

## Om Terranimo®

### 1. Vad är Terranimo® och vad kan Terranimo® användas till?

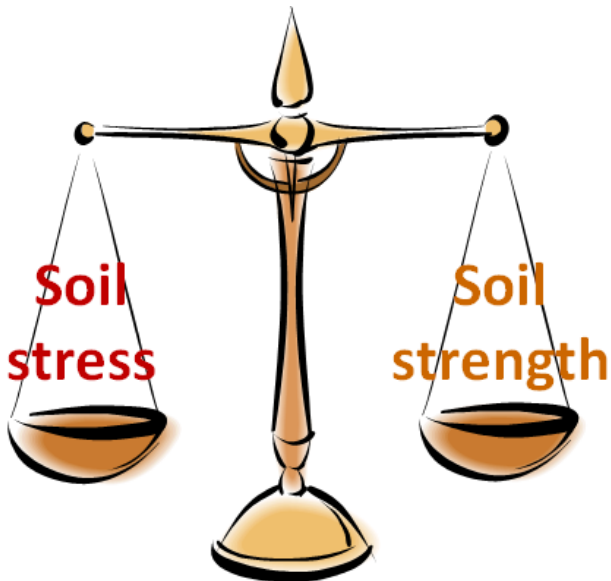
Terranimo® är en modell för att uppskatta risken för markpackning orsakad av lantbruksmaskiner. Terranimo riktar sig framförallt till lantbrukare, maskinstationer och rådgivare, men även tillsynsmyndigheter. Simuleringsmodellen beräknar risken för markpackning utifrån maskinegenskaper och markförhållanden. Modellen är ett hjälpmedel som kan användas för att planera olika arbetsmoment och anpassa användandet av jordbruksmaskiner för att undvika skador på markstrukturen. Modellen lämpar sig även för att jämföra markpackningsrisken för olika maskiner, olika hjulkonfigurationer eller olika däck, och kan därför vara ett hjälpmedel vid t.ex. maskininköp.

### 2. Människorna bakom Terranimo®

Terranimo® är framtagen av en internationell forskargrupp som består av Thomas Keller (SLU Uppsala), Matthias Stettler (Högskolan för jordbruks-, skogsbruks-, och livsmedelsvetenskap, HAFL, Schweiz), och Per Schjønning, Mathieu Lamandé och Poul Lassen (Aarhus universitet, Danmark).

### 3. Idén bakom Terranimo®

Terranimo® baseras på en enkel och välkänd princip (figur 1): den jämför trycket som utövas av en jordbruksmaskin (tryck i marken) med markens resistens mot kompaktering (hållfasthet).



Figur 1: Terranimo® baseras på principen om balansen mellan marktryck och markens hållfasthet.

Om markens hållfasthet är större än det utövade trycket så sker ingen permanent kompaktering av marken. Om däremot hållfastheten är lägre än trycket så kommer marken att kompakteras, och under dessa förhållanden bör man helst avstå från att köra över marken.

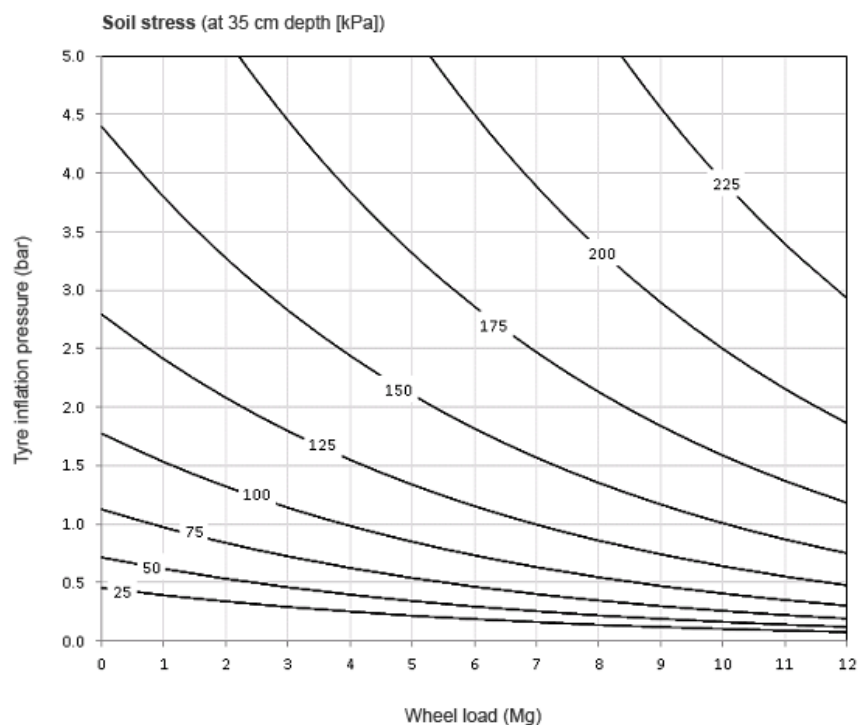
Modellen finns i två versioner, anpassade för olika användare: Terranimo<sup>®</sup> light för en enkel och snabb bedömning av risken för markpackning, och Terranimo<sup>®</sup> expert för en detaljerad analys av risken för markpackning under specifika förhållanden.

#### 4. Terranimo<sup>®</sup> light: riskbedömning på ett enkelt sätt

Terranimo<sup>®</sup> light använder fyra parametrar för att snabbt bedöma risken för markpackning: hjullast, ringtryck, samt markfuktighet och jordens lerhalt.

Hjullast och ringtryck används för att beräkna trycket i alven vid ett djup av 35 cm. Det valda djupet rättfärdigas med alvens känslighet för markpackning då markstrukturen är svår att återställa i alven.

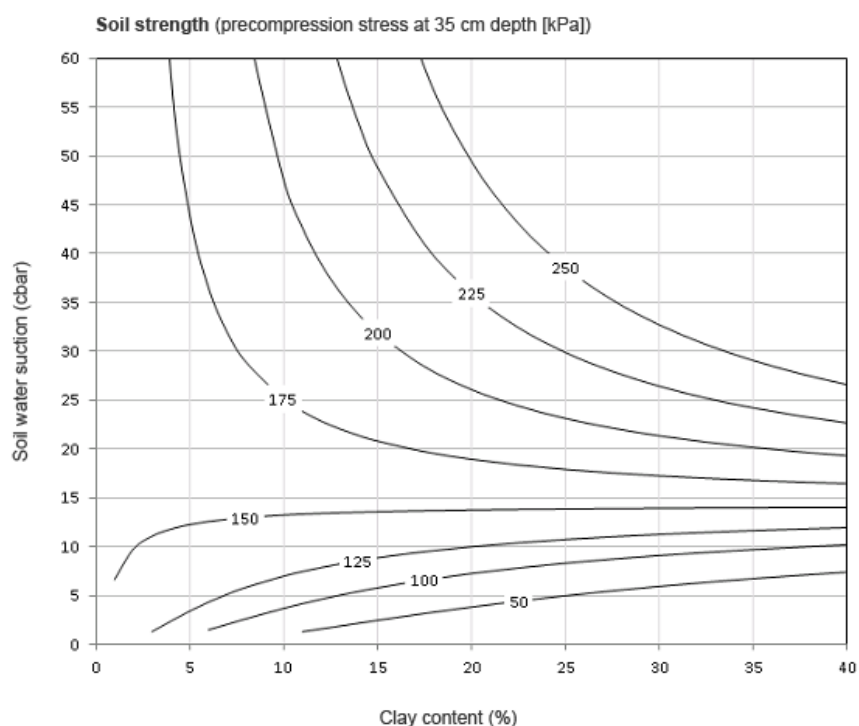
Formeln som beräknar marktrycket har tagits fram från tryckmätningar i fält med olika belastning som utförts i Danmark (Schjønning et al., 2012). I dessa tester användes olika typer av däck med olika hjullast och ringtryck. Resultaten visade att trycket i marken på ett visst djup kan beräknas som funktion av hjullast och ringtryck, oberoende av tillverkare eller typ av däck. Nomogrammet i figur 2 visar hur marktrycket på 35 cm djup (representerade av isolinjer) varierar för olika hjullast och ringtryck.



Figur 2: Marktrycksnomogram (modifierad från Schjønning et al., 2012). Isolinjerna visar trycket vid 35 cm djup som en funktion av hjullast och ringtryck.

Markens hållfasthet kan uppskattas från markens bindningstryck, ett mått av markfuktighet, och lerhalten. Funktionen för beräkning av hållfastheten togs fram genom markkompressionstester i laboratorium (s.k. odometertest) genomförda i Danmark på ca 500 jordprover. Jordproven testades för minst tre olika bindningstryck (5, 10 och 30 cbar), och deras lerhalt varierade mellan 5 och 18%. Nomogrammet över hållfastheten (figur 3) visar markens hållfasthet

(”förkonsolideringstryck”) som funktion av markens bindningstryck och lerhalt. Effekten av markens bindningstryck på markmotståndet varierar, beroende av jordens lerhalt. Under fuktiga förhållanden (bindningstryck < 10 cbar), är lätta jordar (dvs. låga lerhalter) mer stabila än styva jordar. När jorden torkar upp ökar dock inte markens hållfasthet lika mycket hos lättjordarna som hos styvjordarna. Runt fältkapacitet (bindningstryck  $\cong$  10 cbar) har lerhalten inte någon större påverkan på markens hållfasthet. Detta bekräftades också genom ödometertester utförda i Sverige och Schweiz.



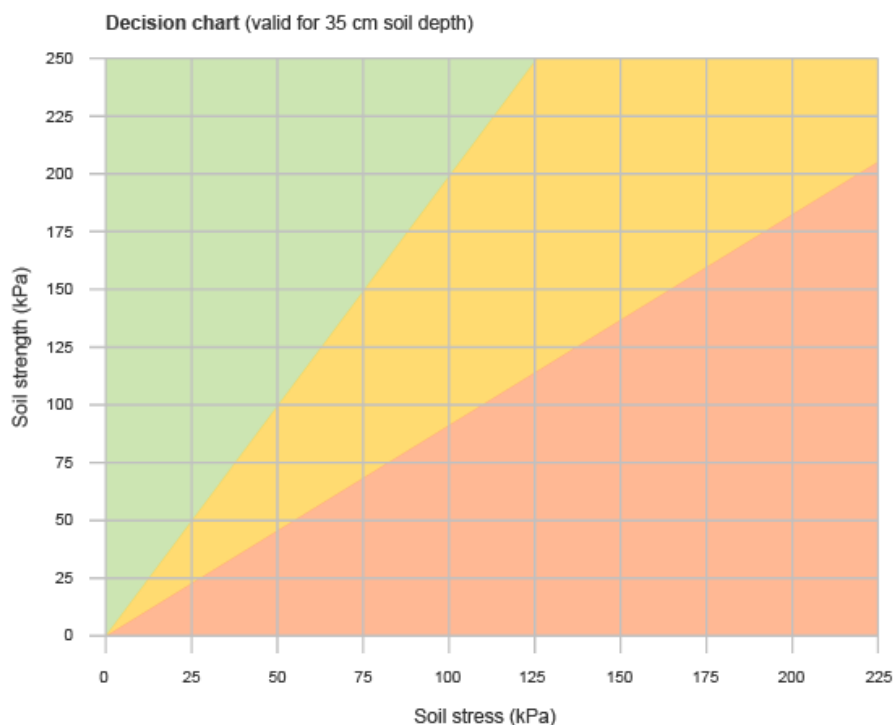
**Figur 3: Markmotståndsnomogram (modifierat från Schjønning, opublicerad). Isolinjerna visar markens hållfasthet (”förkonsolideringstryck”) vid 35 cm djup som en funktion av lerhalt och bindningstryck.**

I Terranimo<sup>®</sup> light jämförs det beräknade marktrycket med markens hållfasthet i ett trefärgat diagram (figur 4) som indikerar risken för markpackning. Den faktiska kompakteringsrisken tillskrivs en av tre risknivåer, grön, gul eller röd.

- **Grön:** ingen risk för markpackning. Marken kommer inte att skadas av att man kör med den valda utrustningen under de givna markförhållandena.
- **Gul:** det gula området indikerar det kritiska övergångsområdet med en betydande risk för markpackning. I detta fall behövs vetskap om ytterligare markegenskaper för en mer precis riskbedömning. Till exempel kommer risken att minska för steniga jordar (>10% sten i alven) och för jordar med god markstruktur (tack vare t.ex. konserverande jordbearbetning, rikligt med rötter, hög humushalt eller kalkrik jord). Hamnar man inom det gula området bör alla tillgängliga åtgärder för att minska trycket genomföras, så som minskning av ringtryck (kolla däcktillverkarens ringtryckstabell vid justering av ringtrycket), köra med halvfull gödseltank, bara fylla halva lastutrymmet vid skörd, eller sätta på dubbelmontage. Effekten av de genomförda åtgärderna kan bekräftas med hjälp av diagrammet efter lämplig justering av data.
- **Röd:** det röda området i diagrammet visar kombinationer av hållfasthet och tryck där en permanent komprimering av alven kan förväntas. Kör inte vid dessa tillfällen om inga

förebyggande åtgärder vidtagits som kan få risknivån att gå tillbaka till det gula området (till exempel minskad hjullast eller ringtryck).

Vid den grön-gula gränsen råder ett tryck av 50% av hållfastheten. Enligt dagens kunskap representerar detta övergången mellan elastsik (reversibel deformation utan permanent skada) och plastisk (icke-reversibel) deformation av marken, dvs. permanent komprimering (Keller et al. 2012). Vid den gul-röda gränsen råder ett tryck av 110% av hållfastheten. Inom det röda området råder en betydande risk för plastisk deformation, och därmed permanent, skadlig komprimering,



**Figur 4: Diagram över marktryck och hållfasthet som det presenteras i Terranimo® light, vilket klassificerar risken för markpackning i tre nivåer (grön, gul och röd).**

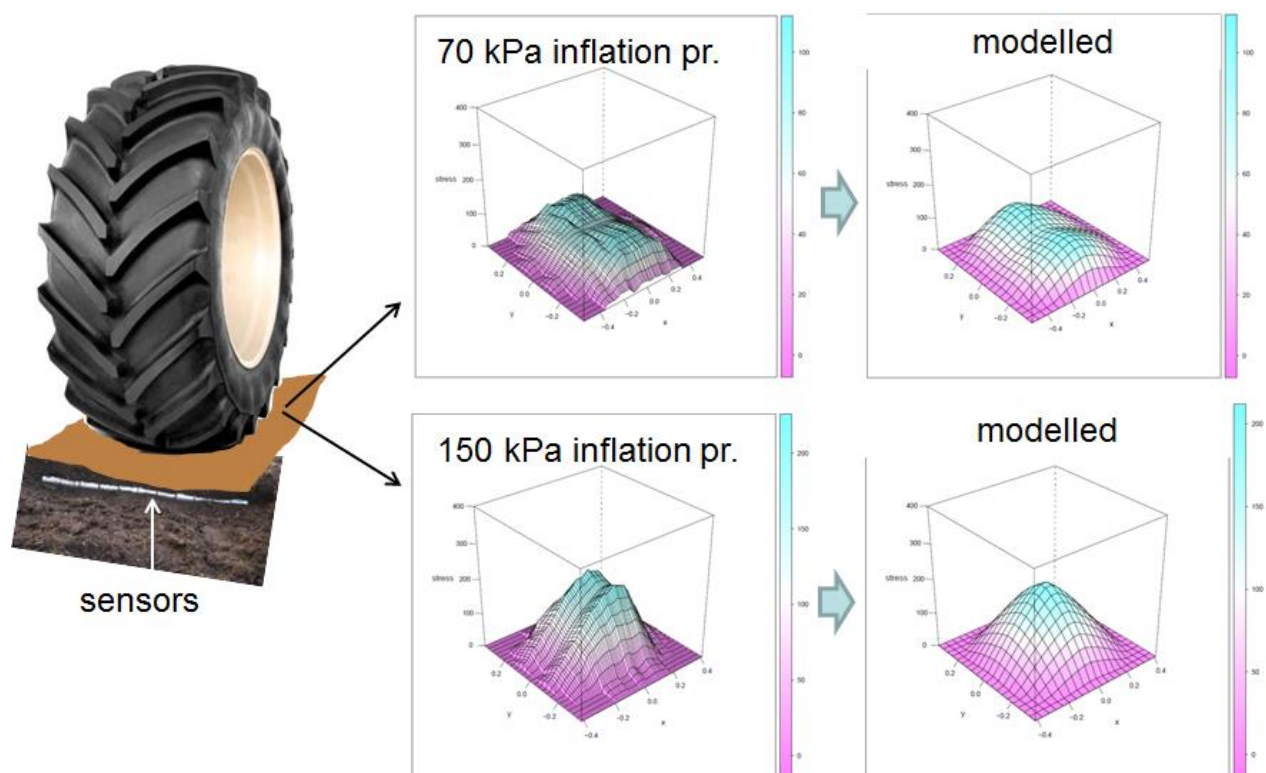
### **5. Terranimo® expert: en detaljerad analys av risken för markpackning under specifika förhållanden**

Terranimo® expert är mer komplex än Terranimo® light och är framtaget som ett verktyg för specialister för att studera specifika körsituationer. Terranimo® expert består av fyra submodeller:

- (1) Uppskattning av kontaktyta och tryckfördelning mellan däck/band och mark
- (2) Tryckutbredning i marken
- (3) Beräkning av markens hållfasthet
- (4) Bedömning av risken för markpackning, baserad på det beräknade trycket och den beräknade hållfastheten.

Kontaktytan mellan däck och mark och tryckfördelningen i kontaktytan bestäms med hjälp av FRIDA modellen (Schjønning et al., 2008), som är baserad på en modell framtagen från ett stort antal tryckmätningar i Sverige (Keller, 2005). Däckets anliggningsyta utgörs av en superelips och tryckfördelningen av en kombinerad exponentiell (vinkelrät mot körriktningen) och en potensfunktion (i körriktningen). FRIDA har utvecklats utifrån fältmätningar av tryck direkt

under markytan som utfördes för ett relativt stort antal olika kombinationer av däck, hjullast och ringtryck. Modell har förmåga att beskriver den verkliga situationen i fält väl, och återger effekten av ringtrycket väl (figur 5).



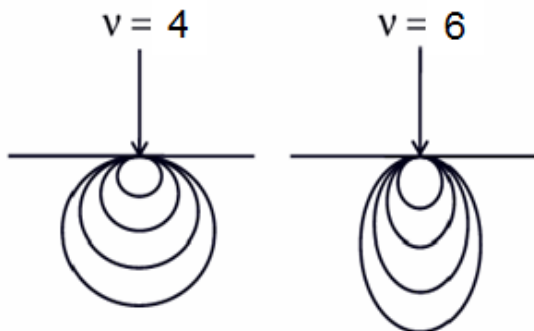
**Figur 5: Diagram över tryckfördelning mellan däck och mark för två olika ringtryck: uppmätt (vänster) och modellerat med FRIDA (höger). Däck som användes i detta exempel: Michelin MultiBib 650/65R38 med 3.5 ton hjullast.**

För att kunna använda FRIDA med andra däck än dem som testats utvecklades funktioner för att beräkna de olika modellparametrarna från däckdimensioner, ringtryck och hjullast. Det är därför möjligt att uppskatta kontaktytan mellan däck och mark samt tryckfördelningen för alla däcktyper genom att använda lättillgänglig data för däck (bredd, diameter och tillverkarens rekommenderade samt effektivt ringtryck), hjullast och matjordens textur och fuktighet.

För att förenkla inmatningen av däckdata lades en databank av de vanligaste däcken till i Terranimo<sup>®</sup>. Databasen innehåller över 1000 däck, listade med alla sina tekniska specifikationer enligt ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organisation), från flertalet tillverkare (Alliance, Continental, Goodyear, Kléber, Michelin, Nokian, Trelleborg and Vredestein).

Nyligen utökades maskinparken i Terranimo<sup>®</sup> expert med bandfordon, dvs. bandtraktorer och tröskor med bandställ. Kontaktytan mellan band och mark och tryckfördelningen i kontaktytan uppskattas från bandställets egenskaper och dess belastning med hjälp av ekvationer baserade på tryckmätningar under bandställ (Keller & Arvidsson, 2016).

Tryckutbredningen i marken beräknas semi-analytiskt i Terranimo<sup>®</sup>, baserat på formler av Boussinesq (1885), Fröhlich (1934) and Söhne (1953). En viktig faktor i denna teori är koncentrationsfaktorn  $\nu$ , vilken bestämmer formen för tryckfördelningen i marken (figur 6).



**Figur 6: Formen för tryckfördelning i marken för olika koncentrationsfaktorer  $\nu$ .**

Faktorn  $\nu$  varierar beroende på markens hållfasthet (Söhne, 1953), något som tas i beaktning i Terranimo<sup>®</sup> expert. För blöta jordar är  $\nu = 6$ , för hårda (torra) jordar är  $\nu = 4$ , och för fuktiga jordar är  $\nu = 5$ .

I Terranimo<sup>®</sup> expert beräknas markens hållfasthet på samma sätt som i light-versionen, och även här presenteras den korresponderande kompakteringsrisken i form av ett trefärgat diagram. I Terranimo<sup>®</sup> expert får man även ett diagram över tryckfördelningen mellan däck och mark samt i markprofilen ("lökdiagram" som i figur 6). Denna information gör det möjligt att uppskatta risken för markpackning längs hela markprofilen, och inte bara på 35 cm djup som i Terranimo<sup>®</sup> light.

## Referenser

- Boussinesq J. 1885. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Gauthier-Villars, Paris, 30 pp.
- Fröhlich O.K. 1934. Druckverteilung im Baugrunde. Springer Verlag, Wien, 178 pp.
- 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, 85-96.
- Keller T. & Arvidsson J. 2016. A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles. Soil & Tillage Research, 155, 116-123.
- Keller T., Arvidsson J., Schjønning P., Lamandé M., Stettler M. & Weisskopf P. 2012. In situ subsoil stress-strain behavior in relation to soil precompression stress. Soil Science, 177(8), 490-497.
- Schjønning, P., Lamandé M., Tøgersen F.A., Arvidsson J. & Keller T. 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. Biosystems Engineering 99, 119-133.
- Schjønning P., Lamandé M., Keller T., Pedersen J. & Stettler M. 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. Soil Use and Management, 28(3), 378-393.
- Söhne W. 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik 5, 49-63.