

Matthias Stettler, Thomas Keller, Peter Weisskopf, Mathieu Lamandé, Poul Lassen und Per Schjønning

Terranimo[®] – ein webbasiertes Modell zur Abschätzung des Bodenverdichtungsrisikos

Um die Druckverhältnisse unter Landmaschinen zu simulieren und das Bodenverdichtungsrisiko einschätzen zu können, wurde das webbasierte Modell Terranimo[®] entwickelt. Darin kann mithilfe von verfügbaren Reifenkennwerten und in Abhängigkeit von der Oberbodenfestigkeit die Kontaktfläche und die Druckverteilung zwischen Reifen und Boden beschrieben werden. Mithilfe von Pedotransferfunktionen wird die Bodenfestigkeit (Vorbelastung) vom Tongehalt und der Saugspannung im Boden abgeleitet. Das Verdichtungsrisiko wird durch den Vergleich von Bodenfestigkeit und ausgeübtem Bodendruck abgeschätzt: Bleibt der durch die Landmaschine ausgeübte Bodendruck unterhalb der aktuellen Bodenfestigkeit, so können das Verdichtungsrisiko minimiert und negative Veränderungen der Bodenstruktur – und somit der Bodenfunktionen – vermieden werden.

eingereicht 17. Februar 2014

akzeptiert 24. April 2014

Schlüsselwörter

Reifen, Druckverteilung, Druckausbreitung, Bodenfestigkeit, Verdichtungsrisiko

rates a model for prediction of contact area, shape and stress distribution in the tyre–soil interface from wheel load and readily-available tyre parameters and the topsoil strength. In Terranimo[®] pedotransfer functions are used to estimate soil strength from clay content and matric potential. Principally, by limiting the imposed stress to below soil strength, the risk of soil compaction and undesirable changes of soil structure – and hence soil functions – can be minimized.

Keywords

Tyres, stress distribution, stress propagation, soil strength, soil compaction risk

Abstract

Stettler, Matthias; Keller, Thomas; Weisskopf, Peter; Lamandé, Mathieu; Lassen, Poul and Schjønning, Per

Terranimo[®] – a web-based tool for evaluating soil compaction

Landtechnik 69(3), 2014, pp. 132–138, 5 figures, 25 references

Based on experimental data from wheeling experiments, a web-based model for the simulation of stress and the evaluation of the soil compaction risk under agricultural machinery named Terranimo[®] has been developed. Terranimo[®] incorpo-

Die Bodenverdichtung durch schwere Landmaschinen wirkt sich nachhaltig auf das Porensystem im Boden aus, insbesondere im Unterboden, und beeinträchtigt wichtige Bodenfunktionen wie Ertragsfähigkeit und Wasserinfiltrationsvermögen. Langzeitstudien haben aufgezeigt, dass Unterbodenverdichtungen durch natürliche Prozesse kaum behoben und die Nährstoffauswaschung und Treibhausgasemissionen langfristig verstärkt werden können [1].

Terranimo[®] ist ein webbasiertes Computermodell zur Beurteilung des Bodenverdichtungsrisikos beim Einsatz von landwirtschaftlichen Fahrzeugen und richtet sich in erster Linie an Landwirte, Lohnunternehmer, Berater und Vollzugsorgane, es soll aber auch wissenschaftliche Anwendungen erlauben. Terranimo[®] kann helfen, den Einsatz von landwirtschaftlichen Maschinen im Feld zu optimieren und Schäden an der Bodenstruktur zu verhindern, indem es aufzeigt, unter welchen Einsatzbedingungen ein hohes Risiko für schädliche Bodenverdichtungen auftritt.

In der Schweiz ist Terranimo® seit dem Sommer 2013 das offizielle Instrument zur Einschätzung des Bodenverdichtungsrisikos im Rahmen der Vollzugshilfe „Bodenschutz in der Landwirtschaft“ des Bundesamtes für Landwirtschaft BLW und des Bundesamtes für Umwelt BAFU [2]. Das Modell ist damit auch von umweltrechtlicher Relevanz. Terranimo® ist frei verfügbar unter www.soilcompaction.ch.

Das Grundprinzip von Terranimo®

Der Grundgedanke von Terranimo® ist einfach und nicht neu: Die mit landwirtschaftlichen Maschinen erzeugte Bodenbelastung (Bodendruck) wird mit der Widerstandsfähigkeit des Bodens (Bodenfestigkeit) verglichen. Ist die Bodenfestigkeit höher als die Bodenbelastung, so sind keine bleibenden Deformationen und somit keine Bodenschäden zu erwarten. Im umgekehrten Fall sind Bodenverdichtungen unvermeidlich und das Befahren des Bodens sollte unterlassen werden.

Die richtige Einschätzung von Bodenbelastung und Bodenfestigkeit ist Voraussetzung für korrekte Prognosen. Mit zunehmenden Ansprüchen an die Präzision der Simulationsergebnisse steigt auch der Aufwand für die exakte Beschreibung der Feldsituation. Um verschiedenen Nutzeransprüchen gerecht zu werden, wurden deshalb zwei Modell-Versionen entwickelt: Terranimo® light für die einfache und schnelle Grob beurteilung und Terranimo® expert für die umfassende Analyse des Verdichtungsrisikos unter spezifischen Bedingungen.

Terranimo® light: Risikoeinschätzung leicht gemacht

Terranimo® light ermöglicht eine rasche Einschätzung des Bodenverdichtungsrisikos mittels vier Kennwerten: Radlast, Reifendruck, Bodenfeuchtigkeit und Tongehalt.

Radlast und Reifendruck sind die maschinenseitigen Eingangsgroßen zur Berechnung des Bodendrucks. Als Referenz dient hierbei eine Bodentiefe von 35 cm. Dieser Wert lehnt sich an den bestehenden Schweizerischen Bodenschutzvollzug im Baubereich an [3] und liegt darin begründet, dass in erster Linie der Unterboden vor Verdichtungen zu schützen ist, da hier Bodenschäden nur mit viel Aufwand und jahrelanger sorgfältiger Folgebewirtschaftung behoben werden können.

Die Berechnungsformel für den Bodendruck basiert auf umfangreichen Befahrungsversuchen, die an der Universität Aarhus in Dänemark mit verschiedenen Reifen und bei unterschiedlichen Radlast- und Reifendruck-Konstellationen durchgeführt wurden [4; 5]. Die Auswertungen zeigten auf, dass Radlast und Reifendruck den Bodendruck für eine bestimmte Bodentiefe ausreichend genau beschreiben können, unabhängig von Reifenmarke und -typ. Dieser Zusammenhang wird für die Referenztiefe von 35 cm in **Abbildung 1** als Nomogramm dargestellt. Die Isolinien für den Bodendruck machen deutlich, dass Radlast und Reifendruck in 35 cm Bodentiefe in ähnlichem Ausmaß für den Belastungszustand bestimmend sind. In weiteren, hier nicht dargestellten, Analysen konnte nachgewiesen werden, dass in oberflächennahen Bodenschichten der Einfluss des Reifendruckes dominiert, während in tieferliegenden

Schichten die Radlast zum bestimmenden Faktor wird [5; 6]. Die altbekannte Faustregel bestätigte sich: Der Reifendruck bestimmt den Druck im Oberboden, die Radlast den Druck im Unterboden.

Als Grundlage für die Bestimmung der bodenseitigen Einflussgrößen zur Bodenfestigkeit dienen Ödometermessungen im Labor der Universität Aarhus an rund 500 Bodenproben mit Tongehalten zwischen 5-18 % und bei unterschiedlichen Saugspannungen: 3, 5, 7,5, 10, 16 und 30 cbar [7]. Die Saugspannung ist ein Maß für die Wasserverfügbarkeit im Boden und beschreibt im Wesentlichen die Anziehungskräfte zwischen Bodenwasser und Bodenteilchen. Zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt besteht für einen bestimmten Boden mit gegebener Porengrößenverteilung ein direkter Zusammenhang. Im Ödometer können Kompressionstests zur Bestimmung der Drucksetzungsbeziehung von ungestörten Bodenproben in Stechzylindern durchgeführt werden. Im vorliegenden Fall wurde aus den Drucksetzungskurven die Vorbelastung nach der Gleichung von Gompertz gemäß Gregory et al. [8] abgeleitet. Die Vorbelastung beschreibt den Druckpunkt beim Übergang des elastischen zum plastischen Verhalten einer Bodenprobe. Bleibt die Druckbelastung unterhalb der Vorbelastung, so federt eine Bodenprobe bei der Entlastung wieder in die ursprüngliche Form zurück und es kommt zu keiner bleibenden Deformation. Die Bodenprobe wird nicht verdichtet. Bei einer Überschreitung der Vorbelastung hingegen kommt es zu plastischen, nicht mehr reversiblen Deformationen: Bei der Entlastung bleiben dauerhafte Setzungen zurück und die Bodenprobe ist verdichtet.

Abb. 1

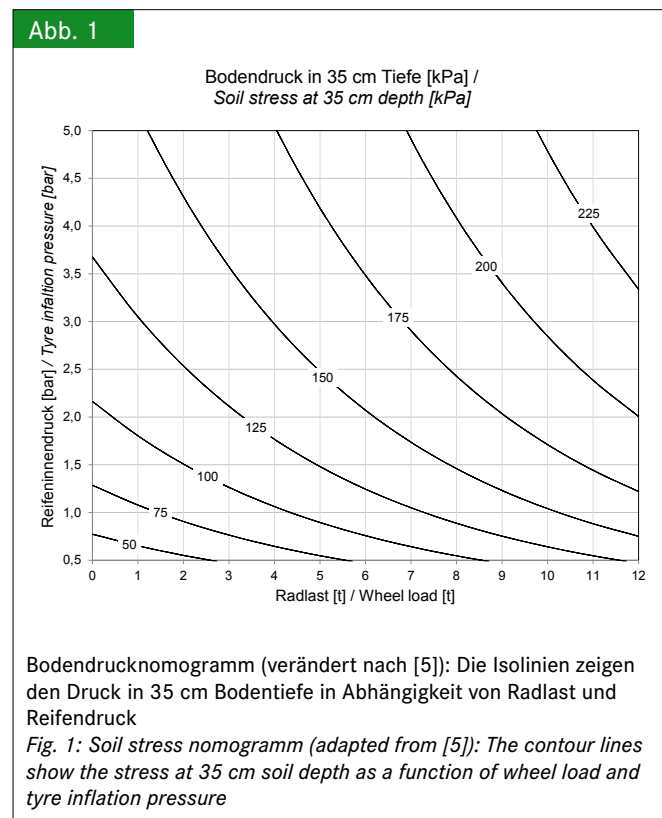
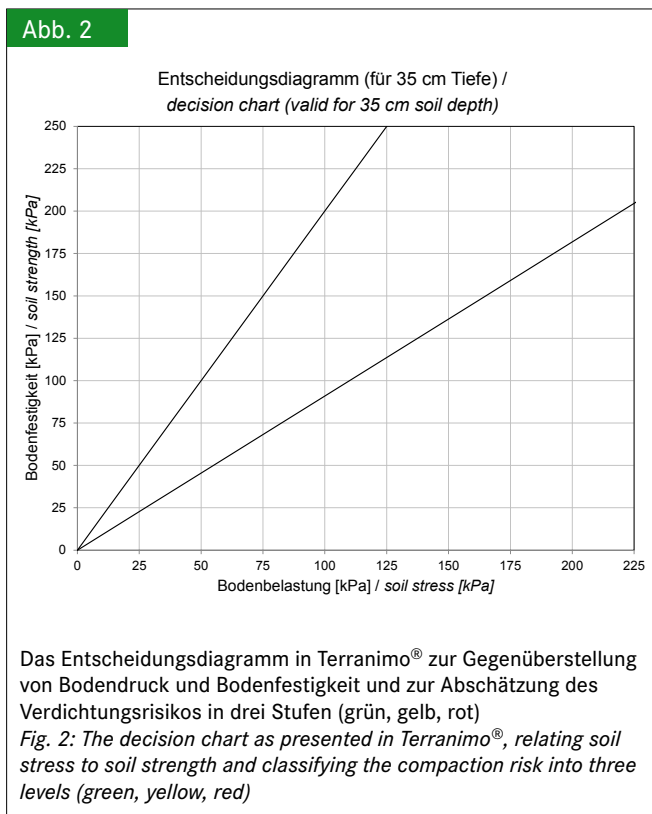


Abb. 2



In Terranimo® dient die Vorbelastung als Maß für die Bodenfestigkeit, was einem gängigen Ansatz entspricht [9]. Auf der Basis des Datensatzes der Universität Aarhus konnte die Bodenfestigkeit als Funktion von Saugspannung und Tongehalt beschrieben werden [10]. Die entsprechende Pedotransferfunktion erlaubt somit eine universelle Abschätzung.

Eine Analyse der absoluten Vorbelastungswerte von Arvidsson und Keller [11], Rücknagel et al. [12] und von in Terranimo® geschätzten Werten ergab, dass die Ergebnisse vergleichbar sind, sogar für sehr schwere Böden (bis 60 % Ton), wenngleich die Streuung in den Messwerten von [11] und [12] recht groß war. Der Vergleich unterschiedlicher Datensätze ist aber nicht einfach, da der Wert der Vorbelastung von den Testbedingungen (speziell von der Belastungsdauer) und Probendimensionen abhängig ist [13].

Im Falle der Bodenfestigkeit sind die Abhängigkeiten aber etwas komplexer als beim Bodendruck. Die Einflussgrößen stehen in Wechselwirkung: Die Saugspannung hat je nach Tongehalt unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Bodenfestigkeit. Leichte Böden mit niedrigem Tongehalt sind bei feuchten Bedingungen (Saugspannung < 10 cbar) grundsätzlich zwar stabiler als schwere Böden, erfahren aber mit zunehmender Austrocknung deutlich geringfügigere Festigkeitszunahmen als tonreiche Böden. Nahe der Feldkapazität (Saugspannung rund 10 cbar) ist der Einfluss des Tongehaltes relativ gering. Diese Erkenntnis stimmt mit Untersuchungen von Cavaglieri et al. [14] überein, in denen bei Wassergehalten im Bereich der Feldkapazität für verschiedene Bodenarten nahezu identische Vorbelastungswerte aufgezeigt wurden.

Die ermittelten Werte für Bodendruck und Bodenfestigkeit werden in Terranimo® light auf ein dreifarbiges Entscheidungsdiagramm übertragen (**Abbildung 2**). Die aktuelle Verdichtungsgefährdung wird einer von drei Gefährdungsstufen (grün, gelb oder rot) zugeordnet [2]:

- Grün: keine Verdichtungsgefährdung. Der Boden kann im aktuellen Feuchtezustand gefahrlos mit dem ausgewählten Fahrzeug befahren werden.
- Gelb: kritischer Übergangsbereich mit einer beträchtlichen Verdichtungsgefährdung. Die Gefährdungsabschätzung kann hier durch die Kenntnis zusätzlicher Bodeneigenschaften präzisiert werden. Zum Beispiel sinkt die Gefährdung bei hohen Skelettgehalten (> 10 % Steine im Unterboden) und bei Böden mit einer guten Struktur (z.B. dank konservierender Bodenbearbeitung, intensiver Durchwurzelung, hohem Humusgehalt oder guter Kalkversorgung). Auf jeden Fall sollten die Möglichkeiten zur Belastungsreduktion genutzt werden (z.B. Reifeninnendruck herabsetzen, Bunker nur teilweise füllen oder Doppelräder montieren).
- Rot: Schadverdichtung im Unterboden zu erwarten. Das Befahren des Bodens ist zu unterlassen, außer es können geeignete Sofortmaßnahmen umgesetzt werden, die die Verdichtungsgefährdung auf die Stufe Gelb herabsetzen (z.B. Reduktion der Radlast oder des Reifeninnendrucks).

Die Grenze zwischen Gefährdungsstufe Grün und Gelb entspricht einem Bodendruck von 50 % der Bodenfestigkeit. Diese Grenze repräsentiert gemäß aktuellem Kenntnisstand den Übergang vom vollkommen elastischen Verhalten eines Bodens zu ersten plastischen Deformationen der Bodenstruktur: Keller et al. [15] konnten nämlich nachweisen, dass die Vorbelastungswerte aus Ödometer-Messungen im Labor nicht direkt auf die Festigkeit von Böden im Feld übertragen werden können.

Die Grenze zwischen Gefährdungsstufe Gelb und Rot liegt bei einem Bodendruck von 110 % der Bodenfestigkeit. Im roten Bereich sind aufgrund der bisherigen Erkenntnisse aus Befahrungsversuchen beträchtliche plastische Deformationen und damit Schadverdichtungen zu erwarten.

Terranimo® expert: umfassende Analyse der Bodenbeanspruchung

Terranimo® expert ist deutlich komplexer als Terranimo® light und erlaubt Experten, spezifische Befahrungssituationen zu simulieren. Terranimo® expert besteht aus vier Teilmodellen:

- Obere Modellrandbedingung: Kontaktfläche und Druckverteilung zwischen Reifen und Boden
- Druckausbreitung im Boden
- Abschätzung der Bodenfestigkeit im Bodenprofil
- Beurteilung des Verdichtungsrisikos aufgrund des berechneten Druckes und der vorherrschenden aktuellen Bodenfestigkeit

Die Darstellung der oberen Modellrandbedingung basiert auf dem Modell „FRIDA“, welches die Kontaktfläche und die Spannungsverteilung zwischen Reifen und Boden berechnen kann, was für eine realitätsnahe Simulation der Druckausbreitung

im Boden unumgänglich ist [6; 16; 17; 18]. Der Umriss der Kontaktfläche wird durch eine Super-Ellipse beschrieben, die Spannungsverteilung in Fahrtrichtung wird mit einer Potenzfunktion und diejenige senkrecht zur Fahrtrichtung mit einer exponentiellen Zerfallsfunktion modelliert [19; 20; 21]. FRIDA kann die realen Verhältnisse sehr gut abbilden, insbesondere den dominierenden Einfluss des Reifeninnendruckes (**Abbildung 3**).

Um FRIDA auch für nicht experimentell untersuchte Reifen nutzbar zu machen, wurden Schätzfunktionen für die Ableitung der verschiedenen FRIDA-Modellparameter entwickelt, sodass aus einfach verfügbaren Reifendaten (Reifenbreite, Reifendurchmesser, Felgendurchmesser, statischer Halbmesser, empfohlener Reifendruck gemäß Hersteller und tatsächlich eingestellter Reifendruck), der Radlast und der Oberbodenfestigkeit die Kontaktfläche und Kontaktdruckverhältnisse für beliebige Reifen dargestellt werden können [4; 22].

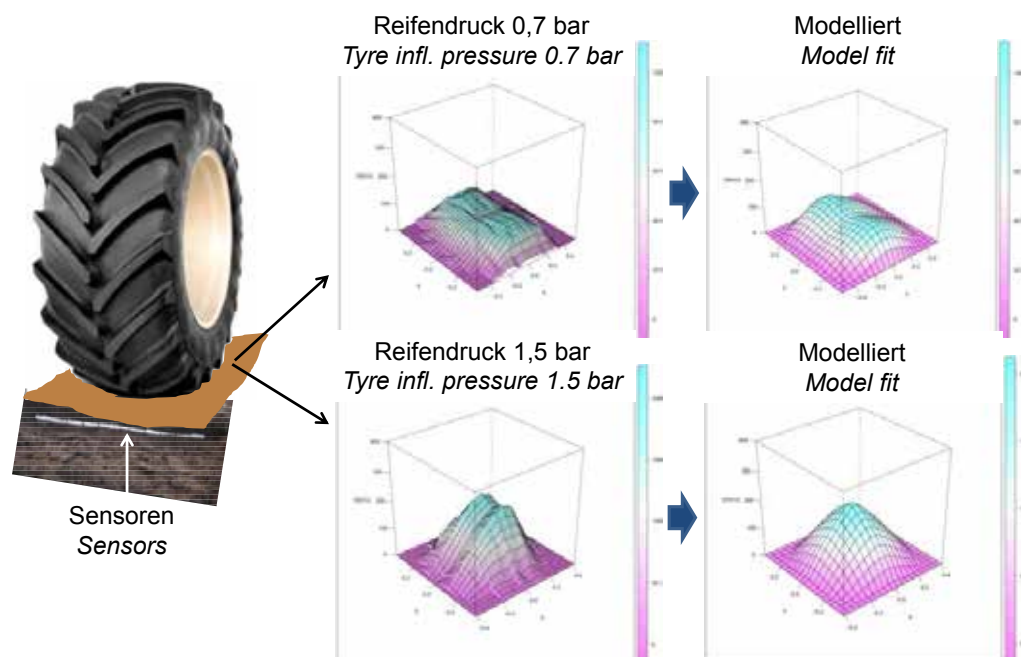
Um die Eingabe der Reifendaten zu vereinfachen und zu beschleunigen, wurde eine Datenbank für gängige Reifenmarken und -modelle angelegt. Die Datenbank umfasst mittlerweile über 1 000 Reifen der Marken Alliance, Continental, Goodyear, Kléber, Michelin, Nokian, Trelleborg und Vredestein mit sämtlichen verfügbaren technischen Daten gemäß ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organisation).

Terranimo[®] expert bietet eine Zusatzfunktion zur Abschätzung der Achslaständerungen am Traktor durch das Anhängen eines Gerätes. Diese sind wegen der auftretenden Hebelwir-

kungen und der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestbelastung der Lenkachse (mind. 20 % des Gesamtgewichtes müssen auf der Lenkachse liegen) nicht ganz einfach abzuschätzen, jedoch für die Bestimmung der aktuellen Radlast und für die korrekte Berechnung des Bodendruckes unabdingbar. Gerade bei schweren Anhängern mit zulässigen Stützlasten von 3 000 kg (Untenanhängung) treten große Belastungsveränderungen der Achsen eines Zugfahrzeuges auf. Da unter diesen Umständen meistens auch ein Frontballast notwendig wird, um weiterhin eine ausreichende Belastung der Vorderachse zu erzielen, steigt das Gesamtgewicht des Zugfahrzeuges um über 3 000 kg an. Um solche Effekte in Terranimo[®] expert abzubilden, wurden die Datensätze der Traktorentests untersucht, welche in den letzten rund 20 Jahren von der Schweizerischen Forschungsanstalt Agroscope, Standort Tänikon, durchgeführt wurden [23].

Für den Lastverschiebungseffekt in der horizontalen Ebene sind Radstand, Abstand der Zugöse von der Hinterachse und der Abstand des Frontballastschwerpunktes von der Vorderachse maßgeblich. Die Analyse der Traktortestdaten zeigte, dass die Achslaständerungen der untersuchten Fahrzeuge sehr gut mit linearen Funktionen beschrieben werden können. **Abbildung 4** zeigt dazu exemplarisch die Beziehung der Hinterachslasten von 100 Traktoren (Leergewicht von 4 020 kg bis 8 130 kg) mit und ohne Stützlast (3 000 kg), inklusive der Frontballastierung für eine 20%ige Lenkachslastbelastung. In Terranimo[®] expert wird jeweils für die Hinterachse eine leicht höhere Zusatzbelastung berechnet (**Abbildung 4**, rote Linie), einerseits um ein Unter-

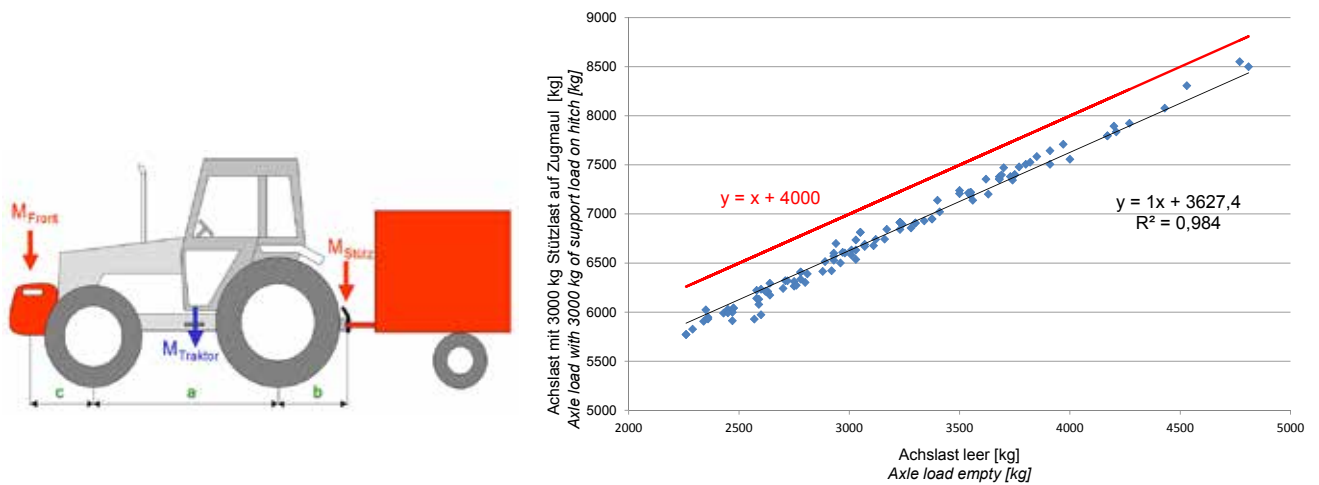
Abb. 3



Gemessene (Diagramme links) und mit FRIDA modellierte Zustände zwischen Reifen und Boden bei unterschiedlichem Reifeninnendruck. Hier am Beispiel eines Michelin MultiBib 650/65R38 mit 3,5 t Radlast

Fig. 3: Measured (left diagrams) and FRIDA modeled stress states between tyre and soil at different tyre inflation pressures. The example here shows a Michelin 650/65R38 Multibib with 3.5 t wheel load

Abb. 4



Lastkomponenten und relevante Abmessungen eines Traktors zur Bestimmung von Achslastverschiebungen (links) (Quelle: Agroscope), Zusammenhang zwischen Hinterachslast in leerem Zustand und Hinterachslast beim Anbringen von 3000 kg Stützlast von 100 untersuchten Traktoren, die rote Linie stellt die verwendete Beziehung in Terranimo[®] expert dar (rechts)

Fig. 4: Load components and relevant dimensions of a tractor for the determination of axle load transfer (left) (Source: Agroscope), relationship between rear axle load when empty and rear axle load when applying a support load of 3000 kg of 100 investigated tractors, the red line represents the relationship used in Terranimo[®] expert (right)

schätzen der Lasten auszuschließen und andererseits um den zusätzlichen Lastverschiebungseffekt durch den Rollwiderstand des Anhängers zu berücksichtigen.

Die Druckausbreitung wird in Terranimo[®] expert semi-analytisch berechnet, basierend auf den Formeln von Boussinesq [24], Fröhlich [25] und Söhne [16]. Ein wichtiges Element dieser Theorie ist der Konzentrationsfaktor ν , der die Form der Druckausbreitung im Boden bestimmt. In Terranimo[®] expert wird der Konzentrationsfaktor in Abhängigkeit von der Bodenfestigkeit gleich gewählt, wie bereits von Söhne [16] vorgeschlagen: Bei weichem (nassem) Boden rechnet man mit $\nu = 6$, bei hartem (trockenem) Boden mit $\nu = 4$ und bei mittlerem Zustand (feuchter Boden) mit $\nu = 5$.

Die Bodenfestigkeit wird in Terranimo[®] expert analog Terranimo[®] light berechnet, das Verdichtungsrisiko wird ebenfalls im dreifarbigem Entscheidungsdiagramm dargestellt. Terranimo[®] expert bietet aber noch weitere Auswertungsmöglichkeiten, z.B. eine Grafik zur Gegenüberstellung der Druckbelastung und der Bodenfestigkeit in allen Bodenschichten (**Abbildung 5**). Mithilfe solcher Darstellungen kann im Gegensatz zu Terranimo[®] light das Verdichtungsrisiko über das gesamte Bodenprofil evaluiert werden und bleibt nicht auf die Schweizer Referenztiefe von 35 cm begrenzt.

Diskussion

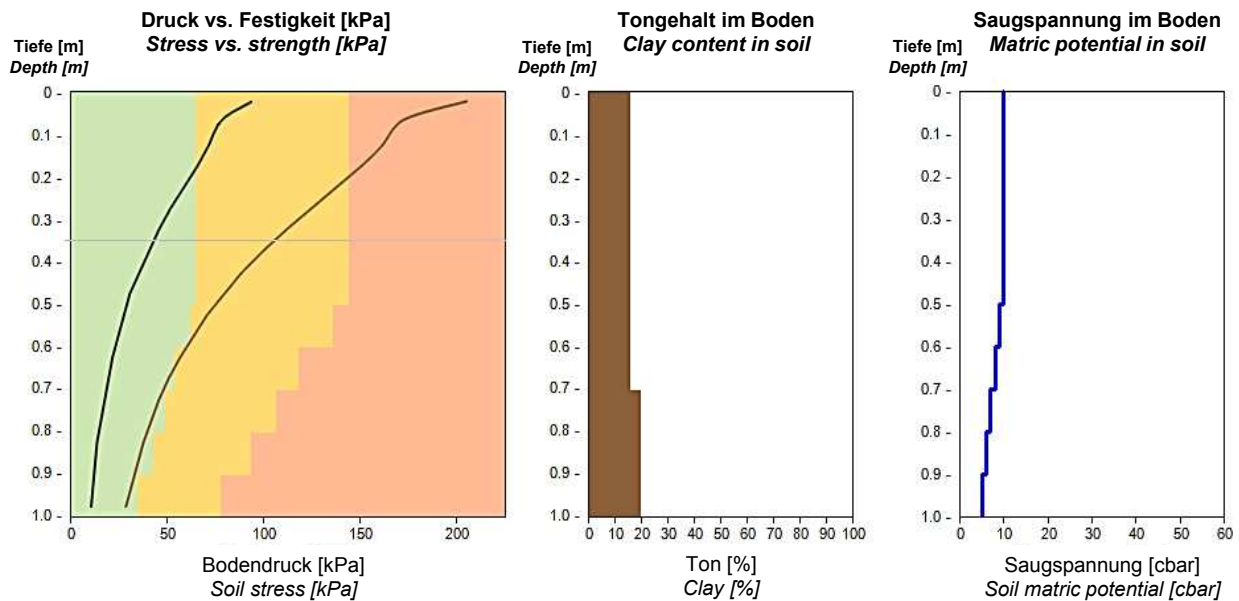
Mit Terranimo[®] wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches die Bewirtschafter bei der Entscheidung über die Befahrbarkeit von Kulturland unterstützen soll und dabei helfen kann, landwirtschaftliche Fahrzeuge bodenverträglich einzusetzen. Die Stärken des Modells liegen insbesondere bei der Simulation der Druckverteilung zwischen Reifen und Boden, welche

als obere Randbedingung entscheidenden Einfluss auf die Druckausbreitung im Boden hat [6; 16; 17; 18]. Die Berechnung der Druckausbreitung erfolgt nach dem bewährten Ansatz von Söhne [16], mit dem einzigen Unterscheid, dass an Stelle der von Söhne nicht genau definierten Begriffe „weicher“ oder „harter Boden“ die Saugspannung, resp. der Wassergehalt des Bodens als Maß für die Wahl des Konzentrationsfaktors und damit der Druckfortpflanzungscharakteristik dient.

Für die Beurteilung der Bodenfestigkeit kommt das Prinzip der Vorbelastung zur Anwendung. Dies bedeutet, dass lediglich eine Ja/Nein-Aussage zur Bodendeformation möglich ist, was ausreicht, um das Bodenverdichtungsrisiko zu beurteilen. Da Terranimo[®] jedoch keine Deformationen quantifiziert, ist eine kontinuierliche Veränderung der Bodenstruktur, wie sie beispielsweise bei Mehrfachbefahrungen auftreten kann, nicht simulierbar. Hierzu wären weitere bodenmechanische Eigenschaften zu berücksichtigen (z. B. Kompressionsbeiwert), welche aber weder leicht verfügbar noch einfach abschätzbar sind.

Der Vorbelastungswert wird in Terranimo[®] aus dem Tongehalt und der Saugspannung abgeleitet. Obwohl der zugrundeliegende Datensatz aus Dänemark nur Böden mit Tongehalten < 20 % beinhaltet, zeigt unsere Analyse von Literaturdaten [11; 12], dass die Schätzfunktion in Terranimo[®] auch für schwerere Böden passable Werte liefert. Wir bemerken aber, dass die Streuung in den Messwerten groß ist und dass der Einbezug von weiteren Einflussgrößen (z. B. Lagerungsdichte) oder Bodenstrukturattributen die Genauigkeit der Schätzung erhöhen könnte. Allerdings sei wiederum darauf hingewiesen, dass weder zur Lagerungsdichte noch zu den Bodenstrukturmerkmalen einfach verfügbare Messwerte vorliegen.

Abb. 5



Auswertungsgrafiken in Terranimo[®] expert. Links: Bodendrücke unter zwei unterschiedlichen Rädern (Linien) und Bodenfestigkeiten (grün, gelb, rot) im Bodenprofil. Mitte und rechts: dazugehörige Tongehalte, resp. Saugspannungen

Fig. 5: Result plots in Terranimo[®] expert. Left: soil stress under two different wheels (lines) and soil strength (green, yellow, red) in the soil profile. Middle and right: corresponding clay content, and soil matric potential

Schlussfolgerungen

Durch die Verknüpfung bewährter Erkenntnisse zur Druckausbreitung und Bodenfestigkeit sowie neue Modellen zur Simulation der Druckverteilung zwischen Reifen und Bodenoberfläche mit aktuellen Internet-Technologien ist es gelungen, ein attraktives und einfach zu bedienendes Tool zur Beurteilung des Bodenverdichtungsrisikos unter Landmaschinen bereitzustellen. Es ist geplant Terranimo[®] laufend weiterzuentwickeln. Neben der Aktualisierung der Datenbanken (z. B. Einpflege der Daten neuer Reifenmodelle) und Verbesserungen der Benutzeroberfläche sollen die erwähnten Schwachstellen sukzessive überwunden werden. Fernziel ist die Verknüpfung von Terranimo[®] mit Sensordaten und dem Terminal auf der Maschine. Ein solches Instrument würde dem Maschinisten automatisch und in Echtzeit wertvolle Informationen zur Optimierung des Feldeinsatzes liefern.

Literatur

- [1] Berisso, F.E. et al. (2012): Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil & Tillage Research* 122, S. 42–51
- [2] BAFU und BLW (2013): Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1313, www.bafu.admin.ch/uv-1313-d, Zugriff am 15.5.2014
- [3] BAFU (2001): Bodenschutz beim Bauen. Leitfaden Umwelt Nr. 10 des Bundesamtes für Umwelt, Bern
- [4] Schjønning, P. et al. (2006): Reduction of soil compaction: magnitude and distribution of stress in the contact area between wheel and soil. Report Markbrug No. 127, The Danish Institute of Agricultural Sciences, Tjele, Denmark
- [5] Schjønning, P. et al. (2012): Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use and Management* 28(3), pp. 378–393
- [6] Keller, T.; Arvidsson, J. (2004): Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* 79, pp. 171–205
- [7] Schjønning, P. (1991): Soil mechanical properties of seven Danish soils. *Tidsskrift for Planteavl* 95, Report No. S2176, p. 458
- [8] Gregory, A. S. et al. (2006): Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil & Tillage Research* 89, pp. 45–57
- [9] Hartge, K. H.; Horn, R. (1984): Untersuchungen zur Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes bei der Setzung von Böden bei wiederholter Belastung. *Z. Acker-Pflanzenbau* 153, S. 200–207
- [10] Schjønning, P. (2011): Multiple regression equation to predict pre-compression stress from clay and pF. Aarhus University, Dänemark, unveröffentlicht
- [11] Arvidsson, J.; Keller, T. (2004): Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research* 77, pp. 85–95
- [12] Rücknagel, J. et al. (2007): Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil Tillage Res.* 92, pp. 213–220
- [13] Koolen, A. J.; Kuipers, H. (1983): *Agricultural Soil Mechanics*. Berlin, Springer-Verlag
- [14] Cavalieri, K. M.V. et al. (2008): Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil & Tillage Research* 98, pp. 17–26
- [15] Keller, T. et al. (2012): In Situ Subsoil Stress-Strain Behavior in Relation to Soil Precompression Stress. *Soil Science* 177, pp. 490–497
- [16] Söhne, W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik* 5, S. 49–63
- [17] Hammel, K. (1994): Soil stress distribution under lugged tires. *Soil & Tillage Research* 32, pp. 163–181
- [18] Keller, T. et al. (2014): Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil & Tillage Research* 140, pp. 106–117
- [19] Keller, T. (2005): A model for prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily-available tyre parameters. *Biosystems Engineering* 92, pp. 85–96

- [20] Lamandé, M.; Schjønning, P. (2008): The ability of agricultural tyres to distribute the wheel load at the soil–tyre interface. *Journal of Terramechanics* 45, pp. 109–120
- [21] Schjønning, P. et al. (2008): Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosystems Engineering* 99, pp. 119–133
- [22] Schjønning, P. et al. (2014): Tyre-soil contact area and distribution of the vertical stress component: predictions based on tyre characteristics. *Soil & Tillage Research*, eingereicht
- [23] Landis, M. (2011): Tabelle mit den Abmessungen der getesteten Traktoren. Forschungsanstalt Agroscope Standort Tänikon, Schweiz. Persönliche Mitteilung. Testberichte abrufbar unter: www.traktorentest.ch, Zugriff am 15.5.2014
- [24] Boussinesq, J. (1885): *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Paris, Gauthier-Villars
- [25] Fröhlich, O. K. (1934): *Druckverteilung im Baugrunde*. Wien, Springer Verlag

Autoren

Dipl.-Ing. Agr. Matthias Stettler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter Agrartechnik an der Fachhochschule Bern, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, 3052 Zollikofen, Schweiz, E-Mail: matt.stettler@bfh.ch

Dr. Thomas Keller und **Dr. Peter Weisskopf** sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Gruppe Bodenfruchtbarkeit/Bodenschutz an der Forschungsanstalt Agroscope, Standort Reckenholz, Schweiz

Per Schjønning, **Dr. Mathieu Lamandé** und **Poul Lassen** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Forschungszentrum Foulum, Aarhus University, Dänemark

Danksagung und Hinweise

Wir danken dem Schweizerischen Bundesamt für Landwirtschaft BLW und der Ministry of Food, Agriculture and Fisheries in Dänemark für die finanzielle Unterstützung.

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2013, Hannover, 8.–9. November 2013, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2193, S. 197–204).