

## SUMMARY

Soil compaction is regarded as one of the most serious problems resulting in soil degradation in modern agriculture. The overuse of machinery (an increase in weight and frequency of wheeling) has been identified as the main reason contributing to soil compaction. Soil structure has a major influence on the ability of soil functions (e.g. soil aeration and water transport). Therefore, in this study, we hypothesized that soil compaction under static and cyclic loading and the amelioration of soil structure by artificially drilled vertical holes can obviously affect soil physical properties.

To better understand the interaction between soil physical properties and the stress strain behavior as well as their influence on pore functions, soil aeration and gas fluxes, the capacity (total porosity and air-filled porosity  $\varepsilon_a$ ) and intensity (pore continuity  $C_2$ -Index and tortuosity  $\tau$ , air permeability  $K_a$  and gas diffusion coefficient  $D_s/D_o$ ) properties of pore functions were investigated. Repacked, homogenized soils (bulk density of  $1.4 \text{ g cm}^{-3}$ ) with three different textures (sand, silt loam and clay loam) at two matric potential (-60 and -300 hPa) under two types of loading (static and cyclic loading) and three compaction levels (50, 100 and 200 kPa) were analyzed. Plastic soil deformation is a reaction of a soil to an applied stress, if the internal soil strength is exceeded. Mechanical or hydraulic processes can either cause it, while the extent of soil deformation depends on the external stress/internal strength ratio. Therefore, vertical displacement and pore water pressure were also detected by our experiment.

In the case of static loading, there was a close relationship between soil pore functions and gas transport. Soil deformation resulted in the reduction of the quantity and quality of air-filled pores, and thus restricted the ability of soil aeration (a decrease in  $K_a$  and  $D_s/D_o$ ). Vertical displacement and changes in pore water pressure increased with the applied vertical stress for treatments at a given soil texture and initial matric potential. Under the same compaction level, soil mechanical deformation was more obvious at high matric potential (-60 hPa) than at low matric potential (-300 hPa). Regardless of initial matric potential, the finer-textured soils tended to have a higher vertical displacement, especially under a higher compaction level. The time-dependent vertical displacement curves for all treatments at all compaction levels were similar in shape but different in scale. An intensive vertical

displacement was observed in the beginning of stress application, while it tended to constantly slightly decline with increasing loading time. However, different situations of time-dependent change in pore water pressure were found due to different soil internal strength resulting from soil texture and initial matric potential. In the case of subsequent cyclic loading, the volume of macropores ( $\varepsilon_a$ ) decreased, but the functional quality of air-filled pores was improved (an increase in pore continuity index  $C_2$  and a decrease in pore tortuosity  $\tau$ ). Therefore, a combined effect of soil pore capacity and intensity properties resulted in a minor change in  $K_a$  and  $D_s/D_o$  after cyclic loading. Vertical displacement increased during loading but an elastic rebound was observed to some extent (depending on the treatments) during unloading, which principally resulted in an increase in pore water pressure during loading and a decrease during unloading. The frequency of loading also played an important role in soil deformation, e.g. soil deformation increased with increasing number of cycles.

In the case of changes in soil structure, the preparation of artificially vertical holes caused an increase in pore continuity  $C_2$  and a significant decrease in pore tortuosity  $\tau$ , while air-filled porosity  $\varepsilon_a$  remained almost the same because the total volume of holes was only 0.4 cm<sup>3</sup>. Consequently, the negative effect of soil compaction on  $K_a$  and  $D_s/D_o$  was alleviated. The deterioration of soil pore functions, and especially capacity properties occurred after static loading. Due to the existence of highly conductive macropores for preferential mass flow resulting from the artificially vertical holes, there were minor differences in  $K_a$  but distinct differences in  $D_s/D_o$  among all treatments. Due to an increase in soil strength caused by previous stress applications (static and subsequent cyclic loading), soils became stronger to withstand the applied stresses, which resulted in a reduction of the extent of soil deformation (vertical displacement and changes in pore water pressure) during static loading with vertical holes compared to without.

A combined effect of the degree of pore water saturation and changes in pore water pressure, resulted in weakened soils which reduced the resistance to external forces for treatments at -60 hPa matric potential. However, soils became more stable to external stresses for treatments at -300 hPa matric potential after each stress application, which can be reflected by an increased effective stresses.

Hence, appropriate management of soils under favourable soil conditions can ameliorate the negative effects resulting from soil compaction. For example, the agricultural field operations should be employed during the more negative matric potential (at least -300 hPa). Meanwhile, the frequency and duration of the usage of agricultural field operations should be also minimized. In addition, improving soil structure (such as adding artificially vertical holes in soils) can improve the ability of soil aeration and water transport for the compacted soils.

## ZUSAMMENFASSUNG

In der modernen Landwirtschaft ist Bodenverdichtung als ein schwerwiegendes Problem anzusehen, das mit für die Degradation der Böden verantwortlich ist. Die Überbeanspruchung von Maschinen hinsichtlich steigender Maschinengewichte und Überfahungshäufigkeit ist einer der Hauptursache für die Entstehung von Bodenverdichtung. Die Bodenstruktur hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Bodenfunktionalität (z.B. Bodenluft- und -wasserhaushalt). In dieser Arbeit werden daher die Veränderungen der bodenphysikalischen Eigenschaften durch Bodenverdichtung (statische und dynamische mechanische Belastungen) und Strukturmeliormationsmaßnahmen in Form von künstlich erzeugten vertikalen Röhren näher betrachtet.

Um die Zusammenhänge zwischen bodenphysikalischen Eigenschaften und dem Spannungs-Verformungsverhalten sowie deren Einfluss auf die Bodenfunktionseigenschaften wie Bodenbelüftung und Gasflüsse besser zu verstehen, wurden Porenkapazitäts- (Gesamtporosität und luftgefülltes Porenvolumen) und Porenintensitätsgrößen (Porenkontinuität  $C_2$ -Index, Porentortuosität  $\tau$ , Luftleitfähigkeit  $K_a$  und Sauerstoffdiffusionskoeffizient  $D_s/D_o$ ) untersucht. Die Untersuchungen wurden an homogenisierten Bodenproben (Lagerungsdichte =  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ ) unterschiedlicher Textur (Sand sowie schluffiger und toniger Lehm) und variierendem Vorentwässerungsgrad (Matrixpotential von - 60 und -300 hPa) anhand von mechanischen Belastungsversuchen (statisch und zyklisch) mit 3 Laststufen (50, 100 und 200 kPa) durchgeführt. Plastische Bodenverformungen sind Folge von Spannungseinträgen, die die interne Bodenstabilität überschreiten. Das Ausmaß der Bodendeformation hängt daher von dem Verhältnis zwischen externem Spannungseintrag und interner Bodenstabilität ab, das wiederum durch mechanische und hydraulische Prozesse beeinflusst wird.

Unter statischer Belastung besteht ein enger Zusammenhang zwischen den Porenfunktionen und Gastransporteigenschaften des Bodens. Die Bodendeformation führte zu einer Reduzierung der Quantität und Qualität von luftgefüllten Poren und damit zu einer Einschränkung der Bodenbelüftung. Vertikale Verformungsprozesse und Änderungen der Porenwasserdrücke verstärkten sich mit zunehmendem vertikalen Spannungseintrag bei

gegebener Bodentextur und Matrixpotential der verschiedenen Versuchsvarianten. Bei gleicher Laststufe nahm die Bodendeformation bei höherem (-60 hPa) im Vergleich zum geringeren Matrixpotential (-300 hPa) zu. Unabhängig vom Matrixpotential wiesen die feinkörnigeren Böden eine höhere vertikale Verformung, insbesondere bei hohen Laststufen, auf. Das zeitabhängige vertikale Verformungsverhalten ähnelte sich dabei für die unterschiedlichen Versuchsvarianten im Verlauf, jedoch nicht in der Dimension (Ausmaß der Deformation). Eine deutliche Setzungszunahme wurde dabei zu Beginn der Lastaufbringung beobachtet, während nachfolgend konstant geringere Setzungszunahmen über die Belastungszeit auftraten. Bedingt durch Unterschiede in der internen Bodenstabilität, in Abhängigkeit von der Bodentextur und dem Matrixpotential, konnten allerdings unterschiedliche Szenarien der zeitabhängigen Änderung von Porenwasserdrücken ausgemacht werden.

Unter zyklischer Belastung reduziert sich das Volumen an Makroporen ( $\epsilon_a$ ), während sich die Funktionalität von luftgefüllten Poren verbessert hat (Zunahme des Porenkontinuitätsindex  $C_2$  und Abnahme der Porentortuosität  $\tau$ ). Durch diesen gekoppelten Effekt von Porenkapazitäts- und -intensitätsänderungen sind nur geringe Auswirkungen auf die Parameter  $K_a$  und  $D_s/D_0$  festzustellen. Die vertikale Verformung nimmt während der Belastung zu, während bei Entlastung eine unterschiedlich hohe elastische Rückverformung (abhängig von der Variante) eintrat. Dies führte prinzipiell dazu, dass die Porenwasserdrücke während der Belastung anstiegen und während der Entlastung wieder abklagen. Auch die Belastungsfrequenz spielte eine wichtige Rolle für das Verformungsverhalten, was sich in einer zunehmenden Bodendeformation mit steigender Anzahl an Belastungszyklen äußerte.

Hinsichtlich der Bodenstrukturänderungen führte die Präparation von vertikalen Röhren zu einer Zunahme der Porenkontinuität und einer signifikanten Abnahme der Porentortuosität  $\tau$ , während das luftgefüllte Porenvolumen nahezu konstant blieb, da das Gesamtporenvolumen der vertikalen Röhren nur  $0,4 \text{ cm}^3$  beträgt. Dadurch ließ sich der negative Effekt der Bodenverdichtung auf die Parameter  $K_a$  und  $D_s/D_0$  mindern. Eine Verschlechterung der Porenfunktionen und insbesondere der Kapazitätskenngrößen erfolgte unter statischer Belastung. Aufgrund des Vorhandenseins von leitfähigen Makroporen für den präferenziellen Massenfluss in Form der vertikalen Röhren konnten geringe Unterschiede in

der  $K_a$ , nicht aber in den  $D_s/D_o$ -Werten zwischen den Versuchsvarianten festgestellt werden. Durch die durchgeführten statischen und zyklischen Belastungen wurden die untersuchten Bodenproben widerstandsfähiger gegenüber weiteren mechanischen Spannungseinträgen (höhere interne Bodenstabilität), wodurch sich das Ausmaß der Bodendeformation (vertikale Verformung und Änderung der Porenwasserdrücke) für die Versuchsvariante mit künstlichen vertikalen Röhren im Vergleich zu der ohne Röhren verringerte.

Das Zusammenwirken von Porenwassersättigungsgrad und Änderungen der Porenwasserdrücke führte zu instabilen Bodenverhältnissen mit geringerem Widerstand gegenüber externen Spannungseinträgen bei einem Matrixpotential von -60 hPa. Demgegenüber erhöhte sich die Stabilität der Böden bei einem Matrixpotential von -300 hPa nach jeder Belastungsphase, was mit einer Zunahme der effektiven Spannung einherging.

Das bedeutet, ein angepasstes Bodenmanagement kann unter günstigen Bedingungen dazu beitragen den negativen Effekten der Bodenverdichtung entgegenzuwirken. So sollten u.a. Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Böden unter stärker negativem Matrixpotential (mindestens -300 hPa) durchgeführt werden. Genauso sollte die Überfahungshäufigkeit und -dauer mit landwirtschaftlichen Maschinen reduziert werden. Zusätzlich kann durch Bodenstrukturmeliorationsmaßnahmen (z.B. durch künstlich hergestellte vertikale Röhren) die Bodenbelüftung und der Wassertransport in verdichteten Böden wieder verbessert werden.