

ERNST E. HILDEBRAND

Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die
Bodenfunktionen im forstlichen Standort

Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort

VON E. E. HILDEBRAND

1 Einleitung und Problemstellung

Um die Befahrbarkeit eines Bodens definieren zu können, muß neben bodenphysikalischen Parametern auch die Zielsetzung der Befahrung bekannt sein. Besteht beispielsweise das Ziel lediglich in einer Durchquerung des Geländes, kann man die Befahrbarkeit durch einen bodenphysikalischen Faktorenkomplex beschreiben, der eine möglichst genaue Prognose erlaubt über die Beweglichkeit bestimmter Fahrzeuge. Ein solches Vorgehen ist z. B. im militärischen Bereich üblich. Für Fragen der maschinellen Bewirtschaftung land- und forstwirtschaftlich genutzter Flächen reicht diese Zielfunktion nicht aus. Man muß vielmehr in der Definition der Befahrbarkeit festlegen, in welchem Ausmaß Veränderungen im Boden toleriert werden (vgl. SOMMER 1979). Wird beispielsweise beim Befahren eines Forststandortes der Bodenzustand so verändert, daß die Einbußen im zukünftigen Produktionsziel größer sind als der durch den Maschineneinsatz erwirtschaftete Rationalisierungsgewinn, so kann man unter *forstwirtschaftlichem* Aspekt von einem nicht befahrbaren Standort sprechen.

Bei Fragen des Maschineneinsatzes im Forstbetrieb ist das standortkundliche Kriterium der Befahrbarkeit bisher viel zu wenig beachtet worden. Man ging wohl davon aus, daß im Zyklus der praxisüblichen mechanischen Beanspruchungen der Bodenzustand aufgrund biologischer Lockerungsprozesse sehr bald wieder in die natürliche Gleichgewichtslage zurückschwingt, und damit die nach Befahrung veränderte Bodenstruktur allenfalls kurzfristig die Bodenfunktionen beeinträchtigt. Dazu kommt, daß die Rückwirkung veränderter Bodenfunktionen auf das Produktionsziel im Forstbetrieb viel schwerer erkennbar ist als in der Landwirtschaft (vgl. SOMMER et al. 1981).

Aus diesem Grund wurde man auf das Problem erst dann richtig aufmerksam, als bei befahrenen Lößlehmstandorten eine stark veränderte Profilmorphe offensichtliche Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen anzeigte (vgl. LEUTZ et al. 1980).

In einer ersten Untersuchung (vgl. HILDEBRAND und WIEBEL 1982) wurden solche Standorte mit ausgeprägtem pedologischem Schadbild mikromorphologisch und bodenphysikalisch charakterisiert. Dabei zeigte sich, daß der natürliche, lockere Oberbodenzustand forstlich genutzter Lößlehmstandorte ein Fließgleichgewicht darstellt, in dem ständig biogene Aufhöhungsarbeit gegenüber der Schwerkraft geleistet wird. Verdichtung bedeutet daher nicht nur vorübergehende Verminderung von Porenvolumina, sondern auch Veränderung der Lebensgrundlagen von Organismen, die das Fließgleichgewicht des gelockerten Zustandes im wesentlichen aufrechterhalten. Daraus ergibt sich die Konsequenz, daß verdichtete Oberböden von Forststandorten nicht nur das Ergebnis vermehrter Auflasten sind, sondern auch als Folge von sekundären Sackungsprozessen aufgrund verminderter oder fehlender biogener Aufhöhung aufgefaßt werden müssen (vgl. GRAFF und HARTGE 1974).

Das Untersuchungsmaterial von HILDEBRAND und WIEBEL (1982) zeigte ferner, daß die Beharrungstendenz verdichteter Zustände im Falle von Lößlehmsubstanzen sehr groß ist. Dies deckt sich auch mit theoretischen Überlegungen, wonach das Fließgleichgewicht des

gelockerten Zustandes bei Lößlehmen aufgrund von Körnungsmerkmalen besonders labil ist (vgl. HARTGE 1978). Nach DICKERSON (1976) stellen sich bei lehmigen Sanden bis schluffig-tonigen Lehmen, die durch Holzbringungsmaschinen um 20 % verdichtet wurden, nach etwa 12 Jahren wieder natürliche Lagerungsdichten ein. HATCHELL et al. (1970) geben für ein körnungsmäßig nicht näher bezeichnetes, verdichtetes Substrat 18 Jahre als Erholungsphase an, und zitieren eine Beobachtung, wonach die Wasserleitfähigkeit in einer alten Fahrspur erst nach 40 Jahren wieder standortstypische Werte aufwies.

In diesem Beitrag soll versucht werden, bodenphysikalisch erfaßte Verdichtungszustände eines befahrenen Lößlehms zu forstlichen Bodenfunktionen in Beziehung zu setzen. Daraus sollen bodenphysikalische Grenzzustände abgeleitet werden, die im Hinblick auf forstliche Produktionsziele nicht erreicht oder überschritten werden dürfen.

2 Material und Methoden

Eine wichtige Bodenfunktion eines Lößlehm-Standortes mit Buchen-Altbestand ist die Aufnahme einer Buchen-Naturverjüngung bei Vorliegen der waldbaulichen Voraussetzungen. Zur Klärung des Einflusses des Verdichtungszustandes auf diese Bodenfunktion wurden folgende zwei Pflanzversuche durchgeführt (vgl. HILDEBRAND u. WIEBEL 1981):

In einem Buchen-Altbestand auf Lößlehm mit Verdichtungssymptomen (Gemeindewald Rutesheim, Mtbl. 7119, R 34943, H 54085) wurden 75 Stechzylinderproben (850 ml) von 0–12 cm Bodentiefe in unveränderter Lagerung entnommen. Der Bestand war zwischen 1949 und 1969 regelmäßig von Militäreinheiten befahren worden. Ab 1969 fand keine mechanische Belastung mehr statt. Im Gewächshaus wurden die Stechzylinder in drei Blöcke mit möglichst breiter und kontinuierlicher Skala von Lagerungsdichten aufgeteilt. Pro Zylinder wurden fünf Buchensamen leicht in die Bodenoberfläche eingedrückt und mit Bodenmaterial abgedeckt. Die tägliche Wasserzugabe entsprach einem Bestandesniederschlag von 500 (Block a), 750 (Block b) bzw. 1000 mm/a (Block c). Damit war der Rahmen der natürlichen Niederschlagsverhältnisse im süddeutschen Verbreitungsgebiet nicht pseudovergleyter Lößlehme abgedeckt. Als Ersatz für den kapillaren Anschluß an den Unterboden wurden die unten offenen Zylinder auf eine ständig feucht gehaltene Vliesmatte gestellt. Nach 44 Tagen wurde das Frisch- und Trockengewicht der pro Zylinder gebildeten, oberirdischen Biomasse bestimmt (vgl. Abb. 1).

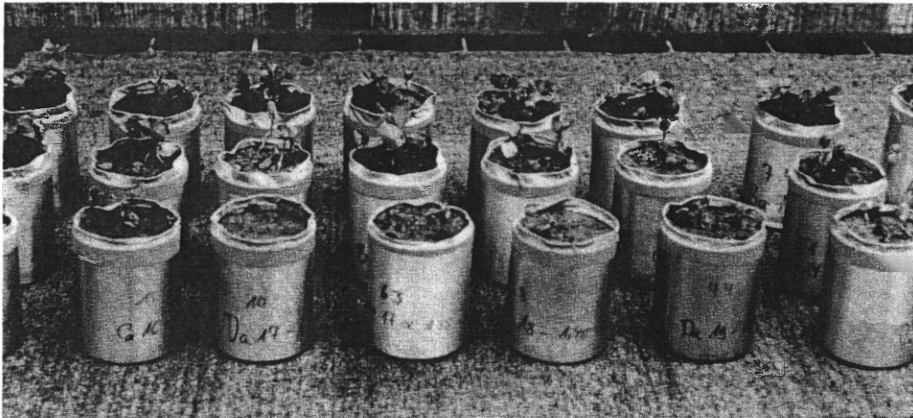


Abb. 1. Ausschnitt aus der Anlage des Keim- und Pflanzversuchs zur Erfassung bodenphysikalischer Grenzzustände für die Buchen-Naturverjüngung (vgl. Text)

Fig. 1. Arrangement for germination and planting tests to approximate the soil physical conditions which limit natural regeneration of beech (see text)

In einem zweiten Pflanzversuch wurde pro Zylinder ein vorgekeimter, mit ca. 5 cm langer Keimwurzel versehener Buchensamen eingepflanzt. Zuvor war für die Keimwurzel ein ca. 1 cm breiter Bodenzylinder ausgestochen worden. Nach 136 Tagen wurden die Bodenzylinder mit dem Keimling mit Hilfe eines Auspreßgerätes¹ aus den Stechzylindern herausgedrückt, und der Boden unter Wasser vorsichtig von den Wurzeln abgelöst. Neben einer photographischen Dokumentation der Bewurzelung wurden pro Zylinder die Trockengewichte der oberirdischen Biomasse und der Feinwurzelmasse bestimmt.

Zur Gewinnung der unabhängigen, bodenphysikalischen Variablen für die in den Pflanzversuchen gewonnenen Informationen zur Eignung der Substrate als Keimbett (Versuch 1) und als durchwurzelbares Medium (Versuch 2) wurden an Parallelproben folgende bodenphysikalische Messungen durchgeführt:

Lagerungsdichte (ρ_b)	Trocknung von 100 ml-Stechzylindern bei 105 °C
Gesamtporenvolumen (GPV)	Luftpyknometer (vgl. SCHLICHTING und BLUME 1966)
Poren $pF < 1$	Gleichgewichtseinstellung der Wasserspannung in den Stechzylinderproben mit bekannten Kapillarspannungen an der Oberfläche eines kalibrierten Sandbetts
Poren $pF 1-1,8$	Niederdrucktopf System „Soilmoisture“, hydrostatische Feindruckregelung durch sogenannten „Blasenturm“
Poren $pF 1,8-4,2$	Hochdrucktopf System „Soilmoisture“
Gesättigte Leitfähigkeit (k_f -Wert)	Haubenpermeameter, Perkolation mit fallender Druckhöhe (vgl. HARTGE 1971)
Hydraulische Leitfähigkeit (ungesättigte Leitfähigkeit, k_u -Wert)	Berechnung aus pF -Kurve und k_f -Wert nach KUNZE et al. (1968) und EHLERS (1977). Charakteristisch für dieses Verfahren ist, daß die berechnete Kurve durch einen Korrekturfaktor f aus gemessener gesättigter und berechneter gesättigter Leitfähigkeit den Verhältnissen im Boden angepaßt wird. Der Korrekturfaktor $f = \frac{k_{fm}}{k_{fb}}$ zeigt also an, inwieweit die aus der pF -Kurve gewonnenen Porenvolumina ideal-kapillar strukturiert sind. Da die Poren eines Bodens um so mehr idealen Kapillaren entsprechen, je größer die Porenkontinuität ist, weisen Faktoren $f \ll 1$ auf niedrige Porenkontinuität hin.
Korngrößenverteilung	Kombinierte Sieb- und Pipettmethode nach KÖHN nach Zerstörung der organischen Substanz mit H_2O_2 . Diese Bestimmungen erfolgten, um die Einheitlichkeit der Körnung und damit die Vergleichbarkeit der Substrate verschiedener Entnahmestellen zu bestätigen.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Bodenphysikalische Charakterisierung des Untersuchungsmaterials

In Abbildung 2 ist für die Bodenzylinder die Porengrößenverteilung in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte dargestellt. Die Bandbreite der erfaßten Lagerungsdichten reichte in jedem Block (= Niederschlagsvarianten a, b und c) von ca. 0,95 bis 1,50 g/cm³. Die Einzelpunkte für die Regressionskurve des Gesamtporenvolumens (GPV) veranschaulichen das

¹ Bezugsquelle: Firma Stenzel, Stahlwiete 9-11, Hamburg 50.

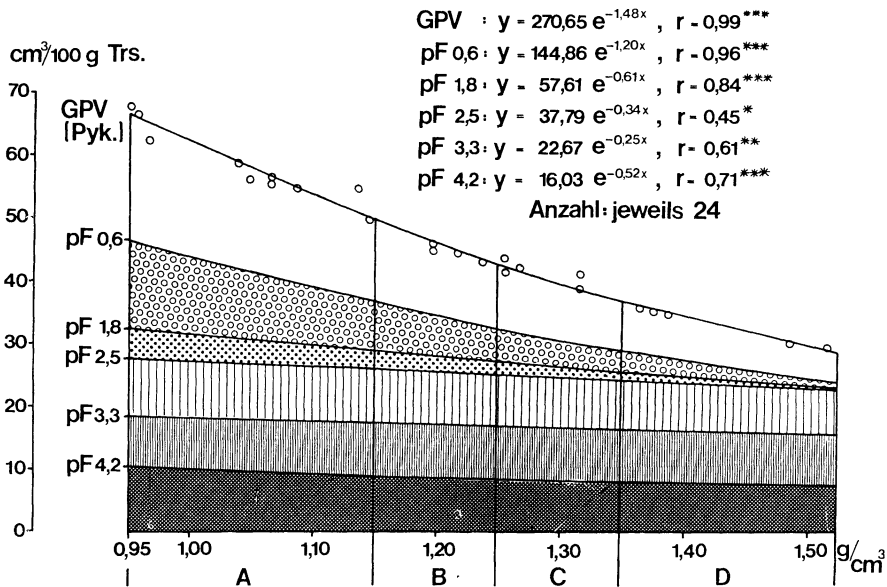


Abb. 2. Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Porung für die Bodenzylinder der Keim- und Pflanzversuche

Fig. 2. Relation between bulk density and pore space of the soil cores used in germination and planting tests

Kontinuum an Lagerungsdichten innerhalb der erfaßten Bandbreite. Für die Auswertung im Hinblick auf die Pflanzversuche wurden vier Gruppen von Lagerungsdichten gebildet: A: $d_B < 1,15$, B: $d_B = 1,15-1,25$, C: $d_B = 1,25-1,35$, D: $d_B > 1,35 \text{ g/cm}^3$.

In Abbildung 3 ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f -Werte) ebenfalls als Funktion der Lagerungsdichte dargestellt. Die Regressionskurve vom Typ der kubischen Parabel zeigt an, daß bei zunehmender Lagerungsdichte der Exponent der gemessenen Wasserleitfähigkeit ($\log k_{fm}$) in dritter Potenz abnimmt. Demgegenüber nehmen die aufgrund der pF-Kurven nach KUNZE et al. (1968) berechneten Exponenten der Wasserleitfähigkeit ($\log k_{fb}$) nur in linearer Funktion der Lagerungsdichte ab. Es müssen also mit zunehmender Lagerungsdichte weitere Faktoren zusätzlich hemmend auf die Wasserleitfähigkeit wirken. Dabei kommt hauptsächlich eine abnehmende Porenkontinuität in Betracht.

In Abbildung 4 ist die hydraulische Leitfähigkeit (k_u -Werte) als Funktion der Wasserspannung aufgetragen. Hilfsvariable sind die in Abbildung 2 dargestellten Bereiche der Lagerungsdichten (A, B, C und D). Die dafür gültigen Korrekturfaktoren $f = \frac{k_{fm}}{k_{fb}}$ wurden

der Abbildung 3 entnommen. Ihre Differenzen zu $f=1$ können als Maß für die mit zunehmender Lagerungsdichte abnehmende Porenkontinuität aufgefaßt werden. Die nahezu parallelen Kurven der Abbildung 4 zeigen ferner, daß die Unterschiede der Leitfähigkeiten im Wasserspannungsbereich der Feldkapazität (pF 1,8) voll erhalten bleiben. Dieser Trend besteht im gesamten pF-Bereich, der für die Wasserversorgung von Waldbäumen relevant ist (bis ca. pF 3).

3.2 Beziehung zwischen bodenphysikalischen Parametern und der Bodenfunktion als Keimbett für Buchensamen

Die Entwicklung der Keimlinge innerhalb von 44 Tagen ist in dem Balkendiagramm der Abbildung 5 dargestellt. Die mittleren Frischgewichte an oberirdischer Biomasse der Stechzylinder mit Lagerungsdichten unter $1,15 \text{ g/cm}^3$ (Dichtestufe A) sind für die drei gewählten Niederschlagsvarianten als 100 % angesetzt. In der Dichtestufe B zwischen $1,15$ und $1,25 \text{ g/cm}^3$ liegen die Frischgewichte kaum tiefer und steigen mit zunehmendem Wasserangebot wieder auf 100 % an. In der Dichtestufe C zwischen $1,25$ und $1,35 \text{ g/cm}^3$ dagegen wurde gegenüber dem lockersten Zustand weniger als die Hälfte an oberirdischer Biomasse produziert. Die Steigerung der Niederschlagsmenge von 500 auf 750 mm/a wirkt sich aber noch positiv aus, während die weitere Erhöhung auf 1000 mm/a die Entwicklung der Keimlinge negativ beeinflusst. Die noch niedrigere Biomasseproduktion der Dichtestufe D ($d_B > 1,35 \text{ g/cm}^3$) zeigt eine deutliche, dem zunehmenden Wasserangebot umgekehrt proportionale Abstufung: sowohl die Steigerung von 500 auf 750 mm/a als auch von 750 auf 1000 mm/a wirken sich negativ aus.

Die in Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse zeigen, daß Lagerungsdichten im Oberboden von ca. $1,25 \text{ g/cm}^3$ für befahrene Parabraunerden aus Löß einen Grenzbereich anzeigen hinsichtlich der Bodenfunktion, eine Buchen-Naturverjüngung hervorzubringen.

Bodenphysikalisch ist dieser Grenzbereich charakterisiert durch die Abnahme der Luft-

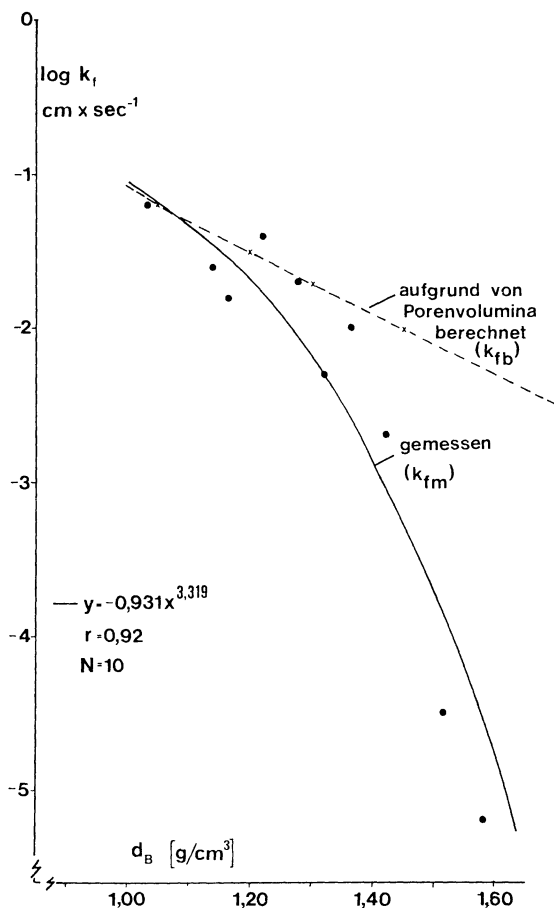


Abb. 3. Beziehung zwischen Lagerungsdichte und gesättigter Wasserleitfähigkeit (k_f -Werte) für befahrene Lößlehme: durchgezogene Kurve: Regression der gemessenen Werte, gestrichelte Kurve: aufgrund von pF-Kurven berechnete Werte (vgl. KUNZE et al. 1968)

Fig. 3. Relation between bulk density and saturated water permeability for loess top soils, influenced by vehicle movement: solid line: regression of measured values, broken line: calculated values, based on pF-curves (see KUNZE et al. 1968)

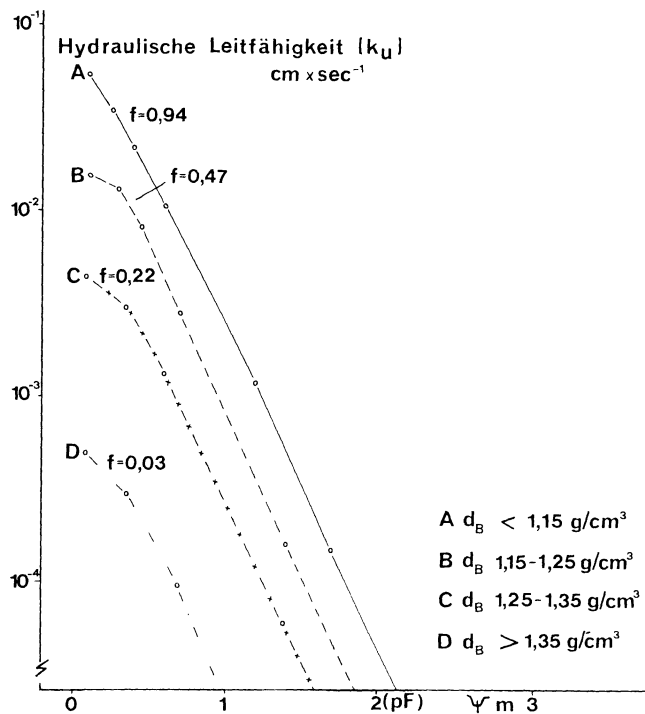


Abb. 4. Hydraulische Leitfähigkeit (k_u -Werte) in Abhängigkeit von der Wasserspannung für vier Lagerungsdichtebereiche eines befahrenen Lößlehms

Fig. 4. Hydraulic conductivity as a function of soil water tension for a compacted loess top soil in four groups of bulk density

kapazität unter $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ bei pF 1,8 (vgl. Abb. 2) und durch beginnende überproportionale Abnahme der Wasserleitfähigkeit, gemessen an der Abnahme des Porenvolumens (vgl. Abb. 3).

Die Faktoren f der Kurven B und C in Abbildung 4 zeigen, daß in diesem Grenzbereich ($d_B = 1,25 \text{ g/cm}^3$) die unter Annahme idealer Kapillarität berechneten gesättigten und ungesättigten (= hydraulischen) Leitfähigkeiten gegenüber gemessenen k_f -Werten ca. 2–4 mal so hoch sind ($f = 0,47$ bzw. $0,22$ im Vergleich zu $f = 0,94$ der Kurve A). Dies rückt die Abnahme der Porenkontinuität bei der Befahrung von Lößlehmstandorten in den Vordergrund der bodenmechanischen Vorgänge, die für das Pflanzenwachstum wichtig sind. Daher dürfte auch der bei Feldkapazität (pF 1,8) als System der Sauerstoffversorgung wirksame Grobporenanteil wesentlich geringer sein als das entsprechende Hohlraumvolumen von ca. $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ nach Abbildung 2. In HILDEBRAND und WIEBEL (1982) konnte die Diskontinuität der Makroporen durch mikromorphologische Untersuchungen anschaulich dargestellt werden. Es zeigte sich, daß verdichtete Lößlehme durchaus Hohlräume besitzen; da diese jedoch durch abiotische Prozesse zustande kommen (z. B. Schrumpfrisse), ist ihr Vernetzungsgrad bei relativ tonarmen Schlufflehmern im Vergleich zu biogenen Makroporen gering. Die für aerobe Bodenverhältnisse allgemein als Grenzwert angesehene Luftkapazität von 6 Vol. % (vgl. BLUME u. DIETERICH 1968; FLÜHLER 1973) ist daher als Bezugsgröße für befahrene Lößlehme mit Sicherheit zu niedrig. Das schlagartige Erlöschen einzelne Inklusionen auflöst. Damit verbunden ist eine schlagartige Erniedrigung des Sauerstoffpartialdruckes in der Bodenluft, da die Sauerstoffdiffusion durch wassergefüllte Poren um ca. 5 Zehnerpotenzen geringer ist als durch luftgefüllte Poren (vgl. HARTGE 1978).

Berichtigung

Forstwissenschaftliches Centralblatt 102/2
Beitrag Hildebrandt, Der Einfluß der Boden-
verdichtung auf die Bodenfunktionen im forst-
lichen Standort. Seite 116 - 117.

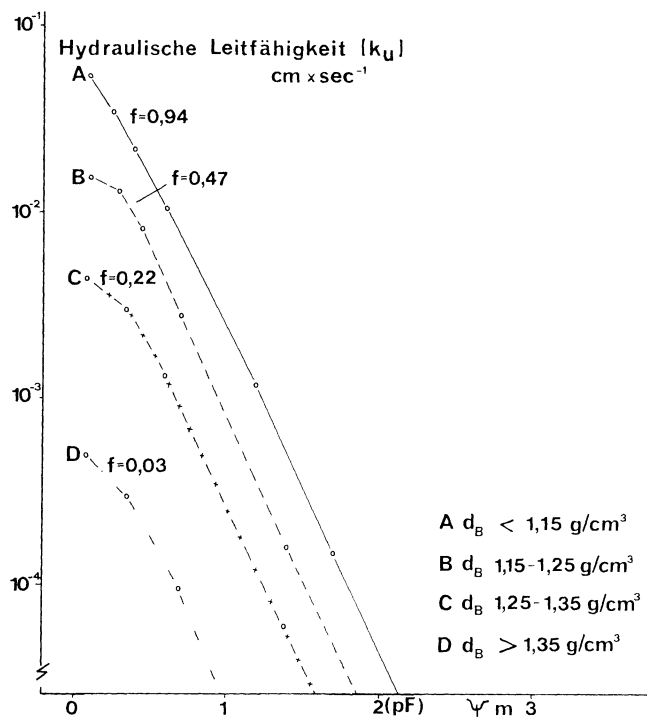


Abb. 4. Hydraulische Leitfähigkeit (k_u -Werte) in Abhängigkeit von der Wasserspannung für vier Lagerungsdichtebereiche eines befahrenen Lößlehms

Fig. 4. Hydraulic conductivity as a function of soil water tension for a compacted loess top soil in four groups of bulk density

kapazität unter $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ bei pF 1,8 (vgl. Abb. 2) und durch beginnende überproportionale Abnahme der Wasserleitfähigkeit, gemessen an der Abnahme des Porenvolumens (vgl. Abb. 3).

Die Faktoren f der Kurven B und C in Abbildung 4 zeigen, daß in diesem Grenzbereich ($d_B = 1,25 \text{ g/cm}^3$) die unter Annahme idealer Kapillarität berechneten gesättigten und ungesättigten (= hydraulischen) Leitfähigkeiten gegenüber gemessenen k_f -Werten ca. 2–4 mal so hoch sind ($f = 0,47$ bzw. $0,22$ im Vergleich zu $f = 0,94$ der Kurve A). Dies rückt die Abnahme der Porenkontinuität bei der Befahrung von Lößlehmstandorten in den Vordergrund der bodenmechanischen Vorgänge, die für das Pflanzenwachstum wichtig sind. Daher dürfte auch der bei Feldkapazität (pF 1,8) als System der Sauerstoffversorgung wirksame Grobporenanteil wesentlich geringer sein als das entsprechende Hohlraumvolumen von ca. $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ nach Abbildung 2. In HILDEBRAND und WIEBEL (1982) konnte die Diskontinuität der Makroporen durch mikromorphologische Untersuchungen anschaulich dargestellt werden. Es zeigte sich, daß verdichtete Lößlehme durchaus Hohlräume besitzen; da diese jedoch durch abiotische Prozesse zustande kommen (z. B. Schrumpfrisse), ist ihr Vernetzungsgrad bei relativ tonarmen Schlufflehmern im Vergleich zu biogenen Makroporen gering. Die für aerobe Bodenverhältnisse allgemein als Grenzwert angesehene Luftkapazität von 6 Vol. % (vgl. BLUME u. DIETERICH 1968; FLÜHLER 1973) ist daher als Bezugsgröße für befahrene Lößlehme mit Sicherheit zu niedrig. Das schlagartige Erlöschen der Bodenfunktion als Keimbett für Buchensamen sowie das Auftreten von Reduktionsbleichungen und Rostflecken weisen darauf hin, daß bereits ab $d_B > 1,25 \text{ g/cm}^3$ das luftgefüllte Porenvolumen (Luftkapazität $< 15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$) diskontinuierlich wird und sich in

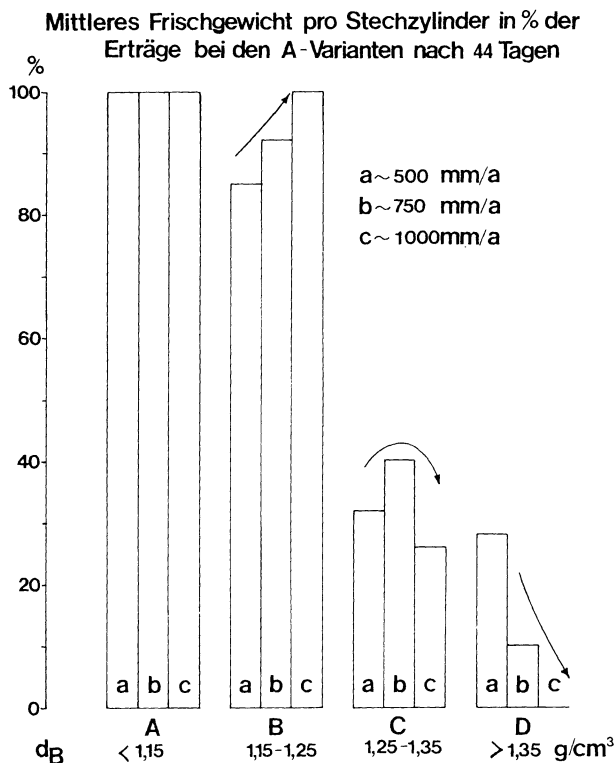


Abb. 5. Relative Frischgewichte von Buchenkeimlingen in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und Wasserangebot, lockerste Variante A ($d_B < 1,15 \text{ g/cm}^3$) als 100 % gesetzt

Fig. 5. Relative green weights of beech seedlings as influenced by bulk density and water supply; the results in block A ($d_B < 1,15 \text{ g/cm}^3$) were taken as 100 %

einzelne Inklusionen auflöst. Damit verbunden ist eine schlagartige Erniedrigung des Sauerstoffpartialdruckes in der Bodenluft, da die Sauerstoffdiffusion durch wassergefüllte Poren um ca. 5 Zehnerpotenzen geringer ist als durch luftgefüllte Poren (vgl. HARTGE 1978). In einer neueren Untersuchung zur Gasdiffusion in bearbeiteten Böden fanden RICHTER und GROSSGEBAUER (1978), daß aus diesem Grund bereits Luftvolumina unter 15 % die Gefahr eines Sauerstoffmangels signalisieren können.

Die ab Lagerungsdichten von $1,25 \text{ g/cm}^3$ aussetzende Bodenfunktion als Keimbett für Buchensamen (vgl. Abb. 5) kann also aufgrund der bodenphysikalischen Charakterisierung dieses Grenzbereichs eher auf Sauerstoffmangel im Wurzelraum als auf mechanische Behinderung des Wurzelwachstums zurückgeführt werden. Das geht auch daraus hervor, daß mit zunehmender Lagerungsdichte ein deutlich negativer Einfluß des steigenden Wasserangebots auftritt (vgl. Abb. 4, Dichtegruppe C und D), obwohl die Bodenkörper mit zunehmender Feuchte abnehmende Eindringwiderstände bieten.

In analoger Weise fanden HATCHELL et al. (1970) bei der Anzucht von *Pinus taeda* auf künstlich verdichteten Bodensäulen, daß die durch praxisübliche Bodendrucke bewirkte Verdichtungsarbeit ausreicht, um Höhe und Gewicht der Keimlinge stark negativ zu beeinflussen. Dabei wird ebenfalls die schlechte Bodenbelüftung als begrenzender Faktor des Wurzelwachstums herausgestellt.

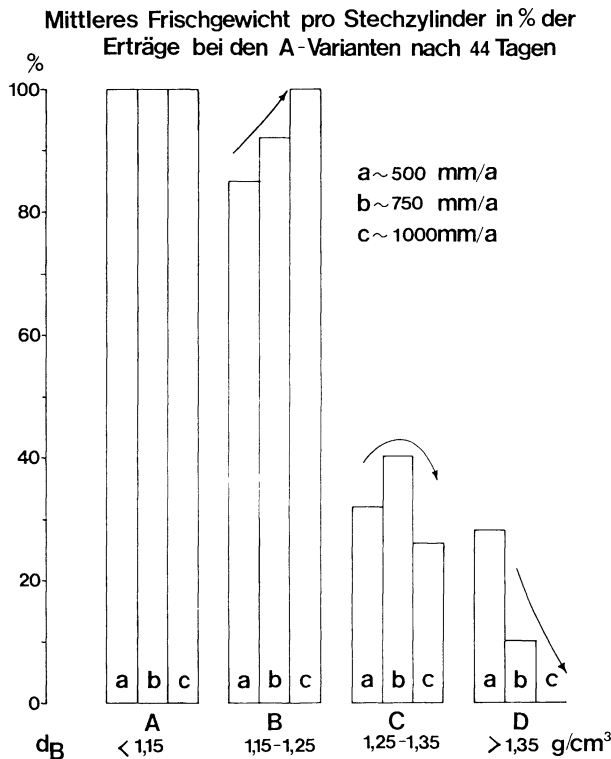


Abb. 5. Relative Frischgewichte von Buchenkeimlingen in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und Wasserangebot, lockerste Variante A ($d_B < 1,15 \text{ g/cm}^3$) als 100 % gesetzt

Fig. 5. Relative green weights of beech seedlings as influenced by bulk density and water supply; the results in block A ($d_B < 1,15 \text{ g/cm}^3$) were taken as 100 %

der Bodenfunktion als Keimbett für Buchensamen sowie das Auftreten von Reduktionsbleichungen und Rostflecken weisen darauf hin, daß bereits ab $d_B > 1,25 \text{ g/cm}^3$ das luftgefüllte Porenvolumen (Luftkapazität $< 15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$) diskontinuierlich wird und sich in einer neueren Untersuchung zur Gasdifffusion in bearbeiteten Böden fanden RICHTER und GROSSGEBAUER (1978), daß aus diesem Grund bereits Luftvolumina unter 15 % die Gefahr eines Sauerstoffmangels signalisieren können.

Die ab Lagerungsdichten von $1,25 \text{ g/cm}^3$ aussetzende Bodenfunktion als Keimbett für Buchensamen (vgl. Abb. 5) kann also aufgrund der bodenphysikalischen Charakterisierung dieses Grenzbereichs eher auf Sauerstoffmangel im Wurzelraum als auf mechanische Behinderung des Wurzelwachstums zurückgeführt werden. Das geht auch daraus hervor, daß mit zunehmender Lagerungsdichte ein deutlich negativer Einfluß des steigenden Wasserangebots auftritt (vgl. Abb. 4, Dichtegruppe C und D), obwohl die Bodenkörper mit zunehmender Feuchte abnehmende Eindringwiderstände bieten.

In analoger Weise fanden HATCHELL et al. (1970) bei der Anzucht von *Pinus taeda* auf künstlich verdichteten Bodensäulen, daß die durch praxisübliche Bodendrucke bewirkte Verdichtungsarbeit ausreicht, um Höhe und Gewicht der Keimlinge stark negativ zu beeinflussen. Dabei wird ebenfalls die schlechte Bodenbelüftung als begrenzender Faktor des Wurzelwachstums herausgestellt.

3.3 Beziehung zwischen bodenphysikalischen Parametern und der Bodenfunktion als durchwurzelbares Medium für Buchenkeimlinge

Bei dem in Abschnitt 2 beschriebenen, zweiten Pflanzversuch sollte die Frage geklärt werden, ob für die Entwicklung des Feinwurzelsystems von Buchenkeimlingen ähnlich eindeutige bodenphysikalische Grenzbedingungen angegeben werden können, wie für die erste Phase der Keimwurzelentwicklung.

Dies erwies sich zunächst anhand der oberirdischen Biomasse als nicht zutreffend. Die Trockengewichte der innerhalb 136 Tagen produzierten, oberirdischen Pflanzenteile ließen nur eine sehr lose Beziehung zur Lagerungsdichte erkennen. Das läßt zunächst darauf schließen, daß das Feinwurzelsystem elastischer auf mangelnde Bodenbelüftung reagiert als die Keimwurzel. Die Aspekte der Bewurzelung selbst bestätigen dies. Abbildung 6 zeigt vier typische Wurzelbilder der Lagerungsdichtebereiche A, B, C und D am Beispiel der Niederschlagsvariante b (= 750 mm/a). Man erkennt, daß mit zunehmender Lagerungsdichte die räumliche Erschließung des Bodenzylinders zwar geringer wird, daß aber selbst im Lagerungsdichtebereich D ($> 1,35 \text{ g/cm}^3$) noch ein Minimum an Feinwurzeln ausgebildet wird. Das kann zum Teil methodisch bedingt sein, da bei der Pflanzung im Bereich der ausgestochenen Bodensäule zwangsläufig eine Lockerung eintrat. Es wurde aber auch beobachtet, daß mit zunehmender Lagerungsdichte am Wurzelhals und an der Keimwurzel selbst hypertrophierte Lenticellen auftraten (vgl. Abb. 7 u. 8), deren Bildung als Anpassungsreaktion an sauerstoffarmes Substrat aufgefaßt werden kann. Trifft dies zu, dann ist eine erhöhte Feinwurzel-dichte an der Keimwurzel selbst und in der Nähe des Wurzelhalses verständlich, da dann die Diffusionswege für Luftsauerstoff, der über die Lenticellen in das Pflanzengewebe eintritt, kurz sind.

In Abbildung 9 sind die Feinwurzeltrockengewichte als Funktion der Lagerungsdichte aufgetragen; Hilfsvariable sind die Niederschlagsvarianten a, b und c. Man beobachtet eine mit zunehmender Niederschlagsmenge zunehmende Signifikanz der Beziehung sowie eine zunehmende Steilheit der Regressionskurve. Offensichtlich nehmen mit zunehmendem

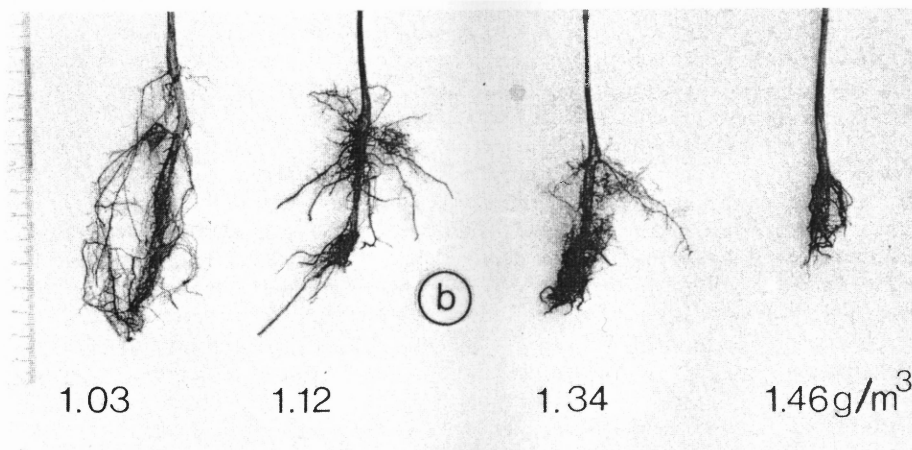


Abb. 6. Wurzelbilder von Buchenkeimlingen (Alter: 136 Tage) in Lößlehmen. Mit zunehmender Lagerungsdichte der befahrenen Substrate nimmt sowohl die Feinwurzelmasse als auch die Raumer-schließung durch Feinwurzeln ab, während ihre Verbuschung in der Nähe der Keimwurzel zunimmt

Fig. 6. Morphological characteristics of roots of beech seedlings (age: 136 days) in soil cores of loess loam. Increasing bulk density is accompanied by decreasing development and less spreading of fine roots, which become more bushy near the radicle

Wasserangebot die „Ausweichmöglichkeiten“ des Wurzelsystems zur Deckung des Sauerstoffbedarfes ab.

Die Regression der Niederschlagsvariante c (= 1000 mm/a) schneidet die – statistisch allerdings wenig gesicherte – Regressionskurve der Niederschlagsvariante b (= 750 mm/a) in einem bodenphysikalischen Zustand, der wiederum durch Lagerungsdichten um $1,25 \text{ g/cm}^3$ charakterisiert wird. In Abbildung 9 wird also durch diesen Dichtebereich wie beim ersten Pflanzenversuch ein Grenzzustand angezeigt, bei dem zunehmendes Wasserangebot sich negativ auswirkt auf die Entwicklung der Pflanzen (vgl. auch Abb. 5). Diese Entwicklung ist diesmal durch die abhängige Variable des Feinwurzeltrockengewichts charakterisiert. Der Grenzbereich wird noch einmal bestätigt durch den Schnittpunkt der Niederschlagsvariante c (= 1000 mm/a) mit der statistisch ungesicherten Regressionskurve der Niederschlagsvariante a (= 500 mm/a). Er wird nicht bestätigt durch den Schnittpunkt der statistisch wenig bzw. nicht gesicherten Kurven a und b.

Die in Abschnitt 3.2 dem Lagerungsdichtebereich um $1,25 \text{ g/cm}^3$ zugeordneten bodenphysikalischen Parameter beschreiben somit auch einen Grenzzustand hinsichtlich der Bodenfunktion als durchwurzelbares Medium für Buchenkeimlinge: Unterhalb einer Luftkapazität von ca. $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ Boden und bei zunehmend durch Porendiskontinuität erniedrigten Wasserleitfähigkeiten unter 10^{-2} cm/sec (vgl. Abb. 3) sinkt das Niveau der Fein-

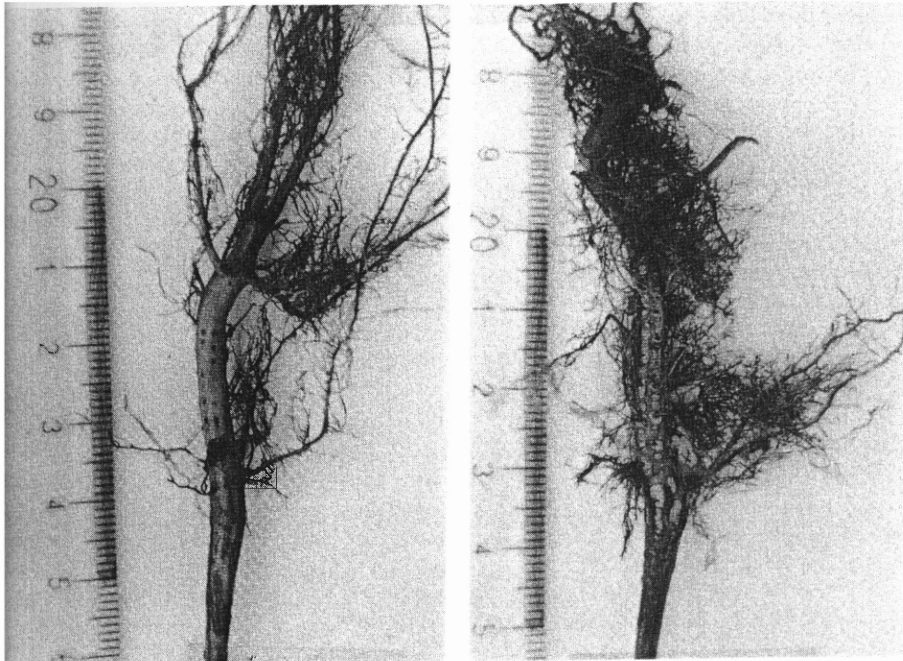


Abb. 7. Wurzelentwicklung bei Buchenkeimlingen in zwei Lößlehmen einer befahrenen Fläche. Links: bei Lagerungsdichte $1,34 \text{ g/cm}^3$, hohe Feinwurzeldichte in der Nähe der Keimwurzel, dadurch schlechte Raumerfüllung. Die Feinwurzeln gehen meist von hypertrophierten Lenticellen aus, rechts: bei Lagerungsdichte $1,03 \text{ g/cm}^3$, gute, raumerfassende Feinbewurzelung, Lenticellen normaler Ausprägung auf der Keimwurzel

Fig. 7. Root development of beech seedlings in soil cores of loess loam, from a site with compaction symptoms. Left: at a bulk density of 1.34 g/cm^3 , high density of fine roots near the radicle; therefore poor penetration of the soil. In most cases, the fine roots originate from hypertrophic lenticels, right: at a bulk density of 1.03 g/cm^3 , good development of the fine roots; the soil space is well utilized, the lenticels of the radicle are normal

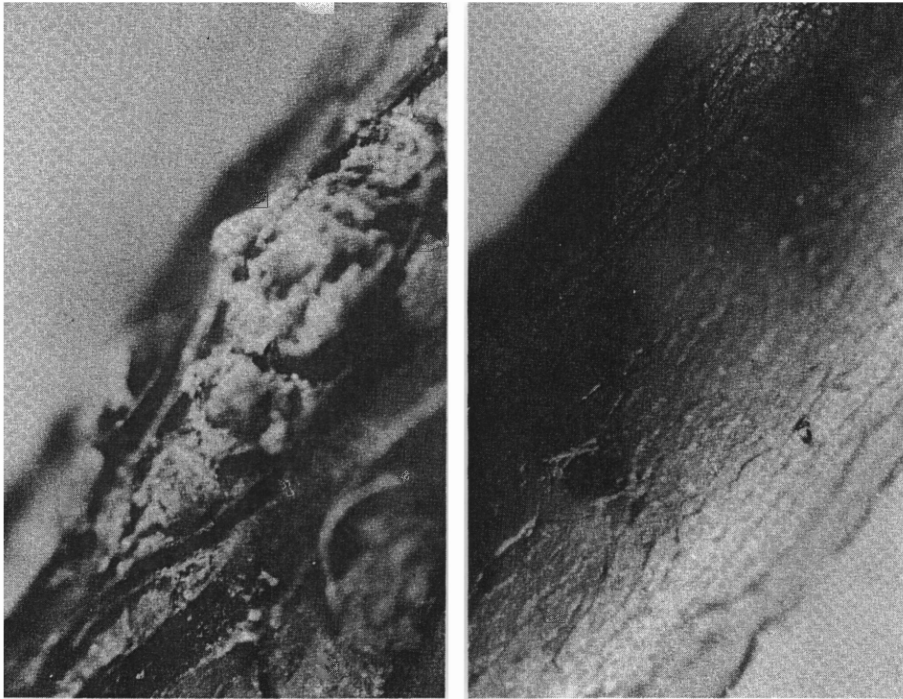


Abb. 8. Lenticellen von Keimwurzeln bei Buchenkeimlingen in Stechzylinderproben von Lößlehm einer befahrenen Fläche (Vergrößerung 1:20). links: hypertrophe Form bei Lagerungsdichte $d_B = 1,34 \text{ g/cm}^3$, rechts: normale Form bei Lagerungsdichte $d_B = 1,03 \text{ g/cm}^3$

Fig. 8. Lenticels of radicles of beech seedlings in soil cores of loess loam (enlargement 1:20). left: hypertrophic form at bulk density $d_S = 1.34 \text{ g/cm}^3$, right: normal form at bulk density $d_S = 1.03 \text{ g/cm}^3$

wurzelproduktion. Deutlich sichtbar wird das an der mit steigendem Wasserangebot abnehmenden Feinwurzeltrockenmasse bei Lagerungsdichten über $1,25 \text{ g/cm}^3$ (vgl. Abb. 9).

3.4 Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf Probleme der Buchen-Naturverjüngung bei Lößlehmstandorten

Bei den in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschriebenen Pflanzversuchen konnte folgendes festgestellt werden:

- bei befahrenen Lößlehmern zeigen Lagerungsdichten von $d_B > 1,25 \text{ g/cm}^3$ einen physikalischen Grenzzustand im Boden an hinsichtlich seiner Funktion als Keimbett für Buchensamen. Bei höheren Lagerungsdichten findet die Keimwurzel aufgrund von Sauerstoffmangel keine ausreichenden Entwicklungsbedingungen innerhalb des Wasserangebots im Verbreitungsgebiet nicht pseudovergleyter Lößlehme.
- ebenso zeigen bei befahrenen Lößlehmern Lagerungsdichten über $1,25 \text{ g/cm}^3$ einen Grenzzustand an hinsichtlich der Bodenfunktion als durchwurzelbares Medium für die Feinwurzeln von Buchenkeimlingen. Zwar findet auch noch bei höheren Lagerungsdichten eine Feinwurzelproduktion statt; das Ausmaß der Erschließung des zur Verfügung stehenden Bodenkörpers nimmt jedoch innerhalb des Rahmens der Freilandniederschläge ab $d_B = 1,25 \text{ g/cm}^3$ mit zunehmendem Wasserangebot stark ab.

Man muß bei der Übertragung dieser Befunde auf die Buchen-Naturverjüngung im Freiland festhalten, daß die in dieser Untersuchung dargestellten Korrelationen zwischen La-

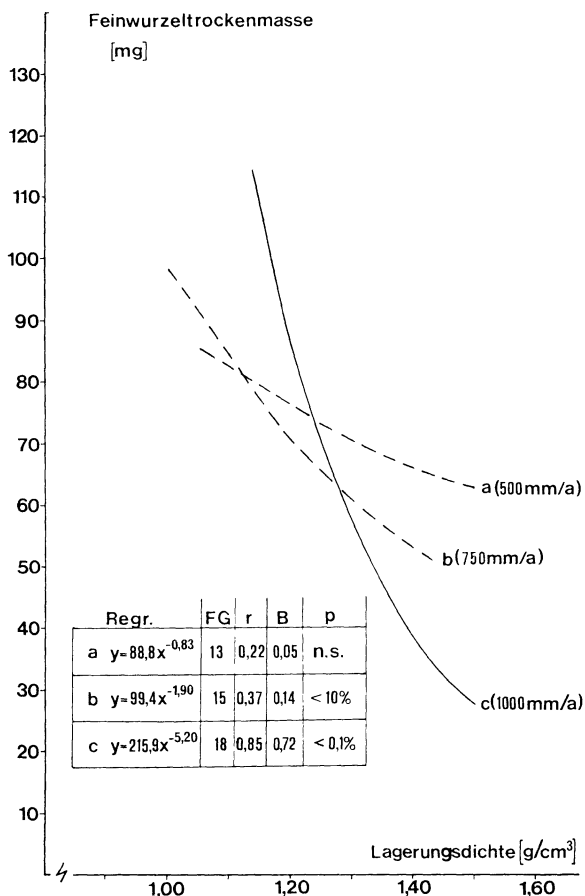


Abb. 9. Feinwurzeltrockenmasse in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und Wasserangebot

Fig. 9. Dry weight of fine roots as a function of bulk density and

gerungsdichte und bodenphysikalischen Parametern aus *befahrenen* Lößlehmen abgeleitet wurden. In HILDEBRAND und WIEBEL (1981, 1982) konnte aber gezeigt werden, daß unbefahrene Lößlehme bei gleich hoher Lagerungsdichte wesentlich günstigere Porungs- und Leitfähigkeitsverhältnisse aufweisen. Das bedeutet, daß die Lagerungsdichte als einzige Information über den physikalischen Zustand des Oberbodens nicht genügt, um sichere Aussagen zur Beeinträchtigung von Bodenfunktionen abzuleiten. Das gilt in gleicher Weise für Meßgrößen, die direkt von der Lagerungsdichte abhängen, wie z. B. Abscher- oder Eindringwiderstände. Die Lagerungsdichte ist also nur mit Zusatzinformationen über die Vorgeschichte des Standorts ein brauchbarer Indikator zur Beurteilung von Bodenfunktionen. So vertreten auch CAMPBELL et al. (1973) die Auffassung, daß die Lagerungsdichte ein ungeeignetes Maß ist, um die höhere Erosionsanfälligkeit befahrener Forststandorte abzuleiten, da bereits geringfügige Strukturverschlechterungen im Oberboden den Oberflächenabfluß stark erhöhen können. HATCHELL et al. (1970) weisen darauf hin, daß die Zerstörung der Makroporen beim Befahren feuchter Standorte nur wenig auf die Lagerungsdichte durchschlägt, wogegen Luftkapazität und Wasserleitfähigkeit erheblich verschlechtert werden. Die in dieser Untersuchung festgestellten Zusammenhänge zwischen Lagerungsdichte, Porungs- und Leitfähigkeitsmerkmalen und Bodenfunktionen gelten also nur für befahrene und damit strukturgeschädigte Lößlehmstandorte. Das bedeutet, daß eine Buchennaturverjüngung i. a. nicht gelingt, wenn der Oberboden auf mehr als 1,25 g/cm³ verdichtet wurde. Dies geht aus dem ersten Pflanzversuch hervor (vgl. Abschnitt 3.2). Auf diesen Flächen muß

also der Oberbodenzustand verändert werden, wenn eine Buchen-Naturverjüngung stattfinden soll. Eine solche Maßnahme könnte in einer mechanischen Lockerung des Oberbodens bestehen. Dabei wird das Porenvolumen aber entgegen dem herrschenden Fließgleichgewicht der Lagerungsdichte vergrößert. Infolge von Konsolidierung durch Sackung wird sich daher sehr bald wieder der vorverdichtete Ausgangszustand einstellen, falls das vergrößerte Porenvolumen nicht biogen stabilisiert werden kann. Die struktur- und porenbildende Fauna von Waldböden ist jedoch auf ein ausgeglichenes Temperatur- und Feuchteregime eingestellt, so daß die größeren Feuchte- und Temperaturamplituden nach mechanischer Bearbeitung im Oberboden die Besatzdichte eher verringern werden.

Eine mechanische Oberbodenlockerung kann aber trotz kurzfristiger Wirkung eine sinnvolle Maßnahme zur Förderung der Buchen-Naturverjüngung sein. Der Vergleich der Ergebnisse der beiden Pflanzversuche zeigt ja, daß in der Phase der Keimwurzelentwicklung offensichtlich die höchsten Anforderungen an den bodenphysikalischen Zustand bestehen. Wird bei einer befahrenen Lößlehmfäche diese Phase durch eine mechanische Lockerung überbrückt, so kann die Entwicklung der Keimwurzel gesichert werden. Bei anschließender Sackung des gelockerten, aber vorverdichteten Lößlehms bis zur neuen Gleichgewichtslage der Lagerungsdichte bestehen für das anpassungsfähigere Feinwurzelsystem noch gewisse Entwicklungsmöglichkeiten. Allerdings nimmt die Durchwurzelbarkeit mit steigender Lagerungsdichte so stark ab, daß ab $d_B > 1,35 \text{ g/cm}^3$ die stagnierende Wurzelentwicklung vitalitätsbestimmend sein dürfte (vgl. Abb. 6 und 9). Man muß also davon ausgehen, daß der in Abb. 5 dargestellte Dichtebereich D ($d_B > 1,35 \text{ g/cm}^3$) ein Mißlingen der Naturverjüngung auch bei mechanischer Lockerung anzeigen wird, da in den meisten Fällen der Oberboden wieder in eine Gleichgewichtslage der Lagerungsdichte zurückschwingt, in der keine ausreichende Feinwurzelentwicklung möglich ist. Dafür sprechen auch Ergebnisse von HATCHELL et al. (1970), wonach in einem Gewächshausversuch die Oberbodenlockerung bei Stechzylinderproben aus befahrenen und verdichteten Flächen keine positive Wirkung auf Keimung und Wachstum von *Pinus taeda* zeigte.

Sollen also in einem Buchenalbestand beim letzten Lichtungshieb die waldbaulichen Voraussetzungen für eine Naturverjüngung geschaffen werden und würden dabei durch den Maschineneinsatz flächenhaft Oberbodendichten über $1,25 \text{ g/cm}^3$ auftreten, so stünde der Maschineneinsatz im Widerspruch zu wesentlichen Teilen des Produktionszieles, die Fläche wäre demnach unter standortkundlichem Aspekt nicht befahrbar. Nimmt man von vornherein eine Bodenbearbeitung in Kauf, so kann bei der Definition der Befahrbarkeit der Grenz Zustand auf eine Lagerungsdichte von ca. $1,35 \text{ g/cm}^3$ verschoben werden.

4. Ausblick

Für befahrene Lößlehmfächen konnten bodenphysikalische Grenzzustände für wichtige Bodenfunktionen in der Buchenwirtschaft abgeleitet werden. Für die Forstpraxis ist die Frage interessant, ob das Erreichen oder Überschreiten solcher Grenzzustände vor einem Maschineneinsatz prognostiziert werden kann. Hierzu sind Befahrungsversuche im Gelände geplant. Vor allem soll dabei geprüft werden, unter welchen Bedingungen der Einsatz von Niederdruckreifen bodenphysikalisch meßbare Vorteile bringt.

Neben der Fähigkeit zur Aufnahme einer Naturverjüngung gibt es natürlich noch zahlreiche weitere, für die Forstwirtschaft wichtige Bodenfunktionen, die durch Befahren und Verdichtung beeinflusst werden, wie z. B. die den Zuwachs mitbestimmenden Bodenfunktionen als Medium für die Aneignung von Wasser, Nährelementen und Sauerstoff. Beispielsweise fand FRIES (1975) in einem maschinell durchforsteten Fichtenbestand nach 5 Jahren Zuwachsverluste von wenigstens 20% innerhalb einer zwei Meter breiten Zone entlang von Fahrspuren. Über die Beeinträchtigung der Bodenfunktion als Medium der Tiefenverankerung kann durch Befahren auch die Risikolage der forstlichen Produktion

verändert werden. Alle diese Rückwirkungen auf forstliche Produktionsziele entziehen sich bislang aufgrund der Langfristigkeit der Holzproduktion einer genauen quantitativen Wertung. Schließlich kann man auch bei landeskulturell bedeutsamen Bodenfunktionen annehmen, daß sie durch Befahren beeinträchtigt werden, wie etwa die hydrologische Pufferfunktion oder die Filterfunktion für kontaminiertes Wasser.

Es ist auch noch die Frage offen, inwieweit die Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch Befahrung auf körnungsbedingt labile Standorte wie z. B. Lößlehmflächen beschränkt ist, d. h. ob ähnliche Wirkungen auch bei anderen Substraten auftreten können. Bei Bodenarten mit hohem Sortierungsgrad wie z. B. bei einheitlich gekörntem Sand bestehen ja bei Erhöhung der Auflast mehr innere Abstützmöglichkeiten zur Erhaltung eines konstanten Porenvolumens (vgl. HARTGE 1978), während bei Tonen aufgrund von Quellung und Schrumpfung ständig struktur- und porenbildende Prozesse ablaufen. Theoretisch müßten also Sande und Tone mit niedrigem Ungleichförmigkeitsgrad gegenüber mechanischer Beanspruchung weniger labil sein als Lößlehme mit geringem Sortierungsgrad der Korngrößen. Ob dies bei der standortkundlichen Definition der Befahrbarkeit berücksichtigt werden kann, ist nicht geklärt.

Zusammenfassung

Bei der Definition der Befahrbarkeit muß für forstlich genutzte Flächen neben dem Aspekt der Maschinenbeweglichkeit ein bodenphysikalischer Zustand festgelegt werden, der beim Einsatz der Fahrzeuge nicht erreicht oder überschritten werden darf. Dieser Grenzzustand orientiert sich an der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen im Hinblick auf ein vorgegebenes, von den standörtlichen Rahmenbedingungen her mögliches Produktionsziel.

Durch Keim- und Pflanzversuche mit Bodenzylindern aus Lößlehmproben in unveränderter Lagerung wird gezeigt, daß durch Befahrung die Bodenfunktion als Keimbett für Buchensamen nahezu vollständig aussetzt, wenn der Oberboden auf Lagerungsdichten über $1,25 \text{ g/cm}^3$ komprimiert wurde. Dabei ist entscheidend, daß das verminderte Grobporenvolumen zunehmend geringere Kontinuität aufweist und damit für die Keimwurzel nur teilweise als System der Sauerstoffversorgung wirksam werden kann.

Für die Bodenfunktion als durchwurzelbares Medium für die Feinwurzeln von Buchenkeimlingen existiert ebenfalls ein bodenphysikalischer Grenzzustand, der von Lagerungsdichten um $1,25 \text{ g/cm}^3$ angezeigt wird. Unterhalb dieses Bereiches nimmt auf gleicher Dichtestufe die Feinwurzelproduktion mit steigendem Wassergehalt zu, darüber nimmt sie ab. Ferner wurde ab $d_B = 1,25 \text{ g/cm}^3$ mit zunehmender Lagerungsdichte eine steigende Tendenz zur Ausbildung hypertrophierter Lenticellen am Wurzelhals und an der Keimwurzel selbst beobachtet. Möglicherweise bedingt dieses, als Anpassungsreaktion interpretierte Phänomen die im Vergleich zur Keimwurzel höhere Elastizität der Feinwurzeln bei bodenphysikalischen Grenzbedingungen. Auch bei Lagerungsdichten über $1,25 \text{ g/cm}^3$ gibt es noch eine reduzierte Entwicklung von Feinwurzelsystemen, die jedoch stark verbuscht sind, und nur keimwurzelnahe Bodenräume erschließen. Bei Lagerungsdichten über $1,35 \text{ g/cm}^3$ ist die Feinwurzelentwicklung so stark eingeschränkt, daß die Bodenfunktion als durchwurzelbares Medium praktisch zum Erliegen kommt. Dieser Bodenzustand ist gekennzeichnet durch Luftvolumina unter $10 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ Boden bei pF 1,8 (Feldkapazität), durch k_f -Werte (gesättigte Wasserleitfähigkeit) um oder unter 10^{-3} cm/sec und durch eine hohe Porendiskontinuität, die aus der Diskrepanz von gemessener und berechneter gesättigter Wasserleitfähigkeit ersichtlich wird. Diese Zusammenhänge zwischen Lagerungsdichte, Porungs- bzw. Leitfähigkeitsmerkmalen und Bodenfunktionen gelten jedoch nur für befahrene und damit strukturgeschädigte Lößlehme. Bei natürlich gelagerten Substraten zeigen gleiche Lagerungsdichten wesentlich günstigere Zustands- und Transportparameter an.

Bei der Übertragung dieser Ergebnisse auf Fragen der Buchen-Naturverjüngung ergibt

sich die Konsequenz, daß auf Lößlehmstandorten, bei denen z. B. der Oberboden während der Holzernte des letzten Lichtungshiebes auf mehr als $1,25 \text{ g/cm}^3$ verdichtet wurde, die Naturverjüngung nicht auflaufen kann. Da aber die höchsten Ansprüche an den bodenphysikalischen Zustand während der Keimungsphase bestehen, kann eine relativ wirksame Oberbodenlockerung die Keimwurzelbildung ermöglichen. Die Verjüngung ist dann gesichert, wenn in der anschließenden Konsolidierung des Oberbodens durch Sackung die Lagerungsdichten nicht über $1,35 \text{ g/cm}^3$ ansteigen, da sonst auch die Bodenfunktion als durchwurzelbares Medium für das Feinwurzelsystem aussetzt.

Langfristig sind auf verdichteten Lößlehmstandorten die für eine problemlose Buchen-Naturverjüngung notwendigen bodenphysikalischen Grenzwerte nur durch biologische Maßnahmen erreichbar. Die erforderlichen hohen Porenvolumina und Porenkontinuitäten können gegenüber der körnungsbedingten Sackungstendenz dieses Substrates nur durch ständige, biogene Energiezufuhr (z. B. Wühlarbeit der Bodenfauna, Wurzelndruck) im Sinne eines Fließgleichgewichts aufrechterhalten werden.

Summary

The influence of soil compaction on soil functions on forest sites

On forest sites it has often to be decided, whether the use of heavy machines is feasible. When criteria are defined, they should not only characterize the vehicle mobility but also take into account a soil physical condition, which may not be reached or exceeded. Whether a deteriorated soil condition is tolerable or not depends on the tolerated loss on yield, which in turn is related to the changes in the soil functions.

Using planting and germination tests with soil cores of undisturbed loess loam, we could show that vehicle movement has a completely inhibitory effect on the soil function as seedbed for beech if the compression leads to bulk densities higher than 1.25 g/cm^3 . If bulk densities become even higher, continuity of the macropore space decreases. Therefore only part of that pore space can be considered as an effective oxygen supply system for roots.

For the development of fine roots, there is also a limit at bulk densities of about 1.25 g/cm^3 . Below that, development of fine roots improves with increasing water supply; the opposite occurs with higher bulk densities. Moreover, the cortex of the radicle showed an increasing tendency of formation of hypertrophic lenticels in the range of bulk densities $>1.25 \text{ g/cm}^3$. The interpretation of these phenomena as mechanism of adaption to oxygen deficiency in the rhizosphere could explain the higher tolerance of the fine root system towards unfavourable soil physical conditions in comparison to the radicle. At bulk densities $>1.25 \text{ g/cm}^3$ the production of fine roots was reduced, they became very bushy, and their development was limited to the proximity of the radicle. At bulk densities $>1.35 \text{ g/cm}^3$ the fine root development is so heavily suppressed, that the soil does not function any more as medium for fine root development. The soil condition at this value can be characterized by an aeration porosity below $10 \text{ cm}^3/100 \text{ g soil at pF } 1.8$ (= field capacity), by saturated water permeabilities below 10^{-3} cm/sec and by high discontinuity of the remaining macropores. This last characteristic was derived from the discrepancy between measured water permeability and calculated values, based on pF-curves. These relations between bulk density, porosity, permeability and soil functions are valid only for compacted loess loams with a deteriorated structure. At corresponding bulk density levels, soil cores not influenced by vehicle movement, show better porosity and conductivity characteristics.

Transferring these results to field conditions, it becomes obvious that timber harvest in old beech forests on loess loam sites may inhibit natural regeneration, if vehicle movement leads to top soil bulk densities above 1.25 g/cm^3 . As during germination the demands on the soil physical condition are highest, scarifying the top soil may facilitate the development

of the radicle. Natural regeneration is endangered if in the following period of top soil consolidation by settling bulk densities exceed 1.35 g/cm^3 , because the soil becomes inaccessible for fine roots.

In the long run, only biological means can re-establish soil physical conditions, favourable to natural beech regeneration on compacted loess loam sites. The needed high volumes of macropores with high degree of reticulation can be maintained only by continuous input of biotic energy (e. g. turnup by soil fauna, root pressure) thus establishing the dynamic equilibrium of pedogenetic bulk density.

Danksagung

Für die gewissenhafte Betreuung der Pflanzversuche habe ich Frau GAUGER und Frau HOLLSTEIN zu danken. Herrn SCHIEKER gebührt Dank für die tatkräftige Mithilfe bei den Geländearbeiten.

Literatur

- BLUME, H.-P.; DIETERICH, H., 1969: Untersuchungen über die Auswirkungen des Fichtenreinanbaus auf Parabraunerden und Pseudogleye des Neckarlandes. V. Wasser und Luft im Jahresablauf. Mitt. d. Ver. f. Forstl. Standortskunde u. Forstpflanzenzüchtung **19**, 92–105.
- CAMPBELL, R. G.; WILLIS, J. R.; MAY, J. T., 1973: Soil disturbance by logging with rubber-tired skidders. Journal of soil and water conservation **28**, 218–220.
- DICKERSON, B. P., 1976: Soil compaction after tree-length skidding in Northern Mississippi. Soil Sci. Soc. Amer. Journal **40**, 965–966.
- EHLERS, W., 1977: Physikalische Eigenschaften von Schluffdecken. Z. Pflanzenern. Bodenkunde **140**, 79–90.
- FLÜHLER, J., 1973: Sauerstoffdiffusion im Boden. Mitteilg. Schweizer. Anst. forstl. Versuchswesen **49**, 123–250.
- FRIES, J., 1975: Ökologische Aspekte der mechanisierten Durchforstung. Der Forst- und Holzwirt **30/17**, 315–320.
- GRAFF, O.; HARTGE, K. H., 1974: Der Beitrag der Fauna zur Durchmischung und Lockerung des Bodens. Mitteilg. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. **18**, 447–460.
- HARTGE, K. H., 1971: Die physikalische Untersuchung von Böden. Stuttgart: Ferdinand Enke-Verlag.
– 1978: Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart: Ferdinand Enke-Verlag.
- HATCHELL, G. E.; RALSTON, C. W.; FOIL, R. R., 1970: Soil disturbances in logging. J. Forestry **68**, 772–775.
- HILDEBRAND, E. E.; WIEBEL, M., 1982: Der Einfluß der Befahrung auf die Qualität von Forststandorten, dargestellt an bodenphysikalischen Kenngrößen. AFJZ **153**, 1/2, 24–34.
– 1981: Befahrung und Bodenverdichtung unter dem Aspekt der Bodenfunktion als Waldstandort. Mitteilg. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. **32**, 51–58.
- KUNZE, R. J.; UEHARA, G.; GRAHAM, F., 1968: Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. **32**, 760–765.
- LEUTZ, R.; SCHAAK, H.; WIEBEL, M., 1980: Oberflächenverdichtung bei Parabraunerden aus Lößlehm nach Einsatz schwerer Holzbringungsmaschinen. Mitt. d. Ver. f. Forstl. Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung **28**, 11–20.
- RICHTER, J.; GROSSGEBAUER, A., 1978: Untersuchungen zum Bodenlufthaushalt in einem Bodenbearbeitungsversuch. 2. Gasdiffusionskoeffizienten als Strukturmaße für Böden. Z. Pflanzenern. Bodenkund. **141**, 181–202.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P., 1966: Bodenkundliches Praktikum. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey.
- SOMMER, C., 1979: Befahrbarkeit und Bearbeitbarkeit. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. **29**, I–XIV.
- SOMMER, C.; RUHM, E.; ALTEMÜLLER, H.-J., 1981: Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenenertrag. Kali Briefe (Büntehof) **15/7**, 429–448.

Anschrift des Verfassers: Dr. E. E. HILDEBRAND, FVA, Abteilung Botanik und Standortskunde, Fasanengarten, D-7000 Stuttgart-Weilimdorf