Terranimo - risicotool bodemverdichting, versie Nederland

Handleiding en achtergronden

G. Bakema en J.J.H. van den Akker

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Terranimo - risicotool bodemverdichting, versie Nederland

Handleiding en achtergronden

G. Bakema en J.J.H. van den Akker

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'Slim Landgebruik' naam' (projectnummer BO-53-002-024).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, februari 2021

Gereviewd door:
Marius Heinen, Wetenschappelijk onderzoeker bodemfysica

Akkoord voor publicatie:
Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van BWL

Rapport 3063
ISSN 1566-7197

Bakema, G. en J.J.H. van den Akker, 2021. *Terranimo - risicotool bodemverdichting, versie Nederland; Handleiding en achtergronden*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3063. 40 blz.; 23 fig.; 10 tab.; 23 ref.

Terranimo is een risico-beoordelingstool waarbij de verticale spanningen in de bodem die ontstaan door wielbelasting worden vergeleken met de sterkte van de bodem. Het model geeft aan welke risico's er verbonden zijn aan het op een bepaald moment uitvoeren van specifieke grondbewerking of transportbeweging. In dit rapport wordt beschreven hoe de tool gebruikt kan worden en welke wetenschappelijke basis eraan ten grondslag ligt.

Terranimo is a risk assessment tool that compares the vertical stresses in the ground caused by wheel load with the strength of the ground. The model indicates which risks are associated with carrying out specific land cultivation or transport movement at a particular time. This report describes how the tool can be used and the scientific basis on which it is based.

Trefwoorden: bodemverdichting, risicobeoordeling, Terranimo, Staringreeks, grondmechanica

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/542087> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2021 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001. Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3063 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Guido Bakema

Inhoud

	Verantwoording	5
	Woord vooraf	7
	Samenvatting	9
1	Inleiding	11
2	Handleiding Terranimo	12
	2.1 Ontwikkeling van Terranimo	12
	2.2 Nederlandse versie van Terranimo	12
	2.3 Algemene interface	12
	2.4 Benodigde input	13
	2.4.1 Machine en bandentype	13
	2.4.2 Bodemopbouw en vochttoestand	14
	2.5 De resultaten	15
	2.5.1 Contactdruk	15
	2.5.2 Spanningen in de bodem en bodemsterktes	17
	2.5.3 Risicoanalyse bodemverdichting	18
3	Werken met Terranimo: voorbeeldcases	20
	3.1 Een referentiesituatie	20
	3.2 De invloed van vochttoestand	21
	3.3 De invloed van wiellast en bandenspanning	22
4	De theoretische achtergrond van Terranimo	24
	4.1 Algemeen	24
	4.2 Bodemsterkte	25
	4.2.1 Precompressiesterkte	25
	4.2.2 Nederlandse bodemdata	26
	4.2.3 Nederlandse vochtgehalte- en vochtspanningsdata	27
	4.3 Spanningen op het grensvlak band-bodem	29
	4.4 Spanningsberekeningen in de ondergrond	32
	4.5 Risicobeoordeling	34
	4.6 Beperkingen van de tool	35
	4.6.1 Simplificaties van het model	36
	4.6.2 Beperkte toepasbaarheid veengronden	36
	4.6.3 Beperkingen nauwkeurigheid invoerparameters	36
	4.6.4 Beoordeling resultaten	37
	Literatuur	38

Verantwoording

Rapport: 3063

Projectnummer: 520004621

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord Referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Wetenschappelijk onderzoeker bodemfysica

naam: Marius Heinen

datum: 23 januari 2021

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 2 februari 2021

Woord vooraf

In de Kamerbrief over de bodemstrategie van 23 mei 2018 schetst minister Schouten het (streef)beeld dat in 2030 alle landbouwbodems duurzaam worden beheerd. Een aantal belangrijke (keten)partijen zijn samen opgetrokken om hier in de praktijk een grote slag in te maken. De betrokken partijen Cosun Beet Company met Sensus, IRS, CUMELA, LTO Nederland en Fedecom hebben dit thema gezamenlijk aangepakt, met als doel een halt toe te roepen aan een verdere verdichting van de ondergrond (30-60 cm -mv). Dit doen ze in een onderzoeksproject binnen het programma 'Slim Landgebruik'. Het doel is a) het ontwikkelen en implementeren van tools en *best practices* voor bodembeoordeling, b) techniekbeoordeling en rooiaanpak in de bietenteelt en c) om de prestatie van een brede groep telers op een hoger niveau te krijgen en zo de risico's op ontstaan van en mate van bodemverdichting bij de bietenteelt te beperken. De combinatie van acties zal bewustwording creëren en handelingsperspectief bieden die telers voldoende handvatten geeft voor implementatie en realisatie van duurzaam bodembeheer.

In dit onderzoek is een Nederlandse versie van het mede door Deense onderzoekers ontwikkelde bodemverdichtingsrisicotool 'Terranimo' gemaakt. Hierin zijn o.a. specifieke Nederlandse bodem- en bodemvochtsituaties en specifieke machines voor het rooien van bieten opgenomen. Het Terranimo-model en ook de Nederlandse versie worden beheerd door Aarhus University. Zij dragen ook de verantwoordelijkheid voor het onderhoud en de verdere ontwikkelen. De komende jaren zal Terranimo door de Denen worden doorontwikkeld. De verwachting is dat WENR via andere onderzoeksprogramma's de Nederlandse versie van Terranimo verder kan optimaliseren door het toevoegen van nauwkeuriger bodemsterkte-, bodemtextuur- en bodemvochtdata.

Samenvatting

Bodemverdichting is een van de belangrijkste bedreigingen voor een gezonde bodem. Veel bodems kampen met verdichting door het gebruik van zware machines en intensieve bewerking. Verdichting zorgt voor een verslechtering van bodemeigenschappen zoals de spons- en bufferwerking van water en kan leiden tot slechtere doorworteling. Een deel van de bodemverdichting kan worden opgeheven door natuurlijke processen, zoals het krimpen en zwellen van kleigronden, en door het telen van diep wortelende gewassen. Naast het opheffen zal er meer aandacht moeten zijn voor het voorkómen van bodemverdichting. Een van de belangrijkste onderdelen daarvan is dat voorkomen wordt dat er met te zware machines onder te natte omstandigheden wordt gewerkt. Al sinds de jaren negentig van de vorige eeuw zijn er algemene vuistregels ten aanzien van maximale bandenspanning en wiellast. Deze vuistregels gaan voorbij aan specifieke bodem- en vochtcondities en zijn ook niet gespecificeerd voor diverse landbouwvoertuigen. Met het internationaal ontwikkelde model Terranimo kan een betere risico-inschatting op bodemverdichting worden gemaakt voor specifieke omstandigheden. Zo kan het model helpen bij het identificeren van de 'zwakste punten' in een specifiek landbouwbewerkingssysteem. Daarnaast kan het potentiële voordeel van het gebruik van bredere of lagedrukbanden of machines met meer assen et cetera worden gekwantificeerd. In 2020 is er een Nederlandse versie van Terranimo ontwikkeld, waaraan met name specifieke bodem- en vochtcondities zijn toegevoegd.

Terranimo is een risico-beoordelingstool waarbij de verticale spanningen in de bodem die ontstaan door wielbelasting worden vergeleken met de sterkte van de bodem. Het model geeft aan welke risico's er verbonden zijn aan het op een bepaald moment uitvoeren van specifieke grondbewerking of transportbeweging. Het model geeft een risicobeoordeling op bodemverdichting, maar geeft niet aan wat de gevolgen zijn voor de waterhuishouding of plantontwikkeling.

In deze handleiding wordt toegelicht hoe men Terranimo kan gebruiken, welke invoergegevens er nodig zijn en hoe de resultaten kunnen worden beoordeeld (hoofdstuk 2). Om het gebruik verder te illustreren, wordt een aantal specifieke cases besproken (hoofdstuk 3). Ten slotte wordt inzicht gegeven in de wetenschappelijke basis die ten grondslag ligt aan het model en de beperkingen ten aanzien van het gebruik (hoofdstuk 4).

Terranimo is een gebruikersvriendelijke tool waar met een relatief beperkte hoeveelheid bodem- en vochtdata een inschatting van de risico's kan worden gemaakt. De belangrijkste beperkingen van het model zijn de versimpeling van het grondmechanische proces, de onzekerheid van de bodem- en vochtcondities en het feit dat een risico niet een directe link legt met schade. De verwachting is dat door het toevoegen van andere grondmechanische processen (o.a. schuifspanning) en de koppeling met bodemvochtmodellen (SWAP) de tool de komende jaren een nog beter beeld geeft van het risico op bodemverdichting.

1 Inleiding

Bodemverdichting is een van de belangrijkste bedreigingen voor een gezonde bodem. Veel bodems kampen met verdichting door het gebruik van zware machines en intensieve bewerking. Verdichting zorgt voor een afname van bodemeigenschappen, zoals de spons- en bufferwerking van water. Hierdoor vindt er een versnelde oppervlakkige afvoer bij heftige buien plaats, kunnen planten niet goed wortelen en wordt nalevering van water aan planten door het grondwater in droge periodes beperkt. Door verdichting verminderen de productiviteit en biologische activiteit van de bodem en treden verliezen op van nutriënten en agrochemicaliën, met een verhoogde kans op afspoeling naar het oppervlaktewater. Door toename van de mechanisatie en intensivering van het landgebruik is bodemverdichting een proces dat voortduurt, verergert en verdiept. De economische schade nu en in de toekomst wordt steeds groter. Op basis van divers nationaal en internationaal onderzoek kan worden geconcludeerd dat ondergrondverdichting minstens 10% opbrengst kost en dat dit in droge of natte jaren sterk kan oplopen, tot wel 40% (Bakema en Van den Akker, 2021).

Een deel van de bodemverdichting kan worden opgeheven door natuurlijke processen, zoals het krimpen en zwellen van kleigronden en het telen van diep wortelende gewassen. Ook zijn er mogelijkheden om door woelen, diepploegen of het boren van gaten de verdichte lagen open te breken. Van deze mechanische methoden is bekend dat ze slechts gedurende een beperkt aantal jaren effect hebben. Naast het opheffen, zal er meer aandacht moeten zijn voor het voorkómen van bodemverdichting. Een van de belangrijkste onderdelen daarvan is dat voorkomen wordt dat er met te zware machines onder te natte omstandigheden wordt gewerkt. Al sinds de jaren negentig van de vorige eeuw zijn er algemene vuistregels ten aanzien van maximale bandenspanning en wiellast. Deze vuistregels gaan voorbij aan specifieke bodem- en vochtcondities en zijn ook niet gespecificeerd voor diverse landbouwvoertuigen. Met de komst van het internationaal ontwikkelde model Terranimo kan een betere risico-inschatting op bodemverdichting worden gemaakt voor specifieke omstandigheden. Zo kan het model helpen bij het identificeren van de 'zwakste punten' in een specifiek landbouwbewerkingssysteem. Daarnaast kan het potentiële voordeel van het gebruik van bredere, lagedrukbanden of machines met meer assen et cetera worden gekwantificeerd.

In 2020 is er een Nederlandse versie op de markt gekomen. In deze handleiding wordt toegelicht hoe men Terranimo kan gebruiken, welke invoergegevens er nodig zijn en hoe de resultaten kunnen worden beoordeeld (hoofdstuk 2). Om het gebruik verder te illustreren, wordt een aantal specifieke cases besproken (hoofdstuk 3). Ten slotte wordt inzicht gegeven in de wetenschappelijke basis die ten grondslag ligt aan het model en de beperkingen ten aanzien van het gebruik (hoofdstuk 4).

Terranimo is een model dat nog steeds in ontwikkeling is. Er worden steeds meer specifieke landbouwvoertuigen en bodem- en vochtcondities aan toegevoegd.

2 Handleiding Terranimo

2.1 Ontwikkeling van Terranimo

Terranimo is een risico-beoordelingstool waarbij de verticale spanningen in de bodem als gevolg van wielbelasting worden vergeleken met de sterkte van de bodem. Het model geeft aan welke risico's er verbonden zijn aan het op een bepaald moment uitvoeren van specifieke landbewerking of transportbeweging. Het model geeft een risicobeoordeling op bodemverdichting, maar geeft niet aan wat de gevolgen zijn voor de waterhuishouding of plantontwikkeling. Het model rekent voor een bodemprofiel (0-150 cm -mv) uit op welk punt de spanningen in de bodem groter zijn dan de bodemsterkte. Op dat punt gaat de samendrukking van de bodem van een elastische (tijdelijke) status over naar een meer plastische (permanente) status. Een plastisch vervormde bodem herstelt zich niet meer na het verwijderen van de belasting.

Terranimo is ontwikkeld binnen het onderzoeksprogramma PredICTor door een groep internationale experts uit Denemarken, Zweden, Zwitserland, Finland, Nederland en Duitsland (Schjønning et al., 2020). Er zijn op dit moment zeven landenversies. De werking van de versies is identiek, maar ze verschillen per land wat betreft bodemparameters, vochtcondities en beschikbare landbouwvoertuigen.

De toegang tot het programma gaat via de webportal www.terranimo.dk of www.soilcompaction.eu; het programma wordt beheerd door de Terranimo Soil Compaction Group. Contactpersonen zijn: Per Schjønning, Mathieu Lamandé en Poul Lassen.

2.2 Nederlandse versie van Terranimo

In 2020 is een Nederlandse versie van Terranimo ontwikkeld. Ten opzichte van de internationale versie zijn de volgende aanpassingen gemaakt:

- Bodem. Er zijn bodemfysische kenmerken van typische Nederlandse gronden toegevoegd. Er wordt daarbij gebruikgemaakt van bodemfysische bouwstenen van de Staringreeks (zie paragraaf 4.2.2).
- Vochtspanning en vochtgehalte. Er zijn specifieke Nederlandse vochtsituaties toegevoegd. Van deze vochtsituaties wordt met behulp van de bodemfysische relaties de vochtspanning uitgerekend (of visa versa: van vochtspanning naar vochtgehalte; zie paragraaf 4.2.3).
- Landbouwvoertuigen. Er zijn specifieke kenmerken toegevoegd van landbouwvoertuigen die bij de teelt en oogst van suikerbieten worden gebruikt. Dit zijn bietenrooier met rupsen, meer-assige bietenladers en bietenrooiers met versmalde wielbasis (hondegang).

Terranimo en de Nederlandse versie zijn niet uitontwikkeld. De komende jaren wordt verder gewerkt aan het verbeteren van het model en de te gebruiken invoerparameters (zie paragraaf 4.6).

2.3 Algemene interface

Terranimo kan gebruikt worden zonder specifieke login. Dit betekent wel dat na het verlaten van het programma alle invoer- en uitvoerdata zijn verdwenen. Om dit te voorkomen, moet er gebruikgemaakt worden van de login-optie (Figuur 1). Een account kan worden aangevraagd bij Poul Lassen (poul.lassen@agro.au.dk).

Het programma maakt gebruik van vier tabbladen: twee voor de invoergegevens (Kies een machine en Beschrijf locatie) en twee voor de resultaten (Contactdruk en Profiel van bodemsterkte en grondspanning). De standaard set-up gaat uit van een combinatie trekker-mestinjecteur, een standaard bodem (lichte zavel) en een vochtige vochtconditie ($pF = 2$). Met deze standaardopties

kunnen direct de resultaten worden bekeken onder de tabbladen Resultaat. Door het wijzigen van voertuigen, bandentype (Kies machine), bodemopbouw en vochtspanning (Beschrijf locatie) kunnen andere situaties worden ingevoerd en worden doorgerekend, door het openen van de tabbladen met resultaten.

Figuur 1 Startscherm met de tab 'Kies een machine'.

2.4 Benodigde input

Terranimo is een eenvoudig te gebruiken programma waar een beperkt aantal gegevens voor nodig is. Door de beschikbaarheid van diverse databases op het gebied van landbouwvoertuigen, bandentypes, bodems en vochttoestanden kan de gebruiker snel diverse configuraties doorrekenen. Ook is het mogelijk met eigen gegevens over bandentype, bandenspanning, wiellast, bodemopbouw en vochtcondities het programma meer gebruikersspecifiek te maken. In de basis zijn de volgende specifieke invoergegevens nodig:

- De combinatie van landbouwvoertuigen;
- Het type band en de gehanteerde bandenspanning (en eventueel de wiellast);
- De bodemopbouw;
- De vochttoestand (al dan niet gemeten).

2.4.1 Machine en bandentype

Onder het tabblad 'Kies de machine' kan de configuratie van het landbouwvoertuig worden gekozen. Dit kan een trekker met aanhanger of een zelfrijdende combi zijn. Op basis van die selectie komt het programma met een wielconfiguratie. Van deze configuratie kan door het klikken op de as (blauwe kleur) voor elke as het aantal banden (twee of vier), de aandrijving (aangedreven of getrokken) en het bandentype worden aangepast (Figuur 2). Het programma heeft een database met een groot aantal verschillende banden. Op basis van de bandselectie en de wiellast berekent het programma de bandenspanning. Het resultaat van die berekening is de zien bij de groene driehoek, die de bandenspanning aangeeft bij een bewerking op het veld (maximaal 10 km/uur).

De bandenspanning en de wiellast kunnen zelf ook handmatig worden aangepast. Na selectie dienen de gekozen instellingen te worden bewaard.

Figuur 2 Tabblad 'kies de machine'. Type machine, bandselectie (per as), bandenspanningen (per as) en wiellast (per as). Blauw is de geselecteerde as.

2.4.2 Bodemopbouw en vochttoestand

Onder het tabblad 'Beschrijf de locatie' kunnen het type bodem, de grondbewerking en de vochtconditie in de bodem worden vastgelegd (Figuur 3). De bodemcondities kunnen op een drietal manieren worden ingevoerd:

- **Handmatig.** Indien op een locatie heel specifieke bodeminformatie bekend is, kan de textuur (kleigehalte, siltgehalte, zandgehalte, organische stof en droge bulkdichtheid) elke 10 cm handmatig worden ingevoerd.
- **Standaard bodemtypes.** In de meeste gevallen is geen detailinformatie beschikbaar en kan gebruikgemaakt worden van standaard bodems. De diverse standaard bodems zijn opgebouwd uit Staringreeks-bouwstenen (zie paragraaf 4.2.2). Er dient zowel een bovengrond als een ondergrond te worden geselecteerd. Ook dient aangegeven te worden hoe dik de bovengrond is (standaard 30 cm).
- **Bodemparameters via de bodemkaart.** Via een link met een GIS-bestand wordt de gebruiker geholpen bij het vinden van de boven- en ondergrond voor zijn specifieke locatie.

De bodemvochtconditie kan worden gedefinieerd door een vochtgehalte of een vochtspanning in te voeren. De relatie tussen het vochtgehalte en de vochtspanning wordt bepaald door standaard water-retentiecurves (zie paragraaf 4.2.3). Mochten er veldwaarnemingen voorhanden zijn, dan kunnen de gegevens handmatig (elke 10 cm) worden ingevoerd. Indien deze gegevens niet voorhanden zijn, dan kan gebruikgemaakt worden van een viertal standaard bodemvochtprofielen. Elk profiel vertegenwoordigt een specifieke bodemvochtsituatie: nat, vochtig, droog en extreem droog (zie paragraaf 4.2.3).

De sterkte van de grond wordt ook bepaald door de mate waarin de grond recentelijk is bewerkt. In het programma kan worden aangegeven of er recentelijk is geploegd. De standaardoptie is dat er geen recente bewerking heeft plaatsgevonden (zie paragraaf 4.3).

Home

Help / Introductie

maak een rapport

TERRANIMO® NETHERLANDS

Taal Nederlands (S) Inloggen

Kies een machine

Beschrijf locatie

Resultaten: Contactdruk

Resultaat: Profiel van bodemsterkte en grondspanning

Grondbewerking

☐ Ja (alleen voor recent geploegd land)
☒ Nee

Bodemtextuur

☒ Automatisch per bodemsoort
☐ Handmatige invoer bodemtextuur

Select top soil

B8 Matig lichte zavel

Select sub soil

O8 Zeer lichte zavel

Select top soil depth

30 cm

Bodemvocht

☒ Automatisch per vochtgehalte
☐ Handmatige invoer waterpotentiaal

Kies een vochtgehalte

Vochtig

bodemvocht profiel

☒ Waterpotentiaal
☐ Vochtgehalte

Nr.	Onderkant [cm]	Klei [%]	silt [%]	Zand [%]	Organische stofgehalte [%]	Dichtheid [g/cm³]
1	10	14,0	30,0	56,0	2,0	1,47
2	20	14,0	30,0	56,0	2,0	1,47
3	30	14,0	30,0	56,0	2,0	1,47
4	40	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
5	50	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
6	60	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
7	70	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
8	80	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
9	90	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
10	100	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
11	110	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
12	120	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
13	130	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
14	140	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58
15	150	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58

Nr.	Onderkant [cm]	Waterpotentiaal [hPa]
1	10	100
2	20	100
3	30	100
4	40	100
5	50	100
6	60	100
7	70	100
8	80	100
9	90	100
10	100	100
11	110	90
12	120	80
13	130	70
14	140	60
15	150	50

Figuur 3 Tabblad 'Beschrijf de locatie'. Type bodem, grondbewerking en vochttoestand.

2.5 De resultaten

De uitkomsten van het programma zijn de drukken die op het contactvlak band-bodem optreden, de spanningen die in de bodem optreden (tot 150 cm -mv), de sterkte van de bodem (tot 150 cm -mv) en een risico-inschatting op bodemverdichting.

2.5.1 Contactdruk

Op basis van de wiellasten en bandenspanningen, de sterkte van de toplaag (bepaald door bodem en vochtgehalte) en de mate van grondbewerking, wordt de druk op het contactvlak van band-bodem bepaald (zie paragraaf 4.3). Deze druk is input voor het bepalen van de spanningstoestand in het gehele bodemprofiel. Door het variëren met bandtype, bandenspanning en wiellast kan een beeld worden verkregen hoe effectief die veranderingen zijn in het verlagen van de contactdruk. De resultaten kunnen worden gepresenteerd als oppervlakte of als contour. Verder staat onderaan de figuur het berekende contactoppervlak, de gemiddelde en de maximale grondspanning (Figuur 4).

Figuur 4 Het contactvlak (m^2) de gemiddelde grondspanning (kPa) en de maximale grondspanning (kPa).

Met deze presentatievorm kan ook snel worden gezien wat de invloed is van andere banden of bandenspanning op de grondspanning. Het veranderen van de bandenspanning van de mestinjector van 1,2 bar (veldcondities 10 km/uur) naar 2,4 bar (wegcondities > 30 km/uur) geeft bijv. 30% meer grondspanning (Figuur 5).

Figuur 5 Het contactvlak (m^2) de gemiddelde grondspanning (kPa) en de maximale grondspanning (kPa) bij verhoging bandenspanning van 1,2 naar 2,4 bar (vergelijk Figuur 4).

2.5.2 Spanningen in de bodem en bodemsterktes

De resultaten van de berekende spanningen worden op een tweetal manieren gepresenteerd (tabblad 'Resultaat: Profiel van bodemsterkte en grondspanning'). In de eerste presentatie wordt per as aangegeven wat de bodemsterkte is (doorgetrokken lijn) en hoe die zich verhoudt tot de aangebrachte grondspanning (Figuur 6). De grondspanning wordt aangegeven als percentage van de bodemsterkte. Groen geeft een grondspanning die kleiner is dan 75% van de bodemsterkte, het gele gebied zit tussen de 75 en 125% van de bodemsterkte; het rode gebied geeft alles boven de 125% procent (zie paragraaf 4.5). In dit voorbeeld is te zien dat de grondspanningen in de toplaag veelal de bodemsterkte sterk overschrijden. Omdat deze verdichte laag door middel van de jaarlijkse grondbewerking en door krimpen en zwellen (klei), een hoger organische stofgehalte, wortels en bodemleven weer kan herstellen, wordt een verdichte bovengrond als tijdelijk en daarom als minder problematisch gezien. Bij de beoordeling zal de focus moeten liggen op het niet overschrijden van de bodemsterkte op de dieptes tussen de 0,25 en 0,5 m (zie de twee horizontale grijze lijnen), omdat de daar ontstane verdichting niet of zeer moeizaam kan worden opgeheven en een ernstige belemmering kan zijn voor beworteling en waterdoorlatendheid. Een verdichting onder de 0,5 m diepte kan als permanent worden beschouwd en moet daarom ook worden vermeden. In deze presentatievorm is het ook mogelijk om per as de bandenspanning en wielast aan te passen, waardoor snel inzichtelijk wordt wat daarvan de gevolgen zijn voor de grondspanning. Ten slotte is het mogelijk om aan te geven dat het effect van herhaalde belasting (het cumulatieve effect van twee of meer banden) op de sterkte van de bodem moet worden meegenomen (standaardoptie).

Figuur 6 Vergelijking tussen bodemsterkte en grondspanning voor de diverse assen.

In de tweede presentatievorm wordt de grondspanning per as in het verticale vlak weergegeven (Figuur 7). Hiermee wordt inzichtelijk tot welke diepte en in welke vorm een opgelegde spanning doorwerkt in de bodem. Door het variëren van de vochtcondities of de wiellasten wordt inzichtelijk welke invloed dit kan hebben op de spanningen in de bodem (zie paragraaf 4.4).

Figuur 7 Spanningsverdeling in de ondergrond (kPa) voor een specifieke as.

2.5.3 Risicoanalyse bodemverdichting

Naast de visuele rapportage heeft het programma ook de mogelijkheden om een rapport te genereren (zie linkerbovenhoek). In die rapportage worden per as in het centrum van de band de verticale grondspanningen weergegeven (Tabel 1).

Tabel 1 Berekende verticale grondspanningen (kPa) in het midden van het wiel (voorbeeld output file Terranimo).

As	bodemlaag [cm]														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Vooras	92	79	64	50	39	30	24	20	16	13	11	10	8	7	7
Achteras	210	193	166	137	112	91	74	61	51	43	37	32	27	24	23
Vooras	187	171	147	121	98	80	65	54	45	38	32	28	24	21	20
Middelste as	183	168	145	120	97	79	65	53	44	37	32	28	24	21	20
Achteras	181	166	143	119	97	78	64	53	44	37	32	27	24	21	20

Daarnaast wordt er een tabel gepresenteerd met de zogenaamde Bodem Verdichtingsindex (SCI Soil Compaction Index) (Vergelijking 1). De kleuren in de tabel komen overeen met de kleuren uit Figuur 6. Hierbij heeft de groene kleur een SCI lager dan -0,12, de gele kleurwaarden een waarde tussen de -0,12 en 0,1 en het rode gebied een waarde hoger dan 0,1 (Tabel 2). De SCI-waarde zou idealiter voor elke diepte lager moeten zijn dan -0,12. Waarden hoger dan 0,1 in de ondergrond dieper dan 30 cm betekenen een zeer hoog risico op permanente bodemverdichting (zie paragraaf 4.5).

$$SCI = \log\left(\frac{P_{act}}{P_c}\right)$$

Vergelijking 1 Bodemverdichtingsindex (SCI), P_{act} = actuele verticale grondspanning (kPa) en de P_c = bodemsterkte (kPa) (Schjønning en Lamandé, 2020).

Tabel 2 SCI (bodemverdichtingsindex) per as, rode waarden in lagen onder de 30 cm -mv moeten worden voorkomen (voorbeeld uit Terranimo-outputfile, Tabel 4)).

Tabel 4. Bodemverdichtingsindex (SCI)

As	bodemlaag [cm]														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Vooras	-0,05	-0,13	-0,23	-0,31	-0,41	-0,52	-0,62	-0,71	-0,79	-0,87	-0,92	-0,96	-0,99	-1,02	-1,00
Achteras	0,30	0,24	0,17	0,13	0,04	-0,04	-0,13	-0,22	-0,29	-0,37	-0,41	-0,45	-0,48	-0,50	-0,49
Vooras	0,29	0,22	0,15	0,08	-0,01	-0,10	-0,19	-0,27	-0,35	-0,42	-0,47	-0,51	-0,54	-0,56	-0,55
Middelste as	0,30	0,23	0,16	0,08	-0,01	-0,10	-0,19	-0,28	-0,35	-0,43	-0,47	-0,51	-0,54	-0,56	-0,55
Achteras	0,33	0,25	0,17	0,07	-0,02	-0,11	-0,19	-0,28	-0,36	-0,43	-0,48	-0,51	-0,54	-0,57	-0,55

De berekende bodemsterkte wordt weergegeven in Bijlage 2 van het rapport (Tabel 3).

Tabel 3 Berekende bodemsterkte per laag (kPa) (voorbeeld uit Terranimo-outputfile, appendix 2).

Appendix 2: Gedetailleerde informatie textuur en vochttoestand

bodemlaag [cm]	Klei [%]	silt [%]	Zand [%]	Organische stofgehalte [%]	Dichtheid, niet belaste grond [g/cm3]	Waterpotentiaal, niet belaste grond [hPa]	Bodemsterkte, niet belaste grond [kPa]
10	14,0	30,0	56,0	2,0	1,47	100	107
20	14,0	30,0	56,0	2,0	1,47	100	107
30	14,0	30,0	56,0	2,0	1,47	100	109
40	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	100	100
50	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	100	100
60	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	100	100
70	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	100	100
80	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	100	100
90	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	100	100
100	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	100	100
110	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	90	95
120	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	80	89
130	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	70	83
140	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	60	77
150	9,0	26,0	65,0	0,7	1,58	50	69

3 Werken met Terranimo: voorbeeldcases

3.1 Een referentiesituatie

Terranimo is een tool om het risico op bodemverdichting te bepalen van een bepaalde bewerking onder specifieke vochtcondities. Daarnaast kan Terranimo helpen om te begrijpen wat de invloed is van de aanpassing van de bewerking, de machine die daarbij wordt gebruikt, de bandenkeuze en gehanteerde bandenspanning en de condities waaronder gewerkt wordt. In dit hoofdstuk wordt een aantal voorbeelden gegeven. In de voorbeelden wordt een referentiesituatie vergeleken met een situatie met een aangepaste handeling. Deze handelingen zijn bijvoorbeeld het verlagen van de bandenspanning en/of wiellast of het wachten tot de grond droger is.

De volgende referentiesituatie is gehanteerd:

- Machine: zelfrijdende, drie-assige bietenrooier
- Bovengrondse bodem (0-30 cm): B8 (matig lichte zavel)
- Ondergrondse bodem (30-150 cm) O9 (matig lichte zavel)
- Vochttoestand: vochtig, vochtspanning -100 cm
- Banden, wiellast en bandenspanning (Tabel 4)

Tabel 4 Bandenkeuze en wiellast referentiesituatie.

As	Fabrikant	Bandencategorie	Bandafmeting	Wiellast (kg)	Bandenspanning (bar)
Vooras	Michelin	Aangedreven	800/70R38	9000	1,8
Middelste as	Michelin	Aangedreven	1050/50R32	11000	2,6
Achteras	Michelin	Aangedreven	1050/50R32	10000	2,1

De referentiesituatie geeft een hoog risico op bodemverdichting tot op 60 cm -mv (Figuur 8). In de onderstaande voorbeelden wordt gekeken hoe dit hoge risicoprofiel teruggebracht kan worden naar een gematigd risicoprofiel ($SCI < 0,1$) in het gebied tussen de 30 en 60 cm -mv.

Figuur 8 Bodemsterkte (groen, geel, rood) in referentiesituatie. Grondspanning (blauwe lijn) valt tussen 25-50 cm diepte volledig in de hoogste risicoklasse.

3.2 De invloed van vochttoestand

In dit voorbeeld wordt gekeken hoever een bodem moet opdrogen om het risico op bodemverdichting van hoog (rode kleur SCI > 0.1) naar gematigd (gele kleur SCI -0,12-0,1)) te verlagen in het gebied tussen de 30 en 60 cm -mv. De geschetste situatie gaat om het rooien van bieten in het najaar. In de eerste stap is gekeken wat het opdrogen van de bovengrond (0-30 cm) tot een vochtspanning van -300 cm voor effect heeft. Vervolgens is in een volgende berekening ook de ondergrond (30-60 cm) uitgedroogd tot een vochtspanning -200 cm. Het blijkt dat er, om het risico op ondergrondverdichting te verkleinen, nadrukkelijk gekeken moet worden naar het verlagen van de vochtspanning van de risicovolle laag (Tabel 5). Hoewel een meer uitgedroogde bovengrond zal leiden tot een betere berijdbaarheid, zal dit het risico op ondergrondverdichting onvoldoende verminderen. Uit een vergelijking van de referentie (Figuur 8) met een situatie met een droge grond (Figuur 9) blijkt dat een drogere grond het risico op verdichting van zowel boven- als ondergrond sterk doet verminderen.

Tabel 5 Invloed van verlaging vochtspanning op het risico op bodemverdichting van de ondergrond (middelste as).

	Bodemsterkte kPa	Grondspanning kPa	Verdichtingsindex
Referentiesituatie			
30 cm	109	205	0,28
60 cm	96	122	0,10
Vochtspanning bovengrond verlaagd			
30 cm	200	220	0,04
60 cm	96	126	0,11
Vochtspanning boven- en ondergrond verlaagd			
30 cm	200	220	0,04
60 cm	141	126	-0,05

Figuur 9 Bodemsterkte (groen, geel, rood) bij een droge grond. Grondspanning (blauwe lijn) valt tussen 25-50 cm diepte volledig in de middelste risicoklasse.

3.3 De invloed van wiellast en bandenspanning

In dit voorbeeld wordt gekeken hoever de wiellast (en daarmee ook de bandenspanning) moet worden verlaagd om het risico op bodemverdichting van hoog (rode kleur) naar medium (gele kleur) te verlagen in het gebied tussen de 30 en 60 cm -mv. Als in het model de wiellast wordt verlaagd, komt het model ook met een suggestie (groene driehoek, zie kader 'aanbevolen druk') om de bandenspanning te verlagen.

Om onder de geschetste vochtige conditie te kunnen rooien, zal de wiellast moeten worden beperkt tot 5.000 kg en zal de bandenspanning moeten worden verlaagd tot 1,2 bar (Tabel 6, Figuur 10). Door in die situatie de bandenspanning nog te verlagen tot het minimale niveau van 0,8 bar (opgave bandenleverancier) kan de grondspanning nog eens 15% worden verlaagd. Wat verder opvalt, is dat het verlagen van de wiellast meer tot verlaging van het risico op bodemverdichting voor de ondergrond (> 30 cm -mv) leidt dan het verlagen van de bandenspanning. Voor de bovengrond (0-30 cm) geldt dat bandenspanning verlagen belangrijker is om verdichting te voorkomen dan wiellastverlaging (zie ook Schjønning en Lamandé, 2018). Bij grotere wiellasten en grotere banden strekt de zone waarin lagere bandenspanningen effectiever zijn, zich tot dieper in de ondergrond uit. Een belangrijk voordeel van lage bandenspanningen is ook dat de spoordiepte sterk afneemt. In zijn algemeenheid is het aan te raden om in eerste instantie de maximale wiellast aan te passen en daarna de bandenspanning in te stellen op het door de bandenleverancier geadviseerde niveau. Wanneer het verlagen van wiellast lastig is, kan ervoor worden gekozen om eerst de bandenspanning sterk te verlagen.

Tabel 6 Invloed van verlaging wiellast (middelste as) op het risico op bodemverdichting van de ondergrond.

	Bodemsterkte kPa	Grondspanning kPa	Verdichtingsindex
Referentiesituatie (11.000 kg)			
30 cm	109	205	0,28
60 cm	96	122	0,10
Wiellast -25% (8.750 kg), bandenspanning 2,0 bar			
30 cm	109	190	0,24
60 cm	96	101	0,02
Wiellast -25% (8.750 kg), bandenspanning 1,2 bar			
30 cm	109	161	0,18
60 cm	96	91	-0,02
Wiellast -50% (5.500 kg), bandenspanning 1,2 bar			
30 cm	109	137	0,1
60 cm	96	70	-0,14
Wiellast -50% (5.500 kg), bandenspanning 0,8 bar			
30 cm	109	116	0,03
60 cm	96	63	-0,18

Resultaat: Profiel van bodemsterkte en grondspanning

☒ Vergelijk bodemsterkte en grondspanning ☐ Spanning

Vergelijk bodemsterkte en grondspanning

Figuur 10 Bodemsterkte (groen, geel, rood) en grondspanningen (blauwe lijn) na verlaging wiellast tot 5.000 kg en 1,2 bar bandenspanning. Grondspanning valt tussen 25-50 cm diepte volledig in de middelste risicoklasse.

4 De theoretische achtergrond van Terranimo

4.1 Algemeen

In de volgende paragrafen zal per onderdeel ingegaan worden op de algemene theoretische achtergronden. Die beschrijving zal de hoofdlijnen weergeven; voor meer details wordt verwezen naar wetenschappelijke publicaties.

Terranimo is opgebouwd uit invoerparameters, rekenmodules en uitvoerfiles (Figuur 11). De invoerparameters kunnen automatisch of handmatig worden ingevoerd (gele vlakken). Voor de Nederlandse versie is er (nog) geen koppeling voor automatische invoer met gegevens uit een simulatieprogramma (zoals SWAP) dat de vochtspanning (*soil water potential*) berekent op basis van bodeminformatie, waterretentiekenmerken, actuele vochttoestand en voorspelde vochttoestand. Vooralsnog kan in de Nederlandse versie gekozen worden uit vochtspanningsprofielen.

Het rekenmodel bestaat uit vier hoofdonderdelen:

- Het onderdeel bodemsterkte (*soil profile strength*) bepaalt op basis van bodem- en vochtspanningseigenschappen de sterkte van de bodem.
- In het onderdeel grensvlakspanning (*stress distribution in the contact area*) wordt op basis van informatie van de bandkarakteristieken, bandenspanning, de wiellast en de bodemsterkte bepaald wat de spanning per wiel is op het grensvlak van band en bodem.
- Op basis van de grensvlakspanning wordt in het onderdeel grondspanning (*stress distribution in the soil profile*) de spanning in de ondergrond berekend per as/band.
- In het laatste onderdeel, risicoanalyse (*compare stress:strength*), wordt een vergelijking gemaakt tussen de bodemsterkte en de grondspanning per as.

Figuur 11 Opbouw van het programma Terranimo. Geel zijn invoerparameters, blauw zijn de rekenmodules en groen zijn de uitvoerfiles (Schjønning et al., 2015a).

4.2 Bodemsterkte

4.2.1 Precompressiesterkte

Om het risico op bodemverdichting te bepalen, wordt gekeken in hoeverre de belasting op de ondergrond (grondspanning of effectieve spanning) de sterkte (belastbaarheid van de ondergrond) overschrijdt. De belastbaarheid van de ondergrond wordt veelal gedefinieerd als het punt waarop de bodemvervorming overgaat van elastisch (tijdelijk) naar plastisch (permanent) (Schjønning et al., 2015a). Dit punt, dat precompressiesterkte wordt genoemd, zou bij het berijden van de grond niet mogen worden overschreden. Het concept van precompressiesterkte komt uit de grondmechanica en gaat uit van de vervorming van de ondergrond als gevolg van verticale spanningen. Schuif- en trekspanningen worden daarin niet meegenomen. Dit is mede de reden dat het concept van precompressiesterkte nog steeds ter discussie staat. Vooralsnog lijkt dit concept de beste manier om bodemsterkte te bepalen voor het doen van onderzoek naar gevolgen van belasting door landbouwvoertuigen (Schjønning et al., 2015a). Het is goed mogelijk om naast verticale belastingen ook horizontale belastingen te beschouwen en daarbij rekening te houden met schuifspanningen en afschuifsterkte. Een voorbeeld hiervan is het model SOCOMO (Van den Akker, 2004). In de nabije toekomst zal deze mogelijkheid ook in het model Terranimo worden opgenomen.

Figuur 12 Schematische weergave van het principe van precompressiestress (Schjønning et al., 2020).

Figuur 12 toont de precompressiesterkte (bodemsterkte) als breekpunt van de spanningssterke-relatie. In labexperimenten is de overgang van elastisch naar plastisch niet zo scherp als in de figuur is aangegeven. Vandaar dat in Terranimo wordt gewerkt met een overgangszone (het gele gebied), waarin de spanning in de bodem de bodemsterkte tussen de 75 en 125% overschrijdt. Boven de 125% wordt het risico op permanente bodemverdichting hoog ingeschat (zie paragraaf 4.5).

Precompressiesterkte wordt bepaald door middel van uni-axiaal proeven in het lab aan in het veld gestoken grondmonsters. Omdat het niet mogelijk is om de precompressiesterkte van elke bodem onder elk vochtgehalte te bepalen, wordt gebruikgemaakt van pedotransferfuncties. Met deze functies wordt een relatie gelegd tussen de karakteristieken van de bodem (bijv. droge bulkdichtheid, vochtgehalte etc.) en de precompressiesterkte van de bodem. Voor de Nederlandse ondergrond zijn geen pedotransferfuncties beschikbaar en wordt gebruikgemaakt van gegevens van Duitse en Vlaamse data. Op basis van de buitenlandse functies wordt ervan uitgegaan dat er voor Nederlandse gronden met name een sterke relatie lijkt te zijn tussen het kleigehalte en de bodemsterkte (Figuur 13). Dit

sluit aan bij internationale studies (Schjønning en Lamandé, 2018), waaruit blijkt dat de belangrijkste parameters die de bodemsterkte bepalen de droge dichtheid, het kleigehalte en de vochtspanning zijn.

Op basis van een uitgebreide set van met behulp van uni-axiaal proeven op Deense bodems verkregen precompressiesterktes, is de generieke functie verder gespecificeerd (Vergelijking 2). Deze functie wordt ook in de Nederlandse versie van Terranimo gebruikt.

Figuur 13 Precompressiesterktes van ondergronden uit de literatuur en uit een database samengesteld in het kader van een Europese Concerted Action on Subsoil Compaction (Trautner et al., 2003).

$$\sqrt{\sigma_{pc}} = 0,726 \log(PSS) - 0,22 * Clay \log(PSS) + 0,417 BD + 4,654 * OS$$

Vergelijking 2 Precompressiesterkte. σ in kPa, BD (g/cm³), Clay (kg/kg), Preload Suction Strength PSS (Vergelijking 3) (in kPa), OS = organisch stofgehalte (Schjønning et al., 2020)

$$PPS = S * \psi$$

Vergelijking 3 Preload suction strenght (kPa), S = waterverzadiging (Vergelijking 4), ψ = vochtspanning (kPa)

$$S = \theta/p$$

Vergelijking 4. Waterverzadiging S, θ = vochtgehalte, p = porositeit (Vergelijking 5)

$$p = 1 - DB/DP$$

Vergelijking 5 Porositeit p, DB= droge bulkdichtheid (g/cm³), DP = gemiddelde (minerale gronden) dichtheid bodemdeeltje 2,65 (g/cm³)

4.2.2 Nederlandse bodemdata

Om de precompressiesterkte te berekenen, hebben we bodemfysische data van de Nederlandse ondergrond nodig. We maken hierbij gebruik van de bodemfysische bouwstenen van de Staringreeks. De Staringreeks bestaat uit achttien verschillende boven- en ondergronden. De moerige en veengronden zijn niet meegenomen, omdat Terranimo het verdichtingsproces van deze gronden niet goed berekent (zie paragraaf 4.6.2). Voor elke bouwsteen wordt de set bodemfysische gegevens

geselecteerd met de grootste verspreiding (oppervlakte en diepte, dus volume) (De Vries, 1999) (Tabel 7).

Tabel 7 Bodem-karakterisatie van de boven- en ondergronden uit de Staringreeks (De Vries, 1999).

BodemID	Klei	Silt	Zand	OS	Bulkdichtheid	Bodemtype
	%	%	%	%	g/cm ³	
B1	2	3	95	1	1.51	B1 Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand
B2	3	10	87	5	1.36	B2 Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand
B3	4	15	81	4	1.39	B3 Sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand
B4	3	52	45	2	1.12	B4 zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig zand
B5	4	9	87	1	1.44	B5 Grof zand
B6	10	22	68	4	1.43	B6 Keileem
B8	14	34	52	2	1.47	B8 Matig lichte zavel
B9	22	43	35	2	1.41	B9 Zware zavel
B10	30	45	25	2	1.33	B10 Lichte klei
B11	35	50	15	6	1.18	B1 Matig zware klei
B12	55	40	5	8	1.01	B12 Zeer zware klei
B13	10	60	30	2	1.49	B13 Zandige leem
B14	17	76	7	2	1.43	B14 Siltige leem
O1	3	6	91	0	1.67	O1 Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand
O2	3	8	89	1	1.63	O2 Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand
O3	4	14	82	0	1.64	O3 Sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand
O4	3	52	45	0	1.2	O4 Zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand
O5	2	5	93	0	1.58	O5 Grof zand
O6	16	21	63	0	1.55	O6 Keileem
O7	20	30	50	3	1.39	O7 Beekleem
O8	9	26	65	0	1.58	O8 Zeer lichte zavel
O9	14	34	52	0	1.54	O9 Matig lichte zavel
O10	22	43	35	1	1.44	O10 Zware zavel
O11	28	44	28	0	1.41	O11 Lichte klei
O12	45	47	8	1	1.26	O12 Matig zware klei
O13	56	39	5	1	1.19	O13 Zeer zware klei
O14	12	58	30	0	1.59	O14 Zandige leem
O15	17	79	4	0	1.54	O15 Siltige leem

Om de gebruiker te helpen bij het bepalen uit welke boven- en ondergronden de bodem op zijn locatie is samengesteld, is een GIS-tool aan Terranimo gekoppeld. Deze tool bepaalt op basis van de bodemkaart 1: 50.000 uit welk van de 368 profielen de bodem is samengesteld. De profielen bestaan uit een of meerdere bouwstenen uit de Staringreeks.

4.2.3 Nederlandse vochtgehalte- en vochtspanningsdata

De gebruiker kan in het programma handmatig het vochtgehalte of de vochtspanning invoeren. Het programma converteert tussen het vochtgehalte en vochtspanning op basis van de Van Genuchten-relatie en de bodemparameters uit Tabel 7. De parameters die nodig zijn voor deze relatie zijn gebaseerd op pedotransferfunctie ontwikkeld door Wösten op basis van Europese gronden (Wösten et al., 1999). In toekomstige versie van Terranimo zullen de parameters worden gebaseerd op Nederlandse data (Staringreeks) (zie paragraaf 4.6).

Omdat in de meeste gevallen de gebruiker niet zal beschikken over lokale vochtgehalte- of vochtspanningsdata, is in Terranimo een viertal standaard vochtspanningsprofielen opgenomen. Deze profielen geven een natte, vochtige, droge en extreem droge vochtsituatie aan. Welke vochtspanning bij deze kwalificaties horen, is sterk afhankelijk van de bodemopbouw, de grondwaterstand, het gewas en de recente neerslag. Het aantal locaties in Nederland waar langjarige vochtspanning wordt gemeten, is gering. Vandaar dat ervoor gekozen is de vochtspanningscurves te modelleren met de

maatwerkoepie van de Waterwijzer Landbouw (Stowa, 2018.) Dit model berekent de vochtspanning voor de bovenste 1,5 m op een bepaalde dag op basis van de bodemopbouw (BOFEK-eenheid; Heinen et al., 2021), de grondwaterstand (GHG en GLG), de neerslaggegevens (De Bilt, periode 1981-2010) en het gewas. De combinatie van diverse parameters levert in potentie een zeer grote hoeveelheid vochtprofielen op diverse data op.

Om toe te kunnen werken naar een viertal 'standaard' vochtspanningsprofielen, is ervoor gekozen vochtspanningsprofielen te bepalen specifiek gericht op de suikerbietenteelt en de gronden die daarvoor hoofdzakelijk worden gebruikt. In Figuur 14 zijn voor een lichte zavel en Figuur 15 voor een lemig fijn zand voor diverse data in het groei- en oogstseizoen vochtspanningsprofielen berekend. De rode lijn is de gemiddelde van de dertig (voor elk weerjaar) vochtspanningsprofielen op een bepaalde datum (eerste dag van de maand). Uit de diverse gemiddelde profielen is een viertal profielen geselecteerd die representatief geacht worden voor een bepaalde vochtsituatie in het jaar (Tabel 8). Dit zijn respectievelijk 1 nov (Figuur 14) nat profiel; 1 nov (Figuur 15) vochtig profiel; 1 okt (Figuur 15) droog profiel; 1 sept (Figuur 15) extreem droog profiel.

Bovenstaande rekenmethode maakt duidelijk dat er eigenlijk geen standaardprofielen zijn en dat de hier geselecteerde profielen het beste kunnen worden gekwalificeerd als een intelligente gok. Omdat vochtspanning een belangrijke parameter is bij de bepaling van de sterkte van de bodem, is er een sterke noodzaak om het aanleveren van de vochtprofielen in toekomstige versies van Terranimo te verbeteren (zie paragraaf 4.6).

Figuur 14 Berekende vochtspanning 1990-2010 lichte zavel (BOFEK 416, grondwaterstand GT VI 60/120. Rode lijn gemiddelde over 30 jaar.

Figuur 15 Berekende vochtspanning 1990-2010 lemig fijn zand (BOFEK 312), grondwaterstand GT VI 80/160. Rode lijn gemiddelde over 30 jaar.

Tabel 8 Vochtspanning voor de diverse vochtprofielen.

diepte (cm -mv)	Vochtspanning (- cm) Nat	Vochtspanning (- cm) Vochtig	Vochtspanning (- cm) Droog	Vochtspanning (- cm) Extreem droog
10	-74	-109	-187	-500
20	-66	-100	-156	-264
30	-58	-92	-134	-177
40	-50	-85	-118	-141
50	-42	-79	-106	-121
60	-33	-71	-91	-100
70	-25	-65	-81	-85
80	-18	-57	-70	-75
90	-9	-46	-56	-60
100	-1	-38	-50	-49
110	-1	-30	-39	-39
120	-1	-24	-29	-29
130	-1	-18	-20	-20
140	-1	-12	-12	-12
150	-1	-6	-6	-6

4.3 Spanningen op het grensvlak band-bodem

De eerste stap in het berekenen van de spanningen in de ondergrond is het bepalen van de druk op het grensvlak band-bodem. Deze druk is als het ware de bovenste modelrand van het spanningsberekeningsmodel zoals weergegeven in paragraaf 4.4.

Terranimo maakt gebruik van het FRIDA-model (Schjønning et al., 2008) om de verticale spanningen te beschrijven die de banden op het bodemoppervlak uitoefenen. Het contactgebied wordt beschreven door een superellips (Figuur 17). Het contactgebied en de daarbij behorende drukken worden bepaald door verschillende dimensies (diameter, dikte, volume, breedte en het doorbuigen van de band, de bandenspanning en de wiellast). Het FRIDA-model is gefit met Deense testen op een zandige leemgrond voor verschillende bandentype en aandrijvingen (Figuur 18). Op basis van die testen zijn relaties ontwikkeld voor de invoerparameters in FRIDA en de bandenkaracteristiek (Schjønning et al., 2015b). Met deze relaties zijn meer dan 1000 verschillende banden doorgerekend. Deze kunnen verder worden gespecificeerd voor een ontelbaar aantal wielbelasting-/bandenspanning-combinaties. Verder zijn er relaties ontwikkeld voor aangedreven banden en niet-aangedreven banden, omdat aangedreven banden een kleiner contactoppervlak hebben.

Op basis van de ontwikkelde relaties zijn er tien cases doorgerekend waarin het bandentype, de bandenspanning en de wijze van aandrijving zijn gevarieerd (Figuur 16). Hieruit blijkt o.a. dat:

- Het gebruik van bredere banden het contactoppervlak vergroot en de grondspanning verlaagt (vergelijk case 1 en 2);
- Het verhogen van de bandenspanning het contactoppervlak verkleint en de grondspanning verhoogt (vergelijk case 3, 4 en 5);
- Aangedreven banden een kleiner contactoppervlak hebben en daardoor een hogere grondspanning veroorzaken dan niet-aangedreven banden (vergelijk case 6 en 9);
- Fabrikanten veelal adviseren de bandenspanning van aangedreven banden te verhogen tot het wegniveau. Hierdoor wordt het effect van hogere grondspanning door aangedreven banden verder versterkt (vergelijk case 6 en 10).

Case no.	Tyre type ^a	Technical name	Tyre volume (10 ⁻³ m ³)	Wheel load (kN)	Actual inflation pressure (kPa)	Rec. inflation pressure ^b (10 km/h) (kPa)	Contact area A (m ²)	Half contact area length a (m)	Half contact area width b (m)	Superellipse squareness n	Stress distribution parameter α	Stress distribution parameter β	Max. stress in contact area p_{max} (kPa)	Mean ground pressure p_{mean} (kPa)
1	Impl	560/60R22.5	410	29.5	63	63	0.40	0.37	0.31	3.1	2.2	1.2	134	73
2	Impl	710/55R34	815	29.5	60	60	0.62	0.46	0.37	3.1	3.0	1.0	84	48
3	Impl	710/55R34	815	58.9	124	124	0.62	0.46	0.37	3.1	2.5	1.0	177	96
4	Impl	710/55R34	815	58.9	90	124	0.73	0.53	0.38	3.4	3.4	1.3	131	81
5	Impl	710/55R34	815	58.9	300	124	0.45	0.37	0.36	2.5	1.8	0.6	311	130
6	Impl	800/60R32	1213	58.9	72	72	0.79	0.53	0.41	3.1	3.4	1.0	129	75
7	Impl	800/60R32	1213	117.8	250	250	0.79	0.53	0.41	3.1	2.3	1.0	283	150
8	Impl	800/60R32	1213	117.8	340 ^c	250	0.69	0.48	0.41	2.9	1.9	1.0	372	171
9	Trac	800/65R32	1213	58.9	94	94	0.61	0.41	0.42	3.1	2.1	1.2	181	96
10	Trac	800/65R32	1213	58.9	165 ^c	94	0.49	0.35	0.41	2.7	1.7	0.8	274	120

Figuur 16 Berekenende maximale (max stress) en gemiddelde grondspanning (mean ground pressure) voor verschillende type banden, bandenspanning en aandrijving (Schjønning et al., 2015b).

Figuur 17 Voorbeeld van een superellips die het contactoppervlak band-grond beschrijft (Lassen et al., 2013).

Figuur 18 Gemeten verticale spanning op het grensvlak band-bodem (boven) en de met FRIDA berekende spanning (onder) voor de bandenspanning van 1.0 bar (links) en 2.4 bar (rechts) (Schjønning en Lamandé, 2020).

Het contactgebied van een band – en dus de stressverdeling – wordt beïnvloed door de sterkte van de bovengrond. Terranimo neemt dit mee in de berekeningen. Eerst wordt het contactgebied berekend op basis van de kenmerken van de geselecteerde band en met behulp van de relaties van Schjønning et al. (2015b). Vervolgens wordt deze schatting gewijzigd op basis van de sterkte van de bovengrond. Hierbij wordt gebruikgemaakt van metingen aan grote aantal contactgebieden voor een niet-recent bewerkte bodem op veldcapaciteit ($p_F = 2$). Deze metingen zijn vergeleken met schattingen van het contactoppervlak voor een ‘zacht’ of een ‘stevig’ oppervlak zoals bepaald door O’Sullivan et al. (1999). Voor recentelijk niet-bewerkte zachte bodems (20 kPa sterkte) blijkt het relatieve contactoppervlak een factor 1,3 groter; voor recentelijk niet-bewerkte sterke bodems (400 kPa sterkte) is het een contactoppervlak een factor 0,8 kleiner. De precompressiesterkte voor bodems op veldcapaciteit met een relatief contactoppervlak van 1 bedraagt ongeveer 100 kPa. Op basis van de drie ‘gefixeerde’ punten is een functie gedefinieerd (Figuur 19). Ook voor recentelijk geploegde gronden is een relatie geformuleerd. Doordat deze op veel minder data is gebaseerd, zal deze optie met enige terughoudendheid moeten worden gebruikt.

In zijn algemeenheid hebben slappere bodems een veel groter contactoppervlak dan sterke bodems. Zijn de bodems recentelijk geploegd, dan neemt het contactoppervlak verder toe in vergelijking met niet recentelijk geploegde gronden.

Figuur 19 Het relatieve contactoppervlak (stiff factor) als functie van de precompressiesterkte van de toplaag. Niet recentelijk bewerkte grond (getrokken lijn) en recentelijk geploegde grond (streepte lijn) (Schjønning, 2020 niet gepubliceerde data).

4.4 Spanningsberekeningen in de ondergrond

De spanningen in de ondergrond worden berekend met een pseudo-analytische model, gebaseerd op het werk van Söhne (1953). Hierbij worden de verticale spanningen in de bodem uitgerekend als gevolg van de opgelegde spanning op het contactoppervlak band/bodem. Hierbij wordt gebruikgemaakt van vergelijkingen die zijn afgeleid door Fröhlich van de analytische oplossing van Boussinesq (Söhne, 1953). De oplossing van Boussinesq, die is vastgesteld voor een homogeen, isotroop, ideaal elastisch materiaal, geeft de verspreiding van de belangrijkste hoofdspanning σ_1 onder een verticaal belastingspunt dat inwerkt op een semi-oneindig medium (Figuur 20).

Figuur 20 Spanning in een element als gevolg van een puntbelasting P (Boussinesq, figuur uit Defossez, 2012).

Fröhlich (1934) heeft de vergelijking van Boussinesq op de bodem toegepast. Hierbij werd een concentratiefactor ξ geïntroduceerd. Die factor geeft de afwijking van de gemeten spanningen in de bodem ten opzichte van de door Boussinesq berekende spanningen (Vergelijking 6). De spanningen in de bodem blijken groter te zijn op de as en omgeving, maar verder naar buiten kleiner (bodem niet-elastisch) (Defossez en Richard, 2012).

$$\sigma_1 = \frac{\xi P}{2\pi r^2} \cos^{\xi-2} \theta$$

Vergelijking 6 De belangrijkste hoofdspanning σ_1 (kPa op afstand r (m) onder een belastingspunt P (kN), θ de hoek is tussen de radiaal en de verticaal, ξ concentratiefactor (dimensieloos).

Figuur 21 Spanningsverdeling in de ondergrond bij verschillende concentratiefactoren bij een puntbelasting van 8 kN (Defossez, 2002).

Söhne (1953) gebruikt concentratiefactoren van 4, 5 en 6 voor respectievelijk harde, stevige en zachte grond (Figuur 21). In Terranimo wordt de concentratiefactor bepaald op basis van de vochtspanning. Bij een vochtspanning van respectievelijk -16.000 cm ($pF = 4.2$), -500 cm ($pF = 2.7$), -100 cm ($pF = 2.0$) en -50 cm ($pF = 1.7$) bedraagt de concentratiefactor 3, 4, 5 en 6. In Figuur 22 is het verschil in verspreiding van de drukken te zien bij een vochtspanning op veldcapaciteit $pF = 2$ (veldcapaciteit) en bij $pF = 3$. Naast het feit dat het vochtgehalte de concentratiefactor beïnvloedt (de diepte waarbij de spanning in de bodem doordringt), wordt ook de spanningsverdeling in het contactoppervlak hierdoor beïnvloed. Het nettoresultaat is dat droge gronden veel hogere, ondiepe drukken geven, maar lagere drukken in de diepere ondergronden, dan natte gronden.

Figuur 22 Spanningsverdeling (kPa) in de ondergrond bij $pF = 2$ (boven) en $pF = 3$ (onder) (output Terranimo).

4.5 Risicobeoordeling

De basisgedachte achter Terranimo is dat als de aangebrachte grondspanning de bodemsterkte overschrijdt, er een risico op het verlies van bodemfunctionaliteit door permanente verdichting kan optreden. Dit lijkt een vrij absoluut omslagpunt (wel/niet permanente bodemverdichting). In de praktijk is er behoefte om het risico meer te kunnen duiden. Hiertoe is de zogenaamde bodemverdichtingsindicator (*Soil Compaction Index*, *SCI*) ontwikkeld (Rücknagel et al., 2015) (Vergelijking 7 = omgeschreven Vergelijking 1).

$$SCI = \log Pact - \log Pc$$

Vergelijking 7 Bodemverdichtingsindex (*SCI*; dimensieloos), $Pact$ = actuele verticale grondspanning (kPa) en de Pc = bodemsterkte (kPa) (Rücknagel et al., 2015).

De bodemverdichtingsindex is door Rücknagel op basis van diverse praktijkexperimenten gecorreleerd aan de bodemparameters die veelal sterk worden beïnvloed door verdichting. Er is een sterke, positieve correlatie tussen de gemeten droge bulkdichtheid en een negatieve correlatie met de verzadigde doorlatendheid (Figuur 23). Verder laten de relaties een veel sterkere verandering zien bij de bovengrond (20 cm) dan bij de ondergrond (35 cm). Op basis van deze relatie is er een maat voor de mate van verdichting van de ondergrond gedefinieerd (Tabel 9) (Kuhwald et al., 2018).

Tabel 9 Classificatie van de bodemverdichtingsindex (Kuhwald et al., 2018).

Bodemverdichtingsindex	Bodemverdichtingsrisico
< 0	Geen risico
0 – 0,1	Laag
0,1 – 0,2	Matig
0,2 – 0,3	Hoog
0,3 – 0,4	Erg hoog
>0,4	Extreem hoog

Binnen Terranimo wordt een andere classificatie aangehouden, met name door de spreiding die er kan zijn rond de bepaling van de bodemsterkte (P_c) (zie paragraaf 4.1). Er wordt gesteld dat, om er zeker van te zijn dat er geen bodemverdichting gaat optreden, de grondspanning niet hoger mag zijn dan 75% van de bodemsterkte. Dit resulteert in een negatieve bodemverdichtingsindex. Een hoog risico op bodemverdichting geldt bij een grondspanning die de bodemsterkte met 125% overschrijdt (Tabel 10). De grenzen die in Terranimo worden gesteld, zijn daarmee voorzichtiger dan die door Kuhwald et al. (2018) zijn ontwikkeld. Uiteindelijk is het aan de gebruiker om te bepalen welk risico hij bereid is te accepteren. Een stelregel zou kunnen zijn om de bodemverdichtingsindex op 30 cm en dieper niet boven de 0,1 te laten komen (zie paragraaf 4.6).

Tabel 10 Classificatie van de bodemverdichtingsindex (Schjønning et al., 2020).

Bodemverdichtingsindex	Bodemverdichtingsrisico
< -0,12	Geen risico
-0,12 – 0,1	Matig
>0,1	Hoog

Figuur 23 Relatie tussen de Bodemverdichtingsindex (SCI) en de logaritme van de verzadigde doorlatendheid voor de bovengrond (top) en ondergrond (sub) (links) en droge bulkdichtheid (rechts) Rücknagel et al., 2015).

4.6 Beperkingen van de tool

Terranimo is een gebruikersvriendelijke tool waar met een relatief beperkte hoeveelheid bodem- en vochtdata een inschatting van de risico's kan worden gemaakt. Dit betekent dat de ontwikkelaars een versimpeling hebben gemaakt van de grondmechanische processen die optreden bij belasting met een voertuig. Om de modelresultaten goed te kunnen beoordelen, is het belangrijk om te weten waar de beperkingen liggen. Deze liggen voor Terranimo op een drietal vlakken: simplificaties van het model, beperkte nauwkeurigheid van de invoerparameters en de beoordeling van de resultaten. Door het verder ontwikkelen van de tool zal een deel van de beperkingen de komende jaren worden opgelost.

4.6.1 Simplificaties van het model

Schuifspanning

Terranimo bepaalt het risico op bodemverdichting door het maken van een vergelijking tussen de precompressiesterkte en de verticale (of normale) spanning als gevolg van een aangebrachte belasting. Het is bekend dat afschuivingsprocessen ook effect hebben op de sterkte van de bodem tijdens belasting. Afschuiving heeft waarschijnlijk een groter effect op de bodemfuncties dan de poriënvolumereductie veroorzaakt door een verhoogde verticale spanning (Schjønning et al., 2020). Het risico op plastische vervorming en verdichting wordt nu inderdaad vaak onderschat. Dit geldt met name voor gronden met een lage cohesie, zoals zandgronden. Bij deze gronden treedt al snel overschrijding van de afschuifsterkte op, waardoor plastische vervormingen gaan optreden. Meestal is dit tot een vrij beperkte diepte het geval, maar in geval van grote wiellasten strekt deze zone waarin plastische vervorming optreedt tot in de ondergrond en is een belangrijke component in de vorming van een 'ploegzool'.

Om het risico op bodemverdichting te beoordelen, is het daarom ook belangrijk een criterium (Mohr-Coulomb-criterium) op te nemen om de overschrijding van de schuifsterkte van de bodem te bepalen. Er zijn modellen die schuifspanning bepalen en beoordelen (SOCOMO (Van den Akker, 2004) en SoilFlex (Keller en Defossez, 2007)). Het is de bedoeling dat het schuifspanningscriterium in de toekomst in Terranimo wordt ingebracht.

4.6.2 Beperkte toepasbaarheid veengronden

Het concept van precompressiesterkte gaat uit van een overgang van elastische vervorming naar plastische vervorming. Veengronden vervormen op een andere manier. Ze zijn veerkrachtig en gaan eerder bezwijken en plastisch vervormen dan dat ze te veel worden verdicht. Door de vervorming verslechteren de bodemfysische eigenschappen wel, maar daar staat tegenover dat ze een groot herstelvermogen hebben. Veengronden zonder minerale afdeklaag worden daardoor als niet-verdichtingsgevoelig beschouwd (Van den Akker et al., 2013). De draagkracht van veen is in natte omstandigheden zeer laag, en zeker oppervlakkig kan de veengrond dan sterk worden vertrapt en versmeerd waardoor de structuur aan het oppervlak totaal wordt vernield en de infiltratiecapaciteit sterk afneemt. Ook kan diepe spoorvorming optreden, waarin het water lang kan blijven staan. Aan de andere kant ziet men dat veengrasland in landbouwkundig gebruik zich sterk kan herstellen.

Doordat veengronden een lage bulkdichtheid hebben, zal Terranimo een lage bodemsterkte berekenen (Vergelijking 2) en daardoor een hoog risico op bodemverdichting opleveren.

4.6.3 Beperkingen nauwkeurigheid invoerparameters

Bodemsterkte-parameters

Op basis van de textuur (kleigehalte, organische stof en droge bulkdichtheid) en vochtcondities (vochtgehalte en vochtspanning) wordt de sterkte van de bodem bepaald (Vergelijking 2). De pedotransferfunctie die hiervoor wordt gebruikt, is ontwikkeld op basis van proeven met Deense gronden. Het is bekend dat een groot deel van de Deense gronden veel meer gerijpt zijn dan de Nederlandse gronden. Nederland kent veel relatieve jonge kleigronden die recentelijk zijn afgezet of door drooglegging zijn blootgelegd. De verwachting is dat de Nederlandse gronden minder sterk zullen zijn. Voor een deel is dat verdisconteerd in de berekeningen doordat de Nederlandse (klei)gronden een lage droge bulkdichtheid hebben.

Actuele en toekomstige vochttoestand

De Nederlandse versie kent een viertal gestandaardiseerde vochtprofielen (vochtspanning). Op basis van de diverse grondsoorten en daarvoor geldende waterretentiecurves wordt het vochtgehalte uitgerekend. De schatting welk vochtprofiel de actuele vochttoestand het best weergeeft, is afhankelijk van de gebruiker, eventueel aangevuld met een expert judgement. Nauwkeurige berekeningen van de vochttoestand zijn mogelijk met het programma SWAP (Soil Water Atmosfeer Plant; Kroes et al., 2017). Met SWAP kan de vochttoestand worden bepaald aan de hand van de verandering van o.a. neerslag, verdamping en waterhuishouding. Er kan voor worden gekozen om aparte SWAP-berekeningen te doen en de resultaten daarvan in te voeren in Terranimo. De Noorse en Deense versie hebben bijvoorbeeld al een automatische koppeling met een dergelijk programma (Daisy).

Nederlandse machines

In toenemende mate worden in Nederland machines ontwikkeld waarmee de grondspanning kan worden verlaagd. Dit gaat om machines met grotere en bredere banden (met lage bandenspanning), machines met rupsen of met een andere wielbasis. Om de bruikbaarheid van Terranimo te vergroten, is het belangrijk om te kunnen kiezen uit een actueel bestand van machines en aanhangers. Daarnaast is het interessant om van die machines te weten wat het werkelijke contactoppervlak en wat de band-grondspanning is.

4.6.4 Beoordeling resultaten

Beoordeling van meerdere bewerkingen

Een berekening met Terranimo levert een risicobeoordeling van een bepaalde bewerking onder een bepaalde vochtconditie. Wat gebeurt er met dit risico wanneer meerdere bewerkingen achter elkaar worden uitgevoerd en kunnen die risico's worden opgeteld? Rücknagel et al. (2015) hebben hiervoor een methode ontwikkeld en (deels) geïntegreerd, waarbij ze onderscheid maken tussen gedeelten van het land die permanent (rijpaden) worden gebruikt en gedeelten die random (bv. grondbewerking) worden gebruikt. De SCI van de permanente delen worden berekend op basis van de gemiddelde SCI van alle bewerkingen en de maximale SCI die gedurende het seizoen is opgetreden (Vergelijking 8). Voor de random gedeeltes worden de diverse SCI van individuele bewerkingen ingedeeld in diverse SCI-groottes. Van die groepen wordt de gemiddelde SCI bepaald en vermenigvuldigd met het oppervlak dat bereiden is (Vergelijking 9). Het optellen van de SCI-permanent en SCI-random levert een inschatting van de SCI van een veld gedurende een seizoen op een bepaalde diepte (veelal de meeste kritische diepte 30 cm -mv) (Vergelijking 10). Door het variëren van bewerkingen en momenten van bewerking kan worden beoordeeld welk effect dat heeft op het risico op bodemverdichting. Ook kan worden beoordeeld of het gunstiger is om meer met vaste rijpaden te werken. Om de SCI voor een veld uit te rekenen, moet met Terranimo van elke bewerking een run worden uitgevoerd. Dit maakt het tijdsintensief. Nader onderzoek is nodig om te bepalen of deze methode geschikt is voor de Nederlandse situatie en of het voldoende handelingsperspectief biedt.

$$SCI_{pt} = \frac{\frac{SCI_{mean} + SCI_{max}}{2} + SCI_{max}}{2}$$

Vergelijking 8 SCI_{pt} voor permanente rijbanen, SCI_{mean} = gemiddelde SCI, SCI_{max} de maximale waarde (Rücknagel et al., 2015).

$$SCI_{rt} = \sum (SCI_{grm} * Agr)$$

Vergelijking 9 SCI_{rt} voor random berijding, SCI_{grm} van een bepaalde bewerking, Agr bereden oppervlak van een bepaalde bewerking (Rücknagel et al., 2015).

$$SCI_{field} = SCI_{pt} * Apt + SCI_{rt} * Art$$

Vergelijking 10 SCI_{field} voor een geheel veld, Apt oppervlak dat permanent wordt bewerkt, Art oppervlak dat random wordt bewerkt (Rücknagel et al., 2015).

Objectivering van de beoordeling

Terranimo levert een risico op bodemverdichting op. Hoe we dit risico moeten beoordelen, is aan de individuele gebruiker. Wat hierbij noodzakelijk is, is een relatie tussen het risico en de gevolgen die dit heeft voor belangrijke bodemparameters of, nog mooier, op toekomstige oogstschade. Rücknagel et al. (2015) hebben een eerste aanzet gemaakt om de risico's te objectiveren (paragraaf 4.5). Meer onderzoek is nodig om dit te toetsen voor Nederlandse gronden en ook om te komen tot een set praktisch hanteerbare bodemparameters.

Literatuur

- Akker, J.J.H. van der. 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil & Tillage Research* 79: 113-127
- Akker, J.J.H. van der, F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke en T. Schouten, 2013. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2409, 81 blz.
- Bakema G. en J.J.H. van den Akker, 2021. Opheffen en voorkomen van bodemverdichting. Wageningen Environmental Research, Rapport xxx, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Defosse, P. and R. Richard. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil & Tillage research* 67 (2002) 41-64.
- Heinen, M., G. Bakker en H. Wösten. 2020. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks; update 2018. Rapport 2978, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Heinen, M., F. Brouwer, K. Teuling en D. Walvoort. 2020. BOFEK 2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland. Update bodemfysische eenhedenkaart. Rapport xxx, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, and P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands.
- Keller, T. and P. Defosse. 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research* 93(2):391-411
- Kuhwald, M., K. Dornhofer, N. Oppelt and R. Duttmann. 2018. Spatially Explicit Soil Compaction Risk Assessment of Arable Soils at Regional Scale: The SaSCiA-Model. MDPI sustainability.
- Lassen, P., M. Lamandé, M. Stettler, T. Keller, M.S. Jørgensen, H. Lilja, L. Alakukku, J. Pedersen and P. Schjønning. 2013. Terranimo® - A soil compaction model with internationally compatible input options. EFITA-WCCA-CIGR Conference 'Sustainable Agriculture through ICT Innovation', Turin, Italy, 24-27 June 2013, 8pp.
- O'Sullivan, M.F., J.K. Henshall and J.W. Dickson. 1999. A simplified method for estimating soil compaction. *Soil & Tillage Research* 49, 325-335
- Rücknagel, J., B. Hofmann, P. Deumelandt, F. Reinicke, J. Bauhardt, K.J. Hülsbergen and O. Christen. 2015. Indicator based assessment of the soil compaction risk at arable sites using the model REPRO. *Ecol. Indic.* 2015, 52, 341-352.
- Schjønning, P., M. Lamandé, F.A. Tøgersen, J. Arvidsson and T. Keller. 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosyst. Eng.* 99, 119-133.
- Schjønning, P., J.J. van den Akker, T. Keller, M.H. Greve, M. Lamandé, A. Simojoki, & H. Breuning-Madsen. 2015a. Chapter Five-Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction – A European Perspective. *Advances in Agronomy*, 133:183-237.
- Schjønning, P., M. Stettler, T. Keller, P. Lassen and M. Lamandé. 2015b. Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil & Tillage Research* 152, 52-66.
- Schjønning, P. and M. Lamandé. 2018. Models for prediction of soil precompression stress from readily available soil properties.
- Schjønning, P. and M. Lamandé. 2020. An introduction to Terranimo. Aarhus University.
- Schjønning, P. and M. Lamandé, T. Keller and R. Labouriau. 2020. Subsoil shear strength, measurements and prediction models based on readily available soil properties. *Soil & Tillage* 200 (2020 104638)
- Söhne, W. 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenformung unter Schleppereiffen (Pressure distribution in the soil and soil deformation under tractor tyres). *Grundlagen der Landtechnik* 5, 49-63.

-
- Stowa, 2018. Waterwijzer Landbouw WWL maatwerk.
www.waterwijzerlandbouw.wur.nl/downloads/2.0/WWL_maatwerk.pdf
- Trautner, A., J.J.H. van den Akker, H. Fleige, J. Arvidsson en R. Horn. 2003. A subsoil compaction database: its development, structure and content. Special Issue on Subsoil Compaction, Soil and Till. Res. 73: 9-13.
- Vries, F. de. 1999. Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken. DLO-SC rapport 654. Wageningen.
- Wösten, H.A. Lilly, A. Nemes, C. Le Bas, 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma 90 (1999) 169-185.

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3063
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers (5.500 fte) en 12.500 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Rapport 3063
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers (5.000 fte) en 12.500 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.