11: Jürgen Gauer (links), Michael Blessinger (rechts)
Seite 14: Johannes D. Mayer/Fotolia.com
Seite 19: Erik Grüneberg (oben), Jürgen Gauer (unten)
Seite 20: LUA Saarland
Seite 23: Erik Grüneberg
Seite 24: Fotoschlick/Fotolia.com
Seite 25: Jürgen Gauer
Seite 27: Erik Grüneberg (oben), Petra Dühnelt (unten)
Seite 28: hochfeld/Fotolia.com
Seite 33: lights4u/Fotolia.com
Seite 35: Jürgen Gauer
Seite 36: tatomm/Fotolia.com
Seite 37: Thomas Heinkele
Seite 38: Erik Grüneberg
Seite 39: Petra Dühnelt

BESTELLINFORMATIONEN
Diese und weitere Publikationen können Sie kostenlos bestellen:
Internet: www.bmel.de/publikationen
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Fax: 01805-77 80 94
Telefon: 01805-77 80 90
(Festpreis 14 ct/Min., abweichende Preise a. d. Mobilfunknetzen mgl.)
Schriftlich:
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09, 18132 Rostock

Diese Publikation wird vom BMEL kostenlos herausgegeben. Sie darf nicht im Rahmen von Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Weitere Informationen finden Sie im Internet unter
www.bmel.de