

2 Methodenüberblick und Qualitätssicherung

J. Höhle¹, N. König¹⁶, L. Hilbrig¹, J. Bielefeldt¹, D. Ziche¹, E. Grüneberg¹, N. Eickenscheidt¹, B. Ahrends¹⁶, N. Wellbrock¹

2.1 Einleitung

Die Methoden der ersten und zweiten bundesweiten Bodenzustandserhebungen (BZE I und BZE II) werden in den jeweiligen Aufnahmeanleitungen detailliert dargestellt (BMELF 1994, Wellbrock *et al.* 2006). In einzelnen Bundesländern wurde davon abgewichen oder die Methoden sowie die Analytik haben sich weiterentwickelt. Die Vergleichbarkeit der Methoden ist im Bericht zur Harmonisierung und Dokumentation der BZE im Wald ausführlich dokumentiert (Höhle *et al.* 2016). An dieser Stelle werden die Methoden und Parameter sowie ihre Vergleichbarkeit in Kürze zusammengefasst.

2.2 Inventurdesign, Raster und Plotdesign

2.2.1 Inventurdesign

Die BZE erfolgte als systematische Stichprobenerhebung, dessen Raster sich über die gesamte Waldfläche Deutschlands erstreckte, wobei grundsätzlich nur Stichprobeneinheiten (BZE-Punkte) der Holzbodenfläche beprobt wurden (Wellbrock *et al.* 2006). Die Mindestdichte der Stichprobenpunkte beträgt 8 x 8 km. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass diese Mindestdichte erforderlich ist, um auf Bundesebene räumlich differenzierte und flächenrepräsentative Aussagen treffen zu können (Wolff & Riek 1996). Länderspezifische Fragestellungen bzw. die Berücksichtigung der regionalen Waldverteilung erfordern vielfach regionale und thematische Verdichtungen des Basisnetzes, z.B. 4 x 2 km (z.B. Saarland). Der Umfang der gesamten BZE-Stichprobe in Deutschland beträgt für die BZE I 1936 und für die BZE II 1859 Aufnahmepunkte (Tab. I-2-1).

Um eine integrative Auswertung von Bodendaten, Nadel-/Blattanalysen und Kronenzustandsansprachen zu ermöglichen, wurde die BZE i.d.R. als eine Unterstichprobe in das Gitternetz der Waldzustandserhebung (8 x 8 km) eingehängt. Somit sind die Stichprobenpunkte der BZE im Allgemeinen identisch mit denen der nationalen Waldzustandserhebung (WZE). Die BZE ist außerdem an das 16 x 16 km-Raster der europaweiten WZE gekoppelt, was Auswertungen auf europäischer Maßstabsebene ermöglicht. Allerdings wurde zeitgleich zur BZE II europaweit im Rahmen des BioSoil-Projekts auf der Grundlage des 16 x 16 km-Level I-Netzes die

BioSoil-Beprobung durchgeführt (Hiederer *et al.* 2011). In einigen Fällen gelten für das BioSoil-Vorhaben andere Vorgaben als für die BZE. Vielfach wurde das nationale Verfahren zugunsten der EU-Vorgaben bzw. der internationalen Vergleichbarkeit angepasst. In einigen Fällen wurde das für die BZE II gewählte Verfahren jedoch beibehalten. Die Gründe hierfür lagen zumeist in der Vergleichbarkeit zu vorhandenen Referenzerhebungen wie der BZE I bestehenden Zeitreihen oder der Berücksichtigung von naturräumlichen Besonderheiten (Wellbrock *et al.* 2006).

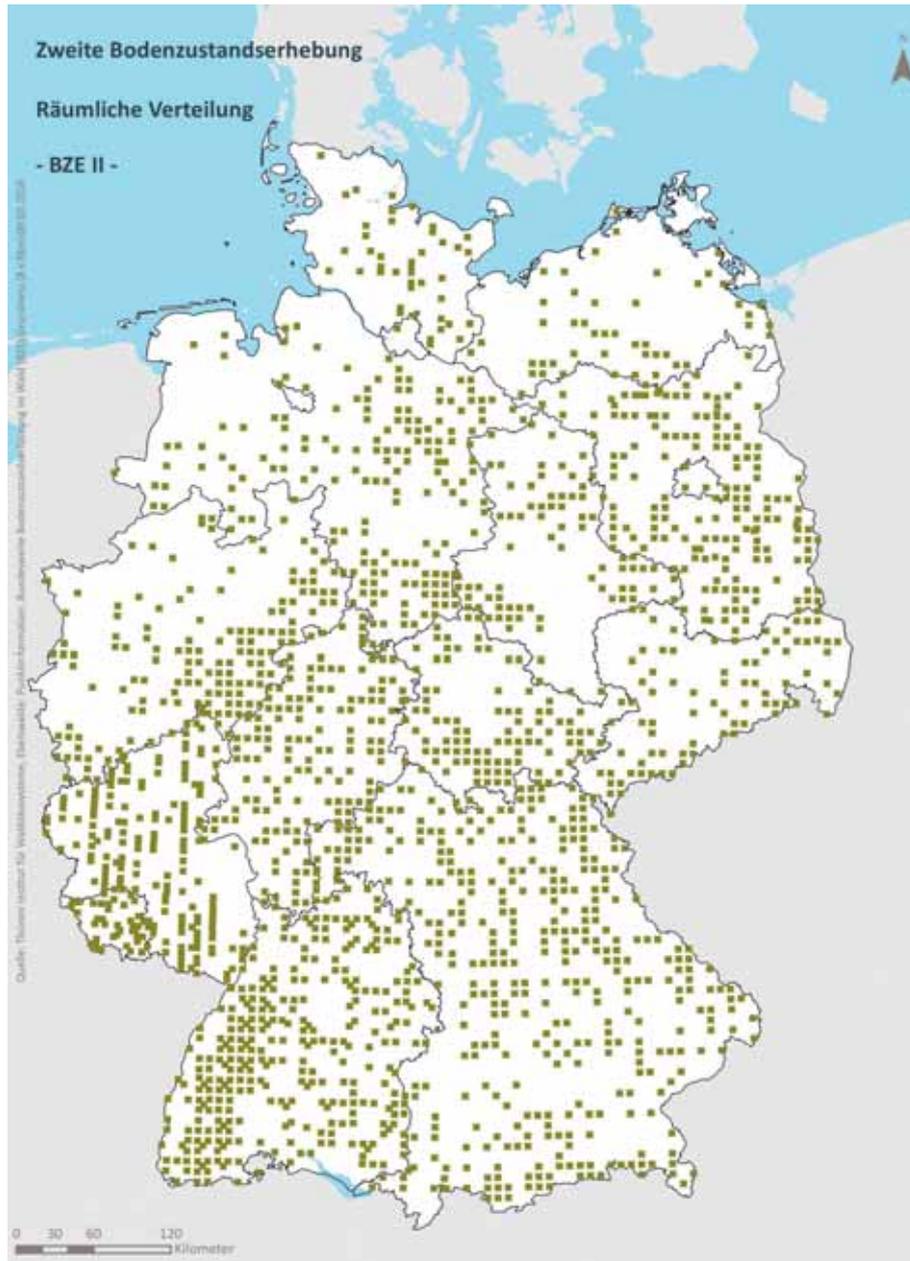


Abb. I-2-1: Räumliche Verteilung der BZE II-Punkte.

Tab. I-2-1: Waldfläche und Anzahl der BZE-Stichprobenpunkte pro Bundesland.

Bundesland	Kürzel	Landes- fläche (km ²)	Wald- fläche (Tsd. ha)	Wald- anteil %	Anzahl der beprobten BZE I-Punkte	Anzahl der beprobten BZE II-Punkte	Anzahl der identen Punkte BZE I und BZE II
Schleswig- Holstein	SH	15.802	137	9	43	41	41
Hamburg	HH	755	3	4	4	2	2
Nieder- sachsen	NI	47.615	970	20	192	169	94
Bremen	HB	419	1	2	4	4	4
Nordrhein- Westfalen	NW	34.110	785	23	140	146	140
Hessen	HE	21.115	851	40	139	139	139
Rheinland- Pfalz	RP	19.854	793	40	143	165	143
Baden- Württemberg	BW	35.751	1.362	37	308	304	303
Bayern	BY	70.550	2.391	34	424	372	0
Saarland	SL	2.569	87	34	80	50	45
Berlin	BE	892	16	18	4	4	4
Brandenburg	BB	29.654	1.035	35	145	165	145
Mecklenburg- Vorpommern	MV	23.214	500	22	73	47	46
Sachsen	SN	18.420	453	25	75	77	75
Sachsen- Anhalt	ST	20.452	440	22	67	76	65
Thüringen	TH	16.202	537	33	95	98	95
gesamt	BRD	357.374	10.325	24,9	1.936	1.859	1.341

Landesflächen der Bundesländer aus Statistischen Bundesamt (2014), kaufmännisch gerundet. Landeswaldflächen aus Corine Landnutzungsdaten 2006 (EEA 2010b), kaufmännisch gerundet.

Für die BZE II wurde als Mindestdichte ein 8 x 8 km-Inventurnetz als Grundnetz definiert. In einigen Bundesländern fand eine Verdichtung des Erhebungsnetzes statt oder es wurde z.B. auf das Raster der BWI verlegt. Dies hat hinsichtlich der bundesweiten Auswertung Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit der erhobenen Daten (Wellbrock *et al.* 2006). Für die bundesweite Auswertung der BZE-Daten wurde eine flächenbezogene Wichtung der einzelnen Stichprobenpunkte durchgeführt (Kapitel 2.11.1).

Länderspezifische Modifikationen

Schleswig-Holstein (SH): Es erfolgte eine Verdichtung des Aufnahmenetzes auf 4 x 4 km, welches in das WZE-Raster eingebunden ist.

Hamburg (HH): Zwei von vier Inventurpunkten aus dem Raster der BZE I wurden wieder beprobt.

Niedersachsen (NI): Die BZE I wurde auf dem Netz der WZE-Unterstichprobe (Raster 12 x 8 km für Bestände unter 60 Jahre und 8 x 4 km für Bestände über 60 Jahre zum Stichjahr 1987) erhoben, die BZE II einheitlich auf dem 8 x 8 km Netz. 94 Punkte sind sowohl in der BZE I und II erhoben worden.

Bremen (HB): Alle vier Punkte der BZE I wurden wiederholt beprobt.

Nordrhein-Westfalen (NW) : Keine Abweichung vom Grundnetz.

Hessen (HE): Keine Abweichung vom Grundnetz.

Rheinland-Pfalz (RP): Das BZE-Raster ist gegenüber dem 8 x 8 km-Standard-Raster auf 12 x 4 km verdichtet. Es bildet teilweise eine Unterstichprobe des WZE- und des europaweiten 16 x 16 km-Rasters.

Baden-Württemberg (BW): Keine Abweichung vom Grundnetz. Das BZE II-Raster bildet keine Unterstichprobe des WZE-Rasters (16 km). Daten zum Waldzustand auf dem BZE II-Raster wurden nur während der Jahre 2006-2008 erhoben.

Bayern (BY): Keine Abweichung vom Grundnetz. In Bayern erfolgte im Vorfeld der BZE II eine Verlegung des BZE-Rasters auf das der BWI. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse der BZE I und BZE II ist durch die Verlegung bzw. Neuanlage der Erhebungspunkte bei der BZE II nicht gegeben.

Saarland (SL): Das Erhebungsraster ist, abweichend vom 8 x 8 km-Standard der BZE, ein 4 x 4 km-Raster, welches unter Berücksichtigung regionaler Besonderheiten örtlich verdichtet wurde (2 x 4 km).

Brandenburg/Berlin (BB/BE): Keine Abweichung vom Grundnetz. Nach der ersten Beprobung der BZE II-Punkte wurde eine zweite Erhebung auf den Inventurpunkten der BWI vorgenommen. In die Bundesdatenbank und Auswertung geht die erste Inventur ein.

Mecklenburg-Vorpommern (MV): Keine Abweichung vom Grundnetz. Bei der BZE II wurde nur jeder zweite BZE-Punkt beprobt.

Sachsen (SN) : Keine Abweichung vom Grundnetz.

Sachsen-Anhalt (ST): Keine Abweichung vom Grundnetz.

Thüringen (TH) : Keine Abweichung vom Grundnetz.

2.2.2 Plotdesign

Die Einrichtung eines BZE-Plots wie in Abbildung I-2-2 dargestellt ist bundeseinheitlich geregelt und in den Arbeitsanleitungen beschrieben (BMELF 1994, Wellbrock *et al.* 2006). Der Mittelpunkt des

BZE-Punktes ist in der Regel der Mittelpunkt des zugehörigen WZE-Kreuztraktes. Der BZE-Mittelpunkt ist Bezugspunkt für alle im Rahmen der BZE durchzuführenden Probenahmen und Untersuchungen. Der Mittelpunkt des BZE-Punkts wurde mit Hilfe eines GPS-Empfängers eingemessen. In der Datenbank werden die Koordinaten im Gauß-Krüger-Koordinatensystem vorgehalten.

Das Standardverfahren zur bodenkundlichen Beprobung der BZE-Punkte ist die Satellitenbeprobung mit einem Bodenprofil am BZE-Mittelpunkt. Die Profilgrube muss innerhalb des 30 m-Radius der BZE-Fläche liegen. Sie sollte mindestens 1 m tief sein und die senkrecht abgestochene Stirnwand soll mindestens 0,8 m breit sein. Für die Satellitenproben werden, ausgehend vom BZE-Mittelpunkt, vier Bohrungen in einem Abstand von 10 m, in die vier Haupthimmelsrichtungen bis 90 cm Tiefe niedergebracht. Sofern für die Gewinnung von ausreichendem Probenmaterial erforderlich, werden zwischen den Haupthimmelsrichtungen – ebenfalls im Abstand von 10 m zum Mittelpunkt der Stirnwand – vier weitere Bohrungen (50 Gon zur Hauptbohrung) vorgenommen. Zur BZE II erfolgen die Bohrungen auf dem ursprünglichen Umkreis mit einem Radius von 10 m um den alten Mittelpunkt und werden gegenüber der BZE I im Uhrzeigersinn um 10 Gon versetzt (Abb. I-2-2).

Die Entnahme von Nadel-Blattproben erfolgt innerhalb des BZE-Probekreises (30 m-Radius) an je drei Probebäumen pro Baumart. Die Vegetationskartierung fand auf einer ungestörten Fläche von 400 m² innerhalb des BZE-Probekreises (30 m-Radius) statt (Kapitel 2.7). Im Kapitel 2.6 wird das Design der harmonisierten Bestandserhebung (HBI)-BZE II behandelt (Hilbrig *et al.* 2014).

2.3 Probenahme

2.3.1 Beprobung des Auflagehumus

Die Beprobung der Auflagehorizonte erfolgte zu beiden Inventuren an acht Satelliten (Achsen der Haupt- und Nebenhimmelsrichtungen) um die Profilgrube (Abb. I-2-2). Die Humusproben wurden mittels Stechrahmen, Stechzylinder oder Murach'schen Wurzelbohrer gewonnen. Zur wiederholten Beprobung der BZE II wurden die Satelliten um 10 Gon im Uhrzeigersinn versetzt. Die Probengewinnung unterscheidet sich zwischen beiden Inventuren folgendermaßen:

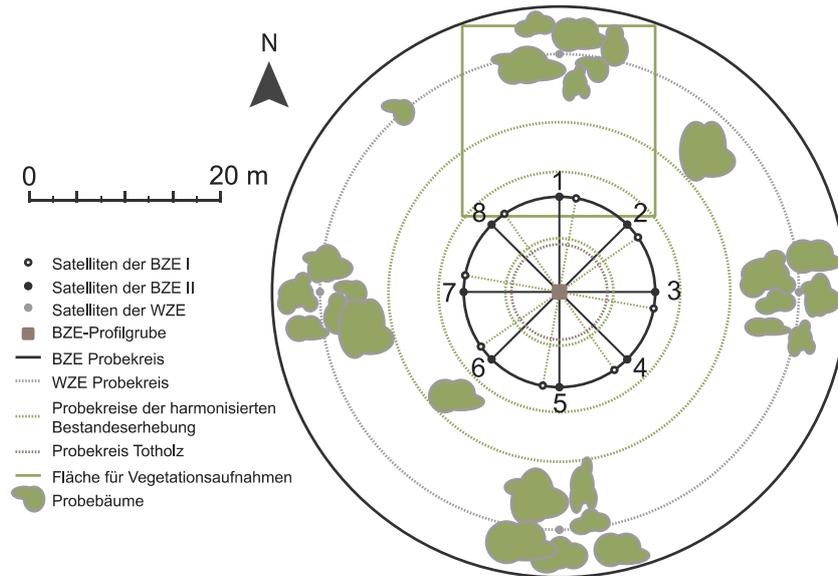


Abb. I-2-2: Beispiel für das Plotdesign der Bodenzustandserhebungen (BZE I, BZE II und HBI).

BZE I

Die acht Satellitenproben der Horizonte L und Of werden zu einer Mischprobe vereinigt. Äste, Zapfen sowie grüne Vegetationsanteile werden aus der Mischprobe entfernt. Eine zweite Mischprobe wird aus den acht Proben des Oh-Horizonts (sofern vorhanden) gebildet.

BZE II

Alle Horizonte des Auflagehumus werden wenn möglich getrennt beprobt. Alle acht Satellitenproben jedes einzelnen Horizonts werden zu Mischproben vereinigt. Grüne Vegetationsanteile und lebende Wurzeln werden aus der Mischprobe entfernt, wohingegen Äste, Zweige und Fruchtschalen in der Probe verbleiben.

Länderspezifische Modifikationen

BZE I

RP, HH: keine Trennung in L/Of- bzw. Oh-Lage

BW, TH, MV, BB, ST, SL: Beprobung der Humusauflage an repräsentativ erscheinenden Stellen: in Profilhöhe (MV, BB, ST, BW, TH), Bildung einer Mischprobe aus mindestens 3 Einzelproben (MV, BB, ST, SL)

HE: Beprobung der Humusauflage i.d.R. an vier Satelliten in den Haupthimmelsrichtungen in 10 m Abstand vom Profil, getrennte Beprobung von Of- und Oh-Lage, keine Beprobung der L-Lage

BY: Probenahme der Humusauflage an 10 gleichmäßig über jeden BZE-Bestand verteilte Entnahmepunkte, keine Trennung in die L/Of- bzw. Oh-Lage, Bildung einer Mischprobe aus 10 Einzelproben

BZE II

BE, BB: Mischprobe aus Of- und Oh-Lage, keine Beprobung der L-Lage

2.3.2 Beprobung des Mineralbodens

BZE I

Für die chemischen Analysen wird pro beprobte Tiefenstufe eine Mischprobe gebildet. Dazu werden die ersten drei Tiefenstufen (0-5, 5-10 und 10-30 cm) an den acht Satelliten und der Profilgrube beprobt. Die darunterfolgenden Tiefenstufen bis 90 cm Bodentiefe werden an den vier Satelliten der Haupthimmelsrichtungen und der Profilgrube beprobt.

Die volumengerechte Beprobung zur Ermittlung der Trockenrohddichte erfolgt für alle BZE-Tiefenstufen bis 90 cm mittels Stechzylinder an der Stirnwand der Profilgrube. Falls die Entnahme von volumengerechten Proben nicht möglich ist, ist auch die Schätzung der TRD zulässig.

BZE II

Für die chemischen Analysen wird pro beprobte Tiefenstufe eine Mischprobe gebildet. Dazu werden die ersten beiden Tiefenstufen (0 - 5 und 5 - 10 cm) an den acht Satelliten beprobt. Die darunterfolgenden Tiefenstufen (10-30, 30-60, 60-90 cm) bis 90 cm Bodentiefe werden wahlweise an den acht Satelliten beprobt oder als Profilbeprobung an jeweils drei Profilwänden durchgeführt. Bis 30 cm Bodentiefe ist eine Mischprobe aus acht Teilproben zu bilden. Unterhalb von 30 cm bis 90 cm ist die Mischprobe aus mindestens vier Teilproben zu bilden. Die Beprobung bis 90 cm Bodentiefe ist obligatorisch vorzunehmen. Die darunterliegenden Tiefenstufen (90-140, 140-200 cm) sind fakultativ zu beproben. Die Probenahme ab 90 cm erfolgt als Tiefenbohrung in der Profilgrube.

Die Ermittlung der bodenphysikalischen Parameter Feinbodenvorrat (FBV), Trockenrohddichte (TRD) und Grobbodenanteil (GBA) war bei der BZE II für die Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-30 cm obligatorisch und erfolgte entweder durch eine volumengerechte Beprobung oder durch die Fortschreibung der gemessenen BZE I-Werte. Eine Fortschreibung von BZE I-Schätzwerten war nicht zulässig. Die volumengerechte Beprobung erfolgte für die ersten beiden Tiefenstufen (0-5 und 5-10 cm) an den acht Satellitenpunkten. Eine Profilbeprobung der oberen zwei Tiefenstufen war nur in Ausnahmefällen zulässig. Für die Tiefenstufe 10-30 cm konnte die Probenahme an Satelliten oder am Profil durchgeführt werden. Das Probenahmeverfahren unterscheidet sich entsprechend des GBA (Wellbrock *et al.* 2006).

Länderspezifische Modifikationen

BZE I

BY: Probenahme an 10 gleichmäßig über jeden BZE-Bestand verteilte Entnahmepunkte. An allen 10 Entnahmestellen wurde Probenmaterial für jede Tiefenstufe mittel fünf Bohrstockeinschlägen gezogen. Aus den 10 Einzelproben wurden tiefenstufenweise Mischproben gebildet.

BY: Die Beprobung der bayerischen BZE I-Punkte erfolgte in den Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm. Unterhalb von 30 cm Bodentiefe liegen für die BZE I in Bayern keine bodenchemischen und -physikalischen Messwerte vor.

BW, HE, TH: Keine Satellitenbeprobung. Die Beprobung des Mineralbodens erfolgte im Auswahlbereich der WZE-Probepflanzen durch Mischproben aus den drei Profilwänden.

SN: Probenahme an acht Satelliten, keine zusätzliche Beprobung der Profilgrube.

MV, ST, BB: Beprobung erfolgte mit Ausnahme der ersten Tiefenstufe (0-5 cm) horizontbezogen. Die Entnahme der Mineralbodenhorizonte erfolgte aus den Stirn- bzw. Seitenwänden des Profils. Das Material für die Tiefenstufe 0-5 cm wurde als Mischprobe aus jeweils drei volumengleichen Teilproben an repräsentativen Stellen in Profilhöhe (max. 3 m Entfernung) entnommen.

BZE II

HE, BW: In den Bundesländern Baden-Württemberg und Hessen erfolgte während der BZE II die Probenahme für alle Tiefenstufen in der Profilgrube an 3 Profilwänden.

BB: Beprobung erfolgte mit Ausnahme der ersten beiden Tiefenstufen (0-5 und 5-10 cm) horizontbezogen.

2.3.3 Beprobung der Nadeln und Blätter

Die Beprobung von Nadeln und Blättern erfolgte bei der BZE I obligatorisch an Fichte und Kiefer und fakultativ an Buche und Eiche. Bei der BZE II wurden alle vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche obligatorisch beprobt. Die Beprobung von Nebenbaumarten war fakultativ. Die detaillierte Beschreibung der Probenahme ist bei Wellbrock *et al.* (2006) zu entnehmen. Die Probenahme an Laubbäumen sowie Lärche wurde zwischen Mitte Juli bis Mitte August, vor dem Einsetzen der Herbstverfärbung bzw. Rückverlagerung von Nährstoffen, durchgeführt. Entnommen wurden Blätter der vollbelichteten Oberkrone, bei der Lärche die Kurztriebneln der Vorjahrestriebe. Bei immergrünen Baumarten erfolgte die Probenahme während der Winterruhe je nach Orographie und Klimazone zwischen Oktober und Februar, rechtzeitig vor Neuaustrieb im Frühjahr. Bei beiden Inventuren wurden Nadeln des ersten Nadeljahrgangs (diesjährige) und zusätzlich dazu bei der BZE II Nadeln des zweiten Nadeljahrgangs gewonnen. Die Einzelproben von jeweils drei Probepflanzen einer Baumart (getrennt nach Nadeljahrgang) wurden entweder im Feld oder im Labor zu einer Mischprobe vereinigt. Dazu wurden die feldfrischen oder die aufbereiteten, getrockneten und gemahlten Proben von jedem Einzelbaum jahrgangsweise zu gleichen Mengenanteilen gemischt und homogenisiert. Sofern die

Einzelbäume getrennt analysiert wurden, entspricht der Mischprobenwert dem statistischen Mittelwert der Einzelanalysen.

2.3.4 Profildaten

Tab. I-2-2: Übersicht über am Profil erhobenen Parameter (Wellbrock *et al.* 2006).

Parameter	Kategorie	Kap.-Nr.
Tiefe der Horizontobergrenze	Horizontobergrenze	IV 2.2.1
	Horizontuntergrenze	IV 2.2.2
Horizontbezeichnung	Haupthorizonte	IV 2.3.1
	Übergangshorizonte	IV 2.3.2
	Verzahnungshorizonte	IV 2.3.3
Bodenart	Feinboden	IV 2.4.1
	Bodenartenuntergruppe	IV 2.4.2
	Grobboden	IV 2.4.4
	Torfarten	IV 2.4.6
Bodenfarbe		IV 2.5
Humusgehalt		IV 2.6
Carbonatgehalt		IV 2.7
Hydromorphiemerkmale	Oxidierete Eisen-/Manganverbindungen	IV 2.8.1
	Reduzierte Eisen-/Manganverbindungen	IV 2.8.2
Bodengefüge	Gefügeformen	IV 2.9.1
	Größe der Aggregatgefüge und Gefügefragmente	IV 2.9.2
Sonstige pedogene Merkmale		IV 2.10
Durchwurzelungsintensität		IV 2.11
Verteilung der Wurzeln		IV 2.12
Physiologische Gründigkeit		IV 2.13
Aktueller Grundwasserstand		IV 2.14
Scheinbarer Grundwasserstand		IV 2.15
Humositätsgrad von Torfen		IV 2.17

Die Kapitelnummerierung (Kap.-Nr.) in der rechten Spalte bezieht sich auf Wellbrock *et al.* (2006).

2.4 Profilsprache

An allen BZE II-Inventurpunkten erfolgte eine umfassende Bodenprofilaufnahme entsprechend der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 5) (Ad-Hoc AG Boden 2005) bzw. bei einigen Parametern modifiziert nach der BZE II-Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen (Wellbrock *et al.* 2006). An Punkten, an denen bei der BZE II keine Profilsprache erfolgte, wurden, falls vorhanden, die Angaben aus der BZE I übernommen und anhand der Profilbeschreibung an die

KA 5 angepasst. Neben der Angabe der Titeldaten und der Beschreibung der Aufnahmesituation wurden horizontbezogene pedogene und substratspezifische Merkmale erfasst, die eine systematische Einordnung des Profils erlauben.

2.4.1 Klassifikationen

2.4.1.1 Humusform

Humusformen spiegeln die unterschiedliche makroskopische Erscheinung des Humus wider (Ad-Hoc AG Boden 2005). An jedem der acht Satelliten erfolgt die Bestimmung der Humusform, die sich jedoch von Punkt zu Punkt entsprechend der standörtlichen Heterogenität unterscheiden kann. Daher wird gutachterlich für jeden Inventurpunkt eine dominante Humusform benannt. Ausführlich beschrieben werden die Humusformen im Kapitel 3.4.1.

2.4.1.2 Bodentypologische Klassifikation

Das Bodenprofil eines jeden Inventurpunkts wird der aktuellen bodensystematischen Einheit der Bundesrepublik Deutschland zugeordnet (Ad-Hoc AG Boden 2005).

2.4.1.3 Ausgangsgestein der Bodenbildung

Das Ausgangsgestein der Bodenbildung umfasst jenes Gestein, aus dem sich der aktuelle Boden entwickelt hat. In der hierarchisch gegliederten Auflistung der Ausgangsgesteine sind Angaben zur Substratgenese integriert (Wellbrock *et al.* 2006).

2.5 Laboranalytik

Die verwendeten Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsverfahren unterscheiden sich teilweise zwischen der BZE I und der BZE II. Außerdem haben einzelne Labore/Länder Verfahrensmodifikationen vorgenommen oder andere Verfahren als vorgesehen verwendet. Im Folgenden wird in Kurzform beschrieben, welche Verfahren bei der BZE I und der BZE II verwendet wurden, welche Abweichungen davon es in einzelnen Ländern gab und inwieweit die Verfahren vergleichbar sind.

Tab. I-2-3: Übersicht über die am Profil (Ausgangsgesteine der Bodenbildung, bodentypologische Klassifikation) und an den Satelliten (Humusform) erhobenen Klassifikationsmerkmale.

Parameter	Kategorie	Kap.-Nr.
Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Klassifikationssystem	IV 3.1.1
	Mischsubstrat	IV 3.1.2
	Schichtung	IV 3.1.3
Bodentypologische Klassifikation	Nationale Klassifikation der Bodentypen	IV 3.2.1
	Podsoligkeit	IV 3.2.2
	Internationale Klassifikation der Bodentypen	IV 3.2.3
Humusform	Nationale Klassifikation der Humusform	IV 3.3.1
	Streuart des Auflagehumus	IV 3.3.1.1
	Mächtigkeit der Lagen des Auflagehumus	IV 3.3.1.2
	Lagerungsart des Auflagehumus	IV 3.3.1.3
	Duchwurzlung des Auflagehumus	IV 3.3.1.4
	Gefüge im A-Horizont	IV 3.3.1.5
	Internationale Klassifikation der Humusform	IV 3.3.2

Die Kapitelnummerierung (Kap.-Nr.) in der rechten Spalte bezieht sich auf Wellbrock *et al.* (2006).

2.5.1 Qualitätsmanagement bei der BZE im Bereich Analytik

1988 wurde vom Bundesministerium für Landwirtschaft die Arbeitsgruppe Bodenanalyse gegründet, um durch Methodenvergleiche und -weiterentwicklungen sowie die Durchführung von Ringanalysen eine Methodenvereinheitlichung und -auswahl für die BZE I zu erreichen. Zur Qualitätssicherung wurden drei BZE I begleitende Ringanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse zur Ermittlung der Vergleichbarkeit der Daten aus den beteiligten Labors herangezogen wurden (König & Wolff 1993). Eine Zusammenfassung findet sich im Deutschen Waldbodenbericht 1996 (Wolff & Riek 1996). Ein Ergebnis der Vergleichbarkeitsprüfung war, dass die Nährelementgehalte in den Humusproben der BZE I wegen der unterschiedlichen zugelassenen Aufschlussmethoden nicht vergleichbar sind. Deshalb wurden – soweit wie möglich – die Humusproben aus der BZE I, die nicht mit dem Königswasseraufschluss aufgeschlossen worden waren, erneut aufgeschlossen und gemessen. Somit sind nun diese Daten vergleichbar mit denen der BZE II.

Zur Vorbereitung der BZE II wurde im Jahr 2002 vom Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung der Gutachterausschuss Forstliche Analytik (GAFA) eingesetzt, um zum einen die Analysemethoden zu vereinheitlichen, festzulegen und zu dokumentieren und zum anderen ein Qualitätskontrollprogramm für die BZE II zu entwickeln. Sämtliche Analysemethoden der BZE I und BZE II sowie des deutschen und des europäischen forstlichen Umweltmonitoring-Programms und die Methoden der Bundesländer wurden daraufhin dokumentiert und im Handbuch forstliche Analytik (HFA) erstmalig 2005 vom GAFA veröffentlicht (GAFA 2005). Das HFA wurde mehrfach ergänzt und liegt in der neusten Version von 2014 vor (GAFA 2014).

Das beschlossene Qualitätssicherungsprogramm umfasste fünf begleitende Ringanalysen (drei Boden- und zwei Humusringanalysen mit je sechs Proben) und die Mitführung von Standardmaterial für jeden Erhebungsparameter, das jeweils mindestens als jede zwanzigste Probe von den Laboren mitgemessen werden musste. Dafür wurden sechs Standardmaterialien hergestellt und festgelegt, welches Material für welchen Parameter mitgemessen werden musste. Die Auswertung der Ringanalysen (zusammenfassende Darstellung in Blum & Heinbach (2010)) und der Untersuchungen der Standardmaterialien ergab, dass mit wenigen Ausnahmen die Analysedaten der Länder/Labors vergleichbar ausgewertet werden können (König *et al.* 2013).

Ausgewertet und verglichen wurden zum einen die Streuungen innerhalb eines Labors und zum anderen die Mittelwerte aller Standardmessergebnisse pro Labor und Parameter (von 2005 bis 2012) sowie ob ein signifikanter zeitlicher linearer Trend bei den Messergebnissen festzustellen ist.

Darüber hinaus wurden aus den Daten der die BZE II begleitenden Ringversuche die Mittelwerte der Z-Scores aller Mittelwerte aus allen Ringversuchen für jede Einzelprobe für jedes Labor ermittelt und verglichen. Der Z-Score wird berechnet aus dem Quotienten der Differenz des jeweiligen Labormittelwerts zum Mittelwert aller Labore und der Standardabweichung aller Labore:

$$Z - Score = \frac{(MW_{Lab} - MW_{ges})}{SD_{ges}} \quad (2-1)$$

mit MW_{Lab} = Mittelwert eines Labors, MW_{ges} = Mittelwert aller Labore, SD_{ges} = Standardabweichung aller Labore.

Er ist ein Maß für die Abweichung des Labormittelwerts vom Mittelwert aller Labore in Abhängigkeit von der Streuung unter den Laboren. Ist der Mittelwert der Z-Scores für ein Labor von Null verschieden, deutet das auf eine bedeutsame Abweichung zu Mehr- (Mittelwert positiv) oder Minderbefunden (Mittelwert negativ) im Vergleich zu den anderen Laboren hin.

Ziel dieser Auswertung war es zu prüfen, ob Labore, bei denen stark abweichende Ergebnisse für bestimmte Parameter der Standardmessungen festgestellt wurden, auch bei den Ringversuchen auffällig abweichende Ergebnisse hatten. Findet ein Labor für den über einen längeren Zeitraum mit gemessenen Standard eines Parameters deutlich niedrigere Werte als die anderen Labore, so kann dies im günstigen Fall an der speziellen Zusammensetzung des Standards liegen und somit standardprobenspezifisch sein. Allerdings ist es auch möglich, dass die verwendete Messmethode abweichende Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Laboren liefert. Dies würde bedeuten, dass auch die Messergebnisse für die im Rahmen der BZE II gemessenen Proben nicht mit denen der anderen Labore/Länder vergleichbar sind. Dies müsste sich dann auch in den Ringversuchsergebnissen der betroffenen Labore niederschlagen. Das heißt, es müsste ein Trend zu Mehr- oder Minderbefunden wie beim Standard erkennbar sein. Die Überprüfung eines solchen Trends erfolgte anhand der Z-Scores wie oben beschrieben.

Bezüglich der laborübergreifenden Auswertung der Standardmessungen kommt die Studie zu dem Schluss, dass mit wenigen Ausnahmen die BZE II-Datensätze der Labore/Länder unter Berücksichtigung vertretbarer Streuungen gemeinsam auswertbar sind. Nur in zwölf Einzelfällen (Kombination Labor – Parameter) muss damit gerechnet werden, dass für den jeweiligen Parameter die Daten eines Labors/Lands gerichtet von den Daten der übrigen Labore/Länder abweichen. Es handelt sich dabei um Daten jeweils eines Labors/Lands der Parameter (Boden-) Stickstoff (N), Aluminium (Al), Calcium (Ca), Eisen (Fe), Mangan (Mn) und Zink (Zn) im Königswasseraufschluss (Humus), Kalium (K) im Königswasseraufschluss (Boden), K und Natrium (Na) aus der Austauschkapazitätsbestimmung (Humus) sowie pH (H₂O) und pH (KCl) (Humus). Details dazu finden sich im Bericht von König *et al.* (2013). Bei der Auswertung dieser Parameter sollte deshalb jeweils entschieden werden, ob die Daten der genannten Länder/Labore entweder unberücksichtigt bleiben oder mit einem Faktor korrigiert werden oder zumindest bei der Ergebnisdarstellung auf die Problematik der möglichen gerichteten Abweichung der Daten dieser Länder/Labore hingewiesen wird.

Für einige Parameter, deren Daten bei den Standardmessungen und bei den Ringversuchen sehr stark streuen, sollte auf eine vergleichende Auswertung der BZE-Daten verzichtet werden. Dies betrifft ausschließlich für die BZE unbedeutende Parameter: Na in der effektiven Kationenaustauschkapazität, AK_e (Boden), AK_e (Humus) und der potentiellen Kationenaustauschkapazität AK_t (Boden) sowie Na im Königswasseraufschluss (Boden und Humus). Problematisch sind die K-Werte im Königswasseraufschluss (Boden und Humus). Hier zeigt sich, dass einzelne Labore große gerichtete Abweichungen aufweisen, welche zumindest für ein Labor so groß sind, dass die Daten nicht mit denen der anderen Labore verglichen werden können. Die Ursache liegt vermutlich am unterschiedlichen Grad der Mahlung der Proben.

Es hat sich gezeigt, dass die Variation sowohl innerhalb als auch zwischen den Laboren mindestens $\pm 10\%$ beträgt; nur bei wenigen Parametern ist die Variation etwas geringer (z.B. Elementaranalyse (Boden) Kohlenstoff (C), Königswasseraufschluss (Boden) Ca, Gesamtaufschluss (Boden) Ca, bei vielen jedoch größer. Tab. I-2-4 stellt eine grobe Übersicht dar, welche mittleren Variationen sich bei den Standardmessungen und bei den Ringversuchen zusammengefasst für die jeweiligen Untersuchungsmethoden zeigen und welche einzelnen Parameter innerhalb einer Untersuchungsmethode deutlich stärker variieren. Bei allen übrigen Parametern und Untersuchungsmethoden kann davon ausgegangen werden, dass die BZE II-Daten aller Labore/Länder gemeinsam ausgewertet werden können.

Tab. I-2-4: Zusammenfassung der tabellarischen Auswertungen für die einzelnen Untersuchungsmethoden (Parametergruppen).

Untersuchungs- methode/ Parametergruppe	Mittlere Variation der Mittelwerte der Standard- messungen	Mittlere Variation der mittleren Abweichung vom Mittelwert bei den Ringversuchen	Parameter mit größeren Variationen	Bemerkungen
Elementaranalytik (C,N)	± 10 %	± 5 %	N bei geringen Gehalten	
Ak _e Boden	± 10 %	± 10 –15 %	Na	Na nicht vergleichbar
Ak _{HU} Humus	± 20 %	± 10 –15 %	H ⁺ , Na	Na nicht vergleichbar
AK _t Boden	± 20 %	± 10 –15 %	Mg, Na	Na nicht vergleichbar
pH Boden und Humus	± 20 %	± 40 –50 %		Achtung: nicht pH, sondern Parameter H+
Königswasseraufschluss Boden Hauptelemente	± 10 %	± 10 %	K, Na	K, Na nicht vergleichbar
Königswasseraufschluss Boden Schwermetalle	± 10 %	± 10 %		
Königswasseraufschluss Humus Hauptelemente	± 10-15 %	± 15 %	Na, Al, K	Na nicht vergleichbar
Königswasseraufschluss Humus Schwermetalle	± 20 %	± 15 %	Cr	
NO ₃ im wässrigem 1:2-Extrakt	± 15 %	± 20 %		
Korngrößenbestimmung	± 20 %	± 20 %	gU, mS, gS	
Gesamtaufschluss Boden Hauptelemente	± 10 -20 %	± 5-15 %		
Oxalat-Extrakt	± 10 %	± 15 %		
AK EU-Methode	± 15 -20 %	± 15 %	H ⁺ , Na	

2.5.2 Probenvorbereitung

Die Auflage- und Mineralbodenproben wurden vor der Weiterverarbeitung im Kühlraum bei 4 °C gelagert oder eingefroren. Proben aus der Auflage wurden im Trockenschrank bei 60 °C, Mineralbodenproben bei 40 °C und Pflanzenproben bei 60 °C mindestens 48 h getrocknet. Die Siebung der Proben aus der Auflage erfolgte bei der BZE I von Hand oder maschinell durch ein 2 mm-Sieb. Bei der BZE II wurde zuerst die Fraktion > 20 mm abgesiebt, gewogen und verworfen. Der Rest wurde durch ein 2 mm-Sieb gesiebt. Anschließend wurde die Fraktion 2-20 mm mit geeignetem Gerät zerkleinert und zur Fraktion < 2 mm hinzugefügt. Im Vergleich zur BZE I wurde bei der BZE II demnach die Fraktion 2-20 mm mitanalysiert. Bei der BZE I wurde je nach Stärke des Reibens der Probe durch das 2 mm-Sieb nur ein Teil dieser Fraktion mitanalysiert oder aber die gesamte Auflagen-Probe gemahlen, was dem Vorgehen bei der BZE II ähnlich ist. Untersuchungen der NW-FVA (Fortmann & König 2014b)) zeigen, dass durch Beimischung der Fraktion 2-20 mm - einer Fraktion mit hohem Holzanteil - zur Fraktion < 2 mm in der Mischprobe

geringere Gehalte an Nährstoffen oder Schwermetallen, aber höhere Gehalte an C gefunden werden. Dieser Effekt ist am stärksten im L-Horizont der Auflage ausgeprägt, da dort die Fraktion zwischen 2-20 mm massenprozentual am größten ist im Vergleich zum Of- und Oh-Horizont. Durch die Berechnung der Vorräte werden die Verdünnungs- und Anreicherungseffekte stark abgeschwächt (< 10 %), da der Humusvorrat der L-Lage gegenüber der Of- und Oh-Lage deutlich geringer ist. Deshalb wird für den Vergleich zwischen BZE I und BZE II empfohlen, Vorräte und weniger Gehalte miteinander zu vergleichen und die Auswertungen auf die gesamte Humusaufgabe, weniger auf einzelne Auflagehorizonte zu beziehen. Die getrockneten Mineralbodenproben wurden bei BZE I und BZE II von Hand oder maschinell durch ein 2 mm-Sieb gesiebt. Die chemischen Analysen wurden an der Feinbodenfraktion < 2 mm durchgeführt. Ein Aliquot der getrockneten und gesiebten Auflage- und Mineralbodenproben wurde in einer Kugel- oder Scheibenschwingmühle analysefein gemahlen. Die getrocknete Pflanzenprobe wurde mittel Kugel- oder Zentrifugalmühle analysefein gemahlen.

2.5.3 Bodenchemische Methoden

2.5.3.1 Bestimmung der pH-Werte im Mineralboden und im Auflagehumus

Aufnahmestatus

BZE I: pH (H₂O), pH (KCl) - Obligatorisch für Auflage und Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE II: pH (H₂O), pH (KCl), pH (CaCl₂) - Obligatorisch für Auflage (Of, Oh) und Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE I-Methoden

Die Proben werden im Gewichts- (Mineralboden) bzw. Volumen- (Auflagehumus) Verhältnis Probe: Lösung von 1:2,5 mit H₂O (pH (H₂O)) bzw. 1 M KCl-Lösung (pH (KCl)) verrührt und der pH-Wert mittels Glaselektrode gemessen.

BZE II-Methoden

Die Proben werden im Volumen-Verhältnis Probe: Lösung von 1:5 mit H₂O (pH (H₂O)), 1 M KCl-Lösung (pH (KCl)) bzw. 0,01 M CaCl₂-Lösung (pH (CaCl₂)) verrührt und der pH-Wert mittels Glaselektrode gemessen.

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: SL: bei Auflagehumus-Probe: Lösungs-Verhältnis 1:10

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

BZE I- und BZE II-Verfahren zur Bestimmung der pH-Werte sind nicht vergleichbar. Untersuchungen zum Vergleich der BZE I- mit den BZE II-Methoden zur Messung der pH-Werte haben jedoch gezeigt, dass die Ergebnisse der jeweiligen Methoden mit gleicher Salzlösung bzw. H₂O einen engen linearen Zusammenhang ($R^2 > 0,98$) aufweisen (Fortmann & König 2014a). Die BZE I-Methoden liefern im Mittel geringere pH-Werte als die BZE II-Methoden. In der Auflage weichen die Werte im Mittel um 0,03 bis 0,07 pH-Einheiten und im Mineralboden um 0,04 bis 0,06 pH-Einheiten ab. Die pH-Werte der BZE I wurden mittels Konstanten umgerechnet (GAFA 2014). Somit sind die Daten im Wesentlichen vergleichbar.

Hinsichtlich der pH-Werte der BZE I im SL, wo mit einem modifizierten Proben-Lösungsverhältnis von 1:10 gearbeitet wurde, liegen keine Untersuchungen zur Vergleichbarkeit mit der BZE II-Methode vor.

2.5.3.2 Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität im Mineralboden

Aufnahmestatus

BZE I: A_{k_e} an Proben pH (H₂O) < pH 6,2 - Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm Tiefe und tiefer

BZE II: A_{k_e} an Proben A_{k_e} pH (H₂O) < pH 6,2 - Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE I-Methode

Perkolation mit NH₄Cl-Lösung an getrockneten und gesiebten Proben; anschließende Messung der Kationen im Extrakt

BZE II-Methode

Identisch mit BZE I-Methode

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: SH: Perkolation mit SrCl₂-Lösung; BY: Extraktion mit NH₄Cl-Lösung

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Verfahren bis auf SH und BY identisch; vergleichbar

Untersuchungen der NW-FVA und der LWF Bayern zufolge liefern die BZE-Standardmethode zur Bestimmung der A_{k_e} im Mineralboden und die länderspezifischen BZE I-Methoden von SH und BY keine gleichwertigen Ergebnisse für saure Kationen (GAFA 2014). Es liegen jedoch enge lineare Korrelationen ($R^2 > 0,93$) vor. Die Werte der sauren Kationen aus den bayerischen und schleswig-holsteinischen BZE I-Messungen wurden im Bundesdatensatz auf der Basis der

ermittelten Korrelationen umgerechnet (Höhle et al. 2016). Somit sind auch diese Daten im Wesentlichen vergleichbar.

2.5.3.3 Bestimmung der potenziellen Kationenaustauschkapazität im Mineralboden

Aufnahmestatus

BZE I: A_{k_t} an Proben $pH(H_2O) > pH\ 6,2$ und Carbonatgehalt $> 0,3\ \%$ - Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm Tiefe und tiefer

BZE II: A_{k_t} an Proben $pH(H_2O) > pH\ 6,2$ und Carbonaten - Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE I-Methode

Perkolation mit $BaCl_2$ -Triäthanolamin-Lösung und $BaCl$ -Lösung an getrockneten und gesiebten Proben; Rücktausch mit $MgCl_2$ -Lösung; anschließende Messung der Kationen im Extrakt bzw. Rücktausch-Extrakt (Barium); diese Methode wurde nur an carbonathaltigen Mineralbodenproben mit $pH(H_2O) > 6,2$ durchgeführt.

BZE II-Methode

Identisch

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: SH: Perkolation mit $SrCl_2$ -Lösung unabhängig vom pH-Wert; BY: Extraktion mit NH_4Cl -Lösung unabhängig vom pH-Wert; BB, MV: Perkolation mit NH_4Cl -Lösung unabhängig vom pH-Wert; BW: bei Mineralbodenproben mit $pH(H_2O) > 6,2$ weder Messung der A_{k_e} noch der A_{k_t}

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Verfahren mit Ausnahme der Länder BB, MV und BY identisch und damit vergleichbar; für die in den drei genannten Ländern angewandten AKe-Methoden liegen keine systematischen Vergleichsuntersuchungen zur A_{k_t} vor; es ist jedoch davon auszugehen, dass durch Kalkauflösung bei den A_{k_e} -Methoden die Austauschkapazität überschätzt wird.

2.5.3.4 Bestimmung des Kohlenstoffs

2.5.3.4.1 Organischer Kohlenstoff

Aufnahmestatus

BZE I: Corg - Obligatorisch für Auflage und Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE II: Corg - Obligatorisch für Auflage (Of, Oh) und Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE I-Methode

Es waren mehrere Methoden zugelassen: (1) Elementaranalyse mittels Elementaranalysatoren; (2) trockene Verbrennung mit anschließender konduktometrischer CO₂-Bestimmung nach Wösthoff; (3) indirekte Bestimmung über Glühverlustermittlung bei 550 °C und Faktorkorrektur (Faktor 1,72); (4) nasse Verbrennung mit K-Dichromat und Schwefel (S)-Säure mit anschließender fotometrischer Chrom (III)-Bestimmung

BZE II-Methode

Elementaranalyse mittels Elementaranalysatoren

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: NI, HB, RP, SL, SN, ST: nur Messung des Gesamt-C

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Die vier bei der BZE I zum Einsatz gekommenen Verfahren werden als vergleichbar eingestuft. Dies zeigt sowohl die Vorstudie zur BZE II (Evers et al. 2002), in deren Rahmen Proben der BZE I mit Elementaranalysatoren nachanalysiert wurden, für die Verfahren (2) und (3) als auch Untersuchungen des Ökologischen Labors der Fachhochschule Eberswalde (Russ & Riek 2011) für das Verfahren (4).

2.5.3.4.2 Carbonat

Aufnahmestatus

BZE I: Carbonat - Obligatorisch Mineralboden ab pH(H₂O) > 6,2 bis 90 cm Tiefe

BZE II: Carbonat - Obligatorisch für Auflage (Of, Oh) ab pH(H₂O) > 5,5 und Mineralboden ab pH(H₂O) > 6,2 bis 90 cm Tiefe

BZE I-Methode

Gas-volumetrische Carbonatbestimmung nach Scheibler

BZE II-Methode

Carbonatbestimmung mittels Elementaranalysatoren oder Gasvolumetrische Carbonatbestimmung nach Scheibler

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: HH, NI, HB, HE, RP, BW, BY, SL, BB, BE, SN, ST: keine Carbonatbestimmung bzw. Daten nicht rekonstruierbar

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Soweit Daten vorliegen vergleichbar

2.5.3.5 Bestimmung des Stickstoffs

Aufnahmestatus

BZE I: Nges - Obligatorisch für Auflage und Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE II: Nges - Obligatorisch für Auflage (Of, Oh) und Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE I-Methode

Es waren zwei Methoden zugelassen: (1) Elementaranalyse mittels Elementaranalysatoren; (2) Kjeldahl-Aufschluss mit anschließender fotometrischer oder titrimetrischer Bestimmung

BZE II-Methode

Elementaranalyse mittels Elementaranalysatoren

Länderspezifische Modifikationen

Keine

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Das bei der BZE I zum Einsatz gekommene Kjeldahl-Verfahren wird als vergleichbar mit der Elementaranalyse eingestuft. Dies zeigt die Vorstudie zur BZE II (Evers et al. 2002), in deren Rahmen Proben der BZE I mit Elementaranalysatoren nachanalysiert wurden.

2.5.3.6 Bestimmung von Nährelementen und Schwermetallen

Aufnahmestatus

BZE I: Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, Pb, S, Zn - Obligatorisch für Auflage

P - Obligatorisch für Auflage und Mineralboden bis 90 cm Tiefe

BZE II: Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, Pb, P, S, Zn - Obligatorisch für Auflage (Of, Oh) und Mineralboden bis 10 cm Tiefe

As, Cr, Hg, Ni - Obligatorisch für Mineralboden bis 10 cm Tiefe

BZE I-Methode

Es waren vier Aufschlussmethoden für die Bestimmung der Gehalte an Al, Ca, Fe, K, Magnesium (Mg), Mn und Phosphor (P) sowie der Schwermetalle Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Blei (Pb) und Zn im Auflagehumus sowie P im Mineralboden zugelassen: (1) Königswasser-aufschluss (2) Salpetersäure-Druckaufschluss (3) Perchlorsäureaufschluss und (4) Gesamtaufschluss mit Flusssäurezusatz. Die Elementbestimmungen in den Aufschlusslösungen erfolgten mit ICP, AAS und spektrophotometrischen Methoden.

BZE II-Methode

Königswasser-Aufschluss für die Bestimmung der Gehalte an Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn Na, P und S sowie der Schwermetalle Cd, Chrom (Cr), Cu, Quecksilber (Hg), Nickel (Ni), Pb, Zn und Arsen (As) des Auflagehumus und im Mineralboden. Die Elementbestimmungen in den Aufschlusslösungen erfolgten mit ICP, ICP-MS, AAS und spektrophotometrischen Methoden.

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: neben den oben aufgelisteten zulässigen Aufschlussverfahren wurden noch mehrere andere oder abgewandelte Verfahren eingesetzt.

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Die begleitend zur BZE I durchgeführte Ringanalyse von König & Wolff (1993) hat gezeigt, dass schon die vier zur BZE I zugelassenen Aufschlussverfahren für Humusproben mit Standardabweichungen bis zu 35 % und Spannen bis 160 % keine bundesweit vergleichbaren Ergebnisse geliefert haben und dementsprechend nur sehr eingeschränkt bundesweite Auswertungen möglich waren. Um die Vergleichbarkeit der Elementgehalte auf Bundesebene und die Vergleichbarkeit zwischen Erst und Folgeinventur zu gewährleisten, wurden die BZE I-Rückstellproben mittels Königswasser-aufschluss erneut aufgeschlossen und nachanalysiert. Vergleichbar sind nun alle Daten aus Königswasser-aufschlüssen mit Ausnahme der K-Werte.

2.5.3.7 Wässriger 1:2-Extrakt

BZE I-Methode

Die getrockneten und gesiebten Mineralbodenproben werden im Gewichtsverhältnis 1:2 mit demineralisiertem Wasser verrührt, 24 Stunden stehen gelassen und dann abfiltriert. Die Elementbestimmungen in den Extrakten erfolgen mit elementspezifischen Verfahren wie ICP, ICP-MS, Ionenchromatographie oder Photometrie.

BZE II-Methode

Identisch

Länderspezifische Modifikationen

BZE II: SH: modifizierte Methode mit Zentrifugation; NW, BB, SN, MV, TH: kein 1:2-Extrakt

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Identische Verfahren, Daten vergleichbar

Die Konzentrationen aus dem 1:2-Extrakt sollen die Eigenschaften der Bodenlösung unterhalb des Wurzelraums abbilden. Wie Schlotter *et al.* (2009) zeigen, trifft dies für die meisten Kationen jedoch nicht zu. Nach bundesweitem Beschluss (BL-AG-BZE) werden deshalb im Rahmen der BZE lediglich Nitrat, Chlorid und Sulfat ausgewertet. Für die NO₃- Konzentrationen im 1:2-Extrakt gibt es eine gute Korrelation zu den Werten aus der Bodenlösung (Saugkerzen) nach Standardisierung der Messwerte auf das Wasser-Bodenverhältnis feldfrischer Proben (Evers *et al.* 2002). Da dieses Wasser-Boden-Verhältnis am BZE-Standort nicht erhoben wird, werden die Nitratkonzentrationen auf Feldkapazität bezogen. Für Chlorid und Sulfat erfolgt keine Umrechnung auf Feldkapazität.

2.5.4 Bodenphysikalische Methoden

2.5.4.1 Humusvorrat

Aufnahmestatus

BZE I: Obligatorisch für Auflage (L, Of, Oh)

BZE II: Obligatorisch für Auflage (Of, Oh)

BZE I-Methode

Die auf einer definierten Fläche entnommene Humusprobe wird bei 60 °C getrocknet und gewogen. Aus dem Quotienten der Masse zur Fläche ergibt sich der Humusvorrat gesamt.

BZE II-Methode

Die auf einer definierten Fläche (Stechzylinder, Stechrahmen) entnommene Humusprobe wird bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Teilfraktion > 2 cm wird aussortiert oder mittels 20 mm-Sieb vom restlichen Teil der Probe getrennt. Der Quotient aus Masse < 2 cm bzw. Masse > 2 cm und der Entnahmefläche ergibt den Humusvorrat < 2 cm und den Humusvorrat > 2 cm (organischer Rest). Die Summe aus beiden Vorräten entspricht dem Humusvorrat gesamt.

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: keine bekannt

BZE II: SH, HH, HE, BB, SN, TH: keine separate Bestimmung der Humusvorräte < 2 cm und > 2 cm

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Infolge der Änderung der Probenahmenvorschrift der BZE II gegenüber der Erstinventur, ist davon auszugehen, dass der Parameter Humusvorrat gesamt der BZE I und BZE II unterschiedliche Fraktionen des Auflagehumus beschreibt. Bei der BZE I-Probenahme verblieben Äste und Zapfen im Feld, wogegen bei der BZE II die gesamte Probe entnommen wurde. Da Äste und Zapfen tendenziell > 2 cm sind, wird folglich angenommen, dass der Parameter Humusvorrat gesamt der BZE I am ehesten dem Parameter Humusvorrat < 2 cm der BZE II gleichzusetzen ist. Alle Vorratsberechnungen werden deshalb unter Verwendung von Humusvorrat gesamt der BZE I und mit Humusvorrat < 2 cm für die BZE II vorgenommen. Für sechs Bundesländer (siehe länderspezifische Modifikationen) lagen keine Humusvorräte < 2 cm vor, in diesen Fällen wurden die Humusvorräte gesamt der BZE II verwendet.

2.5.4.2 Trockenrohdichte des Feinbodens und Feinbodenvorrat

Aufnahmestatus

BZE I: Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm (nur TRD des Gesamtbodens)

BZE II: Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm Tiefe (ab 30 cm sind abgeleitete Werte möglich)

BZE I-Methode

Je nach GBA kommen zwei verschiedene Varianten zum Einsatz: (1) Bei homogenen (skelettarmen) Bodenverhältnissen werden ungestörte Bodenproben mittels Stechzylinder entnommen und bei 105 °C getrocknet. Im Anschluss werden größere Steine aussortiert, die restliche Bodenprobe mit einem Backenbrecher vorzerkleinert (fakultativ) und durch ein 2 mm-Sieb abgeseibt. Durch Einbeziehung des am Profil geschätzten GBA wird der FBV auf Basis der TRD des Feinbodens berechnet.

BZE II-Methode

Je nach Korngrößenverteilung des Grobbodens und des GBA kommen fünf verschiedene Verfahren zum Einsatz (GAFA 2014).

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Mindestens die Hälfte aller Bundesländer haben während der BZE I als Basis zur Berechnung des FBV die TRD des Gesamtbodens verwendet. Dieses Verfahren ist für die BZE II allein für skelettfreie oder -arme Böden (< 5 %) zulässig. In Absprache mit den Bundesländern wurde der bestmögliche Datensatz verwendet. In der Konsequenz erfolgte die Übertragung der Daten von der BZE II auf die BZE I.

Die Beprobung der bayerischen BZE I-Punkte erfolgte in den Tiefenstufen 0-10 und 10-30 cm. Trockenrohichte und GBA von 0-10 cm wurden auf 0-5 cm und 5-10 cm übertragen und sind demnach identisch. Unterhalb von 30 cm Bodentiefe liegen für die BZE I in BY keine bodenchemischen und -physikalischen Messwerte vor.

2.5.4.3 Trockenrohichte des Gesamtbodens

Aufnahmestatus

BZE I: Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm

BZE II: Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm Tiefe (ab 30 cm sind abgeleitete Werte möglich)

Methode

Zur Bestimmung der TRD des Gesamtbodens (TRD_{ges}) werden ungestörte Bodenproben mittels Stechzylinder entnommen. Das Bodenmaterial wird anschließend bei 105 °C mindestens 16 h bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen. Der Quotient aus Trockenmasse und Volumen des Entnahmeggeräts ergibt die TRD_{ges} .

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: TH: keine bodenphysikalische Probenahme

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Die BZE I- und BZE II-Methode unterscheidet sich nicht

2.5.4.4 Korngrößenzusammensetzung des Feinbodens

Aufnahmestatus

BZE I: Laboranalytische Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nicht vorgesehen

BZE II: Obligatorisch für Mineralboden bis 90 cm Tiefe (abgeleitete Werte aus Fingerprobe möglich)

Methode

Die BZE I- und die BZE II-Standardmethode unterscheiden sich in ihrer Präzision.

BZE I: Bei der BZE I war die analytische Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nicht vorgesehen. Die bei der Profilsprache per Fingerprobe bestimmte Bodenart liegt hingegen bundesweit für die einzelnen Horizonte vor. Die Übertragung der Bodenart auf die Tiefenstufen ist jedoch nicht möglich.

BZE II: Die Korngrößenverteilung wurde an Proben der BZE-Tiefenstufen analysiert.

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: SH, NW und MV (Teildatensatz) -analytische Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung mittels Pipette nach Köhn

BZE II: NI, HB, NW, ST: keine analytische Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung

HE: keine Carbonatzerstörung bei carbonathaltigen Proben

SH, HH, BW: Carbonatzerstörung auch bei carbonatfreien Proben

BW: Kombination aus Köhn-Methode für die Fraktion Sand, Laser-Methode für die Fraktionen Schluff und Ton

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Wie die Ergebnisse der Ringanalyse (2007) zeigen, werden in carbonathaltigen Proben, bei fehlender oder unvollständiger Carbonatzerstörung, die Grobschlufffraktion über- und die Tonfraktion unterschätzt, da Carbonate kleinere Teilchen der festen Bodenmatrix zu größeren Aggregaten verkitten können. Eine abschließende Bewertung, ob Proben mit und ohne Carbonatzerstörung vergleichbar sind, steht noch aus.

Für die oben genannten Bundesländer, die auf eine analytische Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung bei der BZE II verzichtet haben, wird die mittlere Korngrößenverteilung aus der tiefenstufenspezifischen Ansprache der Bodenart am Profil abgeleitet. Für NW werden die Korngrößenanalysedaten der BZE I übernommen.

Um die Vergleichbarkeit der Laser-Methode und der Köhn-Methode herzustellen, wurden die Daten mit Hilfe der Regressionsgleichungen nach Trefz-Malcher *et al.* (2011) umgerechnet.

2.5.5 Verfahren zur Blatt- und Nadelanalyse

2.5.5.1 Bestimmung des Stickstoffs

Aufnahmestatus

BZE I: N: obligatorisch für Fichte und Kiefer (fakultativ für Laubbäume)

BZE II: N: obligatorisch für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche und fakultativ für Nebenbaumarten

BZE I-Methode

Es waren zwei Methoden zugelassen: (1) Elementaranalyse mittels Elementaranalysatoren; (2) Kjeldahl-Aufschluss mit anschließender fotometrischer oder titrimetrischer Bestimmung

BZE II-Methode

Elementaranalyse mittels Elementaranalysatoren

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: HE, SL: keine Blatt/Nadel-Analysen

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Das bei der BZE I zum Einsatz gekommene Kjeldahl-Verfahren wird als vergleichbar mit der Elementaranalyse eingestuft. Dies zeigt die Vorstudie zur BZE II von Evers et al. (2002), in deren Rahmen Proben der BZE I mit Elementaranalysatoren nachanalysiert wurden.

2.5.5.2 Bestimmung von Nährelementen und Schwermetallen

Aufnahmestatus

BZE I: Gehalte an Ca, K, Mg, Mn, P, S: obligatorisch für Fichte und Kiefer (fakultativ für Laubbäume) und Gehalte an Cd, Cu, Pb, Fe, Zn für alle Baumarten fakultativ

BZE II: Gehalte an Ca, Cd, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, Pb, S, Zn: obligatorisch für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche und fakultativ für Nebenbaumarten

BZE I-Methode

Es waren fünf Aufschlussmethoden für die Bestimmung der Gehalte an Ca, K, Fe, Mg, Mn, P, S und der Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn zugelassen: (1) Salpetersäure-Druckaufschluss, (2) Gesamtaufschluss mit Flusssäurezusatz, (3) Königswasseraufschluss, (4) Perchlorsäureaufschluss und trockene Veraschung (nicht für Schwermetalle). Die Elementbestimmungen in den Aufschlusslösungen erfolgten mit ICP, AAS und spektrophotometrischen Methoden.

BZE II-Methode

Salpetersäure-Druckaufschluss; die Elementbestimmungen in den Aufschlusslösungen erfolgten mit ICP, ICP-MS, AAS und spektrophotometrischen Methoden

Länderspezifische Modifikationen

BZE I: NW: Röntgenfluoreszenz-Analyse; RP: zweimalige trockene Veraschung bei 450°C; Aufnahme der Asche mit 0,5 M Salzsäure, Messung mittels ICP-AES; BW, MV, SN, TH: angewandte Aufschlussverfahren nicht mehr rekonstruierbar; HE, SL: keine Blatt/Nadel-Analysen

Vergleichbarkeit BZE I-BZE II

Soweit der Salpetersäure-Druckaufschluss bei BZE I und BZE II verwendet wurde, sind die Daten vergleichbar. Der Gesamtaufschluss ist für die Elemente Al und teilweise K nicht vergleichbar. Alle

übrigen Elemente sollten vergleichbar sein, da in der Regel die angewandten Aufschlussverfahren Gesamtgehalte erfassen.

2.6 Bestandsbeschreibung

Die Waldbestände an den Inventurpunkten wurden im Rahmen der BZE I von 1987 bis 1993, der BZE II von 2004 bis 2008 und der HBI an den BZE II-Punkten (HBI-BZE II, von 2011 bis 2012) beschrieben. Als Ergebnis der HBI-BZE II liegt ein bundeseinheitlicher Datensatz (nicht für Bayern) zur ökologischen und ertragskundlichen Bestockungssituation an den Inventurpunkten vor. Es wurde davon ausgegangen, dass die zur HBI-BZE II erfassten ökologischen Verhältnisse schon zur BZE II herrschten.

Alle Parameter der HBI-BZE II sind in der Aufnahmeanweisung von Hilbrig *et al.* (2014) beschrieben. Sie lassen sich in vier Kategorien zusammenfassen: allgemeine Bestockungsbeschreibung, Erfassung des Derbholzes ($BHD \geq 7$ cm), Erfassung der Verjüngung ($BHD < 7$ cm, Baumhöhe > 20 cm) und Erfassung des Totholzes.

Im Rahmen der vorliegenden Auswertung wurden aus den Bestockungsdaten unterschiedliche Parameter abgeleitet:

- fehlende Baumhöhen mittels angepasster Bestandshöhenkurven
- Bonitäten
- Stammzahl je Hektar
- Grundflächenanteile
- Laub- und Nadelholzanteile
- Baumartenanteile

Neben den Daten der HBI-BZE II wird der Parameter Bestockungstyp der BZE II verwendet. Er fasst die zahlreichen Bestockungskombinationen in acht Bestockungstypen zusammen (z.B. Kieferreinbestand (≥ 70 % Kiefer); nadelholzreicher Laubholzbestand (> 30 % Nadelholz)). Dieser Parameter wurde von den Bearbeitern im Feld angesprochen.

2.7 Vegetationskartierung

Zur BZE II-Erhebung (2006-2008) war die Vegetation in vier Schichten (Moosschicht, Krautschicht, Strauchschicht, Baumschicht) auf einer ungestörten Fläche von 400 m² im Bereich des BZE-Mittelpunkts (30 m-Radius) zu erfassen. Die Erfassung sollte im Zeitraum der maximalen phänologischen Ausprägung (i.d.R. von Mitte Juli bis Ende August) stattfinden. Fakultativ konnten zusätzliche Aufnahmen im Frühjahr angefertigt werden (Wellbrock *et al.* 2006).

Es wurden die Rahmenbedingungen wie Aufnahmeteam und -datum sowie Form, Größe und Lage der vegetationskundlichen Aufnahme­fläche dokumentiert. Detailliert erfasst wurden die geschätzten Deckungsgrade (senkrechte Projektion aller lebenden Teile) jeder Pflanzenart in jeder Vegetationsschicht und der Schichtdeckungsgrad. Die Gefäßpflanzenarten wurden nach der Flora Europaea von Tutin *et al.* (1968-1980) und (1993) verschlüsselt. Die Determinierung der Moosarten war fakultativ und erfolgte nach Frey *et al.* (1995) und nach Frahm & Frey (2004).

Im Zuge der Auswertung wurde eine Umcodierung der taxonomischen Referenz zur GermanSL durchgeführt (Jansen & Dengler 2008). Folgende Definitionen sind gültig. Die obere Baumschicht (b1) wird aus allen Gehölzen mit mindestens 5 m Wuchshöhe gebildet. In der unteren Baumschicht (b2) stehen Gehölze mit mindestens 5 m Wuchshöhe, die jedoch maximal zwei Drittel der Oberhöhe der oberen Baumschicht erreichen. Zusätzlich wurden die beiden Schichten, b1 und b2, nach Fischer (2015) zu einer Schicht zusammengefasst. Die Strauchschicht umfasst alle Gehölzarten zwischen 0,5 und 5,0 m Wuchshöhe. Alle krautigen Gewächse unabhängig von der Wuchshöhe und die Gehölze bis 0,5 m Wuchshöhe bilden die Krautschicht. In der Moos­schicht werden die epigäischen Moose erfasst. Die Kletterpflanzen wurden entsprechend ihrer Wuchshöhe der jeweiligen Vegetationsschicht zugeordnet. Die Form der Aufnahme­fläche ist frei wählbar. Die Deckungsgradschätzungen erfolgen in Prozent oder als Klassenmittelwerte bei anderen Schätzskalen (Braun-Blanquet 1964).

Zur Qualitätssicherung wurden zwischen Juli und September 2008 Kontrollstichproben der Vegetationsaufnahmen an ausgewählten Punkten durchgeführt. Im Bericht von Höhle *et al.* (2016) sind unter anderem die Aufnahmemodi der einzelnen Bundesländer in Bezug auf ihre Vergleichbarkeit gegenübergestellt und die länderspezifischen Besonderheiten erfasst. Dies weiterführend sind die durchgeführten Harmonisierungsschritte (Angleichungen, Zusammenfassungen) entwickelt worden und detailliert im technischen Bericht beschrieben (Höhle *et al.* 2016).

Diese Umcodierung zur GermanSL erwies sich für die weiteren Auswertungen als vorteilhaft, da andere, für Deutschland relevante, botanische Datenbanken als taxonomische Referenz ebenfalls die GermanSL nutzen. Den gefundenen Arten konnten so artspezifische Eigenschaften, wie z.B. Ellenberg-Zeigerwert, Kategorie der Waldbindung, Rote Liste Status per Datenbankabfrage zugeordnet werden. Im Rahmen der vorliegenden Auswertung wurden aus den Vegetationsaufnahmen unterschiedliche Parameter abgeleitet. Neben der pflanzensoziologischen Einheit (Jäger & Werner 2005, Oberdorfer 2001, Schubert *et al.* 2001) gehörten dazu Mittelwerte sowie Anteile und Deckungsgradsummen der Zeigerwerte (Ellenberg 2003), der Kategorien der Waldbindung (Schmidt *et al.* 2011), des floristischen Status (BfN 2015, Jäger & Werner 2005, Wisskirchen & Haeupler 1998) und des Gefährdungsgrades (Ludwig & Schnittler 1996).

2.8 Kronenzustand

Der Kronenzustand von Waldbäumen wird im Rahmen der jährlichen WZE erhoben, welche Teil des Forstlichen Umweltmonitorings ist. Der Kronenzustand gilt als wichtiger Indikator für die Vitalität von Wäldern. Die WZE erfolgte erstmalig im Jahr 1984 und wird seit 1990 jährlich im gesamten Bundesgebiet durchgeführt, um die Wirkung von Umweltveränderungen auf den Wald feststellen und bewerten zu können. Die WZE-Aufnahmeverfahren sind zwischen den Bundesländern abgestimmt und es werden Qualitätskontrollen durchgeführt.

Die Beurteilung des Kronenzustands beruht im Wesentlichen auf der Kronenverlichtung. Die Bewertung der Kronenverlichtung geschieht visuell mit Hilfe von Ferngläsern in 5 %-Stufen von 0 % (keine Kronenverlichtung) bis 100 % (Baum ist abgestorben). Die bundesweite Aufnahme wird auf den ca. 430 Level I-Stichprobenpunkten (europaweites systematisches 16 × 16 km-Raster) durchgeführt. In Bayern (2006) und Brandenburg (2009) fand eine Verschiebung des Level I-Rasters im Rahmen von Harmonisierungsprozessen auf die Traktecke A der BWI statt. Von 2006 bis 2008 erfolgte die WZE bundesweit auf dem verdichteten 8 x 8 km-Raster der BZE.

Bei dem Stichprobendesign handelt es sich in der Regel um einen Kreuztrakt. Der Kreuztrakt besteht aus vier Satelliten (jeweils in eine Himmelsrichtung). An jedem Satellitenmittelpunkt werden die sechs Bäume, die sich am nächsten zum Mittelpunkt befinden beurteilt. Neben dem Kreuztrakt findet der Linientrakt (Nordrhein-Westfalen) Anwendung sowie der Quadratrakt bzw. Quadranten für nicht einsehbare Bestände. Die Bäume der Stichprobe werden dauerhaft markiert oder ihre Lage festgehalten. Ausgefallene Bäume werden dokumentiert und ersetzt.

Die Erhebungen zum Kronenzustand und zu Schadursachen erfolgt jährlich im gleichen Zeitraum in den Sommermonaten. Zu den betrachteten Parametern gehören u.a. Aufnahmedatum, Aufnahmeteam, Baumart, Baumalter, Kronenverlichtung, Fruktifikation, Entnahme und Mortalität sowie die Ansprache von biotischen und abiotischen Schäden. Bis 2009 wurde das Ausmaß des Befalls z.B. mit Insekten oder Pilzen angegeben (nationale Ansprache) und seit 2010 erfolgt eine europaweit einheitliche Schadansprache nach Wellbrock *et al.* (2016). Bei dieser Ansprache werden das Symptom, der betroffene Baumteil, das Alter des Schadens sowie der ursächliche Erreger/Faktor dokumentiert. Eine ausführliche Beschreibung der WZE befindet sich in dem Dokument „Leitfaden und Dokumentation zur Waldzustandserhebung in Deutschland“ (Wellbrock *et al.* 2016). In diesem Dokument werden auch Länderspezifikationen und Abweichungen berichtet.

2.9 Klimadaten

2.9.1 Modellierung der Klimadaten

Für jeden BZE-Punkt wurden in täglicher Auflösung meteorologische Größen interpoliert. Als Basis für die Interpolation standen die in täglicher Auflösung vorliegenden homogenisierten Messreihen des Deutschen Wetterdiensts vom 01.01.1961-31.12.2006 zur Verfügung (Österle *et al.* 2006). Als Interpolationsmethode wurde für die Größen Temperatur (mittel, minimum, maximum), Strahlung, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit die Methode Regression Kriging angewandt. Dazu wurde zunächst für jeden Tag der Zeitreihe eine Regression gegen Höhe ü.N.N., geographische Breite und Länge angepasst. Anschließend wurde die räumliche Autokorrelation der Residuen aus der Regression mittels Variogrammanalyse untersucht und mit der Methode Ordinary Kriging die Werte für die BZE-Punkte abgeleitet. Nähere Details zur Vorgehensweise sind in Ziche & Seidling (2010) beschrieben. Die Interpolation der Tagessummen der Niederschläge wurde abweichend nur mit Ordinary Kriging durchgeführt, da die Einbeziehung eines Höhentrends vereinzelt zu hohen Abweichungen im Alpenraum führte. Auf Basis der tageweise abgeleiteten Werte wurde die FAO-Grasreferenzverdunstung nach Penman-Monteith berechnet (Allen *et al.* 1998).

2.9.2 Ariditätsindex nach de Martonne

Der Ariditätsindex nach de Martonne (AM) (de Martonne 1926) ist ein Maß für die Trockenheit des Standorts wobei $AM = \frac{JN}{(JT+10)}$ und JN = Jahresniederschlagssumme [mm], JT = Jahresmitteltemperatur [°C] und 10 = rechnerische Konstante ist.

2.10 Deposition

Flächendeckende und räumlich detaillierte Eingangsdaten von atmosphärischen Stoffeinträgen in Deutschland liefern die Daten des Umweltbundesamts (Bultjes *et al.* 2011, Gauger *et al.* 2008, Schaap *et al.* 2015). Da die Depositionsdaten des Umweltbundesamts methodisch homogen (Modellsprünge) nur relativ geringe Zeiträume abdecken, war es notwendig, diese mit zeitlichen Rekonstruktionsverfahren für die Deposition zu koppeln. Dies erfolgte mit einer vereinfachten Version des Modells MAKEDEP (Abb. I-2-3) von Alveteg (1998).

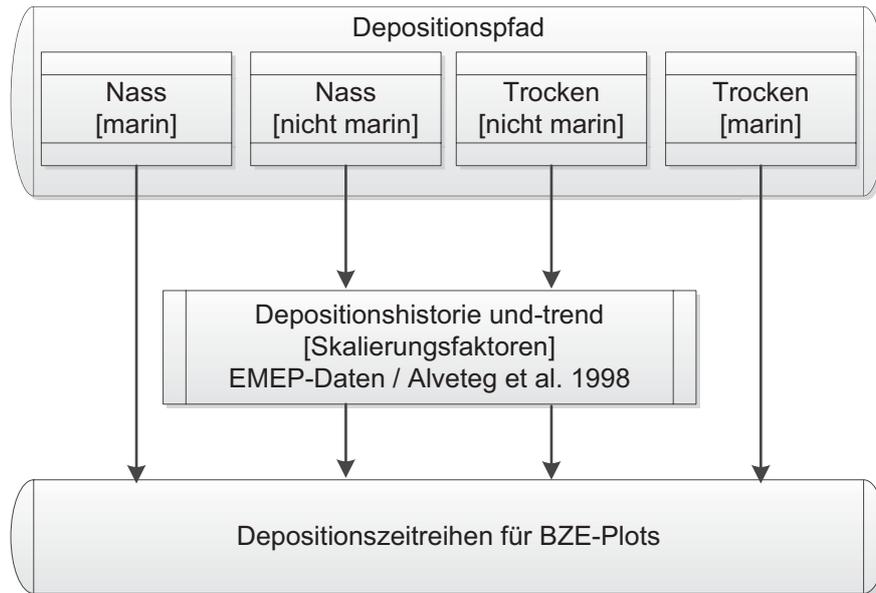


Abb. I-2-3: Flussdiagramm des vereinfachten Modells MAKEDEP zur Entwicklung von Depositionszeitreihen (verändert nach Alveteg *et al.* (1998)).

Die hierfür notwendigen relativen Zeitreihen der Deposition wurden für den Zeitraum von 2000 bis 2013 (methodisch homogene Datensätze) aus den EMEP Daten (UNECE 1979) erstellt und mit den Kurven der Depositionsentwicklung für Mitteleuropa nach Alveteg *et al.* (1998) kombiniert. Diese Depositionszeitreihen liefern zunächst nur Informationen für S-Dioxid, Stickoxide und Ammoniak. Demgegenüber liegen für die langfristige Entwicklung der Emissionen und Deposition von Ca, Mg, K und Chlorid nur sehr wenige Informationen vor. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher lokaler Emissionsquellen, die zur Deposition dieser Elemente beitragen können. Diese Quellen können sich in Abhängigkeit von lokalen und regionalen Faktoren sehr unterschiedlich entwickeln (z.B. Waldbrände, Emissionen aus dem Straßenverkehr, Wüstenstaub oder Kalkungen) (Alveteg 1998).

Tab. I-2-5: Verwendete Depositionstrends bei der Berechnung von Depositionszeitreihen für die verschiedenen Depositionskategorien in Anlehnung an Alveteg *et al.* (1998).

Depositionskategorie	Element	Proportional zur Standardkurve
Trockene und Feuchte Marine	BC ^a , Na ^{+b} , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	konstant
Trockene und Feuchte nicht Marine	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻
	K ⁺ , Cl ⁻	1/3 SO ₄ ²⁻
	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
	NH ₄ ⁺	NH ₄ ⁺

a: BC (basische Kationen) = Ca²⁺, Mg²⁺, und K⁺.

b: Für Nord- und Westeuropa kann angenommen werden, dass Na⁺ kaum bzw. nur sehr lokal aus anthropogenen Quellen stammt und deshalb zumindest in küstennahen Gebieten zu 100 % meeresbürtig ist (Gauger *et al.* 1997). Auch die Untersuchungen von Dämmgen *et al.* (2013) zeigen bei gleichbleibenden Niederschlagsmengen konstante Natriumeinträge für einen längeren Zeitraum.

Langzeituntersuchungen des Depositionsgeschehens zeigen jedoch, dass Ca und Mg zumindest teilweise dem Trend der S-Deposition folgen (Dämmgen *et al.* 2013, Hedin *et al.* 1994, Meesenburg *et al.* 1995). Daher wird vereinfacht angenommen, dass der nicht marine Anteil der Deposition dieser Elemente zumindest zum Teil (gesteuert über den Anteil am Trend der Standardkurve) mit den menschlichen Aktivitäten in Verbindung gebracht werden kann (Johansson *et al.* 1996) und ihre Deposition dem Trend der S-Deposition folgt (Tab. I-2-5). Für K und Chlorid wird ebenfalls ein Einfluss von emissionsmindernden Maßnahmen auf die Stoffeinträge angenommen der jedoch nicht ganz so stark ausgeprägt ist, wie beim S. Beim K ist zusätzlich die starke Beeinflussung durch regionale Quellen zu beachten (Dämmgen *et al.* 2013).

Beispiele für die Anwendung dieses Verfahrens zur Abschätzung von Depositionszeitreihen von N und S sind bei Ahrends *et al.* (2010), Albert & Schmidt (2010) und Hauck *et al.* (2012) zu finden.

Die Abbildungen I-2-4a und I-2-4b zeigen Zeitreihen beispielhaft für Level II-Standorte in Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Sachsen. Die dargestellten Standorte wurden vornehmlich unter der Prämisse ausgewählt, anschaulich Probleme und Sonderfälle zu beschreiben und zu diskutieren. Sind die gemessenen und rekonstruierten Werte parallelverschoben (z.B. Augustendorf SO₄-S-Deposition), dann wird der Trend zwar richtig beschrieben, die standörtlichen Verhältnisse durch die regionalisierten Depositionsraten jedoch mit einem gewissen Fehler wiedergegeben. Dieser Fehler ergibt sich teilweise durch die räumliche Auflösung der Depositionsdaten von 1 x 1 km. Hierdurch können kleinräumliche Einflussfaktoren auf die Deposition, wie z.B. Windgeschwindigkeit (Erismann & Draaijers 2003), Baumart (Augusto *et al.* 2002), Bestandshöhe (de Schrijver *et al.* 2008), Randeffekte (Devlaeminck *et al.* 2005) usw. nur aggregiert oder überhaupt nicht abgebildet werden. Wenn eine rekonstruierte Depositionszeitreihe über den gesamten Zeitraum konstant verläuft (z.B. Solling Mg-Deposition), dann resultiert es daraus, dass bei den Modellierungen von Schaap *et al.* (2015) für diesen Standort die entsprechenden Depositionen zu 100 % als seesalzbürtig ausgewiesen wurden. Entsprechend ergeben sich keine Unterschiede zwischen den Jahren (Tab. I-2-5). Die zeitliche Dynamik der S- und N-Verbindungen wird insgesamt sehr plausibel beschrieben. Dies gilt auch mit einigen Einschränkungen für die basischen Kationen. Insbesondere die K-Depositionen am Standort Klingenthal zeigen die große Bedeutung von regionalen Quellen bei den Einträgen dieses Elements (Dämmgen *et al.* 2013).

Die Depositionswerte wurden für die Landnutzungsklassen Laub-, Nadel- und Mischwald berechnet. Bei der Übertragung auf die Standorte der BZE wurden die Landnutzungsklassen der BZE II verwendet. Diese Vereinfachung erscheint zum einen dadurch gerechtfertigt, dass sich der Zeitpunkt des Übergangs z.B. von einem Nadelwald bei der BZE I in einen Mischwald der BZE II nicht ermitteln lässt. Zum anderen sind die Unterschiede zwischen den Landnutzungsklassen für Wald bei den Depositionsmodellierungen nach Schaap *et al.* (2015) im Vergleich zu den anderen Fehlerquellen als äußerst gering einzustufen.

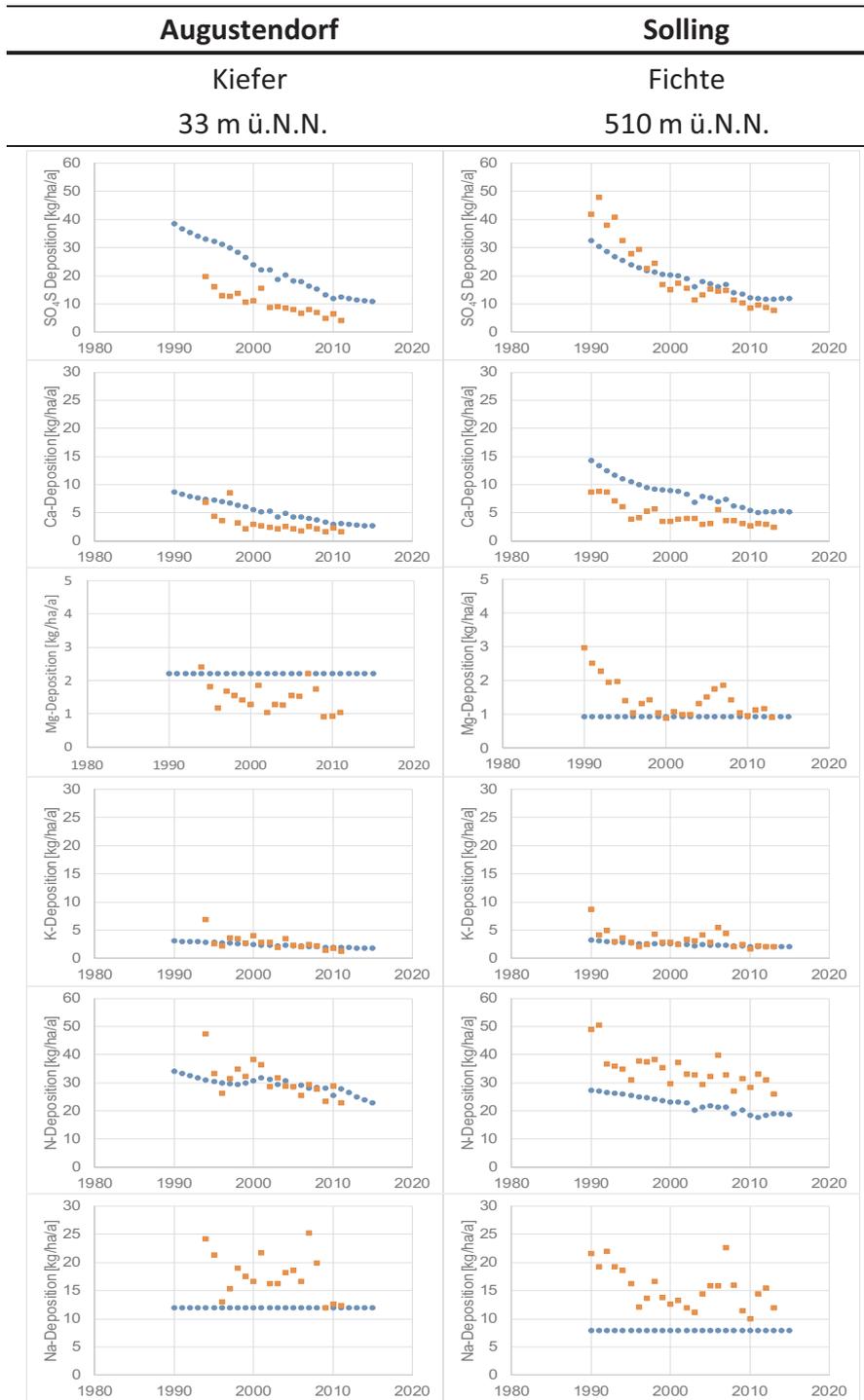


Abb. I-2-4: Vergleich der rekonstruierten Depositionszeitreihen mit „gemessenen“ Gesamtdepositionen auf Level II-Flächen des forstlichen Umweltmonitorings. Grundlage der Rekonstruktionen sind die Depositionsdaten von Schaap *et al.* (2015). ■: Gemessene Deposition; ●: Rekonstruierte Deposition. a: die Gesamtdepositionen wurden nach Ulrich (1994) aus den gemessenen Freiland- und Bestandsdepositionen berechnet.

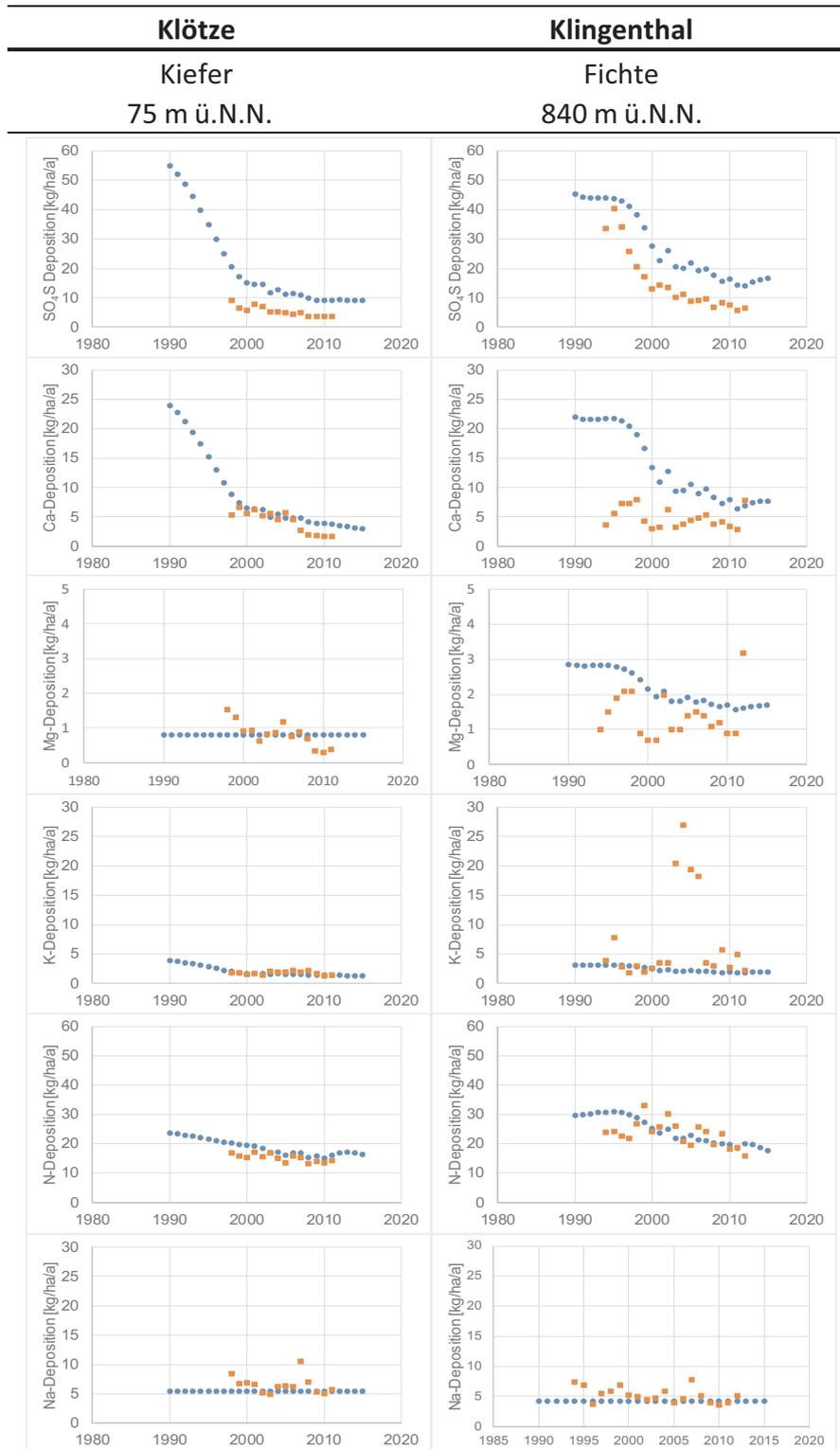


Abb. I-2-5: Vergleich der rekonstruierten Depositionszeitreihen mit „gemessenen“ Gesamtdepositionen auf Level II-Flächen des forstlichen Umweltmonitorings. Grundlage der Rekonstruktionen sind die Depositionsdaten von Schaap *et al.* (2015). ■: Gemessene Deposition; ●: Rekonstruierte Deposition. a: die Gesamtdepositionen wurden nach Ulrich (1994) aus den gemessenen Freiland- und Bestandsdepositionen berechnet.

2.11 Statistik

2.11.1 Wichtungsfaktoren

Zur Herleitung einer flächenrepräsentativen Gesamtaussage ist eine Wichtung der BZE-Punkte entsprechend ihres Waldanteils notwendig. Hintergrund sind Rasterdichten, die vom vorgesehenen 8 x 8 km-Raster abweichen. Zur Ermittlung des Wichtungsfaktors wird der Anteil der Landeswaldfläche an der Bundeswaldfläche berechnet und durch die Anzahl der mit Messwerten belegten BZE-Punkte im jeweiligen Bundesland geteilt (Formel 2-2). Bei dieser Berechnungsmethode wird davon ausgegangen, dass die Punktdichte innerhalb der Länder homogen ist, bzw. dass Inhomogenitäten innerhalb der Länder nicht berücksichtigt werden können.

$$w_l = \frac{A_l}{\sum_{l=1}^{16} A_l} \times \frac{1}{n_l} \quad (2-2)$$

mit

w_l = Wichtungsfaktor der BZE-Punkte im Bundesland l,

A_l = Waldfläche von Bundesland l,

n_l = Anzahl der BZE-Punkte im Bundesland l,

Die Anteile der Landeswaldflächen an der Bundeswaldfläche stammen aus den Corine Landnutzungsdaten 1990 (EEA 2010a) und 2006 (EEA 2010b). Genutzt wurden jeweils die 100 m-Rasterdatensätze. Es wird davon ausgegangen, dass die aus den Corine Landnutzungsdaten ermittelten Waldflächen zwar von den aus den BWIs ermittelten Waldflächen abweichen, die relativen Anteile aber wesentlich geringere und für die Ermittlung der Wichtungsfaktoren tolerierbare Abweichungen aufweisen.

2.11.2 Basisauswertung und Stratifizierung

Im Rahmen der Basisauswertung für die Kapitel 4 bis 7 werden die statistischen Kenngrößen Anzahl, Minimum, Maximum, arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, Standardfehler sowie Perzentile (10., 25., 50. (Median), 75. und 90. Perzentil) für die jeweilige Zielgröße tiefenstufenweise berechnet. In der Regel liegen die Tiefenstufen Auflagehumus, 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm vor. Für einige Zielgrößen wird zusätzlich eine Aggregation von Tiefenstufen durchgeführt z.B. Auflagehumus + Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe oder Gesamtprofil (Auflagehumus und Mineralboden bis maximal 90 cm Bodentiefe).

Die Aggregation von Gehalten erfolgt vorrattsgewichtet (Humusvorrat bzw. FBV). Im Fall von pH-Werten werden diese zunächst delogarithmiert und die gewichtete Aggregation geschieht auf Basis der H⁺-Konzentration.

Neben der Betrachtung des Status der Zielgröße während der BZE II bzw. BZE I erfolgt die Bildung der Differenz zwischen der BZE I und BZE II, die als jährliche Veränderungsrate angegeben wird. Anders als bei der Betrachtung des Status werden bei der Differenz keine Moor- oder organisch geprägten Standorte berücksichtigt (63 Standorte). An einem Großteil der BZE-Inventurpunkte wurden Erhebungen sowohl im Rahmen der BZE I als auch der BZE II vorgenommen, so dass gepaarte Stichproben erzeugt wurden. Für andere Inventurpunkte liegen jedoch keine gepaarten Erhebungen vor. Die BZE-Punkte, für die es keine zwei Erhebungen an identischen Standorten gibt, werden als ungepaart bezeichnet. Die Ermittlung der Differenzen von Werten zwischen der BZE I und BZE II erfolgt für die gepaarte Stichprobe sowie für das Gesamtkollektiv (gepaart und ungepaart). Für das gepaarte Datenkollektiv lässt sich die Differenz zwischen den Werten der BZE I und der BZE II mit einer einfachen Subtraktionsrechnung für jeden einzelnen BZE-Punkt ermitteln. Um die Veränderung pro Jahr zu berechnen, wird der Differenzbetrag durch die vergangene Zeit (in Jahren) zwischen beiden Inventuren dividiert. Für das Gesamtkollektiv erfolgt die Berechnung als Differenzbildung zwischen den Mittelwerten aus allen im Rahmen der BZE I und der BZE II pro Bundesland erhobenen Werten. Um auch hier die Veränderung pro Jahr ermitteln zu können, wird durch die über alle Erhebungen eines Bundeslands gemittelte vergangene Zeit (in Jahren) zwischen den Inventuren dividiert. Anders als bei der gepaarten Stichprobe steht für das Gesamtkollektiv somit maximal ein Wert pro Bundesland (maximal 16 Werte) für die Statistik zur Verfügung.

Bei den statistischen Kenngrößen für den Status und die Differenzen handelt es sich um gewichtete Werte (Formel 2-3), da sie sich auf die gesamte Waldfläche von Deutschland beziehen. Für die Perzentilberechnung werden die Messwerte x_i mit ihren dazugehörigen Wichtungsfaktoren w_i entsprechend ihrer Größe geordnet und mit einem Laufindex versehen. Die Berechnung des Werts y des v -ten Perzentils erfolgt dann nach Formel 2-3:

$$y = \begin{cases} x_1 & , \text{falls } w_1 > pW \\ \frac{1}{2}(x_1 + x_{i+1}) & , \text{falls } \sum_{j=1}^i w_j = pW \\ x_{i+1} & , \text{falls } \sum_{j=1}^i w_j < pW < \sum_{j=1}^{i+1} w_j \end{cases} \quad (2-3)$$

mit

$$W = \sum_{i=1}^n w_i$$

$$p = \frac{v}{100}$$

Die Differenzen werden mit Hilfe des Differenzen-t-Tests mit Gewichtung auf Signifikanz geprüft. Der Status und die Differenz werden als Box-Whisker-Plots in Form von Tiefenprofilen dargestellt.

Die Box (gewichtete Werte) wird durch das untere und obere Quartil (25. und 75. Perzentil) begrenzt und beinhaltet somit 50 % der Daten. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand. Ein durchgehender Strich kennzeichnet den Median während eine Raute zusätzlich das arithmetische Mittel andeutet. Die Whiskers repräsentieren den 1,5-fachen Interquartilsabstand der Daten. Datenpunkte, die außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands liegen, werden in den Tiefenprofilen nicht eingezeichnet. Signifikante Differenzen werden durch einen Stern links neben den Box-Whisker-Plots markiert.

Des Weiteren umfasst die Basisauswertung prozentuale kumulative Häufigkeitsverteilungen der BZE-Werte. Bei den eingezeichneten Linien handelt es sich um die gewichteten Perzentile der BZE I- und BZE II-Daten. Falls ausschließlich BZE II-Daten vorliegen, werden die Perzentile nur dieser Daten verwendet. Die Darstellung der x-Werte erfolgt in der Regel auf der log-Skala.

Der Status und die Differenzen werden außerdem in Form von Karten präsentiert. Die Einteilung richtet sich wiederum nach den gewichteten Perzentilen der BZE I- und BZE II-Daten (bzw. ggf. nur der BZE II-Daten). Zusätzlich erfolgt für einige Zielgrößen eine Bewertung nach AK Standortkartierung (2003). Der Anteil an BZE-Punkten, der sich in einer Perzentil- bzw. Bewertungsklasse befindet, wird angegeben.

Des Weiteren werden die Zielgrößen stratifiziert. Es steht eine Reihe von potenziellen Straten zur Verfügung wie z.B. Bestandstyp, Versauerungstyp, Kalkung. Ziel der Stratifizierung ist es, Einflussgrößen und Ursachen zu erkennen, weshalb es sich um ungewichtete Werte handelt. Die Darstellung erfolgt überwiegend mit Hilfe von Box-Whisker-Plots. Der Mittelwertvergleich erfolgt mittels einer ANOVA. Die Gruppenmittelwerte werden untereinander mit nach Bonferroni korrigierten t-Tests verglichen. Weitere kapitelspezifische statistische Verfahren werden in dem jeweiligen Kapitel erläutert.

Statistische Signifikanz wurde für $p < 0,05$ festgelegt. Im Text werden Ergebnisse als arithmetisches Mittel \pm Standardfehler dargestellt, wenn nicht anders gekennzeichnet. Die statistischen Auswertungen und Abbildungen wurden mit den Programmen R 3.1.2 (R Development Core Team 2015) bzw. SAS 9.4 erstellt. Für die Erstellung der Karten wurden die Geoinformationssysteme ArcGis 10.3.1. for Desktop, QGIS 2.12 und R 3.1.2 verwendet.

2.12 Entwicklung der Datenbank

2.12.1 Grundsatz

Ein bedarfsorientiertes Auswertungskonzept und ein adäquates Datenmanagementsystem sind wesentliche Voraussetzungen für eine sachgerechte und zielführende Auswertung der BZE. Erste Vorarbeiten hierzu wurden im Rahmen des deutschen Level II-Programms und des Verbund-

vorhabens „Entwicklung eines Konzeptes und Durchführung einer Machbarkeitsstudie für die integrierende Auswertung von Daten des forstlichen Umweltmonitorings“ durchgeführt.

In der Vorbereitungsphase zur BZE II wurde ein Konzept der Datenerfassung erarbeitet. In dieser „BZE-Datenbank des Bundes“ sollten die von Bund und Ländern erhobenen Primärdaten erfasst, mit Zusatzinformation verschiedener Quellen zusammengeführt und für die Bundesauswertung verfügbar gemacht werden.

Verschiedene Datenbanksysteme – serverbasiert Oracle und dateibasiert Microsoft Access – sowie Datenmodelle wurden gegenübergestellt. Unter Abwägung der zur Verfügung stehenden Ressourcen fiel die Entscheidung, eine Erfassungsdatenbank auf dem Datenbankmanagementsystem Access 2000 zu programmieren. Diese Erfassungsdatenbank besteht aus mehreren Access Datenbankdateien. Einerseits sind das sog. Datencontainer. Das sind Dateien, die ausschließlich thematische Datentabellen enthalten. Darunter sind auch Metadaten zu verstehen, die in einer gesonderten Datei geführt werden. Andererseits wurde ein Anwendungsprogramm ebenfalls auf Access VBA programmiert. Dieses Programm beinhaltet Benutzeroberflächen sowie Routinen zur Verwaltung und Prüfung der Datenbestände. So wurde erreicht, dass die BZE II-Datenbank sowohl logisch nach Daten und Anwendung als auch nach institutioneller Zuständigkeit zu trennen war.

Accessdatenbankdateien sind für die Aufbereitung großer Datenbestände durch mehrere Personen sowie die zentral organisierte Weitergabe an berechtigte Dritte ungeeignet. Deshalb wurden die Rohdatenbestände am Thünen-Institut in eine Serverdatenbank (PostgreSQL) überführt. Daraus werden sämtliche Rohdaten sowie abgeleitete Informationen und Basisauswertungen über eine Webapplikation verfügbar gemacht. Der Webzugriff auf die Daten ist derzeit berechtigten Gruppen und Personen passwortgeschützt vorbehalten.

2.12.2 Aufbau des Datenmodells

Das Datenschema der BZE II-Datenbank folgt allgemeinen und anerkannten Regeln relationaler sowie normalisierter Datenbanken. Die Tabellen sind thematisch gegliedert und hierarchisch angeordnet. Datentabellen verfügen über einen – wenn erforderlich zusammengesetzten – sog. sprechenden Primär- oder eindeutigen Schlüssel. Zusätzlich wurde in der serverbasierten Auswertungsdatenbank eine fortlaufende Nummerierung kombiniert mit einem Timestamp als Primärindex eingeführt. So ist jeder Datensatz verständlich lesbar und gleichzeitig liegt eine einfache aber handhabbare Form der Versionierung vor.

Neben den Datentabellen gibt es eine Vielzahl sog. Codetabellen. Darin sind nominale, ordinale und z.T. metrische Parameter definiert und mit einem eindeutigen, numerischen Code versehen. Handelt es sich um ordinale oder metrische Größen, werden auch Klassen und Wertebereiche definiert.

Die thematische Gliederung der Datenbank richtet sich nach den Themenkomplexen der BZE II-Arbeitsanleitung. Innerhalb dieser Kapitel sind die Tabellen je nach Erfordernis hierarchisch aufgebaut. Jeder Themenkomplex an sich kann technisch isoliert betrachtet werden, ohne dass zusätzliche Tabellen anderer Themen eingebunden werden müssen.

Die jeweils oberste Hierarchiestufe bildet der Inventurpunkt, welcher durch die eindeutige Nummer beschrieben wird. Nur in Ausnahmefällen – wenn etwa auch Daten der BZE I geführt werden – kommt oberhalb der Punktnummer die Inventurnummer vor. Darunter werden die Datensätze entsprechend des Themas weiter eindeutig gekennzeichnet, etwa durch die Tiefenangaben der Bodentiefenstufen oder fortlaufende Baumnummern.

2.12.3 Datenprüfung, Harmonisierung und Aufbereitung der Auswertungsdatensätze

Die Qualitätskontrolle der Daten wurde in mehreren Stufen realisiert. An erster Stelle stehen dabei die Indizes sowie nach Datentyp und Wertebereich definierte Attribute in Tabellen. Im nächsten Schritt wurden die Datenzeilen auf Vollständigkeit und Übereinstimmung mit vorhandenen Codetabellen überprüft. Anschließend wurde die Konsistenz der Daten innerhalb von Tabellen sowie zwischen interagierenden Tabellen sichergestellt. Das bedeutet z.B., dass die Abfolge von Tiefenstufen im Mineralboden lückenlos vorliegen muss oder dass Datensätze untergeordneter Tabellen in den übergeordneten (Master-) Tabellen definiert sein müssen.

Ein Großteil der Qualitätskontrolle wurde durch programmierte Routinen und Abfragen teilautomatisiert. Dennoch war ein erheblicher Arbeitsaufwand zur inhaltlich-fachlichen Prüfung nötig. Beispielhaft dafür stehen Interaktionen metrischer Variablen, die erst durch fachliche statistische Betrachtung verifiziert werden können.

Der vorläufig letzte Schritt des Datenmanagements bestand in der Aufbereitung einer Auswertungsdatenbank. Hierin werden themenübergreifende Datensammlungen für fachliche Auswertungen in dynamischen Abfragen zusammengestellt und zum Download verfügbar gemacht. Der Zugriff auf diese Daten ist bislang einem eingeschränkten Kreis von Fachleuten zum Zweck der BZE II-Auswertung vorbehalten. Technisch werden die Zugriffsrechte anhand des Rechtesystems von PostgreSQL realisiert.

Im Zuge der Datenaufbereitung waren Harmonisierungen wie z.B. die Umrechnung von bodenphysikalischen und chemischen Daten aus Horizontbeprobungen in einheitliche Tiefenstufen notwendig. Ferner wurden einzelne Parameter aus Messdaten abgeleitet, wie etwa der Gesamt-C aus organischem und carbonatischem C oder der N-Anteil aus gemessenem Nitrat. Des Weiteren wurden Vorratsberechnungen und Aggregationen vorgenommen sowie externe Daten abgelegt und eingefügt. Die Auswertungsdatenbank übernimmt neben der Aufbereitung und Verteilung derzeit auch die Funktion eines BZE-Datenarchivs.