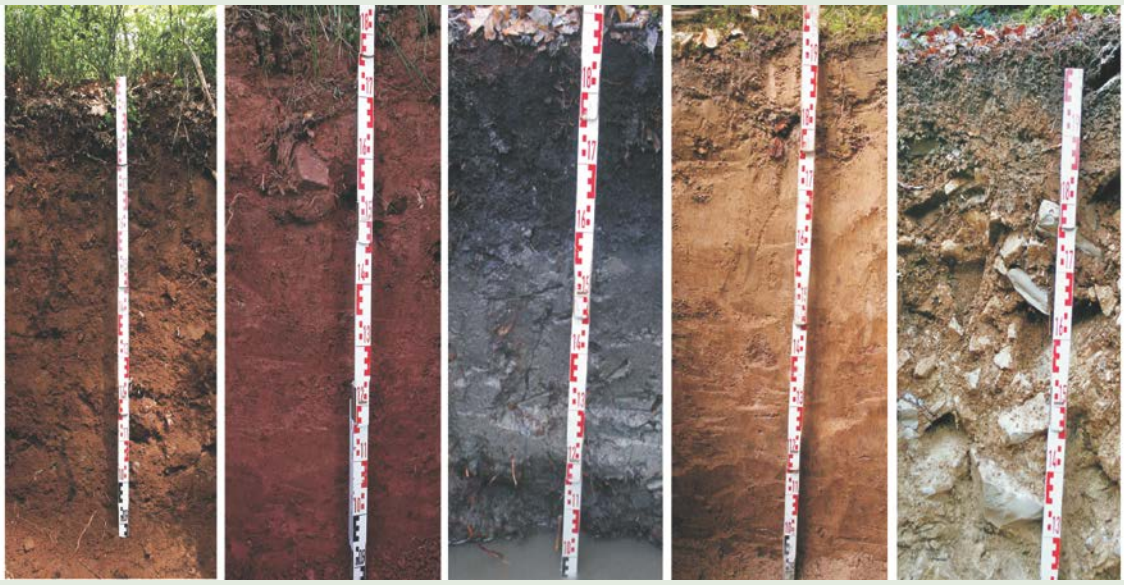
Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald von 1989 – 1992 und 2006 – 2008 in Baden-Württemberg



Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind eine Zusammenfassung von:

Hartmann, P., Buberl, H., Puhlmann, H., Schäffer, J., Trefz-Malcher, G., Zirlewagen, D., von Wilpert, K. (2016): Waldböden Südwestdeutschlands - Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald von 1989 – 1992 und 2006 – 2008. Verlag Kessel, Remagen-Oberwinter, 328 S.

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Inhaltsverzeichnis

1 Bodenzustandserhebung im Wald BZE 2

2 Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse und Schlussfolgerungen 3

2.1 Nährstoffversorgung und Versauerung 4
2.2 Bestandesernährung 8
2.3 Schwermetallvorräte nehmen in der Humusauflage ab – Verlagerung in den Oberboden? 11
2.4 Kohlenstoffspeicher Wald 12
2.5 Stickstoffsättigung ist landesweit hoch, nimmt jedoch signifikant ab 15
2.6 Befahrungsschäden auf nahezu einem Drittel der Waldfläche 16
2.7 Feinwurzelverteilungen als Abbild der Anpassungsstrategie der Bäume 18
2.8 Plausible Simulation von Trockenstress und Stauwasser 19
2.9 Entwicklung von Umweltvorsorgestrategien auf der Basis von BZE und anderen Monitoringsystemen 21

3 Regionale Darstellung der BZE2-Ergebnisse: Waldbodenregionen Baden Württembergs 23

3.1 Oberrheinisches Tiefland 23
3.2 Schwarzwald 26
3.3 Odenwald 31
3.4 Neckarland 33
3.5 Schwäbische Alb 37
3.6 Südwestdeutsches Alpenvorland 40

1 Bodenzustandserhebung im Wald BZE

Böden 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. 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.

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.

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 zum einen auf einem 8x8 km-Raster im Wald und werden ergänzt durch Standorte, die im Rahmen zur Europäischen Bodenzustandserhebung (BioSoil) untersucht wurden. Diese Stichprobenpunkte (BZE und BioSoil) sind identisch mit den Probepunkten der Waldzustandserhebung (WZE) und wurden daher zusammen mit der BZE ausgewertet. 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 Auswertungen der zweiten BZE sind als aktueller Bundesbericht abrufbar
(https://www.thuenen.de/de/wo/arbeitsbereiche/waldmonitoring/bodenzustandserhebung/).

Auswertungen für Baden-Württemberg wurden in HARTMANN et al. (2016) veröffentlicht.

Im Webdienst sind die zusammengefassten Ergebnisse sowie die Analyseergebnisse der Einzelprofile abrufbar.

Themenschwerpunkte der BZE sind:

- 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).

Zielsetzung der BZE

Böden reagieren sensitiv auf Veränderungen ökologischer Rahmenbedingungen. Bis zu einem gewissen Grad können Böden zwar externe Belastungen abpuffern und sich regenerieren. Bei Überschreitung der eigenen und von Standort zu Standort stark variierenden Stabilität werden Böden und deren Funktionen jedoch nachhaltig beeinflusst oder geschädigt. Dies gilt in Bezug auf externe Einflüsse in Form stofflicher Belastungen (Schwermetalle, anthropogene Säureeinträge, Nährstoffungleichgewichte durch übermäßige Nutzung, etc.) und durch mechanische Störungen wie Befahrungsschäden oder Klimaveränderungen (z. B. durch Temperaturerhöhung veränderte Erhaltungsneigung für Bodenkohlenstoff). Den Zustand der Waldböden als auch deren zeitliche Veränderung und Ursachen zu beschreiben, ist Ziel der BZE.

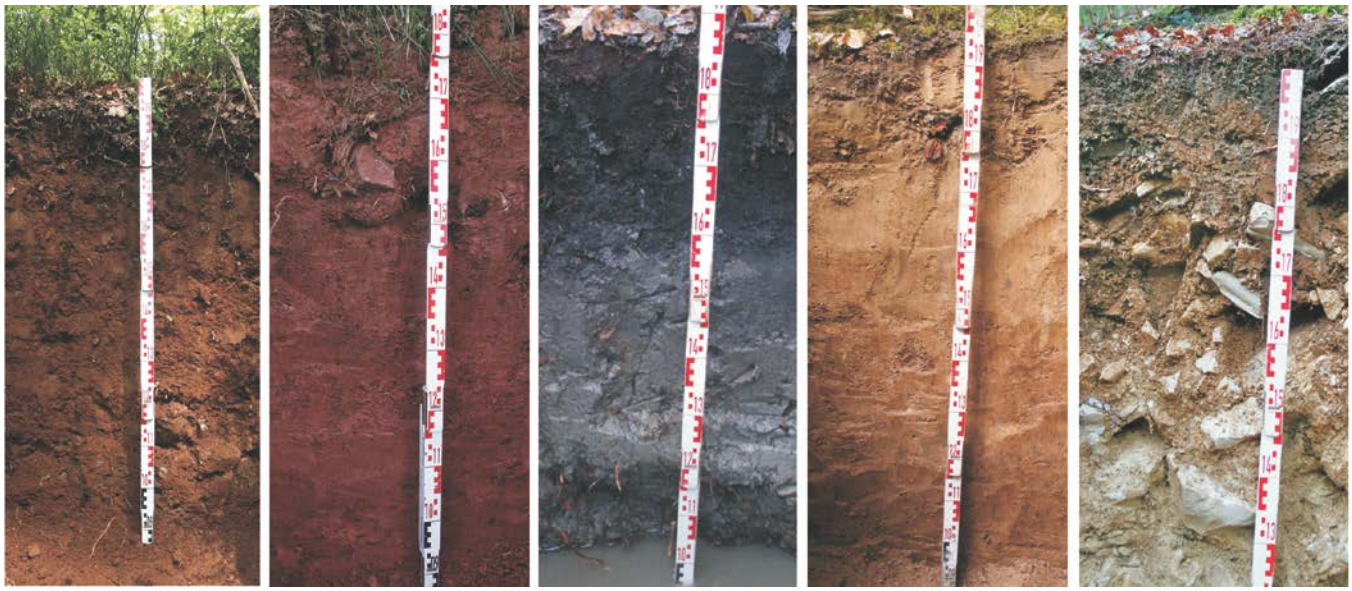


Abbildung 1: Waldböden in Baden-Württemberg sind vielfältig: von links nach rechts: nährstoffarme Braunerde aus Diatexit; wasserstauender Pseudogley aus Rotliegendem; ein stark durch Grundwasser geprägtes Erdniedermoor; nährstoffreiche und sehr gut Wasser speichernde Parabraunerde aus Löss; nährstoffreiche, aber auch steinreiche Terra Fusca aus Weißjura.

2 Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Zustand und Entwicklung der Waldböden im Mittelpunkt des Monitorings

Die Waldböden in Baden-Württemberg sind das Ergebnis einer hochvariablen Geologie gepaart mit starken topographischen Unterschieden unter dem Einfluss eines primär ozeanischen, lokal auch kontinental geprägten Klimas. Biotische und menschliche Aktivitäten beeinflussen des Weiteren die bodenbildenden Prozesse. Dabei sind die Verbraunung (Tonmineralneubildung und Eisenfreisetzung) und die vertikale Differenzierung (Auswaschung von Karbonaten, Tonmineralverlagerung, Podsolierung) sowie redoximorphe Veränderungen durch Grund- und Stauwasser die vorherrschenden bodenbildenden Prozesse in den Waldböden Baden-Württembergs.

Überlagert wird die Bodenprofildifferenzierung von Versauerungsprozessen, die vor allem durch den Eintrag atmosphärischer Säuren (saurer Regen) verstärkt wurden und aktuell durch hohe Stickstoffeinträge voran-

schreiten. Dem entgegen wirkt die Kalkung als gezieltes Instrument, um die Folgen einer übermäßigen Versauerung zu reduzieren und Bodenfunktionen zu regenerieren. Mit Hilfe der BZE gelang es, den aktuellen Zustand sowie die Bodenentwicklung, insbesondere im Rahmen der Nährstoffversorgung und der Versauerungstendenzen, zu erfassen. Ebenso wurde mit der detaillierten Erfassung bodenphysikalischer Parameter die Grundlage für eine Wasser- und Lufthaushaltsbewertung geschaffen, die insbesondere im Rahmen des stattfindenden Klimawandels unentbehrlich ist.

2.1 Nährstoffversorgung und Versauerung

Versauerung mit regionalen Schwerpunkten – Regeneration durch Kalkung

Die langfristige Entwicklung der Versauerung im Boden kann durch die BZE und im Besonderen durch den Vergleich der ersten und der zweiten Aufnahmeperiode (Ergebnisse der BZE2 in Abbildung 2) dargestellt werden. Bei einer landesweiten Betrachtung lässt sich im Mittel in allen Bodentiefen ein signifikanter positiver Trend hin zu höheren pH-Werten (in Wasser) erkennen. Dieser Trend fällt deutlich höher auf gekalkten Standorten (0.28 pH-Einheiten in 10 Jahren im mineralischen Oberboden) als auf ungekalkten Standorten (0.06 pH-Einheiten in 10 Jahren) aus. Der in KCl gemessene pH-Wert, welcher auch die im Boden gespeicherten Säuren abbildet, weist vor allem in der relativ schnell umgesetzten Humusauflage signifikante Anstiege auf. Im Mineralboden sind die Anstiege nur auf den Standorten signifikant, die zwischen BZE1 und BZE2 gekalkt wurden. Ansonsten stagnieren diese pH-Werte. Für die Austauschkapazitäten wurde dahingegen ein tendenziell rückläufiger Wert festgestellt. Der Verlust an Austauscheroberflächen im Oberboden kann dabei primär auf die Abnahme organischer Substanzen zurückgeführt werden. Auch die Austauschkapazität nimmt auf gekalkten Flächen teilweise zu. Hierbei vermag die tendenziell festgestellte Erhöhung organischer Vorräte im mineralischen Oberboden auch in Form schwer löslicher Calciumhumate die Austauscherkapazitäten zu erhöhen. Außerdem weisen variable Ladungen von Metalloxiden eine deutliche pH-Abhängigkeit auf, so dass ein pH-Anstieg mit einer Erhöhung der AKe einhergeht.

Während sich auf ursprünglich basenreicheren Standorten durch die Abnahme von insbesondere austauschbarem Calcium eine fortschreitende Versauerung manifestiert, weisen gekalkte Flächen eine deutliche Erhöhung der Calcium- und Magnesium-Belegung am Austauscher bis in eine Tiefe von 60 cm auf.

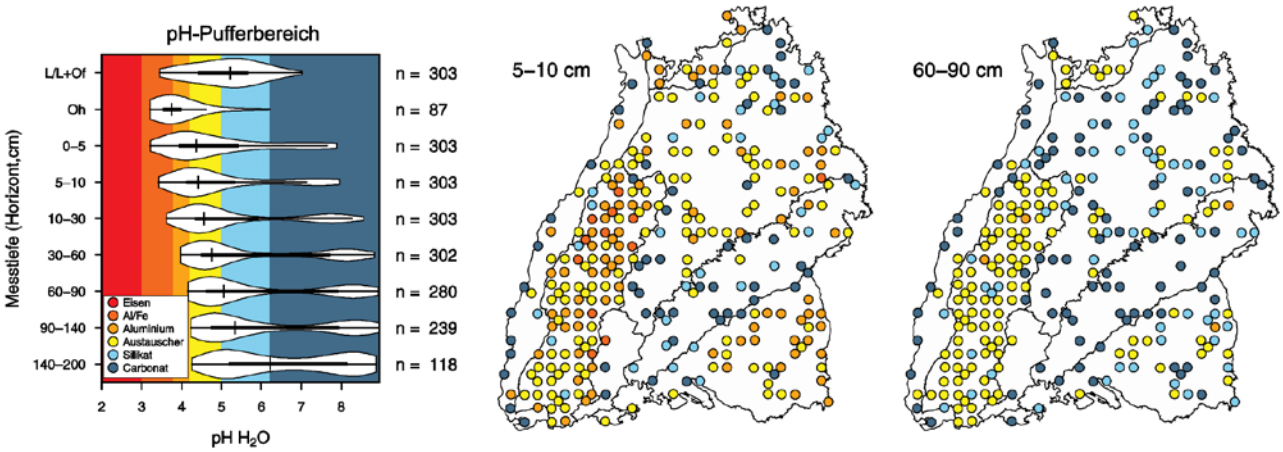


Abbildung 2: pH_{H2O}–Werte im Tiefenverlauf (Klassifizierung = pH-Pufferbereiche nach AK-STANDORTSKARTIERUNG (2003) und die räumliche Verteilung in Baden-Württemberg in den Tiefen 5-10 cm und 60-90 cm.

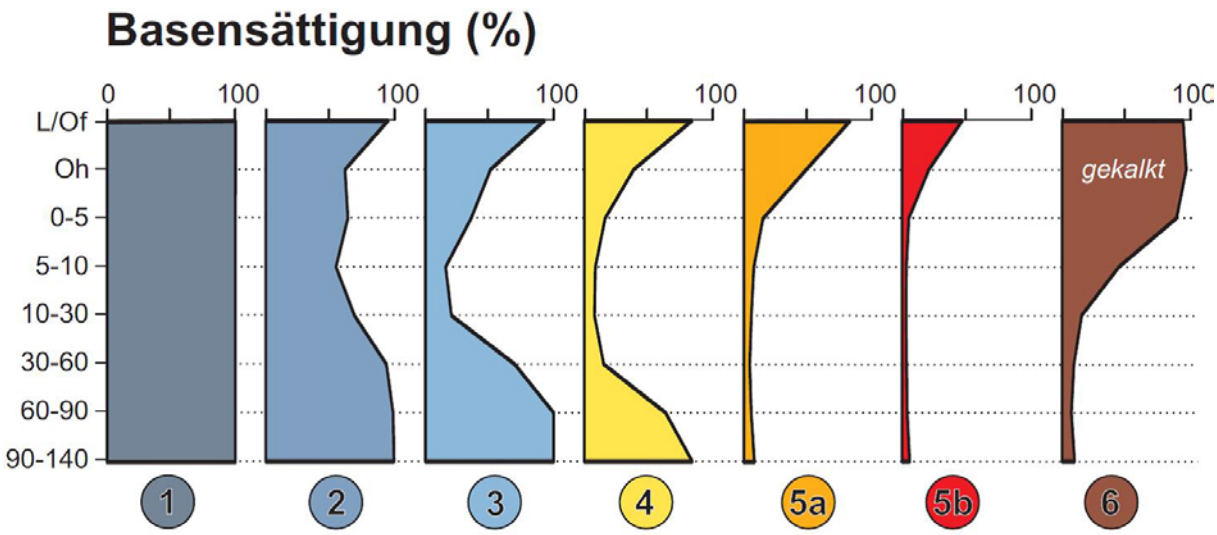
Der Unterschied ist auf den Flächen am größten, die zwischen den beiden Inventuren gekalkt wurden, während die Wirkung der Kalkungen, die vor der BZE1 stattfanden, bereits wieder rückläufig ist. Die Kalium-Belegung hat sich landesweit kaum verändert und verbleibt auf z. T. kritisch geringem Niveau. Auf ungekalkten Flächen konnte des Weiteren eine natürliche Aufbasung durch Natrium-Anreicherung im Oberboden stattfinden. Die sauer wirkenden Kationenbelegungen sind dagegen eher rückläufig. Dabei gehen hauptsächlich die Aluminium- als auch Eisenkonzentrationen auf gekalkten Standorten zurück. Auf ungekalkten Standorten ist nur die Abnahme von Mangan signifikant. Unnatürlich hoch ist an vielen Standorten nach wie vor die Aluminiummenge an den Austauscheroberflächen in 60-90 cm Tiefe als Ausdruck einer Speicherung der starken, meist anthropogen verursachten Versauerung im 20. Jahrhundert. Dieser Wert wird als Grundlage für die Steuerung der Bodenregenerationskalkung genutzt, indem eine, diesem Al-Vorrat äquivalente Kalkmenge von jeweils drei Tonnen/ha im zehnjährigen Abstand ausgebracht wird.

Basische Nährstoffversorgung – primär substratabhängig, aber durch überregional wirksame Versauerung teilweise stark reduziert und nivelliert

Als Summenwert der Kationenbelegung weist die Basensättigung eine starke regionale Differenzierung auf (Abbildung 3). Auf den basenarmen Gesteinen des Schwarzwalds, Odenwalds und in Teilen der Schwäbisch-Fränkischen Waldbergen sowie auf Feuersteinlehmen der Schwäbischen Alb und sandigen Altmoränenstandorten im Alpenvorland finden sich tiefgründig basenarme Böden, deren Nährstoffvorräte nur in geringem Maße durch die Nachlieferung aus der Verwitterung der Gesteine aufgefüllt werden. Teilweise verstärkt durch die Bodenschutzkalkung ist an diesen Standorten die höchste Basensättigung, als Folge der Basenpumpenwirkung tiefwurzelnder Bäume, in ihrer Humusauflage zu finden. Der Humuspflege gilt es an diesen sensiblen Standorten größte Beachtung zu schenken, da eine übermäßige Reduzierung der Oberbodenpotentiale die Böden schnell an die Grenze nachhaltiger Bewirtschaftbarkeit bringt.

Besser mit Basen ausgestattet sind die Böden aus primär carbonathaltigen Locker- und Festsubstraten oder geschichteten Substraten des Neckarlandes und Oberschwabens, die zwar im Ober- und Unterboden oftmals stark versauert sind, jedoch durch den Wurzelanschluss an einen basenreichen Unterboden eine gute Nährstoffversorgung aufrecht erhalten können. Jedoch gilt hier die Nährstoffversorgung zu überwachen, da insbesondere auf Lockersubstraten wie Löss ein vertikales Fortschreiten der Versauerung in den Unterboden im Rahmen der BZE beobachtet wurde. Des Weiteren sind die potentiellen Nährstoffvorräte an diesen oftmals stark aggregierten Böden nicht immer gleichzusetzen mit den tatsächlich verfügbaren Nährstoffmengen. Aggregatinnenräume dienen als Konzentrationsschwerpunkte von Kationen, welche aber meist nur schwer von Pflanzenwurzeln und Hyphen erreicht werden können.

Für Böden aus Kalkstein ist eine hohe Basensättigung auch im Oberboden charakteristisch. Hier ist nur partiell auf sehr flachgründigen Böden bereits eine Versauerung in Form von Aluminiumanreicherung festgestellt worden, welche jedoch noch nicht im Bereich kritischer Werte liegt. Vielmehr sind hier Aufnahme-Antagonismen als vorrangige Probleme der Nährstoffversorgung einzustufen.



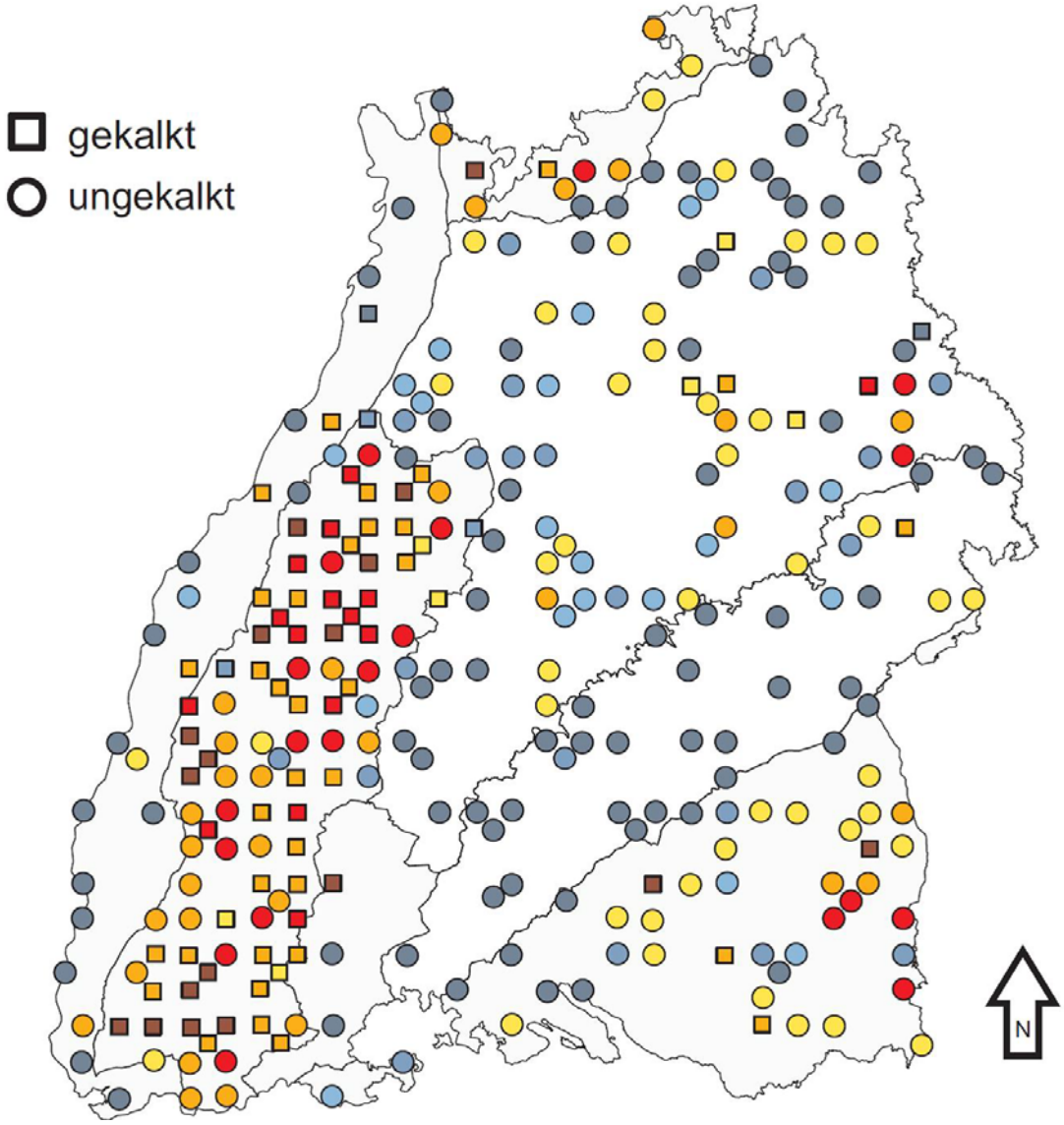


Abbildung 3: Die Nährstoffversorgung wird vereinfacht über die Basensättigung dargestellt. Unterschiedliche Ausgangsgesteine und der Verlust an Nährstoffen durch Entzug und Versauerung bilden charakteristische Tiefenverläufe der Basensättigung.

Nährstoffreserven im Bodenskelett und in der Humusauflage

Vor allem an den nährstoffärmsten Standorten sind prozentual betrachtet sehr hohe Anteile an Nährstoffreserven im Auflagehumus und Bodenskelett gespeichert. Die Skelettfraktion stellt eine, je nach Ausgangsmaterial dem Feinboden ähnlich mit Nährstoffen ausgestattete, längerfristige Quelle basenreicher Kationen dar. Die beiden Kompartimente Feinboden und Bodenskelett sind ein Kontinuum der Stoffspeicherung. Innerhalb dieses Kontinuums gibt es graduelle Unterschiede, so sind insbesondere die basisch wirkenden Kationen Ca^{2+}, Mg^{2+} und K^{+} im Skelett als „quellnäher“ anzusehen, wohingegen die sauer wirkenden Kationen Al^{3+} und Fe^{3+} als Versauerungsprodukte im Feinboden stärker vorrätig sind. Poröse Steine sind vor allem im sauren Milieu wegen ihrer erhöhten Basennachlieferung ein bevorzugter Lebensraum von Pilzhyphen und ein Speicherorgan pflanzenverfügbaren Wassers. Die Skelettfraktion ist demnach dem Feinboden funktionell als rhizosphärenrelevant gleichzustellen, wenngleich der Anteil an der Gesamtversorgung in den meisten Fällen quantitativ untergeordnet ist. Die Nachlieferung der austauschbaren Kationenvorräte in Steinen wird durch den langsamen Prozess der Silikatverwitterung gesteuert. Somit sind die Steine aufgrund ihrer im Vergleich zum Feinboden geringeren Austauscheroberfläche als Puffer mit begrenzter Kapazität anzusehen. Dies verdeutlichen auch die tiefen- und daher verwitterungsabhängigen Relationen zwischen den leicht verfügbaren und den königswasserextrahierbaren Gesamtgehalten an K^{+} und Mg^{2+}. Trotz hoher Gesamtkonzentrationen ist nur ein geringer Anteil tatsächlich austauschbar verfügbar.

Darüber hinaus erweist sich der Nährstoffspeicher der Humusauflage als wichtige kurzfristige Quelle basisch wirkender Kationen (Basenpumpe). So sind Standorte, deren Gesamtvorräte an Ca^{2+}, K^{+} und Mg^{2+} als gering oder sehr gering einzustufen sind, dadurch gekennzeichnet, dass oftmals 20-50 % (stellenweise bis über 90 %) in der Humusauflage gebunden sind. Die Humusauflagen erwiesen sich als schnell umsetzbare Basenquelle, deren Langfristigkeit jedoch eingeschränkt ist.

Versauerung fördert Nähr- und Schadstoffkonzentrationen im Bodenwasser

Die Bestimmung durchschnittlicher Bodenwasserkonzentrationen von Nährstoffen (z.B. Calcium, Kalium und Magnesium) und umweltschädlichen Elementen wie beispielsweise die Versauerungsprodukte Sulfat, Nitrat oder Aluminium sind von hoher Bedeutung für die Abschätzung der Gefahr für unser Grund- oder Oberflächenwasser. Des Weiteren können mit diesen Informationen auch Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser als Teil der standörtlichen Nährstoffbilanzen abgeschätzt werden. Mit Hilfe von in situ-Bodenlösungsmessungen im Südwestdeutschen Alpenvorland konnte die Abschätzung durchschnittlicher Sickerwasserkonzentrationen aus der Austauscherbelegung mittels Selektivitätsfunktionen als auch deren direkte Schätzung aus den 1:2-Extrakten befriedigend abgeleitet werden. Dies kann die Grundlage für eine regionalisierte Abschätzung der Sickerwasserkonzentrationen als Instrument des Boden- und Wasserschutzes sein.

Durch Bodenversauerung ist die Selektivität der Bodenaustauscher für die Nährelementkationen Calcium, Kalium und Magnesium exponentiell gesunken, wodurch deren Konzentration im Bodenwasser und der Austrag mit dem Sickerwasser unnatürlich angestiegen ist. Anhand der wässrigen 1:2-Extrakte lassen sich die resultierenden Versauerungstendenzen sowie Grundwasserbelastungspotenziale abschätzen und im Rahmen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) bewerten. Die Konzentrationen an Natrium, Sulfat, Nitrat und Chlorid weisen an keinem der BZE-Standorte kritische Werte auf (Ausnahme sind natürlich bedingte hohe

Gehalte von Sulfat an Moorstandorten). Im Bereich der sauer wirkenden Kationen (Aluminium, Ammonium, Mangan) liegen die Konzentrationen in der Tiefe 30-60 cm wiederholt deutlich über den Grenzwerten. Allerdings ist eine starke Abnahme mit der Tiefe zu erkennen. Bei ausreichender Kontaktzeit ist daher davon auszugehen, dass mit zunehmender Länge der Fließstrecke durch tiefere Bodenschichten, welche im Gegensatz zum Oberboden weniger bis nicht versauert sind, diese sauer wirkenden Kationen wieder immobilisiert werden. Insbesondere nach Starkregenereignissen kann jedoch das stärker gesättigte Oberbodenwasser durch präferenzielles Fließen weitere Pufferbereiche im Unterboden umfließen und so direkt ins Grundwasser gelangen.

Als pflanzenwachstumsbegrenzend oder als Stressindikator gilt das Ca/Al-Verhältnis, welches die Versauerung des Bodens widerspiegelt. Als kritischer Grenzwert gilt hierbei ein Ca/Al-Verhältnis in der Bodenlösung von 1.0. Insgesamt fällt für ca. 25 % der beprobten Standorte dieser Wert kleiner als 1.0 aus (vor allem auf natürlich basenarmen Substraten, Abbildung 4)).

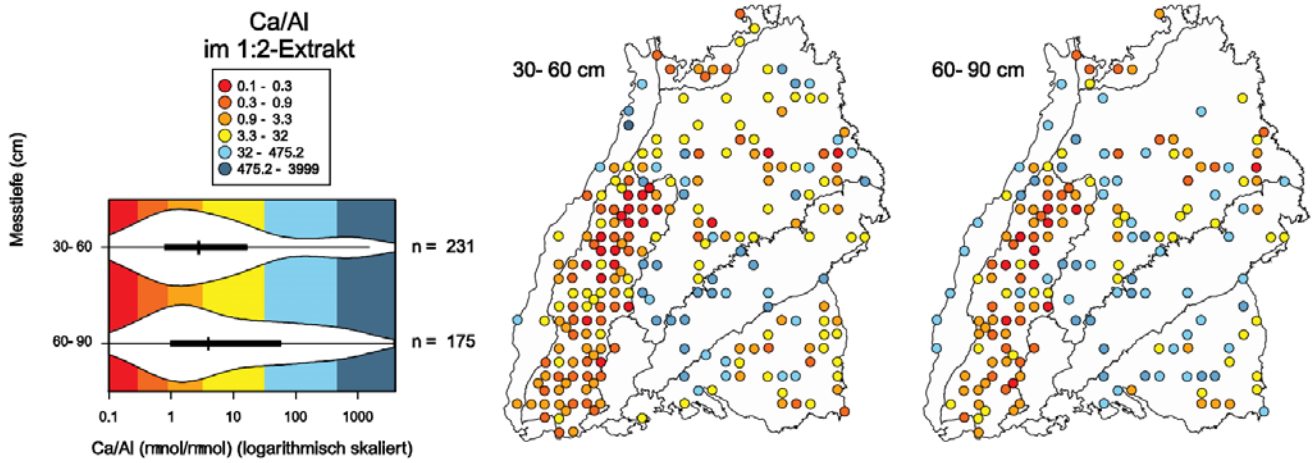


Abbildung 4: Molare Ca/Al-Verhältnisse im wässrigen 1:2 Extrakt in 30-60 cm und 60-90 cm Bodentiefe.

2.2 Bestandesernährung

Durch die räumliche Koppelung der Routinesysteme Bodenzustandserhebung (BZE) und der landesweiten Ernährungsinventur (IWE) wird eine wirksame Überwachung der Waldernährung und der frühzeitigen Erkennung eines Korrekturbedarfs bewirtschaftungs- und umweltbedingter Engpässe ermöglicht. Bei den Hauptbaumarten Fichte, Tanne und Buche ergeben sich teils unterschiedliche Trends, deren Ursachen mit Hilfe multivariater Analysen der BZE-Daten interpretiert werden können (Details in HARTMANN et al. (2016)).

Eine gute Ernährungsgrundlage der Fichte ist stark von variablen Rahmenbedingungen abhängig

Für die Fichte spiegeln die Ernährungsinventurdaten des Jahres 2006 eine überwiegend gute bis optimale Versorgungslage wider (Abbildung 5). Abnehmende Trends der Nährstoffgehalte, die sich für Stickstoff und Kalium in den Vorläuferinventuren abgezeichnet hatten, wurden im Inventurjahr 2006 durchbrochen. Selbst in den Kaliummangelregionen Schwäbische Alb und Alpenvorland trat ein Anstieg der Gehaltswerte aus dem

Bereich der Mangelversorgung in den optimalen Versorgungsbereich ein. Diese Entspannung der Nährelementversorgung kann auf eine dem Trockenjahr 2003 nachgeschaltete, intensivierte Mineralisierung von organischer Substanz der Humusauflagen und des Mineralbodens zurückgeführt werden. Magnesiummangel und die hierdurch ausgelösten Vergilbungsphänomene, die noch zu Beginn der 1980er Jahre großflächig in Tannen- und Fichtenbeständen im Schwarzwald und Odenwald aufgetreten waren, sind heute kaum mehr zu beobachten. Eine Erholung in der Magnesiumernährung zeichnete sich bereits in den 1990er Jahren ab. Ob sich die gute Versorgungslage der Fichte für die Makronährelemente auf den erreichten Nährelementniveaus stabilisiert oder wie für Kalium zu beobachten, bereits wieder in kritische Versorgungssituationen zurückpendelt, lässt sich anhand der aktuellsten Inventurergebnisse des Jahres 2011 noch nicht beurteilen.

Die Tanne zeigt eine Erholung bei den meisten Nährstoffen

Auch für die Baumart Tanne ist im Hinblick auf die Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumernährung eine bis ins neue Jahrtausend hineinreichende Abnahme gefolgt von einem Anstieg der Gehaltswerte im Jahr 2006 zu beobachten. Während die Stickstoff- und auch die Phosphorversorgung bei der Tanne zu Beginn des neuen Jahrtausends ein besorgniserregendes Niveau erreicht hatten, ist für Kalium insgesamt von einer noch entspannten Versorgungslage auszugehen. Dass die Nährelementversorgung der Tanne weniger ausgeprägt auf

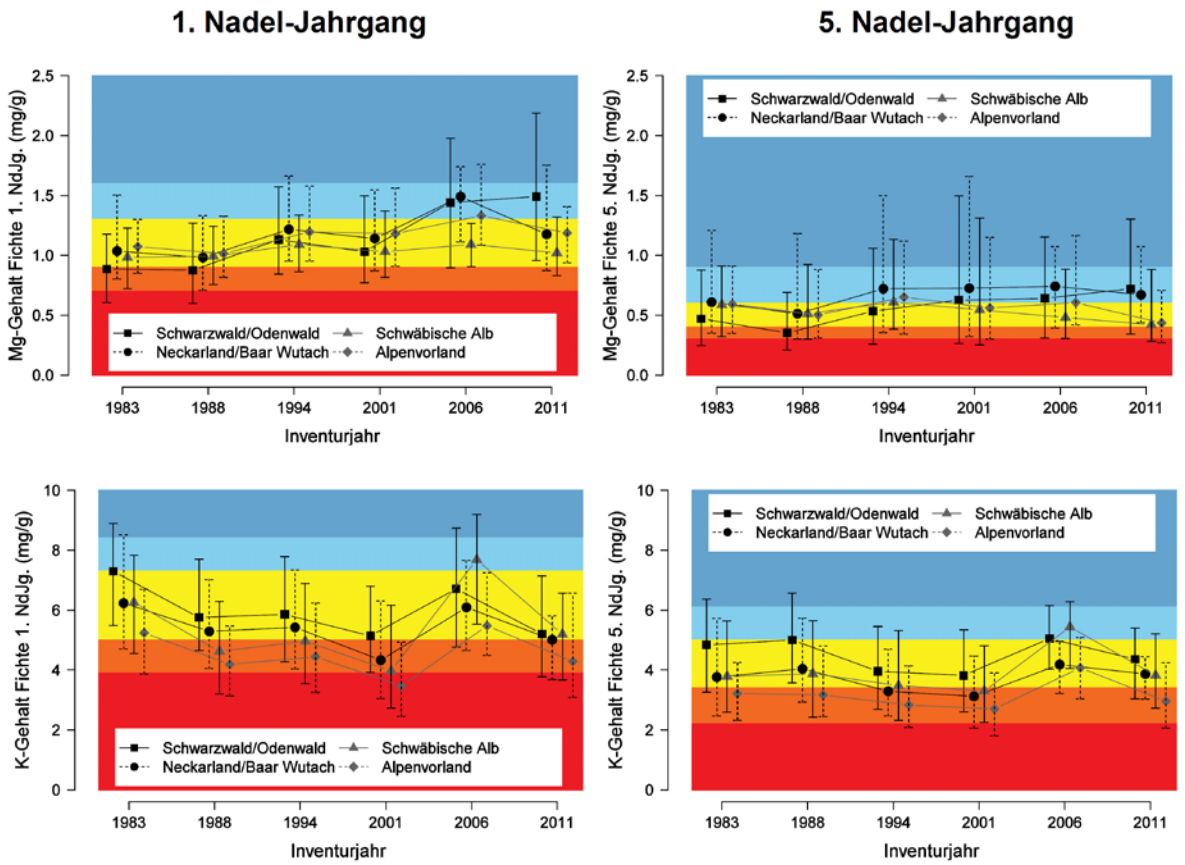


Abbildung 5: Magnesium und Kaliumgehalte in den ein- und fünf-jährigen Fichtennadeln differenziert nach Wuchsregionen. Der Farbhintergrund signalisiert die Versorgungsbereiche (Rot: Mangel, orange: gering, gelb: normal, hellblau: gut und blau: sehr gut versorgt). Die angegebenen Vertrauensbereiche reichen vom 10 %- bis zum 90 %-Perzentil.

den Mineralisierungsschub nach 2003 reagierte, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die im Vergleich zur Fichte tiefere Wurzelraumerschließung zurückzuführen. Die Versorgungslage ist damit weniger von witterungsbedingten Schwankungen der Nährelementverfügbarkeit aus volatilen Nährstoffpools wie der Humusauflage abhängig.

Die Ernährungslage der Buche ist in vielen Bereichen kritisch

Obwohl die Nährelementgehalte für die Baumart Buche erst seit Beginn des Jahrtausends aufgenommen wurden, zeigen die Ergebnisse der drei bisher durchgeführten Inventuren deutliche Entwicklungstendenzen auf (Abbildung 6). Im Gegensatz zu Fichte und Tanne ist für kein Makronährelement ein Anstieg der Gehaltswerte im Jahr 2006 erkennbar. Während die drei Inventuren für die Kaliumernährung eine gute Versorgung belegten, fallen die Stickstoff-, Phosphor- und Magnesiumgehalte innerhalb der elfjährigen Beobachtungsperiode in den Bereich einer angespannten Versorgung bzw. bis in den Mangelbereich ab. Sowohl für Stickstoff als auch für Magnesium ist dieser Rückgang, ausgehend von einem guten Versorgungsniveau noch zu Beginn des Jahrtausends, beunruhigend. Dieser abfallende Trend könnte eventuell eine Reaktion auf die frühere Bodenversauerung darstellen, die auf den besser versorgten Buchenstandorten mit zeitlicher Verzögerung aktuell an Bedeutung gewinnt.

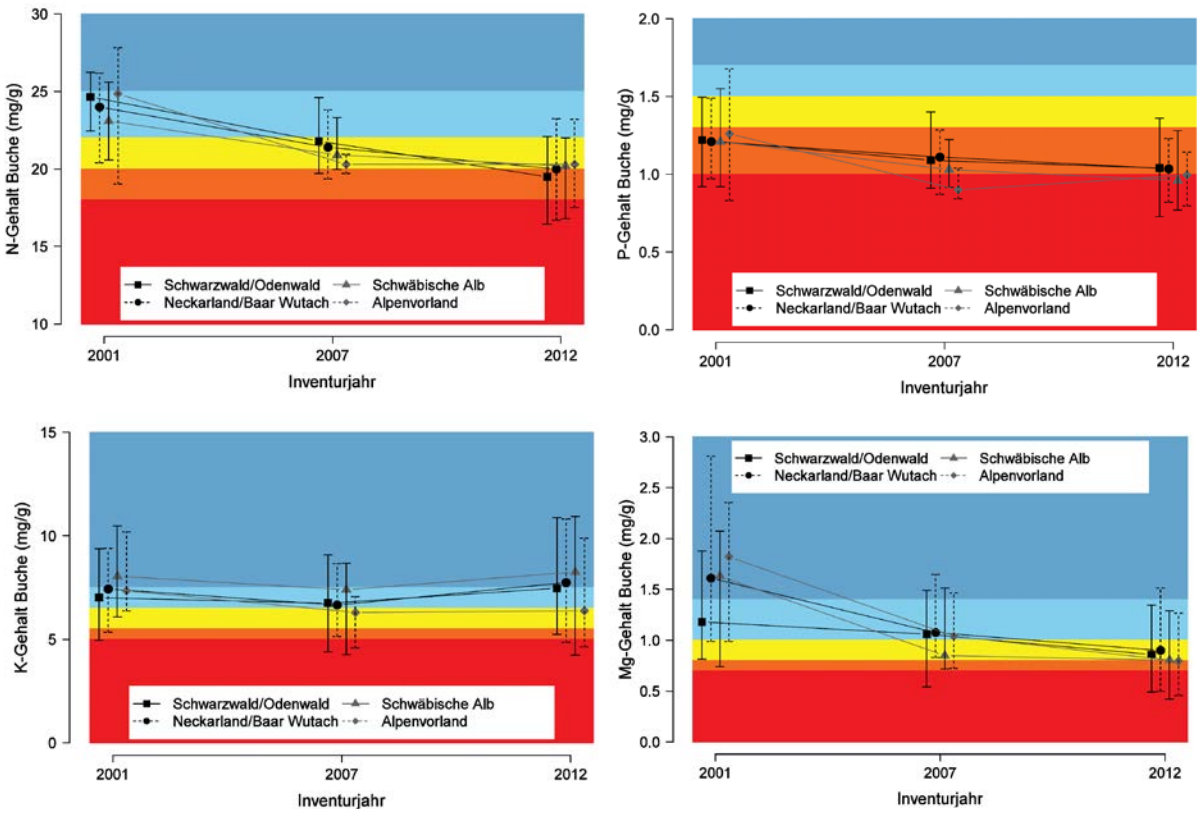


Abbildung 6: Elementgehalte (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium) in den Buchenblättern. Für Schwefel ist der Übergang in den Bereich einer angespannten Versorgungslage durch die horizontale Referenzlinie gekennzeichnet.

Waldumbau und Bodenschutzkalkung zeigen Wirkung

Der Nährelementstatus der Waldbäume ist eine wichtige Indikatorgröße für die Verfügbarkeit der Nährstoffvorräte von Waldböden. Die bis zu Beginn des neuen Jahrtausends für die Fichte beobachteten rückläufigen Nährelementgehalte wurden ursächlich als Folge der Waldbodenversauerung interpretiert. Dieser Zusammenhang wurde in der Waldökosystemforschung vielfach belegt. Durch gezielte Bodenschutzkalkungsmaßnahmen und die Zugabe additiver Nährstoffkomponenten wie z. B. Kalium wurde versucht, dem versauerungsbedingten Verlust essentieller Nährelementvorräte und deren Verfügbarkeit entgegen zu wirken. Dies war auch der Grund, weshalb insbesondere in den früheren Mangelregionen eine Entspannung erreicht werden konnte, da die Kalkungsmaßnahmen dort bereits frühzeitig eingeleitet wurden. Begleitend trug der Umbau der Wälder hin zu einer naturnäheren Bestockung mit höheren Anteilen standortsangepasster Baumarten zur Verbesserung der Nährstoffversorgung bei. Die anhaltend negativen Trends der Phosphorernährung für Tanne und Buche sowie der Magnesiumversorgung von Buche zeigen aber, dass trotz rückläufiger Säureeinträge nicht von einer generellen Entspannung oder gar Erholung ausgegangen werden kann. Ob die in den Inventurjahren 2006/2007 und 2011/2012 günstige Nährelementversorgung der Baumart Fichte nur ein, dem Vorratsabbau von organischer Substanz geschuldetes Strohfeuer darstellt, muss noch abgewartet werden.

Ursachenforschung und Ableitung relevanter Maßnahmen kann nur auf Basis eines umfassenden Monitorings weiter erfolgen

Statistische Zusammenhangsanalysen bestätigen die multikausalen Zusammenhänge zwischen standörtlichen Nährstoffvorräten, klimatischen Rahmenbedingungen, Veränderungen im Bodenzustand und der Ernährungssituation von Fichten und Buchen. Die Fortführung der Inventuren der Nährelementversorgung ist angesichts der beobachteten Dynamik der Nährstoffgehaltswerte und zur Verbesserung von Ursache-Wirkungs-Modellen zwingend erforderlich. Während die Frage der Bodenversauerung im Hinblick auf rückläufige Stoffeinträge als Schadursache an Bedeutung verlieren wird, muss die Thematik der Verfügbarkeit von Nährstoffen in Zeiten des Klimawandels oder der Nährstoffnachhaltigkeit der Biomassenutzung in den Vordergrund rücken. Deren Auswirkungen lassen sich nur mit Hilfe eines räumlichen, wie auch zeitlich hinreichend aufgelösten Aufnahmeverfahrens, wie es derzeit bei der Ernährungsinventur angewandt wird, erkennen.

2.3 Schwermetallvorräte nehmen in der Humusauflage ab – Verlagerung in den Oberboden?

Hochsignifikante Abnahmen der Konzentrationen an Cadmium, Kupfer und im Besonderen an Blei (Abbildung 7) in den L+Of-Humuslagen belegen einen starken Rückgang der atmosphärischen Depositionen. Diese schnell umgesetzte Humusschicht ist laut den aktuellsten Messergebnissen deutlich weniger belastet als bei der BZE1. Keine Änderungen der Konzentrationen zeigten sich hingegen in den Oh-Lagen, welche eine Stabilisierung und Konzentrierung der Schwermetalle aufweisen. Weiter stellt sich die Abnahme der Gesamtvorräte in den Humusauflagen als hochsignifikant dar. Dieser Rückgang begründet sich größtenteils im Abbau ebendieser Humusauflagen. Da Schwermetalle jedoch nicht abgebaut werden, muss eine Verlagerung in den Mineralboden stattgefunden haben. Für die Mineralbodenhorizonte liegen jedoch keine Vergleichsdaten der BZE1 bezüglich Schwermetallkonzentrationen vor. Somit kann der Effekt in diesem Kompartiment nur abge-

schätzt werden. Da Schwermetalle im mineralischen Oberboden in deutlich größeren Mengen (bei geringen Konzentrationen) gespeichert sind, der Vorrat in der Humusauflage dazu jedoch vergleichsweise sehr gering ist, sollte der Schwermetallaustrag aus der Humusauflage kaum die Schwermetallkonzentrationen im mineralischen Oberboden erhöhen.

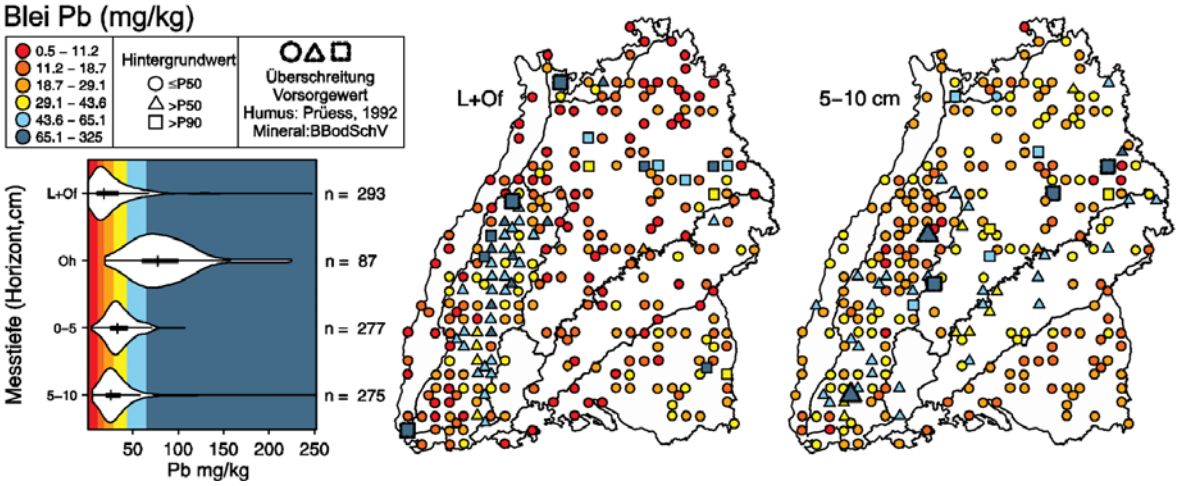


Abbildung 7: Konzentrationen des Schwermetalls Blei (Pb) in den Messtiefen L+Of, Oh, 0-5 cm und 5-10 cm sowie deren räumliche Verbreitung mit Vergleich der Schwermetallhintergrundwerte in Oberböden aus der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (LGRB (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE 2005) (P50 = 50 % -Perzentil, P90 = 90 % -Perzentil) sowie den Vorsorgewerten nach PRÜESS (1992) für die Humusauflagen und nach der BBodSchV für die Mineralhorizonte. Große Symbole kennzeichnen Standorte, bei denen die Vorsorgewerte überschritten wurden.

2.4 Kohlenstoffspeicher Wald

Im Rahmen der Bewertung globaler Kohlenstoffsenken und Quellen werden den Wäldern hohe Sequestrierungspotenziale zugeschrieben. Die BWI-konforme Aufnahme der Bestockung an den BZE-Punkten erlaubt eine synoptische Bewertung der gesamten Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Baden-Württembergs (Abbildung 8). Im Mittel sind an den BZE-Punkten aktuell 242 t/ha im Ökosystem Wald gespeichert. Dabei ist der Kohlenstoffvorrat in der lebenden Bestandesbiomasse (ober- und unterirdisch) mit durchschnittlich (arithmetisches Mittel) 132 t/ha und ca. 54 % des Ökosystempools das bedeutendste Kompartiment. Der zweitgrößte C-Pool ist mit durchschnittlich etwa 104 t/ha und etwas über 43 % des Gesamtpools der Bodenkohlenstoffvorrat (Mineralboden bis 90 cm sowie der Humusauflage inklusive grober Partikel < 5 cm). Dabei ist die Kohlenstoffmenge in der Humusauflage mit durchschnittlich nur 15.5 t/ha und ca. 6 % des C-Gesamtvorrats gering. Auch die Kohlenstoffvorräte im Totholz (liegendes und stehendes Totholz) sind mit ca. 6 t/ha und einem Anteil von ca. 2.5 % am Gesamt-Kohlenstoffpool relativ niedrig.

Größter Umsatz in der Humusauflage

Als sensibelstes Kompartiment der Waldböden zeigt sich bei den Auswertungen der BZE die Humusauflage. Gehemmte Humusabbaubedingungen (durch feuchtkühle oder nährstoffarme Rahmenbedingungen oder

geringe Durchmischung von Nadel- und Blattstreu) fördern die Anreicherung organischer Substanz, wohingegen gute Nährstoffversorgung, Baumartendurchmischung und günstige klimatische Bedingungen den mikrobiellen Abbau der organischen Substanz beschleunigen. Eine Veränderung der Humusformen (Abbildung 9) lässt daher Rückschlüsse auf veränderte Rahmenbedingungen für den Humusumsatz zu. Zwischen den beiden Bodenzustandserhebungen wird ersichtlich, dass eine Entwicklung von Humusformen in Richtung humusärmeren und besseren Humusabbau widerspiegelnde Humusformen stattgefunden hat. Dabei findet dieser Trend zur Humusreduzierung in den meisten Regionen statt. Auf Standorten, die vor der BZE1 gekalkt wurden, konnte der mengenmäßig größte Abbau festgestellt werden. Hiervon sind primär Standorte betroffen, die im Rahmen der damaligen Kalkungskulisse als nährstoffärmste Standorte, vor allem im Schwarzwald, gekalkt wurden und als Folge von Monokulturen (Fichtenbestände) große Mengen an labilem Auflagehumus angereichert hatten. An den Standorten, die zwischen den beiden Erhebungen gekalkt wurden, ist jedoch

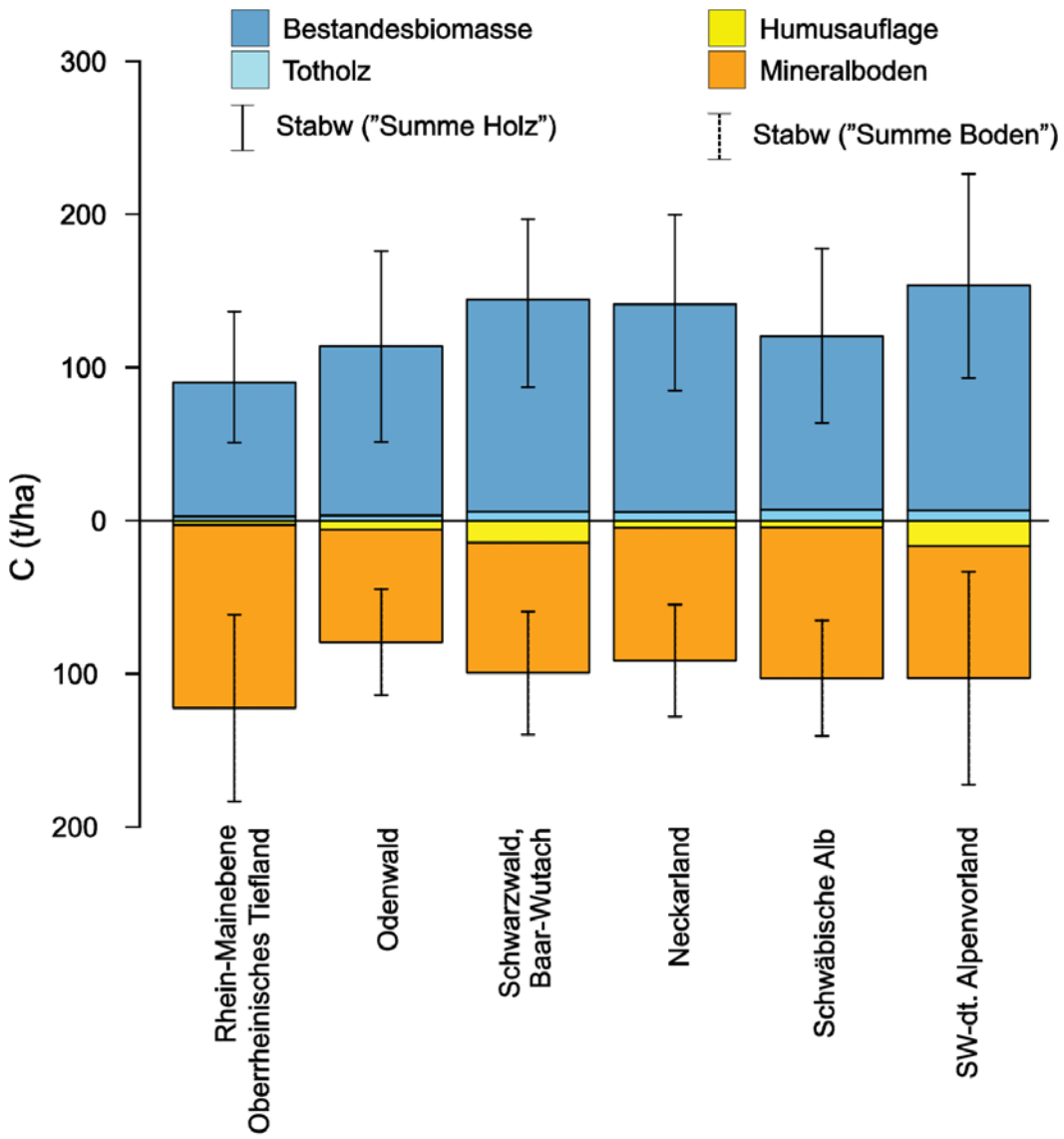


Abbildung 8: In der Bestandesbiomasse und im Boden gespeicherte Kohlenstoffmengen nach Wuchsgebieten. Darstellung arithmetische Mittelwerte ± einfache Standardabweichung.

kein stärkerer Abbau als an ungekalkten Standorten feststellbar. Die Kalkung ist hier nicht als primäre Ursache anzusehen. Vielmehr müssen die über Jahrzehnte ablaufenden Umbaumaßnahmen bis hin zu aufgelockerten und stärker durchmischten Beständen für die verbesserten Rahmenbedingungen des Abbaus der organischen Auflagen als primär verantwortlich gesehen werden. Daneben haben multivariate Regionalisierungsmodelle Hinweise auf den Einfluss der Reliefposition und somit die standörtliche Suszeptibilität gegenüber klimatischen Bedingungen und Änderungen geliefert.

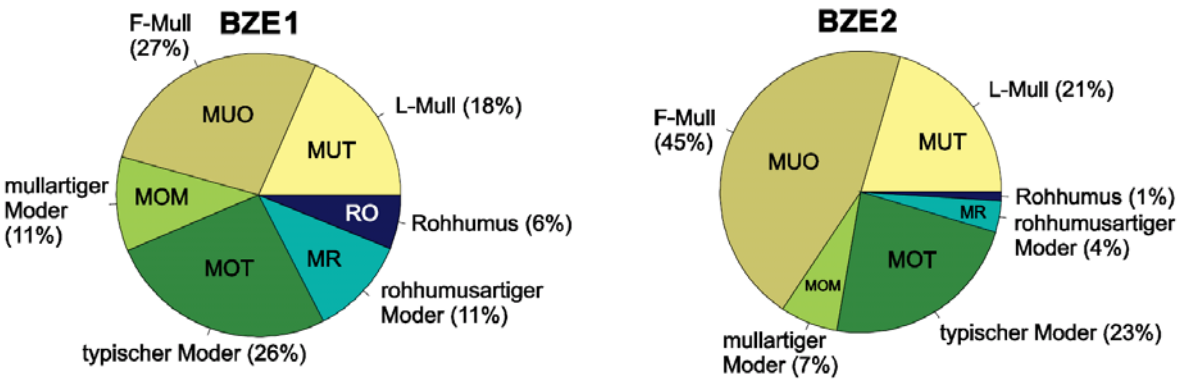


Abbildung 9: Anteile der Humusformen zum Aufnahmezeitpunkt der BZE1 und der BZE2 (MUT = L-Mull; MUO = F-Mull; MOM = mullartiger Moder; MOT = typischer Moder; MR = rohhumusartiger Moder; RO = Rohhumus)

Kohlenstoffvorräte nehmen überwiegend ab

An den Abbau der Humusauflagen ist eine Abnahme der Kohlenstoffvorräte im gesamten Boden gekoppelt, die zusammen mit den Veränderungen im Mineralboden bis 30 cm Tiefe landesweit bei ca. 500 - 700 kg/ha/a liegt. Dabei ist eine hohe Variabilität festgestellt worden, so dass eine Ursachenidentifikation mit Hilfe der BZE kaum möglich ist, ausgenommen derjenigen, die bereits für die Humusauflagen diskutiert worden ist. Als positiver Trend sei die Zunahme der Kohlenstoffvorräte im Mineralboden, vorwiegend gekalkter Standorte hervorgehoben, deren Ursachen diskutiert und weiter untersucht werden müssen. Plausibel erscheint, dass die Kalkung zunächst eine erhöhte Umsetzung organischer Substanzen in der Humusauflage initiiert. Die Abbauprodukte reichern sich dabei in Form stabiler Calciumhumate im mineralischen Oberboden langfristig an und führen zu einer längerfristigen Sequestrierung von Kohlenstoff im Boden.

Die Regionalisierung der Kohlenstofftrends hat neben dem flächenhaft dominierenden Abbau organischer Substanz auch Regionen mit Kohlenstoffanreicherung ergeben (Abbildung 10). Im Oberrheinischen Tiefland überwiegt die Zunahme an Kohlenstoffvorräten vor allem im Mineralboden. Dies ist primär eine Folge guter Humifizierungsbedingungen und einer Stabilisierung organischer Verbindungen im Mineralboden. Ursächlich sollte hierbei die Zunahme trockener Bedingungen in dieser Region diskutiert werden, welche eine weitere Mineralisierung hemmen.

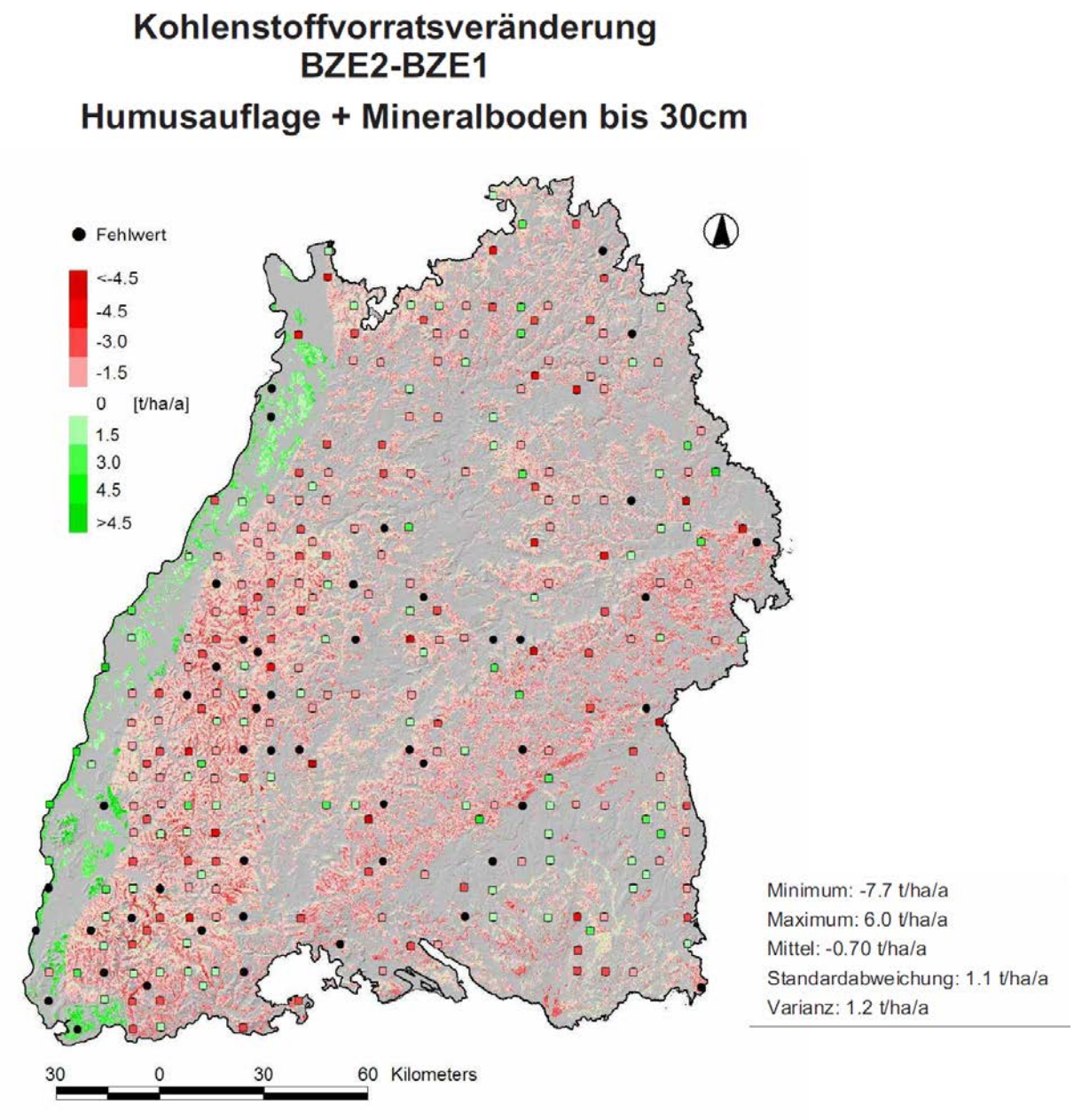


Abbildung 10: Die Veränderung der organischen Kohlenstoffvorräte kann über Regionalisierungsmodelle plausibel von den Punkten der BZE auf die Fläche übertragen werden.

2.5 Stickstoffsättigung ist landesweit hoch, nimmt jedoch signifikant ab

In Baden-Württemberg lassen sich bis auf wenige, meist feinbodenarme Standorte kaum Böden mit mangelnder Stickstoffversorgung identifizieren. Die N-Vorräte sind dabei stark an die organische Substanz im Boden gekoppelt. In landesweiten Beobachtungen lassen sich in allen Bodentiefen hochsignifikante Abnahmen des N-Vorrats erkennen (im Mittel bei 68 kg/ha/a für Humusauflage und im Mineralboden bis 30 cm, inklusive der Unterbodenverluste summiert sich der Verlust auf ~ 100 kg/ha/a auf, siehe Tabelle 1)). Die Vorräte im Oberboden weisen dabei einen starken Zusammenhang mit den Vorratsveränderungen des organischen Kohlenstoffs auf. Mit zunehmender Bodentiefe wird dieser Zusammenhang schwächer, was die Hypothese bestärkt, dass es sich beim im tieferen Mineralboden umgesetzten Stickstoff überwiegend um anorga-

nische Verbindungen handeln muss. Primäre Ursache der N-Abnahme ist jedoch der Abbau organischer Substanz im Boden. Des Weiteren ist von einer verstärkten N-Aufnahme durch hohe Wachstumsraten auszugehen. Für Baden-Württemberg lagen im Zeitraum zwischen den Inventuren bzw. zur Zeit der BWI2 aufgrund günstiger Altersklassenverteilungen die Zuwachsraten im Bundesvergleich am höchsten. Ebenso können erhöhte Stickstoffumsätze (beispielsweise durch Nitrifikation aufgrund erhöhter pH-Werte), erhöhte N-Aufnahmeraten durch höhere Laubbaumanteile oder erhöhte N-Auswaschungen (in Kombination mit Basenverlusten, siehe 1:2-Extrakte) zu den reduzierten N-Gehalten geführt haben. Die Annahme, dass reduzierte Depositionsraten zu einer Abnahme geführt haben, kann jedoch nicht bestätigt werden, da die Depositionsraten, die an den Dauerbeobachtungsflächen des Level-II-Messnetzes gemessen werden, in den letzten Jahren keine deutliche Abnahme aufweisen. Die Veränderungen im Stickstoffhaushalt sind entscheidend für viele Ernährungs- und Versauerungsprozesse im Wald und bedürfen einer intensiven weiteren Beobachtung.

Tab. 1: Absolute (Median) und relative (%) Veränderungen der Stickstoffvorräte zwischen BZE1 und BZE2 (unstratifiziert und in Abhängigkeit von Kalkungsmaßnahmen; *** p ≤ 0.001, ** p < 0.01, * p < 0.05).

ΔVorrat N (kg/ha/a)	*unstratifiziert (N = 183)*			*ungekalkt (N = 140)*			*vor BZE1 gekalkt (N = 21)*			*Zwischen BZE1 und BZE2 gekalkt (N = 19)*		
	Med	*%*	*Sign*	***Med***	*%*	*Sign*	***Med***	*%*	*Sign*	***Med***	*%*	*Sign*
Humus	**-7.2**	-3.0	***	**-6.4**	-3.1	***	**-31.0**	-3.4	*	**-2.0**	-1.5	
0-5 cm	**-11.5**	-1.0	***	**-15.6**	-1.2	***	**-5.1**	-0.7		**-4.4**	-0.5	
5-10 cm	**-13.0**	-1.6	***	**-14.0**	-1.8	***	**-3.3**	-0.8		**-5.3**	-1.2	*
10-30 cm	**-31.5**	-1.5	***	**-33.0**	-1.6	***	**-34.7**	-2.2	**	**-22.7**	-1.2	**
30-60 cm	**-40.3**	-2.0	***	**-42.7**	-2.2	***	**-27.7**	-2.1	***	**-24.8**	-1.4	***
60-90 cm	**-35.9**	-2.9	***	**-37.4**	-3.0	***	**-23.5**	-3.4	***	**-21.5**	-2.3	***
0-30 cm	**-56.5**	-1.5	***	**-62.0**	-1.6	***	**-23.1**	-0.9		**-21.1**	-1.0	*
0-60 cm	**-98.6**	-1.7	***	**-108.7**	-1.8	***	**-94.0**	-2.3	**	**-58.7**	-1.3	**
Hum+Min30	**-68.2**	-1.4	***	**-73.0**	-1.4	***	**-58.1**	-1.4	**	**-54.5**	-1.6	**

2.6 Befahrungsschäden auf nahezu einem Drittel der Waldfläche

Waldböden besitzen aufgrund ihrer lockeren Lagerung und starken Durchwurzelung vor allem im Oderboden gute Luft- und Wasserhaushaltseigenschaften. Mit diesen Eigenschaften geht jedoch auch eine geringe Stabilität und somit hohe Befahrungssensibilität einher. Der Status quo der im Zuge der BZE erfassten Verformungsschäden ist sowohl im Hinblick auf die Intensität wie auch das räumliche Verbreitungsmuster alarmierend (Abbildung 11). Insgesamt zeigten sich auf den Bestandesflächen außerhalb von Rückegassen Verformungsschäden auf 30 % der Waldflächen. Bezogen auf die befahrbaren Lagen (2/3 der Waldfläche) sogar 45 %. Hier liegen schadensträchtige Veränderungen der Bodenstruktur vor, was in einer deutlichen Reduzierung der Belüftung und der Durchwurzelbarkeit resultiert.

In den Handlungsanweisungen für Maschineneinsätze bei der Waldbewirtschaftung hat sich die Konzentration von Fahrbewegungen und damit auch von befahrungsbedingten Bodenschäden auf definierten Fahrtrassen zumindest programmatisch etabliert. Bodenschäden haben sich jedoch auf großer Fläche akkumuliert und es besteht Handlungsbedarf im Hinblick auf die Umsetzung der Vermeidungsstrategien. Mit der Implementierung des strategischen Nachhaltigkeitsmanagements (WALDENSPUHL & HARTARD 2010) für den Landesforstbetrieb Baden-Württembergs bietet sich die Chance, physikalischen Bodenschutz als Ziel für den Betrieb mit hoher Verbindlichkeit festzulegen und in ein Controlling einzubinden. Neben der Vermeidung von Befah-

rungsschäden ist der hohe Anteil an Befahrungsschäden als Anlass zu sehen, praktische Verfahren der Regeneration zu entwickeln und umzusetzen.

Für eine Erfolgskontrolle bieten sich die im Rahmen der BZE erfassten Verformungsschäden an, die den Status quo abbilden. Wird eine Folgeaufnahme in vergleichbarer Methodik durchgeführt, kann der Entwicklungstrend zwischen den beiden Erhebungszeiträumen abgeleitet werden. Damit wäre eine quantitative Bewertung der Bemühungen um Bodenschutz beim Maschineneinsatz auf Landesebene möglich.

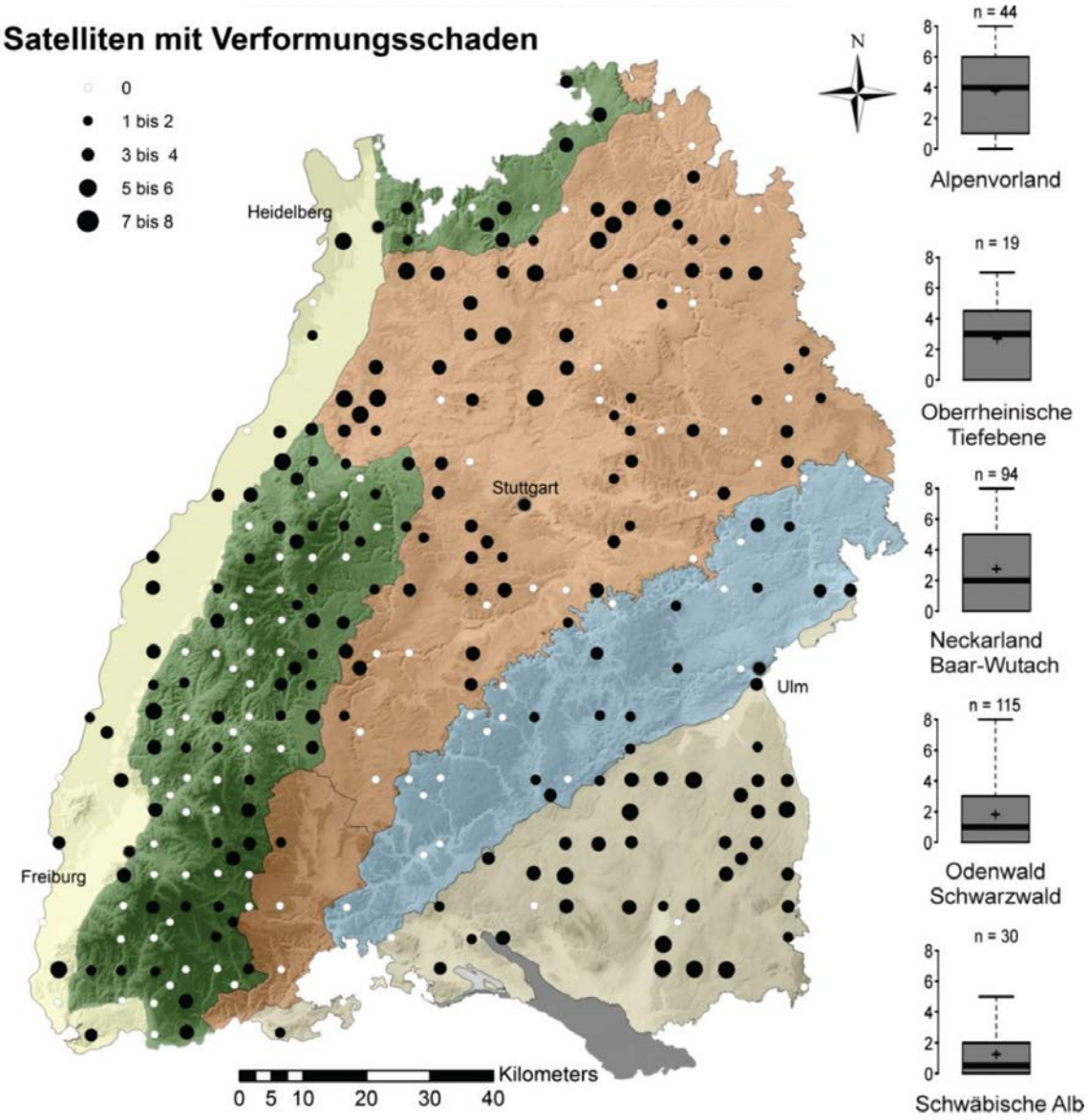


Abbildung 11: Räumliche Verteilung der Verformungsschäden. Die Größe der Kreise repräsentiert die Anzahl an Satelliten mit befahrungsbedingten Bodenstrukturstörungen. An jedem BZE-Punkt wurden die Befahrungsschäden an jeweils acht Punkten, sogenannten Satelliten aufgenommen.

2.7 Feinwurzelverteilungen als Abbild der Anpassungsstrategie der Bäume

Die Feinwurzelverteilungen an den BZE-Standorten können als Abbild der Strategie der Bäume verstanden werden, die Wasseraufnahme aus dem Boden zu maximieren und dadurch die Wurzelverteilung den bodenhydrologischen Rahmenbedingungen entsprechend anzupassen. Dabei wurden zwischen den unterschiedlichen Baumarten keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Buchenbestände weisen beispielsweise nur tendenziell tiefgründigere Feinwurzelverteilungen auf als Fichtenbestände. Vielmehr prägt die standörtliche Variabilität das Wurzelbild, so dass die Baumart als erklärender Faktor in den Hintergrund tritt, zumal eine waldbaulich standortsgerechte Baumartenwahl eine vergleichende und stärker differenzierte Betrachtung erschwert (Abbildung 12). Insbesondere der Reliefparameter Hangneigung sowie Gradienten bodenphysikalischer Eigenschaften (z.B. Steingehalts- oder Trockenraumdichtenunterschiede) innerhalb eines Profils stehen im Zusammenhang mit den Feinwurzelverteilungsmustern. Die Erklärungskraft bodenphysikalischer Parameter nimmt jedoch ab, wenn nur Standorte mit gleichen Beständen (Fichte oder Buche) untersucht werden. In diesen Fällen nimmt die Bedeutung bodenchemischer Parameter zu, speziell solche, die den Versauerungszustand charakterisieren.

Durch die Integration der Feinwurzelverteilungen in die bodenhydrologische Modellierung konnte die Wasserhaushaltsmodellierung deutlich verbessert werden.

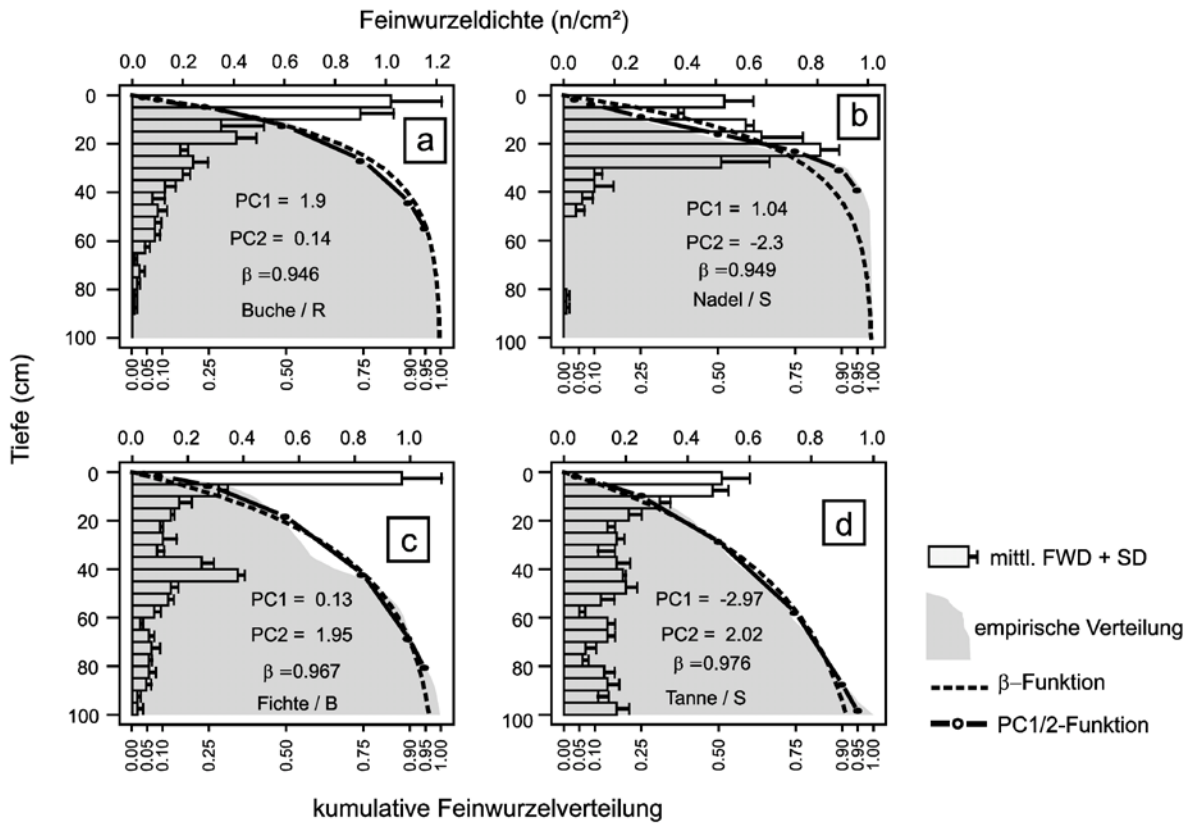


Abbildung 12: Beispiele typischer Feinwurzelverteilungen unterschiedlicher Baumarten auf unterschiedlichen Bodenklassen (Feinwurzeldichten, kumulative Feinwurzelverteilungen sowie über die β-Funktion (GALE & GRIGAL 1987) und die PC1/2-Funktion abgeleitete Tiefenverteilungen) (Details der Modelle in HARTMANN & V. WILPERT (2014b)).

2.8 Plausible Simulation von Trockenstress und Stauwasser

Mit der Wasserhaushaltsmodellierung steht ein effektives Werkzeug zur Verfügung, um standörtliche Gegebenheiten und Veränderungen auch langfristig bewerten zu können.

Die Variabilität der Witterung und des Klimas hinsichtlich eines prognostizierten bzw. bereits stattfindenden Klimawandels stellt eine Herausforderung für den Waldbau dar. Als kritisch gilt hierbei eine Zunahme längerer Trockenphasen in der Vegetationsperiode, die den Wald bei langfristiger Unterschreitung grenzwertiger Wasserversorgung stressen oder schädigen können. Der Waldboden ist hierbei die entscheidende Matrix, welche die primär über den Niederschlag gesteuerte Wasserversorgung zeitlich auszugleichen vermag. Die Waldböden in Baden-Württemberg stellen sich dabei als äußerst variabel und substratabhängig dar. Als Standorte mit hoher Wasserspeicherkapazität erweisen sich größtenteils Böden im Oberrheinischen Tiefland als auch diejenigen mit nicht zu geringmächtiger Lössauflage im Neckarland (Abbildung 13). Auch tiefgründig durchwurzelte Braunerden und Lessivés aus unterschiedlichen Substraten des Südwestdeutschen Alpenvorlandes und des Schwarzwaldes weisen zumindest mittlere bis hohe Werte auf. Geringe bis äußerst geringe Werte herrschen dahingegen auf den flachgründigen und/oder stark sandigen Standorten im Schwarzwald (Podsole, Pseudogleye), auf Böden aus Kalkstein und Tonböden des Neckarlandes und der Schwäbischen Alb vor.

Bei der Kapazität zur Wasserspeicherung handelt es sich jedoch nur um einen potentiellen, maximal möglichen Speicherwert. Erst das Zusammenspiel von jahreszeitlich variablen Niederschlägen bestimmt die tatsächliche Wasserversorgung. Dies abzubilden ist die Aufgabe der Wasserhaushaltsmodellierung.

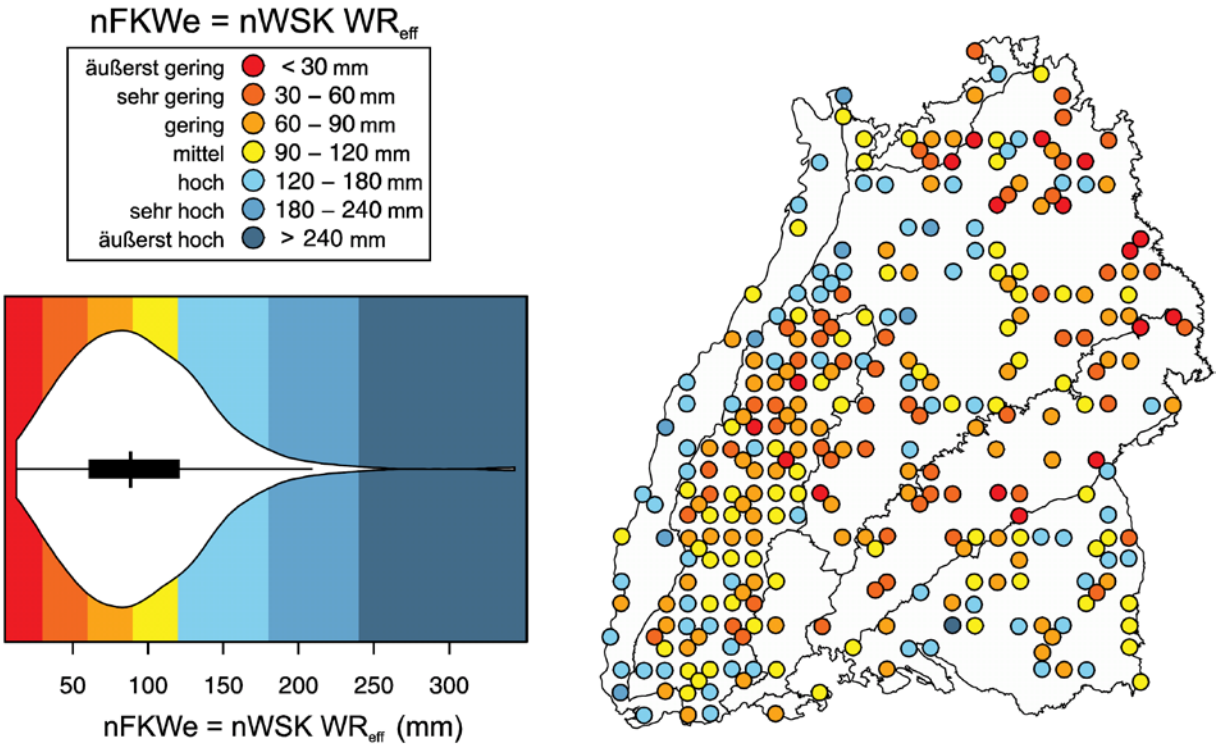


Abbildung 13: Räumliche Verteilung der nach AK-STANDORTSKARTIERUNG (2003) bewerteten nutzbaren Feldkapazitäten im effektiven Wurzelraum nFKWe (= nutzbare Wasserspeicherkapazität im effektiven Wurzelraum nWSK WR$_{eff}$).

Hierfür werden neben detaillierten physikalischen Bodenparametern (die im Zuge der BZE gemessen oder aus Pedotransferfunktionen abgeleitet wurden) auch lokale Klimaparameter in Tagesauflösung sowie Bestandes- und Durchwurzelungsinformationen benötigt. Mit hohem Rechenaufwand konnte so retrospektiv für die Jahre 1971-2007 der Wasserhaushalt plausibel nachgebildet werden (Abbildung 14). Hierbei zeigt sich, zum einen aufgrund unterschiedlicher Wasserspeicherkapazitäten, zum anderen wegen regionaler Variabilität klimatischer Rahmenbedingungen, für die modellierten Standorte eine große Spannbreite der Bodenwasserverfügbarkeit. Für die Modellvariante „90-jährige Buche“ ist auf 7 % der Standorte in allen simulierten Jahren die mittlere Speicherfüllung in der Vegetationsperiode als kritisch zu bewerten. Auf 60 % der Standorte liegt die mittlere Speicherfüllung in der Hälfte aller Jahre ebenfalls unterhalb kritischer Grenzwerte. Dies verstärkt sich bei der Modellvariante mit „70-jähriger Fichte“, die insgesamt trockener ausfällt. Hier wurde für 27 % der Standorte in jedem Jahr temporärer Trockenstress simuliert wie auch auf knapp drei Viertel aller Standorte (73 %) in mindestens der Hälfte aller Jahre. Als gegenläufiges Extrem zur Trockenheit führt Staunässe auf vielen Böden zu Wachstumseinschränkungen. Dies sind Stauwasserböden, in denen versickerndes Wasser oberhalb gering wasserleitender Bodenhorizonte aufgestaut wird und deren Wassersättigungsgrad deshalb regelmäßig den Wert der nutzbaren Feldkapazität überschreitet. Dieser Effekt konnte ebenfalls durch die Modellierung plausibel abgebildet werden.

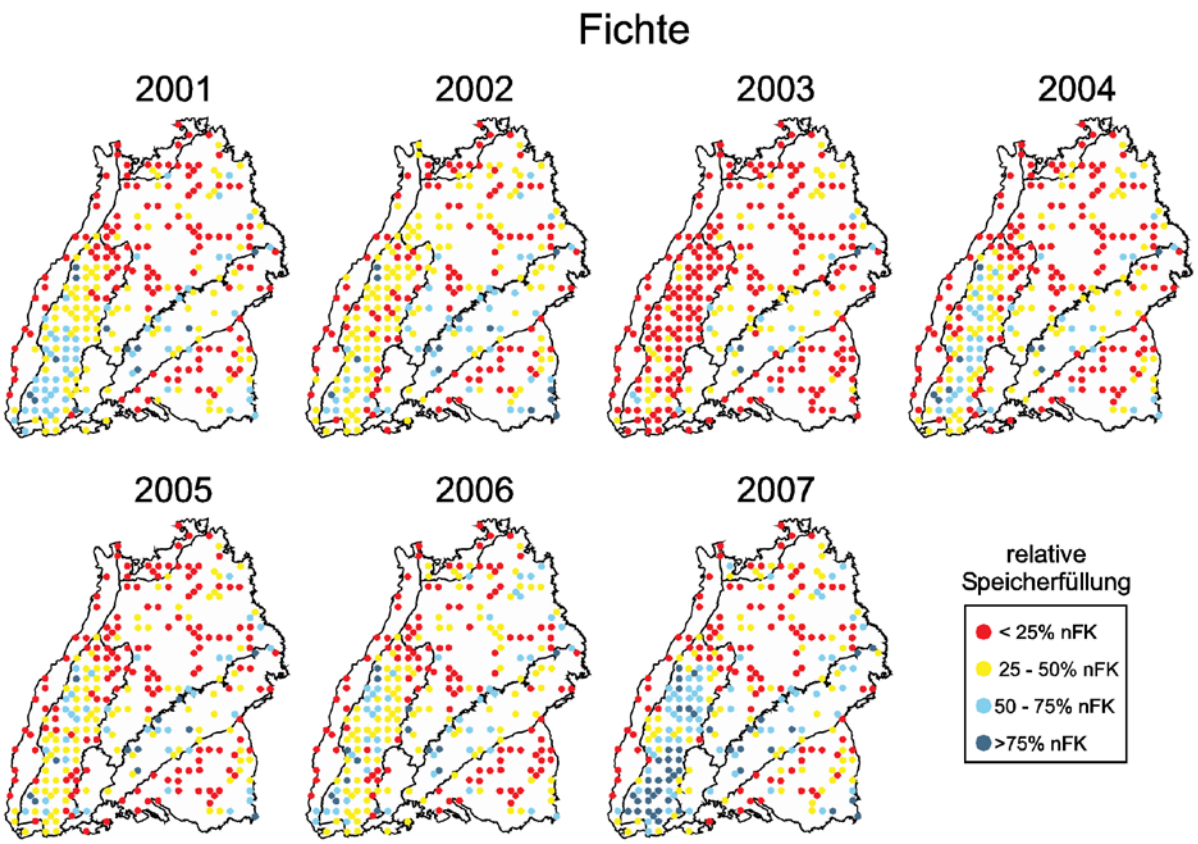


Abbildung 14: Mittlere Füllung der Bodenwasserspeicher in der Vegetationsperiode in % der nutzbaren Feldkapazität im Bodenprofil für die Jahre 2001 bis 2007; Modellvariante „70-jährige Fichte“.

2.9 Entwicklung von Umweltvorsorgestrategien auf der Basis von BZE und anderen Monitoringsystemen

Nachdem wesentliche natürliche Regel- und Puffermechanismen in Waldböden durch Umweltveränderungen belastet und teilweise außer Kraft gesetzt sind, kann man sich nicht mehr uneingeschränkt auf das Regelvermögen der Natur verlassen. Die Messnetze des Forstlichen Umweltmonitorings sind ein umfassendes Instrument der Ökosystemüberwachung, das rechtzeitig Fehlentwicklungen aufzeigt und gezielte Gegenmaßnahmen ermöglicht. Integrale Bestandteile sind die Terrestrischen Waldzustandserfassung, die Bodenzustandserhebung, die Ernährungsinventur sowie Intensivmessflächen zur Aufdeckung kausaler Zusammenhänge und Erfassung ökosystemarer Schlüsselprozesse.

Die Forstlichen Umweltmessnetze sind sukzessiv und isoliert voneinander entstanden. Sie sind räumlich und methodisch auf die jeweilige Fragestellung optimiert und deshalb zwischen den Messnetzen heterogen. Parameterumfang und Fragestellung der Messnetze waren in allen Fällen ursprünglich aus der Waldschadensdiskussion der 1980er und frühen 1990er Jahre motiviert und auf diese ausgerichtet. Da aber die hierfür nötigen Messgrößen sehr fundamental Zustand und Entwicklung von verschiedenen Ökosystemfunktionen nachzeichnen, können sie zur Beantwortung neuer Forschungsfragen und Probleme neu kombiniert und mit geringem Zusatzaufwand zur Ableitung von Entscheidungs- und Unterstützungsinstrumenten und Strategiekonzepten im praktischen Ökosystemmanagement und der Politikberatung entwickelt werden. Voraussetzung dafür ist die fachwissenschaftlich begründbare und statistisch geprüfte Übertragung der an den Messnetzpunkten oder Versuchsflächen erhobenen Daten auf die messtechnisch nicht erfassten Flächen, denn die Messungen liegen nur als Punktdaten vor und das Ökosystemmanagement findet flächenhaft statt.

Ein besonders erfolgreiches Beispiel für die Ableitung von Managementstrategien aus einer Kombination zweckdienlicher Informationen aus verschiedenen forstlichen Umweltmessnetzen ist die Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung, die derzeit in der Praxis umgesetzt wird. Diese Strategieentwicklung basiert im Kern auf Daten der BZE, kombiniert mit Daten aus der Standortskartierung, dem digitalen Geländemodell sowie den GIS-Daten aus Natura 2000, Waldbiotopen, Wasserschutz und anderen Schutzkategorien. Letztere dienen der kleinräumigen Definition von Ausschlussflächen bei der praktischen Planung der Kalkung.

Für alle Auswertungsansätze, welche eine Prognose der Auswirkung von Umweltveränderungen auf Baumwachstum, Produktivität und Kohlenstoffspeicherung der Wälder zum Ziel haben, ist die enge Koppelung der Daten aus Bundeswaldinventur, BWI (hinsichtlich Kompartimentierung und Wachstum der Biomasse) und aus den Umweltmessnetzen (hinsichtlich der Parametrisierung von Umwelteinflüssen) zwingende Voraussetzung. Die Messnetze haben aufgrund der unterschiedlichen Anforderung an die räumliche/zeitliche Auflösung und des unterschiedlichen Messaufwands unterschiedliche Gitternetzdichten und sind systematisch gegeneinander verschoben, da die BWI eine „versteckte“ Stichprobe ist, um einen bewirtschaftungsbedingten Bias zu vermeiden. Dieses Problem wurde dadurch gelöst, dass die Messnetzpunkte des 8x8 km Rasters der forstlichen Umweltmessnetze und den im 2x2 km Raster vorliegenden BWI Trakte dadurch miteinander verknüpft wurden, dass auf den Umweltmessnetz – Punkten jeweils eine zusätzliche BWI-analoge Traktaufnahme angelegt wurde, um Bestandesbiomasse und Bestandesstruktur zu charakterisieren. Anders herum wurde an jedem BWI-Trakt an einer vorfestgelegten Traktecke eine stark vereinfachte Bodenansprache an einem Spatenprofil sowie Probenahmen für die laboranalytische Messung wichtiger Leitparameter durchgeführt. Die gewonnenen Daten bilden eine wertvolle und dringend benötigte Grundlage für angestrebte Regi-

onalisierungen wichtiger Bodenparameter, die insbesondere für die Modellierung des Wasserhaushalts benötigt werden. Außerdem wurde eine 16-fach höhere Probendichte für die Bestimmung von Kohlenstoffvorräten des Bodens erreicht als dies bei der BZE alleine möglich wäre. Damit wird die Datengrundlage für die Bestimmung der Senkenfunktion der Böden für Kohlendioxid verbessert (VON WILPERT et al. 2015).

Durch die enge Verknüpfung von BZE und BWI konnten flächendeckende Modelle für die Schätzung von Nährelementbilanzen entwickelt werden, in denen die wesentlichen Stoffströme – Stoffeintrag mit der Deposition (aus Depositionsmessnetz) – Stoffeintrag durch Verwitterung primärer Mineralien (aus BZE) – Stoffaustrag mit dem Sickerwasser (aus BZE) – der Stoffaustrag mit der geernteten Holzbiomasse (aus Ernährungsinventur und BWI) – zueinander in Beziehung gesetzt wurden (V. WILPERT et al. 2011). Damit wurde ein grundlegender und praxistauglicher Strategieansatz für die Bewertung der Nährstoffnachhaltigkeit von Ernteintensitäten entwickelt. Dieser stellt eine auf Messdaten beruhende Entscheidungsgrundlage für unterschiedliche Steuerungsansätze bereit. Einerseits kann durch Szenariorechnungen eine „kritische“ Ernteintensität bestimmt und durch Nutzungsverzicht die Nährstoffnachhaltigkeit eingehalten werden. Andererseits kann das Bilanzdefizit der Nährelemente zur Steuerung von Konzepten zur Nährelementrückführung verwendet werden.

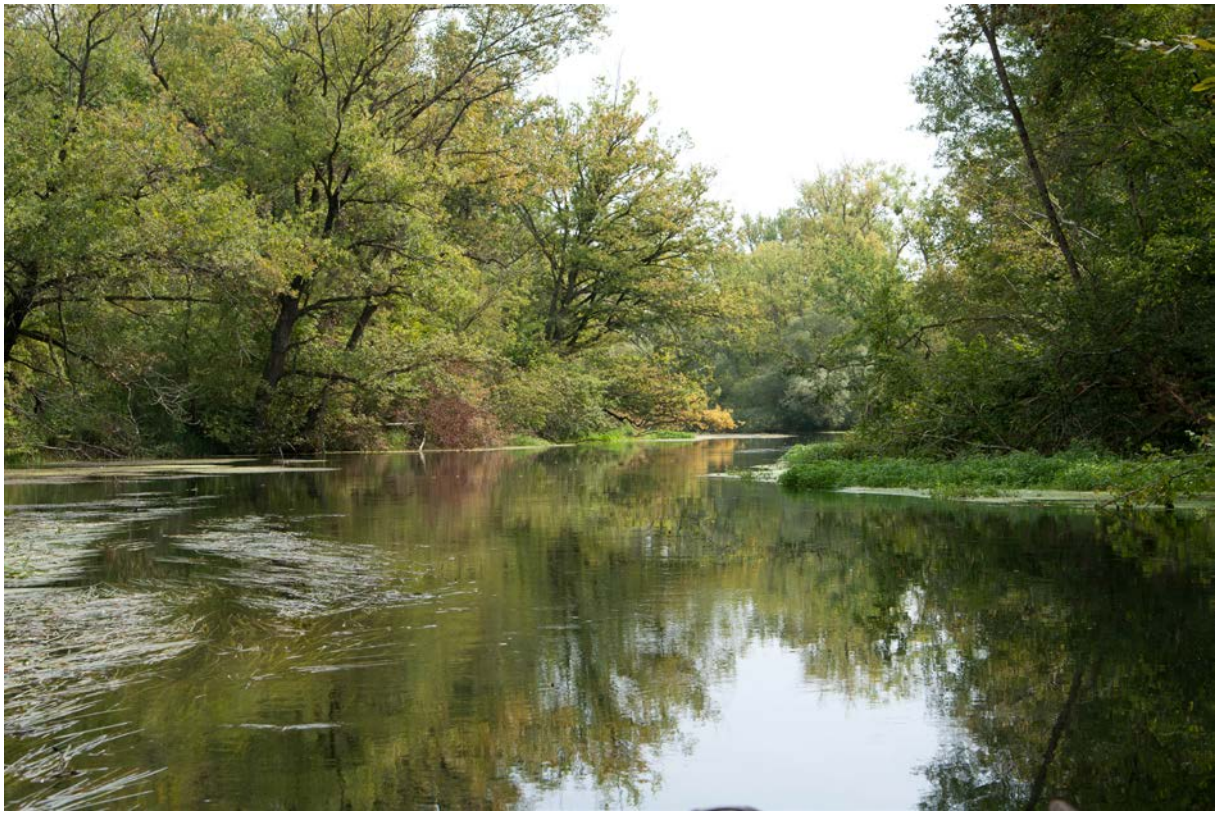
Obwohl die Forstliche Umweltüberwachung aus der Waldsterbensdiskussion entstanden ist, gehen ihre Relevanz und Einsatzmöglichkeit weit über diesen engen Kontext hinaus. Mittlerweile dient sie als unverzichtbare Datengrundlage für die Steuerung der Bodenschutzkalkung, für die Abschätzung der Folgen des Klimawandels, für die Wasserversorgung und Leistung der Wälder oder zur Steuerung der Nährstoffnachhaltigkeit der Holznutzung und damit zur Definition von Möglichkeiten und Grenzen der Holzbiomassenutzung im Wald. Letztere hat in jüngster Zeit im Zusammenhang mit der politischen Wende hin zur Stärkung regenerativer Energienutzung eine besondere Bedeutung gewonnen. Hier werden prognosesichere Entscheidungswerkzeuge benötigt, die auf einer verlässlichen Datenbasis beruhen. Durch die Länge der Datenzeitreihen und mittels moderner Auswertungsmethoden wurde die Forstliche Umweltüberwachung von einem Frühwarnsystem zu einem flexibel einsetzbaren Planungs- und Steuerungsinstrument für die praktische Waldbewirtschaftung entwickelt.

3 Regionale Darstellung der BZE2-Ergebnisse: Waldbodenregionen Baden Württembergs

Die landesweiten Bewertungen des Zustandes und der Trends im Waldboden Baden-Württembergs ließen eine starke räumliche Differenzierung erkennen. Diese orientiert sich überwiegend an den Wuchsgebieten nach ALDINGER et al. (1998), die aus bodenkundlicher Sicht jedoch in Einzelfällen einer weiteren Differenzierung bzw. Generalisierung bedarf, um der bodenkundlich-geologischen Ausrichtung der hier vorgestellten Regionen gerecht zu werden. So sind vor allem die großen Wuchsgebiete Neckarland und Schwarzwald sowie das Alpenvorland durch eine heterogene Geologie geprägt, die sich auch in den unterschiedlichen Bodenformen der Regionen widerspiegelt. Hier ist eine Untergliederung nach geologischen Einheiten bzw. Bodengroßlandschaften (Karte der Bodengroßlandschaften 1:5.000.000, © Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover) nötig. Eine linienscharfe Abgrenzung zwischen den Regionen ist dennoch nicht möglich. Durch tief einschneidende Talerosion wurden beispielsweise in den Grenzgebieten zweier geologischer Einheiten oftmals typische Böden der benachbarten Region als Ausgangssubstrat der Bodenentwicklung freigelegt. Andere Standorte wiederrum sind durch lokale Lössdecken oder fluviatile Akkumulationen geprägt und weichen von den lokal vorherrschenden Böden ab.
Schwerpunkt bei der Beschreibung bilden die regionaltypischen Böden, da mit dem 8x8 km-Raster der BZE2-Aufnahme lokale Besonderheiten nur zufällig erfasst wurden. Im Folgenden werden daher die Regionen anhand der Ergebnisse der BZE2 charakterisiert, die typischen bodenbildenden Prozesse erläutert und eine Bewertung der regionalen Nährstoffsituation (Basensättigungstiefenprofiltypen vgl. Abb. 3) sowie des Wasserhaushaltes (nutzbare Wasserspeicherkapazität im effektiven Wurzelraum vgl. Abb. 13) vorgenommen. Weiterführende Erläuterungen zu den regionaltypischen Leitprofilen findet sich in HARTMANN et al. (2016). Die zu den genannten Profilnummern gehörigen Profilbeschreibungen sind über den Webdienst (HYPERLINK) abrufbar.

3.1 Oberrheinisches Tiefland

Das Oberrheinische Tiefland (in Baden-Württemberg) erstreckt sich im gesamten Westen Baden-Württembergs auf einer Länge von über 250 km in Nord-Süd Ausrichtung und auf einer mittleren Breite von ungefähr 10-30 km (Abbildung 15). Die Gesamtwaldfläche beträgt ca. 81.000 ha (www.forstbw.de). Es handelt sich um das am niedrigsten gelegene Wuchsgebiet mit dem Großteil der Flächen zwischen 100 und 300 mNN. Auch klimatisch ist das Wuchsgebiet außergewöhnlich. Die Niederschläge sind insbesondere im Westen gering und steigen mit Nähe zum Schwarzwald deutlich an. Die Jahresdurchschnittstemperatur von ca. 10 °C ist vergleichsweise hoch.
Das Oberrheinische Tiefland ist geologisch betrachtet Teil eines zentraleuropäischen Grabenbruchs. Dieser Graben wurde seit seiner Entstehung im Tertiär mit Material der aufsteigenden Flanken wieder aufgefüllt. Die jüngsten Sedimente sind neben den eiszeitlichen Terrassenbildungen Gerölle, Flugsande und Löss.
Mehrere eiszeitliche Terrassenablagerungen sind geprägt von carbonatreichen Schottern, Sanden und Lehmen, welche der Rhein aus dem Alpenraum abgelagert hat (Profilnr. 2222, 2230, 2236, 2259). Diese Standorte weisen eine variable Basensättigung auf. Das ursprünglich basengesättigte Ausgangsmaterial ist im Wurzelraum oftmals stärker versauert, hohe Basensättigungen im Unterboden sorgen dort jedoch für eine gute Nährstoffversorgung. Die bodenphysikalischen Eigenschaften hängen von der Korngröße des abgelagerten



Das Oberrheinische Tiefland ist eine Landschaft, die von den Rheinauen geprägt ist. Die Flussauen, ihre Vegetationsformen und Böden sind Ausdruck der hohen Landschaftsdynamik, die durch Hochwasserwellen und ständige Dynamik der Auensedimente charakterisiert ist. Auenböden sind also sehr junge Bodenbildungen. Diese Dynamik ist durch Flussbegradigung, Eindeichung und die dadurch erhöhte Erosion und Eintiefung des Flussbetts nur noch residual auf kleiner Fläche wirksam, wie hier in Teilen der Altrheinarme des Taubergießen. Dies ist ein Bereich, in dem Altrheinarme mit nährstoffreichem Wasser aus dem Rhein und nährstoffarmes Wasser aus Grundwasserquellen, den Gießen, auf engem Raum benachbart sind und eine hohe Vielfalt aquatischer Lebensgemeinschaften ermöglichen (Foto: Jürgen Schäffer).

Materials ab. Sande und Schotter sorgen für eine gute Belüftung bei geringer Wasserspeicherkapazität. Lehmigere Substrate sind prädestiniert für hohe Wasserversorgungspotenziale, jedoch auch anfällig für lessivierungsbedingte Staunässe. Bei geringer Bodenentwicklung auf schotterreichen Substraten finden sich Rendzinen, die bei höheren Anteilen an Feinbodenmaterial in Braunerden übergehen. Viele dieser Standorte sind dem Grundwasser- (Gleye) und Stauwassereinfluss (Pseudogleye) ausgesetzt.

Es wurden neben diesen primär alpinen Sedimenten auch solche mit Ursprung im Schwarzwald entlang der Rheinvorfluter abgelagert und stellenweise wohl auch vermischt (Profilnr. 2218, 2227, 2226, 2289). Bei ähnlich variablen bodenphysikalischen Eigenschaften, wie bei den letztgenannten Böden, weisen diese Sedimente deutlich geringere Nährstoff- und Pufferpotenziale auf, so dass neben der Verbraunung auch fortgeschrittene Versauerung in Form der Podsolierung vorzufinden ist. Späteiszeitlich sowie im Holozän waren die Sedimente meist vegetationsfreier Flächen im Oberrheingraben weiterer Umlagerung ausgesetzt. Durch Winderosion fand eine starke Sortierung des ausgewehten Materials statt. Es bildeten sich

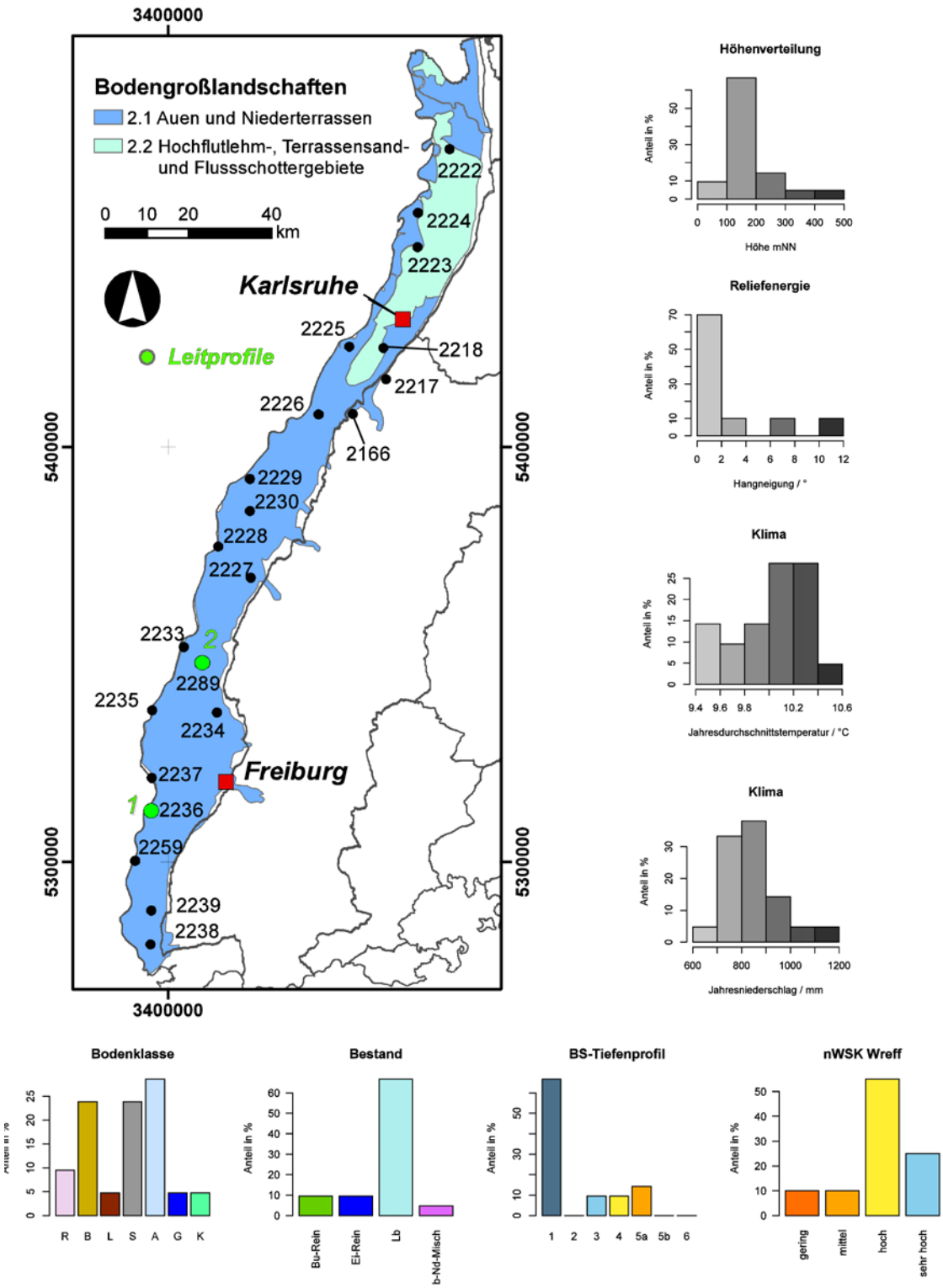


Abbildung 15: Übersicht über die BZE2-Standorte im Wuchsgebiet Oberrheinisches Tiefland, regional gegliedert nach den dominierenden Bodengroßlandschaften; die Histogramme geben die Verteilung der Höhe, der Hangneigung sowie der klimatischen Parameter Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlag an den BZE-Profilen in der Region wieder. Verteilung der BZE2-Standorte auf Bodenklassen (R = Ah-C-Böden, B = Braunerden, L = Lessivés, D = Pelosole, A = Auenböden, G = Grundwasserböden, K = Erd- und Mulmmoore); Bestandestypen; Basensättigungstiefenprofiltypen; nutzbare Wasserspeicherkapazitäten im effektiven Wurzelraum nWSK WR_{eff} = nFK_{We}).

Sanddünen in den Niederungen des nördlichen Oberrheingrabens und in der Vorbergzone des angrenzenden Schwarzwalds kam es zur Akkumulation von bis zu mehreren Metern mächtigen Lössablagerungen (Profilnr. 2217, 2238, 2239, 2234, 2166). Diese sind oft nährstoffreiche Sedimente, die neben guten Belüftungseigenschaften auch hervorragende Wasserspeicherkapazitäten aufweisen und die Gesteinsböden des angrenzenden Schwarzwaldes aufwerten. Nach einer Entkalkung setzt die Tonverlagerung ein (Parabraunerde), die insbesondere im Unterboden zur Verengung von Poren und folglich zu temporärem Stauwasser (Pseudogley, Haftnässegley) führt. Die vorherrschende Auendynamik im Holozän sorgt für mehrschichtige Bodenprofile mit braunerdeähnlichen Eigenschaften (Vega), die im z. T. schnellen Wechsel unterschiedlichste, jedoch überwiegend nährstoffreiche Sedimente übereinander lagerte (Profilnr. 2229, 2228, 2227, 2233, 2237, 2259). Neben dieser rezent noch stattfindenden Akkumulation ist auch der Grundwassereinfluss ein stark prägendes Merkmal dieser Standorte. In dauerhaft grundwassergesättigten Böden ist der Humusabbau stark verzögert und es reichern sich Torfe an. Diese Torfe sind jedoch aufgrund von Flussregulierung und durch Entwässerung einem nachhaltigen Abbau ausgesetzt und nur noch geringflächig vorzufinden (Profilnr. 2223).

3.2 Schwarzwald

Der Schwarzwald bildet die am dichtesten bewaldete Landschaftseinheit in Baden-Württemberg (365.000 ha bei einem Waldanteil von 75 %) und erstreckt sich entlang des Oberrheingrabens von Südwest nach Nordnordost von Waldshut-Tiengen bis Pforzheim über eine Länge von ca. 170 km und eine Breite von im Mittel 50 km (Abbildung 16). Die Niederschläge erreichen hier die höchsten Werte Baden-Württembergs mit knapp 2000 mm bei sehr stark höhenabhängigen Jahresdurchschnittstemperaturen von 5-10 °C. Geologisch lässt sich der Schwarzwald in zwei große Einheiten einteilen: Einem kristallinen Sockel, welcher das Grundgebirge bildet und den darüber liegenden Schichten des Deckgebirges. Bereits die variszische Gebirgsbildung (Devon bis Perm) hat die kristallinen Gesteine des Schwarzwaldes angehoben und durch hohe Drücke und Temperaturen z. T. metamorph überprägt. So entstanden aus Graniten und Sedimentiten folglich (Ortho-)Gneise und Paragneise, oft im Wechsel mit Ganggesteinen. Die für die heutige Oberflächengestalt des Schwarzwaldes ausschlaggebende Anhebung erfolgte im Zuge der Oberrheingrabenbildung vor 35 Mio. Jahren, in Folge dessen die Flanken angehoben und die das Grundgebirge überlagernden Gesteine des Deckgebirges abgetragen wurden. So bilden auf 2/3 der Fläche (südwestlicher Teil) kristalline Gesteine des Grundgebirges das heutige Bodenaus-gangssubstrat, wohingegen der weniger stark gehobene nordöstliche Teil noch von Schichten des Deckgebirges (Buntsandstein) geprägt ist. Der relativ schnell ablaufende Hebungsprozess entlang des Oberrheingrabens ist auch maßgeblich für die Ausprägung der Landschaftsformen verantwortlich. Der westliche Teil ist durch sehr tief eingeschnittene Täler und steile Talflanken mit maximalen Höhenunterschieden von 200 m im Talboden bis 1493 m auf Höhenlagen (Feldberg) charakterisiert. Dahingegen weist der östliche Teil eine geringere Hebung auf und ist eine nach Osten geneigte Hochebene mit verbreitet auftretenden, steil abfallenden Schluchten.

Der Schwarzwald ist die am stärksten angehobene Berglandschaft des südwestdeutschen Schichtstufenlands. Die Ausgangsgesteine des Grundgebirgs-Schwarzwalds sind im Süden großflächig grobkörnige Granite und im Mittleren Schwarzwald grusig-lehmig verwitternde Paragneise, aus denen sich überdurchschnittlich tiefgründige Braunerden entwickelt haben. Hier ein Blick vom Brombeerkopf nach Süden über das Dreisambecken in Richtung Schauinsland (Foto: Carina Sucker).

3.2.1.1 Grundgebirgs-Schwarzwald

Die Bodenbildung im Hochschwarzwald (Südschwarzwald) findet überwiegend auf sauren (quarzreichen) bis intermediären Graniten und Gneisen, teilweise auch auf regional auftretenden Ganggesteinen statt, die an Hängen in Form von Fließerden und Hangschuttdecken auftreten. Der Großteil der Böden ist von der Verbraunung dominiert. Die oft tiefgründigen und grusigen Böden weisen trotz geringer Vorräte an basischen Kationen kaum starke, visuell erkennbare Versauerungsmerkmale der Podsolierung auf; der vorherrschende Bodensubtyp ist die Normbraunerde (Profilnr. 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2012, 2014, 2015, 2016, 2029, 2039, 2048, 2049, 2110, 2111, 2112, 2130, 2131, 2132, 2137, 2139, 2140, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2151, 2155, 2231, 2260, 2261, 2262, 2269).
Differenzierendes Merkmal dieses so häufig auftretenden Bodensubtyps sollte die physikalische Zusammensetzung, der Gehalt an Feinboden und Steinen sein. Grobkörniges Material hat eine relativ geringe Oberfläche, an der die Verwitterung und Mineralfreisetzung angreifen kann und somit sollte hier die Versauerung stärker ausgeprägt sein als an feinbodenreicheren Standorten. Jedoch sind diese theoretischen Unterschiede kaum vorhanden. Anhand der optischen Klassifizierung lassen sich graduelle Unterschiede der in erster Linie natürlichen, durch Kohlensäure im Niederschlag induzierten Bodenentwicklung feststellen.

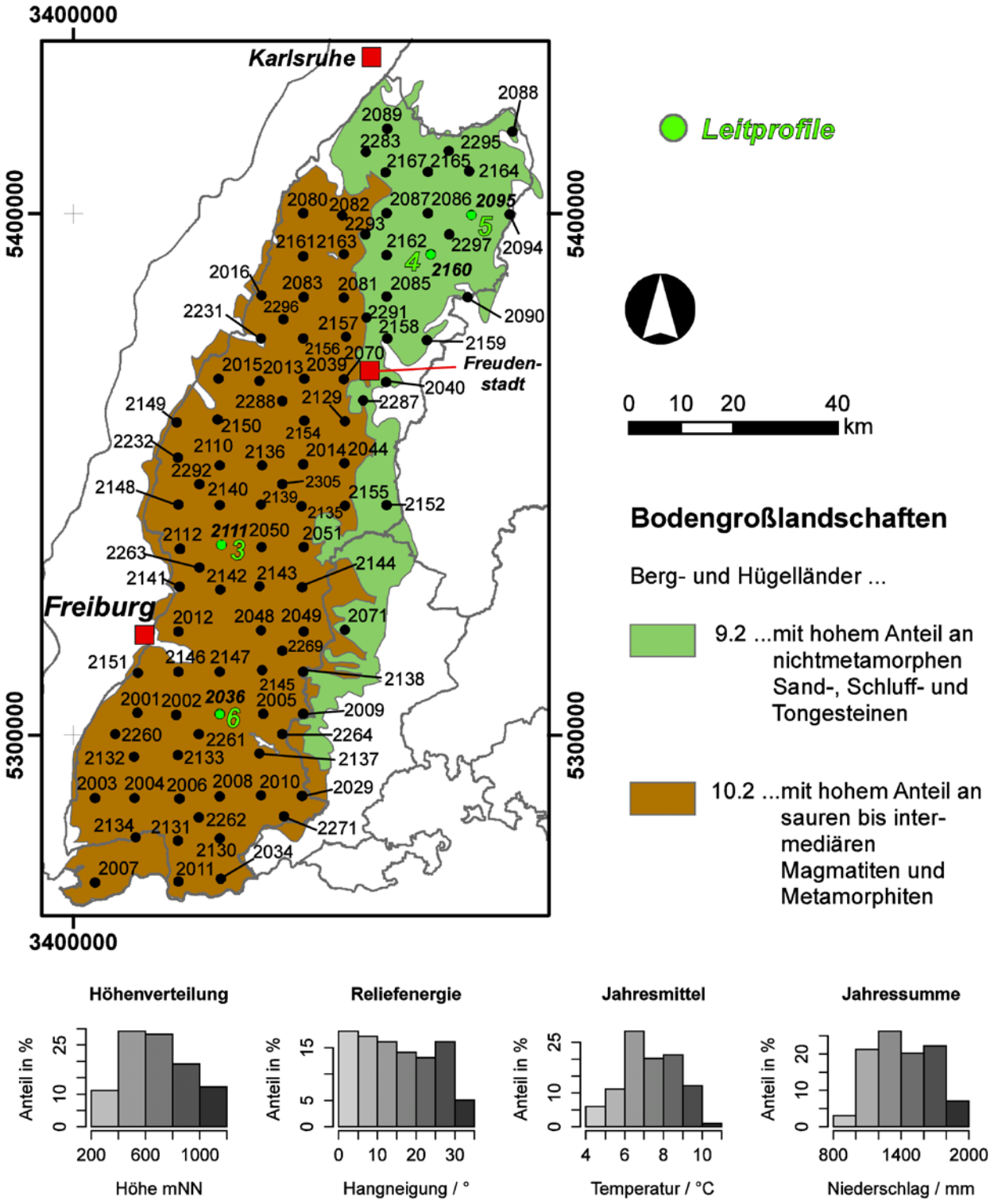


Abbildung 16: Übersicht über die BZE2-Standorte im Wuchsgebiet Schwarzwald und Teilen von Baar-Wutach, regional gegliedert nach den dominierenden Bodengroßlandschaften; die Histogramme geben die Verteilung der Höhe, der Hangneigung sowie der klimatischen Parameter Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlag der untersuchten BZE-Standorte in der Region wieder.

So finden sich Anzeichen deutlich höherer pH-Werte, wie lokal auftretende Tonverlagerungsprozesse, die nur in einem pH-Bereich von etwa 5 – 6.5 abgelaufen sein können (Profilnr. 2082, 2141, 2263, 2292). Überregional vorherrschend ist neben der Verbraunung das mehr oder weniger stark ausgeprägte Varietätsmerkmal der Podsolierung. Zwar kann der Bodentyp des Podsols, bei dem die Oberbodenbleichung / Verlagerung von Fe, Mn, Al und organischer Substanz in den nahen Unterboden dominantes Bodenmerkmal ist, auch im kohlensauren Milieu entstanden sein (Profilnr. 2050, 2051, 2163, 2271, 2296), die laboranalytischen Untersuchungen deuten jedoch auf eine gravierende Nivellierung dieser Unterschiede hin.
Fast alle Standorte sind der tiefgründig sehr basenarmen Gruppe 5 der Tiefenprofiltypen zuzuordnen (Abbildung 17). Ursache dieser weitläufig überprägenden Niveauangleichung ist die deutlich stärker wirkende anthropogen induzierte Versauerung im 20. Jh. (Saurer Regen durch Schwefeleinträge). So sind die von Natur aus basenarmen Böden des Kristallinschwarzwaldes auch im Unterboden stark ausgelaugt worden und bedürfen einer Regeneration, sollen die Funktionen als Forststandort und Trinkwasserfilter erhalten bleiben. Um diesen Prozess bei gleichzeitiger waldbaulicher Nutzung zu fördern, wird seit den 1950er Jahren im Schwarzwald gekalkt (Profilnr. 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2015, 2016, 2048, 2049, 2050, 2051, 2080, 2082, 2132, 2137, 2144, 2147, 2155, 2231, 2261, 2262, 2263, 2271, 2292, 2296). Die langsam über Jahrzehnte ablaufenden Prozesse der lateralen Wiederaufbasung sind mit Hilfe der BZE nachweisbar. Der Tiefenverlauf der Basensättigung mancher dieser Standorte ist von den nicht gekalkten Standorten signifikant differenzierbar (Profilnr. 2003, 2004, 2006, 2008, 2015, 2080, 2231, 2261, 2292). Weitere Bodensubtypen: Hangnassgley Profilnr. 2305, Pseudogley-Braunerde Profilnr. 2136.

3.2.1.2 Buntsandsteindominierter Nordschwarzwald

Der Buntsandstein muss primär in zwei unterschiedliche Bodenausgangssubstrate aufgeteilt werden: die glimmerreicheren und teilweise tonigeren Lagen des Oberen Buntsandstein bilden eine z. T. lehmige Basis für die Bodenbildung. Hier herrschen Braunerden (Profilnr. 2154, 2164) vor, die bei ausgeprägter Schichtung zu temporärer Staunässe neigen (Abbildung 17). Diese Schichtung kann entweder geogen vorgegeben sein, d.h. dass im Gestein bereits ein deutlicher Tongehalts- und damit Porositätsunterschied besteht (primärer Pseudogley, Profilnr. 2090, 2152, 2283) oder bei lehmigeren Substraten kann dies pedogen durch Tonverlagerung entstanden sein (sekundärer Pseudogley nach Lessivierung, Profilnr. 2040, 2094, 2158, 2159, 2287, 2297). Oftmals überlagern sich beide Ursachen (Profilnr. 2085, 2088, 2149, 2232). Ganzjährige Staunässe findet man partiell auf primär geschichteten Stagnogleyen (Profilnr. 2083, 2160, 2138). In Folge dessen setzt die Torfbildung ein, welche ein charakteristisches Merkmal der sogenannten „Missen“ (Profilnr. 2071) ist.
Die Gesteine im Mittleren und Unteren Buntsandstein sind dahingegen dominiert von sandigen, fast lehmfreien Sandsteinen. Deren Durchlässigkeit ist sehr hoch, die primäre Versorgung mit basischen Kationen überwiegend gering und beides, in Kombination mit hohen Niederschlägen im Schwarzwald, die ideale Voraussetzung für die Podsolierung, die hier ihren Verbreitungsschwerpunkt in Baden-Württemberg hat (Profilnr. 2013, 2087, 2095, 2129, 2157, 2162, 2165, 2167, 2293). Daneben sind Braunerden typisch (Profilnr. 2070, 2086, 2089, 2161, 2291, 2295), die ähnlich wie die Böden im kristallindominierten Mittleren und Hochschwarzwald, eine starke Verarmung an basischen Kationen im gesamten Profil zeigen und daher schon früh Standorte gezielter Kalkungsmaßnahmen wurden (Basensättigungstiefenprofiltyp 6 in Abbildung 17).

3.2.1.3 Vorbergzone

Entlang des Oberrheingrabens sind bei der Hebung der Flanken Schollen des Deckgebirges abgerutscht, zerbrochen und von der flächenhaften Erosion ausgenommen geblieben. Diese bilden nun die Vorbergzone, ein komplex strukturiertes Mosaik an Bodenausgangssubstraten überwiegend triassischen Ursprungs, oftmals auch überdeckt von quartären Bildungen wie Löss (Profilnr. 2007, 2034, 2148) (siehe auch Standorte im Oberrheinischen Tiefland).
Lokal begrenzt treten paläozoische Sedimente des Perms auf (Tigersandstein, Rotliegendsedimente), die in ehemaligen Senken zur Ablagerung kamen (Profilnr. 2011, 2134, 2288).

3.2.1.4 Eiszeitliche Sedimente

Eiszeitliche Spuren der Riß- und Würmeiszeit sind in der Landschaft des Schwarzwaldes insbesondere in Form von Karen, von Gletschern ausgeschürfte Eintiefungen, erkennbar. Die Bedeckung mit Gletschern hatte zur Folge, dass sich lokal Moränenmaterial abgelagert hat und nun Ausgangssubstrat der Bodenbildung ist (Profilnr. 2036, 2264). Im Gegensatz zum Alpenvorland handelt es sich bei diesem Geschiebe im Schwarzwald jedoch um kalkfreies Material.

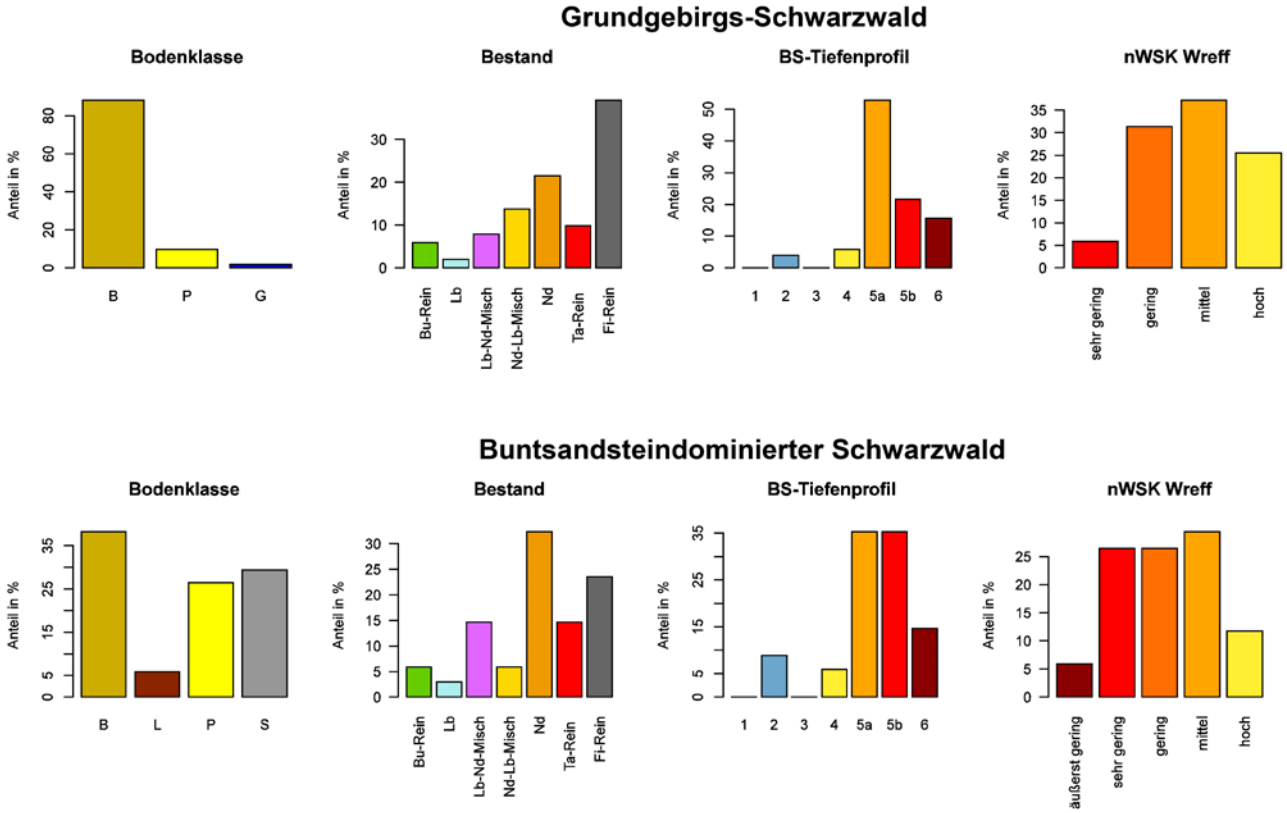


Abbildung 17: Charakterisierung des Grundgebirgs-Schwarzwaldes (oben) und des buntsandsteindominierten Schwarzwalds (unten): Verteilung der BZE2-Standorte auf Bodenklassen (B = Braunerden, G = Gleye, L = Lessivés, P = Podsole, S = Stauwasserböden), Bestandestypen, Basensättigungstiefenprofiltypen und Klassen an nutzbarer Wasserspeicherkapazität im effektiven Wurzelraum (nWSK Wr_{eff} = nFK_{We}).

3.3 Odenwald

Der baden-württembergische Teil des Odenwalds umfasst die südlichen Teile des sich auch in Bayern und Hessen ausdehnenden Wuchsgebietes (Abbildung 18). Die Gesamtwaldfläche beträgt hier 65.000 ha. Die Niederschläge betragen zwischen 700 und 1200 mm bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von ca. 8.5 °C.
In Baden-Württemberg werden alle geologischen Großeinheiten des Odenwalds angeschnitten. Im Westen bildet der steile Anstieg des Grundgebirgssockels und des darüber liegenden Deckgebirges die Grenze zum Oberrheinischen Tiefland. Die Deckgebirgsschichten insbesondere des Buntsandsteins, aber auch des Rotliegenden und Zechsteins bilden den Hauptteil des Odenwalds (BW) und sind leicht gen Ostsüdost geneigt. Im Süden geht die Landschaft in den lössgeprägten Kraichgau über, im Osten in muschelkalkdominierte Regionen (Profilnr. 2127).
Typische Böden sind auf den flächenhaft dominierenden Sandsteinen die Braunerden (Profilnr. 2018, 2097, 2128, 2270), die stellenweise in Podsole übergehen (Profilnr. 2096, 2210) und bei tonigeren Lagen zur Pseudovergleyung mit Staunässemerkmalen tendieren (Profilnr. 2098). Das Kristallin ist wiederum

Der Odenwald ist in seinen Hochlagen und am Westabfall ins Rheintal durch Buntsandsteinsubstrate und im Süden durch Muschelkalk geprägt. Auf dem sandig-steinigen Ausgangsmaterial des Buntsandsteins haben sich arme podsolige Braunerden bis Podsole ausgebildet. Die Geländemorphologie ist durch weitstreichende Hügel und Hochflächen mit steilen Ein-hängen zu den dazwischen liegenden Tälern gekennzeichnet. Das Bild zeigt den Steilabfall von den Buntsandsteinhöhen des Odenwalds in das Rheintal bei Leimen, im Vordergrund würmeiszeitliche Schotterterrassen, die mit ihren mächtigen Lößlehmdecken überwiegend landwirtschaftlich genutzt sind (Foto: Helga Krötzsch).

vergleichbar mit den Grundgebirgsböden des Schwarzwaldes, so bildeten sich auf Graniten Braunerden (Profilnr. 2213) aus. Als äolisches Sediment findet sich im Odenwald weitverbreitet der Löss, der entweder als geringmächtige Deckschicht die Deckgebirgsböden aufwertet oder bei stärkerer Mächtigkeit den Standort mit wasserspeicher- und nährstoffreichen Pararendzinen prägt. Als Folge von Lessivierung sind zudem Pseudogleye (Profilnr. 2017, 2211, 2212) zu finden.

Die chemischen Eigenschaften sowie die Wasserspeicherkapazitäten (Abbildung 18) hängen stark von der Mächtigkeit des Substrates und der überlagernden Menge an Löss ab. Die überwiegend sandigen Standorte sind nährstoffarm (Basensättigungstiefenprofiltyp 5) mit geringen nWSK.

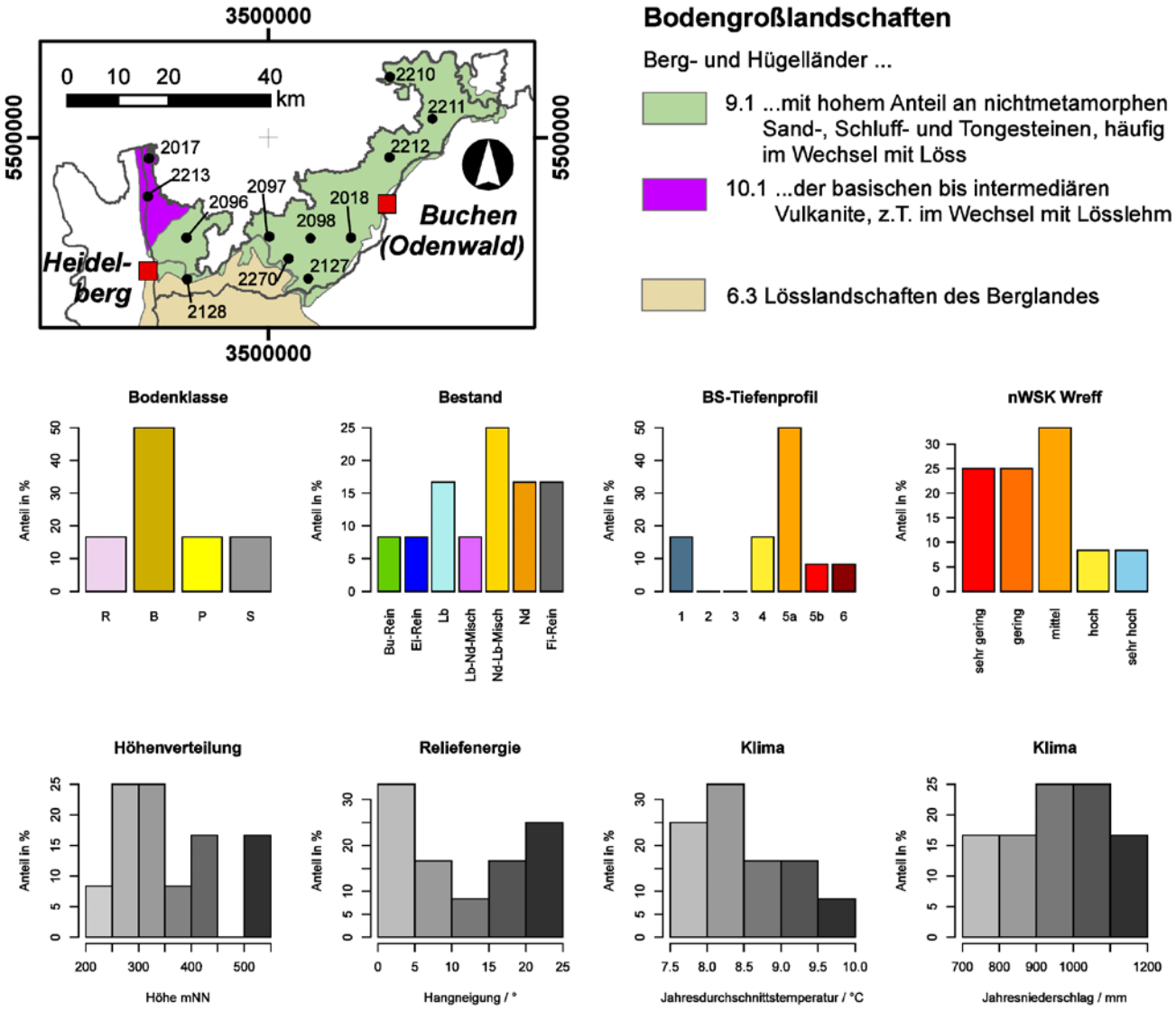


Abbildung 18: Übersicht über die BZE2-Standorte im Wuchsgebiet Odenwald sowie die dominierenden Bodengroßlandschaften in der Region; Anteile der Bodenklassen (R = Ah-C-Böden, B = Braunerden, P = Podsole, S = Stauwasserböden); Bestandestypen; Basen-sättigungstiefenprofiltypen; nutzbare Wasserspeicherkapazitäten im effektiven Wurzelraum nWSK WR_{eff} = nFK_{We}); Histogramme der Höhenverteilung, der Hangneigung als Ausdruck der Reliefenergie und des Standortklimas (Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlag) an den BZE-Profilen in der Region.

3.4 Neckarland

Das Wuchsgebiet Neckarland ist mit einer Gesamtwaldfläche von 353.000 ha das zweitgrößte Wuchsgebiet Baden-Württembergs und umfasst unterschiedliche geologische Ausgangssubstrate, Höhenstufen (ca. 100-800 mNN) und Klimaverhältnisse (Durchschnittstemperaturen zwischen 6.5 und 10 °C, Niederschlagsmengen zwischen 800 und über 1400 mm pro Jahr). Im Folgenden dienen hauptsächlich verschiedene Ausgangssubstrate als Gliederungsmerkmal (Abbildung 19).

Den Großteil des Neckarlandes bilden die sich fächerförmig ausbreitenden, triassischen Schichtstufen des Muschelkalks, des Keupers und des Braun- und Schwarzjuras. Ältere Schichten (Buntsandstein) sind dem westlich und nördlich angrenzenden Schwarzwald oder Odenwald zuzuordnen, die jüngeren Schichten des Weißjura bilden die Grundlage der Schwäbischen Alb. Den Übergang zum Oberrheinischen Tiefland bildet ein Landschaftsgürtel zwischen Schwarzwald und Odenwald, über den peri- und postglazialer Löss eingeweht wurde und der heute Grundlage landwirtschaftlich intensiv genutzter und oftmals waldarmer Flächen ist (Gäulandschaften).

Das Neckarland ist durch eine Vielzahl geologischer Substrate und einen kleinräumigen Wechsel unterschiedlicher Landschaftsformen gekennzeichnet. Sandige bis tonige Keupersubstrate wechseln sich mit großräumigen, von mächtigen Lößlehmflächen überdeckten Gäuflächen ab. Die Waldflächen sind überwiegend auf den Hochflächen der Keuperberge und die landwirtschaftlichen Flächen überwiegend in den Gäuebenen angesiedelt. An den Abhängen der Keuperberge finden sich häufig Weinberge wie hier im Stromberg. Die Hochflächen sind gegenüber Erosion durch die stabileren Kieselsandstein und Stubensandsteindecken geschützt (Foto: Jürgen Schäffer).

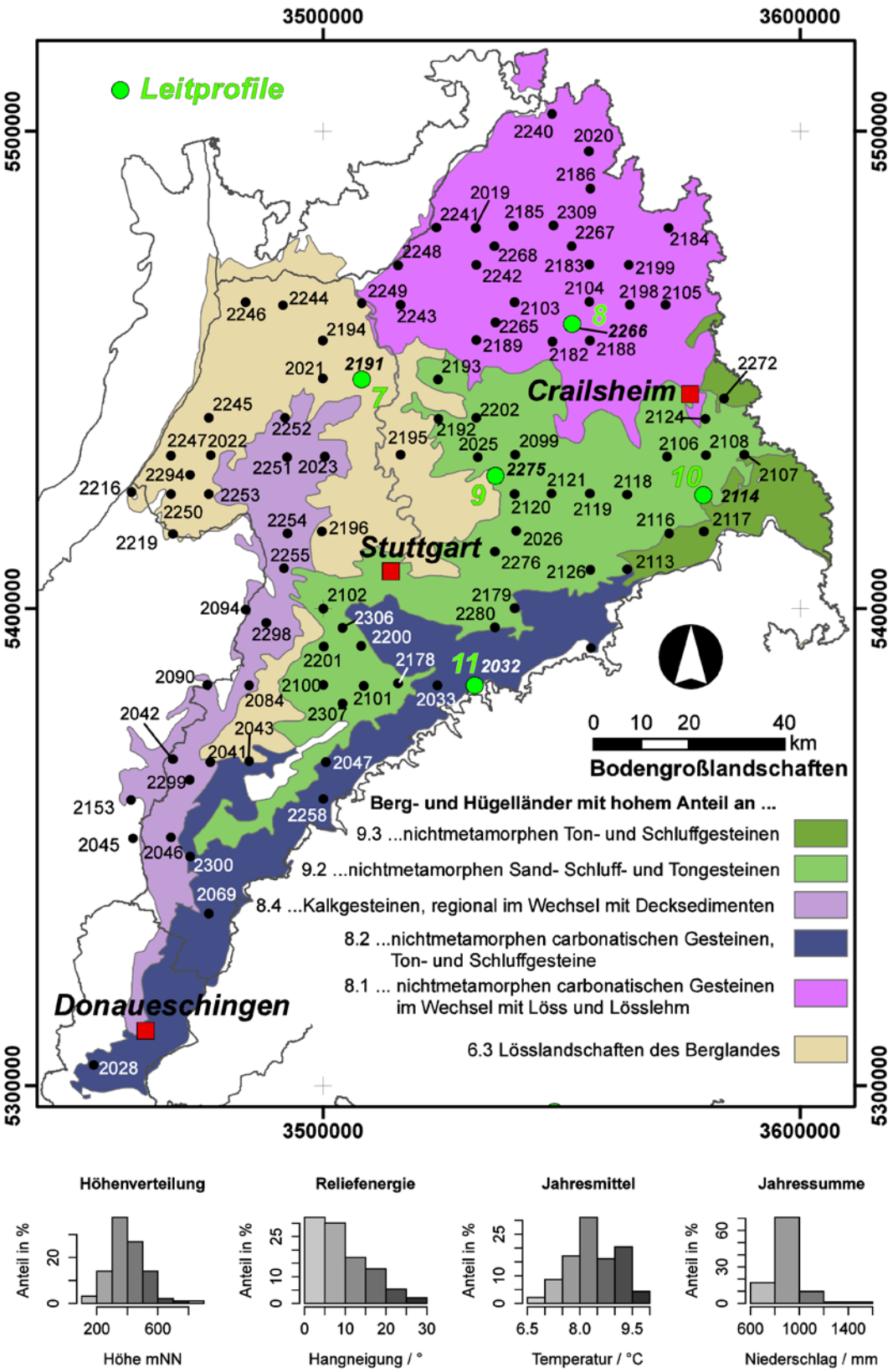


Abbildung 19: Übersicht über die BZE2-Standorte im Wuchsgebiet Neckarland, regional gegliedert nach den dominierenden Bodengroßlandschaften; die Histogramme geben die Verteilung der Höhe, der Hangneigung sowie der klimatischen Parameter Jahresdurchschnittstemperatur und –niederschlag an den BZE-Profilen in der Region wieder.

3.4.1.1 Gäulandschaften

Für die Gäulandschaften ist ein relativ ebenes, baumarmes Erscheinungsbild charakteristisch. Ursächlich sind Lössaufwehungen, die sowohl kleinere Reliefunterschiede überdecken und aufgrund ihrer fruchtbaren Eigenschaften primär ackerbaulich genutzt werden. Dennoch sind auch forstlich genutzte Bereiche vorhanden, insbesondere in stärker reliefgeprägten Landschaften.
Der junge kalkhaltige Löss ist nährstoffreich und besitzt wegen seiner Textur (überwiegend Schluff) und seiner lockeren Lagerung sehr gute Wasser- und Lufthaushaltseigenschaften (Abbildung 20). Jedoch ist der Löss nach durchlaufener Entkalkung und anschließender Lessivierung (Tonverlagerung, Parabraunerde, Profilnr. 2191, 2193, 2194, 2195, 2216, 2243, 2245, 2246, 2247, 2250, 2254) anfällig für Stauwasser (Profilnr. 2021, 2103, 2104). Bei geringmächtiger Ablagerung findet sich in dieser Landschaft oftmals ein geschichtetes Profil mit Löss (über Muschelkalk: Profilnr. 2019, 2022, 2185, 2244, 2268, 2294; über Keuper: Profilnr. 2101, 2105, 2196, 2242).

3.4.1.2 Muschelkalk

Auf den Kalksteinen des Oberen Muschelkalks finden sich auf flachgründigen Standorten Rendzinen mit gelegentlich nur geringen Residuallehmbeimischungen, die aus der Kalkverwitterung stammen (Profilnr. 2043, 2046, 2084, 2241, 2249, 2255, 2309) und beim Bodentyp der Terra fusca mächtiger ausgebildet sind (Profilnr. 2020, 2028, 204, 2042, 2183, 2184, 2186, 2188, 2189, 2248, 2253, 2265, 2298, 2299, 2266). Charakteristisch sind hier durchgehend sehr hohe Basensättigungen bei flachgründiger Entwicklung und dementsprechend geringer Wasserspeicherkapazität (Abbildung 20).
Auf den karbonatreichen tonig-lehmigen Substraten aus Mergel- und Dolomitgestein im Unteren und Mittleren Muschelkalk entwickelten sich unterschiedliche Böden, so finden sich Braunerden (Profilnr. 2045), Pseudogleye (Profilnr. 2153) oder Rendzinen (Profilnr. 2219) bzw. Terra fuscen (Profilnr. 2127, 2240, 2267). Die Landschaft ist offen, leicht hügelig und selten durch steile Hänge charakterisiert, oftmals lössüberlagert und weniger forstlich genutzt.

3.4.1.3 Keuperbergland

Die Schichten des Keuperberglandes sind geprägt von starken Wechseln zwischen härteren Sandsteinen und weicheren tonig-lehmigen Substraten. Somit sind auch die Bodentypen und deren Eigenschaften vielgestaltig (Abbildung 20). Als regionaltypischer Boden des Keupers gilt der „Kerf“, welcher standortskundlich als geologisch geschichteter Boden aus sandigem bzw. schluffig lehmigem Substrat über tonigem Substrat definiert ist und unterschiedliche Bodeneigenschaften aufweisen kann (Braunerden – Pelosole – Pseudogleye: Profilnr. 2023, 2026, 2099, 2102, 2116, 2119, 2180, 2182, 2275). Auf tonigem Substrat bilden sich Braunerden (2199, 2202), Pelosole (Profilnr. 2069, 2107, 2118, 2124, 2126, 2251, 2252, 2272, 2300, 2307) bis Pseudogleye (Profilnr. 2108, 2192, 2306) heraus, auf den sandigen Substraten mehr oder weniger podsolige Braunerden (Profilnr. 2025, 2100, 2120, 2179, 2121) bis Podsole (Profilnr. 2106, 2114). Auf lehmigeren Böden sind auch Parabraunerden (Profilnr. 2047, 2200, 2201) herausgebildet.

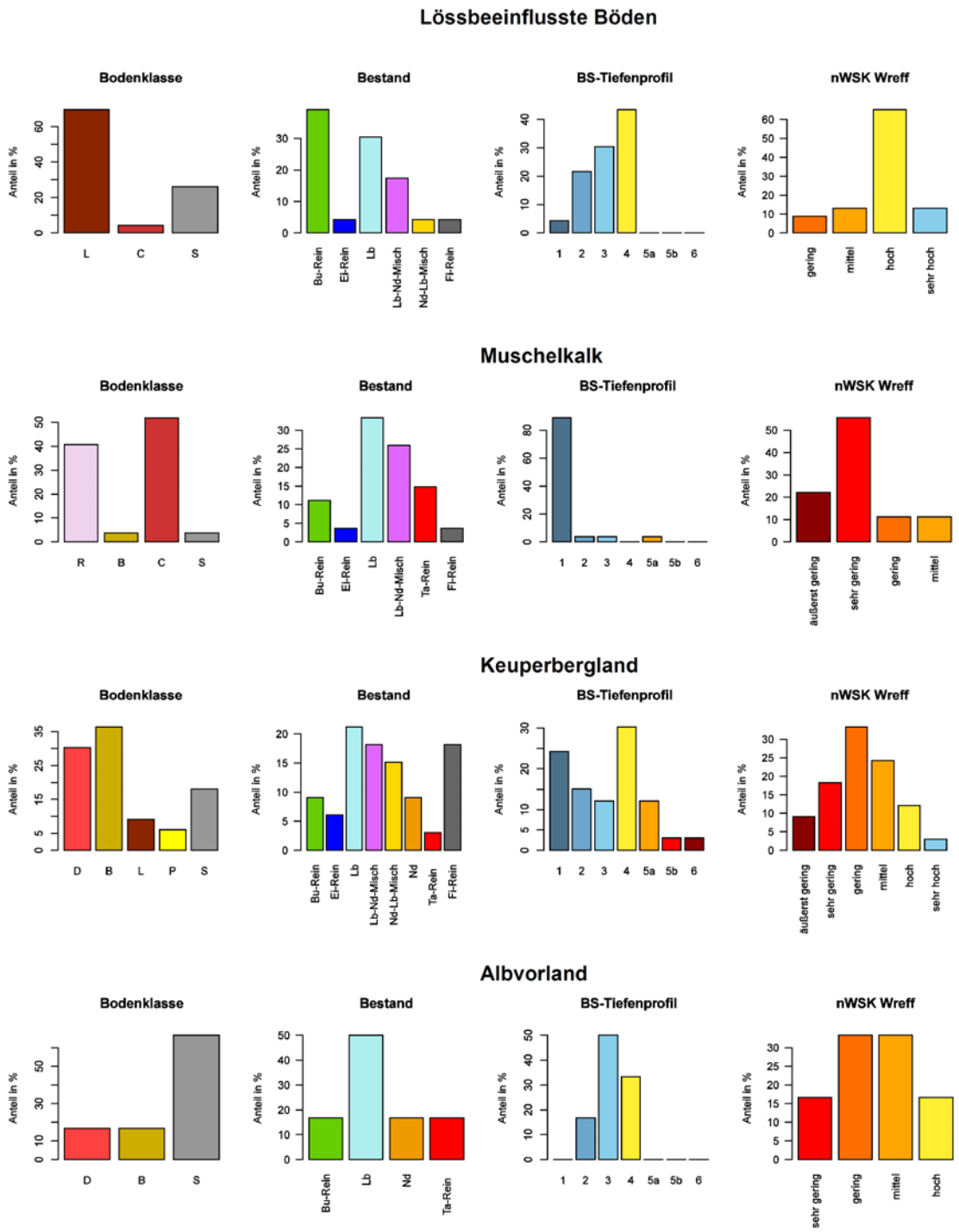


Abbildung 20: Charakterisierung der Böden im Neckarland nach Regionen gegliedert (von oben nach unten): lössbeeinflusste Standorte, Standorte auf Muschelkalk, Standorte im Keuperbergland und Standorte im Albvorland Verteilung der BZE2-Standorte auf Bodenklassen (R = Ah/C-Böden, C = Terra calcis, hier Terra fusca, D = Pelosole, B = Braunerden, L = Lessivés, P = Podsole, S = Stauwasserböden), Bestandestypen, Basensättigungstiefenprofiltypen und Klassen an nutzbarer Wasserspeicherkapazität im effektiven Wurzelraum (nWSK Wreff = nFKWe).

3.4.1.4 Albvorland

Vor der Schichtstufe der Schwäbischen Alb sind im Albvorland die im Gegensatz zum Weißjura tonigeren und weicheren Gesteine des Unter- und Mitteljura (Braun- und Schwarzjura) gelegen. Auf den tonig-mergeligen Substraten sind verbraunte Pseudogleye (Profilnr. 2032, 2033, 2258, 2280) und Pelosole (Profilnr. 2113, 2178) vorherrschend, die gute Nährstoffversorgungen sowie variable Wasserspeicherqualitäten aufweisen (Abbildung 20).

3.5 Schwäbische Alb

Die Schwäbische Alb ist der landschaftlich prägnanteste Teil des baden-württembergischen Schichtstufenlandes und die geologische Fortsetzung des Französischen und Schweizer Juras im Südwesten und der Fränkischen Alb im Osten. Die Schwäbische Alb erstreckt sich über eine Länge von 200 km in südwest-nordöstlicher Richtung bei einer mittleren Ausbreitung von ungefähr 40 km (Abbildung 21). Die Gesamtwaldfläche beträgt 211.000 ha. Die BZE-Standorte liegen auf ca. 500-900 mNN, die Jahresdurchschnittstemperaturen sind mit 6 - 8 °C relativ niedrig, die Niederschlagsmengen liegen bei 800-1100 mm pro Jahr.
Landschaftlich formgebend waren und sind Erosionsprozesse, die mindestens seit Beginn der Hebung der Flanken des Oberrheingrabens als rückschreitende Verwitterung der triassischen Schichten das südwestdeutsche Stufenland bilden. Als nordwestliche Begrenzung der Schwäbischen Alb tritt die am stärksten herausgebildete Stufe der Weißjuraschichten als Albtrauf auf. Dieser ist, durch zum rheinischen System hin entwässernde Täler, tief bis ins Hinterland eingeschnitten mit dazwischen gelagerten Höhenrücken. So unterscheidet sich der nordwestliche Teil der Schwäbischen Alb, die sogenannte Kuppenalb, von der reliefärmeren südöstlichen Flächenalb. Diese leicht nach Südosten geneigte Hochfläche war im Miozän noch vom oberen Molassemeer bedeckt. Die Klifflinie ist auch heute örtlich noch erkennbar und verläuft von Tuttlingen im Südwesten bis Donauwörth im Nordosten. Die Flächenalb ist erst seit dem Rückgang dieses
Meeres der Erosion ausgesetzt und dementsprechend flacher ausgeprägt. Neben diesen kalkstein- und residuallehmgeprägten Standorten finden sich auf den Hochflächen der Ostalb sehr alte Landoberflächen, die von Feuersteinlehm (tertiäre Verwitterungsdecken) bedeckt sind. Auch Lössdecken (Profilnr. 2123) und Terrassen- bzw. Flussablagerung (Profilnr. 2122) sind lokal vorhanden. Zusätzlich finden sich Reste des tertiären Vulkanismus in Form von vulkanischen Kuppen in Begleitung von vulkanischen Maaren, die jedoch nicht ins Beprobungsraster der BZE gefallen sind.

3.5.1.1 Kalkstein- und residuallehmgeprägte Standorte

Für den Großteil dieser Flächen sind die Kalk- und Dolomitgesteine des Weißjura das Ausgangsmaterial der Bodenbildung. Weit verbreitet sind geringmächtige und steinige Böden mit einer dunkel humosen Oberbodenschicht, die schnell in das klüftige Weißjurakalkgestein übergeht (Ah-C-Profil). Diese Böden werden als Rendzinen bezeichnet (Profilnr. 2054, 2062, 2064, 2109**,** 2256, 2278, 2281, 2303, 2308). Mächtigere Feinböden entstanden hier durch den Prozess der Kalksteinlösung durch kohlensaures Niederschlagswasser. Dabei wird Calcium und Magnesium aus dem Dolomit gelöst und ausgewaschen. Je nach Anteil an nicht löslichen, silikatischen Komponenten bleiben mehr oder weniger mächtige sogenannte Residuallehme (T-Horizont = Kalkverwitterungslehm) als Substrat für das Pflanzenwachstum übrig. So entsteht aus 1 m Kalkstein etwa

Die Schwäbische Alb ist die Jurastufe der Südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft. Die Jurasedimente sind an ihrem West- und Nordwestrand am höchsten herausgehoben und fallen zu den Triassischen Oberflächen der angrenzenden Landschaften mit einem 100-200 hohen Steilabfall, dem Albtrauf ab. Südlich zur Donau hin fällt die Schwäbische Alb pultartig mit geringer Geländeneigung zum Südwestdeutschen Alpenvorland ab. Dieser südliche Teil war im Tertiär durch das Burdigalmeer teilweise überflutet und ist dadurch eingeebnet und von tertiären Sedimenten überdeckt, die sogenannte Flächenalb mit ihren reichen, überwiegend landwirtschaftlich genutzten Böden. Im Bild sieht man einen Ausschnitt der Kuppenalb und am rechten Rand den Albtrauf in der Nähe von Hechingen. In dieser Landschaft sind härtere Schwammkalkstotzen durch die hohe Reliefenergie herausmodelliert und wechseln sich mit flachen, von tonigen Residuallehmen der Kalkverwitterung ausgefüllten Senken ab (Foto: Udo Ramm).

5-10 cm lehmiger Boden. Dieser Prozess muss an vielen Orten bereits im Tertiär oder den Zwischenwarmzeiten stattgefunden haben, um die teilweise mächtigen Lehmschichten erklären zu können. Der sich darauf entwickelnde Bodentyp ist die Terra fusca, auch Kalksteinbraunlehm genannt und geht direkt aus den geringmächtigen Rendzinen hervor. So sind viele Standorte als Übergangsformen mit untergeordneten T-Horizonten charakterisiert (Terra fusca – Rendzina: Profilnr. 2027, 2052, 2056, 2057, 2304). Werden diese Residuallehme innerhalb der ersten 3 dm profildominant, spricht man von einer Terra fusca (Profilnr. 2035, 2053, 2055, 2061, 2063, 2065, 2125, 2257, 2274), bei deutlicher Verbraunung (Bv-Horizonte) auch von

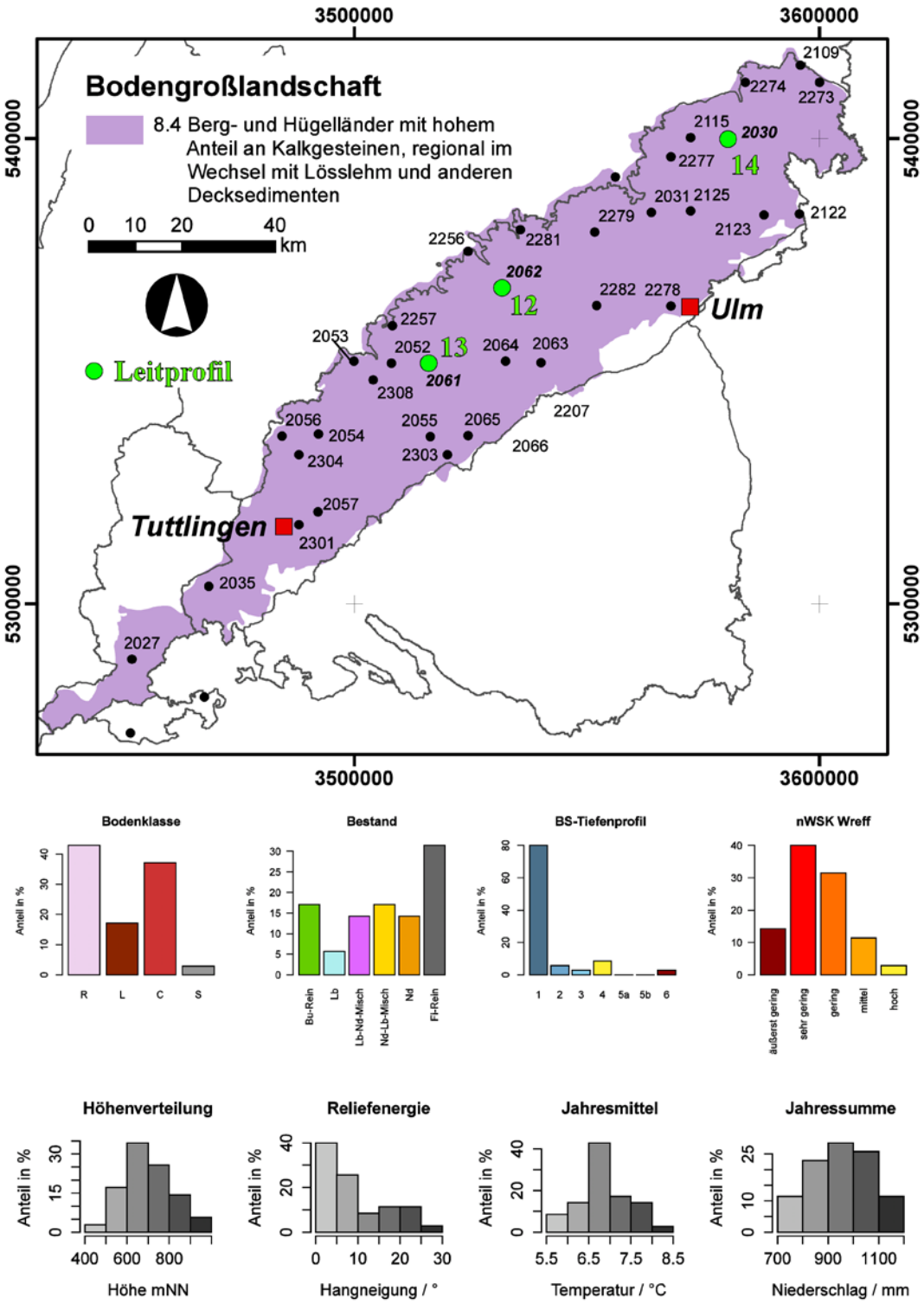


Abbildung 21: Übersicht über die BZE2-Standorte im Wuchsgebiet Schwäbische Alb und Teilen von Baar-Wutach, regional gegliedert nach den dominierenden Bodengroßlandschaften; Verteilung der BZE2-Standorte auf Bodenklassen (R = Ah/C-Böden, L = Lessivés, C = Terra calcis, hier Terra fusca, S = Stauwasserböden), Bestandestypen, Basensättigungs-tiefenprofiltypen und Klassen an nutzbarer Wasserspeicherkapazität im effektiven Wurzelraum (nWSK Wreff = nFKWe); die Histogramme geben die Verteilung der Höhe, der Hangneigung sowie der klimatischen Parameter Jahresdurchschnittstemperatur und -niederschlag an den BZE-Standorten in der Region wieder.

Braunerde-Terra fusca (Profilnr. 2279, 2282, 2301).
Charakteristisch ist für alle Rendzinen und Terra fuscen aus Kalkstein eine durchgehend sehr hohe Basensättigung von meistens 100 %. Nur sehr flachgründige Böden weisen bereits eine geringe Versauerung im Oberboden auf. Die Kalksättigung hat jedoch den Nachteil, dass Kalium, welches im Weißjurakalk nur geringfügig vorkommt, zusätzlich durch Aufnahmeantagonismen blockiert wird und somit limitierend wirken kann. Ebenfalls kann Phosphor als Mangelelement auftreten. Zu großen Problemen führt auch die geringe Wasserspeicherfähigkeit aufgrund der z. T. extremen Flachgründigkeit der Standorte. Tiefangelegte Etagenwurzeln sind daher im klüftigen Kalkstein überlebensnotwendig für viele Bäume. Staunässe ist trotz der tonigen Substrate kein Problem, da die sehr starke Strukturbildung und Klüftigkeit des Gesteins für gute Entwässerungs- und Belüftungseigenschaften sorgt.

3.5.1.2 Tertiäre Verwitterungsdecken

Auf den Hochflächen der Ostalb finden sich sehr alte Landoberflächen, die von den Resten der stark verwitterten Oberjurakalke bedeckt sind. Diese, heute kalkfreien und bereits stellenweise podsolierten Substrate, können reich an kieselsäuredominierten Feuer- oder Hornsteinen (Feuersteinlehm) sein und weisen aufgrund der wasserstauenden Wirkung der Lehme oftmals Pseudovergleyung auf (2030, 2031, 2115, 2277).

3.6 Südwestdeutsches Alpenvorland

Der baden-württembergische Teil des Alpenvorlands erstreckt sich zwischen den Alpen und dem schweizerischen Teil des Alpenvorlandes im Süden, der Schwäbischen Alb im Norden (Abbildung 22) und geht im Osten in das bayerische Alpenvorland über. Die Gesamtwaldfläche beträgt 154.000 ha. Die Jahresdurchschnittstemperaturen liegen zwischen 6.5 und 8.5 °C bei einer von Nordwest nach Südost deutlich ansteigenden Jahresniederschlagsmenge von 600 mm bis über 2000 mm am Alpenrand.
Das Alpenvorland ist primär geprägt von eiszeitlichen Ablagerungen. Entsprechend der unterschiedlich alten Gletschervorstöße lassen sich zwei Bodengroßlandschaften ausgliedern. Die mindestens risseiszeitlichen Altmoränen im nördlichen Teil und die würmeiszeitlichen Sedimente im südlichen Teil. Durch spätglaziale und holozäne Auendynamik wurden diese Sedimente durchschnitten und darunterliegendes Molassegestein ist lokal Ausgangsmaterial der Bodenbildung. Des Weiteren finden sich in den Tälern Auen- und Terrassensedimente sowie die größten Moorvorkommen Baden-Württembergs (allerdings größtenteils unbewaldet). In den Ebenen zeigen sich Deckenschotterplatten und Lössablagerungen.

3.6.1.1 Molasse

Die ältesten flächigen und bodenbildenden Ausgangssubstrate im Alpenvorland sind tertiäre Molassegesteine. Es handelt sich dabei um vorwiegend in terrestrischen oder flachmarinen Ablagerungsräumen sedimentierte Substrate, die durch Flüsse aus den Alpen transportiert wurden. Die Molasse weist eine hohe Variabilität an Korngrößenzusammensetzungen (Geröll bis Ton) und auch Nährstoffverhältnissen auf (Abbildung 23). An sandig-lehmigen Standorten dominert die Verbraunung und Lessivierung, zusätzlich kann die Versauerung bereits bis in den Unterboden fortgeschritten sein (Profilnr. 2092, 2169, 2290) im Gegensatz zu den ton- und schluffreicheren Böden (Profilnr. 2208, 2215).

3.6.1.2 Altmoräne

Moränenablagerungen der Altmoränenlandschaft (überwiegend riss-, aber auch günz- und mindelkaltzeitlich) sind geprägt von schwach sortierten Geschiebemergeln und besser sortierten glazifluviatilen Ablagerungen. Diese sind aufgrund der relativ langen Bodenentwicklung (die schon in den Zwischenwarmzeiten einsetzte) bereits tiefgründig entkalkt und verbraunt und weisen nur im Unterboden noch hohe Basensättigungen auf (Basensättigungstiefenverteilungstyp 4 in Abbildung 23). Die fortgeschrittene Versauerung wird zudem an der einsetzenden Podsolierung im Oberboden deutlich. Nach der Entkalkung setzte der Prozess der Tonverlagerung (Parabraunerde) ein, welcher typischerweise zu einer Tonverarmung im Oberboden und einer Tonanreicherung im Unterboden führt (Profilnr. 2059, 2067, 2072, 2074, 2171, 2174, 2175). Eine relative Tonanreicherung im Unterboden kann bei Gletscherablagerung bereits schon geogen, durch eine Schichtung unterschiedlicher Materialien, bestanden haben. Beide gehen einher mit einer Reduzierung der Leitfähigkeiten, wodurch temporäres Stauwasser zur Pseudovergleyung führt (Profilnr. 2060, 2068, 2073, 2093, 2079, 2168, 2170, 2172, 2173, 2177, 2284, 2285, 2302).

Das Südwestdeutsche Alpenvorland ist in seinem Landschaftscharakter stark durch glazialmorphologische Prozesse geprägt. Die scharf modellierten Herden von Drumlins in der südlichen Hälfte dieses Wuchsgebiets sind in der jüngsten Vereisungsperiode, der Würmeiszeit vor 10.000 - 15.000 Jahren entstanden. Im Bereich der zur Donau nach Norden streichenden Urstromtäler lassen sich im Endmoränenzug noch oft deutlich die Positionen der Gletschertore ausmachen. Im Norden und Nordosten finden sich die flachwelligen Grundmoränen der älteren Vereisungsperioden wie hier im Bild bei Steinhausen die Grundmoränen der Riß- und Mindeleiszeit. An den Taleinhängen von Grundmoränenzügen oder vor allem der fluvio-glazialen, tafelbergähnlichen Deckenschotterriedel treten tertiäre, meist sandige Sedimente zu Tage (Foto: Carina Sucker).

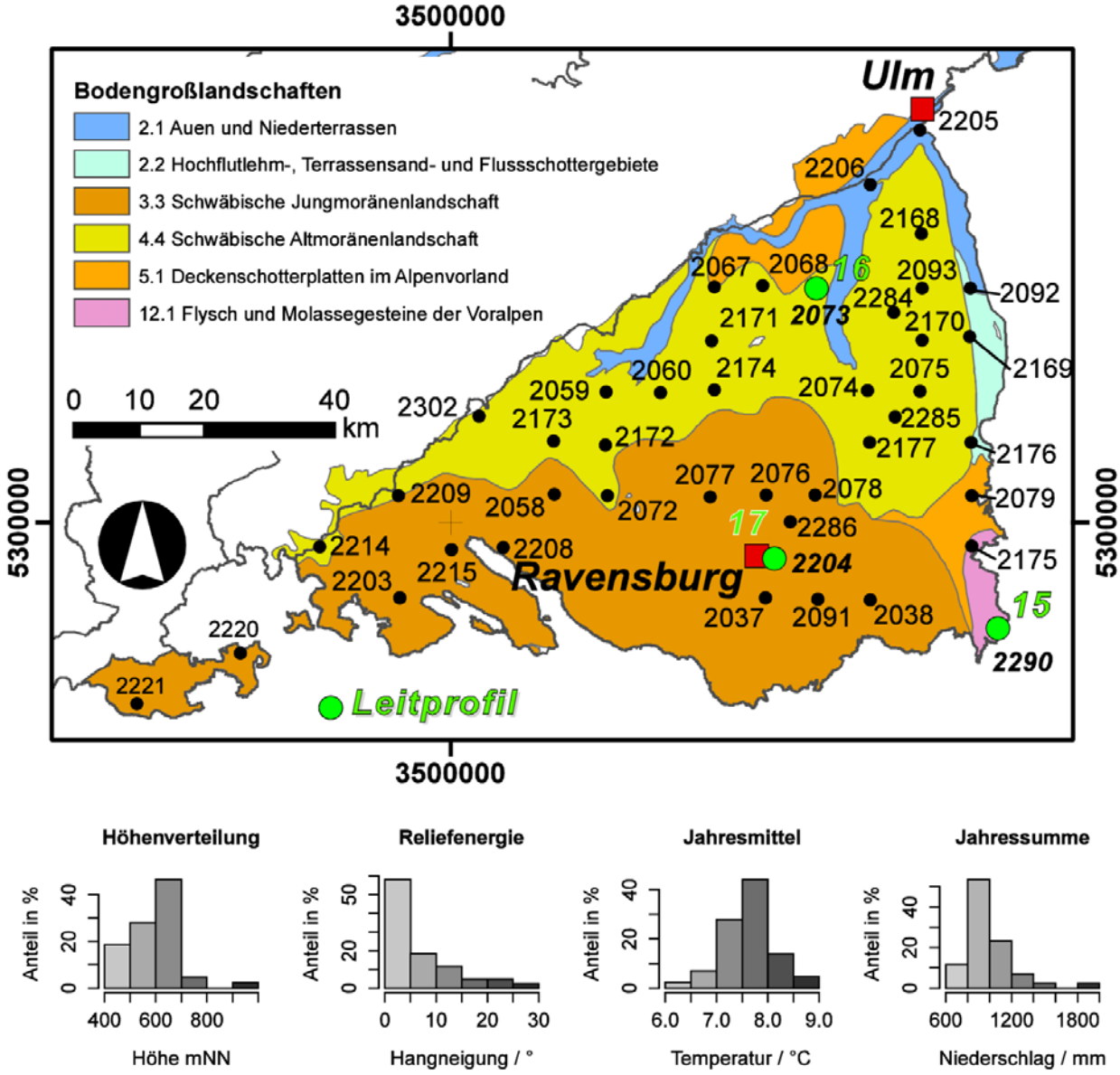


Abbildung 22: Übersicht über die BZE2-Standorte im Wuchsgebiet südwestdeutsches Alpenvorland, regional gegliedert nach den dominierenden Bodengroßlandschaften; die Histogramme geben die Verteilung der Höhe, der Hangneigung sowie der klimatischen Parameter Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlag an den BZE-Standorten in der Region wieder.

3.6.1.3 Jungmoräne

Die jüngeren Sedimente der Würmeiszeit weisen ähnliche Zusammensetzungen auf wie die der älteren Eiszeiten, jedoch ist der Prozess der Entkalkung und Versauerung außer auf primär basenärmeren Standorten noch nicht soweit fortgeschritten. Somit dominieren hier die Prozesse der Verbraunung und nach der Entkalkung auch Tonverlagerung (Parabraunerden), welche lagenbedingt Pseudovergleyung verursacht (Abbildung 23). Aufgrund der Beschaffenheit ihres Ausgangsmaterials weisen dichtgelagerte Standorte auch ohne

Tonverlagerung Hydromorphiemerkmale auf (Profilnr. 2037, 2038, 2076, 2077, 2078, 2091, 2204, 2209, 2220).

3.6.1.4 Holozäne Substrate

Insbesondere in den Niederungen und Talauen finden sich Böden aus Terrassen- und Auenablagerungen (Profilnr. 2075, 2203, 2205, 2206, 2286), die auch in Moore übergehen können (Profilnr. 2058). Vereinzelt dominieren Lössakkumulationen (Profilnr. 2176).

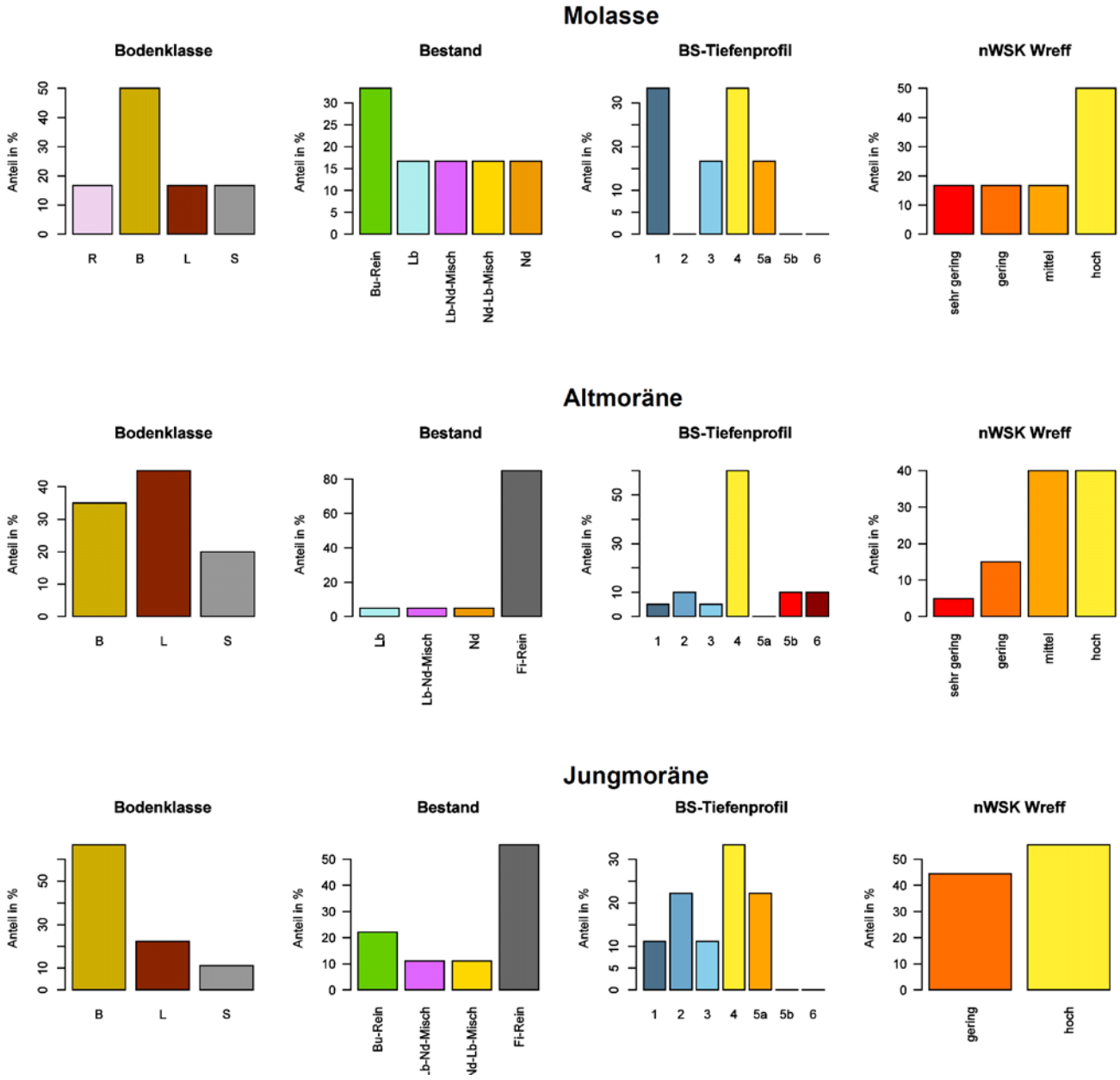


Abbildung 23: Charakterisierung der Standorte im Südwestdeutschen Alpenvorland auf Molassegestein (oben), der Altmoräne (Mitte) und der Jungmoräne (unten); Verteilung der BZE2-Standorte auf Bodenklassen (R = Ah/C-Böden, B = Braunerden, L = Lessivés, S = Stauwasserböden), Bestandestypen, Basensättigungs-tiefenprofiltypen und Klassen an nutzbarer Wasserspeicherkapazität im effektiven Wurzelraum (nWSK Wreff = nFKWe).

Zitierte und weiterführende Literatur

AK-STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen [Manual of forest site survey]. IHW-Verlag, Eching bei München, 352 S.

ALDINGER, E.; HÜBNER, W.; MICHIELS, H.-G.; MÜHLHÄUßER, G.; SCHREINER, M. & WIEBEL, M. (1998): Überarbeitung der standortskundlichen regionalen Gliederung im Südwestdeutschen Standortskundlichen Verfahren. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 39/5-71.

BMELV (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, L. U. V. (2006): Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserfassung im Wald (BZE II), [Manual for the 2nd German wide forest soil survey (BZE II)]. BMELV, Bonn.

BBodSchV "Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 102 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist"

BUBERL, H. G.; V. WILPERT, K. & TREFZ-MALCHER, G. (1994): Der chemische Zustand von Waldböden in Baden-Württemberg: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 1989-92 (BZE), Dokumentation. Forstliche Versuchs-und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 99 S.

GALE, M. R. & GRIGAL, D. F. (1987): Vertical root distributions of Northern tree species in relation to successional status. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 17/8, 829-834.

HARTMANN, P. (2013): Nutzbare Feldkapazitäten im effektiven Wurzelraum an BZE2-Standorten in Baden-Württemberg. Freiburger Forstliche Forschung 96: Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Stoff- und Wasserkreislauf, 95-102.

HARTMANN, P.; BUBERL, H.; PUHLMANN, H.; SCHÄFFER, J.; TREFZ-MALCHER, G.; ZIRLEWAGEN, D. & VON WILPERT, K. (2016): Waldböden Südwestdeutschlands - Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald von 1989 – 1992 und 2006 – 2008. Verlag Kessel, Remagen-Oberwinter, 328 S.

HARTMANN, P.; SCHÄFFER, J. & VON WILPERT, K. (2013): Steine im Boden sind mehr als die Fliegen in Teufels Suppe. FVA-einblick, 3/14-17.

HARTMANN, P. & V. WILPERT, K. (2013a): Nährstoffversorgung an BZE2-Standorten in Baden-Württemberg: Welche Anteile liefern Humusauflage, Feinboden und Skelett? Freiburger Forstliche Forschung 96: Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Wasserkreislauf. Gemeinsames Kolloquium des AK "Waldböden" der DBG und der Sektion "Wald & Wasser" im DVFFA und des vTI Eberswalde in Freiburg am 20.-21.06.2012, 167-178.

HARTMANN, P. & V. WILPERT, K. (2013b): Nutrient stocks in forest soils of Southwest Germany: contribution of humus layer, mineral fine soil and soil skeleton. Soils in Space and Time - first divisional conference of all commissions and working groups of IUSS Division 1 259-260.

HARTMANN, P. & V. WILPERT, K. (2014a): Development of nutrient conditions and acidification in forest soils in Southwest Germany: results from the National Forest Soil Inventory in Baden-Württemberg. Biogeomon, 8th International Symposium on Ecosystem Behaviour, Bayreuther Forum Ökologie, 119, 33.

HARTMANN, P. & V. WILPERT, K. (2014b): Fine-root distributions of Central European forest soils and their interaction with site and soil properties. Canadian Journal of Forest Research, 44/71-81.

HARTMANN, P. & VON WILPERT, K. (2015): Harmonisierung des BZE2-Datensatzes zur Feinwurzelverteilung in Waldböden. "Unsere Böden – Unser Leben“, Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 05. bis 10.09.2015, München.

LGRB (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, R. U. B. (2005): Bodenübersichtskarte 1:200 000 (BÜK200).

PRÜESS, A. (1992): Vorsorgewerte und Prüfwerte für mobile und mobilisierbare, potentiell ökotoxische Spurenelemente in Böden. Grauer, Wendlingen, 145 S.

PUHLMANN, H. (2013): Bodenwasserhaushalt und Baumwachstumsreaktionen an BZE-Monitoringpunkten. 129-140 S.

PUHLMANN, H. & V. WILPERT, K. (2011): Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen für Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit von Waldböden. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz (Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation), 12/61-71.

PUHLMANN, H. & V. WILPERT, K. (2012): Pedotransfer functions for water retention and unsaturated hydraulic conductivity of forest soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 175/2, 221-235.

PUHLMANN, H.; V. WILPERT, K.; LUKES, M. & DRÖGE, W. (2009): Multistep outflow experiments to derive a soil hydraulic database for forest soils. European Journal of Soil Science, 60/5, 792-806.

SCHÄFFER, J. (2012): Bodenstruktur, Belüftung und Durchwurzelung befahrener Waldböden - Prozessstudien und Monitoring. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, 148 S.

SCHÄFFER, J.; BUBERL, H. & V. WILPERT, K. (2012): Deformation damages in forest topsoils—An assessment based on Level-I soil monitoring data from Baden-Württemberg (SW Germany). Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 175/1, 24-33.

SCHÄFFER, J.; V. WILPERT, K. & KUBLIN, E. (2009): Analysis of fine rooting below skid trails using linear and generalized additive models. Canadian Journal of Forest Research, 39/11, 2047-2058.

V. WILPERT, K. (1996): Aus der BZE abgeleitete Indizien einer bodenchemischen Drift in Baden-Württemberg. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 79/189-192.

V. WILPERT, K.; BÖSCH, B.; BASTIAN, P.; ZIRLEWAGEN, D.; HEPPERLE, F.; HOLZMANN, S.; PUHLMANN, H.; SCHÄFFER, J.; KÄNDLER, G. & SAUTER, U. H. (2011): Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. Berichte Freiburger Forstliche Forschung,, 87/155.

V. WILPERT, K.; HARTMANN, P. & SCHÄFFER, J. (2013): Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung, Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt 54/2013. Freiburg i. Br., 39 S.

V. WILPERT, K.; HARTMANN, P.; KÄNDLER, G. & CULLMANN, D. (2015): Erfassung bodenkundlicher Schlüsselgrößen an BWI-Stichproben in Baden-Württemberg. FVA-einblick, 1/2015/18-21.

WALDENSPUHL, T. & HARTARD, B. (2010): Strategisches Nachhaltigkeitsmanagement für den Landesbetrieb ForstBW. AFZ-DerWald, 15/2010, 18-20.

WILLIBALD, J. & HARTMANN, P. (2013): Bodenphysikalische Eigenschaften des Bodenskeletts und Einfluss auf den Wasserhaushalt von Waldböden. Freiburger Forstliche Forschung 96: Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Wasserkreislauf. Gemeinsames Kolloquium des AK "Waldböden" der DBG und der Sektion "Wald & Wasser" im DVFFA und des vTI Eberswalde in Freiburg am 20.-21.06.2012, 73-84.

WOLFF, B. & RIEK, W. (1997): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987 - 1993 (BZE) Band 1. BML (Hrsg.).

ZIRLEWAGEN, D. & V. WILPERT, K. (2011): Regionalisierung bodenphysikalischer Eingangsgrößen für bodenhydraulische Pedotransferfunktionen Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz (Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation), 12, 73-83.