

Diss. ETH No. 14132

**Compaction of Agricultural Subsoils  
by Tracked Heavy Construction Machinery**

Dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH  
for the degree of  
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

MARKUS BERLI  
Dipl. Umwelting., ETH Zürich  
born 1 January 1968  
citizen of Birmensdorf and Ottenbach ZH

Prof. Dr. Rainer Schulin, examiner  
Prof. Dr. Sarah Springman, co-examiner  
Prof. Dr. Hannes Flühler, co-examiner

2001

---

## Summary

---

In the past century mechanisation has revolutionised agriculture. In the course of the desired increase in crop production, negative effects such as an increased risk of soil compaction due to heavy machinery have also emerged threatening soil fertility. Particularly problematic is the compaction of subsoils because it is extremely persistent and often hard, if feasible at all, to restore to non-compacted state. Apart from agricultural activities, the use of agricultural land as temporary access way for road-, overland high voltage transmission line- and pipeline construction work has added to the problem of subsoil compaction. In recent years, heavy tracked machinery weighing up to  $6 \times 10^4$  kg with mean normal stresses in the contact area up to 100 kPa was used for overland gas pipeline construction work in Switzerland.

To prevent subsoil compaction damages, precompression stress, i.e. the yield point between elastic and plastic compression behaviour, has been proposed as a key criterion for allowable mechanic loads on agricultural subsoils. As the available knowledge about the validity and feasibility of this criterion for such application to heterogeneous, unsaturated field soils was insufficient, this study was performed. In particular, the study addressed the applicability of the precompression stress criterion to regulate the use of heavy tracked construction machinery. For this purpose the criterion was tested under real-world conditions in field experiments. A particular problem was the moisture dependence of soil mechanical parameters of unsaturated structured agricultural soil. A soil mechanical model was evaluated to predict subsoil compaction by computer simulation.

On three selected field sites along a gas pipeline under construction, wet and dry test plots were experimentally trafficked with heavy tracked machines used for construction work. Compaction effects were determined by comparing precompression stress, bulk density and macroporosity values as well as water flow pattern from trafficked and non-trafficked soil. Precompression stress was determined by the Casagrande-procedure from confined uniaxial compression tests carried out in the laboratory on undisturbed samples at -6 kPa initial soil water potential. For one of the three test sites, a silt loam Haplic Luvisol, additionally precompression stress, compression- and recompression index were determined at five different initial water potentials between -1 and -32 kPa. For this site,

the outcome of the field trial was interpreted with a finite-element model based on the concept of critical state soil mechanics.

No significant increase of precompression stress and bulk density and decrease of macroporosity occurred in the subsoil if the mean stress in the contact area of the tracks did not reach precompression stress. This findings were supported by the lack of significant changes in water flow pattern. The lack of statistical significance in the subsoil does not mean, however, that compaction effects can be entirely excluded. They may have simply remained insignificant in comparison to the rather large background variability of the parameters used to assess the compaction effects.

A negative logarithmic correlation was found between precompression stress and water potential and a negative linear correlation between precompression stress and gravimetric water content. Precompression stress increased very strongly with water tension in the subsoil but was almost independent of soil moisture (in the range between -1 and -32 kPa water potential) in the topsoil. The compression index slightly increased with decreasing water potential. But it was stronger correlated to initial void ratio of the samples. The recompression index slightly decreased with decreasing water potential. Like precompression stress, also compression and recompression index showed stronger moisture dependence in the subsoil than in the topsoil. No correlation was found between stress-compression characteristics and initial water saturation degree.

For the silt loam Haplic Luvisol, both direct measurement and modelling showed that the dry soil was strong enough to resist compaction. The wet soil was too weak to resist compaction in the topsoil, strong enough in the ploughpan, and probably also strong enough in the subsoil. For the wet soil, the modelling results suggested that only partially drained conditions prevailed in the soil beneath the tracks during passage of the machines.

Given the good agreement between experimentally observed and expected compaction effects and the surprisingly accurate stress predictions of the used critical state soil mechanics model, it was concluded that precompression stress represents a useful and practical parameter to access subsoil compaction susceptibility for the used traffic and soil conditions investigated in this study.

---

## Zusammenfassung

---

Die Landwirtschaft wurde im 20. Jahrhundert durch die starke Mechanisierung revolutioniert. Mit den dadurch erreichten Ertragssteigerungen gehen allerdings auch negative Einflüsse auf die Umwelt einher. Ein Beispiel dafür ist die Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit durch Verdichtungen. Unterbodenverdichtungen gelten dabei als besonders problematisch, da sie sehr persistent und wenn überhaupt, nur schwer wieder zu entfernen sind. Zusätzlich zur immer intensiveren landwirtschaftlichen Nutzung wird Kulturland auch zunehmend mit schwere Baumaschinen im Zusammenhang mit Strassen- oder Überland-Leitungsbauten befahren. Die in den letzten Jahren beim Gasleitungsbau durch Kulturland in der Schweiz eingesetzten Raupenfahrzeuge weisen Gewichte bis  $6 \times 10^4$  kg und mittlere Kontaktflächendrücken bis 100 kPa auf und können daher Unterbodenverdichtungen verursachen.

Um Verdichtungsschäden in Unterböden zu vermeiden, wurde die Vorbelastung, d.h. der Übergang von elastischem zu plastischem Verdichtungsverhalten des Bodens, als Schlüsselkriterium zur Beurteilung der zulässigen mechanischen Belastung vorgeschlagen. Da die Kenntnisse über die Verlässlichkeit und Anwendbarkeit dieses Kriteriums für inhomogene, ungesättigte Kulturböden bisher ungenügend waren, wurde diese Untersuchung durchgeführt. Untersucht wurde, ob sich die Vorbelastung als Kriterium zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden beim Einsatz schwerer Raupenfahrzeuge unter realen Baubedingungen eignet. Ein spezielles Problem stellte dabei die Feuchtigkeitsabhängigkeit der Verformungseigenschaften des ungesättigten, strukturierten Bodens dar. Ein bodenmechanisches Modell wurde evaluiert, um Unterbodenverdichtungen mittels Computersimulation vorhersagen zu können.

An drei Untersuchungsstandorten entlang einer Gasleitungsbaustelle wurden feuchte und trockene Versuchsflächen mit schweren Raupenfahrzeugen, wie sie beim Bau verwendet wurden, befahren. Um Verdichtungseffekte festzustellen, wurden Vorbelastung, Lagerungsdichte und Grobporenvolumen sowie die Fliesspfade von Wasser in befahrenem und unbefahrenem Boden untersucht. Die Vorbelastung wurde mit der Casagrande-Methode, angewendet auf Drucksetzungskurven aus Ödometerversuchen an ungestörten Proben bei 6 kPa Anfangssaugspannung, bestimmt. Für eine der drei Versuchsflächen, einer Parabraunerde aus lehmigem Schluff, wurden zusätzlich zur Vorbe-

lastung auch die Kompressions- und Wiederverdichtungsbeiwerte bei verschiedenen Anfangssaugspannungen zwischen 1 und 32 kPa bestimmt. Für dieselbe Versuchsfläche wurden die Resultate des Befahrungsversuches mit einem Finite-Elemente Modell, basierend auf dem Konzept der critical state soil mechanics, interpretiert.

In den Unterböden wurden keine signifikant grösseren Vorbelastungen und Lagerungsdichten sowie kleinere Grobporenvolumina gefunden, sofern der mittlere Kontaktflächendruck unter den Raupen die Vorbelastung im Boden nicht erreichte. Auch wurden keine signifikanten Veränderungen der Fliesspfade für Wassers festgestellt. Fehlende Signifikanz bedeutet nicht, dass Verdichtungen vollständig ausgeschlossen werden können. Kleine Verdichtungseffekte könnten durch die natürliche Variabilität der untersuchten Parameter überdeckt worden sein.

Die Vorbelastung war positiv logarithmisch mit der Anfangssaugspannung, sowie negativ linear mit dem gravimetrischen Wassergehalt korreliert. Im betrachteten Saugspannungsbereich zwischen 1 und 32 kPa war die Vorbelastung im Unterboden, im Gegensatz zum Oberboden, sehr stark saugspannungsabhängig. Der Kompressionsbeiwert wurde mit zunehmender Anfangssaugspannung tendentiell grösser. Er war jedoch deutlich stärker mit der Anfangsporenziffer als mit der Feuchtigkeit korreliert. Der Wiederverdichtungsbeiwert wurde mit zunehmender Anfangssaugspannung tendentiell kleiner. Wie die Vorbelastung waren auch Kompressions- und Wiederverdichtungsbeiwert im Unterboden stärker feuchtigkeitsabhängig als im Oberboden. Zwischen dem Anfangsättigungsgrad und der Vorbelastung sowie dem Kompressions- und Wiederverdichtungsbeiwert wurden keine Korrelationen gefunden.

Für die Parabraunerde aus lehmigem Schluff zeigten Messung und Modellierung, dass der trockene Boden sowie die Pflugsohle im feuchten Boden durch die Befahrung nicht verdichtet wurden. Der Oberboden der feuchten Versuchsfläche wurde signifikant verdichtet, während der Unterboden wahrscheinlich nicht weiter verdichtet wurde. Die Modellrechnungen zeigten auch, dass während der Belastung im feuchten Unterboden unter den Raupen Porenwasserüberdrücke auftraten und diesen damit möglicherweise vor Verdichtung schützten.

Die gute Übereinstimmung zwischen erwarteten und experimentell beobachteten Unterbodenverdichtungen sowie die überraschend gut zutreffenden Modellvorhersagen lassen den Schluss zu, dass die Vorbelastung, zumindest unter den gewählten Belastungs- und Bodenverhältnissen, einen brauchbaren und praktischen Parameter darstellt, um die Verdichtungsempfindlichkeit von Unterböden zu beurteilen.