## **G** FACULTEIT BIO-INGENIEURSWETENSCHAPPEN

# TOEPASBAARHEID VAN VERSCHILLENDE FIJNMAZIGE MEET- EN REMEDIËRINGSTECHNIEKEN TER BEHEERSING VAN BODEMVERDICHTING IN LANDBOUWPERCELEN

Sarah Verhulst Stamnummer: 01906074

Promotoren: prof. dr. ir. Jan Pieters, dr. ir. Simon Cool Tutor: dr. ir. Simon Cool

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad in Master of Science in de bioingenieurswetenschappen: milieutechnologie

Academiejaar: 2020 - 2021



Deze pagina is niet beschikbaar omdat ze persoonsgegevens bevat. Universiteitsbibliotheek Gent, 2022.

This page is not available because it contains personal information. Ghent University, Library, 2022.

# I. Woord vooraf

Deze masterproef zou niet tot stand gekomen zijn zonder de hulp van verscheidene personen. Graag wil ik hen in dit dankwoord persoonlijk bedanken.

Als eerste wil ik mijn promotoren, prof. dr. ir. Jan Pieters en dr. ir. Simon Cool, bedanken om mij, als milieukundige, toch een topic buiten mijn comfortzone maar in mijn interesse te laten uitvoeren. Ik wil hen bedanken voor hun goede begeleiding hierin, het delen van hun kennis en het verschaffen van nieuwe inzichten. Ook bedankt voor het nalezen van mijn masterproef.

Verder bedank ik ILVO om mij de kans te geven om een masterproef bij hen te schrijven, alsook voor het gebruik van hun percelen en materiaal. Ook bedank ik de landbouwers die in het bezit zijn van het perceel in Deinze en Gavere. Daarnaast wil ik ook Tommy D'Hose en Adriaan Vanderhasselt bedanken voor de begeleiding tijdens de proefopzetten, het delen van hun kennis en het verschaffen van inzichten om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Ook bedank ik Geert De Smet voor het uitvoeren van de veldbewerkingen. *Thanks to Fabio Castaldi for giving new insights in the world of data interpolation.* Ik bedank prof. dr. ir. Ludwig Lauwers om mij te introduceren in de *flat earth economics.* Ook bedank ik Jelle Vliegen, Gilles Claeys en Ivo Dupon voor het verschaffen van de beschikbare informatie over de werking van de trekkrachtbouten bij Fendt en New Holland. Tot slot bedank ik Peter Lootens en Jonathan Van Beek voor de begeleiding tijdens het verwerken van de dronedata.

Finaal wil ik ook nog extra aandacht geven aan al die mensen die mijn masterproef nalazen op spelling. Dankzij hen zal mijn dyslexie en dysorthografie minder in het oog springen van de lezer.

# II. Inhoudsopgave

I. Woord	vooraf	v
II. Inhoud	sopgave	. vii
III. Lijst	met afkortingen	ix
, IV. Liist	met figuren en tabellen	xi
	۲	.xv
Hoofdstuk	1. Inleiding	1
Hoofdstuk	2. Literatuurstudie	3
2.1. Boo	lemverdichting	3
2.1.1.	Inleiding	3
2.1.2.	Ontstaan van bodemverdichting	3
2.1.3.	Gevolgen van bodemverdichting	5
2.1.4.	Vaststellen en in kaart brengen van bodemverdichting	. 11
2.1.5.	Aanpak van bodemverdichting	. 16
22 Pre	cisielandhouw	21
2.2. 110 2.2. Dec		~ ~ ~
2.3. DOE		. 24
Hoofdstuk	3. Methodologie	25
3.1. Pro	efpercelen	. 25
3.1.1.	Perceel 1	. 25
3.1.2.	Perceel 2	. 26
3.1.3.	Perceel 3	. 27
3.2. Mat	eriaal	. 28
3.2.1.	Penetrometer	. 28
3.2.2.	Steekmonsterboor	. 29
3.2.3.	Veris bodemscan	. 30
3.2.4.	Hand-RTK-GPS	. 31
3.2.5.	Exatrek-datalogger	. 31
3.2.6.	Drone	. 32
3.2.7.	Tractor en werktuigen	. 33
3.3. Met	hode	. 37
3.3.1.	Perceel 1	. 37
3.3.2.	Perceel 2	. 45
3.3.3.	Perceel 3	. 53
3.3.4.	Analyse	. 55
Hoofdstuk	4. Resultaten en Discussie	56
4.1. Per	ceel 1	. 56
4.1.1.	Relatie tussen opbrengst zomergerst en brandstofverbruik, tussen opbrengst	
	zomergerst en EC-waarden en tussen EC-waarden en brandstofverbruik	. 56
4.1.2.	Effect van een (variabele) diepe bewerking op de gewashoogte en de	
	gewasopbrengst	. 58
4.1.3.	Effect en behoud van het effect van de diepe bewerking	. 61

4.2. Per	ceel 2	65
4.2.1.	Output bodemscan	65
4.2.2.	Verband tussen de EC-waarden uit de bodemscan en de CAN-bus-paran de scanning met één tand.	neters uit 67
4.2.3.	Verband tussen de penetratieweerstand en de CAN-bus-parameters uit o scanning met één tand.	<b>le</b> 71
4.2.4.	Verband tussen de EC-waarden uit de bodemscan en de CAN-bus-paran de diepe bewerking	<b>neters uit</b> 72
4.2.5.	Effect van de diepe bewerking op de gewashoogte en de biomassa	74
4.3. Per	ceel 3	
4.3.1.	Effect van verschillende types diepwoeler op de effectiviteit van het ope	nbreken
	van de ploegzool	79
4.3.2.	Effect van verschillende types diepwoeler op het brandstofverbruik	82
4.3.3.	Verband tussen de EC-waarden uit de bodemscan en de CAN-bus-paran de diepe bewerking	1eters uit 84
Hoofdstuk	5. Algemene conclusies en ideeën voor verder onderzoek.	87
Hoofdstuk	6. Referenties	90
Hoofdstuk	7. Bijlagen	96
Bijlage 1:	Gewashoogte groenbedekker op perceel 1	96
Bijlage 2:	Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de bodem op perceel 1	
Biilage 2	A: Doorsneden vlak na de diepe bewerking	
Bijlage 2	2B: Doorsneden drie maanden na de diepe bewerking	101
Bijlage 3:	Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de bodem op perceel 3	
Bijlage 3	BA: Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden blok A	105
Bijlage 3	B: Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden blok B	109
Bijlage 3	3C: Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden blok C	112
Bijlage 4:	Verschil van de penetratieweerstanden voor en na de diepe bewer	king op
perceel 3		115

# III. Lijst met afkortingen

ABA	abscisinezuur
С	controle
CAN-bus	Controller Area Network-binary unit system
CH₄	methaan
CI	indringingsweerstand (cone index)
cm-mv	centimeter onder het maaiveld
<b>CO</b> <sub>2</sub>	koolstofdioxide
CTF	vaste rijpaden (Control Traffic Farming)
D	diepwoelen
Db	bulkdensiteit
DEM	digitaal hoogtemodel
DTM	digitaal terreinmodel
EC	elektrische geleidbaarheid
GB	grondgebaseerde snelheid
gcp	ground control points
GIS	Geografisch Informatie Systeem
GNNS	Global Navigation Satellite Systems
GPR	ground-penetrating radar
HRI	horizontal resistance index
Lcc	een matig droge (c) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c)
Ldc	een matig natte (d) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c)
MPa	megapascal
N <sub>2</sub> O	lachgas
NDRE	Normalized Difference Red Edge Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	nabij-infrarood
Pcc	een matig droge (c) licht zandleembodem (P) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c)
Pdc	een matig natte (d) licht zandleembodem (P) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c)
Q50	50ste percentiel (mediaan)
Q90	90ste percentiel

qLca	een matig droge (c) zandleembodem (L) met textuur B horizont (a) en				
	zandsteen op geringe diepte (<75 cm-mv) (q)				
RED	rood licht				
RedEdge	RedEdge licht				
RP	penetratieweerstand				
<b>RTK-GPS</b>	Real Time Kinematic-Global positioning system				
Sbc	een droge (b) lemig zandbodem (S) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur				
	B horizont (c)				
SOP	standard operating procedure				
stdev	standaardafwijking				
V	variabel diepwoelen				
VDC	gelijkspanning (volt direct current)				
VIS	zichtbaar licht				
VR	variable rate				
VRT	variable rate technologie				
w(-)	gravimetrisch vochtgehalte				
WB	wielgebaseerde snelheid				
(w)Lda	een matig natte (d) zandleembodem (L) met textuur B horizont (a) en klei- zand op matige diepte (75 tot 125 cm-mv) (w)				

# IV. Lijst met figuren en tabellen

# Figuren

figuur 1. Samenstelling van de bodem (prosensols, 2011; wageningen university and research, z.d.)
gewabeschermingsmiddelen, brandstof tijdens bewerkingen,) (vlm, 2015a)
figuur 3. Wortelontwikkeling van een maïsplant onder verdichte omstandigheden. De wortels zijn sterk
figuur 4. Wortelontwikkeling van een sojaplant onder verschillende verdichtingsgraden na x passages van een 11 ton tractor (RP= gemiddelde penetratieweerstand van 0-20 cm-mv; D <sub>b</sub> = bulkdensiteit 0-20 cm-mv). Het
figuur 5. Het effect van bodemverdichting op twee kenmerken van gewasgroei. Links: het effect van verschillende verdichtingsgraden t.g.v. verschillende wiellasten op de opkomst van maïs. Rechts: het effect van verschillende verdichtingsgraden t.g.v. verschillende wiellasten op de planthoogte van maïs (wolkowski & lowerv. 2008).
figuur 6. Manieren hoe bodemverdichting de milieucompartimenten beïnvloedt (soane & van ouwerkerk, 1995). 10 figuur 7. N <sub>2</sub> O productie tijdens denitrificatie
figuur 8. Foto's van autonome penetrometers die ontworpen zijn door bouche (2019) in samenwerking met ilvo (links) en door scholz et al. (2014) (rechts)
figuur 9. Het concept van de on-the-go horizontaal opererende penetrometer. Gecollecteerde data uit de sensors worden omgezet naar kaarten die de bodemverdichting weerspiegelen op verschillende dieptes (chung et al., 2006)
figuur 10. Foto's van de twee commerciële uitvoeringen van het eerste type bodemscanners: dualem bodemscan (links) en de topsoil mapper bevestigt aan de fronthef van de tractor (rechts) (dalfsen & baltissen, 2016; topsoil mapper, z.d.)
figuur 11. Foto van de veris msp3-bodemscanner (links) en een foto van een cultivator (rechts) 14
figuur 12. Schematische voorstelling van de zes schijven van de veris msp3-bodemscanner (links) (moral et al., 2010). Voorstelling van een wenner array met bijhorende formule om de weerstand te berekenen (R= weerstand: Ll=spanning: l= stroom) (rechts) (openei, 2013)
figuur 13. Voorstelling van het effect van verschillende mechanische technieken om bodemverdichting op te heffen (schneider et al., 2017)
figuur 14. Opbouw van een diepwoeler. Verschillende combinaties zijn mogelijk. Links is er een kuhn dc 301 diepwoeler afgebeeld. Deze is voorzien van vier rechte tanden met brede vleugelscharen. Rechts is een
profundus z diepwoeler van steeno afgebeeld. Deze heeft vier gebogen tanden zonder vleugelscharen 18 figuur 15. Weergave van de totstandkoming van de v-vormige balk. Boven: voorstelling van de bodemverstoring door de tanden. Midden: voorstelling van de v-vormige balk die gelift wordt tijdens het diepwoelen. Onder: concept achter het scheuren en verkruimelen van de bodem door het liften van de v-vormige balk tijdens het diepwoelen (spoor, 2006)
figuur 16. Weergaven van het effect van de tandinrichting op de bodemverstoring. Boven: gedeeltelijk verstoorde bodem door het diepwoelen met tanden die smal zijn en/of ver genoeg van elkaar staan. De draagkracht blijft hier behouden. Onder: volledig verstoorde bodem door het diepwoelen met tanden die te breed zijn en/of te dicht op elkaar staan. De draagkracht gaat hier verloren (spoor, 2006)
<ul> <li>figuur 17. Overzicht van de technologieën in precisielandbouw gericht op gewassen (balafoutis et al., 2017) 21</li> <li>figuur 18. Het verschil tussen actieve en passieve sensing (edesk &amp; federaal wetenschapsbeleid, 2004)</li></ul>
figuur 21. Afbakening van perceel 2 met aanduiding van de ondergrondse textuur en de terreinhoogte. Pcc wijst op een matig droge (c) licht zandleembodem (P) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur b horizont (c). Pdc wijst op een matig natte (d) licht zandleembodem (P) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur b horizont (c). Lcc wijst op een matig droge (c) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur b horizont (c). Ldc wijst op een matig natte (d) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur b horizont (c). Ldc wijst op een matig natte (d) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur b horizont (c) Ldc wijst op een matig natte (d) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur b horizont (c) (databank ondergrond vlaanderen - verkenner, 2020)
op een droge (b) lemige zandbodem (S) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur b horizont (c) (databank ondergrond vlaanderen - verkenner, 2020)

figuur 23. Foto van de eijkelkamp 6.08 penetrometer met dieptereferentieplaat en belangrijke aanduidingen op de penetrometer (krachtopnemer (1); sondeerstang (2); conus (3)) (eijkelkamp, 2013)	ie 28
figuur 24. Weergave van een penetrogram (links) en een geïnterpoleerde dwarsdoorsnede (rechts) opgesteld m	et
figuur 25. Op de figuur wordt een steekmonsterboor weergegeven met extra benodigde attributen: hamer en	20
figuur 26 Foto's van de veris msp3-bodemscanner (links) en de cultivator (rechts), beide gebruikt on perceel 2	30
figuur 27. Foto's van de stonex multi-frequency gnss receiver (links) en de nautiz x8 handcomputer (rechts),	31
figuur 28. Foto van de exatrek t2 telemetrie module met isobus connectiekabel (exatrek, 2021)	32
figuur 29. Foto van de dii matrice 600 hexacopter (links) en foto van de multispectrale camera (rechts)	32
figuur 30. Foto van de new holland t7.270. Op de achterste driepuntsophanging is de kuhn dc 301 diepwoeler	
aangekoppeld. Deze was gebruikt voor de diepe bewerking in het kader van deze masterproef op perceel	2.
	33
figuur 31. Foto van de kuhn dc 301 diepwoeler	34
figuur 32. Foto van de profundus z diepwoeler van steeno	34
figuur 33. Foto van de zdf-u-5 diepwoeler van steeno	35
figuur 34. Foto van de samco field-lift	35
figuur 35. Foto van prime gx390 éénasser werktuigdrager.	36
figuur 36. Aanduiding van de exacte locatie van de opbrengstplots voor de manuele opbrengstbepaling van de	~~
zomergerst. De plots vormden een dambordpatroon. De plots waren 1,5 m breed en ongeveer 10 m lang.	37
dectoractsonderzeek van lideng ren. Aanduidingen van de proefenetelling in kader van deze masterproef	
werden aangebracht	28
figuur 38. De vijf punten op de dientereferentienlaat waar nenetrometingen werden gedaan	38
figuur 39. De locaties van de penetrometingen en bodemstalen (zwarte stippen).	39
figuur 40. De locaties van de opbrengstplots van de groenbedekker met verduidelijking van de rechthoeken	39
figuur 41. Voorstelling van de gedownloade data uit de exatrek webapplicatie in ggis 3.10. De data wordt hier	
gegradueerd weergegeven o.b.v. de hoogte van de achterste driepuntsophanging (%). 100% indien de het	:
maximaal omhoog is en 0% indien de hef helemaal beneden is.	40
figuur 42. Visualisatie van de hoogte van de driepuntsophanging i.f.v. de afstand ten opzichte van het eerste pur	nt
in de diepe bewerkingslijn. Data aan het begin en einde van de lijn die meer dan 5% bedroegen werden	
verwijderd. Data in het midden van de lijn boven 10% werden verwijderd	41
figuur 43. Afbakening van de plots o.b.v. de gefilterde can-bus-data (punten). Binnen elk plot werd er een buffer	
van -1,5 m toegepast. Binnen deze buffer werd het gemiddelde en de q90 van de gewashoogte bepaald.	42
figuur 44. Rijpatroon van de veris msp-3 bodemscan (links) en van de scanning met een tand (rechts).	45
diepwoelen en de penetrometingen/zwarte stinnen) (rechts)	16
figuur 46. Afbakening van de plots o b v. de gefilterde can-bus-data (nunten). Binnen elk plot werd er een buffer	+0
van -3 m toegepast. Binnen deze buffer werd dan een proefvlak met gelijk oppervlak gelegd. Binnen dit	
proefvlak werd het gemiddelde en de g90 van de gewashoogte, de ndvi en de ndre bepaald.	48
figuur 47. Output van de trekkrachtmonitoring geregistreerd via de can-bus tijdens de scanning met één tand op	
perceel 2 met een new holland tractor. De data zijn hier reeds gefilterd o.b.v. de hoogte van de achterste	
driepuntsophanging. Normaal zouden alle datapunten dus een positieve trekkracht moeten hebben	49
figuur 48. Het elektrisch circuit van de trekkrachtbouten (b032 en b031) van fendt (vliegen, 2021)	50
figuur 49. Opbouw van een trekkrachtbout (dupon, 2020)	50
figuur 50. Trek- of drukkrachten (f) die inwerken op b031 en b032 bij fendt tractoren (vliegen, 2021)	51
figuur 51. Output van de trekkrachtmonitoring geregistreerd via de can-bus tijdens het diepwoelen op perceel 1 i	n
het kader van deze masterproef met een new holland tractor. Als het werktuig naar beneden is (centraal op	) 
het veld) zijn de waarden positief. Als het werktuig naar boven is (kopakker) zijn de waarden negatief	51
figuur 52. Output van de trekkrachtmonitoring geregistreerd via de can-bus tijdens het cultiveren met een fendt	
tractor. Als net werktuig naar beneden is (centraal op net veld) zijn de waarden negatier. Als net werktuig	ະວ
figuur 53. Aanduidingen van de proefonstelling op perceel 3 met op de achtergrond de emi-hodemscan	2כ
uitgevoerd in het najaar van 2020. De eo van de hodem wordt weergegeven voor 0-0.5 m-mv. De randen	
wijken duidelijk af van de rest van het veld. De locaties van de penetrometingen zijn hier ook aangeduid	
(zwarte stippen).	53
figuur 54. Visualisatie van de hoogte van de driepuntsophanging i.f.v. de afstand ten opzichte van het eerste pur	nt
in de diepe bewerkingslijn. Data aan het begin en einde van de lijn die meer dan 15% bedroegen werden	-
verwijderd. Data in het midden van de lijn boven 20% werden verwijderd	55
figuur 55. Kriging-kaart van de opbrengst van de zomergerst (links) met bijhorende standaardafwijking (rechts).	57

figuur 56. De gemiddeldes (punten) met standaardafwijking en de q90-waarden (balken) van de gewashoogte per halve strook (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de halve stroken aangeduid.
figuur 57. De opbrengst van de groenbedekker per halve strook (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking.
Op de x-as staan de halve stroken aangeduid. Op de y-as staat de opbrengst in kg/ha uitgedrukt
de x-as staan de stroken aangeduid. Op de y-as staat de opbrengst in kg/ha uitgedrukt
De diepte van de bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. De dieptes van de
penetrometingen zijn aangeduid met zwarte lijntjes. Er is te zien dat de controles (a c3 en b c3) een gelijkaardige doorspede bebben als de balve strook van bet variabel diepwoelen die niet bewerkt werd (a
v3). Verder zijn duidelijk de tanden vast te stellen op de gediepwoelde stroken (a d3, b d3 en b v3)
figuur 60. Voorstelling van de geïnterpoleerde dwarsdoorsneden in blok 3 genomen drie maanden na de diepe
bewerking. De diepte van de bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. Er is te zien dat de
halve strook van het variabel diepwoelen die niet bewerkt werd (a v3) een minder uitgesproken ploegzool had dan de controles (a c3 en b c3). Verder zijn duidelijk de tanden vast te stellen op de gediepwoelde
stroken (a d3. b d3 en b v3).
figuur 61. Gemodelleerd semi-variogram van de ph-data
figuur 62. Kriging-kaarten van de ec (0-30 cm-mv) (links) en de bijhorende standaardafwijking (rechts)
figuur 63. Kriging-kaarten van de ec (0-90 cm-mv) (links) en de bijhorende standaardafwijking (rechts)
figuur 64. Kriging-kaarten van het organischestorgenalte (links) en de bijnorende standaardatwijking (rechts) 66 figuur 65. Weergegeven volgens de ph-
classificatie van een zandleemgrond (tits et al., 2020). De door de landbouwer aangegeven 'slechte plek' is
aangeduid
figuur 66. Kriging-kaarten van het brandstofverbruik (links) en de bijhorende standaardafwijking (rechts) tijdens de
scanning met één tand
figuur 67 kriging-kaarten van het motorkoppel (links) en de bijnorende standaardatwijking (rechts) tijdens de
figuur 68. Weergave van de residuals tussen het brandstofverbruik en de EC-waarden (0-30 cm-mv links en 0-90
cm-mv rechts). Één geeft een goede correlatie aan, nul een slechte.
figuur 69. Weergave van de residuals tussen het motorkoppel en de EC-waarden (0-30 cm-mv links en 0-90 cm-
mv rechts). Één geeft een goede correlatie aan, nul een slechte
figuur 70. Orthomozaiek uit de dronevlucht met rgb-camera op 27 april 2021 op perceel 2
figuur 72 Het gemiddelde (punten) met standaardafwijking en de g90-waarden (balken) van de gewashoogte per
plot (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de plots aangeduid. Op de y-as staat
de gewashoogte in meter uitgedrukt75
figuur 73. Ndvi wintergerst
figuur 74. Het gemiddelde (punten) met standaardatwijking en de q90-waarden (balken) van de ndvi per plot
ndvi in *100 % uitgedrukt
figuur 75. Ndre wintergerst
figuur 76. Het gemiddelde (punten) met standaardafwijking en de q90-waarden (balken) van de ndre per plot
(grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de plots aangeduid. Op de y-as staat de
ndre in *100 % uitgedrukt
de 14 rtk-gps-punten gebruikt om het dtm op te bouwen. Rechts is de standaardafwijking op het dtm
weergegeven, eveneens met aanduiding van de 14 rtk-gps-punten
figuur 78. Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetratieweerstanden in blok a strook 1, 5 en 7. De diepte
van de diepe bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. De afstanden tussen de tanden en in
net dal zijn aangeduid
perceel 3. De kleurcode geeft het brandstofverbruik (I/h) weer. De plots zijn weergegeven en het type
diepwoeler staat ook weergegeven
figuur 80. Gemiddeld brandstofverbruik met standaardafwijking per strook. Op de x-as staat het blok met het type
diepwoeler aangeduid. Op de y-as staat het brandstofverbruik in l/h uitgedrukt
riguur ör. Gewasnoogte van de groenbedekker op perceel 1. De plots met bijhorende butter waarbinnen het
figuur 82. Voorstelling van de geïnterpoleerde dwarsdoorsneden op perceel 1 genomen vlak na de diepe
bewerking. De diepte van de bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. De dieptes van de
penetrometingen zijn aangeduid met een zwart lijntjes 100

figuu	r 83.	Voorstellin	g van d	e geïnterp	oleerde	dwarsdoor	sneden op	perceel 1	genomen	vlak na de di	epe	
	bew	erking. De	diepte v	van de bew	verking is	s aangedui	d met eer	n horizontal	e zwarte li	jn	1	04

figuur 84. Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetratieweerstanden in blok a.	Links zijn deze voor de
diepe bewerking en rechts zijn deze na de diepe bewerking. De diepte van de die	epe bewerking is aangeduid
met een horizontale zwarte lijn. Plot a3 en a4 zijn niet weergegeven. Dit waren de	e controles, hier vonden
geen metingen plaats na de diepe bewerking	

figuur 85. Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetratieweerstanden in blok b. Links zijn deze voor de diepe bewerking en rechts zijn deze na de diepe bewerking. De diepte van de diepe bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. Plot b3 en b4 zijn niet weergegeven. Dit waren de controles, hier vonden geen metingen plaats na de diepe bewerking.

```
figuur 86. Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetratieweerstanden in blok c. Links zijn deze voor de diepe bewerking en rechts zijn deze na de diepe bewerking. De diepte van de diepe bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. Plot c1 en c2 zijn niet weergegeven. Dit waren de controles, hier vonden geen metingen plaats na de diepe bewerking.
```

## Tabellen

tabel 1. Conclusie van een vergelijkende studie van arvidsson en håkansson (2014) over de re bodemverdichting van verschillende, veel voorkomende landbouwgewassen bekeken onder ver verdichtingsgraden. De opbrengst werd relatief omgezet t.o.v. De maximale opbrengst en de bulkdensiteit werd uitgedrukt als een percentage van de bulkdensiteit vlak na het diepwoelen (r Kolom 1 geeft de optimale verdichtingsgraad weer. Kolom 2 geeft het opbrengstverlies we verdichtingsgraad van 90% vergeleken met de optimale verdichtingsgraad (arvidsson & håkanss sonzoodlebbige	er bij een con, 2014).
tabel 2. Verandering (f/ba) in wintertarweonbrengstwinst, inputbesparing (vb. Nutriënten en brandstofve	
gebruikskost (vb. Machines, brandstofverbruik,) en brutowinst voor verschillende managements Er wordt aangenomen dat de opbrengstverliezen en de nutriëntenverliezen 100% teniet worden ge onder de verschillende managementstrategieën. Verder wordt aangenomen dat onder 'voorkomer opbrengstwinsten gedaan worden t.o.v. De gemiddelde opbrengst per hectare en dat brandstof be wordt onder control traffic farming (ctf, vaste rijpaden). De brutowinst wordt dus vooral bepaald do opbrengstwinsten en het verschil in gebruikskosten. De analyse berust op verschillende assumptie heeft zodus een grote variabiliteit. Echter zijn er wel duidelijke patronen in terug te vinden (chamer 2015).	trategieën. edaan 'espaard or es en n et al., 
tabel 3. Output van de normaliteitaftoetsing van de datasets.	
tabel 4. De totaalopbrengst, de meeropbrengst t.o.v. De controle en het gemiddeld brandstofverbruik pe	r strook. 61
tabel 5. Het verbruik gedurende de diepe bewerking op perceel 1 omgerekend naar l/ha	61
tabel 6. Output van de normaliteitaftoetsing van de datasets.	65
tabel 7. Gemiddelde, 10 <sup>de</sup> percentiel en 90 <sup>ste</sup> percentiel van de datasets	68
tabel 8. Correlatiecoëfficiënten tussen de relevante can-bus-parameters en de EC-waarden in kader van	n dit
onderzoek en de correlatiecoëfficiënten uit onderzoek van windels (2020) ter vergelijking (cursief). tabel 9. Mediaan van de penetratieweerstanden.	68 72
tabel 10. Correlatiecoëfficiënten tussen de relevante can-bus-parameters, de EC-waarden en de penetratieweerstanden.	
tabel 11. Gemiddelde, 10de percentiel en 90ste percentiel van de geëxtraheerde data	73
tabel 12. Correlatiecoëfficiënten tussen de relevante can-bus-parameters en de EC-waarden	73
tabel 13. Gravimetrisch vochtgehalte op perceel 3 voor de verschillende dieptes bepaald op 27/10/2020	en
6/11/2020. Plots CT en C2 zijn nier niet weergegeven omdat er op 6/11/2020 geen bodemstalen we	70
tabel 14. Het verbruik gedurende de diene bewerkingen op perceel 3 omgerekend naar l/ba en de bijbo	
kostprijs	
tabel 15. Gemiddelde, 10de percentiel en 90ste percentiel van de geëxtraheerde data	85
tabel 16. Correlatiecoëfficiënten tussen EC-waarden en can-bus-parameters per type diepwoeler	86
tabel 17. Verschil van de penetratieweerstanden (mpa) voor blok a, uitgemiddeld per 10 cm, voor en na bewerking. Sterk negatieve verschillen zijn aangeduid	de diepe 115
tabel 18. Verschil van de penetratieweerstanden (mpa) voor blok b, uitgemiddeld per 10 cm, voor en na	de diepe
bewerking. Sterk negatieve verschillen zijn aangeduid	117
tabel 19. Verschil van de penetratieweerstanden (mpa) voor blok c, uitgemiddeld per 10 cm, voor en na bewerking. Sterk negatieve verschillen zijn aangeduid. Soms kon de diepte van 80 cm-mv niet ber	de diepe eikt
worden waardoor hier geen waarden van zijn. Deze zijn aangeduid met '/'	119

# V. Samenvatting

Bodemverdichting is het verschijnsel waarbij de doorlatendheid van de bodem afneemt doordat bodempartikels dichter bij elkaar komen. Bodemverdichting ontstaat wanneer de precompressiestress-waarde, een maat voor de bodemsterkte, overschreden wordt. Hierop reageert de bodem met een permanente vervorming (Elsen et al., 2014; Whalley et al., 1995). Industrialisatie van de landbouw heeft gezorgd voor een drastische toename in het gewicht van landbouwmachines wat leidt tot een toegenomen risico op bodemverdichting (Vermeulen et al., 2013).

Bodemverdichting wordt aanzien als een bedreiging voor duurzame landbouw door haar klimatologische en economische gevolgen (Ren, 2020). Hoewel de klimatologische gevolgen heel belangrijk zijn (vb. meer broeikasgasemissies, meer run-off van nutriënten naar oppervlaktewater, meer inputvraag), worden de economische gevolgen het hardst gevoeld. Productiekosten nemen toe t.g.v. de noodzaak aan meer input en de omzet daalt door lagere opbrengst en slechtere kwaliteit (Chamen et al., 2015; Lipiec et al., 2003). Het is in het belang van de landbouwer dat deze verdichting gelokaliseerd en geremedieerd wordt. Echter is bodemverdichting niet zichtbaar aan het oppervlak waardoor de lokalisatie dient te gebeuren met specifieke toestellen die vaak niet zomaar voorhanden en/of zeer duur zijn. Momenteel worden manuele penetrometingen uitgevoerd om de indringingsweerstand van de bodem op te meten, maar deze zijn zeer arbeidsintensief en kunnen hierdoor niet gebruikt worden om de indringingsweerstand fijnmazig in kaart te brengen. Verder wordt er ook gebruikgemaakt van bodemscans die naast een indicatie van de bodemverdichting ook bodemparameters zoals de pH en organische stof kunnen opmeten. Echter zijn deze bodemscans zeer duur (Vilt, 2015).

Met de toekomstvisie op precisielandbouw is het belangrijk dat er nieuwe manieren worden gevonden om bodemverdichting fijnmazig in kaart te brengen die eenvoudig en goedkoop voorhanden zijn voor de landbouwer zodat een gerichte aanpak zoals plaatsspecifieke remediëring (vb. variabel diepwoelen) kan plaatsvinden. Een nieuwe ontwikkeling hierin is het ter beschikking stellen van allerlei data voor landbouwers. Naast opbrengst- en bodemdata is er ook data uit veldbewerkingen. Door technologische vooruitgang worden reeds verschillende componenten (sensoren, controllers) in hedendaagse landbouwmachines geconnecteerd door middel van CAN-bus, waarbij sensordata wordt gepubliceerd tijdens het gebruik (Windels, 2020). Deze gegevens (bv. motorparameters zoals brandstofverbruik of trekkracht via trekkrachtsensoren) kunnen tijdens veldbewerkingen worden uitgelezen met behulp van een datalogger (Exatrek, 2021). De data uit grondbewerkingen kunnen dan bijvoorbeeld gebruikt worden om variabiliteit in verdichting te lokaliseren en in kaart te brengen zodat plaatsspecifieke remediëring mogelijk is. Zo is het intuïtief duidelijk dat verdichting ervoor zal zorgen dat de tractor meer kracht nodig heeft om het werktuig door de grond te trekken. Dit zal zich vermoedelijk vertalen in een hogere trekkracht of een hoger brandstofverbruik. Het linken van CAN-bus-gegevens aan bodemverdichting wordt nog niet veel toegepast door het gebrek aan stavend onderzoek.

In deze masterproef werd de toepasbaarheid van verschillende fijnmazige meet- en remediëringstechnieken ter beheersing van bodemverdichting in landbouwpercelen nader bekeken. Specifiek werd er gezocht naar nieuwe manieren om bodemverdichting te lokaliseren, gebruikmakend van een CAN-bus-monitoringssysteem. Verder werden ook de effectiviteit en efficiëntie van het (variabel) diepwoelen en het effect ervan op de gewasopbrengsten t.o.v. de controle bekeken. Tot slot werd de effectiviteit van het opheffen van de bodemverdichting voor verschillende types diepwoeler nader bekeken.

Voor dit onderzoek werden allereerst voor verschillende grondbewerkingen de CAN-busgegevens uitgelezen met een Exatrek T2 datalogger. De correlatiecoëfficiënten tussen de relevante parameters zoals brandstofverbruik, motorkoppel, trekkracht en slip die intuïtief te koppelen zijn aan bodemverdichting, de elektrische geleidbaarheid (EC) uit een bodemscan en de penetratieweerstanden werden onderzocht. Hieruit bleek dat het brandstofverbruik, het motorkoppel en de trekkracht in staat waren om de variatie in EC te detecteren ( $r = \pm 0,5$ ) en in kaart te brengen ( $r = \pm 0,7$ ). Een relatie met de penetratieweerstand kon niet gelegd worden, maar dit was vermoedelijk door de te kleine dataset van penetratieweerstanden. Uit dit onderzoek bleek ook dat de CAN-bus-parameters niet altijd in staat zijn de variatie in EC vast te stellen. Dit had vermoedelijk als oorzaak dat de EC meer bepaald werd door andere variabelen dan enkel de bodemverdichting.

Verder werd in dit onderzoek ook het effect van een (variabele) diepe bewerking op de gewashoogte, gewasontwikkeling en gewasopbrengst bekeken. Deze parameters werden bepaald m.b.v. een RGB- en een multispectrale camera gemonteerd op een drone en via opbrengstmetingen. Het toepassen van een al dan niet diepe bewerking bleek op perceel 1 geen significant effect (p=0,14 / p=0,11) te hebben op zowel de gewasopbrengst als de gewashoogte. Wel zorgde het variabel diepwoelen en het diepwoelen van de volledige strook voor een meeropbrengst t.o.v. geen behandeling, visueel vastgesteld. De bevindingen over het variabel diepwoelen dienen zeker gevalideerd te worden met verder onderzoek aangezien het variabel diepwoelen hier een bevoordeelde locatie kreeg t.o.v. de andere behandelingen. Dit zou kunnen verklaren waarom het variabel diepwoelen een significant (p=0.02) hogere opbrengst had dan het diepwoelen van de volledige strook, wat niet zoals verwacht was. In blok 3 van deze proefopstelling was er vermoedelijk geen bevooroordeling, waardoor de uitkomst van blok 3 alvast een idee kon geven van de verhoudingen van de opbrengsten onder de verschillende behandelingen. Wanneer de kosten naast deze opbrengsten werden geplaatst, was duidelijk dat het variabel diepwoelen efficiënter was dan het diepwoelen van de volledige strook. Op perceel 2 verschilden de gewashoogte en de NDVI en NDRE ook niet tussen een al dan niet diepe bewerking. Binnen een gediepwoelde plot verschilden de drie parameters wel. Dit deed vermoeden dat andere variabelen limiterend waren voor de groei.

Tot slot werd ook het effect van het type diepwoeler op het openbreken van de ploegzool bekeken m.b.v. penetrometingen. Ook werd hier gekeken naar het brandstofverbruik wat gemonitord werd m.b.v. de CAN-bus. De types diepwoeler verschilden in het aantal en type tanden. Zo bleek dat de 7-tand de verdichting openbrak over de volledige breedte. Wel ging dit vermoedelijk gepaard met een verlies aan bodemstabiliteit wat volgende bewerkingen bemoeilijkt. De 5- en 3-tand braken ook door de verdichting naar de diepere ondergrond, maar niet over de volledige breedte waardoor er vermoedelijk nog een deel van de stabiliteit overbleef. Of beide types in de praktijk nog genoeg stabiliteit voorzagen en of beide types effectief genoeg openbraken voor een optimale gewasgroei, werden niet gevalideerd. Verder verbruikte de 7-tand meer brandstof dan de 5- en 3-tand. Tussen deze laatste twee was het verschil veel kleiner. Met beide bevindingen in het achterhoofd bleek dat de 7-tand, zonder het uitvoeren van exacte opbrengstmetingen, zeker geen meerwaarde bood t.o.v. de 5- of 3-tand. De keuze tussen de 5- en 3-tand was met deze informatie minder eenvoudig te maken.

Dit onderzoek toonde aan dat de CAN-bus-parameters (vnl. brandstofverbruik, trekkracht en motorkoppel) potentieel hebben zowel voor detectie als het in kaart brengen van bodemverdichting. Echter zou er nog meer validatie moeten gebeuren t.o.v. de penetratieweerstand i.p.v. met de EC-waarden door de invloed van vele andere parameters op de EC-waarden. Voor een fijnmazige validatie tegenover de penetratieweerstand zal eerder een autonome of horizontale penetrometer gebruikt moeten worden. Verder toonde dit onderzoek dat (variabel) diepwoelen een hogere opbrengst kan geven dan wanneer er geen

diepe bewerking plaatsvond. Echter is dit niet gegarandeerd. Meer onderzoek over hoe het (variabel) diepwoelen optimaal toe te passen in de praktijk, rekening houdend met andere limiterende parameters, is hiervoor nodig.

# Hoofdstuk 1. Inleiding

Bodemverdichting wordt een steeds groter probleem door de industrialisatie van de landbouw die zorgt voor een drastische toename in het gewicht van landbouwmachines (Vermeulen et al., 2013). Bodemverdichting wordt aanzien als een bedreiging voor duurzame landbouw door de grote milieukost, maar ook voor zijn grote economische kost (Ren, 2020). De opbrengst en de kwaliteit van het gewas worden sterk nadelig beïnvloed door bodemverdichting (Lipiec et al., 2003). Landbouwers moeten steeds meer nadenken over de remediëring ervan, maar omdat bodemverdichting moeilijk zichtbaar is aan het oppervlak, dient het opmeten ervan met specifieke toestellen te gebeuren. Deze toestellen zijn vaak niet zomaar voorhanden voor een landbouwer.

Vaak worden manuele penetrometingen gebruikt om de indringingsweerstand van de bodem op te meten. Een groot nadeel van manuele penetrometingen is dat het een *stop-and-go* manier is die het een eenvoudige, maar zeer arbeidsintensieve techniek maakt. Op die manier is het in de praktijk vaak moeilijk om voldoende data te collecteren om de variabiliteit in het veld in kaart te brengen. Er moet al een algemeen beeld van het veld zijn om gericht metingen te doen (Cho et al., 2015). Dit gebrek aan fijnmazigheid gaat ook in tegen de toekomstvisie gericht op precisielandbouw waar door het verzamelen van fijnmazige plaats- en tijdsafhankelijke data wordt beoogd om de variabiliteit in het veld in kaart te brengen. Hiermee worden dan plaats- en tijdsgerichte acties ondernomen die zorgen voor een hogere efficiëntie, productiviteit en duurzaamheid van landbouwactiviteiten.

Een alternatief is de uitvoering van een bodemscan die meer perceelsdekkend is. Naast een indicatie van de bodemverdichting, kunnen er ook andere parameters zoals het organischestofgehalte of de pH bepaald worden. Een groot nadeel van deze technieken is de hoge kostprijs (Vilt, 2015). Verder vragen de uitvoering, de verwerking van de data en de interpretatie hiervan de nodige expertise (Dillen et al., z.d.). Tot slot wordt er ook gebruikgemaakt van metingen die niet rechtstreeks te linken zijn aan bodemverdichting. Zo worden de beelden van *proximal* en *remote sensing* gebruikt. Deze beelden geven een indicatie van de gewasgroei en gewashoogte die een indicatie kunnen zijn voor bodemverdichting. Echter zijn deze technieken ook zeer duur en vragen ook hier de uitvoering en de verwerking van de data de nodige expertise.

Er dient op zoek gegaan te worden naar fijnmazige meettechnieken die goedkoop en eenvoudig ter beschikking gesteld kunnen worden van de landbouwer. Een nieuwe ontwikkeling hierin is dat door technologische vooruitgang reeds verschillende componenten (sensoren, controllers) in hedendaagse landbouwmachines geconnecteerd worden door middel van CAN-bus, waarbij sensordata wordt gepubliceerd tijdens het gebruik. Het primaire doel van de CAN-bus is om de communicatie die plaatsvindt in voertuigen, onder andere tussen en binnen systemen in de tractor en tussen tractoren en werktuigen, te standaardiseren en te beperken (Windels, 2020). De verstuurde gegevens (bv. motorparameters zoals brandstofverbruik of trekkracht via trekkrachtsensoren) over dit netwerk kunnen worden uitgelezen met behulp van een datalogger die continu de CAN-bus-data uitleest tijdens een bewerking en opslaat (Exatrek, 2021). Dit levert dan een bron aan nuttige informatie. De data uit grondbewerkingen kunnen dan bijvoorbeeld gebruikt worden om variabiliteit in verdichting te lokaliseren en in kaart te brengen zodat plaatsspecifieke remediëring mogelijk is. Zo is het intuïtief duidelijk dat verdichting er zal voor zorgen dat de tractor meer kracht nodig heeft om het werktuig door de grond te trekken. Dit zal zich vermoedelijk vertalen in een hogere

trekkracht of een hoger brandstofverbruik. Het linken van CAN-bus-gegevens aan bodemverdichting wordt nog niet veel toegepast door het gebrek aan stavend onderzoek.

Hedendaagse landbouwers passen de remediëring vaak nog niet gericht toe door het gebrek aan informatie. Meestal wordt er gebruikgemaakt van mechanische manieren die worden uitgevoerd op het volledige perceel. Mechanische manieren vragen een groot brandstofverbruik die de winst in opbrengst en kwaliteit al deels te niet doet. Plaatsspecifieke remediëring (bv. variabel diepwoelen) kan onder andere het brandstofverbruik verminderen waardoor mogelijk meer winst bekomen wordt.

Verder wordt er ook vaak niet nagedacht over het type werktuig dat gebruikt wordt voor de remediëring. Er bestaan namelijk verschillende werktuigen die gebruikt kunnen worden voor de remediëring van bodemverdichting met elk hun eigen effectiviteit en bijhorende voor- en nadelen. Zo staat het vast dat een diepwoeler met zeven tanden meer trekkracht zal vragen dan een diepwoeler met 3 tanden. Er wordt echter minder stilgestaan bij wat, naast het effect op de trekkracht, het effect op de effectiviteit van de remediëring is en op de kwaliteit van de bodem achteraf doordat dit moeilijk meetbaar is.

De uitdaging ligt dus in het vinden van manieren die bodemverdichting fijnmazig kunnen detecteren en in kaart brengen en die eenvoudig en goedkoop ter beschikking zijn van de landbouwer. Deze technieken kunnen dan gebruikt worden om taakkaarten op te stellen zodat plaatsspecifieke remediëring van bodemverdichting meer toegepast kan worden. De plaatsspecifieke remediëring dient hiervoor ook geoptimaliseerd te worden zodat de grootste efficiëntie behaald kan worden.

Concreet worden volgende onderzoeksvragen in deze masterproef bekeken:

- a) Wat is het effect van (variabel) diepwoelen op de gewasopbrengst? Indien er een meeropbrengst is, valt dan het brandstofverbruik voor de diepe bewerking te rechtvaardigen ten opzichte van deze meeropbrengst?
- b) Wat zijn snelle en perceelsdekkende manieren, die eenvoudig ter beschikking gesteld kunnen worden aan de landbouwer (vb. motorparameters zoals brandstofverbruik of trekkracht via trekkrachtsensoren gedurende een grondbewerking), om bodemverdichting te detecteren en in kaart te brengen?
- c) Wat is het effect van verschillende types diepwoeler op de effectiviteit van het openbreken van de ploegzool? Is er een significant verschil in brandstofverbruik tussen deze verschillende types diepwoeler?

In hoofdstuk 2 worden twee belangrijke onderwerpen verder uitgediept als kader voor deze masterproef. Ten eerste wordt gekeken naar wat bodemverdichting is, hoe ze ontstaat, wat de gevolgen zijn en hoe ze vastgesteld en aangepakt wordt. Ten tweede wordt dieper ingegaan op wat precisielandbouw is en welke technieken daar onder vallen. In hoofdstuk 3 wordt dan ingegaan op de gebruikte materialen en de methode voor het praktisch onderzoek van deze masterproef. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de resultaten weergegeven met bijhorende discussie. Tot slot wordt in hoofdstuk 5 een algemeen besluit gegeven met een blik op toekomstig onderzoek. Hoofdstuk 6 en 7 geven nog respectievelijk de referenties en de bijlagen weer.

# Hoofdstuk 2. Literatuurstudie

## 2.1. Bodemverdichting

## 2.1.1. Inleiding

Industrialisatie van de landbouw heeft gezorgd voor een drastische toename in het gewicht van landbouwmachines wat leidt tot een toegenomen risico op bodemverdichting. Uit een vergelijkende studie van Vermeulen et al. (2013) blijkt dat de maximale wiellast van de meest gebruikte landbouwmachines in Nederland gemiddeld is toegenomen van ca. 3700 kg in 1980 naar ca. 7100 kg in 2010. De hoogst voorkomende wiellast in 1980 bedroeg 8000 kg, deze in 2010 bedroeg 16500 kg. Om de toegenomen wiellasten te dragen en om de bodemdruk onder de banden minimaal te houden, werden bredere en grotere banden gebruikt. Al deze veranderingen leidden tot een verandering in bodembelasting. Vermeulen et al. (2013) concluderen dat op 25 cm-mv de grondspanning gedurende 30 jaar gelijk bleef, en die op 40 cm-mv en 50 cm-mv toegenomen zijn met respectievelijk 10% en 20%. Er is dus een toegenomen risico voor bodemverdichting op grotere diepte.

Bodemverdichting is het proces waarbij de porositeit en de doorlatendheid van de bodem afnemen doordat bodempartikels dichter bij elkaar komen (Elsen et al., 2014). Als gevolg hiervan is er een stijging van de bulkdensiteit en de penetratieweerstand van de bodem (Carrara et al., 2007; Raper, 2005). Er treedt een verandering van de fysische bodemeigenschappen op en dit heeft ook een invloed op de chemische en biologische bodemeigenschappen. Deze bodemeigenschappen spelen een belangrijke rol in de plantengroei (Ren, 2020). Opbrengstverliezen in het veld door een niet-optimale bodemdichtheid lopen van enkele procenten tot 10 à 20 procent ten opzichte van die bij de ideale plantspecifieke bodemdichtheid (zie sectie Gewasgroei) (Arvidsson & Håkansson, 2014; Botta et al., 2010; Elsen et al., 2014; Raghavan et al., 1979). Met een gerichte aanpak om deze bodemverdichting te voorkomen of op te heffen, kan mogelijk een aanzienlijke stijging in opbrengst bekomen worden.

Bodemverdichting is een complex gegeven dat vaak alleen als een probleem wordt aanzien, maar het kan ook positieve effecten op de opbrengst hebben. De relatie tussen opbrengst en bodemdichtheid heeft namelijk een parabolisch verloop (Arvidsson & Håkansson, 2014). Dit verloop is ook niet constant, maar afhankelijk van de omstandigheden. Zo heeft Voorhees (1987) een positief effect vastgesteld van bodemverdichting op de opbrengst van sojabonen bij droge omstandigheden en een negatief effect tijdens natte omstandigheden. Dit heeft respectievelijk te maken met een betere waterhuishouding en een slechtere luchttoevoer.

## 2.1.2. Ontstaan van bodemverdichting

Bodemverdichting ontstaat wanneer de precompressiestress-waarde, een maat voor de bodemsterkte, overschreden wordt. Als de toegepaste druk op de bodem kleiner is dan deze waarde reageert een bodem elastisch. Bij overschrijding van deze waarde reageert de bodem met een permanente vervorming (Elsen et al., 2014; Whalley et al., 1995). De precompressiestress-waarde is niet gelijk voor verschillende bodems, maar is sterk afhankelijk van de kwetsbaarheid en de gevoeligheid van de bodem (Elsen et al., 2014; Prosensols, 2011).

De kwetsbaarheid van een bodem voor verdichting wordt bepaald door het bodemvochtgehalte. Hoe droger de bodem is, hoe minder vervorming en verdichting van de bodemstructuur optreden onder een bepaalde druk (Batey, 2009). Een hoger bodemvochtgehalte vermindert namelijk de stabiliteit en de treksterkte van de bodemaggregaten (Lipiec & Tarkiewicz, 1986). Het vocht gedraagt zich als een smeermiddel zodat bodemdeeltjes zich makkelijk ten opzichte van elkaar kunnen verplaatsen (Prosensols, 2011).

De gevoeligheid van een bodem voor verdichting wordt bepaald door de bodemtextuur en de bodemstructuur. Een bodem bestaat uit minerale deeltjes, organisch materiaal, water en lucht (Figuur 1). De bodemtextuur wordt bepaald door de korrelgroottedistributie van de minerale deeltjes. Een gevarieerde korrelgroottedistributie in de bodem zorgt voor snellere verdichting doordat onder druk de kleine deeltjes in de holtes tussen de grotere deeltjes schuiven (Prosensols, 2011). De bodemstructuur wordt bepaald door de mate waarop de vaste bodemdeeltjes gegroepeerd zijn tot aggregaten. Aggregaten zijn opgebouwd uit organisch materiaal en minerale deeltjes die door fysische en chemische reacties worden samengehouden. Ze komen voor in verschillende groottes zodat een variëteit aan poriën ontstaat. Een bodem met een kruimelstructuur met duidelijke aggregaten is ideaal door het stabiele karakter van deze structuur (Prosensols, 2011). De stabiliteit van de aggregaten wordt, naast het vochtgehalte, sterk beïnvloed door de hoeveelheid organische stof en de zuurtegraad (Elsen et al., 2014; VLM, 2015b). Zo hebben Kok et al. (1996) geconcludeerd dat bodems rijk aan organische stof een betere structuur hebben door vorming van grotere en sterkere bodemaggregaten. Deze bodems zijn beter bestand tegen verdichting.



Figuur 1. Samenstelling van de bodem (Prosensols, 2011; Wageningen University and research, z.d.).

Bij bodemverdichting neemt de doorlatendheid van de bodem af doordat bodempartikels dichter bij elkaar komen (Elsen et al., 2014). De uitgeoefende druk veroorzaakt een herschikking van de aggregaten zodat een nieuw evenwicht bereikt wordt tussen de druk die ondervonden wordt en de weerstand die de bodem biedt. De grootte, de vorm, de ruimtelijke schikking en de interne samenhang van de aggregaten veranderen waardoor hoekige of afgeplatte aggregaten gevormd worden (Prosensols, 2011). De verminderde porositeit en doorlatendheid van de bodem zorgen voor een verstoorde lucht- en waterhuishouding. Door

bodemverdichting daalt het totale poriënvolume, daalt het aandeel macroporiën en stijgt het aandeel microporiën. Een goede bodemstructuur bezit voldoende macroporiën die verantwoordelijk zijn voor het water- en luchttransport (Elsen et al., 2014). Macroporiën zorgen ervoor dat onder natte omstandigheden er nog steeds lucht aanwezig is in de bodem door een goede hydraulische geleidbaarheid (Elsen et al., 2014). Een verlies aan macroporiën leidt tot een zuurstoftekort in de bodem evenals een verminderde infiltratie, verhoogde run-off en verhoogde erosie (Shah et al., 2017). Bodemverdichting zorgt verder voor een stijging in de bulkdensiteit en de penetratieweerstand, wat wortelgroei bemoeilijkt (Carrara et al., 2007; Raper, 2005). Ook daalt het bodemleven drastisch door een gebrek aan lucht en een te hoge penetratieweerstand (Chung et al., 2006). Al deze veranderingen zorgen voor een slechtere bodemkwaliteit wat resulteert in een lagere opbrengst en een slechtere kwaliteit van het gewas (Lipiec et al., 2003). Tot slot is er, door de veranderende bodemeigenschappen, ook een effect op het milieu. Zo laat bodemverdichting bijvoorbeeld een minder efficiënte opname van nutriënten door planten toe wat leidt tot uitloging van deze overschotten naar oppervlakte- en grondwater. Bodemverdichting wordt aanzien als een bedreiging voor duurzame landbouw (Ren, 2020).

Aan de basis van bodemverdichting liggen de verhoogde uitgeoefende druk door zwaardere machines en het werken in slechte omstandigheden (bv. te vochtig), maar ook natuurlijke fenomenen (bv. hevige regen) kunnen tot bodemverdichting leiden (Batey, 2009; Shah et al., 2017).

Bodemverdichting komt voor op verschillende dieptes. Zo valt er een onderscheid te maken tussen oppervlakkige verdichting die zich in de bouwvoor (tot 20 à 30 cm-mv) bevindt en verdichting in de diepere ondergrond. Bodemverdichting in diepere ondergrond is problematisch aangezien deze verdichting van langere duur is en remediëring minder gemakkelijk is (Chamen et al., 2015). Meestal komt de verdichting voor net onder de bouwvoor. Deze verdichte laag is enkele centimeters dik en heet de ploegzool. Ze vormt een moeilijk doordringbare laag voor wortels, water en bodemorganismen. Ze wordt gevormd doordat de bodem telkens tot op dezelfde diepte bewerkt wordt en de vorming wordt vaak nog versterkt door de manier waarop het ploegen gebeurt (Prosensols, 2011). Bij een conventioneel kerende bodembewerking rijdt de tractor namelijk in de ploegvoor, de beschermende laag van de bouwvoor is dus niet meer aanwezig. Ook kan het zoolijzer van de ploeg voor een versmerend effect zorgen (Vanderstraeten, 2015).

## 2.1.3. Gevolgen van bodemverdichting

Bodemverdichting heeft effecten op verschillende bodemfuncties die sterk gelinkt zijn. Een visuele vergelijking van deze bodemfuncties tussen een kwalitatief goede en verdichte bodem is te zien in Figuur 2. Een verdere uitdieping van de belangrijkste gevolgen is hieronder neergeschreven.



Figuur 2. Een visuele weergave van de bodemfuncties in een kwalitatief goede (links) en verdichte (rechts) bodem. Rechts is te zien dat er meer hulpstoffen voor de landbouw nodig zijn (vb. meststoffen, gewasbeschermingsmiddelen, brandstof tijdens bewerkingen,...) (VLM, 2015a).

### 2.1.3.1. Water

Door een verandering in bodemstructuur door bodemverdichting treedt er een verstoring van de waterhuishouding op. Onder verdichting daalt het totale poriënvolume, daalt het aandeel macroporiën en stijgt het aandeel microporiën. Een goede bodemstructuur bezit voldoende macroporiën die verantwoordelijk zijn voor het water- en luchttransport (Elsen et al., 2014). Er ontstaat een verminderde hydraulische geleidbaarheid wat zorgt voor een verminderde infiltratie, verhoogde run-off en verhoogde erosie (Boone et al., 1978; Shah et al., 2017). Daarbij bevatten verdichte bodems meer water bij veldcapaciteit, hoewel er minder water beschikbaar is voor de planten doordat het water in kleinere poriën zit (Cambi et al., 2015). Tot slot wordt het capillaire stijgen van het grondwater ook sterk beïnvloed (MIRA, 2013). Boone et al. (1978) concluderen dat in een ploegzool de mogelijkheid tot capillair stijgen verhoogt waardoor het kritisch grondwaterpeil lager ligt. Echter, indien het grondwaterpeil daalt tot onder het kritische grondwaterpeil zullen de waterfluxen dalen. Dit watertekort kan enkel gecorrigeerd worden door diepere wortelgroei wat bij het voorkomen van een ploegzool vaak niet mogelijk is. In de zomer leidt bodemverdichting tot een snellere droogtestress door een gebrek aan water, met een verlies in opbrengst als gevolg. In de winter leidt verdichting tot meer overstromingen en erosie (Chamen et al., 2015). Bodemverdichting heeft dus een negatief effect op het bufferend vermogen van de bodem met zware economische gevolgen. Daarbij zorgt klimaatverandering voor extremere weersomstandigheden die de problemen doen toenemen.

Droogte is in België de laatste jaren een groot probleem. België is één van de Europese landen die het hardst worden getroffen door droogte. Het grondwaterpeil staat lager dan het zou moeten staan. Van de OESO-regio's scoort Vlaanderen, op drie na, het slechtst voor waterbeschikbaarheid (Vilt, 2020). Om de strijd tegen droogte in Vlaanderen tegen te gaan, is in 2020 de Blue Deal goedgekeurd. Deze omvat 70 maatregelen die de basis vormen voor een Vlaams klimaatadaptatieplan 2021-2030 dat de risico's op watertekorten en wateroverlast moet minimaliseren. Er dient maximaal ingezet te worden op waterberging, infiltratie en duurzaam watergebruik (Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, 2020).

Bodemerosie door water heeft grote gevolgen zowel lokaal als stroomafwaarts. Lokaal zorgt het voor een groot verlies aan vruchtbare bodem door de afspoeling van de toplaag die de

nutriënten en het organisch materiaal bevat. Dit gaat gepaard met een verminderde diepte van het bewortelbaar bodemprofiel. Verder daalt het vermogen van de bodem om water op te slaan voor de planten (MIRA, 2013). Al deze factoren leiden tot een verlies aan opbrengst. Uit een studie van Bakker et al. (2004) blijkt dat een bodemverlies van 10 cm leidt tot een gemiddeld opbrengstverlies van ca. 4 %. Stroomafwaarts zorgt het voor sedimentaanvoer in waterlopen die hierdoor minder bufferend worden waardoor kansen op overstromingen toenemen. Bovendien worden er grote hoeveelheden nutriënten meegenomen die de kwaliteit van het oppervlaktewater sterk doen dalen. Dit bemoeilijkt de opruiming van vervuilde wateren en waterbodems. Dit is niet wenselijk in het kader van de 'Europese Kaderrichtlijn Water' die een goede toestand van de watersystemen beoogt tegen 2027.

### 2.1.3.2. Zuurstof

Naast een verstoring in de waterhuishouding treedt er ook een verstoring op in de luchthuishouding door het verlies aan macroporiën (Cambi et al., 2015). Macroporiën zorgen ervoor dat er onder natte omstandigheden nog steeds lucht aanwezig is in de bodem door een goede hydraulische geleidbaarheid (Elsen et al., 2014). Een verlies aan macroporiën leidt tot een zuurstoftekort in de bodem (Shah et al., 2017). Dit heeft gevolgen voor de groei van het gewas, maar heeft ook een effect op de bodemfauna. Door een gebrek aan zuurstof treedt er minder mineralisatie op waardoor minder nutriënten ter beschikking komen. Daarbij leidt een gebrek aan zuurstof tot verhoogde en onvolledige denitrificatie wat de stikstof vrijzet als lachgas. Dit zorgt voor een lagere effectiviteit van de meststof, tot een groot verlies naar de omgeving en vrijstelling van broeikasgassen (Soane & Van Ouwerkerk, 1995).

### 2.1.3.3. Bodemleven

De effecten op de bodemfauna zijn variabel (Chamen et al., 2015). Meestal is er wel een globaal negatief effect op de bodemgemeenschappen (Cambi et al., 2015). Hun biomassa evenals hun soortenaantal is vaak sterk gereduceerd onder verdichte omstandigheden. De oorzaak hiervan is een verlies aan habitats door een verlies aan macroporiën (Beylich et al., 2010). Een verlies aan bodemfauna leidt tot een verminderde bodemproductiviteit (vb. mineralisatie).

### 2.1.3.4. Gewasgroei

De gewassen worden ook rechtstreeks sterk beïnvloed door bodemverdichting wat leidt tot een daling in opbrengst. Zo wordt de wortelgroei sterk gelimiteerd in verticale richting (Beutler et al., 2007; Kumar et al., 2018). Dit leidt tot een verhoogde concentratie wortels in de bovenste lagen en een verminderde concentratie in de diepe lagen (Figuur 3) (Beutler et al., 2007; Lipiec et al., 2003). Gilman et al. (1986) concluderen dat in een verdichte bodem 70 % of meer van de wortels van een *Gleditsia triacanthos* var. inermis (doornloze valse christusdoorn) zich in de bovenste 12 cm bevinden ten opzichte van 40 % in een niet verdichte bodem. Verder daalt het aandeel hoofdwortels en neemt het aandeel zijwortels toe (Figuur 4) (Beutler et al., 2007).



Figuur 3. Wortelontwikkeling van een maïsplant onder verdichte omstandigheden. De wortels zijn sterk geconcentreerd in de bovenste laag (Wolkowski & Lowery, 2008).



 $T_6$ = 6 tractor passages (RP = 4.81 MPa,  $D_b$  = 1.75 Mg m<sup>3</sup>)



Figuur 4. Wortelontwikkeling van een sojaplant onder verschillende verdichtingsgraden na X passages van een 11 ton tractor (RP= gemiddelde penetratieweerstand van 0-20 cm-mv;  $D_b$ = bulkdensiteit 0-20 cm-mv). Het aandeel zijwortels neemt sterk toe bij toenemende bodemverdichting (Beutler et al., 2007).

De veranderde wortelgroei zorgt samen met een verandering in hydraulische bodemeigenschappen en een verandering in mineralisatiepotentieel van de bodem voor een verminderde nutriëntenopname (Kumar et al., 2018). Dit zorgt voor een lagere effectiviteit van de meststof en tot een groot verlies naar de omgeving (Lipiec et al., 2003). Zo blijkt de stikstofopname van zomertarwe en zomergerst in sterk verdichte bodems af te nemen met respectievelijk 30% en 40% (Kuht & Reintam, 2004). Deze beperking in stikstofopname beperkt ook de opname van fosfor (Tu & Tan, 1991).

De verminderde wortelgroei beïnvloedt ook de stomatale weerstand door een verhoogde productie van abscisinezuur (ABA). Door een gebrek aan diepe wortels ontstaat er sneller droogtestress waardoor de stomata sluiten. Dit zorgt voor verminderde groei doordat er minder fotosynthese plaatsvindt en zodus voor een lagere opbrengst. De bladgroei, de planthoogte

(Figuur 5) en de uniformiteit worden ook beperkt onder bodemverdichting, de plantopkomst vertraagt (Figuur 5) en de variabiliteit neemt toe (Beutler et al., 2007; Tu & Tan, 1991). Wortels zijn door de slechte omstandigheden ook gevoeliger aan wortelrot. De activiteit van pathogenen is namelijk groter onder natte, weinig verluchte omstandigheden (Beutler et al., 2007; Tu & Tan, 1991). Vele factoren beïnvloeden de opbrengst onder bodemverdichting, maar de basis van het verlies aan opbrengst door bodemverdichting is dat de bevoorrading van water en nutriënten kleiner is dan dat het gewas nodig heeft (Boone, 1986).



Figuur 5. Het effect van bodemverdichting op twee kenmerken van gewasgroei. Links: Het effect van verschillende verdichtingsgraden t.g.v. verschillende wiellasten op de opkomst van maïs. Rechts: het effect van verschillende verdichtingsgraden t.g.v. verschillende wiellasten op de planthoogte van maïs (Wolkowski & Lowery, 2008).

Het effect van verdichting op de opbrengst is voor de meest voorkomende landbouwgewassen al bestudeerd en is algemeen negatief. Echter, weinig studies bekeken het verschil in plantspecifieke respons op de verdichting (Arvidsson & Håkansson, 2014). In een vergelijkende studie van Arvidsson en Håkansson (2014) worden de reacties op bodemverdichting van verschillende veel voorkomende landbouwgewassen bekeken onder verschillende verdichtingsgraden. Deze studie geeft een overzicht van verschillende kortetermijnstudies in Zweden over het effect van de ploegzool op de opbrengst. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 1. Er wordt geconcludeerd dat verschillende landbouwgewassen verschillend reageren op gelijke bodemdichtheden en dat ieder gewas ook zijn eigen optimum Algemeen wordt er besloten dat tweezaadlobbigen gevoeliger zijn heeft. aan bodemverdichting dan eenzaadlobbigen. In kolom 2 is te zien dat de opbrengstverschillen onder bodemverdichting aanzienlijk kunnen zijn ten opzichte van de optimale verdichtingsgraad. Deze globale fenomenen komen overeen met andere studies, maar door de variabiliteit van andere factoren (vb. vochtgehalte) kunnen de uitkomsten sterk variëren.

Tabel 1. Conclusie van een vergelijkende studie van Arvidsson en Håkansson (2014) over de reacties op bodemverdichting van verschillende, veel voorkomende landbouwgewassen bekeken onder verschillende verdichtingsgraden. De opbrengst werd relatief omgezet t.o.v. de maximale opbrengst en de bijhorende bulkdensiteit werd uitgedrukt als een percentage van de bulkdensiteit vlak na het diepwoelen (referentie). Kolom 1 geeft de optimale verdichtingsgraad weer. Kolom 2 geeft het opbrengstverlies weer bij een verdichtingsgraad van 90% vergeleken met de optimale verdichtingsgraad (Arvidsson & Håkansson, 2014). °eenzaadlobbige

	Optimale verdichtingsgraad (%)	Opbrengstverlies verdichtingsgraad 90% (%)
Zomertarwe°	86,6	1,0
Gerst°	83,6	1,3
Lentekoolzaad	80,6	6,1
Haver	83,0	5,0
Suikerbiet	82,1	9,0
Aardappel	77,7	6,9
Erwten	79,6	5,6
Paardenboon	79,9	21,3
Winterrogge°	80,7	5,5
Wintertarwe°	- (tolerant)	- (tolerant)
Winterkoolzaad	79,8	9,7

#### 2.1.3.5. Milieu

Het effect van bodemverdichting op het milieu is lange tijd buiten beschouwing gelaten. Bodemverdichting resulteert in veranderende bodemeigenschappen die de emissie van broeikasgassen en de run-off van water met polluenten (vb. nitraten en gewasbeschermingsmiddelen) naar oppervlaktewater en grondwater beïnvloeden. Verder leidt bodemverdichting tot een verhoogde inputvraag (vb. meststof en energie) bij de productie van een gewas wat ook een milieu-impact heeft. Deze milieu-impacts hebben daarenboven vaak een globale invloed en verspreiden zich verder dan waar de oorzaak lag (Soane & Van Ouwerkerk, 1995). Met het milieu worden verschillende compartimenten bedoeld: (1) de atmosfeer, (2) het oppervlaktewater, (3) het grondwater en (4) de bodem. Figuur 6 geeft de belangrijkste pathways weer waarop bodemverdichting deze vier compartimenten beïnvloedt. De verhoogde inputvraag wordt ook weergegeven (Soane & Van Ouwerkerk, 1995).



Figuur 6. Manieren hoe bodemverdichting de milieucompartimenten beïnvloedt (Soane & Van Ouwerkerk, 1995).

De landbouw was in 2018 verantwoordelijk voor 9,6% van de broeikasgasuitstoot, meer specifiek koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>) en lachgas (N<sub>2</sub>O) (VMM, 2020). Bodemverdichting heeft een negatieve invloed op deze emissies. De bewerking van verdichte gronden vraagt meer brandstof wat leidt tot verhoogde CO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-emissies. Verder leidt een slechte poriënsamenstelling sneller tot verzadiging. Dit zijn ideale omstandigheden voor methanogenese waarbij de bodem transformeert naar een methaanbron i.p.v. een koolstofsink. Tot slot leidt bodemverdichting tot een verhoogde en onvolledige denitrificatie met het verlies van stikstof en de vrijzet ervan als N<sub>2</sub>O als gevolg (Figuur 7) (Soane & Van Ouwerkerk, 1995).

Denitrificatie:  $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ 

Figuur 7. N<sub>2</sub>O productie tijdens denitrificatie.

Naast effecten op de uitstoot van broeikasgassen zijn er ook effecten op het oppervlaktewater, grondwater en de bodem. De slechte hydraulische geleidbaarheid leidt tot run-off. Een grote hoeveelheid nutriënten wordt hierbij meegenomen, wat in oppervlaktewater leidt tot eutrofiëring en abiotische omstandigheden. Naast uitloging van nutriënten naar het oppervlaktewater is er ook uitloging naar het grondwater. Tot slot treedt er ook erosie op t.g.v. run-off, die de bodemkwaliteit aantast (Soane & Van Ouwerkerk, 1995).

### 2.1.4. Vaststellen en in kaart brengen van bodemverdichting

Het vaststellen van bodemverdichting is meestal een moeilijke opgave doordat de verdichting soms diep in de bodem zit. Er zijn wel enkele visuele manieren om verdichting vast te stellen, maar deze zijn niet altijd sluitend. Zo zorgt verdichting voor een verminderde infiltratie waardoor neerslag plasvorming op het oppervlak veroorzaakt. Verder zijn erosie en een verminderde bewerkbaarheid van de bodem ook indicatoren voor verdichting. Ook zijn dwerggroei, vertraagde groei, het geel worden van gewassen, verhoogde gevoeligheid voor ziektes en schade door insecten, een ongelijke rijping en een verlaging in opbrengst indicatoren voor verdichting. Tot slot kan onkruid ook een indicator zijn. Zo groeien ridderzuring en weegbree op zuurstofarmere plaatsen, maar ook madeliefje, paardenbloem, kweekgras en haagwinde kunnen wijzen op verdichting (Prosensols, 2011).

Om bodemverdichting te meten, wordt er gebruikgemaakt van bodemstalen die geanalyseerd worden in het labo of van penetrometingen (Topakci et al., 2010). Via penetrometingen meet men de indringingsweerstand van de bodem. De indringingsweerstand (*cone index* (CI)) van de bodem is de weerstand tegen penetratie uitgedrukt in eenheid van kracht per oppervlakte (N/cm<sup>2</sup>) of in megapascal (MPa) (Eijkelkamp, 2013). Deze weerstand hangt af van verschillende bodemeigenschappen zoals bulkdichtheid, bodemstructuur, bodemtextuur, organischestofgehalte en vochtgehalte. Indien metingen vergeleken worden, is het essentieel dat er rekening wordt gehouden met deze afhankelijkheid (Eijkelkamp, 2013). De penetratieweerstand is een maat voor verdichting doordat hij de mogelijkheid tot penetratie door wortels weerspiegelt (Singh et al., 2015). Het is algemeen gedocumenteerd dat wortels niet kunnen groeien boven een penetratieweerstand van 2 MPa (Botta et al., 2010; Singh et al., 2015; Taylor et al., 1966).

Meestal worden verticale penetrometingen gebruikt. Hierbij wordt met een constante snelheid van ongeveer 2 cm/s een sondeerstang in de grond geduwd tot een diepte van 80 cm en gelijktijdig wordt de weerstand gemeten. Op het einde van de sondeerstang wordt een conus bevestigd. Afhankelijk van de toepassing en de verwachte indringingsweerstand worden verschillende conussen met verschillende oppervlaktes gebruikt. Met behulp van een

ultrasone sensor en een dieptereferentieplaat wordt de diepte bepaald. Een groot nadeel van verticale penetrometingen is dat het een *stop-and-go* manier is die het een eenvoudige, maar een zeer arbeidsintensieve techniek maakt. Op die manier is het in de praktijk vaak moeilijk om voldoende data te collecteren om de variabiliteit in het veld in kaart te brengen. Er moet al een algemeen beeld van het veld zijn om gericht metingen te doen (Cho et al., 2015). Deze moeilijkheden zorgen ervoor dat er wordt nagedacht over alternatieven zoals autonome verticale penetrometingen en *on-the-go* horizontaal opererende penetrometers (Bolenius et al., 2006; Bouche, 2019; Scholz et al., 2014).

De autonome verticale penetrometer (Figuur 8) berust op het idee om de verticale penetrometingen te robotiseren (Bouche, 2019). Dit maakt de metingen minder arbeidsintensief en tegelijk nauwkeuriger door een constante gerobotiseerde uitvoering. Bouche (2019) en Scholz et al. (2014) concluderen dat de autonome penetrometer veel potentieel heeft, maar dat er nog meer veldonderzoek moet plaatsvinden alvorens het algemeen toepasbaar is.



Figuur 8. Foto's van autonome penetrometers die ontworpen zijn door Bouche (2019) in samenwerking met ILVO (links) en door Scholz et al. (2014) (rechts).

Het concept van de *on-the-go* horizontaal opererende penetrometers wordt weergegeven in Figuur 9. Een verticale staaf met weegcellen bevestigd op verschillende dieptes wordt horizontaal door de bodem getrokken. De weegcellen zullen de uitgeoefende krachten evenredig omzetten naar een elektrisch signaal. De signalen weerspiegelen dan de verdichting op verschillende dieptes (*horizontal resistance index* (HRI)). De techniek is nog in ontwikkeling maar heeft al veelbelovende resultaten (Chung et al., 2006). De relatie tussen de CI en de HRI blijkt niet-significant te zijn in de bovenste laag (0-10 cm), maar wel op grotere diepte (Cho et al., 2015; Chung et al., 2006; Hemmat et al., 2014). Het is een snelle en meer perceelsdekkende manier om de variabiliteit in kaart te brengen. Een nadeel is dat er geen continue data over de diepte bekomen worden.



Figuur 9. Het concept van de on-the-go horizontaal opererende penetrometer. Gecollecteerde data uit de sensors worden omgezet naar kaarten die de bodemverdichting weerspiegelen op verschillende dieptes (Chung et al., 2006).

Een andere manier om de verdichting in kaart te brengen, is via een bodemscan. Zoals uitgelegd zal worden in de sectie over Precisielandbouw is dit één van de technieken die gebruikt worden om de variabiliteit binnen een veld in kaart te brengen zodat plaats- en tijdsgerichte acties ondernomen kunnen worden. Een bodemscan brengt onder andere de elektrische geleidbaarheid (EC) van de bodem in kaart. De EC van een bodem zegt iets over de mate van geleiding van elektrische stroom door die bodem. Dit is afhankelijk van allerlei factoren zoals het kleigehalte, vochtgehalte, organischestofgehalte,... omdat deze zorgen voor meer geleidende deeltjes. Ook verdichting blijkt sterk positief gecorreleerd te zijn met de EC (Hoefer et al., 2010). Dit heeft als oorzaak dat verdichting samengaat met een verandering in vorm en grootte van de poriën die de EC van een bodem beïnvloeden (Apers, 2018).

Er worden verschillende types bodemscanners onderscheiden op basis van welke parameters er gemeten worden. Het eerste type, de elektromagnetische inductiesensor, meet enkel de EC van de bodem en maakt hiervoor gebruik van elektromagnetische inductie. De scanner wekt een elektromagnetisch veld op waardoor de bodem zelf een tweede elektromagnetisch veld creëert. Dit veld wordt dan opgemeten en weerspiegelt de EC. Er zijn twee commerciële uitvoeringen die behoren tot dit eerste type: de Dualem (Figuur 10) en de Topsoil Mapper (Figuur 10). De Dualem wordt voortgetrokken over het bodemoppervlak; er is dus contact tussen de scanner en het bodemoppervlak. De Topsoil Mapper hangt aan de fronthef van de tractor en maakt geen contact met de bodem. Met de output van beide bodemscanners worden kaarten opgesteld. Verder is de Topsoil Mapper ook in staat om de diepte van het werktuig achter de tractor te regelen tijdens een bewerking, in de meeste gevallen wel enkel met getrokken werktuigen (Dillen et al., z.d.; Topsoil Mapper, z.d.).



Figuur 10. Foto's van de twee commerciële uitvoeringen van het eerste type bodemscanners: Dualem bodemscan (links) en de Topsoil Mapper bevestigt aan de fronthef van de tractor (rechts) (Dalfsen & Baltissen, 2016; Topsoil Mapper, z.d.).

Het tweede type, de resistiviteitsmeter, bepaald de EC door het meten van de elektrische weerstand. Daarnaast meet dit type ook de pH en het organischestofgehalte van de bodem. De Veris MSP3-bodemscanner (Figuur 11) is de meest gebruikte commerciële uitvoering binnen dit tweede type bodemscanners. De Veris MSP3 wordt aan de achterste driepuntsophanging van de tractor gekoppeld. Indien er veel grof organisch materiaal aanwezig is, wordt er aan de fronthef een cultivator bevestigd die opstopping voorkomt (Figuur 11). Al rijdend wordt simultaan een bodemstaal genomen waarin telkens de pH wordt gemeten. Een optische camera bepaalt door de reflectie van VIS en NIR hoeveel organische stof aanwezig is in de bodem (Dillen et al., z.d.). De EC wordt met behulp van zes roterende schijven (Figuur 12) op twee dieptes gemeten (0-30 en 0-90 cm-mv) (Agrometius, 2018d). Deze schijven zijn roterend om een goed bodemcontact te garanderen. Deze zes schijven vormen drie elektrodeparen. Tussen één paar elektroden, de zenderelektroden, wordt een stroom aangelegd. Een ander paar elektroden, de potentiaalelektroden, meet de spanning op. Het systeem berust op een Wenner array (Figuur 12) (Moral et al., 2010). Andere commerciële types van de resistiviteitsmeter zijn de Veris iScan (PRO) en de Veris iScan Flex (PRO). Deze zijn gelijkaardig aan de Veris MSP3, maar meten geen pH en de EC wordt enkel bepaald voor het bodemvolume van 0-60 cm-mv. De iScan kan gecombineerd worden met een bewerking, wat brandstofbesparend is. De PRO versie kan ook de temperatuur en het vochtgehalte bepalen in de toplaag (Agrometius, 2018b, 2018c). Een laatste commerciële type is de Veris U3 die een compactere bodemscanner is, die ook gekoppeld kan worden aan een utility vehicle. Dezelfde parameters als bij de Veris MSP3 worden bepaald, de pH-bepaling is enkel een stop-and-go manier en de EC wordt enkel bepaald voor het bodemvolume van 0-60 cmmv (Agrometius, 2018e).



Figuur 11. Foto van de Veris MSP3-bodemscanner (links) en een foto van een cultivator (rechts).



Figuur 12. Schematische voorstelling van de zes schijven van de Veris MSP3-bodemscanner (links) (Moral et al., 2010). Voorstelling van een Wenner Array met bijhorende formule om de weerstand te berekenen (R= weerstand; U=spanning; l= stroom) (rechts) (OpenEl, 2013).

Een laatste type, de bodemradar (*ground-penetrating radar* (GPR)), maakt een radargram van de bodem door de reflectie van een ingestuurde elektromagnetische golf op te meten (SIKB, 2018). De reflectie wordt bepaald door het contrast in permittiviteit en de geleidbaarheid van de twee materialen (GSSI, z.d.). Een radargram is een doorsnede van de bodem die abrupte contrasten in permittiviteit in de ondergrond aangeeft. In tegenstelling tot de vorige twee types wordt er geen gemiddelde van de bodem bekomen, maar een dwarsdoorsnede met lagen van veranderende bodemeigenschappen. Het is een bewezen techniek, desondanks is het gebruik ervan om bodemverdichting te lokaliseren nog nieuw (SIKB, 2018).

Een groot nadeel van deze technieken is de hoge kostprijs (vb. 175 euro/ ha voor een Veris MSP3-bodemscan (Vilt, 2015); 2.000 euro per meetdag, inclusief interpretatie en rapportage voor een GPR ("Grondradar," 2016)). Verder vraagt de uitvoering, de verwerking van de data en de interpretatie hiervan de nodige expertise (Dillen et al., z.d.). Ook is een analyse van bodemstalen nodig voor de kalibratie van de pH en het organischestofgehalte bij de Veris MSP3-bodemscanner. Naast het uitvoeren van de bodemscan, die op zich snel en eenvoudig is, komt er nog veel verwerking van de meetgegevens kijken. Verder is de EC-waarde voor de elektromagnetische inductiesensor en de resistiviteitsmeter een uitmiddeling van een bepaald bodemvolume.

Tot slot wordt er ook gebruikgemaakt van metingen die niet rechtstreeks te linken zijn aan bodemverdichting. Zo worden de beelden van *proximal* en *remote sensing* gebruikt. Ook deze technieken worden, zoals vermeld zal worden in de sectie over Precisielandbouw, vaak gebruikt voor het in kaart brengen van de variabiliteit binnen een veld. Deze beelden geven een indicatie van de gewasgroei en gewashoogte die een indicatie kunnen zijn voor bodemverdichting (Panday et al., 2020).

Verder worden door technologische vooruitgang verschillende componenten (sensoren, controllers) in hedendaagse landbouwmachines geconnecteerd door middel van CAN-bus, waarbij sensordata wordt gepubliceerd tijdens het gebruik. Het primaire doel van de CAN-bus is om de communicatie die plaatsvindt in voertuigen, onder andere tussen en binnen systemen in de tractor en tussen tractoren en werktuigen, te standaardiseren en te beperken. Dit laat een efficiënte communicatie toe. CAN-bus is de afkorting van *Controller Area Network* (CAN)*binary unit system* (bus). Het CAN-bus-netwerk kan voorgesteld worden door een reeks controllers en sensoren die via een centraal netwerk met elkaar verbonden zijn en communiceren (Windels, 2020). De verstuurde gegevens (bv. motorparameters zoals brandstofverbruik of trekkracht via trekkrachtsensoren) over dit netwerk kunnen worden uitgelezen met behulp van een datalogger die continu de CAN-bus-data uitleest tijdens een bewerking en opslaat. Commerciële dataloggers ontwikkeld voor landbouwvoertuigen zijn b.v. de Exatrek of de Logmaster (Agrometius, 2018a; Exatrek, 2021). Dit levert dan een bron aan nuttige informatie voor ontwikkelaars, onderzoekers of de landbouwer zelf (Windels, 2020). Voor uitgebreide informatie over de werking van de CAN-bus kan Windels (2020) geraadpleegd worden. De data uit grondbewerkingen kunnen dan bijvoorbeeld gebruikt worden om variabiliteit in verdichting te lokaliseren. In het onderzoek van Windels (2020) werden gedurende het ploegen en het diepwoelen de CAN-bus-parameters gemonitord. Na verdere analyse van deze parameters bleek dat de CAN-bus-parameters de EC goed kunnen voorspellen. De belangrijkste verklarende parameter was het brandstofverbruik. Uit ditzelfde onderzoek blijkt wel dat CAN-bus-parameters te beperkt zijn om de penetratieweerstand te voorspellen. Echter was dit waarschijnlijk toe te schrijven aan de grote variabiliteit en de kleine dataset van manuele penetrometingen (Windels, 2020). Maar deze bevindingen steunen op een beperkte dataset. In onderzoek van Abbaspour-Gilandeh et al. (2006) werd er ook een goed lineair verband (R<sup>2</sup>>0,9) gevonden tussen de EC-waarden en de trekkracht binnen een veld. Het linken van CAN-bus-gegevens aan bodemverdichting wordt nog niet veel toegepast door het gebrek aan stavend onderzoek.

## 2.1.5. Aanpak van bodemverdichting

Hoewel de klimatologische gevolgen van bodemverdichting (vb. meer broeikasgasemissies, meer run-off van nutriënten naar oppervlaktewater, meer inputvraag) heel belangrijk zijn, worden de economische gevolgen het hardst gevoeld. Productiekosten nemen toe t.g.v. de noodzaak aan meer input en de omzet daalt door lagere opbrengst en slechtere kwaliteit (Chamen et al., 2015). In een economische analyse o.b.v. literatuur uitgevoerd door Chamen et al. (2015) worden verschillende managementstrategieën om bodemverdichting op te heffen of te voorkomen, economisch vergeleken voor wintertarwe in Engeland. Ondanks de vele assumpties en grote variabiliteit in de analyse laat deze studie wel een duidelijk patroon zien. De resultaten voor zand- en leemgronden zijn in Tabel 2 weergegeven. Het opheffen van bodemverdichting blijkt alleen winstgevend te zijn bij gericht diepwoelen. Het voorkomen van bodemverdichting is daarentegen altijd winstgevend. Hieruit wordt ook de meeste winst behaald (Chamen et al., 2015). De resultaten van deze studie zijn op jaarbasis berekend waardoor een belangrijke factor, het langetermijneffect van diepwoelen, niet is meegenomen in de studie. Echter is het effect van diepwoelen nog waarneembaar na twee jaar (Busscher et al., 1995). Maar ook stellen verschillende studies dat de effectiviteit van diepwoelen enkel behouden blijft indien er grote zorg is voor het veld zowel tijdens als na het diepwoelen (Chamen et al., 2015). Zo concludeert Chamen (2011) dat twee tractorpassages op een omgewoelde (30 cm-mv) zandleemgrond de bodem al terugbrachten naar de originele toestand.

Tabel 2. Verandering (£/ha) in wintertarweopbrengstwinst, inputbesparing (vb. nutriënten en brandstofverbruik), gebruikskost (vb. machines, brandstofverbruik,...) en brutowinst voor verschillende managementstrategieën. Er wordt aangenomen dat de opbrengstverliezen en de nutriëntenverliezen 100% teniet worden gedaan onder de verschillende managementstrategieën. Verder wordt aangenomen dat onder 'Voorkomen' opbrengstwinsten gedaan worden t.o.v. de gemiddelde opbrengst per hectare en dat brandstof bespaard wordt onder Control Traffic Farming (CTF, vaste rijpaden). De brutowinst wordt dus vooral bepaald door opbrengstwinsten en het verschil in gebruikskosten. De analyse berust op verschillende assumpties en heeft zodus een grote variabiliteit. Echter zijn er wel duidelijke patronen in terug te vinden (Chamen et al., 2015).

type	Managementstrategie	£/ha verandering	leem	zand
		Gebruikskost	-£51,90	-£47,70
	Diopwoolon	Inputbesparing	£7,99	£1,45
	Diepwoeien	Opbrengstwinst	£21,60	£18,48
		Brutowinst	-£22,31	-£27,77
		Gebruikskost	-£21,80	-£20,03
Onheffen	Gericht dienwoelen	Inputbesparing	£7,99	£1,45
Ophenen	Generit diepwoelen	Opbrengstwinst	£21,60	£18,48
		Brutowinst	£7,80	-£0,10
	Ploegen	Gebruikskost	-£46,50	-£38,10
		Inputbesparing	£7,99	£1,45
		Opbrengstwinst	£21,60	£18,48
		Brutowinst	-£16,91	-£18,17
		Gebruikskost	-£3,58	-£3,58
	Lage druk	Inputbesparing	£7,99	£1,45
	bandenspanning	Opbrengstwinst	£45,00	£46,20
		Brutowinst	£58,41	£44,07
	Pupshandan	Gebruikskost	-£21,00	-£21,00
Voorkomen		Inputbesparing	£7,99	£1,45
VOORONEIT	Rupsbanden	Opbrengstwinst	£54,00	£46,20
		Brutowinst	£40,99	£26,65
		Gebruikskost	-£0,00	-£0,00
	Vaste riinaden	Inputbesparing	£15,34	£4,74
		Opbrengstwinst	£75,60	£64,68
		Brutowinst	£90,94	£69,42

#### 2.1.5.1. Preventie

Om het probleem van bodemverdichting te voorkomen, moet er gewerkt worden met preventiemaatregelen. Eén daarvan is de uitgeoefende druk op de bodem minimaal houden wat op verschillende manieren bereikt wordt (vb. lichtere machines, verschillende bandenconfiguraties, variëren van de bandendruk, minimaal en gecontroleerd het veld berijden door vaste rijpaden (CTF)) (Chamen et al., 2015; Prosensols, 2011). Verder dient er ook gekeken te worden naar de draagkracht van het veld. Zo dient er enkel onder optimale omstandigheden betreding van het veld plaats te vinden. Tot slot is een jaarlijkse intensieve bewerking voor veel gewassen niet nodig. Deze intensieve bewerking kan ervoor zorgen dat de bodemaggregaten kapot gaan. Ook zorgt een constante ploegdiepte voor de vorming van een ploegzool. Vruchtwisseling en het gebruik van groenbedekkers helpen de gemaakte barsten en poriën na een bewerking open te houden waardoor intensieve bewerkingen minder nodig zijn (Prosensols, 2011).

### 2.1.5.2. Opheffen

Remediëring van bodemverdichting wordt met behulp van mechanische en natuurlijke manieren gedaan. Deze methoden lossen de oorzaak echter niet op. Het doel van een remediëring is het losmaken en openbreken van de verdichte lagen zodat de hydraulische geleidbaarheid, de zuurstofuitwisseling, de wortelontwikkeling en het bodemleven verbeteren (Prosensols, 2011; Vreken et al., 2009). Mechanisch wordt de verdichting door (diep-) ploegwerk, (diep-) woelen of (diep-) mixen opgeheven. Bij het ploegen wordt de bodem opgetild, zijwaarts gelegd en gekeerd. Met een woeler wordt de grond losgemaakt zonder deze te keren. Afhankelijk van het type woeler wordt de grond opgetild, voorwaarts en licht zijdelings verschoven. Een mixer vermengt de bodemlagen zodat er een verlies is aan bodemhorizonten (Elsen et al., 2014; Schneider et al., 2017). Een weergave van de effecten op de bodemlagen van deze mechanische technieken is te zien in Figuur 13.



DiepwoelenDiepploegenDiepmixenFiguur 13. Voorstelling van het effect van verschillende mechanische technieken om bodemverdichting op te heffen<br/>(Schneider et al., 2017).Diepmixen

Diepwoelen is de meest toegepaste techniek om verdichting op grotere diepte op te heffen door de lagere energiekost ten opzichte van de andere technieken. Verder heeft het meestal een langdurig effect en is het niet nadelig voor de teeltontwikkeling in het volgende groeiseizoen (Ren, 2020; Schneider et al., 2017). Een diepwoeler is opgebouwd uit één of meerdere tanden die door de bodem worden getrokken. Deze tanden staan naast elkaar of in verschillende rijen. Een tand is samengesteld uit een tandarm met een mes en een beitel met eventuele vleugelscharen. De tandarm kan zowel gebogen als recht zijn (Figuur 14). Bij gebogen tanden wordt de bodem meer opgetild. Bij rechte tanden gaat alle energie naar het openbreken van de bodem. De beitel breekt de bodem en de eventuele vleugelscharen dienen enkel om een hoger en bredere lift van de bodem teweeg te brengen. Hoe breder de beitel en de eventuele vleugelscharen, hoe breder de V-vormige balk die gelift wordt en hoe meer de grond scheurt en verkruimelt (Figuur 15).



Figuur 14. Opbouw van een diepwoeler. Verschillende combinaties zijn mogelijk. Links is er een Kuhn DC 301 diepwoeler afgebeeld. Deze is voorzien van vier rechte tanden met brede vleugelscharen. Rechts is een Profundus Z diepwoeler van Steeno afgebeeld. Deze heeft vier gebogen tanden zonder vleugelscharen.



Figuur 15. Weergave van de totstandkoming van de V-vormige balk. Boven: voorstelling van de bodemverstoring door de tanden. Midden: voorstelling van de V-vormige balk die gelift wordt tijdens het diepwoelen. Onder: concept achter het scheuren en verkruimelen van de bodem door het liften van de V-vormige balk tijdens het diepwoelen (Spoor, 2006).

Al deze bewegingen zijn erop gericht scheuren en poriën te creëren. De mechanische manieren zijn bij een correcte toepassing zeer efficiënt, maar vragen een hoog brandstofverbruik en een sterke tractor wat de kosten snel laat oplopen (Elsen et al., 2014). Volgens Chamen et al. (2015) zou het gemiddelde brandstofverbruik om werktuigen door de grond te trekken in een verdichte bodem tot 87% toenemen in kleigronden, 60% in leemgronden en 29% in zand- en turfgronden. De efficiëntie van het diepwoelen wordt mee bepaald door een correct gebruik. Er dient gewerkt te worden onder droge omstandigheden om versmering te voorkomen. Deze droge omstandigheden zorgen er ook voor dat de bodem beter barst (Prosensols, 2011; Vreken et al., 2009). Het is verder belangrijk dat er tot net onder de verdichte laag gewerkt wordt. Indien er nog dieper gewerkt wordt, verdiept dit het verdichtingsprobleem (Vreken et al., 2009).

De mechanische bewerking wordt het beste toegepast loodrecht op de gebruikelijke rijrichting. Het is namelijk de verdichting onder de rijsporen die doorbroken moet worden (Elsen et al., 2014). De bodem wordt ook beter niet over de hele werkbreedte gelift. Dit kan door het toepassen van minder tanden of smallere tanden. Zo blijft de grond een voldoende hoge draagkracht hebben voor volgende bewerkingen (Figuur 16) (Elsen et al., 2014; Spoor, 2006). Om een langdurig effect te behouden van de diepe bewerking, gebeurt deze na de oogst en voor het inzaaien van een groenbedekker met diepe en sterke wortels die in staat zijn de gemaakte scheuren open te houden (Prosensols, 2011; Vreken et al., 2009).


volledige bodem verstoring

Figuur 16. Weergaven van het effect van de tandinrichting op de bodemverstoring. Boven: gedeeltelijk verstoorde bodem door het diepwoelen met tanden die smal zijn en/of ver genoeg van elkaar staan. De draagkracht blijft hier behouden. Onder: volledig verstoorde bodem door het diepwoelen met tanden die te breed zijn en/of te dicht op elkaar staan. De draagkracht gaat hier verloren (Spoor, 2006).

Naast de mechanische remediëringstechnieken zijn er ook natuurlijke manieren. Allereerst kan dit door een stimulatie of herintroductie van het bodemleven (Prosensols, 2011; Vreken et al., 2009). Verschillende studies tonen aan dat regenwormen belangrijk zijn in zowel de preventie als remediëring van bodemverdichting (Joschko et al., 1989; Larink et al., 2001; Yvan et al., 2012). Zo concluderen Whalley et al. (1995) en Joschko et al. (1989) dat *Lumbricus terrestris*-species in staat zijn de artificiële ploegzool te doorboren. De natuurlijke regeneratie van een verdichte bodem is mogelijk, maar dit verloopt zeer traag (Prosensols, 2011; Yvan et al., 2012). Enkele zaken zoals bemesting, bekalken, minder grondbewerking, worden toegepast om de biologische activiteit te stimuleren.

Er kan ook gebruikgemaakt worden van teelten die de bodemstructuur verbeteren. De dagelijkse fluctuaties van de worteldiameter door de evapotranspiratie van de plant destabiliseren de bodemstructuur en zorgen voor het losser maken van de verdichte bodem rondom de plantenwortel. Verder zijn er ook verschillende sterk- en diepwortelende gewassen die in staat zijn om bodems met een hoge penetratieweerstand te doordringen (vb. Luzerne (*Medicago sativa*), Winterrogge (*Secale cereale*), Rode klaver (*Trifolium pratense*)). Het opnemen van deze gewassen in een rotatieschema is een vorm van remediëring (Elsen et al., 2014; Prosensols, 2011; Vreken et al., 2009). Naast het effect op de bodemstructuur brengen ze ook organische stof en nutriënten in de bodem doordat ze doorgaans ondergewerkt worden (Elsen et al., 2014). Tot slot zullen seizoenale cycli van "vorst-dooi" en "vochtig-droog" een losmakend effect op de bodem hebben, al is dit effect beperkt (Prosensols, 2011; VLM, 2015a).

## 2.2. Precisielandbouw

Met precisielandbouw wordt een managementstrategie bedoeld die met behulp van technologie meer plaats- en tijdsafhankelijke data verzamelt, verwerkt en analyseert om te gebruiken. Zo kunnen meer plaats- en tijdsspecifieke acties ondernomen worden om de efficiëntie, de productiviteit en de duurzaamheid van landbouwactiviteiten te verbeteren (Balafoutis et al., 2017; Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019; Van der Wal et al., 2017). In vereenvoudigde vorm komt deze definitie neer op "met behulp van technologie, heel nauwkeurig die behandelingen geven die de planten en/of dieren op dat moment nodig hebben" (Klein Gunnewiek, 2018). Het concept van precisielandbouw bestaat al vele jaren, maar het idee om elektronische en technologische informatie te gebruiken om de landbouwprocessen te automatiseren, is vrij recent (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019; Van der Wal et al., 2017).

Precisielandbouw is een breed concept, maar in deze literatuurstudie wordt er enkel dieper ingegaan op de precisielandbouw gericht op gewassen. De hedendaagse toepassingen van precisielandbouw zijn toe te kennen aan drie domeinen: begeleidingstechnologie, meettechnieken en reactietechnieken. Alle drie de domeinen berusten op het gebruik van *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) (Figuur 17) (Balafoutis et al., 2017).



Figuur 17. Overzicht van de technologieën in precisielandbouw gericht op gewassen (Balafoutis et al., 2017).

Binnen het domein van GNSS valt het gebruik van een RTK-GPS. Deze GPS laat een zeer nauwkeurige plaatsbepaling toe (2-3 cm nauwkeurig). Dit wordt dan onder andere vertaald in toepassingen zoals stuurhulp en autonoom rijden die onder andere gebruikt worden in het concept van vaste rijpaden ter preventie van bodemverdichting (begeleidingstechnologie). Verder leidt deze nauwkeurige plaatsbepaling tot de mogelijkheid om zeer nauwkeurig plaatsspecifieke advisering en plaatsspecifieke bewerking van het veld te doen (reactietechnieken). Hiervoor worden allereerst opbrengst- en bodemeigenschapskaarten opgesteld (meettechnieken) die dan verwerkt worden in taakkaarten, wat toepassing van bijvoorbeeld variable rate technologie (VRT) toelaat (van der Schans et al., 2008).

Opbrengstkaarten worden opgesteld met behulp van verschillende technieken. Er wordt gebruikgemaakt van opbrengstmetingen tijdens het oogsten, maar er worden ook geavanceerdere technieken gebruikt zoals *proximal* en *remote sensing* die bijvoorbeeld een indicatie van de gewasgroei en gewashoogte verschaffen (Panday et al., 2020). *Proximal* en *remote sensing* worden aanzien als het verkrijgen van informatie over een object, door de analyse van data die verkregen wordt zonder in contact te komen met het object. Het berust op de interactie van elektromagnetische straling met de moleculaire structuur van de te bestuderen materie. De interactie geeft aanleiding tot niet-radioactieve effecten die gebruikt worden in *proximal* en *remote sensing*. Belangrijke begrippen zijn hier emissie, absorptie, reflectie, scattering, transmissie en fluorescentie van elektromagnetische straling. Er zijn twee soorten *proximal* en *remote sensing*: passieve en actieve (Figuur 18). Bij passieve *sensing* wordt gebruikgemaakt van artificieel geproduceerde elektromagnetische straling. Het onderscheid tussen *proximal* en *remote sensing* wordt gemaakt in de afstand waarop het object gelegen is ten opzichte van de sensor (Figuur 19) (Demeestere, 2020).



Figuur 18. Het verschil tussen actieve en passieve sensing (Edesk & Federaal wetenschapsbeleid, 2004).



Figuur 19. Weergave van het schaalverschil tussen proximal en remote sensing (Oerke et al., 2014).

Bodemeigenschapskaarten worden opgesteld met behulp van bodemscans en via CAN-busparameters verkregen tijdens grondbewerkingen. Een bodemscan meet onder andere de EC wat gerelateerd kan worden met het kleigehalte, vochtgehalte, organischestofgehalte, de verdichting. Verder kan een bodemscan eventueel ook de pH, het organischestofgehalte, de temperatuur bepalen. De CAN-bus-parameters kunnen een idee geven over de verdichting. Echter wordt dit nog niet veel toegepast door het gebrek aan stavend onderzoek (Abbaspour-Gilandeh et al., 2006; van der Schans et al., 2008; Windels, 2020).

Op basis van deze kaarten, opbrengst- en/of bodemeigenschapskaarten, worden er dan taakkaarten (isoXML of shp formaat) opgesteld. Dit zijn digitale kaarten waarmee een werktuig gestuurd wordt. Deze worden dan gebruikt voor VR-toepassingen. Toepassingen hierin zijn b.v. variabele bemesting, variabel zaaien en het variëren van de diepte van een grondbewerking (van der Schans et al., 2008).

Door het verzamelen van plaats- en tijdsafhankelijke data wordt beoogd om de variabiliteit in het veld in kaart te brengen. Hiermee worden dan plaats- en tijdsgerichte acties ondernomen die zorgen voor een hogere efficiëntie, productiviteit en duurzaamheid van landbouwactiviteiten.

## 2.3. Doelstellingen

In deze masterproef wordt de toepasbaarheid van verschillende fijnmazige meet- en remediëringstechnieken ter beheersing van bodemverdichting in landbouwpercelen nader bekeken. Er wordt gezocht naar nieuwe manieren om bodemverdichting te lokaliseren gebruikmakend van CAN-bus-monitoringssystemen. Verder worden ook de effectiviteit en efficiëntie van het (variabel) diepwoelen en het effect ervan op de gewasopbrengsten en productiekosten t.o.v. de controle bekeken. Daarbij wordt het brandstofverbruik nauwkeurig gemonitord. Tot slot wordt de effectiviteit van het type diepwoeler voor het opheffen van de verdichting nader bekeken.

Volgende onderzoeksvragen worden in deze masterproef bekeken:

- a) Wat is het effect van (variabel) diepwoelen op de gewasopbrengst? Indien er een meeropbrengst is, valt dan het brandstofverbruik voor de diepe bewerking te rechtvaardigen ten opzichte van deze meeropbrengst?
- b) Wat zijn snelle en perceelsdekkende manieren, die eenvoudig ter beschikking gesteld kunnen worden aan de landbouwer (vb. motorparameters zoals brandstofverbruik of trekkracht via trekkrachtsensoren gedurende een grondbewerking), om bodemverdichting te detecteren en in kaart te brengen?
- c) Wat is het effect van verschillende types diepwoeler op de effectiviteit van het openbreken van de ploegzool? Is er een significant verschil in brandstofverbruik tussen deze verschillende types diepwoeler?

# Hoofdstuk 3. Methodologie

## 3.1. Proefpercelen

Voor deze masterproef werd gebruikgemaakt van vier percelen die ter beschikking werden gesteld door ILVO en plaatselijke landbouwers.

## 3.1.1. Perceel 1

Perceel 1 (Figuur 20) is gelegen in de Van Thorenburghlaan te Oosterzele. Het perceel is 1,02 ha groot. Het veld wordt jaarlijks geploegd. Sinds 2016 is er kuilmaïs op geteeld (Databank Ondergrond Vlaanderen - Verkenner, 2020). In de zomer van 2020 werd er zomergerst geteeld. Het westelijke deel van het perceel bestaat uit een matig droge zandleembodem met textuur B horizont en zandsteen op geringe diepte (<75 cm-mv). Het oostelijke deel van het perceel bestaat uit een met textuur B horizont en klei-zand op matige diepte (75 tot 125 cm-mv) (Databank Ondergrond Vlaanderen - Verkenner, 2020). Het perceel is relatief vlak met een zeer lichte helling in noordoostelijke richting (Geopunt, 2020).



Figuur 20. Afbakening van perceel 1 met aanduiding van de ondergrondse textuur en de terreinhoogte. qLca wijst op een matig droge (c) zandleembodem (L) met textuur B horizont (a) en zandsteen op geringe diepte (<75 cm-mv) (q). (w)Lda wijst op een matig natte (d) zandleembodem (L) met textuur B horizont (a) en klei-zand op matige diepte (75 tot 125 cm-mv) (w) (Databank Ondergrond Vlaanderen - Verkenner, 2020).

## 3.1.2. Perceel 2

Perceel 2 (Figuur 21) is gelegen in de Lammekensstraat te Deinze. Een loonwerker stelde het veld ter beschikking voor de proeven. Het perceel is 2,32 ha groot. Het veld werd altijd standaard bewerkt. Door de jaren heen werden er verschillende gewassen geteeld. Sinds 2018 is er korrelmaïs op geteeld (Databank Ondergrond Vlaanderen - Verkenner, 2020). Het oostelijke en zuidwestelijke deel van het perceel bestaan uit een matig droge licht zandleembodem met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont. Het centrale deel van het perceel bestaat uit een matig natte licht zandleembodem met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont. Het noordwestelijke deel van het perceel bestaat uit een matig droge, en een klein deel matig natte, zandleembodem met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (Databank Ondergrond Vlaanderen - Verkenner, 2020). Het perceel helt af in zuidelijke richting (Geopunt, 2020).



Figuur 21. Afbakening van perceel 2 met aanduiding van de ondergrondse textuur en de terreinhoogte. Pcc wijst op een matig droge (c) licht zandleembodem (P) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c). Pdc wijst op een matig natte (d) licht zandleembodem (P) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c). Lcc wijst op een matig droge (c) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c). Ldc wijst op een matig natte (d) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c). Ldc wijst op een matig natte (d) zandleembodem (L) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c) (Databank Ondergrond Vlaanderen - Verkenner, 2020).

## 3.1.3. Perceel 3

Perceel 3 (Figuur 22) is gelegen in de Dorpstraat te Gavere. Een landbouwer stelde het veld ter beschikking voor de proeven. Het perceel is 2,01 ha groot. Het veld werd altijd standaard bewerkt. Sinds 2016 is er kuilmaïs op geteeld. Het perceel bestaat uit een droge lemige zandbodem met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (Databank Ondergrond Vlaanderen - Verkenner, 2020). Het perceel helt af in noordwestelijke richting (Geopunt, 2020).



Figuur 22. Afbakening van perceel 3 met aanduiding van de ondergrondse textuur en de terreinhoogte. Sbc wijst op een droge (b) lemige zandbodem (S) met sterk gevlekte, verbrokkelde textuur B horizont (c) (Databank Ondergrond Vlaanderen - Verkenner, 2020).

## 3.2. Materiaal

## 3.2.1. Penetrometer

De indringingsweerstand van de bodem werd gemeten met een Eijkelkamp 6.08 verticale penetrometer (Figuur 23).

Voor de metingen werd gebruikgemaakt van een conus met een oppervlakte van 1 cm<sup>2</sup> en een tophoek van 60°. Het in de grond duwen van de sondeerstang gebeurde manueel met een constante snelheid van ongeveer 2 cm/s tot een diepte van 80 cm. Om tijdens het meten een correcte hoogtemeting te verkrijgen met de ingebouwde ultrasoon sensor was het noodzakelijk om een dieptereferentieplaat te gebruiken. Dit is een metalen mal met 11 gaten die telkens 7,5 cm uit elkaar staan. Het tussenlaten van een standaardafstand maakt deze mal eveneens mogelijk. Na de metingen werd de data verwerkt met behulp van penetroviewer 6.08 en sigmaplot 13. In penetroviewer 6.08 werd een penetrogram (Figuur 24) opgesteld. Dit is een weergave van de kracht uitgeoefend op verschillende dieptes. In sigmaplot 13 werd een dwarsdoorsnede van de bodem opgesteld door interpolatie van meerdere penetrometingen die in één lijn worden bemonsterd met behulp van de dieptereferentieplaat (Figuur 24).



Figuur 23. Foto van de Eijkelkamp 6.08 penetrometer met dieptereferentieplaat en belangrijke aanduidingen op de penetrometer (krachtopnemer (1); sondeerstang (2); conus (3)) (Eijkelkamp, 2013).



Figuur 24. Weergave van een penetrogram (links) en een geïnterpoleerde dwarsdoorsnede (rechts) opgesteld met data in het kader van deze masterproef.

## 3.2.2. Steekmonsterboor

Voor de bepaling van het gravimetrisch vochtgehalte van de bodem werden bodemstalen genomen met een steekmonsterboor (Figuur 25) (Eijkelkamp, z.d.). Deze boringen vonden telkens plaats samen met de penetrometingen omwille van de vochtafhankelijkheid van de penetrometingen. Het bodemvocht zorgt namelijk voor een smerende werking (Elsen et al., 2014; Prosensols, 2011). Indien verschillende penetrometingen vergeleken moesten worden, was het belangrijk dit vochtgehalte in rekening te brengen.

De bodemstalen werden altijd bemonsterd op een diepte van 0 cm tot 10 cm, van 10 cm tot 30 cm en van 30 cm tot 60 cm. Vervolgens werden de verse stalen afgewogen (Mettler Toledo), minstens 24 uur in een droogoven (Memmert) gelegd bij 105 °C en vervolgens droog afgewogen (Mettler Toledo). Het gravimetrisch vochtgehalte werd op droge basis berekend via volgende formule (vergelijking 1):

$$w(-) = \frac{massa \ natte \ bodem(g) - massa \ droge \ bodem(g)}{massa \ droge \ bodem(g)}$$
(vergelijking 1)



Figuur 25. Op de figuur wordt een steekmonsterboor weergegeven met extra benodigde attributen: hamer en spatel.

## 3.2.3. Veris bodemscan

Voor de bodemscan uitgevoerd door Landbouwmechanisatie Verhaeghe op perceel 2 op 15 oktober 2020 werd een Veris MSP3-bodemscanner (Figuur 26) gebruikt. Doordat de meting werd uitgevoerd op een maïsstoppel werd er gebruikgemaakt van een cultivator gekoppeld aan de fronthef (Figuur 26). De EC en het organische stof werden elke 0,2 seconden gemeten. De pH werd ongeveer om de 15 m gemeten, dit resulteerde in ongeveer 50 pH-metingen per hectare. Er werd gereden met een snelheid van 7 km/h en standaard liggen de parallelle lijnen 10 m uit elkaar, echter werd er op perceel 2 voor een scanafstand van 5 m gekozen.



Figuur 26. Foto's van de Veris MSP3-bodemscanner (links) en de cultivator (rechts), beide gebruikt op perceel 2.

## 3.2.4. Hand-RTK-GPS

Voor de lokalisatie van de bodemstalen en de penetrometingen en om de proeven op te zetten werd er gebruikgemaakt van een hand-RTK-GPS. Deze bestond uit een Stonex *multi-frequency GNSS receiver* en Nautiz X8 handcomputer (Figuur 27). Via de SurveCE app werden coördinaten uitgezet en opgemeten.



Figuur 27. Foto's van de Stonex multi-frequency GNSS receiver (links) en de Nautiz X8 handcomputer (rechts).

## 3.2.5. Exatrek-datalogger

Als datalogger om de CAN-bus uit te lezen, werd er gebruikgemaakt van een Exatrek T2 telemetrie module (Figuur 28) (Exatrek, 2021). Exatrek is een commercieel bedrijf dat dataloggers ontwikkelt voor het gebruik in landbouwvoertuigen. De kostprijs van de gebruikte Exatrek T2 telemetrie module bedraagt 499 euro. Daarbij komt een maandelijkse kost van 19.90 euro voor de licentie (Windels, 2020). Eerder onderzoek stelde dat de Exatrek dataloggers zeer gebruiksvriendelijk zijn, voornamelijk door de bijhorende overzichtelijke webapplicatie (Moeyersoons, 2020).

De module wordt gekoppeld met de tractor via een ISOBUS connectiekabel die in de diagnostische stekker van de cabine past. Deze module verzendt via telemetrie de uitgelezen gegevens naar de Exatrek *cloud* waarna deze via de Exatrek webapplicatie gedownload kunnen worden (Exatrek, 2021). De uitlezing gebeurt met een hoge resolutie (1Hz) en betreft over het algemeen parameters die de prestatie van de tractor kwantificeren: snelheid, toerental, brandstofverbruik, wiel- en grondgebaseerde snelheid, motorkoppel, trekkracht, hoogte van de driepuntsophanging etc. (Windels, 2020). De download van de webapplicatie gebeurt via een .silo-bestand dat vervolgens op te laden is in verschillende geografische informatie systeem (GIS)-programma's.



Figuur 28. Foto van de Exatrek T2 telemetrie module met ISOBUS connectiekabel (Exatrek, 2021).

## 3.2.6. Drone

Voor de uitvoering van de dronevluchten werd gebruikgemaakt van een DJI Matrice 600 (Figuur 29). Deze hexacopter kon uitgerust worden met een RGB-camera van het type Sony alfa 6000 of een multispectrale camera van het type RedEdge MX Dual Camera van MicaSence (Figuur 29). De RGB-camera had een resolutie van 6000x4000 pixels (Borra-Serrano et al., 2020). De multispectrale camera had een resolutie van 1280 x 960 pixels en bekeek tien spectrale banden (MicraSense, 2021). De *ground control points* (gcp's), noodzakelijk voor de lokalisatie, werden opgemeten met de hand-RTK-GPS.



Figuur 29. Foto van de DJI Matrice 600 hexacopter (links) en foto van de multispectrale camera (rechts).

## 3.2.7. Tractor en werktuigen

Voor de bewerkingen op de verschillende percelen werd er telkens gebruikgemaakt van een New Holland T7.270 (Figuur 30). Deze tractor met bouwjaar 2019 had een motorvermogen van 270 pk. De tractor was voorzien van een variabel bandendruksysteem en een XCN-1050 RTK-GPS. De druk werd voor de proeven telkens op ongeveer 1,2 bar gezet. Gedurende de diepe bewerkingen werden telkens de CAN-bus-parameters van de tractor gelogd met een Exatrek T2 datalogger.



Figuur 30. Foto van de New Holland T7.270. Op de achterste driepuntsophanging is de Kuhn DC 301 diepwoeler aangekoppeld. Deze was gebruikt voor de diepe bewerking in het kader van deze masterproef op perceel 2.

Voor de proefopzettingen op de verschillende percelen werden verschillende werktuigen gebruikt. Een opsomming wordt hieronder gemaakt:

- Kuhn DC 301 diepwoeler:

Deze was 3 m breed en was voorzien van vier rechte tanden met brede vleugelscharen. De tanden stonden 70 cm uit elkaar en de vleugelscharen waren 50 cm breed (Figuur 31). De diepteregeling gebeurde via de hoogte-instellingen van de achterste driepuntsophanging.



Figuur 31. Foto van de Kuhn DC 301 diepwoeler.

- Profundus Z diepwoeler van Steeno:

Deze was 3 m breed en was opgebouwd uit twee rijen gebogen tanden zonder vleugelscharen gevolgd door twee rollen. Deze bestond uit zeven tanden die 45 cm uit elkaar stonden en 7 cm breed waren (Figuur 32). De diepteregeling gebeurde via de hoogte-instelling van de achterste driepuntsophanging in combinatie met de hydraulische aansturing van de rollen.



Figuur 32. Foto van de Profundus Z diepwoeler van Steeno.

#### ZDF-U-5 diepwoeler van Steeno:

Deze was 3 m breed en was opgebouwd uit twee rijen gebogen tanden zonder vleugelscharen. Deze bestond uit vijf tanden die 75 cm uit elkaar stonden en 10 cm breed waren (Figuur 33). De diepteregeling gebeurde via de hoogte-instelling van de achterste driepuntsophanging.



Figuur 33. Foto van de ZDF-U-5 diepwoeler van Steeno.

- Samco Field-lift:

Deze was 3 m breed en was voorzien van drie rechte tanden met brede vleugelscharen gevolgd door een triltand. De tanden stonden 85 cm uit elkaar en de vleugelscharen waren 30 cm breed (Figuur 34). De diepteregeling gebeurde via de hoogte-instelling van de achterste driepuntsophanging in combinatie met de hydraulische aansturing van de tanden.



Figuur 34. Foto van de Samco Field-lift.

## Prime GX390:

\_

Dit was een éénasser werktuigdrager met een maaibalk van 1,5 m breed (Figuur 35).



Figuur 35. Foto van Prime GX390 éénasser werktuigdrager.

## 3.3. Methode

## 3.3.1. Perceel 1

De proeven op het perceel 1 hadden betrekking op doelstellingen a en b. Voor doelstelling a werd op het perceel het effect van een (variabele) diepe bewerking op de opbrengst bekeken t.o.v. de opbrengst in de controle. Het brandstofverbruik tijdens de diepe bewerking werd gemonitord. Het mogelijke verschil in bruto-opbrengst kon dan ten opzichte van het brandstofverbruik geplaatst worden om de economische meerwaarde te bekijken. Verder werden het effect, en het behoud van het effect van de diepe bewerking bekeken met behulp van penetrometingen. Voor doelstelling b werd de variatie in manuele opbrengstmetingen van zomergerst geoogst in de zomer van 2020 vergeleken met de variatie in het brandstofverbruik tijdens de diepe bewerking. Er werd zo bekeken of de variatie in opbrengst een gevolg was van bodemverdichting. Uit beperkt onderzoek van Windels (2020) bleek het brandstofverbruik de meeste bijdrage te hebben in een voorspellend model (R<sup>2</sup>=0,6) voor de penetratieweerstand.

### 3.3.1.1. Proefopstellingen

De manuele opbrengstmetingen van de zomergerst geoogst in de zomer van 2020 vielen buiten de scoop van deze masterproef. Het perceel werd via een dambordpatroon geoogst (Figuur 36) o.b.v. plots die 1,5 m breed en ongeveer 10 m lang waren. Via weging en droging van de vers geoogste zomergerst, het volledige bovengrondse deel van de plant, werd de opbrengst als massa droge stof per hectare bepaald.



Figuur 36. Aanduiding van de exacte locatie van de opbrengstplots voor de manuele opbrengstbepaling van de zomergerst. De plots vormden een dambordpatroon. De plots waren 1,5 m breed en ongeveer 10 m lang.

Voor de proefopstellingen binnen de scoop van deze masterproef werd er gebruikgemaakt van een bodemscan uitgevoerd op perceel 1 in het voorjaar van 2018 in het kader van het doctoraatsonderzoek van Lidong Ren (Figuur 37) (Ren, 2020). Het perceel werd op basis van deze bodemscan in vijf blokken verdeeld waarna ieder blok in drie stroken werd verdeeld. Er werd aangenomen dat de drie stroken binnen één blok een vergelijkbare bodemverdichting hadden. Blokken onderling hadden een verschillende bodemverdichting. Elke strook binnen

één blok kreeg dan via randomisatie een behandeling toegekend. De drie behandelingen waren: niet diepwoelen (Controle (C)), diepwoelen van de volledige strook (D) en variabel diepwoelen (V). Bij het variabel diepwoelen, hier aanzien als gericht diepwoelen, vond op één helft van de strook een diepe bewerking plaats. Dit was de helft met de hoogste EC-waarden en dus vermoedelijk de hoogste bodemverdichting. Deze helft is gearceerd in Figuur 37.

Op 31 augustus 2020 vonden de diepe bewerkingen plaats. Deze werden uitgevoerd op een zo constant mogelijke diepte van 50 cm-mv. Dit was na het oogsten van de zomergerst en een drijfmestinjectie. Deze bewerking was met de Profundus Z diepwoeler van Steeno gekoppeld aan de New Holland T7.270. Voor de bewerking was de eerste rij tanden verwijderd waardoor slechts vier tanden overbleven die 90 cm uit elkaar stonden. Gedurende de diepe bewerkingen werden de CAN-bus-parameters van de tractor gelogd met een Exatrek-datalogger. Hieruit kon het brandstofverbruik gedurende de bewerkingen gehaald worden.



Figuur 37. Bodemscan (0-25 cm-mv) uitgevoerd op perceel 1 in het voorjaar van 2018 in het kader van het doctoraatsonderzoek van Lidong Ren. Aanduidingen van de proefopstelling in kader van deze masterproef werden aangebracht.

Na de diepe bewerkingen werden op 1 en 2 september 2020 enkele penetrometingen uitgevoerd in combinatie met het nemen van bodemstalen. Er werden telkens vijf penetrometingen gedaan ongeveer in het midden van elke halve strook. Deze vijf punten werden bepaald met behulp van de dieptereferentieplaat (Figuur 38) die loodrecht op de lengte van de strook werd georiënteerd. Het centrale punt is weergegeven op Figuur 39.



Figuur 38. De vijf punten op de dieptereferentieplaat waar penetrometingen werden gedaan.



Figuur 39. De locaties van de penetrometingen en bodemstalen (zwarte stippen).

Na de penetrometingen en het nemen van de bodemstalen werd op 3 september 2020 het perceel ingezaaid met een groenbedekker, namelijk een mengsel van gele mosterd en bladrammenas. Op deze groenbedekker werd het effect van de diepe bewerkingen gemonitord. De zaaicombinatie was opgebouwd uit een voorzet-diepwoeler, een rotoreg en een zaaimachine. De voorzet-diepwoeler was ingesteld op 25 cm-mv en de zaaidensiteit was 25 à 30 kg/ha.

Op 4 november 2020 werd er een dronevlucht over de groenbedekker gedaan met een RGBcamera. Uit de genomen foto's kon dan een inschatting van de gewashoogte gemaakt worden. De vlucht werd uitgevoerd volgens een zigzagpatroon met 75 % overlap, op een hoogte van 40 m en met een snelheid van 4,5 m/s. Voor deze vlucht werden negen gcp's uitgezet over het perceel.

Op 19 en 20 november 2020 werden manuele opbrengstmetingen gedaan van de groenbedekker met de Prime GX390 éénasser werktuigdrager. Plots van 1,5 m breed en ongeveer 6 m lang werden gemaaid. De locaties van de plots zijn te zien op Figuur 40. Via weging en droging van de vers geoogste groenbedekker, het volledige bovengrondse deel van de plant, werd de opbrengst als massa droge stof per hectare bepaald.



Figuur 40. De locaties van de opbrengstplots van de groenbedekker met verduidelijking van de rechthoeken.

Finaal werden er op 2 december 2020 nogmaals penetrometingen uitgevoerd en bodemstalen genomen om het behoud van het effect van de diepe bewerking te bekijken. Deze werden op dezelfde locatie uitgevoerd als weergegeven in Figuur 39. Hier werden twaalf metingen gedaan. Deze twaalf punten werden bepaald met behulp van de dieptereferentieplaat die loodrecht op de lengte van de strook werd georiënteerd. Er werd telkens één gat tussen gelaten en twee platen werden in elkaars verlengde gelegd zodat een afstand van 180 cm overbrugd werd. De locatieaanduiding op Figuur 39 geeft hier het punt tussen de twee dieptereferentieplaten weer. De bodemstalen werden genomen ter hoogte van dit punt.

### 3.3.1.2. Dataverwerking

#### Penetrometingen

De penetrometerresultaten werden gezuiverd door de verticale stukken waar de dieptesensor niet werkte door een te hoge snelheid en niet-gelogde gegevens op het einde van de meting te verwijderen. Vervolgens werden met deze data dwarsdoorsneden van de bodem opgesteld. De geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetrometingen uitgevoerd vlak na de diepe bewerking en na het oogsten van de groenbedekker, werden binnen elk half blok visueel vergeleken met de controles om respectievelijk het effect, en het behoud van het effect van de diepe bewerking te bekijken.

#### CAN-bus-data

De gelogde CAN-bus-data werden via een geografisch informatiesysteem (QGIS 3.10) gevisualiseerd (Figuur 41). Enkel de relevante variabelen werden meegenomen: lengtegraad, breedtegraad, snelheid, toerental, brandstofverbruik, wiel- en grondgebaseerde snelheid, motorkoppel, trekkracht en hoogte van de achterste driepuntsophanging.



Figuur 41. Voorstelling van de gedownloade data uit de Exatrek webapplicatie in QGIS 3.10. De data wordt hier gegradueerd weergegeven o.b.v. de hoogte van de achterste driepuntsophanging (%). 100% indien de hef maximaal omhoog is en 0% indien de hef helemaal beneden is.

Om de data te filteren werd er allereerst een opsplitsing gedaan op basis van de hoogte van de achterste driepuntsophanging. Deze hoogte werd uitgelezen in procent en bedroeg 100% indien de hef maximaal omhoog was en 0% indien de hef helemaal beneden was. Na het

visualiseren van deze gegevens werd de limietwaarde op 5% gelegd op het begin en het einde van de lijn en op 10% in het midden van de lijn (Figuur 42). Zo werd enkel de data behouden wanneer het werktuig in de grond zat. Data tijdens het keren op de kopakker werden zo uitgefilterd.



Figuur 42. Visualisatie van de hoogte van de driepuntsophanging i.f.v. de afstand ten opzichte van het eerste punt in de diepe bewerkingslijn. Data aan het begin en einde van de lijn die meer dan 5% bedroegen werden verwijderd. Data in het midden van de lijn boven 10% werden verwijderd.

Na de filtering o.b.v. de driepuntsophanging werd er verder ook gekeken naar het percentage slip, de rijsnelheid, de trekkracht en het brandstofverbruik om de begin- en eindpunten van de datalijnen verder te filteren. De slip werd bepaald door de grondgebaseerde snelheid (GB) te verminderen met de wielgebaseerde snelheid (WB) en relatief om te zetten ten opzichte van de WB. Indien deze waarde positief was (GB>WB) kwam dit bij deze grondbewerking overeen met een onlogische waarde, die dan verwijderd werd. De rijsnelheid werd relatief gezet ten opzichte van de mediaan van de rijsnelheden in de volledige datalijn. Na visualisatie was te stellen dat de rijsnelheid meestal boven 80% bleef (100% is mediaan). Data die onder een rijsnelheid van 80% zat, werd verwijderd. De trekkracht was negatief als de hef naar boven was. Negatieve data werden daarom dan ook verwijderd. De uitschieters van het brandstofverbruik werden gevalideerd via een boxplot van alle data. Indien er uitschieters op de randen van de datalijnen lagen, werden ze verwijderd doordat ze het gevolg waren van randeffecten. Afwijkingen van deze limietwaarden in het midden van de datalijnen werden ook nader bekeken, maar enkel de extreme afwijkingen zonder een voor de hand liggende verklaring werden verwijderd.

De coördinaten werden verder nog aangepast naar de locatie van het werktuig i.p.v. deze van de locatie van de GPS van de tractor. Een verplaatsing van 2 m was nodig. Voor de doelstellingen op perceel 1 was het brandstofverbruik een belangrijke parameter. De variatie in brandstofverbruik tijdens de diepe bewerking werd allereerst vergeleken met de variatie in opbrengst van de zomergerst. Vervolgens werd het brandstofverbruik ook bekeken om een idee te krijgen van het verbruik en de kostprijs van een (variabel) diepe bewerking. Beide onderdelen worden hieronder verder besproken in de sectie over Manuele opbrengstmetingen.

#### Dronebeelden

De verwerking van de foto's genomen tijdens de dronevlucht, voor de opbouw van een orthomozaïek en een digitaal hoogtemodel (DEM), gebeurde met de software Agisoft Metashape gebaseerd op de negen gcp's. Deze verwerking gebeurde door beeldverwerkingsspecialisten bij ILVO. De resulterende orthomozaïek had een planimetrische spatiale resolutie van 4 mm. Het DEM had een hoogteresolutie van 1,5 cm. Vervolgens werd een digitaal terreinmodel (DTM) opgesteld met behulp van de 25 RTK-GPS-punten via een ordinary-kriging-interpolatie met een raster van 10 cm x 10 cm. Het DTM-resultaat werd tot slot afgetrokken van het DEM-resultaat om de gewashoogte te bekomen.

Vervolgens werden o.b.v. de gefilterde CAN-bus-data de plots afgebakend waar de bewerking effectief plaatsvond. Binnen elk plot werd dan een buffer toegepast van -1,5 m zodat randeffecten niet meegenomen werden (Figuur 43). Binnen elke buffer werd het gemiddelde en het 90<sup>ste</sup> percentiel (Q90) van de gewashoogte bepaald. De Q90 wordt standaard gebruikt aangezien deze minder gevoelig is aan afwijkingen.



Figuur 43. Afbakening van de plots o.b.v. de gefilterde CAN-bus-data (punten). Binnen elk plot werd er een buffer van -1,5 m toegepast. Binnen deze buffer werd het gemiddelde en de Q90 van de gewashoogte bepaald.

De Q90-waarden van de gewashoogtes werden in een statistisch lineair model met meervoudige regressie gegoten om te bepalen of de bewerking een effect had op de hoogte. De hoogte van de groenbedekker staat dan in positief verband met de opbrengst. De hoogte was een continue variabele. De behandeling en de locatie waren factoren. De interactie tussen behandeling en locatie werd ook bekeken. De behandeling houdt in: diepwoelen en controle. Het variabel diepwoelen werd niet meegenomen aangezien de stroken in Figuur 37 per helft werden bekeken waardoor het variabel diepwoelen kon opgesplitst worden in een controle helft en een diepwoelen helft. De locaties stelden de verschillende blokken voor, maar telkens in twee gedeeld waardoor er 10 locaties ontstonden.

#### Manuele opbrengstmetingen

Het vers maaisel uit de plots werd allemaal gewogen en een klein monster werd bijgehouden voor het labo. Dit vers monster werd in het labo nogmaals afgewogen en vervolgens 48 uur gedroogd bij 70 °C. Hierna werd het droge monster gewogen om het droge gewicht te bepalen. Via volgende formule (vergelijking 2) werd het gewicht van dit monster omgerekend naar de opbrengst van de volledig gemaaide plot:

$$opbrengst (droog) \left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right) = \frac{\text{massa}_{\text{droge monster}} (\text{kg}) * \frac{\text{massa}_{\text{vers maisel}} (\text{kg})}{\text{massa}_{\text{vers monster}} (\text{kg})} * 10000 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{ha}}\right) \quad (\text{vergelijking 2})$$

De breedte van de plots, zowel voor de groenbedekker als de zomergerst, was 1,5 m bepaald door de breedte van de maaibalk. De lengte was maar een schatting waardoor deze na het oogsten nogmaals met de hand-GPS werd opgemeten. Deze lengte werd vervolgens gebruikt in bovenstaande vergelijking.

#### Zomergerst

Om te bekijken of de variatie in opbrengstmetingen van zomergerst te linken was aan de variatie in brandstofverbruik tijdens de diepe bewerking, werden ordinary-kriging-interpolaties van het brandstofverbruik en van de manuele opbrengstmetingen van de zomergerst toegepast. Deze konden dan vergeleken worden met elkaar. Kriging is een geostatistische interpolatietechniek die veel toegepast wordt in de aardwetenschappen. Tijdens het interpolatieproces voor de voorspelling van een niet bemonsterd punt houdt deze techniek rekening met de afstand tot gekende punten en de graad van variatie tussen de gekende datapunten (Aspexit, 2019; Dauphine, 2017; Paramasivam & Venkatramanan, 2019). Een voordeel bij kriging is dat er naast de schatting van de waarde toegekend aan een bepaald punt ook een variatie op elk punt wordt bepaald. Dit geeft dan een beeld over de onzekerheid ((Aspexit, 2019). Een voorwaarde om kriging te gebruiken is dat de data normaal verdeeld zijn. Dit werd bekeken met behulp van een histogram waarvoor de scheefheid berekend werd en via een Shapiro-Wilk-test. De scheefheid moest tussen -1 en 1 liggen indien er aangenomen mocht worden dat de data normaal verdeeld waren. Indien dit niet zo was diende een Box Cox transformatie toegepast te worden. De resoluties van de rasters waarop het brandstofverbruik en de opbrengstmetingen geïnterpoleerd werden, bedroegen beide 1 m x 1 m. Aangezien de coördinaten waarvoor er brandstofverbruikgegevens gekend waren niet homogeen over het perceel lagen, maar dat er enkel data waren waar er gediepwoeld was, werd het perceel opgedeeld in 4 stukken. D1 en V1 werden samengenomen om een kriging-kaart te maken, D2 en V2 werden samengenomen, D3, V3 en V4 werden samengenomen, en D4, V5 en D5 werden samengenomen. Als coördinaten gekoppeld aan de opbrengstwaarden werden de coördinaten van het centrum van de plots gebruikt. De relatie tussen beide kriging-kaarten diende vervolgens bekeken te worden via Pearson-correlatie.

Echter, omdat het brandstofverbruik geen ruimtelijke structuur bleek te bevatten, kon er geen semi-variogram opgesteld worden en kon er geen kriging-interpolatie uitgevoerd worden. Een semi-variogram beschrijft namelijk de ruimtelijke afhankelijkheid binnen een dataset als functie van de afstand. Deze ruimtelijke structuur wordt dan gebruikt als voorspellend model in de kriging-interpolatie. Als er geen ruimtelijke structuur uit de variogram-analyse zichtbaar wordt, kan er geen kriging-interpolatie gedaan worden. Als alternatief om alsnog de relatie te bekijken, werden uit de opgestelde kriging-kaart van de opbrengst de waarden geëxtraheerd op de locaties waar brandstofverbruik-data ter beschikking was. De relatie tussen beide datasets werd vervolgens bekeken via Pearson-correlatie.

Er werd hier verondersteld dat de variatie in opbrengst een gevolg was van de bodemverdichting en dat het brandstofverbruik tijdens de diepe bewerking een snelle en perceelsdekkende manier is om bodemverdichting te detecteren en in kaart te brengen. Beide veronderstellingen werden via volgende twee correlaties gevalideerd. De relatie tussen het brandstofverbruik en de bodemscan werd bekeken via Pearson-correlatie. Op eenzelfde manier als reeds aangehaald, werden de EC-waarden geëxtraheerd uit de kriging-kaart van de bodemscan. Ook werd de relatie tussen de opbrengstmetingen en de bodemscan bekeken via Pearson-correlatie door de correlatiecoëfficiënt tussen beide kriging-kaarten te bepalen.

#### Groenbedekker

De manuele opbrengstmetingen van de groenbedekker werden in twee statistisch lineaire modellen met meervoudige regressie gegoten om te bepalen of de bewerking een effect had op de opbrengst. Het eerste lineair model was gelijk opgesteld als dit voor de Q90-waarden van de gewashoogte. Voor het tweede lineair model werd de totaalopbrengst per strook bekeken. De behandeling hield hier in: controle, diepwoelen en variabel diepwoelen. De interactie kon niet meegenomen worden doordat er te weinig herhalingen waren. De locaties stelde de vijf blokken voor.

Tot slot werd er voor de manuele opbrengstmetingen van de groenbedekker ook bekeken of het brandstofverbruik van het (variabel) diepwoelen te rechtvaardigen was door de eventuele meeropbrengst die gecreëerd werd. Hiervoor werd het gemiddelde verbruik (I/h) per strook bepaald en dit werd geplaatst t.o.v. de meeropbrengst.

## 3.3.2. Perceel 2

De proeven op perceel 2 hadden betrekking op doelstellingen a en b. Voor doelstelling a werden de effecten van een diepe bewerking op de gewashoogte en ontwikkeling bekeken t.o.v. de controle. Voor doelstelling b werd bekeken of CAN-bus-parameters gelogd tijdens een scanning met één tand of gelogd tijdens het diepwoelen een snelle en meer perceelsdekkende manier kunnen zijn om bodemverdichting te detecteren en in kaart te brengen door deze waarden te vergelijken met de EC-waarden van de bodemscan en met de indringingsweerstand uit de penetrometingen. Het idee van de scanning met één tand berustte op het concept van de horizontale penetrometer, waar in plaats van sensoren op verschillende diepte die de penetratieweerstand opmeten, de CAN-bus-parameters worden uitgelezen om bodemverdichting te detecteren. Het is intuïtief duidelijk dat bodemverdichting bijvoorbeeld een hoger brandstofverbruik zal vragen om de tand door de grond te trekken.

### 3.3.2.1. Proefopstellingen

Op 15 oktober 2020, werd er een Veris MSP3-bodemscan uitgevoerd op de naakte maïsstoppel. Deze bodemscan was uitgevoerd met een hoek van ongeveer 45° op de gebruikelijke rijrichting en er werd voor een scanafstand van 5 m gekozen (Figuur 44). De EC (0-30 en 0-90 cm-mv), pH en organische stof zijn bepaald. Voor de kalibratie van de pH en het organische stof werden zes bodemstalen genomen op 13 november 2020. De analyse van deze stalen gebeurde door het labo van ILVO. De laboresultaten werden gebruikt door Agrometius ter kalibratie.



Figuur 44. Rijpatroon van de Veris MSP-3 bodemscan (links) en van de scanning met één tand (rechts).

Op 16 oktober 2020 werd er vervolgens een scanning van het perceel gedaan met één tand centraal op de eerste rij van de Profundus Z diep-cultivator van Steeno gekoppeld aan de New Holland T7.270. De scanning gebeurde tot ongeveer 50 cm-mv. Het rijpatroon was gelijkaardig als dit van de Veris MSP3-bodemscan (Figuur 44). Gedurende de scanning werden de CANbus-parameters van de tractor gelogd met een Exatrek-datalogger. Deze gegevens konden dan in verband gebracht worden met de EC-waarden uit de bodemscan.

Na de scanning werd er een proef aangelegd waar delen gediepwoeld werden (D) en andere delen niet (C). Op 16 oktober 2020 werd de diepe bewerking uitgevoerd met de Kuhn DC 301 diepwoeler tot ongeveer 50 cm-mv. De proefopstelling is weergegeven in Figuur 45. De proefopstelling was zonder GPS gebeurd, maar met een rolmeter, waardoor de werkelijke

plots anders liggen. De RTK-GPS kon tijdens de bewerking ook geen verbinding vinden vanwege problemen met de FLEPOS correctie-service waardoor er op de locatiebepaling een fout zat (1,5-2 m) (Figuur 45). Gedurende de diepe bewerking werden de CAN-bus-parameters van de tractor gelogd met een Exatrek-datalogger. Deze gegevens konden dan ook in verband gebracht worden met de EC-waarden uit de bodemscan.



Figuur 45. Weergave van de vooropgestelde proefopstelling (links) en van de werkelijke locatie van het diepwoelen en de penetrometingen(zwarte stippen) (rechts).

Voorafgaand aan de diepe bewerking werden er op 15 en 16 oktober 2020 enkele penetrometingen uitgevoerd in combinatie met het nemen van bodemstalen. Er werden telkens zes penetrometingen gedaan ongeveer in het midden van elke halve strook en centraal. Deze zes punten werden bepaald met behulp van de dieptereferentieplaat die loodrecht op de lengte van de strook werd georiënteerd. Er werd telkens één gat tussen gelaten. Het centrale punt is weergegeven op Figuur 45. Deze gegevens konden dan in verband gebracht worden met de EC-waarden uit de bodemscan en met de CAN-busparameters van de scanning met één tand.

Op 19 oktober 2020 is het perceel ingezaaid met wintergerst. Op dit gewas werd het effect van de diepe bewerkingen gemonitord. De zaaidensiteit was 160 kg/ha. Op 9 maart 2021 vond er een vloeibare bemesting plaats van het type Ansul 15 aan 90 eenheden stikstof.

Op 27 april 2021 werd er een dronevlucht over de wintergerst gedaan met een RGB-camera en een multispectrale camera. Uit de genomen foto's kon dan respectievelijk een inschatting van de gewashoogte, het NDVI- en het NDRE-gehalte gemaakt worden. De vlucht met de RGB-camera werd uitgevoerd volgens een zigzagpatroon met 80% overlap, op een hoogte van 50 m en met een snelheid van 4,5 m/s. De vlucht met de multispectrale camera werd uitgevoerd volgens een zigzagpatroon met 80% overlap, op een hoogte van 35 m en met een snelheid van 4,5 m/s. Voor deze vluchten werden zeven gcp's uitgezet over het perceel.

### 3.3.2.2. Dataverwerking

#### Penetrometingen

De penetrometerresultaten werden gezuiverd op dezelfde manier als voor perceel 1 en vervolgens werden voor alle 18 locaties de mediaan, het minimum en het maximum bepaald. Dit werd gedaan door eerst de mediaan, het minimum en het maximum van elke meting te bepalen om vervolgens per zes metingen op één locatie de mediaan van respectievelijk de

medianen, de minima en de maxima van deze zes metingen te bepalen. Zo werd er één waarde per locatie bekomen.

#### Bodemscan

Na kalibratie werden van de EC- en de organischestof-waarden kriging-kaarten opgesteld via een ordinary-kriging-interpolatie met respectievelijk een resolutie van 1 m x 1 m en 2,5 m x 2,5 m. Deze kaarten werden onderling vergeleken en werden ook vergeleken met de pH-waarden.

#### CAN-bus-data

De verwerking van de CAN-bus-data van de scanning met één tand en van de diepe bewerking gebeurde op dezelfde manier als op perceel 1. De coördinaten werden aangepast naar de locatie van het werktuig i.p.v. deze van de locatie van de GPS van de tractor. Een verplaatsing van 2 m was nodig voor de scanning met één tand en een verplaatsing van 1 m was nodig voor de diepe bewerking. De gefilterde data werd gebruikt in de verdere analyse.

#### Scanning met één tand

Voor de scanning met één tand werden de relaties tussen de CAN-bus-parameters die reeds intuïtief te linken zijn aan bodemverdichting (slip, motorkoppel en brandstofverbruik), de EC-waarden uit de bodemscan en de penetratieweerstand bekeken via Pearson-correlatie. De trekkracht kon niet bekeken worden aangezien deze data foutieve output gaven vermoedelijk door de instabiliteit van het werktuig met één tand (zie sectie 3.3.2.3).

Voor de relaties tussen de CAN-bus-parameters en de EC-waarden te bekijken, werden de EC-waarden overeenkomstig met de locatie van de CAN-bus-data geëxtraheerd uit de krigingkaart. De correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende datasets werden vervolgens bekeken. Voor de relaties tussen de CAN-bus-parameters en de penetratieweerstand te bekijken, werden kriging-kaarten met resoluties van 1 m x 1 m opgesteld van de relevante CAN-busparameters. Uit deze kaarten werd dan de mediaan bepaald van de parameters in een buffer van 2 m straal rond de locatie van de penetrometingen. Ditzelfde werd gedaan voor de ECwaarden. De slip had geen ruimtelijke structuur waardoor geen kriging-kaart kon worden opgesteld. De correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende datasets werden vervolgens bekeken.

#### Diepe bewerking

Voor de diepe bewerking werden de relaties tussen de relevante CAN-bus-parameters (motorkoppel, brandstofverbruik en trekkracht) en de EC-waarden uit de bodemscan bekeken via Pearson-correlatie. De slip werd niet gemonitord tijdens de diepe bewerking en kon dus niet bekeken worden.

De extractie van de EC-waarden gebeurde hier door de mediaan van de EC-waarden in een buffer van 3 m straal rond de locatie van de CAN-bus-data uit de diepe bewerking te bepalen. Deze buffer werd toegepast door het gebrek aan RTK-GPS-coördinaten van de CAN-bus-data. De correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende datasets werden vervolgens bekeken.

Uit alle bovengenoemde correlatiecoëfficiënten werd dan afgeleid welke parameters een eenvoudige en perceelsdekkende manier bieden om bodemverdichting te detecteren en in kaart te brengen.

#### Dronebeelden

De verwerking van de foto's genomen tijdens de dronevlucht met RGB-camera gebeurde op dezelfde manier als op perceel 1. De resulterende orthomozaïek had een planimetrische spatiale resolutie van 5 mm. Het DEM had een hoogteresolutie van 1,5 cm. Het DTM werd op dezelfde manier opgesteld als voor perceel 1 m.b.v. 14 RTK-GPS-punten. Het DTM-resultaat werd tot slot afgetrokken van het DEM-resultaat om de gewashoogte te bekomen.

De verwerking van de foto's genomen met de multispectrale camera tot een NDVI- en NDREkaart gebeurde met de software Pix4d. Deze verwerkingen gebeurden door beeldverwerkingsspecialisten bij ILVO.

De Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is een genormaliseerd verschil van het rode en nabij-infrarode licht en geeft een indicatie van de hoeveelheid biomassa en dus opbrengst (Guan et al., 2019). Waar het rode licht sterk geabsorbeerd zal worden door chlorofyl, zal het nabij-infrarode licht sterk gereflecteerd worden bij licht/vegetatie interactie. De Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) geeft een indicatie van de hoeveelheid opgenomen stikstof en dus opbrengst van graangewassen (Heidarian Dehkordi et al., 2020).

 $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$  (NIR: reflectiefactor nabij-infrarood, RED: reflectiefactor rood)  $NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge}$  (NIR: reflectiefactor nabij-infrarood, RedEdge: reflectiefactor RedEdge)

Vervolgens werden o.b.v. de gefilterde CAN-bus-data de plots afgebakend waar de bewerking effectief plaatsvond. Binnen elk plot werd dan een buffer toegepast van -3 m zodat er zeker data genomen werden in de diepe bewerking of in de controle ondanks de fout op de plaatsbepaling door het niet rijden met een RTK-GPS (Figuur 46). Door het grote verschil in oppervlakte van de proefvlakken en door de aanwezigheid van rijsporen in het veld werd er binnen elke buffer een nieuw proefvlak gelegd waarin de data bekeken werd. Dit proefvlak werd random gelegd binnen elke buffer, maar de aanwezigheid van rijsporen of kopakker werd vermeden. Binnen elk proefvlak werd dan het gemiddelde en het 90<sup>ste</sup> percentiel (Q90) van de gewashoogte, de NDVI en de NDRE bepaald.



Figuur 46. Afbakening van de plots o.b.v. de gefilterde CAN-bus-data (punten). Binnen elk plot werd er een buffer van -3 m toegepast. Binnen deze buffer werd dan een proefvlak met gelijk oppervlak gelegd. Binnen dit proefvlak werd het gemiddelde en de Q90 van de gewashoogte, de NDVI en de NDRE bepaald.

### 3.3.2.3. Supplementair: Werking trekkrachtsensor

Zoals reeds aangehaald in de sectie Scanning met één tand, kon de trekkracht uit de scanning met één tand niet bekeken worden aangezien deze data foutieve output gaf door een dan niet te verklaren reden. In tegenstelling met de andere bewerkingen die in het kader van deze masterproef werden uitgevoerd, werden er veel negatieve waarden bekomen wanneer de hef beneden was (Figuur 47). Echter wees de praktijk al uit dat New Holland normaal een positieve trekkracht (N) uitleest indien het werktuig naar beneden is en een negatieve kracht uitleest indien het werktuig naar boven is (Figuur 51). Er liep dus iets mis in het monitoringsproces.



Figuur 47. Output van de trekkrachtmonitoring geregistreerd via de CAN-bus tijdens de scanning met één tand op perceel 2 met een New Holland tractor. De data zijn hier reeds gefilterd o.b.v. de hoogte van de achterste driepuntsophanging. Normaal zouden alle datapunten dus een positieve trekkracht moeten hebben.

Aangezien één van de doelstellingen van de scanning met één tand was om te bekijken of de trekkracht een snelle en perceelsdekkende manier is om bodemverdichting te detecteren en in kaart te brengen, werd er toch meer onderzoek gedaan naar de werking van een trekkrachtsensor om zo mogelijk een verklaring te vinden voor de foutieve output. De trekkrachtmonitoring werd hier verder uitgediept en zo accuraat mogelijk weergegeven voor New Holland en Fendt, twee vaak gebruikte commerciële tractormerken. De beschikbare kennis werd verkregen in een persoonlijke communicatie met dhr. Ivo Dupon medewerker bij CNH Industrial (New Holland), dhr. Gilles Claeys medewerker bij Verschueren bvba (New Holland) en dhr. Jelle Vliegen medewerker bij Quintyn (Fendt).

Zo bleek dat de trekkrachtmonitoring bij New Holland en Fendt op een gelijkaardige manier gebeurt. De trekkrachtmonitoring gebeurt met twee trekkrachtbouten die ingebouwd zijn in de scharnierpunten waar de liftlatten op gemonteerd zijn. Wanneer er een afschuifkracht wordt uitgeoefend op de bouten, wordt deze kracht omgezet naar een evenredig elektrisch signaal dat richtingsafhankelijk is (Dupon, 2020; Vliegen, 2021).



Figuur 48. Het elektrisch circuit van de trekkrachtbouten (B032 en B031) van Fendt (Vliegen, 2021).

Het elektrisch circuit van de trekkrachtbouten (B032 en B031) van Fendt is weergegeven in Figuur 48. De werking bij New Holland is analoog. Het circuit wordt gevoed met een spanning van 8,5 VDC. De resulterende stroom (aangeduid volgens de pijlen) wordt in de bout omgezet naar een wisselstroom m.b.v. een omvormer. De opbouw van de bout en van de kern van de bout is weergegeven in Figuur 49. De kern bestaat uit drie spoelen gewikkeld rond metalen staven. De spoelen worden bekrachtigd met de wisselstroom waardoor ze een stabiel wisselend magnetisch veld creëren. Het omhulsel van de bout is opgebouwd uit metaal met unieke magnetische eigenschappen (niet gespecifieerd). Wanneer dit metaal onderworpen wordt aan een afschuifkracht, uitgeoefend op de insnoering, verandert het natuurlijk magnetisme van het metaal wat het magnetische fluxpatroon in de kern verandert. Deze verandering wordt getransformeerd in een elektrisch signaal dat evenredig is met de uitgeoefende kracht en richtingsafhankelijk is, en wordt ontvangen bij de processor. In onbelaste toestand is er een spanning van ca. 4,22 VDC op de signaallijn aanwezig, dit t.g.v. het wisselend magnetisch veld dat aangelegd wordt op de spoelen. Bij belasting verandert deze signaalspanning. Dit wordt weergegeven binnen de cirkels op het elektrisch circuit (Dupon, 2020; Vliegen, 2021).



Figuur 49. Opbouw van een trekkrachtbout (Dupon, 2020).

De trekkrachtbouten reageren enkel op de horizontale afschuifkrachten en niet op de afschuifkrachten veroorzaakt door het gewicht van het werktuig (Figuur 50). Indien het werktuig omhoog is, wordt er horizontaal geduwd op de bouten. Wanneer het werktuig naar beneden is, wordt er horizontaal getrokken. Dit kan differentieel zijn tussen de bouten door de asymmetrie van de werktuigkrachten op de bouten. Beide signalen worden uiteindelijk gecombineerd tot één waarde die gecommuniceerd wordt over de CAN-bus en die bijkomend gelogd kan worden. Hoe deze combinatie gebeurt voor New Holland is niet achterhaald. Wel blijkt uit de praktijk dat New Holland een positieve kracht (N) uitleest indien het werktuig naar beneden is en een negatieve kracht uitleest indien het werktuig naar boven is (Figuur 51). De combinatie van de twee signalen bij Fendt gebeurt door de twee sensoren uit te middelen tegenover elkaar. Verder worden bij Fendt negatieve krachten (N) uitgelezen als het werktuig naar boven is (Figuur 52) (Dupon, 2020; Vliegen, 2021).

- (F) trek- of drukkracht
- (FR) kracht op onderste hefarmen rechts
- (FL) kracht op onderste hefarmen links
- (1) lager onderste hefarmen
- (2) ingebouwde elektronica
- (3) spoelen, transformator



Figuur 50. Trek- of drukkrachten (F) die inwerken op B031 en B032 bij Fendt tractoren (Vliegen, 2021).



Figuur 51. Output van de trekkrachtmonitoring geregistreerd via de CAN-bus tijdens het diepwoelen op perceel 1 in het kader van deze masterproef met een New Holland tractor. Als het werktuig naar beneden is (centraal op het veld) zijn de waarden positief. Als het werktuig naar boven is (kopakker) zijn de waarden negatief.



Figuur 52. Output van de trekkrachtmonitoring geregistreerd via de CAN-bus tijdens het cultiveren met een Fendt tractor. Als het werktuig naar beneden is (centraal op het veld) zijn de waarden negatief. Als het werktuig naar boven is (kopakker) zijn de waarden positief (Vliegen, 2021).

Uiteindelijk werd er vermoed dat de reden achter de foutieve data voor de trekkracht tijdens de scanning met één tand lag bij de instabiliteit van het werktuig met één tand. Dit zou er eventueel voor gezorgd kunnen hebben dat er op één bout werd getrokken en op de andere bout sterk geduwd. Afhankelijk van de uitlezing van beide waarden tot één waarde kon er dan een negatieve waarde bekomen worden. Vlak na de scanning met één tand werd namelijk de diepe bewerking uitgevoerd met vier tanden, hier werd geen probleem ondervonden. Dit toonde aan dat het zeker aan het werktuig gelegen moet hebben.

Echter werd er met dezelfde tractor enkele weken later een test gedaan met een horizontale penetrometer ontwikkeld door ILVO. Deze penetrometer bestond ook uit één tand. Hier werden er geen foutieve trekkracht-data bekomen. Er waren wel enkele verschillen tussen de twee werktuigen die mogelijk voor meer stabiliteit zorgden bij de horizontale penetrometer. Zo stond de horizontale penetrometer veel dichter opgesteld bij de tractor, het was een rechte tand en geen gebogen tand en er waren vleugelscharen aanwezig.

## 3.3.3. Perceel 3

De proeven op perceel 3 hadden betrekking op doelstellingen b en c. Voor doelstelling b werd bekeken of CAN-bus-parameters gelogd tijdens het diepwoelen met verschillende types diepwoeler een snelle en perceelsdekkende manier kunnen zijn om bodemverdichting te detecteren en in kaart te brengen door deze waarden te vergelijken met de EC-waarden van de bodemscan. Voor doelstelling c werd het effect van verschillende types diepwoeler op de effectiviteit van het openbreken van de ploegzool bekeken door penetrometingen genomen voor en na de diepe bewerking te vergelijken. Vervolgens werd er ook bekeken of er een significant verschil is in brandstofverbruik tussen deze verschillende types diepwoeler. De diepwoelers verschilden in het aantal en type tanden.

### 3.3.3.1. Proefopstellingen

Voor de proefopstellingen binnen de scoop van deze masterproef werd er gebruikgemaakt van een EMI-bodemscan (Dualem-21S sensor) uitgevoerd op perceel 3 in het najaar van 2020 in het kader van het doctoraatsonderzoek van Adriaan Vanderhasselt (Figuur 53) (Vanderhasselt, Verwacht 2022). Het veld werd op basis van deze bodemscan in drie blokken (A-B-C) verdeeld waarna ieder blok in vier stroken en elke strook in twee helften werd verdeeld (1-8). De blokken werden zo gepositioneerd in het veld dat de bodemverdichting binnen een blok als gelijk beschouwd kon worden. Voornamelijk de randen weken af, dus deze werden vermeden. Er werd dus aangenomen dat alle vier de stroken binnen één blok een vergelijkbare bodemverdichting hadden. Blokken onderling hadden een verschillende bodemverdichting. Elke strook binnen één blok kreeg dan via randomisatie een behandeling toegekend. De vier behandelingen waren: niet diepwoelen (0), diepwoelen met de Profundus Z diepwoeler van Steeno met zeven tanden (7), diepwoelen met de ZDF-U-5 diepwoeler van Steeno met vijf tanden (5) en diepwoelen met de Samco Field-lift met drie tanden (3) (Figuur 53).



Figuur 53. Aanduidingen van de proefopstelling op perceel 3 met op de achtergrond de EMI-bodemscan uitgevoerd in het najaar van 2020. De EC van de bodem wordt weergegeven voor 0-0,5 m-mv. De randen wijken duidelijk af van de rest van het veld. De locaties van de penetrometingen zijn hier ook aangeduid (zwarte stippen).

Op 27 oktober 2020, voor de diepe bewerkingen, werden enkele penetrometingen uitgevoerd in combinatie met het nemen van bodemstalen op de naakte maïsstoppel. Er werden telkens metingen gedaan ongeveer in het midden van elke halve strook. De exacte locaties zijn weergegeven op Figuur 53. Op elke locatie zijn twaalf penetrometingen gedaan op dezelfde manier als de penetrometingen uitgevoerd op 2 december 2020 op perceel 1.

Op 6 november 2020 vonden de diepe bewerkingen plaats. Deze werden uitgevoerd op zo'n constant mogelijke diepte van 50 cm-mv. De diepwoelers werden gekoppeld aan de New Holland T7.270. De bewerkingen gebeurden op de naakte maïsstoppel. Gedurende de diepe bewerkingen werden de CAN-bus-parameters van de tractor gelogd met een Exatrekdatalogger. Deze gegevens konden dan in verband gebracht worden met de EC-waarden uit de bodemscan. Verder kon hieruit ook het brandstofverbruik gedurende de bewerkingen bepaald worden.

Finaal werden er op 6 november 2020, na de diepe bewerking, nogmaals penetrometingen uitgevoerd en bodemstalen genomen. Deze werden precies uitgevoerd zoals op 27 oktober 2020, met uitzondering van de locaties A3, A4, B3, B4, C1 en C2, waar geen penetrometingen werden gedaan aangezien hier geen bewerking had plaatsgevonden. Op locaties C1 en C2, werden evenmin bodemstalen genomen.

### 3.3.3.2. Dataverwerking

#### Penetrometingen

De penetrometerresultaten werden gezuiverd op dezelfde manier als voor perceel 1 en vervolgens werden er dwarsdoorsneden van de bodem opgesteld. Om de effectiviteit van de diepe bewerking kwalitatief te bekijken werden de geïnterpoleerde dwarsdoorsneden op een bepaalde locatie, voor en na de diepe bewerking, visueel vergeleken. Daarnaast werden de metingen per 10 cm uitgemiddeld. De gemiddeldes na de diepe bewerking werden afgetrokken van de gemiddeldes voor de diepe bewerking. Deze waarden gaven dan een kwantitatief idee van de effectiviteit van die diepe bewerking per type diepwoeler.

Alvorens de penetrometingen vergeleken werden, werd er bepaald of de vochtgehaltes voor de twee metingen als gelijk beschouwd konden worden, vermits de output van de penetrometingen vochtafhankelijk is. Deze validatie gebeurde met behulp van een gepaarde t-test. Drie testen werden uitgevoerd: één voor de vochtgehaltes op 0-10 cm-mv, één voor de vochtgehaltes op 10-30 cm-mv en één voor de vochtgehaltes op 30-60 cm-mv. Indien de vochtgehaltes niet gelijk beschouwd konden worden, konden de penetratieweerstanden eventueel omgerekend worden naar de vocht gecorrigeerde penetratieweerstanden (Lapen et al., 2004).

#### CAN-bus-data

De verwerking van de CAN-bus-data gebeurde op dezelfde manier als op perceel 1. De limietwaarden voor de hoogte van de driepuntsophanging werden hier op 15% gelegd op het begin en het einde van de lijn en op 20% in het midden van de lijn. Deze limietwaarden waren hoger dan deze op perceel 1 aangezien na visualisatie van de data bleek dat het minimum niet rond 0% lag, maar rond 10% (Figuur 54). Dit kwam doordat de ingestelde hoogte van de driepuntsophanging afhankelijk was van de benodigde diepte en het type diepwoeler, wat andere types waren dan op perceel 1. Deze gefilterde data werden gebruikt in de verdere analyse.



Figuur 54. Visualisatie van de hoogte van de driepuntsophanging i.f.v. de afstand ten opzichte van het eerste punt in de diepe bewerkingslijn. Data aan het begin en einde van de lijn die meer dan 15% bedroegen werden verwijderd. Data in het midden van de lijn boven 20% werden verwijderd.

Om te bepalen of er een verschil was in brandstofverbruik tussen de types diepwoeler werd het brandstofverbruik per strook uitgemiddeld. Om de significantie van dit verschil te bekijken, werd het verbruik in een statistisch lineair model met meervoudige regressie gestoken. Het brandstofverbruik was een continue variabele. De behandeling en het blok waren factoren. De interactie tussen behandeling en blok werd ook bekeken.

Tot slot werden de relaties tussen de relevante CAN-bus-parameters (motorkoppel, brandstofverbruik, trekkracht en slip) per type diepwoeler en de EC-waarden uit de bodemscan bekeken via Pearson-correlatie. Zo werd bekeken of CAN-bus-parameters een snelle en perceelsdekkende manier konden zijn om bodemverdichting te detecteren en in kaart te brengen. Hiervoor werden de coördinaten van de CAN-bus-data aangepast naar de locatie van het werktuig i.p.v. de locatie van de GPS van de tractor. Een verplaatsing van 2 m was nodig voor de 3- en 5-tand en een verplaatsing van 1,5 m was nodig voor de 7-tand. De extractie van de EC-waarden gebeurde hier door de mediaan van de EC-waarden in een buffer van 0,5 m straal rond de locatie van de CAN-bus-data te bepalen. Deze buffer werd toegepast om een fout op de locatie van het werktuig, na de verschuiving van de datapunten, mee te nemen.

### 3.3.4. Analyse

De penetrometingen werden gezuiverd en verwerkt met behulp van penetroviewer 6.08, sigmaplot 13 en Excel versie 2103. De gepaarde t-test van de vochtgehaltes werd uitgevoerd in RStudio R 4\_0\_2. De visualisatie van de CAN-bus-data gebeurde in QGIS 3.10. De verwerking gebeurde in Excel versie 2103. De verschillende ordinary-kriging-interpolaties, evenals de correlatiebepaling tussen twee rasters, werden uitgevoerd in RStudio R 4\_0\_2 m.b.v. het 'gstat' pakket. De Pearson-correlatie tussen twee datasets gebeurde in Excel versie 2103. Het bepalen van de gewashoogte, de NDVI en de NDRE gebeurde in QGIS 3.10. De statistisch lineaire modellen werden opgesteld in RStudio R 4\_0\_2.
## 4.1. Perceel 1

### 4.1.1. Relatie tussen opbrengst zomergerst en brandstofverbruik, tussen opbrengst zomergerst en EC-waarden en tussen ECwaarden en brandstofverbruik

De voorwaarde van normaliteit bleek voor zowel de manuele opbrengstmetingen van de zomergerst als voor het brandstofverbruik van de diepe bewerkingen in orde te zijn (Tabel 3). Vervolgens kon er voor elke dataset een kriging-kaart worden opgesteld. Echter bleek dat het brandstofverbruik geen ruimtelijke structuur bevatte waardoor geen semi-variogram opgebouwd kon worden. Hierdoor was het niet mogelijk om het brandstofverbruik gedurende de diepe bewerking via kriging te interpoleren. Van de opbrengstdata kon wel een kriging-kaart opgesteld worden. Deze kaart is terug te vinden in Figuur 55. De standaardafwijking is ook weergegeven. De standaardafwijking is homogeen over het veld, maar heeft grote waarden wellicht door het beperkt aantal datapunten.

Tabel 3. Output van de normaliteitaftoetsing van de datasets.

	Scheefheid	Shapiro-Wilk-test
Opbrengstdata	-0,64	0,94
D1-V1-data	-0,12	0,98
D2-V2-data	0,08	0,99
D3-V3-V4-data	-0,15	0,99
D4-V5-D5-data	-0,09	0,98

Als alternatief voor het opstellen van een kriging-kaart voor het brandstofverbruik werden de geïnterpoleerde opbrengstwaarden, overeenkomstig met de locatie van de CAN-bus-data, geëxtraheerd uit de kriging-kaart. Er werd geen buffer toegepast aangezien de data verschoven waren naar de locatie van het werktuig. Op deze verschuiving zat een maximale inschattingsfout van 0,5 m, maar de resolutie van de opbrengstkaart was 1 m x 1 m waardoor het toepassen van een buffer geen andere waarden gaf. De relatie tussen de opbrengst en het brandstofverbruik werd dan onderzocht via een Pearson-correlatie. Dit gaf een correlatiecoëfficiënt van 0,05 wat aangaf dat de twee datasets niet gecorreleerd waren. Dit was reeds te verwachten aangezien er geen ruimtelijke structuur gevonden werd voor het brandstofverbruik. Dit wees erop dat de veronderstelling dat het brandstofverbruik in grote mate afhankelijk was van de bodemverdichting niet klopt, maar dat andere factoren deze parameter sterk mee bepaalden. Bodemverdichting was namelijk wel ruimtelijk gestructureerd. Het brandstofverbruik kon hier niet gekoppeld worden aan de variatie in opbrengst van zomergerst en bleek hier geen eenvoudig voorspellende variabele voor de variatie.



Figuur 55. Kriging-kaart van de opbrengst van de zomergerst (links) met bijhorende standaardafwijking (rechts).

De correlatiecoëfficiënten tussen de kriging-kaarten van de opbrengst en van de bodemscan van 2018 op 0-25 cm-mv en 0-50 cm-mv werden ook bepaald. Hier waren ook maar beperkte globale correlatiecoëfficiënten van respectievelijk -0,45 en -0,38 te vinden. Deze waren negatief zoals verwacht. Uit de lage absolute waarden van de correlatiecoëfficiënten viel te concluderen dat er ook geen sterke correlatie te kwantificeren was tussen de opbrengst van zomergerst en de EC-waarden. Aannemend dat de EC-waarden de bodemverdichting weerspiegelden, kon deze bevinding er op wijzen dat de bodemverdichting toch niet alleen aan de basis lag van de variatie in opbrengst. Dit was tegengesteld aan wat er verondersteld werd. Over andere limiterende factoren was niets gekend, desondanks zou het mogelijk zijn dat deze er wel waren. Echter was deze bevinding niet sluitend aangezien de EC-waarden ook nog afhankelijk zijn van vele andere parameters dan enkel de verdichting. Hogere ECwaarden kunnen bijvoorbeeld een indicatie zijn van een verhoogd aantal ionen. Kowalczyk et al. (2014) concludeerden dat er uit EC-waarden enkel iets geconcludeerd kan worden over de bodemverdichtingsgraad als de andere beïnvloedende factoren zoals bijvoorbeeld het vochtgehalte ook gekend zijn. Zo kunnen de EC-waarden opgesplitst worden per factor en kan er een beter beeld gevormd worden van de werkelijke toestand van de bodem. Beide factoren zorgden waarschijnlijk samen voor de beperkte correlatiecoëfficiënten. Verder waren er maar een beperkt aantal datapunten voor de opbrengst waardoor er wellicht een grote fout op de interpolatie zat. Ook was de bodemscan uitgevoerd in 2018, twee jaar voor de opbrengstbepaling. Uit onderzoek van Windels (2020) bleek wel dat ruimtelijke variabiliteit van de elektrische geleidbaarheid vergelijkbaar bleef over twee jaar.

Tot slot werd ook de relatie tussen de EC-waarden en het brandstofverbruik onderzocht via een Pearson-correlatie. Hiervoor werden de geïnterpoleerde EC-waarden, overeenkomstig met de locatie van de CAN-bus-data, geëxtraheerd uit de kriging-kaart. Er werd ook hier geen buffer toegepast om dezelfde reden als hierboven aangehaald. Voor EC-waarden van 0-25 cm-mv gaf dit een correlatiecoëfficiënt van 0,24 en voor de EC-waarden van 0-50 cm-mv gaf dit een correlatiecoëfficiënt van 0,27. Beide variabelen waren maar zeer beperkt gecorreleerd. In onderzoek van Abbaspour-Gilandeh et al. (2006) werd er wel al een goed lineair verband (R<sup>2</sup>>0,9) gevonden tussen de EC-waarden en de trekkracht binnen een veld. Uit onderzoek van Kichler et al. (2011) bleek ook dat een hogere trekkracht gepaard gaat met een hoger brandstofverbruik via een lineair verband (R<sup>2</sup>=0,59; R<sup>2</sup>=0,85) waardoor verwacht kon worden dat er ook een goed verband was tussen de EC en het brandstofverbruik. Echter bleek al in dit onderzoek dat het brandstofverbruik nog sterk afhankelijk was van andere factoren naast de bodemverdichting door het gebrek aan ruimtelijke structuur in het verbruik. Ook de EC werd

beïnvloed door andere variabelen. Verder was het brandstofverbruik een gemiddelde waarde over een diepte van 0,5 m en een breedte van 3 m aangezien de diepwoeler meerdere tanden had. Er was dus qua locatie geen exacte vergelijking (één op één vergelijking) wat de correlatie ook beïnvloedt. Echter was er in het onderzoek van Abbaspour-Gilandeh et al. (2006) ook geen één op één relatie, maar er werd wel maar gebruikgemaakt van twee tanden waardoor er maar een gemiddelde over 1 m werd gebruikt.

# 4.1.2. Effect van een (variabele) diepe bewerking op de gewashoogte en de gewasopbrengst

#### Gewashoogte

De bekomen rasterkaart van de gewashoogte is terug te vinden in Bijlage 1. De gemiddeldes en de Q90-waarden van de gewashoogte worden per halve strook weergegeven in Figuur 56. Visueel was er geen invloed van al dan niet bewerking op de gewashoogte te zien. Wel was er duidelijk een effect te zien van de 'slechte' kopakker (blok 1). Hier was de gewashoogte beduidend lager. Er werd een statistisch lineair model met meervoudige regressie toegepast op de dataset van de Q90-waarden. De onderliggende voorwaarden voor het opstellen van een lineair model, getest m.b.v. diagnostische plots, bleken voldaan te zijn. Het statistisch lineair model bevestigde de visuele bevindingen. De behandeling had geen significant effect (p=0,11) op de gewashoogte en de locatie had wel een significant effect ( $p=2,35.10^{-5}$ ). De hoogte in blok één was significant lager dan deze in de andere blokken.



Figuur 56. De gemiddeldes (punten) met standaardafwijking en de Q90-waarden (balken) van de gewashoogte per halve strook (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de halve stroken aangeduid. Op de y-as staat de gewashoogte in meter uitgedrukt.

Dat er geen duidelijk verschil was in gewashoogte tussen de gediepwoelde halve stroken en de controle halve stroken was niet zoals verwacht. Meerdere studies toonden reeds aan voor verschillende gewassen dat planthoogte sterk afneemt onder verdichting (Beutler et al., 2007; Tu & Tan, 1991; Wolkowski & Lowery, 2008). Verder is gele mosterd zeer gevoelig aan bodemverdichting (Elsen et al., 2014). Hierbij dient vermeld te worden dat bladrammenas wel tolerant is tegen bodemverdichting, maar deze werd op perceel 1 volledig weggeconcurreerd door de gele mosterd (Elsen et al., 2014).

#### Manuele opbrengstmetingen

De opbrengst wordt per halve strook weergegeven in Figuur 57. Visueel was er geen invloed van al dan niet bewerking op de gewashoogte te zien. Aan de B-kant lagen de opbrengsten van de gediepwoelde halve stroken wel telkens hoger dan deze van de halve stroken die niet gediepwoeld werden, maar dit effect was niet waar te nemen aan de A-kant. Wel was er ook hier een effect te zien van de 'slechte' kopakker (blok 1). Hier was de opbrengst lager. Dit was wel meer aan de A-kant waar te nemen dan aan de B-kant. Er werd een statistisch lineair model met meervoudige regressie toegepast op de dataset. De onderliggende voorwaarden voor het opstellen van een lineair model bleken voldaan te zijn. Het statistisch lineair model bevestigde de visuele bevindingen. De behandeling had geen significant effect (p=0,14) op de gewasopbrengst en de locatie had wel een significant effect (p=5,98.10<sup>-6</sup>). De opbrengst in blok één A is significant lager dan deze in de andere blokken. De opbrengsten in de overige blokken verschilden niet-significant van elkaar (p>0,2).

Dat er geen duidelijk verschil was in de opbrengst tussen de gediepwoelde halve stroken en de controle halve stroken was ook hier niet zoals verwacht. Hier dient vermeld te worden dat de manuele opbrengstmetingen een lage nauwkeurigheid hadden door de manier van uitvoering. Vermoedelijk kleine verschillen in opbrengst op een oppervlakte van 9 m<sup>2</sup> konden hierdoor niet opgemerkt worden. Echter aangezien de opbrengstmetingen in lijn waren met de hoogtemetingen was de onnauwkeurigheid vermoedelijk niet de oorzaak.



Figuur 57. De opbrengst van de groenbedekker per halve strook (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de halve stroken aangeduid. Op de y-as staat de opbrengst in kg/ha uitgedrukt.

Tot slot werd ook nog het effect van de volledige behandeling op de opbrengst van de volledige strook bekeken. De controle werd vergeleken met het volledig diepwoelen en het variabel diepwoelen. In Figuur 58 en Tabel 4 worden de totaalopbrengsten van de stroken weergegeven. Hieruit was visueel af te leiden dat variabel diepwoelen telkens een meeropbrengst opleverde t.o.v. de controle en t.o.v. het diepwoelen met uitzondering van blok 3. Het diepwoelen leverde met uitzondering van blok 5 ook telkens een meeropbrengst t.o.v. de controle ook bevestigd. Uit een lineair model bleek dat zowel de behandeling (p=0,04) als de locatie (p=0,0002) een significant effect hadden op de totaalopbrengst. Concreet bleek dat het variabel diepwoelen een statistisch significante (p=0,02) meeropbrengst opleverde tegenover de controle. Het diepwoelen leverde geen statistisch significante (p=0,37) meeropbrengst tegenover de controle. Verder was de

opbrengst in blok 1 significant lager (p<0,001) dan deze van de overige blokken. De opbrengsten in blokken 2, 3, 4 en 5 verschilden niet-significant van elkaar (p>0,7).

Dat het variabel diepwoelen meer opbrengst had dan het diepwoelen was niet zoals verwacht. De reden dat het variabel diepwoelen een statistische meeropbrengst opleverde t.o.v. de controle en het diepwoelen niet lag waarschijnlijk bij de veronderstelling dat de bodemverdichting van de drie stroken binnen een blok gelijkgesteld mocht worden. Op de bodemscan waren toch verschillen in EC-waarden te zien tussen de drie stroken binnen een blok. Toevallig werd het variabel diepwoelen telkens toegekend aan de strook met de laagste EC-waarden. In theorie zou deze strook zonder diepe bewerking al betere opbrengsten moeten hebben. Bij de controle en het diepwoelen was hier meer afwisseling tussen. Om toch een idee te verkrijgen over hoe de opbrengst van het variabel diepwoelen zich zou weerhouden t.o.v. de controle en het diepwoelen van de volledige strook, kon blok 3 bekeken worden. Hier bleek de veronderstelling die gemaakt werd het meest toepasbaar.



Figuur 58. De totaalopbrengst van de groenbedekker per strook (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de stroken aangeduid. Op de y-as staat de opbrengst in kg/ha uitgedrukt.

Algemeen werd er dus geen verschil gevonden in de gewashoogte en opbrengst met of zonder diepwoelen. Wel zorgde het variabel diepwoelen en het diepwoelen van de volledige strook voor een meeropbrengst t.o.v. geen behandeling, visueel vastgesteld. Uit Tabel 4 was af te leiden dat met het diepwoelen van de volledige strook opbrengstwinsten tussen 3 en 11% gehaald konden worden. Met het variabel diepwoelen konden ook winsten tussen 4 en 15% gehaald worden. Echter dienen deze bevindingen zeker gevalideerd te worden met verder onderzoek aangezien het variabel diepwoelen, zoals reeds aangehaald, hier wellicht een bevoordeelde locatie kreeg t.o.v. de andere behandelingen. Vermoedelijk zou de verhouding tussen de behandelingen eerder zijn zoals in blok 3.

Het verbruik gedurende de diepe bewerking op perceel 1 is in Tabel 5 omgerekend naar l/ha. Met een gasolie-diesel (landbouw) prijs van 0,5817euro/liter, bedroeg het gemiddelde verbruik 17 euro/ha diepwoelen (FOD, 2021). Door toepassing van variabel diepwoelen, wat in deze proefopstelling 50% minder brandstof vroeg dan volledig diepwoelen, kon er naast een opbrengstwinst t.o.v. de controle ook een grote kostenbesparing verwezenlijkt worden t.o.v. het volledig diepwoelen. Naast enkel de kostprijs van het brandstofverbruik was er ook nog een winst door de werkuren die gereduceerd konden worden. Ook slijtage van het materiaal

werd verminderd wat zich vertaalt in een langere levensduur. De kostprijs van het variabel diepwoelen bedroeg dus ruwweg de helft van de kostprijs van het diepwoelen van de volledige strook. Desondanks was er geen halvering van de winst in opbrengst t.o.v. het diepwoelen van de volledige strook als blok 3 als representatief aanschouwd kon worden. Hieruit viel te besluiten dat het variabel diepwoelen efficiënter was dan het diepwoelen van de volledige strook. Wel kon er niets geconcludeerd worden over de uiteindelijke brutowinst.

Deze bevinding lag in lijn met de conclusie uit het onderzoek van Chamen et al. (2015) waar geconcludeerd werd dat het opheffen van bodemverdichting alleen winstgevend bleek te zijn bij gericht diepwoelen. Dit toonde reeds aan dat gericht diepwoelen efficiënter is dan diepwoelen van het volledige perceel.

Strook	Totaal opbrengst (kg/ha)	Meeropbrengst (%)	Gemiddeld brandstofverbruik (I/h)
C1	8437,8		0
D1	9179,0	8,8	$39 \pm 3$
V1	9712,0	15,1	16 ± 2
C2	11744,2		0
D2	13122,2	11,7	34 ± 5
V2	14804,9	26,1	17 ± 2
C3	13023,5		0
D3	13751,1	5,6	34 ± 5
V3	13506,8	3,7	17 ± 3
C4	13052,9		0
D4	13415,2	2,8	36 ± 5
V4	14099,0	8,0	18 ± 2
C5	13073,7		0
D5	11886,3	-9,1	35 ± 5
V5	13639,2	4,3	19 ± 2

Tabel 4. De totaalopbrengst, de meeropbrengst t.o.v. de controle en het gemiddeld brandstofverbruik per strook.

Tabel 5. Het verbruik gedurende de diepe bewerking op perceel 1 omgerekend naar l/ha.

	gemiddelde	mediaan	min	max
Brandstofverbruik (I/ha)	29 ±3	27,90	24,56	37,84

### 4.1.3. Effect en behoud van het effect van de diepe bewerking

Het effect, en het behoud van het effect van de diepe bewerking werden bekeken met behulp van penetrometingen. De geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetrometingen uitgevoerd vlak na de diepe bewerking en na het oogsten van de groenbedekker werden hiervoor visueel vergeleken met de bijhorende controle.

De geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetrometingen uitgevoerd op 1 en 2 september 2020, vlak na de diepe bewerking, zijn terug te vinden in Bijlage 2A. Op de doorsneden is de diepte van de diepe bewerking aangeduid met een zwarte horizontale lijn. Deze metingen gebeurden in een zeer droge periode waardoor een gebrek aan vocht in de bodem ervoor zorgde dat er meer kracht nodig was om de sondeerstang in de grond te duwen. Hierdoor konden de meting bijna nooit tot 80 cm-mv uitgevoerd worden. Het gebrek aan data in de diepere delen beïnvloedde de interpolatie. Op de doorsneden is eveneens weergegeven, met zwarte streepjes, tot op welke dieptes de metingen ongeveer werden uitgevoerd. Door een gebrek aan data onder 40 cm-mv dient vermeld te worden dat de volgende bevindingen niet sluitend zijn en dat de realiteit anders kan zijn dan wat hier geconcludeerd werd.

Uit de doorsneden van de controles in Bijlage 2A was af te leiden dat, met uitzondering van A C1, de ploegzool zich tussen 30 en 40 cm-mv bevond. Dit was hoofdzakelijk de diepte tot waar de sondeerstang in de grond geduwd kon worden. De geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de halve stroken uit het variabel diepwoelen die niet bewerkt werden, bevatten ook op dezelfde diepte een ploegzool. De controles en de helften van het variabel diepwoelen die niet bewerkt werden, waren op deze interpolaties gelijk.

Op de gediepwoelde en de variabel gediepwoelde doorsneden in Bijlage 2A was er een beperkt effect van de diepwoeler te zien. Op de locaties van de tanden was de verdichting sterk gereduceerd tot op 50 cm-mv, de diepte tot waarop de diepe bewerking gebeurde. Dieper konden eveneens geen metingen uitgevoerd worden door de te hoge kracht die noodzakelijk was om de sondeerstang in de grond te duwen. Op de locaties tussen de tanden was er geen effect van de diepe bewerking vast te stellen. Er kon niet dieper in de grond gedrongen worden als bij de controle. De breedte van het dal waar de tand kwam bedroeg ongeveer 15 cm. Dit was een redelijk grote invloedstraal aangezien de tand slechts 7 cm breed was. Deze invloedstraal was ook groter dan deze in sectie 4.3.1 waar hetzelfde werktuig werd gebruikt. Uit onderzoek van Karlen et al (1991) bleek dat de invloedstralen van verschillende types diepwoeler onder droge condities breder werden. In het literatuuronderzoek werd ook al aangehaald dat droge omstandigheden ervoor zorgen dat de bodem beter barst (Prosensols, 2011; Vreken et al., 2009). De droge omstandigheden waarin op dit perceel gediepwoeld werd, verklaarde deze brede invloedstralen. Op Figuur 59 kunnen al voorgaande bevindingen gevalideerd worden voor blok 3.



Figuur 59. Voorstelling van de geïnterpoleerde dwarsdoorsneden in blok 3 genomen vlak na de diepe bewerking. De diepte van de bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. De dieptes van de penetrometingen zijn aangeduid met zwarte lijntjes. Er is te zien dat de controles (A C3 en B C3) een gelijkaardige doorsnede hebben als de halve strook van het variabel diepwoelen die niet bewerkt werd (A V3). Verder zijn duidelijk de tanden vast te stellen op de gediepwoelde stroken (A D3, B D3 en B V3).

De geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetrometingen uitgevoerd op 2 december 2020, vlak na de oogst van de groenbedekker, zijn terug te vinden in Bijlage 2B. Dit was ongeveer drie maanden na de diepe bewerking. Met deze doorsneden werd dan ook getracht het behoud van het effect te bekijken. Op de doorsneden is de diepte van de diepe bewerking aangeduid met een zwarte horizontale lijn. In tegenstelling tot de vorige metingen kon hier wel bijna altijd tot 80 cm-mv opgemeten worden wat de bevindingen betrouwbaarder maakt.

Ook hier was op de doorsneden van de controles in Bijlage 2B waar te nemen dat de ploegzool tussen 30 en 40 cm-mv lag. Verschillend aan de vorige doorsneden was dat de halve strook van het variabel diepwoelen die niet bewerkt werd niet gelijk was aan de controle, met uitzondering van A V4, A V5 en B V1. De ploegzool was minder uitgesproken en had onderbrekingen waardoor er doorgang naar de diepere ondergrond mogelijk was. Dit bevestigde het vermoeden, dat reeds aangehaald werd in sectie 4.1.2, dat de veronderstelling dat de drie stroken binnen een blok een gelijke verdichting hadden niet klopte.

Het effect van het diepwoelen en variabel diepwoelen was op deze doorsneden veel duidelijker waar te nemen. Met uitzondering van de blok 1 (de kopakker) en A D2, was er nog steeds een

sterke reductie van de bodemverdichting ter hoogte van de ploegzool. De locaties van de tanden waren nog duidelijk te detecteren. Op de locaties van de tanden was de verdichting nog sterk gereduceerd. Op de locaties tussen de tanden was er ook een vermindering van de verdichting t.o.v. de controle vast te stellen. De diepe bewerking maakte via zijn tandprofiel mogelijkheden voor wortelgroei naar de diepere ondergrond. De breedte van het dal, waar de tand kwam, bedroeg hier nog steeds ongeveer 15 cm. Op Figuur 60 kunnen al voorgaande bevindingen gevalideerd worden voor blok 3.

Het effect van de diepe bewerking op het openbreken van de ploegzool was dus duidelijk zichtbaar en bleef sterk behouden. Het planten van een groenbedekker zal dit resultaat vermoedelijk ten goede zijn gekomen door barsten en scheuren open te houden.



Figuur 60. Voorstelling van de geïnterpoleerde dwarsdoorsneden in blok 3 genomen drie maanden na de diepe bewerking. De diepte van de bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. Er is te zien dat de halve strook van het variabel diepwoelen die niet bewerkt werd (A V3) een minder uitgesproken ploegzool had dan de controles (A C3 en B C3). Verder zijn duidelijk de tanden vast te stellen op de gediepwoelde stroken (A D3, B D3 en B V3).

## 4.2. Perceel 2

### 4.2.1. Output bodemscan

De voorwaarde van normaliteit bleek voldaan te zijn voor het organischestofgehalte en de pH. Voor de EC-waarden was een Box Cox transformatie van de data nodig (Tabel 6). Vervolgens konden er voor de EC-waarden (Figuur 62 en Figuur 63), de organischestof-waarden (Figuur 64) en de pH-waarden bekomen uit de bodemscan kriging-kaarten worden opgesteld.

	Scheefheid	Shapiro- Wilk-test	Scheefheid (na Box Cox)	Shapiro-Wilk-test (na Box Cox)
EC 0-30 cm-mv	1,86	0,80	0,19	0,97
EC 0-90 cm-mv	1,81	0,80	0,17	0,97
Organische stof	0,41	0,98	/	/
рН	0,74	0,96	/	/

Tabel 6. Output van de normaliteitaftoetsing van de datasets.

De resolutie van het raster waarop geïnterpoleerd werd voor de EC-waarden bedroeg 1 m x 1 m. Voor de organischestofgehaltes werd initieel ook een resolutie van 1 m x 1 m gekozen. Echter gaf de kriging-kaart dan een te hoog detail. Om de kaart iets minder gedetailleerd te maken, werd een resolutie van 2,5 m x 2,5 m gekozen. Verder werden tijdens de interpolatie waarden voorspeld buiten het bereik van de werkelijke data. Een Box Cox transformatie van de data was nodig om dit probleem te verhelpen. De pH was een moeilijk te voorspellen factor door zijn random variabiliteit. Het semi-variogram gaf ook afwijkende waarden bij een lage afstand (Figuur 61). Bij nader onderzoek van de datapunten was te zien dat er meerdere punten, die op een korte afstand van elkaar lagen, toch een groot pH-verschil hadden. Dit kon een verklaring zijn voor de afwijking van het semi-variogram. Voor de pH werd er enkel verder gewerkt met de gekende datapunten en werd er geen kriging-kaart opgesteld (Figuur 65).



Figuur 61. Gemodelleerd semi-variogram van de pH-data.



Figuur 62. Kriging-kaarten van de EC (0-30 cm-mv) (links) en de bijhorende standaardafwijking (rechts).



Figuur 63. Kriging-kaarten van de EC (0-90 cm-mv) (links) en de bijhorende standaardafwijking (rechts).



Figuur 64. Kriging-kaarten van het organischestofgehalte (links) en de bijhorende standaardafwijking (rechts).



Figuur 65. Weergave van de pH-datapunten. De data wordt hier gegradueerd weergegeven volgens de pHclassificatie van een zandleemgrond (Tits et al., 2020). De door de landbouwer aangegeven 'slechte plek' is aangeduid.

Op perceel 2 was het een zandleemgrond, de optimale pH ligt hier tussen 6,1-6,6 en het optimale organischestofgehalte ligt hier tussen 1,2-1,6% (Tits et al., 2020). Wanneer er dan naar Figuur 64 en Figuur 65 gekeken werd, was te zien dat het organischestofgehalte en de pH over het algemeen tamelijk laag lagen. Waar de landbouwer zelf aangaf dat er een 'slechte plek' was, lagen het organischestofgehalte en de pH nog lager. Op perceel 2 was het dus een kwalitatief mindere landbouwgrond. Beide parameters beïnvloedden sterk de EC-output. Deze verklaarden dus waarom de EC-waarden redelijk laag lagen.

# 4.2.2. Verband tussen de EC-waarden uit de bodemscan en de CAN-bus-parameters uit de scanning met één tand.

Om de relaties tussen de EC-waarden en de relevante CAN-bus-parameters uit de scanning met één tand te onderzoeken, werden de EC-waarden geëxtraheerd uit de kriging-kaarten op de locaties waar CAN-bus-data beschikbaar waren. Er werd geen buffer toegepast aangezien de data verschoven waren naar de locatie van het werktuig. Op deze verschuiving zat een maximale inschattingsfout van 0,5 m, maar de resoluties van de EC-kaarten waren 1 m x 1 m waardoor het toepassen van een buffer van 0,5 m geen andere waarden gaf. In Tabel 7 is het bereik van de data weergegeven. Relaties tussen de EC-waarden, het motorkoppel, het brandstofverbruik en de slip werden dan onderzocht via een Pearson-correlatie. In Tabel 8 is de output hiervan weergegeven. De trekkracht kon niet bekeken worden aangezien deze data

foutieve output gaven vermoedelijk door de instabiliteit van het werktuig met één tand (zie sectie 3.3.2.3).

	gemiddelde	10 <sup>de</sup> percentiel	90 <sup>ste</sup> percentiel
EC 0-30 cm-mv (µS/cm)	12 ± 5	8	18
EC 0-90 cm-mv (µS/cm)	16 ± 6	11	23
Motorkoppel (%)	23 ± 3	20	26
Brandstofverbruik (I/h)	12 ± 1	11	14
Slip (m/s)	-0,03 ± 0,05	-0,09	0,04

Tabel 7. Gemiddelde, 10<sup>de</sup> percentiel en 90<sup>ste</sup> percentiel van de datasets.

Uit Tabel 8 was af te leiden dat de EC-waarden op verschillende diepten met elkaar sterk gecorreleerd waren (r=0,97). Dit was te verwachten. Verder waren de correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende parameters en de EC-waarden op 0-30 cm-mv ongeveer gelijk aan de correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende parameters en de EC-waarden op 0-90 cm-mv. Dit kwam door de hoge correlatie tussen de EC-waarden op verschillende diepten. Het brandstofverbruik (r=0,47) en het motorkoppel (r=0,48) waren het best gecorreleerd aan de EC-waarden. Echter was de correlatie beperkt. De slip (r=-0,26) was zeer beperkt negatief gecorreleerd aan de EC-waarden. Het brandstofverbruik bleek sterk positief gecorreleerd te zijn aan het motorkoppel (r=0,88).

Tabel 8. Correlatiecoëfficiënten tussen de relevante CAN-bus-parameters en de EC-waarden in kader van dit onderzoek en de correlatiecoëfficiënten uit onderzoek van Windels (2020) ter vergelijking (cursief).

	EC 0-30 cm-mv	EC 0-90 cm-mv	Motor- koppel	Brandstof- verbruik	Slip (GB-WB)
EC 0-30	1	0,97	0,48	0,47	-0,26
cm-mv		(0,91)	(0,50)	(0,25)	
EC 0-90		1	0,48	0,46	-0,26
cm-mv			(0,61)	(0,39)	
Motorkoppel			1	0,88	-0,21
				(0,86)	
Brandstofverbruik				1	-0,26
Slip (GB-WB)					1

Bij vergelijking van de correlatiecoëfficiënten tussen de EC-waarden en de CAN-busparameters met die uit eerder gelijkaardig onderzoek van Windels (2020), viel op dat de correlatiecoëfficiënten redelijk gelijkend waren (Tabel 8). Een betere correlatie werd gevonden tussen het brandstofverbruik en de EC 0-30 cm-mv. Dit week af van de beperkte verschillen tussen de andere correlatiecoëfficiënten. Een mogelijke verklaring was dat de bodemscan in het onderzoek van Windels (2020) in zeer natte omstandigheden gebeurde, waardoor de correlatiecoëfficiënten met de EC 0-30 cm-mv een grote onzekerheid hadden.

Dat de correlatiecoëfficiënten redelijk gelijk waren, was niet zoals verwacht. In het onderzoek van Windels (2020) gebeurde de monitoring namelijk tijdens het inzaaien met een zaaicombinatie met voorzet-diepwoeler die meerdere tanden tot 30 cm-mv had. Hierdoor werd er een gemiddelde over de tanden en over de breedte bekeken. In dit onderzoek gebeurde de scanning met één tand waardoor een één op één relatie bekeken werd. Hogere correlatiecoëfficiënten werden hierdoor verwacht. Echter viel het beperkte verschil te verklaren door de grotere dataset in het onderzoek van Windels (2020) doordat de correlatiecoëfficiënten tussen de volledige kriging-kaarten werden bepaald. De hypothese werd wel bevestigd als de correlatiecoëfficiënten tussen het brandstofverbruik en de EC-waarden werden vergeleken met deze uit sectie 4.1.1 waar een diepwoeler met meerdere tanden werd gebruikt.

Verder werd in het onderzoek van Windels (2020) ook geconcludeerd dat ook de slip- en de trekkracht sterk verklarende variabelen waren van de EC-waarden. Echter ging het over een beperkt onderzoek. De slip bleek in dit onderzoek zeer beperkt negatief gecorreleerd te zijn met de EC-waarden. Mogelijk werd de slip hier sterk bepaald door het hoogteverschil. De rijrichting was namelijk loodrecht op een verhoging van het veld waardoor de tractor naast trekken ook bergop moest rijden waardoor deze combinatie af en toe voor slip zorgde. De trekkracht kon niet gevalideerd worden, maar in onderzoek van Abbaspour-Gilandeh et al. (2006) werd er wel al een goed lineair verband (R<sup>2</sup>>0,9) gevonden tussen de EC-waarden en de trekkracht binnen een veld. Tot slot lag de correlatie tussen het brandstofverbruik en het motorkoppel ook in lijn met het onderzoek van Windels (2020).

Ondanks dat het hier, in tegenstelling tot sectie 4.1.1, een één op één vergelijking was, bleef de correlatie beperkt. Dit toonde nogmaals aan dat zowel de EC als het brandstofverbruik en het motorkoppel nog beïnvloed werden door andere factoren dan enkel de bodemverdichting.

Het brandstofverbruik en het motorkoppel werden vervolgens gebruikt om twee kriging-kaarten op te stellen. De normaliteit van de datasets bleek voldaan te zijn. De resolutie van het raster waarop geïnterpoleerd werd, bedroeg telkens 1 m x 1 m. De kriging-kaarten van het brandstofverbruik en het motorkoppel, met bijhorende standaardafwijking, zijn terug te vinden in Figuur 66 en Figuur 67. De Correlatiecoëfficiënten tussen deze rasterkaarten en de EC-kaarten werden vervolgens bepaald. Hier waren goede correlatiecoëfficiënten te vinden van 0,72; 0,71; 0,74 en 0,74 voor respectievelijk het brandstofverbruik en de EC 0-30 cm-mv, het brandstofverbruik en de EC 0-90 cm-mv, het motorkoppel en de EC 0-30 cm-mv en het motorkoppel en de EC 0-90 cm-mv. Figuur 68 en Figuur 69 geven de *residuals* weer van een lineair model tussen de parameters. Eén geeft een goede correlatie aan, nul een slechte. Uit de *residuals* was te zien dat deze voornamelijk lager lagen waar de organischestof- en de pH-waarden afweken van de rest van het veld. Hierdoor weken de EC-waarden waarschijnlijk in verhouding ook af van de waarden op de rest van het veld. Het brandstofverbruik en het motorkoppel waren dus in deze situatie goede parameters om op een snelle en perceelsdekkende manier de variabiliteit van de EC te detecteren en in kaart te brengen.



Figuur 66. Kriging-kaarten van het brandstofverbruik (links) en de bijhorende standaardafwijking (rechts) tijdens de scanning met één tand.



Figuur 67 Kriging-kaarten van het motorkoppel (links) en de bijhorende standaardafwijking (rechts) tijdens de scanning met één tand.



Figuur 68. Weergave van de residuals tussen het brandstofverbruik en de EC-waarden (0-30 cm-mv links en 0-90 cm-mv rechts). Één geeft een goede correlatie aan, nul een slechte.



Figuur 69. Weergave van de residuals tussen het motorkoppel en de EC-waarden (0-30 cm-mv links en 0-90 cmmv rechts). Één geeft een goede correlatie aan, nul een slechte.

Een scanning met één tand biedt zeker potentieel om de variabiliteit in bodemverdichting in kaart te brengen. Het is een veel goedkopere en toegankelijkere manier voor landbouwers dan het maken van een bodemscan. Verder is de scanning sneller en meer perceelsdekkend dan het uitvoeren van penetrometingen. Desondanks vraagt deze scanning nog steeds redelijk veel tijd om uit te voeren. Ze kan ook niet gecombineerd worden met een andere grondbewerking en ook de dataverwerking vraagt redelijk wat kennis en tijd. In de toekomst zou automatisatie van het dataverwerkingsproces hier een oplossing kunnen bieden. Een mogelijkheid zou ook kunnen zijn om de scanningslijnen toch verder uit elkaar te leggen, dan is er weliswaar minder detail, maar dit vraagt dan maar de helft van tijd en verbruik. Tot slot geeft de scanning geen informatie over op welke diepte de bodemverdichting zich bevindt. De oplossing hierin ligt bij de *on-the-go* horizontale penetrometingen.

### 4.2.3. Verband tussen de penetratieweerstand en de CAN-busparameters uit de scanning met één tand.

De relaties tussen de penetrometingen, de CAN-bus-parameters uit de scanning met één tand en de EC-waarden uit de bodemscan werden onderzocht via Pearson-correlatie. Voor de penetrometingen werd de mediaan gebruikt (Tabel 9). Voor de CAN-bus-parameters en de EC-waarden werd de mediaan van de waarden in een buffer van 2 m straal rond de locatie van de penetrometingen uit de kriging-kaarten gebruikt. Er werd gekozen om een buffer toe te passen doordat de mediaan van de penetrometingen een vereenvoudiging was van zes penetrometingen over een lengte van 75 cm en omdat de data geëxtraheerd werd uit krigingkaarten waar ook een fout op zat. Zo konden deze afwijkingen gebufferd worden.

De kriging-kaarten van het brandstofverbruik en het motorkoppel, met bijhorende standaardafwijking, zijn terug te vinden in Figuur 66 en Figuur 67. In de slipdata zat geen ruimtelijke structuur waardoor voor deze parameter geen semi-variogram opgebouwd kon worden. Hierdoor was het niet mogelijk om de slipdata via kriging te interpoleren. De trekkracht kon niet bekeken worden aangezien deze data foutieve output gaven vermoedelijk door de instabiliteit van het werktuig met één tand (zie sectie 3.3.2.3). De kriging-kaarten van de ECwaarden, met bijhorende standaardafwijking, zijn terug te vinden in Figuur 62 en Figuur 63. Tabel 10 geeft de correlatiecoëfficiënten weer. Hieruit was af te leiden dat de mediaan van de penetratieweerstand niet gecorreleerd was met het brandstofverbruik en het motorkoppel en dat deze beperkt negatief gecorreleerd was met de EC-waarden. Dat deze correlatiecoëfficiënt negatief was, is onlogisch en doet vermoeden dat de output niet klopt. Dit was waarschijnlijk te wijten aan de combinatie van een kleine dataset en de sterke vereenvoudiging die gedaan werd door zes penetratiemetingen te reduceren naar één waarde. Er waren maar een beperkt aantal penetratieweerstanden wegens het arbeidsintensieve karakter. Het gebrek aan een grote dataset was ook te zien aan de andere correlatiecoëfficiënten die ook in sectie 4.2.2. onderzocht werden. In sectie 4.2.2 lagen de correlatiecoëfficiënten hoger, daar er wel gebruik werd gemaakt van een grote dataset.

locatie	Mediaan penetratieweerstanden (MPa)	Mediaan van maximale penetratieweerstanden (MPa)	Mediaan van minimale penetratieweerstanden (MPa)
C1 huis	2,15	5,85	0,11
D1 huis	2,31	6,94	0,11
C2 huis	2,44	6,29	0,05
D2 huis	3,30	6,48	0,13
C3 huis	2,41	6,37	0,09
D3 huis	1,32	6,29	0,09
C1 midden	1,44	6,57	0,30
D1 midden	3,28	6,25	0,26
C2 midden	2,98	5,46	0,33
D2 midden	2,36	5,46	0,10
C3 midden	2,34	6,03	0,25
D3 midden	2,43	6,48	0,43
C1 veld	1,40	5,87	0,04
D1 veld	2,78	6,28	0,06
C2 veld	2,66	5,77	0,07
D2 veld	2,89	5,61	0,14
C3 veld	1,21	6,75	0,16
D3 veld	2,06	6,44	0,09

#### Tabel 9. Mediaan van de penetratieweerstanden.

Tabel 10. Correlatiecoëfficiënten tussen de relevante CAN-bus-parameters, de EC-waarden en de penetratieweerstanden.

	Penetratie- weerstand	Brandstof- verbruik	Motor- koppel	EC 0-30 cm-mv	EC 0-90 cm-mv
Penetratieweerstand	1	-0,11	0,07	-0,38	-0,37
Brandstofverbruik		1	0,79	0,32	0,32
Motorkoppel			1	0,40	0,40
EC 0-30 cm-mv				1	0,97
EC 0-90 cm-mv					1

## 4.2.4. Verband tussen de EC-waarden uit de bodemscan en de CAN-bus-parameters uit de diepe bewerking

Om de relaties tussen de EC-waarden uit de bodemscan en de relevante CAN-bus-parameters uit de diepe bewerking te onderzoeken, werden de EC-waarden geëxtraheerd uit de krigingkaarten op de locaties waar CAN-bus-data beschikbaar waren. Dit gebeurde met een circulaire buffer van 3 m straal rond deze datapunten om een fout op de locatie door gebrek aan RTK-GPS in rekening te brengen. De datapunten waren voorafgaand wel verschoven naar de locatie van het werktuig. Binnen deze buffer werd dan de mediaan van de EC bepaald. De relaties tussen de EC-waarden, het motorkoppel, de trekkracht en het brandstofverbruik werden dan onderzocht via een Pearson-correlatie. De slip werd niet gemonitord tijdens de diepe bewerking dus kon niet bekeken worden. In Tabel 11 is het bereik van de data weergegeven. In Tabel 12 zijn de correlatiecoëfficiënten weergegeven. Tabel 11. Gemiddelde, 10de percentiel en 90ste percentiel van de geëxtraheerde data.

	gemiddelde	10 <sup>de</sup> percentiel	90 <sup>ste</sup> percentiel
Medianen EC 0-30 cm-mv (µS/cm)	10 ± 2	8	13
Medianen EC 0-90 cm-mv (µS/cm)	13 ± 3	11	17
Motorkoppel (%)	61 ± 8	52	72
Brandstofverbruik (I/h)	32 ± 5	27	38
Trekkracht (kN)	$0,07 \pm 0,02.10^3$	0,05.10 <sup>3</sup>	0,10.10 <sup>3</sup>

Uit Tabel 12 waren gelijkaardige bevindingen als in sectie 4.2.2 af te leiden. De EC-waarden op verschillende diepten waren opnieuw sterk met elkaar gecorreleerd (r=0,97). Verder waren de correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende parameters en de EC-waarden op 0-30 cm-mv ongeveer gelijk aan de correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende parameters en de EC-waarden op 0-90 cm-mv. Dit kwam opnieuw door de hoge correlatie tussen de EC-waarden op verschillende diepten. Zowel het brandstofverbruik (r=0,27), het motorkoppel (r=0,26) als de trekkracht (r=0,23) waren zeer beperkt gecorreleerd met de EC-waarden. De correlatiecoëfficiënten lagen hier wel beduidend lager dan in sectie 4.2.2. Dit viel mogelijk te verklaren door het aantal tanden dat gebruikt werd. In tegenstelling tot sectie 4.2.2 werd er hier gebruikgemaakt van meerdere tanden. Hierdoor werd er een gemiddelde over de tanden en over de breedte bekeken en was er geen één op één relatie. Het brandstofverbruik, het motorkoppel en de trekkracht bleken ook hier sterk positief gecorreleerd te zijn met elkaar.

	EC 0-30	EC 0-90	Motor-	Brandstof-	Trekkracht
	cm-mv	cm-mv	koppel	verbruik	
EC_0-30 cm-mv	1	0,97	0,26	0,27	0,23
EC 0-90 cm-mv		1	0,25	0,26	0,22
Motorkoppel			1	0,96	0,86
Brandstofverbruik				1	0,82
Trekkracht					1

Tabel 12. Correlatiecoëfficiënten tussen de relevante CAN-bus-parameters en de EC-waarden.

De correlatiecoëfficiënten tussen de parameters en de EC-waarden waren lager dan in het onderzoek van Windels (2020). Vermoedelijk viel dit te verklaren door de grotere dataset in het onderzoek van Windels (2020) doordat de correlatiecoëfficiënten tussen de volledige kriging-kaarten werden bepaald. De correlatiecoëfficiënt tussen het brandstofverbruik en de EC-waarden was gelijkaardig aan de bevinding in sectie 4.1.1. De correlatiecoëfficiënt tussen het brandstofverbruik en de trekkracht was in lijn met eerder onderzoek (Kichler et al., 2011).

Het brandstofverbruik, het motorkoppel en de trekkracht toonden dus zeker een verband met de EC-waarden. Echter was het verband kleiner dan bij de scanning met één tand door het gebruik van meerdere tanden. Een kriging-interpolatie met deze parameters om te bekijken hoe goed deze parameters de variabiliteit in EC in kaart kunnen brengen, werd niet gedaan door het gebrek aan RTK-GPS-coördinaten. Om dezelfde reden, en omdat sectie 4.2.3 al aantoonde dat de dataset aan penetrometingen te klein was, werd het verband tussen de penetrometingen en de relevante parameters niet bekeken.

# 4.2.5. Effect van de diepe bewerking op de gewashoogte en de biomassa

Figuur 70 geeft de orthomozaïek van perceel 2 weer. De gewashoogte, de NDVI en de NDRE worden weergegeven in respectievelijk Figuur 71, Figuur 73 en Figuur 75. De gemiddeldes en de Q90-waarden van de gewashoogte, de NDVI en de NDRE worden per plot weergegeven in respectievelijk Figuur 72, Figuur 74 en Figuur 76.



Figuur 70. Orthomozaïek uit de dronevlucht met RGB-camera op 27 april 2021 op perceel 2.

Visueel was er voor de gewashoogte geen duidelijke invloed van al dan niet bewerking op de Q90 van de gewashoogte te zien (Figuur 72). Voor D1 en D3 was de Q90 van de gewashoogte wel net hoger dan de controle, voor D2 was dit niet zo. Op Figuur 71 was er binnen de verschillende plots wel een grote variabiliteit in gewashoogte te zien. Dit weerspiegelde zich ook in een groot verschil tussen het gemiddelde en de Q90 op Figuur 72. Voor de NDVI was er ook geen duidelijke invloed van al dan niet bewerking op de waarden te zien (Figuur 74). De variabiliteit binnen de plots was hier beperkt (Figuur 73). Het gemiddelde en de Q90 verschilden niet veel (Figuur 74). Wel viel hier op te merken dat de NDVI dicht tegen verzadiging lag. Tot slot was er op de NDRE ook geen duidelijke invloed van al dan niet bewerking op de waarden te zien (Figuur 76). Voor D1 en D2 lag de NDRE wel net hoger dan deze van de controle, voor D3 was dit niet zo. De variabiliteit binnen de plots was hier ook geen duidelijke invloed van al dan niet bewerking op de waarden te zien (Figuur 76). Voor D1 en D2 lag de NDRE wel net hoger dan deze van de controle, voor D3 was dit niet zo. De variabiliteit binnen de plots was hier ook beperkt (Figuur 75). Het gemiddelde en de Q90 verschilden niet veel (Figuur 76).



Figuur 71. Gewashoogte wintergerst.



Figuur 72. Het gemiddelde (punten) met standaardafwijking en de Q90-waarden (balken) van de gewashoogte per plot (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de plots aangeduid. Op de y-as staat de gewashoogte in meter uitgedrukt.



Figuur 73. NDVI wintergerst.



Figuur 74. Het gemiddelde (punten) met standaardafwijking en de Q90-waarden (balken) van de NDVI per plot (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de plots aangeduid. Op de y-as staat de NDVI in \*100 % uitgedrukt.



Figuur 75. NDRE wintergerst.



Figuur 76. Het gemiddelde (punten) met standaardafwijking en de Q90-waarden (balken) van de NDRE per plot (grijs) zonder en (groen) met diepe bewerking. Op de x-as staan de plots aangeduid. Op de y-as staat de NDRE in \*100 % uitgedrukt.

Uit deze bevindingen bleek er dus geen duidelijk verschil te zijn in gewashoogte en biomassa door een al dan niet diepe bewerking. Dit was niet zoals verwacht. Dit deed vermoeden dat voornamelijk andere parameters de groei beïnvloedden. Zoals al reeds aangehaald in sectie 4.2.1., had perceel 2 qua pH en organische stof een kwalitatief mindere bodem. Allereerst zijn er op Figuur 71, Figuur 73 en Figuur 75 duidelijke strepen te zien waar zowel de gewashoogte, de NDVI en de NDRE hoger lagen. Deze strepen waren het gevolg van een overlap in vloeibare bemesting. Vermoedelijk was de gewasgroei dus gelimiteerd door stikstof. Verder was er, voornamelijk op Figuur 71, binnen de verschillende plots een grote variabiliteit te zien. Aangezien deze variatie voornamelijk te zien was in de gewashoogte en niet in de NDVI en NDRE, kon de oorzaak liggen bij de onzekerheid van het DTM (Figuur 77) waarmee de gewashoogte bekomen werd. De 'vlekken' van lagere en hogere gewashoogte in D3 (Figuur 77) hadden vermoedelijk de fout op het DTM als oorzaak aangezien deze vlekken niet zichtbaar waren in de NDVI (Figuur 73) en NDRE (Figuur 75), alsnog in de orthomozaïek (Figuur 70). Echter de 'vlek' van lagere gewashoogte in C2 en D2 (Figuur 77) was wel terug te zien in de NDRE (Figuur 75) en beperkt in de NDVI (Figuur 73), alsook op de orthomozaïek (Figuur 70). Deze 'vlek' kwam niet overeen met het patroon in de pH of organische stof, al waren deze waarden algemeen wel laag. Wel leek het hier opnieuw een gevolg van de vloeibare bemesting te zijn, aangezien deze 'vlek' mooi in het patroon van de vloeibare bemesting lag. De vlek van lagere gewashoogte in C1 en D1 (Figuur 77) was ook terug te zien op de NDRE (Figuur 75) en beperkt in de NDVI (Figuur 73), alsook op de orthomozaïek (Figuur 70). Deze was gelegen aan de ingang van het perceel waar veel betreding plaatsvond en verder werd op die locatie ook een lagere pH en organischestofgehalte vastgesteld. Hier leken dus meerdere reden aan de oorzaak te liggen.



Figuur 77. Links is de gewashoogte van wintergerst weergegeven met aanduiding van de opvallende variaties en de 14 RTK-GPS-punten gebruikt om het DTM op te bouwen. Rechts is de standaardafwijking op het DTM weergegeven, eveneens met aanduiding van de 14 RTK-GPS-punten.

Uit onderzoek van Arvidsson en Håkansson (2014) bleek ook dat eenzaadlobbigen minder gevoelig waren aan bodemverdichting dan tweezaadlobbigen. Wintergerst, een eenzaadlobbige, was mogelijk een minder geschikt gewas om het effect van een diepe bewerking duidelijk in beeld te brengen.

## 4.3. Perceel 3

## 4.3.1. Effect van verschillende types diepwoeler op de effectiviteit van het openbreken van de ploegzool

Om te valideren of de vochtgehaltes bij beide penetrometingen (27/10/2020 en 6/11/2020) als gelijk beschouwd mochten worden, werd een gepaarde t-test uitgevoerd. Voorafgaand aan de gepaarde t-test werd de normaliteit getoetst met een Shapiro-Wilk-test. Alle drie de datasets bleken normaal verdeeld te zijn (Tabel 13). Vervolgens werd de gepaarde t-test uitgevoerd op de drie datasets en hieruit bleek dat voor alle drie de dieptes de nulhypothese behouden bleef (Tabel 13). De vochtgehaltes verschilden niet-significant van elkaar.

Tabel 13. Gravimetrisch vochtgehalte op perceel 3 voor de verschillende dieptes bepaald op 27/10/2020 en 6/11/2020. Plots C1 en C2 zijn hier niet weergegeven omdat er op 6/11/2020 geen bodemstalen werden genomen.

	Gravimetrisch vochtgehalte (g/g)							
	0-10	cm-mv	10-30	cm-mv	30-60	cm-mv		
	27-okt	06-Nov	27-okt	06-Nov	27-okt	06-Nov		
A1	0,12	0,13	0,12	0,17	0,11	0,11		
A2	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12		
A3	0,14	0,15	0,12	0,13	0,11	0,10		
A4	0,15	0,15	0,14	0,13	0,11	0,12		
A5	0,14	0,14	0,13	0,16	0,12	0,11		
A6	0,15	0,19	0,14	0,09	0,12	0,13		
A7	0,17	0,15	0,15	0,14	0,12	0,12		
A8	0,14	0,16	0,13	0,13	0,11	0,11		
B1	0,20	0,17	0,15	0,16	0,12	0,13		
B2	0,12	0,14	0,12	0,11	0,12	0,11		
B3	0,12	0,15	0,12	0,15	0,11	0,14		
B4	0,16	0,13	0,15	0,13	0,14	0,11		
B5	0,12	0,14	0,12	0,14	0,12	0,13		
B6	0,14	0,15	0,13	0,14	0,13	0,13		
B7	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,13		
B8	0,15	0,14	0,14	0,15	0,13	0,13		
C3	0,13	0,11	0,13	0,11	0,10	0,10		
C4	0,11	0,13	0,10	0,14	0,10	0,10		
C5	0,14	0,12	0,15	0,11	0,08	0,09		
C6	0,14	0,14	0,12	0,11	0,10	0,08		
C7	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13		
C8	0,14	0,14	0,15	0,13	0,12	0,13		
W	0,	96	0,	97	0,91			
р	0,5	808	0,9	312	0,8665			

Vervolgens konden de geïnterpoleerde dwarsdoorsneden visueel vergeleken worden. Dit zowel via een vergelijking voor en na de diepe bewerking als via een vergelijking tussen de types diepwoeler. Deze dwarsdoorsneden zijn twee aan twee weergegeven voor blok A in Bijlage 3A, voor blok B in Bijlage 3B en voor blok C in Bijlage 3C. Op de doorsneden is de diepte van de diepe bewerking aangeduid met een zwarte horizontale lijn. Ook kan het verschil van de penetratieweerstanden (MPa), uitgemiddeld per 10 cm, van voor en na de diepe bewerking bekeken worden in Bijlage 4 Tabel 17 voor blok A, in Bijlage 4 Tabel 18 voor blok B en in Bijlage 4 Tabel 19 voor blok C.

Bij het algemeen vergelijken van de doorsneden in blok A (Bijlage 3A) viel op dat de doorsneden op 27 oktober, met uitzondering van A1, redelijk gelijkend waren. Dit was voor blok B (Bijlage 3B) en blok C (Bijlage 3C) ook zo, met uitzondering van respectievelijk B2 en C6. De veronderstelling dat de verdichting binnen een blok gelijk was, kon dus behouden blijven. Vervolgens was er vast te stellen op de doorsneden van 27 oktober dat er op alle locaties een duidelijke ploegzool aanwezig was rond de 40 cm-mv en dat deze ploegzool sterk gereduceerd was op de doorsneden van 6 november. Nog niet verder ingaand op het type diepwoeler bleek hieruit dat alle diepwoelers, in meerdere of mindere mate, de verdichting konden verminderen. Ook was te zien dat het profiel onder de zwarte lijn, dieper dan waar de diepe bewerking plaatsvond, per locatie redelijk gelijk bleef over de twee datums. Dit was een goed teken aangezien dit aangeeft dat de penetrometingen twee keer op een redelijk gelijke manier werden uitgevoerd waardoor een gelijke output werd verkregen.

Bij het bekijken van de doorsneden per type diepwoeler waren er wel verschillen vast te stellen. Allereerst waren de locaties van de tanden duidelijk vast te stellen op de dwarsdoorsneden van 6 november, met uitzondering van Bijlage 3A A6 en Bijlage 3C C3, beide bij de 7-tand. Uit de afmetingen tussen de twee dalen gevormd door de tanden en uit de afmetingen van het dal viel af te leiden welk type diepwoeler er actief was. Dit werd verduidelijkt voor A1, A5 en A7 op Figuur 78 waar afstanden van respectievelijk ongeveer 65 cm, 45 cm en 100 cm tussen de twee dalen vast te stellen waren en afstanden van respectievelijk ongeveer 15 cm, 7 cm en 30 cm in de twee dalen vast te stellen waren. Dit kwam bijna overeen met de afmetingen van respectievelijk de 5-, 7- en 3-tand.

In de dalen, waar de tanden kwamen, was de verdichting bijna zo goed als volledig opgeheven. Waar de tanden niet kwamen was er een lichte daling in penetratieweerstand, maar de verdichting was nog duidelijk aanwezig boven de penetratieweerstand die planten kunnen overwinnen. Zowel de 5- als 3-tand maakten via hun tandprofiel wel mogelijkheden voor wortelgroei naar de diepere ondergrond. Bij de 7-tand was dit, met uitzondering in blok B (Bijlage 3B) minder vast te stellen. Daar bleef over de volledige doorsnede nog een licht verdichte laag aanwezig. Mogelijk was hier de diepe bewerking niet tot op 50 cm-mv, de dalen komen hier ook niet tot 50 cm-mv. Of deze toegang bij de 5- en 3-tand volstond voor een optimale gewasgroei, diende in de toekomst nog bekeken te worden met opbrengstmetingen.

Verder zullen de 5- en 3-tand vermoedelijk nog voor een stabiele bodem zorgen na de diepe bewerking omdat niet heel de ondergrond opengebroken werd, met uitzondering van Bijlage 3C C7 en C8, de 5-tand. Er waren nog duidelijke toppen met verdichting te zien tot ongeveer 35 cm-mv. Dit creëert vermoedelijk draagkracht voor het bereiden van het veld. Bij de 7-tand was dit minder vast te stellen. De toppen waren hier veel lager en ook minder breed. Bij de 7-tand verloor de bodem vermoedelijk veel draagkracht. Bij alle types tanden wordt de bodem boven 30 cm-mv wel helemaal opengebroken. Echter was daar op de doorsneden van 27 oktober al maar beperkte verdichting vast te stellen.



Figuur 78. Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetratieweerstanden in blok A strook 1, 5 en 7. De diepte van de diepe bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. De afstanden tussen de tanden en in het dal zijn aangeduid.

Deze bevindingen zijn ook terug te vinden in Bijlage 4 Tabel 17, Tabel 18 en Tabel 19 waar het verschil van de penetratieweerstanden, uitgemiddeld over 10 cm, van voor en na de diepe bewerking staan weergegeven. Waarden rond nul geven aan dat de penetratieweerstanden voor en na de bewerking gelijk waren. Negatieve waarden geven aan dat de penetratieweerstand na de diepe bewerking kleiner was dan deze voor de diepe bewerking. De verdichting werd hier opgeheven. Positieve waarden geven aan dat de penetratieweerstand na de diepe bewerking groter was dan deze voor de diepe bewerking.

De locaties waar de tanden kwamen, waren er ook hier duidelijk uit te halen, met uitzondering van Bijlage 4 Tabel 17 A6, de 7-tand, en Bijlage 4 Tabel 19 C3, C4 en C7, respectievelijk de 7- en 5-tand. Waar de tanden kwamen, waren de penetratieweerstanden sterk negatief. De waarden tussen de tanden zijn licht negatief, hier was een beperkte opheffing van de verdichting, die ook al visueel werd vastgesteld. Zoals ook reeds aangehaald; waren deze licht negatieve zones bij de 7-tand minder te detecteren. De 7-tand brak heel de ondergrond waardoor er vermoedelijk een groot verlies aan draagkracht was. Bij de 5- en 3- tand waren deze licht negatieve zones er wel. Bij de 3-tand waren deze zones wel breder dan bij de 5- tand.

Alle types diepwoeler waren dus in staat de ploegzool, al dan niet helemaal, open te breken en toegang naar de diepere ondergrond te creëren. Of deze toegang bij de 5- en 3-tand volstond voor een optimale gewasgroei, diende nog bekeken te worden met opbrengstmetingen. De 7-tand voorzag vermoedelijk ook geen draagkracht meer voor volgende bewerkingen door het volledig openbreken van de bouwvoor. De 5- en 3-tand voorzagen vermoedelijk wel nog draagkracht, maar of dit genoeg was voor volgende bewerkingen werd niet gevalideerd.

### 4.3.2. Effect van verschillende types diepwoeler op het brandstofverbruik

De gefilterde CAN-bus-data worden weergegeven in Figuur 79 volgens een kleurcode die het brandstofverbruik weerspiegelt. Visueel was hieruit vast te stellen dat de 7-tand meer brandstofverbruik vroeg. Deze stroken waren duidelijk donkerder gekleurd dan de stroken van de 5- en 3-tand. Een kleurverschil tussen de 5- en 3-tand was visueel moeilijker vast te stellen.



Figuur 79. Output van de brandstofverbruiksmonitoring geregistreerd via de CAN-bus tijdens de diepe bewerking op perceel 3. De kleurcode geeft het brandstofverbruik (l/h) weer. De plots zijn weergegeven en het type diepwoeler staat ook weergegeven.

Om te bepalen of er een significant verschil was in brandstofverbruik tussen de types diepwoeler werd allereerst het brandstofverbruik per strook uitgemiddeld. Deze gemiddeldes met standaardafwijking zijn per strook weergegeven in Figuur 80. Ook hieruit kon geconcludeerd worden dat het brandstofverbruik voor de 7-tand duidelijk meer was dan dit voor de 5- en 3- tand. Deze laatste twee hadden een verbruik dat sterk gelijkend was, echter lag dat van de 5-tand nog net iets hoger. Verder was ook te zien dat de verbruiken per type diepwoeler tussen de blokken niet veel verschilden.

Ter verificatie werd de significantie nagegaan via een lineair model. De onderliggende voorwaarden voor het opstellen van een lineair model, getest m.b.v. diagnostische plots, bleken voldaan te zijn. De brandstofverbruiksdata was normaal verdeeld. De output van het lineair model gaf aan dat voor blok A de 7-tand significant ( $p<2.10^{-16}$ ) meer verbruikt dan de 5- en 3-tand. Tussen de behandeling met de 5- en 3- tand was er in blok A geen significant verschil in brandstofverbruik. Voor blok B en blok C, was er in vergelijking met blok A, wel een significant ( $p=8,44.10^{-5}/p=0,008$ ) verschil tussen het verbruik van de 5- en 3-tand. Voor blok A verbruikte de 7-tand dus significant meer brandstof dan de 5- en 3- tand. In blok B en blok C verbruikte de 5- en 3-tand dus significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan de 3-tand en verbruikte de 7-tand significant meer brandstof dan



Figuur 80. Gemiddeld brandstofverbruik met standaardafwijking per strook. Op de x-as staat het blok met het type diepwoeler aangeduid. Op de y-as staat het brandstofverbruik in l/h uitgedrukt.

In Tabel 14 werden de verbruiken omgerekend naar het gemiddeld verbruik per hectare en de gemiddelde kostprijs per hectare rekening houdend met een gasolie-diesel (landbouw) prijs van 0,5817euro/liter (FOD, 2021). Hieruit was te zien dat de 7-tand net geen 10 euro meer kostte per hectare. Dit was een grote meerkost als ook naar het technische aspect uit sectie 4.3.1 gekeken werd. In sectie 4.3.1 werd namelijk geconcludeerd dat de 3- en 5-tand ook voor toegang naar de diepere ondergrond zorgden. Echter in mindere maten dan de 7-tand, maar of deze toegang volstond, kan in de toekomst eenvoudig bekeken worden door gewasopbrengsten te bekijken. Daarbij voorzagen de 3- en 5-tand in tegenstelling tot de 7-tand vermoedelijk nog genoeg draagkracht voor volgende bewerkingen.

	Blok A		BI	ok B	Blok C	
	Verbruik	Kostprijs	Verbruik	Kostprijs	Verbruik	Kostprijs
	(l/ha)	(€/ha)	(l/ha)	(€/ha)	(l/ha)	(€/ha)
3-tand	69 ± 8	± 40	68 ± 8	± 40	71 ± 6	± 41
5-tand	69 ± 3	± 40	74 ± 10	± 43	74 ± 10	± 43
7-tand	82 ± 7	± 48	85 ± 6	± 49	83 ± 8	± 48

Tabel 14. Het verbruik gedurende de diepe bewerkingen op perceel 3 omgerekend naar l/ha en de bijhorende kostprijs.

# 4.3.3. Verband tussen de EC-waarden uit de bodemscan en de CAN-bus-parameters uit de diepe bewerking

Om de relaties tussen de EC-waarden uit de bodemscan en de CAN-bus-parameters uit de diepe bewerking te onderzoeken, werden de EC-waarden geëxtraheerd uit de rasterkaart op de locaties waar CAN-bus-data beschikbaar waren. Dit gebeurde met een circulaire buffer van 0,5 m straal rond deze datapunten om een fout op de locatie van het werktuig, na de verschuiving van de datapunten, mee te nemen. De rasterkaart van de EC-waarden had een resolutie van 0,2 m x 0,3 m. Binnen deze buffer werd dan de mediaan bepaald. In Tabel 15 is het bereik van de data per type diepwoeler weergegeven. De relaties tussen de EC-waarden, het motorkoppel, het brandstofverbruik, de trekkracht en de slip werden vervolgens onderzocht

via Pearson-correlatie. In Tabel 16 is de output hiervan weergegeven. De correlatiecoëfficiënten werden per type diepwoeler bekeken.

	gemiddelde	10 <sup>de</sup> percentiel	90 <sup>ste</sup> percentiel
3-tand	•		-
Medianen EC 0-50 cm-mv (mS/m)	$6,7 \pm 0,8$	5,6	7,7
Motorkoppel (%)	55 ± 6	47	62
Brandstofverbruik (I/h)	29 ± 3	25	33
Trekkracht (kN)	27 ± 6	19	35
Slip (m/s)	-0,2 ± 0,1	-0,4	0,0
5-tand			
Medianen EC 0-50 cm-mv (mS/m)	6,9 ± 0,8	5,9	8,0
Motorkoppel (%)	56 ± 8	46	67
Brandstofverbruik (I/h)	31 ± 4	25	36
Trekkracht (kN)	0,05 ± 0,02.10 <sup>3</sup>	0,03.10 <sup>3</sup>	0,07.10 <sup>3</sup>
Slip (m/s)	-0,2 ± 0,1	-0,3	0,0
7-tand			
Medianen EC 0-50 cm-mv (mS/m)	$6,2 \pm 0,8$	5,4	7,2
Motorkoppel (%)	65 ± 5	58	70
Brandstofverbruik (I/h)	35 ± 3	31	39
Trekkracht (kN)	0,10 ± 0,01.10 <sup>3</sup>	0,09.10 <sup>3</sup>	0,12.10 <sup>3</sup>
Slip (m/s)	$-0,3 \pm 0,1$	-0,5	0,1

Tabel 15. Gemiddelde, 10de percentiel en 90ste percentiel van de geëxtraheerde data.

Uit Tabel 16 was te zien dat hier het motorkoppel, het brandstofverbruik en de trekkracht niet gecorreleerd waren met de EC-waarden ongeacht het type diepwoeler. Dit was tegengesteld aan de bevindingen op perceel 1 en perceel 2. Dit zou een indicatie kunnen zijn dat de EC hier niet bepaald werd door de bodemverdichting, maar door andere parameters die de EC-waarden beïnvloedden. Hier was geen informatie over. Wat wel opviel, was dat de EC-waarden maar een zeer beperkte variatie hadden. Bij een zeer zanderige bodem, met weinig klei, organische stof en vocht, moet de verdichting vermoedelijk al heel wat hoger liggen om echte verschillen waar te nemen. Verder was er ook hier geen correlatie met de slip. Er was wel weer een goede correlatie tussen het motorkoppel en het brandstofverbruik zoals op perceel 2. Er was ook een matige correlatie tussen het motorkoppel en de trekkracht en tussen het brandstofverbruik en de trekkracht, met uitzondering voor de 3-tand. Echter waren deze lager dan op perceel 2 vermoedelijk door de kleinere datasets. De correlatiecoëfficiënten van het motorkoppel, brandstofverbruik en trekkracht met de slip toonden een zeer beperkte tot geen correlatie aan. Hier leek ook meer variabiliteit in te zitten dan bij perceel 2.

Het brandstofverbruik, het motorkoppel en de trekkracht toonden hier dus geen verband met de EC-waarden. Dit toonde de moeilijkheid om met de EC de bodemverdichting in kaart te brengen. Eerdere experimenten in dit onderzoek toonden al duidelijk aan dat de CAN-busparameters meestal wel gecorreleerd zijn met de EC-waarden indien de EC-waarden wel een representatief beeld geven van de bodemverdichting. Vermoedelijk zou de correlatiecoëfficiënt tussen de CAN-bus-parameters en de penetratieweerstand op perceel 3 veel hoger zijn. Echter werd dit niet gevalideerd door de te beperkte dataset aan penetrometingen, daar al eerder duidelijk werd dat dit dan geen juiste output geeft.

3-tand	EC 0-50	Motor-	Brandstof-	Trekkracht	Slip
	cm-mv	koppel	verbruik		(GB-WB)
EC_0-50 cm-mv	1	-0,03	-0,04	-0,09	0,01
Motorkoppel		1	0,83	0,25	0,14
Brandstofverbruik			1	-0,001	0,03
Trekkracht				1	0,09
Slip (GB-WB)					1
5-tand					
EC_0-50 cm-mv	1	0,09	0,11	0,08	-0,10
Motorkoppel		1	0,88	0,67	-0,0009
Brandstofverbruik			1	0,55	-0,15
Trekkracht				1	-0,14
Slip (GB-WB)					1
7-tand					
EC_0-50 cm-mv	1	-0,03	-0,02	0,12	0,01
Motorkoppel		1	0,87	0,54	-0,19
Brandstofverbruik			1	0,39	-0,26
Trekkracht				1	-0,08
Slip (GB-WB)					1

Tabel 16. Correlatiecoëfficiënten tussen EC-waarden en CAN-bus-parameters per type diepwoeler.

## Hoofdstuk 5. Algemene conclusies en ideeën voor verder onderzoek

Binnen deze masterproef werd de toepasbaarheid van CAN-bus monitoringssystemen als basis voor een fijnmazige meettechniek ter detectie en kartering van bodemverdichting in landbouwpercelen nader bekeken. Verder werden ook de effectiviteit en efficiëntie van het (variabel) diepwoelen als fijnmazige remediëringstechniek en het effect ervan op de gewasopbrengsten bekeken. Tot slot werd de effectiviteit op het openbreken van de ploegzool van verschillende types diepwoeler nader bekeken. Hieronder zijn de belangrijkste bevindingen over deze onderzoeksvragen samengevat en wordt er nagedacht over toekomstige mogelijkheden van deze technieken.

In dit onderzoek werden gedurende verschillende diepe bewerkingen de CAN-bus-parameters gelogd met een Exatrek T2-datalogger. Vervolgens werden de relaties tussen de belangrijkste parameters die reeds intuïtief te linken zijn aan bodemverdichting (brandstofverbruik, motorkoppel, trekkracht en slip) en de EC-waarden uit de Veris MSP3- en EMI-bodemscan uitgevoerd op de verschillende percelen onderzocht via Pearson-correlatie. Uit de correlatiecoëfficiënten tussen de CAN-bus-parameters van een standaard diepe bewerking met meerdere tanden en de EC-waarden bleek dat zowel het brandstofverbruik, het motorkoppel als de trekkracht een zeer beperkte correlatie (r=± 0,25) met de EC-waarden hadden. Deze correlatie was beperkt vermoedelijk doordat er geen één op één vergelijking was door het gebruik van meerdere tanden: de CAN-bus-parameters waren namelijk een gemiddelde over de breedte van het werktuig met meerdere tanden. Voor een scanning met één tand lagen de correlatiecoëfficiënten van zowel het brandstofverbruik en het motorkoppel met de EC-waarden hoger (r=± 0,5). De correlatiecoëfficiënt tussen de trekkracht en de ECwaarden kon niet onderzocht worden, maar in onderzoek van Abbaspour-Gilandeh et al. (2006) werd er wel al een goed lineair verband (R<sup>2</sup>>0,9) gevonden tussen de EC-waarden en de trekkracht binnen een veld. Zowel het brandstofverbruik, het motorkoppel als de trekkracht lieten dus toe de bodemverdichting, al dan niet in beperkte mate, te detecteren. Wanneer er dan zowel van het brandstofverbruik als van het motorkoppel uit de scanning met één tand een kriging-kaart werd opgesteld, bleken deze kaarten sterk gecorreleerd ( $r=\pm 0.72$ ) te zijn met de EC-kaarten. Het brandstofverbruik, het motorkoppel en vermoedelijk ook de trekkracht uit de scanning met één tand waren dus, naast het detecteren van bodemverdichting, ook in staat om bodemverdichting in kaart te brengen. Voor de bewerking met meerdere tanden kon dit niet gevalideerd worden doordat er geen kriging-kaarten konden worden opgesteld door een gebrek aan RTK-GPS-coördinaten.

De matige correlaties toonden ook aan dat de CAN-bus-parameters niet enkel bepaald werden door de bodemverdichting. Ook moest er bij al deze voorgaande conclusies rekening gehouden worden met het feit dat de EC-waarden niet altijd een representatie zijn van de bodemverdichting. Dit was ook vast te stellen bij de bovengenoemde correlatie tussen de kriging-kaarten van het brandstofverbruik en het motorkoppel met de EC-waarden. Uit de *residuals* was te zien dat de correlatie voornamelijk lager waren waar de organischestof- en pH-waarden afweken van de rest van het veld. Hierdoor weken de EC-waarden waarschijnlijk in verhouding ook af van de waarden op de rest van het veld. Dit fenomeen bepaalde ook de resultaten op perceel 3. Daar was er totaal geen correlatie tussen de EC-waarden en de relevante CAN-bus-parameters. Dit viel vermoedelijk te verklaren doordat de EC-waarden sterk bepaald werden door andere variabelen en niet enkel door bodemverdichting. Er viel daar op dat de EC-waarden maar een zeer beperkte variatie hadden. Bij een zeer zanderige grond, met weinig klei, organische stof en vocht, moet de verdichting vermoedelijk al heel wat hoger liggen om echte verschillen waar te nemen.

Om de bevindingen van de scanning met één tand te valideren, werden deze ook gekoppeld aan de penetratieweerstanden. Dit is een directe weergave van de bodemverdichting. Hier was echter geen verband te vinden, maar dit had eerder als oorzaak de te kleine dataset door het arbeidsintensieve karakter van de penetrometingen en de te grote vereenvoudiging van zes penetratieweerstanden tot één waarde. Om die reden van de te kleine dataset werd deze validatie ook niet uitgevoerd bij de andere bewerkingen.

Verder werden ook de effecten van een (variabele) diepe bewerking op de gewasopbrengst, de gewashoogte en gewasontwikkeling bekeken via manuele opbrengstmetingen en via dronevluchten met een RGB- en een multispectrale camera. Het toepassen van een al dan niet diepe bewerking bleek op perceel 1 geen significant effect (p=0.14 / p=0.11) te hebben op zowel de gewasopbrengst als de gewashoogte. Wel zorgde het variabel diepwoelen en het diepwoelen van de volledige strook voor een meeropbrengst t.o.v. geen behandeling, visueel vastgesteld (Figuur 58). De bevindingen over het variabel diepwoelen dienen zeker gevalideerd te worden met verder onderzoek aangezien het variabel diepwoelen hier een bevoordeelde locatie kreeg t.o.v. de andere behandelingen. Dit zou kunnen verklaren waarom het variabel diepwoelen een significant (p=0,02) hogere opbrengst had dan het diepwoelen van de volledige strook, wat niet zoals verwacht was. Echter, in blok 3 van de proefopstelling was er vermoedelijk geen bevooroordeling. De uitkomst van blok 3 kon dus alvast een idee geven van de verhoudingen van de opbrengsten onder de verschillende behandelingen. Wanneer deze bevinding dan naast de andere kosten zoals brandstofverbruik, personeelskost, sleet van de werktuigen werd geplaatst, was duidelijk dat het variabel diepwoelen efficiënter was dan het diepwoelen van de volledige strook. De gewasontwikkeling (gewashoogte, NDVI en NDRE) werd op perceel 2 ook bekeken, echter was deze ook niet te linken aan het al dan niet uitvoeren van een diepe bewerking, maar waren er duidelijk andere variabelen die hier de limiterende factor in de gewasontwikkeling waren. Verder was wintergerst mogelijk een minder geschikt gewas om het effect van een diepe bewerking duidelijk in beeld te brengen doordat eenzaadlobbigen minder gevoelig zijn aan bodemverdichting (Arvidsson & Håkansson, 2014).

Tot slot werd de effectiviteit op het openbreken van de ploegzool van verschillende types diepwoeler nader bekeken. Ook het brandstofverbruik werd hierbij meegenomen. Alle types diepwoeler waren in staat de ploegzool, al dan niet helemaal, open te breken en toegang naar de diepere ondergrond te creëren. Of deze toegang bij de 5- en 3-tand volstond, diende nog bekeken te worden met opbrengstmetingen. Het was ook duidelijk dat de 7-tand geen bodemstabiliteit meer voorzag door het volledig openbreken van de bouwvoor. De 5- en 3-tand voorzagen wel nog stabiliteit, maar of dit genoeg was voor volgende bewerkingen werd niet gevalideerd. Verder vereiste de 7-tand beduidend meer brandstof dan de 5- en 3-tand. Tussen deze laatste twee was het verschil veel kleiner. Met beide bevindingen in het achterhoofd kon er geconcludeerd worden dat de 7-tand op het eerste zicht, zonder het uitvoeren van exacte opbrengstmetingen, zeker geen meerwaarde bood t.o.v. de 5- of 3-tand. De keuze tussen de 5- en 3-tand was met deze informatie minder eenvoudig te maken.

Voor toekomstig onderzoek is het vooral interessant om verder in te zetten op het vinden van manieren die fijnmazig de bodemverdichting kunnen detecteren en karteren en die bovendien eenvoudig en goedkoop voorhanden kunnen zijn voor de landbouwers. Dit onderzoek toonde, ondanks de beperkte correlatiecoëfficiënten, dat de **CAN-bus-parameters** (vnl. brandstofverbruik, trekkracht en motorkoppel) zeker potentieel hebben zowel voor detectie als in kaart brengen van bodemverdichting. Dit bevestigde eerder onderzoek, echter was er maar beperkt eerder onderzoek voorhanden. In de toekomst zou er nog meer validatie moeten gebeuren ten opzichte van de penetratieweerstand i.p.v. met de EC-waarden door de invloed van vele andere parameters op de EC-waarden. Ideaal zouden de correlatiecoëfficiënten tussen de penetratieweerstand en de CAN-bus-parameters nog veel hoger moeten liggen.

Voor een fijnmazige validatie tegenover de penetratieweerstand zal eerder een autonome of horizontale penetrometer gebruikt moeten worden. De matige correlatiecoëfficiënten waren verder ook deels te danken aan het feit dat de CAN-bus-parameters niet enkel bepaald werden door de bodemverdichting. Het opstellen van standard operating procedures (SOP) waarbij de invloed van andere factoren op een bepaalde CAN-bus-parameter geminimaliseerd wordt, kan hier een oplossing bieden.

Het opstellen van deze SOP's biedt daarnaast ook de eerste stap in de automatisering van het dataverwerkingsproces. Automatisatie van de verwerking van de CAN-bus-parameters tot taakkaarten zou het kunnen toelaten om een scanning met één tand samen te laten plaatsvinden met een diepe bewerking. De CAN-bus-parameters worden dan in real-time toegepast. De CAN-bus biedt immers de mogelijkheid om de trekkracht op te splitsen tussen de fronthef en de achterste driepuntsophanging. Het werktuig met één tand voor de scanning zou dan gekoppeld kunnen worden aan de fronthef terwijl het werktuig voor de diepe bewerking gekoppeld wordt aan de achterste driepuntsophanging. Met behulp van deze opsplitsing is het mogelijk om in real-time de werkingsdiepte van het werktuig dat achteraan de tractor gekoppeld is te gaan variëren. Dit laat dat een variabel diepe bewerking toe.

Hierdoor is het ook belangrijk dat er verder ook ingezet wordt op het onderzoek naar het effect van een (variabel) diepe bewerking op de opbrengsten en productiekosten. Dit onderzoek toonde aan dat (variabel) diepwoelen een hogere opbrengst kan geven en dat vermoedelijk variabel diepwoelen efficiënter is dan het diepwoelen van de volledige perceel. Echter is dit niet gegarandeerd. Meer onderzoek over hoe het (variabel) diepwoelen optimaal toe te passen in de praktijk, rekening houdend met andere limiterende parameters, is hiervoor nodig.

## Hoofdstuk 6. Referenties

Abbaspour-Gilandeh, Y., Alimardani, R., Khalilian, A., Keyhani, A., & Sadati, S. H. (2006). Energy requirement of site-specific and conventional tillage as affected by tractor speed and soil parameters. *Int. J. Agric. Biol.* 8(4), 499-503.

Agrometius, V. (2018a). LogMaster. Beschikbaar op: https://www.vantageagrometius.nl/product/logmaster/. Geraadpleegd op: 10/4/ 2021.

- Agrometius, V. (2018b). Veris iScan bodemscanner. Beschikbaar op: https://www.vantageagrometius.nl/product/veris-iscan-bodemscanner/. Geraadpleegd op: 10/4/ 2021.
- Agrometius, V. (2018c). Veris iScan Flex bodemscanner. Beschikbaar op: https://www.vantage-agrometius.nl/product/veris-iscan-flex-bodemscanner/. Geraadpleegd op: 10/4/ 2021.
- Agrometius, V. (2018d). Veris MSP3 Bodemscanner. Beschikbaar op: https://www.vantageagrometius.nl/product/veris-msp3-bodemscanner/. Geraadpleegd op: 25/10/ 2020.
- Agrometius, V. (2018e). Veris U3 series bodemscanner. Beschikbaar op: https://www.vantage-agrometius.nl/product/veris-u3-bodemscanner/. Geraadpleegd op: 10/4/ 2021.
- Apers, J. (2018). *Correlatie bodemgeleidbaarheid en nutriënteninhoud bodem.* (Bachelor). HoGent, agro- en biotechnologie.
- Arvidsson, J., & Håkansson, I. (2014). Response of different crops to soil compaction—Shortterm effects in Swedish field experiments. *Soil and Tillage Research, 138*, 56-63.
- Aspexit. (2019). Spatial data interpolation : TIN, IDW, kriging, block kriging, co-kriging.... What are the differences ? Beschikbaar op: https://www.aspexit.com/en/spatial-data-interpolation-tin-idw-kriging-block-kriging-co-kriging-what-are-the-differences/#Kriging. Geraadpleegd op: 27/2/ 2021.
- Bakker, M. M., Govers, G., & Rounsevell, M. D. (2004). The crop productivity–erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena*, *57*(1), 55-76.
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Wal, T. V. d., Soto, I., . . . Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, 9(8), 1339.
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management–a review. Soil use and management, 25(4), 335-345.
- Beutler, A. N., Centurion, J. F., Centurion, M. A. P. d. C., Freddi, O. d. S., Sousa Neto, E. L. d., Leonel, C. L., & Silva, Á. P. d. (2007). Traffic soil compaction of an Oxisol related to soybean development and yield. *Scientia Agricola*, *64*(6), 608-615.
- Beylich, A., Oberholzer, H.-R., Schrader, S., Höper, H., & Wilke, B.-M. (2010). Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 133-143.
- Bolenius, E., Rogstrand, G., Arvidsson, J., Stenberg, B., & Thylen, I. (2006). *On-the-go measurements of soil penetration resistance on a Swedish Eutric Cambisol.* Paper presented at the Proceedings of International Soil Tillage Research Organization 17th Triennal Conference.
- Boone, F. (1986). Towards soil compaction limits for crop growth. *NJAS wageningen journal of life sciences, 34*(3), 349-360.
- Boone, F., Bouma, J., & De Smet, L. (1978). A case study on the effect of soil compaction on potato growth in a loamy sand soil. 1. Physical measurements and rooting patterns. *NJAS wageningen journal of life sciences*, 26(4), 405-420.
- Borra-Serrano, I., De Swaef, T., Quataert, P., Aper, J., Saleem, A., Saeys, W., ... Lootens, P. (2020). Closing the phenotyping gap: High resolution UAV time series for soybean growth analysis provides objective data from field trials. *Remote Sensing*, *12*(10), 1644.
- Botta, G., Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., & Tourn, M. (2010). Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (Glycine max L.) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research, 110*(1), 167-174.

Bouche, G. (2019). Ontwikkeling van een automatische penetrometer voor precisielandbouw toepassingen. (Bachelor). UGent, Elektromechanica.

- Busscher, W., Edwards, J., Vepraskas, M., & Karlen, D. (1995). Residual effects of slit tillage and subsoiling in a hardpan soil. *Soil and Tillage Research, 35*(3), 115-123.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest ecology and management, 338*, 124-138.
- Carrara, M., Castrignanò, A., Comparetti, A., Febo, P., & Orlando, S. (2007). Mapping of penetrometer resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics. *Geoderma*, *142*(3-4), 294-307.
- Chamen, W. C. T. (2011). The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil types. (PhD Thesis). Cranfield University, Philosophy.
- Chamen, W. C. T., Moxey, A. P., Towers, W., Balana, B., & Hallett, P. D. (2015). Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, *146*, 10-25.
- Cho, Y., Lee, D. H., Park, W., & Lee, K. S. (2015). Development of a Real-Time Measurement System for Horizontal Soil Strength. *Journal of Biosystems Engineering, 40*(3), 165-177.
- Chung, S., Sudduth, K., & Hummel, J. (2006). Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. *Transactions of the ASABE, 49*(1), 5-14.
- Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid. (2020). Juli 2020 Blue Deal bindt strijd aan tegen droogte. Beschikbaar op: https://www.integraalwaterbeleid.be/nl/nieuws/blue-deal-bindt-strijd-aan-tegen-droogte. Geraadpleegd op: 6/1/ 2021.
- Dalfsen, P. v., & Baltissen, T. (2016). Bodemscans: Achtergrond informatie over geleidbaarheid bodem. Beschikbaar op: https://edepot.wur.nl/392825.
- Databank Ondergrond Vlaanderen Verkenner. (2020). Beschikbaar op: https://www.dov.vlaanderen.be/portaal/?module=verkenner. Geraadpleegd op: 19/12/ 2020.
- Dauphine, A. (2017). Spatial interpolation: creating fields from data points. In *Geographical Models with Mathematica* (pp. 179): Elsevier.
- Demeestere, K. (2020). Analyse van organische micropolluenten. Cursus binnen de opleiding Master in de Bio-ingenieurswetenschappen: Milieutechnologie. UGent (EnVOC).
- Dillen, J., Vandervelpen, D., Bode, J., Smets, S., Euben, R., & Ven, G. V. D. (z.d.). SMART-Bodem: De mogelijkheden van precisielandbouw voor een optimaal bodembeheer. Beschikbaar op:

https://lv.vlaanderen.be/sites/default/files/attachments/brochure\_smart-bodem.pdf

- Dupon, I. (2020). [Persoonlijke communicatie: Vragen i.v.m. werking New Holland T7 270].
- Edesk, & Federaal wetenschapsbeleid. (2004). *Aardobservatie in de klas*. Beschikbaar op: https://eo.belspo.be/sites/default/files/publications/aardobservatie-in-de-klas.pdf
- Eijkelkamp. (2013). Penetrologger: gebruiksaanwijzing.
- Eijkelkamp. (z.d.). grondboren en bodembemonstering apparatuur: eendelige steekmonsterboor set. Beschikbaar op: https://www.eijkelkamp.com/producten/grondboren-en-bodembemonstering-apparatuur/eendelige-steekmonsterboor-set-c.html. Geraadpleegd op: 25/10/ 2020.
- Elsen, F., Beckers, V., Diels, J., Orshoven, J. V., Wauters, S., & Huybrechts, M. (2014). Praktijkonderzoek naar de toepassing van preventieve en remediërende maatregelen tegen bodemaantasting door bodemverdichting. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Overheid, Dep. Leefmilieu, Natuur en Energie, Afd. Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommern, door de bodemkundige Dienst van België, het Departement Aard- en Omgevingswetenschappen (KU Leuven) en Thomas More (KU Leuven Associatie). 314 pp.
- Exatrek. (2021). Unsere Produkte auf einen Blick. Beschikbaar op: https://exatrek.de/produkte.html. Geraadpleegd op: 6/3/ 2021.
- FOD, E. (2021). Officiële maximumprijzen volgens de Programma-overeenkomst. Beschikbaar op:
https://economie.fgov.be/sites/default/files/Files/Energy/prices/Officiele-Maximumtarieven-aardolieproducten.pdf

Geopunt. (2020). Beschikbaar op: https://www.geopunt.be/. Geraadpleegd op: 19/12/ 2020.

- Gilman, E. F., Leone, I., & Flower, F. (1987). Effect of soil compaction and oxygen content on vertical and horizontal root distribution. *Journal of Environmental Horticulture, 5*(1), 33-36.
- Grondradar. (2016). Beschikbaar op: https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/gro ndradar. Geraadpleegd op: 10/4/ 2021.
- GSSI. (z.d.). What is GPR? Beschikbaar op: https://www.geophysical.com/whatisgpr. Geraadpleegd op: 10/4/ 2021.
- Guan, S., Fukami, K., Matsunaka, H., Okami, M., Tanaka, R., Nakano, H., . . . Takahashi, K. (2019). Assessing correlation of high-resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs. *Remote Sensing*, *11*(2), 112.
- Heidarian Dehkordi, R., Burgeon, V., Fouche, J., Placencia Gomez, E., Cornelis, J.-T., Nguyen, F., . . . Meersmans, J. (2020). Using UAV collected RGB and multispectral images to evaluate winter wheat performance across a site characterized by centuryold biochar patches in Belgium. *Remote Sensing*, *12*(15), 2504.
- Hemmat, A., Rahnama, T., & Vahabi, Z. (2014). A horizontal multiple-tip penetrometer for onthe-go soil mechanical resistance and acoustic failure mode detection. *Soil and Tillage Research, 138*, 17-25.
- Hoefer, G., Bachmann, J., & Hartge, K. (2010). Can the EM38 probe detect spatial patterns of subsoil compaction? In *Proximal Soil Sensing* (pp. 265-273): Springer.
- Joschko, M., Diestel, H., & Larink, O. (1989). Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurements. *Biology and Fertility of Soils, 8*(3), 191-196.
- Karlen, D., Busscher, W., Hale, S., Dodd, R., Strickland, E., & Gamer, T. (1991). Drought condition energy requirement and subsoiling effectiveness for selected deep tillage implements. *Transactions of the ASAE, 34*(5), 1967-1972.
- Kichler, C., Fulton, J., Raper, R., McDonald, T., & Zech, W. (2011). Effects of transmission gear selection on tractor performance and fuel costs during deep tillage operations. *Soil and Tillage Research*, *113*(2), 105-111.
- Klein Gunnewiek, J. (2018). *Precisielandbouw: De technieken en zijn gebruikers.* (Bachelor). Aeres Hogeschool, Agrotechniek en management.
- Kok, H., Taylor, R., Lamond, R., & Kessen, S. (1996). Soil Compaction Problems and Solutions. *Cooperation Extension Service, Manhattan, Kansas. File Code: Crops and Soils*, 4-6.
- Kowalczyk, S., Maślakowski, M., & Tucholka, P. (2014). Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction. *Journal of Applied Geophysics, 110*, 43-50.
- Kuht, J., & Reintam, E. (2004). Soil compaction effect on soil physical properties and the content of nutrients in spring barley (Hordeum vulgare L.) and spring wheat (Triticum aestivum L.). Agronomy Research, 2(2), 187-194.
- Kumar, V., Jain, M., Rani, V., Kumar, A., & Kumar, S. (2018). A Review of Soil Compaction-Concerns, Causes and Alleviation. *Int. J. Plant Soil Sci, 22*, 1-9.
- Lapen, D., Topp, G., Edwards, M., Gregorich, E., & Curnoe, W. (2004). Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration—water content relationships in tillage research. *Soil and Tillage Research, 79*(1), 51-62.
- Larink, O., Werner, D., Langmaack, M., & Schrader, S. (2001). Regeneration of compacted soil aggregates by earthworm activity. *Biology and Fertility of Soils*, *33*(5), 395-401.
- Lipiec, J., Medvedev, V., Birkas, M., Dumitru, E., Lyndina, T., Rousseva, S., & Fulajtar, E. (2003). Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International agrophysics, 17*(2).

- Lipiec, J., & Tarkiewicz, S. (1986). The effect of moisture on the crushing strength of aggregates of loamy soil of various density levels. *Polish journal of soil science, 19*(1-2), 27-31.
- Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal, 111*(4), 1552-1569.
- MicraSense. (2021). RedEdge MX dual camera imaging system. Beschikbaar op: https://micasense.com/dual-camera-system/. Geraadpleegd op: 27/4/ 2021.
- MIRA. (2013). Milieurapport Vlaanderen, Themabeschrijving bodemkwaliteit. Overloop S., Vlaamse Milieumaatschappij, www.milieurapport.be.
- Moeyersoons, M. (2020). Toepassing en analyse van een CAN/ISOBUS monitoringssysteem voor tractoren en landbouwmachines. (Master). UGent, Bio-ingenieur.
- Moral, F., Terrón, J., & Da Silva, J. M. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, *106*(2), 335-343.
- Oerke, E.-C., Mahlein, A.-K., & Steiner, U. (2014). Proximal sensing of plant diseases. In Detection and Diagnostics of Plant Pathogens (pp. 55-68): Springer.
- OpenEI. (2013). Exploration technique: DC resistivity survey (Wenner array). Beschikbaar op: https://openei.org/wiki/DC\_Resistivity\_Survey\_(Wenner\_Array). Geraadpleegd op: 6/3/ 2021.
- Panday, U. S., Shrestha, N., Maharjan, S., Pratihast, A. K., Shrestha, K. L., & Aryal, J. (2020). Correlating the plant height of wheat with above-ground biomass and crop yield using drone imagery and crop surface model, a case study from Nepal. *Drones, 4*(3), 28.
- Paramasivam, C., & Venkatramanan, S. (2019). An introduction to various spatial analysis techniques. GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science, edited by: Venkatramanan, S., Prasanna, MV, and Chung, SY, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 23-30.
- Prosensols. (2011). Bodemverdichting in de landbouw: vermeiden en herstellen. Beschikbaar op:

http://www.agripress.be/\_STUDIOEMMA\_UPLOADS/downloads/PROSENSOLS\_NL \_DEC\_web.pdf

- Raghavan, G., McKyes, E., Taylor, F., Richard, P., & Watson, A. (1979). The relationship between machinery traffic and corn yield reductions in successive years. *Transactions of the ASAE*, 22(6), 1256-1259.
- Raper, R. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics, 42*(3-4), 259-280.
- Ren, L. (2020). *Evaluation of soil compaction: effects, prevention, alleviation and detection.* (PhD Thesis). Ghent University, Ghent, Belgium,
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., & Seidel, S. J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield–What do we really know? *Soil and Tillage Research, 174*, 193-204.
- Scholz, C., Moeller, K., Ruckelshausen, A., Hinck, S., & Goettinger, M. (2014). Automatic soil penetrometer measurements and GIS based documentation with the autonomous field robot platform bonirob. Paper presented at the 12th International Conference of Precision Agriculture.
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., ... Souliyanonh, B. (2017). Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(11), 10056-10067.
- SIKB. (2018). Onderzoek bodemverdichting landelijk gebied. Beschikbaar op: https://www.sikb.nl/doc/richtlijn8100/Handreiking\_8151\_Onderzoek%20Bodemverdic hting\_ontwerp\_0.1\_180621.pdf
- Singh, J., Salaria, A., & Kaul, A. (2015). Impact of soil compaction on soil physical properties and root growth: A review. *International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences*, *5*(1), 23-32.
- Soane, B., & Van Ouwerkerk, C. (1995). Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research, 35*(1-2), 5-22.

Spoor, G. (2006). Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. Soil use and management, 22(2), 113-122.

Taylor, H. M., Roberson, G. M., & Parker Jr, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil science*, *102*(1), 18-22.

Tits, M., Elsen, A., Deckers, S., Bries, J., & Vandendriessche, H. (2020). Bodemvruchtbaarheid van de akkerbouw- en weilandpercelen in België en noordelijk Frankrijk (2016-2019). Bodemkundige dienst van België.

Topakci, M., Unal, I., Canakci, M., Celik, H. K., & Karayel, D. (2010). Design of a Horizontal Penetrometer for Measuring On-the-Go Soil Resistance. *Sensors, 10*(10), 9337-9348.

- Topsoil Mapper. (z.d.). The Topsoil Mapper. Beschikbaar op: https://www.topsoilmapper.com/en/. Geraadpleegd op: 3/1/ 2021.
- Tu, J., & Tan, C. (1991). Effect of soil compaction on growth, yield and root rots of white beans in clay loam and sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 23(3), 233-238.
- van der Schans, D., Jukema, J. N., van der Klooster, A., Molenaar, K., Krebbers, H., Korver, R., . . . Truiman, J. (2008). Toepassing GPS en GIS in de akkerbouw. *Nut en rendement van toepassingen op het gebied van geolandbouw. PPo-rapportnr. 3250062000.*
- Van der Wal, T., Vullings, L., Zaneveld-Reijnders, J., & Bink, R. (2017). Doorontwikkeling van de precisielandbouw in Nederland: een 360 graden-verkenning van de stand van zaken rond informatie-intensieve landbouw en in het bijzonder de plantaardige, openluchtteelt. *Wageningen Environmental Research*.
- Vanderhasselt, A. (Verwacht 2022). Voorlopige titel: Voorkomen en remediëren van bodemverdichting. (doctoraat). UGent
- Vanderstraeten, M. (2015). Invloed van diverse bodembewerkingsmethoden op groei van maïs en bodemkarakteristieken. (Master). UGent, Bio-ingenieur.
- Vermeulen, G. D., Verwijs, B., & van den Akker, J. (2013). Vergelijking van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010. *Plant Research International, Business Unit Agrosysteemkunde.*
- Vilt. (2015). Bodemscan toont wat precisielandbouw in zijn mars heeft. Beschikbaar op: https://vilt.be/nl/nieuws/bodemscan-toont-wat-precisielandbouw-in-zijn-mars-heeft. Geraadpleegd op: 18/11/ 2020.
- Vilt. (2020). 75 miljoen euro voor 'Blue Deal' tegen droogte. Beschikbaar op: https://vilt.be/nl/nieuws/75-miljoen-euro-voor-blue-deal-tegen-droogte. Geraadpleegd op: 10/2/ 2021.
- Vliegen, J. (2021). [Persoonlijke communicatie: Werking trekkrachtsensor Fendt].
- VLM. (2015a). Bodemstructuur en -verdichting. Beschikbaar op: https://www.vlm.be/nl/SiteCollectionDocuments/Bedrijfsadvies/Fiches%20BA/06%202 0151210\_BAS\_FICHE\_BODEMVERDICHTING\_LR.pdf
- VLM. (2015b). De zuurtegraad van de bodem. Beschikbaar op: https://www.vlm.be/nl/SiteCollectionDocuments/Bedrijfsadvies/Fiches%20BA/07%202 0151214\_BAS\_FICHE\_Zuurtegraad\_LR.pdf
- VMM. (2020). Emissie van broeikasgassen door de landbouw. Beschikbaar op: https://www.milieurapport.be/sectoren/landbouw/emissies-afval/emissie-vanbroeikasgassen. Geraadpleegd op: 3/12/ 2020.
- Voorhees, W. (1987). Assessment of soil susceptibility to compaction using soil and climatic data bases. *Soil and Tillage Research, 10*(1), 29-38.
- Vreken, P. V. D., Holm, L. V., Diels, J., & Orshoven, J. V. (2009). Bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting.
- Wageningen University and research. (z.d.). Grond. Beschikbaar op: https://library.wur.nl/WebQuery/file/lom/lom\_t43df981c\_002.html. Geraadpleegd op: 31/5/ 2021.
- Whalley, W. R., Dumitru, E., & Dexter, A. (1995). Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, *35*(1-2), 53-68.
- Windels, J. (2020). Toepassing en analyse van een CAN/ISOBUS-monitoringssysteem voor tractoren en landbouwmachines. (Master). UGent, Bio-ingenieur.

- Wolkowski, R., & Lowery, B. (2008). Soil compaction: causes, concerns and cures. Division of Cooperative Extension of the University of Wisconsin--Extension.Yvan, C., Stéphane, S., Stéphane, C., Pierre, B., Guy, R., & Hubert, B. (2012). Role of
- Yvan, C., Stéphane, S., Stéphane, C., Pierre, B., Guy, R., & Hubert, B. (2012). Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 55, 93-103.

# Hoofdstuk 7. Bijlagen





Figuur 81. Gewashoogte van de groenbedekker op perceel 1. De plots met bijhorende buffer waarbinnen het gemiddelde en de Q90 van de gewashoogte werden bepaald, zijn weergegeven.

# Bijlage 2: Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de bodem op perceel 1



#### Bijlage 2A: Doorsneden vlak na de diepe bewerking







Figuur 82. Voorstelling van de geïnterpoleerde dwarsdoorsneden op perceel 1 genomen vlak na de diepe bewerking. De diepte van de bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. De dieptes van de penetrometingen zijn aangeduid met een zwart lijntjes.



### Bijlage 2B: Doorsneden drie maanden na de diepe bewerking







Figuur 83. Voorstelling van de geïnterpoleerde dwarsdoorsneden op perceel 1 genomen vlak na de diepe bewerking. De diepte van de bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn.

# Bijlage 3: Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de bodem op perceel 3



#### Bijlage 3A: Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden blok A





Perceel 3 - 06/11/2020

Perceel 3 – 27/10/2020 A5 7-tand















Perceel 3 - 06/11/2020

Kracht (MPa)

20

40

60

80

Afstand [cm]

100

120

140

160

0

-10 -

-20 ·

-30

-40

-50

-60

-70

-80 -

0

Diepte [cm]



Figuur 84. Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetratieweerstanden in blok A. Links zijn deze voor de diepe bewerking en rechts zijn deze na de diepe bewerking. De diepte van de diepe bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. Plot A3 en A4 zijn niet weergegeven. Dit waren de controles, hier vonden geen metingen plaats na de diepe bewerking.



## Bijlage 3B: Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden blok B

Perceel 3 – 27/10/2020 B2 3-tand



Perceel 3 - 06/11/2020 B2 3-tand











Perceel 3 – 06/11/2020 B6 5-tand





Figuur 85. Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetratieweerstanden in blok B. Links zijn deze voor de diepe bewerking en rechts zijn deze na de diepe bewerking. De diepte van de diepe bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. Plot B3 en B4 zijn niet weergegeven. Dit waren de controles, hier vonden geen metingen plaats na de diepe bewerking.



## Bijlage 3C: Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden blok C



. 



Figuur 86. Geïnterpoleerde dwarsdoorsneden van de penetratieweerstanden in blok C. Links zijn deze voor de diepe bewerking en rechts zijn deze na de diepe bewerking. De diepte van de diepe bewerking is aangeduid met een horizontale zwarte lijn. Plot C1 en C2 zijn niet weergegeven. Dit waren de controles, hier vonden geen metingen plaats na de diepe bewerking.

Plot	cm-mv∖cm	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
A1	0-10	-0,11	0,05	0,25	0,00	-0,17	0,02	0,07	0,11	0,39	0,10	-0,21	-0,42
5-tand	10-20	-0,36	0,14	0,31	0,47	-0,02	-0,21	0,22	0,70	0,27	-0,43	-0,59	-0,20
	20-30	-0,37	-0,35	0,50	0,32	0,35	-0,49	-1,06	0,03	-0,47	-1,46	-0,76	-0,77
	30-40	-2,25	-1,70	-1,95	0,77	-0,27	-3,38	-2,58	0,95	-0,90	-4,16	-3,73	-3,98
	40-50	-3,69	-4,16	-1,44	-0,41	-0,53	-1,55	-1,34	0,40	-0,66	-2,05	-2,72	-0,39
	50-60	-1,24	-1,44	-0,77	-0,06	-0,28	0,02	0,29	0,53	0,30	-0,16	0,12	0,39
	60-70	0,16	1,56	-0,35	0,80	-0,13	1,47	-0,29	-0,04	0,59	-0,11	0,28	1,12
	70-80	0,70	2,77	1,99	1,61	-1,47	1,48	0,16	-2,09	-0,50	-2,39	-0,76	0,51
A2 5-tand	0-10	-0,29	0,11	0,35	-0,17	-0,03	0,15	0,09	0,09	0,36	0,08	-0,13	0,05
	10-20	-1,38	-0,77	-0,38	-0,82	-0,49	-0,69	-0,78	-0,68	-0,45	-0,79	-1,04	-0,53
	20-30	-1,63	-1,78	<del>-0,94</del>	-1,47	-0,61	1,19	-1,40	-0,35	-1,12	-1,11	-1,59	-0,98
	30-40	-3,32	-4,42	-4,47	-3,27	-2,04	-3,39	-4,09	-1,24	-2,21	-4,03	-4,64	-2,63
	40-50	-3,05	-4,84	-4,33	-2,64	-0,87	-2,16	-3,52	-0,11	-1,08	-2,96	-4,65	-2,34
	50-60	-0,45	-1,46	-1,38	-0,79	0,67	-0,09	-0,45	-0,11	-0,78	-1,24	-1,44	0,26
	60-70	-0,38	-0,83	-0,36	-0,06	1,27	0,20	-0,84	-0,17	-2,24	-0,30	-0,10	0,99
	70-80	-0,18	0,10	-0,15	-0,08	1,11	-0,70	-1,58	-1,08	-1,78	-0,58	0,34	0,97
A5	0-10	-0,27	-0,68	-0,50	-0,49	-0,85	-0,84	-0,83	-0,81	-0,66	-0,63	-0,81	-0,50
7-tand	10-20	-0,01	-0,32	0,13	0,32	-0,64	0,18	0,14	-0,91	-0,45	-0,70	-0,80	-0,28
	20-30	-0,32	-1,84	-1,17	-1,02	-1,87	0 67	-0,69	-1,78	-0,97	-0,77	-0,77	-0,35
	30-40	-2,56	-5,42	-5,34	-3,31	-5,27	-2.58	-3,70	-4,71	-2,31	-1,66	-3,44	-0,93
	40-50	-1,02	-2.29	-1.22	-0,46	-0,70	0,72	-0,44	-1,32	0,25	-0,46	-1,95	-0,02
	50-60	-0,40	-0,99	0,06	-0,37	0,34	0,41	0,02	0,63	0,43	0,26	0,08	0,28
	60-70	-0,80	-0,87	0,08	0,46	0,57	0,10	-0,05	0,00	0,11	0,56	0,02	-0,76
	70-80	-1,46	-1,62	-1,33	0,89	-0,41	-0,73	-0,45	-0,94	-0,38	0,19	-1,37	0,79

## Bijlage 4: Verschil van de penetratieweerstanden voor en na de diepe bewerking op perceel 3

Tabel 17. Verschil van de penetratieweerstanden (MPa) voor blok A, uitgemiddeld per 10 cm, voor en na de diepe bewerking. Sterk negatieve verschillen zijn aangeduid.

Plot	cm-mv∖cm	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
A6	0-10	-0,52	0,03	-0,63	-0,73	-0,74	-0,59	-0,37	-0,35	-0,44	-0,63	-0,39	-0,33
7-tand	10-20	-0,56	-0,39	-0,16	-1,01	-0,58	-0,28	-0,57	-0,49	-0,41	-0,74	-0,78	-0,30
	20-30	2,52	-1,46	-1,76	2,59	-1,84	-1,40	-1,14	-1,66	-1,25	-1,55	1,09	2,15
	30-40	-4,36	-4,80	-3,93	-4,52	-3,53	-4,33	-4,89	-4,56	-3,81	-3,84	-3,07	-4,01
	40-50	-1,54	-3,15	-0,62	-0,96	-0,74	-0,28	-1,84	-2,54	-1,03	-0,88	0,00	-1,08
	50-60	1,07	0,01	0,31	0,00	-0,08	0,20	0,14	0,13	0,89	0,43	0,40	-0,25
	60-70	0,87	0,76	0,06	0,80	-0,16	0,49	0,29	0,69	0,85	0,52	-0,98	0,56
	70-80	1,08	0,28	-0,27	0,99	-0,90	0,39	0,64	1,01	0,36	0,13	-1,40	0,33
A7	0-10	0,50	0,15	0,28	0,02	0,30	0,12	0,49	0,34	0,02	0,40	-0,06	0,31
3-tand	10-20	0,37	0,65	0,59	-0,06	0,48	0,68	0,71	0,70	0,24	0,20	0,09	0,54
	20-30	0,43	0,35	-0.11	-0.19	-0.08	<u>0</u> ,15	1,01	0,95	0,37	-0,37	-0,42	-0,36
	30-40	0,09	-0,10	-3,74	-2,23	-3,69	0 26	2,11	0,13	-0,07	-1,13	-2,32	-1,68
	40-50	-1,84	-0,45	-2,69	-4,92	-3,98	-0,86	-2,27	-1,37	-1,81	-3,58	-5,42	-4,59
	50-60	-0,71	-0,22	-0,01	-1,20	-0,71	-0,43	-1,97	-1,08	-1,94	1,74	-2,75	-2,15
	60-70	0,40	0,34	0,15	-0,09	0,12	-0,40	0,21	-0,27	-0,97	-1,02	-1,09	-1,57
	70-80	0,09	0,50	0,45	0,11	0,04	0,05	0,79	0,12	-0,17	0,02	-0,25	-0,68
A8	0-10	-0,38	-0,40	-0,60	-0,75	-0,52	-0,50	0,16	-0,53	-0,61	-0,70	-0,53	-0,74
3-tand	10-20	-0,35	0,20	-0,26	-1,01	-1,18	-0,38	-0,60	-0,86	-0,78	-0,78	-1,00	-1,03
	20-30	-2,63	-1,83	-2,61	-2,99	-2,81	-2,19	-2,60	-2,73	-2,69	-2,63	-4,36	-2,43
	30-40	-1,96	-1,56	-3,77	-4,24	-4,92	-3,07	-1,33	-1,38	-1,47	-4,34	-4,00	-4,49
	40-50	-0,40	-0,69	-0,91	-3,21	-4,02	-1,48	-0,52	-0,76	-1,30	-1,88	-3,45	-3,24
	50-60	-0,12	-0,04	-0,42	-0,91	-1,14	-0,07	0,22	-0,13	-0,55	-0,44	-0,68	-0,65
	60-70	0,60	0,20	0,61	-0,32	0,04	-0,12	0,08	0,09	-0,60	-0,14	-0,05	0,23
	70-80	0,71	0,17	0,05	-0,33	0,07	-0,25	-0,46	-0,33	-1,19	-0,50	-0,01	0,33

Plot	cm-mv∖cm	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B1	0-10	0,04	0,07	0,14	0,31	0,08	0,05	0,16	-0,13	0,01	-0,32	-0,19	-0,10
3-tand	10-20	0,48	0,44	0,07	0,44	0,40	0,36	0,53	0,46	-0,08	-0,50	-0,50	-0,53
	20-30	0,31	0,20	0,03	-0,08	0,17	0,27	0,50	0,24	-0,53	-1,03	-0,18	0,42
	30-40	-0,46	0,01	-0,11	-0,31	-1,13	-0,80	0,07	-0,33	-1,84	-2,11	-1,85	-0,79
	40-50	-1,48	-1,18	-3,81	-0,44	-3,51	-1,28	-2,01	-1,63	-3,08	-4,72	-4,13	-2,03
	50-60	-0,26	0,03	-2,17	-1,08	-0,63	0,79	-1,00	-1,41	-1,43	-2,57	-0,45	-1,21
	60-70	0,53	0,10	-0,71	-0,31	-0,31	0,53	-0,32	-0,38	-0,14	-0.83	0,75	-0,35
	70-80	0,77	0,77	-0,29	-0,81	-1,53	-0,67	-0,20	0,21	0,46	-0,20	0,45	-0,42
B2	0-10	-0,55	-0,35	-0,23	-0,77	-0,37	-0,49	0,12	-0,18	-1,21	-0,98	-0,87	-0,29
3-tand	10-20	0,22	0,06	0,06	-1,14	-0,39	-0,35	-0,03	-0,31	-1,73	-0,99	-1,29	-0,73
	20-30	-1,71	-2,61	-1,36	-3,28	-3,52	-3,29	-3,22	-2,42	-2,38	-1,87	-1,12	-2,28
	30-40	-0,32	-0,66	-4,55	-3,29	-3,03	-1,57	-1,17	-1,06	-3,92	-3,70	-2,23	-4,88
	40-50	1,08	0,36	-1,53	-2,73	-1,84	-0,02	-0,84	-0,06	-3,14	-2,97	-3,96	-2,48
	50-60	0,27	-0,12	-0,63	-1,10	-0,18	-0,72	0,26	-1,11	-2,41	-0,29	-1,29	-0,14
	60-70	-0,21	-0,33	-0,69	-0,97	-0,29	0,21	-0,03	0,06	0,00	0,65	0,09	0,29
	70-80	0,21	-0,53	0,45	-0,67	-0,30	0,11	-0,53	0,73	0,29	1,49	-0,06	0,42
B5	0-10	-0,93	-0,62	-0,98	-1,02	-0,79	-0,87	-0,57	-0,56	-0,48	-1,11	-0,95	-1,10
5-tand	10-20	-1,21	-1,05	-1,04	-0,94	-1,03	-0,81	0,05	-0,56	-0,67	-1,06	-0,95	-0,39
	20-30	-1,17	-0,93	-0,29	-0,30	-0,59	-1,17	<del>-0,6</del> 4	-1,68	-1,08	-1,94	-1,64	-1,27
	30-40	-4,37	-4,43	-2,25	-1,61	-3,22	-3,65	-3,43	-4,43	-4,09	-4,64	-4,63	-2,64
	40-50	-4,47	-3,58	-1,94	-2,44	-3,11	-3,48	-1,28	-3,67	-4,00	-4,61	-4,01	-1,88
	50-60	-2,04	-1,30	-0,87	-0,40	-0,03	-1,27	-0,31	-2,20	-0,52	-1,83	-0,90	-0,54
	60-70	-0,82	-0,18	-1,43	0,01	0,47	0,08	0,24	-0,78	-0,23	0,28	-0,83	-0,24
	70-80	-0,27	1,35	-1,27	-0,70	2,12	-1,68	-0,31	1,76	1,50	1,02	-2,07	0,72

Tabel 18. Verschil van de penetratieweerstanden (MPa) voor blok B, uitgemiddeld per 10 cm, voor en na de diepe bewerking. Sterk negatieve verschillen zijn aangeduid.

Plot	cm-mv\cm	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B6	0-10	-0,26	-0,23	-0,25	-0,12	-0,36	-0,29	-0,45	-0,26	-0,43	-0,15	-0,36	-0,41
5-tand	10-20	-0,31	-0,33	-0,03	-0,66	-0,44	-0,26	-0,06	-0,44	-0,58	-0,24	-0,33	-0,25
	20-30	<del>-0,86</del>	-0,50	-0,22	-1,20	0,73	-0,20	-0,80	-0,50	-0,94	-0,50	-0,37	-0,69
	30-40	-2,99	-3,78	-1,06	-4,32	-4,66	-1,91	-2,92	-4,18	-4,70	-4,16	-2,40	-3,87
	40-50	-4,75	-2,58	C,10	-3,13	-2,91	-0,98	-0,33	-3,03	-3,95	-1,81	-1,16	-2,41
	50-60	-1,70	-0,36	C,55	-0,44	-0,28	0,51	0,59	-0,35	-1,11	0,76	-0,23	0,41
	60-70	-0,06	0,50	-0,04	0,24	-1,02	0,01	0,16	0,30	0,68	1,08	-0,19	1,27
	70-80	-0,54	-0,12	-0,45	0,85	0,09	-0,29	-0,19	-1,03	0,03	0,92	0,41	0,35
B7	0-10	-0,55	-1,27	-1,10	-1,12	-1,10	-1,53	-1,17	-1,04	-1,19	-1,37	-1,15	-1,17
7-tand	10-20	-0,97	-1,65	-0,80	-1,12	-1,66	-1,44	-1,37	-1,51	-0,76	-1,25	-1,48	-1,31
	20-30	-2,04	-3,01	-2,39	-2,80	-3,25	-2,56	-2,07	-2,22	-1,40	-1,61	-2,46	-2,57
	30-40	-3,77	-4,20	-3,03	-3,39	-4,31	-3,91	-2,60	-4,65	-4,01	-3,23	-5,19	-2,54
	40-50	<del>-1,50</del>	-2,74	0,43	<del>-0,15</del>	-3,74	<del>-1,54</del>	<del>-0,85</del>	-2,92	-1, <del>59</del>	-1,21	-2,49	0,47
	50-60	-0,28	0,11	-0,23	-0,38	-1,41	-2,25	-0,15	-0,07	0,85	-0,67	0,44	0,61
	60-70	-0,17	-0,73	-2,34	-0,65	0,09	-1,24	-0,71	1,12	1,82	-0,07	-0,94	-0,03
	70-80	-1,88	-2,04	-1,16	0,86	0,03	-0,57	-0,51	-1,13	2,48	-1,10	-2,35	-0,21
B8	0-10	-0,29	-0,51	-0,39	-0,36	-0,23	-0,16	-0,27	-0,15	-0,24	-0,42	-0,43	-0,16
7-tand	10-20	-0,11	-0,26	0,27	0,29	0,08	0,16	-0,34	0,02	-0,34	-0,20	-0,44	0,06
	20-30	-0,28	<del>-0,93</del>	-0,46	-0,29	-1,06	0,42	-0,30	-0,58	-0, <mark>8</mark> 2	-1, <del>58</del>	-0,45	-1,4 <mark>9</mark>
	30-40	-3,18	-5,04	-4,83	-3,97	-5,46	-2,64	-2,56	-4,35	-3,00	-3,34	-5,23	-3,18
	40-50	-2,30	-4,17	-2,90	1,88	-3,10	-2,61	-3,17	-5,00	-3,16	-2,58	-3,90	-1,35
	50-60	-0,24	-1,47	-0,42	-0,26	-0,19	-0,58	-1,32	-1,12	-0,47	-0,67	0,23	0,05
	60-70	0,59	-1,61	0,22	0,18	-0,56	-0,36	-0,77	-0,18	-0,77	-0,19	-0,22	0,45
	70-80	0,35	-0,06	-0,47	-2,58	0,61	-0,09	-0,08	-0,09	-1,75	0,84	-0,20	0,02

Plot	cm-mv∖cm	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
C3	0-10	0,12	-0,11	0,10	0,36	-0,05	0,04	0,05	-0,11	-0,21	-0,04	0,02	-0,13
7-tand	10-20	0,22	-0,46	-0,43	0,11	-0,32	-0,33	-0,31	-0,44	-0,64	-0,83	-1,17	-0,98
	20-30 🚬	-0,58	-1,60	-1,58	-0,78	-1,10	-0,77	-0,94	-1,43	-1,61	-1,39	-1,32	-1,78
	30-40	-2,66	-4,31	-4,29	-3,45	-3,05	-2,71	-2,83	-5,19	-4,98	-2,91	-4,39	-2,13
	40-50	/	-2,63	-3,60	-2,12	-2,25	-2,88	-2,59	-2,73	-3,23	-1,68	/	-1,86
	50-60 🖵	/	1,69	1,13	0,91	-1,12	-1,42	-0,72	-0,94	-1,48	<del>-0,03</del>	/	-1,20
	60-70	/	0,86	0,29	/	-2,13	-0,71	-0,92	0,32	-1,89	-1,54	/	-1,25
	70-80	/	-1,44	-1,12	/	-0,25	-1,09	-0,76	-0,07	-0,55	-2,27	/	0,87
C4	0-10	-0,99	-1,48	-1,11	-1,41	-1,07	-1,14	-1,37	-0,65	-1,00	-1,04	-1,18	-1,43
7-tand	10-20	-1,98	-1,68	-2,04	-1,55	-1,59	-2,10	-1,65	-1,84	-2,35	-1,41	-2,15	-2,33
	20-30	-2,56	-2,49	-2,62	-2,31	-1,53	-2,42	-2,46	-3,28	-3,59	-2,20	-2,22	-2,47
	30-40	-3,12	-2,30	-3,83	-3,18	-2,21	-2,85	-2,65	-3,25	-4,58	-3,41	-1,17	-3,16
	40-50	/	-0.96	-0.75	-2,81	-1,60	-1,00	-2,01	-1.34	-0.74	-2,07	-0,14	-0.50
	50-60	/	-0,35	-1,82	-0,74	-1,50	-0,46	-0,22	-0,80	0,18	-1,18	-0,57	0,16
	60-70	/	0,86	-0,37	-1,08	-0,99	-1,60	-0,78	-1,07	1,13	-0,06	-0,50	1,60
	70-80	/	0,96	1,42	-0,13	-0,70	-1,97	-1,08	-0,76	0,75	-0,62	-0,90	0,02
C5	0-10	0,03	0,16	0,09	-0,29	-0,21	-0,12	-0,20	-0,08	0,25	-0,28	-0,44	-0,24
3-tand	10-20	-0,13	0,59	-0,46	-0,66	-0,61	-1,10	-0,79	-0,18	-0,03	-0,31	-0,50	-0,59
	20-30	1,48	-0,45	-0,83	-1,40	-1,93	-2,03	-2,09	-1,26	-1 54	-1,65	-1,24	-1,31
	30-40	-4,41	-1,49	-1,08	-4,23	-4,76	-4,76	-5,47	-4,43	-4 18	-3,65	-2,22	-3,86
	40-50	-6,18	-2,24	-1,34	-2,52	-4,01	-4,44	-4,99	-1,53	-1 79	-0,55	-0,87	-4,88
	50-60	-4,58	-1,63	-0,99	0,72	-0,60	-2,14	-0,60	-0,62	0,41	-0,37	-1,76	2,37
	60-70	-1,23	-2,46	-1,15	-0,65	-0,46	-0,36	1,57	-1,59	1,37	-1,33	-2,27	-1,01
	70-80	-1,15	-1,95	-2,66	0,54	-0,55	-1,41	-2,79	-1,09	-0,38	-2,23	-3,71	-2,86

Tabel 19. Verschil van de penetratieweerstanden (MPa) voor blok C, uitgemiddeld per 10 cm, voor en na de diepe bewerking. Sterk negatieve verschillen zijn aangeduid. Soms kon de diepte van 80 cm-mv niet bereikt worden waardoor hier geen waarden van zijn. Deze zijn aangeduid met '/'.

Plot	cm-mv\cm	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
C6	0-10	-0,51	-0,15	0,01	-0,70	-0,53	-0,89	-0,68	-0,35	-0,37	-0,29	-0,55	-0,50
3-tand	10-20	-0,84	-0,42	-0,30	-0,65	-1,03	-1,14	-1,15	-0,87	-0,35	-0,73	-0,87	-0,71
	20-30	-1,89	-0,27	-0,07	-1,07	-1,45	-1,65	-1,14	-0,44	-0,16	-0,78	-1,22	-1,17
	30-40	-3,46	1,72	0,58	-1,28	-2,75	-3,10	-2,18	-0,56	-1,15	-1,16	-0,47	-2,22
	40-50	-2,69	0,27	-0,14	-1,01	-2,26	-3,48	-2,26	0,69	-0,94	-1,44	-0,16	-3,19
	50-60	-0,95	0,10	-0,49	-1,35	-0,59	-1,14	-0,89	0,79	-0,57	-1,96	-0,11	-0,62
	60-70	-0,32	1,26	-0,59	-0,60	-0,33	0,59	0,62	0,13	-0,40	-1,78	-0,38	-0,02
	70-80	-1,09	0,90	-0,10	-1,60	0,09	-1,35	1,19	-0,15	-0,63	0,74	0,36	0,71
C7	0-10	-0,98	-0,87	-0,45	-0,88	-0,95	-0,71	-0,69	-0,80	-1,19	-0,29	0,00	0,35
5-tand	10-20	-1,54	-1,12	-0,49	-0,84	-1,06	-0,97	-0,87	-1,04	-0,57	-0,44	-0,90	-0,28
	20-30	1,77	-1,63	1,30	0,77	-0,83	-1,65	-1,70	-1,50	-1,43	-1,09	-1,63	-0 <u>.</u> 97
	30-40	-2,85	-4,09	-4,41	-2,56	-0,08	-4,42	-4,97	-4,71	-5,12	-3,95	-4,82	-3,03
	40-50	-3,20	-5,23	-4,72	-3,71	-1,67	-4,02	-4,43	-4,04	-3,43	-5,20	-5,43	-3,04
	50-60	-1,07	-2,52	-2,23	-1,88	-1,10	-0,99	-2,03	-2,47	-1,25	-2,58	-3,77	-1,19
	60-70	-0,18	0,14	-0,85	-0,38	-0,65	-0,29	-1,35	-2,79	-1,80	-1,23	-2,22	-0,11
	70-80	-2,05	-0,24	0,52	-0,40	0,27	0,43	-1,49	-1,00	-1,14	-0,08	-0,53	0,07
C8	0-10	-0,40	-0,68	-1,00	-0,29	-0,98	-0,93	-0,92	-0,59	-0,83	-1,00	-1,03	-0,94
5-tand	10-20	-1,45	-1,23	-1,64	-0,71	-1,51	-1,07	-0,81	-0,78	-0,83	-1,35	-1,23	-1,12
	20-30	-1,10	-2,28	-1,78	-0,91	-2,50	-1,43	-1,98	-1,67	-1,33	-1,05	-1,66	-1,69
	30-40	-4,09	-5,11	-4,97	-2,53	/	-4,44	-3,70	-2,38	-1,60	-1,22	-3,38	-3,65
	40-50	-1,38	/	-2,69	-3,92	/	-3,10	-3,55	-0,67	0,13	-2,75	-4,80	-1,00
	50-60	0,37	-0,82	0,59	0,28	/	-2,87	-2,85	-2,60	0,18	-1,58	-3,86	0,09
	60-70	-1,68	-1,10	3,08	2,14	/	-1,32	/	-4,48	0,51	-1,98	-1,81	0,73
	70-80	-1,19	-1,31	0,71	2,51	/	0,23	/	-1,55	0,95	-0,13	0,56	1,41