

3 Einleitung

3.1 Allgemeine Einführung zum Thema Boden

Uwe Paar, Jan Evers

Ohne die Böden der Erde könnte die Menschheit nicht ernährt werden. Dieser vielfältig belebte oberste Teil der Erdkruste ist die ökologische Lebensgrundlage zur Erzeugung von Nahrung und Energie und ist deshalb ein kostbares Gut. Auch im Wald, der in Deutschland zumeist die ursprüngliche Vegetationsform darstellt, sind die Böden die Grundlage für alles Leben. Sie stellen Lebensraum und Standorte für Lebensgemeinschaften und bilden zusammen mit Luftraum, Flora und Fauna das Waldökosystem.



Abbildung 8: Humoser Oberboden auf Kalk

3.1.1 Bodenbildung

Im Grenzbereich zwischen Atmosphäre und festem bzw. lockerem Gestein entstehen Böden als Teil der Biosphäre durch physikalische und chemische Prozesse (Verwitterung) sowie durch die Tätigkeit einer Vielzahl von Organismen. Böden setzen sich aus Mineralien unterschiedlicher Art und Größe sowie aus organischen Stoffen zusammen. Die räumliche Anordnung der Bodenteilchen erzeugt das Bodengefüge mit einem bestimmten Hohlraumssystem, das mit Bodenlösung (Wasser mit gelösten Salzen und Gasen) und Luft gefüllt ist. Die bodenbildenden Prozesse stellen sich als

dynamisches System dar, das in ständiger kleinräumlicher Entwicklung begriffen ist. Böden entwickeln sich aufgrund unterschiedlicher Ausgangsgesteine, Klimafaktoren und Relief sowie durch die Beeinflussung durch Bodenwasser, Vegetation, Tier und Mensch zu verschiedenen Bodentypen. Diese Faktoren sind durch Stofftransporte miteinander verknüpft und schaffen eine Vielzahl unterschiedlicher Böden. Erst eine bestimmte Kombination von Verwitterung, damit verbundener Nährstofffreisetzung, Hohlraumsystem, Bodenwasser sowie Bodenluft schafft die Grundlage für eine bestimmte Pflanzen- und Baumartenkombination (Waldgesellschaft) und die daran gebundene Fauna.

3.1.2 Funktionen der Böden

Böden dienen vielen pflanzlichen und tierischen Organismen als Lebensraum und Lebensgrundlage. Die physikalische Verankerung und die Versorgung von Pflanzen mit Wasser, Gasen und Nährstoffen hängen dabei von der Durchwurzelbarkeit der Böden sowie von der Leitfähigkeit für Flüssigkeiten und Gase ab. Als Bestandteil des Naturhaushalts spielen Böden aufgrund ihrer Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften eine zentrale Rolle als Speicher- und Transformationsmedium gegenüber einer großen Zahl von Umwelteinflüssen.

Waldböden stellen mit ihren vergleichsweise mächtigen humosen Schichten eine wichtige Senke für Kohlenstoff im globalen Kohlenstoffhaushalt dar. Die Kohlenstoffvorräte im Boden übersteigen die oberirdischen Speicher teils um das Doppelte (FAO 2006). Kohlenstoff kann dabei im Boden in karbonatisch und organisch gebundener Form (Humus, organische Substanz und Lebensgemeinschaften des Mineralbodens) vorliegen. Abgefallene Baumkompartimente (Blätter und Äste) und abgestorbene Wurzeln stellen die wichtigste Humusquelle dar. Sie werden von zahlreichen Bodenorganismen zersetzt und mineralisiert. Die Umsetzungsgeschwindigkeit ist dabei wiederum von den Faktoren der Bodenbildung abhängig und resultiert in unterschiedlichen Bodenhumusgehalten und -vorräten, wobei der Humusgehalt zumeist mit der Bodentiefe abnimmt (SCHACHTSCHABEL et al. 1998).

Darüber hinaus hat der weitgehend noch naturbelassene Waldboden eine bedeutende Funktion als Wasserspeicher und leistet so einen wichtigen Beitrag zur verstetigten Wasserversorgung der Waldbestände. Informationen zur mengenmäßigen Erfassung und Verknüpfung von Niederschlag, Speicherwirkung und Transpiration gibt der Wasserhaushalt eines Gebietes (KÖLLING u. FALK 2010). In Abhängigkeit von Bodenart und -gefüge können die Folgen von Trockenperioden abgepuffert, Hochwasserspitzen gemildert und die stetige Nachlieferung von Grundwasser ermöglicht werden. Hohe Speicherwirkungen erzielen Böden mit hohem Lehm- und Schluffgehalten, während grobe Sande und Tone deutlich geringere Wassermengen speichern. Auch hohe Stein-(Skelett-)Gehalte vermindern die pflanzenverfügbare Wassermenge.

Böden können wertvolle natur- und kulturhistorische Archive darstellen, die es zu erfassen und zu erforschen gilt, bevor sie durch Nutzung oder dynamische Bodenentwicklung verloren gehen.

Die Lebensgrundlage des Menschen sichern Böden z. B. als Rohstofflager, als Nutzungsfläche für Siedlung und Verkehr, für die Land- und Forstwirtschaft sowie für Naturschutzbelange.

Ziel des deutschen Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBODSCHG 1998) ist es, all diese Bodenfunktionen zu sichern oder wiederherzustellen. Daraus leitet sich die Vorsorge zur Verhinderung schädlicher Bodenveränderungen ab.

3.1.3 Gefährdungen

Viele Jahrhunderte liefen in Waldböden ohne menschliche Nutzung eher langsame natürliche Prozesse ab, deren Dynamik Flora und Fauna durch Anpassung zu meist folgen konnten. Historische Waldnutzungen wie beispielsweise Köhlerei, Glashütten, Erzgewinnung oder Streunutzung führten teilweise schon zu starken Veränderungen der Waldböden. Besonders in den letzten Jahrzehnten veränderte jedoch eine Vielzahl von unterschiedlichen Umweltfaktoren (z. B. Stickstoff-, Säure- und Schwermetalleinträge) die Böden so schnell, dass die Anpassungsmöglichkeiten vieler Tier- und Pflanzenarten sowie von Standorten überschritten wurde. Aufgrund der langen Verweildauer von Schadstoffen und der Akkumulation in Böden können dadurch Schädigungen des Lebensraumes auftreten und die Bodenfunktionen erheblich beeinträchtigen. Schadstoffeinträge unterschiedlicher Quellen, die über Luft, Niederschläge oder auch Grund- und Oberflächenwasser auf die Waldböden einwirken, können zur Versauerung und zu einem daraus resultierenden Ungleichgewicht beim Nährstoffangebot sowie zur Kontaminierung mit toxischen Schwermetallen und organischen Schadstoffen (z. B. Lindan, Dieldrin) führen.

In versauerten Böden werden die *basischen Nährelemente* wie Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na) und Kalium (K) verstärkt von Säurekationen wie Aluminium (Al), Eisen (Fe), Mangan (Mn) und Protonen von den negativ geladenen Austauscherplätzen im Boden verdrängt und mit dem Sickerwasser aus dem durchwurzelten Boden ausgewaschen. Sie stehen somit nicht mehr zur Pflanzenernährung zur Verfügung. Auch eine übermäßige, nicht standortsangepasste Biomassennutzung kann auf einigen Standorten zum Nährstoffentzug und damit zu einer verringerten Basensättigung beitragen (GLATZEL 1991). Dies verschlechtert letztlich die Lebensbedingungen für Wurzeln und Bodentiere und damit auch die Bodenfruchtbarkeit (KÖLLING 2010).

Obwohl der *Stickstoff* (N) für Pflanzen einen lebensnotwendigen Nährstoff und erdgeschichtlich einen Minimumfaktor für die Pflanzenentwicklung darstellt, haben sich heute durch anthropogene Stickstoffeinträge viele Waldflächen zu mit diesem Element überversorgten Standorten entwickelt (ABER et al. 1989, EICHHORN 1995). Eine einseitig hohe Stickstoffversorgung kann zu einem Nährstoffungleichgewicht

und zu einer Eutrophierung des Bodens führen. Mit eintretender Stickstoffsättigung des Bodens können Pflanzen und Mikroorganismen die eingetragenen Stickstoffverbindungen nicht mehr vollständig aufnehmen. Sie werden mit dem Sickerwasser ausgewaschen, führen zu einer erhöhten Nitratbelastung des Grund- und Oberflächenwassers und gefährden damit die bisher weitgehend unbelastete Trinkwassernachlieferung aus dem Wald. Stickoxide als Verbrennungsprodukte fossiler Energieträger tragen als Säurebildner durch Pufferreaktionen zur Bodenversauerung bei und können ebenfalls zu einer Auswaschung von basischen Nährelementen führen. Insbesondere der luftbürtige Eintrag von Ammoniak, vor allem aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung stammend, fördert die Bodenversauerung, da bei der Pflanzenaufnahme von Ammonium die gleiche Menge an Protonen in die Bodenlösung geht (FALK u. STETTER 2010, KÖLLING et al. 2010b, PAAR 1994). Überhöhte Stickstoffeinträge können zur erhöhten Freisetzung des klimawirksamen und am Ozonabbau beteiligten Spurengases Distickstoffmonoxid (N_2O , Lachgas) führen (HAIDER 1996).

Bei den *Schwermetallen* muss zwischen essenziellen Schwermetallen wie Mangan (Mn), Kupfer (Cu) oder Zink (Zn), die erst in hohen Konzentrationen giftig wirken, und Schwermetallen wie Blei (Pb) oder Cadmium (Cd), die schon in sehr geringen Konzentrationen toxisch wirken können, unterschieden werden. Die Bodenkonzentrationen der jeweiligen Elemente sind vom geologischen Ausgangssubstrat, der Bodenbildung und von anthropogenen Einträgen, zumeist aus der Luft, abhängig. Für die Schadwirkung der jeweiligen Elemente, vor allem für die Einschätzung der Grundwassergefährdung, ist darüber hinaus das Lösungsverhalten von Bedeutung, welches durch die elementspezifische Bindungsstärke des Bodens bestimmt wird. Waldböden sind in der Lage, aufgenommene Schadstoffe zu filtern, zu speichern, umzuwandeln und abzubauen (SCHACHTSCHABEL et al. 1998). Da die Waldböden vergleichsweise naturbelassen und unbelastet sind, erfüllen sie eine wichtige Weiserfunktion für die Luftschadstoffbelastung (FIEDLER u. RÖSLER 1988). Durch eine zunehmende Versauerung könnten aber auch Schwermetalle in Lösung gehen und das Grundwasser belasten.

Eine weitere Gruppe von Schadstoffen, die über die Luftdeposition in die Böden gelangt, sind *persistente organische Stoffe*, sogenannte POP (Persistent Organic Pollutants). Zu dieser Gruppe gehören eine Reihe von zumeist in der Landwirtschaft ausgebrachten Bioziden, aber auch Nebenprodukte der chemischen Industrie und Produkte aus Verbrennungsprozessen. Sie besitzen eine nachgewiesene schädliche Wirkung auf den menschlichen Organismus und unterliegen deshalb weitgehenden Beschränkungen und Verboten (RIEK u. WOLFF 2007). Herbizide, Insektizide und Fungizide sind von Natur aus nicht in Böden enthalten. Ihrem Anwendungszweck entsprechend haben sie einen großen Einfluss auf den Organismenbesatz und damit auf die Eigenschaften und Nutzbarkeit der Böden. Die organischen Biozide können wie alle Stoffe in Böden gelöst, bewegt, gefällt, adsorbiert, desorbiert und chemisch und biologisch verändert oder abgebaut werden. Die jeweiligen Bodeneigenschaften

haben großen Einfluss auf die ablaufenden Reaktionen. Auch die Transformationsprodukte wirken teilweise noch immer biozid (SCHACHTSCHABEL et al. 1998).

Nicht an den Standort angepasste Erntetechniken oder unsachgemäß eingesetzte Maschinen können das Hohlraumsystem des Waldbodens durch Zusammenpressen der porenreichen Bodenkrume langfristig schädigen. Die so verdichteten Böden verändern ihre ökologische Funktionalität, wobei besonders die Bodenluft- und Wasserleitfähigkeit stark beeinträchtigt wird. Eine Verschiebung des Artenspektrums der Mikroorganismen in sauerstoffarme oder sogar anaerobe Bodenverhältnisse und eine verringerte Stressresistenz der Waldbestände gegen Trockenheit, Durchnässung und Sturm kann die Folge sein. Bereits entstandene Beeinträchtigungen lassen sich nur mit hohem Aufwand beheben; die natürliche Regeneration kann Jahrzehnte dauern (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Klimaveränderungen wirken sich wahrscheinlich auf den Kohlenstoff-, Stickstoff- und damit den gesamten Nährstoffhaushalt der Wälder aus. Dies betrifft sowohl den unbelebten wie auch den belebten Boden. Die vorhergesagte Klimaerwärmung und die Verminderung der Sommerniederschläge lassen überdies deutliche Änderungen (Verschlechterungen) im Wasserhaushalt der Böden erwarten. Es ist deshalb grundsätzlich von dynamischen ökosystemaren Standortentwicklungen auszugehen (KÖLLING u. FALK 2010).

Regelmäßige, flächenrepräsentative Bodenzustandserhebungen im Wald können zeitliche Veränderungen von indikativen Bodenkenngrößen erfassen und Gefährdungspotenziale aufzeigen. Auf der Basis dieser Untersuchungen und Ergebnisse sind Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenfunktionen ableitbar.

3.2 Geologische und bodenkundliche Verhältnisse in sachsen-anhaltischen Wäldern

Wolfgang Schmidt, Jan Evers, Uwe Paar

3.2.1 *Geologie Sachsen-Anhalts*

Sachsen-Anhalt verfügt über eine abwechslungsreiche Geologie. Das Land ist im geologischen Untergrund in Form von Pultschollen aufgebaut, die sich von Süden nach Norden fortsetzen und in der Altmarksenke von mächtigen pleistozänen Sedimenten bedeckt sind.

Sowohl der Harz als auch der Kyffhäuser an der Grenze nach Thüringen sind im Wesentlichen aus Gesteinen des Erdaltertums aufgebaut. Diese Gebirgszüge werden kranzförmig eingefasst von Sedimenten des Erdmittelalters, die mit unterschiedlicher Mächtigkeit ausstreichen und zum Teil markant das Gelände prägen. Die Gesteine des Erdmittelalters umschließt ein Lössgürtel aus in der Weichselkaltzeit durch Gletscherwinde angewehten schluffigen Partikeln. Der Löss überdeckt häufig auch die Schichten des Erdmittelalters und liegt auch schleierförmig in die Gebirgsböden eingemischt. Nach Norden, Nordosten und Osten wird der Lössgürtel durch eiszeitliche und nacheiszeitliche Ablagerungen abgelöst, die sich in Sachsen, Brandenburg und Niedersachsen fortsetzen.

Folgende erdgeschichtliche Vorgänge führten zur Bildung der heutigen Landschaften Sachsen-Anhalts:

Mehrere tausend Meter tonige, sandige und kalkige Sedimente wurden im Gebiet im Ordovizium (vor ca. 500 Mio. Jahren), Silur (440), Devon (400) und Unterkarbon (350) abgelagert, in die Diabase eindringen. Diese wurden an der Wende vom Devon/Karbon und im Oberkarbon (vor 345 bis 260 Mio. Jahren) zum Varistischen Gebirge (Südfrankreich über Schwarzwald, Spessart, Harz bis Ostpolen und Ostasien) aufgefaltet. Silikatische Schmelzen drangen ein, die heute in den Granitmassiven des Brockens und des Ramberges zu Tage treten.

Bei der Auffaltung entstandene Höhen wurden im Laufe der geologischen Entwicklung erodiert. Im Rotliegenden lagerten sich im Meisdorfer und Ilfelder Becken Sedimente ab. Ein Vulkanausbruch bildete den Quarzporphyr des Auerberges. Nach wiederum fast völliger Einebnung durch Erosion sank das Gebiet unter den Meeresspiegel. In der Folge kam es zu Ablagerungen von Schichten des Zechsteins (250) und der Trias (250-200).

Der Harz wurde im Jura (195) und in der Kreidezeit (135) um einige 100 m angehoben. In der Kreidezeit kam es zur Saxonischen Bruchschollentektonik, bei der durch hohen Druck aus Südwest und Nordost der Gebirgsstock in Pultschollen zerbrach, die vom Thüringer Wald kommend mit allmählich ansteigenden Südrändern

und steilen Nordrändern über Kyffhäuser, Harz, Flechtinger Höhenzug und Altmarkscholle aneinander anschließen. Dabei wurden die Nordränder stark aufgerichtet und teils über die vorgelagerten Schollen geschoben.

Zu Beginn des Tertiärs (65) erfolgte erneut eine völlige Abtragung und Einebnung und damit eine Freilegung des Grundgebirges von Kyffhäuser, Harz und Flechtinger Höhenzug. Als silikatische Härtlinge ragten der Brocken, der Ramberg und der Auerberg aus dem Harz heraus. Erneut wurde der Harz im Tertiär um mehrere hundert Meter zum heutigen Mittelgebirge angehoben.

Den Harz umschließen die Sedimente des Perm, der Trias und der Kreidezeit, die in weiten Gebieten von einer unterschiedlich mächtigen Lössschicht bedeckt sind. Auch der Harz ist zum Teil von einem Lössschleier überzogen. An den südlichen allmählich ansteigenden Gebirgsrändern streichen diese Sedimente breiter aus, wogegen sie an den Nordrändern schmale diskordant gestellte Bänder von geringer Breite bilden, die die Landschaft häufig durch ihre exponierte Erscheinung prägen (z.B. Teufelsmauer bei Thale). Auf den im tieferen Untergrund liegenden, als plastisches Gleitlager wirkenden Salzen des Zechsteins wurden durch den hohen Gebirgsdruck von Südwest und Nordost Sättel und Mulden aus Triassedimenten geformt, die als Kreidesandstein-, Keuper-, Muschelkalk- und Buntsandsteinrücken an die Oberfläche treten. Markante Höhenzüge nördlich des Harzes sind Hoppelberg, Regenstein und Heidelberg (Kreidesandstein), Fallstein, Huy und Hakel (Muschelkalk). Zwischen Oschersleben und Helmstedt in Niedersachsen tritt der Jura im Hohen Holz an die Oberfläche.

Als Widerlager des Harzes bei der Faltung der Gesteine der subhercynen Mulde zu Sätteln wirkte der Flechtinger Höhenzug (Porphyry und Porphyrit). Dieser bildet gleichzeitig die Grenze zu den Sedimenten der Saalekaltzeit. Die Grenze zwischen Hügelland und Tiefland verläuft in etwa entlang des Mittellandkanals bis Magdeburg und von dort über Schönebeck und Halle bis nach Zeitz. Im Südosten Sachsen-Anhalts reicht die Leipziger Tieflandbucht mit ihren im Tagebau gewonnenen Braunkohlevorkommen des Paläozäns bis Oligozäns (vor 61–23 Mio. Jahren) und des Miozäns (23 – 5) ins Land herein.

Im Süden des Landes erhebt sich der Buntsandsteinrücken des Ziegelrodaer Plateaus und um Naumburg und Freyburg tritt der Muschelkalk in größerer Ausprägung zu Tage. Diese Triasgesteine sind mehr oder weniger von Löss bedeckt, der sich in einem breiten Band dem Harz anschmiegt und bis zur Tieflandgrenze reicht. Die als Börde bekannte Lösslandschaft mit ihren Schwarzerdeböden wird zu großen Teilen landwirtschaftlich genutzt und ist daher waldarm.

Das pleistozäne Tiefland wird beherrscht von der Altmarksenke mit Sedimenten der Saale-Kaltzeit (Plankener Stadium). Einen breiten Raum nehmen die Endmoränenzüge des Altmarkrückens und des Fläming ein, die in einem breiten Band von der Elbe und den anschließenden die Elbe begleitenden Niederungen und Terrassen durchschnitten werden. Zwischen den Niederungen der Elbe und der Mulde

erhebt sich die Dübener Heide als ältere Moränenbildung, die in Teilen als Stauendmoräne ausgebildet ist. Hier findet man auch Sedimente der Elsterkaltzeit.

Im Nordosten zwischen Genthin und Havelberg reicht die weichselkaltzeitliche Brandenburger Staffel in das Land herein.

Auf die 3 Großlandschaften Mittelgebirge, Hügelland und Tiefland verteilt sich die Waldfläche von ca. 492.000 ha wie folgt:

Mittelgebirge:	19 % der Waldfläche (7 % der Landesfläche)
Hügelland:	11 % der Waldfläche (40 % der Landesfläche)
Tiefland:	70 % der Waldfläche (53 % der Landesfläche)

Diese Verteilung spiegelt sich auch in den geologischen Ausgangsgesteinen wider. Die Auswertung der geologischen Karte unter Wald ergab folgende Anteile der geologischen Formationen:

Tabelle 1: Prozentuale Verteilung der geologischen Formationen unter Wald in Sachsen-Anhalt nach der geologischen Karte

geologischen Formation	Anteil in %
holozäne Bodenbildung	32
pleistozäne Sedimente	44
Tertiär	2
Kreide	1
Jura	<1
Trias	3
Perm	2
Karbon	9
Devon	6
Ordovizium	<1

3.2.3 Bodenbildung der geologischen Formationen

3.2.3.1 Holozäne Bodenbildung

Künstliche Aufschüttungen (<1 %) treten als Halden des Braunkohle-Tagebaus in Erscheinung. Hier wurden die häufig tauben tertiären bis paläogenen Sedimente des Abraumes mit holozänen Erden überdeckt. Die Böden sind in der Regel undifferenziert. Die Halden wurden meist mit Pionier-Baumarten aufgeforstet (Pappeln, Aspe, Robinie, Kiefer, Birke), in neuerer Zeit aber auch mit Eiche und Ahornarten.

Moorerden und Torfe (4 %) sind typisch für die Niederungen der kleineren Flüsse im Tiefland (Havel, Tanger, Milde, Biese) sowie für weite Niederungsbereiche der Elbe und ehemalige Urstromtalgebiete (Fiener südlich Genthin, Wische bei Seehausen, Salzwedeler Niederung). Hier haben sich als Böden stark durch Grundwasser beeinflusste Moore, Gley Moore, Moorgleye, Anmoorgleye und Humusgleye ausgebildet. Moorbirken-, Erlen- und Erlen-Eschenwälder sowie Stieleichen-Hainbuchenwälder kommen häufig als natürliche Waldgesellschaften auf diesen Standorten vor.

Flussablagerungen, Auen (7 %) findet man vor allem entlang der Elbe, aber auch an Saale, Mulde, Bode und Elster. Im flussnahen Bereich befinden sich die Bodenbildungsprozesse im ständigen Wandel. Mit humosen Material angereicherte Klockböden (Vegen) sowie Gleye und Amphigleye, die je nach Sedimentationsgeschwindigkeit aus höheren Ton-, Lehm- oder Sandanteilen zusammengesetzt sind, bilden die wesentlichen Bodenformen. Hier wachsen die aus dem Biosphärenreservat Elbtal- aue bekannten Auenwälder mit Eiche, Ulme, Hainbuche und bei höherem Kalkgehalt der Böden (entlang der Saale) auch verstärkt mit Esche. Artenreiche Auenwälder kommen vor allem an der mittleren Elbe zwischen Wittenberge und Magdeburg, an der unteren Mulde, der unteren Saale zwischen Bernburg und Schönebeck und an der weißen Elster zwischen Leipzig und Halle vor.

Dünen, Flugsand (6 %) findet man inselartig in der Niederung der Elbe. Sie treten meist als Erhöhungen in Erscheinung, können aber auch in Moränengebiete eingebettet liegen. Die Bodenbildungsprozesse sind häufig noch jung, deshalb bilden sich meist Ranker oder Saumpodsole aus. Ältere Dünen haben wegen längerer Offenlage auch gekappte Böden, die als Rumpfrosterden (gekappte Podsole oder Braunerden) bezeichnet werden. Auf den Dünen mit ihren reinen Sanden und geringer Trophie sowie einem angespannten Wasserhaushalt gedeihen i.d.R. arme, leistungsschwache Kiefernwälder.

Die *Niederterrassen und Talsande* (14 %) (z.T. Mittelterrassen) setzen sich aus humusreichen, verlehmt bis hin zu rein silikatischen Gleyen, Amphigleyen und Halb- gleyen mit Einstreuungen terrestrischer Bodenformen kräftiger bis ziemlich armer Nährkraft zusammen. Typisch für diese Bereiche sind Eichen-Eschen-Wälder und Eichen-Hainbuchenwälder, sowie ärmere Eichen-Wälder, die heute entlang der Elbe, der Havel und des Tanger zu finden sind.

3.2.3.2 Pleistozäne Sedimente

Löss, Lösslehm, *Flotssand* (< 1%). Aufgrund ihrer hervorragenden Eignung für die Landwirtschaft, vor allem durch die Ausbildung von sehr fruchtbaren Schwarzerden im mitteldeutschen Trockengebiet, sind die Lössböden nur sehr gering bewaldet. Schwarzerden, Parabraunerden und Fahlerden bis hin zu Pseudogleyen sind die charakteristischen Bodentypen. Die gute bis sehr gute Nährkraft lässt artenreiche Waldlabkraut-Eichen-Hainbuchenwälder gedeihen, bei stärkerer Ausprägung subkontinentalen Klimas auch Eschen-Ulmen-Wälder mit spezieller thermophiler Bodenvegetation. Auf mächtigeren Lössen (bis 4 m) kommen aber auch im trockenen Klima Buchenwälder vor. Hier wird die fehlende Klimafeuchte durch die hohe Wasserspeicherkapazität der Böden kompensiert, jedoch besteht eine erhebliche Gefährdung durch Spätfröste.

Eiszeitliche Böden der Brandenburger Staffel der *Weichselkaltzeit* (*Sander, Grund- und Endmoränen*) reichen mit einem geringen Flächenanteil von *knapp über 1 %* im Nordosten des Landes zwischen Genthin und Havelberg aus Brandenburg herein. Auf den Bodentypen Braunerde und Braunerde-Podsol mittlerer bis ziemlich armer Nährkraft kommen Eichen- und Eichen-Kiefernwälder vor.

Die Saalekaltzeit hat das Tiefland Sachsen-Anhalts am stärksten geprägt. Deshalb stockt der größte Anteil der Wälder des Landes auf eiszeitlichen Böden der *Saalekaltzeit* (*Sander, Grundmoränen, Endmoränen, glazilimnische Bildungen* – 44 %).

Die gesamte Altmark sowie der Fläming und die Dübener Heide sind das Ergebnis der die Landschaft formenden Prozesse der Saalekaltzeit. Entsprechend vielfältig sind auch die Bodentypen, die je nach Anteilen von Ton, Schluff und Sand unterschiedliche Trophieausprägungen aufweisen. Am häufigsten kommen Braunerden mittlerer Nährkraft vor, gefolgt von ziemlich armen Braunerden und Braunerde-Podsolen bis hin zu armen Podsolen und Rankern. Je nach klimatischen Einfluss in der Region wachsen auf diesen Böden Buchenwälder, Eichen-Buchenwälder, Eichen-Hainbuchenwälder, Eichen-Kiefernwälder oder Kiefernwälder. Braunerden und Fahlerden kräftiger Trophie treten auf den Endmoränenzügen bei Klötze, auf der Diesdorfer Hochfläche, im Fläming und in der Dübener Heide auf. Im nordwestlichen Sachsen-Anhalt sind diese Standorte kräftiger Nährkraft bei entsprechend atlantischem Klimaeinfluss durch das Vorkommen von Waldmeister- bis Hainsimsen-Buchenwäldern charakterisiert. Im Fläming und in der Dübener Heide nimmt die Konkurrenzkraft der Eiche zu, sodass Mischwälder aus Eiche und Buche sowie Eichen-Kiefernwälder typisch für diese Moränengebiete sind.

Staugleye und Braunerde-Staugleye begleiten vor allem die Endmoränen. Dort wo toniges Material abgelagert wurde und Bändersande oder lehmunterlagerte Böden vorkommen, wachsen Stieleichen-Hainbuchenwälder als natürliche Waldgesellschaft.

3.2.3.3 Tertiär

Tertiäre Böden aus Tonen, Schluffen und Sanden (2 %) befinden sich häufig in der Nachbarschaft von Braunkohlen-Tagebauen. Mittlere Braunerden aber auch Staugleye sind die typischen Bodenformen mit Eichen-Hainbuchenwäldern als natürliche Waldgesellschaft.

3.2.3.4 Kreide und Jura

Vor allem der *Kreidesandstein (< 1 %)* tritt am Nordharzrand in verschiedenen Ausprägungen zutage. Dort bildet er Schichtrippen (Teufelsmauer, Gegensteine), Steilabstürze (Regenstein) und markante Höhenzüge (Alteburg, Heidelberg). Die gelblichen Sandsteine enthalten wenig Nährstoffe und verwittern zu schwachen Braunerden, Braunerde-Podsolen, Podsolen und Rankern. Ein weit nach Südwesten vorgeschobenes Vorkommen von Kiefernwäldern ist hier als natürliche Waldgesellschaft zu finden. Auf Standorten mittlerer Trophie, die häufig Beimischungen von Löss enthalten, kommt zur Kiefer in Beimischung Traubeneiche hinzu, die auch in Reinbestände auf flachgründigen Böden vorkommen kann.

Böden auf *Jura* im Bereich des Hohen Holzes bei Oschersleben sind mit *unter 0,5 %* sehr gering bewaldet.

3.2.3.5 Trias

Wie bei den Böden auf *Jura* sind auch die Böden auf *Keuper* meist landwirtschaftlich genutzt und nur zu *rund 0,5 %* bewaldet.

Bodenbildungen auf *Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalk* sind mit insgesamt *rund 1 %* unter Wald vertreten. Fallstein Huy und Hakel, Sättel im nördlichen Harzvorland sowie Steilstufen am Harzrand stellen das wesentliche Verbreitungsgebiet der Böden auf Muschelkalk dar. Im südlichen Sachsen-Anhalt um Naumburg und Freyburg stocken weitere Wälder auf Muschelkalk. Rendzina, Rendzina-Braunerde und Lössbedeckte Fahlerden sind die charakteristischen Bodentypen mit einer sehr guten Nährkraftausstattung. Artenreiche Bingelkraut-Buchenwälder, Schwalbenwurz-Buchenwälder bis Orchideen-Buchenwälder und Steinsame-Buchenwälder mit z. T. hohen Anteilen von Hainbuche, Linde, Ulme, Esche und Ahorn kennzeichnen als natürliche Waldgesellschaften diese nährstoffreichen Standorte.

Böden, die sich auf *Buntsandstein* entwickelt haben, decken lediglich *1 %* der Waldstandorte des Landes ab. Das Ziegelrodaer Plateau und Bereiche der Schrecke an der Grenze nach Thüringen stellen das Hauptverbreitungsgebiet dar. Vor allem Braunerden, Braunerde-Pseudogleye und Pseudogleye haben sich hier entwickelt, auf denen Goldnessel-Eichen-Buchenwälder, Hainrispengras-Eichen-Buchenwälder, Hainsimsen-Eichen-Buchenwälder, Drahtschmielen-Eichen-Buchenwälder und auf Pseudogleyen Eichen-Hainbuchenwälder als natürliche Waldgesellschaften vorkommen. Auch am Rande der Südharzer Zechsteinmulde findet man ein schmales

Band Braunerden auf Buntsandstein-Untergrund sowie am Rand zum Thüringer Becken bei Nebra.

3.2.3.6 Perm

Speziell im Mansfelder Land am südlichen und südöstlichen Harzrand streicht der *Zechstein* relativ flach in der so genannten Zechsteinmulde in einem breiteren Band aus. Zu dem seit Jahrhunderten abgebauten geringmächtigen Kupferschiefer kam im letzten Jahrhundert intensiver tiefer Bergbau zur Förderung von Kalisalzen hinzu. Am Rande der Zechsteinmulde, die mit holozänen Sedimenten ausgefüllt ist, stehen Gips und Stinkkalk an, auf denen sich Rendzinen, Braunerden und Gipsascheböden entwickelt haben mit ihrer sehr abwechslungsreichen Topografie aus Dolinen und Erdfällen. Sie tragen eine vielgestaltige Flora mit Mischwäldern aus Eiche, Hainbuche, Buche, Linde, Ahornarten und Bergulme, die eher den Hangschuttwäldern zuzuordnen sind. Weniger als 1 % der *Zechsteinstandorte* sind bewaldet.

In der Meisdorfer Mulde am Nordostrand des Harzes und in der Südharzmulde bei Illfeld sind Sedimente des *Rotliegenden* abgelagert. Auf diesem Untergrund haben sich vor allem lehmige bis tonige Braunerden mit Beimischung von Löss entwickelt, die eine kräftige Trophie besitzen. Natürliche Waldgesellschaften sind der Goldnesel- und der Perlgras-Buchenwald, sowie der Labkraut-Eichen/Buchen-Hainbuchenwald. Im Rotliegenden entstand durch vulkanische Aktivität auch der aus Quarzporphyr bestehende Auerberg. Auf diesem Gestein sind mittlere bis ziemlich arme Braunerden und Pseudogleye ausgebildet mit aufstockendem Waldreitgras- bis Drahtschmielen-Buchenwald. An den Südhängen findet man eine stärkere Beimischung von Eiche und Hainbuche. Insgesamt sind Wälder auf 1,5 % der *Rotliegenden-Standorte* zu finden.

3.2.3.7 Karbon

Der Harz und auch der Kyffhäuser sind in weiten Bereichen aus Gesteinen des Karbons aufgebaut. Hierbei handelt es sich um intrusive Gesteine (Granit, Diorit, Gabbro, Melaphyr), Grauwacken, untermeerische Rutschmassen (Olisthostrome), Kieselschiefer und Quarzite.

Die *Granit-Härtlinge* des Brockens (inklusive Diorit, Gabbro, Melaphyr und Ganggesteinen) und des Rambergs überragen das Harzplateau. Ihre Braunerden, Braunerde-Podsole, Podsole und Staugleyböden kommen unter 2,5 % der Waldfläche vor. Sie haben i.d.R. mittlere bis ziemlich arme Nährkraft und tragen Bergreitgras- (Fichten)-Buchenwälder bis Wollreitgras-Fichtenwälder. Um Brocken und Ramberg haben sich im Grenzbereich zwischen Granit und umliegenden Gesteinen Gürtel mit Stau- und Humusstaugleyböden ausgebildet, auf denen Erlenwälder und Fichtenwälder geringer Leistung in den höheren Lagen wachsen. Um den Brocken kommen auch nahezu waldfreie Moore vor.

Quarzite, auf denen sich Podsolböden mit geringer Nährkraft entwickelt haben, besitzen nur lokale Verbreitung im Raum Ilsenburg/Wernigerode mit einem Waldanteil von $< 0,5\%$. Die geringe Nährkraft dieser Böden führt zu schwachwüchsigen Fichten-Birkenwäldern. Auch ein inselartiges Vorkommen von Kiefer befindet sich in diesem Gebiet.

Weite Teile des Harzplateaus bestehen aus *Rutschmassen und Molasse (4 %)*, die im Karbon unter dem Meer vom Brockengranit in die weiter östlich gelegenen Faltenmulden abrutschten. Sie liegen als östliches Unterharz-Plateau mit einer durchschnittlichen Höhe zwischen 400 und 500 Metern zwischen Brocken-Komplex, Harzhöhe, Auerberg und Ramberg eingebettet und dehnen sich weiter nach Osten bis zur Wippraer Zone aus. Die anstehenden *tonigen Schiefer* sind oberflächlich mit einem Lössschleier durchmischt. Auf diesen Standorten haben sich im Wesentlichen Braunerden, Podsol-Braunerden und Staugleye kräftiger bis ziemlich armer Trophie ausgebildet, deren natürliche Waldgesellschaften Goldnessel-, Waldreitgras- und Drahtschmielen-Buchenwälder bilden, die nach Osten höhere Eichenanteile enthalten.

Karbonische Grauwacke (Tanner Grauwacke) kommt unter $< 2\%$ der Waldfläche des Landes vor. Es handelt sich um ein Band, das sich von Herzberg im Westharz kommend über Tanne, Hasselfelde und Güntersberge bis nach Gernrode hinzieht. Braunerden und Staugleye sind die wesentlichen Bodenbildungen. Ähnlich den Rutschmassen tragen auch diese Böden einen Lössschleier und sind mit kräftiger bis ziemlich armer Nährkraft ausgestattet. Goldnessel-, Hainrispengras-, Bergreitgras- und Drahtschmielen-Buchenwälder mit Eichenanteilen, die nach Osten zunehmen, stellen die natürliche Waldgesellschaft dar.

Karbonische Kieselschiefer begleiten in einem schmalen Band vor allem das Selketal. Sie haben einen geringen Flächenanteil. Auf ihnen entstanden Braunerden und Braunerde-Podsole mit ziemlich armer Nährkraft und natürlichen Drahtschmielen- bis Heidelbeer-Buchenwäldern.

3.2.3.8 Devon und Silur

Diabase treten im Harz eingebettet in devonische Schieferablagerungen meist in geringerer Flächenausdehnung (*insgesamt $< 1\%$*) auf. Auf diesen Standorten haben sich reiche Ranker und Braunerden ausgebildet. Typische natürliche Waldgesellschaften sind Bingelkraut-Buchenwälder, die häufig in den mittleren Berglagen von der Zwiebel-Zahnwurz als charakteristische Weiserart begleitet werden.

Mit knapp 5% Flächenanteil an den bewaldeten geologischen Formationen des Landes finden *devonische Schiefer* im Harz weite Verbreitung, vor allem um die Täler der Bode und Selke sowie um die Südharzmulde. Auf den tonigen Schiefen haben sich Braunerden, Braunerde-Staugleye, Staugleye und Humusstaugleye ausgebildet, wobei Braunerden kräftiger bis mittlerer Nährkraft dominieren. Auf diesen Böden würden von Natur aus Goldnessel-, Hainrispengras-, Waldreitgras- und Hainsimsen-

Buchenwälder zum Nordharzrand und nach Osten hin auch mit höheren Eichenanteilen wachsen. In mittleren Berglagen ist wiederum die Zwiebel-Zahnwurz charakteristischer Begleiter speziell auch in Hangschuttwäldern. Auf Diabas beeinflussten Standorten tritt auch die Waldhaargerste als Weiserpflanze auf. Staugleye werden von Hexenkraut-, Rasenschmielen- und Schachtelhalm-Roterlen-Eschen-, Buchen-Eschen- bis Roterlenwäldern charakterisiert.

Devonische Gramwacken wurden in der Selke- und der Südharzmulde abgelagert. Ihr Flächenanteil beträgt knapp 1 %. Auf ihnen sind Braunerde-Ranker und Braunerden ausgebildet. Im wärmegetönten Klima des Harzrandbereiches kommen auf diesen Böden bei kräftiger Nährkraft Waldreitgras-Goldnessel- bis Hainrispengras-Traubeneichen-Hainbuchen-Buchenwälder vor.

Kleine Vorkommen *silurischer Ablagerungen* im Raum Wippra und Paragneise am Fuße des Kyffhäusers nehmen nur sehr geringe Flächenanteile ein.

3.2.4 Prozesse der Bodenbildung

Die Bodenbildung fand in Sachsen-Anhalt vornehmlich im Pleistozän und Holozän statt, das heißt zwischen- und nacheiszeitlich bis in die heutige Zeit.

Im Harz und Kyffhäuser sowie in anderen Gebieten mit durchragenden Grundgesteinen kam es während der eisfreien Tundrenzeiten innerhalb und nach der Weichselkaltzeit zur Entstehung periglazialer Lagen. Diese zeichnen sich durch Lockergesteinsdecken aus, die durch Frostdestruktion (kryogen), über Luftfracht eingetragenes Material (Löss, Feinsand) oder auf Dauerfrostboden stattfindenden Kriechprozessen der Materialverlagerung (Solifluktion) entstanden sind. Dabei kam es durch Wechsel von Warm- und Kaltphasen zur Überlagerung verschiedener solcher Deckschichten, bei denen die hangabwärts gerichtete Solifluktion im wassergesättigtem Milieu für die Lagenbildung die entscheidende Rolle spielte. Selbst bei geringen Hangneigungen fanden diese Prozesse während der Auftauphasen statt.

Die periglazialen Lagen wurden nach ihrer Entstehungsgeschichte, ihrer Beimengung von kryogen aufbereitetem Gestein (Gesteinsschutt), äolisch eingewehten Lössbeimengungen, Sanden und typisch vorkommenden Gesteinssohlen an den Grenzen der Lagen systematisiert.

Für das Gebiet der ehemaligen DDR und somit auch für das heutige Sachsen-Anhalt wurden diese periglazialen Lagen für das Mittelgebirge und Hügelland „Umlagerungszone“ (SCHWANECKE 1970) zugeordnet. Für das Tiefland beschriebene „Perstruktionszonen“ (KOPP 1965, 1970) bezeichnen periglaziale Lagen, die durch wiederholte Auftauprozesse im Pleistozän entstanden sind. Sie werden charakterisiert durch Gefügedestruktion mit Filtergerüstumbau und an der Basis der Lagen angelagerten Steinsohlen aus Moränenmaterial, das während der Auftauphasen durch das Decksediment hindurch bis auf die Grenze des Dauerfrostbodens sank. Dabei entstanden im Tiefland Sachsen-Anhalts die meisten oberflächenbildenden Ablagerungen und Reliefformen in bestimmten Phasen der Saale-Kaltzeit. Nur im

Osten und Nordosten des Landes ragen Bildungen des Brandenburger Stadiums der Weichsel-Kaltzeit ins Land herein.

Die periglazialen Lagen bilden die prägende Grundlage der Bodenbildung der heutigen Naturräume. Die *Basislage* (nach ostdeutschem Verfahren in etwa der Eta-Zone entsprechend) besteht aus Gesteinsschutt oder im Tiefland feingeschichteten Sedimenten, die keinen äolischen Eintrag enthalten. Diese Lage ist meist oberflächenparallel mit einer Mächtigkeit zwischen 20 und 100 cm ausgebildet.

Die eigentlichen Bodenbildungsprozesse finden jedoch in den darüber liegenden Lagen statt:

Die *Mittellage* (etwa Zeta- und Epsilon-Zone) ist nur in bestimmten Reliefteilen erhalten. In ihr sind Löss-Einwehungen zu erkennen, an ihrer Basis findet man Steinanreicherungen und sie besitzt Merkmale von Verdichtung und Solifluktion.

Die *Hauptlage* (Delta-Zone) ist außerhalb holozän geprägter Gebiete fast überall oberflächlich oder zumindest oberflächennah zu finden, enthält durchweg äolisches Material und kann ebenfalls durch eine basale Steinsohle gekennzeichnet sein. Sie dokumentiert die jüngsten kryogenen Vorgänge (jüngere Tundrenzeit) und ist oberflächenparallel eingeregelt. Ihre Mächtigkeit beträgt zwischen 40 und 60 cm. Darüber kann eine Oberlage aus feinerdearmen Gesteinsschutt auf verwitterungsresistenten Gesteinen vorkommen. Nach der ostdeutschen Systematik kann über der Delta-Zone noch eine extraperiglaziale biogene Entschichtungszone auftreten (Beta-Zone) bzw. eine anthropogene Durchmischungszone (Alpha-Zone).

Die Hauptlage mit ihrer Mächtigkeit und ihren Eigenschaften bestimmt insbesondere die Boden- und Standortseigenschaften. Sie stellt den Hauptwurzelraum dar. So hängt die Bodenbildung wesentlich von den Eigenschaften der Lagen oberhalb der Basislage ab. In ihnen finden die Bodenbildungsprozesse wie die Stoffumwandlung durch Verwitterung, die Bildung sekundärer Tonmineralien, die Stoffumwandlung durch Zersetzung organischen Materials und Humusbildung, die Stoffumlagerung durch Perkolation, die Aggregation sowie die Umwandlung und Verlagerung durch Versauerungsvorgänge statt. Bestimmt durch diese Prozesse sowie durch Grund- und Stauwassereinfluss kommt es auf der Basis der Grundeigenschaften der Lagen zur Bildung von Horizonten, die schließlich den Bodentyp bestimmen.

Im Tiefland liegen vor allem sandige bis lehmig-tonige Sedimente in Form von Grund- und Endmoränen sowie Sandern vor. Auf ihnen bildeten sich unter Vegetation Braunerden, Fahlerden, Podsole, Staugleye und Grundgleye aus. In die eiszeitlichen Sedimente eingebettet liegen die Auen und Niederungen wichtiger Fließgewässer, deren Böden hauptsächlich durch holozäne Sedimente bestimmt sind. In die Auen wurden Feinsande eingeweht, die bis heute in Form von Dünen erhalten blieben und meist aus den Auen herausragen. Die Auenböden befinden sich in Flussnähe in ständiger Veränderung und besitzen dadurch häufig einen undifferen-

zierten tiefgründigen Aufbau mit meist hohem Anteil an eingeschwemmten organischen Material. Kennzeichnend für die Auen und Niederungen sind die Bodentypen der Vega (Klockböden), Grundgleye und Amphigleye. Die jeweilige Zusammensetzung der Böden aus Kies, Sand, Lehm oder Ton wird von der Fließgeschwindigkeit der Flüsse bestimmt. Mit wachsender Entfernung vom Fluss treten Gleye, Braungleye, Pseudogleye und mit geringer werdenden Grundwassereinfluss Braunerden stärker in Erscheinung.

Das den Harz und die Bergketten Nordthüringens umfließende Hügelland wird wesentlich durch Lössdecken unterschiedlicher Mächtigkeit bestimmt, die in periglazialen vegetationsfreien Trockenphasen durch kontinuierlich von den Gletschern wehenden Winde abgelagert wurden. Auf ihnen haben sich Schwarzerden, Parabraunerden, Fahlerden und Pseudogleye entwickelt.

Die Lössdecken werden regional von Schichten der Trias, des Jura und der Kreide durchragt. Die periglazialen Lagen sind hier besonders mit äolischem Material angereichert, besitzen aber häufig typische charakteristische Eigenschaften des kryogenen Gesteinszersatzes in der Hauptlage. In Abhängigkeit vom dominierenden Grundgestein kommen vielfältige Bodentypen vor, deren Spektrum für die Waldwachstumsbedingungen außerdem durch ihre Substrateigenschaften noch wesentlich erweitert wird.

Rendzinen auf Muschelkalk, Braunerden unterschiedlicher Trophie, Fahlerden, Pelosole, Parabraunerden und Staugleye kommen mit unterschiedlich großen Flächenanteilen in diesen Naturräumen vor.

Äolische Sedimente wurden periglazial im Harz und Kyffhäuser den vorkommenden Gesteinsschuttdecken des Ordoviziums, Silurs, Devons, Karbons und Perms beigemischt, die als Lössschleier bezeichnet werden und den Feinbodenanteil und damit die Eigenschaften der periglazialen Lagen entscheidend beeinflussen. Dies betrifft das Gefüge sowie die mineralische Zusammensetzung und Filtrationseigenschaften dieser Böden. Prägend für die einzelnen Standorte treten jedoch meist die Eigenschaften der Gesteinsschuttdecken in Erscheinung. Auf den Waldstandorten des Harzes können sich je nach Ausgangsgestein Ranker, Braunerden, Parabraunerden, Podsole, Staugleye, Humusstaugleye oder Moore ausbilden.

3.2.5 Zusammenfassung

Die Vielfalt der geologischen Verhältnisse Sachsen-Anhalts spiegelt sich in den mannigfaltigen Bodentypen des Landes wider. Die Voraussetzungen für die Bodenbildung wurden durch eiszeitliche Sedimentation, kryogene Gesteinsdestruktion im Periglazial, Sedimentation äolischen Materials, holozäne Sedimentation und Umlagerung durch Flussfracht sowie durch anthropogene Einflussnahme geschaffen. Die Wälder Sachsen-Anhalts stocken auf einer großen Zahl unterschiedlichster Böden, deren Trophie von sehr armen Standorten der Dünen bis hin zu sehr reichen Standorten der Lössböden und der Kalkgebiete reicht.

Ihre größte Ausdehnung besitzt die Waldfläche Sachsen-Anhalts im Tiefland der Altmark und in der Elbniederung. Die Flächenverteilung orientiert sich an der Trophie der Böden aber auch an den Grund- und Stauwasserverhältnissen sowie an der häufig klein parzellierten Eigentumsstruktur.

Die Lössböden werden ihrer reichen Böden wegen fast ausschließlich landwirtschaftlich genutzt. Dies kommt in einer Bewaldung von lediglich 11 % für das Hügelland zum Ausdruck.

Der Harz war schon früh zum Bannwald erklärtes kaiserliches Jagdregal. Wegen seines in weiten Teilen rauen Klimas wurde und wird er nur in geringem Maße landwirtschaftlich genutzt und ist deshalb im Gegensatz zum umliegenden Hügelland stark bewaldet. Das breite Spektrum an Böden begründet die große Vielfalt natürlicher Waldgesellschaften, die sich von armen gering wüchsigen Fichtenwäldern und Fichten-Birkenwäldern auf Granit oder Quarzit in hohen Berglagen bis hin zu reichen Orchideen-Buchenwäldern und thermophilen Steinsamen-Eichen-Hainbuchenwäldern spannt.

3.3 Forstliches Umweltmonitoring an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA)

Johannes Eichborn, Uwe Paar, Henning Meesenburg, Jan Evers, Birte Scheler, Nils König

3.3.1 Aufgaben

Die natürliche zeitliche Veränderung der Waldbestände, Managementmaßnahmen und vor allem biotische und abiotische Einflüsse der Umwelt führen zu Veränderungen in Waldökosystemen. Hinzu kommt, dass die Ansprüche der Gesellschaft an den Wald weit gefächert sind und gesellschaftliche Veränderungen widerspiegeln. Während noch vor wenigen Jahrzehnten der Kohlenstoffspeicherung in Waldböden keine besondere Bedeutung zugemessen wurde, erlangen heute der Kohlenstoffvorrat in Waldböden und seine Veränderung ein zunehmendes wissenschaftliches, politisches und wirtschaftliches Interesse. Waldfunktionen als Ausdruck der gesellschaftlichen Erwartungen können nur dann nachhaltig entwickelt und gesichert werden, wenn sie in ihrem Zustand und in ihrer Veränderung zahlenmäßig darstellbar sind.

Das Forstliche Umweltmonitoring leistet dazu einen wesentlichen Beitrag. Es erfasst mittel- bis langfristig Einflüsse der Umwelt auf die Wälder wie auch deren Reaktionen, zeigt Veränderungen von Waldökosystemen auf und bewertet diese auf der Grundlage von Referenzwerten. Die Forstliche Umweltkontrolle leistet Beiträge zur Daseinsvorsorge, arbeitet die Informationen bedarfsgerecht auf, erfüllt Berichtspflichten, gibt für die Forstpraxis Entscheidungshilfen und berät die Politik auf fachlicher Grundlage.

Die rechtliche Grundlage für die Walderhebungen im Forstlichen Umweltmonitoring stellt § 41a des Gesetzes zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz, BWALDG 1975) dar. Dies wird konkretisiert durch die Verordnung über Erhebungen zum Forstlichen Umweltmonitoring (FORUMV 2013) und durch das Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring (BMEL 2016).

Die Forstliche Umweltkontrolle geht ursprünglich von den Fragestellungen der Genfer Luftreinhaltkonvention (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE 1979)) aus. In deren Mittelpunkt stehen Belastungen der Gesellschaft und des Waldes durch Umweltveränderungen in Folge der Nutzung fossiler Energieträger, insbesondere im Hinblick auf die damit verursachten Säureeinträge. Die Methodik zur Erfassung der Säurebelastung geht dabei im Wesentlichen auf die Arbeit von Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Bernhard Ulrich (Göttingen) zur Bodenkunde und Waldernährung zurück (ULRICH et al. 1979). In der Folgezeit hat sich das Forstliche Umweltmonitoring als inhaltlich flexibel und breit angelegt erwiesen, um auch Informationen zum Stickstoffhaushalt, zur Kohlenstoffspeicherung und zu möglichen Risiken infolge des Klimawandels zu gewinnen.

Durch die Einbindung des Forstlichen Umweltmonitorings in Deutschland in das Europäische Waldmonitoring unter ICP Forests (Level I seit 1984, Level II seit 1994) und die Orientierung an den dort definierten Standards (ICP FORESTS 2010) ist ein hinsichtlich inhaltlicher Tiefe, räumlicher Repräsentanz, Langfristigkeit, Datenqualität und internationaler Vergleichbarkeit weltweit beispielhaftes Monitoringprogramm entstanden.

3.3.2 *Konzept*

Grundsätzlich werden im Forstlichen Umweltmonitoring waldfächenrepräsentative Übersichtserhebungen auf Rasterebene (Level I), die intensive Dauerbeobachtung ausgewählter Waldökosysteme (Level II) sowie Untersuchungen auf Experimentalflächen (Level III) unterschieden.

Das Konzept der NW-FVA umfasst folgende Monitoringprogramme, wobei einzelne Messflächen mehreren Programmen zugeordnet sein können:

- Level I (Übersichtserhebung)
- BDF (Bodendauerbeobachtungsprogramm)
- Level II (ICP Forests Intensive Monitoring Plots)
- Level II Core (Level II mit intensivierten Erhebungen)
- WÖSSH (Waldökosystemstudie Hessen)
- Experimentalflächen (Level III)
- An den *Level I-Punkten* werden folgende Erhebungen durchgeführt:
 - Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren (auf allen Stichprobenpunkten der Waldzustandserhebung (WZE) und der Bodenzustandserhebung (BZE)).
 - Auf den BZE-Punkten werden zusätzlich Baumwachstum, Nadel-/Blatternährung, Bodenvegetation und der morphologische, physikalische und chemische Bodenzustand untersucht. Auf dem BZE-Netz erfolgt zusätzlich eine Erhebung von Daten entsprechend der Bundeswaldinventur.
- Auf *Bodendauerbeobachtungsflächen* (BDF) werden langfristig standorts-, belastungs- und nutzungsspezifische Einflüsse auf Waldböden erfasst. BDF dienen als Referenzstelle und der Vorsorge für rechtzeitige Maßnahmen zum Schutz von Böden in ihrer Substanz und ihren Funktionen. Das BDF-Programm umfasst für forstlich genutzte Flächen folgende Erhebungen (HÖPER u. MEESENBURG 2012):
 - Chemischer und physikalischer Bodenzustand, Nadel-/Blatternährung, Baumwachstum, Bodenvegetation, Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren.

- Auf Intensiv-BDF werden zusätzlich Erhebungen zum Wasser- und Stoffhaushalt von Waldböden durchgeführt:
 - Deposition, Bodenlösung, Streufall, Meteorologie und Bodenhydrologie.
- Das Monitoring auf *Level II-Flächen (Standard)* umfasst nach der Modifizierung im Rahmen der ICP Forests Manualrevision 2010 folgende Erhebungen:
 - Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren, Baumwachstum, Nadel-/Blatternährung, Bodenvegetation, Deposition, Bodenzustand.
- *Level II Core-Flächen* sind eine Unterstichprobe der Level II-Flächen. Sie haben die Zielsetzung einer möglichst umfassenden Beobachtung. Neben den Erhebungen auf den Level II-Standardflächen sind hier folgende Erhebungen verpflichtend durchzuführen (ICP FORESTS 2010):
 - Streufall, Baumphänologie, Baumwachstum (intensiviert), Bodenlösung, Bodenfeuchte, Luftqualität, Meteorologie.
- Auf den Flächen der *Waldökosystemstudie Hessen (WÖSSH)* werden auf repräsentativen Standorten Waldökosystemzustände und -prozesse beobachtet, um Veränderungen von Waldfunktionen durch Umwelteinflüsse zu detektieren. Die Erhebungen auf WÖSSH-Flächen beinhalten folgende Indikatoren:
 - Deposition, Bodenlösung, Nadel-/Blatternährung, Baumwachstum, Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren, chemischer und physikalischer Bodenzustand sowie Bodenvegetation.
- Zu den *Experimentalflächen (Level III)* gehören Forsthydrologische Forschungsgebiete, Flächen zur Bodenschutzkalkung und zur Nährstoffergänzung sowie zur wasser- und stoffhaushaltsbezogenen Bewertung von Nutzungsalternativen.

Anhand von Übersichtserhebungen (Level I) können frühzeitig Entwicklungen und Störungen aufgezeigt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Als erfolgreiches Beispiel ist hier die Bodenschutzkalkung zu nennen, die im Waldboden wesentlich anthropogenen Säureeinträgen entgegenwirkt und zum Nährstoffhaushalt der Wälder positiv beiträgt. Das Intensive Monitoring ermöglicht einen detaillierteren Blick auf die Abläufe im Ökosystem, als es Übersichtserhebungen leisten könnten, und trägt somit wesentlich zum Verständnis der Entwicklungen bei. Im Falle von umweltpolitischen Maßnahmen ermöglicht das Forstliche Monitoring eine wirksame Kontrolle der Erfolge.

Die im Forstlichen Umweltmonitoring verwendeten Instrumente der Ökosystemüberwachung stehen europaweit harmonisiert nach den Grundsätzen des ICP Forests (Methoden: <http://icp-forests.net>; Manual: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>), der BDF-Arbeitsanleitung (BARTH et al. 2000), der BZE-

Arbeitsanleitung (WELLBROCK et al. 2006) sowie des Handbuchs Forstliche Analytik (GAFA 2005, 2014) zur Verfügung. Qualitätssichernde und -prüfende Maßnahmen sind danach verbindlich vorgeschrieben. Sie garantieren die Qualität und die Nutzbarkeit der Ergebnisse.

Das Untersuchungsdesign der Forstlichen Umweltkontrolle in der NW-FVA für die Bereiche Level I, Intensives Monitoring (Level II) und Experimentalflächen (Level III) für die Länder Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt, Bremen und Schleswig-Holstein zeigen die Abbildungen 9 bis 11.

In Sachsen-Anhalt umfasst das Level I-Netz der BZE 78 Inventurpunkte, das Intensive Forstliche Umweltmonitoring 2 Monitoringflächen und 2 Experimentalflächen. Das sachsen-anhaltische Bodendauerbeobachtungsprogramm für Wälder fällt in die Zuständigkeit der NW-FVA, die sachsen-anhaltischen Bodendauerbeobachtungsflächen sind in Abbildung 10 mit dargestellt.

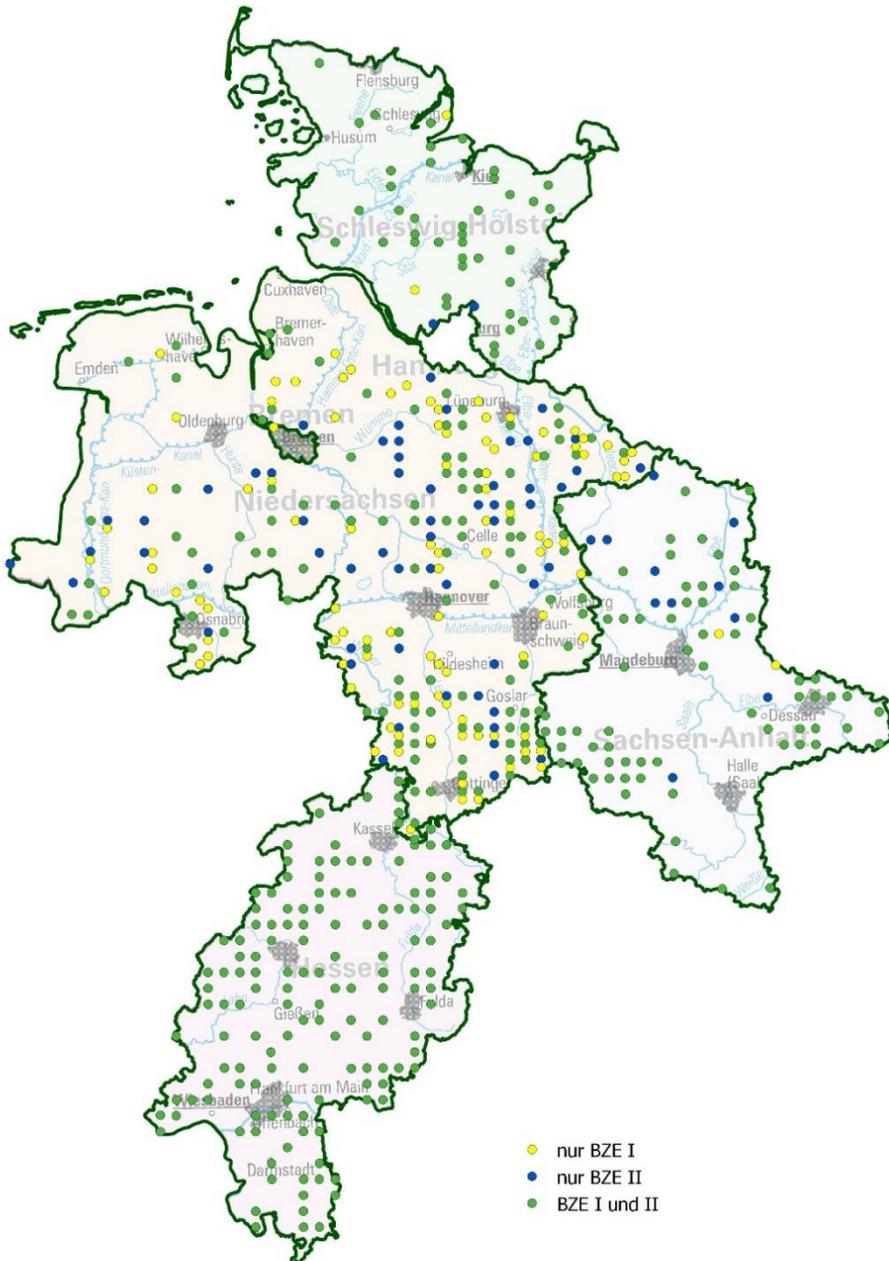


Abbildung 9: Lage der BZE-Punkte (Level I) in Niedersachsen und Bremen, Hessen, Sachsen-Anhalt, und Schleswig-Holstein

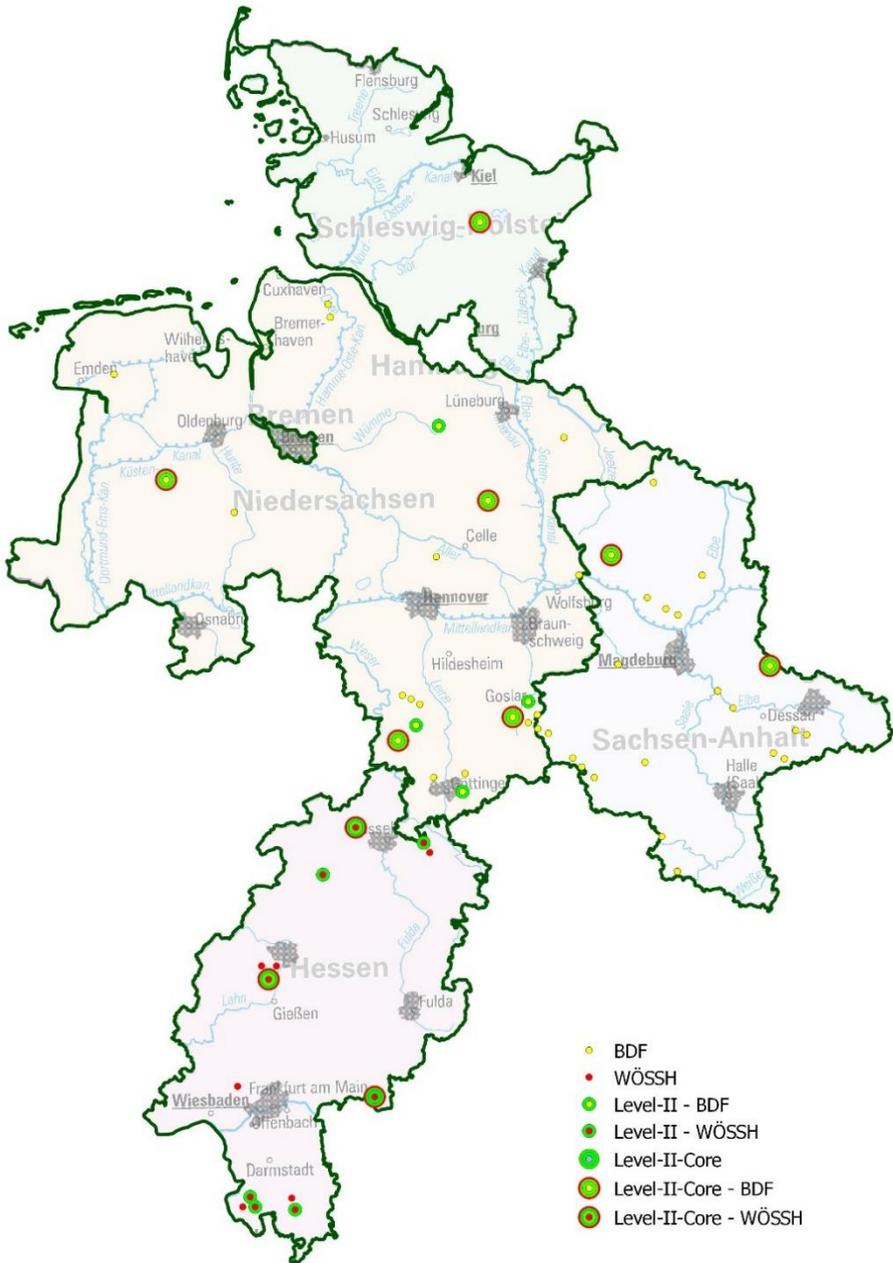


Abbildung 10: Lage der Flächen für das Intensive Monitoring in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (Level II)

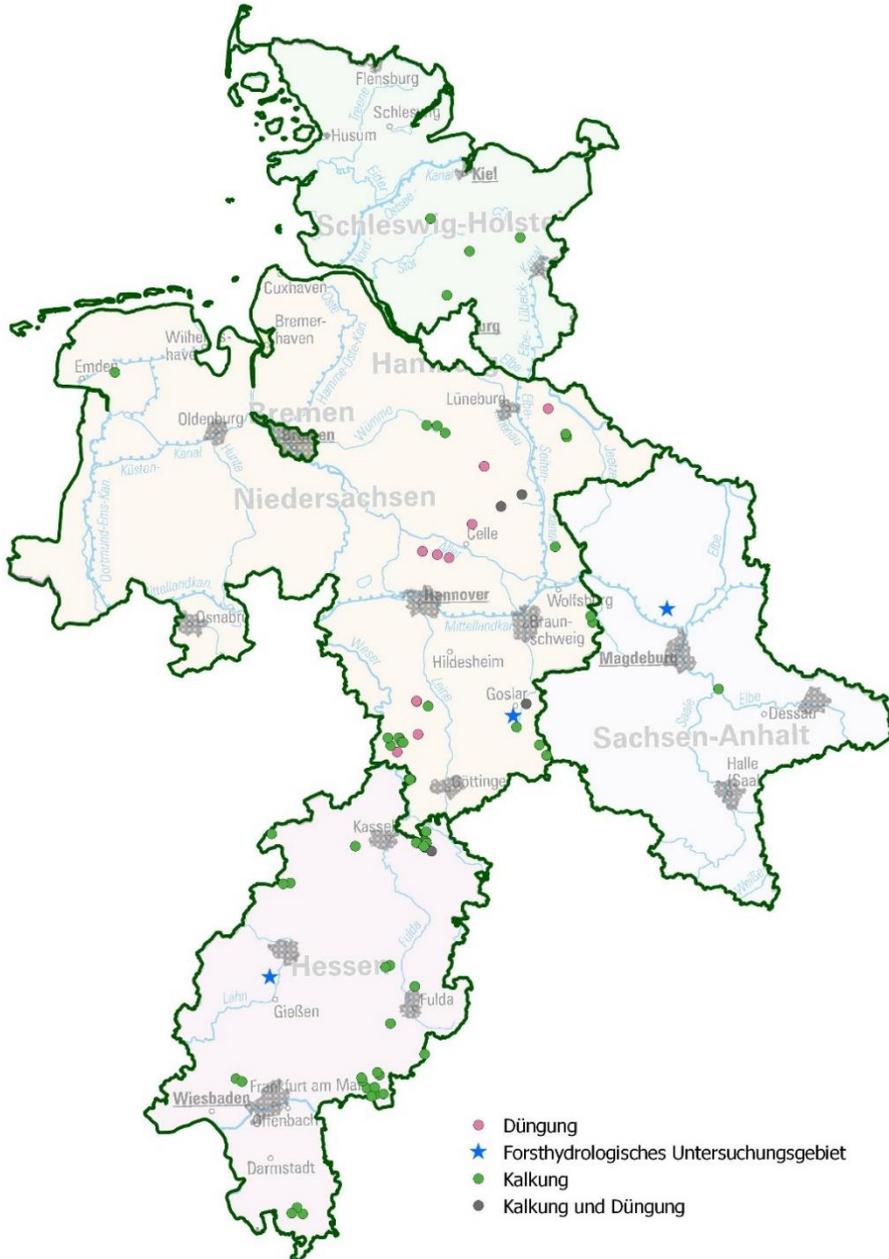


Abbildung 11: Lage der Experimentalflächen in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (Level III)

3.4 Befunde des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings zur Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE

Birte Scheler, Henning Meesenburg

Nachfolgend werden einige wesentliche Ergebnisse des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings (Level II) zur Entwicklung der Stoffeinträge, der chemischen Zusammensetzung der Bodenlösung sowie der Ernährungssituation dargestellt. Alle drei Flächen sind außerdem Flächen des Boden-Dauerbeobachtungsprogramms in Sachsen-Anhalt (BDF). Diese Befunde sind hilfreich für die Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE.

3.4.1 Stoffeintrag – Belastungssituation der Wälder

Die weltweit längsten Zeitreihen der atmosphärischen Deposition liegen für Fichten- und Buchenbestände im Solling (Niedersachsen) vor und reichen bis 1969 zurück. In Sachsen-Anhalt wurde der Stoffeintrag in Kiefernbestände des nordostdeutschen Tieflands mit dem Niederschlag erstmals für die Jahre 1986 bis 1988 systematisch durch die Forschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Eberswalde erfasst (SIMON u. WESTENDORFF 1991). Mit Hilfe dieser Daten kann die spezielle Belastungssituation, die in den neuen Bundesländern durch die Braunkohle-Energiewirtschaft und andere verarbeitenden Gewerbe wie z.B. Kaliindustrie bis zur Wende vorlag, eingeschätzt und mit den Verhältnissen in den alten Bundesländern verglichen werden.

Im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings in Sachsen-Anhalt werden seit 1998 in zwei (BDF 5.1 Klötze Kiefer; BDF 11 Nedlitz), seit 2013 in drei Kiefernbeständen (zusätzlich Großlysimeter Colbitz) und einem Douglasienbestand (BDF 5.2 Klötze Douglasie) Stoffeinträge aus der Atmosphäre erfasst. Die Höhe der Einträge in den Waldboden ist von den Eigenschaften der Oberflächen abhängig, es wird von einer Akzeptorabhängigkeit der Einträge gesprochen. Die Einträge im Bestand sind deshalb regelmäßig höher als im Freiland. Beim Vergleich der Baumarten sind Fichten- und Douglasienbestände wegen der ganzjährigen und im Vergleich mit Kiefern dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Kiefernbestände und winterkahle Lärchen- und Laubwaldbestände.

Nachfolgend wird die zeitliche Entwicklung der Stoffeinträge auf vier Intensivmonitoringflächen in Sachsen-Anhalt sowie im Vergleich auf der Fichtenfläche im Solling in Niedersachsen dargestellt, auf denen aktuell der Stoffeintrag gemessen wird.

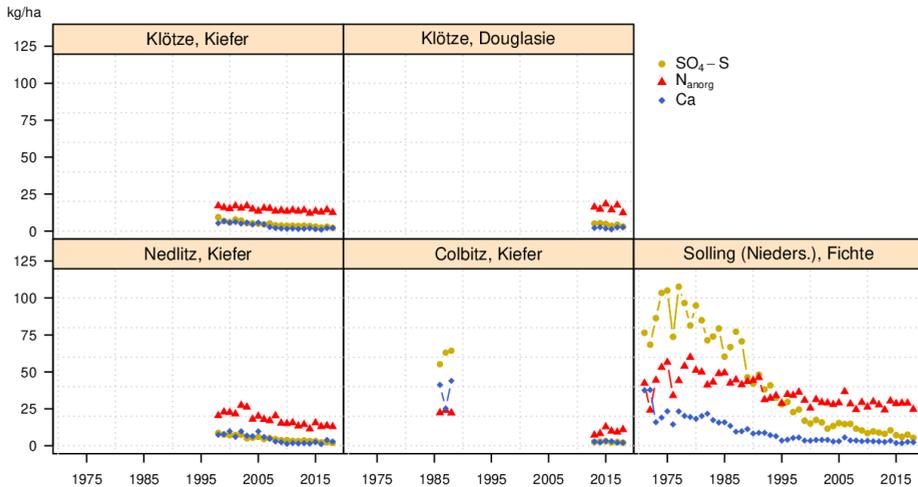


Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Deposition von Sulfatschwefel (SO_4-S), Stickstoff (N_{anorg} : Summe aus Nitrat- und Ammonium-N) und Calcium (Ca) [kg/ha] auf Flächen des Intensiven Umweltmonitorings in Sachsen-Anhalt

Die Analyse der Stoffeinträge zeigt eine extrem hohe Belastung der Waldökosysteme durch anthropogen bedingte Stoffeinträge bis Mitte/Ende der 1980er-Jahre in den alten und vermutlich bis Anfang/Mitte der 1990er Jahre in den neuen Bundesländern. Auf der Fichtenfläche im Solling wurde das Maximum der Sulfat-Schwefelbelastungen (Abb. 12; SO_4-S ; gelbe Linien) in den 1970er Jahren erreicht. Im Mittel der Jahre 1986–1988 betrug der Schwefeleintrag im Solling unter Fichte 72 kg je Hektar und Jahr, unter Buche 38 kg je Hektar und Jahr, unter Kiefer in Raum Colbitz zwischen 61 und 72 kg je Hektar und Jahr und im Raum Wittenberg sogar 173 kg je Hektar und Jahr. Trotz deutlich geringerer Niederschläge und geringerer Benadelungsdichte war die Sulfatbelastung im Raum Colbitz unter Kiefer genauso hoch wie unter Fichte im Solling. Durch das Ende der Kohlewirtschaft der ehemaligen DDR und Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind die Emissionen von Schwefeldioxid in erheblichem Umfang zurückgegangen, auch in den neuen Bundesländern. Infolge dieser Maßnahmen ging der Schwefeleintrag in Wälder stark zurück. Unter der Annahme, dass die Ende der 1980er Jahre gemessenen Stoffeinträge repräsentativ für Kiefernbestände im Raum Colbitz waren, beträgt der Rückgang der Sulfateinträge im Vergleich zum Zeitraum 1986 - 1988 in diesem Gebiet unter Kiefer rund 95 %.

In der Diskussion um die positive Wirkung der Reduktion, insbesondere der Schwefeleinträge infolge der ergriffenen Luftreinhaltmaßnahmen, wird wenig berücksichtigt, dass die Deposition der Basen Calcium (Abb. 12; Ca ; blaue Linie), Magnesium, Kalium und Natrium (hier nicht dargestellt), die dem Säureeintrag neutralisierend gegenüberstehen und entlastend wirken, durch die Luftreinhaltmaßnahmen

ebenfalls stark reduziert wurden. In Colbitz hat der Calciumeintrag beispielsweise von 37 kg je Hektar und Jahr (Mittel 1986–1988) auf knapp 3 kg je Hektar und Jahr, d.h. um rund 90 %, abgenommen. In Colbitz wurden in den Jahren 1986–1988 im Mittel 43 % der eingetragenen Säuren durch ebenfalls eingetragene Basen neutralisiert, im Zeitraum 2013–2018 im Mittel noch 27 %. (Abb. 14, blaue Linie).

Während die Schwefelbelastung im Raum Colbitz in den Jahren 1986–1988 ähnlich hoch war wie unter Fichte im Solling, betrug die Gesamtd deposition von Stickstoff (Abb. 12; Summe aus Nitrat- und Ammonium-N; rote Linie) nur gut 50 % im Vergleich zur Fichtenfläche. Ausgehend von 23 bis 27 kg anorganischem Stickstoff im Mittel der Jahre 1986–1988 werden auf der Kiefernfläche Colbitz nunmehr knapp 10 kg je Hektar und Jahr (Mittel 2013–2018) gemessen, ein Rückgang um knapp 60 %. Auf den Kiefernflächen Nedlitz und Klötze betrug der Eintrag von anorganischem Stickstoff gut 13 kg je Hektar und Jahr (Mittel 2013–2018). Am höchsten war der Eintrag erwartungsgemäß mit rund 16 kg je Hektar und Jahr unter Douglasie (Klötze).

Da Stickstoffeinträge in der Größenordnung zwischen 10 und 16 kg je Hektar und Jahr den Stickstoffbedarf der Waldbäume nach wie vor überschreiten, kommt es zu einer weiter fortschreitenden Stickstoffsättigung. Hierdurch verändert sich der Stoffhaushalt von Wäldern großflächig und tiefgreifend. Dies kann zu Bodenversauerung, Nährelementverlusten und -imbalancen sowie Änderungen des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Waldbäumen und Bodenorganismen führen (EICHORN 1995, ABER et al. 1998, DISE et al. 1998 a+b, GUNDERSEN et al. 1998a+b, ROTHE et al. 2002 a+b, BERNHARDT 2005, BERNHARDT 2005 et al., ETZOLD et al. 2020). Diese Befunde werden durch Ergebnisse Internationaler Langzeit-Monitoring-Programme, in die die Flächen aus Sachsen-Anhalt eingebunden sind, gestützt (BORKEN u. MATZNER 2004, WALDNER et al. 2015, JOHNSON et al. 2018).

Der Netto-Säureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtd deposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid abzüglich der mit dem Niederschlag eingetragenen Basen Calcium, Magnesium und Kalium (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile; GAUGER et al. 2002). Natrium wird nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass es vollständig seesalzbürtig ist.

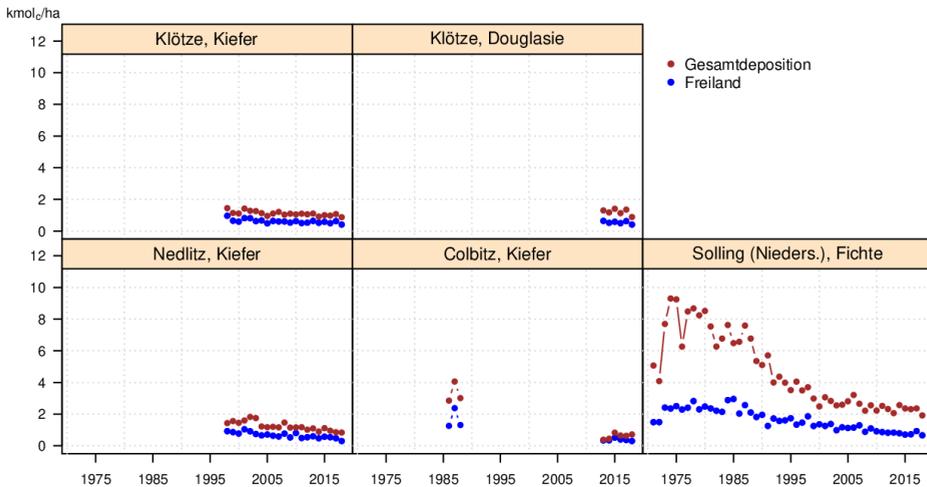


Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung des Netto-Gesamtsäureeintrags (nach GAUGER et al. 2002) in kmol , je Hektar und Jahr auf den Flächen des Intensiven Monitorings (rot: Gesamtd deposition im Wald, blau: Freiland) in Sachsen-Anhalt

Trotz der beobachteten Abnahme der Stoffeinträge werden die Critical Loads für Säure- und für Stickstoffeinträge nach wie vor an einer Vielzahl von Standorten überschritten (MEESENBERG et al. 2015).

Die deutliche stärkere Abnahme beim Schwefeleintrag im Vergleich zum Stickstoffeintrag hat dazu geführt, dass sich die Bedeutung der einzelnen Säurebildner am Gesamtsäureeintrag deutlich verschoben hat. Während in den Jahren 1986–1988 die Schwefeldeposition für rund 60 %, die Stickstoffdeposition für rund 25 % und die Chloriddeposition (Einfluss der Kaliindustrie im Raum Colbitz; SIMON u. WESTENDORFF 1991) für rund 15 % des Gesamtsäureeintrags verantwortlich war, wird auf den Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt heute mehr als 80 % des Gesamtsäureeintrags durch anorganische Stickstoffeinträge verursacht (Abb. 14). Chlorideinträge spielen heute hinsichtlich des Säureeintrags keine Rolle mehr.

Eine weitere Reduktion des Stickstoffeintrags ist deshalb auch unter dem Gesichtspunkt Säurebelastung dringend geboten.

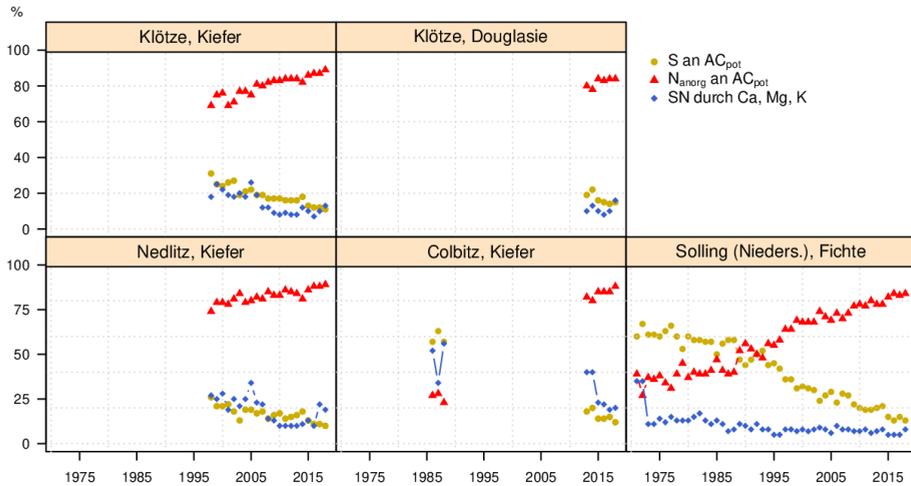


Abbildung 14: Zeitliche Entwicklung der relativen Anteile von Sulfatschwefel (gelbe Symbole) und Stickstoff (Summe aus Nitrat- und Ammonium-N, rote Symbole) am Gesamtsäureeintrag (AC_{pot}) sowie des Anteils an AC_{pot}, der durch eingetragene Basen neutralisiert wird, auf ausgewählten Flächen des Intensiven Monitorings (SN = Säureneutralisationskapazität, blaue Symbole auf Flächen des Intensiven Monitorings in Sachsen-Anhalt)

3.4.2 Chemische Zusammensetzung des Wasserflusses durch die Waldökosysteme

Die Analyse der Zusammensetzung der wichtigen Kationen und Anionen im Wasserfluss des Freilandniederschlags, der Kronentraufe sowie in der Bodenlösung verschiedener Tiefenstufen gibt Einblicke in die chemischen Veränderungen, die der Wasserfluss auf dem Weg durch das Ökosystem erfährt. Außerdem sind Rückschlüsse auf die chemischen Bodenverhältnisse möglich.

Die Wasserflüsse der beiden untersuchten Kiefernflächen zeigen eine ähnliche Stoffbefrachtung, während sich die Douglasienfläche deutlich unterscheidet (Abb. 15), trotz gleicher klimatischer Verhältnisse und chemischer Zusammensetzung des Freilandniederschlags wie auf der in der Nähe gelegenen Kiefernfläche. Wichtigstes Kation im Niederschlag (Freilandniederschlag und Kronentraufe) aller drei Flächen ist Ammonium (NH₄), während Nitrat (NO₃) das mengenmäßig bedeutendste Anion ist. Die stoffliche Befrachtung der Kronentraufe ist unter Kiefer 3,3-mal so hoch, unter Douglasie sogar 4,5-mal so hoch wie im Freilandniederschlag. In der Bodenlösung ist NH₄ kaum noch vorhanden; stattdessen gewinnt Aluminium (Al) mit einem Äquivalentanteil im Mineralboden von bis zu 59 % an Bedeutung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Al durch saure Lösungen aus den Bodenmineralien gelöst wird. Der hohe Säuregrad im Sickerwasser (erkennbar in Abb. 15 an

den Anteilen freier Säure H) ist u. a. auf die Aufnahme von NH_4 durch die Vegetation oder die Umwandlung zu NO_3 zurückzuführen, bei der ein bzw. zwei Säureäquivalente gebildet werden.

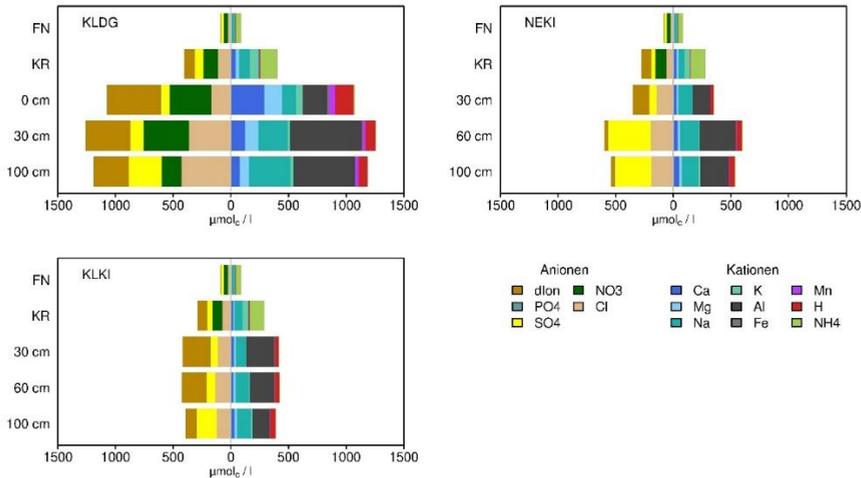


Abb. 15: Zusammensetzung der Wasserflüsse mit dem Freilandniederschlag (FN), der Kronentränfe (KR) und der Bodenlösung unter der Humusaufgabe (0 cm) sowie in 30, 60 und 100 cm des Mineralbodens auf BDF 5.1 Klötze Kiefer (unten links), BDF 5.2 Klötze Douglasie (oben links) und BDF 11 Nedlitz Kiefer (oben rechts) ($\mu\text{mol/l}$; $d\text{Ion} = \Sigma\text{Kationen} - \Sigma\text{Anionen}$, Mittelwerte 1/2013 bis 12/2019)

Obwohl im langjährigen Mittel je Hektar und Jahr mit ca. 14 kg unter Kiefer und 16 kg unter Douglasie mehr anorganischer Stickstoff in das System eingetragen wird, als der Wald für sein Wachstum benötigt, ist Nitrat im Sickerwasser nur auf BDF 5.2 Klötze Douglasie in größeren Mengen zu finden. Vermutlich wird Stickstoff in den beiden Kiefernwaldökosystemen sehr effektiv recycelt bzw. gespeichert. Das Douglasienökosystem kann hingegen offenbar nicht den gesamten eingetragenen Stickstoff verwerten. Zwar ist die Nitratkonzentration in den Tiefenstufen 0 und 30 cm deutlich höher als in 100 cm Tiefe, es besteht aber die Gefahr, dass es zu einem relevanten NO_3 -Ausstrag in Richtung Grundwasser kommt.

Auf allen drei Flächen ist eine Zunahme der Sulfatgehalte (SO_4) im Sickerwasser mit zunehmender Tiefe zu beobachten, die zwischen 30 und 100 cm Bodentiefe besonders ausgeprägt ist (Abb. 15). Dies deutet auf eine Remobilisierung von zwischengespeichertem Schwefel hin, die aufgrund der zurückgehenden Sulfateinträge eingesetzt hat. Aufgrund der mit der Remobilisierung von SO_4 verbundenen Freisetzung von Säure wird somit der Effekt abnehmender Säureinträge teilweise kompensiert.

Insbesondere die Kiefern-BDF weisen sehr niedrige Gehalte an basischen (Nährstoff-)Kationen (Kalium, Magnesium, Calcium) in der Bodenlösung auf. Höhere Anteile finden sich nur auf der Douglasienfläche unmittelbar unter der Humusauf-lage (0 cm Tiefe).

Damit besteht das Risiko einer unzureichenden Versorgung der Waldbäume mit diesen Nährstoffen. Die BDF 11 Nedlitz wurde in der Vergangenheit vermutlich in deutlich stärkerem Ausmaß als die BDF 5.1 Klötze Kiefer durch Flugascheeinträge mit basischen Stäuben beeinflusst (HOFMANN & HEINSDORF 1990). Daher lagen die Gehalte der basischen Kationen in der Bodenlösung in Nedlitz zu Beginn der Beobachtung deutlich über denen in Klötze. Mittlerweile hat sich das Niveau der Konzentrationen auf beiden Flächen angeglichen.

3.4.3 Ernährungssituation

Die durch Nadelanalysen erfasste Ernährungssituation zeigt für BDF 5.1 Klötze Kiefer für Calcium, Magnesium und Phosphor eine sehr geringe, im Bereich der latenten Mangelernährung liegende Versorgung, während die Versorgung auf BDF 11 Nedlitz Kiefer für diese Elemente im unteren Normalbereich liegt. Die Ernährung mit Stickstoff ist auf allen Flächen aufgrund der hohen Stickstoffeinträge gut bis sehr gut, bei Kalium liegen die Gehalte in den meisten Jahren im für das Wachstum optimalen mittleren Normalbereich (GÖTTLEIN 2015). Für Calcium, Kalium, Phosphor und Stickstoff sind auf den Kiefernflächen abnehmende Trends festzustellen. Abnehmende Phosphorgehalte in Kiefernadeln in Europa wurden auch von JONARD et al. (2015) festgestellt. Der langjährige Trend kehrt sich für Kalium und Phosphor auf der BDF 11 Nedlitz in einen zunehmenden Trend um, wenn analog der Douglasienfläche der Zeitraum 2012 bis 2019 betrachtet wird, während sich der negative Trend auf der BDF 5.1 Klötze fortsetzt bzw. noch verstärkt. Wenn sich der Trend abnehmender Kaliumgehalte in Klötze weiter fortsetzt, ist in den nächsten Jahren eine defizitäre Kaliumernährung zu erwarten (Abb. 16).

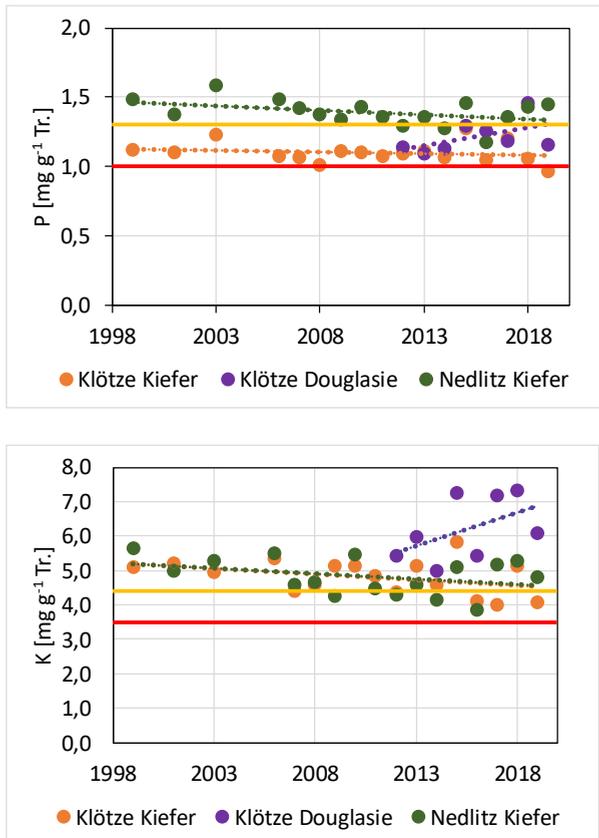


Abb. 16: Gebalte von Phosphor (P, oben) und Kalium (K, unten) im jeweils aktuellen Nadeljahrgang der BDF 5.1 Klötze Kiefer, BDF 5.2 Klötze Douglasie und BDF 11 Nedlitz im Zeitraum 1999 bis 2019. Die horizontalen Linien zeigen die untere Grenze des Normalbereichs (gelb) bzw. die Symptomgrenze (rot) bei der Ernährung bei Kiefer an (GÖTTLEIN, 2015). Die gepunkteten Linien, soweit dargestellt, zeigen einen signifikanten ($p \leq 0,05$) linearen Trend an.

Die Douglasienfläche Klötze zeichnet sich im Vergleich mit den Kiefernflächen durch deutlich höhere Calcium-, Magnesium- und Kaliumgehalte aus. Hierin spiegeln sich vermutlich die deutlich höheren Konzentrationen dieser Elemente in der Bodenlösung wider. Außerdem weisen die Gehalte aller fünf Nährelemente unter Douglasie einen steigenden Trend auf.

3.4.4 *Schlussfolgerung und Ausblick*

Das Monitoring auf den Intensiv-Beobachtungsflächen zeigt, dass die atmosphärischen Stoffeinträge in die Wälder Sachsen-Anhalts deutlich zurückgegangen sind. Es ist jedoch weiterhin eine Reduktion der Säure- und Stickstoff-Emissionen nötig, da die kritischen Belastungsgrenzen (Critical Loads) für Säure und eutrophierenden Stickstoff an vielen Standorten immer noch überschritten werden. Dies zeigt sich auch in den niedrigen pH-Werten der Bodenlösung. Diese liegen auf den Kiefernflächen im Mittel bei 4,4 (Klötze) bzw. 4,3 (Nedlitz), auf der Douglasienfläche sind sie mit 3,8 (0 cm Tiefe) resp. 4,1 (30 und 100 cm) noch deutlich niedriger. Trotz hoher anorganischer Stickstoffeinträge findet sich Nitrat in der Bodenlösung beider Kiefernflächen nur in sehr geringen Konzentrationen. Auf der Douglasienfläche ist Nitrat hingegen in nennenswertem Umfang gelöst, nimmt aber mit der Tiefe deutlich ab.

Die Phosphor- und Magnesiumernährung der Waldbestände ist meist defizitär. Rückläufige Trends sind auf den Kiefernflächen u.a. bei Calcium festzustellen. Waldkalkungen bieten sich daher als Option zur Stabilisierung des Bodenzustandes sowie der Calcium- und Magnesiumernährung an.

Das intensive Umweltmonitoring von Waldstandorten in Sachsen-Anhalt hat sich zu einem Instrument der integrierten Umweltbeobachtung entwickelt. Die Ergebnisse zum Zustand und zur Entwicklung der Waldböden eignen sich als Frühwarnsystem für ungünstige Umweltveränderungen sowie zur Entscheidungsunterstützung für umweltpolitische Maßnahmen und das forstliche Management.