



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

35 Jahre Bodendauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern

Band 2: Bodenphysik



Nummer 02

2022

Schriftenreihe

ISSN 1611-4159

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz
Lange Point 12, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: Agraroeekologie@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 8640-3640

1. Auflage: Januar 2022



**35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung
landwirtschaftlich genutzter Flächen
in Bayern**

Band 2: Bodenphysik

**Florian Ebertseder, Melanie Treisch,
Johannes Burmeister**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Einleitung 9
2	Material und Methoden 9
2.1	Texturanalyse 9
2.2	Substanz- und Porenanteile 10
3	Ergebnisse und Diskussion 12
3.1	Textur 12
3.1.1	Bodenarten im Oberboden 12
3.1.2	Bodenarten im Unterboden 18
3.2	Bodengefüge – Status und Veränderungen 22
3.2.1	Einfluss der Bewirtschaftung 23
3.2.2	Rahmenbedingungen 23
3.2.3	Entwicklungen im Bodengefüge 23
3.2.4	Diskussion und Fazit 29
4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung 31
	Literaturverzeichnis 33

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1: Laborautomat SEDIMAT 4-12 zur Bestimmung der Korngrößenfraktionen der mineralischen Bodensubstanz kleiner 0,063 mm.....	10
Abb. 2: Stechzylinderprobenahme im Acker: links: Stechzylinder mit Bodenkern, rechts: Verteilung von Stechzylindern in einer Aufgrabung von etwa 10 cm Tiefe für die Probenahme in der Krume vor dem Einschlagen.....	11
Abb. 3: Bodenkennwerte von Festsubstanz und Bodenporen zur Berechnung der Luftkapazität (LK); TW = Totwasser, nFK= nutzbare Feldkapazität, GPV = Gesamtporenvolumen.....	11
Abb. 4: Korngrößenanteile der Fraktionen Ton, Schluff und Sand je Hauptbodenart im Oberboden der Acker-BDF	13
Abb. 5: Standorte der Acker-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Oberbodens und ihren Ton- und Schluffanteilen.	13
Abb. 6: Korngrößenanteile der Fraktionen Ton, Schluff und Sand der Hauptbodenarten Lehme und Tone der Grünland-BDF	15
Abb. 7: Standorte der Grünland-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Oberbodens und ihren Ton- und Schluffanteilen.	15
Abb. 8: Bodenartendreieck für den Oberboden aller BDF-Standorte (nach Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5), 2005).....	16
Abb. 9: Sonderkultur-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Oberbodens	17
Abb. 10: Standorte der BDF mit Nutzungsänderung in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Oberbodens	17
Abb. 11: Korngrößenanteile der Fraktionen Ton, Schluff und Sand je Hauptbodenart im Unterboden der Acker-BDF	19
Abb. 12: Standorte der Acker-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Unterbodens und ihren Ton- und Schluffanteilen	19
Abb. 13: Korngrößenanteile der Fraktionen Ton, Schluff und Sand der Hauptbodenarten Lehme, Schluffe und Tone des Unterbodens der Grünland-BDF	21
Abb. 14: Standorte der Grünland-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Unterbodens und ihren Ton- und Schluffanteilen	21
Abb. 15: Standorte der BDF mit Sonderkulturen in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Unterbodens	22
Abb. 16: Standorte der BDF mit Nutzungsänderung in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Unterbodens	22
Abb. 17: Vergleich der bodenphysikalischen Parameter Substanzdichte, Totwasser, nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität zwischen Pflugsohle und Unterboden sowie den beiden Probenahmeserien (die Acker BDF sind sortiert nach der Luftkapazität in der ersten Probenahmeserie 1995-2002).....	24
Abb. 18: Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle als jährliche Änderung von 25 Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in % a ⁻¹	26
Abb. 19: Korrelationsmatrix der im linearen Modell zur Erklärung der Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle herangezogenen Variablen; ausgeschlossene Kombinationen sind mit einem roten x gekennzeichnet (Rangkorrelationskoeffizient Kendalls Tau, hochsignifikante Korrelationen p<0.01, sind ausgeschlossen).	27
Abb. 20: Rangkorrelationskoeffizient (Kendall's Tau) für den Zusammenhang der Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle mit den ausgewählten Variablen (Farbskala nach p-Wert).....	28

Abb. 21: Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten (standardisiert) für das ungewichtete und das mit dem RMSE gewichtete gemittelte Model für die Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle der bayerischen Acker BDF (full average Methode)..... 28

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Anzahl der auf den BDF vorkommenden Bodenarten des Oberbodens und ihrer Hauptgruppen gruppiert nach Art der Nutzung.....	14
Tab. 2: Anzahl der auf den BDF vorkommenden Bodenarten des Unterbodens und ihrer Hauptgruppen gruppiert nach Art der Nutzung.....	18
Tab. 3: Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle und im Unterboden von 25 Acker-BDF im Zeitraum 1995-2017 als Anzahl BDF und Anteil an den untersuchten BDF (%), ermittelt durch Anfangs- minus Endwert.....	26
Tab. 4: Übersicht über die verwendeten Parameter, deren Kurz-Bezeichnung und Beschreibung der Parameter.....	29

1 Einleitung

Bodenphysikalische Parameter wurden im BDF-Programm für jede Untersuchungsfläche erhoben, um deren Standorteigenschaften anhand der Bodenarten und anhand von Kennwerten des Wasserhaushalts (Gesamtporenvolumen, Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität) zu beschreiben. Daneben wurden Eigenschaften des Bodengefüges (Rohdichte, Aggregatstabilität) bestimmt, die durch landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst werden können (vergl. Band 1, Übersicht Bodenprobenahmen 1985-2018). Im Vordergrund steht dabei, den langfristigen Einfluss der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge zu erkennen (LfL, 2005).

Die Bestimmung von Bodeneigenschaften bildet zudem die Grundlage für die Interpretation anderer Messgrößen. So dienen die Hauptbodenarten der Einordnung von Schadstoff-Vorsorgewerten nach Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV, 1999; vergl. Band 3 der Schriftenreihe 35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung) oder erlauben die Bewertung von Individuenzahlen von Regenwürmern (vergl. Band 5 der Schriftenreihe 35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung). Die Bestimmung der Bodenarten anhand der Texturanalyse gehört zu den zentralen Aufgaben der Bodenphysik im BDF-Programm und wurde regelmäßig auf dem Stand der aktuellen Labormethodik wiederholt.

2 Material und Methoden

2.1 Texturanalyse

Das Verfahren für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden basiert auf der DIN ISO 11277 (2002) und beschreibt die Bestimmung der Bodenart von Mineralböden mit maximal 10 % organischer Substanz mittels Siebung und Sedimentation.

Das Probenmaterial für die dargestellten Texturwerte (Kapitel 3.1) stammt aus den Mischproben der Bodenprobenahmen der Jahre 2015 und 2016. Für die Oberbodenproben wurde bei Acker, Hopfen und Wein Bodenmaterial aus einer Tiefe von 0-15 cm gezogen. Bei Grünland und Obst betrug die Probenahmetiefe des Oberbodens 0-10 cm. Die Probenahmetiefe des Unterbodens betrug für Acker 35-50 cm und für Grünland 15-30 cm (vergl. Band 1, Kapitel 3.1). Probenmaterial aus allen vier gezogenen Mischproben wurde zu einer repräsentativen Probe je BDF zusammengefasst, luftgetrocknet und auf eine Korngröße von 2 mm gesiebt, um die Feinbodenfraktion zu erhalten.

Weitere Arbeitsschritte nach der Trockensiebung beinhalten:

- Zerstören der organischen Substanz mittels 30 %iger Wasserstoffperoxid-Lösung
- Entfernen von löslichen Salzen und Gips
- Dispergierung
- Nasssieben durch Sieb mit 0,063 mm Öffnungsweite
- Trockensiebung der erhaltenen Sandfraktion größer 0,063 bis 2 mm in drei Fraktionen (Fein- Mittel- und Grobsand) und Bestimmung der Massen
- Sedimentation mit Laborautomat zur Bestimmung der Korngrößenfraktionen kleiner 0,063 mm in vier Fraktionen (Ton, Fein-, Mittel- und Grobschluff) an gleichzeitig 12 Proben (SEDIMAT 4-12) und Berechnung der Massen

Beim Berechnen der Masseanteile der einzelnen Fraktionen wird davon ausgegangen, dass die Gesamtmasse die Summe der Massen der Teilfraktionen ist.

Für die Definition der Bodenarten des Feinbodens sind die Anteile der drei Korngrößenfraktionen (< 2 mm) Sand, Schluff und Ton maßgeblich. Nach der dominierenden Fraktion werden die Bodenarten Sande, Schluffe, Tone und Lehme unterschiedlicher Ausprägung unterschieden. Die Bodenarten werden nach Vorgabe der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, 2005) eingeteilt in Bodenarten-Hauptgruppen, -Gruppen und -Untergruppen (eigentliche Bodenart).



Abb. 1: Laborautomat SEDIMAT 4-12 zur Bestimmung der Korngrößenfraktionen der mineralischen Bodensubstanz kleiner 0,063 mm

2.2 Substanz- und Porenanteile

Die ersten Gefügeuntersuchungen von 1986-1989 auf allen BDF waren vorrangig auf eine Standortcharakterisierung ausgerichtet (Probenahme innerhalb der BDF in einer Unterbodentiefe mit 8 Stechringen angelegt, vergl. Band 1, Kapitel 3). Die darauffolgenden Untersuchungen beschränkten sich auf eine Auswahl von Acker-BDF mit erhöhter Stichprobenzahl je BDF-Parzelle, um möglichst stabile Datensätze für den zeitlichen Vergleich zu erhalten. Zur Erfassung etwaiger Unterbodenverdichtungen wurden von 1995 bis 2017 auf 39 (für den zweiten Zeitpunkt auf 25) Acker-BDF direkt unterhalb der Krume im Bereich der Pflugsohle und darunter in ca. 40 cm Tiefe (je nach Pflugsohle) aus drei Probenahmestellen 6 Stechzylinderringe pro Tiefe je BDF entnommen. Um mögliche Veränderungen über die Zeit auszuwerten, wurden Acker BDF mit mindestens zwei Probenahmezeitpunkte gewählt ($n = 25$). Für jede Probenahme wurden die Anteile der Porenvolumina für die Probenahmestellen aus den sechs Stechzylindern gemittelt. Auf zwei der ausgewählten BDF wurden

mehr als zwei Probenahmen durchgeführt. Die Auswertung erfolgte nach dem im Kapitel 3.2.3 beschriebenen Vorgehen.



Abb. 2: Stechzylinderprobenahme im Acker: links: Stechzylinder mit Bodenkern, rechts: Verteilung von Stechzylindern in einer Aufgrabung von etwa 10 cm Tiefe für die Probenahme in der Krume vor dem Einschlagen

Als Parameter für die Qualität des Bodengefüges und somit als Hinweis auf Bodenverdichtung wurde die Luftkapazität bei pF 1,8 (Entwässerung mit hängender Wassersäule) untersucht. Als Luftkapazität wird jener Porenraum definiert, der bei Feldkapazität mit Luft gefüllt ist (Porengröße >50 µm; vergl. Abb. 3).

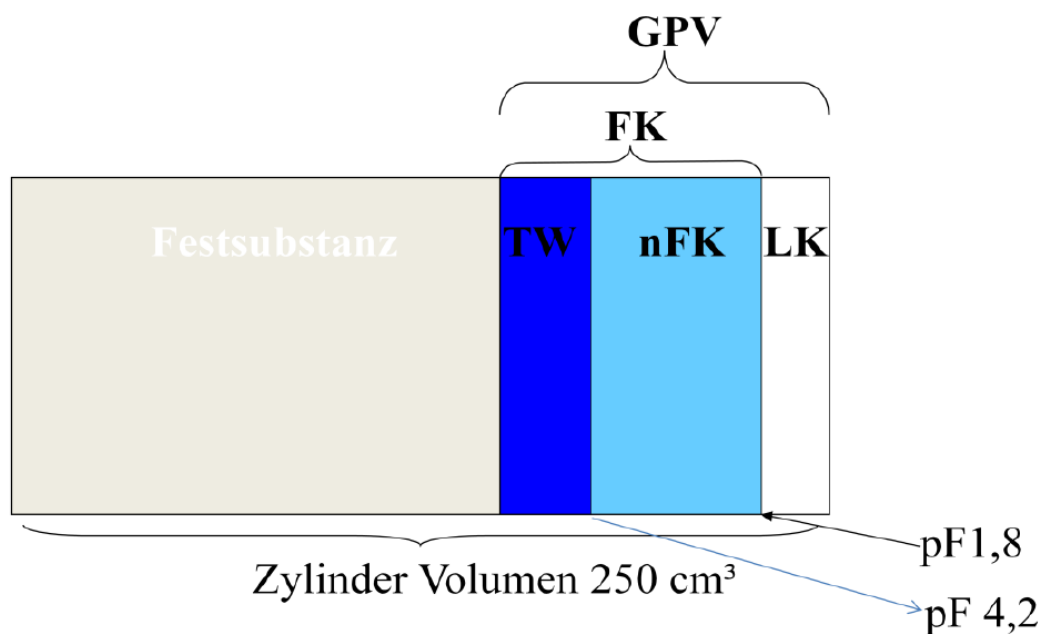


Abb. 3: Bodenkennwerte von Festschubstanz und Bodenporen zur Berechnung der Luftkapazität (LK); TW = Totwasser, nFK= nutzbare Feldkapazität, GPV = Gesamtporenvolumen

Zum Bestimmen des Wasseranteils bei **Feldkapazität** (FK) wurden die wassergesättigten Stechzylinderproben im Unterdruckverfahren mittels Druckmembran-Extraktionsanlage bis pF-Stufe 1,8 entwässert (Methode nach DIN ISO 11274).

Die (pflanzenverfügbare) **nutzbare Feldkapazität** (nFK) wurde anhand einer gestörten Bodenprobe ermittelt, die jeweils parallel zur Stechzylinderprobenahme am selben Grabloch und Horizont entnommen wurde. Die gestörte Bodenprobe wird luftgetrocknet, auf 2 mm gesiebt und ein Teil ca. 24 h lang wassergesättigt, bis eine pastöse Masse entsteht. Mittels Drucktopf werden diese Proben bei 16 bar bis zur pF-Stufe 4,2 entwässert, was dem Wassergehalt des **Totwassers** entspricht. Da das Verfahren je nach Bodenart 3 bis 11 Tage in Anspruch nehmen kann, beruht die Einschätzung der Dauer auf Erfahrungswerten. Die erreichte pF-Stufe wird nach Abschluss der Entwässerung mittels Potenziometer überprüft. Ein pF-Wertebereich von 3,7 bis 4,7 gilt als zulässig. Die nutzbare Feldkapazität berechnet sich aus der Differenz der Feldkapazität und dem Totwasser. (Methode nach DIN ISO 11274)

Die **Trockenrohdichte** (TRD) beschreibt die Dichte (Masse je Volumen (g/cm^3)) bei komplett getrockneter Bodensubstanz der ungestörten Bodenprobe (inkl. Porenvolumen). Dazu wurden die Stechzylinder im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend gewogen (Methode nach DIN ISO 11272).

Die **Festsubstanzdichte** (FSD) beschreibt die Dichte eines Bodens (g/cm^3) ohne Porenanteile und wurde mit dem Laborgerät AccuPyc 1330 anhand von Bodenmaterial der luftgetrockneten und auf 2 mm gesiebten gestörten Bodenprobe bestimmt (Methode nach DIN ISO 11508: 2002-05).

Das **Gesamtporenvolumen** (GPV) wurde anschließend aus dem Verhältnis von TRD zu FSD berechnet: $\text{GPV} = (1 - (\text{TRD}/\text{FSD})) * 100$ (Methode nach DIN ISO 11274).

Die **Luftkapazität** kann anschließend mit folgender Gleichung als Differenz des Gesamtporenvolumens und des Wasservolumens bei Feldkapazität berechnet werden: $\text{LK} = \text{GPV} - \text{FK}(1,8\text{pF})$ (Methode nach DIN ISO 11274).

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Textur

3.1.1 Bodenarten im Oberboden

Acker

Bei den Acker-BDF kommen mit 35 Standorten am häufigsten **Lehme** im Oberboden vor, deren Korngrößenanteile in der Tonfraktion zwischen 12 und 35 % (Mittelwert: 20 %) und in der Schlufffraktion zwischen 11 und 49 % (Mittelwert: 37 %) liegen. Ungefähr zwei Drittel der Lehme werden dabei von den Bodenarten Ls2, Ls3 und S14 (vergl. Bodenartendreieck in Abb. 8 und Tab. 1) gebildet.

Die zweithäufigste Hauptbodenartengruppe im Oberboden bilden die **Schluffe** mit 20 Acker-BDF (Bodenarten Lu und Ut4). Die Tonanteile liegen dort zwischen 18 und 29 % (Mittelwert: 22 %), die Schluffanteile zwischen 50 und 77 % (Mittelwert: 64 %) (Abb. 4).

Tone sind auf 16 Acker-BDF zu finden (überwiegend Lt3, Tu3 und Tu4). Sie besitzen Tonanteile von im Durchschnitt 40 % (von 28 bis 65 %) und Schluffanteile von im Mittel 48 % (von 21 bis 68 %) (Abb. 4).

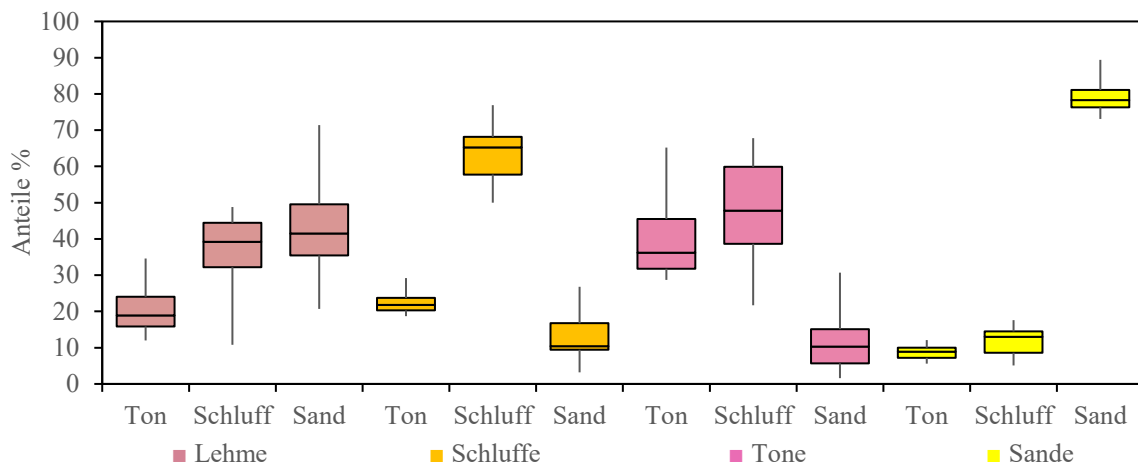


Abb. 4: Korngrößenanteile der Fraktionen Ton, Schluff und Sand je Hauptbodenart im Oberboden der Acker-BDF

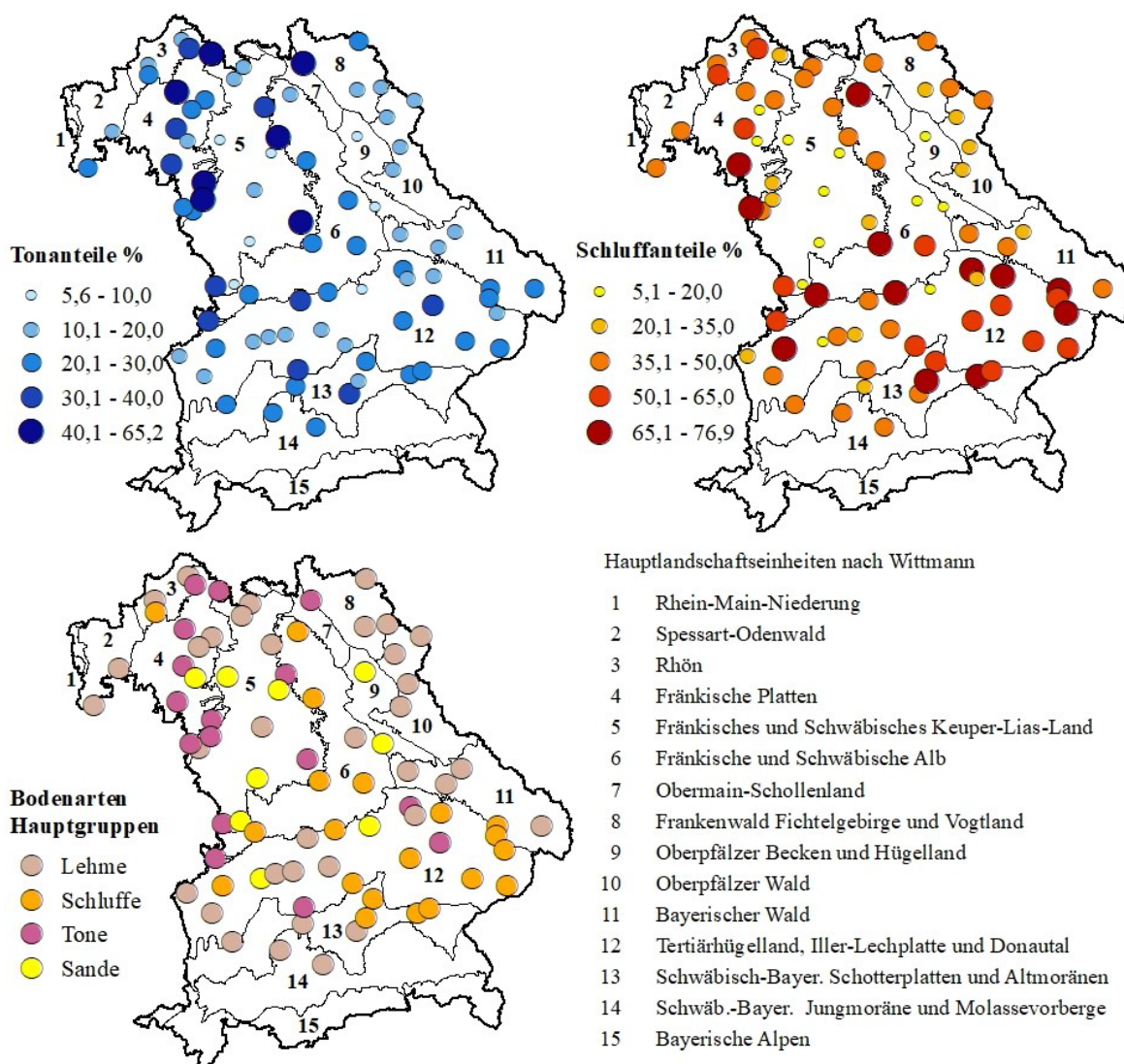


Abb. 5: Standorte der Acker-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Oberbodens und ihren Ton- und Schluffanteilen.

Lehmige, bzw. tonige **Sande** (meist Sl2 und St2) weisen nur 9 Acker-BDF auf. Der Tonanteil liegt bei diesen Böden zwischen 5 und 12 % (im Mittel 9 %), der Schluffanteil zwischen 5 und 17 % (im Mittel 12 %) (Abb. 4).

Ackerböden mit hohen Tonanteilen über 40 % befinden sich vor allem im Bereich der Fränkischen Platten und im Übergang zum Keuper-Lias-Land und der Fränkischen Alb. Tonböden mit Tonanteil über 30 % kommen bei Acker-BDF außerdem im Einflussbereich der Donau und der Iller-Lechplatten vor. Hohe Schluffanteile von über 50 % konzentrieren sich auf Acker-BDF im Tertiärhügelland, kommen aber auch lokal in Franken im Bereich der südliche Fränkische Platten bei gleichzeitig hohem Tonanteil um die 30 % und der Fränkischen Alb vor (Landschaftseinheiten nach Wittmann, 1991, vergl. Abb. 5).

Tab. 1: Anzahl der auf den BDF vorkommenden Bodenarten des Oberbodens und ihrer Hauptgruppen gruppiert nach Art der Nutzung

Bodenart	Hauptgruppe	Acker	Grünland	BDF mit Nutzungsänderung	Sonderkulturen
Ls2	Lehme	8	3	1	
Ls3	Lehme	8		1	2
Lt2	Lehme	6	6	4	1
Lts	Lehme	1			
Sl4	Lehme	7		2	1
Slu	Lehme	4		1	
St3	Lehme	1			
gesamt	Lehme	35	9	9	4
Sl2	Sande	1			1
Sl3	Sande	4			
St2	Sande	4			
gesamt	Sande	9	0	0	1
Lu	Schluffe	10		1	1
Ut4	Schluffe	10	1		1
gesamt	Schluffe	20	1	1	2
Lt3	Tone	4	5		
Tl	Tone	2		1	
Tt	Tone	1			
Tu2	Tone	1	1		
Tu3	Tone	4	2	1	
Tu4	Tone	4			
gesamt	Tone	16	8	2	0
Summe		80	18	12	7

Grünland

Bei den Grünland-BDF gehören je die Hälfte der Standorte zu den **Lehmen** (9 BDF) und **Tonen** (8 BDF). Die Lehme der Grünlandstandorte haben einen Tonanteil zwischen 18 und 34 % (im Mittel: 26 %), sowie einen Schluffanteil zwischen 35 und 49 % (im Mittel: 44 %). Sechs der Lehmstandorte gehören zur Bodenart Lt2, drei Standorte haben die Bodenart Ls2. Bei den Tonböden (Lt3, Tu3, Tu2) unter Grünlandnutzung beträgt der Tonanteil im Durchschnitt 42 % (von 35 - 58 %), der Schluffanteil liegt im Durchschnitt bei 46 % (von 40 - 54 %). Ein Grünlandstandort weist einen stark tonigen **Schluff** als Bodenart auf (Ut4, Tonanteil 19 %, Schluff 70 %) (Abb. 6).

Tonige und lehmige Böden der Grünland-BDF verteilen sich auf die im BDF-Programm repräsentierten typischen Grünlandstandorte der Alpen, Jungmoränen- und Molassevorberge und der Mittelgebirgslandschaften. Die Standorte mit den höchsten Tonanteilen befinden sich im Isartal bei Mittenwald (58 %) und Bad Tölz (45 %) und auf einer Alm bei

Bayrischzell (45 %). Der Schluff-Standort im Tertiärhügelland besitzt mit 70 % den weit höchsten Schluffanteil der Grünland-BDF (vergl. Abb. 7 und Abb. 8 Bodenartendreieck).

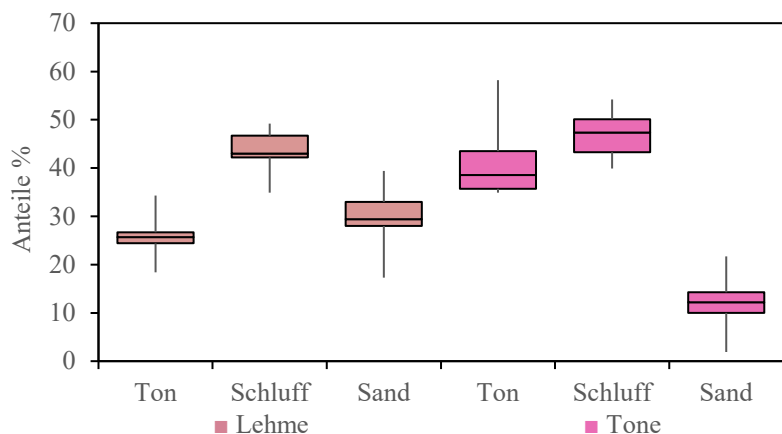


Abb. 6: Korngrößenanteile der Fraktionen Ton, Schluff und Sand der Hauptbodenarten Lehme und Tone der Grünland-BDF

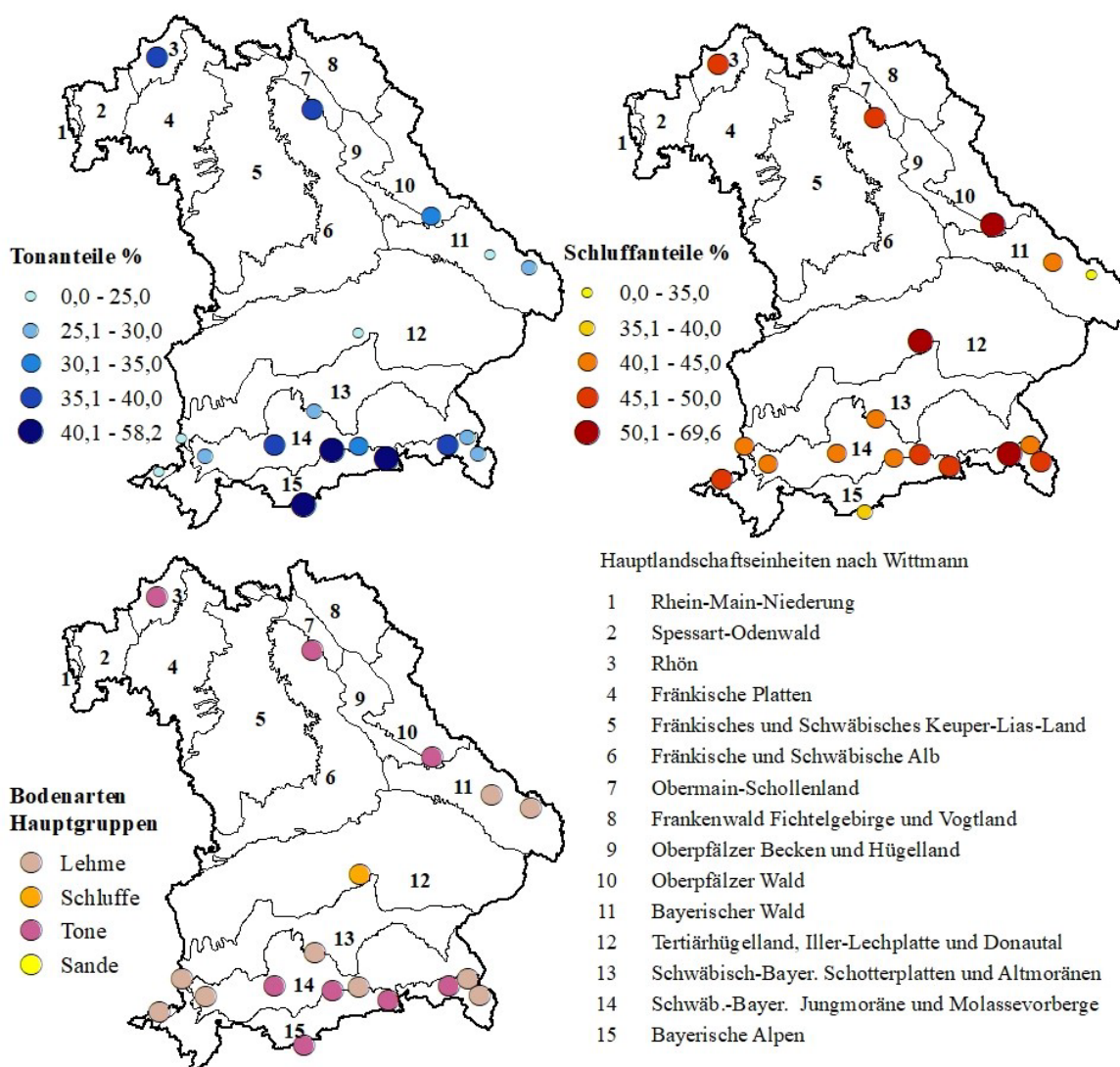


Abb. 7: Standorte der Grünland-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Oberbodens und ihren Ton- und Schluffanteilen.

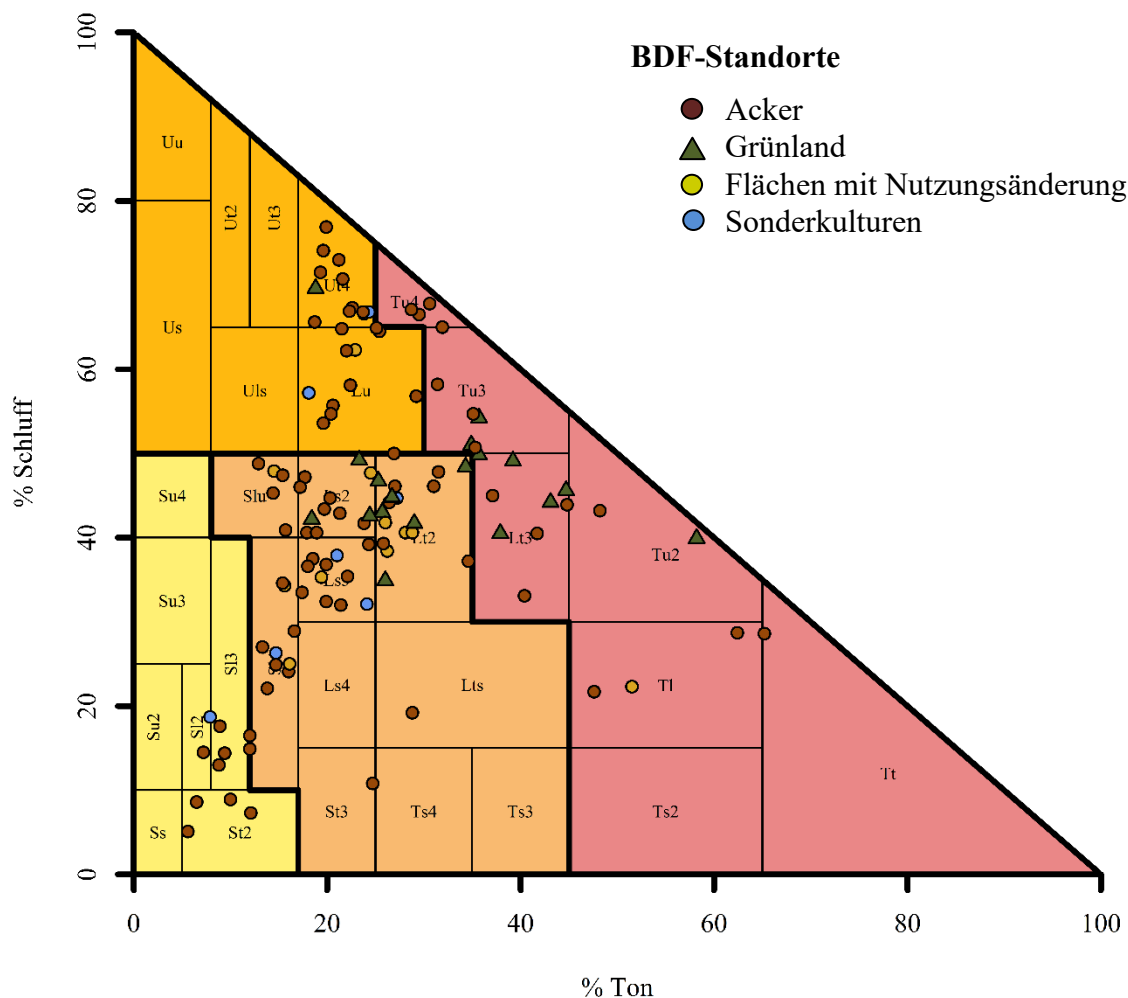


Abb. 8: Bodenartendreieck für den Oberboden aller BDF-Standorte (nach Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5), 2005)

Sonderkulturen

Die beiden Hopfenstandorte in der Hallertau sind Schluffe mit den Bodenarten Ut4 und Lu (vergl. Abb. 8). Der Standort im mittelfränkischen Hopfenanbaugebiet besitzt einen Sandanteil von über 70 % und die Bodenart Sl2 und unterscheidet sich damit deutlich von den beiden oberbayerischen Hopfen-BDF.

Die Obstfläche am Bodensee (mittlerweile umgewandelt in eine Weinparzelle) besitzt als Bodenart im Oberboden einen Ls3 mit relativ ausgeglichenem Ton, Schluff, Sand-Verhältnis.

Die Bodenarten der drei Wein-BDF (Sl4, Ls3, Lt2, in der Reihenfolge von zunehmendem Ton- und Schluffanteil) gehören zu den Lehmen, unterscheiden sich jedoch deutlich in ihren Sandanteilen. So besitzt der Sl4 bei Aschaffenburg einen Sandanteil von fast 60 %, der Lt2 bei Würzburg von nur 28 % (Abb. 9).

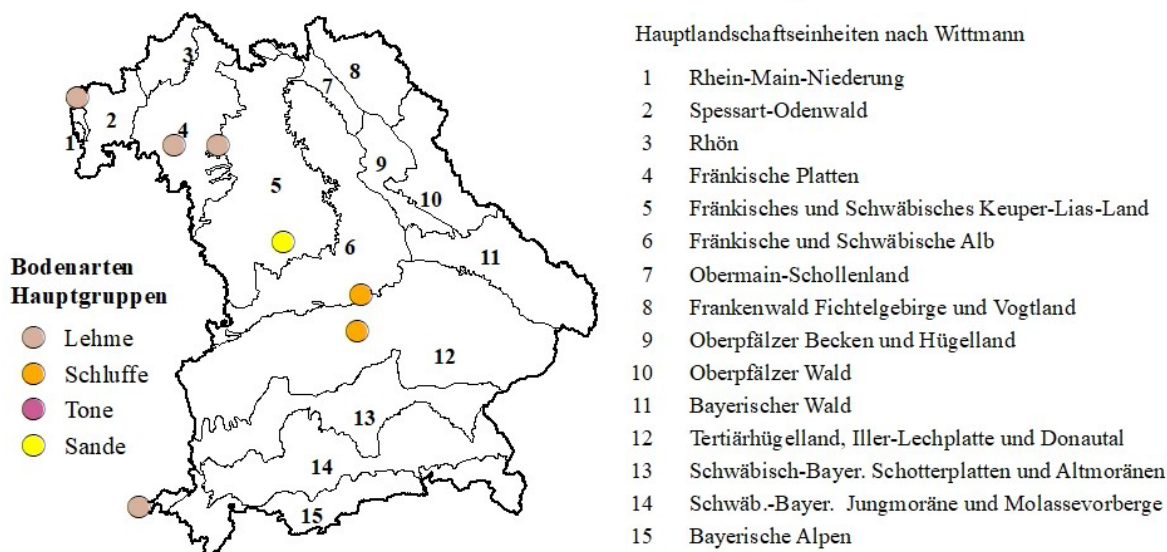


Abb. 9: Sonderkultur-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Oberbodens

Flächen mit Nutzungsänderung

Die BDF-Standorte mit Nutzungsänderung, bei denen entweder ein Grünlandumbruch stattfand oder ein Acker in Grünland umgewandelt wurde, werden in der gesamten Schriftenreihe als eigene Gruppe ausgewertet. Ihre aktuelle Nutzung kann also entweder Acker oder Grünland sein. Unter ihnen kommen überwiegend Lehme (9 BDF), 1 Schluff- und 2 Tonböden vor (vergl. Tab. 1). Die Lehme haben einen Tonanteil zwischen 14 und 29 % (im Mittel 22 %) und einen Schluffanteil zwischen 25 und 48 % (im Mittel 39 %). Der Schluff hat die Bodenart Lu, die Tonböden die Bodenarten Tl und Tu3 (vergl. Abb. 10, Abb. 8).

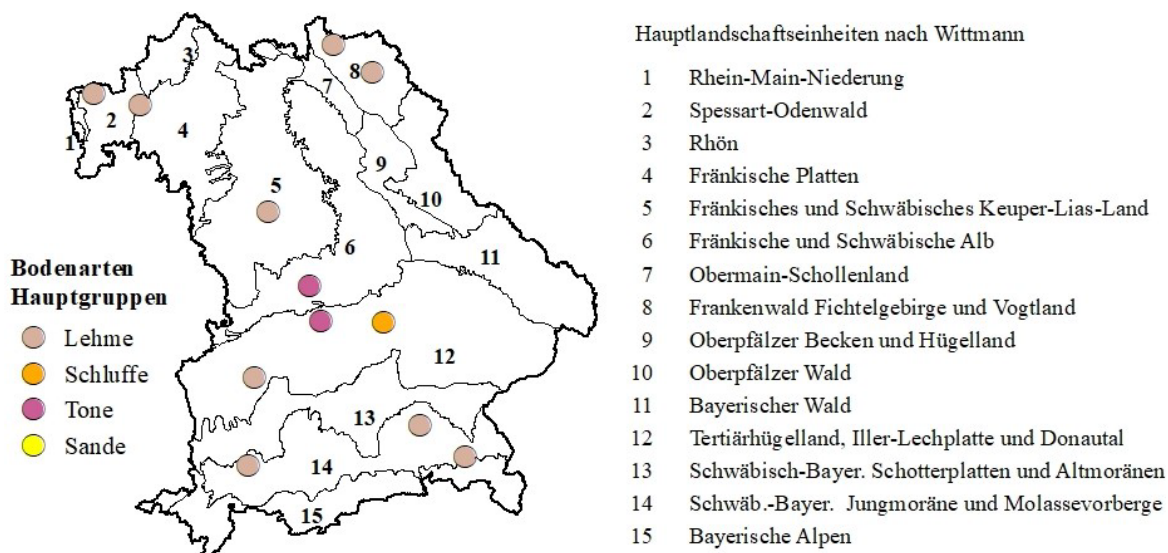


Abb. 10: Standorte der BDF mit Nutzungsänderung in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Oberbodens

3.1.2 Bodenarten im Unterboden

Acker

Bei den Acker-BDF setzt sich die Bodenart des Oberbodens bei Lehmen und Tonen meist im Unterboden fort, während bei 11 der 20 Oberboden-Schluffe auch Tone unterhalb der Pflugsohle zu finden sind. Sand unter Lehm kommt einmal, Ton unter Lehm zweimal bei den Acker-BDF vor. Unter den 16 Tonen des Oberbodens wurden dreimal Lehme und einmal ein Schluff festgestellt.

Tab. 2: Anzahl der auf den BDF vorkommenden Bodenarten des Unterbodens und ihrer Hauptgruppen gruppiert nach Art der Nutzung

Bodenart Unterboden	Hauptgruppe	Acker	Grünland	BDF mit Nutzungsänderung	Sonderkulturen
Ls2	Lehme	6	3	1	1
Ls3	Lehme	4	1	2	
Ls4	Lehme	3			
Lt2	Lehme	8	3	3	2
Lts	Lehme	1		1	
Sl4	Lehme	9		1	1
Slu	Lehme	5	2	1	
Ts3	Lehme	1			
Ts4	Lehme	1			
gesamt	Lehme	38	9	9	4
Sl2	Sande				1
Sl3	Sande	3			
Ss	Sande	1			
St2	Sande	3			
Su2	Sande	1			
gesamt	Sande	8	0	0	1
Lu	Schluffe	7	2		1
Uls	Schluffe			1	
Ut4	Schluffe	2	1		
gesamt	Schluffe	9	3	1	1
Lt3	Tone	4	4	1	
Tt	Tone	1			
Tu2	Tone	4	1		
Tu3	Tone	8	1	1	1
Tu4	Tone	8			
gesamt	Tone	25	6	2	1
Summe		80	18	12	7

Die häufigste Bodenart bilden auch im Unterboden die **Lehme** mit 38 Standorten. Ähnlich wie im Oberboden liegt der Tonanteil im Mittel bei 21 %, der Schluffanteil bei 34 %.

Mit 25 Acker-BDF sind **Tone** die zweithäufigste Bodenart im Unterboden, darunter 20 schluffige Tone (Tu2, Tu3, Tu4, vergl. Tab. 2). Ihr Tonanteil liegt mit 37 % im Mittel etwas niedriger, ihr Schluffanteil mit 54 % etwas höher als bei den Tonen des Oberbodens.

Bei 9 Acker-BDF besteht der Unterboden aus **Schluffen** mit durchschnittlich 24 % Tonanteil und 61 % Schluffanteil. Schluffe kommen im Unterboden wesentlich seltener vor als im Oberboden, ihre Korngrößenzusammensetzung ist im Durchschnitt vergleichbar.

Sande bilden mit 8 Standorten auch im Unterboden die am wenigsten häufige Bodenart. Ihr Tonanteil liegt im Mittel bei 8 %, ihr Schluffanteil bei 11 % (Abb. 11, Tab. 2).

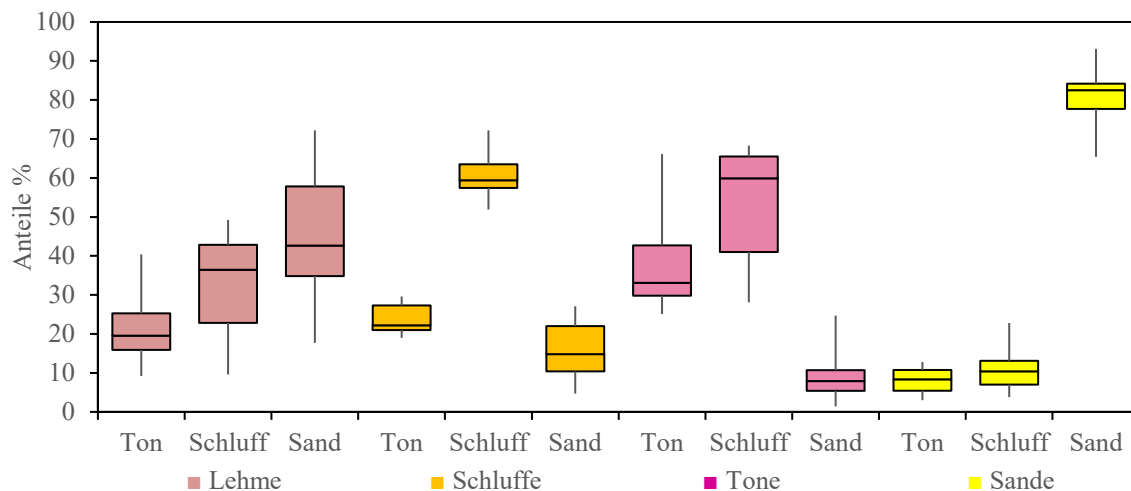


Abb. 11: Korngrößenanteile der Fraktionen Ton, Schluff und Sand je Hauptbodenart im Unterboden der Acker-BDF

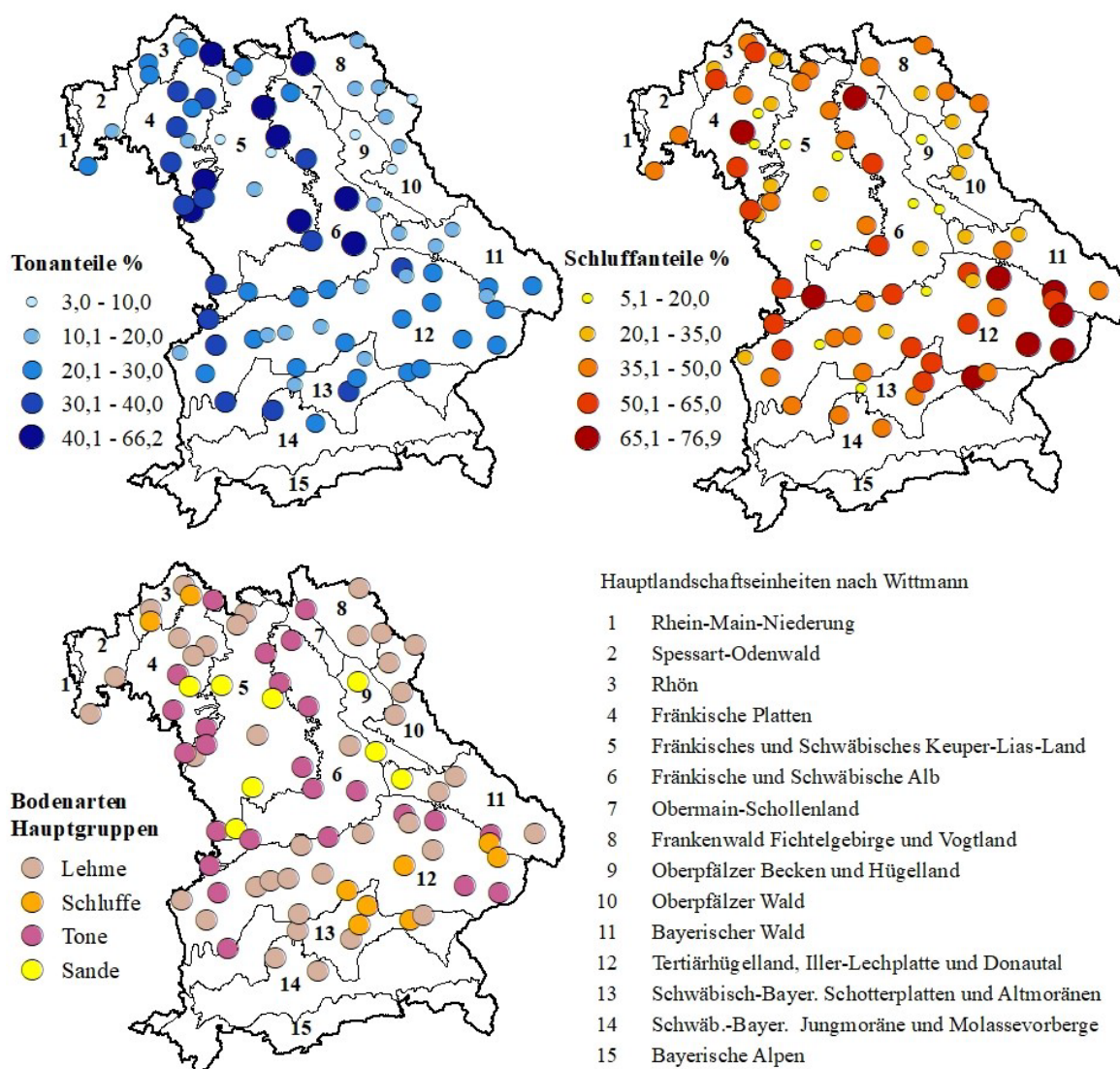


Abb. 12: Standorte der Acker-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Unterbodens und ihren Ton- und Schluffanteilen

Die regionale Verteilung der Böden mit den höchsten Ton-, bzw. Schluffanteilen entspricht grundsätzlich der des Oberbodens. Fränkische Alb und die Fränkischen Platten mit angrenzenden Regionen (Keuper-Lias, Obermain-Schollenland) sind die Landschaftseinheiten mit den BDF-Standorten mit den höchsten Tongehalten (bis zu 66 % bei Bad Windsheim) in Bayern. Tone kommen im Unterboden aber auch unter den Schluffen des Tertiärhügellands und entlang von Donau und Lech vor. Hohe Schluffanteile im Unterboden von über 65 % besitzen Acker-BDF, die meist im Tertiärhügelland, vereinzelt in Franken zu finden sind (Abb. 12).

Grünland

Da es beim Grünland keine Pflugsohle gibt, stammen die Unterbodenwerte aus einer Tiefe von 15-30 cm. Die dort bestimmten Hauptbodenarten sind meist identisch mit denen des Oberbodens. Bei zwei Grünlandflächen mit toniger Deckschicht im Oberboden kommen darunter Schluffe vor, bei einem Standort folgt auf Lehm im Oberboden ein Ton im Unterboden.

Die neun **Lehme** besitzen einen mittleren Tonanteil von 24 %, die Schluff-Fraktion macht im Mittel 41 % der Bodenfraktionen aus. Beide Anteile sind etwas geringer als in den Oberboden-Lehmen.

Die drei **Schluffe** besitzen einen mittleren Tonanteil von 23 % und einen mittleren Schluffanteil von 59 %, wobei zweimal die Bodenart Lu und ein Ut4 bestimmt wurden.

Bei den sechs **Tonen** der Grünland-Standorte wurde viermal die Bodenart Lt3, außerdem ein Tu2 und ein Tu3 bestimmt. Die Tonanteile liegen im Mittel bei 38 %, die Schluffanteile bei 48 % (Abb. 13).

Lehme und Tone kommen sowohl im Grünland-Schwerpunkt des Alpen- und Voralpenraums und im Bayerischen Wald vor. Die beiden fränkischen Grünlandstandorte besitzen Tone im Unterboden. Hohe Schluffanteile im Unterboden sind nicht nur am typischen Lössstandort im Tertiärhügelland, sondern auch am bayerischen Alpenrand und im Regen-Tal bei Cham anzutreffen.

Sonderkulturen

Von den sieben Standorten mit Sonderkulturen kommt nur auf einer Hopfenfläche eine vom Oberboden abweichende Hauptbodenart im Unterboden vor, nämlich Ton unter Schluff (vergl. Abb. 15).

Bei zwei Hopfenstandorten ist die Bodenart des Unterbodens (Lu in der Hallertau und Sl2 in Mittelfranken) identisch mit dem Oberboden, mit jeweils nur geringfügig höherem Sandanteil im Unterboden (35-50 cm von Bifangoberkante). Die Ursache kann in der intensiven Bodenbearbeitung und Durchmischung der Bifänge liegen. Der zweite Hopfenstandort in der Hallertau besitzt einen wesentlich höheren Tonanteil im Unterboden (40 %) als im Oberboden (24 %), was kann einem Tu3 als Bodenart zugeordnet werden.

Die Obst-BDF besitzt im Unterboden einen etwas geringeren Sandanteil von 37 % (Ls2) als im Oberboden (41 %, Ls3).

Die drei fränkischen Weinstandorte besitzen im Unterboden mit den Bodenarten Lt2 und Sl4 unter 35 cm eine sehr ähnliche Korngrößenverteilung wie jeweils im Oberboden.

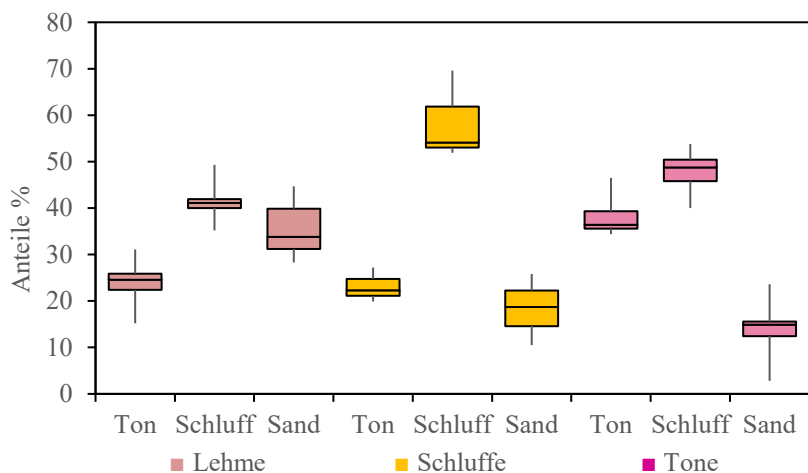


Abb. 13: Korngrößenanteile der Fraktionen Ton, Schluff und Sand der Hauptbodenarten Lehme, Schluffe und Tone des Unterbodens der Grünland-BDF

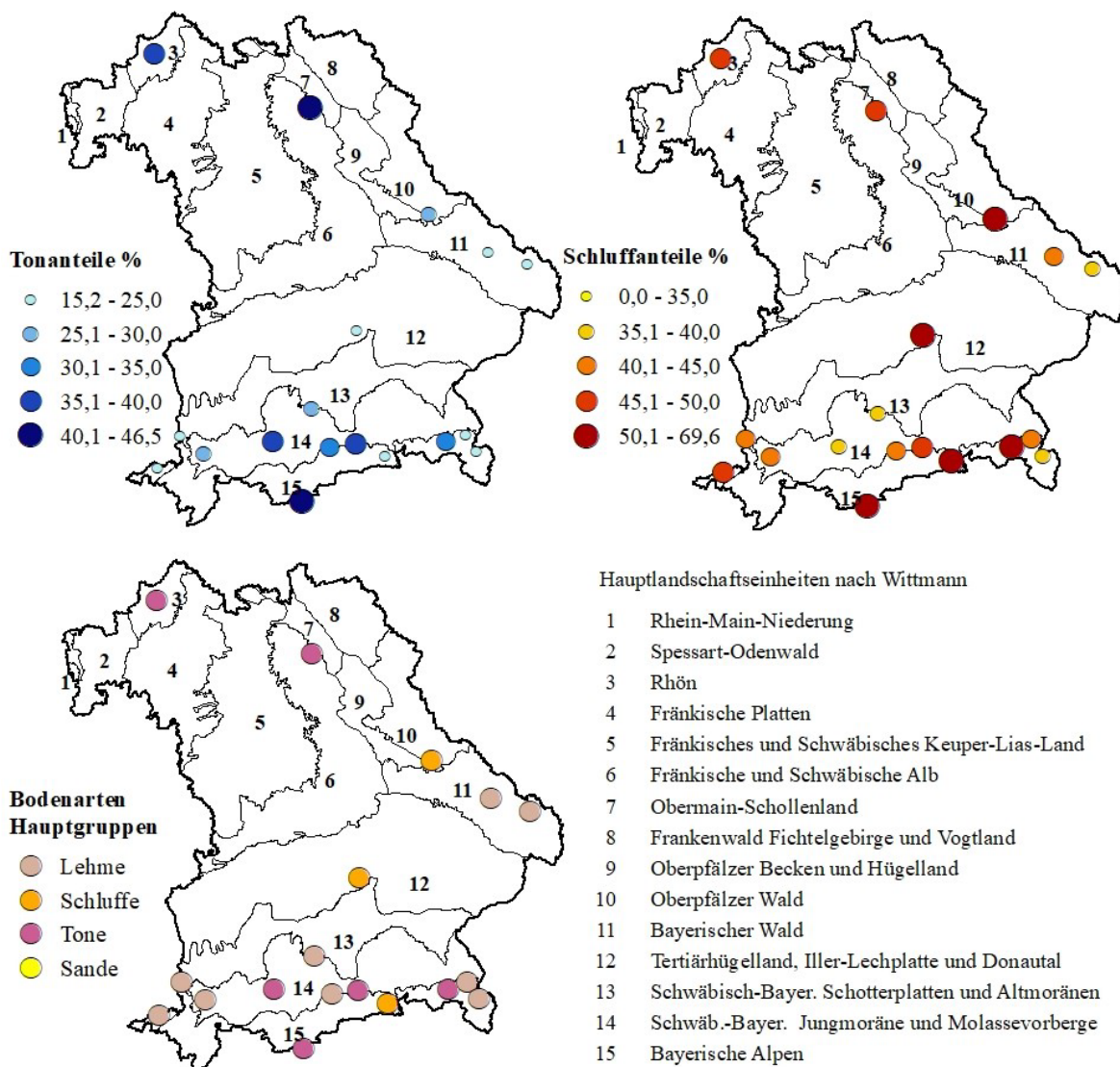


Abb. 14: Standorte der Grünland-BDF in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Unterbodens und ihren Ton- und Schluffanteilen

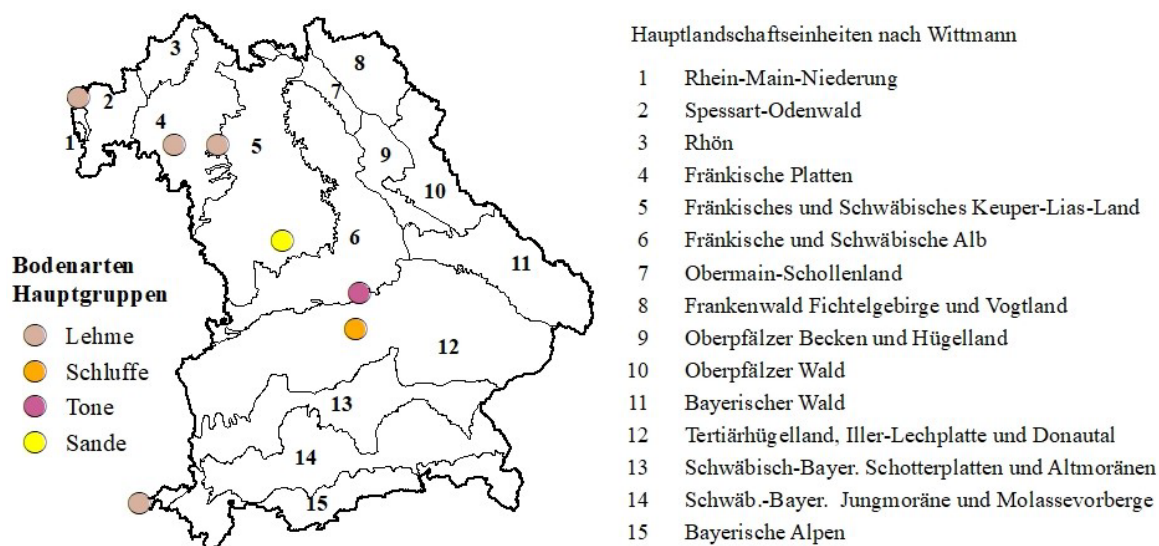


Abb. 15: Standorte der BDF mit Sonderkulturen in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Unterbodens

Flächen mit Nutzungsänderung

Bei den zwölf BDF mit Nutzungsänderung kommen wie im Oberboden neben neun Lehmen, zwei Töne und ein Schluff im Unterboden vor, teils jedoch auf anderen Standorten (vergl. Abb. 10 und Abb. 16). Die Lehme haben im Unterboden im Mittel einen etwas höheren Tonanteil (25 %) und einen etwas niedrigeren Schluffanteil (36 %) als im Oberboden.

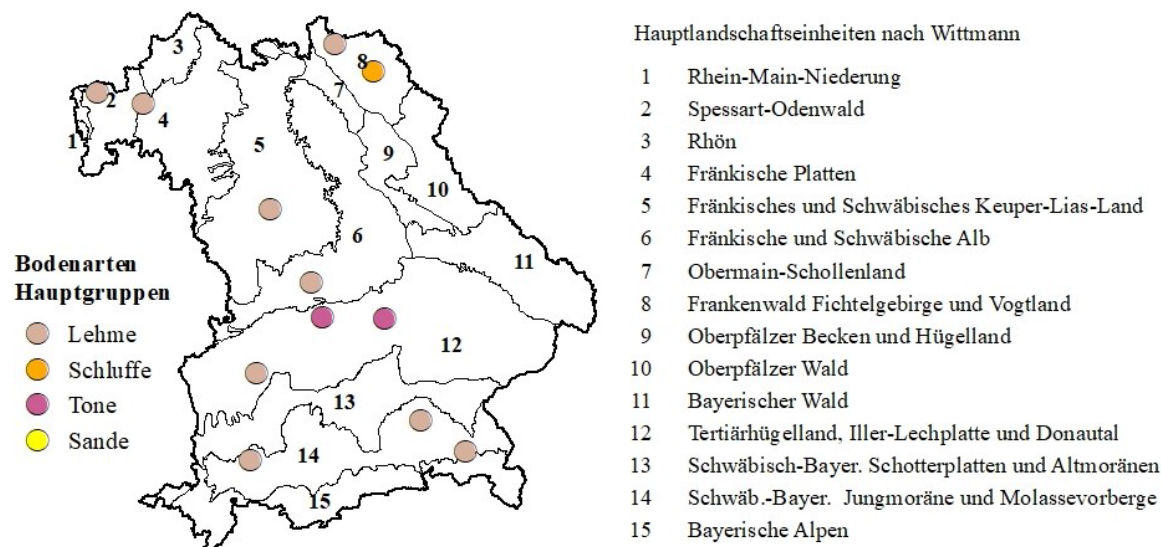


Abb. 16: Standorte der BDF mit Nutzungsänderung in Bayern mit Angaben zur Bodenart des Unterbodens

3.2 Bodengefüge – Status und Veränderungen

Als Bodengefüge wird die Architektur und die Strukturbildung des Bodens beschrieben. Die Hohlräume bieten Lebensraum für Organismen und bilden das Versorgungsnetz für den Wasser- und Lufthaushalt. Sie sind von großer Bedeutung für die Durchwurzelbarkeit sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen. Des Weiteren ist das Bodengefüge der steuernde Faktor für die Bearbeitbarkeit der Böden.

Das Bodengefüge bestimmt damit wesentlich das Produktivitätspotenzial des Systems Boden/Pflanze und wirkt als Regler für Stoffflüsse. Gerade die sich verändernden Rahmenbedingungen hin zu häufig auftretenden kleinräumigen Starkregenereignissen sowie längeren Trockenperioden setzen ein intaktes Bodengefüge voraus, um das Wasser und die Nährstoffe nutzbar im Boden zu halten.

3.2.1 Einfluss der Bewirtschaftung

Das Gefüge von Böden im Hauptwurzelraum ist stark von der Bewirtschaftung geprägt. Technischer Fortschritt und die damit verbundene Flächenleistung und Schlagkraft verändern die Bewirtschaftungsweisen in der Landwirtschaft:

- Veränderungen bei der Bodenbearbeitung, Fruchtfolgegestaltung und organischen Düngung, wie sie auch bei den BDF in den letzten Jahrzehnten festgestellt wurden (vergl. Band 1, Kapitel 6), beeinflussen vorrangig das Gefüge im Oberboden (bis zur Pflugsohle).
- Während des Beobachtungszeitraums kann in Bayern ein ungebrochener Trend zu leistungsfähigeren, aber auch schwereren Maschinen und Transportfahrzeuge beobachtet werden. Eine stärkere mechanische Beanspruchung des Unterbodens kann die Folge sein.

3.2.2 Rahmenbedingungen

Die Gefügeuntersuchungen auf BDF wurden im zurückliegenden Beobachtungszeitraum für ausgewählte Ackerstandorte im Frühjahr in der Kultur Winterweizen durchgeführt, mit dem Ziel die Unterbodenverdichtung zu dokumentieren, und unterliegen folgenden Rahmenbedingungen:

- Im Oberboden ist die zeitliche Variabilität der Gefügeeigenschaften hoch. Regelmäßige Eingriffe durch Bodenbearbeitung, biologische Umsetzungsvorgänge, steter Wechsel von Feucht- und Trockenphasen sowie Frost bedingen eine hohe Gefügedynamik.
- Während in der Krume Bodenbearbeitungsmaßnahmen die ursprüngliche räumliche standorttypischen Heterogenität verwischen, kommt im nicht mehr bearbeiteten Unterboden die geo- und pedogene Variabilität der Standorte zum Tragen. Somit führt jede Änderung der Randbedingungen zu einer neuen dynamischen Gleichgewichtseinstellung der physikalischen Kenngrößen.
- An vielen Standorten in Bayern verhindert ein hoher Steinanteil im Unterboden den Einsatz üblicher bodenphysikalischer Untersuchungsmethoden.

Bodengefügeuntersuchungen im Rahmen von Bodendauerbeobachtung müssen deshalb mit einer geringeren Schärfe der Aussagekraft ihrer Daten zurechtkommen. Das Risikopotenzial von schweren Landmaschinen und von Bewirtschaftungssystemen im Sinne der Vorsorge exakt zu fassen, bleibt gezielten Versuchsanstellungen vorbehalten. Ziel der Gefügeuntersuchungen auf BDF ist es, Gefügeausprägungen als Ergebnis langjähriger Bewirtschaftung auf verschiedensten Standorten zu dokumentieren (LfL, 2005).

3.2.3 Entwicklungen im Bodengefüge

Um die Veränderung der Qualität des Bodengefüges im Unterboden, sowie die möglichen Einflussfaktoren darauf quantifizieren zu können, wurden die Ergebnisse der letzten und ersten Probenahme im Beprobungszeitraum von 1995 bis 2017 von 25 ausgewählten Acker-BDF verglichen.

In Abb. 17 zeigt die Grafik der bodenphysikalischen Parameter Substanzdichte, Totwasser, nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität sowohl bei der Pflugsohle als auch beim Unterboden eine Zunahme bei den Volumenanteilen der nutzbaren Feldkapazität und gleichzeitig eine Abnahme der Totwasseranteile im Vergleich der beiden Probenahmeserien. Insbesondere die Abnahme beim Totwasseranteil von im Mittel 19 auf 15% sowohl in der Pflugsohle wie im Unterboden, und die Zunahme der nutzbaren Feldkapazität von 14 auf 18% in der Pflugsohle und 13 auf 17% im Unterboden sind erkennbar. Das vorwiegend vom Bodenmaterial bestimmte Gesamtporenvolumen blieb erwartungsgemäß im Mittel zwischen den Beobachtungszeiträumen nahezu unverändert und lag im in der Pflugsohle etwa 2% Prozentpunkte unterhalb des Unterbodens bei etwa 41 %,

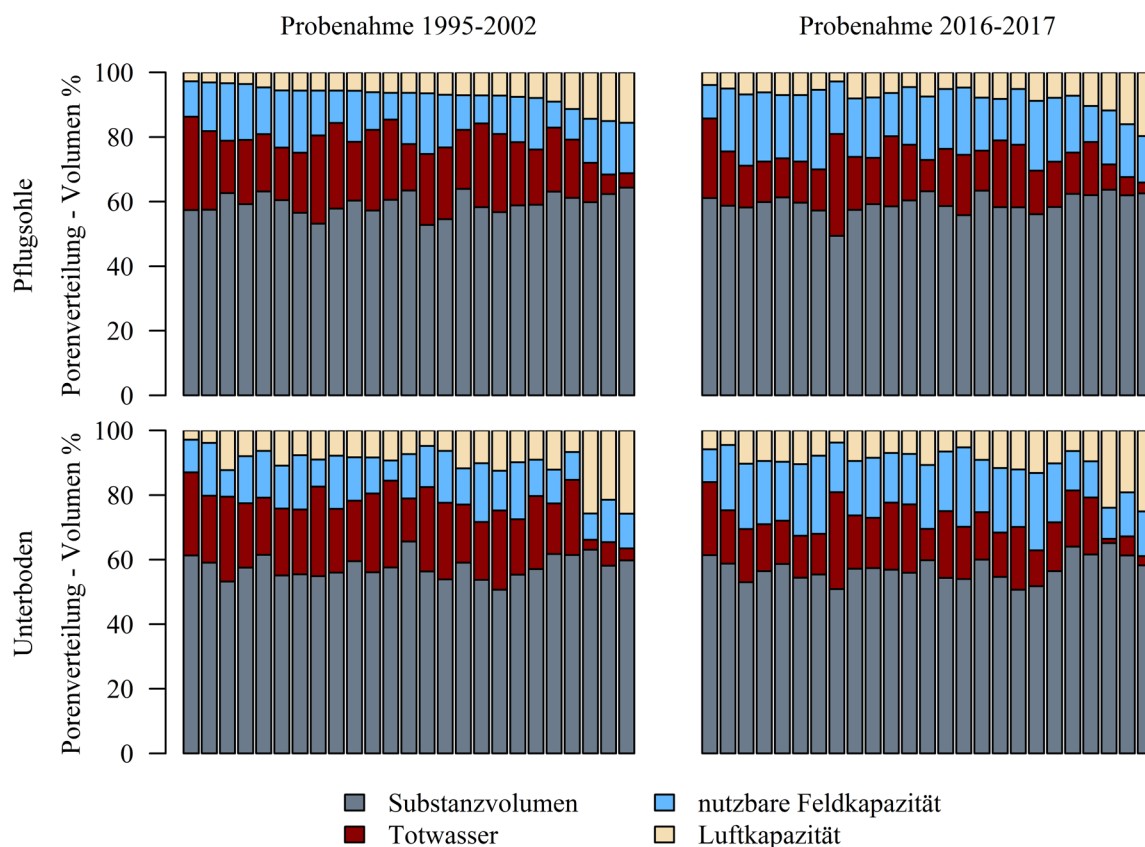


Abb. 17: Vergleich der bodenphysikalischen Parameter Substanzdichte, Totwasser, nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität zwischen Pflugsohle und Unterboden sowie den beiden Probenahmeserien (die Acker BDF sind sortiert nach der Luftkapazität in der ersten Probenahmeserie 1995-2002).

Luftkapazität in der Pflugsohle

Die Luftkapazität in der Pflugsohle lag zum ersten Probenahmezeitpunkt im Mittel bei 7,3 %, zur zweiten Probenahme im Mittel bei 7,7 %. Der Anfangs-Mittelwert setzt sich zusammen aus 9 Standorten mit überdurchschnittlich hoher Luftkapazität von bis zu 16 % und 16 Standorten mit unterdurchschnittlicher Luftkapazität von im Mittel 5,4 %. Beide Gruppen unterschieden sich auch deutlich hinsichtlich ihrer Textur: Überdurchschnittliche Standorte hatten im Mittel 20 % Ton und 45 % Sand, unterdurchschnittliche Standorte 28 % Ton und 19 % Sand. Besonders niedrige Luftkapazität wies ein Standort (BDF 77) mit der Bodenart

Lt3 im Unterboden auf, der in der ersten Beprobung bei 3,1 % und in der zweiten bei 3,9 % Grobporenanteil lag. Besonders hohe Luftkapazitäten waren bei BDF mit den Bodenarten Su2, St2 und Sl4 festzustellen.

Bei den einzelnen Standorten nahm die Luftkapazität in der Pflugsohle auf 10 der 25 untersuchten Acker BDF vom ersten zum letzten Probenahmezeitpunkt ab und auf 15 zu (Abb. 17 und Abb. 18). Im Mittel lag die Veränderung im positiven Bereich bei +0,02 Prozentpunkten je Jahr.

Die maximale Abnahme lag bei einer BDF in der Oberpfalz bei -0,18 % a⁻¹ (BDF 51), was extrapoliert auf einen Zeitraum von 30 Jahren einer Änderung von -5,4 Prozentpunkten entsprechen würde. Der Standort hat einen hohen Tongehalt von etwa 54 % (Bodenart Unterboden: Tu3) und sank von 5,7 % Luftkapazität auf 2,8 %. Die zweitstärkste Abnahme mit -0,15 % a⁻¹ zeigte ein sandiger Standort (BDF 98, Bodenart UB: St2, 82% Sand) mit hohem Ausgangswert der Luftkapazität von 14,4 %. Im Mittel aller neun Standorte mit Abnahmen lag die jährliche Abnahme bei -0,1 % a⁻¹.

Die größte Zunahme der Luftkapazität von +0,2 % a⁻¹ war auf zwei ebenfalls sehr unterschiedlichen Standorten zu beobachten. Der Grobporenanteil der BDF 32 im Straubinger Gäu stieg von 3,1 % im Jahr 1999 auf 6,8 % im Jahr 2017. Die Bodenart im Unterboden ist dort ein Tu4 mit 28 % Ton. Bei der BDF 87 stieg der Anteil von 15,9 % auf 19,7 % im Zeitraum von 1997 bis 2017. Der Su2 hat dort einen Tonanteil von nur 5 %. Im Mittel aller Standorte mit Zunahmen lag die jährliche Zunahme bei +0,1 % a⁻¹.

Die Standorte mit Abnahmen haben durchschnittlich einen etwas höheren Tonanteil im Unterboden (27 %), als die Standorte mit Zunahmen (24 %), aber gleichzeitig mit 28 % einen gleich hohen Sandanteil. Der Schluffanteil liegt bei den Standorten mit Abnahmen bei durchschnittlich 44 %, bei den Standorten mit Zunahmen bei 48 %.

Insgesamt lagen zum ersten Probenahmezeitpunkt fünf Standorte unter dem von Lebert et al. (2004) beschriebenen kritischen Wert der Luftkapazität von 5 %. In der letzten Probenahme waren es vier Standorte, jedoch, bis auf eine Ausnahme (BDF 77) andere Standorte als zu Beginn.

In der Pflugsohle konnte insgesamt eine Zunahme der Luftkapazität beobachtet werden. Angesichts der nur zwei Untersuchungsjahre, sind die Aussagen zur Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle allerdings mit Vorsicht zu bewerten. Bei den untersuchten Acker-BDF haben Böden mit hohem Tonanteil generell eine geringere Luftkapazität, so lagen zuletzt 16 Standorte bei im Mittel 5,8 % LK und somit nahe, in einigen Fällen auch unter dem kritischen Wert von 5 %. Die größte Abnahme wurde auf einem tonreichen Standort festgestellt, gefolgt von einem sandigen Standort mit hohem Ausgangswert. Auch bei den Zunahmen zeigten sowohl tonige als auch sandige Böden hohe Raten.

Bewirtschaftungsparameter wie Anzahl der Jahre mit Pflug, organischer Düngung oder der Anbau bestimmter Kulturen (vergl. Tab. 4) unterscheiden sich bei den BDF mit Zu- und Abnahmen kaum. Lediglich beim Pflugeinsatz und bei der organischen Düngung zeichnet sich bei den BDF mit Abnahme der Luftkapazität ein höherer Anteil der Jahre im Beobachtungszeitraum ab (Pflug: 74 % der Jahre bei BDF mit Abnahmen im Vergleich zu 58 % bei den BDF mit Zunahme, Organische Düngung: 58 % der Jahre bei BDF mit Abnahmen im Vergleich zu 50 % bei den BDF mit Zunahme). Zur statistischen Absicherung wurden Rangkorrelationskoeffizient (Kendall's Tau) für den Zusammenhang der Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle mit den ausgewählten Variablen herangezogen, sowie Konfidenzintervalle bestimmt und im Folgenden (Seite 27f) beschrieben.

Tab. 3: Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle und im Unterboden von 25 Acker-BDF im Zeitraum 1995-2017 als Anzahl BDF und Anteil an den untersuchten BDF (%), ermittelt durch Anfangs- minus Endwert

	LK-Abnahme	LK-Zunahme
Änderung Pflugsohle	10 (40 %)	15 (60 %)
Änderung Unterboden	12 (48 %)	13 (52 %)

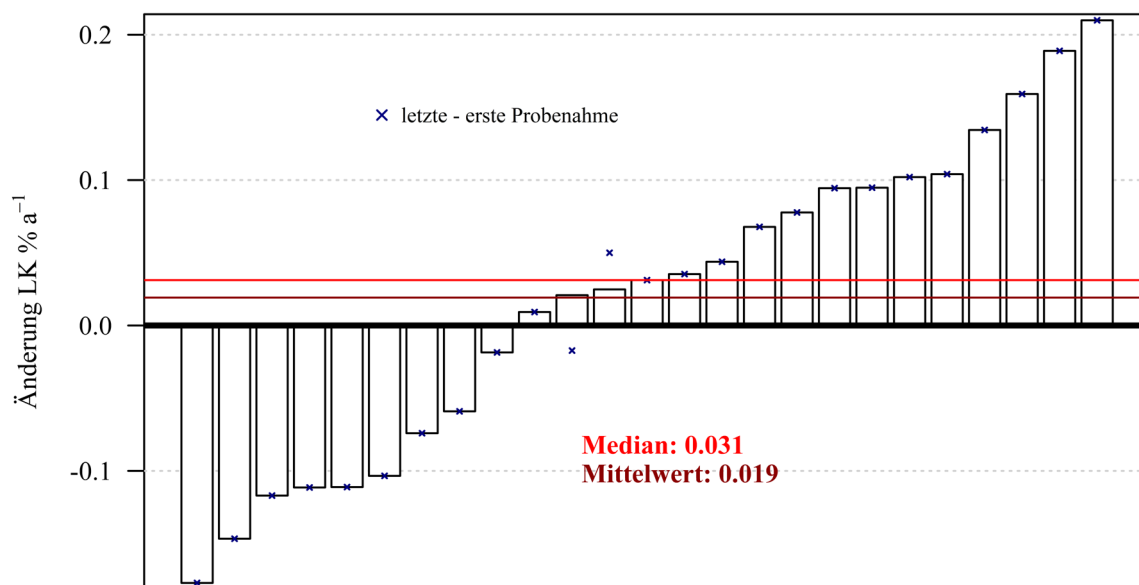


Abb. 18: Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle als jährliche Änderung von 25 Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\% a^{-1}$

Ergebnisse unterhalb der Pflugsohle

Unterhalb der Pflugsohle lag die Luftkapazität zu Beginn des Beprobungszeitraums mit im Mittel 10,2 % deutlich höher als in der Pflugsohle und zeigte zum zweiten Probenahmezeitpunkt (10,3 %) im Mittel kaum eine Veränderung. Tatsächlich gab es 13 BDF mit Zunahmen von im Durchschnitt $+0,1 \% a^{-1}$ und Abnahmen bei 12 BDF von durchschnittlich $-0,1 \% a^{-1}$. Über alle 25 Standorte entspricht das einer vernachlässigbaren rechnerischen Zunahme von $+0,005$ Prozentpunkten je Jahr (Tab. 3).

Die stärkste Abnahme unterhalb der Pflugsohle war auf der gleichen BDF (BDF 51) festzustellen, die auch in der Pflugsohle den größten Rückgang beim Grobporenanteil aufzeigte, sowie auf der BDF 107 in Unterfranken im Steigerwaldvorland. Hier sank die Luftkapazität unterhalb der Pflugsohle im Beobachtungszeitraum jeweils um $-0,3$ Prozentpunkte je Jahr. Beide Standorte sind Tonböden mit den Bodenarten Tu2 und Ts4. Die stärksten Zunahmen waren auf den BDF 118 (Lt2) und 124 (S14) mit $+0,2 \% a^{-1}$ registriert worden.

Im Unterboden unterhalb der Pflugsohle lagen zum ersten Probenahmezeitpunkt drei der untersuchten BDF unter dem kritischen Wert von 5 % Luftkapazität. Zwei davon lagen bei der zweiten Probenahme über 5 %, eine weiterhin unter der kritischen Marke (BDF 40) und lag dabei sogar unterhalb der Luftkapazität der Pflugsohle. Außerdem unterschritt ein neuer Standort (BDF 51) am zweiten Termin die 5 % (Abb. 17).

Vergleich mit Standort- und Bewirtschaftungsparametern

Um mögliche Ursachen der sich verändernden bodenphysikalischen Parameter ableiten zu können, wurden bestimmte Standort- und Bewirtschaftungsmerkmale als erklärende Parameter statistisch ausgewertet und mit der Luftkapazität in der Pflugsohle verglichen.

Abb. 19 zeigt die Korrelationen unter den als möglicherweise erklärende Variablen herangezogenen Parametern. Für den gewählten Probenahmezeitraum und die reduzierte Auswahl an Acker BDF (25 der insgesamt 80 Ackerstandorte im BDF-Programm) zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Anteil an Jahren mit organischer Düngung und dem Anbau von Zwischenfrüchten, sowie dem Anteil von Mais in der Fruchtfolge der 25 Standorte. Je mehr Mais angebaut wurde, desto mehr Winterzwischenfrüchte kamen in der Fruchtfolge vor und desto mehr wurde organisch gedüngt. Der Strohverbleib auf der Fläche nahm jedoch mit zunehmender organischer Düngung ab.

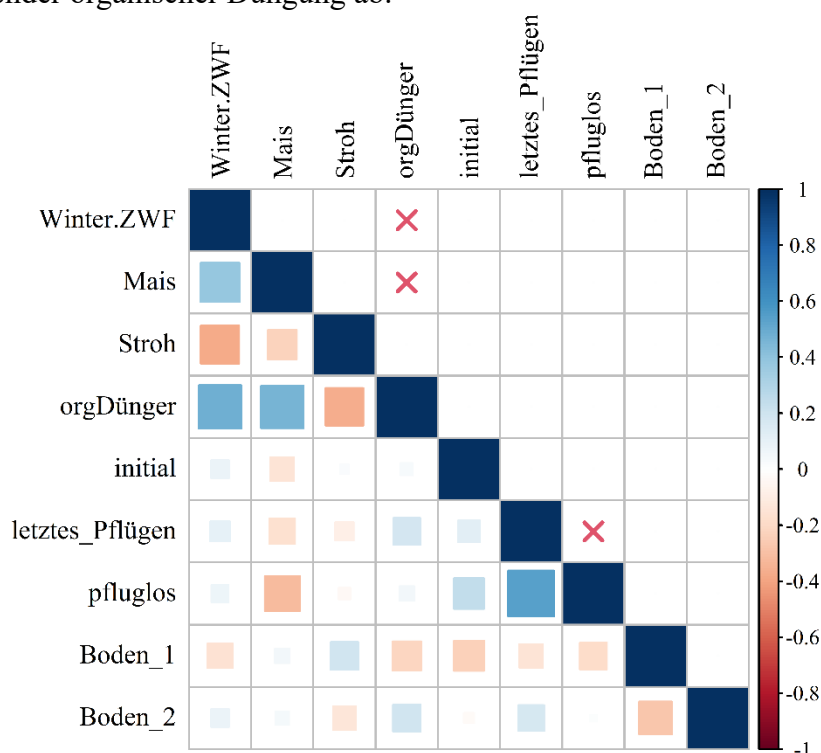


Abb. 19: Korrelationsmatrix der im linearen Modell zur Erklärung der Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle herangezogenen Variablen; ausgeschlossene Kombinationen sind mit einem roten x gekennzeichnet (Rangkorrelationskoeffizient Kendalls Tau, hochsignifikante Korrelationen $p < 0.01$, sind ausgeschlossen).

Für die ausgewählten erklärenden Parameter konnte kein signifikanter Zusammenhang mit der Änderung der Luftkapazität in der Pflugsohle als direkte univariate Korrelation festgestellt werden (Abb. 20). Den stärksten Zusammenhang, der zumindest als Tendenz ($p < 0,1$) nachzuweisen war, wies die Variable Boden_2 aus der Hauptkomponentenanalyse auf, die hauptsächlich durch den Tongehalt bestimmt ist, sowie die Höhe der Luftkapazität zur Ausgangssituation.

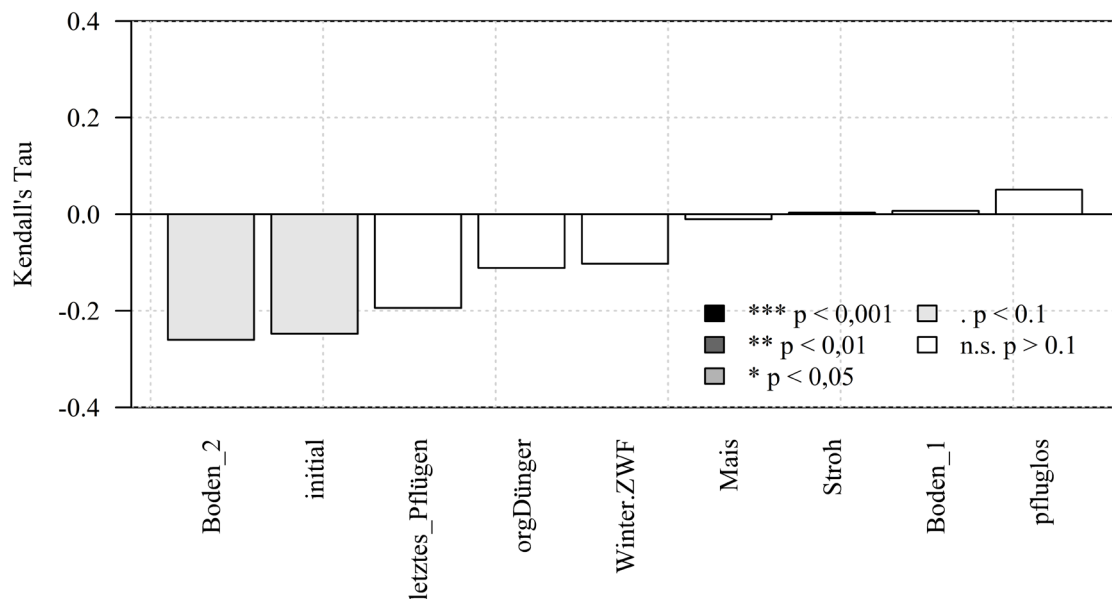


Abb. 20: Rangkorrelationskoeffizient (Kendall's Tau) für den Zusammenhang der Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugschleife mit den ausgewählten Variablen (Farbskala nach p-Wert)

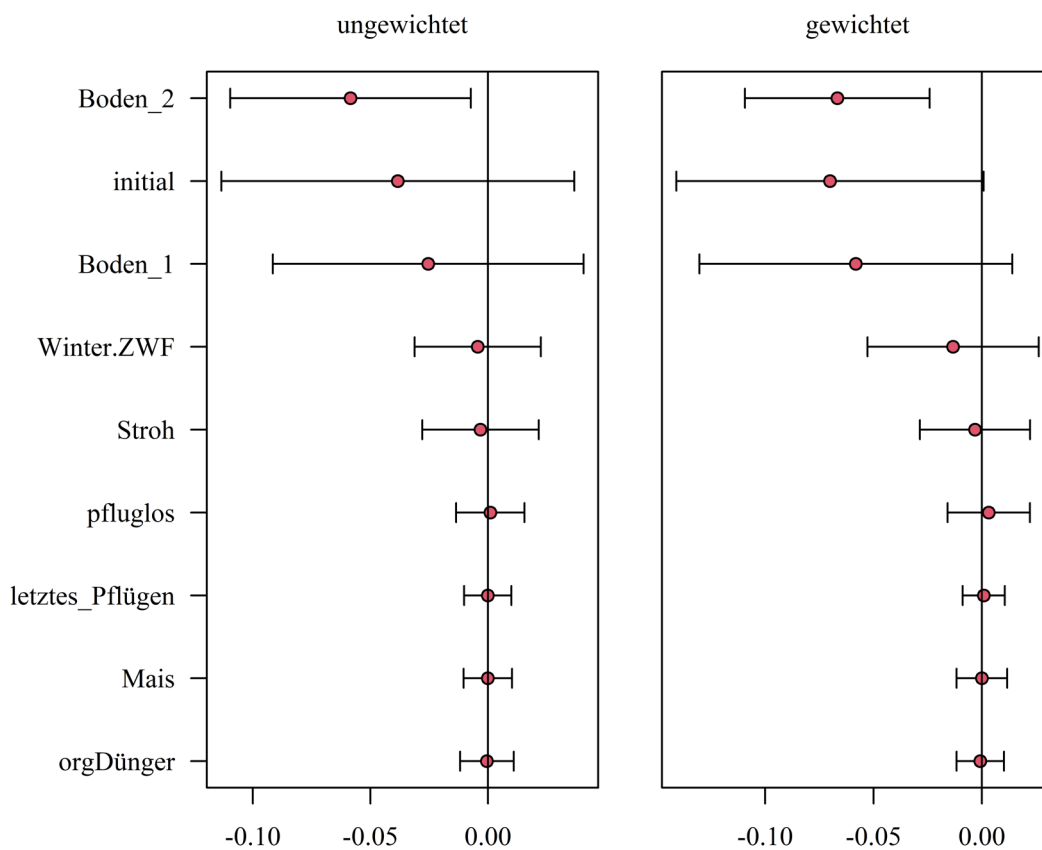


Abb. 21: Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten (standardisiert) für das ungewichtete und das mit dem RMSE gewichtete gemittelte Modell für die Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugschleife der bayerischen Acker BDF (full average Methode).

Für die gemittelten Modell-Parameter ist ein signifikanter Effekt des Tongehaltes im Boden (Boden_2) festzustellen (Abb. 21). Das nach AIC beste Modell erklärte die Varianz der Messungen der Änderung der Luftkapazität, sowohl im gewichteten wie ungewichteten, gemittelten Model durch die beiden Bodenparameter (Boden_1, Boden_2) und den initialen Zustand (Luftkapazität) der Pflugsohle zu 39%. Tonige Böden zeigten eher eine Neigung zur weiteren Verdichtung im Laufe des Beobachtungszeitraums, und auch der Parameter Boden_1, der einen Gradienten von sandigen eher ertragsschwachen zu eher schluffigen ertragsstarken Böden darstellt, zeigt ansatzweise, dass bessere Böden eher eine Abnahme der Luftkapazität in der Pflugsohle aufweisen. Der Ausgangsgehalt stellt, wie bei einer berechneten Änderung über zwei Probenahmezeitpunkte zu erwarten, noch einen großen Einfluss auf die gemessenen Parameter dar. Böden mit einer höheren Luftkapazität in der Pflugsohle bei der ersten Probenahme neigen eher zu einem Rückgang dieser bei der folgenden Beprobung.

Tab. 4: Übersicht über die verwendeten Parameter, deren Kurz-Bezeichnung und Beschreibung der Parameter

Bezeichnung	Beschreibung
Standortparameter	
Boden_1	Hauptkomponente I, beschreibt Gradient von sandigen Böden mit niedriger Ackerzahl zu schluffigen mit hoher Ackerzahl
Boden_2	Hauptkomponente II, beschreibt den Tongehalt der Acker BDF
Bewirtschaftungsparameter	
Mais	Anteil Jahre mit Mais (Körner- und Silomais) am gesamten Beobachtungszeitraum
Winter.ZWF	Anteil Jahre mit Zwischenfruchtanbau über den Winter (Aussaat im Herbst, Umbruch/Bearbeitung im folgenden Jahr nach dem Winter) am gesamten Beobachtungszeitraum
Stroh	Anteil der Jahre am gesamten Beobachtungszeitraum, in denen Getreidestroh nach der Ernte auf dem Feld verbleibt
Pfluglos	Anteil der Jahre am gesamten Beobachtungszeitraum, in denen gepflügt wurde (wendende Bodenbearbeitung)
letztes_Pflügen	Anzahl an Jahren seit dem letzten Pflügen (mit Pflug)
orgDünger	Anteil der Jahre mit organischer Düngung am gesamten Beobachtungszeitraum

3.2.4 Diskussion und Fazit

Die Luftkapazität charakterisiert den Porenanteil, der den schnellen Wasser- und Gastransport sicherstellt. Sie ist entscheidend für die Versickerung von Niederschlagswasser (Infiltration verhindert Erosion) in tiefere Bodenschichten sowie für die Wasserhaltefähigkeit in Trockenphasen (nutzbare Feldkapazität). Zeitweiliger Wasserstau über der Pflugsohle kann zu reduktiven Bedingungen führen, insbesondere dann, wenn dort Stroh vom Vorjahr vergraben liegt. Eine Bodenverdichtung bedeutet eine Veränderung des Gefüges und hat somit negative Auswirkungen auf die Bodenfunktionen, was somit zu Einschränkungen des Wurzelwachstums führt (Harrach und Vorderbrügge, 1991; Sommer und Brunotte 2003), auch wenn die Pflugsohle i.d.R. nur einige Zentimeter dick ist und die Pflanzenwurzeln diese kompakte Zone insbesondere im Frühjahr bei ausreichender Feuchte durchdringen können.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Gefügekenwerte erlauben eine Bewertung der Verdichtungsneigung im Unterboden bei den BDF mit Ackernutzung. Alle untersuchten Ackerböden wiesen eine sogenannte „Pflugsohle“ auf, die sich durch niedrigere Werte der Luftkapazität deutlich vom Unterboden darunter abgrenzen lässt. Dabei liegt die Luftkapazität in der Pflugsohle bei gut der Hälfte der untersuchten Standorte nahe am kritischen Wert von 5 % (Lebert et al., 2004), in wenigen Fällen auch darunter. Tonige Böden haben generell einen niedrigeren Grobporenanteil und neigen tendenziell eher zur Verdichtung, wohingegen sandige Böden dies eher ausgleichen können, mit dem Nachteil der geringeren Wasser- und Nährstoffhaltefähigkeit (nutzbare Feldkapazität).

Unter der Pflugsohle liegen bei den untersuchten Acker-BDF die Gefügekenwerte mit wenigen Ausnahmen in einem Bereich, der auf eine ausreichende Funktionsfähigkeit schließen lässt.

Über den Beobachtungszeitraum konnten Veränderungen auf allen Standorten, jedoch keine generelle Verschlechterung der Luftkapazität in der Pflugsohle oder im Unterboden festgestellt werden. Es wurde über alle BDF sogar eine leichte Zunahme in der Pflugsohle und ein in etwa gleichbleibendes Niveau im Unterboden darunter gemessen.

Nach wie vor liegen die Kennwerte für die Ausprägung der Gefüge der untersuchten BDF innerhalb der für bayerische Verhältnisse bekannten Bereiche (vgl. Bayer. Geol. Landesamt, 1986, 1992; Horn et al., 1991, LBP, 1997; LfL, 2005) und weisen überwiegend auf ausreichend funktionsfähige Gefügeleistungen der landwirtschaftlich genutzten Böden Bayerns hin. Die Ergebnisse lieferten, trotz der generellen Tendenz zu schwererem Maschineneinsatz in der Landwirtschaft, somit keinen Hinweis auf eine zunehmende Schadverdichtung im Unterboden der 25 untersuchten Acker-BDF.

Es ist zu berücksichtigen, dass nicht jede Verdichtung des Bodens eine Schadverdichtung darstellt. In bestimmten Situationen ist dieser Effekt erwünscht. Zum Beispiel wird nach dem Pflug häufig der Packer eingesetzt, um den überlockerten Oberboden rückzuverfestigen und den Kapillarwasseraufstieg zu gewährleisten. Anders ist dies jedoch im nicht regelmäßig gelockerten krumennahen Unterboden zu beurteilen. Hier bewirken Bodenverdichtungen über das Maß der Bodenfestigkeit hinaus das Gegenteil. Eine so genannte plastische Verformung kann zu einer nachhaltigen Störung der Bodenfunktionen führen (Geischeder, 2011).

Da auch bei den untersuchten BDF gut die Hälfte der Standorte zum zweiten Probenahmezeitpunkt noch nahe am kritischen Wert von 5 % LK in der Pflugsohle lagen, ist eine bodenschonende Bewirtschaftung weiterhin entscheidend. Positiv auf die Bodenstruktur wirken sich Bewirtschaftungsparameter aus, die den Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden erhöhen, sowie das Bodenleben in Form von Regenwürmern fördern (vergl. Band 4 Humus und Band 5 Regenwürmer). Johnston et al. (2018) sowie Briones und Schmidt (2017) weisen dazu nach, dass reduzierte Bodenbearbeitung und Strohverbleib die mechanische Störung im Boden reduziert und zur Vermehrung von des tiefgrabenden Regenwurms *Lumbricus terrestris* führt. Weitere Studien zeigen, dass langjährige organische Düngung in Verbindung mit der Anreicherung organischen Materials die Lagerungsdichte verringern und die Aggregatstabilität erhöhen kann (Haynes und Naidu, 1998), sowie die Porosität des Oberbodens vergrößert (Schlüter et al., 2011). Jedoch sind die Parameter wie Feldkapazität, Gesamtporenvolumen oder auch Lagerungsdichte auch stark von Standortbedingungen sowie insbesondere von der Textur geprägt. Grundsätzlich besitzen Böden mit Dauergrünland als Folge ihrer intensiven Durchwurzelung, ihres höheren Humusgehaltes, ihrer größeren biologischen Aktivität und einer ungestörten Gefügeentwicklung eine höhere Wasserspeicherfähigkeit als Ackerböden (LBP, 1997).

Ein Einfluss bestimmter Bewirtschaftungsparameter auf den Trend der Luftkapazität konnte in der vorliegenden Beprobungsreihe nicht nachgewiesen werden. Zum einen lassen sich anhand von nur zwei Probenahmezeitpunkten noch keine soliden Trends bestimmen, zum anderen ist die Anzahl von 25 BDF hinsichtlich der hohen Variabilität der Bewirtschaftung relativ gering. Die statistischen Tests legen nahe, dass Standortfaktoren eine entscheidende Rolle spielen und tonige aber auch ertragreiche, schluffige Böden eher zu einer Verdichtung neigen. Dass die stärksten Veränderungen aber sowohl auf tonigen, als auch auf sandigen Standorten zu beobachten waren, lässt vermuten, dass dem Entscheidungsspielraum des Landwirts beim bodenschonenden Maschineneinsatz eine bedeutende Rolle zukommt. Diese These sollte durch Fortführung der bodenphysikalischen Untersuchungen im BDF-Programm weiter überprüft werden.

Die in Form eines Screenings erhobenen Gefügedaten auf den BDF haben die Anfälligkeit bestimmter Böden für Schadverdichtungen bestätigt und gezeigt, dass Verdichtungswerte zeitlichen Veränderungen unterliegen, auch wenn die genauen Ursachen aufgrund der geringen Wiederholungszahl noch nicht abgeleitet werden konnten. Die gewonnenen Erkenntnisse stützen die auf Basis von Feldexperimenten abgeleitete Forderung, Maschinen und Arbeitsverfahren besonders bei zur Verdichtung neigenden Böden bodenschonend auszurichten, um das Bodengefüge funktionsfähig zu erhalten (LfL, 2005 und BMELV 2013). Der technische Fortschritt in der Reifen- und Fahrzeugentwicklung sollte künftig vermehrt dazu genutzt werden, die mechanische Belastung der Böden zu senken. Hier bestehen auch die Einsatzmöglichkeiten für neue autonome Technologien wie Agrarrobotik.

Nach wie vor liegen die Kennwerte für die Ausprägung der Gefüge der untersuchten BDF innerhalb der für bayerische Verhältnisse bekannten Bereiche (vgl. Bayer. Geol. Landesamt, 1986, 1992; Horn et al., 1991, LBP, 1997; LfL, 2005) und weisen überwiegend auf ausreichend funktionsfähige Gefügeleistungen der landwirtschaftlich genutzten Böden Bayerns hin. Dabei zeichnet sich im Ackerland die lockere Krume deutlich vom nicht mehr bearbeiteten und deshalb dichter gelagerten Unterboden ab. In der für gepflügte Ackerböden charakteristischen Pflugsohle geben die Gefügekennwerte auch nach einer weiteren Untersuchungsserie im Vergleich in den meisten Fällen der untersuchten Flächen keine Anhaltspunkte einer erheblichen Bodenfunktionsstörung durch flächenhafte Verdichtung (LfL, 2005).

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Bodenphysikalische Parameter wie Textur und Gefügekennwerte können zum einen wichtige Erklärungen zu anderen Bodenkennwerten wie Humus, Schadstoffe und Regenwürmern liefern und leisten zum anderen im langjährigen Monitoring auch einen wichtigen Beitrag, um den Zustand und die Veränderung der Böden hinsichtlich Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit sowie Schadverdichtung unter gegebenen Bewirtschaftungssystemen aufzuzeigen.

Die Untersuchungen der Unterböden unterhalb der Pflugsole haben über die Jahre gezeigt, dass es keine Anhaltspunkte für flächendeckende Schadverdichtung in Bayern gibt. Dennoch muss in Zukunft auch aus Vorsorgegründen weiterhin verstärkt auf folgende Bodenschutzziele geachtet werden und deren Umsetzung auch in weiteren Probenahmeserien im BDF-Programm untersucht werden:

Die Erhaltung der guten Gefügestruktur und Durchlässigkeit sowie einer hohen nutzbaren Feldkapazität im Oberboden und die Durchlässigkeit unterhalb der Bearbeitungstiefe, insbesondere in der Bodenartengruppe der Schluffe und Tone, die gefährdet sind für anhaltende Schadverdichtungen.

Die Förderung der Stabilität der Oberflächenstruktur und Aggregate zum Schutz vor Verschlammung und Erosion. Gefährdet sind auch hier vorrangig die fruchtbaren Schluffböden.

Dies machen auch die sich weiter verändernden Rahmenbedingungen wie weiter fortschreitende Veränderung in der Landbewirtschaftung, getrieben von Klimawandel, Technik oder gesellschaftlich sowie politischen Ansprüchen notwendig.

Literaturverzeichnis

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. 5., verbesserte und erweiterte Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller). Stuttgart.

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2005: 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern. LfL Schriftenreihe, 8-2005, 57-60.

BBodSchV, 1999: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328). Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz. <http://www.gesetze-im-internet.de/>.

Briones, M. J. I., Schmidt, O. 2017: Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology*. 2017, 4396-4419, DOI: 10.1111/gcb.13744.

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013: Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bonn.

DIN ISO 11272, 2001: Handbuch der Bodenuntersuchung. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohddichte. DIN ISO 11272, 2001-01. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN ISO 11274, 2001: Handbuch der Bodenuntersuchung. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren. DIN ISO 11274. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN ISO 11277, 2002: Handbuch der Bodenuntersuchung. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. DIN ISO 11277, 2002-08. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Geischeder, R. 2011: Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen, Dissertation am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München, 2011.

Harrach, T., Vorderbrügge, T. 1991: Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. *Bericht über Landwirtschaft* 204: S. 69 – 82.

Haynes, R. J.; Naidu, R., 1998: Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Jg. 51, Nr. 2, S. 123–137.

Horn, R., Lebert, M., Burger, N. 1991: Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen. -Materialien des Bayer. Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 73 – München.

Johnston, A. S. A., Sibly, R. M., Thorbek, P. 2018: Forecasting tillage and soil warming effects on earthworm populations. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 1-12, DOI: 10.1111/1365-2664.13096.

LBP, 1997: Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen (BDF), Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil III Boden: Gefüge, Organische Substanz, Bodenorganismen, Vegetation;

In: Bodenkultur und Pflanzenbau, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 6/97, Freising-München.

LfL, 2005: 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern, Zwischenbilanz der wichtigsten Ergebnisse 1985-2005, 4. Kulturlandschaftstag der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischer Landbau und Bodenschutz am 26. Oktober 2005 in Freising-Weihenstephan, Tagungsband als LfL-Schriftenreihe 8-2005, ISSN 1611-4159.

Lebert, M., Brunotte, J., Sommer, C., 2004: Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung. UBA-Texte 46/04, Berlin.

Schlüter, S.;Weller, U.; Vogel, H.-J. 2011: Soil-structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Jg. 174, Nr. 3, S. 395–403.

Sommer, C., Brunotte, J. 2003: Lösungsansätze zum Problembereich Bodenschadverdichtung in der Pflanzenproduktion. Landnutzung und Landentwicklung 44, H. 5. S. 220 – 228.

Wittmann, O., 1991: Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern. Übersichtskarte 1:1.000.000. 2. erweiterte Auflage. Geologisches Landesamt Bayern (GLA). GLA Fachberichte, 5-1991. München.