Peter Hartmann, Hermann Buberl, Heike Puhlmann, Jürgen Schäffer, Gabriele Trefz-Malcher, Dietmar Zirlewagen, Klaus von Wilpert

Waldböden Südwestdeutschlands

Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald von 1989 – 1992 und 2006 – 2008

Herausgeber:
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

© 2016
Verlag Kessel
Eifelweg 37
53424 Remagen-Oberwinter
Tel.: 02228-493
Fax: 03212-1024877
E-Mail: nkessel@web.de

Homepage:
www.forstbuch.de
www.forestrybooks.com

Bestellungen an den Verlag richten

ISBN: 978-3-945941-14-0

Autorenanschriften

Dr. Peter Hartmann
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestr. 4
79100 Freiburg im Breisgau

Hermann Buberl
Geoplan - Büro für Umwelttechnik
Oberrieder Straße 3
79117 Freiburg

Dr. Heike Puhlmann
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestr. 4
79100 Freiburg im Breisgau

Prof. Dr. Jürgen Schäffer
Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg (HFR)
Schadenweilerhof
72108 Rottenburg a.N.

Gabriele Trefz-Malcher
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestr. 4
79100 Freiburg im Breisgau

Dr. Dietmar Zirlewagen
Interra - Büro für Umweltmonitoring
St.-Peter-Str. 30
79341 Kenzingen

PD Dr. Klaus von Wilpert
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestr. 4
79100 Freiburg im Breisgau

Vorwort

Böden sind räumlich hochdifferenzierte Naturgebilde, die aufgrund ihrer Struktur vielfältige, auch sich gegenseitig ausschließende Funktionen wie z. B. Luft- und Wasserversorgung gleichzeitig auf kleinstem Raum erfüllen können. Dies gilt insbesondere im Wald, da sich dort die Böden und ihre Struktur über lange Zeiträume, ohne ständige menschliche Einflussnahme durch die Bewirtschaftung (z. B. mechanische Bodenbearbeitung) entwickeln können. Dennoch ist die Funktionalität von Böden auch im Wald durch die Einflüsse von Stickstoffübersättigung und Bodenversauerung beeinträchtigt. Anfang der 1990er Jahre wurde die Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) konzipiert, um diese Störungen zu erfassen. Um menschlich verursachte Bodenveränderungen trennscharf identifizieren und von natürlichen Fluktuationen unterscheiden zu können, muss der Messaufwand hoch sein. Damit kann die BZE nicht mit einer so hohen Rasterdichte durchgeführt werden wie Messnetze mit geringerem Messaufwand.

Mit der ersten Wiederholung der BZE nach 15 Jahren wurde die Fragestellung der BZE deutlich über die Diagnose anthropogen verursachter Bodenveränderungen hinaus erweitert und die BZE zu einem effektiven Instrument der Erhaltung und Regeneration der Bodenqualität entwickelt. Dazu gehört auch, dass die Daten der BZE zur Erfolgskontrolle der Bodenschutzkalkung eingesetzt werden. So ist die BZE zu einer unverzichtbaren Entscheidungs- und Steuerungsgrundlage für Programme zum Erhalt und der Wiederherstellung der natürlichen Bodenvielfalt im Wald als Basis eines vielfältigen Waldbaus und zu einer wesentlichen Voraussetzung des nachhaltigen Erhalts einer standortsangepassten Biodiversität geworden.

Nicht nur statische Bodeneigenschaften werden bei der BZE untersucht, sondern auch Parameter zur Abbildung von komplexen Bodenfunktionen, wie den Stoffaustrag mit dem Sickerwasser, pflanzenverfügbare Wasservorräte, Waldernährung und die Zusammensetzung der Bodenvegetation als Indikator der Biodiversität. Außerdem wurde die Bestandesstruktur an den BZE-Punkten aufgenommen, um eine Verknüpfung zwischen BWI und BZE herzustellen, welche die Einflüsse von Bodenveränderungen und auch der Wechselwirkung zwischen zunehmenden Klimaextremen und Bodeneigenschaften auf Wachstum und Produktivität der Wälder widerspiegeln.

Es ist nicht das Ziel dieses Vorworts, die Vielfalt der Ergebnisse der BZE zu referieren. Die wichtigsten Ergebnisse sind, dass sich die Geschwindigkeit der Bodenversauerung verlangsamt hat und dass diese aber auf gut basenversorgten Standorten noch weiter fortschreitet. Die Bodenschutzkalkung hat die Basenausstattung der Oberböden signifikant erhöht und die Nährstoffversorgung der Bäume stabilisiert. Die Stickstoffsättigung der Waldböden ist landesweit noch hoch, hat aber zwischen BZE 1 und 2 abgenommen. In den Wäldern Baden-Württembergs sind derzeit durchschnittlich 242 t pro ha Kohlenstoff gespeichert, davon 43 % im Boden. Unerwartet ist, dass zwischen BZE 1 und 2 der Bodenkohlenstoffvorrat um durchschnittlich 500 - 700 kg pro ha und Jahr abgenommen hat. Die größte Abnahmerate betraf die Humusauflage, wobei eine Verlagerung von Kohlenstoff in den obersten Mineralboden beobachtet wurde, die aber den Abbau der Humusauflage nicht vollständig kompensiert. Auf gekalkten Flächen war der Trend zum Abbau der Humusauflage nicht signifikant

verstärkt, aber die Zunahme des Kohlenstoffvorrats im Oberboden signifikant höher. Im Gegensatz zu den anderen Regionen haben in der Oberrheinischen Tiefebene die Bodenkohlenstoffvorräte zugenommen, was durch die Unterbrechung der Kohlenstoffmineralisierung während sommerlichen Trockenphasen erklärt wird.

Die BZE bietet mit ihrer umfangreichen und fundierten Datenbasis eine außerordentliche Grundlage für die Bewertung des Status Quo der Waldböden und in Kombination mit der ersten Erhebung wichtige Einblicke in die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte. Sie ist eine unersetzbare Grundlage für viele waldbaulichen Themen. Eine nachhaltige Bewirtschaftung und Erhaltung eines stabilen Gesamtökosystems Wald ist ohne das Wissen über den Boden nicht möglich!

Danksagung

Ein Umweltmessnetz wie die BZE, in dem mit hohem technischem und wissenschaftlichem Aufwand qualitätsgesicherte Umweltdaten erhoben und ausgewertet werden, ist kosten- und arbeitsintensiv. Dies wird unterstrichen durch die Tatsache, dass vom Beginn der Außenaufnahmen bis zur Erstellung des umfassenden Abschlussberichts 10 Jahre benötigt wurden.

Für die Bereitstellung der nötigen Haushaltsmittel für den überwiegenden Teil der Kosten danken wir dem Staatswaldbetrieb des Landes Baden-Württemberg (ForstBW) sehr herzlich. Außerdem danken wir der EU, welche im Rahmen des EU-weiten LIFEplus Programms BioSoil ca. 25 % der Kosten übernommen hat.

Federführend in der Konzeption der BZE im Wald ist das Institut für Waldökosysteme des Thünen-Instituts in Eberswalde (TI). Das TI hat die deutschland- und EU-weite Methodenharmonisierung vorangetrieben und deren Ergebnisse in einem umfangreichen Methodenhandbuch dokumentiert. Außerdem hat das TI die zentrale Datenhaltung für den deutschlandweiten Datensatz unterstützt. Hierbei seien Herrn Prof. Dr. Andreas Bolte sowie Frau Dr. Nicole Wellbrock (Bundesinventurleiterin Bodenzustands-erhebung) und deren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die Organisation und die Administration gedankt. Ohne den regen Gedanken- und Erfahrungsaustausch im Rahmen der vom TI organisierten Bund- und Ländertreffen stünde die BZE 2 nun nicht auf solch soliden Füßen und sie bietet somit die Basis für weitere Diskussionen über die notwendige Durchführung der nächsten Bodenzustandserhebungen.

Die Durchführung der Probenahmen, der Analysen und Auswertungen oblag für die Böden Baden-Württembergs der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA). Ganz besonders danken möchten wir für die verlässliche und unermüdliche Arbeit von Jörg Niederberger und Ulf Marks, die die Feldaufnahmen, die Bodenansprachen, Vermessungsarbeiten und Probennahmen durchgeführt und unterstützt haben. Die dabei über 2700 beprobten Messtiefen sind vom Labor der Abteilung Boden und Umwelt getrocknet, gesiebt, gemahlen, aufgeschlossen, analysiert, entwässert, gewogen und validiert worden, um so die umfangreiche und durch Ringanalysen qualitätsgesicherte Datenbank dieser Auswertung bereitzustellen. Die Hauptarbeit erbrachten dabei Martina Fehrenbach, Rosalinde Zimmermann, Marion Schubert, Angelika Jakob, Melanie Strecker, Karl-Heinz Rommler und Monika Rotzinger. Besonders erwähnen wollen wir den außerordentlich engagierten Einsatz von Alexander Schengel, der neben den bodenphysikalischen Messungen gemeinsam mit Benedikt Burget unter der Leitung von Martin Lukes die Neuentwicklung einer Messapparatur zur zeitsparenden Messung von Wasserretentions- und Wasserleitfähigkeitsfunktionen entwickelt, gebaut, getestet und in die Messroutine eingeführt hat.

Sehr viel Administratives musste nebenbei auch geregelt werden. Herzlichen Dank an Roland Hoch für seinen unermüdlichen Kampf gegen die Mühlen der Verwaltung!

Zuletzt danken wir allen nicht namentlich genannten Kolleginnen und Kollegen, die durch ihre Mitarbeit und Beratung bei der Erstellung und Korrektur der Texte und der Abbildungen das vorliegende Buch erst ermöglicht haben.

1 EINLEITUNG 1

1.1 Ziele 1

1.2 Durchführung und Repräsentanz 3

1.3 Methodische Schwerpunkte der BZE2 3

1.4 BZE im Vergleich zu Bodenmessnetzen anderer Ressorts 7

2 METHODEN 9

2.1 Aufnahmeverfahren im Gelände 9

2.1.1 Bodenkundliche Geländeaufnahme 9

2.1.2 Probenahme 9

2.2 Laboranalyseverfahren 10

2.3 Sonderuntersuchungen 10

2.3.1 Zusatzerhebung Befahrungsschäden 10

2.3.2 Zusatzerhebung Feinwurzeln 14

2.3.3 Zusatzerhebung Multi-Step-Outflow-Versuche (MSO) zur Bestimmung der hydraulischen Bodeneigenschaften 14

2.4 Statistische Auswertung und Ergebnisdarstellung 17

3 ZUSTAND DER WALDBÖDEN 19

3.1 Allgemeine Standortbeschreibung 20

3.1.1 Klima 20

3.1.2 Bestockung 22

3.1.3 Feinwurzelverteilungen 22

3.1.4 Ausgangssubstrate 24

3.1.5 Bodenklassen 26

3.1.6 Humusformen 27

3.1.7 Kalkungsmaßnahmen 27

3.2 Bodenphysikalische Charakterisierung 29

3.2.1 Textur 29

3.2.2 Steingehalt 29

3.2.3 Trockenrohdichten 29

3.2.4 Schätzwerte der physikalischen Eigenschaften aus der Profilansprache 30

3.2.5 Feinbodenvorräte 33

3.2.6 Physikalische Eigenschaften der Humusauflagen 33

3.2.7 Kennwerte der Wasserbindung und gesättigte Wasserleitfähigkeit 35

3.2.8 Schätzung bodenhydraulischer Funktionen mittels Pedotransferfunktionen PTF 36

3.2.9 Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum nFKWe (=nWSK WReff) 40

3.3 Status der Versauerung und der Nährstoffversorgung 44

3.3.1 Bodenreaktion 44

3.3.2 Austauscherbelegung 46

3.3.3 Tiefenprofile der Basensättigung 57
3.3.4 1:2 - Extrakte und Grundwasserbelastungspotenziale 60
3.3.5 Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte 63
3.3.6 Phosphor- und Schwefelgehalte 63
3.3.7 C/N- und C/P- Verhältnisse 65
3.4 Elementvorräte in Humus, Feinboden und Skelett 68
3.4.1 Vorräte an organischem Kohlenstoff 68
3.4.2 Stickstoffvorräte 70
3.4.3 Schwefelvorräte 71
3.4.4 Phosphorvorräte 71
3.4.5 Kurz- und mittelfristige Nährstoffversorgung 74
3.4.6 Mittel- bis langfristige Nährstoffversorgung (königswasserextrahierbare Elementvorräte) 77
3.5 Belastung mit Schwermetallen 80

4 TRENDANALYSEN ZWISCHEN BZE1 UND BZE2 87

4.1 Veränderungen der Humusauflage 89
4.2 Trend der Bodenreaktion 91
4.3 Trend der austauschbaren Kationen 91
4.3.1 Austauschkapazität 91
4.3.2 Kationenbelegung 92
4.3.3 Basensättigung 92
4.4 Trend der Stoffkonzentrationen im wässrigen 1:2-Extrakt 96
4.5 Trend der Stoffvorräte 97
4.5.1 Kurz- bis mittelfristige Nährstoffvorräte 97
4.5.2 Kohlenstoffvorräte 97
4.5.3 Stickstoffvorräte 100
4.5.4 C/N-Verhältnisse 101
4.5.5 Schwefelvorräte 103
4.5.6 Phosphorvorräte 104
4.5.7 Schwermetalle 104

5 BESTANDESERNÄHRUNG 107

5.1 Messnetz der Ernährungsinventur 107
5.2 Nährelementgehalte in Nadeln und Blättern 108
5.2.1 Fichte 108
5.2.2 Tanne 121
5.2.3 Buche 125
5.3 Zusammenfassende Übersichten zu Nährelementmängeln bei Fichte, Tanne und Buche 129
5.4 Zusammenhangsanalysen zwischen Nährelementwerten und Standortseigenschaften 130
5.4.1 Modellgüte 131

5.4.2 Modellergebnisse Fichte 132
5.4.3 Modellergebnisse Buche 134

6 STRATEGIEANSÄTZE UND ENTWICKLUNG VON PRAXISKONZEPTEN 137

6.1 Regionalisierung von Waldbodendaten 137
6.1.1 Regionalisierungsmodelle 137
6.1.2 Regionalisierungsverfahren 137
6.1.3 Stratifizierung 139
6.1.4 Hilfsvariablen 140
6.1.5 Regionalisierung von Bodeneigenschaften 140
6.1.6 Zusammenfassende Bewertung der Regionalisierungsmodelle 154
6.2 Abschätzung der durchschnittlichen Bodenlösungszusammensetzung 155
6.2.1 Zielsetzung und Methodenansatz 155
6.2.2 Verwendung von Selektivitätskoeffizienten zwischen Austauscherbelegung und Bodenlösung 156
6.2.3 Direkte Korrektur der 1:2-Extrakte mit Sickerwasserkonzentrationen 158
6.2.4 Schlussfolgerungen 160
6.3 Wälder als Kohlenstoffspeicher 162
6.3.1 Ziele und Methodik der Aufnahme der oberirdischen Holzbiomassen 162
6.3.2 Kohlenstoffvorräte im gesamten Ökosystem Wald 164
6.3.3 Regionalisierung der Veränderung des Kohlenstoffvorrats zwischen BZE1 und BZE2 167
6.3.4 Zusammenfassung und Fazit 170
6.4 Bodenschutzkalkung schützt den Wald und regeneriert Bodenfunktionen 174
6.4.1 Warum sind Waldböden so sauer? 174
6.4.2 Kalkung bringt den Stoffkreislauf ins Gleichgewicht 175
6.4.3 Kalkung belebt Waldböden wieder 176
6.4.4 Kalkung stabilisiert Waldernährung 177
6.4.5 Trinkwasservorsorge durch Kalkung 178
6.4.6 Nutzen und Risiken der regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung 179
6.4.7 Herleitung des Kalkungsbedarfs zur Regeneration des natürlichen Bodenzustandes 180
6.4.8 Fazit 181
6.5 Waldböden als ökologisch diverse Pflanzenstandorte 182
6.5.1 Reaktionszahl 182
6.5.2 Stickstoffzahl 184
6.5.3 Feuchtezahl 184
6.5.4 Lichtzahl 186
6.6 Bodenverformung durch Befahrung 187
6.6.1 Ergebnisse der feldbodenkundlichen Verformungsschadensansprache 187
6.6.2 Räumliche Verteilung der Verformungsschäden 188
6.6.3 Statistische Bewertung der Verformungsschäden 190
6.6.4 Relevanz von Verformungsschäden 190
6.6.5 Schlussfolgerung 192

6.7 Zusammenhangsanalyse zwischen Feinwurzel-Tiefenverteilung und Standortseigenschaften 192
6.7.1 Messung und statistische Auswertung 192
6.7.2 Ergebnisse der Zusammenhangsanalysen 195
6.7.3 Regressionsanalysen für das β-Modell 200
6.7.4 Diskussion der Zusammenhänge zwischen Feinwurzeltiefenverteilung und Standortsparameter 202
6.7.5 Fazit 203
6.8 Abschätzung und Bewertung von Trockenstress-Szenarien 203
6.8.1 Parametrisierung der Wasserhaushaltsmodelle 204
6.8.2 Ergebnisse der Modellierungen 205

7 ZUSAMMENFASSUNG WICHTIGER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN 209
7.1 Zustand und Entwicklung der Waldböden im Mittelpunkt des Monitorings 209
7.2 Bestandesernährung 213
7.3 Waldumbau und Bodenschutzkalkung zeigen Wirkung 214
7.4 Schwermetallvorräte nehmen in der Humusauflage ab - Verlagerung in den Oberboden? 215
7.5 Kohlenstoffspeicher Wald 215
7.6 Stickstoffsättigung ist landesweit hoch, nimmt jedoch ab 216
7.7 Befahrungsschäden auf nahezu einem Drittel der Waldfläche 217
7.8 Feinwurzelverteilungen als Abbild der Anpassungsstrategie der Bäume 218
7.9 Plausible Simulation von Trockenstress und Stauwasser 218
7.10 Entwicklung von Umweltvorsorgestrategien auf der Basis von BZE und anderen Monitoringsystemen 219

8 REGIONALE DARSTELLUNG DER BZE2-ERGEBNISSE 223
8.1 Waldbodenregionen Baden-Württembergs 223
8.1.1 Oberrheinisches Tiefland 223
8.1.2 Schwarzwald 226
8.1.3 Odenwald 231
8.1.4 Neckarland 233
8.1.5 Schwäbische Alb 237
8.1.6 Südwestdeutsches Alpenvorland 240
8.2 Beschreibung der Leitprofile 244
8.2.1 Allgemeine Informationen zum Standort 244
8.2.2 Profilansprache 245
8.2.3 Chemische und physikalische Parameter 247
8.2.4 Leitprofile 250

9 LITERATURVERZEICHNIS 321

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 327

1 Einleitung

Böden sind eine wertvolle Ressource. Sie erfüllen wichtige Funktionen im Naturkreislauf, z. B. als Filter und Puffer gegenüber Schadstoffeinträgen, als Speicher von Niederschlägen sowie als Lebensgrundlage für Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen. Die für Existenz und Funktionen der Wälder grundlegende Eigenschaft der Waldböden ist ihre hohe Speicherkapazität für Wasser und Nährstoffe. Dadurch werden witterungsbedingte Extremsituationen überbrückt und gleichmäßig günstige Rahmenbedingungen für die Produktivität und Gesundheit der Wälder aufrechterhalten. Diese selbstregulierende Ausgleichsfunktion der Böden geht auf ihre Eigenschaft als Ionenspeicher in Kombination mit ihrer porenreichen Struktur zurück. Deshalb stehen diese Eigenschaften bei der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) im Vordergrund. Neben dieser Ernährungs- und Habitatfunktion bestehen aber eine Anzahl von Funktionen und Wirkungen, die in angrenzende Ökosphären hineinwirken und so dem Umweltschutz im Allgemeinen dienen, wie z. B. die Filterung von Schadstoffen im Boden- und Sickerwasser oder die Metabolisierung klimaschädlicher Spurengase wie beispielsweise Methan. Die BZE ist ein Gemeinschaftsvorhaben von Bund und Ländern im Rahmen des forstlichen Umweltmonitorings. Die fachwissenschaftliche, bundesseitige Betreuung der BZE obliegt dem Institut für Waldökologie und Waldinventuren des Thünen-Instituts. In Baden-Württemberg werden die BZE-Standorte von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) betreut und ausgewertet.

1.1 Ziele

Im Rahmen der bundesweiten BZE werden der Zustand und die Veränderung von Waldböden, Vegetation, Kronenzustand und der Waldernährung an 304 Stichprobenpunkten in Baden-Württemberg untersucht. Diese Punkte liegen auf einem 8x8 km-Raster im Wald. Auf einer Unterstichprobe im 16x16 km-Raster fand 2006 die Probenahme zur europäischen Bodenzustandserhebung (BioSoil) und bis 2008 die Aufnahme der übrigen Probepunkte statt. Die 304 Stichprobenpunkte (BZE und BioSoil) sind identisch mit den Probepunkten der Waldzustandserhebung (WZE). Bei der BZE werden länderübergreifend harmonisierte Methoden bei Probenahme und Analytik verwendet, die in einer Arbeitsanleitung (BMELV, BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG 2006) veröffentlicht sind.

Die Aufnahmen zur BZE werden im 15-jährigen Turnus, die Aufnahmen zur Waldernährung in Baden-Württemberg im 5-jährigen und diejenigen zur WZE jährlich wiederholt. Die Außenaufnahmen der ersten BZE fanden von 1987-1993 statt. Im ersten Bundesbericht (WOLFF & RIEK 1997) und Landesbericht (BUBERL et al. 1994) sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Die BZE soll zuverlässige, flächenrepräsentative und bundesweit vergleichbare Beiträge zum Zustand und der zeitlichen Entwicklung der Waldökosysteme und ihrer Funktionen liefern. Dabei werden prioritär Aspekte der Waldböden, aber auch der Waldbäume (Kronenzustand) und der Hydrosphäre (Risiken für Grund- und Quellwasser) beleuchtet. In jedem Fall dienen die dargestellten Messgrößen als Indikatoren für die Integrität von Ökosystemfunktionen und deren Entwicklung.

Themenschwerpunkte sind hierbei:

- Räumliche Muster der die Ökosystemfunktionen bestimmenden chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften
- Veränderungen von Bodeneigenschaften im Zeitraum zwischen BZE1 und BZE2
- Ursache-Wechselwirkungen zwischen Umwelteinflüssen und Waldzustand
- Waldböden als Filter und Puffer für Wasser
- Böden als Quelle der Waldernährung
- Böden als Kohlenstoffspeicher
- Einfluss des Klimawandels auf den Bodenzustand
- Ableitung von Strategien zum Bodenschutz und der nachhaltigen Nutzung von Wäldern (z. B. Bodenschutzkalkung).

Die Ziele der BZE fußen auf den sechs paneuropäischen Kriterien und Indikatoren zur Beschreibung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung im Sinne der Helsinki-Resolutionen von 1993.
Durch neue Erkenntnisse, inhaltliche Entwicklungen und Anforderungen im politischen Raum sind bei der BZE2 neue Ziele und Schwerpunktsetzungen hinzugekommen, die auf der Basis der BZE1 nicht umgesetzt werden können, da die BZE1 hierfür methodisch nicht ausgelegt war. So stehen bei der BZE2 die Stickstoffeutrophierung und die Entwicklung der Kohlenstoffspeicherung in den Waldböden sehr viel stärker im Zentrum des Interesses als die Bodenversauerung und ihre Folgen, die bei der BZE1 die zentrale Fragestellung war. Außerdem wird viel stärker als bei der BZE1 auf Wechselwirkungen zwischen Bodenprozessen und der Waldbewirtschaftung abgehoben. Dabei stehen Fragestellungen wie:

- Wirkung der Bodenschutzkalkung auf Bodenfunktionen und Waldernährung, sowie die Wirkung des Waldumbaus auf den Bodenzustand
- Ableitung von Indikatoren für eine nachhaltige Forstwirtschaft und die
- Auswirkung des Klimawandels auf Bodenfunktionen

im Vordergrund. Die Aktualität neu hinzugekommener Ziele sowie organisatorische/methodische Aspekte sprechen für einen nicht zu langen zeitlichen Abstand zwischen den einzelnen BZE-Aufnahmekampagnen. Zwischen den beiden ersten Aufnahmen liegt mit geringfügigen Abweichungen unter den Bundesländern eine 15-jährige Zeitspanne. An einigen Probenahmepunkten ist diese Zeitspanne kürzer, wenn bei der BZE1 Teilkollektive nach dem vereinbarten Zeitfenster nachgearbeitet wurden wie z. B. in Baden-Württemberg die BZE-Punkte in Laubholzbeständen. In Baden-Württemberg war ursprünglich die BZE nur in Nadelholzbeständen geplant. Angesichts der im Durchschnitt der Standorte langsamen Veränderungstendenz des chemischen Bodenzustandes und dessen raum-/zeitlicher Variabilität ist es kaum möglich einen zeitlichen Entwicklungstrend sicher auf der Basis von nur zwei Aufnahmeterminen zu diagnostizieren. Im 15-Jahresturnus der BZE wird dann die dritte Aufnahmeperiode im Jahr 2021 beginnen. Auf der Basis einer dritten Aufnahme können dann zeitliche Trends sehr viel sicherer interpretiert werden als bisher mit zwei Aufnahmekampagnen.

1.2 Durchführung und Repräsentanz

Das Datenmaterial wurde an den in Abbildung 1-1 dargestellten Probenahmepunkten erfasst, wobei die im 16x16 kmRaster erhobenen BioSoil-Punkte eine Verdichtung des 8x8 km-Rasters der BZE darstellen.
Die Repräsentanz in Bezug auf die Waldfläche wird in Tabelle 1-1 für die einzelnen Wuchsgebiete gezeigt. Dabei zeigt sich, dass die prozentuale Verteilung der Probepunkte auf die Wuchsgebiete überwiegend mit geringen Abweichungen (± 2 %) der Waldflächenverteilung entspricht. Ausnahme hiervon ist der Schwarzwald, der mit 6 % gegenüber dem Waldflächenanteil überrepräsentiert und die Schwäbische Alb, die mit 7 % unterrepräsentiert ist. Damit kann die BZE in Baden-Württemberg trotz des vergleichsweise niedrigen Stichprobenumfangs von 304 Messnetzpunkten für die Waldfläche als flächenrepräsentativ angesehen werden.
Die niedrige Messnetzdichte, welche inhaltliche Stratifizierung des Datenmaterials und multivariate statistische Auswertungen einschränkt, wurde durch den hohen Probenahme- und Messaufwand der BZE erzwungen. Der Mess- und Aufnahmeumfang der BZE ist mit 245 Parametern sehr hoch. Davon sind 35 % überwiegend im Feld aufgenommene beschreibende Parameter und Kopfdaten, 15 % humuschemische Daten, 17 % mineralbodenchemische Daten, 4 % am Skelett austauschbar sorbierte Elemente, 6 % Bodenlösungsdaten, 11 % physikalische Zustandsgrößen des Mineralbodens, 4 % bodenhydraulische Daten und 8 % Daten zu Waldernährung und Wurzelverteilung. Bei durchschnittlich 6 untersuchten Tiefenstufen und 304 Bodenprofilen summieren sich diese Aufnahmen und Laboranalysen einschließlich der zur Qualitätssicherung notwendigen Doppelbestimmungen zu ca. 500.000 Einzelaufnahmen und Laboranalysen. Hinzu kommt, dass die Probenvorbereitung für einzelne Analyseverfahren außerordentlich aufwendig ist und oft aus mehreren Arbeitsschritten zusammengesetzt ist. Dies hat zur Folge, dass der Material- und Personalaufwand, und damit die Kosten der BZE mit knapp 1.5 Mio. € sehr hoch ist.

1.3 Methodische Schwerpunkte der BZE2

Innerhalb der BZE2 gibt es verschiedene Arbeitsschwerpunkte, die helfen sollen die Daten der BZE integrierend auszuwerten, das heißt, die einzelnen Messgrößen prozessorientiert

Tabelle 1-1: Waldflächenanteile und Messnetzpunkte der BZE der baden-württembergischen Wuchsgebiete.

Wuchsgebiet	*Waldfläche*		*Messnetzpunkte BZE*	
	km²	%	n	%
Oberrheinische Tiefebene	80 784	5.8	20	6.6
Odenwald	64 037	4.6	12	3.9
Schwarzwald	401 923	28.8	102	33.6
Neckarland	393 809	28.3	90	29.6
Baar-Wutach	52 731	3.8	3	1.0
Schwäbische Alb	237 453	17.0	32	10.5
Südwestdeutsches Alpenvorland	162 627	11.7	45	14.8
Summe:	**1 393 364**	**100 %**	**304**	**100 %**

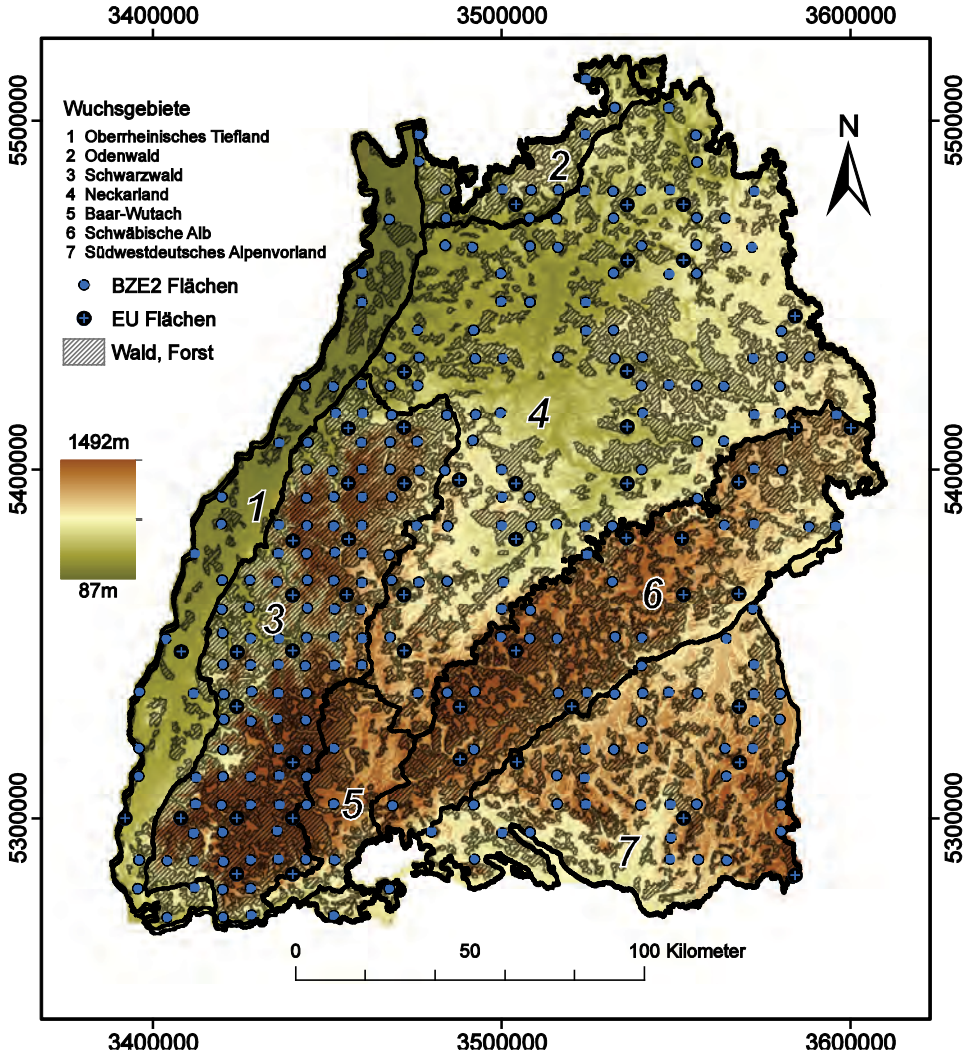


Abbildung 1-1: Übersicht über die Lage der Untersuchungsflächen der BZE2 in Baden-Württemberg, die Wuchsgebietsgrenzen (1 = Oberrheinisches Tiefland, 2 = Odenwald, 3 = Schwarzwald, 4 = Neckarland, 5 = Baar-Wutach, 6 = Schwäbische Alb, 7 = Südwestdeutsches Alpenvorland) sowie die Flächen mit forstlicher Nutzung. Im Hintergrund liegt ein digitales Höhenmodell.

so zu verknüpfen, dass Ökosystemfunktionen bewertet werden können:

- Bodenphysikalische Zustands- und Transferparameter
- Wasserhaushalt
- Bodenkohlenstoffhaushalt
- Regionalisierung
- Aufnahme der Bestandesstruktur und biometrischen Baumdaten
- Waldernährung

Die BZE1 wurde sehr stark auf die Thematik Bodenversauerung fokussiert. Deshalb wurde folgerichtig der Schwerpunkt der Aufnahmeintensität auf die exakte Messung intensiver

Messgrößen wie Stoffkonzentrationen gelegt. Hilfsgrößen, wie sie vor allem für die Berechnung von Feinbodenmengen und Elementvorräten benötigt werden, wurden überwiegend durch feldbodenkundliche Aufnahmen und Schätzungen bestimmt. Bei der BZE 2 wurde sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene Wert darauf gelegt, dass die zur Berechnung von Stoff- und Feinbodenmengen benötigten bodenphysikalischen Größen so weit als möglich gemessen und nicht ausschließlich geschätzt wurden. So wurde der Steingehalt und die Trockenrohdichte des Feinbodens, weitestgehend mittels der vergleichsweise aufwendigen Volumenersatzmethode oder mittels Stechzylinderentnahme bestimmt. In Baden-Württemberg wurde die Messung bodenphysikalischer Größen gegenüber den Vereinbarungen auf Bundesebene im Bereich der Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsmodellierung intensiviert. So wurde zusätzlich zur Texturbestimmung im Feld durch die Fingerprobe in den Tiefenstufen 10-30 cm und 30-60 cm Tiefe die Korngrößenzusammensetzung des Feinbodens mittels eines gemischten Nasssiebungs- / Laserbeugungsverfahrens bestimmt. Außerdem wurden in den Tiefen 10-14 cm und 30-34 cm je fünf 100 ml-Stechzylinder entnommen, an denen Retentions- und Leitfähigkeitsfunktionen bestimmt wurden. Diese charakterisieren das Wasserspeicher- und Wasserleitfähigkeitsverhalten der Böden und sind die zentralen bodenhydraulischen Eigenschaften, welche die Voraussetzung für die Parametrisierung von Wasserhaushaltsmodellen und die Berechnung von Wasserverfügbarkeit und Wassertransport in Böden sind. Damit wurde in Baden-Württemberg die Voraussetzung für die Einbeziehung von Bodeneigenschaften in die Berechnung von durch Klimawandel veränderter Wasserverfügbarkeit und des Trockenstressrisikos in besonderem Maß geschaffen. Im gleichen Kontext wurde zusätzlich zu der tiefenstufenweisen Schätzung von Dichteklassen der Feinwurzeldichte in jedem Bodenprofil in einem 20 cm breiten Streifen bis 1 m Tiefe der Tiefengradient der Feinwurzeldichte durch Auszählung in 5x5 cm Zählquadraten quantitativ bestimmt. Dies dient in Verbindung mit einer Zusammenhangsanalyse mit bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften der verbesserten und detaillierteren Abschätzung der Verteilung der Wurzelwasseraufnahme über das Bodenprofil und ist damit ebenfalls eine wichtige Voraussetzung für eine zutreffende Modellierung des Wasserhaushalts an den BZE-Profilen.

Als ein weiterer, eminent praxisrelevanter Auswertungsschwerpunkt sollte die Bodenstrukturveränderung durch Befahrung an den acht im 10 m-Radius um das zentrale Bodenprofil angeordneten Satelliten-Punkten erhoben werden. Dafür wurde an jedem Satelliten ein Spatenstich ausgehoben und an diesem unnatürliche Gefügeveränderungen (z. B. Kohärenz oder Plattigkeit des Gefüges) und nicht durch die lokale natürliche Bodenwasserführung erklärbare Hydromorphiemerkmale als Indikatoren von Befahrungsfolgen angesprochen. Die Grundlage dafür war eine modifizierte Version des von GAERTIG et al. (2000) entworfenen feldbodenkundlichen Anspracheschlüssels zur Differenzierung von Befahrungsschäden.

Die ober- und unterirdische Kohlenstoffspeicherung in Waldökosystemen kann ein wesentlicher Beitrag zur Mitigation des Klimawandels sein. Aus diesem Grund wurde einerseits an jedem BZE-Punkt ein Klon einer Bundeswaldinventur-Aufnahme (BWI) angelegt, um die im aufstockenden Bestand gespeicherte Kohlenstoffmenge zu schätzen, sowie eine detaillierte Aufnahme der im Bestand zum Aufnahmezeitpunkt vorhandenen stehenden und liegenden Totholzmasse $\geq$ 5 cm durchzuführen. Außerdem wurden bei der Humusaufnahme die in-

nerhalb des Stechrahmens bzw. des Probenahmebohrers liegenden Totholzteile ≤ 5 cm separat zur Humusprobe eingesammelt und gravimetrisch deren Trockenmasse als Proxy des Kohlenstoffgehalts bestimmt. Dadurch wurde die Aufnahmelücke zwischen oberirdischer Bestandesmasse bzw. Totholzmasse und Humus bzw. Mineralbodenhumus vollständig geschlossen. Damit ist eine wesentlich detailliertere Erfassung der im Wald gespeicherten Kohlenstoffmengen möglich als mit den bisherigen, nicht zwischen BWI und BZE gekoppelten Aufnahmen. Die methodische Verknüpfung von BZE und BWI stellt einen ersten und wichtigen Schritt zu integrierenden Auswertungsansätzen dar, in denen die Auswirkung von umweltbedingten Bodenveränderungen auf Wachstum, Gesundheit und Produktivität der Wälder quantifiziert werden soll.

Von entscheidender Bedeutung ist die räumliche Flächenrepräsentanz der BZE-Daten. Durch die hohe kleinräumige Variabilität von Bodendaten sind die Bodendaten der BZE in ihrer Gültigkeit auf eine räumliche Reichweite von wenigen Metern um die Entnahmestelle der Bodenproben beschränkt (KÖHL et al. 2008). Gilt es nun, flächenhafte Modelle zu erstellen (z. B. für Kalkungsmodelle, Wasserhaushaltsmodelle), wird eine Regionalisierung der Bodendaten benötigt. Kleinräumige Vorhersagen dieser Bodendaten für konkrete Areale zwischen den Rasterpunkten der BZE sind nicht trivial und keinesfalls durch einfache Interpolation aus den Bodeninformationen der umgebenden Rasterpunkte lokal abzuleiten. Regionalisierung umfasst die multivariate Schätzung von Bodendaten in den Leerräumen zwischen den Messpunkten der BZE, in denen keine gemessenen Bodendaten vorliegen. Bodendaten werden eben nicht an den Messnetzpunkten benötigt, sondern auf der gesamten Landesfläche, weil dort die Waldbewirtschaftung und Maßnahmen des Ökosystemmanagements gesteuert und umgesetzt werden müssen. Dabei ist es nicht nur von Bedeutung, dass Bodendaten geschätzt werden, sondern vor allem mit welcher statistischen Sicherheit diese Schätzung möglich ist. Nur wenn das Risiko für Fehlschätzungen vertretbar niedrig ist, können Strategien und Managementmaßnahmen entwickelt werden, die auf diesen Schätzdaten beruhen. Somit ist es opportun, die Daten der BZE in Kombination mit anderen vorhandenen Daten zur Entwicklung von abgesicherten Regionalisierungsmodellen heranzuziehen.

Zum Schutz der Bodenqualität wurden in Baden-Württemberg seit 1983 in allen Waldbesitzarten Bodenschutzkalkungen mit dem Ziel durchgeführt, die aktuellen Säureeinträge zu neutralisieren und so einer weiteren Bodenversauerung und dem irreversiblen Verlust von Bodenqualität entgegen zu wirken. Als Erfolg einer konsequenten Luftreinhaltepolitik konnten in den vergangenen Jahren die Säureeinträge auf einem Großteil der Landesfläche soweit zurückgeführt werden, dass eine weitere Bodenversauerung nur noch sehr langsam verläuft oder sogar ganz gestoppt wurde. Tatsächlich verbleibt jedoch durch die Bodenversauerung eine depositionsbedingte Altlast, die Waldökosysteme und ihre Funktionen nach wie vor belastet. Es besteht also trotz der Reduktion von Säuredepositionen ein Sanierungsbedarf, um die natürlichen Funktionen der Waldböden wiederherzustellen. Zur effizienten und dauerhaften Regeneration essenzieller Bodenfunktionen bedarf es daher eines langfristigen Kalkungskonzeptes, das nicht nur die aktuellen Säureeinträge neutralisiert, sondern auch die im Boden gespeicherten und schädlichen Säuremengen abbaut. Mit Hilfe der detaillierten Daten der BZE und Regionalisierungsmodellen besteht die Möglichkeit und Chance, durch ein standortsdifferenziertes und kleinflächig geplantes Kalkungsprogramm

die natürlichen Bodenqualitäten und Bodenfunktionen langfristig wiederherzustellen. Dieses Programm ist Bestandteil der umfassenden Strategie von ForstBW zum Nachhaltigkeitsmanagement und im Merkblatt zur regenerationsorientierten Bodenschutzkalkung erläutert (v. WILPERT et al. 2013).

Über die an die BZE gekoppelte ernährungskundlichen Waldzustandserhebung (vormals Immissionsökologische Waldzustandsinventur, IWE) lassen sich zum einen zeitliche Trends in der Bestandesernährung als auch deren Zusammenhänge mit standortspezifischen Parametern ableiten. Die Konzentrationen der Nährelemente in den Nadeln und Blättern von zufällig gewählten Bäumen auf jedem BZE-Plot geben Auskunft über Mangelsituationen oder Versorgungsoptima und lassen sich in Zusammenhang mit Standortseigenschaften und Klimatrends in Verbindung bringen. So besteht mit der BZE ein wichtiges Routinesystem zur Überwachung der Waldernährung und zum frühzeitigen Erkennen von Korrekturbedarf sowie bewirtschaftungs- und umweltbedingten Engpässen.

1.4 BZE im Vergleich zu Bodenmessnetzen anderer Ressorts

Nicht nur zu anderen Messnetzen des Forstressorts bestehen inhaltliche Bezüge der BZE, die eine methodische Verknüpfung der Messnetze notwendig machen, sondern auch zu den Bodenaufnahmen, die in anderen Fachbereichen oder auf überregionaler Integrationsebene (z. B. EU) durchgeführt werden. So dienen die Bodenerhebungen im Bereich des Umweltressorts (LUBW), die aus zufällig verteilten Basismessstellen (BDF I) und wenigen Intensivmessflächen (BDF II) bestehen, vorwiegend der Erhebung von Schadstoffgehalten (Schwermetalle und persistente Organika). Das Basismessnetz besteht aus 33 repräsentativen Standorten, die nach den einheitlichen Vorgaben der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) in 10-jährigen Abständen untersucht werden. Diese verteilen sich auf die Landnutzungsformen Acker, Grünland und Wald. Dagegen sind die Aufnahmen der BZE hauptsächlich auf die im vorherigen Kapitel dargestellten Ziele als Grundlage für das Ökosystemmanagement und die Anpassung der Wälder an sich verändernde Umweltbedingungen ausgerichtet. Durch die unterschiedliche inhaltliche Ausrichtung der ressortgebundenen Bodenmessnetze ergänzen sich diese in komplementärer Weise.

Auf überregionaler Ebene (Bund, EU) definieren die Anforderungen der Politikberatung und der internationalen Berichterstattung die inhaltliche Ausrichtung der Bodenmessnetze. Hier liegt der Fokus aktuell hauptsächlich im Bereich der Klimafolgenforschung und Klima-Berichtserstattung. Da Klimaeffekte großräumige Phänomene sind, interessiert auf EU-Ebene (z. B. BioSoil-Programm) weniger die kleinräumige Variation des Bodenzustands als großräumige EU-weite Trends. Folgerichtig wird auf EU-Ebene die Rasterpunktdichte mit 16x16 km auf ¼ der Rasternetzweite in Deutschland herabgesetzt. In Baden Württemberg werden die Messnetzpunkte des um 4x4 km gegenüber dem hier verwendeten 8x8 km Netz verschobenen EU-Messnetzes als Verdichtung verwendet (Abbildung 1-1), um eine verbesserte räumliche Repräsentanz zu erreichen. Um dies zu ermöglichen wurden einige Messungen, die auf EU-Ebene mit abweichender Methodik gefordert waren, auf den EU-Punkten zusätzlich mit der bundesdeutschen Methodik durchgeführt.

2 Methoden

Die Feld- und Labormethoden wurden in der Bund-Länder-Arbeitsgruppe BZE vereinbart und in der Arbeitsanleitung zur BZE2 des BMELV (2006) geregelt. Dabei wurde hinsichtlich der Labormethoden Bezug auf das Handbuch Forstliche Analytik (kurz HFA (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK 2009)) genommen. Im Folgenden werden neben einer Kurzdarstellung der anleitungskonformen Methoden im Wesentlichen die in Baden-Württemberg angewandten, z. T. abweichenden Methoden geschildert.

2.1 Aufnahmeverfahren im Gelände

2.1.1 Bodenkundliche Geländeaufnahme

Die Koordinaten der Profile wurden mit Garmin 60 csx GPS eingemessen bis eine befriedigende Genauigkeit (i. d. R. < 2 m) erreicht war. Zusätzlich zur Klassenbildung bei den Geländeerhebungen, wie z. B. Hangneigung, wurden gemessene Daten wie Inklination und Exposition erhoben.

2.1.2 Probenahme

2.1.2.1 Humus

Die Beprobung wurde je nach Humusmächtigkeit mit einem Stechrahmen oder einem Murach´schen Wurzelbohrer durchgeführt und die Probenahme dokumentiert. Die L- und Of–Lage wurden gemeinsam, die Oh–Lage getrennt beprobt. Zusätzlich zu den vorgeschriebenen Proben wurden an jedem Beprobungspunkt Äste und Zapfen, die innerhalb der Probe waren und einen Durchmesser kleiner oder gleich 5 cm hatten, in einer gesonderten Tüte gesammelt, um den gesamten mittel- bis langfristigen Kohlenstoffvorrat in der Auflage besser zu erfassen.

2.1.2.2 Mineralboden

Um eine Kontinuität der Daten im Tiefenprofil zu gewährleisten, wurde bei der Beprobung des Mineralbodens, wie bei der BZE1, auf eine Satellitenbeprobung verzichtet (vgl. BUBERL et al. 1994). In den BZE–Tiefenstufen erfolgte die Beprobung bis 60 cm Tiefe bei geringeren Skelettgrößen bis Grus und Skelettanteilen < 10 % mittels 200 cm^3 Stechzylindern, um eine volumengerechte Probe für die bodenchemischen und bodenphysikalischen Parameter (Trockenrohdichte, Skelettgehalt) zu erhalten. Bei den Probenahmen wurde darauf geachtet die gesamte Tiefenstufe zu repräsentieren. Bei höheren Skelettgehalten und dem Vorhandensein von Grobskelett kam eine Volumenersatzmethode zur Anwendung. Dabei wurden je nach Skelettgröße zwischen einem und sechs Liter Material aus der Profilwand entnommen, die Entnahmestelle wurde nach vorne abgedeckt und auf die entsprechende Höhe mit

Styroporkugeln (Isoself-Isoliermaterial) aufgefüllt, wobei die Füllmenge mit Hohlmaßen gemessen und dokumentiert wurde. Die Repräsentativität des Verfahrens wurde vor Ort eingeschätzt. War diese nicht gegeben, wurde der Grobskelettgehalt, der nicht durch die Entnahmevolumina repräsentativ erfassten größeren Steine zusätzlich am Profil geschätzt.
Die Probenahme unterhalb 60 cm Tiefe erfolgte durch Schlitzproben bzw. unterhalb der Profiltiefe mit einem Pürckhauer-Bohrer.

2.2 Laboranalyseverfahren

Die im Folgenden dargestellten Analyseverfahren entsprechen den in der Arbeitsanleitung für die BZE2 (BMELV 2006) vorgegebenen Methoden, die im Detail im Handbuch Forstliche Analytik (kurz HFA (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK 2009)) beschrieben sind (Tabellen 2-1 bis 2-4). In Tabelle 2-5 sind Unterschiede in der Laboranalytik zwischen BZE1 und BZE2 dargestellt.

2.3 Sonderuntersuchungen

Zusätzlich zu den obligaten Untersuchungen, die bundesweit durchgeführt wurden, sind in Baden-Württemberg zusätzliche Untersuchungen zu den Themen Befahrungsschäden, Feinwurzelverteilungen und hydraulische Eigenschaften des Mineralbodens durchgeführt worden, deren Methoden im Folgenden kurz dargestellt werden.

2.3.1 Zusatzerhebung Befahrungsschäden

Diese Untersuchungen wurden bei der Profilansprache an den Satelittenflächen durchgeführt. An jedem Satellitenpunkt wurde mittels eines Spatens ein ca. 250 cm³ großer Quader aus dem Boden bis ca. 5 cm Bodentiefe gehoben. An diesem Quader wurden, nach einem von GAERTIG et al. (2000) entwickelten Schlüssel die Befahrungsschäden visuell erhoben (siehe Tabelle 2-6). Bei Böden mit einem natürlichen Kohärentgefüge wurde bei der Einstufung des Befahrungsschadens vor allem auf plattige Strukturen und auf die Festigkeit des Kohärentgefüges abgehoben, vgl. auch SCHÄFFER et al. (2012). Neben dem primären Gefügetyp wurden auch Anzeichen von Bodenschadverdichtung aufgenommen, beides in Intervallgrenzen von 5 % Anteilen. Des Weiteren wurden Hydromorphiemerkmale angesprochen, wobei nur oxidative Merkmale berücksichtigt wurden. Reduktionsfarben als Folge einer Bodenschadverdichtung sind an vielen Standorten nicht von gesteinsbürtigen Färbungen unterscheidbar und wurden daher nicht aufgenommen. Bei erkennbaren Rückegassen wurde der Punkt (auch für die Humusbeprobung) nach BZE–Handbuch verlegt.
Der Intensitätsgrad der Verformungsschäden wurde durch die Kombination der Gefügeanteile sowie der Ausprägung von oxidativen Hydromorphiemerkmalen entsprechend dem Schema in Abbildung 2-1 bewertet. Die Klassen „kein“ oder „geringer Befahrungsschaden“ stimmen mit dem Ansatz von GAERTIG et al. (2000) überein. Davon abweichend wurde innerhalb der Klasse IV das Vorhandensein stecknadelkopfgroßer Rostflecken in Kombination mit nur 10 % an Primärstruktur als Übergang zwischen „mäßiger“ und „signifikanter“ Schädigung definiert. Punkte ohne Rostfleckung bei gleichzeitiger Strukturklassifikation V (< 10 % Primärstruktur) wurden ebenfalls als „signifikant“ geschädigt definiert. Bei gleichzei-

tigem Auftreten von Hydromorphiemerkmale wurden „schwere“ bis „extreme“ Befahrungsschäden diagnostiziert.

Tabelle 2-1: Laboranalysen zur Untersuchung der Humusproben.

Vorbereitung	***Kapitel im HFA***
Trocknung: bei 60°C	HFA 1.2.1
Vorbehandlung: Anteile > 2 cm wurden aussortiert Der Rest wurde in einer Scheibenschwingmühle mit Achateinsatz gemahlen	-
Bodenphysikalische Untersuchungen	***Kapitel im HFA***
Humusvorrat: Wägung der Anteile < 2 cm	HFA 2.4
Bodenchemische Untersuchungen	***Kapitel im HFA***
pH-Wert in H_2O	HFA 3.1.1.2
pH-Wert in 1 M KCl	HFA 3.1.1.4
pH-Wert in 0.01 M $CaCl_2$	HFA 3.1.1.7
pH-Messung: Einstab-Glaselektrode Fa. Metrohm (Eichung pH 4.00 und 7.00)	
AKe: Austausch mit 0.1 M $BaCl_2$-Lösung Kationen-Messung: ICP-OES Fa. Varian radial	HFA 3.2.1.9
Königswasser-Aufschluss unter Rückfluss Geräte-Aufschluss: SMA12 Fa. Behr Messung: ICP-OES Fa. Varian axial	HFA 3.3.3
Organ. Kohlenstoff und Stickstoff: Messung: Elementaranalysator Fa. LECO bei 950°C	HFA D31.1.2.1 und D58.1.2.1

Tabelle 2-2: Laboranalysen zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der Mineralbodenproben.

Vorbereitung	***Kapitel im HFA***
Trocknung: bei 40°C	HFA 1.2.1
Vorbehandlung: Vorzerkleinerung mit einem Holzhammer	-
Bodenphysikalische Untersuchungen	***Kapitel im HFA***
Skelettfraktionen: Siebdurchgang über Siebe 63 – 20 – 6.3 und 2 mm Messung: Grobfraktionen nach mechanischer Säuberung über Wägung Fraktion 6.3-2 mm nach Waschen und Trocknen über Wägung	-
Feinbodenanteil: Siebdurchgang durch 2 mm-Trapezsieb Fa. Retsch	HFA 1.3.2
Trockenraumdichte: TRD = Trockenraumdichte der Gesamtprobe TRD_{FB} = Trockenraumdichte des Feinbodens unter Berücksichtigung des Skelettanteils Zur Ergänzung fehlender oder Ersetzung nicht plausibler Werte für TRD_{FB} wurde eine lineare Regression durchgeführt. Die verwendeten Prädiktoren wurden gewählt, da sie für alle Profile und Messtiefen lückenlos vorhanden sind: $\log_{10}(TRD_{FB})$ = 0.0234 • log(Messtiefenmitte) – 0.0031 • Skelett(2-63 mm, geschätzt) – 0.0016 • Skelett(> 63 mm, geschätzt) + 0.0009 • Ton + 0.1417 • dB(geschätzt) – 0.0028 • C_{org} Das Regressionsmodell erreicht eine zufriedenstellende Güte mit einem R^2 von 0.58 und ergänzt die Tiefenverläufe der TRD_{FB} im Einzelfall plausibel.	HFA 2.2
Feinbodenvorrat	HFA 2.3
Textur: Messung: Schluff- und Tonanteile über Laserbeugung mit der Analysette 22 der Fa. Fritsch aus der Fraktion < 63 µm aus der Siebanalyse. Sandanteile über Siebanalyse. Da die Laserbeugung die Tonanteile unter-, die Schluffanteile überschätzt, wurde ein Korrekturfaktur angewandt, der über Regression aus 293 Datenpaaren bestimmt worden war (TREFZ-MALCHER et al. 2010). Für Ton ist dies 2.0928, für fU 0.5663, mU 0.7124 und gU 1.1202.	HFA 2.5 (Anlehnung an DIN ISO 11277)

Tabelle 2-3: Laboranalysen zur Untersuchung der chemischen Eigenschaften der Mineralbodenproben.

Bodenchemische Untersuchungen	*Kapitel im HFA*
pH-Wert in H_2O	HFA 3.1.1.2
pH-Wert in 1 M KCl	HFA 3.1.1.4
pH-Wert in 0.01 M $CaCl_2$	HFA 3.1.1.7
pH-Messung: Einstab-Glaselektrode Fa. Metrohm (Eichung pH 4.00 und 7.00)	
AKe: Austausch mit 1 M NH_4Cl –Lösung (nur carbonatfreie Böden)	HFA 3.2.1.1
AKt: bei Böden mit pH(H_2O) > 6.2 mit 0.1M $BaCl_2$-Lösung bei pH 8.1	HFA 3.2.1.2
AKe Skelett mit 1 M NH_4Cl-Lösung	HFA 3.2.1.10
AKe-Messung Kationen: ICP-OES Fa. Varian radial	
Königswasser-Aufschluss unter Rückfluss Geräte-Aufschluss: SMA12 Fa. Behr Messung: ICP-OES Fa. Varian axial	HFA 3.3.3
Wässriger 1:2-Extrakt Messung: Kationen: ICP-OES Fa. Varian axial Messung: Anionen: Ionenchromatograph 761 Fa. Metrohm Messung: DOC und NH_4: kolorimetrisch mit Autoanalyzer Fa. Skalar DOC: nach UV-Aufschluss und Ausblasen des gelösten CO_2 über Entfärbung einer Phenolphthaleinlösung bei 550 nm NH_4: als blaugrüner Indophenol-Komplex bei 660 nm	HFA 3.2.2.1
Oxalat-Extrakt: Messung: ICP-OES Fa. Varian radial	HFA 3.2.3.1
Organ. Kohlenstoff und Stickstoff: Messung: Elementaranalysator Fa. LECO bei 950°C	HFA D31.1.1.1 D58.1.1.1
Organ. Kohlenstoff: in carbonatischen Böden (pH(H_2O) > 6.2): Messung: bei 1250°C a) gesamter C-Gehalt und b) nach Zerstörung der organischen Substanz im Muffelofen bei 550°C der carbonatische C-Gehalt. Aus der Differenz der Messungen bei 1250°C wurde der organische C-Gehalt berechnet.	HFA D31.2.1.3

Tabelle 2-4: Laboranalysen zur Untersuchung der Nadel-Blatt-Proben.

Vorbereitung	*Kapitel im HFA*
Trocknung: bei 60°C	HFA 1.2.1
Mahlen: in einer Schlagkreuzmühle Fa. Janke & Kunkel	-
Physikalische Untersuchungen	***Kapitel im HFA***
Blatt- und Nadelgewicht: Wägung der Anteile < 2 cm	HFA B2.2 und B2.3
Chemische Untersuchungen	***Kapitel im HFA***
Druckaufschluss mit HNO_3 Geräte-Aufschluss: SMA12 Fa. Behr; Messung: ICP-OES Fa. Varian axial	HFA 3.2.1
Organ. Kohlenstoff und Stickstoff: Messung: Elementaranalysator Fa. LECO bei 950°C	HFA D31.1.3.1 und D58.1.3.1

Tabelle 2-5: Unterschiede in den Laboranalytischen Verfahren zwischen BZE1 und BZE2.

Methode	*Unterschiede*
pH-Werte	Da bei der BZE2 das Verhältnis Einwaage zu Lösung 1:5, bei der BZE1 1:2.5 war, ergeben sich leichte, aber gerichtete Unterschiede, die beim Vergleich beider Erhebungen berücksichtigt werden müssen (Fortmann und König unveröffentlicht). Entsprechend den vergleichenden Untersuchungen müssen von den Werten der BZE2 für die Humusauflage in H_2O 0.071, in KCl 0.046 pH-Einheiten und im Mineralboden in H_2O 0.061 und in KCl 0.06 pH-Einheiten abgezogen werden, wenn beide Inventuren miteinander verglichen werden. Somit sind im Kap 3.3.1 die unkorrigierten Werte und im Kap. 4.2 die korrigierten Werte dargestellt.
Kohlenstoff und Stickstoff	BZE1: Elementaranalysator Fa. Heraeus bei 950°C
Kohlenstoff bei carb. Böden	BZE1: Verbrennung in einem Wösthoff-Gerät (Carmhomat) bei 600°C und Auffangen des aus der org. Substanz entstandene CO_2 in einer definierten NaOH-Lösung. Über die Herabsetzung der elektrischen Leitfähigkeit durch das Na_2CO_3 wurde der organische C-Gehalt bestimmt (keine Neuberechnung bei Vergleichen).

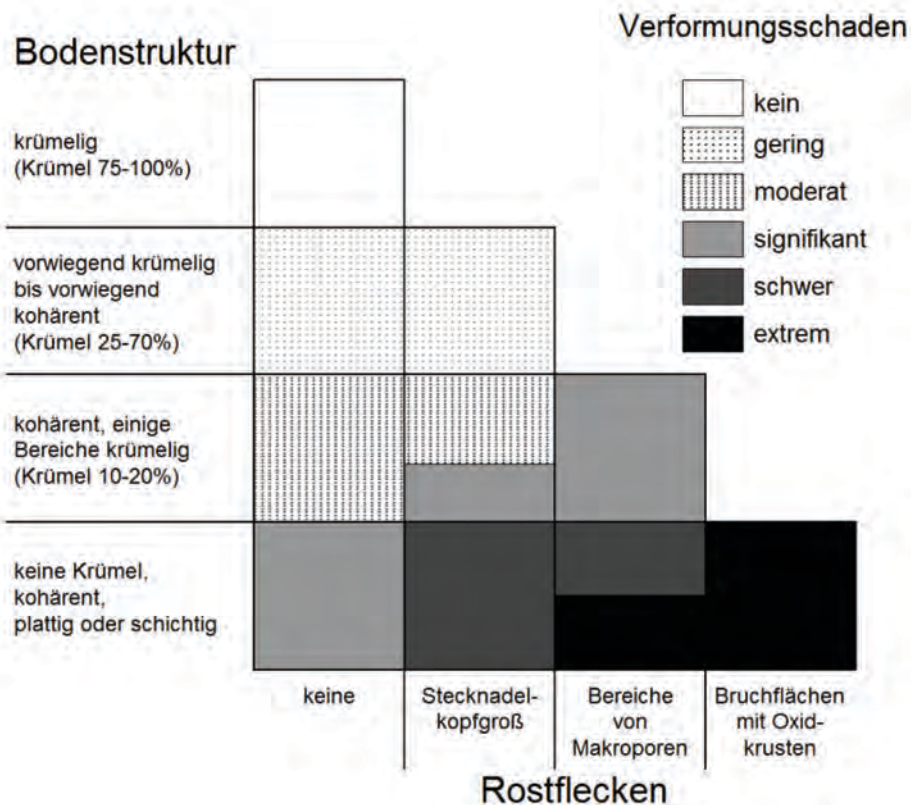


Abbildung 2-1: Bewertungsschema für Befahrungsschäden im Oberboden. Die Klassifikation der Bodenstruktur ist exemplarisch für primär krümeliges Gefüge dargestellt.

Tabelle 2-6: Schlüssel für die Bestimmung der Gefügeformenklasse. Verbale Beschreibung ist getrennt für die Aggregatgefügeformen (Krümel-, Subpolyeder- und Polyedergefüge) und die nicht aggregierten Gefügeformen (Kohärent- und Einzelkorngefüge) aufgeführt. Die Gefügeformklasse wurde basierend auf den Prozentanteilen des natürlich vorkommenden, standortstypischen „Primärgefügetyps“ definiert.

Klasse	***Primärgefügetyp***		***Anteil Primärgefügetyp***
	Aggregiert	***Nicht aggregiert***	
	Krümelig (oder subpolyedrisch, polyedrisch)	*Kohärent- oder Einzelkorngefüge*	
I	Krümelgefüge	Kohärent- / Einzelkorngefüge	75 – 100 %
II	vorwiegend krümelig bis kohärent	vorwiegend Kohärent- / Einzelkorngefüge bis Platten- oder Schichtgefüge	55 – 70 %
III	krümelig bis überwiegend kohärent	Kohärent- / Einzelkorngefüge bis überwiegend Platten- oder Schichtgefüge	25 – 50 %
IV	kohärent, einige Bereiche krümelig	Platten- oder Schichtgefüge, einige Bereiche Kohärent- oder Einzelkorngefüge	10 – 20 %
V	keine Krümel, vollständig kohärent	kein Kohärent- oder Einzelkorngefüge, vollständig Platten- oder Schichtgefüge	< 10 %

2.3.2 Zusatzerhebung Feinwurzeln

Da die Feinwurzeln ein wichtiger ökologischer Indikator sind, wurden die Wurzeldurchtritte von Feinwurzeln (< 2 mm) an der Profilwand auf einem für das Profil repräsentativen Streifen von 20 cm Breite und 100 cm Tiefe (falls möglich) mit Hilfe eines Zählrahmens in 5x5 cm großen Quadraten gezählt. Aus diesen Werten wurden die horizontweisen Feinwurzeldichten abgeleitet und weiterführende statistische Auswertungen durchgeführt.

2.3.3 Zusatzerhebung Multi-Step-Outflow-Versuche (MSO) zur Bestimmung der hydraulischen Bodeneigenschaften

Die hydraulischen Eigenschaften der Böden, also deren Fähigkeit Wasser zu speichern und zu leiten, bestimmen maßgeblich die Verfügbarkeit des Bodenwassers und damit das Risiko von Wassermangel an einem Standort. Für Waldböden liegen bisher nur wenige systematische Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften, insbesondere der Wasserspeicher- und der Wasserleitfähigkeit, vor. Die BZE2 bot die Möglichkeit, die hydraulischen Kennfunktionen – Wasserretention und Wasserleitfähigkeit – zu erfassen und in Baden-Württemberg eine bundesweit einmalige Datenbank der bodenhydraulischen Eigenschaften von Waldböden zu erstellen.
Herkömmliche Verfahren zur Messung der bodenhydraulischen Eigenschaften im Labor sind sehr zeit- und arbeitsaufwändig und deswegen nicht für Routineauswertung im Rahmen von Monitoring-Programmen geeignet. Um die Messungen im Zeitrahmen der BZE2 durchführen zu können, entwickelten wir eine Versuchsanlage, mit der eine schnelle und weitgehend automatisierte Bestimmung der Wasserspeicherfähigkeit und Wasserleitfähigkeit mit Hilfe von Auslaufversuchen möglich ist (Abbildung 2-2). Hierbei wird an wassergesättigte Proben mit Hilfe einer Vakuumpumpe ein stufenweiser Unterdruck angelegt und die resultierende Entwässerung der Bodenproben (Auslauf aus der Bodenprobe und Entwicklung der Saugspannung in der Probe) kontinuierlich gemessen und geloggt. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus findet sich in PUHLMANN et al. (2009).

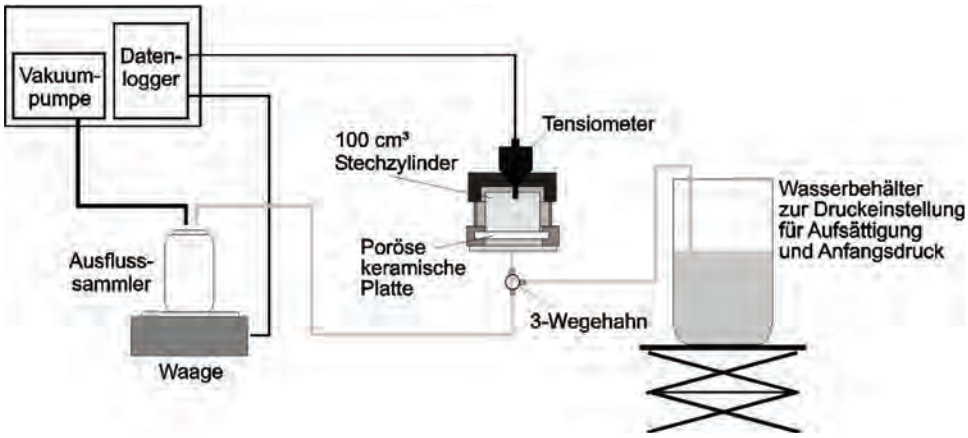


Abbildung 2-2: Auslaufapparatur zur simultanen Bestimmung der Retentions- und der ungesättigten Leitfähigkeitskurve.

Das Unterdruckregime (d. h. die Dauer und die Höhe der angelegten Druckstufen) wurde in Abhängigkeit von der Bodenart variiert. Details zur Optimierung der Druckregime im Hinblick auf den Informationsgehalt der im Versuch gewonnenen Messungen sind PUHLMANN et al. (2009) zu entnehmen. In allen Druckregimen nehmen die Unterdrücke unterhalb der keramischen Platte von -5 hPa bis -500 hPa während des MSO-Experiments ab, aber die Gesamtdauer des Experiments sowie die Höhe und Dauer der einzelnen Druckstufen variiert zwischen den verschiedenen Druckregimen.

Aus der gemessenen Zeitreihe des Ausflusses und dem Wassergehalt in der Bodenprobe bei Versuchsende (gemessen mittels Luftpyknometrie) wurde das integrale Wasservolumen in der Bodenprobe zu jedem Messzeitpunkt berechnet. Standardmäßig wurde an allen Proben, die während des MSO-Versuchs weniger als die Hälfte des entwässerbaren Volumens abgaben, ein zusätzlicher Wassergehaltswert im Drucktopf bei -900 hPa bestimmt, um die Form der Retentionskurve im trockenen Bereich besser abzubilden.

Aus den gemessenen Auslauf-Zeitreihen (sowie dem daraus abgeleiteten Wasservolumen in der Bodenprobe) und der Saugspannung können die bodenhydraulischen Kenngrößen über eine sogenannte inverse Parameteroptimierung geschätzt werden. Hierfür wird der Laborversuch mit Hilfe eines Bodenwasserströmungsmodells simuliert, welches die gemischte Form der eindimensionalen Richards-Gleichung verwendet. Zur Beschreibung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der Wasserretention wird das parametrische Modell von MUALEM (1976) und VAN GENUCHTEN (1980) in einer modifizierten Version von VOGEL et al. (2001) verwendet. Ein Optimierungsalgorithmus (in unserem Fall der Annealing-Simplex-Algorithmus; vgl. PUHLMANN et al. 2009) bestimmt die unbekannten Bodenparameter, indem die Abweichung zwischen simulierten und beobachteten Zeitreihen der Zustandsgrößen minimiert wird. Die Optimierungsroutine verändert in einem iterativen Prozess schrittweise die Bodenparameter und reduziert dabei die Abweichungen, bis ein festgelegtes Konvergenzkriterium (z. B. die Reduzierung der Abweichung in zwei aufeinanderfolgenden Iterationen) erreicht wird. Details zum verwendeten Optimierungsalgorithmus und den Zielfunktionen für die Parameteroptimierung enthält PUHLMANN et al. (2009).

Zur Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften wurden an den Bodenprofilen der BZE2 in zwei Bodentiefen (10-14 cm, 30-34 cm) jeweils 5 ungestörte Bodenproben (100 ml-Stechzylinder) genommen, wenn der Steingehalt in der jeweiligen Beprobungstiefe kleiner 20 Vol % geschätzt wurde. Insgesamt wurden an 180 Profilen Stechzylinderproben gewonnen und mittels MSO-Versuchen ausgewertet, davon an 159 Profilen in beiden Beprobungstiefen, an 19 Profilen nur in 10-14 cm Tiefe und an 2 Profilen nur in 30-34 cm Tiefe. Weitere 46 Profile wurden mit herkömmlicher Methodik (Sandbetten und Drucktöpfe) analysiert. An 83 Profilen war eine Entnahme ungestörter Stechzylinder nicht möglich.

Entsprechend der am Profil angesprochenen Bodentextur wurden die Proben mit einem der vier definierten Druckregime entwässert. 41 % aller Proben entfielen auf das Druckregime BC1 (Sand- und Normallehme, Sand- und Lehmschluffe), 46 % in BC2 (Tonschluffe, Lehm- und Schlufftone, Ton- und Schlufflehme), 8 % in BC3 (Lehm- und Schluffsande) und 5 % in BC4 (Reinsande). Abbildung 2-3 zeigt beispielhaft gemessene Zeitreihen der Saugspannung (obere Grafik) und des kumulierten Ausflusses (mittlere Grafik) sowie des aus dem kumulativen Ausfluss abgeleiteten Wasservolumens in der Bodenprobe (untere Grafik) für jedes der vier verschiedenen Druckregime.

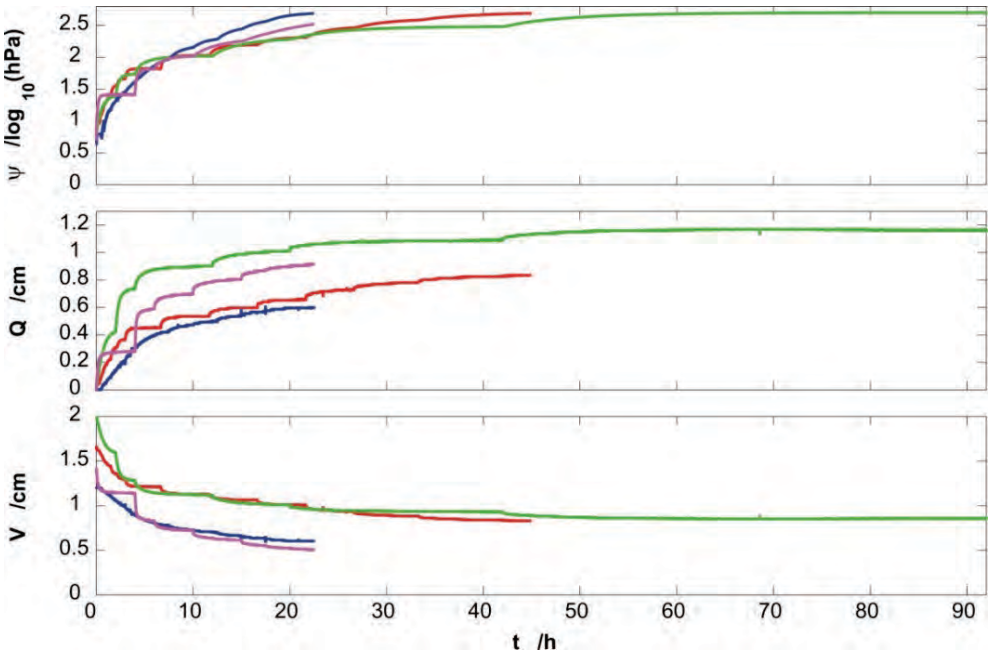
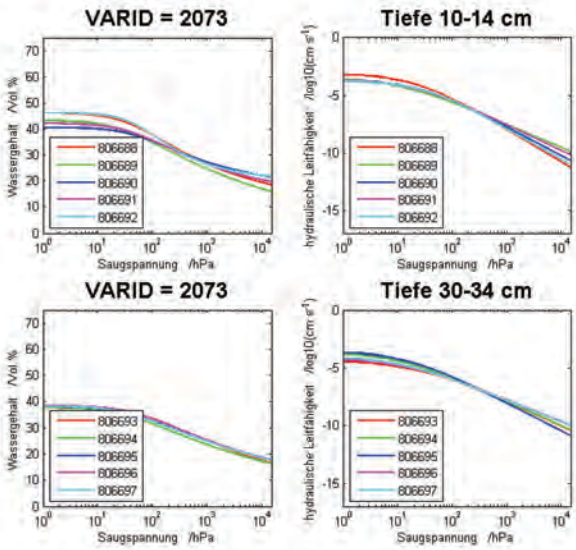


Abbildung 2-3: Beispiele für gemessene Zeitreihen der Saugspannung (in pF, oben), des kumulativen Ausflusses (Mitte) und des integralen Wasservolumens in der Bodenprobe (unten) unter Verwendung vier verschiedener Druckregime für Sand- und Normallehme sowie Sand- und Lehmschluffe (rote Linien), Tonschluffe, Lehm- und Schlufftone sowie Ton- und Schlufflehme (grün), Lehm- und Schluffsande (violett) und Reinsande (blau).



Labnum	806688	806689	806690	806691	806692
alpha	0.02382	0.03178	0.01849	0.02065	0.01779
n	1.24960	1.16320	1.26480	1.25290	1.48650
log10(Ks)	-3.22418	-3.88999	-3.71864	-3.74208	-3.84689
theta_r	0.10282	0.00085	0.15911	0.12888	0.20087
theta_s	0.46087	0.43100	0.40480	0.41947	0.46140
tau	1.32431	-1.95152	-0.13175	-1.02365	-0.69107

Labnum	806693	806694	806695	806696	806697
alpha	0.01340	0.03099	0.02657	0.01977	0.02870
n	1.15560	1.13740	1.13090	1.13890	1.13010
log10(Ks)	-4.53215	-3.88438	-3.73118	-4.36782	-4.19038
theta_r	0.00044	0.00000	0.00347	0.00000	0.00109
theta_s	0.37600	0.37700	0.38100	0.38400	0.38200
tau	-1.21017	-1.14182	1.15350	-2.77335	-2.84141

Abbildung 2-4: Beispiel für die Archivierung der ermittelten Retentionskurven (linke Grafiken) und Leitfähigkeitskurven (rechte Grafiken) für die zwei Entnahmetiefen (oben: 10-14 cm, unten: 30-34 cm); die Tabellen enthalten die zugehörigen Schätzwerte der Mualem/van Genuchten-Parameter.

Allgemein wurde festgestellt, dass die Varianz innerhalb der Wiederholungen einer Beprobungstiefe unerwartet gering war. Abbildung 2-4 zeigt beispielhaft für das BZE-Profil 2037 die in den zwei Beprobungstiefen (oben: 10-14 cm, unten: 30-34 cm) gemessenen Retentions- (links) und Leitfähigkeitskurven (rechts). Die Spannweite zwischen Maximal- und Minimalwert der fünf Wiederholungen lag für den Sättigungswassergehalt im Mittel aller BZE-Profile bei 0.064 cm^3/cm^3, für den Wassergehalt bei 63 hPa (welcher etwa der Feldkapazität entspräche) bei 0.048 cm^3/cm^3 und für den Wassergehalt bei 15000 hPa (permanenter Welkepunkt) bei 0.052 cm^3/cm^3. Die Werte für die hydraulische Leitfähigkeit variieren verhältnismäßig stärker, jedoch sind auch hier in Anbetracht des verwendeten kleinen Probenvolumens von 100 ml erstaunlich konsistente Werte innerhalb der fünf Wiederholungen gemessen worden. Die Spannweite der fünf Wiederholungen lag für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Mittel bei $1.0 \cdot 10^{-4}$ cm/s und für die hydraulische Leitfähigkeit bei 63 hPa (Infiltrationsrate bei Feldkapazitätsbedingungen) bei $5.8 \cdot 10^{-8}$ cm/s.
Aus den invers geschätzten Mualem/van Genuchten-Parametern wurden verschiedene kapazitive Größen des Bodenwasserhaushalts (z. B. nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität) berechnet. Die Ergebnisse der MSO-Versuche bildeten außerdem die Datengrundlage für die Entwicklung von Pedotransferfunktionen für die Schätzung der Wasserretentions- und Leitfähigkeitskurve (Kap. 3.2.8).

2.4 Statistische Auswertung und Ergebnisdarstellung

Die statistischen Auswertungen wurden mit der Open-Source Software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2009) durchgeführt. Im deskriptiven Teil wurde die Ergebnisdarstellung mittels Violinplots (Abbildung 2-5) gewählt, welche eine Kombination aus Box-Plot und geschätzter Verteilungsfunktion (Kerndichteschätzung) darstellen. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Box-Plots liegt darin, dass auch multimodale (mehrgipflige) Verteilungen dargestellt werden können. Die räumliche Verteilung der Parameter wurde anhand klassifizierter Werte in Karten dargestellt. Dabei wurden i. d. R. folgende Quantile als Klassifizierungsgrenzen herangezogen: 10 %, 25 %, 50 % (Median), 75 % und 90 % und i. d. R. folgender Farbgebung gefolgt: geringe Werte rot – mittlere Werte gelb – hohe Werte blau. Einige Parameter (z. B. TRD oder Basensättigung) wurden anhand definierter Bewertungsschlüssel (z. B. nach AD-HOC-AG BODEN (2005) klassifiziert. Bei tabellarischen Übersichten werden i. d. R. Quantile dargestellt (Tabelle 2-7).
Neben der rein deskriptiven Darstellung wurden auch multivariate Auswertungen durchgeführt, um Gruppen, Muster und Strukturen im Datensatz der BZE zu finden. Zur Anwendung kamen hierbei Hierarchische Clusteranalysen. Dabei handelt es sich um distanzbasierte Verfahren zur Gruppierung von Objekten, welche eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Mehrere Variablen werden standardisiert eingesetzt, um ähnliche Standorte zu gruppieren. Dieses Verfahren wurde bei den Elementvorräten und Basensättigungen verwendet, um Tiefenprofiltypen auszuweisen.
Um Aussagen über Veränderungen von Bodeneigenschaften zwischen BZE1 und BZE2 zu treffen, wurden die entsprechenden Datenkollektive mittels eines Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests daraufhin überprüft, ob sich die zentralen Tendenzen der gepaarten Stichproben gleichen ($p < 0.05$).

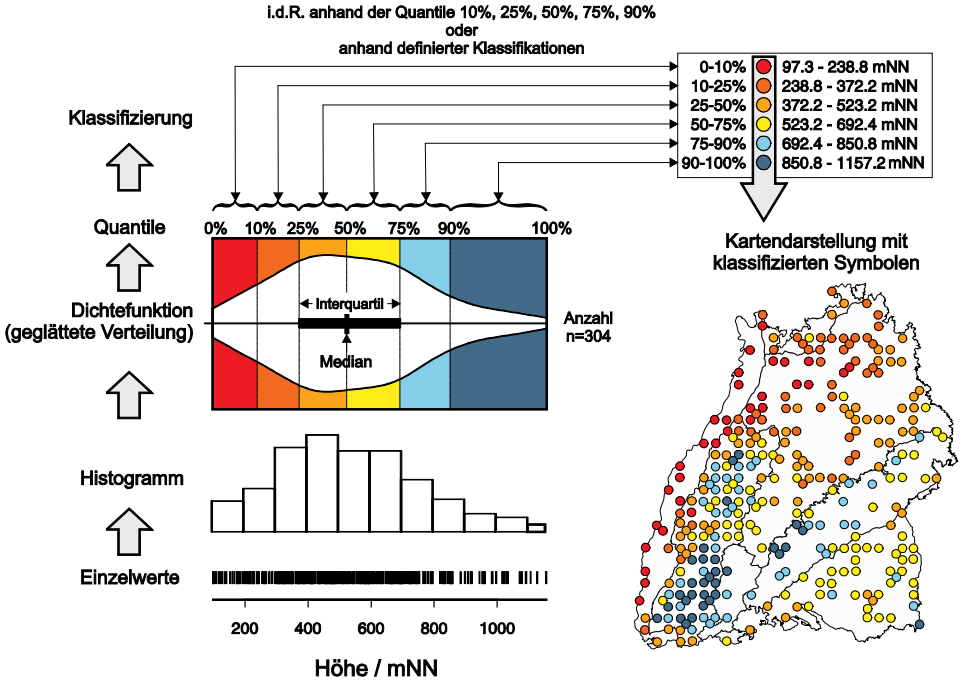


Abbildung 2-5: Beschreibung der in graphischen Ergebnisdarstellungen genutzten Violinplots und der Übertragung der Quantilwerte auf die räumliche Darstellung in der Karte.

Tabelle 2-7: Definition und Beispiel der tabellarischen Ergebnisdarstellung.

	Parameter / Beispiel Höhe mNN					
Abkürzung Tabelle	*Min*	*25%*	***Med***	*75%*	*Max*	*N*
Bedeutung	Minimum	25%-Quantil	**Median**	75%-Quantil	Maximum	Anzahl
Wert Beispiel	97.3	372.2	**523.2**	692.4	1157.2	304

3 Zustand der Waldböden

Der Zustand der Waldböden wird im folgenden Kapitel über alle im Rahmen der BZE2 gemessenen Parameter deskriptiv beschrieben. Einführend in die Standortsbeschreibung (3.1) erfolgt die Darstellung der klimatischen Rahmenbedingungen (3.1.1) sowie der Bestockung (3.1.2), wobei neben den Bestandesparametern wie Baumartenzusammensetzung auch die Feinwurzelverteilungen (3.1.3) an den BZE2-Flächen dargestellt werden. Als Grundlage der Bodenentwicklung werden die Ausgangssubstrate (3.1.4) definiert und die räumliche Verteilung der Böden anhand der Bodenklassen dargestellt (3.1.5). Als Teil der Bodengenese und symptomatisch für den Zustand des Bodens gilt der Zustand der Humusauflage, der über die Humusform abgebildet wird (3.1.6). Als gezielte forstliche Maßnahme der Bodenmelioration wurde an vielen nährstoffarmen Standorten eine Bodenschutzkalkung durchgeführt, die den Zustand der Waldböden beeinflusst (3.1.7).

In Kapitel 3.2 werden die bodenphysikalischen Eigenschaften der Böden dargestellt. Als grundlegend für bodenökologische und –hydraulische Prozesse gelten die Textur (3.2.1), der Steingehalt (3.2.2) und die Trockenrohdichte (3.2.3). Da diese Größen nicht immer als Messwert vorliegen, werden diese mit Hilfe der vor Ort vorgenommenen Profileinschätzung ergänzt (3.2.4), so dass alle Standorte durchgehend bodenphysikalisch charakterisiert sind und Feinbodenvorräte (3.2.5) berechnet werden können. Ebenso wurden die Humusauflagen physikalisch charakterisiert, um über die Mächtigkeiten und Lagerungsdichten die vorhandenen Humusmengen abzuleiten (3.2.6). Bodenhydrologische Messungen wurden im Labor mit Hilfe der Multi-Step-Outflow-Anlage (MSO) durchgeführt und Kennwerte der Wasserbindung und Leitfähigkeit bestimmt (3.2.7). Diese Messungen waren Grundlage für die Ableitung bodenhydraulischer Funktionen mittels Pedotransferfunktionen (PTF), mit deren Hilfe für alle BZE-Standorte und Messtiefen Bodenwasserhaushaltskennwerte abgeleitet wurden (3.2.8). Summarisch bildet die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum nFKWe das Zusammenspiel der zuvor vorgestellten bodenphysikalischen Parameter sowie der Durchwurzelungstiefe als kapazitiven Kennwert ab (3.2.9).

Von primärem waldökosystemaren Interesse sind fundierte Kenntnisse der Nährstoffversorgung und des Status der Versauerung der Waldböden (3.3). Durch die anthropogen verstärkte atmosphärische Deposition von Säurebildnern wurde die natürliche Bodenversauerung deutlich intensiviert mit teilweise drastischen Folgen für den Nährstoffhaushalt, insbesondere nährstoffarmer Standorte. Als Indikator des Säurestatus dient der pH-Wert (3.3.1), der in unterschiedlichen Salzlösungen gemessen die Pufferbereiche (pH_{H2O}) und die gespeicherten Säuren (pH_{KCl} und pH_{CaCl2}) abbildet. Als quantitatives Maß der Nährstoffversorgung wird die Austauscherbelegung nach basisch und sauer wirkenden Kationen sowie nach den Bodenkompartimenten Feinboden – Humusauflage – Skelett differenziert und gibt Auskunft über die Basensättigung (3.3.2). Diese weist je nach Ausgangssubstrat, Bodengenese und anthropogener Überprägung (Versauerung, Kalkung) charakteristische Tiefenverläufe auf (3.3.3).

Anhand der Anion- und Kationenkonzentrationen von Boden-Wasser-Extrakten des Unterbodens (1:2-Extrakt) lassen sich zusätzlich aktuell ablaufende Versauerungstendenzen und Grundwasserbelastungspotentiale abschätzen (3.3.4). Darüber hinaus geben Kohlenstoff-

und Stickstoffkonzentrationen Auskunft über die bodenbiologische Aktivität und die Nährstoffumsetzung im System Waldboden, die auch durch die essenziellen Nährelemente Phosphor und Schwefel gesteuert wird (3.3.5 bis 3.3.7).
Zur Bilanzierung und Abschätzung von Gesamtvorräten werden die zuvor genannten Konzentrationen an Nährelementen mit den Feinbodenvorräten multipliziert (3.4). So können die Vorräte an Kohlenstoff (3.4.1), Stickstoff (3.4.2), Schwefel (3.4.3) und Phosphor (3.4.4), die die Kompartimente Humusauflage, Feinboden und z. T. Skelett zur Gesamtnährstoffversorgung beitragen, differenziert dargestellt werden. Von grundlegender Standortscharakteristik sind die kurz- und mittelfristigen Nährstoffversorgungen mit austauschbaren Kationen (3.4.5) sowie der Vergleich mit der langfristigen Nährstoffversorgung, die aus den königswasserextrahierbaren Konzentrationen abgeleitet wird (3.4.6).
Neben den Nährstoffen lagern sich auch Schadstoffe wie beispielsweise Schwermetalle im Boden ab und reichern sich an. Inwieweit in Waldböden Baden-Württembergs Belastungspotenziale vorliegen, ist in Kapitel 3.5 dargestellt.

3.1 Allgemeine Standortbeschreibung

3.1.1 Klima

In Baden-Württemberg dominieren aufgrund vorherrschender Westwinde ozeanische Klimaeinflüsse, die im Wechsel mit kontinentalen Einflüssen das Klima prägen. Aufgrund der hohen topographischen Heterogenität des Landes (Bergländer neben Beckenräumen und Gräben) wird das Klima regional stark differenziert, was sich unter anderem an der weiten Spannweite der Jahresdurchschnittstemperaturen und Niederschläge zeigt.

3.1.1.1 Temperaturen

Die Jahresdurchschnittstemperaturen (Abbildung 3-1) hängen stark von der Höhenlage ab. So weist das Oberrheinische Tiefland Temperaturen von > 10 °C auf und ist die wärmste Region Baden-Württembergs. Auch der Kraichgau sowie Teile des Neckarlands und in der Bodenseeregion sind Bereiche überdurchschnittlich hoher Jahresdurchschnittstemperaturen. Mit zunehmender Höhe verringert sich die Jahresdurchschnittstemperatur. So fallen insbesondere in den Hochlagen des Schwarzwalds, der Schwäbischen Alb und im Allgäu die Jahresdurchschnittstemperaturen auf unter 8 °C.

3.1.1.2 Niederschlag

An den Höhenzügen des Schwarzwalds stauen sich die feuchten ozeanischen Luftmassen und ergeben sehr hohe Niederschlagsmengen von deutlich > 1000 mm (Abbildung 3-2). Auch der Odenwald, die Schwäbische Alb und die Schwäbisch-Fränkischen Waldberge weisen durch orographischen Niederschlag relativ hohe Werte auf. Im Gegenzug sind Becken und Täler im Lee dieser Erhöhungen von geringen Niederschlägen gekennzeichnet: für das Oberrheinische Tiefland leeseitig der Vogesen, das mittlere Neckarland im Lee des Schwarzwalds, die Donauniederungen leeseitig der Schwäbischen Alb und dem Taubergrund sind Jahresniederschläge von < 800 mm vorherrschend.

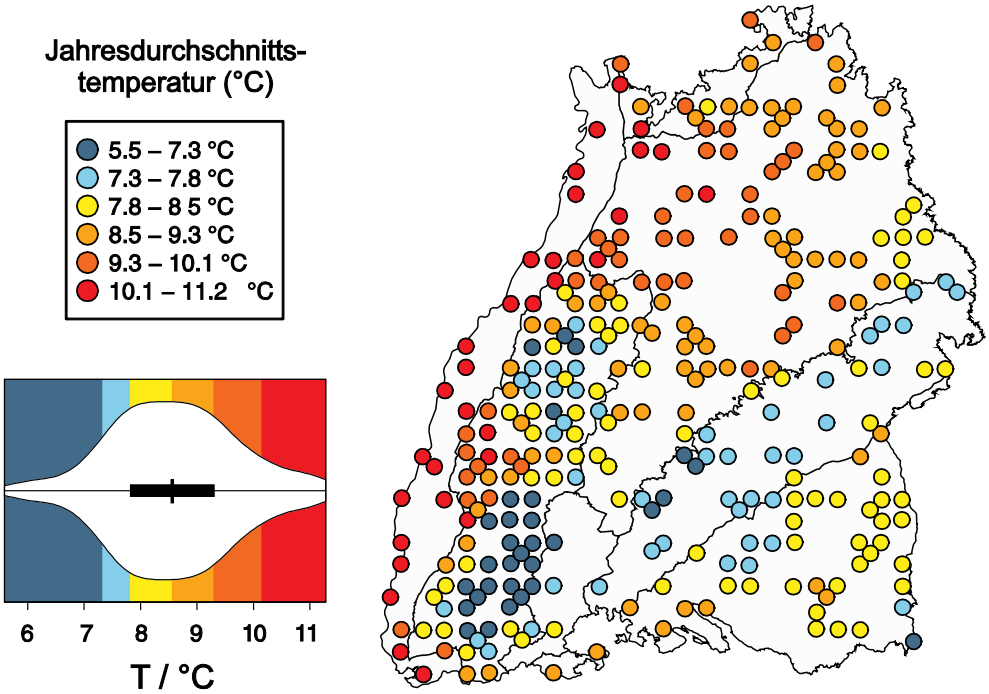


Abbildung 3-1: Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur an den BZE-Standorten abgeleitet von regionalisierten Daten der Jahre 1971-2005.

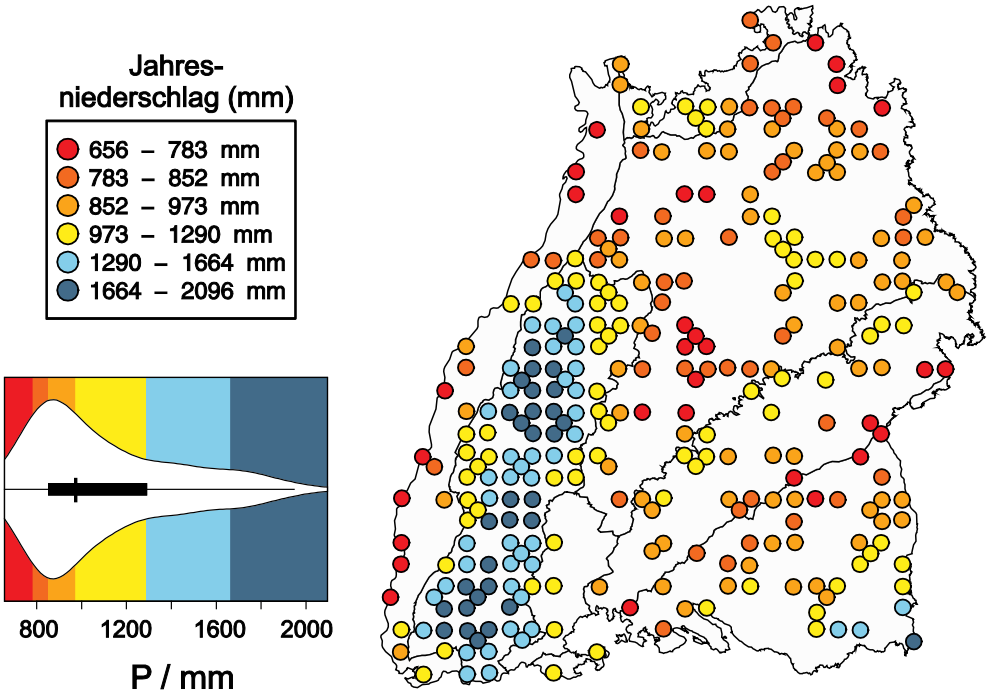


Abbildung 3-2: Mittlerer Jahresniederschlag an den BZE-Standorten abgeleitet von regionalisierten Daten der Jahre 1971-2005.

3.1.2 Bestockung

3.1.2.1 Bestandesparameter nach BZE

Die Bestockung bezieht sich auf die Fläche um das aufgenommene BZE-Bodenprofil. Die aufgenommene Fläche variiert je nach Bestandesdichte, da konzentrisch um das Profil etwa 20 Bäume mit einem BHD > 7 cm aufgenommen wurden. Die Baumartenanteile wurden aus den Deckungsgraden abgeleitet und mit der BZE1 und der Bundeswaldinventur (BWI, hier Bezug auf Standflächen) verglichen (Tabelle 3-1). Auffällig ist dabei eine deutliche Verschiebung von Nadelbeständen zu Laubbeständen, die zum einen mit etwa 5 % Differenz auf das Fortschreiten der Umbaumaßnahmen hin zu laubbaumreicheren Beständen zurück zu führen ist (Vergleich der BWI1 und BWI2). Zum andern ist dieser Unterschied auch dem Probedesign der BZE1 und BZE2 geschuldet. Während bei der BZE1 anfangs ausschließlich nadelbestandene Standorte untersucht wurden, die dann um Laubbestände ergänzt wurde, ist die BZE2 von vornherein ohne baumartenbezogene Einschränkungen durchgeführt worden.
Die eventuelle Überrepräsentation der Tanne ist darauf zurück zu führen, dass diese ihren regionalen Schwerpunkt im Osten des Schwarzwaldes hat, der die höchsten Waldanteile im Land aufweist und somit bei der Rasterbeprobung quasi ohne Lücken beprobt wurde im Gegensatz zu stärker strukturierten Regionen wie z. B. das Neckarland. Der dabei erfasste Bestockungstyp wird nach Tabelle 3-2 gekennzeichnet. Bei der regionalen Betrachtung erweisen sich die Hauptwuchsgebiete als deutliches Gliederungsmerkmal der Bestockungstypen (Abbildung 3-3). Buchen-Bestockungen haben ihren Verbreitungsschwerpunkt im nordwestlichen Neckarland (Kraichgau) und finden sich mit hohen Anteilen auch auf der Schwäbischen Alb und im Südwesten Baden-Württembergs (Oberrhein – Schwarzwald – Südwestdeutsches Alpenvorland). Eichen-Bestockungen finden sich vereinzelt im Oberrheinischen Tiefland und im Neckarland, in welchen neben den genannten Buchen andere Laubholzbestockungen vorherrschen. Der Anteil an Nadelgehölzen nimmt im Südosten des Neckarlandes deutlich zu bis hin zu Fichten-Beständen, die auf Teilen der Schwäbisch-Fränkischen Waldberge und dann auch auf der Schwäbischen Alb dominieren. Weite Teile des Schwarzwaldes sind geprägt von Fichten-Beständen, wo sich größere Anteile mit Tannen-Bestockung im Wechsel mit sonstigen Nadelbestockungen vorfinden. Im Südwestdeutschen Alpenvorland dominieren wiederum Fichten-Bestände im Wechsel mit Mischbeständen.

3.1.3 Feinwurzelverteilungen

3.1.3.1 Durchwurzelungsintensitäten

Die Durchwurzelungsintensitäten sind im Oberboden (0-10 cm) meist als sehr stark bis extrem stark anzusprechen und auch in der Tiefe 10-30 cm finden sich überwiegend starke Feinwurzelintensitäten (Abbildung 3-4), die im Mittleren Schwarzwald des Öfteren auch noch extrem stark ausfallen. Regionen unabhängig zeigen sich jedoch bereits einige Standorte mit schwachen Durchwurzelungsintensitäten in dieser Tiefenstufe. Dies ändert sich in der Tiefenstufe 30-60 cm, in welcher insbesondere Standorte der Schwäbischen Alb und lokal im Schwarzwald bereits als wurzelfrei zu charakterisieren sind. Ansonsten überwiegen schwache und mittlere, teils noch starke Durchwurzelungsintensitäten.

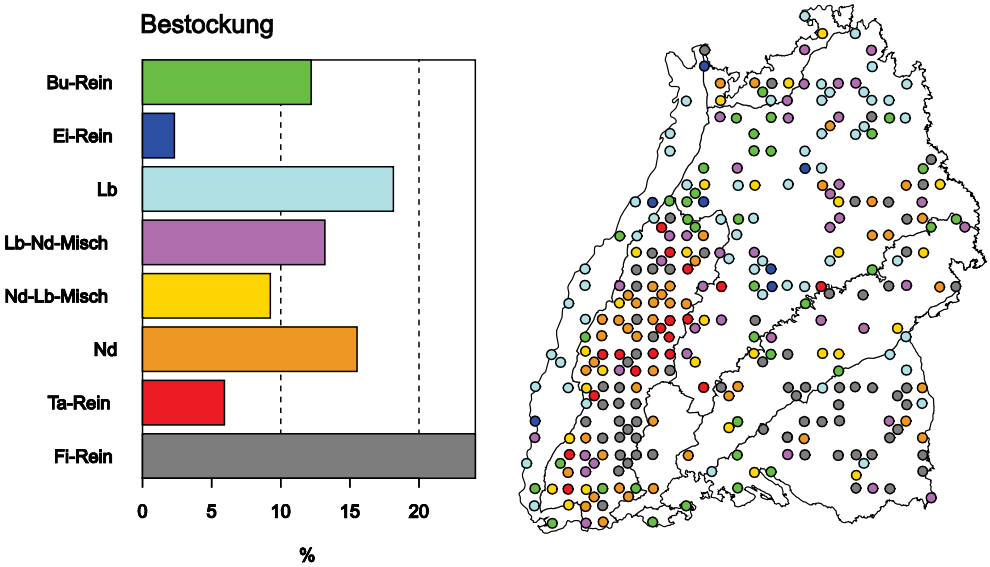


Abbildung 3-3: Anteile der Bestockungstypen (Abkürzungen siehe Tabelle 3-2) an der BZE2 und deren räumliche Verbreitung in Baden-Württemberg.

Tabelle 3-1: Baumartenanteile (%) an den BZE-Flächen zum Zeitpunkt der BZE1 und der BZE2 sowie die mittleren Anteile für Baden-Württemberg ermittelt in der Bundeswaldinventur BWI1 und BWI2.

Baumart	*BZE1*	*BWI1 (1987)*	*BZE2*	*BWI2 (2002)*
Eiche	6.4	6.4	8.4	7.1
Buche	21.3	18.7	25.3	20.6
Laub (hohe Lebensdauer)	7.5	8.2	9.6	9.8
Laub (niedrige Lebensdauer)	2.1	3.4	3.2	4.0
Laub gesamt	*37.3*	*36.7*	*46.5*	*41.5*
Fichte	44.3	39.8	34.4	36.5
Tanne	13.7	7.7	12.3	7.6
Douglasie	0.9	2.3	1.6	2.8
Kiefer	2.8	8.5	3.6	6.6
Lärche	0.9	2.0	1.6	1.8
Nadel gesamt	*62.6*	*60.3*	*53.5*	*55.3*

Tabelle 3-2: Bestockungstypen der BZE2 in Baden-Württemberg.

Bestockungstyp	*Beschreibung*	*Abkürzung*
Buchen(rein)bestockung	≥ 70 % Buche	Bu-Rein
Eichen(rein)bestockung	≥ 70 % Eiche	Ei-Rein
Sonst. Laubbaumarten	≥ 70 % sonst. Laubholz	Lb
Nadelholzreiche Laubholzmischbestände	> 30 % Nadelholz	Lb-Nd-Misch
Laubholzreiche Nadelmischbestände	> 30 % Laubholz	Nd-Lb-Misch
Sonst. Nadelbaumarten	≥ 70 % sonst. Nadelholz	Nd
Tannen(rein)bestockung	≥ 70 % Tanne	Ta-Rein
Fichten(rein)bestockung	≥ 70% Fichte	Fi-Rein

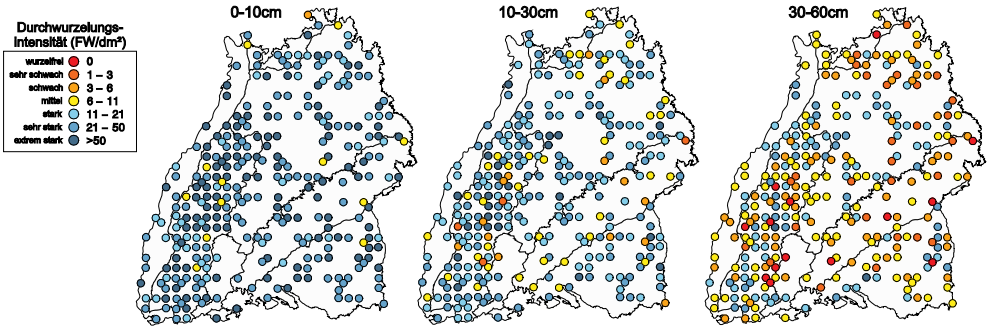


Abbildung 3-4: Mittlere Durchwurzelungsintensitäten in den Tiefen 0-10 cm, 10-30 cm und 30-60 cm klassifiziert nach AK-STANDORTSKARTIERUNG (2003).

3.1.3.2 Abschätzung der effektiven Durchwurzelungstiefe

Als effektiver Durchwurzelungsraum WR_{eff} gilt der Bereich, welcher für die Wasser- und Nährstoffaufnahme durch Feinwurzeln bis zum permanenten Welkepunkt ausschöpfbar ist. Die exakte Ermittlung der Untergrenze (effektive Durchwurzelungstiefe W_{eff}) erfolgt über Feuchtemessungen im Frühjahr und Herbst, im Rahmen der BZE2 kann diese jedoch nur über die tatsächliche Wurzelverteilung abgeschätzt werden. Als Hilfsgröße wird nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003) diejenige Tiefe als Untergrenze des W_{eff} angegeben, ab der eine Feinwurzeldichte von 3 Feinwurzeln/dm² unterschritten wird. Hierbei gilt das „Prinzip Vorsicht“, bei dem eine Überschätzung des W_{eff} vermieden werden soll. Dabei ist zu beachten, dass Durchwurzelungstiefen von > 100 cm mit der hier angewandten Methode nicht erfasst werden. Ein Großteil der effektiven Wurzeltiefen ist jedoch im mittleren und tiefgründigen Bereich (bis 100 cm) vorzufinden (Abbildung 3-5). Wurzelverteilungen, bei denen auch in 95-100 cm eine Feinwurzeldichte ≥ 3 Feinwurzeln/dm² vorgefunden wurde,

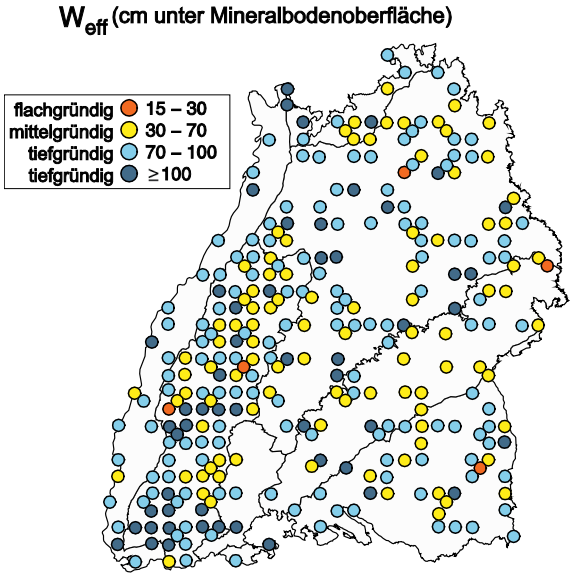


Abbildung 3-5: Effektive Durchwurzelungstiefe W_{eff} (Schätzung nach AK-STANDORTSKARTIERUNG (2003): Tiefe, ab der die Feinwurzeldichte < 3 Feinwurzeln/dm² ist).

sind als tiefgründig ≥ 100 cm gekennzeichnet. Regional lassen sich nur geringe Unterschiede feststellen, überwiegend mittelgründig erscheinen die Böden der Schwäbischen Alb, aber auch des nördlichen Schwarzwalds und des Odenwalds. Die Waldböden im Oberrheinischen Tiefland sowie im Kraichgau sowie eine Vielzahl an weiteren Standorten aus allen Wuchsgebieten erwiesen sich als überwiegend tiefgründig. Flachgründige Standorte sind vereinzelt auf stauwassergeprägten Böden zu finden.

3.1.4 Ausgangssubstrate

Die Klassifizierung der Ausgangssubstrate erfolgte nach einem hierarchischen System, das auf der Substratklassifizierung der KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) basierend zur vereinfachten Bodenbeschreibung angepasst wurde. Es wurden jeweils die geologische Hauptgruppe (1. Ebene), geologische Untergruppen (2. Ebene) sowie weitere Untergliederungen (3. Ebene) aufgenommen. So wurde z. B. ein Standort aus Granit der Ausgangsgesteingruppe 111 (3. Ebene) zugeordnet, welche zur Untergruppe der Plutonite (2. Ebene, 110) und somit der Hauptgruppe der sauren magmatischen Festgesteine (1. Ebene, 100) angehört. Im Folgenden wird die landesweite Beschreibung auf der 1. Ebene der geologischen Hauptgruppe erläutert. Bis auf die Gruppe der (ultra)basischen magmatischen Festgesteine sind in Baden-Württemberg alle Hauptgruppen vertreten. Bei der regionalen Betrachtung

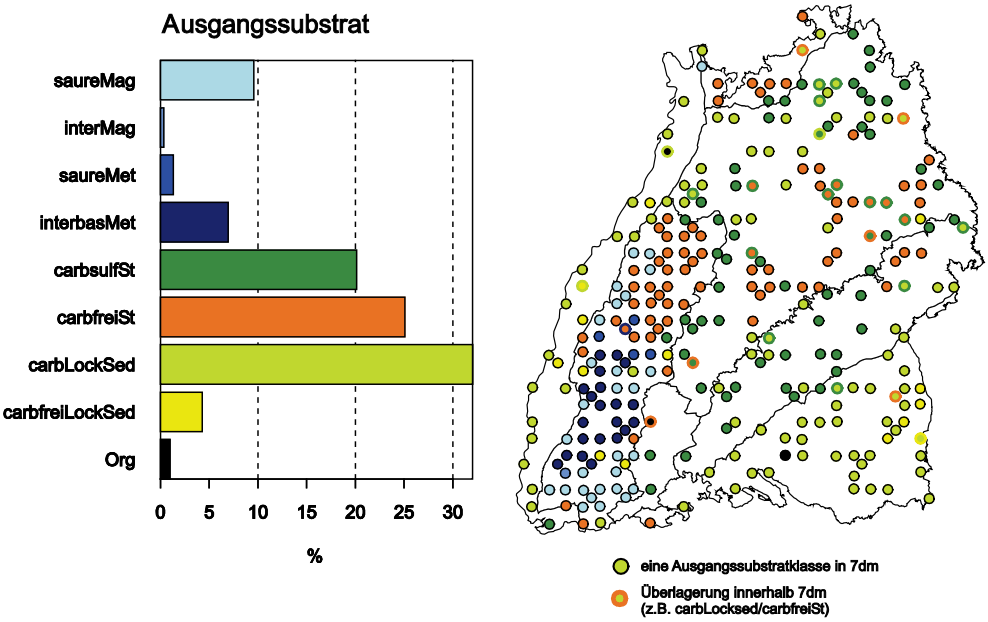


Abbildung 3-6: An den Standorten dominierende Ausgangssubstrattypen, Überlagerungstypen (äußere Farbe kennzeichnet das überlagernde Substrat): saureMag = saure magmatische Festgesteine (Kurzzeichen BZE2 100); interMag = intermediäre magmatische Festgesteine (200); saureMet = saure metamorphe Festgesteine (400); interbasMet = intermediäre und (ultra)basische metamorphe Gesteine (500); carbsulfSt = carbonatische und sulfatische Festgesteine (600); carbfreiSt = carbonatfreie silikatische Festgesteine (700); carbLockSed = carbonathaltige Lockergesteine (800); carbfreiLockSed = carbonatfreie Lockergesteine (900); Org = organische Bildungen (1000).

verdeutlicht sich der Zusammenhang zwischen der geologischen Struktur und der standortskundlichen regionalen Gliederung (Abbildung 3-6). Saure magmatische Festgesteine (überwiegend Granite) dominieren den Hochschwarzwald sowie Teile des Mittleren und westliche Gebiete des Nördlichen Schwarzwaldes. Im Mittleren Schwarzwald herrschen saure metamorphe (helle Gneise) sowie intermediäre und basische metamorphe Gesteine (dunkle Gneise und Paragneise) vor. Der Nordschwarzwald sowie der Odenwald sind geprägt von carbonatfreien Festgesteinen in Form von Buntsandstein (Oberrotliegend nicht durch BZE2 erfasst). Weitere Vorkommen carbonatfreien Festgesteins bilden sandige und tonige Keuper- und Juraschichten im Neckarland sowie vereinzelt in der Schwäbischen Alb (Feuersteinlehm) und am Südrand des Schwarzwaldes. Carbonatische und sulfatische Festgesteine charakterisieren den Muschelkalk im Neckarland und weite Teile der Schwäbischen Alb (Weißjura). Flächenhaft dominierend sind die carbonathaltigen Lockersedimente, insbesondere im Südwestdeutschen Alpenvorland (glaziale Sedimente, Schmelzwassersedimente), im Oberrheinischen Tiefland (überwiegend alpine Rheinschotter und Terrassenablagerungen), im nördlichen Neckarland (Löß) sowie auf carbonatischen Standorten mit Residuallehm der Kalkverwitterung als Ausgangssubstrat der holozänen Bodenbildung. Carbonatfreie Lockersedimente finden sich nur vereinzelt auf umgelagerten Schwarzwaldgesteinen als Talfüllung (z. B. entlang des Elztals im Oberrheingraben) oder auf tertiären Sanden im Alpenvorland. Organisches Material bildet das Ausgangssubstrat an Standorten mit (vererdetem) Niedermoor.

3.1.5 Bodenklassen

Die Profilkennzeichnung der BZE2-Standorte erfolgte bis hin zur Bodensubtypebene, wobei das Merkmal der Podsoligkeit ebenfalls aufgenommen wurde. Bei der landesweiten Betrachtung wird, der Übersichtlichkeit halber, auf der Ebene der Bodenklassen ausgewertet. Der Vergleich mit der Bodenübersichtskarte BÜK200 (Abbildung 3-7) verdeutlicht, dass im Rahmen der BZE2 die vorherrschenden Bodentypen sowie deren Begleitböden sehr gut repräsentiert werden. Aus der Abteilung der terrestrischen Böden dominieren die Braunerden insbesondere in den Wuchsgebieten Schwarzwald auf metamorphen und magmatischen Ausgangsgesteinen, im Odenwald auf Buntsandstein, im Neckarland auf sandigen Keuperschichten, sowie in Teilen des Südwestdeutschen Alpenvorlandes auf Geschiebe- und Terrassenablagerungen. Die zweitgrößte Klasse, die der Stauwasserböden, findet sich auf primär geschichteten Moränenablagerungen im Südwestdeutschen Alpenvorland sowie auf primär geschichteten und/oder durch fortgeschrittene Lessivierung zu Stauwasser neigenden Substraten im Nördlichen Schwarzwald, im Albvorland, im Schönbuch und im nordöstlichen Neckarland. Diese Stauwasserböden treten typischerweise im Wechsel mit Lessivés mit geringerer oder ohne Staunässeausprägung auf, welche den nördlichen Teil des Südwestdeutschen Alpenvorlandes (Donau-Iller-Lech-Platte) und im Kraichgau (nordwestliches Neckarland) dominieren. Auf carbonathaltigen Ausgangsgesteinen der Schwäbischen Alb (Weißer Jura) und des Neckarlandes (Muschelkalk und z. T. Keuper) herrschen Rendzinen und Pararendzinen (Ah/C-Böden) sowie bei stärkerer Ausprägung der Residuallehmanreicherung Terrae fuscae (Klasse Terrae calcis) vor. Podsole entwickelten sich auf nährstoffarmen Sandsteinen des Mittleren und Nördlichen Schwarzwaldes, im Odenwald und im Übergang vom Schwäbischen zum Fränkischen Keuper-Lias-Land.

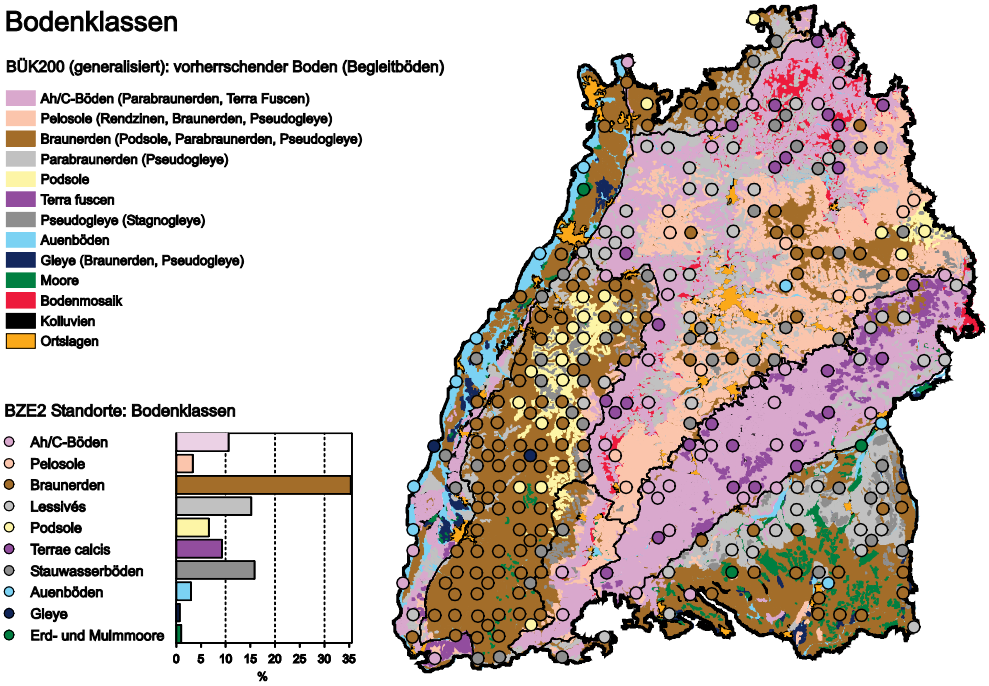


Abbildung 3-7: Bodenklassen aus der Standortsansprache sowie die vorherrschenden Böden aus der BÜK200 (LGRB, LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU (2005), © Regierungspräsidium Freiburg) als flächige Hintergrundinformation.

Tonige Substrate des Keupers sowie des Schwarzen und Braunen Juras im Neckarland sind Grundlage für Pelosole. Die semiterrestrischen Klassen der Auenböden, Gleye sowie Erdniedermoore finden sich überwiegend in den Niederungen des Oberrheins und im Südwestdeutschen Alpenvorland. Vereinzelt treten von den vorherrschenden Bodentypen abweichende Böden auf, die jedoch als Begleitböden durchaus typisch sind.

3.1.6 Humusformen

Die Mull-Humusformen nehmen ~ 2/3 aller BZE2 Standorte ein. Insbesondere dominieren diese in den Wuchsgebieten Oberrheinisches Tiefland, Neckarland (mit Ausnahme der Schwäbisch-Fränkischen Waldberge und dem östlichen Albvorland, hier Moder-Formen) und der Schwäbischen Alb. Moder-Humusformen finden sich verstärkt im östlichen Teil des Südwestdeutschen Alpenvorlands und im Schwarzwald, wobei hier die Westflanke sowie große Teile des Mittleren Schwarzwaldes und die westliche Hälfte des Hochschwarzwaldes von Mull-Formen geprägt sind. Rohhumus wurde vereinzelt im Schwarzwald mit Konzentrationsschwerpunkt im Östlichen Hochschwarzwald kartiert.

3.1.7 Kalkungsmaßnahmen

Die Beschreibung der Kalkungsmaßnahmen an den BZE-Standorten bedurfte einer intensiven Auswertung der forstamtlich dokumentierten Maßnahmen. So konnten für den Großteil der Flächen gesicherte Informationen bezüglich des Zeitpunktes, der Kalkrezepturen und Menge zusammengestellt werden. Bei den Kalkformulierungen handelt es sich überwiegend um Kalke und Dolomite, die z. T. mit Zusätzen wie Hyperphosphat oder Blaukorn ergänzt

wurden. Die ausgebrachten Mengen liegen im Median bei 3.0 t/ha, wobei die Streuung gering ist. Bei 75 % der Maßnahmen wurden Mengen zwischen 2.5 und 3.5 t/ha ausgebracht.

Da die Zusätze zu Kalkungsmaßnahmen prinzipiell mengenmäßig sehr geringfüg variieren, wurde im Folgenden nur der zeitliche Bezug der Kalkungsmaßnahmen differenziert. Auf etwa 74 % der Standorte wurde keine Kalkung durchgeführt, etwa 10 % wurden vor der BZE1, 3 % vor BZE1 und zwischen BZE1 und BZE2, und ca. 13 % nur zwischen BZE1 und BZE2 gekalkt (Abbildung 3-9). Kalkungsschwerpunkte sind primär im Schwarzwald zu finden, des Weiteren nährstoffarme Standorte im Odenwald, in den Schwäbisch-Fränkischen Waldbergen und im Südwestdeutschen Alpenvorland.

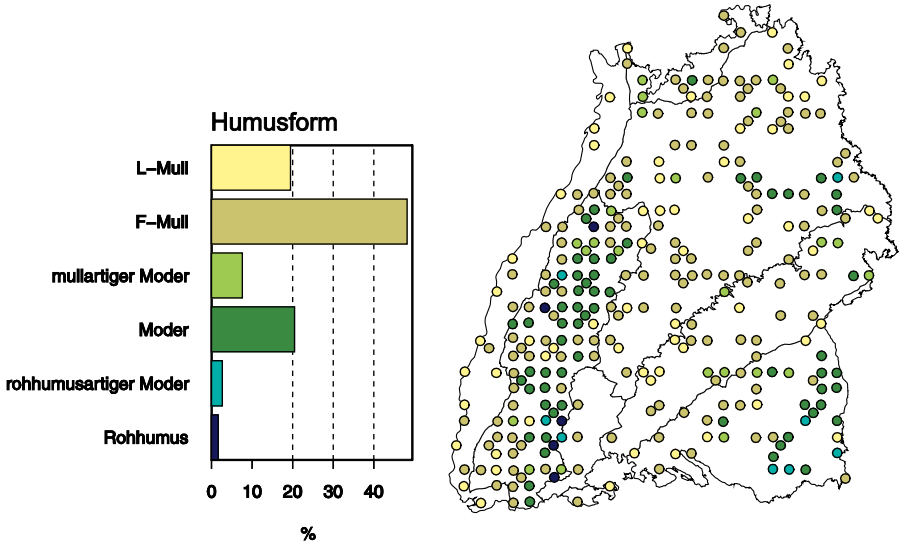


Abbildung 3-8: An den Standorten dominierende Humusform (inklusiv Satellitenflächen).

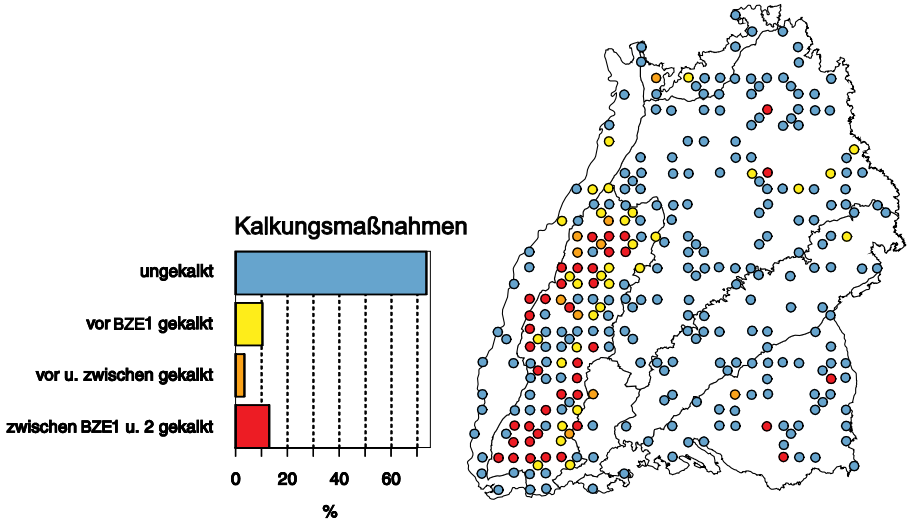


Abbildung 3-9: Zeitliche Einordnung der Kalkungsmaßnahmen an den BZE-Punkten in Baden-Württemberg.