

Bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting

Eindrapport van een
verkenkende studie

Philippe Van De Vreken
Lieven Van Holm
Jan Diels
Jos Van Orshoven



**SPATIAL APPLICATIONS DIVISION
K.U.LEUVEN**

Celestijnenlaan 200 E, BE-3001 LEUVEN
TEL.: 32 16 32 97 32 FAX: 32 16 32 97 24
URL: <http://www.sadl.kuleuven.be>



Colofon

Titel: Bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting: Eindrapport van een verkennende studie.

Auteur(s): Philippe Van De Vreken¹, Lieven Van Holm², Jan Diels², Jos Van Orshoven¹

Opdrachtgever: Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur, Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen

Bestek nr.: BOD/STUD/2007/01

Versie van: 2009-11-04

Afgedrukt op: 2009-11-27

Bestandslocatie: P:\MVG-LNE-2008-Bodemverdichting\06.FINAL DELIVERABLE\BoVd_Eindrapport_KUL_090918.doc

K.U.Leuven

Celestijnenlaan 200 E, BE-3001 LEUVEN

TEL.: +32 16 32 97 32 FAX +32 16 32 97 24

URL: <http://aow.kuleuven.be>

¹ Spatial Applications Division

² Afdeling Bodem en Water

Inhoudsopgave

1	Literatuurstudie (WP1)	3
1.1	Definitie, processen, oorzaken en factoren	3
1.1.1	Definitie bodemverdichting en gerelateerde begrippen.....	3
1.1.2	Processen van bodemverdichting	3
1.1.3	Oorzaken van bodemverdichting.....	7
1.1.4	Beïnvloedende factoren van bodemverdichting.....	9
1.2	Gevolgen van bodemverdichting.....	11
1.2.1	Invloed op bodemeigenschappen.....	11
1.2.1.1	Bodemfysische eigenschappen	11
1.2.1.2	Bodemchemische eigenschappen	14
1.2.1.3	Bodembioologische eigenschappen	15
1.2.2	Invloed op vegetatiegroei	16
1.3	Metten van bodemverdichting	17
1.3.1	Inleiding	17
1.3.2	Directe meetmethoden	18
1.3.2.1	Penetrometer.....	18
1.3.2.2	Kopeckringen.....	20
1.3.2.3	Oedometer	21
1.3.2.4	Invloed van bodemfysische eigenschappen op meetmethoden.....	22
1.3.3	Indirecte methoden	23
1.3.3.1	Aëratiestatus van de bodem	23
1.3.3.2	Profielwanden.....	24
1.3.3.3	Waarnemingen	25
1.4	Voorkomen en remediëren van bodemverdichting	25
1.4.1	Preventieve maatregelen	26
1.4.1.1	Beperking van uitgeoefende spanningen op de bodem	26
1.4.1.2	Beter in rekening brengen van de draagkracht van de bodem.....	30
1.4.2	Remediëringsmaatregelen	31
1.4.2.1	Mechanisch losmaken van verdichte horizon	31
1.4.2.2	Decompactie door regenwormactiviteit.....	32
1.4.2.3	Decompactie door plantenwortels.....	33
1.5	Modelleren van bodemverdichting	33
1.6	Zonering en weergave op kaart van de gevoeligheid voor en risico op bodemverdichting.....	34
1.6.1	Pan-Europse schaal.....	34
1.6.2	Nationale schaal	39
1.6.3	Regionale schaal.....	40
2	Ontwikkeling van een Vlaanderen dekkende gevoeligheids- en risicokaart (WP2) .	42
2.1	Uitgangsmateriaal	42
2.1.1	Digitale bodemkaart Vlaanderen	42
2.1.2	Databank Aardewerk.....	42
2.1.3	Combinatie van bodemkaart en Aardewerk.....	42
2.2	Definitie van gevoeligheids- en risicokaart en terugkoppeling naar literatuur.....	44
2.3	Gevoeligheidskaart	46

2.3.1	Methode 1: Toewijzing van PCS-waarden afgeleid voor Nederlandse bodems	46
2.3.2	Methode 2: Berekenen van PCS-waarden met PTF's afgeleid voor Duitse bodems	49
2.3.3	Vergelijking en bespreking van de gevoeligheidskaarten	56
2.3.4	Hybride-gevoeligheidskaart	60
2.4	Risicokaart	63
2.4.1	Voorgestelde methode	63
2.4.2	Keuze van de parameters voor de risicokaart	63
2.4.3	Keuze van het bodemcompactiemodel	64
2.4.4	Keuze van banden	66
2.4.5	Berekeningen met SoilFlex	67
2.4.6	Ontwikkeling en bespreking van de risicokaarten	72
2.4.7	Lage druk-banden	73
3	Veldvalidatie en toetsing in kenniscirkels (WP3)	74
3.1	Veldvalidatie	74
3.1.1	Methode	74
3.1.2	Praktische uitvoering	75
3.1.3	Validatie inputparameters PTF's (validatie 1a)	77
3.1.4	Validatie PTF's (validatie 1b)	79
3.1.5	Validatie kaart (validatie 1c)	84
3.1.6	Validatie actuele compactie-status (validatie 2)	85
3.2	Toetsing in kenniscirkels	90
4	Conclusies en perspectieven voor verder onderzoek	91
5	Referenties	94
6	Bijlagen	99
6.1	Bijlage 1: Vergelijking van de in de literatuur beschikbare gevoeligheids- en risicokaarten voor bodemverdichting	99
6.1.1	Pan-Europe: Jones et al. (2003)	99
6.1.2	EU27: JRC (2008)	101
6.1.3	Pan Europe: Horn et al. (2005a) (1/2)	104
6.1.4	Pan Europe: Horn et al. (2005b) (2/2)	105
6.1.5	Nederland: van den Akker (2004)	107
6.1.6	Duitsland: Horn et al. (2005)	109
6.2	Bijlage 2: Overzicht van de bodemzones en van de bodemzonegroeperingen op de verschillende niveaus van Aardewerk-BIS	111
6.3	Bijlage 3: Gevoeligheidskaarten voor bodemverdichting in Vlaanderen	114
6.4	Bijlage 4: NAD-tabel	118
6.5	Bijlage 5: Elliptisch contactoppervlak van tractorband	119
6.6	Bijlage 6: Risicokaarten voor bodemverdichting in Vlaanderen	120
6.7	Bijlage 7: Verslag kenniscirkels	126

1 LITERATUURSTUDIE (WP1)

1.1 Definitie, processen, oorzaken en factoren

1.1.1 Definitie bodemverdichting en gerelateerde begrippen

Bodemcompactie of bodemverdichting is het samendrukken van bodempartikels door externe krachten, waardoor de volumedichtheid en de penetratieweerstand toenemen en het totale poriënvolume afneemt. Bij bodemverdichting wordt het aandeel macroporiën sterk verminderd, terwijl het aandeel aan micro- en mesoporiën in lichte mate verhoogt. Door het afnemende (macro-)poriënvolume zullen het luchtvolume, de waterinfiltratiesnelheid en de verzadigde hydraulische conductiviteit afnemen. Er moet een onderscheid worden gemaakt tussen oppervlakkige verdichting, dewelke zich situeert in de bouwvoor (inclusief de toplaag van de bodem), en verdichting van de diepere ondergrond (= zone onder de bouwvoor). Oppervlakkige verdichting kan makkelijk worden opgeheven door normale grondbewerkingen, in tegenstelling tot diepe verdichting die blijvend kan zijn in de afwezigheid van specifieke remediëringmaatregelen.

Een maat voor de dichtheid van een grond is de penetratieweerstand. Bodemverdichting kan bijgevolg geschat worden aan de hand van de penetratieweerstand. De volumedichtheid wordt bepaald door natuurlijke omstandigheden zoals afzetting (sedimentatie) en bodemvormende processen, maar ook door cultuurmaatregelen zoals het uitvoeren van allerhande bodembewerkingen. Het ligt voor de hand dat een invloed van de dichtheid zich cultuurtechnisch in eerste instantie uit in de ontwikkeling van het wortelstelsel.

Nauw gerelateerd aan de bodemdichtheid is de draagkracht of het draagvermogen van de bodem. Als de toplaag van de bodem na het berijden, beweiden of betreden tekenen van insporing of vervorming laat zien, is er sprake van een geringe draagkracht en is er verdichting opgetreden.

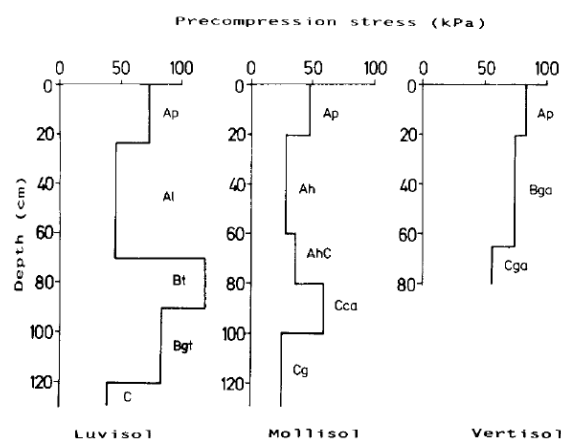
1.1.2 Processen van bodemverdichting

Bij blootstelling aan mechanische druk zal er een toename zijn van de dichtheid van de bodem, een proces dat wordt aangeduid als compressie. In gesatureerde bodems spreekt men van consolidatie en is een toename van de volumedichtheid enkel mogelijk indien water wordt weggedraineerd uit de bodem. In niet-gesatureerde bodems wordt compressie aangeduid als compactie. De duur van de belasting is op landbouwgrond normalerwijze te kort om drainage van water toe te laten en bovendien bevindt de bouwvoor zich zelden in verzadigde toestand op het ogenblik van betreding. Op landbouwgrond zal compactie daarom het belangrijkste verdichtingsproces zijn (Arvidsson, 1997). Hetzelfde is waarschijnlijk ook waar voor bosgrond.

De manier waarop de bodem zal reageren op mechanische stress, d.w.z. de gevoeligheid van de bodem voor compactie, is afhankelijk van de sterkte van de desbetreffende bodem. Sommige bodems zijn voldoende sterk om te kunnen weerstaan aan alle te verwachten belastingen (bodems met een lage compactibiliteit), terwijl andere bodems zo zwak zijn dat ze zelfs onder een lichte belasting reeds gecompacteerd worden (bodems met een hoge compactibiliteit). De compactibiliteit of samendrukbaarheid van een bodem wordt bepaald door de bodemmechanische eigenschappen ervan, dewelke variëren in de tijd met het bodemwatergehalte (Eckelmann *et al.*, 2006). Een belangrijk begrip is de 'precompressiestress-waarde' (PCS), dewelke een maat is voor de structurele sterkte ('soil

structural strength') van de bodem en een indicator voor de gevoeligheid van de bodem voor verdichting. Wanneer de verticale spanningen in de bodem -resultierend uit de op de bodem uitgeoefende mechanische drukken- deze waarde niet overschrijden, reageert de bodem elastisch. Een overschrijding van de precompressiestress-waarde impliceert echter een blijvende en dus plastische vervorming. De precompressiestress wordt dan ook beschouwd als die druk waarbij de vervorming van de bodem overgaat van "klein, elastisch en omkeerbaar" naar "plastisch en bijgevolg onomkeerbaar". Bodemcompactie treedt op wanneer de druk op zekere diepte groter is dan de precompressiestress.

Onder dezelfde klimaatcondities en bij hetzelfde landgebruik zullen de precompressiestress-waarden variëren ten gevolge van verschillen in onder meer bodemtextuur, de mate van aggregaatvorming en de matrixpotentiaal¹ (Horn *et al.*, 1995, Arvidsson *et al.*, 2001, Arvidsson *et al.*, 2003, Arvidsson en Keller, 2004). Figuur 1-1 toont de resultaten van metingen van de precompressiestress bij een matrixpotentiaal van -6 kPa, en dit voor 3 bodemtypes.



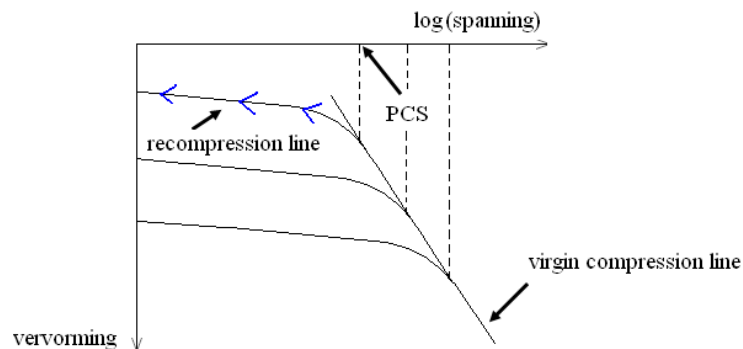
Figuur 1-1 Precompressiestress-waarden in de verschillende horizonten van drie bodemtypes bij een matrixpotentiaal van -6 kPa (Horn *et al.*, 1995).

In de Luvisol leidt kleimigratie uit de A-horizont tot een afname van de interne bodemsterkte, terwijl kleiaanrijking van de Bt-horizont zich vertaalt in een verbetering van de bodemstructuur met een toename van de interne bodemsterkte als gevolg. In de Mollisol leidt het neerslaan van calciumcarbonaat in de Cca-horizont tot hogere precompressiestress-waarden. Voor elk van de 3 bodemtypes was het moedermateriaal (de C-, Cg- en Cga-horizonten) steeds het zwakst, d.w.z. de laagste bodemsterkte en precompressiestress-waarde (Horn *et al.*, 1995). In een studie uitgevoerd door Arvidsson en Keller (2004), waarbij precompressiestress-waarden werden afgeleid voor bouwland in Zweden, bleek de precompressiesdruk hoger te zijn voor de diepere ondergrond dan voor de toplaag van de bodem en hoger bij een meer negatieve zuigspanning. Het bodemvochtgehalte heeft dan ook een uitgesproken invloed op de precompressiestress, waarbij een toename van het vochtgehalte hand in hand gaat met een afname van de sterkte van de (onverzadigde) diepere ondergrond (= afname van de precompressiestress) (Alakukku *et al.*, 2003). Zo hebben Arvidsson *et al.* (2001) kunnen vaststellen dat een toename van het bodemvochtgehalte van 11,0 naar 20,8 g 100 g⁻¹ de precompressiestress-waarde op 50 cm

¹De matrixpotentiaal is het resultaat van de adhesie van water aan de bodemdeeltjes en capillariteit. Deze twee krachten verlagen de vrije energie van het bodemwater en de matrixpotentiaal is dus negatief. I.p.v. 'matrixpotentiaal' spreekt men vaak ook over 'zuigspanning'. Hoe negatiever de zuigspanning, hoe droger de grond. De (10-delige) logaritmische transformatie van de zuigspanning wordt aangeduid als de pF. De pF is per definitie positief en is een maat voor het bodemvochtgehalte. Hoe hoger de pF, hoe droger de grond.

diepte deed afnemen van 165 naar 98 kPa. Tenslotte dient te worden opgemerkt dat ook de voorgeschiedenis van een bodem medebepalend is voor zijn precompressiestress-waarde (Alakukku *et al.*, 2003).

De precompressiestress kan worden bepaald in het labo via een zogenaamde uniaxiale compactieproef waarbij een bodemstaaf in een ring aan een reeks verticale belastingen wordt onderworpen. Zulke proef legt een relatie tussen de vervormingen in de bodem en de uitgeoefende drukken, waarbij de precompressiestress kan worden afgeleid uit deze relatie. Wanneer de vervorming van de bodem wordt uitgezet in functie van het 10-delig logaritme van de aangelegde spanning wordt de precompressiestress (PCS) gevonden als die logaritmisch getransformeerde spanning waarbij de 'Recompression Line' (RCL) overgaat in de 'Virgin Compression Line' (VCL). Zolang de aangelegde spanningen kleiner zijn dan de PCS is de vervorming omkeerbaar en keert de bodem terug naar de initiële toestand vóór belasten via de RCL (cfr. blauwe pijltjes op Figuur 1-2). Van zodra echter de aangelegde spanning de PCS overschrijdt is de vervorming blijvend en neemt deze vervorming lineair toe met de spanning via de VCL (Lebert en Horn, 1991; Alakukku *et al.*, 2003; Arvidsson en Keller, 2004; Van den Akker, 2004).



Figuur 1-2 Concept van precompressiestress

De precompressiestress kan ook worden voorspeld via zogenaamde pedotransferfuncties. Dit zijn regressievergelijkingen die gekende variabelen (in dit geval allerhande fysische en mechanische bodemeigenschappen) relateren tot de te schatten variabele (in casu de precompressiestress). De vergelijkingen van Lebert en Horn (1991), opgesteld op basis van metingen in Duitse bodems, zijn in Europa waarschijnlijk de meest gebruikte vergelijkingen ter predictie van de bodemsterkte. Deze vergelijkingen werden opgesteld voor 2 verschillende vochtregimes: (a) een zuigspanning van -60 hPa (pF 1,8) en (b) een zuigspanning van -300 hPa (pF 2,5). Omwille van de textuurafhankelijkheid van precompressiestress werden de vergelijkingen afgeleid per textuurgroep.

Tabel 1-1 Pedotransferfuncties ter bepaling van de precompressiestress bij pF 1,8 en pF 2,5. P_v = de precompressiestress (kPa), d_B = de volumedichtheid ($g\ cm^{-3}$), org = de hoeveelheid organisch materiaal (gewichts%), Lk = de luchtcapaciteit (volume%), k_f = de verzadigde hydraulische conductiviteit ($10^3\ cm\ s^{-1}$), TW = de niet-beschikbare watercapaciteit (volume%), nFk = de beschikbare watercapaciteit (volume%), c = de cohesie (kPa) en ϕ = de interne frictiehoek ($^\circ$) (Lebert en Horn, 1991).

Texture group	pF	Formula	
Sand	1.8	$Pv_{1,8} = 438.10 d_B - 0.0008 (\phi_{1,8})^3 - 3.14$ $TW - 0.11 (nFk_{1,8})^2 - 465.60$	$r^2 = 0.778$
	2.5	$Pv_{2,5} = 410.75 d_B - 0.0007 (\phi_{2,5})^3 - 3.41$ $TW - 0.35 (nFk_{2,5})^2 - 384.71$	$r_2 = 0.710$
Sandy loam	1.8	$Pv_{1,8} = 169.30 d_B - 29.03 (org)^{0.5} + 6.45$ $k_f + 32.18 \log(c_{1,8}) - 9.44 \phi_{1,8} + 27.25$ $\sin(TW) + 119.74 \log(nFk_{1,8}) + 19.51$	$r^2 = 0.828$
	2.5	$Pv_{2,5} = 89.50 d_B - 23.99 (org)^{0.5} - 2.89$ $k_f + 125.76 \log(c_{2,5}) - 1.14 \phi_{2,5} + 26.90$ $\sin(TW) - 51.46 \log(nFk_{2,5}) - 77.25$	$r^2 = 0.874$
Silt	1.8	$Pv_{1,8} = 374.15 d_B - 4.10 org + 3.38 Lk_{1,8} - 1.58$ $(k_f)^{-0.5} + 1.79 c_{1,8} + 1.09 TW - 6.37$ $(\phi_{1,8})^{0.67} + 0.088 (nFk_{1,8})^2 - 472.77$	$r^2 = 0.765$
	2.5	$Pv_{2,5} = 460.71 d_B - 20.33 org + 9.08$ $Lk_{2,5} - 2.38 (k_f)^{-0.5} + 2.86 c_{2,5} + 4.50$ $TW - 20.96 (\phi_{2,5})^{0.67} + 0.304$ $(nFk_{2,5})^2 - 610.62$	$r^2 = 0.847$
Clay and clay loam (< 35%, w/w, clay)	1.8	$\log Pv_{1,8} = 0.843 d_B - 0.544 (k_f)^{0.33} - 0.022$ $TW + 7.03 (c_{1,8})^{-1} + 0.024 \phi_{1,8} - 0.015$ $nFk_{1,8} + 0.725$	$r^2 = 0.808$
	2.5	$\log Pv_{2,5} = 0.844 d_B - 0.456 (k_f)^{0.33} - 0.026$ $TW + 12.88 (c_{2,5})^{-1} + 0.003$ $\phi_{2,5} - 0.016 nFk_{2,5} + 1.419$	$r^2 = 0.804$
Clay and clay loam ($\geq 35%$, w/w, clay)	1.8	$Pv_{1,8} = 4.59 d_B - 1.02 org - 16.43$ $(k_f)^{0.33} + 0.31 TW - 1.57 nFk_{1,8} + 3.55$ $c_{1,8} + 1.18 \phi_{1,8} - 18.03$	$r^2 = 0.774$
	2.5	$Pv_{2,5} = 70.65 d_B - 0.55 org - 7.01$ $(k_f)^{0.33} + 1.32 TW - 1.08 nFk_{2,5} + 1.72$ $c_{2,5} + 1.05 \phi_{2,5} - 100.94$	$r^2 = 0.763$

Eénmaal de precompressiestress van een bodem (of bodemhorizont) gekend is, kan er een inschatting worden gemaakt van de gevoeligheid voor bodemverdichting. Immers, hoe hoger de precompressiestress-waarde, des te lager deze gevoeligheid. Of omgekeerd: hoe lager de precompressiestress, hoe hoger de gevoeligheid voor verdichting. In Tabel 1-2 worden 6 gevoeligheidsklassen onderscheiden gaande van een precompressiestress < 30kPa (extreem hoge gevoeligheid) tot een precompressiestress > 150 kPa (zeer lage gevoeligheid).

Tabel 1-2 Classificatie van de gevoeligheid voor bodemverdichting (Horn et al., s.d.).

Gevoeligheid	Precompressiestress (kPa)
Klasse 1. Zeer laag	> 150
Klasse 2. Laag	120-150
Klasse 3. Matig	90-120
Klasse 4. Hoog	60-90
Klasse 5. Zeer hoog	30-60
Klasse 6. Extreem hoog	< 30

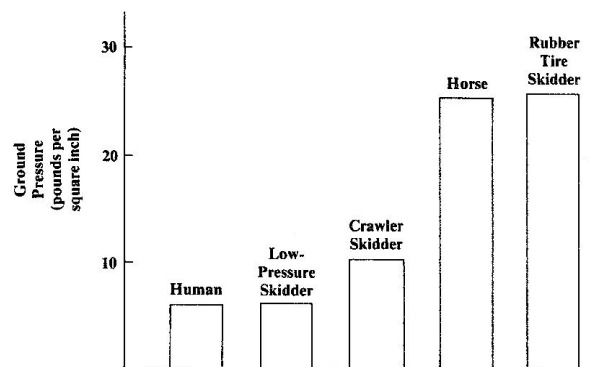
Naast de structurele sterkte van de bodem ('soil structural strength'), waarvoor de precompressiestress een maat is, speelt bij bodemvervorming nog een tweede factor, zijnde

de 'schuifsterkte' of schuifweerstand van de bodem ('soil shear strength'). In tegenstelling tot de structurele sterkte die aangeeft hoe groot de verticale spanningen in de bodem mogen zijn alvorens plastische vervorming optreedt, gaat het bij de 'schuifsterkte' om de maximaal te verdragen zijwaartse spanningen (of schuifspanningen). Bij het overschrijden van de structurele sterkte zullen de poriën tussen de bodemaggregaten verdwijnen (= verdwijnen van inter-aggregaat poriënruimte), daar waar een overschrijding van de kritische schuifspanning ook de intra-aggregaat poriënruimte doet teniet gaan, met een volledig verlies van structuur (en bijgevolg ook van draagkracht) als gevolg. De schuifsterkte van een bodem wordt gekarakteriseerd door zijn cohesie en door de interne frictiehoek, 2 bodemmechanische parameters die ook vaak worden aangewend in pedotransferfuncties ter bepaling van de precompressiestress van de bodem (en dus ter bepaling van zijn structurele sterkte) (Van den Akker, 2004).

1.1.3 Oorzaken van bodemverdichting

Bodemcompactie kan verscheidene oorzaken hebben. Zo kan de impact van neerslag op de bodem leiden tot verslemping en korstvorming van het bodemoppervlak, een vorm van bodemverdichting waarvoor sommige bodems gevoelig zijn in jaren met een overvloedige of hoge neerslagintensiteit (Kok *et al.*, 1996). Meestal echter zal bodemverdichting optreden als gevolg van menselijke activiteiten. Verschillende studies over verdichting werden uitgevoerd en wezen uit dat land- en bosbouw de voornaamste oorzaken zijn van bodemcompactie in Europa, omwille van de grote oppervlaktes die deze activiteiten bestrijken. Ook andere activiteiten zoals recreatie (wandelen, kamperen, skiën,...), toerisme enz. kunnen een aanzienlijke invloed hebben op de bodemverdichtingsproblematiek en mogen niet over het hoofd worden gezien in de gebieden waar zulke activiteiten het landgebruik domineren. (Eckelmann *et al.*, 2006). Doch, in deze literatuurstudie zal er hoofdzakelijk gefocust worden op verdichting als gevolg van landbouw- en bosbouwpraktijken. Bij de beschouwing van verdichting van bosgronden moet men rekening houden met het feit dat natuurlijke bosgronden in veel gevallen veel minder dicht zijn dan eenzelfde grond in gebruik als grasland of akkerbouwland. De lossere bosgrond is daardoor kwetsbaarder voor verdichting dan de in cultuur gebrachte gronden, die al veel dichter zijn (De Jong *et al.*, 2007). Dit is zeker waar op wereldvlak; in Vlaanderen echter zijn er quasi geen natuurlijke bosbodems meer en zijn onze bosbodems over het algemeen wellicht meer verdicht. De voornaamste bedreiging voor bodemverdichting van landbouw- en bosgrond vloeit voort uit het inzetten van allerhande machines nodig voor de exploitatie. Op landbouwgrond manifesteert zulke machine-geïnduceerde verdichting zich tussen de 10 tot 60 cm diepte met de meest duidelijke effecten in de toplaag (rond 10 cm) en ook voor bosgronden worden in de literatuur gelijkaardige waarden vermeld. De mate van verdichting is afhankelijk van het type van machine en de toegepaste belasting, dewelke op hun beurt gerelateerd zijn aan productietype en exploitatiesysteem. Wiellast en de grootte van het contactoppervlak tussen band en bodem zijn de belangrijkste machinekarakteristieken van belang voor verdichting en zijn machinetype-afhankelijk. Andere factoren die spelen zijn de effectief bereden/bewerkte veldoppervlakte en het aantal passages (veldbetredingen), waarbij laatstgenoemde factor de aandacht verdient met het oog op het ontstaan van cumulatieve effecten van compactiestress. Het type grondbewerking (traditionele vs. gereduceerde) is eveneens van belang voor het verdichtingspotentieel van een bodem. Zo impliceert gereduceerde (minimale of zero) grondbewerking een toename van het organische stofgehalte van de bodem (althans nabij het bodemoppervlak; dieper in het bodemprofiel dicht bij de vroegere ploegzool is er minder organische stof dan in conventionele bodembewerking) en een afname van de frequentie van betreden van het perceel, waarbij er op twee manieren effect is op verdichting. De impact van machinegebruik op de bodem is verder ook afhankelijk van het bodemtype en van de vochttoestand van de bodem. Het tijdstip waarop een machine wordt ingezet is een belangrijke factor: bodembewerkingen dienen te gebeuren bij het juiste bodemvochtgehalte teneinde verdichting te beperken, d.w.z. wanneer de bodem droog tot zeer droog is. Voor een gegeven externe belasting neemt compactie van de bodem toe met

het bodemvochtgehalte en daarom zal een toenemend vochtgehalte een afname impliceren van de maximaal toelaatbare contactdruk uitgeoefend door landbouwvoertuigen om bodemverdichting te voorkomen en een aanvaardbare gewasopbrengst mogelijk te maken. In de landbouw zijn machines niet de enige oorzaak van bodemverdichting: ook de veestapel kan via belasting van de bodem compactie in de hand werken. De toename in vee aantallen en de gelijktijdige afname van de oppervlakte aan permanent en 'tijdelijk grasland' sinds de zestiger jaren van vorige eeuw, hebben in Europa geleid tot een toename van de veebezettingsdichtheid in de weide. Het getrappel van het vee kan echter een uitgesproken nadelig effect hebben op de bodemeigenschappen (vooral bij vochtige bodemcondities) en resulteren in bodemcompactie. De diepte van zulke vorm van compactie varieert naargelang het gewicht van het dier en de vochtstatus van de bodem en is te situeren in de bovenste 5 tot 20 cm, waarbij de grootste effecten zich voordoen in de toplaag (Hamza en Anderson, 2005; Eckelmann *et al.*, 2006). Een studie van Pietola *et al.* (2005) waarbij de effecten werden nagegaan van het getrappel van grazend vee op de hydraulische eigenschappen van de bodem toonde aan dat zelfs bij een lage begrazingsintensiteit er reeds een significante afname is van de waterinfiltratie. De bodemverdichting die hiervan de oorzaak is, is het gevolg van de relatief hoge gronddrukken uitgeoefend door het vee. Deze resulteren uit het feit dat het gewicht van het dier geconcentreerd wordt op de kleine oppervlakte onder de hoeven. Bij wijze van voorbeeld wordt in Figuur 1-3 geïllustreerd hoe de gronddruk uitgeoefend door een paard vergelijkbaar is qua grootte met de gronddruk veroorzaakt door een 'skidder' (= een bosbouwtractor) op rubberen banden. Ook de gronddruk uitgeoefend door de mens is zeker niet zomaar te verwaarlozen en is van dezelfde grootteorde als de drukken uitgeoefend door 'skidders' op lagedrukbanden (Adams en Froehlich, 1981).



Figuur 1-3 De bij benadering uitgeoefende gronddrukken door een persoon, een paard en verscheidene types van (bosexploitatie)machines (Adams en Froehlich, 1981).

Bodemcompactie is waarschijnlijk het meest bestudeerd voor bodems in landbouwgebruik, waarbij het gebruik van landbouwmachines en tractoren de voornaamste oorzaak zijn voor verdichting. Wanneer bouwland doorheen de jaren regelmatig wordt bereden en bewerkt, zal de interne bodemsterkte hetzij toenemen hetzij afnemen, afhankelijk van de ratio externe druk/interne sterkte en de actuele status van het bodemvocht. In een proef waarbij de precompressiestress op verschillende dieptes in het bodemprofiel werd opgemeten na verschillende betredingsfrequenties gedurende een periode van 6 jaar, liet de hoogste betredingsfrequentie (het drukste landbouwverkeer) zich vertalen in de grootste waarden voor de precompressiestress, en dit op alle dieptes in het bodemprofiel. In de ploegzool (een relatief harde en weinig permeabele laag dewelke vaak wordt aangetroffen net onder de bouwvoor) was de precompressiestress het hoogst. Hoe groter ook de intensiteit waarmee een bodem wordt belast, hoe groter de verticale drukken in de desbetreffende bodem, waarbij de grootte van de matrixpotentiaal determinerend zal zijn voor het al dan niet optreden van verdichting. Bij het berijden van een bodem onder gunstige condities (d.w.z. een matrixpotentiaal tussen -10 en -30 kPa) zullen de diepere bodemlagen sterk genoeg zijn om weerstand te kunnen bieden aan de drukken waaraan onderhevig en zal er enkel in de

bouwvoor compactie optreden. Zulke oppervlakkige verdichting is meestal slechts tijdelijk, aangezien deze makkelijk wordt teniet gedaan door een normale grondbewerking. Bij gereduceerde bodembewerking kan deze oppervlakkige verdichting een belangrijk probleem vormen, omdat er geen regelmatige decompactatie is van de verdichte toplaag, terwijl dit bij conventionele bodembewerking wél zo is. Wanneer een bodem wordt bereiden onder minder gunstige omstandigheden (bodem is natter), zullen de heersende drukken groter zijn dan de structurele bodemsterkte (precompressiestress) tot op grotere diepte en zal bijgevolg ook de bodemverdichting zich dieper manifesteren. Hoewel de nadelige effecten van veldberijding groter zullen zijn wanneer de bodem wordt bewerkt bij vochtgehalten in de buurt van de veldcapaciteit, kan er ook in droge(re) bodems compactie optreden. Naast het berijden van de bodem door tractoren of andere landbouwvoertuigen dragen ook bepaalde grondbewerkingen bij aan de verdichting van de bodem. Hét voorbeeld bij uitstek is het ploegen van de akker, waar er naast de invloed van de tractorwielen ook een effect is van de ploeg zelf. Een normaal gebruik van de ploeg leidt tot een losse laag aan het oppervlak en een dichte ondergrond waar bodemaggregaten werden samengedrukt door de zool van de ploeg. Het compacterend effect van een ploeg is echter vooral nadelig wanneer jaar na jaar op dezelfde diepte wordt geploegd. Zulke praktijk kan immers het ontstaan van een ploegzool in de hand werken, dewelke een heuse barrière kan vormen voor wortelgroei en watertransport en op die manier negatief kan interfereren met gewasgroei en -productie. Bij het mechanisch losmaken van de bodem is het doorgaans deze laag die men tracht te doorbreken. Wanneer wortelontwikkeling, gasuitwisseling en drainage echter niet belemmerd worden, kan de ploegzool een belangrijke rol vervullen bij het absorberen van compactiedrukken alvorens deze de losse ondergrond bereiken. In dat geval zou het vernietigen van deze laag de diepere bodemlagen alleen maar gevoeliger maken voor verdichting en is het ten stelligste aanbevolen om de ploegzool in stand te houden.

Het berijden en bewerken van landbouwgrond leidt dus vaak tot een toename van de bodemsterkte (draagkracht). Deze kan echter ook afnemen via de vernietiging van de bestaande bodemaggregatie, wanneer de schuifspanningen teweeggebracht door het landbouwverkeer de kritische schuifspanning van de bodem overschrijden. Wanneer een bodem intensief wordt bewerkt bij zeer natte condities, kan dit een uiteenvallen van bodemaggregaten induceren, hetgeen resulteert in een slechte bodemstructuur die weinig draagkrachtig is. (Chamen *et al.*, s.d.; Baver *et al.*, 1972; Horn *et al.*, 1995; Kok *et al.*, 1996).

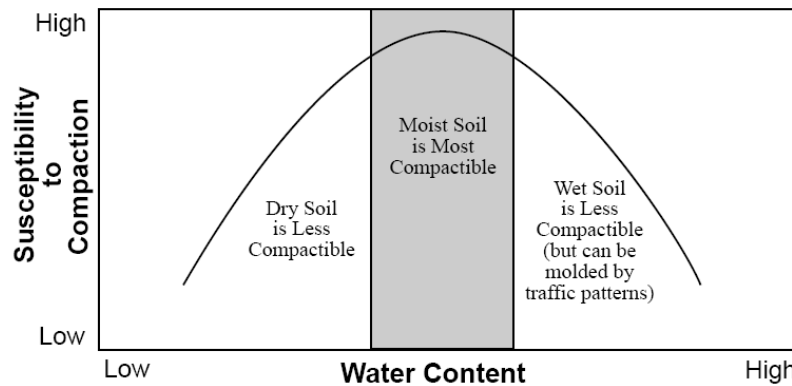
Ook voor bosgrond komt de voornaamste compactiebedreiging voort uit het inzetten van allerlei exploitatiemachines en -voertuigen. De processen die hierbij te pas komen zijn analoog aan degene beschreven in voorgaande paragrafen voor de verdichting van landbouwgrond door berijden/bewerken van de bodem.

1.1.4 Beïnvloedende factoren van bodemverdichting

Een aantal factoren, die bovendien sterk ruimtelijk en temporeel variëren, beïnvloeden het bodemverdichtingsproces. Het type landgebruik en de daarmee samenhangende landbewerking en grondbelasting spelen een grote rol alsook bodemfysische eigenschappen, neerslag en vochtregime. Het vochtregime hangt samen met het waterbergend vermogen van de bodem (afhankelijk van textuur en organische stofgehalte), de grondwaterstand en de positie in het landschap. Factoren die de intrinsieke gevoeligheid van bodems voor bodemverdichting bepalen en hun ruimtelijke en temporele variatie zullen afzonderlijk beschreven worden.

Bodemvocht is een kritische factor voor het verdichtingspotentieel van een bodem. Een droge bodem, waar er wrijving is tussen de bodempartikels, zal minder makkelijk verdichten. Water treedt op als 'smeermiddel' tussen de partikels en zal een bodem gevoeliger maken voor verdichting. Bij een toenemende hoeveelheid bodemvocht zal een punt worden bereikt waarbij de poriënruimtes in de bodem voornamelijk zullen gevuld zijn met water i.p.v. lucht. Aangezien water niet kan worden samengedrukt, zal water tussen de bodempartikels een deel van de belasting op de bodem 'absorberen', waardoor deze resistenter wordt t.o.v.

verdichting. Een zeer natte bodem zal dan ook minder worden samengedrukt dan een matig vochtige bodem, hetgeen duidelijk wordt geïllustreerd in Figuur 1-4 die het verband aangeeft tussen de hoeveelheid bodemvocht en de gevoeligheid van de bodem voor verdichting ten gevolge van verticale belasting.



Figuur 1-4 Kwalitatief verband tussen het bodemwatergehalte en de gevoeligheid van de bodem voor verdichting (Kok et al., 1996).

De grijze zone in de figuur toont waar er het meeste kans is op verdichting van de bodem. Links van deze zone treedt minder verdichting op; rechts ervan zal de bodem eerder opzij worden gedrukt i.p.v. samengedrukt. Het is belangrijk om te beklemtonen dat uit deze figuur niet mag worden besloten dat zeer natte bodems in feite toch niet zo gevoelig zijn voor verdichting. Deze figuur wil enkel aangeven dat bodemvervorming tengevolge van verticale belasting reeds optreedt lang vóór de bodem volledig verzadigd is. De structurele sterkte van een bodem ('soil structural strength') zal immers reeds overschreden worden bij vochtgehalten rond veldcapaciteit. Bij hogere vochtgehalten zal er eveneens bodemvervorming optreden. Deze zal echter een gevolg zijn van het overschrijden van een kritische schuifspanning ('soil shear strength'). In de afgebeelde figuur wordt echter abstractie gemaakt van deze 'soil shear strength' en werd enkel de 'soil structural strength' in rekening gebracht.

Een tweede factor met effect op verdichting is de bodemtextuur (het percentage aan zand, leem en klei in de bodem), hoewel compactie een probleem kan zijn in bijna elk bodemtype. Bodems opgebouwd uit partikels van ongeveer dezelfde grootte, zullen minder compacteren dan een bodem waarin er meer variatie is in partikelgrootte. Hier kunnen bij compactie immers de kleinere partikels de ruimtes opvullen tussen de grotere partikels, hetgeen resulteert in een dichtere bodem (Kok et al., 1996). Vochtige klei- en leembodems worden snel gecompacteerd, terwijl droge bodems met een grove textuur minder snel worden gecompacteerd (Inverde, 2008). De invloed van bodemtextuur op verdichting is duidelijk afhankelijk van het samenspel met het bodemvochtgehalte. Naast het effect op verdichting zelf is textuur ook bepalend voor het herstelpotentieel van een verdichte bodem. Zo zullen verdichte bodems met een belangrijk aandeel aan kleifraction (> 10%) het vermogen hebben om door zwel/krimp-activiteit in functie van het vochtregime in zekere mate te decompacteren, daar waar dit bij verdichte zandbodems niet het geval is (De Vos, 2005). Laatstgenoemde bodems staan er dan ook om bekend slechts langzaam te herstellen van verdichting. Naast de afwezigheid van een grote hoeveelheid kleideeltjes met zwel- en krimppotentieel dragen ook andere eigenschappen van een zandbodem bij aan zijn beperkt herstelpotentieel na compactie. Zo wordt een zandbodem gekenmerkt door zijn grote hoeveelheid macroporiën waaruit het water snel wegdraineert. Dit maakt dat een zandbodem weinig water kan vasthouden, waardoor het proces van afwisselend bevriezen en smelten van bodemwater van ondergeschikt belang is als herstelproces voor bodemverdichting. De over het algemeen lage pH van een zandbodem evenals zijn lage nutriënten- en watergehalte zijn bovendien nadelig voor de diversiteit van het bodemleven, zodat er in een

zandbodem ook weinig herstel is door toedoen van biologische activiteit (Ampoorter *et al.*, 2005). Het herstellend potentieel van een bodem is vooral van belang op bosbodems en niet zozeer op landbouwbodems waar jaarlijks toegepaste grondbewerkingen als frezen en ploegen (indien tenminste goed uitgevoerd) voor een zekere remediëring zorgen, althans voor wat betreft de verdichting in de toplaag van de bodem.

Een laatste factor die mede het verdichtingspotentieel van een bodem bepaalt, is de structuur ervan (hoe goed breekt de bodem op in kleine, samenhangende entiteiten bij verkrumming) en daarmee samenhangend het organische stofgehalte van de bodem. Bodems rijk aan organisch materiaal hebben volgens Kok *et al.* (1996) doorgaans een betere structuur via de vorming van grotere en sterkere bodemaggregaten en zouden bijgevolg weerstandiger zijn aan verdichting dan bodems met een lager organisch stofgehalte en minder stabiele aggregaten. De Vos (2005) en Hamza en Anderson (2005) pleiten voor het behoud en zo nodig de extra aanvoer van zoveel mogelijk organische stof ter preventie/remediëring van bodemverdichting. Naast een verbeterde bodemstructuur wijzen deze auteurs op de stimulering van het bodemleven (cfr. regenwormen en andere organismen met 'woelende activiteit'), met een daaropvolgende afname van het volumegewicht door het ontstaan van macroporiën. Anderzijds is een goed gestructureerde bodem met laag volumegewicht gevoeliger voor compactie dan een slecht gestructureerde (reeds gecompacteerd) bodem met een laag koolstofgehalte omwille van een lagere draagkracht. Maar dan vergelijken we in feite 'appelen met peren', namelijk een goed functionerende, niet gecompacteerd bodem met een bodem die al een aantal belangrijke bodemfuncties (bwortelbaarheid, infiltratiecapaciteit,...) niet meer kan vervullen. Daarom moeten we ons afvragen of er zomaar mag gesteld worden dat koolstof in de bodem de draagkracht van de bodem verlaagt, ook met behoud van essentiële bodemfuncties?

1.2 Gevolgen van bodemverdichting

De gevolgen van bodemverdichting dienen in eerste instantie gerelateerd te worden aan de veranderende bodemeigenschappen en bodemfuncties. De combinatie van een afnemend poriënvolume met een verlies aan connectiviteit tussen de poriën verlaagt de drainagecapaciteit waardoor de oppervlakkige afvoer en erosie kunnen toenemen. De veranderende bodemfysische eigenschappen hebben een sterke invloed op de bodemchemische en -biologische eigenschappen. De verslechterde interne drainage zorgt voor meer anaerobe omstandigheden. Macroporiën zijn de leefwereld van de micro-organismen zodat een gecompacteerd bodem minder bodembioologische kwaliteiten heeft. Nutriënten zijn minder beschikbaar en de gasuitwisseling verloopt trager. De veranderende bodemeigenschappen resulteren in verminderde wortel- en gewasgroei.

1.2.1 Invloed op bodemeigenschappen

1.2.1.1 Bodemfysische eigenschappen

Herverdeling van bodemdeeltjes

Door processen van pakking (zetting), erosie en bodembewerking kunnen fijne partikels de ruimte rond andere bodempartikels opvullen, alsook de ruimte tussen de structurele aggregaten. Sommige bodemtypes zijn hier gevoeliger voor dan andere. Vooral leembodems met een grotere variatie aan partikelgroottes kunnen sterk gecompacteerd worden omdat er partikels aanwezig zijn die quasi elk poriënvolume kunnen opvullen (De Vos, 2005).

Wijziging in poriënvolume en poriënverdeling

Compactie initieert ook een redistributie van poriëngrootte in de bodemmatrix. Grotere poriën worden dichtgedrukt waardoor kleinere poriën ontstaan (De Vos, 2005). Bodemcompactie

gaat gepaard met een afname van het aandeel aan macroporiën en een toename van het aandeel aan microporiën (Kozlowski, 1999). Een groter aandeel aan microporiën betekent dat de bodem zich gaat gedragen alsof die van een zwaardere (fijnere) textuur is (De Vos, 2005). Het totale poriënvolume van de bodem neemt af bij compactie (Kozlowski, 1999).

Destructie van bodemaggregaten en wijziging in bodemstructuur

Doorgaans is de structuur van een niet-gecompacteerde bodemlaag op bouwland heterogeen en betreft het een geaggregeerde fragmentstructuur waar aggregaten variërend in diameter van ongeveer 1 tot 20-30 mm overheersen. Tussen deze aggregaten komen grote open ruimtes tot zelfs meer dan 20 mm voor. Wanneer echter de druk uitgeoefend door tractoren of andere (landbouw)voertuigen de maximale interne bodemsterkte overschrijdt, zal ten eerste de poriëruimte tussen de aggregaten (inter-aggregaat poriëruimte) verdwijnen, terwijl de intra-aggregaat poriëruimte constant blijft. Herhaalde veldbetredingen voor bewerking van de akker induceren een nog dichtere herschikking van de aggregaten en de vorming van een plaatvormige structuur met zeer regelmatige horizontale kloven of een massieve structuur gekenmerkt door een combinatie van zowel horizontale als verticale scheuren en spleten (Horn *et al.*, 1995).

Toenemend soortelijk gewicht

Verdichting van de bodem gaat gepaard met een toename van de bulkdensiteit (ρ). De USDA Forest Service gaat uit van een drempelwaarde van 15% ρ -toename als norm voor bodemcompactie na exploitatie (Block *et al.*, 2002). Hoewel de droge bulkdensiteit vaak wordt aangewend om de toestand van bodemcompactie te karakteriseren, heeft deze slechts een beperkte bruikbaarheid voor de vergelijking van de mate van bodemverdichting tussen verschillende bodemtypes. Om aan dit probleem tegemoet te komen wordt de actuele bulkdensiteit uitgedrukt als een percentage van één of andere referentietoestand van verdichting voor een gegeven bodem en spreekt men van 'de graad van compactie' of van 'de relatieve compactie'. De graad van compactie wordt gedefinieerd als de ratio actuele bulkdensiteit/referentiebulkdensiteit. Een andere relatieve compactiewaarde is de ratio van de actuele en de maximale bulkdensiteit, oftewel de relatieve compactie-index, dewelke als volgt wordt gedefinieerd: $(\rho_{\text{actueel}} - \rho_{\text{min}}) / (\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{min}})$, waarbij ρ_{max} en ρ_{min} de maximale en minimale bulkdensiteit vertegenwoordigen. Waarden van de index < 0.5 , $0.5-0.6$, $0.6-0.7$ en > 0.7 corresponderen met respectievelijk een lage, middelmatige, hoge en zeer hoge mate van compactie (Lipiec en Hatano, 2003). Een andere densiteits-gerelateerde grootte voor bodemverdichting is de zogenaamde 'pakkingsdensiteit'. Wanneer de actuele bulkdensiteit gekend is, kan de pakkingsdensiteit makkelijk worden berekend via volgende vergelijking: $PD = \rho + 0.009C$ waarbij PD staat voor pakkingsdensiteit in ton m^{-3} , ρ voor de bulkdensiteit eveneens in ton m^{-3} , en C voor het kleigehalte (gewichts%). Drie PD-classes worden onderscheiden: 'laag' < 1.40 , 'medium' $1.40-1.75$ en 'hoog' > 1.75 ton m^{-3} . Bodems met een hoge PD (> 1.75 ton m^{-3}) zijn over het algemeen niet zo vatbaar voor verdere verdichting, terwijl bodems met medium en lage PD (< 1.40 ton m^{-3}) bij kritieke vochtgehalten en belastingen wél gevoelig zijn hieraan (Jones *et al.*, 2003).

Enkele cijfers: In de streek van Washington DC deed compactie van verscheidene bodems door toedoen van voetgangersverkeer de bulkdensiteit van de bodem toenemen van $1,2 - 1,6 \text{ g cm}^{-3}$ naar $1,7 - 2,2 \text{ g cm}^{-3}$. Op een kampeerplek in Michigan nam de bulkdensiteit toe met 21 %. In Illinois nam de bodemverdichting toe naarmate er meer kampeeractiviteit was. Op kampeergronden in het Rocky Mountains Nationaal Park had de bodem van druk bezochte kampeersites een gemiddelde bulkdensiteit die 55,3 % hoger was dan de bulkdensiteit op sites die minder in trek waren als kampeerplaats (sites met slechts weinig kampeeractiviteit) (Kozlowski, 1999).

Toenemende bodemsterkte (toenemende mechanische weerstand)

Bodemsterkte ('soil strength') is net als bulkdensiteit een indicator voor bodemverdichting, waarbij compactie van de bodem gepaard gaat met een toename van de bodemsterkte. Bodemsterkte wordt doorgaans gedefinieerd als de weerstand die overwonnen dient te worden om een gegeven vervorming van de bodem te verkrijgen (Arvidsson, 1997) en kan gekarakteriseerd worden via verschillende grootheden zoals penetratieweerstand (of conusweerstand), schuifweerstand, aggregaatsterkte en precompressiestress. Penetratieweerstand geeft de weerstand aan voor wortelpenetratie en is de meest gebruikte grootheid voor de inschatting van de bodemsterkte (Lipiec en Hatano, 2003). Een kritische penetratieweerstand waarbij wortels niet in staat zijn door een bodemlaag te dringen, is niet éénduidig gedefinieerd in de literatuur. Voor landbouwgewassen is er in de literatuur reeds sprake van compactie vanaf 2,5 MPa en zouden duidelijke groeiremmingen optreden vanaf 3 MPa. Voor boomsoorten worden kritische grenzen voor wortelgroei van 2 à 2,5 MPa teruggevonden (De Vos, 2005). In hun literatuurstudie vermelden Håkansson en Lipiec (2000) dat heel wat auteurs een penetratieweerstand van 3 MPa hanteren als kritische grens voor de doorwortelbaarheid en plantengroei. Er dient echter te worden benadrukt dat deze grens heel gewasafhankelijk is.

Hoewel de penetratieweerstand wordt beschouwd als een bruikbare maat voor de weerstand voor wortelgroei, heeft deze grootheid ook een aantal beperkingen. Eén ervan is de relatief grote ruimtelijke variatie, aangezien het meten van de penetratieweerstand een puntmeting betreft, eerder dan een 'bulkmeting'. Voor een nauwkeurige schatting is dan ook een groot aantal metingen vereist. In een ietwat lossere bodem blijkt de ruimtelijke variatie van de penetratieweerstand hoger te zijn dan in een meer gecompacteerd bodem. Dit impliceert dat voor representatieve resultaten het bemonsteringsinterval in een losse bodem kleiner dient te zijn (Lipiec en Hatano, 2003). Een tweede beperking verbonden aan het gebruik van de penetratieweerstand is de gevoeligheid van deze grootheid voor veranderende bodemwatergehalten (Block *et al.*, 2002). De invloed van het bodemvochtgehalte op de bodemsterkte maakt dat de bodemsterkte ook grotendeels met de seizoenen varieert. Onder gemiddelde klimaatcondities zal de sterkte van bodems met fijne en middelmatige textuur het laagst zijn in de late lente en de vroege zomer. Bodemsterkte neemt vervolgens toe gedurende de zomer als de bodem uitdroogt, en neemt tenslotte weer af in de herfst (Inverde, 2008).

Verminderde infiltratie en beperkte drainage

Bij een toename van het soortelijk gewicht van de bodem (en een overeenkomstige afname van de poriënruimte) vermindert de snelheid waarmee neerslag- en irrigatiewater in de bodem infiltreren. Bodemcompactie vermindert de waterinfiltratiecapaciteit en de infiltratiediepte (Kozłowski, 1999). In aanzienlijk gecompacteerd bodemlagen waar in het verticale vlak fijnere en bijgevolg minder permeabele poriën overheersen en waar in het horizontale vlak eerder grove poriën domineren, zal de hydraulische conductiviteit in de horizontale richting vele grootte-orde groter zijn dan in de verticale richting. Bijgevolg zal het water op een vlak oppervlak makkelijker blijven staan (cfr. plassen op het veld), waardoor de veldwerkzaamheden in de lente mogelijk vertraging oplopen. Bij compactie van de diepere ondergrond, dewelke gepaard gaat met een afname van de interne drainage, zal het probleem van 'staand water' nog verergerd worden (Horn *et al.*, 1995). Naast een verstoring van de afvoer van drainagewater leidt een verminderde infiltratie overigens ook tot een verstoring van de gewasgroei.

Oppervlakkige afspoeling (runoff) en verhoogde erosiegevoeligheid

Verminderde infiltratie en drainage ten gevolge van bodemcompactie kan leiden tot oppervlakkige afspoeling wanneer de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit van de bodem overschrijdt. Water zal trager infiltreren in de verdichte zone, waardoor de bodem boven deze zone sneller verzadigd zal zijn en het overtollige water sneller zal afspoelen dan bij een

bodem waar geen verdichting aanwezig is. Wanneer deze oppervlakkige afspoeling zodanig hevig en snel is dat bodempartikels kunnen worden meegevoerd, kan bodemerosie optreden (Adams en Froehlich, 1981). Zelfs op licht hellend terrein (hellingspercentage van 2-4%) kan oppervlakkige afspoeling ten gevolge van een gecompacteerd laag aanleiding geven tot aanzienlijke bodemerosie (d.w.z. meer dan 20 ton/ha/jaar en soms zelfs meer dan 100 ton/ha/jaar). Cijfers voor Vlaanderen werden vooralsnog niet gevonden. Erosie kan leiden tot een verminderde bodemproductiviteit door het verlies van vruchtbare teelaarde. Het transport van bodemmateriaal gaat bovendien gepaard met een begeleidende afvoer van nutriënten en chemicaliën. Wanneer sediment, nutriënten en chemicaliën in het oppervlaktewater terechtkomen, kan dit het dichtslibben van waterlopen tot gevolg hebben en kan er schade worden toegebracht aan de algemene waterkwaliteit en bijgevolg ook aan het aquatische leven. Ook aan wegen en gebouwen kan erosie schade berokkenen (Horn *et al.*, 1995).

1.2.1.2 Bodemchemische eigenschappen

Zoals reeds gezegd, hebben de veranderende bodemfysische eigenschappen een sterke invloed op de bodemchemie (en –biologie). De gevolgen van bodemverdichting voor de lucht- en zuurstofhuishouding van de bodem, hoewel hoofdzakelijk veroorzaakt door een wijziging van bodemchemische eigenschappen, kunnen dus niet helemaal los worden gezien van de veranderende bodemfysische eigenschappen. Toch werd geopteerd om de impact op de lucht- en zuurstofhuishouding onder te brengen onder deze paragraaf.

Impact op de lucht- en zuurstofhuishouding

Vanwege de respiratie van plantenwortels en bodemorganismen dient zuurstof vanuit de atmosfeer naar de bodem te worden getransporteerd. Het zuurstoftransport geschiedt voornamelijk via diffusie in de luchtgevulde poriën. Dit diffusieproces is bijzonder gevoelig aan bodemcompactie dewelke per definitie neerkomt op een reductie van de luchtgevulde porositeit (Arvidsson, 1997). Immers, als door compactie de poriën kleiner worden (gewijzigde bodemfysica), zal het poriënvolume meer gevuld zijn met water (gewijzigde bodemchemie) en watergevulde poriën diffunderen O_2 zowat 7000 tot 10.000 maal trager dan luchtgevulde poriën. Verder zal er bij toenemende compactie een verminderde connectiviteit zijn tussen de verluchtingsporiën (gewijzigde bodemfysica) waardoor de verluchtingswegen van de atmosfeer naar de wortels worden beperkt of onderbroken. Compactie leidt tot een verhoging van de tortuositeit (mate van kronkeling) van deze verluchtingswegen (bodemfysica), waardoor de anaërobe condities (bodemchemie) opschuiven naar de oppervlakte (De Vos, 2005). Bij anaërobe condities zullen de bodemchemische reacties plaatsvinden onder gereduceerde omstandigheden.

Impact op stikstofmineralisatie

Compactie heeft een verregaande impact op de stikstofcyclus in de bodem. Eén van de effecten op de N-cyclus is een afname van de snelheid waarmee organisch materiaal wordt afgebroken en stikstof wordt gemineraliseerd. Hierbij is het negatieve effect op de stikstofmineralisatie des te groter naarmate het vochtgehalte in de bodem hoger is. De afname van de N-mineralisatie kan op twee manieren worden verklaard. Een eerste hypothese stelt een toename van het aantal anaërobe microsites verantwoordelijk voor de verminderde mineralisatie. In een tweede hypothese wordt de afname verklaard via de gewijzigde poriëndistributie. Bodemcompactie leidt immers tot een aanzienlijke reductie van het volume aan poriën beschikbaar voor nematoden, organismen die normaal in staat zijn tot een substantiële toename van de turnover van stikstof via de consumptie van micro-organismen. Tegelijkertijd is er bij compactie van de bodem een toename van het aandeel aan microporiën waarin organisch materiaal fysisch wordt beschermd tegen microbiële afbraak en waarin micro-organismen onbereikbaar zijn voor prederende protozoa en nematoden (Breland en Hansen, 1996). Bij de tweede hypothese is er duidelijk een sterke

samenhang met de microbiologie van de bodem, waardoor we 'impact op de stikstofstofmineralisatie' eventueel ook in volgende paragraaf hadden kunnen onderbrengen.

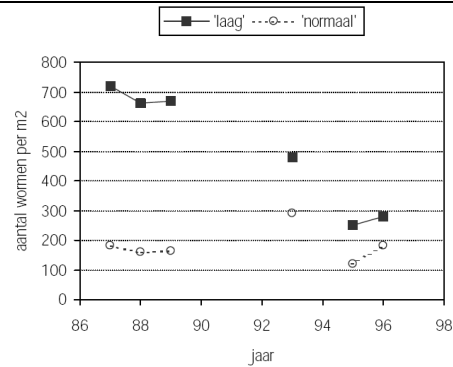
1.2.1.3 Bodembiologische eigenschappen

Effecten op bodemorganismen

Bodemcompactie teweeggebracht door cultuurwerkzaamheden brengt vermoedelijk schade toe aan de tunnelstructuren van regenwormen en leidt tot afsterving van vele regenwormen. Bij gereduceerde en zero bodembewerking (waar in vergelijking met conventionele bodembewerking minder grondbewerkingen plaatsvinden) zijn er immers aanwijzingen van een verhoogde regenwormactiviteit². De aanwezigheid van regenwormen heeft een aantal positieve effecten op de bodem, met name een afname van de bulkdensiteit van de bodem en een toename van de infiltratiesnelheid. In de afwezigheid van regenwormen echter, neemt het soortelijk gewicht van de bodem toe en is er een afname van de snelheid van infiltratie. Er zijn sterke aanwijzingen dat de activiteit van regenwormen afhankelijk is van de hoeveelheid bodemvocht en een afname van regenwormactiviteit in sterk gecompacteerd bodems zou voor een deel kunnen worden toegeschreven aan een verminderde beschikbaarheid van zuurstof (Whalley *et al.*, 1995). Door de beperkte macroporositeit bij bodemcompactie ondervinden ook andere bodembewonende organismen problemen. Vele arthropoden hebben bijvoorbeeld schuilmogelijkheden nodig, vooral bij veranderingen in vochtigheid en temperatuur. Indien ze niet in de bodem kunnen dringen, is hun overleving bedreigd (De Vos, 2005). Nematoden vertonen in gecompacteerd bodems een toename van de activiteit rondom de plantenwortel, hetgeen negatieve implicaties heeft voor de gewasproductie. Compactie heeft tenslotte ook een effect op de microbiële activiteit in de bodem, voornamelijk via wijzigingen in de luchthuishouding veroorzaakt door een sterke vermindering van het aandeel aan macroporiën. Anaërobe condities gaan overheersen en een gevolg is onder meer een toename van de microbiële denitrificatie (Whalley *et al.*, 1995).

Op een Noors proefbedrijf werd tussen 1985 en 1996 de regenwormdichtheid bestudeerd op een lemige zandgrond, waarbij onder meer de invloed werd nagegaan van de intensiteit van het tractorverkeer ('normaal' en 'laag'). Het verschil tussen 'normaal' en 'laag' trekkerverkeer kwam op jaarbasis neer op 5 veldbetredingen. Figuur 1-5 toont het verloop van de regenwormdichtheid in functie van de 2 verkeersregimes.

² Bij zero en gereduceerde bodembewerking is enkel de oppervlakkige laag minder verdicht dan bij conventionele bodembewerking. De laag 5-30 cm is meer verdicht (hogere bulkdensiteit) bij zero bodembewerking in vergelijking met conventionele bodembewerking. Nochtans vindt men uitgerekend in deze densere laag meer regenwormen en meer regenwormgangen dan bij conventionele bodembewerking het geval is. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn: (1) minder verstoring van het bodemprofiel en dus ook minder verstoring van de regenwormen en regenwormgangen die niet langer elk jaar kapot worden gemaakt, (2) de aanwezigheid van een mulchlaag dewelke vooral de diepgravende (zogenaamde anekische) regenwormsoorten in aantal doet toenemen vanwege de voorkeur van deze soorten voor ongestoorde bodemprofielen met aan het oppervlak veel gewasresten.



Figuur 1-5 Verandering in wormdichtheid bij 2 trekker-verkeersintensiteiten: 'laag' en 'normaal' (Baars, 2000).

De figuur toont duidelijk aan dat de wormdichtheid sterk gereduceerd werd bij meer tractorverkeer. Ook is duidelijk hoe er in de loop van het experiment een afname is van het aantal wormen. Deze afname kon worden verklaard aan de hand van de pH, die tijdens de looptijd van de proef gestaag bleek te dalen. Er werd geconcludeerd dat verdichting door tractorverkeer en verzuring van de bodem oorzaak waren van de teruglopende hoeveelheid regenwormen op deze lemige zandgrond (Baars, 2000).

1.2.2 Invloed op vegetatiegroei

Impact op wortelgroei

Een toename van de bulkdensiteit van de bodem gaat gepaard met een afname van de wortelgroei (Unger en Kaspar, 1994). De impact op de wortelgroei wordt vooral gedetermineerd door (1) de penetratieweerstand (soil strength), (2) vocht- en luchthuishouding en (3) porositeit. Penetratieweerstanden of indringingsweerstand waarbij de wortelgroei wordt belemmerd, worden in de literatuur algemeen geschat op 3 MPa. Omdat de penetratieweerstand meestal afneemt wanneer bodems natter worden, is wortelgroei doorgaans beter in vochtige bodems. Het is echter niet geheel duidelijk of dit ligt aan makkelijker penetratie, dan wel aan een verbeterde vochtvoorziening, of een combinatie van beide. In ieder geval zal in te natte omstandigheden dan weer de aëratie limiterend zijn voor wortelgroei. Bodemcompactie kan de macroporositeit dermate reduceren dat groei en zelfs de overleving van wortels gehypothekerd worden, vooral wanneer de bodem waterverzadigd is (De Vos, 2005). Opdat planten voordeel zouden kunnen halen uit het water en de nutriënten die in de bodem aanwezig zijn, dienen de plantenwortels hier ook effectief over te kunnen beschikken. Bijgevolg kunnen penetratieweerstanden die wortelpenetratie verhinderen of de wortelgroeisnelheid vertragen leiden tot een reductie van de gewasontwikkeling en de opbrengst, daar het water en de nutriënten onder de gecompacteerde zone in wezen niet beschikbaar zijn voor de plant. De mate van reductie zal echter in grote mate afhankelijk zijn van de diepte in het bodemprofiel waar de gecompacteerde zone zich situeert. Naarmate deze zone dieper gelegen is, heeft de plant doorgaans meer water ter beschikking, waardoor er minder kans is op het ontstaan van ernstige waterstress bij de plant. In extreme gevallen leidt waterdeficiëntie echter tot het afsterven van de plant. Veel nutriënten zijn slechts beperkt mobiel in de bodem, waardoor plantenwortels als het ware in de richting van de nutriënten moeten groeien opdat de plant deze zou kunnen benutten. De beschikbaarheid van nutriënten voor de plant kan dan ook gelimiteerd worden indien er in de bodem een zone aanwezig is die beperkend is voor de wortelgroei. In tegenstelling tot waterdeficiëntie zal een nutriëntendeficiëntie gewoonlijk geen aanleiding geven tot het afsterven van de plant. Wél kunnen bij een nutriëntendeficiëntie de groei alsook de opbrengst van het gewas sterk aan banden worden gelegd (Unger en Kaspar, 1994). Fosfor (P) en kalium (K) zijn beide relatief immobiel (fosfor meer dan kalium),

zodat een afname van de wortelgroei in gecompacteerde bodems de opname van deze nutriënten door de plant zal beperken (Lipiec en Stepniewski, 1995).

Verminderde N-beschikbaarheid voor het gewas

Een afname van de stikstofmineralisatie tezamen met de verliezen van gemineraliseerde stikstof naar de atmosfeer (toename van de microbiële denitrificatie), maken dat onder condities van bodemcompactie de plant minder minerale N ter beschikking heeft. Dit zal leiden tot een verminderde N-opname en bijgevolg tot een lagere N-concentratie in de plant (Lipiec en Stepniewski, 1995).

Verslechterde water- en luchthuishouding

Een goede vocht- en luchtvoorziening is een conditio sine qua non voor een goede groei en ontwikkeling van het gewas. Als gevolg van bodemverdichting is deze echter niet altijd gegarandeerd, daar compactie van de bodem vaak aanleiding geeft tot meer anaërobe omstandigheden en tot diverse vormen van waterstress. Zowel problemen met overtollig water ('staand water' door verminderde infiltratie + beperkte interne drainage) als waterdeficiëntie-problemen (gecompacteerde zone bevindt zich dicht bij het bodemoppervlak waardoor de wortels slechts water kunnen betrekken uit beperkt bodemvolume) kunnen zich manifesteren. Een verslechterde lucht- en waterhuishouding laat zich vertalen in opbrengstverliezen, doch kan ook leiden tot kwaliteitsverliezen (bv. verlies van de kwaliteit van het hout in bosexploitaties).

Enkele cijfers: De opbrengstverliezen door het gebruik van te zware suikerbietenrooiers worden geschat op 0,5 % op jaarbasis. De door zwaar verkeer geïnduceerde verdichting van de diepere ondergrond zou de totale productie van kuilmaïs in Nederland met 7 % reduceren. Voor de VS, waar veel hogere wiellasten worden toegepast in vergelijking met Europa, worden de gemiddelde opbrengstreducties voor maïs op de lange termijn op 6% geraamd. Door het Europees Milieuagentschap werden verliezen gerapporteerd tussen de 5 à 35 % met een gemiddelde van 12 % op bodems waarvan de diepere ondergrond sterk gecompacteerd is. In de voormalige Sovjetunie, waar zwaar materieel wordt ingezet (cfr. de staatsbedrijven), zelfs op natte bodems, werd melding gemaakt van oogstverliezen door bodemverdichting tot 50 %. Totale oogstverliezen worden er geschat op 13 tot 15 miljoen ton graan (7-8 % van de totale oogst), twee miljoen ton suikerbieten (3 % van de oogst) en tenslotte, een half miljoen ton maïs (4 % van de oogst) (ALTERRA, s.d.).

1.3 Meten van bodemverdichting

1.3.1 Inleiding

Door bodemverdichting zal het soortelijk gewicht van de bodem stijgen alsook de weerstand. Voor beide bodemeigenschappen zijn meetmethoden beschikbaar. Het soortelijk gewicht of de bulkdensiteit kan worden gemeten door het nemen van ongestoorde stalen met Kopeckyringen. Een penetrometer meet de weerstand van de bodem bij een verticale penetratie waarbij een object (meestal een conus) in de bodem wordt geduwd. Beide methoden zullen verschillende resultaten geven; penetrometermetingen worden sterk beïnvloed door het bodemvochtgehalte.

Een goede maat voor de gevoeligheid van een bodem voor verdichting is de precompressiestress. Deze kan in het labo worden gemeten met een zogenaamde oedometer.

De meetmethoden worden verder uitgewerkt alsook de interpretatie van de metingen en hun relatie met andere bodemfysische eigenschappen zoals het vochtgehalte en de textuur van de bodem.

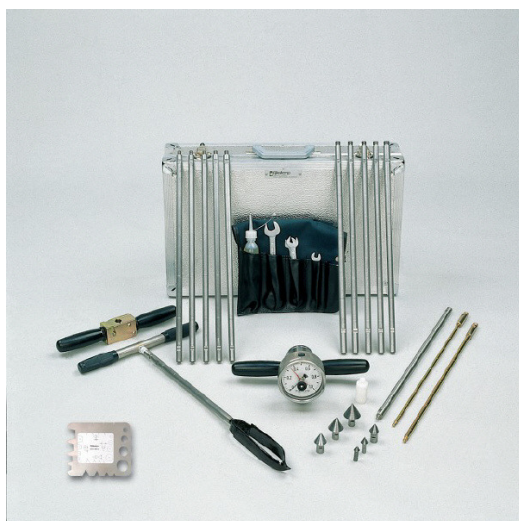
1.3.2 Directe meetmethoden

1.3.2.1 Penetrometer

De bodemsterkte of penetratieweerstand kan gemeten worden aan de hand van een penetrometer. Een penetrometer is een toestel waarbij een object (meestal een conus) in de bodem wordt geduwd teneinde de weerstand te meten van de bodem bij een verticale penetratie. De indringingsweerstand is een maat ter bepaling van het draagvermogen en de doorwortelbaarheid van de bodem.

De eerste penetrometers waren messen, gepunte stokken of metalen staven. Sommige types worden nog gebruikt voor kwalitatieve metingen van de relatieve dichtheid van cohesieloze bodems (voornamelijk zandbodems). Conus penetrometers worden reeds lang gebruikt in de land- en tuinbouw, vooral omdat ze verondersteld worden de actuele druk die een wortel ondervindt bij het indringen in de bodem te simuleren. Deze toestellen worden vooral gebruikt omdat ze relatief eenvoudig in gebruik zijn, een onmiddellijk resultaat geven en de meting op zich goedkoop is.

Handsondeerapparaten (Figuur 1-6) kunnen worden gebruikt voor het bepalen van de indringingsweerstand (en het draagvermogen) van een bodem. In hoofdlijnen bestaat het apparaat uit een meetlichaam, een sondeerstang en een conus. Het apparaat wordt middels een gelijkmatige druk op beide handgrepen, loodrecht in de grond gedrukt. Schoksgewijs drukken geeft te hoge waarden die niet representatief zijn voor de grond. De weerstand die tijdens de meting door de conus wordt ondervonden kan op de manometer worden afgelezen met een zwarte wijzer. De maximaal opgetreden weerstand tijdens de meting wordt aangegeven door een rode meesleepwijzer. De indringingsweerstand (kN/cm^2) van de grond is te bepalen door de afleeswaarde te delen door het oppervlak van de gebruikte conus. De grootte van de te verwachten indringingsweerstand bepaalt het oppervlak van de conus die wordt gebruikt. Bij hoge waarden worden de kleine en bij lage waarden de grote conussen toegepast. Des te groter de conus, des te nauwkeuriger is de indringingsweerstand te bepalen.

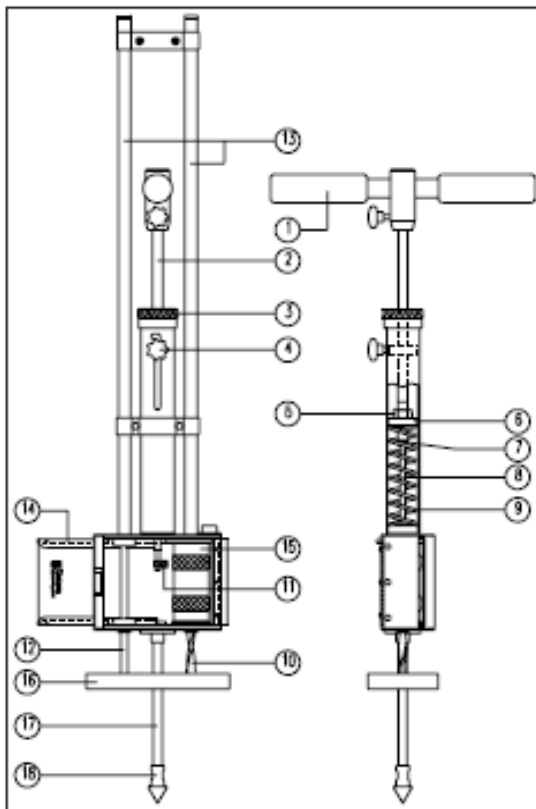


Figuur 1-6 Handsondeerapparaat

Een zogenaamde penetrograaf is een penetrometer, waarmee de indringingsweerstand van de bodem in het veld kan worden bepaald (Figuur 1-7). De standaardset is uitgerust met

diverse conussen, schrijfstiften, sondeerstangen en registratiekaarten. De penetrograaf heeft een meetbereik van 5000 kN/m^2 (= 5000 kPa) en is geschikt voor metingen tot $0,80 \text{ m}$ diepte. Met de penetrograaf kan een continuumeting worden uitgevoerd, waarbij elke laag van het bodemprofiel tot $0,80 \text{ m}$ op de kaart wordt weergegeven. De penetrograaf is bovendien zelfschrijvend, d.w.z. dat tijdens de meting gemeten weerstanden direct grafisch worden weergegeven. De hoeveelheid nawerk wordt daardoor sterk verminderd, de gegevens zijn direct overdraagbaar en gemakkelijk te bewaren. Het principe van de meting berust op registratie van de samendrukking van de gekalibreerde veer, terwijl gelijktijdig de registratiekaart evenredig met de diepte verplaatst wordt naar de aandrijfrol. De penetrograaf wordt toegepast bij:

- algemeen bodemkundig onderzoek (bijv. bij profielbeschrijvingen, het verschaffen van gegevens voor geschiktheidsbeoordeling van gronden);
- controle op berijdbaarheid en/of betreedbaarheid van gronden;
- de controle van verdichtingen;
- het opsporen van verdichte (mogelijk ondoorlaatbare) bodemlagen (bijv. ploegzool);
- onderzoek naar slechte groeiomstandigheden van o.a. stads- en parkbomen;
- onderzoek naar de samenhang tussen de bewortelingsintensiteit van bepaalde gewassen en de indringingsweerstand van de voorkomende bodemlagen.



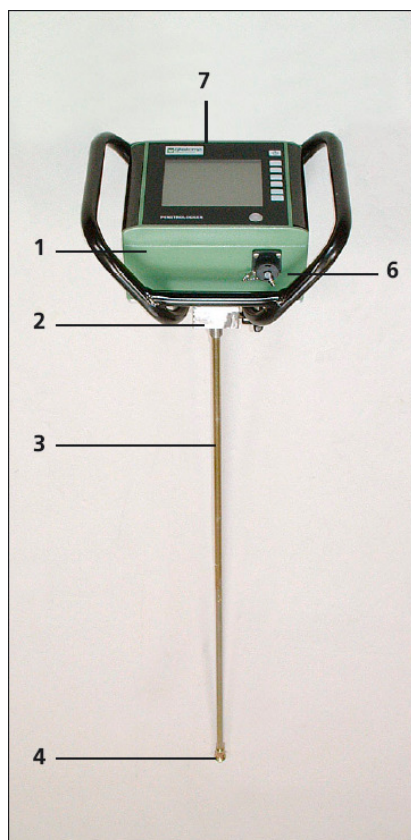
GEBRUIK

1. Afhankelijk van de verwachte dichtheid van de te sonderen grond bevestigt men een conus (18) met een bepaald basisoppervlak aan de bijbehorende sondeerstang (17). Deze stang moet in het registratiehuis geschroefd worden.
2. De handgreep (1) wordt haaks t.o.v. de twee geleidebuizen (13) op de drukstang (2) bevestigd.
3. Met behulp van de drukstanggeleider (4) wordt de drukveer (9) zodanig afgesteld dat de veer spannings- en spelingsvrij zit opgesloten tussen het registratiehuis en de veerschetel (6).
4. Via de kaartgeleider (14) wordt een registratiekaart in het registratiehuis geschoven. Om de kaart onder de schrijfstift door te kunnen schuiven, wordt deze door een lichte verdraaiing van de handgreep iets opgelicht. Vervolgens wordt m.b.v. de gekartelde rand van de aandrijfrol (15) het nulpunt van de kaart precies onder de schrijfstift gedraaid.
5. De schrijfstift wordt exact boven de verticale nullijn geplaatst. Dit is mogelijk door het boutje in de schrijfstifthouder (11) met een bijgeleverde schroevendraaier los te draaien, en vervolgens de schrijfstifthouder over de schrijfstang te bewegen.

6. De schrijfstift wordt zodanig afgesteld, dat deze een lichte druk op het papier uitoefent. Vervolgens wordt m.b.v. de grondplaat (16) de getordeerde spindel (10) en de geleidestang (12) uit het meetinstrument getrokken, waarna de grondplaat op het maaiveld wordt geplaatst. Hierna drukt men met een constante snelheid van ca. 2 cm/sec en met een gelijke druk op beide handgrepen de sondeerconus loodrecht de grond in. Ter controle van het verticaal houden van het apparaat bevindt zich een waterpasniveau op het registratiehuis.

Figuur 1-7 De werking van de penetrograaf

Het meten van de indringingsweerstand van de bodem kan bij een groot aantal metingen het best geschieden met een elektronische penetrometer met datalogger, waarbij de meetgegevens direct opgeslagen en bewerkt kunnen worden in de datalogger. Hiervoor werd de penetrologger (Figuur 1-8) ontwikkeld: een elektronische penetrometer met ingebouwde datalogger voor opslag en bewerking van een groot aantal meetgegevens (tot 1500 sonderingen). De conus wordt op de sondeerstang geschroefd, die met een snelkoppeling aan de krachtopnemer onder de penetrologger wordt bevestigd. De conus wordt vervolgens langzaam en gelijkmatig in de bodem gedrukt. De op het bodemoppervlak liggende dieptereferentieplaat reflecteert de signalen uitzonden door de interne ultrasone sensor. Hiermee wordt een nauwkeurige dieptemeting gedaan. De dieptereferentieplaat reflecteert tevens de signalen voor de controle van de prestatiesnelheid. De gemeten indringingsweerstand en GPS coördinaten worden opgeslagen in de interne logger van de penetrologger. Al naar gelang de toepassing en de te verwachten indringingsweerstand kunnen er verschillende conussen aan de sondeerstang bevestigd worden. Optioneel is een bodemvochtmeting met behulp van een externe bodemvochtsensor.



De penetrologger bestaat uit:

- de logger (1) met krachtensensor (2);
- een sondeerstang (3);
- een conus (4);
- de dieptereferentieplaat (5);
- een communicatiepoort (6); en,
- een GPS antenne (7).

Figuur 1-8 De penetrologger

Wegens het gemakkelijk gebruik en de digitale opname worden penetrometermetingen vandaag de dag quasi altijd uitgevoerd met de penetrologger. Een penetrograaf wordt steeds minder gebruikt.

1.3.2.2 Kopeckyringen

De bepaling van het soortelijk gewicht of de bulkdensiteit van de bodem geschiedt via het nemen van ongestoorde bodemstalen via zogenaamde Kopeckyringen (Figuur 1-9). Dit zijn stalen ringen met diameter 53 mm, hoogte 50 mm en een inhoud van 100 cc. Deze zijn aangescherpt langsheen één zijde en worden in de grond gedrukt met een steekset. Na staalname worden de ringen afgedekt langs boven- en onderkant met een plastic deksel.

Het schijnbaar soortelijk gewicht, de bulkdensiteit of de dichtheid van een ongestoorde bodem heeft betrekking op de grond als geheel, dus vaste bestanddelen en poriën samen. Het SSG is het gewicht in g per cm³ grond in zijn ongestoorde natuurlijke toestand, doch vrij van vocht (ovendroog):

$$\text{SSG (of BD)} = \frac{\text{gewicht ovendroge ongestoorde grond}}{\text{volume grond}}$$



Figuur 1-9 Monsterringsteekset voor ongestoorde grondmonstername

Bij de bepaling van de bulkdensiteit is de monstername zeer belangrijk. Bij de monstername mogen er zich geen volumeveranderingen voordoen (de zgn. ongestoorde monstername). Het volume moet wegens de variabiliteit van de bodem voldoende groot en juist gekend zijn (minimum 100 cm³). Daartoe gebruikt men open stalen of koperen cylinders of ringen die in de grond geduwd worden (Figuur 1-9).

Daar poriën geen massa hebben, zal een grond met veel poriën een geringere bulkdensiteit hebben dan een minder poreuze grond. Voor kleilig-lemige texturen varieert de bulkdensiteit van 1,1 - 1,6 g/cm³; voor zandige texturen van 1,3 - 1,7 g/cm³ en voor compacte lagen van 1,7 - 2 g/cm³.

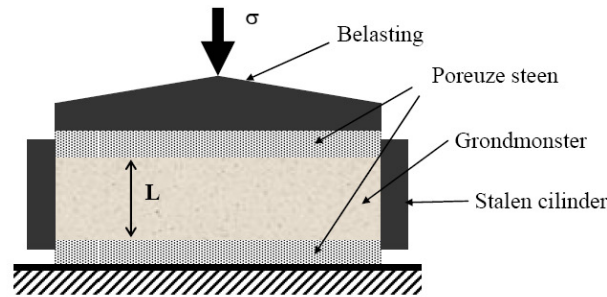
Hoe hoger de bulkdensiteit, hoe dichter de grond. Voor akker met een gehalte aan organische stof lager dan 4% en weiland dieper dan 10 cm worden de volgende normen ter beoordeling van de dichtheid gegeven:

Tabel 1-3 Beoordelingsklassen voor bulkdensiteit in relatie tot beworteling (Arshad et al., 1996).

Textuur	Laag	Matig	Hoog
Zand	< 1,4	1,4 – 1,6	> 1,6
Leem/Klei	< 1,1	1,1 – 1,5	> 1,5

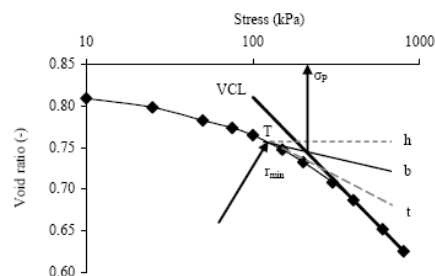
1.3.2.3 Oedometer

Het bepalen van de precompressiestress, die een maat is voor de structurele sterkte van de bodem en zijn gevoeligheid voor verdichting, kan in het labo geschieden via een zogenaamde oedometer of samendrukkingsapparaat.



Figuur 1-10 Het oedometerapparaat (De Smedt, 2007)

De grond bevindt zich in een stalen ring waarvan de vervorming t.o.v. die van de grond kan worden verwaarloosd (uniaxiale samendrukkingsproef). Onder- en bovenzijde van het monster worden afgesloten met poreuze platen zodat het uitgeperste water makkelijk weg kan vloeien. Het geheel staat in een bakje met water om uitdrogen van het monster te voorkomen en om een bekende zuigspanning te kunnen aanleggen. Op het grondmonster wordt een toenemende verticale druk uitgeoefend, waarbij voor elke spanningsstap de relatieve verandering in lengte ($\Delta L/L$) van het grondmonster wordt uitgezet in functie van het 10-delig logaritme van de aangelegde spanning σ ($\log(\text{kPa})$). Uit deze relatie kan vervolgens de precompressiestress grafisch worden afgeleid. Meestal wordt hiervoor de methode van Casagrande gebruikt, een grafische methode die in de jaren '30 van vorige eeuw werd ontwikkeld op basis van metingen in verzadigde, structuurloze bodems. Later is echter aangetoond dat deze methode ook kan worden aangewend voor het bepalen van de precompressiestress in onverzadigde, gestructureerde bodems. De methode van Casagrande bestaat erin om het punt te identificeren op de curve met de grootste kromming, daaraan de raaklijn te tekenen en de horizontale, en vervolgens de bissectrice van deze lijnen; het snijpunt met het verlengde van de VCL geeft dan de PCS.



Figuur 1-11 De methode van Casagrande voor afleiding van de precompressiestress. Vervorming werd uitgedrukt via het poriëngetal (verhouding volume poriën: volume vaste fase). De curve werd opgesteld via oedometermetingen (zwarte punten = opeenvolgende belastingen). VCL = Virgin Compression Line; punt T: punt van maximale buiging (correspondeert met kleinste buigingstraal r_{min}); t: raaklijn door T; h: horizontale door T; b: bissectrice tussen h en t; σ_p = PCS: correspondeert met het snijpunt van VCL en b (Keller, 2004).

1.3.2.4 Invloed van bodemfysische eigenschappen op meetmethoden

Vochtgehalte

In de loop van het jaar variëren de bodemvochtgehalten, zodat de grond zwelt en krimpt. Hierdoor varieert dan eveneens het volume. De maximale zwellingsstoestand van de bodem

(= bodem bij veldcapaciteit) doet zich in onze streken normaal voor aan het begin van de lente, nadat in de winter het bodemvolume in evenwicht is gekomen met het vochtgehalte. In de lente is het soortelijk gewicht dan ook het meest representatief.

De indringingsweerstand (of penetratieweerstand) is sterk vochtafhankelijk. Zo verlaagt deze weerstand aanzienlijk voor klei- en leemhoudende bodems als deze vochtig zijn. De indringingsweerstand wordt meestal bepaald wanneer de bodem op veldcapaciteit is. Vanwege de vochtafhankelijkheid is een bijkomende bodemvochtmeting vereist, teneinde een juiste interpretatie van de gemeten bodemsterkte mogelijk te maken. De meest moderne penetrologgers beschikken dan ook over een externe bodemvochtsensor.

Textuur

Voor een bodem met een bepaalde textuur neemt de bodemsterkte (waarvoor de indringingsweerstand een maat is) toe, wanneer zijn volumegewicht stijgt.

Een hoge penetratieweerstand of hoge bulkdensiteit is typisch voor zandgronden, die van nature uit al vrij dicht zijn. De binding tussen de zanddeeltjes is in een verzadigde grond erg zwak, zodat het gewicht van bovenliggende bodemlagen en de trillingen van rijtuigen voldoende zijn om de grond verder te verdichten. Zandbodems zijn echter een uitzondering op de regel dat bodems gevoeliger zijn voor verdichting in natte toestand. De cohesie van een zandbodem is in droge toestand immers minstens even klein als in natte toestand, waardoor ook dan verdichting en spoorvorming mogelijk is. Op een zandbodem kunnen penetratieweerstanden tot 5 MPa worden geregistreerd. Zulke hoge penetratieweerstanden vereisen heel wat spierkracht om de conus van de penetrometer verticaal in de bodem te duwen.

Bij kleigronden is het poriënvolume veel groter in vergelijking met zandgronden. Berijden en beweiden leidt op vochtige kleigronden tot verdichting, voornamelijk omdat de grotere poriën (macroporiën) worden samengedrukt. Het kwantificeren van deze verdichting via het bepalen van de bodemsterkte zal op kleigronden makkelijker uitvoerbaar zijn dan op zandgronden omwille van de lagere penetratieweerstanden, waardoor men de penetrometer makkelijker in de bodem kan duwen.

1.3.3 Indirecte methoden

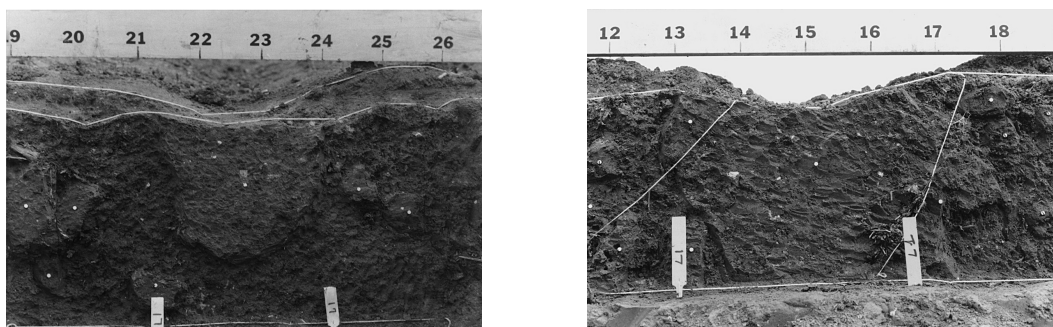
1.3.3.1 Aëratiestatus van de bodem

Aangezien compactie het zuurstoftransport in de bodem limiteert en resulteert in meer anaërobe condities, is de aëratiestatus van de bodem een indirecte maat voor bodemcompactie. Deze aëratiestatus kan gekwantificeerd worden via diverse parameters zoals de luchtgevulde porositeit, de permeabiliteit van de bodem voor lucht, de relatieve gasdiffusiecoëfficiënt, de snelheid van zuurstofdiffusie en de redoxpotentiaal. De luchtgevulde porositeit is relatief eenvoudig te meten en betreft dan ook de meest aangewende indicator, waarbij volgende richtlijnen gelden: meer dan 25% lucht (v/v) garandeert een goede aëratie, 10-25% kan resulteren in beperkingen onder zekere condities en minder dan 10% is karakteristiek voor een deficiënte aëratie en wordt bijgevolg beschouwd als zijnde kritisch voor plantengroei. Echter, bij eenzelfde luchtgevulde porositeit kan de equivalente poriëndiameter in een gecompacteerd bodem heel wat kleiner zijn in vergelijking met een niet-gecompacteerde bodem. Voor een gegeven luchtgevulde porositeit zal de aëratie dan ook normalerwijze meer gelimiteerd zijn in gecompacteerd dan in niet-gecompacteerde bodems. De permeabiliteit van de bodem voor lucht, dewelke de door een drukgradiënt teweeggebrachte massastroom van lucht beschrijft, is een tweede parameter waarmee inzicht kan worden verschaft in de luchthuishouding van de bodem en in de eventuele compactie ervan. Deze permeabiliteit is gerelateerd aan de bodemstructuur, aan de grootte van de poriën en aan hun continuïteit. Een hoge permeabiliteit is indicatief voor de aanwezigheid van poriën tussen de aggregaten (inter-aggregaat poriënruimte), dewelke

gevoelig zijn aan compactie. Een permeabiliteit van $1,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (gemeten via een zogenaamde permeameter bij een waterpotentiaal van -5kPa) werd in de literatuur gesuggereerd als zijnde de kritische ondergrens voor een goede agronomische performantie op slecht gedraineerde bodems. Een derde parameter is de relatieve gasdiffusie-coëfficiënt D/D_0 , die gedefinieerd wordt als de ratio van de gasdiffusiecoëfficiënt in de bodem (D) en de gasdiffusiecoëfficiënt van hetzelfde gas (in casu O_2) in de atmosfeer (D_0). Deze parameter is afhankelijk van de continuïteit en tortuositeit van de poriën en neemt af naarmate de compactie van de bodem toeneemt, vooral in natte bodems. Een volgende parameter is de zuurstof-diffusiesnelheid, dewelke de snelheid karakteriseert waarmee zuurstof wordt aangeboden van de bodemlucht aan de plantenwortels. De kwantificatie van de zuurstof-diffusiesnelheid gebeurt via een platina micro-elektrode waarop O_2 wordt gereduceerd en naarmate bodemcompactie en bodemvochtgehalte toenemen, zal deze parameter afnemen. Een diffusiesnelheid van ongeveer $25 \mu\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ wordt algemeen beschouwd als de grens waaronder wortelgroei verwaarloosbaar wordt. Een volgende indicator voor de status van de bodemaëratie is de redoxpotentiaal, dewelke nuttig is voor het karakteriseren van reductieprocessen in zeer natte bodems (dichtbij of bij saturatie) en anoxische condities, waar metingen van de zuurstofstroom van weinig of geen nut zijn. Redoxpotentiaalmetingen gebeuren d.m.v. elektrodes (Arvidsson, 1997; Lipiec en Hatano, 2003). Tenslotte kan de aëratiestatus van de bodem ook direct worden bepaald door het opmeten van de zuurstof- of koolstofdioxideconcentratie.

1.3.3.2 Profielwanden

In veldexperimenten ter evaluatie van bodemcompactie wordt er vaak een beroep gedaan op onderzoek van profielwanden. Een voorbeeld in dat verband is het werk van Richard *et al.* (1999), waar via een morfologische analyse van de structuur van het bodemprofiel een inschatting werd gemaakt van de bodemcompactie veroorzaakt door landbouwverkeer. Hiervoor werden er in het veld profielwanden aangelegd van 3 meter breed onder de wielsporen, gecreëerd na zaaien, oogsten of klaarmaken van het zaaibed. Bodemverdichting werd bestudeerd in het gedeelte van de bouwvoor onder het zaaibed, waarbij er getracht werd om een idee te krijgen over de intensiteit van compactie en het betrokken bodemvolume. De gecompacteerd zones onder de wielsporen hadden een massieve structuur en vertoonden geen zichtbare macroporiën. Ze werden visueel afgebakend in het reliëf van het bodemprofiel, waarna er fotografische opnamen werden genomen die in het labo werden onderworpen aan een beeldanalyse. Het (relatieve) percentage aan gecompacteerd zones onder de wielsporen liet toe het effect van het veldverkeer op verdichting van de bodem te kwantificeren. Deze percentages varieerden van 0 tot 100% en namen toe met het vochtgehalte in de bodem.



Figuur 1-12 Twee bodemprofielen na het zaaien van suikerbieten. De sterk gecompacteerd zone werd veroorzaakt door het wielspoor van de tractor waarmee de zaaimachine werd getrokken. Links bevindt de gecompacteerd zone zich tussen referentiepunten 21 en 24, rechts tussen referentiepunten 13 en 17 (Richard *et al.*, 1999).

Een tweede voorbeeld van onderzoek waarin profielwanden werden aangewend om compactie en de gevolgen ervan te bestuderen is het werk van Kulli *et al.* (2003). Deze onderzoekers visualiseerden aan de hand van stromingspatronen de compactie-effecten teweeggebracht door een suikerbietenrooier en vergaarden specifiek kwalitatieve informatie over de door compactie geïnduceerde wijzigingen inzake het infiltratieregime van de bodem. Drie behandelingen werden vergeleken: (1) een éénmalige passage van de bietenrooier, (2) herhaalde passages van dezelfde rooier, en (3) een controlebehandeling (afwezigheid van verkeer over de akker). In het veld werd voor elk van de behandelingen een kleurenoplossing aangebracht op het bodemoppervlak, waarna de dag erop verticale bodemprofielen werden geprepareerd. Met een gewone fotocamera werden vervolgens kleurenfoto's genomen van de gekleurde stromingspatronen in de profielen, dewelke bewerkt werden via digitale beeldanalyse waardoor de ruimtelijke verdeling van de gekleurde oppervlakken kon worden berekend. Analyse van de stromingspatronen van de bodems mét verkeer (enkele passage of herhaalde passages) wees op een reductie van het homogeen verdeeld netwerk van infiltratiepathways in de toplaag.

1.3.3.3 Waarnemingen

Het al dan niet gecompacteerd zijn van een bodem en de mate waarin de compactie optreedt kan indirect worden afgeleid via een aantal typische symptomen waarmee compactie in het veld dikwijls gepaard gaat. Voorbeelden van zulke 'compactiesymptomen' zijn onder meer (Kok *et al.*, 1996) :

- Het visueel tot uiting komen van rijspoor-patronen in het groeiende gewas.
- 'Staand water' of overmatige erosie.
- Een toename van de vereiste paardenkracht voor veldbewerkingen. Compactie gaat per definitie gepaard met een toename van de bodemsterkte, waardoor tractoren een grotere trekkracht vereisen.
- Misvormde plantenwortels. Wortels die een gecompacteerd bodemzone aantreffen, kunnen een ietwat gewijzigd morfologisch uitzicht hebben. Ook een oppervlakkige beworteling waarbij de wortels eerder horizontaal in plaats van verticaal groeien, duidt op compactie van de bodem.
- Dwerggroei van het gewas. Een gewas dat achterblijft in groei of onderhevig is aan nutriëntenstress kan te lijden hebben onder de gevolgen van compactie in de bodem. Wanneer compactie limiterend is voor de wortelgroei, kan de opname van water en nutriënten door de plant immers danig worden beïnvloed. Dit uit zich vaak in een verkleuring van de bladeren en in vroegtijdige droogtestress.
- Opbrengstderving. Hét ultieme symptoom van bodemcompactie is waarschijnlijk wel de afname in gewasopbrengst.
- Stagnering van de vertering van mest en gewasresten.

Het is belangrijk om te benadrukken dat de meeste van deze waarnemingen niet exclusief zijn toe te schrijven aan bodemverdichting en dat ze ook andere oorzaken kunnen hebben.

1.4 Voorkomen en remediëren van bodemverdichting

Té zware machines en té hoge bandenspanning leiden in ongunstige omstandigheden tot een verdichte bodem. Het lijkt evident dat dit voorkomen moet worden; de realiteit is echter niet zo eenvoudig. Bodemverdichting is een erg hardnekkig verschijnsel wat nauwelijks door natuurlijke herstelprocessen wordt opgeheven. Bodems met een belangrijk aandeel aan kleifraction hebben het vermogen om door zwel- en krimpproductie in functie van het vochtregime in zekere mate te decompacteren.

Een overzicht zal worden gegeven van de mogelijke maatregelen om bodemverdichting te beperken of te voorkomen. Belangrijk is om de oorzaken te koppelen aan de omstandigheden: het effect van maatregelen zoals aangepaste landbewerking (bandendruk,

goede verdeling van de wiellast, ruimtelijke verdeling van de rijpaden, betredingsfrequentie) en de relatie met omstandigheden zoals vochtregime en bodemtype zullen geïllustreerd worden aan de hand van bestaande onderzoeksresultaten. Om compactie van de diepere ondergrond te voorkomen moet er over gewaakt worden dat de spanningen die de ondergrond bereiken, de draagkracht van de ondergrond niet overschrijden. Dit kan op twee manieren worden bekomen: via een beperking van de spanningen uitgeoefend op het bodemoppervlak of via een beter in rekening brengen van de draagkracht van de toplaag van de bodem (Chamen *et al.*, s.d.; Van den Akker *et al.*, 2003).

De mate en mogelijkheid van remediëren is sterk afhankelijk van de compactiegraad. Remediëringsmaatregelen zoals het mechanisch loswerken van de bodem zullen worden beschreven.

In het algemeen zullen de voor- en nadelen van de in de literatuur beschreven preventieve en remediëringsmaatregelen worden besproken.

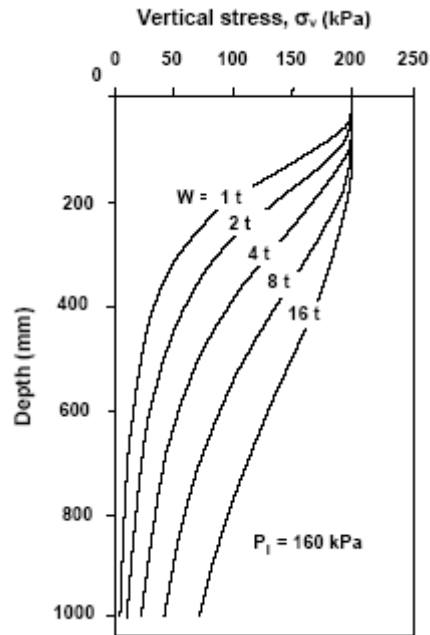
1.4.1 Preventieve maatregelen

1.4.1.1 Beperking van uitgeoefende spanningen op de bodem

Een eerste reeks van preventieve maatregelen beoogt een beperking van de op de bodem uitgeoefende spanningen. Voorbeelden van zulke maatregelen zijn onder meer:

- Het aanpassen van de wiellast, de wielconfiguratie (dubbele wielen, aantal assen,...) en de bandenspanning aan de draagkracht van de bodem. Een eerste aandachtspunt bestaat erin hoge wiellasten te vermijden aangezien bij een constante bandenspanning een hogere wiellast zal leiden tot een toename van de verticale spanningen (drukken) in de bodem. Omgekeerd leiden lagere wiellasten tot een afname van de verticale spanningen. (Chamen *et al.*, s.d.). De spanningen in de bodem onder een belast wiel nemen af met de diepte (Alakukku *et al.*, 2003). Naarmate echter de wiellast toeneemt, is er een afname van de snelheid waarmee de verticale spanningen verminderen met de diepte (Figuur 1-13). Een negatieve trend is het feit dat wiellasten van landbouw- en bosbouwmachines nog steeds toenemen. Zo wordt een wiellast vanaf 40-50 kN reeds als hoog beschouwd³ (Van den Akker *et al.*, 2003, De Jong *et al.*, 2007), hoewel de wiellasten in de praktijk vaak een stuk hoger zijn.

³ 1 N.m⁻² = 1 Pa



Figuur 1-13 Theoretische relatie tussen de verticale spanningen in de bodem en de diepte bij een constante bandendruk (W : wiellast in ton, P_i : bandendruk in kPa) (Chamen *et al.*, s.d.).

Eveneens belangrijk is de wielconfiguratie, aangezien hiermee een reductie van de wiellast mogelijk is. Zo zullen 'dubbele wielen' (twee wielen aan elk uiteinde van een as) alsook 'tandemassen' (twee of meerdere assen achter elkaar, d.w.z. twee of meerdere wielen achter elkaar, op korte afstand) de wiellast verlagen voor een gegeven totale belasting (Keller en Arvidsson, 2004). 'Dubbele wielen' krijgen echter de voorkeur op 'tandemassen' aangezien bij een tandemas het positieve effect van een lagere wiellast wordt afgezwakt door een toename van het aantal wiel passages in hetzelfde rijspoor (Alakukku *et al.*, 2003). Een derde parameter die de nodige aandacht verdient is de bandenspanning. Voor een gegeven wiellast zal een lagere bandenspanning -resultierend in een groter contactoppervlak tussen band en bodem en bijgevolg in een lagere gemiddelde contactdruk met de grond (d.i. wiellast gedeeld door contactoppervlak)- tot een afname leiden van de verticale spanningen in de bodem. Omgekeerd leidt een hogere bandendruk tot een toename van de verticale spanningen (Chamen *et al.*, s.d.). Ten behoeve van compactiepreventie zou de bandendruk bijgevolg steeds zo laag mogelijk moeten zijn. Een probleem hierbij is het feit dat een band voor veldverkeer aan andere vereisten moet voldoen dan voor wegverkeer: voor het rijden op de weg zijn hoge bandendrukken vereist, terwijl in het veld de bandendruk laag moet zijn (Alakukku *et al.*, 2003). Aan dit probleem kan worden verholpen via technologie waarbij de bandenspanning "on the move" wordt aangepast (via oppompen of laten leeg lopen van de band). Zulk systeem laat toe om de bandenspanning te verlagen gedurende veldbewerkingen en deze snel terug op te voeren wanneer er op de weg moet worden gereden. Hoewel deze technologie (in het Engels aangeduid als "Central Tyre Inflation Systems") reeds wijdverbreid beschikbaar is, bestaat er in Europa een grote variatie qua adoptiegraad (Chamen *et al.*, 2003). Nochthans zou deze, wanneer meer algemeen aangewend, kunnen bijdragen aan de preventie van bodemverdichting. Zeer lage bandendrukken (minder dan 50 kPa) zijn mogelijk voor radiaalbanden met laag profiel zonder hoge contactdrukken onder de zijkanten van de band (Alakukku *et al.*, 2003).

Arvidsson en Keller (2007) onderzochten de invloed van wiellast en bandendruk op de verticale spanningen in boven- (10 cm) en ondergrond (30, 50 en 70 cm) van een

landbouwperceel bij een bodemvochtgehalte nabij veldcapaciteit. Hiertoe werd het bodemoppervlak belast met 3 verschillende wiellasten (11, 15 of 33 kN) in combinatie met 3 verschillende bandenspanningen (70, 100 en 150 kPa) – dus 9 behandelingen in totaal – waarbij de verticale krachten op de vernoemde dieptes werden opgemeten via krachtsensoren. De metingen wezen uit dat de spanningen in de bovengrond (10 cm) sterk werden bepaald door de bandendruk: hoe lager de bandendruk bij eenzelfde wiellast, hoe lager de spanningen. In de diepere ondergrond (30 cm en dieper) daarentegen bleek de invloed van de bandenspanning op de verticale krachten veel beperkter te zijn en was het voornamelijk de wiellast die een invloed uitoefende: de hoogste krachten werden geregistreerd bij de hoogste wiellast (33kN), en dit op elke diepte (30, 50, 70 cm). Enkel bij de hoogste wiellast had de bandenspanning een zeker effect op de gemeten krachten op 30 cm diepte. In een gelijkaardig onderzoek van Keller en Arvidsson (2004), waar veel hogere wiellasten (>80 kN) werden toegepast, bleek de bandenspanning wél de verticale krachten in de ondergrond significant te beïnvloeden: de verticale krachten op 30 cm waren significant kleiner naarmate de bandendruk lager was. Op 50 en 70 cm echter, werden geen significante verschillen in verticale kracht geregistreerd bij toepassen van verschillende bandendrukken.

In de literatuur werden technische richtlijnen opgesteld ter preventie van compactie van de diepere ondergrond, waarbij limieten worden aangegeven voor bandenspanning en/of gemiddelde contactdruk met de grond. Hierbij geldt: hoe hoger de gevoeligheid van de bodem voor compactie, des te lager de aanvaardbare maximale bandenspanning en gemiddelde contactdruk met de grond. Een voorbeeld van dergelijke richtlijnen is aangegeven in Tabel 1-4:

Tabel 1-4 Richtlijnen voor maximale bandenspanning en gemiddelde contactdruk met de grond voor radiaalbanden voor landbouwgebruik in functie van 4 gevoeligheidsklassen (vulnerability) voor bodemverdichting (Chamen et al., s.d.; Spoor et al., 2003).

Gevoeligheidsklasse	Aanbevolen maximum	
	Contactdruk met grond (kPa)	Bandenspanning (kPa)
E (extreem gevoelig)	65	40
Z (zeer gevoelig)	100	80
M (matig gevoelig)	150	120
N (niet bijzonder gevoelig)	200	160

De bandenspanning in bovenstaande tabel werd geschat uit $p = 1,25 \times p_i$ met p = de gemiddelde contactdruk met de grond en p_i = de bandenspanning. De relatie tussen gemiddelde contactdruk en bandendruk is afhankelijk van de stijfheid van de band én van de bodemcondities (Alakukku *et al.*, 2003). Volgende vergelijking laat toe de contactdruk te berekenen uit de bandendruk en de eigenschappen van de band:

$p_m = c_i p_i + p_c$ waarbij p_m = de gemiddelde contactdruk met de grond, c_i = een constante voor de stijfheid van de band, p_i = de bandenspanning en p_c = de druk uitgeoefend door het karkas van de band wanneer $p_i = 0$. In de literatuur is ook melding gemaakt van gevallen waarbij de gemeten gemiddelde contactdruk lager was dan de bandendruk. De maximum drukken kunnen echter aanzienlijk hoger zijn dan de gemiddelde contactdruk, soms met een factor twee tot vier (Arvidsson en Keller, 2007).

- Rupsen in plaats van traditionele wielen. In veel gevallen wordt in een vergelijking tussen banden en rupsen al snel de conclusie getrokken dat rupsen veel minder druk uitoefenen op de grond dan banden, omdat het contactoppervlak van de rups met de

grond vele malen groter is dan van een band. Daarbij wordt de (gemiddelde) contactdruk met de grond vaak uitgedrukt als totale last op de rups (vaak de helft van het eigen gewicht plus een nuttige last) gedeeld door het contactoppervlak (breedte \times lengte van de rups), hetgeen resulteert in zeer lage (gemiddelde) contactdrukken. Dit geeft echter een verkeerde voorstelling van zaken, omdat bij rupsbanden zeer hoge piekspanningen onder de wielen en steunrollen kunnen optreden, die leiden tot hoge grondspanningen in de bovengrond. Doordat de pieken echter relatief kort zijn, dempen deze wel sterk uit, zodat in de ondergrond de grondspanningen toch relatief laag worden. Samengevat kan worden gesteld dat rupsen veel schade aan vooral de ondergrond kunnen voorkomen mits de verdeling van de (gemiddelde) contactdruk onder de rups gelijkmatig is en de (gemiddelde) contactdruk niet te hoog (De Jong *et al.*, 2007).

- Verminderen van aantal veldbetredingen. De frequentie waarmee landbouwvoertuigen het veld betreden voor de uitvoering van cultuurwerkzaamheden is mede bepalend voor het risico op bodemverdichting, aangezien een toename van het aantal veldbetredingen kan leiden tot een toename van de bodemvervorming. Het beperken van het aantal veldbetredingen is dan ook een voor de hand liggende maatregel, dewelke men bijvoorbeeld zou kunnen realiseren door meerdere grondbewerkingen gelijktijdig uit te voeren in één en dezelfde werkgang (Hamza en Anderson, 2005), of door gereduceerde bodembewerking. Bij het uitvoeren van meerdere grondbewerkingen in één werkgang, bijvoorbeeld door een werktuig vóór en één achter de tractor te monteren, moet erover worden gewaakt dat de totale last niet te hoog wordt. Zoniet zal er evengoed verdichting optreden.
- Gecontroleerd verkeer. Gecontroleerd verkeer (controlled traffic) is een systeem waarbij het exploitatieverkeer in strikte banen wordt geleid via speciaal daartoe voorziene verkeerspaden, zodat de oppervlakte waar potentiële bodemcompactie kan optreden beperkt blijft (Hamza en Anderson, 2005). In bosbestanden zou dit systeem compactie kunnen beperken tot (minder dan) 10% van de oppervlakte, hetgeen beduidend minder is dan de 20 à 35% bereden oppervlakte die het gevolg is van ongecontroleerde circulatie van de toegepaste bosexploatiemachines o.a. 'skidders' (bosbouwtractoren) en 'forwarders' (uitrijcombinaties, d.w.z. voorwagen + uitrijwagen). Lineaire exploitatiewegen, mits goed gepositioneerd, beperken in sterke mate de oppervlakte onderhevig aan verstoring en compactie en zijn bijgevolg de uitgelezen manier om het systeem van gecontroleerd verkeer te vertalen naar de praktijk (Adams en Froehlich, 1981; De Vos, 2005). Om de bereden oppervlakte te minimaliseren zou men in akkers met een onregelmatige vorm de tractoren en andere exploitatiemachines eventueel kunnen voorzien van een DGPS (Differential Global Positioning System)-routeplanner (Chamen *et al.*, s.d.). Wanneer gecontroleerd verkeer in een breder perspectief wordt opgevat, zou men ook het afbakenen en uitstippelen van ruiterspaden en voetgangerswegjes kunnen vermelden als mogelijke maatregelen ter preventie van bodemcompactie. Immers, ook ruiters en voetgangers kunnen compactie veroorzaken, wat het noodzakelijk maakt om het ruiters- en voetgangersverkeer in goede banen te leiden (De Vos, 2005).
- Goede ploegpraktijk. Doorgaans zal men bij het ploegen van de akker met de tractor-ploeg-combinatie in de open ploegvoor rijden. Aangezien de tractorwielen dan rechtstreeks in contact komen met het bovenste gedeelte van de diepere ondergrond, is er echter een groot risico op compactie van deze laag. Het alternatief waarbij er gereden wordt op het ongeploegde oppervlak geniet dan ook sterk de voorkeur uit hoofde van compactie-preventie. Oppervlakkiger ploegen bij vochtige condities in de ondergrond is een andere optie (Chamen *et al.*, s.d.; Chamen *et al.*, 2003). Tenslotte is het aanbevolen om het ene jaar te beginnen ploegen aan de ene kant van het perceel, om het jaar nadien dan te beginnen aan de andere kant (afwisselend links, rechts ploegen)

1.4.1.2 Beter in rekening brengen van de draagkracht van de bodem

Een tweede reeks van maatregelen met preventieve werking ten aanzien van bodemcompactie heeft tot doel de draagkracht van de toplaag van de bodem beter in rekening te brengen. Het gaat onder meer om volgende maatregelen:

- Tijdstip van bewerking. Daar bodemvervorming toeneemt met het vochtgehalte in de bodem, zal het belangrijk zijn om bodembewerkingen uit te voeren bij het juiste (lees: minimale) bodemvochtgehalte teneinde compactie te voorkomen (Hamza en Anderson, 2005). Het tijdstip van bewerking is bijgevolg een cruciale factor voor de preventie van compactie. Er dient te worden opgemerkt dat er wel een aantal moeilijkheden zijn verbonden aan de implementatie van deze maatregel. Zo is er ten eerste de veelheid en verscheidenheid aan bodem- en machinekarakteristieken, hetgeen voor elk bodemtype en elke bewerking een andere benadering vergt. Een andere moeilijkheid is het feit dat het opleggen van beperkingen qua betreden van land en/of bos de periode waarin bewerkingen kunnen worden uitgevoerd danig kan limiteren, zeker op plaatsen waar de bodem het hele jaar door een hoog vochtgehalte heeft (Adams en Froehlich, 1981).
- Aandacht voor het organisch materiaal (OM) in de bodem (goed bodembeheer). Een voldoende hoeveelheid OM in de bodem zou de bodemstructuur stabiliseren en de bodem resistenter maken t.o.v. degradatie (fysische weerstand tegen compactie). Verder zorgt OM voor een toename van de regenwormactiviteit, hetgeen onder meer de waterinfiltratie ten goede komt (Unger en Kaspar, 1994). Op de landbouwakker zijn gewasresten (o.a. stoppels) een voorname bron van OM, maar ook via de toepassing van dierlijke mest kan de organische stofvoorraad van de bodem op peil worden gehouden, om op die manier de weerstand van de bodem t.o.v. compactie te verhogen (Hamza en Anderson, 2005). OM is verder ook in de bosbouw heel belangrijk en alle ingrepen die OM verwijderen van de standplaats moeten vermeden worden (strooiselverwijdering, verbranden kroonresten, ...). Zeker in zandige bodems is het humuscomplex uitermate belangrijk en zou humusopbouw een lange termijn-doelstelling moeten zijn, waarbij het vermijden van de export van OM een voorname vereiste is (De Vos, 2005).
- Aandacht voor de pH van de bodem. Verzuurde bodems zijn zeer gevoelig voor compactie en herstellen zeer langzaam daar er minder aggregaatvorming en bodemleven is in een zure bodem. Bij verzuring verslempen vele bodems snel, zeker wanneer weinig OM aanwezig is. Indien de zuurtegraad van de bodem te laag is ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 5,5$) zal dit nefast zijn voor de vorming van een goede bodemstructuur. Bekalking kan echter uitkomst bieden, vooral op leem- en kleibodems, daar bekalking een sterk positief effect kan hebben op de aggregaatvorming (Ca-bruggen), waardoor de macro-porositeit en bodemaëratie worden verbeterd. Daarenboven komt bekalking ook het bodemleven ten goede en meer in het bijzonder de regenwormpopulatie (De Vos, 2005), waarvan de aantallen zullen teruglopen bij verzuring van de bodem (Baars, 2000). Omwille van het decompactierend effect van regenwormen (zie verder), draagt bekalking dus niet alleen bij aan de preventie van bodemverdichting, maar ook (onrechtstreeks) aan de remediëring ervan.

Op landbouwbodems wordt de pH doorgaans nauwgezet opgevolgd en wordt bij een afwijkende zuurtegraad onmiddellijk bijgestuurd, zodat een te lage pH minder vaak een probleem vormt. Dit is niet zo voor bosgronden waar verzuring wél een grote bedreiging vormt naar verdichting toe.

1.4.2 Remediëringsmaatregelen

1.4.2.1 Mechanisch losmaken van verdichte horizon

Hoewel in sommige gevallen biologische activiteit en natuurlijke processen (cfr. afwisselende vries- en dooiperiodes) volstaan om bodemcompactie te remediëren⁴, zullen deze processen in vele andere gevallen te traag of inadequaet zijn, zodat mechanische decompactie een noodzaak is. Bij het mechanisch losmaken van de bodem dient er echter steeds over gewaakt te worden dat de bodem niet extra gevoelig wordt gemaakt voor toekomstige compactie of recompatie (Chamen *et al.*, s.d.; Kok *et al.*, 1996). Diepe grondbewerkingen waarbij de bodem wordt opengescheurd, kunnen hun nut bewijzen op landbouwgronden via een verbetering (herstel) van de bewortelingscapaciteit en de permeabiliteit voor bodemwater (betere drainage) door het verwijderen van de gecompacteerd bodemlaag. Het openscheuren van de bodem dient te gebeuren bij het juiste bodemvochtgehalte en verder moeten de diepte waarop de bodembewerking plaatsvindt en de positionering van de tanden waarmee de bodem wordt gescheurd goed op elkaar worden afgestemd. Een voorbeeld van een werktuig voor decompactie van (diepere) bodemlagen op landbouwgrond is voorgesteld in het linkerluik van Figuur 1-14. De tanden van de afgebeelde machine zijn gemonteerd in opeenvolgende tandenrijen, waarbij elke rij steeds dieper in de bodem weet te dringen. Een nadeel van het openscheuren van de bodem door zulke werktuigen is het feit dat de bodem na afloop in een toestand komt te verkeren die gevoelig is aan recompatie door grazende dieren of machineverkeer. Bewerkingen van de diepere ondergrond om bodemverdichting opnieuw ongedaan te maken, gaan immers frequent gepaard met het aanzienlijk losser worden van de bodem, een herschikking van de bodemaggregaten én een verlies van de draagkracht van de bodem. Het remediëren van verdichting via mechanische weg zou dan ook de vorming van scheuren en barsten doorheen de verdichte zone moeten beogen (om de beworteling en drainage te herstellen), waarbij de verstoring van de overblijvende bodemmassa minimaal is. Het doorklieven van de bodem mag niet gepaard gaan met het losser maken ervan, zodat er geen verlies is van draagkracht. Het doel is scheuren en barsten te creëren waarbij de bodemmassa tussenin zoveel mogelijk intact wordt gelaten.

Het initiële decompactie-effect zal van korte duur zijn indien er geen controle wordt uitgeoefend over de veldbetreding na decompactie. Alvorens een gedecompacteerd bodem aan nieuwe belastingen wordt blootgesteld, moet deze gedurende een zekere periode onaangeroerd blijven zodat de bodem de tijd krijgt om te stabiliseren. Hoe langer deze periode, hoe groter de bodemsterkte die opnieuw kan worden opgebouwd en hoe groter de waarschijnlijkheid dat de decompactie meer blijvend en succesvol zal zijn. Een correcte timing van de decompactie-actie binnen een rotatieschema kan bijdragen aan het stabilisatieproces. Zo is het aangewezen om na decompacteren een diepwortelend gewas te voorzien (bijvoorbeeld een graangewas), daar zulk een gewas het stabilisatieproces kan ten goede komen. Ter preventie van recompatie en ter verbetering van de structuur van een opengescheurd bodem is het raadzaam om een aggregaatvormend (flocculerend) agens zoals gips of organisch materiaal aan de bodem toe te voegen. Zonder zulk een agens zou de verdichting wel eens kunnen terugkeren in het eerste jaar na openscheuren (Chamen *et al.*, 2003; Spoor *et al.*, 2003; Hamza en Anderson, 2005).

Ook voor een bosgrond is het mechanisch losmaken van de bodem een noodzakelijke maatregel, indien deze niet op een natuurlijke manier kan herstellen na compactie. Robuuste machines dienen daarvoor ingezet, waarbij het type van bodembewerking afhankelijk is van de terreincondities. Indien er weinig obstakels zijn (stronken, omgevallen bomen, ondergroei,...) en de bodem niet waterverzadigd is, kan gebruik gemaakt worden van een bosfrees. Een tandenfrees is wellicht beter dan een bladfrees, omdat deze laatste nog meer de neiging heeft de bodem dicht te smeren. In de andere gevallen (nattere bodemcondities,

⁴ In het geval van vriezen en dooien zal het remediëren van eventuele verdichting beperkt blijven tot de bovenlaag van de bodem. Biologische activiteit (cfr. regenworm-activiteit: zie 1.4.2.2) laat ook toe verdichting van de ondergrond (= zone onder de bouwvoor) te remediëren.

meer geaccidenteerd terrein en meer stronken) kan een schijveneg (rechterluik Figuur 1-14) ingezet worden. Deze kan opklappen door middel van een geveerd systeem wanneer takken of stronken voorkomen (De Vos, 2005).



Figuur 1-14 Links: een werktuig van de nieuwe generatie voor de decompactie van de diepere bodemlagen op landbouwgrond (Hamza en Anderson, 2005); Rechts: een schijveneg voor het losmaken van de bovenlaag van bosbodems (De Vos, 2005).

1.4.2.2 Decompactie door regenwormactiviteit

(Her)introdactie van regenwormen biedt mogelijkheden om de bodem op een natuurlijke manier te decompacteren. Regenwormen kunnen bodems met een penetratieweerstand tot 3 MPa doorboren door ingestie van bodempartikels in plaats van zijdelingse verplaatsing (De Vos, 2005). In de literatuur werd reeds melding gemaakt van het doorboren van een artificiële 'ploegzool' door *Lumbricus terrestris*-species (Whalley *et al.*, 1995). Deze regenwormsoort betreft een zogenaamde anekische soort. Typisch voor anekische regenwormen of diepgravers zijn de diepe verticale gangenstelsels, die tot meer dan 1 meter diep gaan. 's Nachts voeden deze wormen zich aan de oppervlakte met strooisel en vaak trekken ze organisch materiaal mee in hun gangen (Vande Kerkhof en Muys, 2003) waarin ze heen en weer pendelen. Vandaar dat deze wormen ook wel eens worden aangeduid als 'pendelaars'. Kenmerkend aan hun gangen is dat er aan de zijkant verteerd organisch materiaal (zwart van kleur) is afgezet. De bekwaamheid van deze wormen om gangen door verdichte lagen (ploegzolen) heen te graven is bijzonder belangrijk, aangezien op die manier tunnels ontstaan (een soort van 'bioporiën') langswaar plantenwortels snel tot in de diepere bodemlagen kunnen doordringen zonder dat ze hier verdichte bodemzones voor hoeven te penetreren. Zo wordt wortelgroei mogelijk doorheen bodemzones die wortelpenetratie normalerwijze bemoeilijken of zelfs geheel onmogelijk maken (Unger en Kaspar, 1994). Endogeïsche regenwormen (of bodemwoelers) en epigeïsche regenwormen (of strooiselwormen) zijn minder of niet geschikt voor de decompactie van verdichte bodemlagen vergeleken met de anekische wormsoorten. De gangenstelsels van endogeïsche regenwormen zijn niet permanent, lopen min of meer horizontaal en beperken zich tot de bovenste 30 à 40 cm van de bodem. Epigeïsche soorten dewelke huizen in de strooisellaag bezitten onvoldoende spierkracht om gangen te graven en oefenen bijgevolg geen invloed uit op de bodemstructuur. Laatstgenoemde regenwormen zijn zuurtolerant in tegenstelling tot endogeïsche regenwormen waarbij de meeste soorten weinig zuurtolerant zijn. De anekische soorten of diepgravers zijn zelfs zuurschuwend (Vande Kerkhof en Muys, 2003). Vandaar dat de zuurtegraad van de bodem heel bepalend zal zijn voor het al dan niet slagen van de decompactie van verdichte bodemlagen via een (her)introdactie van regenwormen. Zo is op zure bosbodems de introductie van regenwormen in het verleden niet echt succesvol gebleken. Het remediërend vermogen van regenwormen wordt overigens niet door iedereen erkend. Misschien is het vermogen van regenwormen om verdichte lagen (bv. ploegzolen) te doorboren wel een beetje overroepen en is hun effect op verdichting eerder preventief i.p.v. curatief?

1.4.2.3 Decompactie door plantenwortels

De dagelijkse inherente fluctuaties in de worteldiameter (tijdelijke afnames en toenames) destabiliseren de bodemstructuur en zorgen voor een lossere bodem van de verdichte bodemlagen die de wortels omgeven. De wortels van verschillende gewassen alsook de verschillende cultivars van eenzelfde gewas verschillen aanzienlijk in hun vermogen om harde bodemlagen te penetreren. Echter, doorgaans zijn het vooral sterk (= diep) wortelende gewassen die in staat zijn om bodems met een hoge penetratieweerstand te doorboren en de verdichte zones te vernietigen. Een voorbeeld van een dergelijk gewas is alfalfa (*Medicago sativa* L.). Het opnemen van zulke gewassen in het rotatieschema is een vorm van compactieremediëring en is wenselijk om het risico op verdichting van de diepere ondergrond te minimaliseren. Wanneer een verdichte zone doorboord wordt door plantenwortels zullen de kanalen en macroporiën die hierbij ontstaan als toekomstige pathways doorheen de gecompacteerde zone fungeren, waarlangs de wortels van volgende gewassen zich een weg kunnen banen zonder al te fel gehinderd te worden. Recompactie moet dan uiteraard worden vermeden (Unger en Kaspar, 1994; Hamza en Anderson, 2005). Een groenbemester als gele mosterd staat gekend om zijn diepe beworteling (kan bv. op korte tijd tot in de drainagebuizen groeien) en zou omwille van die reden in aanmerking kunnen komen voor het remediëren van verdichting. Ook andere groenbemers zouden echter een rol kunnen vervullen als 'decompacteerend gewas'. Zo bewortelt rode klaver zowel de bovengrond alsook de diepere lagen. De voordelen van het opnemen van rode klaver in de rotatie zijn naast de diepere beworteling, dat er meestal weinig of geen bewerking nodig is na inzaaien én dat de oogst plaatsvindt wanneer de bodem droog is en bijgevolg weinig gevoelig voor compactie. Bij een meerjarige teelt met klaver in de rotatie vergroten deze effecten nog.

1.5 Modelleren van bodemverdichting

Om bodemverdichting in het veld tengevolge van veldverkeer te voorspellen kan er gebruik worden gemaakt van diverse bodemcompactiemodellen. Daarbij onderscheiden we enerzijds de (pseudo-)analytische modellen en anderzijds 'de begrensde element modellen' (finite element models, FEM's), die van elkaar verschillen in de manier waarop de stressverdeling in de bodem wordt berekend (Arvidsson, 1997).

In een analytisch model wordt de bodem opgevat als een homogeen, elastisch, isotroop⁵ en semi-oneindig medium. Gelaagdheid van het bodemprofiel (heterogeniteit) kan bij een dergelijk model niet in rekening worden gebracht bij de berekening van de stresspropagatie doorheen de bodem, in tegenstelling tot een FEM waar dit wel mogelijk is. FEM's delen het bodemcontinuüm op in een eindig aantal bodemelementen die elk afzonderlijk behandeld worden. In vergelijking met een analytisch model zal een FEM het effect van plastische vervorming van de bodem op de stressverdeling makkelijker in rekening kunnen brengen. Het opdelen van de bodem in individuele elementen laat de FEM's toe om bodemcompactie te modelleren voor bodems waar anisotrope condities heersen. Nadeel van de FEM's is dat ze in vergelijking met de analytische modellen meer mechanische parameters vereisen, dewelke vaak moeilijk experimenteel te bepalen zijn (Arvidsson, 1997, Arvidsson *et al.*, 2001, Defosse en Richard, 2002). Voor sommige parameters kan echter beroep worden gedaan op pedotranferfuncties die de parameter schatten aan de hand van gekende variabelen.

Een voorbeeld van een analytisch bodemcompactiemodel is SOCOMO (SOil COmpaction MOdel) (Van den Akker, 2004), een relatief eenvoudig model waarbij de inputbehoeften eerder beperkt blijven. Een meer uitgebreid analytisch model is SoilFlex (Keller *et al.*, 2007), welke de meest interessante aspecten van vier bestaande analytische modellen (waaronder SOCOMO) integreert en verfijnt. De voor het model benodigde bodemmechanische

⁵ Een materiaal wordt isotroop genoemd wanneer de materiaaleigenschappen niet van de richting afhangen. Wanneer de eigenschappen wél van de richting afhangen, spreekt men van anisotroop.

parameters kunnen worden ingeschat via pedotransferfuncties. Probleem is echter dat slechts enkele van zulke pedotransferfuncties beschikbaar zijn en er nood is aan de ontwikkeling van meer van deze functies. Voorbeelden van FEM's zijn het Generalised Plasticity model en het Soft Soil model. Eerstgenoemd model heeft het voordeel dat het kan worden aangewend voor compactievoorvoorspellingen op niet-gesatureerde bodems. Bovendien beschouwt het Generalised Plasticity model lage hydraulische conductiviteiten in tegenstelling tot het Soft Soil model, waarin wordt uitgegaan van een extreem hoge hydraulische conductiviteit. Het Generalised Plasticity model vergt echter een relatief grote hoeveelheid rekenkracht, terwijl voor het Soft Soil model een gewone PC volstaat (Gysi, 2001).

1.6 Zonering en weergave op kaart van de gevoeligheid voor en risico op bodemverdichting

In de literatuur zijn er verschillende voorbeelden voorhanden van bodemverdichtingskaarten. Hiervan zal een overzicht worden gegeven in de volgende paragrafen. Er zijn kaarten beschikbaar voor 3 schaalniveaus: (1) de Europese schaal, (2) de nationale schaal en (3) de regionale, locale schaal. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de procedures achter de diverse pan-Europese en nationale kaarten (voor zover gepubliceerd) wordt verwezen naar de Bijlage 1. Via een fichesysteem worden van elke kaart een aantal kenmerken systematisch opgelijst.

1.6.1 Pan-Europese schaal

Jones *et al.* (2003) hebben een bodemkundige gevoeligheidskaart opgesteld voor bodemverdichting van de diepere ondergrond in Europa (Figuur 1-15), die voorzien werd van een schaal met 4 gevoeligheidsklassen (lage, matige, hoge of zeer hoge gevoeligheid). Het betreft hier een inschatting van de inherente gevoeligheid (susceptibility) dewelke werd afgeleid op basis van relatief stabiele bodemeigenschappen, met name textuur (6 textuurklassen) en pakkingsdensiteit (3 klassen: laag, medium en hoog). De pakkingsdensiteit wordt berekend aan de hand van volgende pedotransferfunctie: $PD = \rho + 0.009C$ waarbij PD staat voor pakkingsdensiteit in ton m^{-3} , ρ voor de bulkdensiteit eveneens in ton m^{-3} , en C voor het kleigehalte (gewichts%).

Tabel 1-5 *Inherente gevoeligheid (susceptibility) voor bodemverdichting op basis van textuur en pakkingsdensiteit (inherente gevoeligheidsklassen: L, laag; M, matig; H, hoog; ZH, zeer hoog)^a (Jones et al., 2003).*

Textuurklasse	Pakkingsdensiteit (t m^{-3})		
	Laag (< 1.40)	Medium (1.40-1.75)	Hoog (> 1.75)
Grof	ZH	H	M ^b
Medium	H	M	M
Medium fijn	M(H)	M	L ^c
Fijn	M ^d	L ^e	L
Zeer fijn	M	L	L
Organisch	ZH	H	

^a Aan deze initiële gevoeligheidsclassificatie van Jones *et al.* werden later nog wijzigingen aangebracht via een opdeling binnen de textuurklassen 'medium' (in 'medium < 18% klei' en 'medium > 18% klei') en 'medium fijn' (in 'medium fijn < 18 % klei' en 'medium fijn > 18% klei') (Chamen *et al.*, s.d.; Spoor *et al.*, 2003).

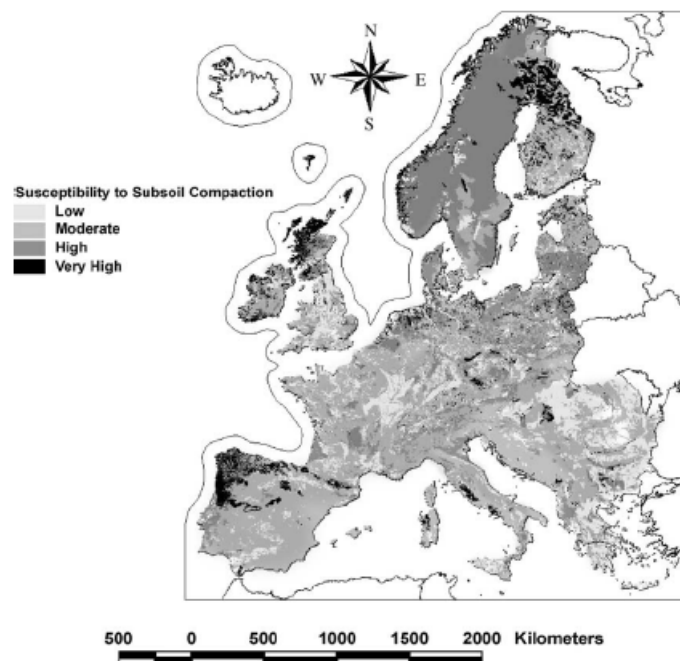
^b Uitgezonderd natuurlijk gecompacteerd of zandig materiaal dat een zeer lage (L) gevoeligheid heeft.

^c Deze bodems zijn al zeer verdicht.

^d Deze pakkingsdensiteiten worden gewoonlijk alleen aangetroffen in recente alluviale bodems met bulkdichtheden van $0.8-1.0 \text{ t m}^{-3}$ of in de toplaag van bodems waar $> 5\%$ organische koolstof

^e Fluvisols in deze categorie hebben een matige gevoeligheid.

Deze gevoeligheidsclassificatie werd gekoppeld aan de European Soil Database om aldus te komen tot de hieronder afgebeelde kaart. Deze geeft zoals gezegd een voorstelling van de inherente gevoeligheid voor bodemverdichting van de diepere ondergrond in Europa. Een analyse van de verdeling van de bodems over de verschillende gevoeligheidsklassen gaf aan dat 20% van alle bodems in Europa een lage (inherente) gevoeligheid heeft voor bodemverdichting, 44% een matige gevoeligheid, 28% een hoge en 9% een zeer hoge gevoeligheid. Meer dan een derde van de Europese bodems werd dus bestempeld als gevoelig tot zeer gevoelig voor compactie en circa 75% matig tot hoog gevoelig. Organische bodems (cfr. veengronden) of bodems met een grove textuurklasse bleken bodems met een hoge of zeer hoge compactiegevoeligheid te zijn.



Figuur 1-15 De inherente gevoeligheid voor compactie van de diepere ondergrond in Europa (Jones et al., 2003).

Belangrijk om op te merken is het feit dat de inherente gevoeligheid voor compactie niet mag verward worden met de actuele gevoeligheid, dewelke de resultante is van de inherente gevoeligheid gecombineerd met gegevens over de actuele vochtstatus en het landgebruik van de betreffende bodem. Vertrekkende van de gevoeligheidsclassificatie (susceptibility) in Tabel 1-5 werd door Jones *et al.* (2003) een nieuwe gevoeligheidsclassificatie (vulnerability) uitgewerkt, waarin ook de vochttoestand van de bodem in rekening wordt gebracht.

Tabel 1-6 Gevoeligheid (vulnerability) voor bodemverdichting op basis van inherente gevoeligheid (susceptibility) uit Tabel 1-5 en vochtstatus van de bodem (gevoeligheidsklassen: N, niet bijzonder gevoelig; M, matig gevoelig; Z, zeer gevoelig; E, extreem gevoelig) (Chamen et al., s.d.; Spoor et al., 2003 naar Jones et al., 2003).

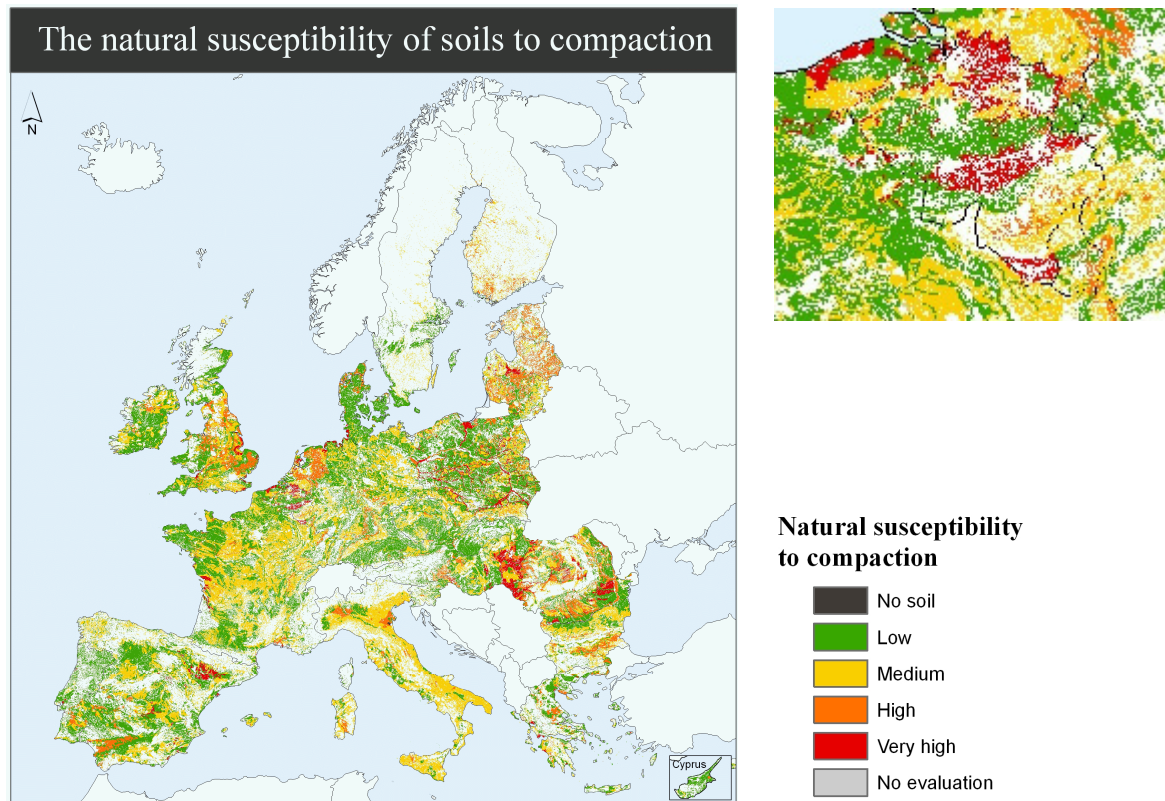
Gevoeligheidsklasse	Vochttoestand ^a			
	Nat	Vochtig	Droog	Zeer droog
ZH	E ^b (E ^c)	E (E)	Z (E)	Z (Z)
H	Z (E)	Z (E)	M (Z)	M (M)
M	Z (E)	M (Z)	N (M)	N (N)
L	M (Z)	N (M)	N (N)	N (N)

^a De vochttoestand refereert naar de condities in de diepere ondergrond. Bodems bij vochtgehalten dicht bij veldcapaciteit corresponderen bij benadering met de 'Nat'-klasse en deze in de nabijheid van het permanent verwelkingspunt met de 'Droog'-klasse.

^b Klassen buiten de haakjes refereren naar situaties waarbij er een significante bescherming is van de diepere ondergrond, d.w.z. alle belastingen worden uitgeoefend op het bodemoppervlak in de aanwezigheid van een hardere laag op zekere diepte met daarboven een stevige en vaste toplaag.

^c Klassen binnen de haakjes refereren naar situaties waarbij de diepere ondergrond minimaal beschermd is, d.w.z. die situaties waarbij tractoren tijdens het ploegen in de open ploegvoor rijden en waar de belastingen worden uitgeoefend in aanwezigheid van een losse toplaag met weinig draagkracht.

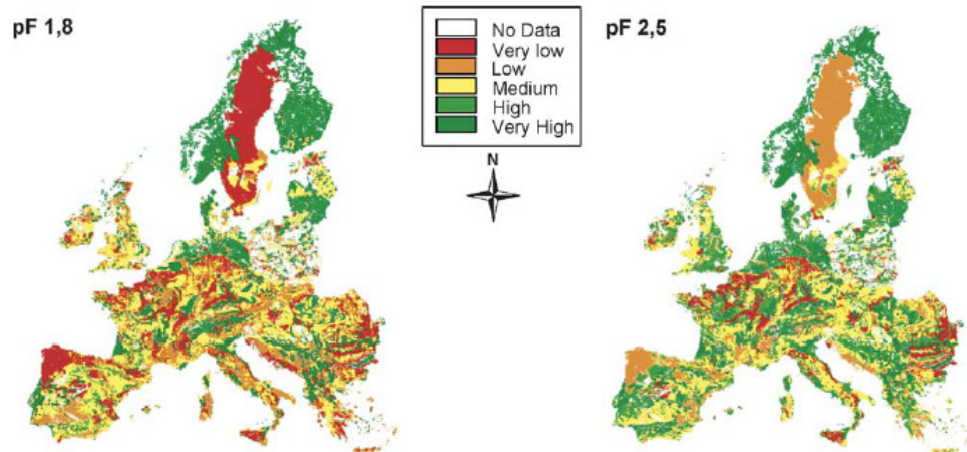
Een tweede voorbeeld van een gevoeligheidskaart voor bodemverdichting voor het grondgebied Europa is aangegeven in Figuur 1-16. Deze kaart toont de natuurlijke (inherente) gevoeligheid van landbouwgronden voor verdichting indien deze aan verdichting zouden blootgesteld worden. De natuurlijke gevoeligheid werd bepaald aan de hand van pedotransfer-rules, waarvoor de input-parameters werden betrokken uit de European Soil Database. Voorbeelden van dergelijke parameters zijn bodemeigenschappen als bodemtype, textuur, waterregime, diepte tot texturele wijzigingen (diepte bodemhorizonten), en de beperkingen van de bodem voor landbouwgebruik. Naast de 'hoofdparameters' werd er ook gebruik gemaakt van een aantal bijkomende parameters ('hulpparameters') zoals o.a. de aanwezigheid van een impermeabele laag, info over het water management systeem en het primaire en secundaire landgebruik (data in verband met landgebruik werden betrokken uit CORINE Land Cover 2000). Er werd verondersteld dat elke bodem, als poreus medium zijnde, gecompacteerd kon worden (JRC, 2008).



Figuur 1-16 Natuurlijke gevoeligheid van de bodems in Europa voor verdichting (Links). Voor het grondgebied van België werd een uitvergroting gemaakt (Rechts)(JRC, 2008).

Het is belangrijk te onderstrepen dat bovenstaande bodemverdichtingskaart opnieuw slechts de gevoeligheid voor bodemverdichting weergeeft. Dit is de waarschijnlijkheid dat verdichting optreedt gegeven de blootstelling van de bodem aan factoren die erom bekend staan verdichting in de hand te werken. Deze kaart is bijgevolg vooral belangrijk voor preventie-doeleinden en toont geenszins de werkelijke (reële) compactietoestand in de bodem (JRC, 2008).

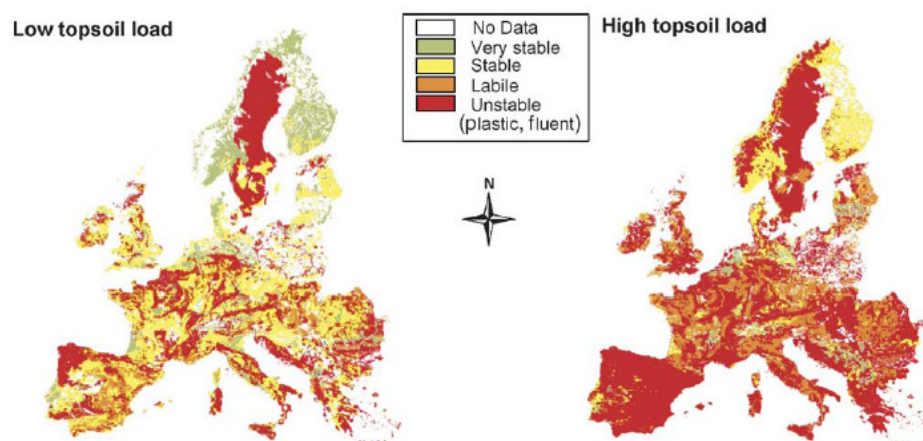
Een derde gevoeligheidskaart voor bodemverdichting die dekkend is voor Europa is weergegeven in Figuur 1-17. Deze kaart werd ontwikkeld door Horn *et al.* (2005) en geeft de precompressiestress weer voor bouwland, berekend aan de hand van de pedotransferfuncties uit Horn en Fleige (2003) die overgenomen werden uit Lebert en Horn (1991).



Figuur 1-17 Berekende waarden voor de precompressiestress (in kPa) bij een pF van 1,8 en 2,5 voor de diepere ondergrond (30-60 cm) van Europa. De bodemkaart van Europa (schaal 1:1.000.000) vormt de vertrekbasis van deze kaart. Klassificatie van de precompressiestress (kPa): <30, zeer laag; 30-60, laag; 60-90, medium; 90-120, hoog; 120-150, zeer hoog (Horn *et al.*, 2005).

Een toename van de pF van 1,8 naar 2,5 resulteert in hogere waarden voor de precompressiestress: bij een pF van 1,8 variëren de precompressiestress-waarden in de diepere ondergrond meestal tussen 'laag' (30 tot 60 kPa) tot 'medium' (60 tot 90 kPa); echter, bij een pF van 2,5 is er een toename van het aandeel aan hoge waarden (>120 kPa) (Horn *et al.*, 2005). Hogere precompressiestress-waarden impliceren een lagere gevoeligheid voor verdichting. Uit Figuur 1-17 blijkt duidelijk dat een drogere bodem (= hogere pF) minder compactiegevoelig is. Of omgekeerd: nattere bodems (= bodems met een lagere pF) hebben lagere PCS-waarden en zijn daarom compactiegevoeliger.

Een tweede type bodemverdichtingskaart voor Europa ontwikkeld door Horn *et al.* (2005) is weergegeven in Figuur 1-18.



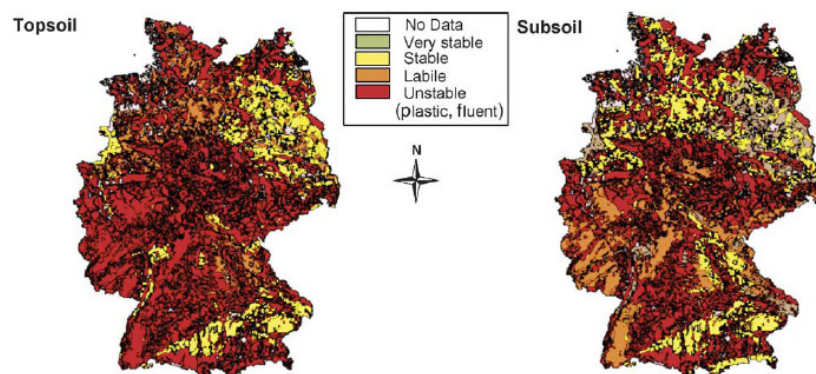
Figuur 1-18 Verhouding van de precompressiestress tot de op het bodemoppervlak uitgeoefende actuele druk bij een pF van 1,8 voor de toplaag van de bodems (0-30 cm) van Europa. Lage belasting van de bovenlaag = een bandenspanning van 60 kPa + een belasting van de achterste as van 17 kN; hoge belasting = bandendruk van 200 kPa + asbelasting achteraan van 200 kN. De bodemkaart van Europa (schaal 1:1.000.000) vormt de vertrekbasis van deze kaart. Klassificatie van de effectieve bodemsterkte via de ratio precompressiestress over uitgeoefende bodemdruk: >1,5, zeer stabiel, elastische

vervorming; 1,5-1,2, *stabil*; 1,2-0,8, *labiel*; <0,8, *onstabil*, *additionele plastische vervorming* (Horn et al., 2005).

De kaart in Figuur 1-18 toont de ratio van de precompressiestress over de op het bodemoppervlak uitgeoefende actuele contactdruk door landbouwmachinerie voor de toplaag van de bodems in de verscheidene bodemregio's in Europa. Wanneer de bodemhorizont sterker is dan de externe mechanische druk is deze ratio groter dan 1,2 en kunnen we de bodem bestempelen als 'stabil' tot 'zeer stabil'. Wanneer deze ratio echter begrepen is tussen 0,8 en 1,2 zijn de uitgeoefende drukken meestal te hoog. Bij een ratio kleiner dan 0,8 tenslotte zal er als gevolg van de externe drukken plastische vervorming optreden. In het geval van hoge belastingen (d.w.z. hoge bandendruk + hoge asbelasting achteraan; rechterluik Figuur 1-18) zijn de resulterende mechanische drukken meestal te hoog voor Europa als geheel, uitgezonderd de zandige bodemregio's.

1.6.2 Nationale schaal

Alle totnogtoe getoonde bodemverdichtingskaarten betreffen kaarten voor het Europese grondgebied. Ook op niveau van de landen zijn er echter voorbeelden beschikbaar. Een eerste voorbeeld van een kaart op landniveau is weergegeven voor Duitsland in Figuur 1-19 (Horn et al., 2005).

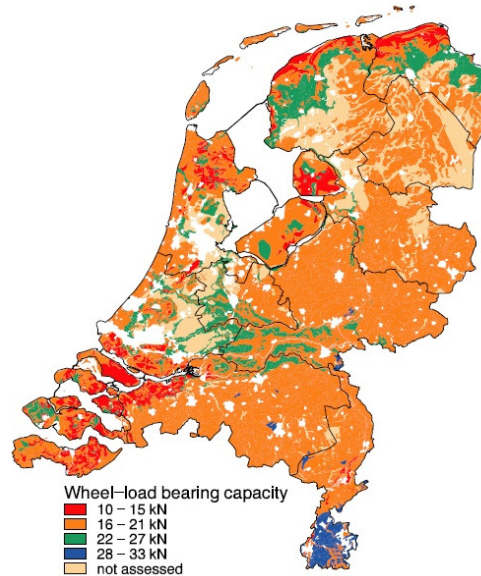


Figuur 1-19 Klassificatie van de wijzigingen in bodemsterkte in (1) de toplaag van de bodem en (2) de diepere ondergrond bij een pF van 1,8 voor Duitse bodems als gevolg van de uitoefening van een contactdruk op het bodemoppervlak van 200 kPa. Klassificatie van de effectieve bodemsterkte via de ratio precompressiestress over uitgeoefende bodemdruk: >1,5, zeer stabil, elastische vervorming; 1,5-1,2, stabil; 1,2-0,8, labiel; <0,8, onstabil, additionele plastische vervorming (Horn et al., 2005).

De toepassing van een uitwendige druk van 200 kPa bij een gegeven contactoppervlak leidt duidelijk tot onstabil en plastisch bodemgedrag. Dit is niet alleen waar voor de toplaag van de bodem (linkerluik Figuur 1-19), doch kon ook worden berekend voor de diepere ondergrond (30-60 cm) (rechterluik Figuur 1-19) door gebruik te maken van de theorie van stress-propagatie in de bodem.

Een tweede voorbeeld van een bodemverdichtingskaart op landniveau is de kaart van Van den Akker (2004) (Figuur 1-20) waarin maximaal te verdragen wiellasten worden aangegeven op Nederlandse bodems. Met behulp van het door deze auteur ontwikkelde SOil COMpaction MOdel (= SOCOMO, zie supra) werden de maximaal toelaatbare wiellasten berekend voor banden met een breedte van 0,50 meter en een bandenspanning van 80 kPa. De bodems waarop de kaart betrekking heeft, betreffen bodems op bouwland in de herfstperiode bij een zuigspanning van 30 kPa, oftewel een pF-waarde van 2,5. De

draagkracht van de bodem werd opgedeeld in 4 verschillende klassen (10-15 kN, 16-21 kN, 22-27 kN en 28-33 kN) en de schaal van de kaart bedraagt 1:250.000.



Figuur 1-20 Maximaal toelaatbare wiellasten voor Nederlandse bodems op basis van banden met een breedte van 0,50 m en een bandenspanning van 80 kPa op bouwland bij een zuigspanning van 30 kPa ($\rho F 2,5$) (Van den Akker, 2004).

Met de maximaal toelaatbare wiellast wordt de maximum wiellast bedoeld waarbij nog geen plastische vervorming (compactie) van de bodem optreedt. Om deze wiellast te kunnen bepalen vergelijkt SOCOMO de sterkte van de bodem met de uitgeoefende spanningen in de diepere ondergrond, die het gevolg zijn van de horizontale en verticale krachten teweeggebracht door het veldverkeer. Van zodra de uitgeoefende spanningen de sterkte van de diepere ondergrond overschrijden is plastische vervorming een feit. De structurele sterkte van de diepere ondergrond – weergegeven via de PCS berekend a.d.h.v. de PTF's van Lebert en Horn (1991) – wordt vergeleken met de verticale normaalspanningen in de ondergrond; de schuifsterkte ('shear strength') – berekend via SOCOMO – wordt vergeleken met de horizontale schuifspanningen.

1.6.3 Regionale schaal

Opnieuw door Horn *et al.* (2005) is er ook een bodemverdichtingskaart opgesteld die verder inzoomt dan het landniveau en tot op veldniveau gaat. Deze kaart is afgebeeld in Figuur 1-21.



Figuur 1-21 Berekende waarden voor de precompressiestress (kPa) bij een pF van 1,8 op bedrijfsniveau voor morene-ondergrond (30-60 cm) in Duitsland. Klassificatie van de precompressiestress (kPa): <30, zeer laag; 30-60, laag; 60-90, medium; 90-120, hoog; 120-150, zeer hoog; >150, extreem hoog (Horn et al., 2005).

Er wordt geschat dat bodemverdichting de oorzaak is van de degradatie van 33 miljoen hectare gronden in Europa. Het is de meest wijdverbreide vorm van fysieke bodemdegradatie in Nederland (Van den Akker, 2003; ALTERRA, 2008).

2 ONTWIKKELING VAN EEN VLAANDEREN DEKKENDE GEVOELIGHEIDS- EN RISICOKAART (WP2)

2.1 Uitgangsmateriaal

Twee datasets vormen de basis voor het construeren van een gevoeligheids- en risicokaart voor bodemverdichting, die gebiedsdekkend is voor Vlaanderen: de Digitale Bodemkaart Vlaanderen en de databank 'Aardewerk'.

2.1.1 Digitale bodemkaart Vlaanderen

De digitale versie, daterend uit 2001, van het Vlaanderen dekkende deel van de Belgische bodemkaart vormt de geografische basis voor de gevoeligheids- en risicokaarten. De schaal van de analoge bodemkaart is 1:20.000 en de legende-eenheid is de bodemserie die de basiseenheid vormt van het Belgische bodemklassificatiesysteem. De bodemserie bestaat uit de concatenatie van de volgende nominale en ordinale componenten: substraat, textuur, drainage, profielontwikkeling, variante van de profielontwikkeling of van het moedermateriaal en dieptefase. Alle polygonen (313.546) en alle vermelde attributen zijn overgenomen in de digitale geodataset.

2.1.2 Databank Aardewerk

"Aardewerk" is een databank die de gegevens bevat afkomstig van de beschrijving van meer dan 13.000 bodemprofielen en van de analyse van nagenoeg 70.000 geassocieerde horizonten, die in het kader van het bodemkarteringsproject (1947-1971) zijn uitgevoerd voor het gehele Belgische grondgebied (Van Orshoven *et al.*, 1993). 6.543 profielen met 26.921 horizonten zijn gesitueerd in Vlaanderen. De data werden verzameld door het centrum voor Grondonderzoek met financiering van het I.W.O.N.L. . Van elk profiel in de databank is o.a. de bodemserie opgenomen. Van elk horizont zijn de horizontdiepte en -dikte (beiden als interval-variabelen), negen granulometrische fracties, het koolstof- en het kalkgehalte beschikbaar. Soms zijn ook limonietgehalte, uitwisselingscapaciteiten en C/N-verhouding bepaald (Van Orshoven en Vandenbroucke, 1993). Tijdens het profileringswerk zijn geen hydraulische parameters opgemeten. Ze zijn dus ook niet opgenomen in de databank.

2.1.3 Combinatie van bodemkaart en Aardewerk

Gezien het concept 'bodemserie' is gebruikt als legende-eenheid van de bodemkaart én als classificatie-eenheid van de bodemprofielen, kunnen de Aardewerk-gegevens van een gegeven bodemserie direct gekoppeld worden met de bodemkaarteenheden. Dit proces, class-matching genaamd, waarbij er wordt gekoppeld op basis van een gemeenschappelijk attribuut (*in casu* de bodemserie), resulteert in de uitbreiding of opwaardering van de legende-informatie in de bodemkaart met profiel- en horizontgegevens uit Aardewerk. Een andere mogelijkheid om Aardewerk-gegevens te verbinden met de bodemkaarteenheden is 'geo-matching', waarbij er wordt gekoppeld op basis van de X- en Y-coördinaten van de profiellocaties. Profielen (met geassocieerde horizonten) (= puntlocaties) worden gekoppeld

aan kaarteenheden (= polygonen), indien ze gelegen zijn binnen de desbetreffende kaarteenheden ('point within polygon').

Om de bodemkaart en de veelheid aan profielen in Aardewerk effectief te verbinden, werd in deze studie gebruik gemaakt van class-matching. Dit gebeurde echter niet met de 6.543 individuele profielen die voor Vlaanderen beschikbaar zijn, maar wel met de van deze individuele profielen afgeleide statistische of synthetische profielen opgenomen in het informatiesysteem Aardewerk-BIS (Van Orshoven en Maes, 1988; Van Orshoven *et al.*, 1991).

Aardewerk-BIS laat toe om van een bepaalde bodemserie statistisch geresumeerde gegevens (gemiddelde, standaard-afwijking, ...) op te vragen over de opgemeten kenmerken. Hierbij is de horizont de primaire gegevensdrager. Naast gegevens over de granulometrische samenstelling, de mediaan van de granulometrische verdeling, de gehalten aan organische stof, kalk en limoniet, zijn eveneens gegevens op te vragen over de uitwisselingscapaciteit van zowel minerale als organische fracties afzonderlijk, en van de combinatie ervan. Ook gegevens over de vochtretentiekarakteristiek en de hydraulische conductiviteitsrelatie zijn beschikbaar. Voor zowel de uitwisselingscapaciteiten als de hydraulische functies werden in BIS pedotransferfuncties geïmplementeerd die toelaten de variabelen te berekenen aan de hand van de in de basisdatabank opgenomen variabelen.

De statistische samenvatting van de basisdata uit de Aardewerk-databank gebeurde op 3 niveaus volgens een 2-traps-model. Dit laatste houdt in dat voor de beschouwde bodemserie in de beschouwde bodemzone⁶ in de eerste trap de mogelijke sequenties van horizonten worden opgezocht. Hieruit wordt één sequentie (standaard de meest frequente) geactiveerd en worden van elk horizont in de sequentie de gemiddelde diepteligging en dikte berekend. Bijvoorbeeld: de sequentie 'Ap Bt BC C' is de meest frequente (31 observaties of 43% van het totaal) horizontensequentie voor de Aba1-bodemserie in de Haspengouwse leemstreek waarbij het Bt-horizont gemiddeld op 28 cm diepte begint en 60 cm dik is. In de tweede trap worden de statistieken van de overige kenmerken berekend. Hiervoor worden niet alleen de gegevens van de meest frequente sequentie gebruikt, maar van alle sequenties van de serie.

De opeenvolgende niveaus corresponderen met toenemende conceptuele en ruimtelijke generalisatie. Op niveau 1 worden de sequenties en horizonten van bodemseries per bodemzone gekarakteriseerd. Op niveau 2 gaat het om groepen van bodemseries in groepen van bodemzones. Dezelfde groepering van de bodemseries wordt gehanteerd op niveau 3, maar geografisch worden nog enkel de polder- van de niet-polderzones onderscheiden. Bijvoorbeeld: de bodemzone 'Noorderkempen' op niveau 1, ressorteert onder de bodemzonegroep 'Noordelijke, zuidelijke en oostelijke kempen en landduinen in de kempen' op niveau 2 en onder de bodemzonegroep 'Niet-polders' op niveau 3. Een overzicht van de bodemzones op niveau 1 en de bodemzonegroepen op niveaus 2 en 3 is weergegeven in Bijlage 2. Niveau 1 is het meest gedetailleerde niveau, gevolgd door niveau 2 en tenslotte niveau 3 (meest doorgedreven aggregatie, dus minst gedetailleerd). De groepering van de bodemseries op de niveaus 2 en 3 is licht verschillend voor trap 1 (bepaling van de meest frequente horizontensequentie én van de diepte en dikte van de horizonten) en voor trap 2 (bepaling van de horizontkenmerken).

Om de statistische profielen uit Aardewerk-BIS te kunnen koppelen aan de ruimtelijke bodemkaarteenheden werd de attributentabel van de digitale bodemkaart uitgebreid met de groeperingsvariabelen die in Aardewerk-BIS werden ingevoerd. Op niveau 1 zal de match

⁶ De bodemseries werden door Tavernier en Maréchal (1958) regionaal gegroepeerd in zogenaamde bodemassociaties, waarbij voor geheel België 38 associaties werden onderscheiden, waarvan 24 in het gedeelte ten noorden van Samber en Maas. Deze bodemassociaties werden door De Leenheer *et al.* (1968) verder onderverdeeld in bodemzones. Elke bodemzone correspondeert met – of is een deel van – een bodemassociatie. Bij deze verdere onderverdeling werd gestreefd naar de scheiding van gelijknamige bodemseries met afwijkende eigenschappen. Van de 38 bodemassociaties zijn er 16 verder ingedeeld. Het totaal aantal bodemzones is 72 waarvan 46 ten noorden van Samber en Maas.

tussen BIS en de bodemkaart het kleinst zijn (minste koppeling), gevolgd door niveau 2 en vervolgens niveau 3 (van de 3 niveaus het niveau waarvoor de meeste records zullen matchen). Aldus is er een soort van cumulatief effect wat de dekking van de bodemkaart (niet bebouwd gebied!) betreft, die met de 3 niveaus van BIS gerealiseerd kan worden. M.a.w., alles wat op niveau 1 is gedekt, zal gedekt zijn op niveau 2 en alles wat op 2 is gedekt, is gedekt op 3 waarbij er de meeste dekking is op 3. Uitzondering hierop vormen de zeepolders die enkel op niveau 1 gedekt worden en niet op de niveaus 2 of 3. De reden hiervoor is de afwijkende geomorfologische legende, daar waar voor de rest van Vlaanderen een morfogenetische legende wordt gehanteerd: enkel niveau 1 laat toe om voor records met geomorfologische legende een koppeling te verzekeren. Samengevat kan gesteld worden dat een maximale koppeling tussen BIS en de bodemkaart wordt gerealiseerd door elk van de 3 BIS-niveaus afzonderlijk te koppelen en de 3 resulterende koppelingen te overleggen. Alles wat dan niet gekoppeld is op niveau 1, is dan mogelijks wél gekoppeld op niveau 2 en/of niveau 3.

2.2 Definitie van gevoeligheids- en risicokaart en terugkoppeling naar literatuur

Aangezien er in de literatuur geen éénduidig onderscheid wordt gemaakt tussen 'gevoeligheid' voor bodemverdichting enerzijds en 'risico' op bodemverdichting anderzijds, dienen we zelf eerst aan te geven wat we precies verstaan onder deze begrippen. In het kader van deze studie hanteren we volgende definities:

- Gevoeligheid voor bodemverdichting is de relatieve of absolute mate waarin de kans op bodemverdichting varieert met de inherente bodemeigenschappen bij een gespecificeerde vochttoestand (bv. $pF = 2.5$). Belastingen ten gevolge van een bepaald machinegebruik worden hierbij niet in rekening gebracht.
- Een gevoeligheidskaart voor bodemverdichting is een thematische kaart die voor elke bodemeenheid van de bodemkaart een gevoeligheids-score weergeeft die geldt bij een gespecificeerde bodemvochttoestand.
- Risico op bodemverdichting = waarschijnlijkheid (relatief/absoluut) dat een gevoeligheidsscore die kritisch is voor een gespecificeerd bodemvochtgehalte wordt overschreden bij een specifieke belasting of gebruik.
- Risicokaart voor bodemverdichting = thematische kaart die voor elk van de bodemkaartenheden de waarschijnlijkheid aangeeft dat een gevoeligheidsscore die kritisch is voor een gespecificeerde bodemvochttoestand wordt overschreden bij een bepaald bodemgebruik. Dit veronderstelt dat bodemgebruik kan vertaald worden in 'belasting'.

Aan de hand van bovenstaande definities kunnen we de in Bijlage 1 voorgestelde bodemverdichtingskaarten vervolgens typeren als zijnde een gevoeligheidskaart of risicokaart. Het resultaat van deze oefening is weergegeven in Tabel 2-1. In deze tabel worden verder nog een aantal belangrijke kenmerken van de verschillende kaarten onderling vergeleken.

Tabel 2-1: Vergelijking van enkele centrale kenmerken van de bestudeerde bodemverdichtingskaarten

		'Top-/Subsoil'	Bodemeigenschappen	Vochttoestand	Landgebruik	PTR/PTF	Resultaat
1	Jones, 2003	'Sub'	JA	NEEN	NEEN	PTR	Gevoeligheid
2	JRC, 2008	'Top' & 'Sub'	JA	JA	JA	PTR	Gevoeligheid
3	Horn, 2005a	'Sub'	JA	JA, pF 1.8 en 2.5	JA (beperkt tot bouwland)	PTF (PCS)	Gevoeligheid bij gegeven pF

4	Horn, 2005b	'Top'	JA	JA, pF 1.8	JA (beperkt tot bouwland)	PTF (PCS)	Risicokaart bij gegeven pF met verwaarlozing van 'shear stress'
5	van den Akker, 2004	'Sub'	JA	JA, pF 2.5	JA (beperkt tot bouwland)	PTF (PCS) + SOCOMO	Risicokaart bij gegeven pF m.i.v. 'shear stress'
6	Horn, 2005c	'Top' & 'Sub'	JA	JA, pF 1.8 en 2.5	JA (beperkt tot bouwland)	PTF (PCS)	Gevoeligheid bij gegeven pF

Uit deze oefening, uit contact name met van den Akker (5), Jones (1) en Houskova (2) én uit de literatuurstudie kunnen we het volgende besluiten:

-Methodes (1) en (2) zijn relatief ruwe benaderingen. Ze maken gebruik van PedoTransferRegels (PTR) gevoed door data rechtstreeks afgeleid uit de Soil Geographic DataBase of Europe of onrechtstreeks via de PTR van Van Ranst *et al.* (1995) om dan via een logisch schema gecombineerd te worden. De classificatie- en combinatieschema's zijn expert-based. (2) brengt bodemvochtregime en landgebruik in rekening wat (1) absoluut niet doet.

-Methodes (3), (4), (5), en (6) tappen allen uit hetzelfde vaatje, namelijk de PTF's van Lebert en Horn (1991) voor schatting van de structurele sterkte bij een gegeven bodemvochtspanning. (3), en (6) gebruiken PCS als directe maat voor weerstand tegen compactie (inverse van gevoeligheid) van bovengrond (6) en diepere bodemlagen (3 en 6). In (4) wordt de structurele sterkte van de toplaag vergeleken met de uitgeoefende spanning bij een gegeven belasting van de bovengrond. In (5) worden structurele sterkte en 'shear strength' van de bodemlaag op de beschouwde diepte ('subsoil') vergeleken met respectievelijk de verticale normaalspanningen en de horizontale schuifspanningen, berekend door het SOCOMO-model, op de desbetreffende diepte uitgeoefend door een gegeven belasting van de bovengrond.

2.3 Gevoeligheidskaart

Op basis van de vergelijking van de bestaande bodemverdichtingskaarten in de vorige paragraaf werd gekozen om de structurele sterkte van de bodem, gekarakteriseerd door de precompressiestress, te hanteren als maat voor de gevoeligheid van de bodem voor verdichting. Twee verschillende methoden werden ontwikkeld, hetgeen resulteert in twee types gevoeligheidskaarten: waarden voor de PCS worden toegewezen in methode 1 of geschat in methode 2.

2.3.1 Methode 1: Toewijzing van PCS-waarden afgeleid voor Nederlandse bodems

Een eerste methode voor het opstellen van een gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen komt neer op het toewijzen aan de bodemkaartenheden in Vlaanderen van een precompressiestress(= PCS)-waarde berekend voor Nederlandse bodems. Het gaat om de PCS-waarden gepubliceerd door Van den Akker (2004) die voor elk van de 10 Nederlandse textuurklassen een typische PCS-waarde heeft berekend. Deze typische PCS-waarden zijn door Van den Akker bekomen door gebruik te maken van de set van pedotransferfuncties geldig bij pF 2,5, die opgesteld werden door Lebert en Horn (1991; zie Tabel 1-1 hoofdstuk 1) voor Duitse bodems. Deze PCS-waarden zijn weergegeven in de S_s -kolom van Tabel 2-2.

Tabel 2-2 Interne frictiehoek ϕ , cohesie C en structurele sterkte (precompressiestress) S_s voor de diepere ondergrond (uitgezonderd veengrond) in Nederland bij een zuigspanning van 30 kPa (pF 2.5) (Van den Akker, 2004).

	Clay content (g kg^{-1})	C (kPa)	ϕ ($^\circ$)	S_s (kPa)	D (m)
Sandy soils	<8	12	28	198	0.32
Coarse sand	<8	10	32	240	0.32
Sandy loam	<8	10	32	122	0.32
Sandy loam	8–18	10	32	140	0.27
Clay loam	18–25	14	31	79	0.27
Light clay	25–35	26	36	118	0.22
Medium clay	35–50	26	36	96	0.22
Heavy clay	>50	34	38	114	0.22
Sandy silt	<18	15	39	82	0.22
Silt loam (loess)	<18	26	37	110	0.22

Bovenstaande tabel toont de sterktekaracteristieken voor de diepere ondergrond in Nederland. De indeling in 10 textuurklassen is gebaseerd op de bodemkaart van Nederland op schaal 1/250.000. Veengronden werden buiten beschouwing gelaten, daar er voor zulke gronden geen data in verband met sterktekaracteristieken beschikbaar waren. Voor toepassing van de PTF's dienden de Nederlandse textuurklassen gerelateerd te worden met de Duitse (Horn en Fleige, 2003).

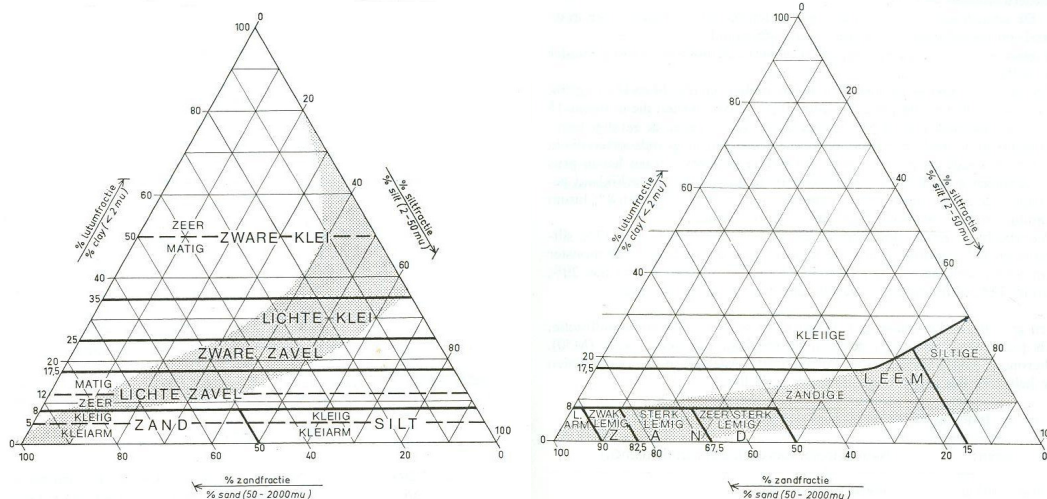
Naast de precompressiestress, dewelke een maat is voor de structurele sterkte van de bodem, zijn in Tabel 2-2 eveneens de cohesie en interne frictiehoek, die de schuifsterkte van de bodem karakteriseren, aangegeven. Cohesie en interne frictiehoek zijn niet alleen afhankelijk van de zuigspanning en bodemtextuur, doch variëren ook volgens de bodemstructuur. Voor elke textuurklasse werd gekozen voor de set van sterkte-parameters met de laagste waarden. Er werd m.a.w. gekeken naar de bodems met de zwakste structuur (Van den Akker, 2004).

Een eerste stap in de ontwikkeling van de gevoeligheidskaart bestaat erin om voor elke bodemkaartenheid uit Aardewerk-gBIS het meest waarschijnlijke horizont te selecteren waardoor het 41 cm-dieptevlak loopt. Door te kiezen voor 41 cm en niet 40 cm werd rekening gehouden met het feit dat in de oorspronkelijke Aardewerk-gegevens, de diepte- en diktegegevens als interval-data zijn opgenomen (bv. 21-40 cm voor diepte en 31-50 cm voor dikte) en werden omgezet naar het middelpunt van het interval (respectievelijk 30 en 40 cm in het voorbeeld). Met 41 cm i.p.v. 40 cm wordt m.a.w. de kans kleiner om een horizont te selecteren dat net op het grensvlak begint of eindigt. Wanneer bij selectie van het meest waarschijnlijke horizont waardoor het 41 cm-dieptevlak loopt toch 2 horizonten worden gevonden, wordt consequent gekozen voor het horizont met de diepste ondergrens.

De argumenten om te kiezen voor 41 cm als referentie-diepte en niet voor meer 'oppervlakkige' referentie-diepten (bv. 31 cm) zijn tweërlei. Vooreerst is er de afspraak om te focussen op verdichting die niet meer ongedaan kan worden gemaakt: 41 cm is diep genoeg om zeker te zijn dat geen herstel mogelijk is via normale landbouwkundige praktijken. 31 cm daarentegen is niet diep genoeg, daar er geploegd kan worden tot op deze diepte. Op leem- en kleigrond wordt er vandaag de dag doorgaans geploegd tot op ca. 25 cm, terwijl men op zandgrond dikwijls dieper gaat dan 30 cm. Een tweede argument om te kiezen voor 41 cm als referentie-diepte heeft te maken met de opbouw van de Aardewerk-BIS databank, waaruit de profiel- en horizontgegevens worden betrokken om de structurele sterkte van de kaartenheden te berekenen. In het oorspronkelijke Aardewerk worden in de horizontsequenties Ap1's, Ap2's, Ap3's,... onderscheiden, waarbij voor elk van deze horizonten de bijhorende eigenschappen in de database zijn opgenomen. In BIS is echter een aggregatie gebeurd van deze horizonten en spreekt men over hét Ap-horizont, waarbij de kenmerken van dit horizont een gemiddelde zijn van de kenmerken van de afzonderlijke deel-horizonten uit Aardewerk. De kenmerken van de Ap-horizonten uit Aardewerk-BIS zijn m.a.w. gemiddelde kenmerken en kunnen dus enigszins afwijken van de reële situatie op een bepaalde diepte. Door te kiezen voor 41 cm als referentie-diepte voor de kaarten worden er minder van dergelijke 'generalisatie-Ap's' geselecteerd i.v.m. 31 cm.

Het 'meest waarschijnlijke' horizont komt uit de meest frequente horizontensequentie die afgeleid werd voor alle individuele profielen die class-matchen met de desbetreffende bodemkaartenheid. Dit is gebeurd voor de 3 niveaus van toenemende aggregatie. Gegevens van het meest gedetailleerde niveau worden behouden. Profielen class-matchen met een bodemkaartenheid wanneer de profielen dezelfde klassificatie (serie of aggregaat van series) hebben als de bodemkaartenheid. Locatie van het profiel wordt niet expliciet in rekening gebracht, tenzij door te stratificeren volgens bodemzone of groep van bodemzones.

Eénmaal het meest waarschijnlijke horizont op 41 cm diepte geselecteerd is, werd aan de hand van de textuurfracties van het horizont bepaald met welk van de 10 textuurklassen uit Nederland uit Tabel 2-2 er overeenstemming is. Probleem is echter het feit dat de diverse textuurklassen uit voornoemde tabel enkel worden onderscheiden op basis van het percentage klei, waardoor er geen éénduidige afbakening is van deze klassen. Zo kan bijvoorbeeld een horizont met een kleipercentage van 5% worden ondergebracht bij 5 verschillende textuurklassen ("zandige bodems", "grof zand", "zandleem", "zandig silt" en "siltleem (loess)". Voor een éénduidige afbakening van textuurklassen moet ook het zand- en/of leemgehalte gekend zijn. Daarom werd in de literatuur op zoek gegaan naar de Nederlandse textuurdriehoek. Deze zoektocht leerde ons echter dat er in Nederland niet 1, maar 2 textuurdriehoeken bestaan. Beide zijn weergegeven in Figuur 2-1:



Figuur 2-1 Links: Indeling en benaming van niet-eolische afzettingen, zowel zand als zwaarder materiaal (zogenaamde klei-driehoek). Het merendeel van de monsters uit rivieren en zeeleigebieden ligt in de grijze zone. Rechts: Indeling en benaming van eolische afzettingen, zowel zand als zwaarder materiaal (zogenaamde leem-driehoek). Het merendeel van de monsters uit dekzand- en lössgebieden ligt in de grijze zone (De Bakker en Schelling, 1966).

Aan de hand van deze 2 textuurdriehoeken kan de indeling in textuurklassen uit Tabel 2-2 verder worden aangevuld met de zand- en leemgehalten. Een combinatie van klei- én zandgehalte biedt het nodige discriminerend vermogen voor een éénduidige afbakening, zoals aangegeven in Tabel 2-3:

Tabel 2-3 Indeling van de Nederlandse textuurklassen volgens klei- en zandgehalte.

Textuurklasse	Kleigehalte (%)	Zandgehalte (%)
Zandige bodems	≤ 8	> 82,5
Grof zand	≤ 8	> 67,5 ≤ 82,5
Zandleem (a)	≤ 8	> 50 ≤ 67,5
Zandleem (b)	> 8 ≤ 18	> 50
Kleileem	> 18 ≤ 25	
Lichte klei	> 25 ≤ 35	
Medium klei	> 35 ≤ 50	
Zware klei	> 50	
Zandig silt	≤ 18	> 15 ≤ 50
Siltleem (loess)	≤ 18	≤ 15

Met behulp van bovenstaande tabel en de textuurfractionen van het geselecteerde horizont op 41 cm diepte werd voor elk horizont bepaald met welke (Nederlandse) textuurklasse er overeenstemming is. Zo kan vervolgens aan het horizont een PCS-waarde worden toegekend via Tabel 2-2 die elke textuurklasse verbindt met een typische PCS-waarde (10 textuurklassen, 10 PCS-waarden). Aan de attribuentabel van de bodemkaart werd uiteindelijk een extra veld toegevoegd waarin deze PCS-waarden worden opgenomen. Het uitzetten van de PCS-waarden in een choropleet-kaart geeft een eerste gevoeligheidskaart. Deze is weergegeven in Figuur 6-1 in Bijlage 3.

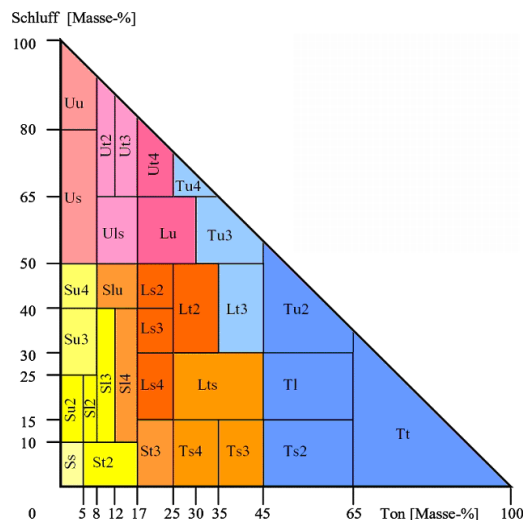
2.3.2 Methode 2: Berekenen van PCS-waarden met PTF's afgeleid voor Duitse bodems

Een tweede methode voor de ontwikkeling van een gevoeligheidskaart (PCS-kaart) bestaat erin pedotransferfuncties (PTF's) door te rekenen voor de geselecteerde horizonten op 41 cm diepte. Hiervoor worden dezelfde PTF's gebruikt als degene aangewend door Van den Akker, met name deze van Lebert en Horn (zie Tabel 1-1 hoofdstuk 1). Zoals eerder aangegeven werden deze PTF's ontwikkeld op basis van metingen in Duitse bodems, en dit voor 2 verschillende pF-waarden: pF 1,8 en pF 2,5. Voor de verschillende groepen van (Duitse) textuurklassen is telkens een andere regressievergelijking van toepassing, waarbij de constanten in deze vergelijkingen afhankelijk zijn van de pF-waarde.

Tabel 2-4 Multipole lineaire regressievergelijkingen voor de schatting van de precompressiestress voor de diverse (Duitse) textuurklassen bij pF 1,8 en 2,5. P_v = precompressiestress (kPa), ρ_t = volumedichtheid ($Mg\ m^{-3}$), org = hoeveelheid organisch materiaal (gewichts%), L_k = luchtcapaciteit (volume%), k_f = verzadigde hydraulische conductiviteit ($10^3\ cm\ s^{-1}$), TW = niet-beschikbaar water-capaciteit (volume%), nFK = beschikbaar water-capaciteit (volume%), c = cohesie (kPa) en γ = interne frictiehoek ($^\circ$) (Horn en Fleige, 2003).

Soil texture classes	Regression
Ss, Su, Slu, Sl, St2	$P_{v1,8} = 438.10\rho_t - 0.0008\gamma^3 - 3.14TW - 0.11(nFK_{1,8})^2 - 465.60$ $P_{v2,5} = 410.75\rho_t - 0.0007\gamma^3 - 3.41TW - 0.35(nFK_{2,5})^2 - 384.71$
St3, Ls	$P_{v1,8} = 169.30\rho_t - 29.03(org)^{0.5} + 6.45k_f + 32.18\log(c) - 9.44\gamma + 27.25\sin(TW)$ $+ 119.74\log(nFK_{1,8}) + 19.51$ $P_{v2,5} = 89.50\rho_t - 23.99(org)^{0.5} - 2.89k_f + 125.76\log(c) - 1.14\gamma + 26.90\sin(TW)$ $- 51.46\log(nFK_{2,5}) - 77.25$
Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3	$P_{v1,8} = 374.15\rho_t - 4.10org + 3.38LK_{1,8} - 1.58(k_f)^{-0.5} + 1.79c + 1.09TW - 6.37(\gamma)^{0.67} +$ $0.088(nFK_{1,8})^2 - 472.77$ $P_{v2,5} = 460.71\rho_t - 20.33org + 9.08LK_{2,5} - 2.38(k_f)^{-0.5} + 2.86c + 4.50TW - 20.96(\gamma)^{0.67} +$ $0.304(nFK_{2,5})^2 - 610.62$
Lu, Ut4, Lt2, Ts4	$\log(P_{v1,8}) = 0.843\rho_t - 0.544(k_f)^{0.33} - 0.022TW + 7.03(c)^{-1} + 0.024\gamma - 0.015nFK_{1,8} + 0.725$ $\log(P_{v2,5}) = 0.844\rho_t - 0.456(k_f)^{0.33} - 0.026TW + 12.88(c)^{-1} + 0.003\gamma - 0.016nFK_{2,5} + 1.419$
Lt3, Tu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, Tt	$P_{v1,8} = 4.59\rho_t - 1.02org - 16.43(k_f)^{0.33} + 0.31TW - 1.57nFK_{1,8} + 3.55c + 1.18\gamma - 18.03$ $P_{v2,5} = 70.65\rho_t - 0.55org - 7.01(k_f)^{0.33} + 1.32TW - 1.08nFK_{2,5} + 1.72c + 1.05\gamma - 100.94$

De Duitse textuurdriehoek met de in Tabel 2-4 aangegeven textuurklassen, wordt weergegeven in Figuur 2-2:



Figuur 2-2 De Duitse textuurdriehoek met de diverse textuurklassen (“Schluff” = “silt”, “Ton” = “klei”) (Horn en Fleige, 2003; Wikipedia, 2008).

Uit bovenstaande figuur is duidelijk dat een combinatie van silt- en kleigehalte genoeg discriminerend vermogen heeft voor een éénduidige indeling van de textuurklassen. Samengevat in tabelvorm ziet deze indeling er als volgt uit:

Tabel 2-5 Indeling van de Duitse textuurklassen volgens klei- en siltgehalte.

Textuurgroep	Textuurklassen	Siltgehalte (%)	Kleigehalte (%)
Zand	Ss, Su, Slu, Sl, St2	< 50	< 17
Zandleem	St3, Ls	< 50	≥ 17 < 25
Silt	Uu, Us, Uls, Ut2, Ut3	≥ 50	< 17
Klei en kleileem (< 35 gewichts% klei)	Lu	≥ 50 < 65	≥ 17 < 30
	Ut4	≥ 65 < 79	≥ 17 < 25
	Lt2	≥ 30 < 50	≥ 25 < 35
	Ts4	< 15	≥ 25 < 35
Klei en kleileem (≥ 35 gewichts% klei)	Lt3, Tu2, Ts2, Ts3, Tl, Tt		≥ 35
	Tu3	≥ 50 < 65	≥ 30 < 45
	Tu4	≥ 65 < 75	≥ 25 < 35
	Lts	≥ 15 < 30	≥ 25 < 45

Aan de hand van Tabel 2-5 en de in Aardewerk opgenomen textuurfracties van de geselecteerde horizonten, kan nu voor elk horizont worden bepaald met welke textuurgroep en -klasse van de Duitse textuurdriehoek er overeenstemming is. Hierbij moet worden opgemerkt dat de zeefgrenzen voor de leemfractie verschillen tussen de Duitse en Belgische indeling: in België slaat de leemfractie op alle minerale bodempartikels met een grootte tussen 2 en 50µm; in Duitsland echter gaat de leemfractie tot 63 µm (Nemes *et al.*, 1999). Hiervan werd echter abstractie gemaakt.

Eenmaal aan een geselecteerd horizont de overeenstemmende Duitse textuurklasse is toegekend, kan aan de hand van Tabel 2-4 worden bepaald welke PTF er moet worden gebruikt om de PCS-waarde op 41 cm diepte te kunnen berekenen.

Om de PTF's ter bepaling van de PCS te kunnen doorrekenen moeten alle variabelen uit de regressievergelijkingen gekend zijn. Sommige van deze variabelen werden uit de literatuur gehaald, de overige werden berekend aan de hand van de in Aardewerk beschikbare data in combinatie met specifieke, in België gebruikte, pedotransferfuncties. In wat volgt zal voor elk van de benodigde variabelen worden besproken waar we deze gehaald hebben of hoe we deze berekend hebben.

Cohesie en interne frictiehoek

Waarden voor cohesie en interne frictiehoek, dewelke de schuifsterkte van de bodem karakteriseren, zijn beschikbaar in de literatuur. In een paper van Horn en Fleige (2003) wordt een tabel weergegeven die voor elk van de 31 Duitse textuurklassen (= 31 verschillende combinaties van % klei en % leem) verschillende waarden aangeeft al naargelang de bodemstructuur, en dit zowel voor pF 1,8 als pF 2,5. Deze tabel is hieronder weergegeven (Tabel 2-6):

Tabel 2-6 De parameters voor de schuifsterkte, cohesie c en interne frictiehoek γ , bij verschillende zuigspanningen (pF 1,8 en 2,5) voor diverse textuur en structuur bij een gemiddelde volumedichtheid van $1,4-1,75 \text{ Mg m}^{-3}$. X: grof fragment (> 80 gewichts%); Bodemstructuur: 'sin' = 'single grain' ('enkel-korrelig'), 'coh' = 'coherent' ('coherent'), 'pri' = 'prismatic' ('prismatisch'), 'pol' = 'blocky' ('blokkig'), 'sub' = 'subangular' ('subangulair'), 'cru' = 'crumb' ('kruimelig') (Horn en Fleige, 2003).

Soil texture classes	Soil structure	pF 1.8		pF 2.5	
		c (kPa)	γ (°)	c (kPa)	γ (°)
X	sin	0	25	0	26
Ss, Su2-4	sin	8	26	12	28
Sl2-4	sin	8	30	10	32
Slu	coh/pri	12	34	14	37
	pol	15	39	18	41
St2-3	coh/pri	13	38	15	40
	pol	20	41	23	43
Uu, Us	sin	2	29	4	30
Us	coh/pri	10	35	15	39
	cru	8	37	12	40
Ut2-4	coh/pri	12	35	26	37
Uls	pol	18	35	20	38
	sub/cru	44/40	40/43	50/45	42/45
Lu	coh/pri	10/12	30/35	15	32/36
	pol	16	35	18	37
	sub/cru	34	38/39	44	40/46
Ls2-4	coh/pri	10	22/25	14	31/33
Lts	pol	19	30	26	35
	sub/cru	26/22	36/38	38/33	39/42
Lt2-3	sin	1	19	2	23
	coh/pri	15	28/32	26/34	36/38
	pol	30	36	41	40
Tu	sub	46	39	66	43
	coh/pri	32	22/28	45	30/32
	pol	40	30	70	34
	sub	45	36	40	42
Tt	sin	0	16	0	20
Tl, Tt	coh/pri	30/40	24/32	34/45	38/42
Ts2-4	pol	50	44	60	48
	sub	50	48	70	56

Binnen elke textuurklasse worden verschillende waarden onderscheiden voor c en γ naargelang de structuur (enkel-korrelig, coherent, prismatisch, blokkig, subangulair of kruimelig). Daar we geen gegevens ter beschikking hebben over het aandeel van de diverse structuurklassen binnen een bepaalde textuurklasse, hebben we net zoals van den Akker telkens geopteerd voor de waarden van c en γ overeenstemmend met de zwakste structuur

(d.w.z. de laagste waarden: 'worst case'). Wanneer echter voor een textuurklasse van de silt- of klei- en kleileem-textuurgroepen naast een enkelkorrelige structuur nog andere mogelijke structuren bestaan, werd geopteerd voor het koppel van c en γ met de "tweede laagste waarden" ('second worst case'). Een leem- of kleigrond met een 'single grain'-structuur komt immers zelden voor, waardoor blindelings opteren voor het 'worst case'-scenario minder aangewezen lijkt. Op basis van bovenstaande redenering en de in Tabel 2-6 opgelijste waarden voor c en γ werden voor onze nieuwe gevoeligheidskaarten (pF 2,5 én 1,8) volgende c - en γ -waarden aangewend:

Tabel 2-7 Waarden voor cohesie (kPa) en hoek van interne frictie ($^{\circ}$) aangewend voor de berekening van de structurele sterkte bij pF 2,5 en pF 1,8.

TEXTUURGROEP	TEXTUUR- KLASSE	KLEI- GEHALTE (%)	SILT- GEHALTE (%)	pF 2.5		pF 1.8	
				COHESIE (kPa)	FRICTIE- HOEK ($^{\circ}$)	COHESIE (kPa)	FRICTIE- HOEK ($^{\circ}$)
zand	Ss	0-5	0-10	12	28	8	26
	Su2	0-5	10-25	12	28	8	26
	Su3	0-8	25-40	12	28	8	26
	Su4	0-8	40-50	12	28	8	26
	Sl2	5-8	10-25	10	32	8	30
	Sl3	8-12	10-40	10	32	8	30
	Sl4	12-17	10-40	10	32	8	30
	Slu	8-17	40-50	14	37	12	34
zandleem	St2	5-17	0-10	15	40	13	38
	St3	17-25	0-15	15	40	13	38
	Ls2	17-25	40-50	14	31	10	22
	Ls3	17-25	30-40	14	31	10	22
silt	Ls4	17-25	15-30	14	31	10	22
	Uu	0-8	80-100	4	30	2	29
	Us	0-8	50-80	12	40	8	37
	Ut2	8-12	65-92	26	37	12	35
	Ut3	12-17	65-87	26	37	12	35
klei en kleileem (<35% klei)	Uls	8-17	50-65	20	38	18	35
	Lu	17-30	50-65	15	32	10	30
	Ut4	17-25	65-83	26	37	12	35
	Lt2	25-35	30-50	26	36	15	28
	Ts4	25-35	0-15	60	48	50	44
klei en kleileem (\geq 35% klei)	Tu4	25-35	65-75	45	30	32	22
	Lt3	35-45	30-50	26	36	15	28
	Lts	25-45	15-30	26	35	19	30
	Tu2	45-65	30-55	45	30	32	22
	Tu3	30-45	50-65	45	30	32	22
	Tt	65-100	0-35	34	38	30	24
	Tl	45-65	15-30	34	38	30	24
	Ts2	45-65	0-15	60	48	50	44
Ts3	35-45	0-15	60	48	50	44	

Voor geotechnisch onderzoek wordt in Vlaanderen vaak verwezen naar de zogenaamde NAD-tabel, waarin voor de verschillende grondsoorttypes een aantal bodemmechanische parameters worden opgelijst, waaronder ook cohesie (c' [kPa]) en de hoek van interne frictie (δ' [$^{\circ}$]). Vergelijking van de in de NAD-tabel aangegeven waarden voor cohesie en hoek van interne frictie (zie Bijlage 4) met de waarden weergegeven in Tabel 2-7, maakt duidelijk dat de in de NAD-tabel gehanteerde waarden duidelijk lager zijn i.v.m. deze uit Tabel 2-7. De

waarden in de NAD-tabel zijn veilige conservatieve waarden voor de verschillende grondsoorttypes zoals deze in situ aanwezig zijn en gelden ook op grotere diepte (Leen Vincke, persoonlijke communicatie). Ze werden afgeleid onder verzadigde condities en zijn als dusdanig niet toepasbaar onder onverzadigde omstandigheden. De waarden aangegeven in Tabel 2-7 daarentegen, zijn geldig bij specifieke vochtspanningen vóór verzadiging optreedt: -30 kPa (pF 2,5) en -6 kPa (pF 1,8). Dit zijn ook de vochtspanningen waarbij de PTF's van Lebert en Horn werden afgeleid. De waarden uit Tabel 2-7 horen daarom inherent bij deze PTF's.

Organische stof

De hoeveelheid organisch materiaal (OM; in gewichts%) kan berekend worden met de klassieke conversiefactor, uit de hoeveelheid koolstof (C) beschikbaar in Aardewerk:

$$OM = 1.724 * C$$

Indien een organische stof-gehalte groter dan 15% wordt gevonden, hebben we te maken met een venig horizont, waarvoor de PTF niet mag worden toegepast. Bij een organische stofgehalte > 15% blijken de PTF's van Lebert en Horn immers niet van toepassing. Voor de betreffende bodemkaartenheid kan geen PCS-waarde worden berekend.

Volumegewicht

Enmaal de hoeveel OM is berekend kan het volumegewicht worden bepaald via de PTF van Rawls (1983), die luidt als volgt:

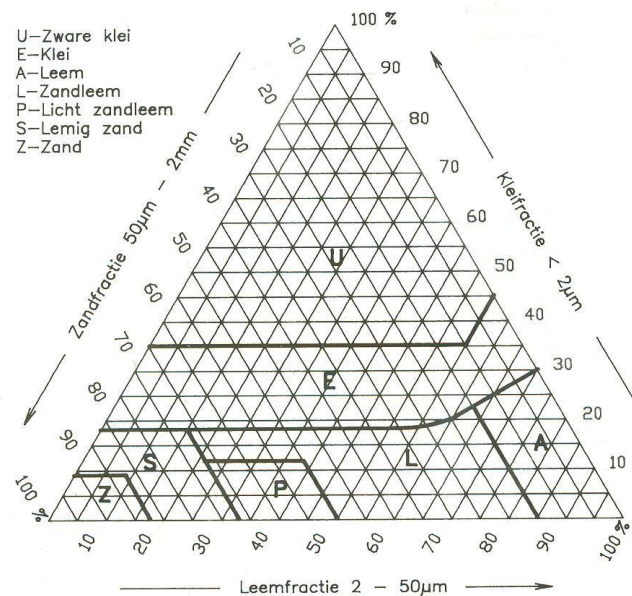
$$\text{Volumegewicht} = 100 / (((100 - OM) / \text{bdm}) + (OM / 0.224))$$

waarbij bdm, de minerale bulkdensiteit, functie is van textuur; voor de Belgische textuurklassen is bdm zoals aangegeven in Tabel 2-8:

Tabel 2-8 Waarde van de minerale bulkdensiteit ($g\ cm^{-3}$) als functie van de Belgische textuurklassen (Boon, 1984).

	Z	S	P	L	A	E	U
bdm	1,55		1,41	1,30	1,41	1,41	1,35

Aangezien de textuurklasse op 41 cm diepte vaak niet overeenstemt met de textuurklasse die is opgenomen in de bodemserie (want deze laatste geldt voor de bovenlaag van de bodem, niet voor de diepere lagen !), diende de textuurklasse van het geselecteerde horizont bepaald te worden om de bijhorende bdm uit Tabel 2-8 te kunnen selecteren en het volumegewicht te kunnen berekenen. Daarvoor werd er beroep gedaan op de Belgische textuurdriehoek (zie Figuur 2-3) en de textuurfracties van het geselecteerde horizont, dewelke beschikbaar zijn in Aardewerk.



Figuur 2-3 De Belgische textuurdriehoek, met de afbakening van de textuurklassen in gebruik bij de nationale bodemkartering (Ameryckx et al., 1995).

Vertaald in tabelvorm ziet de indeling in de diverse textuurklassen er in België als volgt uit:

Tabel 2-9 Indeling van de Belgische textuurklassen volgens klei-, leem- en zandgehalte (met benadering van de 'vloeiende' klassegrenzen voor E en L).

	Kleigehalte (%)	Leemgehalte (%)	Zandgehalte (%)
Z	≤ 8		> 82,5
U	> 35	≤ 55	
A	≤ 30	> 62,5	≤ 15
P	≤ 12		> 50 ≤ 67
S	≤ 8		> 67 ≤ 82,5
	> 8 ≤ 18		> 67
L	> 12 ≤ 18		> 50 ≤ 67
	≤ 18		> 15 ≤ 50

Op basis van Tabel 2-9 en de gegevens in Aardewerk werd de textuurklasse van het geselecteerde horizont bepaald en werd de overeenkomstige bdm-factor afgelezen uit Tabel 2-8. Vervolgens werd het volumegewicht van het horizontmateriaal berekend via de Rawls-PTF.

Beschikbaar water-capaciteit, niet-beschikbaar water-capaciteit, luchtcapaciteit

Voor 'beschikbaar water-capaciteit', 'niet-beschikbaar water-capaciteit' en 'luchtcapaciteit' werden volgende definities aangenomen:

- De beschikbaar water-capaciteit is het percentage aan water dat een bodem kan opslaan in een vorm die beschikbaar is voor planten. Het is gelijk aan het vochtgehalte tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt.

- De niet-beschikbaar water-capaciteit is het voor planten onbeschikbare water. Het is gelijk aan het vochtgehalte bij verwelkingspunt.
- De luchtcapaciteit is de fractie van het bulkvolume van de bodem die gevuld is met lucht. Het is gelijk gesteld aan de totale porositeit min het vochtgehalte bij veldcapaciteit.

Voor de berekening van deze 3 variabelen moeten we eerst de parameters van de vocht karakteristiek kennen.

De vorm van bodemwaterretentie-curven kan worden gekarakteriseerd d.m.v. verschillende modellen, waaronder het model van Mualem en Van Genuchten (Van Genuchten, 1980):

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|\psi|)^n)}$$

waarbij: $\theta(\psi)$ = de vochtinhoud bij een gegeven zuigspanning ($l^3 l^{-3}$), $|\psi|$ = de zuigspanning (l^{-1} of cm water), θ_s = het verzadigd vochtgehalte ($l^3 l^{-3}$), θ_r = het residueel vochtgehalte ($l^3 l^{-3}$), α = een parameter gerelateerd met de inverse van de 'air entry suction' (l^{-1} of cm^{-1} ; $\alpha > 0$), en n = een maat voor de verdeling van de poriëngrootte (dimensieloos; $n > 1$).

Voor de berekening van de 4 parameters van de vocht karakteristiek wordt gebruik gemaakt van volgende transferfuncties (Vereecken *et al.*, 1989):

$$\theta_s = 0,81 - (0,283 * \text{bulk density}) + (0,0013 * \text{kleigehalte})$$

$$\theta_r = 0,015 + (0,005 * \text{kleigehalte}) + (0,0139 * \text{koolstofgehalte})$$

$$\alpha = \exp(-2,486 + (0,025 * \text{zandgehalte}) - (2,617 * \text{bulk density}) - (0,023 * \text{kleigehalte}) - (0,351 * \text{koolstofgehalte}))$$

$$n = \exp(0,053 - (0,009 * \text{zandgehalte}) - (0,013 * \text{kleigehalte}) + (0,00015 * \text{zandgehalte}^2))$$

Na berekening van deze parameters kan nu de vochtinhoud bij een bepaalde pF-waarde worden berekend met de Mualem-Van Genuchten vergelijking.

Tenslotte werd de 'beschikbaar water-capaciteit', 'niet-beschikbaar water-capaciteit' en 'luchtcapaciteit' berekend als volgt:

$$\text{beschikbaar water-capaciteit} = (\text{vochtinhoud bij pF 2,5 of pF 1,8}) - (\text{vochtinhoud bij pF 4,2})$$

$$\text{niet-beschikbaar water-capaciteit} = \text{vochtinhoud bij pF 4,2}$$

$$\text{luchtcapaciteit} = \theta_s - (\text{vochtinhoud bij pF 2,5 of pF 1,8})$$

Verzadigde hydraulische conductiviteit

Een laatste variabele tenslotte die we moeten kennen is de verzadigde hydraulische conductiviteit (k_f of K_{sat}). In Aardewerk-gBis kan er een keuze worden gemaakt tussen een 'hoge', 'gemiddelde' of 'lage' K_{sat} . Bij de keuze voor een hoge, gemiddelde of lage K_{sat} , worden de waarden gehanteerd uit Tabel 2-10.

Tabel 2-10 De in Aardewerk-BIS gehanteerde waarden voor verzadigde hydraulische conductiviteit (in $cm\ dag^{-1}$).

	Hoog	Gemiddeld	Laag
Ksat	572,49	77,48	5,53

De in Tabel 2-10 aangegeven waarden zijn gebaseerd op Vereecken *et al.* (1990). Deze auteurs stelden empirisch vast dat K_{sat} in de Belgische niet-polders en niet-stenige bodems zodanig variabel is dat er geen significante relatie kon worden gevonden met één van de in Aardewerk opgenomen horizontkenmerken (bv. zandgehalte). Daarom heeft men ervoor geopteerd om in Aardewerk-BIS slechts drie K_{sat} -waarden te implementeren, respectievelijk voor een 'hoge' (90-percentiel van 100+ metingen), 'gemiddelde' (mediaan of 50-percentiel) of 'lage' (10-percentiel) verzadigde hydraulische conductiviteit. Wij opteerden voor de gemiddelde waarde (77,48). Na omrekenen verkregen we:

$$k_f = 77,48 / (24 * 60 * 60) * 10^3 = (8,97 * 10^{-4}) [10^3 \text{ cm s}^{-1}]$$

Alle variabelen uit de PTF's uit Tabel 2-4 ter berekening van de PCS zijn nu bekend, zodat de PTF's voor elk van de geselecteerde horizonten kunnen doorgerekend worden, en dit voor beide pF -waarden. Door de berekende PCS-waarden uit te zetten in een choropleetkaart worden twee nieuwe gevoeligheidskaarten bekomen (één voor elke pF -waarde). Deze zijn weergegeven in Figuur 6-2 (pF 2,5) en Figuur 6-3 (pF 1,8) in Bijlage 3.

2.3.3 Vergelijking en bespreking van de gevoeligheidskaarten.

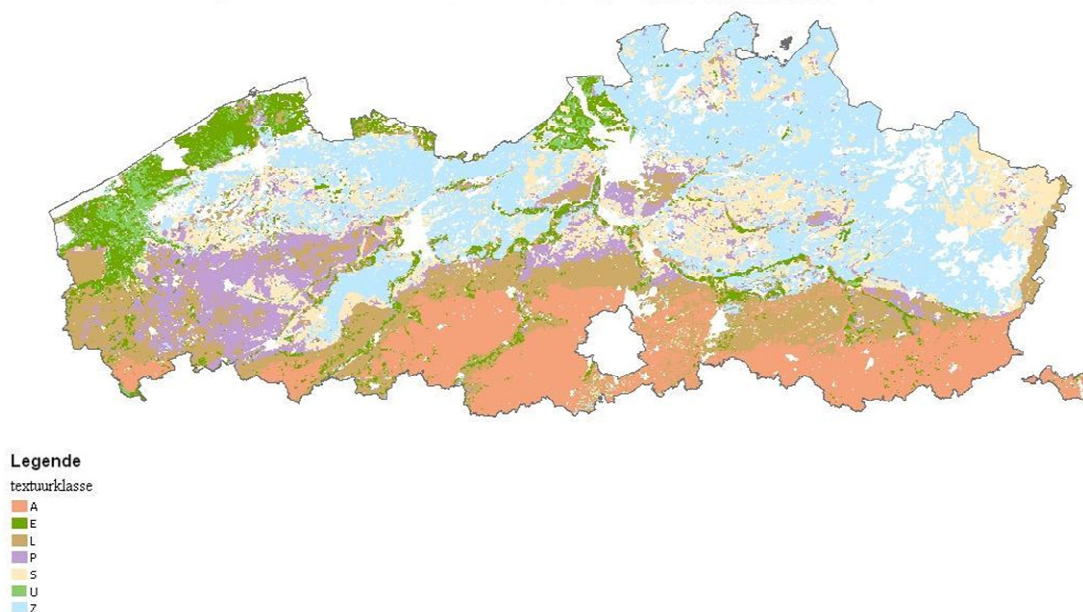
In de voorgaande paragrafen werden 2 methoden voorgesteld voor de ontwikkeling van een gevoeligheidskaart voor bodemverdichting voor Vlaanderen. Beide methoden gebruiken het Vlaanderen-dekkende deel van de bodemkaart van België als ruimtelijke basis en hanteren de structurele sterkte van de bodem (die wordt gekarakteriseerd via de PCS) op 41 cm diepte als maat voor gevoeligheid. De rationale voor de interpretatie van de resulterende PCS-kaarten is dat hoe groter de PCS is, hoe groter de weerstand van de bodem tegen plastische vervorming en hoe kleiner de gevoeligheid voor bodemverdichting. Waarden voor de PCS worden toegewezen in methode 1 of geschat in methode 2 voor bodemkaartenheden waarbij de kaartenheden vertegenwoordigd worden door het meest waarschijnlijke horizont waardoor het 41 cm-dieptevlak loopt. Dit horizont is afgeleid uit de databank 'Aardewerk-BIS' die zelf gebaseerd is op de verzameling van bodem-profielstudies die zijn uitgevoerd ten tijde van de opmaak van de Belgische bodemkaart (Van Orshoven *et al.*, 1991). Hét grote verschil tussen de 2 methoden is het feit dat in methode 2 (cfr. Figuur 6-2 en Figuur 6-3) de PCS-waarde een continue ratio-variabele is t.o.v. een discreet-ordinale variabele in methode 1 (cfr. Figuur 6-1). Omwille van minder doorgedreven a priori generalisatie is de tweede methode (berekenen van PCS-waarden) te verkiezen boven de eerste (toewijzen van PCS-waarden).

De ontwikkelde gevoeligheidskaarten realiseren op niveau 1 slechts 33,4% dekking, op niveau 2 51,5% en op niveau 3 73,5%. De totale dekking (netto oppervlakte Vlaanderen minus bebouwd gebied en andere niet-bodems ten tijde van de bodemkartering), waarbij telkens de informatie van het meest gedetailleerde niveau wordt behouden, wordt dan berekend als volgt:

$$\text{Totale dekking} = (\text{dekking op niveau1}) + (\text{alles wat wordt gedekt op niveau2, maar niet wordt gedekt op niveau1}) + (\text{alles wat wordt gedekt op niveau3, maar niet wordt gedekt op niveau1 of 2}) = 80,7\%$$

De symbolisatie van de PCS-waarden in beide types kaarten gebeurde volgens de indeling uit Tabel 1-2 in hoofdstuk 1, waarbij de waarden uit de PCS-klasse '<30 kPa' een extreem hoge gevoeligheid voor verdichting impliceren en de waarden uit de klasse '>150 kPa' een zeer lage gevoeligheid. In de eerste kaart (toewijzing van Nederlandse PCS-waarden) ontbreken de klassen '<30 kPa' (extreem hoge gevoeligheid) en '30-60 kPa' (zeer hoge gevoeligheid), daar de laagste van de 10 typische PCS-waarden voor Nederland (cfr. Tabel 2-2) 79 kPa bedraagt.

Op basis van de textuurfracties van de via Aardewerk geselecteerde horizonten kan er een textuurkaart worden gemaakt die de textuurklassen op 41 cm diepte toont volgens de legende van de Belgische textuurdriehoek. Deze kaart is weergegeven in Figuur 2-4.



Figuur 2-4 Textuurklassen op 41 cm diepte, afgeleid via Aardewerk.

Wanneer nu de gevoeligheidskaart ontwikkeld bij pF 2,5 via methode 1 (cfr. Figuur 6-1) wordt vergeleken met bovenstaande textuurkaart, stellen we logischerwijze vast dat beide kaarten dezelfde ruimtelijke patronen vertonen: kaartenheden kregen immers een PCS-waarde toegewezen in functie van hun textuur op 41 cm diepte. Vergelijking van beide kaarten leert ons dat voor zandgronden de hoogste structurele sterkte wordt gevonden, hetgeen een lage gevoeligheid voor verdichting impliceert. Zandleemgronden krijgen de laagste PCS-waarden toegewezen en zijn dus het meest verdichtingsgevoelig. Voor leem- en kleigronden situeren de PCS-waarden zich tussen deze van zand en zandleem in en is de gevoeligheid voor compactie van deze gronden eerder matig te noemen.

Het doorrekenen van de PTF's van Lebert en Horn met de info uit Aardewerk (= methode 2) leidt tot een gevoeligheidskaart die tamelijk goed correspondeert met deze uit methode 1 (cfr. vergelijk Figuur 6-2 met Figuur 6-1). De zandgronden in Vlaanderen krijgen opnieuw de hoogste PCS-waarden, de zandleemgronden de laagste. Wél duidelijk verschillend is de beoordeling van lichte zandleem (textuurklasse P). In methode 1 werden voor lichte zandleem PCS-waarden gevonden in de range van 120-150 kPa, wat een lage compactiegevoeligheid zou betekenen. Volgens de tweede methode daarentegen wordt lichte zandleem wél beschouwd als zijnde compactiegevoelig (PCS-waarden voornamelijk in de klassen '<30 kPa', '30-60 kPa' en '60-90 kPa'). Zoals eerder gezegd is de tweede methode echter te verkiezen boven de tweede omwille van minder doorgedreven a priori generalisatie. Daarom zullen we vanaf nu enkel nog de tweede methode in acht nemen en zullen we de via deze methode geconstrueerde kaarten gebruiken als basis voor de ontwikkeling van de risicokaarten (zie verder).

Vergelijking van Figuur 6-2 en Figuur 6-3, waarin respectievelijk gevoeligheidskaarten worden getoond bij pF 2,5 en pF 1,8, maakt duidelijk dat de structurele sterkte bij pF 1,8 lager wordt ingeschat in vergelijking met de structurele sterkte voorspeld bij pF 2,5. Dit is volledig in overeenstemming met de verwachtingen: een nattere grond (lagere pF) heeft een hogere gevoeligheid voor verdichting dan een meer droge grond (hogere pF). Voor beide gevoeligheidskaarten werd het oppervlakte-aandeel berekend van de 6 PCS-classes. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in Tabel 2-11.

Tabel 2-11 Oppervlakte-aandeel van de PCS-klassen bij de gevoeligheidskaarten opgesteld bij pF 2,5 of pF 1,8 (Figuur 6-2, resp. Figuur 6-3).

PCS-klasse	Gevoeligheid	pF 2,5	pF 1,8
		OPP.-AANDEEL (%)	
<0 kPa	/	1,1	7,2
<30 kPa	Extreem hoog	3,1	6,7
30-60 kPa	Zeer hoog	2,1	20,4
60-90 kPa	Hoog	12,8	23,2
90-120 kPa	Matig	38,9	30,8
120-150 kPa	Laag	7,2	9,9
>150 kPa	Zeer laag	34,8	1,8

Wat onmiddellijk in het oog springt is het feit dat in beide kaarten klaarblijkelijk ook negatieve PCS-waarden werden berekend voor een aantal bodemkaartenheden. Via de PTF's van Lebert en Horn werd bij pF 2,5 voor 1,1% (naar oppervlakte) van de kaartenheden waarvoor een match werd gevonden een negatieve PCS-waarde berekend. Bij pF 1,8 werd een oppervlakte-aandeel bekomen van 7,2% voor bodemkaartenheden met een PCS kleiner dan nul. Aangezien echter per definitie de PCS steeds positief dient te zijn, worden de negatieve waarden verworpen. Uit de tabel blijkt verder dat bij pF 2,5 voor 42% van de gekoppelde kaartenheden een lage tot zeer lage gevoeligheid voor verdichting wordt voorspeld (PCS in de klassen '120-150 kPa' en '>150 kPa'). Bij pF 1,8 is dit slechts 11,7%. Omgekeerd wordt bij pF 1,8 voor 50,3% van de gekoppelde kaartenheden een hoge tot extreem hoge gevoeligheid voor compactie voorspeld (PCS-klassen '<30 kPa', '30-60 kPa' en '60-90 kPa'). Bij pF 2,5 daarentegen is dit slechts 18%.

We kunnen nu ook de kenmerken van onze gevoeligheidskaarten (methode 2!) weergeven via het eerder gebruikte fichesysteem uit Bijlage 1 aan de hand waarvan we de in de literatuur beschikbare bodemverdichtingskaarten met elkaar vergeleken hebben:

Tabel 2-12 Kenmerken van de gevoeligheidskaart voor verdichting van de bodem in Vlaanderen op 41 cm diepte (pF 2,5 en 1,8).

Titel	Gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de berekende waarde van de PCS bij pF 2,5 of pF 1,8 van het meest waarschijnlijke horizont per kaartenheid waardoorheen het 41 cm dieptevlak loopt.
Referentie	Van De Vreken, P., Van Holm, L., Diels, J., Van Orshoven, J en Gobin A., 2009.
Ruimtelijk bereik	Vlaanderen
Ruimtelijke resolutie	De digitale versie, daterend uit 2001, van het Vlaanderen dekkende deel van de Belgische bodemkaart vormt de geografische basis van de gevoeligheidskaart. De schaal van de analoge bodemkaart is 1:20.000 en de legende-eenheid is de bodemserie die eveneens de basiseenheid vormt van het Belgische bodemclassificatiesysteem.
Procedure	Voor 80,7% (oppervlakte-aandeel van de niet-bebouwde of verstoorde gronden) van de bodemkaartenheden werd een PCS-waarde berekend d.m.v. pedotransferfuncties.
Input voor de PTF's	<ul style="list-style-type: none"> - pt: volumedichtheid (Mg m^{-3}) - org: organisch materiaal (gewichts%) - Lk: luchtcapaciteit (volume%) - kf: verzadigde hydraulische conductiviteit (10^3 cm s^{-1})

	<ul style="list-style-type: none"> - TW: niet-beschikbaar water-capaciteit (volume%) - nFK: beschikbaar water-capaciteit (volume%) - c: cohesie (kPa) - γ: interne frictiehoek (°) <p>Waarden voor cohesie en interne frictiehoek zijn beschikbaar in de literatuur. De overige variabelen werden berekend aan de hand van de in Aardewerk beschikbare data in combinatie met specifieke, in België gebruikte, PTF's (cfr. Rawls-PTF en PTF's van Vereecken <i>et al.</i>).</p>
Output van de PTF	Continue PCS-waarden die geklasseerd werden in 1 van 6 mogelijke ordinale klassen voor PCS: <30; 30-60; 60-90; 90-120; 120-150; >150
Aard van de procedure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vooreerst werd de bodemkaart via class-matching a.d.h.v. de bodemserie gekoppeld aan de statistische of synthetische profielen uit het informatiesysteem Aardewerk-BIS. Deze synthetische profielen zijn afgeleid uit de individuele bodemprofielen opgenomen in Aardewerk, een databank die de gegevens bevat afkomstig van de beschrijving van meer dan 13.000 bodemprofielen en van de analyse van nagenoeg 70.000 geassocieerde horizonten. 2. Vervolgens werd voor elke bodemkaartenheid het meest waarschijnlijke horizont geselecteerd waardoor het 41 cm-dieptevlak loopt. 3. Tenslotte werd d.m.v. pedotranferfuncties een PCS-waarde berekend op basis van de voor het geselecteerde horizont beschikbare info in BIS. Deze PTF's zijn gebaseerd op oedometer-metingen (uniaxiale compactieproef) uitgevoerd op bodemstalen uit horizonten van meer dan 180 bodemprofielen, hoofdzakelijk verzameld in Duitsland, doch aangevuld met verscheidene locaties in de rest van Europa (Horn en Fleige, 2003).
Beoordeling	<ul style="list-style-type: none"> ➤ pF 2,5: Voor de zandgronden in Vlaanderen werden de hoogste PCS-waarden berekend. Omgekeerd werden de laagste PCS-waarden gevonden voor de (lichte) zandleemstreek. ➤ pF 1,8: In de zeepolders, de lichte zandleemstreek en de leemstreek ten oosten van het Brussels Gewest werden de laagste PCS-waarden voorspeld. Voor de zandgronden vielen de berekende PCS-waarden in zowat elk van de PCS-klassen (uitgezonderd de klasse '>150 kPa').

Tenslotte kunnen we onze resultaten vergelijken met de positie van Vlaanderen/België in de bodemverdichtingskaarten beschikbaar in de literatuur (cfr. Bijlage 1):

Tabel 2-13 Vergelijking van de gevoeligheid voor (het risico op) bodemverdichting in Vlaanderen/België voor de bestudeerde én zelf ontwikkelde kaarten.

		Polders / Klei	Kempen / Zand	Leemstreek / Leem	Condroz / Stenig leem tot zand
1	Jones, 2003 (Europa)	Matig	Hoog	Matig	Matig
2	JRC, 2008	Zeer hoog	Zeer hoog	Laag	Zeer hoog

	(Europa)				
3	Horn, 2005a (pF) (Europa)	pF 2.5 of 1.8 : Niet af te lezen	pF 2.5 of 1.8 : Niet af te lezen	pF 2.5 of 1.8 : Niet af te lezen	pF 2.5 of 1.8 : Niet af te lezen
4	Horn, 2005b (topsoil load; pF 1.8) (Europa)	Low: ? High: Zeer hoog	Low: Zeer laag High: Zeer laag	Low: Zeer hoog High: Zeer hoog	Low: ? High: Zeer hoog
5	Van den Akker, 2004 (Nederland)	/	/	/	/
6	Horn, 2005c (Duitsland)	/	/	/	/
7	SADL, 2009 (Vlaanderen)	pF 2.5: Matig tot Hoog pF 1.8: Hoog	pF 2.5: Laag tot Zeer laag pF 1.8: Laag tot Extreem hoog	pF 2.5: Matig pF 1.8: Matig tot Zeer hoog	/

2.3.4 Hybride-gevoeligheidskaart

Arvidsson *et al.* (2003) geven aan dat structurele sterkte op zich een goede indicator is van de weerstand van de bodem tegen plastische vervorming, zij het dat de reële waterhuishouding in de kritische voorjaarsperiode zo goed als mogelijk in rekening moet gebracht worden, eerder dan bij constante pF-waarde te werken (cfr. Horn *et al.*, 2005). Om de verschillen in drainagetoestand van de bodemkaartenheden mee in rekening te brengen bij de inschatting van de gevoeligheid voor bodemverdichting, maken we in een volgende stap een 'hybride-kaart' waarbij een kaartenheid ofwel de PCS-waarde bij pF 2.5 krijgt, ofwel de PCS-waarde bij pF 1.8 op basis van een beslissingsregel. Deze is gebaseerd op de veronderstelde diepte van de grondwatertafel in het voorjaar afgeleid uit de diepte van voorkomen van roestverschijnselen, zoals vastgelegd in de drainageklasse op de bodemkaart.

De definitie van de drainageklasse verschilt tussen twee groepen van textuurklassen: L,A,E en U enerzijds en Z,S,P anderzijds. De drainageklasse is gedefinieerd o.b.v. een dieptere range voor roest (gemakkelijkshalve gelijk te stellen aan de gemiddelde hoogste grondwaterstand in het vroege voorjaar) en een diepte range voor reductie (gemiddelde laagste grondwaterstand in de late zomer). Omdat gesteld kan worden dat na de winter het grondwater systematisch hoger staat dan in het najaar, is het voorjaar de kritische periode voor compactie. Daarom beschouwen we de ondergrens van de range voor roest als zijnde de grondwaterstand die de gevoeligheid voor verdichting mede bepaalt. Aan de hand van deze diepte berekenen we de pF van de bodem (textuurklasse x drainageklasse) bij het begin van het landbouwseizoen (eind maart – begin april). Algemeen wordt gesteld dat bodems dan op veldcapaciteit zijn, doch de daarmee corresponderende pF-waarde zou sterk kunnen afwijken van de courant aangenomen 2.3. Deze pF-waarde overeenstemmend met de 'natuurlijke veldcapaciteit' berekenden we door de diepte van de ondergrens voor roest te verminderen met -41cm (= diepte waarvoor de structurele sterkte werd berekend) en van de absolute waarde van dat verschil het 10-delig logaritme te nemen. Vervolgens berekenden we het verschil tussen deze berekende pF-waarde en pF 2.5, respectievelijk 1.8. De desbetreffende combinatie van textuur- en drainageklasse kreeg vervolgens de structurele sterkte toegewezen bij dié pF (1.8 of 2.5) die het dichtst bij de berekende ligt:

Tabel 2-14 Afleiding van toe te passen pF voor schatting van de structurele sterkte voor voorstelling in 'hybride-gevoeligheidskaart'.

Textuur	Drainage	Ondergrens roest t.o.v. maaiveld	Ondergrens roest t.o.v. horizont op -41 cm	pF op 41 cm diepte	Δ pF 2.5	Δ pF 1.8	Toe te passen pF voor schatting PCS
L, A, E, U	a	-		2.3	0.2	0.5	2.5
L, A, E, U	b	-		2.3	0.2	0.5	2.5
L, A, E, U	c	-125	-84	1.92	0.58	0.12	1.8
L, A, E, U	d	-80	-39	1.59	0.91	0.21	1.8
L, A, E, U	e	-50	-9	0.95	1.55	0.85	1.8
L, A, E, U	f	-30	11	0	2.5	1.8	1.8
L, A, E, U	g	0	41	0	2.5	1.8	1.8
L, A, E, U	h	-50	-9	0.95	1.55	0.85	1.8
L, A, E, U	i	-30	11	0	2.5	1.8	1.8
L, A, E, U	A	-80	-39	1.59	0.91	0.21	1.8
L, A, E, U	B	-		2.3	0.2	0.5	2.5
L, A, E, U	D	-80	-39	1.59	0.91	0.21	1.8
L, A, E, U	I	-30	11	0	2.5	1.8	1.8
L, A, E, U	F	-30	11	0	2.5	1.8	1.8
L, A, E, U	G	0	41	0	2.5	1.8	1.8
Z,S,P	a	-		2.1	0.4	0.3	1.8
Z,S,P	b	-125	-84	1.92	0.58	0.12	1.8
Z,S,P	c	-90	-49	1.69	0.81	0.11	1.8
Z,S,P	d	-60	-19	1.28	1.22	0.52	1.8
Z,S,P	e	-40	1	0	2.5	1.8	1.8
Z,S,P	f	-20	21	0	2.5	1.8	1.8
Z,S,P	g	0	41	0	2.5	1.8	1.8
Z,S,P	h	-40	1	0	2.5	1.8	1.8
Z,S,P	i	-20	21	0	2.5	1.8	1.8
Z,S,P	A	-60	-19	1.28	1.22	0.52	1.8
Z,S,P	B	-125	-84	1.92	0.58	0.12	1.8
Z,S,P	D	-60	-19	1.28	1.22	0.52	1.8
Z,S,P	I	-20	21	0	2.5	1.8	1.8
Z,S,P	F	-20	21	0	2.5	1.8	1.8
Z,S,P	G	0	41	0	2.5	1.8	1.8

^a Voor de complexe drainageklassen A, B, D, I, F en G wordt de ondergrens van de range voor roest gelijk verondersteld aan de ondergrens van de range voor roest van de natste samenstellende drainageklasse. Bijvoorbeeld: $D = c + d \rightarrow$ ondergrens roest D = ondergrens roest d (d is natter dan c)

^b Textuurklassen L,A,E of U in combinatie met drainageklassen a of b: gronden waarin geen roestverschijnselen worden waargenomen binnen de boordiepte (125 cm); voor deze gronden veronderstellen we de pF op 41 cm diepte gelijk aan 2.3 (de bij veldcapaciteit meest courant aangenomen pF-waarde) \rightarrow toe te passen pF = 2.5 (kleinste verschil)

^c Textuurklassen L,A,E,U in combinatie met drainageklassen f, g, i, F, G en I; textuurklassen Z,S,P in combinatie met drainageklassen e, f, g, h, i, F, G en I: eind maart/begin april komt de grondwatertafel hoger dan de referentie-diepte van 41 cm, zodat het horizont op 41 cm in feite verzadigd is; voor deze gronden veronderstellen we de pF gelijk aan 0 \rightarrow toe te passen pF = 1.8 (kleinste verschil)

Voor gronden met drainageklassen f, g, i, F, G, I (alle texturen) of drainageklassen e of h (textuurklassen Z,S,P) zou men kunnen argumenteren dat het niet zinnig is om de structurele sterkte bij pF 1.8 te gebruiken daar deze gronden in werkelijkheid veel natter zijn. Door de ondiepe grondwatertafel zijn deze gronden vermoedelijk niet te berijden in het voorjaar. We nemen echter aan dat deze gronden gedraineerd worden, omdat ze anders niet voor landbouw geschikt zouden zijn. Bij

drainage komt de grondwatertafel dan toch op 60 à 80 cm diepte, zodat pF 1.8 toch gerechtvaardigd is.

^d Textuurklassen Z, S of P in combinatie met drainageklasse a: gronden waarin geen roestverschijnselen worden waargenomen binnen de boordiepte (125 cm); voor textuurklassen Z en S ligt de veldcapaciteit in het geval van een diepe grondwatertafel eerder bij pF 2.1 (niet bij pF 2.5): bij zandige textuur valt drainage nagenoeg stil bij deze pF omdat K dan klein wordt → toe te passen pF = 1.8 (kleinste verschil). Textuurklasse P in combinatie met drainageklasse a is dan een beetje een randgeval waarbij we geopteerd hebben voor het 'worst-case-scenario', d.w.z. pF 1.8 (nattere grond en dus meer gevoelig voor verdichting).

^e Voor de zeepolders wordt in tegenstelling tot de rest van Vlaanderen een geomorfologische legende gehanteerd i.p.v. een morfogenetische legende. Aangezien in de geomorfologische legende echter niet wordt gewerkt met de in Tabel 2-14 aangewende textuur- en drainageklassen, kan de in deze tabel uitgewerkte beslissingsregel voor keuze van de toe te passen pF niet worden toegepast. Vanuit een 'worst case'-optiek werd daarom beslist om aan de bodemkaartenheden van de zeepolders de PCS-waarden berekend bij pF 1,8 toe te kennen.

Het toepassen van de in Tabel 2-14 uitgewerkte beslissingsregel resulteert in de hybride-gevoeligheidskaart weergegeven in Figuur 6-4. De hybride-kaart lijkt zeer sterk op de gevoeligheidskaart ontwikkeld bij pF 1.8 (Figuur 6-3), met uitzondering van de leemstreek ten oosten van Brussel. Aan 86% van de kaartenheden van de hybridekaart werd de PCS-waarde bij pF 1.8 toegekend. Slechts 14% van de kaartenheden kreeg de PCS-waarde bij pF 2.5.

2.4 Risicokaart

2.4.1 Voorgestelde methode

Gezien de enorme diversiteit aan werktuigen die in de land- en bosbouw worden gebruikt, is het zeer moeilijk om aan een landgebruiksklasse een typische belasting te koppelen (wiellasten, bandenspanning e.d.). Daarom stellen wij voor een risicokaart op te stellen die de grensbelasting aangeeft die mag uitgeoefend worden op een bodemkaartenheid (gekaracteriseerd voor een gegeven diepte met een welbepaald horizont) om de PCS-waarde (uit de gevoeligheidskaart) niet te overschrijden. Dit zal een kaart opleveren die conceptueel gelijkaardig is aan de 'wheel load carrying capacity-kaart' van Van den Akker (2004). Het ruimtelijke detail zal echter veel groter zijn en dezelfde als deze uit de gevoeligheidskaarten. De grensbelasting zal berekend worden voor een aantal combinaties van bodemspecifieke concentratiefactor enerzijds en wiellasten en bandenspanningen anderzijds, gebruik makend van SOILFLEX. Voor elke bodemkaartenheid zullen op deze wijze een aantal belastingscijfers beschikbaar zijn. In de risicokaart zal per kaartenheid de hoogste belastingswaarde opgenomen worden die de desbetreffende gevoeligheidswaarde (PCS) niet overschrijdt. Twee scenario's werden doorgerekend, waarbij voor elk scenario nog eens twee vochttoestanden werden beschouwd (pF 1,8 en pF 2,5). In het eerste scenario wordt de grensbelasting berekend voor een typische tractorband. Het tweede scenario berekent de grensbelasting voor een typische band van een oogstmachine (bv. een maïshakselaar of bietenrooier). Op net dezelfde wijze als het geval was bij de gevoeligheidskaart, zullen de resulterende risicokaarten bij verschillende pF fungeren als uitgangsmateriaal voor een 'hybride-risicokaart'.

2.4.2 Keuze van de parameters voor de risicokaart

Voor de preventie van bodemverdichting en de inschatting van het risico op bodemverdichting worden in de literatuur verschillende parameters aangehaald. Zo worden door Tijink *et al.* (1995) technische richtlijnen ter preventie van verdichting geciteerd, die worden uitgedrukt als limieten voor (i) bandenspanning, (ii) gemiddelde contactdruk aan het bodemoppervlak en (iii) verticale krachten op 50 cm diepte. In meer recent werk van Tijink (2006) benadrukt hij vooral de toepassing van extra brede banden bij lage banddruk als dé mechanisatiestrategie bij uitstek om verdichting van de ondergrond te voorkomen. Binnen de werkgroep erosie opgericht in het kader van de Soil Thematic Strategy van de Europese Commissie, in voorbereiding van de Kaderrichtlijn Bodem, alsook in het bijbehorende rapport (Taskgroup 5) kwam echter de kritiek dat zijn benadering geen rekening houdt met het effect van hoge wiellasten. Als reactie hierop stelt Tijink dat "een limitering van de bandendruk automatisch een beperking van de wiellasten en aslasten impliceert". Bovendien is het volgens hem een basisregel dat wiellast, bandenspanning, gemiddelde contactdruk met de grond en snelheid onderling gecorreleerd zijn. Hij stelt dan ook dat bandenspanning op zich een nuttige parameter is voor het afleiden en formuleren van druklimieten, aangezien het een parameter betreft die eenvoudig kan gemeten worden en die bovendien makkelijk kan worden aangepast/bijgesteld onder praktische omstandigheden (Tijink, persoonlijke communicatie). Een aanpak waarbij een limiet wordt voorgesteld voor aslast (d.i. tweemaal de limiet voor wiellast) stuit eveneens op kritiek. Deze luidt dat het hanteren van grenzen voor aslast een te simpele benadering is, waarbij men voorbijgaat aan de aanzienlijke voordelen van een lage bandenspanning. Een andere parameter, geïntroduceerd door Van den Akker en Schjønning (2004), is de 'wheel-load carrying-capacity' of vrij vertaald: 'de wiellast-draagkracht'. Deze wordt gedefinieerd als zijnde de maximum wiellast uitgeoefend door een specifiek bandtype en bandenspanning die in de ondergrond geen krachten veroorzaakt die de sterkte van de ondergrond overschrijden. Of anders: alleen veldverkeer met wiellasten die lager zijn dan de draagkracht van de ondergrond veroorzaakt géén

verdichting van de ondergrond. Daar de sterkte van de ondergrond afhankelijk is van het bodemtype en verder ook wordt beïnvloed door het vochtgehalte is de 'wiellast-draagkracht' een dynamische parameter. Deze parameter werd door Van den Akker aangewend voor de ontwikkeling van een 'wiellast-draagkrachtk kaart' voor Nederland (Van den Akker, 2004). Eén van de belangrijkste beperkingen bij het gebruik van de 'wiellast-draagkracht' is het gebrek aan data aangaande de bodemsterkte, waardoor men een beroep moet doen op pedotransferfuncties die een verband leggen tussen bodemtextuur en –sterkte. (cfr. De PTF's van Lebert en Horn voor schatting van Ss). Tijink argumenteert bovendien dat het gebruik van de wiellast als parameter voor de preventie van verdichting niet praktisch is daar "onder praktijkomstandigheden de wiellast continu wijzigt in het veld (cfr. toename van massa tijdens oogsten), het bijna onmogelijk is om de wiellast te meten tijdens veldwerkzaamheden en de toegelaten wiellast verschillend is voor elke band – er worden in de Europese landbouw op zijn minst enkele honderden verschillende banden aangewend – en voor elke wijziging in de banden-settings (bv. bandenspanning en snelheid)" (Tijink, persoonlijke communicatie).

Op de kenniscirkels die plaatsvonden in september 2008 werd door de aanwezige landbouwers opgemerkt "dat de wiellast op zichzelf weinig zeggend is voor het opstellen van een risicokaart. De bandenspanning is eveneens belangrijk, zoniet nog belangrijker dan de wiellast en mag dus zeker niet uit het oog verloren worden bij de ontwikkeling van de risicokaart", aldus de landbouwers. Er werd verder ook opgemerkt dat de kiloNewton als eenheid voor wiellast niet echt bekend is in landbouwmiddens en er werd dan ook gesuggereerd om de wiellast uit te drukken in ton.

Op basis van de bemerkingen van de landbouworganisaties én de discussie i.v.m. de verschillende benaderingswijzen m.b.t. de preventie van bodemcompactie werd beslist om voor de ontwikkeling van de risicokaart voor Vlaanderen het concept van Van den Akker (2004) te volgen, mits een aantal aanpassingen. Net als Van den Akker berekenen we voor elke kaarteenheid de grensbelasting die mag uitgeoefend worden om de sterkte van de bodem niet te overschrijden. In tegenstelling tot Van den Akker die voor elke kaarteenheid de maximum wiellast berekent in kN bij een constante bandenspanning, zal in onze aanpak de maximum wiellast worden bepaald, uitgedrukt in ton (kg), bij de door de bandenfabrikant voor die wiellast aangeraden bandenspanning, uitgedrukt in bar, waarbij de bandenspanning dus varieert met de wiellast (een toename van de wiellast impliceert een toename van de bandendruk). Voor elke kaarteenheid zal dus berekend worden: maximaal toelaatbare wiellast X bij de voor die wiellast optimale bandenspanning Y.

2.4.3 Keuze van het bodemcompactiemodel

Voor elke kaarteenheid zal de grensbelasting worden berekend die mag uitgeoefend worden om de sterkte van de ondergrond op 41 cm diep niet te overschrijden. Hiervoor zal er gebruik worden gemaakt van een bodemcompactiemodel dat toelaat om de krachten te berekenen in de bodem die resulteren uit het belasten van deze bodem door een zekere wiellast, typisch voor een bepaald machinegebruik. Twee soorten bodemcompactiemodellen zijn voorhanden: enerzijds onderscheiden we de (pseudo-)analytische modellen en anderzijds 'de begrensde element modellen' (finite element models, FEM's), die van elkaar verschillen in de manier waarop de drukverdeling in de bodem wordt berekend (Arvidsson, 1997). In een analytisch model wordt de bodem opgevat als een homogeen, elastisch, isotroop en semi-oneindig medium. Gelaagdheid van het bodemprofiel (heterogeniteit) kan bij een dergelijk model niet in rekening worden gebracht bij de berekening van de drukpropagatie doorheen de bodem, in tegenstelling tot een FEM waar dit wel mogelijk is. FEM's delen het bodemcontinuüm op in een eindig aantal bodemelementen die elk afzonderlijk behandeld worden. In vergelijking met een analytisch model zal een FEM het effect van plastische vervorming van de bodem op de drukverdeling makkelijker in rekening kunnen brengen. Het opdelen van de bodem in individuele elementen laat de FEM's toe om bodemcompactie te modelleren voor bodems waar anisotrope condities heersen. Nadeel van de FEM's is dat ze

in vergelijking met de analytische modellen meer mechanische parameters vereisen, dewelke vaak moeilijk experimenteel te bepalen zijn (Arvidsson, 1997, Arvidsson *et al.*, 2001, Defosse en Richard, 2002). Omwille van dit gegeven werd voor de ontwikkeling van de risicokaart geopteerd voor een analytisch model. Een voorbeeld van een dergelijk analytisch bodemcompactiemodel is het SOCOMO (SOil COMpaction MOdel)-model van Van den Akker (2004), een relatief eenvoudig model waarbij de inputbehoeften eerder beperkt blijven. Een meer uitgebreid analytisch model is SoilFlex (Keller *et al.*, 2007), welke de meest interessante aspecten van vier bestaande analytische modellen (waaronder SOCOMO; de andere zijn Compoil (O'Sullivan *et al.*, 1999) en de modellen van Gupta en Larson (1982) en Johnson en Burt (1990)) integreert en verfijnt. Het SOCOMO-model laat toe om voor elk punt in de bodem de krachten te berekenen, gegeven eender welke krachtenverdeling in de bodem/band-interface. Het uitgangspunt van SOCOMO is het voorkomen van verdichting van de ondergrond: a.d.h.v. SOCOMO kunnen de krachten worden berekend die op de ondergrond worden uitgeoefend door een zekere wiellast, waarbij om plastische vervorming te vermijden deze krachten de sterkte van de ondergrond niet mogen overschrijden. Structurele sterkte (= precompressiestress) en schuifsterkte van de ondergrond worden vergeleken met de berekende verticale normaal-, respectievelijk horizontale schuifkrachten. Indien één of beide grenswaarden overschreden worden is de doorgerekende wiellast niet toerekenbaar en treedt plastische vervorming op. Met SOCOMO is het echter niet mogelijk om de vervorming zelf te berekenen (Van den Akker, 2004). Dit is wél mogelijk met SoilFlex: vooreerst berekent SoilFlex de krachten aan het bodemoppervlak, waarbij zowel verticale als horizontale contactkrachten in aanmerking worden genomen; in een tweede stap wordt de krachtenpropagatie doorheen de bodem analytisch bepaald; tenslotte kan in een derde en laatste stap de bodemvervorming worden berekend, dewelke functie is van de uitgeoefende krachten. Twee versies van SoilFlex werden ontwikkeld: 'SoilFlex Uniaxial' en 'SoilFlex PlaneStrain'. Beiden verschillen van elkaar in de manier waarop de vervorming wordt berekend: in de Uniaxial-versie wordt verondersteld dat er alleen verticale vervorming is net zoals in de uniaxiale compactie-test uitgevoerd in het laboratorium. Hierbij zijn geen horizontale/zijdelingse vervormingen mogelijk. In de PlaneStrain-versie daarentegen kunnen zowel verticale als horizontale vervormingen worden berekend. Wat betreft de berekening van de krachten is er geen verschil tussen beide SoilFlex-versies en kunnen met beide versies zowel de horizontale schuifkrachten ('shear stresses') als de verticale normaalkrachten ('normal stresses') worden berekend. Voor de berekening van de 'shear stresses' zijn er wél extra input-gegevens benodigd (cohesie, interne wrijvingshoek, 'schuifverplaatsing-coëfficiënt' ('shear displacement coefficient') en de 'wiel-slip' ('wheel slip') waaruit vooreerst de netto tractie aan het bodemoppervlak wordt berekend. Beide SoilFlex-versies laten eveneens toe om te testen of er al dan niet 'schuiffalen' ('shear failure') optreedt: er wordt getest of de horizontale krachten de schuifsterkte van de bodem al dan niet overschrijden (Keller *et al.*, 2007; persoonlijke communicatie met Thomas Keller en Pauline Défossez).

Voor de ontwikkeling van de risicokaart werd geopteerd voor het SoilFlex-compactiemodel. Een eerste reden om te opteren voor SoilFlex is het feit dat in tegenstelling tot het SOCOMO-model, SoilFlex zélf de verticale en horizontale puntladingen in de bodem/band-interface berekent alvorens over te gaan naar de berekening van de verticale en horizontale krachten in de bodem. Met SOCOMO is dit niet mogelijk en dienen de verticale en horizontale puntladingen vooraf bekend te zijn, dewelke in 2 afzonderlijke matrixen moeten ingeladen worden in het model. Indien we dus geopteerd zouden hebben voor SOCOMO, hadden we deze puntladingen eerst moeten berekenen met een model als SoilFlex (of een gelijkaardig model), alvorens met SOCOMO zelf aan de slag te kunnen gaan. Een tweede reden om te opteren voor SoilFlex is de gebruiksvriendelijkheid van het model, dat geïmplementeerd werd in een Excel-spreadsheet. SOCOMO is veel complexer opgebouwd en bestaat uit 2 modules (SOCODT00.EXE en SOCOMO004.EXE) die naast elkaar gebruikt moeten worden. De input- en outputfiles voor SOCOMO zijn ASCII-files en voor grafische voorstellingen dient de output-file in Excel geïmporteerd te worden. Verder hanteert SOCOMO een verouderde eenheid voor kracht, met name de kgf of kilogramkracht, waarbij

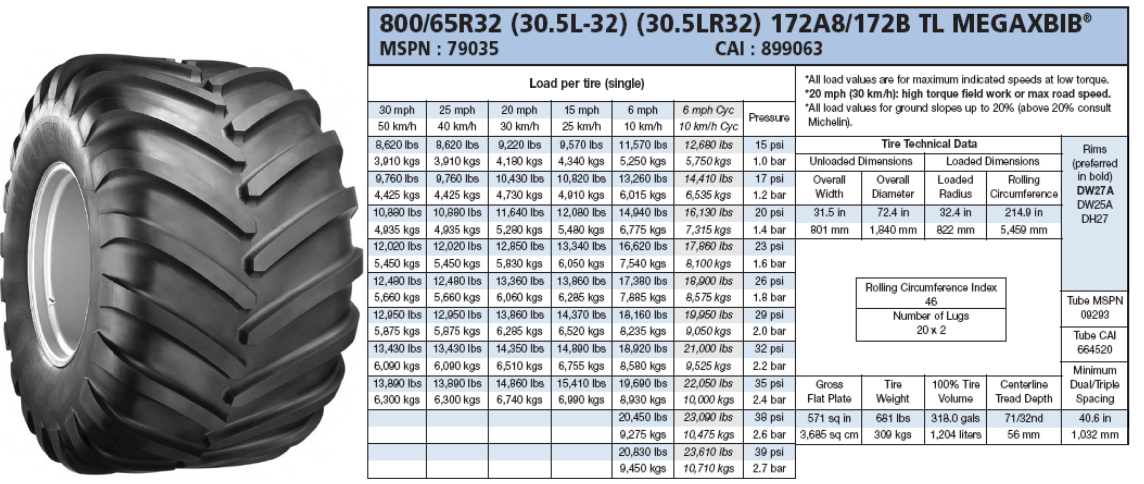
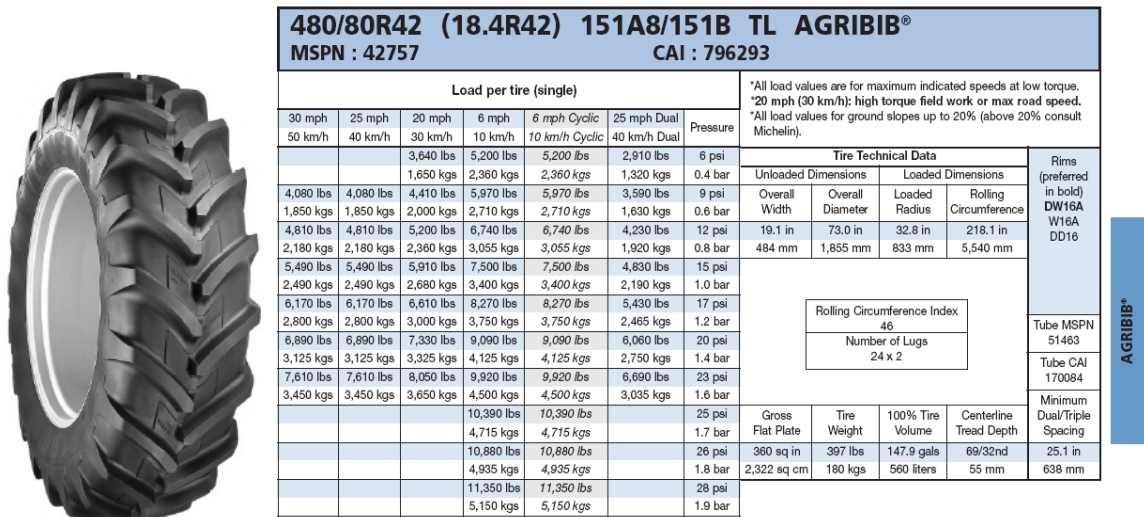
1 kfg overeenkomt met 9,80665 Newton. SoilFlex daarentegen drukt de wiellast uit in kg, d.w.z. hanteert massa i.p.v. kracht. Een laatste reden om voor SoilFlex te opteren i.p.v. SOCOMO is het feit dat in laatst genoemd model de volumegewicht moet worden opgegeven over het ganse dieptebereik waarvoor men de krachten wil berekenen, onder de vorm van een matrix RHONUL(1), RHONUL(2),...,RHONUL(I),..., RHONUL(DIEP). Dit impliceert dat het verloop van de volumedichtheid in functie van de diepte gekend moet zijn voor elke kaarteenheden, hetgeen in de praktijk niet het geval zal zijn. Ook voor de cohesie en de interne wrijvingshoek is een 'dieptematrix' vereist. In SoilFlex daarentegen volstaat één waarde voor cohesie en hoek van interne frictie. De volumedichtheid is niet nodig als inputparameter.

Samengevat zullen we dus opteren voor het SoilFlex-model. Daar beide SoilFlex-versies de krachten (verticale én horizontale) op identieke wijze berekenen – alleen de manier waarop de vervorming (verdichting) wordt berekend verschilt – maakt het niet uit met welke versie er gewerkt zal worden. De berekeningen gebeurden uiteindelijk met de Uniaxial-versie, waarmee wel degelijk ook horizontale krachten ('shear stresses') berekend kunnen worden. Wat echter niet mogelijk is, is het testen van 'shear failure' (dit is ook niet mogelijk met de PlaneStrain-versie!), aangezien voor deze test allerhande bijkomende mechanische en/of fysische parameters benodigd zijn die niet voorhanden zijn. Drie modellen zijn in SoilFlex geïmplementeerd voor het testen van 'shear failure' (en het berekenen van de vervorming en de volledige krachtentoeestand), maar geen van deze 3 modellen biedt een uitweg vanwege te gecompliceerd. Zo is bijvoorbeeld in 2 van de 3 modellen de helling van de VCL ('virgin compression line') benodigd als één van de mechanische bodemparameters. Wanneer deze niet gekend is, kan deze worden geschat via een in het model geïmplementeerde pedotransferfunctie, doch ook de voor deze PTF benodigde inputparameters zijn niet eenvoudig voorhanden. Het al dan niet optreden van 'shear failure' kan bijgevolg niet worden getest, waardoor enkel zal worden nagegaan of de uitgeoefende verticale krachten ten gevolge van een bepaalde wiellast de structurele sterkte van de bodem op 41 cm al dan niet overschrijden. Wél is het mogelijk om na te gaan wat de invloed is van de horizontale krachten aan het bodemoppervlak (= de tractie) op de propagatie van de verticale krachten doorheen de bodem.

2.4.4 Keuze van banden

Voor elke kaarteenheden zal a.d.h.v. SoilFlex Uniaxial de grensbelasting worden berekend die mag uitgeoefend worden om de structurele sterkte (PCS) uit de gevoeligheidskaart voor een diepte van 41 cm niet te overschrijden. Voor elke kaarteenheden zal daartoe de maximale wiellast in kg worden berekend bij de door de bandenfabrikant voor die wiellast aangeraden bandenpanning, uitgedrukt in bar.

Twee scenario's werden doorgerekend, hetgeen finaal zal resulteren in 2 risicokaarten. In een eerste scenario wordt een typische tractorband beschouwd; in een tweede scenario wordt een band beschouwd die op diverse oogstmachines kan worden aangewend (cfr. maaidorsers en bietenrooiers). De tractorband betreft een 480/80R42-band uit de AGRIBIB-serie van Michelin en heeft een breedte van 484 mm en een diameter van 1,855 m. De 'oogstmachineband' is een 800/65R32-type, eveneens van Michelin, uit de MEGAXBIB-serie en heeft een breedte van 801 mm en een diameter van 1,840 m. Een afbeelding van beide banden, evenals hun technische specificaties zijn weergegeven in Figuur 2-5.



Figuur 2-5 De voor de risicokaarten beschouwde tractorband (boven) en 'oogstmachineband' (onder) evenals de technische specificaties van beide banden.

Voor beide banden zijn voor verschillende snelheden verschillende wiellasten aangegeven en de voor die wiellasten optimale bandenspanning. Aangezien we geïnteresseerd zijn in de krachten die deze banden veroorzaken in het veld, beschouwen we de wiellasten en bandenspanningen bij een maximumsnelheid van 10 km/h.

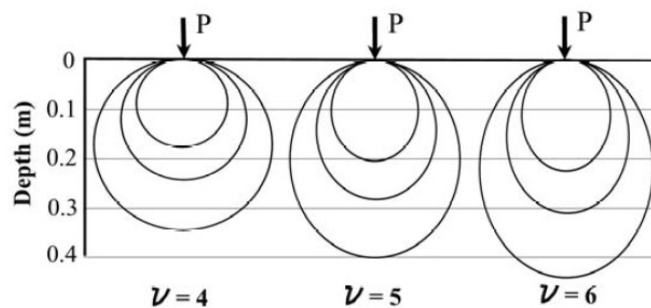
2.4.5 Berekeningen met SoilFlex

Aan de hand van de wiellast, de bandenspanning aangewezen door de fabrikant, de effectief toegepaste bandenspanning (die wordt gelijk verondersteld aan de aangewezen bandenspanning), de breedte van de band en de diameter van de onbelaste band kunnen de verticale krachten aan het bodemoppervlak worden berekend d.m.v. SoilFlex. Hierbij dienen de vorm van het contact-oppervlak en de verdeling van de krachten over dit oppervlak gespecificeerd te worden. SoilFlex biedt keuze tussen onder meer een circulair contactoppervlak, een elliptisch contactoppervlak en een 'super-elliptisch' contactoppervlak, en tussen onder meer een uniforme, lineaire en parabolische krachtverdeling. Wij opteerden voor een elliptisch contactoppervlak in combinatie met een parabolische krachtverdeling. Zulke krachtverdeling betekent dat de maximale kracht wordt bereikt onder het middelpunt van de band en dat de krachten afnemen, volgens een tweegraads-functie, naar de randen

van de band toe. Voor de tractorband uit Figuur 2-5 met een wiellast van 4715 kg bij een bandenspanning van 1,7 bar, waarbij een elliptisch contactoppervlak werd verondersteld met parabolische krachtverdeling met $\sigma_{\max} = 1,5 \times$ de bandenspanning, werd de door SoilFlex berekende krachtverdeling over het contactoppervlak opgenomen in Bijlage 5.

Indien naast de eerder aangehaalde parameters ook nog de cohesie, de interne wrijvingshoek, de 'schuifverplaatsing-coëfficiënt' en de 'wiel-slip' worden opgegeven, kunnen na keuze van de vorm van het contactoppervlak en de verdeling van de krachten over dit oppervlak op volledig analoge wijze ook de horizontale krachten aan het bodemoppervlak worden berekend.

Eenmaal de krachten aan het bodemoppervlak zijn gekend, kan nu in een volgende stap de propagatie van deze krachten doorheen het bodemcontinuüm worden berekend. De propagatie van de krachten doorheen de bodem is afhankelijk van de zogenaamde concentratiefactor. Deze concentratiefactor brengt in rekening dat de (verticale) krachten geconcentreerd worden rond de belastingsas, waardoor deze krachten tot op grotere diepte propageren naarmate de waarde van deze grootte toeneemt. Door Söhne (1953) werden waarden toegekend aan de concentratie-factor van 4,5 en 6 voor respectievelijk een harde (droge), gemiddelde (relatief droge) en zachte (natte bodem), waarbij hij dus aanneemt dat voor een meer plastische bodem de krachten dieper propageren. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 2-6.



Figuur 2-6 Berekende principale kracht-verdeling voor verschillende concentratiefactoren onder een puntbelasting P (Trautner, 2003 naar Söhne, 1958).

In een meer recente wetenschappelijke bijdrage (Koolen en Kuipers, 1983) worden echter waarden aangehaald van 3,4 en 5 voor respectievelijk een harde, normale en zachte bodem. Van den Akker verwijst in zijn SOCOMO-paper uitsluitend naar laatstgenoemde waarden. Wij opteerden eveneens om met deze waarden te werken.

Daar een lagere precompressiestress (structurele sterkte) gepaard gaat met een zwakkere bodem die meer gevoelig is voor verdichting, is er een verband tussen precompressiestress enerzijds en de concentratiefactor anderzijds: de concentratiefactor is groter naarmate de precompressiestress kleiner is. De concentratiefactor wordt echter niet alleen beïnvloed door bodemeigenschappen, ook de belastingsintensiteit speelt een rol. Dit komt duidelijk tot uitdrukking in Tabel 2-15 (Horn en Fleige, 2003), waarin de concentratiefactor werd bepaald in functie van de bodemtextuur en de precompressiestress, maar ook in functie van de contactdruk (-kracht) aan het bodemoppervlak en in functie van de equivalente radius, die gedefinieerd wordt als zijnde de straal van een cirkel die dezelfde oppervlakte heeft als de oppervlakte van het gemodelleerde contactoppervlak (in ons geval een elliptisch contactoppervlak).

Tabel 2-15 Gemiddelde waarden voor de concentratiefactor, afgeleid uit gemeten krachten in het veld voor de textuurklassen zand, leem en klei in afhankelijkheid van (1) de equivalente radius van het contactoppervlak van de band, (2) de precompressiestress (level 2 = 30- 60 kPa, level 3 = 60-90 kPa, level 4 = 90-120 kPa, level 5 = 120-150 kPa level 6 = >150 kPa) en (3) de effectieve contactdruk (bij $pF 2.5$) (Horn en Fleige, 2003).

Equivalent radius of the contact area (cm)	Contact pressure (kPa)	Precompression level for silt				Precompression level for loam				Precompression level for clay			
		2-3	4	5	6	2-3	4	5	6	2-3	4	5	6
<10	<100	4.1	3.7	2.1	2.0	3.8	3.3	3.1	2.8	4.0	3.7	2.9	2.8
	100-150	4.3	3.8	3.1	2.3	4.3	3.5	3.5	— ^a	4.7	4.0	3.3	2.8
	150-200	4.5	3.9	3.4	2.5	4.7	3.8	3.8	—	4.8	4.3	3.6	3.0
	>200	4.7	4.2	3.8	2.9	5.0	—	—	—	4.9	4.5	3.9	3.1
10-15	<100	3.4	3.3	2.6	—	3.7	3.1	2.7	2.7	4.1	3.6	2.8	2.7
	100-150	3.6	3.4	2.8	—	3.9	3.3	3.2	—	4.3	3.8	3.3	3.0
	150-200	3.7	3.5	2.9	2.8	4.3	3.5	—	—	4.5	3.9	3.6	—
	>200	3.9	3.7	—	—	4.8	3.8	—	—	4.8	4.4	3.8	—
15-20	<100	3.0	2.6	2.3	—	3.2	3.2	2.9	2.7	4.0	3.6	—	—
	100-150	3.3	2.7	2.4	—	3.5	3.3	3.0	—	4.2	3.7	—	—
	150-200	3.5	3.0	2.6	—	3.7	3.6	—	—	4.3	3.9	—	—
	>200	3.7	3.1	2.8	—	4.2	—	—	—	4.5	4.0	—	—
20-25	<100	2.5	2.3	2.1	—	3.0	2.9	2.7	2.6	3.7	3.5	3.0	2.8
	100-150	2.9	2.7	2.5	—	3.2	3.1	2.9	—	3.9	3.5	—	—
	150-200	3.4	3.0	2.7	—	3.7	3.5	—	—	4.0	3.5	—	—
	>200	3.6	3.3	2.9	—	3.9	—	—	—	4.1	3.6	—	—

^a Niet gedefinieerd daar deze combinatie niet of zeer zelden voorkomt onder natuurlijke omstandigheden

Uit Tabel 2-15 is duidelijk dat de precompressiestress de grootste invloed heeft op de waarde van de concentratiefactor. Het effect van textuur, van de effectieve contactdruk en van de equivalente radius is minder groot.

Voor de tractorband werd door SoilFlex bij de laagste wiellast en bandenspanning (2360 kg – 0,4 bar) een elliptisch contactoppervlak berekend van 0,59 m². Hieruit wordt een equivalente radius berekend van 43 cm ($5.900 \text{ cm}^2 = \pi \cdot r^2 \rightarrow r = 43 \text{ cm}$). Bij de hoogste belasting (5150 kg – 1,9 bar) werd voor de tractorband een equivalente radius berekend van 29 cm (elliptisch contactoppervlak = 0,27 m²)⁷. Voor de 'oogstmachineband' schommelt de equivalente radius tussen 41 cm (laagste wiellast) en 33 cm (hoogste wiellast). De equivalente radii van de door ons beschouwde banden liggen m.a.w. buiten het bereik van de equivalente radii uit bovenstaande tabel waarvoor een concentratiefactor werd afgeleid. Zodoende konden de concentratiefactoren uit Tabel 2-15 niet worden aangewend voor de verdere berekeningen. Er werd beslist om de concentratiefactor daarom alleen te laten variëren in functie van de precompressiestress, waarbij we op basis van de waarden voorgesteld door Koolen en Kuipers (1983) volgend verband gedefinieerd hebben:

⁷ De hoogste wiellast leidt tot de kleinste contactoppervlakte, hetgeen onlogisch lijkt. Wat men echter niet uit het oog mag verliezen is het feit dat de door de bandenfabrikant aangeraden bandenspanning evenredig toeneemt met de wiellast, zoals ook duidelijk uit Figuur 2-5. Enkel bij gelijke bandenspanning echter resulteert de hoogste wiellast in het grootste contactoppervlak. Ter illustratie volgende SoilFlex-berekeningen:

Wiellast = 2360 kg; Bandenspanning = 0,4 bar → Elliptisch contactoppervlak = 0,59 m²

Wiellast = 5150 kg; Bandenspanning = 0,4 bar → Elliptisch contactoppervlak = 0,92 m²

Wiellast = 2360 kg; Bandenspanning = 1,9 bar → Elliptisch contactoppervlak = 0,13 m²

Wiellast = 5150 kg; Bandenspanning = 1,9 bar → Elliptisch contactoppervlak = 0,27 m²

Tabel 2-16 *Beslissingsregel die voor de diverse klassen van precompressiestress de toe te passen concentratiefactor aangeeft.*

Precompressiestress (kPa)	Toe te passen concentratiefactor
> 150	3
120-150	3
90-120	4
60-90	5
30-60	5
< 30	5

Voor beide types banden werden voor 10 verschillende wiellasten en bijbehorende optimale bandenspanningen – zoals aangegeven in de respectievelijke tabellen in Figuur 2-5 voor een snelheid van 10 km/h – de verticale krachten aan het bodemoppervlak berekend, waarna de propagatie van deze krachten doorheen de bodem werd berekend, daarbij gebruik makend van een concentratiefactor van 3, 4 of 5. Op die manier konden de verticale krachten worden berekend op 40 cm diep⁸. In totaal gebeurden voor elk type band dus 30 SoilFlex-berekeningen (10 wiellasten x 3 concentratiefactoren). Zoals reeds eerder vermeld werd een elliptisch contactoppervlak verondersteld met parabolische krachtverdeling. Er is voor de SoilFlex-gebruiker echter keuze uit 2 parabolische verdelingen: bij de ene is $\sigma_{\max} = 1,5 \times$ de bandenspanning, bij de ander is $\sigma_{\max} = 2 \times$ de bandenspanning. Voor de 480/80R42-band werden beide verdelingen doorgerekend. Dichter bij het bodemoppervlak bleek de keuze van de verdeling zéker een invloed te hebben op de grootte van de verticale kracht. In de diepere bodemlagen daarentegen was er geen significant verschil meer, zoals blijkt uit Tabel 2-17 waarin de verticale krachten op 40 cm diep, berekend volgens beide verdelingen, zijn samengevat:

Tabel 2-17 *Verticale krachten (kPa) op 40 cm diep, berekend met SoilFlex voor de 480/80R42-band uit Figuur 2-5 voor 10 wiellasten (kg) bij de voor die wiellasten optimale bandenspanning (bar), waarbij een elliptisch contactoppervlak werd verondersteld met parabolische krachtverdeling. Boven: $\sigma_{\max} = 2 \times$ de bandenspanning; onder: $\sigma_{\max} = 1,5 \times$ de bandenspanning.*

	concentratiefactor	0,4 bar 2360 kg	0,6 bar 2710 kg	0,8 bar 3055 kg	1 bar 3400 kg	1,2 bar 3750 kg	1,4 bar 4125 kg	1,6 bar 4500 kg	1,7 bar 4715 kg	1,8 bar 4935 kg	1,9 bar 5150 kg
$\sigma_{\max} = 2 \times p_i$	3	31	43	53	63	72	81	90	95	100	105
	4	37	52	65	77	89	101	112	119	125	131
	5	42	59	75	89	104	118	132	139	146	153
$\sigma_{\max} = 1,5 \times p_i$	3	28	40	50	59	68	77	86	91	96	100
	4	33	48	60	72	84	95	106	112	118	124
	5	37	54	69	83	97	110	123	130	137	144

⁸ A.d.h.v. de SoilFlex Uniaxial-software werd de krachtenpropagatie berekend voor de bovenste 50 cm van het bodemprofiel, met een interval van 2 cm: voor 2 cm, 4 cm, 6 cm, ..., 40 cm, 42 cm, ..., 46 cm, 48 cm, 50 cm werden de verticale krachten berekend op de desbetreffende dieptes. Om te kunnen vergelijken met de structurele sterkte op 41 cm diepte, werd gekeken naar de krachten op 40 cm diepte. Idealiter zou er vergeleken moeten worden met de krachten op 41 cm, maar deze zijn niet beschikbaar vanwege het 2 cm-interval. Doch, er bleek geen significant verschil te bestaan tussen de krachten op 41 of 40 cm.

Volgens een vuistregel van Koolen en Kuipers (1983) is de gemiddelde normaalspanning aan het contactoppervlak gelijk aan 1,2 maal de bandenspanning. Daarom werd beslist om verder te werken met de krachten berekend via de verdeling waarbij $\sigma_{\max} = 1,5 \times$ de bandenspanning. Voor de 800/65R32-band met zulke verdeling aan zijn contactoppervlak zijn de verticale krachten op 40 cm diep, berekend via SoilFlex, devolgende (Tabel 2-18):

Tabel 2-18 Verticale krachten (kPa) op 40 cm diep, berekend met SoilFlex voor de 800/65R32-band uit Figuur 2-5 voor 10 wiellasten (kg) bij de voor die wiellasten optimale bandenspanning (bar), waarbij een elliptisch contactoppervlak werd verondersteld met parabolische krachtverdeling waarbij $\sigma_{\max} = 1,5 \times$ de bandenspanning.

concentratiefactor	1 bar 5250 kg	1,2 bar 6015 kg	1,4 bar 6775 kg	1,6 bar 7540 kg	1,8 bar 7885 kg	2 bar 8235 kg	2,2 bar 8580 kg	2,4 bar 8930 kg	2,6 bar 9275 kg	2,7 bar 9450 kg
3	79	93	106	119	129	138	147	155	164	168
4	94	110	127	143	155	167	178	189	199	204
5	105	124	143	161	176	190	203	216	228	235

Zoals reeds eerder aangehaald, kunnen met de Uniaxial-versie van SoilFlex evengoed horizontale krachten worden berekend. Deze bleken echter een zeer minieme invloed te hebben op de propagatie van de verticale krachten: de verticale kracht op 40 cm berekend zonder inachtneming van horizontale krachten bleek niet significant verschillend van de verticale kracht op 40 cm berekend mét inachtneming van horizontale krachten. Ter illustratie: voor de 800/65R-32 band werd bij een wiellast van 5250 kg en een bijbehorende optimale bandenspanning van 1 bar op 40 cm diepte voor een concentratiefactor gelijk aan 3 een verticale kracht berekend, zonder inachtneming van horizontale krachten, van 79 kPa (cfr. Tabel 2-18); wanneer men een zandbodem veronderstelt met een cohesie van 14 kPa, een interne wrijvingshoek van 37° , een schuifverplaatsing-coëfficiënt van 5 cm en 10% wielslip kunnen naast de verticale krachten eveneens de horizontale krachten worden berekend: op 40 cm bedraagt de verticale kracht nu 82 i.p.v. 79 kPa, waarbij de 3kPa verschil te wijten is aan de invloed van tractie op de propagatie van de verticale krachten doorheen de bodem. Voor dezelfde band, een concentratiefactor van 5, een wiellast van 9450 kg en een bandenspanning van 2,7 bar bedraagt de verticale kracht op 40 cm diep, zonder inachtneming van tractie, 235 kPa; wanneer men een cohesie veronderstelt van 60 kPa, een interne wrijvingshoek van 48° (typisch voor een kleigrond met meer dan 35 gewichts% klei) een schuifverplaatsing-coëfficiënt van 5 cm en 10% wielslip, bedraagt de verticale kracht, op dezelfde diepte beschouwd, 236 kPa.

Schematisch kunnen we de berekeningen met SoilFlex voortstellen volgens de flow-chart weergegeven in volgende figuur:



Figuur 2-7 Schematische weergave van de berekeningen in SoilFlex

2.4.6 Ontwikkeling en bespreking van de risicokaarten

In de eerder gepresenteerde gevoeligheidskaarten bij pF 1,8 en pF 2,5 werd voor elke kaarteenheden de precompressiestress (of structurele sterkte) berekend. Afhankelijk van de berekende waarde van de precompressiestress kan nu de toe te passen concentratiefactor worden bepaald via de beslissingsregel uit Tabel 2-16. Vervolgens kunnen de verticale krachten op 40 cm diep via Tabel 2-17 en Tabel 2-18 (voor respectievelijk de tractorband en 'oogstmachineband'), worden gekoppeld aan de kaarteenheden. Daardoor kan de structurele sterkte van de bodem op 41 cm (in kPa) vergeleken worden met de verticale krachten op 40 cm (eveneens in kPa), en dit voor 10 verschillende configuraties van wiellast en bandenspanning. Door 10 maal het verschil te maken tussen de berekende PCS en de berekende verticale krachten, kan dan de grensbelasting (wiellast x bandenspanning) worden bepaald die mag uitgeoefend worden om de PCS uit de gevoeligheidskaart (geldig voor een diepte van 41 cm) niet te overschrijden. Het plotten van deze grensbelasting die geen verdichting veroorzaakt geeft aanleiding tot een risicokaart. Figuur 6-5 in Bijlage 6 geeft de risicokaart weer voor de tractorband bij pF 2,5. Figuur 6-6 geeft de risicokaart weer voor dezelfde band, maar bij pF 1,8. In Figuur 6-8 en Figuur 6-9 tenslotte zijn de risicokaarten afgebeeld voor de 'oogstmachineband', respectievelijk bij pF 2,5 en pF 1,8.

De oppervlaktestatistieken voor de risicokaarten van de tractorband en oogstmachineband zijn weergegeven in respectievelijk Tabel 2-19 en Tabel 2-20

Tabel 2-19 Oppervlakte-aandeel van de 'belastingsklassen' (wiellast in ton x bandenspanning in bar) bij de risicokaarten voor een 480/80R42-tractorband opgesteld bij pF 2,5 of pF 1,8 (Figuur 6-5, resp. Figuur 6-6).

BELASTINGSKLASSE	pF 2.5	pF 1.8
	OPP.-AANDEEL (%)	
niet belastbaar	3.4	10.6
0,4 bar / 2360 kg	1.8	12.8
0,6 bar / 2710 kg	2.6	17.5
0,8 bar / 3055 kg	2.9	10.3
1 bar / 3400 kg	7.5	3.1
1,2 bar / 3750 kg	7.0	6.6
1,4 bar / 4125 kg	17.0	17.5
1,6 bar / 4500 kg	6.5	2.9
1,7 bar / 4715 kg	7.5	5.1
1,8 bar / 4935 kg	1.4	1.1
1,9 bar / 5150 kg	42.5	12.6

Tabel 2-20 Oppervlakte-aandeel van de 'belastingsklassen' (wiellast in ton x bandenspanning in bar) bij de risicokaarten voor een 800/65R32-oogstmachineband opgesteld bij pF 2,5 of pF 1,8 (Figuur 6-8, resp. Figuur 6-9).

BELASTINGSKLASSE	pF 2.5	pF 1.8
	OPP.-AANDEEL (%)	
niet belastbaar	24.8	58.5
1 bar / 5250 kg	20.0	21.2
1,2 bar / 6015 kg	12.7	7.8
1,4 bar / 6775 kg	0	0
1,6 bar / 7540 kg	2.8	2.7
1,8 bar / 7885 kg	3.2	3.7

2 bar / 8235 kg	1.3	3.8
2,2 bar / 8580 kg	1.3	0.6
2,4 bar / 8930 kg	3.0	0.1
2,6 bar / 9275 kg	1.0	0
2,7 bar / 9450 kg	30.0	1.7

De risicokaart voor de oogstmachine-band bij pF 1,8 (Figuur 6-9) is hoogst opmerkelijk. In verschillende regio's in Vlaanderen (oppervlakte-aandeel van 59%!) leidt elk gebruik van deze band tot overschrijding van de structurele sterkte. Zelfs bij de kleinst mogelijke wiellast voor deze band treedt verdichting op op 41 cm diepte (cfr. de lichte zandleemstreek en de leemstreek ten oosten van het Brussels Gewest). In de rest van Vlaanderen kunnen alleen lagere wiellasten worden toegepast.

Voor de beide types banden werd ook een 'hybride-risicokaart' gemaakt, op volledig analoge wijze als voor de gevoeligheidskaart. Voor de tractorband is deze hybride-kaart weergegeven in Figuur 6-7, voor de oogstmachineband in Figuur 6-10.

2.4.7 Lage druk-banden

Indien lage druk-banden worden aangewend, neemt het risico op verdichting af via een afname van de verticale normaalspanningen in de ondergrond. Lage druk-banden zijn typisch banden die kunnen aangewend worden bij drukken lager dan 1 bar, zonder dat deze lage drukken tot een versnelde slijtage van de band zouden leiden. De lage drukken zorgen voor een groter contactoppervlak tussen band en bodem, zodanig dat de uitgeoefende druk per oppervlakte-eenheid lager is, wat leidt tot lagere contactkrachten. Voor een 800/65R32 lage druk-band uit de MACHXBIB-serie van Michelin (breedte = 798 mm, diameter = 1,838 m) werden voor 10 wiellasten en bijhorende optimale bandenspanningen, zoals gespecificeerd in de technische fiche bij de band, de verticale normaalspanningen berekend op 40 cm diep a.d.h.v. SoilFlex Uniaxial (elliptisch contactoppervlak verondersteld + parabolische krachtverdeling met $\sigma_{\max} = 1,5 \times$ bandenspanning). De resultaten van de SoilFlex-berekeningen werden opgenomen in Tabel 2-21.

Tabel 2-21 Verticale krachten (kPa) op 40 cm diep, berekend met SoilFlex voor een lage druk 800/65R32-band, voor 10 wiellasten (kg) bij de voor die wiellasten optimale bandenspanning (bar), waarbij een elliptisch contactoppervlak werd verondersteld met parabolische krachtverdeling waarbij $\sigma_{\max} = 1,5 \times$ de bandenspanning.

concentratiefactor	0,4 bar 3880 kg	0,6 bar 5330 kg	0,8 bar 5900 kg	1 bar 6470 kg	1,1 bar 6755 kg	1,2 bar 7040 kg	1,3 bar 7325 kg	1,4 bar 7610 kg	1,5 bar 7895 kg	1,6 bar 8180 kg
3	39	57	72	86	93	100	106	112	118	125
4	44	66	84	101	110	118	125	133	141	148
5	48	72	93	112	122	131	140	149	158	167

Vergelijking van Tabel 2-21 met Tabel 2-18, waarin de verticale krachten op 40 cm diep voor een normale 800/65R32-band zijn samengevat, maakt duidelijk dat voor een vergelijkbare wiellast voor de lage druk-band een lagere optimale druk wordt gespecificeerd i.v.m de normale band. De lagere druk leidt bij eenzelfde wiellast tot lagere contactkrachten aan het bodemoppervlak, waardoor ook op 40 cm de verticale normaalspanningen lager zijn.

3 VELDVALIDATIE EN TOETSING IN KENNISCIRKELS (WP3)

De doelstellingen van werkpakket 3 van het project zijn om (1) een validatie uit te voeren van de opgestelde gevoeligheidskaarten, en (2) een toetsing in kenniscirkels uit te voeren a.d.h.v. de verkregen resultaten. Een toetsing in kenniscirkels werd reeds uitgevoerd in september 2008 op basis van de literatuurstudie uit hoofdstuk 1. Het terreinwerk voor de veldvalidatie heeft plaatsgehad in het vroege voorjaar van 2009, wanneer de bodems op veldcapaciteit waren en de velden makkelijk toegankelijk omdat de gewassen zich nog in een initieel groeistadium bevonden of omdat er nog niet was gezaaid of geplant.

3.1 Veldvalidatie

De gevoeligheidskaarten voor bodemverdichting in Vlaanderen uit hoofdstuk 2 werden afgeleid van bestaande informatie van de bodemkaart en de databank 'Aardewerk-BIS'. Uit de literatuurstudie bleek dat de gevoeligheid voor verdichting kan voorspeld worden a.d.h.v. de precompressiestress (PCS) die berekend wordt op basis van pedotransferfuncties (PTF's) gebaseerd op intrinsieke bodemeigenschappen. Een aantal van die eigenschappen kunnen gemeten worden. In de veldvalidatie zullen we in de eerste plaats nagaan in hoeverre de verschillen in PCS zoals voorspeld uit de gevoeligheidskaart(en) overeenkomen met de PCS gemeten op stalen van een representatieve set van bodems, waarvoor een uiteenlopende PCS werd voorspeld (validatie 1). Deze eerste validatie bestaat uit 3 subvalidaties: een validatie van de inputparameters van de PTF's voor PCS (validatie 1a), een validatie van de PTF's (pF 1.8) zelf (validatie 1b) en tenslotte een validatie van de kaart (pF 1.8) (validatie 1c). Voor dezelfde set van bodems werd ook de actuele verdichtingstoestand nagegaan (validatie 2).

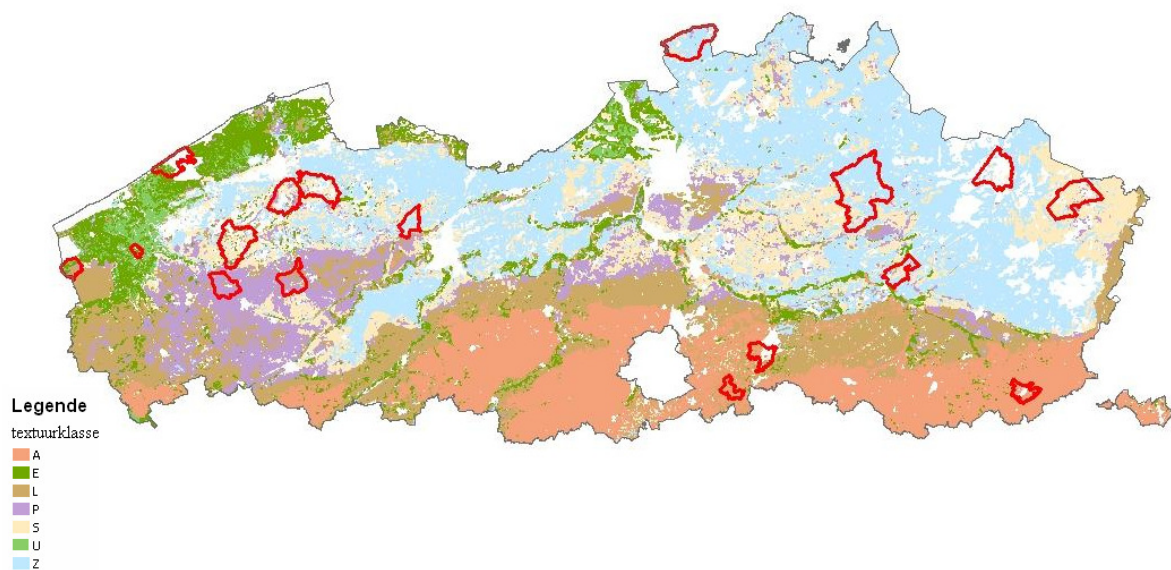
3.1.1 Methode

Van 17 velden met uiteenlopende textuur (gaande van zand tot zware klei) werden stalen genomen onder de bouwvoor (41 cm diepte), en werden hierop textuur, %C, volumedichtheid en PCS bepaald. De voorspelling van de PCS voor een bepaald bodemtype bestaat in wezen uit twee stappen: eerst worden voor een kaarteenheden de typische textuur en het koolstofgehalte van de bodemlaag onder de bouwvoor (op 41 cm) geschat met behulp van de databank 'Aardewerk-BIS'. Vervolgens wordt met een set van pedotransferfuncties de PCS van die typische bodemlaag geschat. Ter validatie van stap 1 zijn we nagegaan in hoeverre de via Aardewerk-BIS voorspelde textuur, koolstofgehalte en volumegewicht (berekend uit het koolstofgehalte) op de beschouwde diepte van de kaarteenheden waarbinnen de landbouwpercelen gesitueerd zijn, representatief zijn voor de gemeten textuur, %C en bd op de op het terrein verzamelde grondstalen (validatie 1a). Ter validatie van stap 2 zijn we nagaan in hoeverre de PCS correct voorspeld wordt uit textuur, %C en bd met de pedotransferfuncties gebruikt voor de ontwikkeling van de gevoeligheidskaart, door de gemeten waarden in te vullen in de PTF's en de verkregen (voorspelde) PCS-waarden te vergelijken met de gemeten PCS-waarden op onverstoorde grondstalen verzameld tijdens de veldcampagne (validatie 1b). Tenslotte valideren we de gevoeligheidskaart door de gemeten PCS-waarden voor de bezochte percelen te vergelijken met de door de gevoeligheidskaart (pF 1.8) voorspelde PCS-waarden voor de overeenkomstige kaarteenheden.

Daarnaast zijn we ook nagegaan of we ook effectief verdichtingen kunnen vaststellen in bepaalde zones in het veld (bv. de kopakker of natte zones in het veld) (validatie 2). Dergelijke zones geven immers aan welke verdichting optreedt bij te vaak betreden van het veld (kopakker) of bij het bewerken in ongunstige omstandigheden (natte plekken in het veld). Daartoe werden op de velden waarop ook validatie 1 werd uitgevoerd met de penetrometer variaties in verdichting gekwantificeerd, en werd de volumedichtheid gemeten en vergeleken tussen verdichte en niet-verdichte zones. De verkenning met de penetrometer laat meteen ook toe om te beslissen waar de stalen voor validatie 1 best genomen worden (representativiteit).

3.1.2 Praktische uitvoering

De metingen werden uitgevoerd op 17 landbouwpercelen met uiteenlopende textuur, gaande van zand tot zware klei. Deze percelen werden gekozen uit percelen waarop reeds eerder textuurbepalingen van de bouwvoor gebeurden, en waarvoor vroeger reeds contacten werden gelegd met de bedrijfsleider in het kader van een lopend IWT-project. Bij de veldbezoeken werden volgende gemeenten aangedaan: Heverlee, Huldenberg, Schaffen, Geel, Essen, Tongeren, Bree, Overpelt, Lovendegem, Torhout, Oedelem, Oostkamp, Oostende, Oostkerke, Houtem, Pittem en Hoogdele. De locatie van deze gemeenten is aangegeven in Figuur 3-1, waarin deze gemeenten werden afgebeeld op de textuurkaart van de diepere ondergrond (41 cm) in Vlaanderen.



Figuur 3-1 Locatie van de bezochte gemeenten en textuur van de diepere ondergrond (41 cm), zoals afgeleid uit Aardewerk.

Op elk perceel werd telkens hetzelfde protocol gevolgd:

1. Uitzetten van een transect (15 punten), waarbij beide kopakkers en eventuele natte zones worden doorsneden (punt 1 en 15 zijn telkens kopakker).
2. Bepalen van de X- en Y-coördinaten van de 15 punten langsheen het transect + hoekpunten van het perceel via GPS.
3. Registreren van de penetratieweerstand (0-80 cm diep) voor de 15 punten langsheen het transect. Op elke locatie wordt telkens 6 maal gemeten: 3 metingen gebeurden met de penetrologger, de overige 3 gebeurden met een penetrograaf. Voor beide toestellen werd een conus gebruikt van 1,0 cm²; 60°. De penetrologgermetingen gebeurden aan een constante snelheid van 2,0 cm/s.

4. Op 6 van de 15 transect-punten werden telkens 2 grondmonster-ringen (= Kopecky-ringen; volume = 100 cm³, inwendige diameter = 50 mm, hoogte = 51 mm) gestoken ter bepaling van de volumedichtheid, %C en textuur. De ringen werden genomen op een diepte van 41 cm, de diepte waarop de PCS werd geschat voor de gevoeligheidskaart. De 6 staalname-plaatsen werden gespreid over de verdichte zones en niet-verdichte zones langsheen het transect. Indien zones met afwijkende textuur geïdentificeerd werden, werden hiervoor bijkomende staalname-plaatsen voorzien.
5. Op 1 (of bij textuurvariatie op 2) plaats(en) die representatief is/zijn voor de niet-verdichte zone en 1 op de kopakker (bij textuurvariatie op 2) werd een ongestoord grondmonster genomen ter bepaling van de precompressiestress (41 cm diepte) in het labo. Daartoe werd een PVC-ring gebruikt van 8 cm hoogte en 11 cm diameter, voorzien van een metalen steek-stuk, die verticaal in de grond werd gedreven.



Figuur 3-2 Staalnamemethodiek PCS-stalen

In het laboratorium werden volgende standaardanalyses uitgevoerd:

- 1) Op de Kopecky-stalen werd het drooggewicht bepaald voor bepaling van de volumedichtheid.
- 2) Op dezelfde stalen werden %zand, %leem, en %klei bepaald via de pipetmethode.
- 3) Nog steeds op dezelfde Kopecky-stalen werd %C bepaald met een Variomax C-N Analyzer (Pro-Tech, Coolum Beach, QLD, Australia; based on dry combustion following the Dumas principle). De Variomax C-N Analyzer meet de totale C, die werd gelijkgesteld aan de organische C. Eerdere metingen op dezelfde percelen in 2005 wezen immers uit dat de hoeveelheid anorganische C verwaarloosbaar is i.v.m. de hoeveelheid organische C.

De onverstoorde grondmonsters voor bepaling van de structurele sterkte werden na aankomst in het labo onmiddellijk in een waterbak gezet ter verzadiging. Een week later werden ze overgebracht naar een zandbak, waar een vochtspanning van 63 cm (pF 1.8) werd aangelegd. Na een week zijn de stalen in evenwicht en werden ze overgebracht naar het Departement Burgerlijke Bouwkunde van de K.U.Leuven, waar de uniaxiale compactieproef werd uitgevoerd. De oedometertest werd uitgevoerd op ongeroerde grondmonsters (ringstaal) met een diameter van 63 mm en een hoogte van 20 mm. Daartoe werd een deelstaal gestoken uit de grotere ongeroerde grondmonsters in de PVC-cilinders, net in het midden van de cilinder waardoorheen het 41 cm-dieptevlak loopt.

De oedometertest werd uitgevoerd door toepassing van ASTM D2435-80 ("Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils") evenwel met de volgende aanpassingen die gebruikelijk zijn bij bodemverdichtingsonderzoek in de landbouw: (1) het staal wordt niet verzadigd zoals gebruikelijk bij een klassieke consolidatieproef, (2) de spanningen die aangelegd worden bedragen 12,5, 25, 50, 75, 100, 200, 400, 800 en 1600 kPa, en (3) de druk wordt reeds verhoogd na ca. 30 minuten in plaats van de gebruikelijke 24 uur. De bekomen resultaten werden uitgezet in een last-zakkingsdiagramma waarin voor

elke spanningsstap de relatieve verandering in lengte ($\Delta L/L$) van het ringstaal werd uitgezet in functie van het 10-delig logaritme van de aangelegde spanning σ ($\log(kPa)$). Uit deze relatie werd de precompressiestress grafisch afgeleid via de methode van Casagrande. In de recente literatuur (cfr. Baumgartl en Köck, 2004, Keller, 2004, Cavalieri *et al.*, 2008) wordt de zakking vaak uitgedrukt via het poriëngetal e (verhouding volume poriën : volume vaste fase) i.p.v. via de relatieve verandering in lengte. Aangezien het doel van de eerste validatie erin bestaat de PTF's voor PCS van Lebert en Horn te valideren, dienen we echter dezelfde methodiek toe te passen als degene gevolgd door beide auteurs bij de afleiding van deze PTF's. Lebert en Horn drukten de zakking uit via de relatieve verandering in lengte van het staal (cfr. Lebert, 1989) en daarom hebben wij hetzelfde gedaan, hoewel dit enigszins afwijkt van wat gangbaar is in het bodemverdichtingszoek anno 2009.

3.1.3 Validatie inputparameters PTF's (validatie 1a)

In een eerste stap worden de waarden voor de inputparameters van de PTF's voor PCS, zoals gemeten op de grondstalen verzameld tijdens de veldcampagne, vergeleken met de waarden voorspeld via Aardewerk-BIS voor de overeenkomstige kaartenheden van de bezochte velden. In Tabel 3-1 is een vergelijkend overzicht weergegeven.

Tabel 3-1 Vergelijking van de gemeten waarden voor de inputparameters van de PTF's met de waarden voorspeld door Aardewerk-BIS voor de overeenkomstige kaartenheden van de bezochte velden. De textuurfracties (%zand, %leem en %klei), alsook het koolstofgehalte (%C) werden rechtstreeks afgeleid uit Aardewerk-BIS. Het volumegewicht (bd) bepaald via BIS werd onrechtstreeks afgeleid a.d.h.v. de voor België gecalibreerde Rawls-PTF en het in BIS beschikbare koolstofpercentage. Er werd voor elke locatie aangegeven met welk niveau van BIS (1,2 of 3) de overeenkomstige kaartenheid werd gekoppeld. Indien er koppeling mogelijk is op meer dan 1 niveau, wordt gekoppeld met het meest gedetailleerde niveau (1 meer gedetailleerd dan 2 en 2 meer dan 3). De locatie bestaat uit de naam van de gemeente waar het perceel is gesitueerd, gevolgd door het nummer van het transectpunt (nr. 1 en 15 zijn kopakker).

	Gemeten						Aardewerk-BIS						
	%zand	%leem	%klei	%C	bd (g/cm ³)	textuur	%zand	%leem	%klei	%C	bd (g/cm ³)	textuur	niveau
Huldenberg 15	10	78	13	1.13	1.501	A	7	73	21	0.20	1.279	A	NIV1
Huldenberg 7	4	80	16	0.20	1.560	A	19	67	14	0.30	1.268	L	NIV1
Schafften 15	84	9	7	1.46	1.617	Z	80	16	4	0.30	1.504	S	NIV2
Schafften 11	87	8	6	0.42	1.658	Z	80	16	4	0.30	1.504	S	NIV2
Geel 1	58	35	6	0.85	1.610	P	59	30	11	0.10	1.397	P	NIV3
Geel 6	61	33	6	0.91	1.559	P	59	30	11	0.10	1.397	P	NIV3
Heverlee 1	6	71	23	0.34	1.605	A	8	78	14	0.40	1.258	A	NIV1
Heverlee 5	7	72	21	0.41	1.622	A	5	74	21	0.20	1.279	A	NIV1
Lovendegem 1	63	27	10	1.35	1.591	P	34	49	17	0.30	1.268	L	NIV3
Lovendegem 5	60	27	13	0.51	1.752	L	34	49	17	0.30	1.268	L	NIV3
Lovendegem12	74	16	10	1.11	meting mislukt	S	68	24	8	0.20	1.519	S	NIV3
Lovendegem15	93	5	3	0.16	1.644	Z	68	24	8	0.20	1.519	S	NIV2
Essen 1	87	9	4	1.76	1.544	Z	87	12	2	0.20	1.519	Z	NIV1
Essen 4	88	8	4	1.89	1.477	Z	87	12	2	0.20	1.519	Z	NIV1
Oostkamp 1	86	11	3	0.48	1.657	Z	/	/	/	/	/	/	/
Oostkamp 4	75	20	5	0.56	1.607	S	/	/	/	/	/	/	/
Oedelem 15	92	5	3	0.38	1.570	Z	/	/	/	/	/	/	/
Oedelem 13	81	14	5	1.07	1.591	S	/	/	/	/	/	/	/
Houtem 1	54	29	17	0.59	1.827	L	18	62	20	0.20	1.385	E	NIV3
Houtem 4	47	34	19	0.45	1.633	E	30	39	32	0.40	1.360	E	NIV1
Oosterkerke 15	4	40	56	1.51	1.427	U	7	45	47	0.50	1.294	U	NIV1

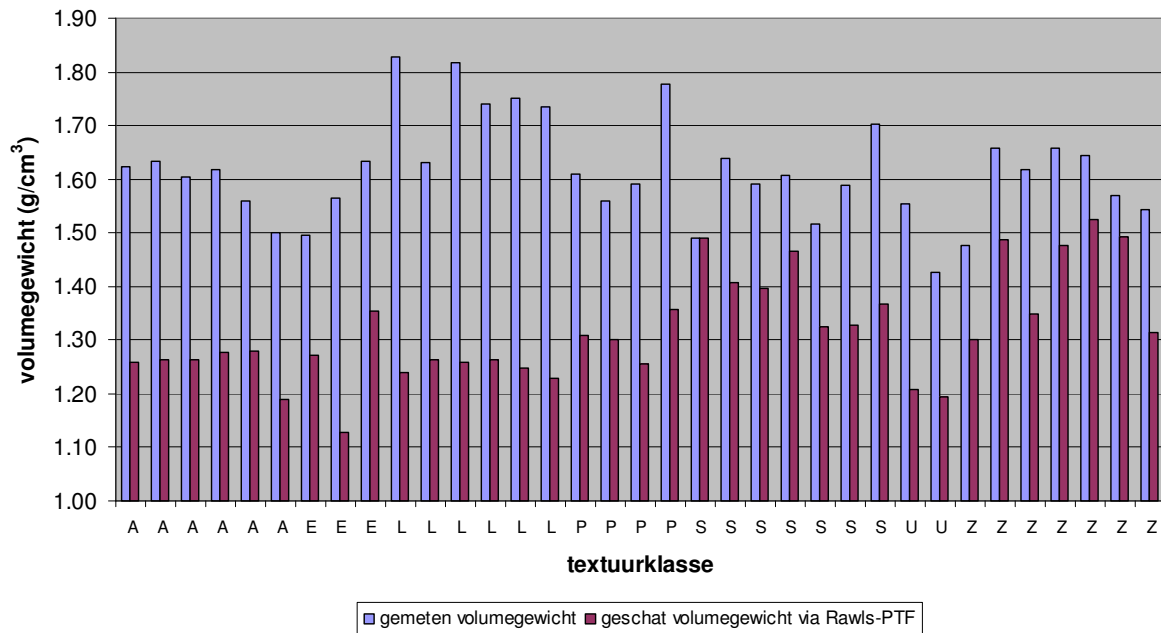
Oosterkerke 9	49	26	24	2.75	1.563	E	32	39	29	0.60	1.337	E	NIV1
Oostende 1	33	33	34	1.19	1.495	E	25	42	33	0.40	1.360	E	NIV1
Oostende 4	33	27	39	1.35	1.553	U	25	42	33	0.40	1.360	E	NIV1
Tongeren 1	6	71	23	0.34	1.634	A	4	75	20	0.30	1.268	A	NIV1
Tongeren 4	14	63	23	0.22	1.618	A	4	75	20	0.30	1.268	A	NIV1
Torhout 1	65	21	14	0.36	1.632	L	76	16	8	1.60	1.332	S	NIV3
Torhout 4	71	23	6	0.40	1.490	S	76	16	8	1.60	1.332	S	NIV3
Bree1	77	18	5	1.31	1.702	S	77	19	5	1.30	1.368	S	NIV2
Bree4	78	17	5	0.98	1.640	S	/	/	/	/	/	/	/
Overpelt1	79	15	5	1.66	1.517	S	/	/	/	/	/	/	/
Overpelt4	76	13	11	1.64	1.589	S	/	/	/	/	/	/	/
Hooglede 1	50	36	14	0.39	1.817	L	63	31	7	0.20	1.385	P	NIV1
Hooglede 4	54	35	12	0.42	1.779	P	63	31	7	0.20	1.385	P	NIV1
Pittem 1	44	47	9	0.70	1.736	L	30	58	12	0.20	1.279	L	NIV1
Pittem 4	44	44	12	0.36	1.741	L	30	58	12	0.20	1.279	L	NIV1

Zoals duidelijk moge zijn uit Tabel 3-1 zijn sommige staalnamelocaties gesitueerd binnen kaarteenheden die niet konden gekoppeld worden met Aardewerk-BIS. Zo vielen de bezochte percelen te Oedelem, Oostkamp en Overpelt volledig binnen zulk een niet-gekoppelde kaarteenheid. Ook transectpunt nr. 4 van het bezochte veld te Bree valt in een ongedekte kaarteenheid.

Eén en hetzelfde veld kan meerdere kaarteenheden beslaan, waardoor voor verschillende delen van het veld een verschillende PCS zal worden berekend vanwege verschillen in de inputvariabelen van de PTF. Een voorbeeld in dit verband in Lovendegem, waarbij het transect door 3 kaarteenheden loopt: transectpunten 1 en 5 vallen binnen een kaarteenheid met textuurklasse 'L' (zandleem); transectpunten 12 en 15 vallen elk binnen een kaarteenheid met textuurklasse 'S' (lemig zand).

Vergelijking van de gemeten en voorspelde textuur maakt duidelijk dat er over het algemeen een goede overeenkomst is, zeker op niveau 1. Voor het %C daarentegen worden doorgaans hogere waarden gemeten op 41 cm diepte dan we zouden vermoeden afgaande op de info uit Aardewerk-BIS. Hetzelfde geldt voor het volumegewicht, waar de gemeten bd-waarden (op één uitzondering na) systematisch groter zijn dan de berekende bd-waarden, berekend a.d.h.v. het %C, afgeleid uit Aardewerk, en de voor België gecalibreerde Rawls-PTF.

Door het in dit WP gemeten koolstofgehalte in te vullen in de Rawls-PTF, het volumegewicht te berekenen en deze te vergelijken met het gemeten volumegewicht kan de performantie van de Rawls-PTF worden bepaald. Vergelijking van het via Rawls geschatte volumegewicht en het werkelijk gemeten volumegewicht toont duidelijk aan dat Rawls het werkelijke volumegewicht consequent onderschat, hetgeen duidelijk moge zijn uit Figuur 3-3. Hiermee zullen we rekening moeten houden bij de validatie van de kaart (validatie 1c).

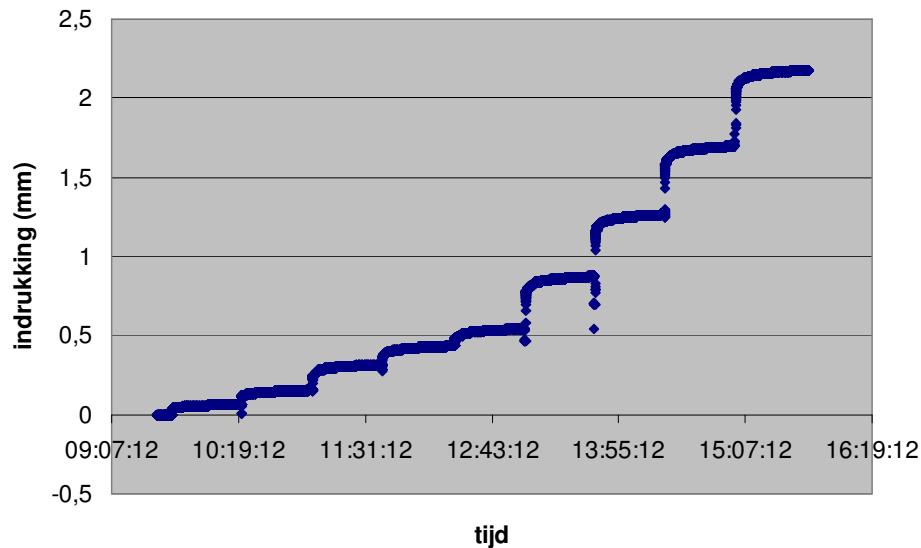


Figuur 3-3 Vergelijking van het werkelijke, gemeten volumegewicht met het geschatte volumegewicht berekend a.d.h.v. het gemeten koolstofpercentage en de voor België gecalibreerde Rawls-PTF voor de staalnamelocaties uit Tabel 3-1, gerangschikt per textuurklasse.

3.1.4 Validatie PTF's (validatie 1b)

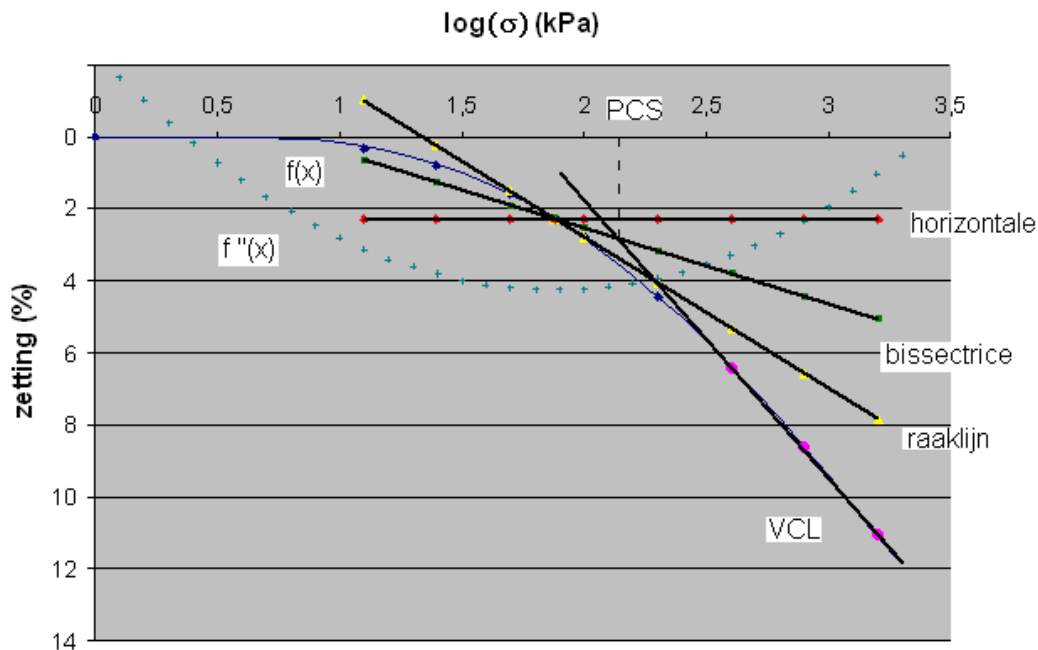
In een volgende stap van de validatie worden de PTF's voor PCS gevalideerd. Hiertoe wordt een set van berekende PCS-waarden –berekend a.d.h.v. de PTF's voor PCS en de gemeten waarden voor textuur, %C en bd– vergeleken met een set van gemeten PCS-waarden. De PCS-metingen gebeurden a.d.h.v. een uniaxiale compactieproef op onverstoord grondmonsters, genomen op dezelfde staalnamelocaties (en diepte) als waar de Kopeckystalen ter bepaling van textuur, %C en bd werden verzameld.

In de uniaxiale compactieproef (oedometerproef) wordt het ringstaal onderworpen aan een reeks sequentiële belastingen (12,5, 25, 50, 75, 100, 200, 400, 800 en 1600 kPa), waarbij de tussentijd tussen 2 drukstappen ca. 30 minuten bedraagt. Na elke drukstap zal de grond van het ringstaal steeds verder ingedrukt ('gecompacteerd') worden. Voor het oedometerstaal Pittem 1A (= één van de twee stalen die op de kopakker van het bezochte veld in Pittem werden verzameld), verloopt deze indrukking, die om de seconde via een LVDT wordt geregistreerd, zoals weergegeven in Figuur 3-4.



Figuur 3-4 Indrukking van het oedometerstaal 'Pittem 1A' i.f.v. de tijd tijdens de uniaxiale compactieproef. Aangelegde belastingen om resp. 9:41:33, 10:21:01, 11:01:11, 11:41:04, 12:21:49, 13:02:08, 13:41:44, 14:21:23, 15:01:32 : 12,5, 25, 50, 75, 100, 200, 400, 800 en 1600 kPa.

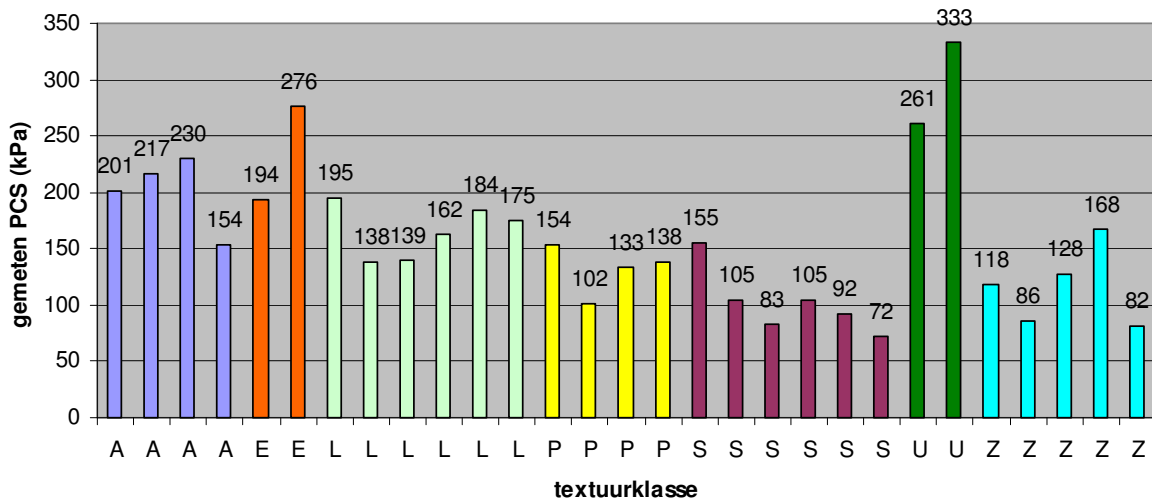
Uit bovenstaande figuur kan vervolgens een last-zakkingsdiagram worden gegenereerd, waarbij op de X-as het 10-delig logaritmische van de aangelegde spanningen (in kPa) wordt afgebeeld en op de Y-as de zetting die wordt berekend als de relatieve verandering in lengte ($\Delta L/L$) van het ringstaal (in %), waarbij L = de hoogte van het staal (ca. 20 mm) en ΔL = de indrukking die wordt geregistreerd na het opleggen van een nieuwe belasting. ΔL wordt berekend door de waarden voor indrukking te middelen over de laatste 30 seconden vóór het opvoeren van de belasting en van dit getal de waarde af te trekken die wordt verkregen door het middelen, eveneens over een tijdsspanne van 30 seconden, van de door de LVDT geregistreerde waarden vóór het opleggen van de allereerste belasting (12,5 kPa). Aangezien in de oedometerproef 9 belastingen werden opgelegd, zullen er uiteindelijk 9 punten worden afgebeeld in het resulterende last-zakkingsdiagram. We hebben echter nog een bijkomend punt toegevoegd, met name het punt (0,0), in de veronderstelling dat bij een belasting van 1 kPa ($\log 1 = 0$) er geen indrukking optreedt. Aldus worden er in ons last-zakkingsdiagram uiteindelijk 10 punten weergegeven. Door deze punten werd vervolgens een vierdegraads-polynoom gefit met Excel, waarbij we de randvoorwaarde oplegden dat $y = f(x) > 0$ moet zijn. In een volgende stap kan dan de precompressiestress worden afgeleid via de methode van Casagrande. Deze methode bestaat erin om eerst het punt van maximale buiging te vinden (hetgeen gevonden wordt door het maximaliseren van de tweede afgeleide), hierdoor een horizontale te tekenen én een raaklijn aan de gefitte 4^{de}-graads polynoom, de bissectrice tussen de raaklijn en horizontale te tekenen, en het snijpunt van deze bissectrice te bepalen met de Virgin Compression Line, die wordt gevonden door een tweede raaklijn te fitten aan het lineaire stuk van de gefitte polynoom. De Casagrande-procedure werd volledig geïmplementeerd in Excel en is weergegeven in Figuur 3-5 voor het oedometerstaal uit Figuur 3-4.



Figuur 3-5 Toepassing van de methode van Casagrande voor de bepaling van de PCS van het oedometerstaal 'Pittem 1A'.

In bovenstaand voorbeeld werd berekend dat de x-coördinaat van het snijpunt 2,142 bedraagt. Door de inverse van het 10-delig logaritme te nemen wordt dan uiteindelijk de PCS gevonden: 139 kPa.

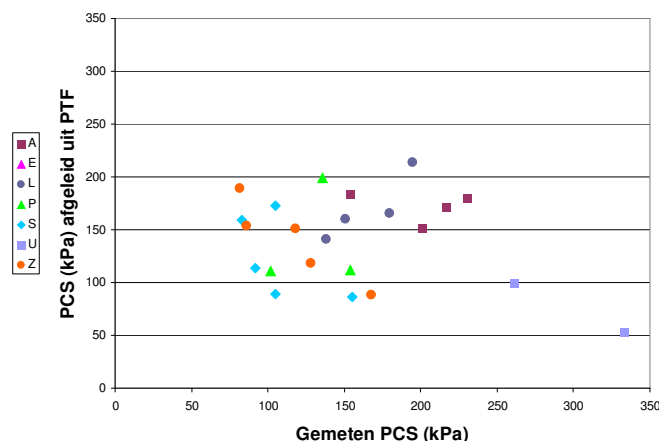
De Casagrande-methode bleek in de praktijk niet zo rechttoe rechtaan te zijn als verwacht. Zo blijkt dat het aantal punten dat wordt gebruikt voor het fitten van de VCL een grote invloed heeft op de uitkomst van de PCS. Voor het voorbeeld uit Figuur 3-5 zouden we bijvoorbeeld een PCS van 162 kPa zijn gekomen i.p.v. 139 kPa indien we voor een fit met 2 punten hadden gekozen i.p.v. een fit met 3 punten. Keller (2004) raadt aan om de VCL door "zoveel punten als mogelijk" te fitten. Wij hebben deze aanpak echter niet gevolgd, maar hebben steeds gekozen voor een fit op basis van 3 punten, en dit om eventuele subjectiviteit bij de keuze van het aantal punten uit te sluiten. De methode van Casagrande heeft ons niet in staat gesteld om voor al de stalen waarvoor we oedometermetingen hebben laten uitvoeren (42 in totaal) een PCS-waarde af te leiden. Zo zijn er verschillende stalen, waarvoor we na construeren van het last-zakkingsdiagram, geen maximum vinden van de 2^{de} afgeleide binnen het bereik van de zettingsproef. We vermoeden dat we voor deze stalen nog hogere belastingen hadden moeten aanleggen dan 1600 kPa om op de VCL te raken, wat zou impliceren dat deze stalen afkomstig zijn van sterk verdichte gronden met een hoge structurele sterkte. De via Casagrande afgeleide PCS-waarden liggen allen binnen dezelfde range en variëren tussen 72 kPa (laagste waarde) en 333 kPa (hoogste waarde), met 69% van de metingen in PCS-klassen ('120-150 kPa' en '>150 kPa'), d.w.z. lage tot zeer lage gevoeligheid voor verdichting. De gemeten PCS-waarden, in absolute termen, zijn per textuurklasse weergegeven in Figuur 3-6.



Figuur 3-6 De via Casagrande afgeleide PCS-waarden, gegroepeerd naar textuurklasse.

Voor de zwaardere texturen werd schijnbaar een hogere PCS gemeten dan voor de lichtere texturen, wavoor lagere PCS-waarden werden verkregen.

De beschikbare waarden voor textuur, koolstof en volumedichtheid werden gebruikt om alle inputparameters van de PTF's van Lebert en Horn te berekenen, waarna deze parameters werden ingevuld en de vergelijkingen werden doorgerekend. Op die manier wordt een set van PCS-waarden verkregen die we kunnen vergelijken met de gemeten PCS-waarden, dit zijn de PCS-waarden bepaald via de oedometerproef en toepassen van Casagrande. Voor alle stalen waarvoor een paarsgewijze vergelijking mogelijk is, wordt het resultaat van deze oefening aangegeven in Figuur 3-7.

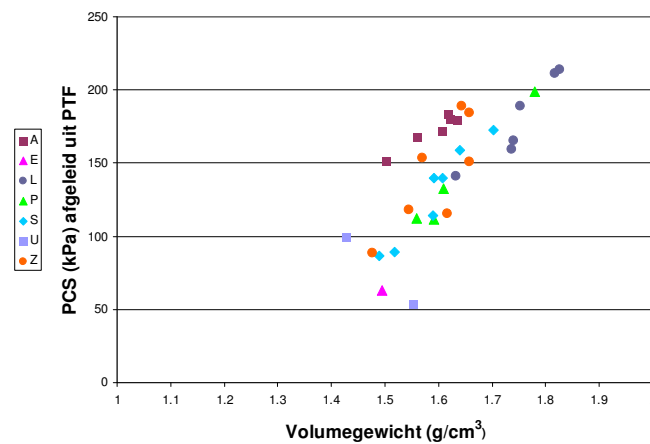


Figuur 3-7 Vergelijking van de via de PTF's afgeleide structurele sterkte (PCS) met de gemeten structurele sterkte, bepaald via een oedometerproef en Casagrande.

Uit Figuur 3-7 kunnen we vaststellen dat: (1) de berekende en gemeten PCS-waarden in dezelfde range liggen (80-250 kPa) en (2) er geen enkele correlatie is tussen berekende en gemeten PCS. Het blijkt dus helaas niet mogelijk te zijn om op basis van de beschikbare data de voor onze gevoeligheidskaarten aangewende PTF's ter bepaling van PCS te valideren. Voor het ontbreken van enige correlatie kunnen verschillende redenen worden bedacht. Ten eerste is er de onzekerheid in de methode van Casagrande, waarmee de PCS wordt bepaald uit het experimentele last-zakkingsdiagram, dat kan worden opgesteld uit de

oedometerproef. Het is bv. niet eenduidig hoeveel punten dienen aangewend te worden voor de fit van de Virgin Compression Line. Bovendien was het niet voor alle bodemmonsters mogelijk om met de methode van Casagrande een PCS-waarde af te leiden. Zoals eerder aangehaald zijn er verschillende stalen, waarvoor na construeren van het lastzakkingsdiagram, geen maximum van de 2de afgeleide binnen het bereik van de zettingsproef kon worden gevonden. Er werd eveneens vastgesteld dat de PTF's van Lebert en Horn bij pF 1,8 resulteren in een oppervlakte-aandeel van 7,2% aan bodemkaarteenheden met een negatieve PCS-waarde. Bij pF 2,5 werd voor 1,1% (naar oppervlakte) van de bodemkaarteenheden in de gevoeligheidskaart een negatieve PCS berekend. Wellicht geeft dit aan dat deze PTF's van Lebert en Horn zijn opgesteld op basis van metingen in een geheel van bodems die niet volledig het gamma van bodemmateriaal dekken dat in Vlaanderen op 41 cm diepte voorkomt. Een vierde reden die kan aangehaald worden voor het ontbreken van correlatie tussen berekende en gemeten PCS-waarden is de beperkte dataset.

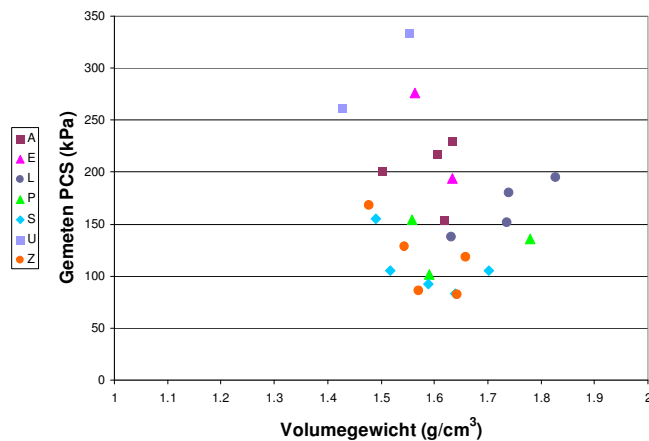
Een duidelijke correlatie werd gevonden tussen de gemeten volumedichtheid enerzijds en de PCS, zoals afgeleid uit de PTF's, anderzijds. Dit wordt duidelijk geïllustreerd in Figuur 3-8:



Figuur 3-8 Structurele sterkte (PCS) afgeleid uit PTF i.f.v. de gemeten volumedichtheid.

Uit Figuur 3-8 is duidelijk dat naarmate de volumedichtheid van de bodem toeneemt, ook zijn structurele sterkte (PCS) zal toenemen. Dit is volledig in overeenstemming met de praktijk: naarmate de volumedichtheid van de bodem toeneemt en de bodem dus meer verdicht is, neemt zijn draagkracht toe. De structurele sterkte (PCS) neemt toe en overeenkomstig neemt de gevoeligheid voor verdere verdichting af. Volumedichtheid lijkt een invloedrijke predictor in de PTF's voor PCS (belangrijker dan textuur).

Tenslotte werd ook de gemeten structurele sterkte geplot i.f.v. de volumedichtheid, hetgeen is weergegeven in Figuur 3-9:



Figuur 3-9 Gemeten structurele sterkte (PCS) i.f.v. de gemeten volumedichtheid.

Uit bovenstaande figuur kunnen we besluiten dat de gemeten PCS geen relatie vertoont met volumedichtheid, maar mogelijk wel met textuurklasse (zoals reeds duidelijk mocht zijn uit Figuur 3-6).

3.1.5 Validatie kaart (validatie 1c)

In een derde stap van validatie 1 vergelijken we nu de gemeten PCS-waarden op de bezochte velden met de door de gevoeligheidskaart (pF 1.8) voorspelde PCS-waarden voor de overeenkomstige kaarteenheden. Een volledige paarsgewijze vergelijking is echter niet mogelijk, daar (i) niet voor al de stalen waarvoor we oedometermetingen hebben laten uitvoeren een PCS-waarde kon worden afgeleid en (ii) sommige staalnamelocaties gesitueerd zijn binnen kaarteenheden die niet konden gekoppeld worden met Aardewerk-BIS, zodat voor de betreffende kaarteenheden geen PCS-waarden konden berekend worden en afgebeeld op kaart. Voor staalnamelocaties waar wél een paarsgewijze vergelijking mogelijk is tussen gemeten PCS enerzijds en PCS volgens kaart (pF 1.8) anderzijds, werden niet de absolute PCS-waarden vergeleken, doch er werd een relatieve vergelijking gemaakt op basis van de PCS-klassen gehanteerd in de gevoeligheidskaart. Het resultaat van deze oefening is weergegeven in Tabel 3-2.

Tabel 3-2 Vergelijking, in relatieve termen, van de gemeten PCS-waarden op de bezochte velden met de door de gevoeligheidskaart (pF 1.8) voorspelde PCS-waarden voor de overeenkomstige kaarteenheden.

locatie	PCS-klasse kaart	PCS-klasse gemeten
Huldenberg 15	90-120	>150
Schaffen 11	90-120	90-120
Geel 6	30-60	>150
Heverlee 1	30-60	>150
Lovendegem 1	>150	90-120
Lovendegem 12	90-120	60-90
Lovendegem 15	90-120	60-90
Essen 1	120-150	120-150
Essen 4	120-150	>150
Houtem 1	120-150	>150
Houtem 4	30-60	>150
Oostkerke 15	90-120	>150
Oostkerke 9	30-60	>150

Oostende 4	30-60	>150
Tongeren 1	90-120	>150
Tongeren 4	90-120	>150
Torhout 1	<30	120-150
Torhout 4	<30	>150
Bree 1	<30	90-120
Hooglede 4A	30-60	120-150
Hooglede 4B	30-60	120-150
Pittem 1A	60-90	120-150
Pittem 1B	60-90	>150
Pittem 4A	60-90	>150
Pittem 4B	60-90	>150

Uit Tabel 3-2 is duidelijk dat de gemeten PCS meestal in een hogere klasse valt dan de PCS voorspeld door de kaart. De enige uitzondering hierop vormen de staalname-locaties te Lovendegem, waarvoor we net het omgekeerde zien, en de locaties 'Schaffen 11' en 'Essen 1', waarvoor de gemeten PCS en de door de kaart voorspelde PCS binnen dezelfde PCS-klasse vallen.

Dat de PCS-klassen doorgaans hoger zijn voor de gemeten PCS i.v.m. de door de kaart voorspelde PCS kan deels worden uitgelegd door het feit dat de door de kaart voorspelde PCS werd berekend aan de hand van een via de Rawls-PTF geschat volumegewicht dat een onderschatting is van het werkelijke volumegewicht. Dat Rawls het werkelijke volumegewicht onderschat, was reeds duidelijk uit Figuur 3-3, waarin het werkelijk gemeten volumegewicht op basis van Kopecky-staالنamen in 2009 wordt vergeleken met het via Rawls geschatte volumegewicht op basis van koolstofmetingen op deze Kopecky-stalen. De data in Aardewerk werden verzameld tussen 1947 en 1971 in het kader van het bodemkarteringsproject en op basis van de bevindingen met Rawls anno 2009, kan er vermoed worden dat het werkelijke volumegewicht in de jaren '40-'70 hoger moet zijn geweest dan het volumegewicht geschat via Rawls, op basis waarvan de PCS voor de gevoeligheidskaart werd geschat. Aangezien een hoger volumegewicht een hogere PCS impliceert, onderschat onze gevoeligheidskaart de werkelijke PCS in die periode.

Veel belangrijker is het feit dat de gevoeligheidskaart op basis van de Aardewerk-data kan worden beschouwd als een inherente gevoeligheidskaart die de gevoeligheid voor bodemverdichting toont voor ongecompacteerde 'virgin' bodems. In de jaren '40-'70 was de mechanisatie immers niet van die aard dat landbouwbodems aan grote belastingen werden blootgesteld. De PCS-metingen op stalen verzameld anno 2009 weerspiegelen echter de actuele compactietoestand van de bodem, die de resultante is van alle belastingen waaraan de bodem ooit werd blootgesteld sinds de opkomst van de mechanisatie. Daarom is het begrijpbaar dat de gemeten PCS-waarden doorgaans hoger zijn dan de PCS-waarden uit de kaart, ontwikkeld a.d.h.v. historische data: ze weerspiegelen dat er compactie is opgetreden, waardoor de gevoeligheid voor verdere verdichting is afgenomen en de PCS overeenkomstig is toegenomen.

3.1.6 Validatie actuele compactie-status (validatie 2)

Zoals eerder gezegd zijn we ook nagegaan of we effectief verdichtingen kunnen vaststellen in bepaalde zones van het veld (bv. de kopakker of natte zones) waarvan we verwachten dat ze een groter risico voor compactie vertonen. Dit is meteen onze 2^{de} validatie.

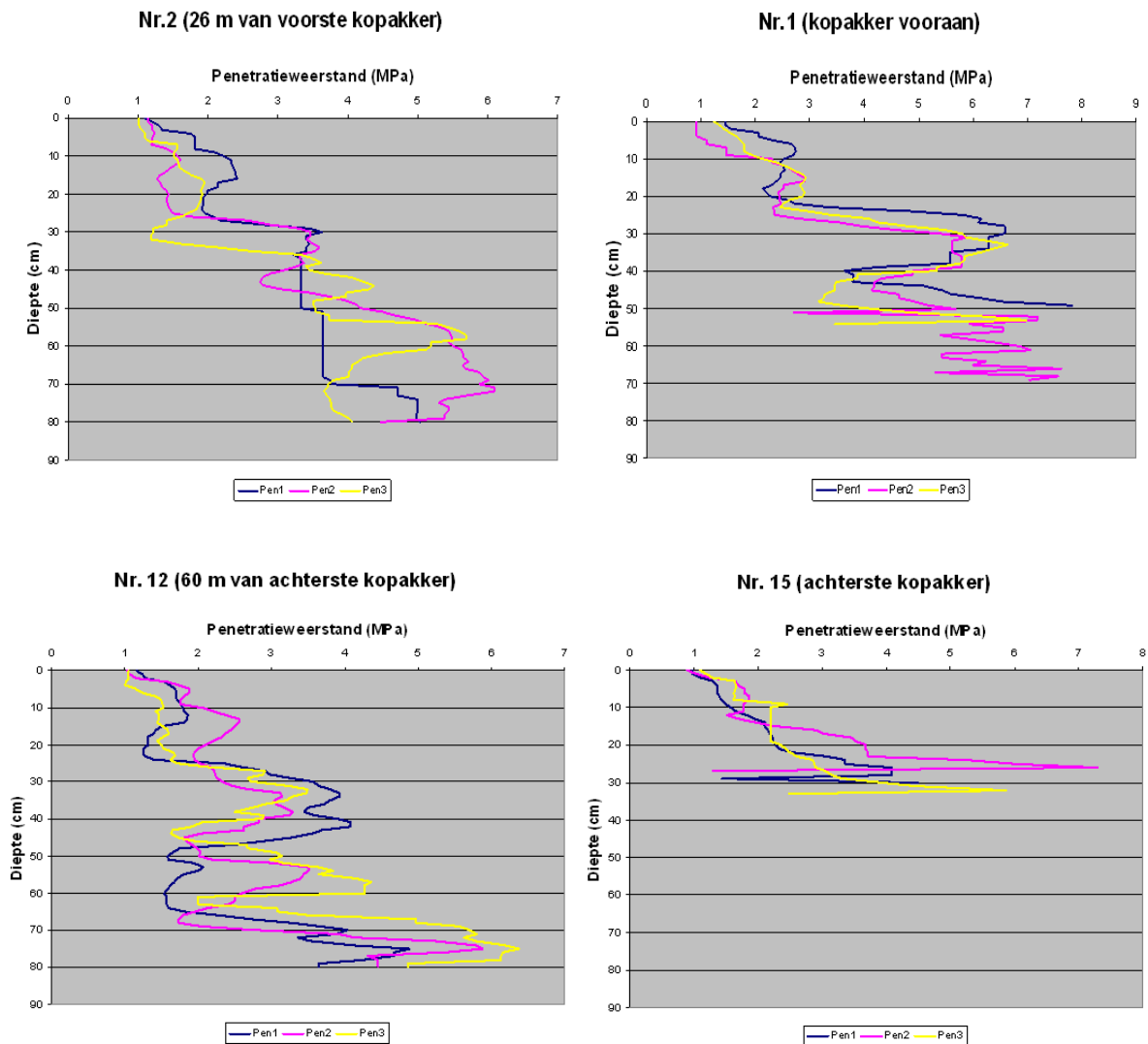
De penetrometer- (en penetrograaf)metingen langsheen het transect van 15 punten dat beide kopakkers van het veld doorsnijdt, bewijzen inderdaad dat er op vele akkers wel degelijk een 'gradiënt van verdichting' bestaat, waarbij er meer verdichting wordt vastgesteld op de kopakkers i.v.m. de rest van het veld. Voor het bezochte veld te Essen, waarvan het uitgezette transect is weergegeven in Figuur 3-10, wordt dit geïllustreerd a.d.h.v. de door de

penetrometer geregistreerde penetratieweerstanden op de punten 1,2, 12 en 15 langsheen het transect, dewelke zijn weergegeven in Figuur 3-11.

Uit Figuur 3-11 is duidelijk dat op de kopakkers te Essen (punten 1 en 15) hogere penetratieweerstanden werden opgemeten dan op locaties op enige afstand van de kopakkers (punt 2, op 26 meter van de voorste kopakker, en punt 12, op 60 meter van de achterste kopakker): op punt 1 (voorste kopakker) werden penetratieweerstanden tot 8 MPa geregistreerd t.o.v. maximum 6 MPa op punt 2; idem achteraan het veld: op punt 15 (achterste kopakker) penetratieweerstanden tot maximum 7,5 MPa t.o.v. maximum 6 MPa op punt 12. Verder kon de staaf van de penetrometer waaraan de conus is bevestigd niet tot op 80 cm worden geduwd op beide kopakkers, vanwege te verdicht: op locatie 1 kon éénmaal worden geduwd tot 70 cm diep, de overige keren ging de staaf maar tot 50 diep; op de achterste kopakker (locatie 15), ondervonden we nóg meer weerstand en kregen we de penetrometer niet dieper dan 30 cm.



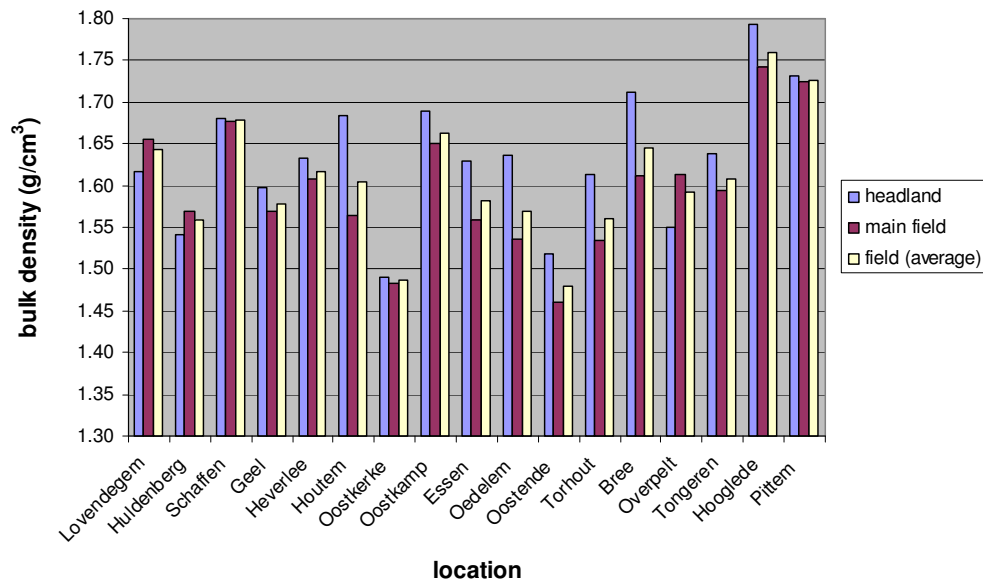
Figuur 3-10 Transect van het bezochte veld te Essen, waarbij punten 1 en 15 op de kopakker zijn gesitueerd.



Figuur 3-11 De via de penetrometer geregistreerde penetratieweerstanden i.f.v. de diepte voor de locaties 1, 2, 12 en 15 langsheen het transect van het bezochte grasland te Essen.

Aangezien penetrometermetingen sterk beïnvloed worden door het vochtgehalte, is een onderlinge vergelijking van de penetratieweerstanden tussen de verschillende percelen alleen maar mogelijk indien ook het vochtgehalte over het ganse dieptebereik van de penetrometer-meting wordt geregistreerd. Via een meting van het vochtgehalte kunnen de penetratieweerstanden gecorrigeerd worden en zijn ze onderling vergelijkbaar. Voor de penetrologer kan zulk een vochtmeting gebeuren via een externe bodemvochtsensor. Aangezien we hiervan geen gebruik hebben gemaakt, heeft het weinig zin om de penetratieweerstanden tussen de verschillende percelen onderling te gaan vergelijken.

Naast de penetrometermetingen kan ook via de bepaling van de volumedichtheid worden aangetoond dat de kopakker doorgaans meer verdicht is dan de rest van het veld. Dit blijkt uit Figuur 3-12, waarin voor elk van de bezochte velden drie waarden voor volumedichtheid (op 41 cm) met elkaar worden vergeleken: (1) een waarde van de volumedichtheid voor de kopakkers, (2) een waarde van de volumedichtheid voor de rest van het veld (= gemiddelde van de volumedichtheid van alle locaties, uitgezonderd de kopakker-locaties) en (3) een gemiddelde waarde van de volumedichtheid voor heel het veld.



Figuur 3-12 Vergelijking van de volumedichtheid (op 41 cm) van de kopakker ('headland'), met de volumedichtheid van de 'rest van het veld' ('main field') en de gemiddelde volumedichtheid over heel het veld ('field (average)').

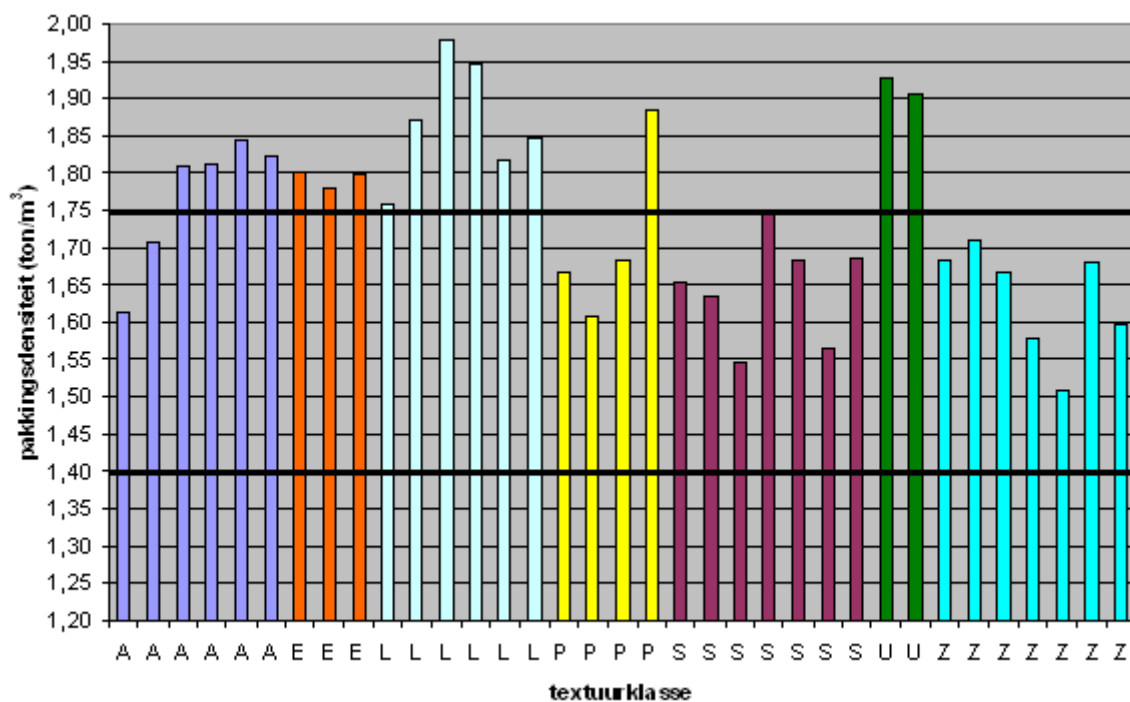
Uit Figuur 3-12 kunnen we 2 zaken vaststellen: (1) voor bijna alle bezochte locaties is de volumedichtheid van de kopakker hoger dan de volumedichtheid van de rest van het veld of de gemiddelde volumedichtheid over heel het veld, en (2) verdichting onder de bouwvoor (41 cm) lijkt voor heel wat van de bezochte locaties een reëel feit, met volumegewichten die vlotjes over de $1,6 \text{ g/cm}^3$ gaan. Bij zulke volumegewichten komt de beworteling van het gewas in moeilijkheden, afgaand op de kritische grenzen voor beworteling, zoals voorgesteld in Tabel 1-3 uit Hoofdstuk 1. Vergelijking met de gemiddelde volumedichtheden in de bouwvoor voor de verschillende Belgische textuurklassen, voorgesteld in 1969 door Van Hove, en weergegeven in onderstaande tabel (Tabel 3-3), maakt duidelijk dat de volumedichtheden onder de bouwvoor, anno 2009, van een heel andere grootte-orde zijn.

Tabel 3-3 Gemiddelde waarden voor de volumedichtheid (g.cm^{-3}) i.f.v. de Belgische textuur-klassen (Van Hove, 1969).

textuurklasse	Z	S	P	L	A	E	U
volumegewicht	1.37	1.42	1.47	1.44	1.43	1.34	1.20

Aangezien het volumegewicht onder meer ook afhankelijk is van de textuur, kunnen de volumegewichten tussen de verschillende percelen niet zonder meer onderling vergeleken worden. Zo hebben zandgronden typisch een hoger volumegewicht dan de zwaardere texturen (cfr. Tabel 2-8: waarde van de minerale bd voor toepassing in Rawls-PTF: 1,55 voor textuur Z vs. 1,35 voor textuur U). Om aan dit probleem tegemoet te komen wordt de actuele bulkdensiteit soms uitgedrukt als een percentage van één of andere referentietoestand van verdichting voor een gegeven bodem en spreekt men van 'de graad van compactheid' of van 'de relatieve compactheid'. De graad van compactheid wordt gedefinieerd als de ratio actuele bulkdensiteit/referentiebulkdensiteit. Een andere relatieve compactiewaarde is de ratio van de actuele en de maximale bulkdensiteit, oftewel de relatieve compactie-index, dewelke als volgt wordt gedefinieerd: $(\rho_{\text{actueel}} - \rho_{\text{min}}) / (\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{min}})$, waarbij ρ_{max} en ρ_{min} de maximale en minimale bulkdensiteit vertegenwoordigen. Een andere densiteits-gerelateerde grootte voor bodemverdichting die vergelijking mogelijk maakt tussen verschillende

texturen, is de zogenaamde 'pakkingsdensiteit': $PD = \rho + 0.009C$ waarbij PD staat voor pakkingsdensiteit in ton m^{-3} , ρ voor de bulkdensiteit eveneens in ton m^{-3} , en C voor het kleigehalte (gewichts%). Drie PD-klassen worden onderscheiden: 'laag' < 1.40 , 'medium' $1.40-1.75$ en 'hoog' > 1.75 ton m^{-3} . Bodems met een hoge PD (> 1.75 ton m^{-3}) zijn over het algemeen niet zo vatbaar voor verdere verdichting, terwijl bodems met medium en lage PD (< 1.40 ton m^{-3}) bij kritieke vochtgehaltenes en belastingen wél gevoelig zijn hieraan (cfr. 1.2.1.1). Typische minimale en maximale bd-waarden per textuurklasse werden niet onmiddellijk teruggevonden in de literatuur, zodat de relatieve compactie-index alvast geen optie was om de volumegewichten tussen de verschillende percelen onderling te vergelijken. Ook de graad van compactheid kon niet worden aangewend: hoewel we voor de referentiebulkdensiteit gebruik zouden kunnen maken van de minerale volumegewichten uit Tabel 2-8, stelt zich het probleem dat de actuele volumegewichten uit de teller werden bepaald op grondmonsters waarvan het organisch stofgehalte sterk varieert al naargelang het perceel waarop het grondmonster werd genomen (cfr. vergelijk de gemeten koolstofgehaltenes uit Tabel 3-1 tussen de verschillende percelen). Daarom werd uiteindelijk geopteerd voor de pakkingsdensiteit als relatieve maatstaf voor verdichting. De PD werd berekend voor elk van de staalnamelocaties uit Tabel 3-1 a.d.h.v. de koolstofpercentages en de actuele (gemeten) volumegewichten uit deze tabel, en werd vervolgens geplot per textuurklasse. Het resultaat is weergegeven in *Figuur 3-13*.



Figuur 3-13 Berekende pakkingsdensiteit in functie van textuur.

Uit *Figuur 3-13* blijkt dat de PD het hoogst is op velden met zware textuur (A, E, U, L), waarbij de PD vaak groter is dan 1.75 ton m^{-3} . Omgekeerd is de PD het laagst voor de lichtere texturen (S en Z), met alle PD-waarden kleiner dan 1.75 ton m^{-3} . De zwaardere gronden bleken dus meer verdicht te zijn dan de lichtere anno 2009. Dit beeld bevestigt de bevindingen met de PCS-metingen (cfr. *Figuur 3-6*), waarbij voor S en Z de laagste PCS-waarden werden gevonden, terwijl voor de zwaardere texturen een hogere PCS werd gemeten.

3.2 Toetsing in kenniscirkels

Het verslag van de twee kenniscirkels die plaatsvonden op 24 en 25 september 2008 is toegevoegd als Bijlage 7.

4 CONCLUSIES EN PERSPECTIEVEN VOOR VERDER ONDERZOEK

De digitale bodemkaart Vlaanderen werd gekoppeld met de databank Aardewerk-BIS, zodat voor 80,7% van de bodemkaartenheden (netto oppervlakte Vlaanderen minus bebouwd gebied en andere niet-bodems ten tijde van de bodemkartering), de legende-informatie van de bodemkaart kon worden uitgebreid met statistische profiel- en horizontgegevens die gebaseerd zijn op grote aantallen effectief beschreven en bemonsterde horizonten. Deze profieldata bevatten directe of indirecte predictoren voor de pedotransferfuncties van Lebert en Horn (1991), waarmee de structurele sterkte, uitgedrukt als de precompressiestress (PCS), van het horizontmateriaal kan worden berekend.

Twee kaarten die de gevoeligheid voor bodemverdichting aangeven werden ontwikkeld waarin de structurele sterkte (PCS) van de bodem op 41 cm diepte en bij een pF van 2,5 (drogere grond) resp. 1,8 (nattere grond) gehanteerd werd als maat voor de gevoeligheid voor verdichting. De rationale voor de interpretatie van deze kaarten is dat hoe groter de PCS, hoe groter de weerstand van de bodem tegen plastische vervorming en hoe kleiner de gevoeligheid voor bodemverdichting. In de gevoeligheidskaart bij pF 2,5 wordt voor 42% (naar oppervlakte) van de kaartenheden een lage tot zeer lage gevoeligheid voor verdichting aangegeven. Bij pF 1,8 is dit slechts 12%. Omgekeerd wordt bij pF 1,8 voor 50% van de kaartenheden een hoge tot extreem hoge gevoeligheid voor compactie berekend. Bij pF 2,5 daarentegen is dit slechts 18%. Om de verschillen in drainagetoestand van de bodemkaartenheden mee in rekening te brengen bij de inschatting van de gevoeligheid voor bodemverdichting werd een hybridekaart opgesteld waarbij een kaartenheid ofwel de PCS-waarde bij pF 2.5 krijgt, ofwel de PCS-waarde bij pF 1.8 op basis van een beslissingsregel. Deze is gebaseerd op de veronderstelde diepte van de grondwatertafel in het voorjaar afgeleid uit de diepte van voorkomen van roestverschijnselen, zoals vastgelegd in de drainageklasse op de bodemkaart. Aan 86% van de kaartenheden van de hybridekaart werd de PCS-waarde bij pF 1.8 toegekend. Slechts 14% van de kaartenheden kreeg de PCS-waarde bij pF 2.5.

Voor een typische tractorband enerzijds en oogstmachineband anderzijds werden vervolgens per band drie risicokaarten voor bodemverdichting opgesteld: één voor pF 2,5, één voor pF 1,8 en een hybridekaart gebaseerd op dezelfde beslissingsregel als gebruikt voor de hybride-gevoeligheidskaart. Via de SoilFlex-software werd de grensbelasting berekend voor een aantal combinaties van bodemspecifieke concentratiefactor enerzijds en wiellasten en bandenspanningen anderzijds. In de risicokaarten werd per kaartenheid de hoogste belastingswaarde (wiellast x bandenspanning) voorgesteld die de desbetreffende PCS-waarde uit de gevoeligheidskaart niet overschrijdt. De risicokaart voor de oogstmachine-band bij pF 1,8 is hoogst opmerkelijk. Op 59% (naar oppervlakte) van de bodemkaartenheden leidt het gebruik van deze band, zelfs bij de laagste door de fabrikant aangegeven wiellast, tot overschrijding van de structurele sterkte en draagt aldus bij tot verdichting onder de bouwvoor.

Een veldcampagne werd opgezet om (1) na te gaan in hoeverre de verschillen in PCS zoals voorspeld uit de gevoeligheidskaart overeenkomen met de PCS gemeten op stalen van een representatieve set van bodems, waarvoor een uiteenlopende PCS werd voorspeld (validatie 1), en (2) na te gaan of we ook effectief verdichtingen kunnen vaststellen in bepaalde zones in het veld (bv. de kopakker of natte zones) (validatie 2). Op een maand tijd werden op 17 landbouwpercelen in Vlaanderen met uiteenlopende textuur bodemstalen verzameld op 41 cm diepte, waarop in het laboratorium het koolstofgehalte, de granulometrie en het volumegewicht werden bepaald. Daarnaast werden aparte stalen genomen van het veld

enerzijds en de kopakker anderzijds (eveneens op 41 cm) voor het afleiden van de PCS via de oedometer-test. Ook werden penetratieweerstanden gemeten op diverse locaties in elk perceel.

De meetwaarden voor koolstof, granulometrie en volumegewicht werden gebruikt als inputparameters om via de PTF-vergelijkingen de *in situ* PCS te berekenen. Deze via PTF berekende PCS-waarden werden vervolgens vergeleken met de PCS-waarden verkregen uit oedometerproeven op de onverstoorte bodemmonsters die op dezelfde locaties en diepte werden verzameld. Er bleek geen correlatie te bestaan tussen de experimenteel bepaalde PCS-waarden en de berekende PCS-waarden, ofschoon de experimentele en gemeten PCS-waarden van dezelfde grootte-orde zijn (80-250 kPa). Hiervoor kunnen verschillende overwegingen worden aangehaald:

- Na het uitvoeren van de oedometerproef wordt een experimenteel last-zakkingsdiagram opgesteld waaruit de PCS wordt bepaald met de methode van Casagrande. Het betreft een oude methode en er is geen eenduidige regel over hoeveel punten gebruikt moeten worden voor het fitten van de Virgin Compression Line. Voor een aantal bodemmonsters werd geen maximum van de 2de afgeleide gevonden binnen het bereik van de zettingsproef en hieraan valt niet onmiddellijk te verhelpen. Zodoende kon voor deze monsters geen PCS worden bepaald a.d.h.v. Casagrande;
- Bij het berekenen van de PCS via de PTF's van Lebert en Horn voor de gevoeligheidskaart bij pF 1,8 vonden we een oppervlakte-aandeel van 7,2% aan bodemkaartenheden met een negatieve PCS-waarde. Bij pF 2,5 werd dit 1,1% (naar oppervlakte). Onvermijdelijk zijn bij uitbreiding ook een deel van de andere PCS-waarden een onderschatting of overschatting. De PTF's van Lebert en Horn zijn wellicht opgesteld op basis van metingen in een geheel van bodems die niet volledig het gamma van bodemmateriaal dekken dat in Vlaanderen op 41 cm diepte voorkomt;
- Ondanks de tijdrovende validatie was de dataset beperkt.

De vergelijking, voor een aantal bodemkaartenheden, van de in de gevoeligheidskaart (pF 1.8) weergegeven en in de risicokaart (pF 1.8) gebruikte PCS-waarden met deze die voor locaties binnen deze kaartenheden experimenteel werden bepaald, wees uit dat de gemeten PCS-waarden meestal hoger waren dan de voorspelde (geschatte) PCS-waarden uit de kaart. De geschatte PCS-waarden zijn gebaseerd op historische data uit Aardewerk, verzameld tussen 1947 en 1971 in het kader van het bodemkarteringsproject. Sindsdien is de landbouwmechanisatie echter geëvolueerd naar groter en zwaarder. De afgeleverde kaarten kunnen als – minstens relatief – geldig beschouwd worden voor bodems die nog geen compactie hebben ondergaan. Het zijn a.h.w. historische gevoeligheidskaarten die een basis kunnen vormen voor het afbakenen van risicogebieden in Vlaanderen, wetende dat op aanzienlijke aantallen percelen binnen deze gebieden compactie inmiddels is opgetreden waardoor het risico op verdere compactie is afgenomen maar schade t.g.v. de opgetreden compactie reeds aan de orde is.

Deze bevindingen kunnen uitgebreid worden met volgende overwegingen:

- De soms belangrijke variatie van PTF-predictoren (als granulometrie, gehalte organische stof, volumegewicht e.a.) binnen kaartenheden verhoogt de onzekerheid op de PCS-schattingen;
- Volumegewicht is de belangrijkste predictor in de gebruikte PTF's voor PCS. Bovendien zijn de gemeten volumegewichten systematisch hoger dan de geschatte volumegewichten op basis van Rawls. Kennis van het actuele volumegewicht lijkt een belangrijke sleutel te zijn om gevoeligheids- en risicokaarten te maken die beter rekening houden met de compactie die reeds is opgetreden;
- Verdichting onder de bouwvoor is een reëel feit voor veel van de bezochte percelen. Met volumegewichten die vlot over de 1,6 g/cm³ gaan en penetratieweerstanden die vaak groter zijn dan 3 MPa, wordt de doorwortelbaarheid op 41 cm diepte bemoeilijkt. Ook de range van de gemeten en berekende PCS-waarden met heel wat waarden

groter dan 120 kPa wijst op verdichting, waardoor er een lage tot zeer lage gevoeligheid is voor nog verdere verdichting. Er kon a.d.h.v. van penetrometermetingen en bepalingen van de volumedichtheid worden aangetoond dat de kopakker doorgaans meer verdicht is dan de rest van het perceel;

- In het theoretisch geval dat verdichte lagen onder de bouwvoor kunnen losgewoeld worden, zouden de historische gevoeligheidskaarten voor verdichting terug actueel worden. Maar bij dezelfde mechanisatie en management zou de verdichting heel snel terugkeren naar de toestand anno 2009;
- Volgens onze gevoeligheidskaarten gebaseerd op historische gegevens, blijken zandgronden minder gevoelig te zijn voor bodemverdichting dan de zwaardere texturen, daar de PTF's voor zandgronden hogere PCS-waarden voorspellen dan voor leem- en kleigrond. Anderzijds laten vergelijkingen van de gemeten PCS-waarden en van de pakkingsdensiteiten tussen de verschillende textuurklassen uitschijnen dat anno 2009 de zwaardere gronden meer verdicht zijn dan de lichtere. Dit zou impliceren dat er effectieve verdichting is opgetreden op de meest gevoelige gronden in de loop der jaren en dat hun draagkracht daardoor overeenkomstig is toegenomen: verdere verdichting van leem- en kleigrond vergt hogere belastingen i.v.m. de belastingen die nodig zijn om zandgrond verder te verdichten.

Het nieuwe aan deze studie is dat er, anders dan in de ons omringende landen, specifiek naar verdichting van de diepere lagen werd gekeken. Compactie van oppervlakkiger horizonten kan immers door normale bodembewerkingen ongedaan worden gemaakt. Dankzij de opwaardering van de bodemkaart met gegevens uit de bodemdatabank Aardewerk-BIS kon de PCS en daardoor de gevoeligheid voor en het risico op bodemverdichting bepaald worden voor het horizont onder de bouwvoor. Deze laag reflecteert als het ware de geschiedenis van het landgebruik. Dezelfde combinatie van bodemkaart en Aardewerk-BIS leidde eveneens tot kaarten met een onuitgegeven ruimtelijke resolutie, namelijk overeenkomend met een kartografisch schaalniveau 1:20.000. Vergeleken met vele van de andere gevoeligheids- en risicokaarten die gevonden werden in de literatuur zijn de hier gepresenteerde kaarten haast de enige die een vorm van validatie hebben ondergaan.

Tenslotte formuleren we nog een aantal perspectieven voor verder onderzoek:

- Hoe gegevens over volumegewicht bekomen die voldoende accuraat zijn om bodemverdichting te voorspellen: real-time metingen of alternatieve PTF's? Naast de PTF van Rawls zijn andere PTF's voor volumegewicht beschikbaar (Van Hove, Boucneau, Devos, ...). Deze zouden als alternatief voor Rawls gebruikt kunnen worden;
- PTF's voor PCS ontwikkelen voor Vlaanderen (aangezien we nu deze van Duitsland moeten overnemen), waarbij we trachten het vochtgehalte als predictor mee te nemen (voor real-time berekening van de gevoeligheid voor verdichting);
- Aardewerk uitbreiden en corrigeren om ook aan de 20% niet-gekaracteriseerde bodemkaartenheden een PCS-waarde te kunnen toekennen;
- ...

5 REFERENTIES

- Adams, P.W. en Froehlich, H.A. (1981). Compaction of forest soils. A Pacific Northwest Extension Publication, PNW 217. Oregon State University, Oregon. 13p.
- Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W.C.T., Tjink, F.G.J., van der Linden, J.P., Pires, S., Sommer, C. en Spoor, G. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil & Tillage Research*, 73: 145-160.
- ALTERRA (s.d.). Subsoil compaction [on line]. Beschikbaar op: <http://www.alterra-research.nl/pls/portal30/docs/folder/subsoil/subsoil/index.htm> [14/08/08].
- ALTERRA (2008). Bodemverdichting [on line]. Beschikbaar op: <http://www.alterra.wur.nl/NL/onderzoek/Werkveld+Bodem/LD/BVE/> [14/08/08].
- Ameryckx, J.B., Verheye, W. en Vermeire, R. (1995). *Bodemkunde: Bodemvorming, bodemeigenschappen, de bodems van België, bodembehoud en -degradatie, bodembeleid en bodempolitiek*. Ameryckx, Gent. 346p.
- Ampoorter, E., Goris, R., Cornelis, W.M. en Verheyen, K. (2007). Impact of mechanized logging on compaction status of Sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*, 241: 162-174.
- Arshad, M.A., Lowery, B. en Grossman, B. (1996). Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W., Jones, A.J., *Methods for assessing soil quality*. p.123-141. SSSA special publication no. 49. Madison, WI, USA
- Arvidsson, J. (1997). Soil compaction in agriculture: from soil stress to plant stress. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. onregelmatig gepagineerd
- Arvidsson, J., Trautner, A., Van den Akker, J.J.H en Schjønning, P. (2001). Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil & Tillage Research*, 60: 79-89.
- Arvidsson, J., Sjöberg, E. en Van den Akker, J.J.H (2003). Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. III. Risk assessment using a soil water model. *Soil & Tillage Research*, 73: 77-87.
- Arvidsson, J. en Keller, T. (2004). Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research*, 77: 85-95.
- Arvidsson, J. en Keller, T. (2007). Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil & Tillage Research*, 96: 284-291.
- Baars, T. (2000). Regenwormpopulatie, bemesting en bodemverdichting. *Vlugschriften Louis Bolk Instituut*, maart 2000, p.36.
- Baumgartl, Th. en Köck, B. (2004). Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 57-65.
- Baver, L.D., Gardner, W.H. en Gardner, W.R. (1972). *Soil Physics*. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York. 498p.
- Block, R., Van Rees, K.C.J. en Pennock, D.J. (2002). Quantifying harvesting impacts using soil compaction and disturbance regimes at a landscape scale. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1669-1676.
- Boon, W. (1984). Onderzoek naar het verband tussen het koolstofpercentage en de volumedichtheid van de grond. Intern Rapport Bodemkundige Dienst van België, Heverlee.
- Breland, T.A. en Hansen, S. (1996). Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biology & Biochemistry*, 28: 655-663.

- Cavaliere, K.M.V., Arvidsson, J., da Silva A.P. en Keller, T. (2008). Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil & Tillage Research*, 2008: 17-26.
- Chamen, W.C.T., Alakukku, L., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., Tijink, F. en Weisskopf, P. (s.d.). Qualitative strategies as guidelines for avoiding subsoil compaction in farming systems [on line]. Beschikbaar op: <http://www.alterra-research.nl/pls/portal30/docs/FOLDER/SUBSOIL/SUBSOIL/DOWNLOAD/PREVENTIONSUBSOILCOMPACTION.PDF> [19/05/08].
- Chamen, W.C.T., Alakukku, L., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., Tijink, F. en Weisskopf, P. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. *Soil & Tillage Research*, 2003: 161-174.
- De Bakker, H. en Schelling, J. (1966). *Systeem van bodemclassificatie voor Nederland: De hogere niveaus*. Centrum voor Landbouwpublicaties en Landbouwdocumentatie, Wageningen (1966). 217p
- Defossez, P. en Richard, G. (2002). Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil & Tillage Research*, 67: 41-64.
- De Jong, J.J., Van den Akker, J.J.H. en Kiestra, E. (2007). *Bodembeschadiging bij houtoogst met harvesters. Een vergelijking tussen harvesters op luchtbanden en op rupsbanden*. Alterra-rapport 1476. Alterra, Wageningen. 37p.
- De Leenheer, L., Appelmans, F. en Vandamme, J. (1968). *Cartes perforées et ordinateur comme instruments pour la caractérisation du sol et la pédologie régionale; Le système des cartes perforées de la section 'caractérisation du sol' de la cartographie des sols de la Belgique*. *Pédologie* 18: 208-227.
- De Smedt, F. (2007). *Grondmechanica: cursusnota's oktober 2007*. Vrije Universiteit Brussel, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde. 160p.
- De Vos, B. (2005). *Bodemcompactie en de invloed op de natuurlijke verjonging van Beuk in het Zoniënwoud*. IBW.Bb R 2005.004. In opdracht van het Fonds Generale Maatschappij van België voor het Zoniënwoud onder auspiciën van de Koning Boudewijnstichting. Instituut voor Bosbouw en Wildbeheer, Geraardsbergen. 75p.
- Eckelmann, W., Baritz, R., Bialousz, S., Bielek, P., Carre, F., Houšková, B., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M.G., Kozak, J., Le Bas, C., Tóth, G., Tóth, T., Várallyay, G., Yli-Halla, M. en Zupan, M. (2006). *Common criteria for risk area identification according to soil threats*. European Soil Bureau Research Report No.20, EUR 22185 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 94p.
- Gysi, M. (2001). *Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: Field data and a critical state soil mechanics model approach*. *Soil & Tillage Research*, 61: 133-142.
- Håkansson, I. en Lipiec, J. (2000). *A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction*. *Soil & Tillage Research*, 53: 71-85.
- Hamza, M.A. en Anderson, W.K. (2005). *Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions*. *Soil & Tillage Research*, 82: 121-145.
- Horn, R., Fleige, H., Mayol, F., Diaz-Pereira, E. en de la Rosa, D. (s.d.). *Alcor model : agricultural soil compaction risk* [on line]. Beschikbaar op : <http://www.irnase.csic.es/users/microleis/microlei/manual2/pdfs/Alcor-model-e.pdf> [19/11/08].
- Horn, R., Domzal, H., Slowinska-Jurkiewicz, A. en van Ouwerkerk, C. (1995). *Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment*. *Soil & Tillage Research*, 35: 23-36.
- Horn, R. en Fleige, H. (2003). *A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils*. *Soil & Tillage Research*, 73: 89-99.
- Horn, R., Fleige, H., Richter, F.-H., Czyz, E.A., Dexter, A., Diaz-Pereira, E., Dumitru, E., Enarache, R., Mayol, F., Rajkai, K., de la Rosa, D. en Simota, C. (2005). *SIDASS project Part*

5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil & Tillage Research*, 82: 47-56.

Inverde v.z.w. (2008). Bodemcompactie [on line]. Beschikbaar op: <http://ecopedia.be/fiche/Bodemcompactie> [14/08/08].

Jones, R.J.A., Spoor, G. en Thomasson, A.J. (2003). Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil & Tillage Research*, 73: 131-143.

JRC (Joint Research Centre of the European Commission) (2008). Maps for Soil Susceptibility to Compaction [on line]. Beschikbaar op: <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/themes/compaction/Data.html> [06/12/08].

Keller, T. (2004). Soil compaction and soil tillage – Studies in agricultural soil mechanics. Doctoral thesis. Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 75p.

Keller, T. en Arvidsson, J. (2004). Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effect of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research*, 79: 191-205.

Keller, T. en Arvidsson, J. (2007). Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science*, 58 : 1373-1381.

Keller, T., Défossez, P., Weisskopf, P., Arvidsson, J. en Richard, G. (2007). *SoilFlex*: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*, 93: 391-411.

Kok, H., Taylor, R.K., Lamond, R.E. en Kessen, S. (1996). Soil compaction: problems and solutions. Pub Number: AF-115. Cooperative Extension Service, Kansas State University, Manhattan, Kansas. 4p.

Koolen, A.J. en Kuipers, H. (1983). *Agricultural Soil Mechanics*. Advanced Series in Agricultural Sciences, vol. 13. Springer-Verlag, Berlijn Heidelberg. 241 p.

Kozlowski, T.T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14: 596-619.

Kulli, B., Gysi, M. en Flühler, H. (2003). Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. *Soil & Tillage Research*, 70: 29-40.

Lebert, M. (1989). Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Dissertation Universität Bayreuth, Bayreuther Bodenkundliche Berichte. Berichte Band 12, 133p.

Lebert, M. en Horn, R. (1991). A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil & Tillage Research*, 19: 275-286.

Lipiec, J. en Stepniewski, W. (1995). Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil & Tillage Research*, 35: 37-52.

Lipiec, J. en Hatano, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116: 107-136.

Nemes, A., Wösten, J.H.M., Lilly, A., Oude Voshaar, J.H. (1999). Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*, 90: 187-202.

Pietola, L., Horn, R. en Yli-Halla, M. (2005). Effects of trampling cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil & Tillage Research*, 82: 99-108.

Rawls, W.J. (1983). Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science*, 135(2): 123-125.

Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J. en Guérif, J. (1999). Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil & Tillage Research*, 51: 151-160.

- Spoor, G., Tijink, F.G.J. en Weiskopf, P. (2003). Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil & Tillage Research*, 73: 175-182.
- Tavernier, R. en Maréchal, R. (1962). Soil survey and soil classification in Belgium. *Transactions of a joint meeting of the International Society of Soil Science*, Palmerston North, New Zealand, November 13-22, 1962: 298-307.
- Tijink, F.G.J., Döll, H. en Vermeulen, G.D. (1995). Technical and economic feasibility of low ground pressure running gear. *Soil & Tillage Research*, 35: 99-110.
- Tijink, F.G.J., Vermeulen, G.D. en Koolen, A.J. (2006). Technische richtlijnen ter preventie van schadelijke bodemverdichting [on line]. Beschikbaar op: <http://www.irs.nl/ccmsupload/ccmspres/Technische%20richtlijnen%20ter%20preventie%20van%20schadelijke%20bodemverdichting.pdf> [14/06/2009].
- Trautner, A. (2003). On soil behaviour during field traffic. Doctoral thesis. Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 55p.
- Unger, P.W. en Kaspar, T.C. (1994). Soil compaction and root growth: a review. *Agronomy Journal*, 86: 759-766.
- Vande Kerkhof, G. en Muys, B. (2003). Bodemdecompactatie door regenwormintroductie rond laanbomen in urbaan gebied. Eindwerk, Katholieke Universiteit Leuven. Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Laboratorium voor Bos, Natuur en Landschap. 53p.
- Van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. en Horn, R. (2003). Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil & Tillage Research*, 73: 1-8.
- Van den Akker, J.J.H. (2004). SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil & Tillage Research*, 79: 113-127.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- Van Hove, J. (1969). Variatie van het organisch materiaal en van de C/N verhouding in de oppervlaktehorizonten van de bodems in laag- en midden België. Aggregaat voor het Hoger Onderwijs, Rijksuniversiteit Gent.
- Van Orshoven, J. en Maes, J. (1988). Aardewerk: Handleiding bij het Bodeminformatiesysteem. Faculteit der Landbouwwetenschappen K.U.Leuven, Leuven. 20p.
- Van Orshoven, J., Maes, J., Vereecken, H. en Feyen, J. (1991). A procedure for the statistical characterization of the units of the Belgian soil map. *Pedologie*, 41(3): 193-212.
- Van Orshoven, J., Deckers, J.A., Vandenbroucke, D. en Feyen, J. (1993). The completed database of Belgian soil profile data and its applicability in planning and management of rural land. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 28(2-3): 197-222.
- Van Orshoven, J. en Vandenbroucke, D. (1993). Handleiding bij AARDEWERK, databank van profielgegevens in België. Rapport nr 18A (Nederlands) en 18B (Frans). Instituut voor Land- en Waterbeheer, Katholieke Universiteit Leuven, België: 43p en 44p.
- Van Ranst, E., Thomasson, A.J., Daroussin, J., Hollis, J.M., Jones, R.J.A., Jамagne, M., King, D. en Vanmechelen, L. (1995). Elaboration of an extended knowledge database to interpret the 1:1,000,000 EU Soil Map for environmental purposes. In: *European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring*. D. King, R.J.A. Jones and A.J. Thomasson (eds.). EUR 16232 EN, p.71-84. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. en Darius, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148 (6): 389-403.
- Vereecken, H., Maes, J. en Feyen, J. (1990). Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil science*, 149 (1): 1-12.

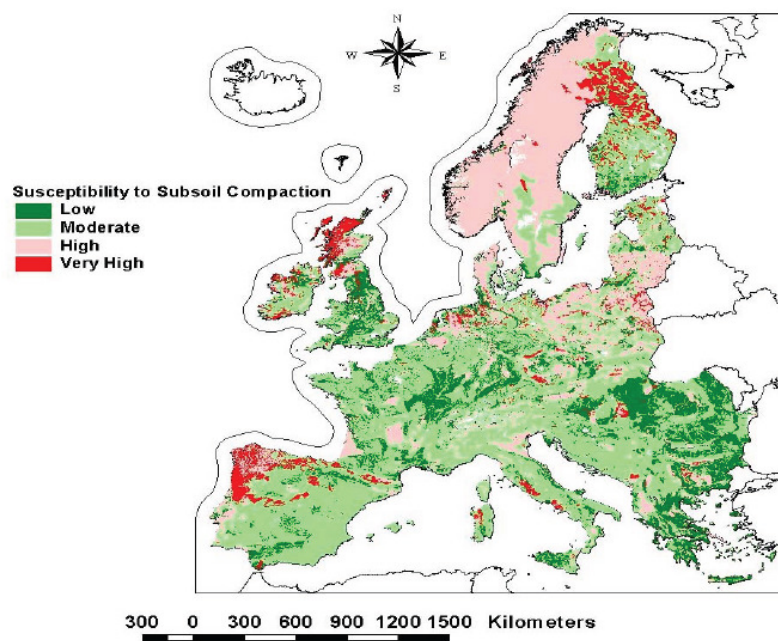
Whalley, W.R., Dumitru, E. en Dexter, A.R. (1995). Biological effects of soil compaction. *Soil & Tillage Research*, 35: 53-68.

Wikipedia (2008). Fingerprobe (Boden) [on line]. Beschikbaar op: [http://de.wikipedia.org/wiki/Fingerprobe_\(Boden\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Fingerprobe_(Boden)) [09/12/2008].

6 BIJLAGEN

6.1 Bijlage 1: Vergelijking van de in de literatuur beschikbare gevoeligheids- en risicokaarten voor bodemverdichting

6.1.1 Pan-Europe: Jones et al. (2003)

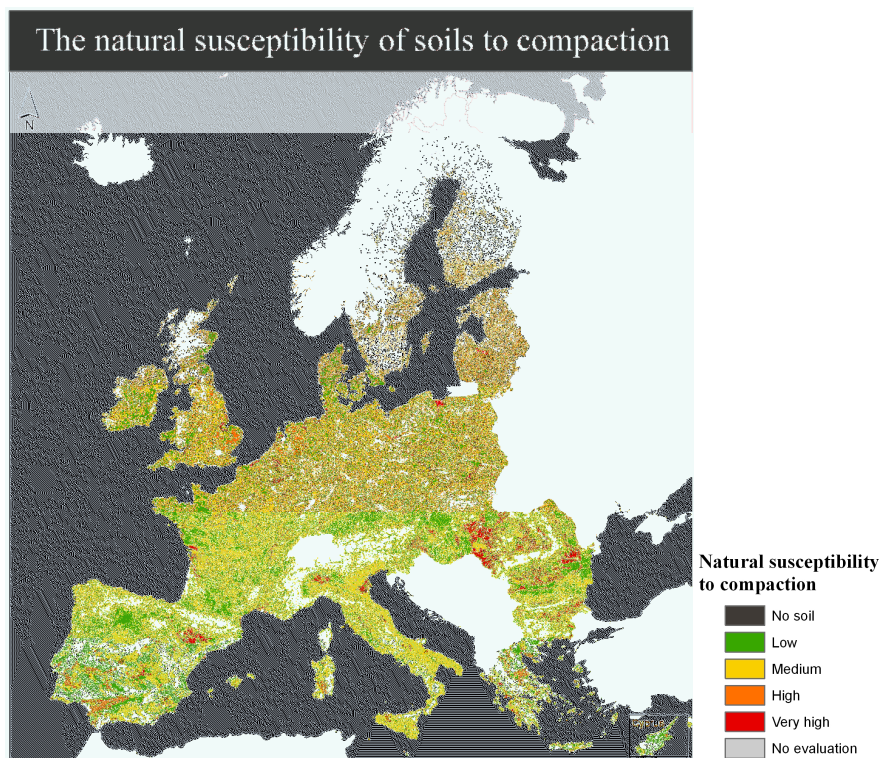


Titel	Provisional map of inherent susceptibility of subsoils in Europe to compaction, based on soil properties alone.
Referentie	Jones, R.J.A., Spoor, G. en Thomasson, A.J. (2003). Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. <i>Soil & Tillage Research</i> , 73: 131-143.
Ruimtelijk bereik	EU27 + NO, LI, CH, HR, BO, Servië, Albanië, Voormalige Joegoslavische Republiek Macedonië
Ruimtelijke resolutie	De Soil Geographical DataBase of Europe (SGDBE) die zelf gebaseerd is op de gedigitaliseerde bodemkaart van Europa (schaal 1:1.000.000) vormt de vertrekbasis van deze kaart. De legende-eenheid is de Soil Mapping Unit (SMU).
Procedure	Aan elke STU (Soil Typological Unit) is een gevoeligheidsklasse toegekend o.b.v. een PedoTransfer Rule (PTR). De - in oppervlakte - dominante gevoeligheidsklasse per SMU werd voorgesteld op de kaart.
Input voor de	- Textuurklasse van de ondergrond van de STU

PTR	- $PD = \rho + 0.009C$ waarbij PD staat voor pakkingsdensiteit in ton m^{-3} , ρ voor de bulkdensiteit eveneens in ton m^{-3} , en C voor het kleigehalte (gewichts%). ρ en C zijn bekomen door PTR's uit de PedoTransfer Rules Database (PTRDB), dewelke een set van PTR's (Van Ranst <i>et al.</i> , 1995) bevat die gevoed kunnen worden met STU-karakteristieken uit de SGDBE.																															
Output van de PTR	1 van 4 mogelijke ordinale klassen: (1) Low susceptibility (L), (2) Moderate susceptibility (M), (3) High susceptibility (H), (4) Very high susceptibility (VH)																															
Aard van de PTR	Inherente gevoeligheid (susceptibility) voor bodemverdichting op basis van textuur en pakkingsdensiteit ^a <table border="1" data-bbox="421 629 1347 1126"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Textuurklasse van de ondergrond van de dominante STU</th> <th colspan="3">Pakkingsdensiteit (t m^{-3})</th> </tr> <tr> <th>Laag (< 1.40)</th> <th>Medium (1.40-1.75)</th> <th>Hoog (> 1.75)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grof</td> <td>ZH</td> <td>H</td> <td>M^b</td> </tr> <tr> <td>Medium</td> <td>H</td> <td>M</td> <td>M</td> </tr> <tr> <td>Medium fijn</td> <td>M(H)</td> <td>M</td> <td>L^c</td> </tr> <tr> <td>Fijn</td> <td>M^d</td> <td>L^e</td> <td>L</td> </tr> <tr> <td>Zeer fijn</td> <td>M</td> <td>L</td> <td>L</td> </tr> <tr> <td>Organisch</td> <td>ZH</td> <td>H</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>^a Aan deze initiële gevoeligheidsclassificatie van Jones <i>et al.</i> werden later nog wijzigingen aangebracht via een opdeling binnen de textuurklassen 'medium' (in 'medium < 18% klei' en 'medium > 18% klei') en 'medium fijn' (in 'medium fijn < 18% klei' en 'medium fijn > 18% klei') (Chamen <i>et al.</i>, s.d.; Spoor <i>et al.</i>, 2003).</p> <p>^b Uitgezonderd natuurlijk gecompacteerd of zandig materiaal dat een zeer lage (L) gevoeligheid heeft.</p> <p>^c Deze bodems zijn al zeer verdicht.</p> <p>^d Deze pakkingsdensiteiten worden gewoonlijk alleen aangetroffen in recente alluviale bodems met bulkdichtheden van $0.8-1.0 \text{ t m}^{-3}$ of in de toplaag van bodems waar > 5% organische koolstof</p> <p>^e Fluvisols in deze categorie hebben een matige gevoeligheid.</p>	Textuurklasse van de ondergrond van de dominante STU	Pakkingsdensiteit (t m^{-3})			Laag (< 1.40)	Medium (1.40-1.75)	Hoog (> 1.75)	Grof	ZH	H	M ^b	Medium	H	M	M	Medium fijn	M(H)	M	L ^c	Fijn	M ^d	L ^e	L	Zeer fijn	M	L	L	Organisch	ZH	H	
Textuurklasse van de ondergrond van de dominante STU	Pakkingsdensiteit (t m^{-3})																															
	Laag (< 1.40)	Medium (1.40-1.75)	Hoog (> 1.75)																													
Grof	ZH	H	M ^b																													
Medium	H	M	M																													
Medium fijn	M(H)	M	L ^c																													
Fijn	M ^d	L ^e	L																													
Zeer fijn	M	L	L																													
Organisch	ZH	H																														
Positie van Vlaanderen	Overwegend 'Moderate'. Noorder- en Zuiderkempem zijn 'High'. Aangezien in de Kempen een grove textuur (zand) mag worden verwacht, volgt uit bovenstaande tabel dat de packing density klaarblijkelijk als laag is beoordeeld. <div data-bbox="684 1722 1078 1998" data-label="Figure"> </div>																															

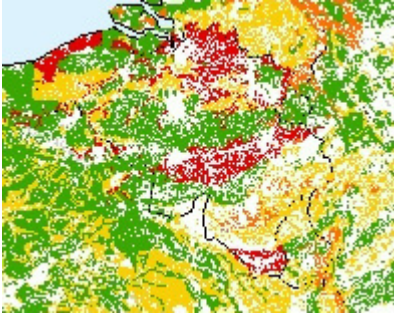
Beoordeling	<p>Deze kaart wordt door JRC als 'provisional' beschouwd (Soil Atlas of Europe, p. 115).</p> <p>Belangrijk om op te merken is het feit dat de inherente gevoeligheid voor compactie niet mag verward worden met de actuele gevoeligheid, dewelke de resultante is van de inherente gevoeligheid gecombineerd met gegevens over de vochtstatus en het gebruik van de betreffende bodem. Vertrekkende van de gevoeligheidsclassificatie (susceptibility) werd een nieuwe gevoeligheidsclassificatie (vulnerability) uitgewerkt, waarin ook de vochttoestand van de bodem in rekening wordt gebracht.</p>
-------------	--

6.1.2 EU27: JRC (2008)

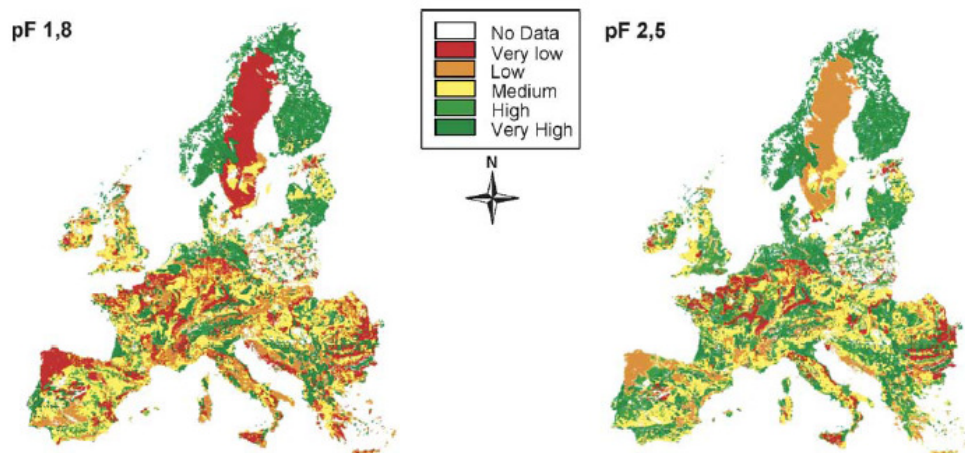


Titel	Map of the natural susceptibility of soils to compaction
Referentie	JRC (Joint Research Centre of the European Commission) (2008). Maps for Soil Susceptibility to Compaction [on line]. Beschikbaar op: http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/library/themes/compaction/Data.html [06/12/08] (Beata Houskova)
Ruimtelijk bereik	EU27
Ruimtelijke resolutie	De Soil Geographical DataBase of Europe (SGDBE) die zelf gebaseerd is op de gedigitaliseerde bodemkaart van Europa (schaal 1:1.000.000) vormt de vertrekbasis van deze kaart. De kaarteenheden zijn de SMU. Aan elke STU (Soil Typological Unit) binnen de SMU is een gevoeligheidsklasse toegekend. De -in oppervlakte- dominante gevoeligheidsklasse per SMU werd behouden en omgezet in een 1 km

	* 1 km raster.
Procedure	Aan elke STU wordt een susceptibility-klasse toegekend o.b.v. een PedoTransfer Rule (PTR). De -in oppervlakte- dominante gevoeligheidsklasse per SMU werd behouden en omgezet in een 1 km * 1 km raster.
Input voor de PTR	<p>De STU-attributen uit de SGDB die in aanmerking genomen worden voor de bepaling van de natuurlijke gevoeligheid voor verdichting zijn de volgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> - AGLIM1: de belangrijkste beperking voor landbouwkundige exploitatie van de STU - AGLIM2: de tweede meest beperkende factor voor landbouwkundige exploitatie van de STU - WRB-ADJ1: eerste 'bodem-adjectiefcode' (soil adjective code) van de STU uit de 'World Reference Base' (1998) - WRB-FULL: volledige bodemcode van de STU uit de 'World Reference Base' (1998) - TEXT-SRF-DOM: dominante textuurklasse aan het bodemoppervlak van de STU - TEXT-SRF-SEC: secundaire textuurklasse aan het bodemoppervlak van de STU - TEXT-SUB-DOM: dominante textuurklasse van de ondergrond van de STU - TEXT-SUB-SEC: secundaire textuurklasse van de ondergrond van de STU - TEXT-DEP-CHG: diepteklasse tot een texturele wijziging van de dominante en/of secundaire STU. - WR: dominerende jaarlijkse gemiddelde bodemwaterregime-klasse van het bodemprofiel van de STU <p>Verder werden nog een aantal 'hulp-attributen' in rekening gebracht:</p> <ul style="list-style-type: none"> - IL: de aanwezigheid van een impermeabele laag in het bodemprofiel van de STU - ROO: diepteklasse van een obstakel tot de wortels in de STU - WM1: de normale aanwezigheid en het doel van een bestaand water management-systeem - USE-DOM: dominant landgebruik van de STU - USE-SEC: secundair landgebruik van de STU
Output van de PTR	1 van 6 mogelijke ordinale klassen: (1) Low susceptibility to compaction, (2) Medium susceptibility, (3) High susceptibility, (4) Very high susceptibility, (5) No soil (Waterlichamen, gletsjers en dagzomende rotsen), (6) No evaluation (bodems gelocaliseerd in steden en bodems die verstoord werden door de mens of door moerasvorming)
Aard van de PTR	<ol style="list-style-type: none"> 1. Selectie van de relevant geachte STU-attributen uit de SGDB en CORINE Land Cover 2000. 2. Expert-beoordeling van de bijdrage van elk van deze parameters aan de gevoeligheid voor bodemverdichting als (1) hoog, (2) matig of (3) laag. 3. Combinatie van de beoordeelde attributen in een globale beoordeling o.b.v. de wet van het minimum, d.w.z. de meest negatieve beoordeling (het attribuut met de grootste bijdrage aan

	<p>de gevoeligheid) bepaalt de finale beoordeling. Wanneer echter alle geselecteerde parameters een hoge gevoeligheid voor verdichting vertonen, krijgt de bodem een zeer hoge gevoeligheid voor verdichting toegewezen; wanneer alle geselecteerde parameters een lage gevoeligheid voor verdichting vertonen, wordt, conform de wet van het minimum, de bodem als met lage gevoeligheid beschouwd.</p>
<p>Positie van Vlaanderen</p>	<p>Zeer gevarieerd: Polders, Condros en Noorder- en Zuiderkempfen: Very high susceptibility. Leemstreek: Low; Ardennen: Medium</p> 
<p>Beoordeling</p>	<p>Deze kaart toont de natuurlijke (inherente) gevoeligheid van landbouwgronden voor verdichting indien deze aan verdichting zouden blootgesteld worden. Het gaat zowel over de bovengrond als over de diepere bodemlagen. Het is geen kaart van de actuele compactietoestand.</p> <p>JRC benadrukt dat de gevoeligheid van een bodem voor verdichting hoofdzakelijk bepaald wordt door de textuur, vooral dan door de kleifractie. Hoe hoger de kleifractie, hoe gevoeliger de bodem voor compactie. De compactiegevoeligheid neemt volgens JRC als volgt toe: sandy (minst gevoelig) – loamy sandy – sand loamy – loamy – clay loamy – loam clayey – clayey soils – clays (meest gevoelig voor natuurlijke verdichting). Dit blijkt niet consistent uit deze kaart.</p>

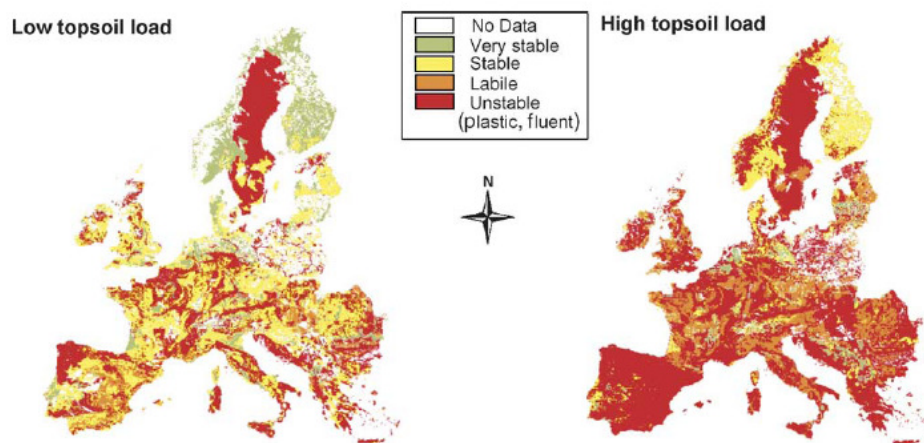
6.1.3 Pan Europe: Horn et al. (2005a) (1/2)



Titel	Berekende waarden voor de precompressiestress (in kPa) bij een pF van 1.8 en 2.5 voor de diepere bodemlagen (30-60 cm)
Referentie	Horn, R., Fleige, H., Richter, F.-H., Czyz, E.A., Dexter, A., Diaz-Pereira, E., Dumitru, E., Enarache, R., Mayol, F., Rajkai, K., de la Rosa, D. en Simota, C. (2005). SIDASS project Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. <i>Soil & Tillage Research</i> , 82: 47-56.
Ruimtelijk bereik	EU27 + NO, LI, CH, HR, BO, Servië, Albanië, Voormalige Joegoslavische Republiek Macedonië
Ruimtelijke resolutie	De Soil Geographical DataBase of Europe (SGDBE) die zelf gebaseerd is op de gedigitaliseerde bodemkaart van Europa (schaal 1:1.000.000) vormt de vertrekbasis van deze kaart. De kaarteenheid is de SMU.
Procedure	Voor elke STU werd een PCS-waarde berekend d.m.v. pedotransferfuncties (PTF's). De -in oppervlakte- dominante PCS-klasse werd toegekend aan de SMU.
Input voor de PTF	<ul style="list-style-type: none"> - ρ_t: volumedichtheid (Mg m^{-3}) - org: organisch materiaal (gewichts%) - Lk: luchtcapaciteit (volume%) - kf: verzadigde hydraulische conductiviteit (10^3 cm s^{-1}) - TW: niet-beschikbaar water-capaciteit (volume%) - nFK: beschikbaar water-capaciteit (volume%) - c: cohesie (kPa) - γ: interne frictiehoek ($^\circ$)
Output van de PTF	1 van 6 mogelijke ordinale klassen voor PCS: <30 kPa, Very low; 30-60 kPa, Low; 60-90 kPa, Medium; 90-120 kPa, High; 120-150 kPa, Very high; No data
Aard van de PTF	PTF's voor PCS uit Horn en Fleige (2003) die overgenomen werden uit Lebert en Horn (1991). Deze PTF's zijn opgesteld o.b.v. een set van oedometer-metingen (uniaxiale compactieproef) uitgevoerd op stalen van horizonten van meer dan 180 bodemprofielen, hoofdzakelijk in Duitsland, maar aangevuld met verscheidene locaties in de rest van Europa.

Positie van Vlaanderen	Moeilijk visueel te bepalen
Beoordeling	Dit is een PCS-kaart van de diepere bodemlagen (30-60 cm) bij een gegeven vochtspanning waarbij de PTF's van Lebert en Horn werden toegepast op de SGDB. De input-variabelen voor deze PTF's zijn afgeleid uit de bodemprofieldata van de EU o.b.v. kwalitatieve en kwantitatieve schattingen.

6.1.4 Pan Europe: Horn et al. (2005b) (2/2)

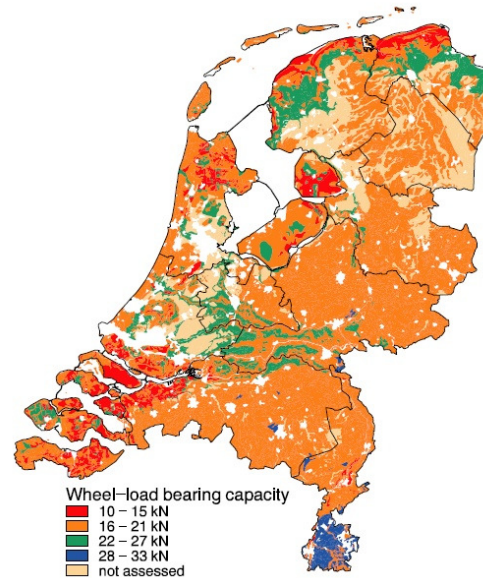


Titel	Verhouding van de precompressiestress tot de op het bodemoppervlak uitgeoefende actuele druk bij een pF van 1,8 voor de toplaag van de bodems (0-30 cm) van Europa bij lage belasting (= een bandenspanning van 60 kPa + een belasting van de achterste as van 17 kN) en bij hoge belasting (= bandendruk van 200 kPa + asbelasting achteraan van 200 kN). Klassificatie van de effectieve bodemsterkte via de ratio precompressiestress over uitgeoefende bodemdruk.
Referentie	Horn, R., Fleige, H., Richter, F.-H., Czyz, E.A., Dexter, A., Diaz-Pereira, E., Dumitru, E., Enarache, R., Mayol, F., Rajkai, K., de la Rosa, D. en Simota, C. (2005). SIDASS project Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. Soil & Tillage Research, 82: 47-56.
Ruimtelijk bereik	EU27 + NO, LI, CH, HR, BO, Servië, Albanië, Voormalige Joegoslavische Republiek Macedonië
Ruimtelijke resolutie	De Soil Geographical DataBase of Europe (SGDBE) die zelf gebaseerd is op de gedigitaliseerde bodemkaart van Europa (schaal 1:1.000.000) vormt de vertrekbasis van deze kaart. De kaartenheid is de SMU.
Procedure	Voor elke STU werd berekend: (i) een PCS-waarde d.m.v. pedotransferfuncties (PTF's) en (ii) de ratio tussen deze PCS en de op het bodemoppervlak uitgeoefende actuele druk (berekend a.d.h.v. bandendruk en asbelasting). De -in oppervlakte- dominante ratio-

	klasse werd toegekend aan de SMU
Input voor de PTF	<ul style="list-style-type: none"> - ρ_t: volumedichtheid (Mg m^{-3}) - ρ_{org}: organisch materiaal (gewichts%) - L_k: luchtcapaciteit (volume%) - k_f: verzadigde hydraulische conductiviteit (10^3 cm s^{-1}) - TW: niet-beschikbaar water-capaciteit (volume%) - n_{FK}: beschikbaar water-capaciteit (volume%) - c: cohesie (kPa) - γ: interne frictiehoek ($^\circ$) - bandenspanning, asbelasting
Output van de procedure	1 van 5 mogelijke ordinale stabiliteitsklassen: (1) Very stable ($>1,5$; elastische vervorming), (2) Stable (1,5-1,2), (3) Labile (1,2-0,8), (4) Unstable (Plastic/Fluent; $<0,8$; additionele plastische vervorming), (5) No data
Aard van de PTF's	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vooreerst werd voor elke STU een PCS-waarde berekend d.m.v. de pedotransferfuncties (PTF's) uit Horn en Fleige (2003) die overgenomen werden uit Lebert en Horn (1991). Deze PTF's zijn gebaseerd op oedometer-metingen (uniaxiale compactieproef) uitgevoerd op bodemstalen uit horizonten van meer dan 180 bodemprofielen, hoofdzakelijk verzameld in Duitsland, doch aangevuld met verscheidene locaties in de rest van Europa. 2. Vervolgens werd de op het bodemoppervlak uitgeoefende actuele druk berekend, en dit zowel bij lage belasting (bandenspanning van 60 kPa + asbelasting achteraan van 17 kN) als hoge belasting (bandenspanning van 200 kPa + asbelasting achteraan van 200 kN). Deze druk werd berekend als de verhouding van wiellast en contactoppervlak (wiellast / contactoppervlak), waarbij het contactoppervlak werd gedefinieerd als $\text{contactoppervlak} = (0,9 \times \text{asbelasting}) / \text{bandenspanning}$. Deze definitie stoelt op de aanname dat de zijanten van een band ongeveer 10% van de last dragen, terwijl de ingesloten lucht in de band de overige 90% van de last draagt. 3. Tenslotte werd de verhouding gemaakt van de berekende PCS tot de berekende druk, uitgeoefend op het bodemoppervlak. Deze verhouding werd ingedeeld in de hoger vermelde klassen.
Positie van Vlaanderen	<p>Bij lage belasting:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Leemstreek = Unstable (Plastic/Fluent) - Noorder- en Zuiderkempen = Very stable - Rest van Vlaanderen = Stable <p>Bij hoge belasting:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kempen en Zandstreek = Very stable - Rest van Vlaanderen = Unstable (Plastic/Fluent)
Beoordeling	<p>De PCS-kaart voor toplaag van de bodem (0-30 cm) wordt vertaald naar een 'stabiliteitskaart' die de stabiliteit aangeeft voor de toplaag indien deze wordt onderworpen aan een lage, resp. hoge belasting.</p> <p>Bij lage belasting (d.w.z. lage asbelasting in combinatie met lage bandendrukken) zijn de regio's met meer lemige en kleiïge bodems als meest gevoelig voor verdichting/vervorming beoordeeld. In het geval van hoge belastingen (d.w.z. hoge bandendruk + hoge asbelasting achteraan) zijn de resulterende mechanische drukken meestal hoger</p>

dan de PCS, uitgezonderd in zandige bodemregio's.

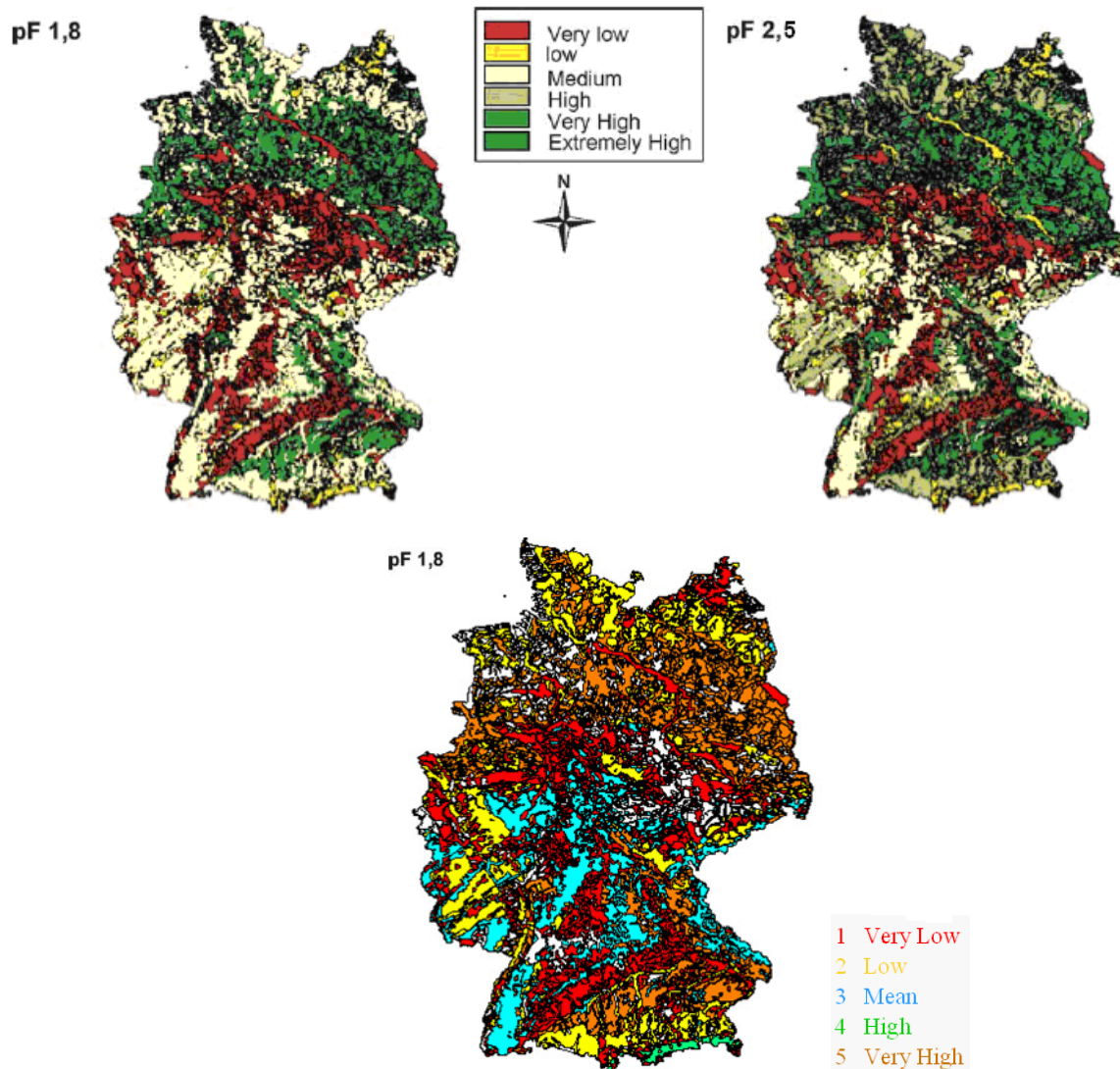
6.1.5 Nederland: van den Akker (2004)



Titel	Kaart van de maximaal toegelaten wiellast voor de diepere bodemlagen in Nederland, bij akkerbouw, bij een zuigspanning van 30 kPa (pF 2,5) en bij gebruik van banden met een breedte van 0,50 m en een bandenspanning van 80 kPa
Referentie	van den Akker, J.J.H. (2004). SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. Soil & Tillage Research, 79: 113-127.
Ruimtelijk bereik	Nederland
Ruimtelijke resolutie	De kaarteenheden van de bodemkaart van NL op schaal 1:250.000
Procedure	<p>Aan elke kaarteenheid is een 'wheel load bearing capacity-klasse' toegekend o.b.v. de vergelijking van de geschatte 'structural strength' (PCS) en de 'shear strength' van de bodem onder de bouwvoor bij pF 2,5 met de verticale, resp. horizontale druk uitgeoefend door machines met banden van 0.5 meter breed en een bandendruk van 80 kPa. Deze drukken zijn berekend met het SOCOMO-model</p> <p>Eerst wordt aan elke kaarteenheid een 'structural strength' waarde (PCS-waarde) toegekend (zand = hoog, klei = laag). Deze waarden zijn berekend met de PTF's uit Horn en Fleige (2003) die overgenomen werden uit Lebert en Horn (1991). Vervolgens wordt met het SOCOMO-model de gegeven belasting aan het bodemoppervlak doorgerekend om de 'shear strength', de horizontale en verticale spanning op de bepaalde diepte te berekenen. 'Shear strength' en 'structural strength' (PCS) worden dan vergeleken met horizontale, resp. verticale spanning. Indien één of beide grenswaarden</p>

	overschreden worden is de ingestelde belasting niet tolereerbaar en is de wheel load bearing capacity van de ondergrond overschreden.
Input voor SOCOMO en PTF voor PCS	<ul style="list-style-type: none"> - Wiellast (kgf) - Concentratie-factor (dimensieloos) - Uniform verdeelde belasting over volledige oppervlak (kgf/cm²) - Volumegewicht (g/cm³) volgens diepte - Matrix met verticale puntladingen (kgf) in elk gridpunt in bodem/band interface - Matrix met horizontale puntladingen (kgf) in elk gridpunt in bodem/band interface - Interne frictiehoek (°) - Cohesie (kPa) - PCS (kPa) <p>De PCS dient eerst berekend te worden via PTF's. Volgende variabelen dienen als input voor deze PTF's:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ρ_t: volumedichtheid (Mg m⁻³) - org: organisch materiaal (gewichts%) - Lk: luchtcapaciteit (volume%) - kf: verzadigde hydraulische conductiviteit (10³ cm s⁻¹) - TW: niet-beschikbaar water-capaciteit (volume%) - nFK: beschikbaar water-capaciteit (volume%) - c: cohesie (kPa) - γ: interne frictiehoek (°)
Output van de procedure	1 van 5 mogelijke ordinale wheel load bearing klassen: (1) 10-15 kN, (2) 16-21 kN, (3) 22-27-kN, (4) 28-33 kN, (5) Not assessed
Aard van de PTF	Deze PTF's zijn gebaseerd op oedometer-metingen (uniaxiale compactieproef) uitgevoerd op bodemstalen uit horizonten van meer dan 180 bodemprofielen, hoofdzakelijk verzameld in Duitsland, doch aangevuld met verscheidene locaties in de rest van Europa.
Positie van Vlaanderen	Het Nederlandse zandgebied aan de overkant van de grens met de Kempen in Vlaanderen bevindt zich in klasse 2 (16-21 kN), d.w.z. heeft een lage bearing capacity (hoge gevoeligheid/risico op verdichting).
Beoordeling	<p>Het zandgebied heeft een hoge 'structural strength' (PCS) maar toch een lage bearing capacity. Dit betekent dat de 'shear strength' de beperkende factor is. Belasting leidt tot 'shear stress' die snel hoger is dan de 'shear strength'. Dit laatste wordt niet bevestigd door de SOCOMO-modelconcepten (van den Akker, 2004).</p> <p>Opmerking: via www.bodemdata.nl kan afgeleid worden dat <u>de diepere lagen</u> van de bodems in het Nederlandse zandgebied overwegend eveneens zandig zijn.</p>

6.1.6 Duitsland: Horn et al. (2005)



Titel	Boven: berekende waarden voor de PCS (in kPa) bij een pF van 1.8 en 2.5 voor representatieve toplagen (0-30 cm) van Duitse bodems; Onder: berekende waarden voor de PCS (in kPa) bij een pF van 1.8 voor de diepere bodemlagen (30-60 cm) van Duitsland.
Referentie	Horn, R., Fleige, H., Richter, F.-H., Czyz, E.A., Dexter, A., Diaz-Pereira, E., Dumitru, E., Enarche, R., Mayol, F., Rajkai, K., de la Rosa, D. en Simota, C. (2005). SIDASS project Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. <i>Soil & Tillage Research</i> , 82: 47-56.
Ruimtelijk bereik	DE
Ruimtelijke resolutie	De bodemkaart van Duitsland op schaal 1:1.000.000 vormt de vertrekbasis van deze kaart. Per kaarteenheden zijn profielputbeschrijvingen en bijhorende analyses voor representatieve profielen beschikbaar.

Procedure	Voor elke bodemkaartenheid werd een PCS-waarde berekend d.m.v. pedotransferfuncties (PTF's).
Input voor de PTF	<ul style="list-style-type: none"> - ρ_t: volumedichtheid (Mg m^{-3}) - org: organisch materiaal (gewichts%) - Lk: luchtcapaciteit (volume%) - kf: verzadigde hydraulische conductiviteit (10^3 cm s^{-1}) - TW: niet-beschikbaar water-capaciteit (volume%) - nFK: beschikbaar water-capaciteit (volume%) - c: cohesie (kPa) - γ: interne frictiehoek ($^\circ$)
Output van de PTF	1 van 6 mogelijke ordinale PCS-klassen: (1) Very low (< 30 kPa), (2) Low (30-60 kPa), (3) Medium (60-90 kPa), (4) High (90-120 kPa), (5) Very high (120-150 kPa), Extremely high (>150)
Aard van de PTF	Deze PTF's zijn gebaseerd op oedometer-metingen (uniaxiale compactieproef) uitgevoerd op bodemstalen uit horizonten van meer dan 180 bodemprofielen, hoofdzakelijk verzameld in Duitsland, doch aangevuld met verscheidene locaties in de rest van Europa.
Positie t.o.v. van België en Nederland	Aan de grens met België bevinden de Duitse PCS-waarden zich in de Medium-klasse (60-90 kPa). Meer noordwaarts, aan de grens met Nederland vallen de Duitse PCS-waarden in de Low (30-60 kPa) en Very low (<30 kPa) PCS-klassen. De textuurklasse in deze zones is niet gekend.
Beoordeling	<p>PCS-kaarten voor toplaag van de bodem (0-30 cm), resp. de diepere ondergrond (30-60 cm).</p> <p>De PCS-klassen in de verschillende regio's van Duitsland weerspiegelen duidelijk de verschillende bodemtypes en bodemsamenstellingen. Regio's met leembodems van glaciële oorsprong in Noord-Duitsland vertonen een Low tot Medium sterkte bij pF 1.8. Bodems in de loess-regio in Noord-Duitsland zijn bij dezelfde pF zelfs zeer gevoelig (Very low PCS) voor vervorming. Regio's met zandbodems, zowel in het noorden als in het zuiden van Duitsland vallen in de PCS-klassen Medium tot Extremely high en zijn dus weinig gevoelig voor vervorming. Bij hogere pF (drogere toestand) is de PCS hoger.</p>

6.2 Bijlage 2: Overzicht van de bodemzones en van de bodemzonegroeperingen op de verschillende niveaus van Aardewerk-BIS

1.1. Niveau 1: De bodemzone

- 01 Kustduinen
- 02 Recente Zeepolders en Braakmanpolders
- 03 Scheldepolders
- 04 Zeepolders, Middelland
- 05 Zeepolders, Oudland
- 06 Moeren
- 07 Vlaams Zandgebied (Oostelijk Deel); Haacht - Tremelo en Hasselt - Zonhoven
- 08 Fijnzanden van de Vlaamse Vallei
- 09 Fijnzanden ten Westen van de Vlaamse Vallei en Fijnzanden tussen Leie en Schelde
- 10 Streek van Beernem
- 11 Noorderkempen
- 12 Zuiderkempen
- 13 Oosterkempen
- 14 Oost- en West-Vlaamse Leemzanden (Waasland uitgezonderd)
- 15 Leemzanden van Waasland, Antwerpen en Brabant (Hageland uitgezonderd)
- 16 Leemzanden van Noord-Hageland
- 17 Leemzanden van de Maas
- 18 Licht Zandleem, westelijk van de Schelde; uitgezonderd gedeelte Huize-Kruishoutem
- 19 Licht Zandleem van het Centrum (Wetteren-lebbeke-Tisselt-Weerde-Wespelaar) en van de streek van Huize en Kruishoutem
- 20 Licht Zandleem van Waasland en Kontich
- 21 Licht Zandleem van Rummen en Zuid-Limburg
- 22 Noordelijk Hageland
- 23 Centraal Hageland
- 24 Zandleem van Hoogstade
- 25 Zandleem Westelijk van de Leie (Hoogstade uitgezonderd)
- 26 Zandleem van het Centrum, Westelijk van de Zenne; uitgezonderd het zuidelijk gebied met invloed van het Landeniaan
- 27 Zandleem van het Centrum, Oostelijk van de Zenne
- 28 Zandleem van het Zuidelijk Gebied, met invloed van het Landeniaan (Kaartbladen Doornik (124E) en Antoing (125W) inbegrepen)
- 29 Lichte Zandleemgronden van de Hainestreek
- 30 Normale Oostelijke Leemstreek (Kaartblad Gembloux (130E) en noordoosten ervan)
- 31 Normale Westelijke Leemstreek (Hertaing-Antoing; Leuze-Lens-Lessines; evenals het Oost-Vlaamse en Brabantse gebied)
- 32 Normale Zuidelijke Leemstreek (tussen kaartbladen Roisin (161W) en Chastre-Villeroux -Blanmont (130W))
- 33 Haspengouwse Leemstreek
- 34 Vochtige Leemstreek, noord en west (noordelijk van de Hainestreek)
- 35 Vochtige Leemstreek, zuid en oost

- 36 Zuid-Brabantse Leemstreek
- 37 Zuid-Vlaams Heuvelland en 2 eilandjes op het kaartblad Nieuwkerke (095W)
- 38 Krijt-Leemstreek
- 39 Terrassen van Samber en Maas
- 40 Geul van Samber en Maas
- 65 Beekalluvium ten noorden van de Samber en Maasvall
- 66 Rivieralluvium ten noorden van de Samber en Maasvallei
- 71 Zandgronden van de Hainestreek
- 72 Landduinen; Stuifzandgronden - Noorderkempen
- 73 Landduinen; Stuifzandgronden - Zuiderkempen
- 74 Landduinen; Stuifzandgronden - Rest van België

1.2. Niveau 2: De bodemzonegroepering

Tussen haakjes worden de korresponderende bodemzones aangegeven

- 01 Kustduinen (01)
- 02 Recente Zeepolders en Braakmanpolders (02)
- 03 Scheldepolders (03)
- 04 Zeepolders, Middelland (04)
- 05 Zeepolders, Oudland (05)
- 06 Moeren (06)
- 07 Vlaams zandgebied, ten westen en ten oosten van de Vlaamse vallei, en fijnzanden tussen Leie en Schelde (07,09)
- 08 Fijnzanden van de Vlaamse vallei (08)
- 09 Zanden van Beernem (10)
- 10 Noordelijke, zuidelijke en oostelijke kempen en landduinen in de kempen (11,12,13,72,73)
- 11 Oost- en West-Vlaamse leemzanden en leemzanden van Antwerpen, Waasland en Brabant (Hageland uitgezonderd) (14,15)
- 12 Leemzanden van Noord-Hageland, Noord en Centraal Hageland (16,22,23)
- 13 Leemzanden van de Maas en terrassen van Samber en Maas (17,39)
- 14 Licht zandleem, westelijk van de Schelde en licht zandleem van het centrum (Wetteren-lebbeke-Tisselt-Weerde-Wespelaar) (18,19)
- 15 Licht zandleem van Waasland en Kontich en van Rummen en Zuid-Limburg (20,21)
- 16 Zandleem van Hoogstade, westelijk van de Leie en van het centrum, westelijk van de Zenne, inclusief het zuidelijk gebied met invloed van het Landeniaan (24,25,26,28)
- 17 Zandleem van het centrum, oostelijk van de Zenne (27)
- 18 Lichte zandleemgronden en zandgronden van de Haine-streek (29,71)
- 19 Normale oostelijke en zuidelijke en vochtige zuidoostelijke leemstreek (30,32,35)
- 20 Normale westelijke en vochtige noordwestelijke leemstreek (31,34)
- 21 Haspengouwse leemstreek (33)
- 22 Zuid-Brabantse leemstreek (36)
- 23 Zuid-Vlaams heuvelland (37)

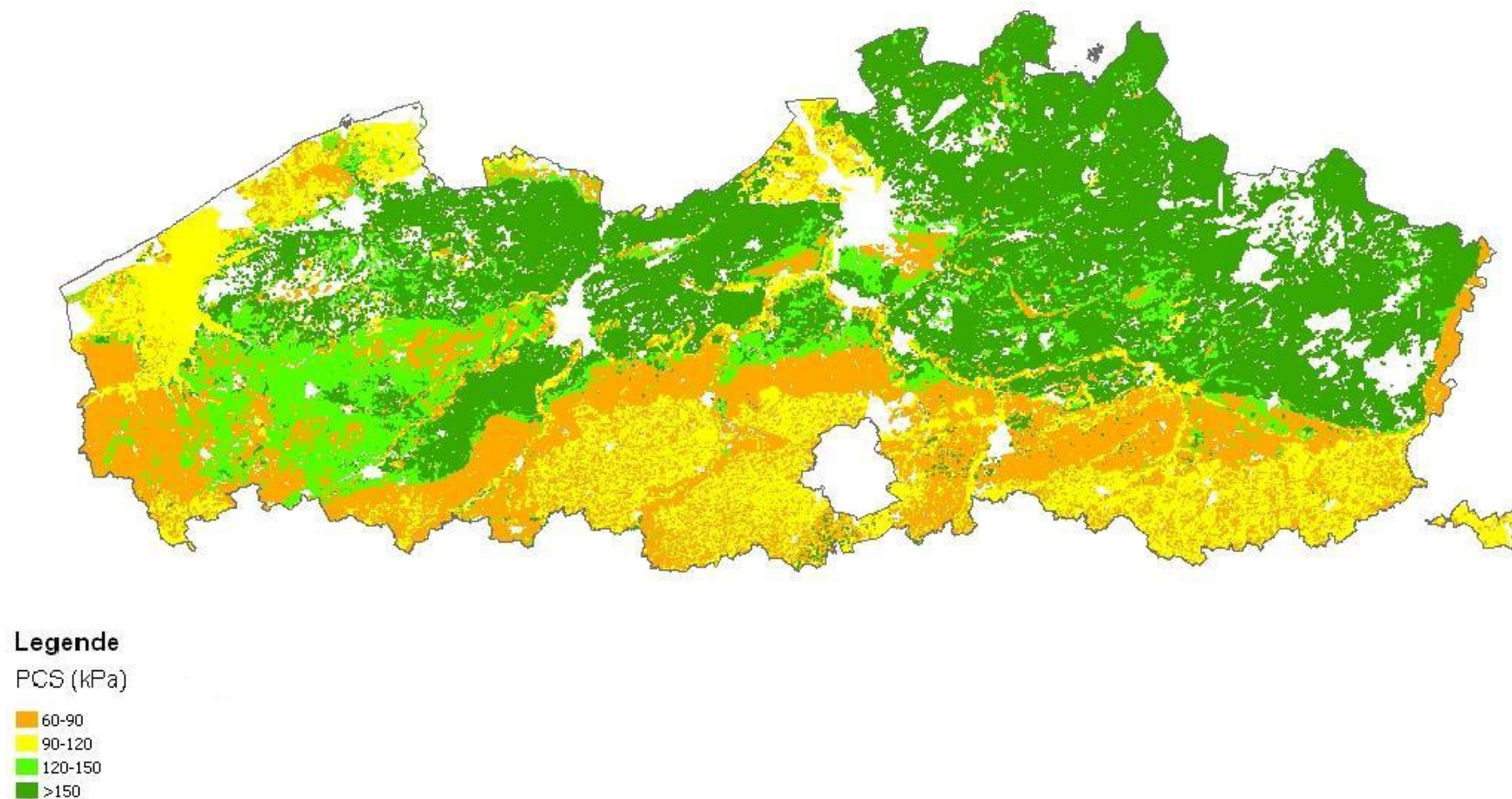
- 24 Krijt-leemstreek (38)
- 25 Geul van Samber en Maas (40)
- 26 Beekalluvia (65)
- 27 Rivieralluvia (66)
- 28 Overige landduinen (74)

1.3. Niveau 3: De bodemzonegroepering

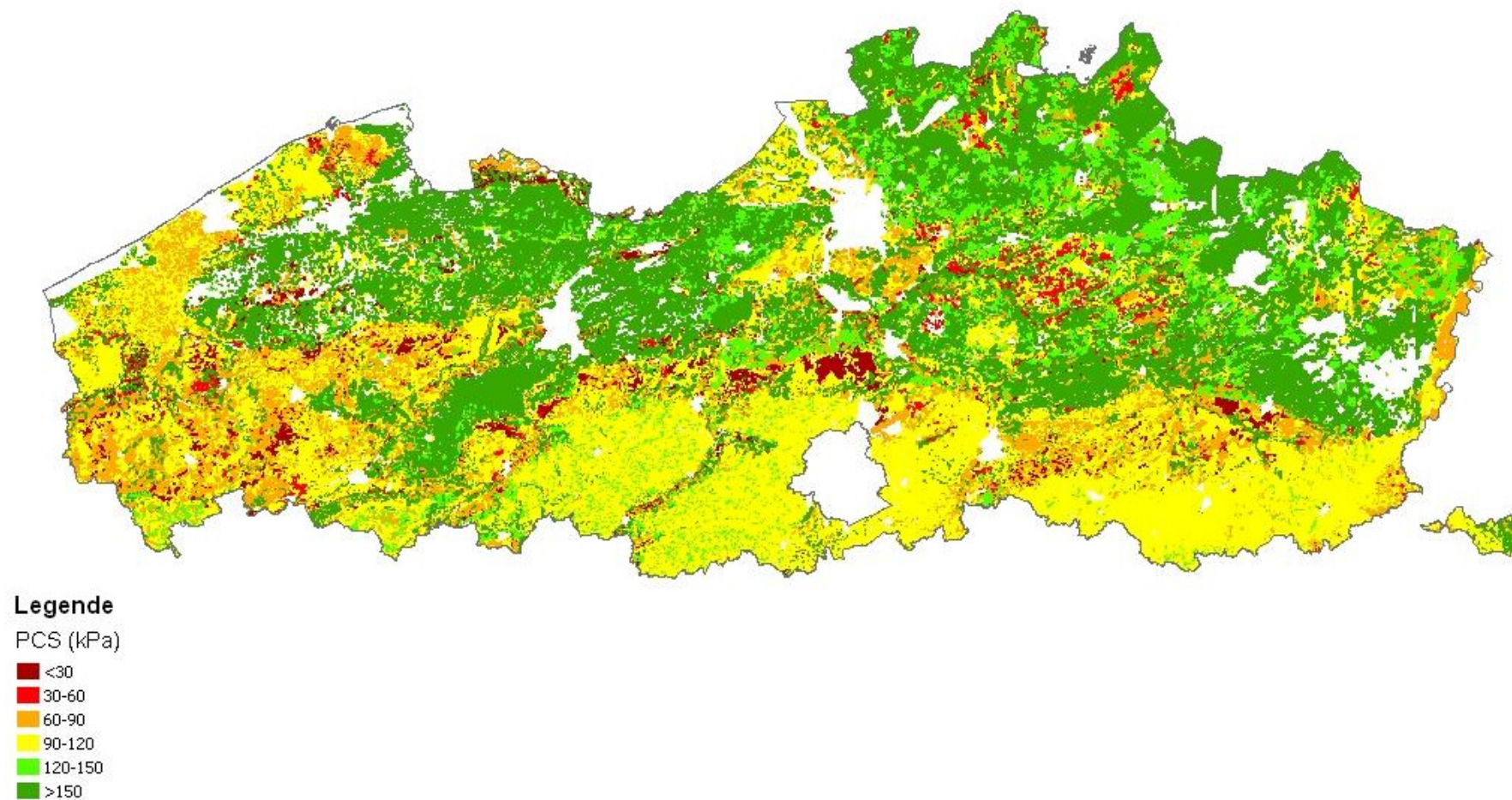
Tussen haakjes worden de korresponderende bodemzones aangegeven.

- 01 Polders (02,03,04,05,06)
- 02 Niet-Polders (overige zones)

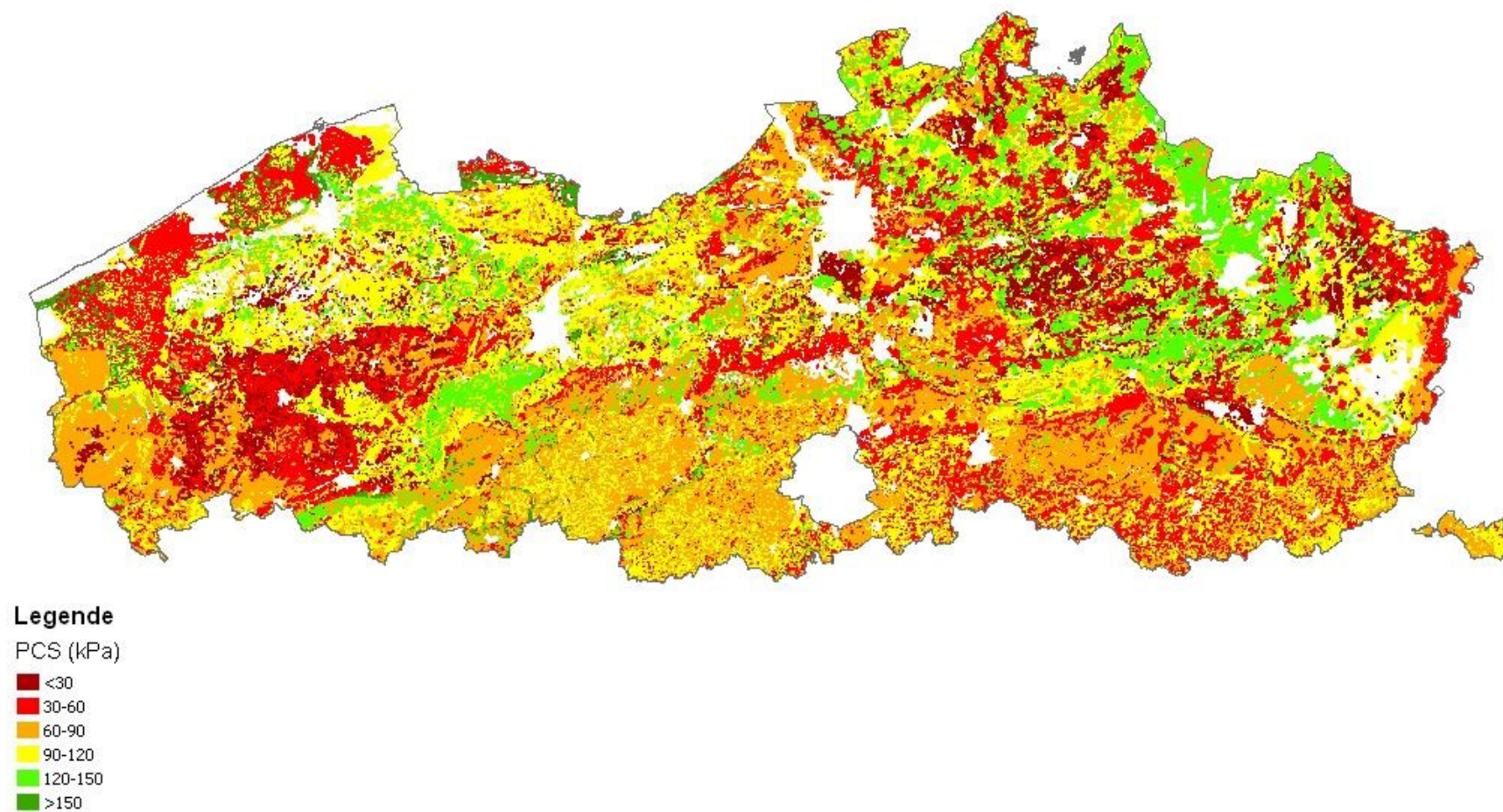
6.3 Bijlage 3: Gevoeligheidskaarten voor bodemverdichting in Vlaanderen



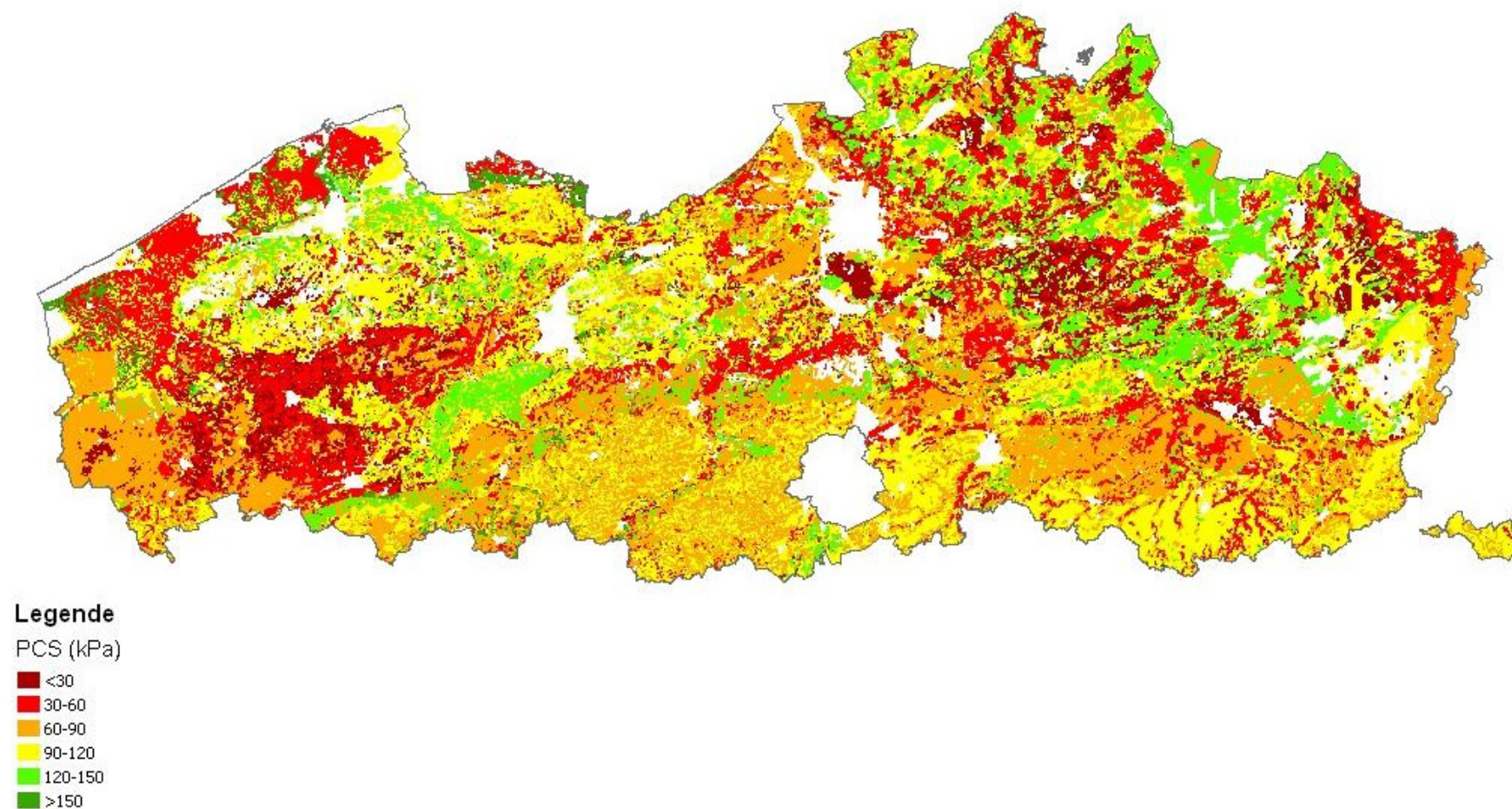
Figuur 6-1 Gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de toegewezen waarde van de structurele sterkte (PCS) bij pF 2,5 van het meest waarschijnlijke horizont per kaartenheid waardoorheen het 41 cm dieptevlak loopt.



Figuur 6-2 Gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen uitgedrukt als de berekende waarde van de structurele sterkte (PCS) bij pF 2,5 van het meest waarschijnlijke horizont per kaarteenhed waardoorheen het 41 cm-dieptevlak loopt. De kaart werd ontwikkeld door het doorrekenen van de PTF's van Lebert en Horn.



Figuur 6-3 Gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen uitgedrukt als de berekende waarde van de structurele sterkte (PCS) bij pF 1,8 van het meest waarschijnlijke horizont per kaarteenheden waarvoor het 41 cm-dieptevlak loopt. De kaart werd ontwikkeld door het doorrekenen van de PTF's van Lebert en Horn.

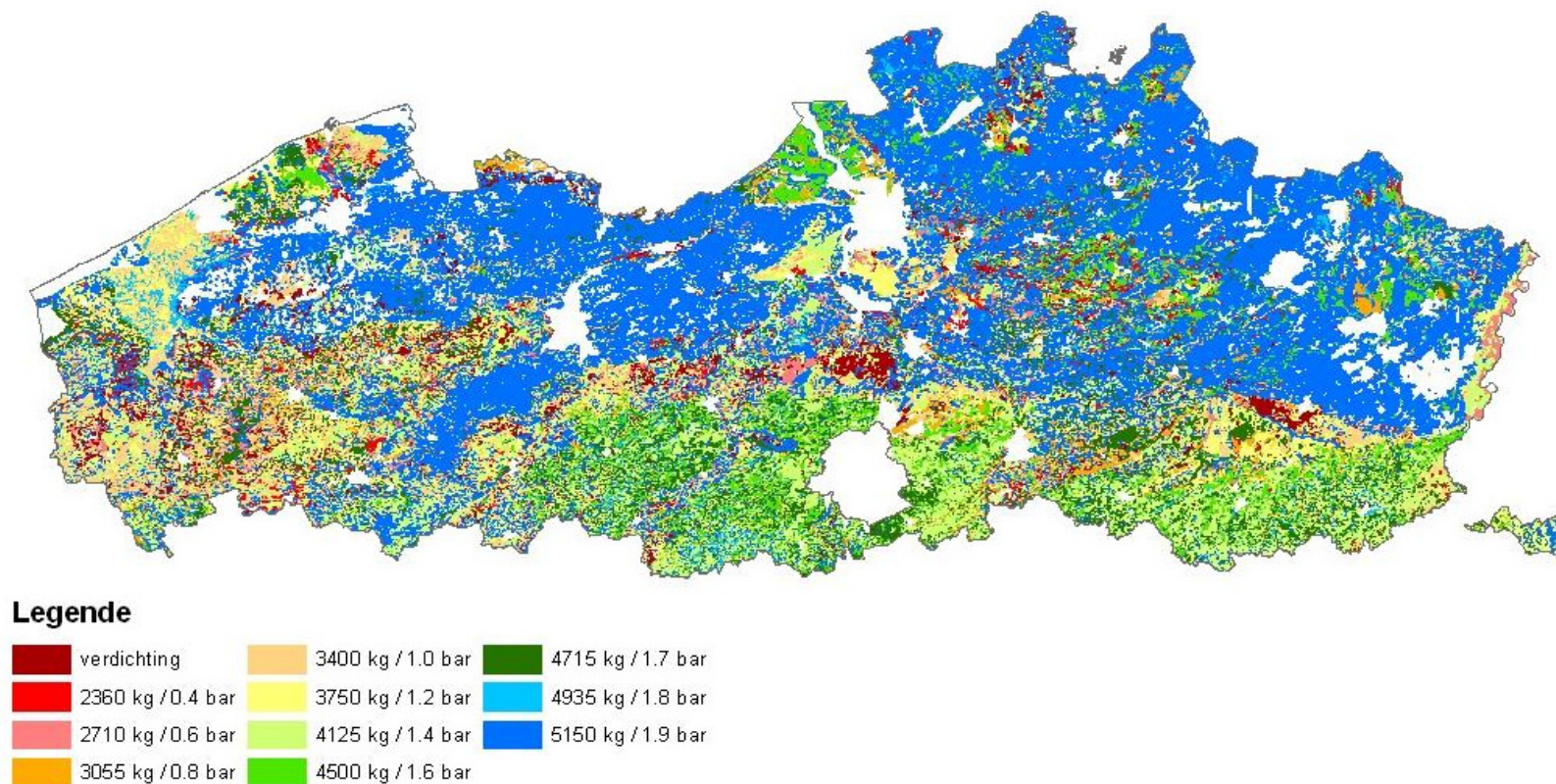


Figuur 6-4 Hybride-gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen uitgedrukt als de berekende waarde van de structurele sterkte (PCS) bij pF 2,5 of pF 1,8 van het meest waarschijnlijke horizont per kaarteenheid waardoorheen het 41 cm-dieptevlak loopt.

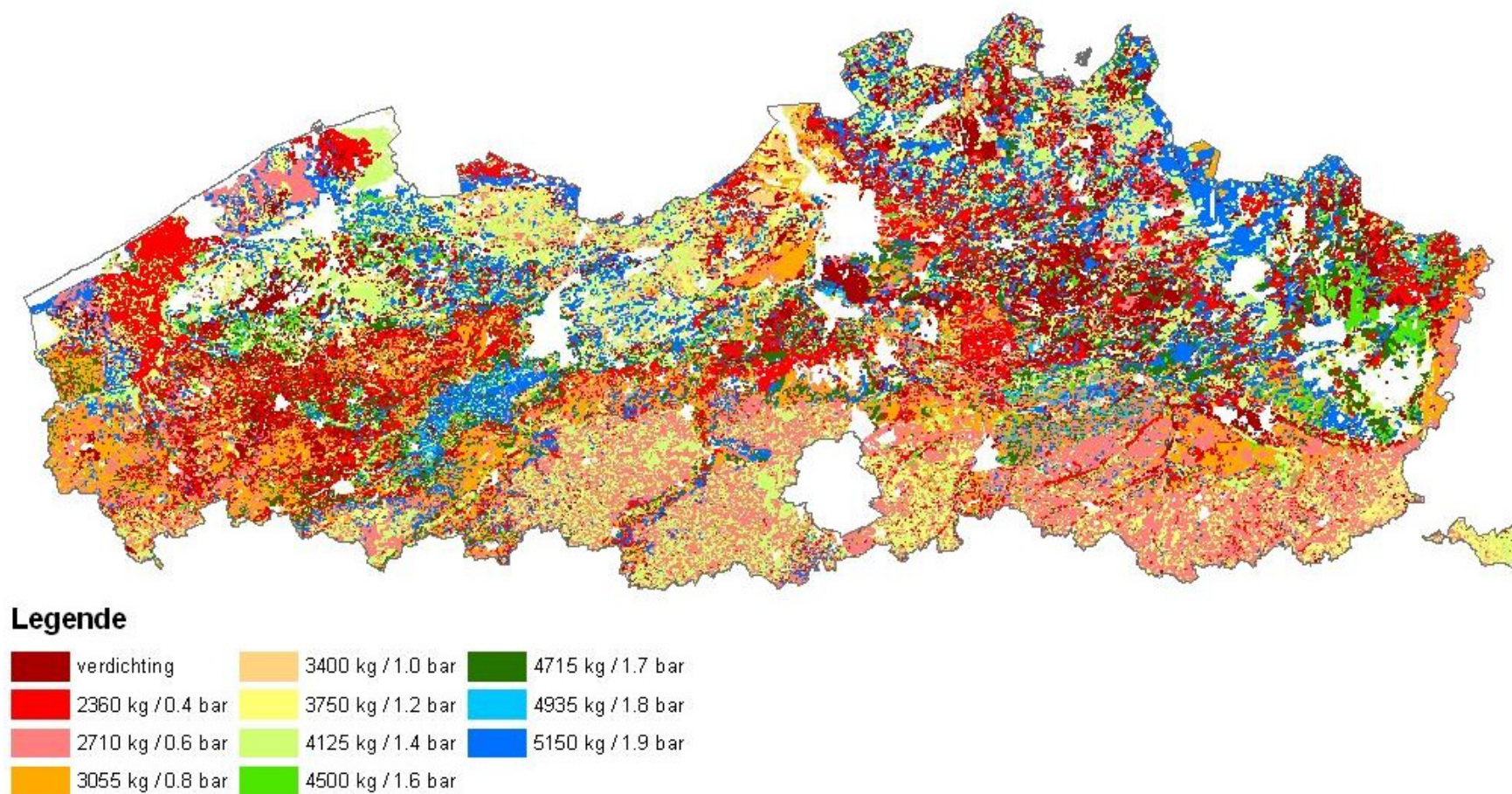
6.4 Bijlage 4: NAD-tabel

Grondsoort	Bijmenging	Pakkingsdichtheid/ consistentie	q_c (MPa)	R_f (%)	$\bar{\alpha}$ boven F.O. (kN/m ³)	$\bar{\alpha}$ beneden F.O. (kN/m ³)	$\bar{\sigma}'$ (°)	c' (kPa)	c_u (kPa)
grind	-	matig dicht	10-20	< 1%	18	20	35	0	-
			> 20		19	21	40	0	-
	leem- of kleihoudend	matig dicht	10-20 > 20	1-2%	19 20	21 22	32 37	0 0	- -
zand	-	los matig dicht	2-4	< 1%	16	18	27	0	-
			4-10		17	19	30	0	-
			> 10		18	20	35	0	-
	leem- of kleihoudend	los matig dicht	2-4 4-10 > 10	1-2%	16 17 18	18 19 20	25 27 30	0 0 0	- - -
leem	-	Weinig vast	0.4-1	2-4%	17	17	22	0	10
		matig vast	1-2		18	18	22	2	25
		vrij vast	2-4		19	19	22	4	50
		vast	≥ 4		20	20	22	8	100
	zandhoudend	Weinig vast matig vast vrij vast vast	0.4-1 1-2 2-4 ≥ 4	1-3%	17 18 19 20	17 18 19 20	25 25 25 25	0 2 4 8	10 25 50 100
klei	-	Weinig vast	0.4- 1	3-6%	16	16	20	2	20
		matig vast	1-2		17	17	20	4	50
		vrij vast	2-4		18	18	20	8	100
		vast	≥ 4		19	19	20	15	200
	zandhoudend	Weinig vast matig vast vrij vast vast	0.4-1 1-2 2-4 ≥ 4	2-5%	16 17 18 19	16 17 18 19	22 22 22 22	2 4 8 15	20 50 100 200
veen		Weinig vast	0.2-0.5	>6%	10	10	15	2	10
		Matig vast	0.5-1		12	12	15	5	20
		Vast	>1		14	14	15	10	40

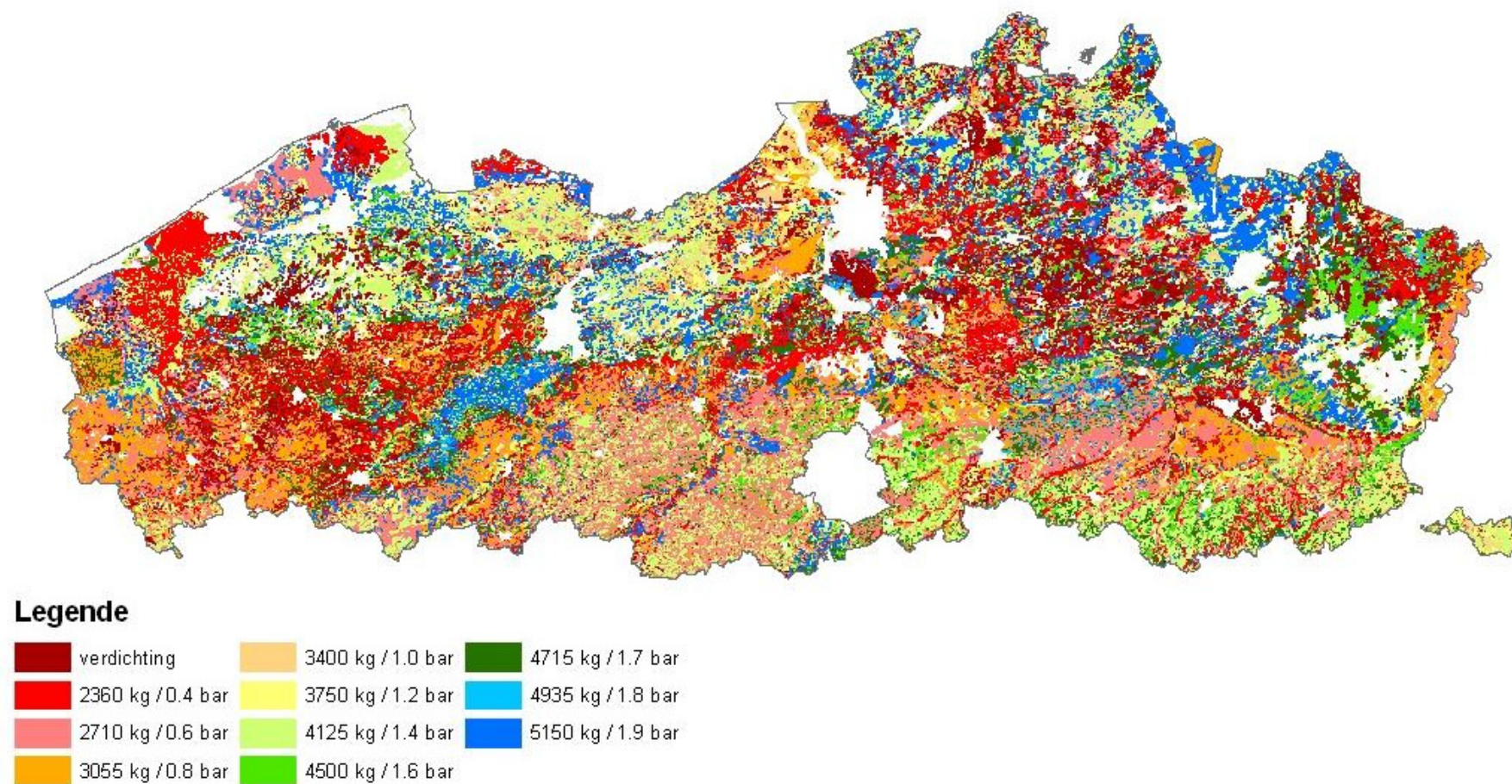
6.6 Bijlage 6: Risicokaarten voor bodemverdichting in Vlaanderen



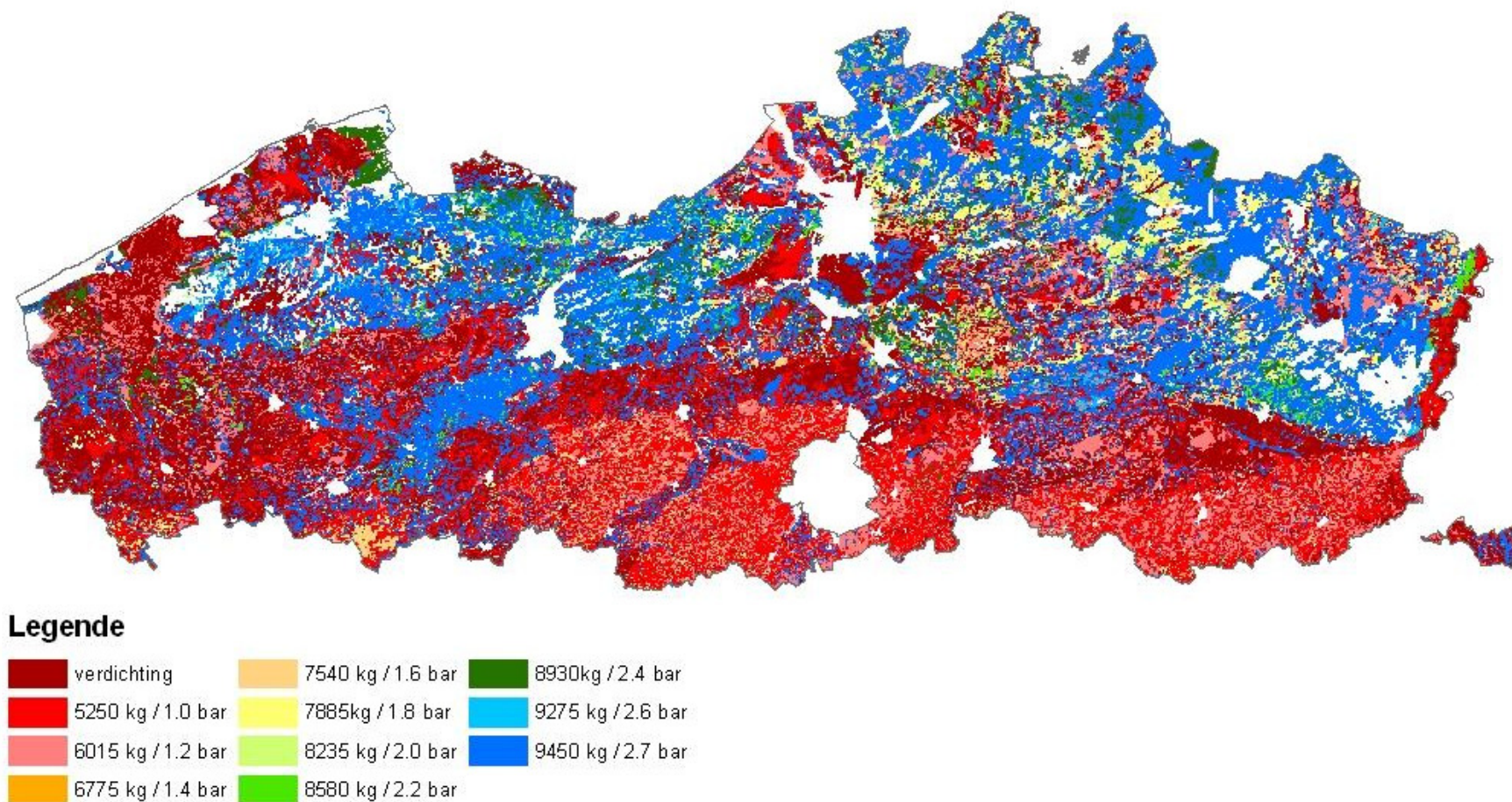
Figuur 6-5 Risicokaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de maximale wiellast (in kg) bij de door de bandenfabrikant aangeraden optimale bandenspanning (in bar) voor een 480/80R42-band, die de structurele sterkte (PCS) uit de gevoeligheidskaart, berekend bij pF 2,5 op een diepte van 41 cm, niet overschrijdt.



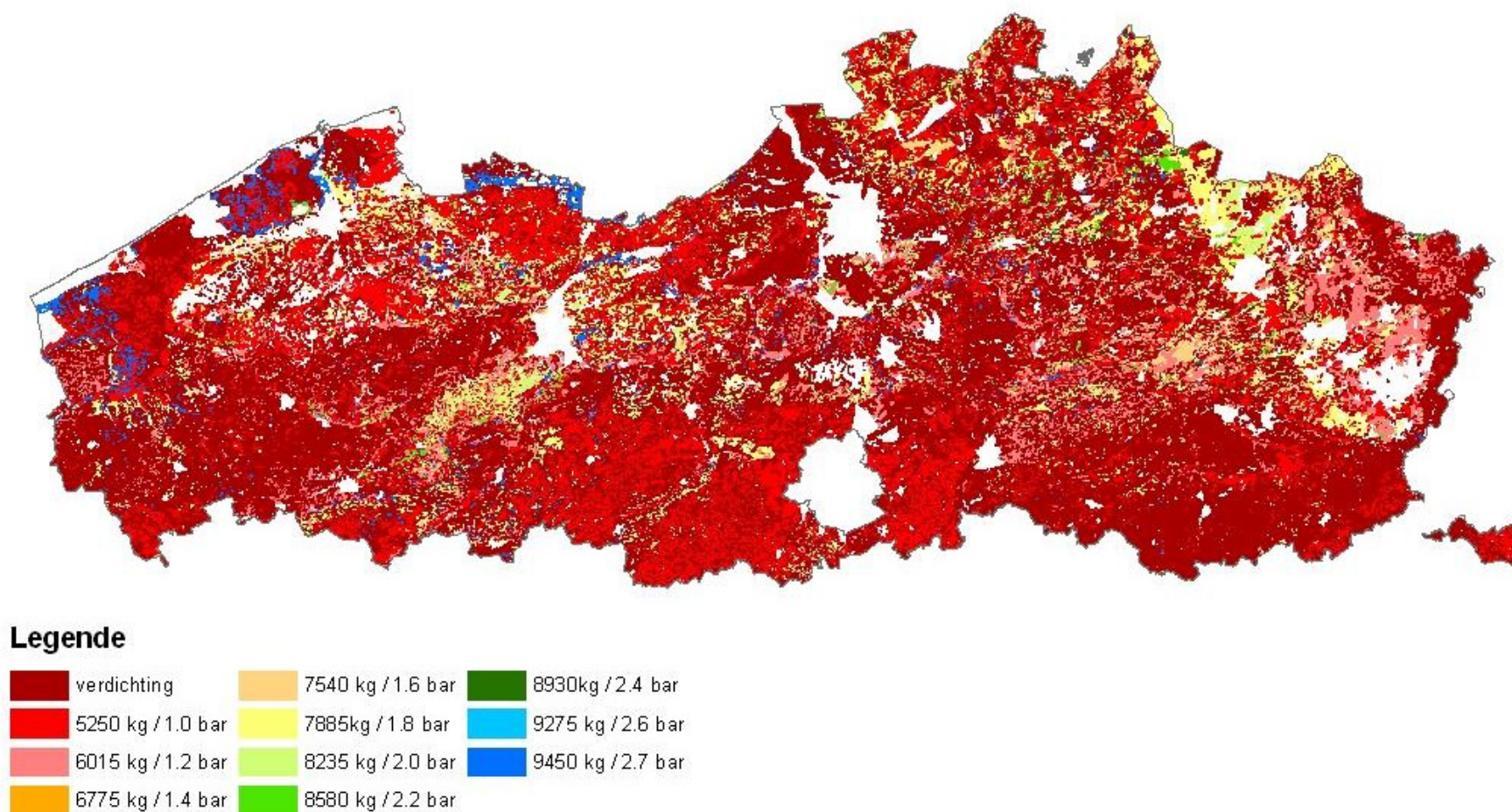
Figuur 6-6 Risicokaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de maximale wiellast (in kg) bij de door de bandenfabrikant aangeraden optimale bandenspanning (in bar) voor een 480/80R42-band, die de structurele sterkte (PCS) uit de gevoeligheidskaart, berekend bij pF 1,8 op een diepte van 41 cm, niet overschrijdt.



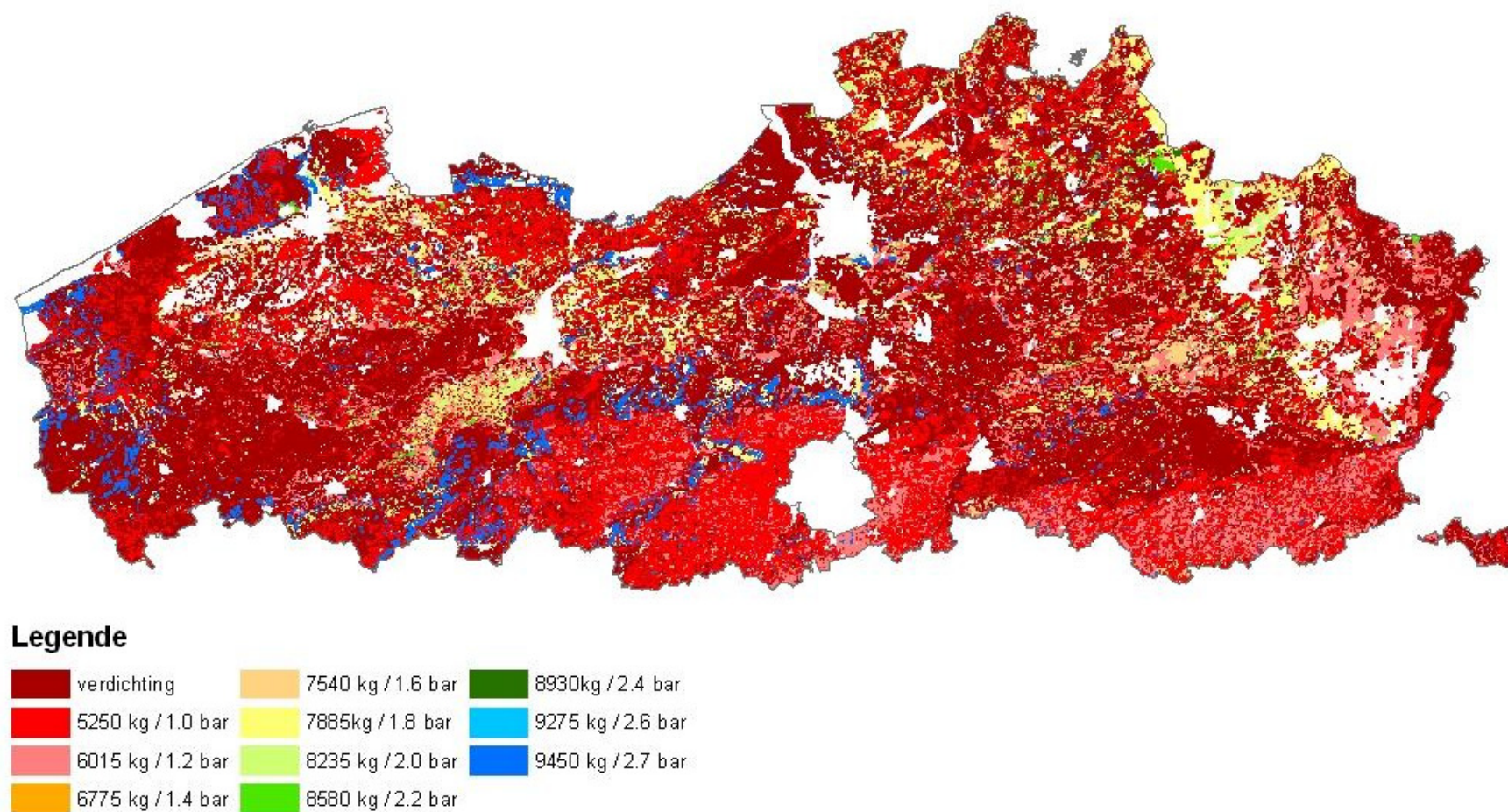
Figuur 6-7 Hybride-riisicokaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de maximale wiellast (in kg) bij de door de bandenfabrikant aangeraden optimale bandenspanning (in bar) voor een 480/80R42-band, die de structurele sterkte (PCS) uit de gevoeligheidskaart, berekend bij pF 2,5 of pF 1,8 op een diepte van 41 cm, niet overschrijdt.



Figuur 6-8 Risicokaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de maximale wiellast (in kg) bij de door de bandenfabrikant aangeraden optimale bandenspanning (in bar) voor een 800/65R32-band, die de structurele sterkte (PCS) uit de gevoeligheidskaart, berekend bij pF 2,5 op een diepte van 41 cm, niet overschrijdt.



Figuur 6-9 Risicokaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de maximale wiellast (in kg) bij de door de bandenfabrikant aangeraden optimale bandenspanning (in bar) voor een 800/65R32-band, die de structurele sterkte (PCS) uit de gevoeligheidskaart, berekend bij pF 1,8 op een diepte van 41 cm, niet overschrijdt.



Figuur 6-10 Hybride-riecokaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de maximale wiellast (in kg) bij de door de bandenfabrikant aangeraden optimale bandenspanning (in bar) voor een 800/65R32-band, die de structurele sterkte (PCS) uit de gevoeligheidskaart, berekend bij pF 2,5 of pF 1,8 op een diepte van 41 cm, niet overschrijdt.

6.7 Bijlage 7: Verslag kenniscirkels

29-09-2008

Ontwerp van verslag bij de 2 kenniscirkels rond het bodemverdichtingsproject

Aanwezig: Petra Deproost (ALBON/LNE), Martine Swerts (ALBON/LNE), Maarten Huybrechts (Boerenbond), Lieven Van Holm (K.U.Leuven/BWB), Philippe Van De Vreken (K.U.Leuven/SADL – verslaggever)

1. Kenniscirkel te Tongeren (24/09, locatie: PIBO)

Aanwezige landbouwers: Renaat Moors, Guy Kersten, Philip Debougnoux, Philippe Martin, Jean-Paul Vanelderden, Dieter Cauffman

Philippe Van De Vreken (K.U.Leuven/SADL) licht de praktische resultaten van de literatuurstudie toe a.d.h.v. een Powerpoint-presentatie voor een publiek van 6 landbouwers. Volgende opmerkingen werden door hen gemaakt:

- In de literatuurstudie wordt gesteld dat vanaf een wiellast van 40 à 50 kN de kans op verdichting toeneemt. De Newton is echter een eenheid die niet echt bekend is in landbouwmiddens. Hetzelfde geldt voor de Pascal (Pa) als eenheid van druk. De bar is een beter bekende drukeenheid onder landbouwers en daarom hier de conversie: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N.m}^{-2}$; $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
- In de praktijk is de wiellast meestal hoger dan 40 à 50 kN. Daarnaast is de bandenspanning ook belangrijk. Het uiteindelijke effect is het resultaat van de combinatie van wiellast en bandenspanning.
- De constructeurs van landbouwmachines stappen vandaag de dag meer en meer af van tandmassen en grijpen terug naar enkele assen daar deze minder insporing veroorzaken, aldus de landbouwers. Toch zijn volgens onze inzichten en de literatuur meerdere assen op eenzelfde landbouwvoertuig beter ter preventie van verdichting in vergelijking met één enkele as, tenminste bij gelijkblijvende belasting. Maar in de praktijk wordt een landbouwkar met 2 of meer assen uitgerust om zwaarder geladen te kunnen worden en zal er inderdaad meer insporing zijn in vergelijking met diezelfde kar voorzien van slechts 1 as, indien men effectief de belasting opdrijft in functie van het aantal assen. Doch, bij eenzelfde belasting leidt een toename van het aantal assen steeds tot een afname van de uitgeoefende druk per oppervlakte-eenheid op het onderliggende bodemoppervlak, waardoor er minder insporing is en minder kans op verdichting. Maar daar zijn niet alle bedrijfsleiders van overtuigd. Volgens hun aanvoelen resulteren opeenvolgende assen in een sterkere verdichting. Ze kiezen eerder voor bredere banden dan voor meerdere assen. Bredere banden zijn echter vrij duur.
- Er zijn 2 types banden: lage druk-band en traditionele banden. Het verlagen van de bandenspanning (deze leidt tot een groter contactoppervlak met de bodem via afplating van de band, hetgeen resulteert in een lagere druk per oppervlakte-eenheid) is een preventieve maatregel die in de praktijk een aantal beperkingen met

zich meebrengt. Hoewel de bandenspanning op het veld perfect kan worden laag gehouden zonder schade te berokkenen aan de banden, zal rijden op straat bij lage druk steeds in meerdere of mindere mate schade teweegbrengen en is de slijtage groter. Een tweede beperking is de lagere rijnsnelheid die moet worden aangehouden bij bewerken/berijden van het land met lage druk-banden. Daarom worden in de praktijk lage druk-banden voorbehouden voor veldbewerkingen maar worden alle vormen van transport met de traditionele banden uitgevoerd.

- Met diepwoelers (die worden aangewend om verdichte lagen terug op te breken) moet voorzichtig worden omgegaan, aangezien je niet precies kunt controleren hoe los de bodem wordt gemaakt. Mogelijks kan de bodem te los worden gemaakt, waardoor deze vatbaar is voor hercompactie. Door toedoen van een diepwoeler kan een bodem zijn originele draagkracht verliezen. Nochthans worden er de laatste jaren enorm veel diepwoelers verkocht, hoewel deze dus gevaarlijk kunnen zijn bij verkeerd gebruik. Anderzijds bleek dat de begripsverwarring ook nu nog algemeen is: de meeste diepwoelers waarop door de landbouwers in de discussie werd gedoeld bleken niet veel verder dan onder de ploegzool te gaan. Het breken van de ploegzool is in de perceptie van de landbouwers het grootste probleem van compactie. Uit de literatuur en de ervaring van de projectmedewerkers komt echter naar voren dat verdichting ook dieper gebeurt, door oogsten in slechte omstandigheden.
- Er is een grote variatie tussen de verschillende diepwoelers, dus als men over proeven spreekt moet men altijd duidelijk stellen over welk type diepwoeler het gaat. Verschillende types zullen tot verschillende resultaten leiden. Vraag: Welke tanden zijn het beste?
- De aanwezige landbouwers erkenden dat de problemen met verdichting zich voornamelijk voordoen in de kopakker (of wendakker).
- In de presentatie werd het verkavelen van landbouwgrond aangehaald als één van de factoren met een negatieve invloed op verdichting. Immers, in het verleden zijn er heel wat grachten dichtgemaakt, waardoor overtollig regen- of irrigatiewater vandaag de dag over een veel grotere oppervlakte moet stromen alvorens het een gracht bereikt. Bovendien worden de drainagepijpen alsmaar langer. Eén van de landbouwers merkte echter op dat het verkavelen van akkers anderzijds leidt tot grotere aaneengesloten percelen met minder wendakker, zodat verkavelen dus ook positieve effecten heeft met betrekking tot de problematiek van bodemverdichting (uiteraard is dat enkel zo als het perceel langer wordt). Wél dient te worden opgemerkt dat grotere percelen doorgaans worden bewerkt met zwaarder materieel, hetgeen dan weer minder gunstig is naar verdichting toe.
- Voor de veldvalidatie werd gesuggereerd ook metingen uit te voeren in de spuitbanen, aangezien deze volgens de boeren soms sterk verdicht kunnen zijn.
- Eén van de aanwezige boeren merkte op dat de gevolgen van verdichting voor het gewas zich ook tussen 2 rijsporen kunnen manifesteren. Hij haalde een voorbeeld aan van een onkruidbestrijding die hij had uitgevoerd in slechte omstandigheden (te nat perceel), waarbij hij nadien opmerkte dat het gewas in de rijen naast het spuitspoor duidelijk hinder ondervond van de verdichting in het spuitspoor.
- Het systeem van gecontroleerd verkeer is een preventieve maatregel voor verdichting die volgens de landbouwers van de kenniscirkel niet haalbaar is in de praktijk. Normalerwijze zal men immers het ene jaar beginnen ploegen aan de ene kant van een perceel, om het jaar nadien dan te beginnen aan de andere kant. Bovendien zouden vaste rijpaden enkel gerealiseerd kunnen worden indien alle machines dezelfde werkbreedte hebben. Dit is echter niet het geval in de praktijk.
- Bekalken van de akker werd aangeraden als preventieve maatregel om bodemverdichting te vermijden via een vergroten van de draagkracht van de bodem. Meer en meer gronden zijn echter in seizoenspacht en bekalken kost geld, zodat zich de vraag stelt welke boer er gaat moeten bekalken. Anders geformuleerd: wie zou er verantwoordelijk moeten gemaakt worden voor regelmatige bekalking : de

eigenaar of de tijdelijke gebruiker? De klassieke bekalking gebeurt nog weinig, zo werd opgemerkt.

- Het opnemen van gele mosterd in de gewasrotatieschema's werd in de literatuurstudie aanbevolen als mogelijke maatregel ter remediëring van verdichting omwille van de diepe beworteling van deze groenbemester die een zeker decompactierend effect kan teweegbrengen (de haarwortels gaan tot ca. 80 cm diep). Volgens de op de kenniscirkel aanwezige landbouwers is gele mosterd vandaag reeds de meest gezaaide groenbemester want nog betaalbaar. Groenbemesters als wikke en bladramenas worden daarentegen stilaan onbetaalbaar. Toch werd volmondig ja geantwoord op de vraag of men bereid zou zijn om meer te willen uitgeven aan een groenbemester indien deze verdichting zou kunnen opbreken.
- Volgens de aanwezige boeren zouden gele mosterd of andere groenbemesters niet alleen bijdragen aan het remediëren van verdichting, maar zouden het ook goede indicatoren zijn om bodemverdichting aan te duiden in het veld.
- Luzerne zou volgens de landbouwers zeker in aanmerking komen om verdichte lagen op te breken. Nadeel is echter het feit dat het een omslachtig gewas betreft, waarbij het zaad moet geënt worden met bepaalde bacteriën (zeker bij inzaai op zandgronden en op percelen waar al lange tijd geen luzerne werd geteeld). Inoculatie is nochtans perfect mogelijk en zeer efficiënt wanneer correct uitgevoerd.
- Preventie van verdichting is mogelijk wanneer men voldoende oog heeft voor een goed organisch stof-gehalte in de bodem. Het optrekken van het gehalte aan O.S. vraagt echter tijd en is dan ook een lange termijn-aangelegenheid.
- Het mechanisch breken van verdichte lagen mag alleen worden uitgevoerd indien de bodem voldoende droog is.
- Door niet in de ploegvoor te rijden bij het ploegen kan verdichting worden voorkomen. Misschien zou men ook elk jaar op een verschillende diepte kunnen ploegen om het ontstaan van een ploegzool te vermijden. Een belangrijk aandachtspunt zijn de 'messen' van de ploeg. Wanneer deze bot zijn, leidt dit altijd tot versmering. Bij een ploeg met scherpe messen is er minder kans op versmering.
- Alle boeren waren het ermee eens dat bij het maken van fouten in het voorjaar met betrekking tot verdichting (bv. grondbewerkingen uitvoeren in zeer natte omstandigheden) de rekening zich reeds presenteert in het gewas van datzelfde jaar.
- De schade (verdichting) die wordt teweeggebracht door een loonwerker is doorgaans veel groter dan hetgeen de boer zelf kapot maakt. De bedrijfsleiders erkennen dat ze daar weinig controle over hebben tenzij ze kunnen kiezen tussen loonwerkers met verschillende machines. Het is uiteraard de vraag of verdichting zich ook niet zou voordoen indien ieder landbouwbedrijf zou beschikken over de typische loonwerkmachinerie.
- Eén van de aanwezige boeren maakte melding van het feit dat hij de laatste jaren spoorvorming constateerde bij de oogst van het graan in de zomer d.m.v. een maaidorser, iets wat hij vroeger nooit zag. De verklaring die hij hiervoor geeft is het niet meegeëvolueerd zijn van de grootte van de wielen met de grootte van de machine.
- Bij het rooien van bieten d.m.v. een bunkerrooier worden de bieten doorgaans afgekapt op een grote hoop in een uithoek van het veld van zodra de bunker vol is. Het traject dat de bietenrooier moet afleggen om tot bij de hoop te geraken zou volgens de landbouwers altijd sterk verdicht zijn, hetgeen je de jaren nadien duidelijk zal zien aan de gewasgroei aldaar.
- Rupsen blijken volgens de ervaringen van de landbouwers inderdaad beter te zijn dan gewone wielen om verdichting te voorkomen, zeker bij berijden/bewerken van het land in extreme omstandigheden. Vooral in de grove groententeelt en in de teelt van maïs (zowel snij- als korrel-) worden machines op rupsen wel vaker gebruikt. De grove groententeelt in Vlaanderen is meestal contractteelt en het oogsten op rupsen moet bijgevolg worden gezien als een manier om een continue aanvoer naar de

fabriek te verzekeren (cfr. met rupsen kan ook in slechte omstandigheden worden geoogst!), eerder dan als een preventiemaatregel voor verdichting die voortvloeit uit een bezorgdheid van de fabriek om geen schade te willen berokkenen aan de bodem.

- Het is van weinig nut om een bepaald perceel te betreden met een oogstmachine op rupsen indien de tractoren en karren waarmee de oogst wordt afgevoerd naar de hoeve met gewone wielen zijn uitgerust. Een maïshakselaar op rupsen met ernaast een tractor + kar op luchtbanden zal m.a.w. een halfslachtige maatregel zijn ter preventie van verdichting.
- Bij vele loonwerkers heeft de boer soms de keuze tussen het laten uitvoeren van een bewerking door een machine op rupsen en het laten uitvoeren van diezelfde bewerking door een machine op wielen. Echter, wanneer wordt geopteerd voor een machine op rupsen zal de door de loonwerker aangerekende prijs steeds duurder zijn. Machines op rupsen hebben volgens de boeren uit de kenniscirkel immers een groter verbruik en meer slijtage in vergelijking met machines op wielen. Bovendien mogen machines met rupsen niet op straat rijden en moet de loonwerker deze transporteren met een oplegger, wat het rendement van de machine verlaagt en hetgeen een bijkomende reden is voor het hogere tarief.
- Het uitrusten van tractoren met dubbele wielen wordt heden ten dage bijna nooit gedaan door onze landbouwers. Dubbele wielen zijn volgens de landbouwers immers onpraktisch, onder meer omdat de weg vaak te smal is voor zulke wielconfiguratie. In de wegcode worden bovendien beperkingen opgelegd voor de maximumbreedte van landbouwvoertuigen, zodat het rijden met dubbele wielen op de weg in vele gevallen indruist tegen de wet. Een derde reden die werd aangehaald is het feit dat banden vrij duur zijn, waardoor de landbouwers opzien tegen de aankoop van 4 extra banden. Tweede hands-bandens zagen ze niet zitten.
- Aangezien het vochtgehalte van de bodem één van de belangrijkste factoren is voor verdichting is het uit hoofde van preventie zeer belangrijk om dit vochtgehalte beter te leren kennen. Hiervoor zouden eenvoudige meetinstrumenten ter beschikking moeten zijn van de individuele boer.
- Bij een rups is vooral het aantal rollen van belang.
- Te Gembloux zijn in het verleden proeven gebeurd met verschillende soorten rupsbanden. Het zou nuttig kunnen zijn om deze studie eens te bekijken.
- Een vraag die duidelijk leeft onder de boeren is de vraag of de voorgestelde preventie- en remediëringmaatregelen ook allemaal wel economisch te verantwoorden zijn.
- Volgens Boerenbond en LNE zouden we al heel veel bereikt hebben mocht dit onderzoek uiteindelijk kunnen resulteren in een praktische brochure over de problematiek van bodemverdichting, dewelke verspreid zou kunnen worden in onder meer de landbouwscholen.
- Voor een landbouwer zal de oogst altijd primeren op het vermijden van bodemverdichting door uitstellen van grondbewerkingen wanneer de bodemcondities niet optimaal zijn. Op bepaalde momenten moet er gewoon geoogst worden (ook al kan dit schade toebrengen aan het land) aangezien het moet opbrengen voor de boer.
- Zowel een strenge winter met veel vorst als een droge, hete zomer kunnen voor veel (natuurlijk) herstel zorgen van een kapotgereden bodem. Uiteraard is dat enkel waar voor bepaalde bodemtypes.

2. Kenniscirkel te Oud-Heverlee (25/09, locatie: Ruiterschool)

Aanwezige landbouwers: Frans Nackaerts, Christian Dirick, Jean Grégoire, Josse Peeters en Josse Geleyns

Philippe Van De Vreken (K.U.Leuven/SADL) licht de praktische resultaten van de literatuurstudie toe a.d.h.v. een Powerpoint-presentatie voor een publiek van 5 landbouwers. Volgende opmerkingen werden door hen gemaakt:

- Na een bodem te hebben opengescheurd met een diepwoeler zou het best een aantal weken droog zijn, opdat de bodem opnieuw zou winnen aan draagkracht. Maar te lang wachten zagen de bedrijfsleiders niet zitten.
- Een door een diepwoeler opengescheurde bodem is zeer gevoelig aan hercompactie indien er snel terug veel veldverkeer is, aangezien de oorspronkelijk draagkracht van de ondergrond werd verstoord. Deze hercompactie zal zich voornamelijk manifesteren in de diepere bodemlagen (= in de zone onder de bouwvoor).
- Volgens de op de kenniscirkel aanwezige landbouwers is een verminderde gewasopkomst geen symptoom van verdichting en heeft het hier niets mee te maken. Om deze stelling te staven haalde één van de boeren een voorbeeld aan uit zijn eigen ervaringen. De boer in kwestie zat op een gegeven ogenblik met een perceel dat totaal kapot gereden was (diepe insporing) en bijgevolg zeer verdicht was. Na dit perceel 2 maal te hebben bewerkt met een decompactator heeft hij er bieten op laten zaaien. Deze bieten vertoonden een goede opkomst en het was slechts een hele poos na de opkomst dat de verdichting zich vertaalde in een verminderde gewasgroei. Het is evident dat een slechte opkomst niet alleen te wijten is aan verdichting. Indien er door verdichting in een lager gelegen zone van het veld water op het veld blijft staan zal de opkomst uiteraard erg slecht zijn.
- Ook in deze kenniscirkel werd het belang van vorst onderstreept om kapotgereden land te herstellen.
- Hoever moeten de tanden van een diepwoeler uit elkaar staan? Hoe verder uiteen, hoe moeilijker de bewerking. Voor bijvoorbeeld 60 cm is al een zeer zware tractor nodig.
- Eén van de aanwezige boeren gaf aan dat hij aan zijn loonwerker bepaalde beperkingen oplegt om bodemverdichting op zijn percelen te vermijden. Zo legt hij het verbod op om zijn velden te betreden met een landbouwkar en eist hij dat de maïsdorser de inhoud van zijn opslagtank komt lossen in een kar die naast zijn perceel staat geparkeerd.
- De landbouwers maakten de bemerking dat de gebiedsdekkende kaarten die zullen voortvloeien uit deze studie misschien wel nuttig kunnen zijn voor het beleid maar niet echt praktisch bruikbaar zijn voor de individuele boer. Om echt bruikbaar te zijn voor de boer is er nood aan kaarten op perceelsniveau, maar dan nog zijn deze volgens sommige boeren misschien 'overbodig' daar "een goede boer zijn land kent en geen nood heeft aan een kaart om de gevoeligheid of het risico op verdichting te kennen". Er werd opgemerkt dat dit dan niet zo is voor de mogelijke schade door de uitbestede werken aan bijvoorbeeld loonwerkers.
- Vandaag de dag kunnen heel wat oogstmachines opbrengstkaarten genereren voor een perceel, dewelke men zelfs kan uitprinten. Verdichting is een factor die mede de opbrengst van een gewas zal bepalen, zodat de opbrengstkaarten misschien een ruwe indicatie zouden kunnen geven van de verdichtingstoestand van een perceel.
- Boeren zouden zelf op een makkelijke wijze verdichting kunnen meten in het veld door gebruik te maken van een betonijzer (met dwars handvat bv.) dat ze verticaal in de grond duwen.
- Mr. Roisin van Gembloux heeft expertise op het vlak van verdichting en zou daarom eventueel gecontacteerd kunnen worden.

- Bij een tractor op rupsen moet de trekhaak onder de buik zitten, zoniet kan hij opklimmen en zal hij vooral op de achterste rupswielen gaan rijden, waardoor de bodem toch sterk kan verdichten.

Conclusies van de 2 vergaderingen:

1. De interesse van de bedrijfsleiders ging duidelijk uit naar de kennis hoe verdichting te voorkomen en wat er zou kunnen gedaan worden voor remediëring na moeilijkheden. Daarom zou de literatuur nog wat meer moeten ingaan op kritische niveaus voor draagkracht. Anderzijds kwamen een aantal misverstanden aan het licht, bijvoorbeeld de bewering van een aantal landbouwers dat de mogelijke schade enkel wordt bepaald door de bandenspanning.
2. De vrees bestaat dat het gebruik van bodemverdichtingskaarten eerder een verdere betutteling zal toelaten dan dat het als een bruikbaar instrument zou kunnen dienen om bv. ook de loonwerkers en contractors te confronteren met de risico's (en ze vervolgens eventueel te laten opdraaien voor blijvend aangerichte schade).
3. De confrontatie met de praktijk was erg belangrijk en moet verder gezet worden, alhoewel de aanwezigen bezwaarlijk als representatief kunnen worden beschouwd.