

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>EINLEITUNG</b>  | <b>1</b>  |
| 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         |
| <b>2</b> | <b>METHODEN</b>  | <b>9</b>  |
| 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        |
| <b>3</b> | <b>ZUSTAND DER WALDBÖDEN</b>   | <b>19</b> |
| 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 Profilsprache                                   | 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 $n_{FKWe}$ ( $=n_{WSK} W_{Reff}$ )                   | 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

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>6.1</b> | <b>Regionalisierung von Waldbodendaten .....</b>   | <b>137</b> |
| 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        |
| <b>6.2</b> | <b>Abschätzung der durchschnittlichen Bodenlösungszusammensetzung .....</b>                | <b>155</b> |
| 6.2.1      | Zielsetzung und Methodenansatz .....   | 155        |
| 6.2.2      | Verwendung von Selektivitätskoeffizienten zwischen Austauschbelegung und Bodenlösung ..... | 156        |
| 6.2.3      | Direkte Korrektur der 1:2-Extrakte mit Sickerwasserkonzentrationen .....                   | 158        |
| 6.2.4      | Schlussfolgerungen .....   | 160        |
| <b>6.3</b> | <b>Wälder als Kohlenstoffspeicher .....</b>  | <b>162</b> |
| 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        |
| <b>6.4</b> | <b>Bodenschutzkalkung schützt den Wald und regeneriert Bodenfunktionen .....</b>           | <b>174</b> |
| 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        |
| <b>6.5</b> | <b>Waldböden als ökologisch diverse Pflanzenstandorte .....</b>                            | <b>182</b> |
| 6.5.1      | Reaktionszahl .....  | 182        |
| 6.5.2      | Stickstoffzahl .....   | 184        |
| 6.5.3      | Feuchtezahl .....  | 184        |
| 6.5.4      | Lichtzahl .....  | 186        |
| <b>6.6</b> | <b>Bodenverformung durch Befahrung .....</b>   | <b>187</b> |
| 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        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>6.7</b> | <b>Zusammenhangsanalyse zwischen Feinwurzel-Tiefenverteilung und Standortseigenschaften .....</b>   | <b>192</b> |
| 6.7.1      | Messung und statistische Auswertung .....   | 192        |
| 6.7.2      | Ergebnisse der Zusammenhangsanalysen .....  | 195        |
| 6.7.3      | Regressionsanalysen für das $\beta$ -Modell .....   | 200        |
| 6.7.4      | Diskussion der Zusammenhänge zwischen Feinwurzel-Tiefenverteilung und Standortparameter .....       | 202        |
| 6.7.5      | Fazit .....   | 203        |
| <b>6.8</b> | <b>Abuschätzung und Bewertung von Trockenstress-Szenarien .....</b>                                 | <b>203</b> |
| 6.8.1      | Parametrisierung der Wasserhaushaltsmodelle .....   | 204        |
| 6.8.2      | Ergebnisse der Modellierungen .....   | 205        |
| <b>7</b>   | <b>ZUSAMMENFASSUNG WICHTIGER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>                            | <b>209</b> |
| 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 Humusaufage 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        |
| <b>8</b>   | <b>REGIONALE DARSTELLUNG DER BZE2-ERGEBNISSE .....</b>  | <b>223</b> |
| 8.1        | Waldbodenregionen Baden-Württembergs .....  | 223        |
| 8.1.1      | Oberrhelnlshes 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        |
| <b>9</b>   | <b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>   | <b>321</b> |
|            | <b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>  | <b>327</b> |