

## *Eindrapport metingen smalspoortrekkers 2018*

**Smalspoortrekkers: vergelijking van de blootstelling aan lichaamstrillingen en schatting van de kantelhoek van zeven merken tijdens een praktijktest**

*Narrow track tractors: comparison of the exposure to whole-body vibrations and rollover angle estimation of seven different makes in a test in practice*

Huub H.E. Oude Vrielink

Rapport 2018-1001



# Colofon

## Over ErgoLab Research B.V.

“Kennis werkt beter”

ErgoLab Research is in 2006 opgericht vanuit Wageningen Universiteit & Research (Wageningen U&R) en heeft als doelen om specialistische wetenschap, kennis en ervaring met onderzoek, advies en coaching toe te passen, verstandig en efficiënt werken te bevorderen door het leveren van “evidence-based” kwaliteit, en kennis en uitkomsten bij de klant naar binnen te dragen. ErgoLab Research heeft ruim 30 jaar ervaring in toegepast wetenschappelijk onderzoek binnen arbeid en ergonomie.

Op het gebied van blootstelling aan lichaamstrillingen kunnen de volgende bijdragen ook interessant zijn (deze kunnen worden gedownload vanaf <https://www.ergolabresearch.eu>):

- Multidisciplinaire Richtlijn. Vermindering van blootstelling aan lichaamstrillingen om rugklachten te voorkómen (2014).
- Comparison of high-power agricultural tractors: effect of whole-body vibration exposure during a standardized test in practice (2012).
- Exposure to whole-body vibration of drivers of state-of-the-art self-propelled wide area rotary mowers during mowing of public green areas in practice (2014).

---

Title	Smalspoortrekkers: vergelijking van de blootstelling aan lichaamstrillingen en schatting van de kantelhoek van zeven trekkermerken tijdens een praktijktest (met Engelstalige samenvatting) Narrow track tractors: comparison of the exposure to whole-body vibrations and rollover angle estimation of seven different makes in a test in practice (in Dutch with summary and figures in English)
Author(s)	Huub H.E. Oude Vrielink
Report number	2018-1001
ISBN-number	
Date of publication	Oktober 2018
Confidentiality	Dit rapport kan worden gedownload voor eigen gebruik vanaf de website van ErgoLab Research: <a href="https://www.ergolabresearch.eu">https://www.ergolabresearch.eu</a>
Project code	
Price	-
Publisher	ErgoLab Research B.V. Alexanderweg 56 NL-6721 HH Bennekom
Telephone	+31 6 140 242 14
E-mail	<a href="mailto:huub.oudevrielink@ergolabresearch.eu">huub.oudevrielink@ergolabresearch.eu</a>
Internet	<a href="http://www.ergolabresearch.eu">www.ergolabresearch.eu</a>

© 2018 ErgoLab Research B.V.

All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

## Samenvatting

Smalspoortrekkers worden in de agrarische sector en het groenonderhoud gebruikt daar waar de ruimte beperkt is. De compacte bouw kan de oorzaak zijn van instabiliteit, zoals versnellingen waaraan de chauffeur wordt blootgesteld en de neiging tot kantelen bij werken op een helling. In dit rapport zijn zeven verschillende merken smalspoortrekkers vergeleken op de blootstelling aan lichaamstrillingen van de chauffeur en is een schatting gemaakt van de hoek waaronder de trekkers zijwaarts zouden gaan kantelen. Tevens is gekeken naar het effect op de lichaams-trillingen van voorasvering en het monteren van een speciale lage-drukband: PneuTrac.

De testen zijn uitgevoerd met drie chauffeurs op een vast parcours, bestaande uit een hobbelig, onverhard pad en een relatief vlakke grasstrook. De verschillende trekkermerken waren Case IH, Claas, Kubota, Deutz-Fahr, John Deere, Fendt en New Holland. Iedere chauffeur reed twee keer iedere trekker over hetzelfde parcours bij twee rijsnelheden (7-8 en 13-14 km/uur). Trillingsmetingen zijn uitgevoerd in drie richtingen, op en onder de stoel, en geanalyseerd volgens ISO-richtlijnen. De kantelhoek is benaderd door de verticale lijn door het massamiddelpunt van elke trekker te bepalen, met de trekker horizontaal en onder een hellingshoek, gevolgd door een modelberekening.

De trillingsblootstelling tijdens het rijden op een smalspoortrekker blijkt in zijwaartse richting het hoogst. Deze trillingsrichting bepaalt dan ook de maximale werkduur op een werkdag. Bij lage rijsnelheid bedroeg de blootstelling in de zijwaartse richting  $0.70 \text{ m/s}^2$  (mediane waarde over alle trekkers, chauffeurs en typen ondergrond; spreiding:  $0.55\text{-}0.85 \text{ m/s}^2$ ), bij hoge rijsnelheid was dit  $0.83 \text{ m/s}^2$  ( $0.47\text{-}1.06 \text{ m/s}^2$ ). Ter vergelijking: de waarden in voor-achterwaarts richting bedroegen  $0.32 \text{ m/s}^2$  ( $0.21\text{-}0.41 \text{ m/s}^2$ , lage rijsnelheid) en  $0.48 \text{ m/s}^2$  ( $0.25\text{-}0.72 \text{ m/s}^2$ , hoge rijsnelheid) en in verticale richting  $0.46 \text{ m/s}^2$  ( $0.35\text{-}0.70 \text{ m/s}^2$ , lage rijsnelheid) en  $0.77 \text{ m/s}^2$  ( $0.44\text{-}1.51 \text{ m/s}^2$ , hoge rijsnelheid). De Deutz-Fahr trekker scoorde voor alle trillingsrichtingen het meest gunstig: mediane waarden bij hoge rijsnelheid van  $0.57 \text{ m/s}^2$  voor zijwaartse trillingen en  $0.55 \text{ m/s}^2$  (verticaal). Indien de omstandigheden van de test als representatief worden uitgelegd voor de praktijk, dan betekenen de gemeten blootstellingen dat maximale rijtijden op een smalspoortrekker variëren tussen 2.0 en 5.8 uur per werkdag. Opvallend was dat voor alle trekkers de gemeten trilling óp de stoel in voor-achterwaartse en zijwaartse richtingen groter was dan gemeten aan het chassis onder de stoel. Voorasvering en het monteren van PneuTrac banden (deze laatste in vergelijking met conventionele banden op lage bandenspanning) bleken beide geen effect te hebben op de blootstelling aan lichaamstrillingen. Bij de kantelhoekbepaling bleek de Kubota smalspoortrekker het meest stabiel, vooral vanwege de relatief lage ligging van het massazwaartepunt. Gegeven de aannames bij de berekening wordt voor deze trekker een kantelhoek van  $31^\circ$  geschat.

De conclusie is dat smalspoortrekkers een hogere zijwaartse instabiliteit kennen ten opzichte van de normale landbouwtrekkers. Tevens worden grote verschillen geconstateerd tussen de trekkermerken, zowel wat blootstelling aan lichaamstrillingen als kantelhoek betreft. Een aanbeveling aan alle fabrikanten is in te zetten op betere trillingsisolatie van de stoel in zijwaartse richting, dit het het oog op het verminderen van de trillingsblootstelling.

*Kernwoorden:* lichaamstrillingen, WBV, blootstelling, agrarisch, trekkerwerk, banden, voorasvering, chauffeur, vering, rijsnelheid, rijoppervlak, ISO-2631, SEAT, schokken, kantelen, kantelhoek.

## Summary

Narrow width tractors are used in the agricultural sector and the maintenance of public green spaces, in situations when space is limited. The compact construction may result in instability. One may think of accelerations to which the driver is exposed, or of the tendency to roll over when working on a slope. In this report, seven different makes of narrow width tractors were compared for whole-body vibration (WBV) exposure of the driver. It was also investigated whether the presence of a front axle suspension or the mounting of a new type of low-pressure tires (PneuTrac) has an effect on WBV exposure. Finally, an estimate was made of the angle at which the tractors would demonstrate a rollover.

The tests were performed with three drivers on a fixed track, which consisted of a bumpy, unpaved path and a relatively flat grass strip. The different tractor brands involved were Case IH, Claas, Kubota, Deutz-Fahr, John Deere, Fendt and New Holland. Every driver drove each tractor on the track mentioned twice at two different speeds (7-8 and 13-14 km/h). Vibration measurements were made in three directions, on and below the seat, and were analyzed, all according to ISO guidelines. The rollover angle was approximated by first determining the vertical lines through the centre of mass in two situations, namely the tractor in horizontal and inclined position, and then performing a model calculation.

The vibration exposure while driving with a narrow width tractor appears to be the highest in the lateral direction. Hence, this vibration axis determines the maximum working time on a working day. At low driving speed the exposure to lateral WBV was  $0.70 \text{ m/s}^2$  (median value over all tractors, drivers and driving surface; range:  $0.55\text{-}0.85 \text{ m/s}^2$ ), at high driving speed this was  $0.83 \text{ m/s}^2$  ( $0.47\text{-}1.06 \text{ m/s}^2$ ). To compare: the values in the fore-aft direction were  $0.32 \text{ m/s}^2$  ( $0.21\text{-}0.41 \text{ m/s}^2$ , low driving speed) and  $0.48 \text{ m/s}^2$  ( $0.25\text{-}0.72 \text{ m/s}^2$ , high driving speed) and in the vertical direction  $0.46 \text{ m/s}^2$  ( $0.35\text{-}0.70 \text{ m/s}^2$ , low driving speed) and  $0.77 \text{ m/s}^2$  ( $0.44\text{-}1.51 \text{ m/s}^2$ , high driving speed). The Deutz-Fahr tractor appeared to have the lowest exposure for all vibration axes: median values at high driving speed were  $0.57 \text{ m/s}^2$  for lateral vibrations and  $0.55 \text{ m/s}^2$  (vertically). If the conditions of the test are interpreted as representative for those in practice, the exposure values measured indicate that maximum driving times on a narrow width tractor vary between 2.0 and 5.8 hours per working day. It was striking that for all tractors the measured vibration on the seat in fore-aft and lateral directions were greater than measured at the cabin floor. Front axle suspension and the fitting of PneuTrac tires (the latter were compared to conventional tires at comparably low pressure) were both found to have no effect on the WBV exposure. The Kubota narrow-track tractor was found to be the most stable at the rollover angle estimation, mainly because of the relatively low location of the centre of mass. Given that the calculation is done under various assumptions, a rollover angle of  $31^\circ$  is estimated for this tractor.

The conclusion is that narrow width tractors have a higher lateral instability than conventional agricultural tractors. Great differences are observed between the tractor brands, both in terms of whole-body vibration exposure and rollover angle. A recommendation to all manufacturers is to improve the vibration isolation of the seat in the lateral direction, this in order to reduce vibration exposure.

*Keywords:* whole body vibration, WBV, exposure, agriculture, tractor work, tractor driver, tyres, front axle suspension, driving speed, road surface, ISO-2631-1, ISO-2631-5, SEAT, repetitive shocks, rollover angle.

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Summary</b>	<b>4</b>
<b>Inhoud</b>	<b>5</b>
<b>Met dank</b>	<b>6</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2 Methoden, technieken en procedure</b>	<b>9</b>
2.1 Chauffeurs	9
2.2 Trekkers	9
2.3 Locatie en uitvoering van de trillingsmetingen	11
2.4 Trillingen: meetinstrumentarium en procedure	12
2.5 Trillingen: dataverwerking, interpretatie en presentatie	13
2.5.1 Dataverwerking	13
2.5.2 Interpretatie van de gemeten waarden naar dagelijkse blootstelling	16
2.5.3 Presentatie van de data en statistiek	18
2.6 Kantelhoek: opstelling, metingen en dataverwerking	18
<b>3 Resultaten en bespreking</b>	<b>23</b>
3.1 Typisch patroon van de trillingsmetingen	23
3.2 Effecten van rijsnelheid, ondergrond en chauffeurs	24
3.3 Gerealiseerde rijsnelheid	25
3.4 Verschillen tussen de trekkers	26
3.4.1 Standaard configuratie	26
3.4.2 Voorasvering	29
3.4.3 PneuTrac banden	29
3.5 Interpretatie naar een werkdag	30
3.6 Kantelhoek	31
<b>4 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>35</b>
<b>Referenties</b>	<b>37</b>
<b>Bijlage A – Meetwaarden van de blootstelling aan lichaamstrillingen en schokken</b>	<b>39</b>
<b>Bijlage B – De geteste trekkers en configuratie</b>	<b>43</b>
<b>Bijlage C – Frequentiespectra</b>	<b>45</b>

## Met dank

De in dit rapport weergegeven testresultaten zouden niet tot stand zijn gekomen zonder de welwillende medewerking van diverse personen en bedrijven. We willen graag **hartelijk dank** zeggen aan:

- het vakblad *Trekker* als onderdeel van *Reed Business* voor het financieel mogelijk maken van de uitgevoerde testen;
- de drie chauffeurs Bob, Bas en Bernie voor het steeds maar weer rijden over het parcours met de vastgestelde rij snelheden, en het delen van hun trekkerexpertise;
- Kuypers Graszoden te Biezenmortel, voor het beschikbaar stellen van de hal bij de voorbereidingen van de metingen en het uitvoeren van de tests ter bepaling van de kantelhoek, en met speciale dank aan John voor zijn niet aflatende hulp, advies en informatie over het gebruik van smalspoortrekkers in de praktijk;
- Boomkwekerij Udenhout voor het beschikbaar stellen van het testparcours voor de trillingsmetingen;
- De fabrikanten en leveranciers van de smalspoortrekkers voor het beschikbaar stellen en rijklaar maken van hun machines: Case IH, Claas, Deutz-Fahr, Fendt, John Deere, Kubota, New Holland;
- De fabrikant Trelleborg voor het leveren van banden, het beschikbaar stellen van de PneuTrac banden, en het uitlenen van een weegplaat en verhogingen voor de test van de kantelhoek.

# 1 Inleiding

Smalspoortrekkers (“narrow width tractors” of “narrow row tractors” of “narrow track tractors” of ook wel “narrow tractors” of “orchard / vineyard tractors” genoemd) zijn trekkers met een relatief geringe spoorbreedte: rond 1 meter, gemeten vanuit het loopvlak van de achterbanden. Ze worden binnen Nederland vooral ingezet in de fruit- en boomteelt en het groenonderhoud. In het buitenland worden ze ook toegepast in de druiventeelt en op andere plaatsen waar de ruimte beperkt is. De belangrijkste reden van gebruik is dat ze, vanwege de beperkte breedte, zeer geschikt zijn om tussen de dicht opeenstaande rijen van de aanplant door te rijden. Daarnaast zijn ze zeer wendbaar, hebben een korte draaicirkel en gaan dus effectief om met de beschikbare ruimte.

Rijden op een trekker maakt dat de chauffeur wordt blootgesteld aan lichaamstrillingen. Indien de chauffeur een werknemer is, wordt deze wettelijk beschermd tegen een te hoge blootstelling (zie: EU, 2002). Kortweg betekent deze bescherming het volgende: bij een blootstelling over een willekeurige werkdag van meer dan de zogenoemde actiewaarde ( $0.5 \text{ m/s}^3$ ) moeten in de (nabije) toekomst maatregelen volgen om de blootstelling naar onder die waarde te brengen. Dat kan op verschillende manieren, o.a. via technische maatregelen (bronaanpak) maar ook door de werkduur te verkorten, dus via een vermindering van de blootstellingsduur. Bij een blootstelling over een willekeurige werkdag van meer dan de grenswaarde (deze is  $1.15 \text{ m/s}^3$ ) moeten onmiddellijk maatregelen volgen om de blootstelling naar onder die waarde te brengen. In de praktijk betekent dit voor de betrokken persoon meestal het stoppen met de werkzaamheden voor die dag.

De hoogte van de blootstelling bij het rijden op een smalspoortrekker hangt van meerdere factoren af. Allereerst natuurlijk van de trekker zelf, waarbij de fabrikant wat betreft bouw en technische voorzieningen diverse mogelijkheden heeft om de blootstelling van de chauffeur bij normaal gebruik te beperken (zie bijvoorbeeld Oude Vrielink, 2009 of 2012, voor gewone landbouwtrekkers). Daarnaast zijn er diverse externe factoren. De belangrijkste hiervan zijn de mate van ongelijkheid van de ondergrond, de rijsnelheid, het al dan niet rijden met externe belading (aanhanger, spuitboom, etc.) en de massa van de trekker (zie bijvoorbeeld Oude Vrielink, 2007 of 2012). Tot slot spelen ook rijgedrag en lichaamsgewicht van de chauffeur een rol.

Vanwege de compacte bouw – dat wil zeggen: smalle spoorbreedte in de orde van 1 m en verkorte wielbasis in de orde van 2 tot 2.5 m – en de lagere massa ten opzichte van de “normale” landbouwtrekkers zijn smalspoortrekkers instabieler bij het rijden over ongelijke ondergrond. Het kan zijn dat daardoor de blootstelling aan lichaamstrillingen van de chauffeur hoger is dan verwacht mag worden indien een normale landbouwtrekker gebruikt zou worden. Aan de andere kant profiteren ook de smalspoortrekkers van technische innovaties die de veiligheid en het comfort van de chauffeur verhogen. Zo zijn de moderne smalspoortrekkers voorzien van een luchtgeveerde stoel, is bij enkele merken een voorasvering geïntroduceerd en kunnen speciale banden voor lage druk worden gemonteerd.

Een ander instabiliteitseffect, vooral het gevolg van de smalle spoorbreedte in combinatie met de normale hoogte, is dat een smalspoortrekker bij het rijden dwars op een helling eerder de neiging heeft zijwaarts om te rollen.

Om te testen in hoeverre moderne smalspoortrekkers zich onderscheiden wat betreft de blootstelling aan lichaamstrillingen van de chauffeur en de neiging om te kantelen heeft TREKKER, het maandblad voor mechanisatie in de landbouw, een vergelijking met 7 verschillende smalspoor-trekkermerken georganiseerd. ErgoLab Research BV is gevraagd de metingen uit te voeren.

Van de zeven trekkers waren er twee voorzien van een (afschakelbare) voorasvering. Één van de trekkers werd tevens voorzien van speciale lage-drukbanden (PneuTrac). De test om de blootstelling aan lichaamstrillingen te evalueren is uitgevoerd op een onverhard pad met de gebruikelijke ongelijkheden als kuilen, rijsporen en hobbels, en op een aansluitende vlakke grasstrook. Hierbij zijn twee verschillende rijnsnelheden gehanteerd: rond 7 en rond 14 km/uur. De hoek van de helling waarbij een trekker zou gaan kantelen is niet als zodanig in de praktijk gemeten, maar is benaderd via een berekening. De data voor deze berekening werden verkregen door middel van een weegplaat onder de wielen, waarbij de trekker zowel horizontaal als in een zijwaarts gekantelde positie stond.

De volgende vragen zijn in de test onderzocht en beantwoord:

- Wat is de blootstelling aan lichaamstrillingen (WBV) tijdens het rijden op elk van de smalspoortrekkers over een qua ondergrond stabiel testparcours, waarbij de omstandigheden vergelijkbaar zijn met die in de praktijk?
- Wat is voor elk van de trekkers en tijdens dezelfde omstandigheden het effect van een verandering van de rijnsnelheid op de blootstelling aan lichaamstrillingen?
- In welke mate is tijdens de tests de stoel effectief? Met ander woorden: in welke mate vermindert de stoel de trillingen die via de cabinebodem worden overgedragen?
- Welk effect op de blootstelling aan lichaamstrillingen hebben het activeren van voorasvering en het monteren van PneuTrac banden?
- Wat betekenen de gemeten trillingsblootstellingen voor de maximale rijtijd per dag indien de omstandigheden van de test als representatief voor de praktijk worden uitgelegd? Hierbij worden de gemeten trillingsblootstellingen vergeleken met de actie- en grenswaarde voor werknemers zoals die voor de dagelijkse blootstelling in de wet zijn vastgelegd (zie bijvoorbeeld Staatsblad, 2005)
- Wat is bij benadering de kantelhoek, dat wil zeggen de hellingshoek van de ondergrond waarbij de trekker juist zijwaarts zou gaan omrollen?

In het navolgende verslag worden de opzet van de metingen en de gevonden resultaten besproken.



## 2 Methoden, technieken en procedure

De metingen van de blootstelling aan lichaamstrillingen werden uitgevoerd tijdens het rijden met de verschillende smalspoortrekkers over een testparcours met twee verschillende rijnsnelheden. De chauffeurs waren twee medewerkers van TREKKER, onderdeel van Reed Business (locatie Doetinchem) en een student van Aeres Hogeschool Dronten. Het testparcours was onderdeel van Boomkwekerij Udenhout, gelegen aan de Hooghoutseweg te Biezenmortel. De testen hadden tot doel om eventuele verschillen in blootstelling te bepalen tussen de verschillende smalspoortrekkers in voor het overige gelijke omstandigheden. Omdat twee van de trekkers voorzien waren van een afschakelbare voorasvering werden deze trekkers tevens getest op het effect op de blootstelling aan lichaamstrillingen van het al dan niet activeren van deze voorasvering. Daarnaast is één van de trekkers gebruikt voor het testen van het effect van PneuTrac banden op de lichaamstrillingen. Bij deze laatste is de vergelijking gemaakt met standaardbanden, waarbij de bandenspanning zoveel mogelijk vergelijkbaar werd gemaakt aan die van de PneuTrac banden. Voor de bepaling van de kantelhoek zijn de werktuigenschuur en het verharde buitenterrein van Kuypers Graszoden aan de Gijzelsestraat te Biezenmortel gebruikt. De metingen vonden plaats in de periode 28 februari 2018 tot 21 maart 2018.

### 2.1 Chauffeurs

Elk van de chauffeurs werd voorafgaand aan de metingen ingelicht over het doel en de risico's van de metingen. Alle chauffeurs deden vrijwillig mee en ze tekenden vooraf een verklaring hiervoor (een zogenoemd "informed consent").

De chauffeurs, alle mannelijk, waren niet bijzonder ervaren in het rijden op een smalspoortrekker: nul tot twee jaar, met de ervaring beperkt tot enkele weken per jaar. Wel hadden de chauffeurs ruime ervaring met het rijden op en bedienen van normale landbouwtrekkers. Tabel 1 toont een samenvatting van de belangrijkste persoonskenmerken van de chauffeurs. Eén van de chauffeurs rapporteerde lage-rugklachten in het jaar voorafgaand aan de test, waarbij deze ten tijde van de test nog speelden. De klachten waren van bescheiden aard, zodat de testritten op een normale wijze konden worden uitgevoerd. De beide andere chauffeurs waren klachtenvrij.

*Tabel 1: persoonskenmerken van de betrokken chauffeurs, weergegeven als gemiddelde (en spreiding tussen baken).*

Aantal chauffeurs (n; geslacht)	Leeftijd (jaren)	Lengte (m)	Lichaamsgewicht (kg)
3; alle mannelijk	28.7 (21-42)	1.87 (1.74-2.01)	83.7 (75-100)

### 2.2 Trekkers

De test werd uitgevoerd met nieuwe trekkers van zeven verschillende merken. De kenmerken van de trekkers zijn vermeld in tabel 2. Een visuele weergave van de trekkers is gegeven in bijlage B. Twee van de trekkers waren voorzien van een (afschakelbare) voorasvering: Deutz-Fahr en Fendt. De werking ervan is voor beide trekkers vergelijkenderwijs getest. Vooraf is gestreefd de trekkers zoveel mogelijk op dezelfde type banden te laten rijden. Dit is niet voor alle trekkers gelukt: vier trekkers reden de test op exact dezelfde type banden, bij twee trekkers weken alleen

Tabel 2: kenmerken van de in de test betrokken smalspoortrekkers (zie toelichting op de voetnoten onder de tabel).

Nr	Merk, type	Bouwjaar	Lege massa <sup>6</sup> (kg)	Power kW (pK)	Banden <sup>1</sup>	As- en cabinevering <sup>2</sup>	Stoel	Stoelvering, richting <sup>3</sup>
1	Case IH 100 Quantum	2017 /2018	3250	69.1 (94.2)	Standaard / PneuTrac / Lage druk	VA: geen; wel vrij pendelen AA: geen CV: geen	COBO SC84- M97/3	X: geen Y: geen Z: lucht
2	Claas 240 ve Nexos	2017 /2018	3030	69.1 (94.1)	Standaard	VA: geen; wel vrij pendelen AA: geen CV: geen	Grammer MSG 93/511 12V	X: geen Y: geen Z: lucht
3	Kubota M5101 Narrow	2017 /2018	2900	72.9 (99.3)	Standaard-2	VA: geen; wel vrij pendelen AA: geen CV: rubber blokken	Grammer MSG 93 12V	X: geen Y: geen Z: lucht
4	Deutz-Fahr 5100 DS	2017 /2018	3070	61.2 (83.4)	Standaard-3	VA: onafhankelijk <sup>4</sup> AA: geen CV: geen	Grammer MSG 93/511 12V	X: geen Y: geen Z: lucht
5	John Deere 5090 GV	2017 /2018	2810	61.3 (83.5)	Standaard	VA: geen; wel vrij pendelen AA: geen CV: geen	Grammer MSG 93/511 12V	X: geen Y: geen Z: lucht
6	Fendt 209 v Vario	2017 /2018	3110	62.5 (85.2)	Standaard-4	VA: pendelend <sup>5</sup> AA: geen CV: geen	Grammer MSG 93/511 12V	X: geen Y: geen Z: lucht
7	New Holland T4 100n	2017 /2018	3320	71.2 (97.0)	Standaard	VA: geen; wel vrij pendelen AA: geen CV: geen	COBO SC84-M97	X: geen Y: geen Z: lucht

<sup>1</sup> Standaard=Trelleborg TM700 260/70 R16 200 kPa (voor), Trelleborg TM700 380/70 R24 180 kPa (achter); Standaard-2=Trelleborg TM700 280/70 R16 200 kPa (voor), Trelleborg TM700 380/70 R24 180 kPa (achter); Standaard-3=Trelleborg TM700 240/70 R16 200 kPa (voor), Trelleborg TM700 360/70 R24 180 kPa (achter); Standaard-4=Michelin X M27 II L R16xM27 200 kPa (voor), Trelleborg TM700 380/70 R24 180 kPa (achter); PneuTrac=Trelleborg PneuTrac 280/70 T18 60 kPa (voor), 480/65 T28 60 kPa (achter); Lage druk=Mitas 280/70 R18 80 kPa (voor), Trelleborg TM 800 480/65 R28 60 kPa (achter).

<sup>2</sup> VA: vooras; AA: achteras; CV: cabinevering .

<sup>3</sup> X: voor-achter; Y: zijwaarts; Z: verticaal.

<sup>4</sup> Beide zijden onafhankelijk. Twee dubbelwerkende hydraulische cilinders. Software-gestuurd, waarin opgenomen o.a. tractie regeling, anti-duik en anti-roll.

<sup>5</sup> Hydraulisch geveerd (olie loopt vertraagd over van de ene zijde naar de andere). Pendelend, één asdeel.

<sup>6</sup> Met volle dieseltank.

de voorbanden af, en bij één trekker zowel voor- als achterbanden. Één trekker, Case IH, is tevens gebruikt voor het testen van het effect van PneuTrac banden op de blootstelling aan lichaamstrillingen. De vergelijking hierbij is gemaakt met standaard banden die op vergelijkbare druk werden gebracht. Alle trekkers waren voorzien van een in de verticale richting luchtgeveerde stoel. De beide horizontale richtingen van de stoel waren onbeweeglijk.

### 2.3 Locatie en uitvoering van de trillingsmetingen

Voor alle metingen van de trillingsblootstelling is steeds hetzelfde testparcours gebruikt. Het betrof een onverhard pad in een boomkwekerij van ongeveer 500 m lang en een aansluitende grasstrook van ongeveer 100 m lengte. Aan het einde van de grasstrook werd gekeerd om het parcours in omgekeerde volgorde af te leggen. De heenweg werd steeds afgelegd met een rijsnelheid van ongeveer 7 km/uur, de terugweg met ongeveer 13-14 km/uur. Het onverharde pad was grotendeels ongelijk, met diverse kuilen en hobbels, en één diepere kuil, waarvoor afgeremd moest worden. Ook werd afgeremd voor de bocht als overgang tussen onverhard pad en grasstrook. De grasstrook was enigszins vlak. De omstandigheden waren tijdens de vergelijking van de zeven trekkers en de meting van het effect van de vooras vering voor alle trekkers constant: het vror en de ondergrond was stevig bevroren. Alleen bij het meten van het effect van de PneuTrac banden was er geen sprake meer van vorst. Om die reden is tijdens diezelfde dag de test met normale banden herhaald, zij het met enigszins afwijkende banden waarbij tevens de luchtdruk in de banden verlaagd was maar wel binnen de richtlijn van de fabrikant bleef (zie tabel 1, “Lage druk” banden). Een overzicht van het parcours en een indruk van de rijondergrond wordt gegeven in figuur 1.

Een enkele test hield het volgende in: vanaf het startpunt werd met lage snelheid ( $\sim 7$  km/u) het



Figure 1: testparcours in vogelvlucht (linksboven; beeld verkregen met behulp van Google Earth; startpunt en keerpunt zijn aangegeven) en enkele indrukken van het oppervlak van het testparcours, dat wil zeggen onverhard pad (rechtsboven en linksonder) en grasstrook (rechtsonder).

parcours gereden (in ongeveer 5 minuten), waarna gekeerd werd en het parcours in omgekeerde richting met hoge snelheid (13-14 km/u) in ongeveer 2'.40" werd afgelegd. Een chauffeur deed deze test twee keer alvorens beide werden herhaald met een tweede chauffeur. Dit gebeurde bij iedere trekker. Er was geen vaste volgorde van de chauffeurs. De metingen om de zeven trekkers te vergelijken werden uitgevoerd met standaard configuratie (d.w.z. de standaard banden) en met de voorasvering "uit" (voor zover instelbaar) en met steeds dezelfde twee chauffeurs. De volgorde van de metingen van de trekkers was gelijk aan die vermeld in tabel 1. Dezelfde chauffeurs deden ook de test van de Deutz-Fahr en Fendt trekkers met de voorasvering aan of uit. Een identieke opzet als bovenbeschreven is daarbij toegepast. Tenslotte werd ook de test met de PneuTrac banden en lage druk banden volgens dezelfde opzet uitgevoerd, alleen met één van de beide chauffeurs en een andere tweede chauffeur.

## 2.4 Trillingen: meetinstrumentarium en procedure

De procedure voor het meten van de blootstelling aan lichaamstrillingen is beschreven in enkele ISO-richtlijnen. Voor de huidige metingen zijn de volgende richtlijnen gevolgd: ISO-2631-1 (1997) en ISO 2631-5 (2004). In aanvulling is richtlijn ISO-8041-1 (2017) toegepast bij de dataverwerking.

Blootstelling aan lichaamstrillingen werd gemeten op de stoelzitting. Daarnaast werden de trillingen van de bodem van de trekkercabine gemeten, direct aan het frame waarmee de stoel op de cabinebodem was vastgezet. Alle trillingen werden geregistreerd langs de drie basicentrische assen X (voor-achter), Y (zijwaarts) en Z (verticaal). Voor de stoelzitting werd een voor dit doel ontworpen Bruel & Kjaer (B&K, Denemarken) triaxiale accelerometer 4322 PE gebruikt. De opnemer werd door middel van Duct-tape vastgezet op de stoelzitting (zie figuur 2, links), zódanig dat de chauffeur precies midden boven de opnemer zat. Trillingen van de stoelbasis werden gemeten met een B&K triaxiale accelerometer 4321, welke stevig aan het frame van de stoel werd vastgezet, gebruik makend van een draadeind ( $\varnothing$  8 mm) en metaalstrook (4 mm dik; zie figuur 2, rechts).

De zes gemeten signalen van de accelerometers werden naar twee versterkers geleid (B&K, Nexus 2692) via afgeschermdde kabels. Deze versterkten en filterden de signalen (high-pass: 1 Hz en 0.1 Hz, voor respectievelijk stoelzitting en stoelbasis; low-pass: 1000 Hz voor beide). Vervolgens werden de signalen elk met 4096 Hz door een laptop computer (PC; Dell Latitude D610, 2.0 GHz) bemonsterd via een 16-bit A/D kaart (National Instruments, DAQ 6036E met BNC 2090). De signalen werden on-line frequentie-gewogen volgens ISO-2631-1 (1997). Zowel het ongewogen trillingssignaal als het frequentie-gewogen signaal werd op het computerscherm getoond, waarbij gebruik werd gemaakt van een in eigen beheer ontwikkeld LabView (v. 8.0, National Instruments, US) computerprogramma, die gebruik maakte van Matlab routines (v. 6.5.1, The Mathworks Inc., US) voor de frequentieweging.

De gehele meetketen werd voor ieder opnemerkanaal steeds de dag voorafgaand aan een meetserie geïjkt met behulp van een geïjkte B&K calibrator 4291 (ijking augustus 2017 door SONOR Kalibratie te Nieuwegein). Tijdens de metingen werd de stroomvoorzorging voor alle apparatuur geleverd door externe 12V accu's.

De precieze rijsnelheid en positie tijdens de metingen werd vastgelegd met behulp van een GPS ontvanger (Garmin GPSmap 62st, Olathe, US), gemonteerd naast de meetcomputer. Positiedata werden met een frequentie van 1 Hz opgeslagen. Voorafgaand aan elke meting werd de interne



*Figuur 2: illustratie van de bevestiging van de accelerometers op de stoel (linksboven) en aan de stoelbasis (rechtsboven). Tevens is geïllustreerd hoe de meetinstrumenten in een standaard kist achter de trekker worden meegevoerd (links onder).*

klok van de computer met de GPS ontvanger gesynchroniseerd (Mapsource software). GPS data werden na elke meetserie van een trekker overgebracht naar de laptop computer.

Tot slot werden alle activiteiten van de chauffeurs alsmede hun rijgedrag vastgelegd door middel van een videocamera (JVC Action Cam, GC-XA1 BE), gemonteerd op de voorruit van de trekker, dit met het oog op de analyse achteraf. Op de video werden tevens het start- en eindmoment van een trillingsmeting ingesproken.

## 2.5 Trillingen: dataverwerking, interpretatie en presentatie

### 2.5.1 Dataverwerking

De data werden in verschillende stappen verwerkt. De eerste stap betrof de analyse van de videoregistraties met behulp van Windows Media Player (Microsoft), waarmee de volgende tijdstippen, in uren, minuten en seconden, werden vastgelegd:

- begin- en eindtijdstip van een meting,
- begin- en eindtijdstip van rijden,
- begin- en eindtijdstip van het passeren van de diepe kuil, de overgang tussen pad en gras, en de draai aan het einde van de grasstrook.

Vervolgens werden met hulp van de GPS registraties hieraan toegevoegd:

- begin- en eindtijdstip van het rijden op de doelsnelheid, eveneens met één seconde nauwkeurigheid.

Daarna werden in LabView de gemeten signalen van elk van de zes gemeten kanalen zichtbaar gemaakt van begin- tot eindtijdstippen. Voor elk signaal werden steeds tijdsegmenten

geselecteerd waarbinnen de rijsnelheid van begin tot eind aan de doelsnelheid beantwoordde en er uitsluitend rechtuit werd gereden. Het betekent o.a. dat de kuil en de bocht die de overgang vormde tussen onverharde pad en grasstrook buiten de analyse zijn gehouden. Vervolgens werden de tijdsegmenten visueel gecontroleerd en eventuele vreemde meetwaarden, bijvoorbeeld omdat de chauffeur ging verzitten, werden eveneens buiten de analyse gehouden. Dit betekende dat een tijdsegment werd opgeknipt in meerdere kortere tijdsegmenten. Hierna werd softwarematig met behulp van Matlab ieder tijdsegment omgevormd tot een frequentie-gewogen signaal, volgens ISO-richtlijnen 2631-1 (1997). Bij de frequentieweging is tevens een ISO-2631-1 (1997) voorgeschreven vermenigvuldiging met factor  $k$  uitgevoerd voor zowel de lichaamstrillingen als die gemeten aan de stoelbasis:  $k=1.4$  voor trillingen in de X- en Y-richting,  $k=1.0$  voor trillingen in de Z-richting. Vervolgens is van elk van de frequentie-gewogen signalen een zogenoemd “running RMS”  $a_w(t_0)$  berekend. In onderstaande formule 1 is de berekenwijze weergegeven (met  $t_0$  het moment van observeren):

$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) \cdot d(t)} \quad (1)$$

waarin  $a_w(t)$  de instantane versnellingswaarde (in  $m/s^2$ ) van het frequentie-gewogen trillingssignaal op tijdstip  $t$  en  $\tau$  de integratietijd. Deze laatste werd constant gehouden op 1 s, zoals aanbevolen in ISO-2631-1 (1997).

Als derde stap werd van ieder frequentie-gewogen trillingssignaal voor ieder meetkanaal ( $n=6$ ) de root-mean-square (RMS) trillingswaarde ( $a_{wki}$  in  $m/s^2$ ) berekend volgens:

$$a_{wki} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a_{wki}^2(t) \cdot d(t)} \quad (2)$$

waarin  $a_{wki}(t)$  de instantane waarde in de trillingsrichting  $k$  (met  $k=X, Y$  of  $Z$ ) van het gewogen trillingssignaal op tijdstip  $t$  is,  $T$  de lengte van het tijdsegment in seconden, en met  $i$  de verschillende tijdsegmenten worden aangeduid (zie hieronder).

Indien de uitkomst van voorgaande formule werden samengevoegd met die van één of meerdere andere tijdsegmenten, bijvoorbeeld omdat deze betrekking had(den) op eenzelfde experimentele situatie (dit is: dezelfde chauffeur, ondergrond, rijsnelheid, banden en voorasvering), dan werd dit als volgt gedaan:

$$a_{wk} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{wki}^2 T_i} \quad (3)$$

met  $a_{wk}$  de gewogen trillingsblootstelling van alle tijdsegmenten samen voor de trillingsrichting  $k$  (met  $k = X, Y$  of  $Z$ ),  $a_{wki}$  de gewogen trillingsblootstelling van elk van de tijdsegmenten  $i$ ,  $T_i$  de duur van elk gemeten tijdsegment  $i$ ,  $n$  het aantal bij elkaar te nemen tijdsegmenten, en  $T_0$  de duur van de samengevoegde tijdsegmenten samen.

Lidstaten van de Europese Unie mogen op grond van de richtlijn (EU, 2002) bij de beoordeling van lichaamstrillingen in plaats van de bovengenoemde RMS waarde ook de dosismaat VDV (vibration dose value, ofwel trillingsdosis waarde, in  $m/s^{1.75}$ ) toepassen. De VDV wordt (en is in dit rapport) als volgt berekend:

$$VDV_{ki} = \sqrt[4]{\int_0^T a_{wki}^4(t) \cdot d(t)} \quad (4)$$

met  $VDV_{ki}$  de VDV waarde voor de trillingsrichting  $k$  van het  $i^e$  tijdsegment met tijdsduur  $T$ .

De VDV waarden van meerdere tijdsegmenten die betrekking hadden op eenzelfde experimentele situatie werden als volgt samengevoegd:

$$VDV_k = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n VDV_{ki}^4} \quad (5)$$

waarin  $VDV_k$  de VDV waarde van de meting van alle tijdsegmenten samen voor de trillingsrichting  $k$  (met  $k = X, Y$  of  $Z$ ) en  $n$  het aantal tijdsegmenten.

Daarnaast is de SEAT waarde berekend ter beoordeling van de effectiviteit van de stoel. SEAT staat voor “seat effective amplitude transmissibility” (Paddan & Griffin, 2002).  $SEAT_{rmsk}$  is de procentuele ratio van de frequentie-gewogen RMS versnellingswaarde op de zitting in één van de trillingsrichtingen  $a_{wk}$  en de frequentie-gewogen RMS versnellingswaarde van de stoelbasis in diezelfde richting  $a_{sbk}$ :

$$SEAT_{rmsk} = \frac{a_{wk}}{a_{sbk}} \times 100\% \quad (6)$$

Het effect van meervoudige schokken is beoordeeld op basis van ISO 2631-5 (2004). De stappen zijn beschreven in deze norm en worden hieronder kort uiteengezet. De berekeningen zijn gemaakt met behulp van Matlab. Uit pieken in de versnellingsrespons van de wervelkolom wordt een versnellingsdosis  $D_{ki}$  (in  $m/s^2$ ) berekend voor elk van de drie versnellingsrichtingen  $k=X, Y$  of  $Z$ , volgens:

$$D_{ki} = \left[ \sum_j A_{jki}^6 \right]^{1/6} \quad (7)$$

waarin  $A_{jki}$  de piekversnelling van de  $j^e$  piek in de versnellingsrespons van het  $i^e$  tijdsegment.

De versnellingsdosis van meerdere signalen van eenzelfde experimentele situatie werden samengevoegd tot  $D_k$  volgens:

$$D_k = \left[ \sum_{i=1}^n D_{ki}^6 \frac{t_i}{t_t} \right]^{1/6} \quad (8)$$

waarin  $D_{ki}$  de versnellingsdosis van het  $i^e$  tijdsegment met duur  $t_i$  en  $t_t$  de totale duur is van de samengenomen tijdsegmenten.

De dagelijkse versnellingsdosis  $D_{kd}$  wordt vervolgens berekend door de volgens formule 8 bepaalde  $D_k$  te schalen naar de normale dagelijkse blootstellingstijd,

$$D_{kd} = D_k \times \left( \frac{t_d}{t_m} \right)^{1/6} \quad (9)$$

waarin  $t_d$  de duur van de normale dagelijkse blootstelling en  $t_m$  de duur van de meting is.

Om het gezondheidseffect te kunnen schatten wordt de bovengenoemde maat voor versnellingsdosis omgerekend naar een equivalent van de statische compressie dosis  $S_{ed}$  (in MPa) volgens

$$S_{ed} = \left[ \sum_{k=x,y,z} (m_k D_{kd})^6 \right]^{1/6} \quad (10)$$

waarin de volgende waarden voor  $m_k$  worden aanbevolen voor de drie trillingsrichtingen:  $m_x = 0.015 \text{ MPa} / (\text{m/s}^2)$ ,  $m_y = 0.035 \text{ MPa} / (\text{m/s}^2)$ ,  $m_z = 0.032 \text{ MPa} / (\text{m/s}^2)$ .

In de ISO richtlijn wordt aangegeven dat bij een dagelijkse blootstelling gedurende het gehele jaar (i.e. 240 dagen/jaar) de kans op rugschade in een werkend leven (45 jaren) laag is indien de  $S_{ed}$  onder 0.5 MPa blijft. Een hoge kans ontstaat bij een  $S_{ed}$  boven 0.8 MPa. Bij een lager aantal blootstellingsdagen worden deze waarden gecorrigeerd en komen de grenzen hoger te liggen: zie de tabel 3 hieronder.

*Tabel 3: Grenzen voor de dagelijkse statische compressie dosis  $S_{ed}$  bij een variabel aantal dagen blootstelling aan schokken per jaar door de verrichte werkzaamheden. De getallen zijn gegeven op basis van ISO-2631-5 (2004).  $S_{ed}$  in MPa. De vermenigvuldigingsfactor is de factor waarmee de  $S_{ed}$ -grenswaarden van een volledig jaar blootstelling (240 dagen) moeten worden vermenigvuldigd.*

Dagen per jaar	240	120	60	30	10	5	2	1
Vermenigvuldigingsfactor	1.00	1.12	1.26	1.41	1.70	1.91	2.22	2.49
<b>Gezondheidsschadekans</b>								
laag: $S_{ed} <$	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2
aanwezig: $S_{ed} <$	0.8	0.9	1.0	1.1	1.4	1.5	1.8	2.0
hoog $S_{ed} >$	0.8	0.9	1.0	1.1	1.4	1.5	1.8	2.0

Tot slot: ISO beveelt aan in de rapportages van metingen tevens melding te maken van de frequentiespectra van de metingen. Enkele voorbeelden van ruwe dataseries van ongewogen trillingsmetingen gemeten aan de stoelbasis met de bijbehorende frequentiespectra zijn weergegeven in de bijlage C. De frequentiespectra zijn een weergave van het rechtuit rijden over het onverharde pad bij 13-14 km/uur.

In de tabel 4 zijn de belangrijkste uitkomstvariabelen van de trillingsmetingen kort samengevat.

### 2.5.2 Interpretatie van de gemeten waarden naar dagelijkse blootstelling

Voor de berekening van de dagelijkse blootstelling schrijft de wet voor dat de trillingsrichting met de hoogste blootstelling de maximale werkduur bepaalt, gegeven een willekeurige werkdag. In een interview met een ervaren werknemer van een boomkwekerij is gevraagd naar de normale dagelijkse blootstelling. Daaruit kwam naar voren dat 4 uur per dag rijden op een smalspoortrekker normaal is, waarbij in piekperioden het ook wel kan voorkomen dat op werkdagen meer dan 10 uur gereden wordt. In dit rapport is echter gerekend met een dagelijkse blootstellingsduur van 4 uur. Ongeveer de helft van de tijd (2 uur/dag) wordt besteed aan transport (hoge snelheid), de andere helft aan spuiten, maaien, watervoorziening en grondwerk bij lage snelheid. Om voor iedere trekker de dagelijkse blootstelling te berekenen zijn allereerst de



Tabel 4: Uitleg van de belangrijkste uitkomstvariabelen van de trillingsmetingen in het huidige rapport

$a_w$	De <u>trillingsblootstelling</u> wordt uitgedrukt in de variabele $a_w$ , met als eenheid $m/s^2$ , en is de gewogen RMS versnelling over de meetperiode. Voor de beoordeling van de trillingsblootstelling wordt de hoogste waarde van de drie gemeten assen gebruikt. De wetgever geeft aan dat bij een waarde $\geq 0.5 m/s^2$ over een 8-urige werkdag maatregelen moeten volgen. De weging is frequentieafhankelijk, en door ISO gedefinieerd.
SEAT	Seat Effective Amplitude Transmissibility, ofwel de gewogen RMS trillingswaarde gemeten op de stoel als percentage van die gemeten aan de stoelbasis. Het is een <u>maat voor de effectiviteit van de stoeldemping</u> . Een waarde 100% geeft aan dat de stoel de trillingen gewoon doorgeeft. Bij een waarde onder 100% treedt er vermindering van de trillingsblootstelling op.
VDV	Vibration Dose Value, ofwel <u>trillingsblootstelling</u> berekend als vierde macht van de gemeten versnelling over de meetperiode. De VDV is meer gevoelig voor pieken in de blootstelling en heeft als eenheid $m/s^{1.75}$ . De EU landen hebben de keuze de gezondheidkundige grenzen uit te drukken als $a_w$ of als VDV. Voor de VDV geldt als actiewaarde $9.1 m/s^{1.75}$ en als grenswaarde $21 m/s^{1.75}$ .
D	Versnellingsdosis volgens ISO-2631-5 (2004) in $m/s^2$ . Het is een hulpmiddel bij de evaluatie van de kans op gezondheidsschade door schokken.
$S_{ed}$	Equivalent van de dagelijkse statische compressie dosis volgens ISO-2631-5 (2004), in MPa, als <u>hulpmiddel bij het beoordelen van schokken</u> . Bij een dagelijkse blootstelling gedurende het gehele jaar (i.e. 240 dagen / jaar) wordt in deze richtlijn aangegeven dat de kans op rugschade laag is indien de $S_{ed}$ onder 0.5 MPa blijft. Een hoge kans ontstaat bij een $S_{ed}$ boven 0.8 MPa. Voor een kleiner aantal dagen gelden hogere grenzen. De grenzen gaan uit van een blootstelling gedurende een werkend leven (i.e. 45 jaren).
Tijdsduur	Lengte van de meetperiode (in s), na correctie voor de momenten van stilstand, verstoringen van de normale taakuitvoering, en van geen contact met de stoelzitting.

uitkomsten van beide chauffeurs voor eenzelfde experimentele situatie samengevoegd volgens formule 3. Op dezelfde wijze is het rijden over het onverhard pad en de grasstrook samengenomen. Let wel: dit laatste betekent dat aangenomen wordt dat het relatief lange en ongelijke onverharde pad en de relatief korte maar vlakke grasstrook de verhouding in de rijomstandigheden in de praktijk weerspiegelen. Vervolgens is de blootstelling berekend indien dagelijks twee uur met hoge snelheid en twee uur met lage snelheid zou worden gereden, Dit is gedaan volgens:

$$a_{wk} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{wki}^2 T_i} \quad (11)$$

met  $a_{wk}$  de gewogen trillingsblootstelling voor de vier uur voor de trillingsrichting  $k$  (met  $k = X, Y$  of  $Z$ ),  $a_{wki}$  de gewogen trillingsblootstelling van elk van de taakonderdelen  $i$  (langzaam en snel rijden),  $T_i$  de duur van elk gemeten taakonderdeel  $i$  (beide twee uur), en  $T_0$  de duur van alle taakonderdelen samen (vier uur).

Vervolgens werd de berekende blootstelling voor de gehele taak geschaald naar een werkdag van 8 uur, waarmee de dagelijkse blootstelling werd verkregen, volgens

$$a_{wk(eq,dag)} = \sqrt{\frac{a_{wk}^2 T_i}{T_d}} \quad (12)$$

met  $a_{\text{wk(eq,dag)}}$  de dagelijkse blootstelling bij een normale werkdag,  $T_i$  de duur van de blootstelling op een werkdag (4 uur),  $T_d$  de totale lengte van een werkdag (8 uur) en  $k$  de trillingsrichting X, Y of Z.

Een trekker wordt zo'n 600 uur per jaar gebruikt, dus gemiddeld zijn er op jaarbasis zo'n 150 blootstellingsdagen. Voor het schatten van het gezondheidsrisico door schokken zijn daarom de grenzen van tabel 3 genomen die vallen onder minimaal 120 dagen blootstelling per jaar: 0.6 en 0.9 MPa. Voor de schatting van de dagelijkse blootstelling aan schokken zijn de beide meetuitkomsten  $D_k$  voor langzaam en snel rijden samen genomen volgens dezelfde formule 8, en evenals bovenstaand aannemend dat beide gelijkelijk (voor de helft in tijd) aan de blootstelling bijdragen. Vervolgens is de berekende "gemiddelde"  $D_k$  geschaald naar de dagelijkse blootstelling (formule 9), daarbij een totale dagelijkse rijtijd van 4 uur (=14400 seconden) aannemend.

### 2.5.3 Presentatie van de data en statistiek

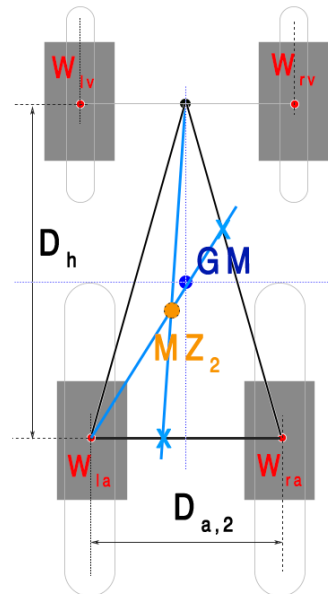
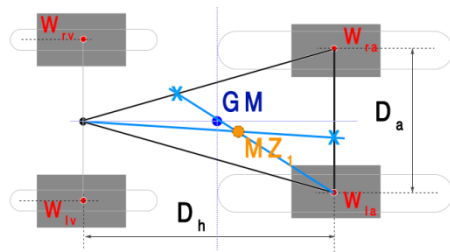
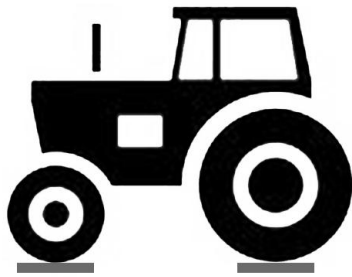
De resultaten zijn weergegeven in tabelvorm en als boxplots en tijdseries. Een boxplot geeft mediane (middelste) waarde en interkwartielen als box (de box omvat dus 50% van de waarnemingen) en uiterste waarden als "harken" boven en onder de box. Soms ligt een enkele waarde zó ver buiten de groep andere waarnemingen dat deze apart is aangegeven buiten de harken, de zogenoemde "verre waarden". In de boxplots is door middel van een onderbroken lijn tevens het niveau van actiewaarde voor een acht-urige werkdag getoond (dit is:  $0.5 \text{ m/s}^2$ , de waarde voor de dagelijkse blootstelling  $a_{\text{wk(eq,dag)}}$  waarboven verdere actie gewenst is om de blootstelling tot onder deze waarde terug te brengen).

Statistische toetsing is gedaan met behulp van IBM SPSS Statistics (v.21.0). Omdat bij het testen van verschillen tussen de trekkers enkel maar twee chauffeurs betrokken waren – elk completeerde twee herhalingen van dezelfde experimentele situatie – is geen statistische toetsing gedaan om verschillen tussen de trekkers weer te geven. Immers, er was slechts sprake van twee onafhankelijke bepalingen. Wel konden verschillen worden getoetst tussen de chauffeurs, herhalingen, ondergronden en rij snelheden. De mediane verschillen, met elke trekkeruitkomst als onafhankelijke bepaling, werden getoetst met behulp van de Wilcoxon's matched-pairs signed-ranks test. Voor een significant verschil werd een p-waarde van 0.05 aangehouden.

## 2.6 Kantelhoek: opstelling, metingen en dataverwerking

De berekening van de kantelhoek, dat wil zeggen de hellingshoek waaronder een trekker zijwaarts gekanteld staat waarbij hij juist dreigt opzij te rollen, is als volgt bepaald:

Als eerste is een verticale lijn, dat wil zeggen de loodlijn door het vlak waarop een trekker in horizontale stand staat, bepaald die juist door het massazwaartepunt gaat. Het massazwaartepunt is het middelpunt van de massa van de trekker. De bepaling is gedaan door het gewicht van de trekker midden onder elk van de vier steunpunten – de banden – te bepalen met behulp van een weegplaat (HM Scales, type WAWL, nauwkeurigheid 10 kg; zie figuur 3, linksboven voor één van de vier meetsituaties). De loodlijn levert de ligging van het massazwaartepunt in het horizontale vlak, echter niet de verticale hoogte ervan. De ligging werd uitgedrukt als afwijking van het geometrisch midden van de trekker. Met dit laatste wordt bedoeld het kruispunt van de lijn die het midden van de achter- en vooras verbindt en de lijn midden tussen en parallel aan die beide assen: zie figuur 1 linksonder.



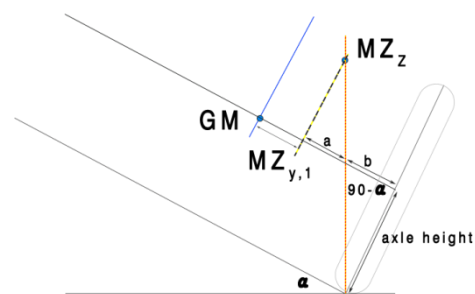
Figuur 3: schematische weergave van de metingen ter bepaling van de ligging van het massazwaartepunt van een trekker: a (linker deel) trekker horizontaal, b (rechter deel) trekker gekanteld.  $W$  = gewicht gemeten onder de betreffende band (rv=rechts voor, lv=links voor, ra=rechts achter, la=links achter),  $D_h$ =afstand tussen beide assen,  $D_a$ =wielaafstand (spoorbreedte) achter,  $D_{a,2}$ =horizontale projectie van de spoorbreedte in gekantelde situatie, GM=geometrisch midden in het horizontale vlak, MZ1=ligging van het massazwaartepunt in het horizontale vlak zoals bepaald op vlakke ondergrond, MZ2=idem maar nu op een helling.

Alle trekkers waren voorzien van een in het midden scharnierende, pendelende vooras. Dit betekende dat de gewichtsverdeling over de beide voorwielen ongeveer gelijk moet zijn, wat ook uit de metingen bleek: het maximale verschil tussen de voorwielen was 20 kg, daarmee twee keer de onnauwkeurigheid van de weegplaat. Voor het bepalen van de kantelhoek is daarom uitgegaan van een driehoekvormige gewichtsverdeling (zie figuur 3, midden). Hierbij vormen de middens van beide achterbanden (van boven gezien) de steunpunten van de basis van de driehoek en vormt het midden van de vooras (het scharnierpunt) de top van de driehoek. Om de ligging van de loodlijn van het massazwaartepunt te bepalen zijn twee lijnen berekend (zie figuur 3, linksmidden de blauwe lijnen): (1) een lijn vanuit de “top” naar het punt op de achteras waar de gewichtsverdeling links en rechts gelijk was, en (2) een lijn vanuit het midden van het linker achterwiel naar rechtsvoor, waarbij eveneens de gewichtsverdeling tussen middenvoor en rechtsachter gelijk was. De kruising van beide lijnen leverde de coördinaten in het horizontale vlak van de loodlijn van het massazwaartepunt.

Als tweede stap is hetzelfde gedaan waarbij de trekker in lichte mate opzij gekanteld werd, dat wil zeggen met de rechterwielen op een verhoging van 12.1 cm boven het niveau van de weegplaat (zie figuur 3, rechtsboven). In deze situatie is het gewicht bepaald onder alleen de beide linker wielen. Aangenomen werd dat door de kanteling de gewichtsverdeling tussen voorwielen en achterwielen niet veranderde. Dit betekent dat een gemeten toename van het gewicht onder een linkerwiel gelijk gesteld werd aan de afname in gewicht aan de contralaterale zijde. Ook hier leverden de metingen een verticale loodlijn door het massazwaartepunt. Omdat de trekker in de tweede situatie onder een hoek staat, verloopt deze laatste lijn ook onder een hoek ten opzichte van de in de eerste stap bepaalde lijn. De kruising van beide lijnen levert de hoogte van het massazwaartepunt. Hier geldt de volgende aantekening: bij een relatief kleine kanteling, zoals hier uitgevoerd staan de beide lijnen ook onder een relatief geringe hoek (7-8°). Een kleine meetfout in de gewichtsbepaling kan dan al leiden tot een behoorlijke afwijking in de schatting van de hoogte van het massazwaartepunt. Om deze reden zijn de uitkomsten tevens weergegeven waarbij de gewichtstoename linksachter gemeten op de weegplaat ten opzichte van de horizontale meting 50% en 100% groter was.

De derde stap: met behulp van de in drie richtingen vastgestelde ligging van het massazwaartepunt is bepaald onder welke zijwaartse hellingshoek dit massazwaartepunt juist voorbij de lijn tussen de zijwaarste steunpunten zou komen. Op dat moment zou de trekker in theorie kantelen. Hierbij moeten twee kanttelingen worden gemaakt. Ten eerste is zoals gesteld de vooras van de trekkers flexibel opgehangen en steunt de trekker in het midden van de vooras hierop af. Dit betekent dat aangenomen is dat de voorwielen niet bijdragen aan de zijwaartse stabiliteit. De trekker is dan ook benaderd vanuit een driehoekvorm. Berekend is bij welke hoek van kanteling

*Figuur 4: schematisch voorgestelde situatie van een gekantelde trekker waarbij het massazwaartepunt ( $MZ_z$ ) juist boven het steunpunt in het midden van de band geprojecteerd staat.  $GM$ =geometrisch midden,  $MZ_y$ =ligging massazwaartepunt in de y-richting (=zijwaarts),  $MZ_z$ = ligging van het massazwaartepunt in de Z-richting (=verticaal), axle height=ashoogte,  $\alpha$ =kantelhoek.*



(= optillen van de rechterhoek van de basis van de driehoek) de projectie van het massazwaartepunt voorbij de lijn top-linker basishoek zou komen, waarbij hierbij tevens rekening gehouden wordt dat bij kanteling de basis korter wordt omdat het midden van het linker achterwiel van boven gezien verschuift ten opzichte van het steunpunt van de band aan de bodem (en dit is weer afhankelijk van de hoogte van de achteras: zie figuur 4). Ten tweede is een trekker voorzien van een relatief brede band waarvan onzeker is of die sterk bijdraagt aan de stabiliteit. Weliswaar brengt de band het steunpunt meer naar buiten en zou dan kunnen zorgen voor meer stabiliteit, echter de band is voorzien van nokken die normaal diep in relatief zachte ondergrond kunnen verdwijnen. De vraag is dus of de normale banden echt bijdragen aan zijwaartse stabiliteit. Om deze reden is de kanteelhoek in twee situaties berekend: één waarbij het steunpunt geplaatst is midden onder de band die als rondlopend beschouwd is, en de ander waarbij het steunpunt gelegd is aan het uiteinde van de nokken van de band.

Tabel 5 tot slot geeft de gebruikte gegevens van de verschillende trekkers en de gemeten gewichtsverdeling over de banden.

*Tabel 5: gemeten gewichten onder de banden en kenmerken van de smalspoortrekkers (RV=rechts voor, LV=links voor, RA=rechts achter, LA=links achter). De maten voor de gewichten zijn in kilogram, de lengtematen in centimeters. De bandbreedte is bepaald over het vlakke gedeelte van de band, dus zonder rekening te houden met de afgeschuining van de nokken.*

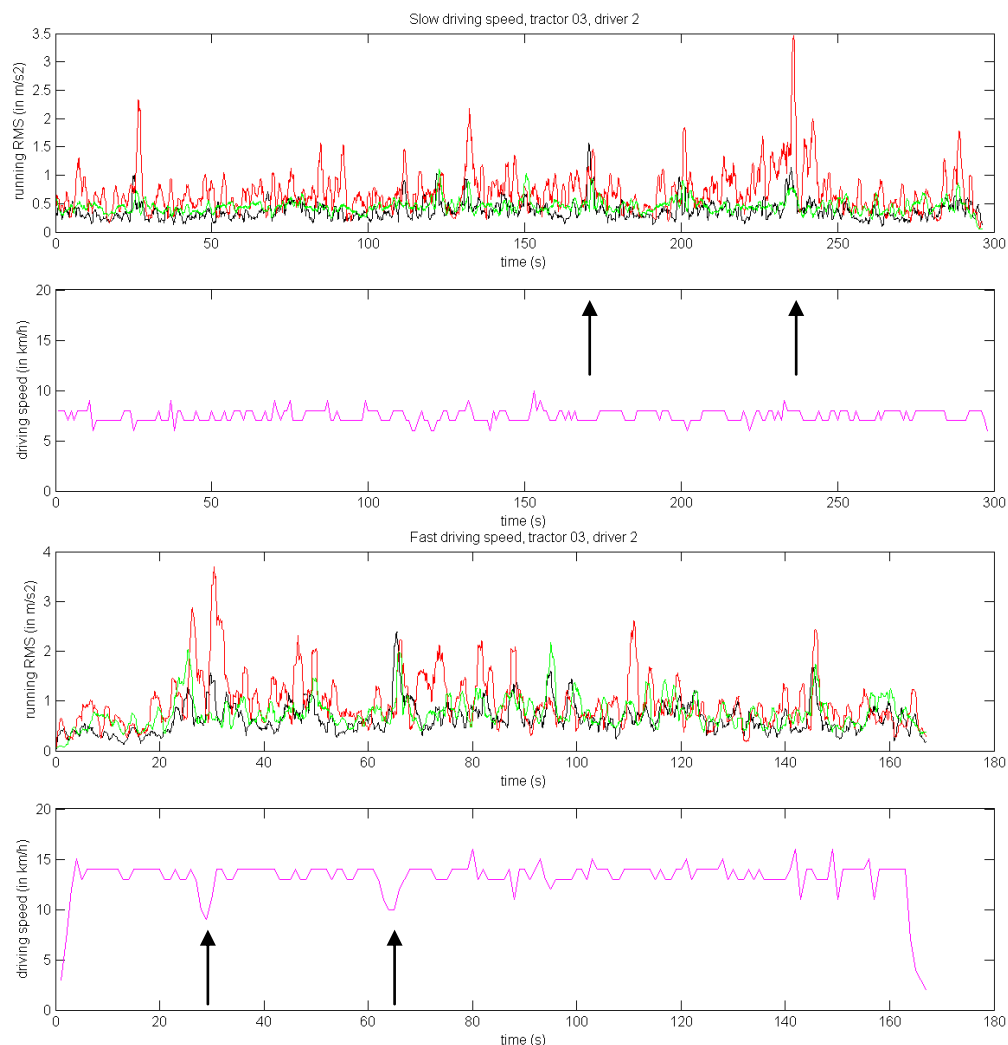
	Case IH 100 Quantum	Claas 240 ve Nexos	Kubota M5101 Narrow	Deutz Fahr 5100 DS	John Deere 5090 GV	Fendt 209 v Vario	New Holland T4 100n
Meting horizontaal							
RV	770	700	670	750	620	670	740
LV	760	710	650	760	630	690	740
RA	860	830	810	780	780	890	920
LA	860	790	810	780	780	860	920
Meting gekanteld							
LV	830	790	680	820	675	720	800
LA	1035	930	910	1000	910	1090	1000
Hoogte draaipunt achteras	57.5	56	56	53	56	56	56
Wielafstand achter	99.5	96	100	99	96	89	96
Asafstand	219	214	210	205	214	218	244
Bandbreedte achter	34.5	37.5	37.5	32	37.5	34.5	34



### 3 Resultaten en bespreking

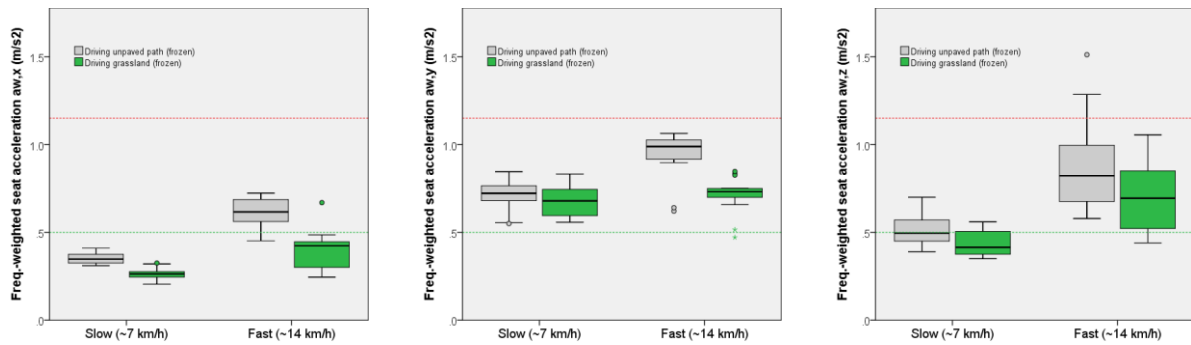
#### 3.1 Typisch patroon van de trillingsmetingen

Onderstaande figuur 5 geeft het typische patroon van de trillingsblootstelling weer bij de twee rijnsnelheden. Het patroon is van één chauffeur rijdend op één van de trekkers over de volledige lengte van het parcours. De snelheidsregistratie wordt tevens getoond. De overgang tussen onverhard pad en grasstrook en ook de diepe kuil in het onverhard pad waren bij alle trekkers duidelijk te herkennen. Deze beide zijn vervolgens buiten de analyse gehouden. Wat opvalt zijn de relatief hoge waarden voor zijwaartse trillingen bij beide rijnsnelheden.



*Figuur 5: running rms van het frequentie-gevoegen trillings signaal zoals gemeten bij één chauffeur op de stoel van een Kubota M5101 Narrow trekker voor de X-richting (zwarte lijn), Y-richting (rood), en Z-richting (groen), en de bijbehorende registratie van de rijnsnelheid, gedetecteerd via GPS (magenta). De bovenste grafieken geven de langzame rijnsnelheid weer, de onderste de hoge rijnsnelheid. De pijlen geven bij lage rijnsnelheid achtereenvolgens een diepe kuil en de overgang tussen onverhard pad en grasstrook aan; bij hoge snelheid is dit omgekeerd en is de rijnsnelheid daar ook verminderd. De grafieken omvatten het rijden over de volle lengte van het parcours.*

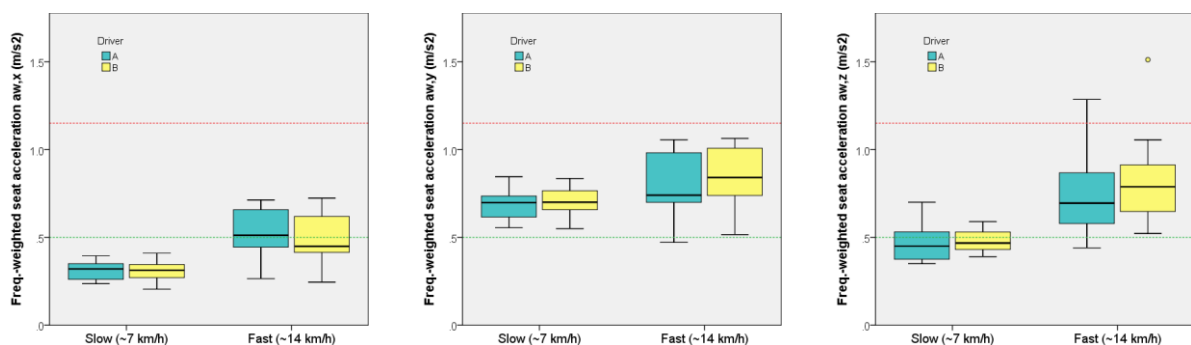
### 3.2 Effecten van rijsnelheid, ondergrond en chauffeurs



Figuur 6: frequentie-gewogen trillingsblootstelling, gemeten op de stoel (Y-as) voor langzaam en snel rijden (X-as) in de drie trillingsrichtingen voor-achter (links), zijwaarts (midden) en verticaal (rechts). Iedere grafiek maakt onderscheid tussen het rijden over (bevroren) onverhard pad en een (bevroren) grasstrook. Elke box bevat de meetpunten van zeven trekkers en twee chauffeurs. De horizontale groene stippellijn geeft de actiewaarde voor een 8-urige werkdag, de rode stippellijn de grenswaarde.

Figuur 6 toont de blootstellingen gemeten op de stoel in de drie trillingsrichtingen voor alle trekkers en chauffeurs samen. Onderscheid is gemaakt naar het rijden met lage en hoge snelheid, en naar het rijden over het (bevroren) onverharde pad en over de (bevroren) grasstrook. Voor de voorwaartse en verticale trillingen geldt dat het rijden over het bevroren onverharde pad een hogere blootstelling opleverde ( $p=0.001$ ) dan het rijden over de bevroren grasstrook, voor beide rijsnelheden. Dit gold ook voor de zijwaartse trillingen tijdens het snel rijden ( $p=0.001$ ), alleen het onderscheid bleek hier niet significant tijdens het langzaam rijden ( $p=0.06$ ). Met name de Deutz-Fahr trekker droeg hier aan bij. Opvallend bij langzaam rijden is ook dat de zijwaartse trillingen domineren en bij beide ondergronden boven de actiewaarde komen. Bij rijden op hogere snelheid is de trillingsblootstelling in alle richtingen verhoogd, maar ook hier worden de hoogste mediane waarden gezien bij de zijwaartse trillingen.

De resultaten van de blootstellingsmetingen per chauffeur, samengenomen voor de trekkers en ondergrond, zijn weergegeven in figuur 7. Tijdens langzaam rijden is er geen verschil tussen beide chauffeurs voor alle trillingsrichtingen. Voor snel rijden is het verschil significant voor zijwaartse en verticale trillingen (respectievelijk  $p=0.001$  en  $0.022$ ). Dit is ook wat verwacht mag worden: chauffeur B was de lichtste van beide: een lichter persoon zal doorgaans een hogere trillings-



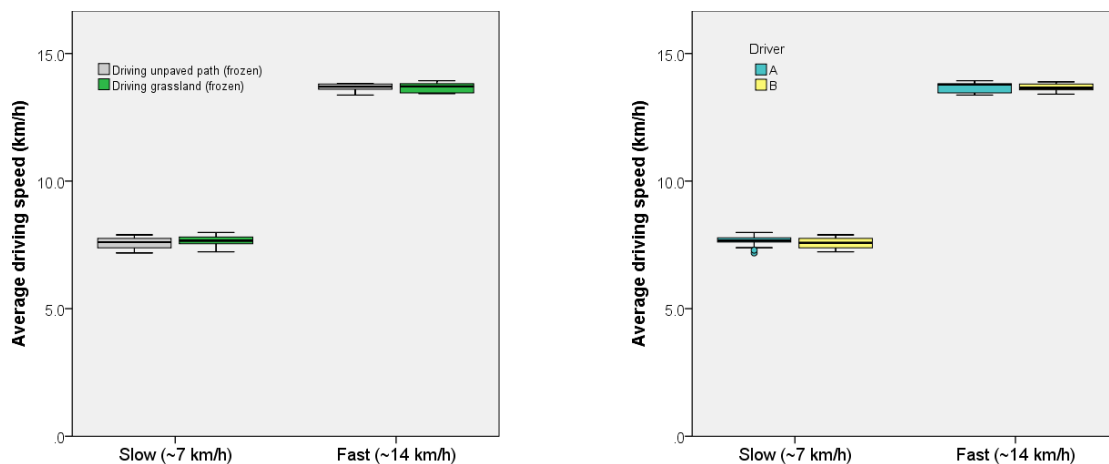
Figuur 7: frequentie-gewogen trillingsblootstelling, gemeten op de stoel (Y-as) voor langzaam en snel rijden (X-as) in de drie trillingsrichtingen voor-achter (links), zijwaarts (midden) en verticaal (rechts). Iedere grafiek maakt onderscheid tussen de beide chauffeurs in de ritten over de bevroren ondergrond. Elke box bevat de meetpunten van zeven trekkers en twee typen ondergrond. De horizontale groene stippellijn geeft de actiewaarde voor een 8-urige werkdag, de rode stippellijn de grenswaarde.



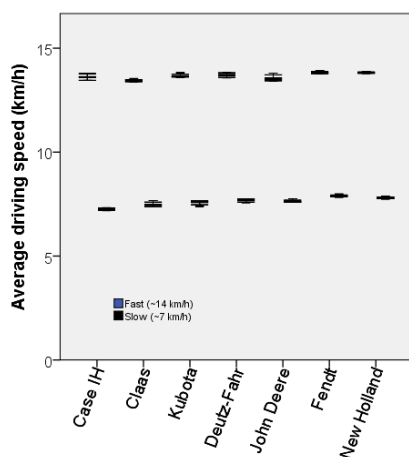
blootstelling ondervinden. De verschillen tussen de chauffeurs bleven overigens beperkt qua grootte. Om die reden is in de verdere analyses ook geen onderscheid meer gemaakt naar de beide chauffeurs.

### 3.3 Gerealiseerde rijnsnelheid

De rijnsnelheid verschilde niet significant tussen de chauffeurs voor beide snelheden van de test: gemiddeld 7.62 en 13.67 km/uur. Het rijden met lage snelheid over het gras (7.66 km/uur) ging iets sneller ( $p=0.019$ ) dan over het pad (7.58 km/uur). Bij hoge snelheid was er geen verschil: 13.67 km/uur over beide. Zie figuur 8 voor een grafische weergave.



Figuur 8: gemiddelde rijnsnelheid (Y-as), gemeten met behulp van GPS, bij langzaam en snel rijden (X-as) en onderscheiden naar ondergrond (links) en chauffeur (rechts) in de ritten over de bevroren ondergrond. Elke box bevat de meetpunten van zeven trekkers en twee typen ondergrond / twee chauffeurs.



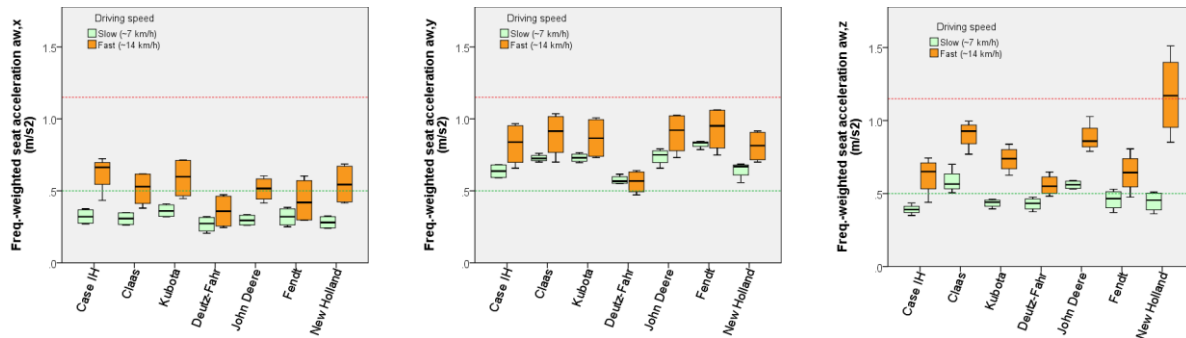
Figuur 9: gemiddelde rijnsnelheid (Y-as), gemeten met behulp van GPS, voor elk van de trekkers (X-as) en onderscheiden naar langzaam en snel rijden. Elke box bevat vier meetpunten: van de twee chauffeurs en de twee typen ondergrond.

Zoals figuur 9 laat zien lijkt er wel een oplopende trend in rijnsnelheid waar te nemen over de testen (de trekkervolgorde in de figuur is dezelfde als die in de test). De lage rijnsnelheid loopt aanvankelijk systematisch op (7.26 km/uur in geval van Case IH, 7.67 km/uur bij Deutz-Fahr, om daarna af te vlakken. De hoogste langzame rijnsnelheid wordt gerealiseerd met de Fendt: 7.90 km/uur. Bij de hoge rijnsnelheid is er geen sprake van een duidelijke trend. De rijnsnelheid is het laagst met de Claas trekker (13.44 km/uur), het hoogst (wederom) met de Fendt (13.83 km/uur).

## 3.4 Verschillen tussen de trekkers

### 3.4.1 Standaard configuratie

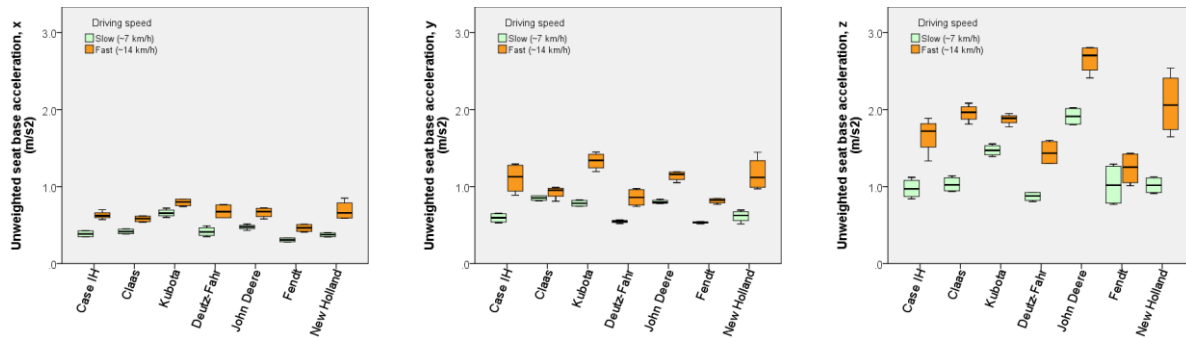
In de navolgende figuren zijn de data van de beide typen ondergrond (pad en gras) en de beide chauffeurs per box samengevoegd. De blootstellingen aan lichaamstrillingen tijdens het rijden met de zeven merken trekkers bij twee rijsnelheden is weergegeven in figuur 10. De waarden van de meetdata, voor beide chauffeurs samengevoegd, zijn weergegeven in de bijlage A.



Figuur 10: frequentie-gewogen trillingsblootstelling, gemeten op de stoel (Y-as) voor elk van de trekkers (X-as) in de drie trillingsrichtingen voor-achter (links), zijwaarts (midden) en verticaal (rechts). Iedere grafiek maakt onderscheid tussen lage en hoge rijsnelheid. Elke box bevat de meetpunten van twee chauffeurs en de twee typen ondergrond. De horizontale groene stippellijn geeft de actiewaarde voor een 8-urige werkdag, de rode stippellijn de grenswaarde.

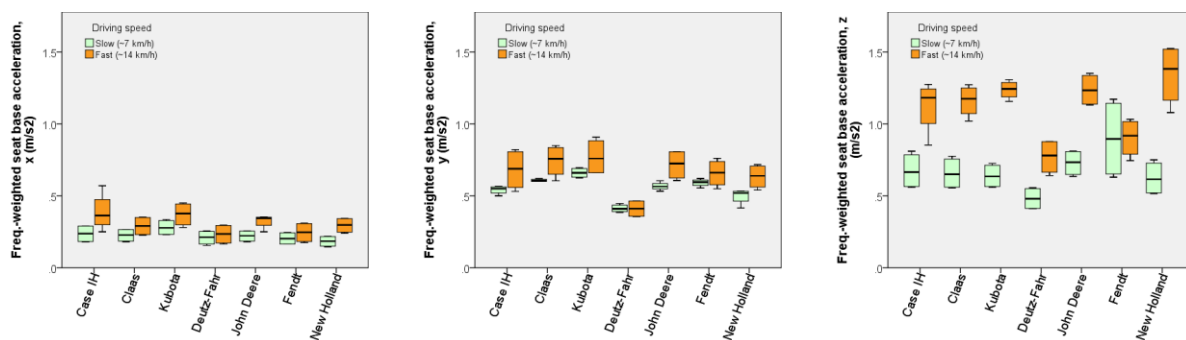
Zoals eerder geconstateerd is de voor-achterwaartse blootstelling aan lichaamstrillingen het laagst, waarbij de trekkermerken Deutz-Fahr en Fendt het meest gunstig scoren: de mediane blootstellingen bij beide rijsnelheden blijven onder de actiewaarde. Voor de meeste trekkers wordt de hoogste trillingsblootstelling gemeten in de zijwaarts richting. Dit is het meest duidelijk indien met langzame snelheid gereden wordt. De blootstelling aan zijwaartse trillingen is het laagst bij de Deutz-Fahr trekker, met mediane waarden net boven de actiewaarde. Bij de blootstelling aan verticale trillingen is wederom de Deutz-Fahr trekker het meest gunstig, eveneens net boven de actiewaarde bij rijden met hoge rijsnelheid. Ook de Case IH en Fendt trekkers blijven wat verticale blootstelling betreft relatief laag. Opvallend hier is de hoge waarde voor de New Holland trekker bij hoge rijsnelheid, met een mediane waarde net boven de grenswaarde.

Om de verschillen tussen de trekkers in blootstelling via de stoelzitting te kunnen verklaren kunnen we het beste eerst naar de stoelbasis kijken, dat wil zeggen naar de ruwe trillingen die via de cabinebodem aan de stoel worden overgedragen. Het kenmerk “ruw” betekent in dit geval dat op de trillingen geen verdere bewerking is gedaan. De grootte ervan per trekker is weergegeven in figuur 11. Het meest opvallende punt is dat de hoogste waarden van deze ongewogen trillingen worden gevonden in de verticale richting. Verder valt op dat deze ongewogen trillingen in de Y- en Z-richting fors sterker zijn dan de frequentie-gewogen trillingen van figuur 10. En tot slot valt op dat de Deutz-Fahr trekker op grond van dit beeld zeker niet beter presteert dan de Fendt trekker. En ook dat, wat betreft de verticale trillingen, de New Holland trekker niet opvallend ongunstig scoort, en hier de John Deere trekker juist relatief ongunstig afsteekt.



Figuur 11: ongewogen grootte van de trillingen, gemeten op de cabinebodem (Y-as) voor elk van de trekkers (X-as) in de drie trillingsrichtingen voor-achter (links), zijwaarts (midden) en verticaal (rechts). Iedere grafiek maakt onderscheid tussen lage en hoge rijsnelheid. Elke box bevat de meetpunten van twee chauffeurs en twee typen ondergrond.

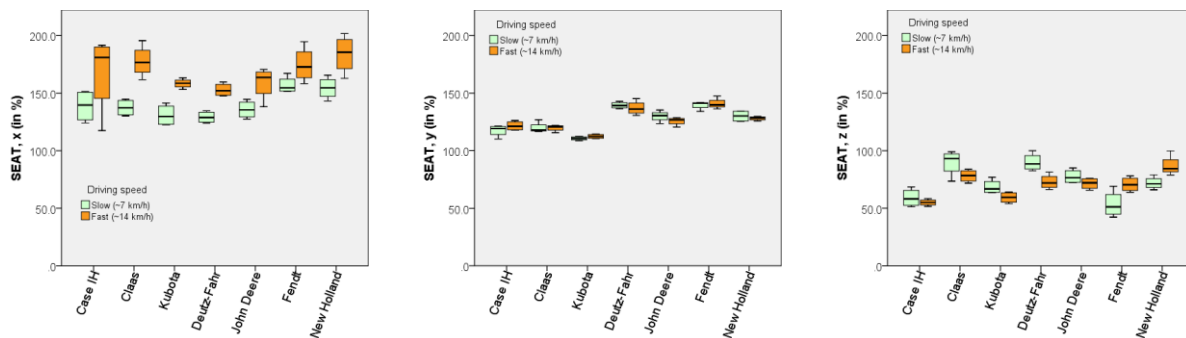
De in figuur 11 samengevatte trillingen worden via het frame van de stoel aan de zitting en vervolgens aan de chauffeur overgedragen. Deze trillingen zijn een heel complex geheel van verschillende frequenties (0.5-2000 Hz). Om een beeld van de frequentieopbouw te krijgen is in bijlage C voor elk van de trekkers voor één minuut rijden met hoge snelheid over het onverharde pad een frequentieanalyse gegeven (door middel van een Fast Fourier Transformatie, ofwel FFT). Een deel van die frequenties zal door de luchtveer van de stoel en ook door het zittingmateriaal worden gedempt, en dus minder of niet meer waarneembaar zijn in de trilling gemeten op de stoel. Daarnaast schrijft ook de ISO in de normen (zie Methode-sectie) voor dat bij het beoordelen van de trillingen er een frequentiefilter wordt toegepast. De gedachte hierachter is dat bepaalde frequenties (in het gebied 0.5-12 Hz, afhankelijk van de trillingsrichting) schadelijker zijn dan andere voor het ontstaan van rugklachten. En tot slot schrijft de ISO voor dat trillingen in het horizontale vlak (X, Y) zwaarder (1.4 keer) moeten worden meegeteld dan de verticale trillingen, omdat deze schadelijker worden geacht. Al deze zaken maken dus dat het lastig is de beide figuren 11 en 10 rechtstreeks te vergelijken. Voor een eenvoudiger vergelijking is daarom in figuur 12 het frequentie-gewogen trillingssignaal van de cabinebodem weergegeven, waarin tevens de genoemde correctiefactor voor de horizontale trillingen is verwerkt.



Figuur 12: frequentie-gewogen grootte van de trillingen, gemeten op de cabinebodem (Y-as) voor elk van de trekkers (X-as) in de drie trillingsrichtingen voor-achter (links), zijwaarts (midden) en verticaal (rechts). Iedere grafiek maakt onderscheid tussen lage en hoge rijsnelheid. Elke box bevat de meetpunten van twee chauffeurs en twee typen ondergrond.

Wat aan figuur 12 opvalt is de relatief lage trillingswaarden in de voor-achterwaarts en zijwaarts richting ten opzichte van op de stoelzitting (te zien in figuur 10). De stoel versterkt dus in deze richtingen de trillingen. Het omgekeerde kan worden waargenomen voor de verticale trillingen:

deze worden ten dele verminderd. Ook hier zijn de gewogen trillingen van de Deutz-Fahr trekker het laagst in zijwaartse richting. En opvallend is in de figuur 12 (midden) het verschil met de Fendt trekker. Blijkbaar heeft deze laatste de trillingen veel meer gelokaliseerd in het volgens ISO schadelijke gebied (0.5-12 Hz). In bijlage C wordt dit laatste bevestigd: de Deutz-Fahr trekker heeft wat betreft zijwaartse trillingen vooral een scherpe piek rond 20 Hz, terwijl bij de Fendt trekker de piek rond 1 Hz relatief hoog is en die rond 20 Hz breder en naar lagere frequenties neigt ten opzichte van de Deutz-Fahr trekker. Wat betreft de verticale trillingen blijken de gewogen trillingen van de cabinebodem bij hoge rijsnelheid het laagst voor Deutz-Fahr en Fendt (figuur 12, rechts), terwijl de andere trekkers min of meer vergelijkbaar scoren. Des te opvallender zijn in deze figuur de relatief hoge waarde tijdens rustig rijden van de Fendt en de niet opvallend verhoogde waarde tijdens snel rijden van de New Holland. Als dit wordt vergeleken met de blootstelling gemeten op de stoel (figuur 10, rechts) moet worden geconstateerd dat de stoel van de Fendt hier uitstekend functioneert, en dat die van de New Holland hier een steek laat vallen. Om dit stoeffect te objectiveren is in figuur 13 de SEAT uitgezet.



Figuur 13: Seat Effective Amplitude Transmissibility (SEAT; Y-as) voor elk van de trekkers (X-as) in de drie trillingsrichtingen voor-achter (links), zijwaarts (midden) en verticaal (rechts). Iedere grafiek maakt onderscheid tussen lage en hoge rijsnelheid. Elke box bevat de meetpunten van twee chauffeurs en twee typen ondergrond.

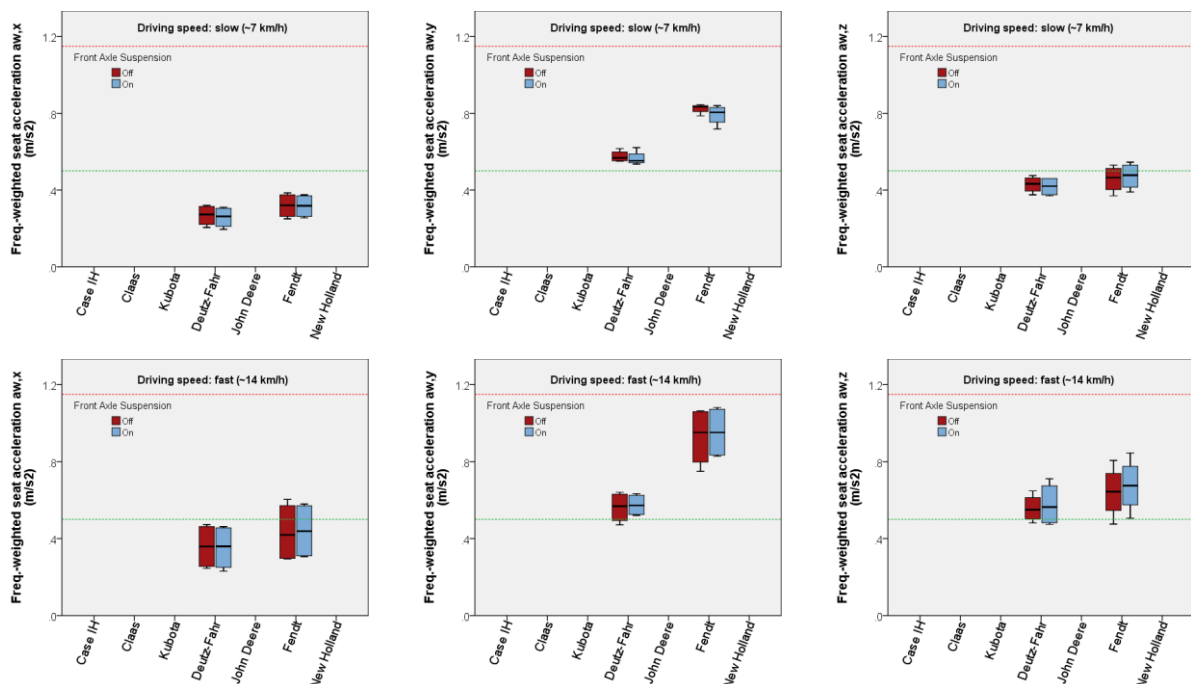
Indien de SEAT waarde op 100% zou uitkomen betekent dit dat de stoel geen effect heeft. Wat de figuur laat zien is dat de stoelen van alle trekkers in de voor-achterwaartse en zijwaartse richtingen de trillingen versterken. Omdat de stoelen geen van alle een vering hebben in deze richtingen moet dit effect worden toegeschreven aan het feit dat de stoelzitting hoger ligt dan de cabinebodem. Hierdoor treedt het zogenoemde “zeilmast-effect” op: versnellingen van de boot zijn boven in de mast een stuk groter dan onderaan in de boot. Toch kan dit effect niet de enige verklaring zijn: in de voor-achterwaartse richting, met de relatief beperkte trillingen, is de SEAT beduidend groter dan in de zijwaartse richting met beduidend grotere trillingsintensiteit. Bovendien lijkt de SEAT in voor-achterwaarts richting afhankelijk van de intensiteit van de aangeboden trillingen: de minder sterke trillingen tijdens rustig rijden worden minder versterkt dan de sterkere trillingen tijdens snel rijden. In de zijwaartse richting wordt dit effect niet gezien.

In verticale richting, met de luchtveer, blijken alle gemonteerde stoelen de trillingen te isoleren (alle mediane waarden blijven beneden 100%), alleen gebeurt dit meer of minder goed. Op de Case IH en Fendt trekkers is de best passende stoel gemonteerd. De trekkers van Deutz-Fahr en Claas steken hier ongunstig bij af. En bij de hoge rijsnelheid verklaart de beperkte werking van de stoel de uitspringende blootstelling gemeten bij de New Holland trekker (zoals eerder te zien in figuur 10, rechts).

### 3.4.2 Voorasvering

Twee van de trekkers, namelijk Deutz-Fahr en Fendt, zijn vergelijkenderwijs getest met tijdens het rijden met voorasvering “uit” en “aan”. De test was identiek aan de hiervoor beschreven trekkeervergelijking en met dezelfde chauffeurs. De resultaten zijn weergegeven in figuur 14.

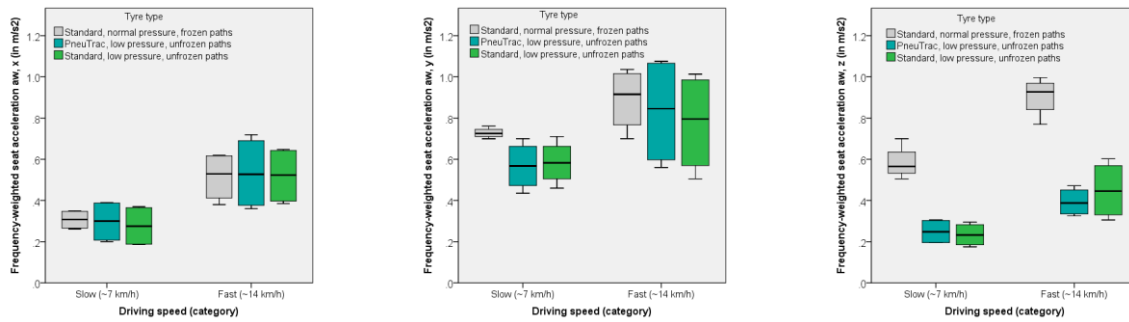
De resultaten van de voorasvering “uit” zijn identiek aan die beschreven in de voorgaande sectie voor deze twee trekkers. De grafieken laten zien dat er geen duidelijk effect is van voorasvering op de blootstelling aan lichaamstrillingen. Dit geldt voor elk van de drie trillingsrichtingen en voor beide rijnsnelheden. De huidige resultaten laten geen bevestiging zien van het onderzoek door Giordano en collega's (2015), die een enigszins blootstellingsverlagend effect van de voorasvering lieten zien bij het rijden op een lege normale trekker, vooral in de voor-achterwaarts richting.



Figuur 14: frequentie-gevogen trillingsblootstelling, gemeten op de stoel (Y-as) voor de trekkers Deutz-Fahr en Fendt (X-as) in de drie trillingsrichtingen voor-achter (links), zijwaarts (midden) en verticaal (rechts) voor rustig (boven) en snel (onder) rijden. Iedere grafiek maakt onderscheid tussen voorasvering uit en aan. Elke box bevat de meetpunten van twee chauffeurs en twee typen ondergrond. De horizontale groene stippellijn geeft de actiewaarde voor een 8-urige werkdag, de rode stippellijn de grenswaarde.

### 3.4.3 PneuTrac banden

Figuur 15 toont de resultaten van de vergelijking van het rijden op PneuTrac banden op lage druk met standaard banden, eveneens op verlaagde druk maar wel zódanig dat die binnen de aanwijzingen van de fabrikant viel (zie Methode-sectie). Het testparcours was hetzelfde als voor de eerder weergegeven tests, alleen waren de paden niet meer bevroren. Ter vergelijking is eveneens het resultaat van de meting op standaard banden met standaard druk over bevroren ondergrond weergegeven. De test is uitgevoerd met alleen de Case IH trekker.



Figuur 15: frequentie-gevoegen trillingsblootstelling, gemeten op de stoel (Y-as) van de Case IH trekker bij lage en hoge rijsnelheid (X-as) in de drie trillingsrichtingen voor-achter (links), zijwaarts (midden) en verticaal (rechts). Iedere grafiek maakt onderscheid tussen (1) de standaard band op standaard druk rijdend op bevroren ondergrond, (2) de PneuTrac band op lage druk rijdend op niet-bevroren ondergrond, en (3) de standaard band op lage druk rijdend op niet-bevroren ondergrond. Elke box bevat de meetpunten van twee chauffeurs en twee typen ondergrond: onverhard pad en grasstrook.

Er kan geen effect van het rijden op PneuTrac banden worden gezien op de blootstelling aan lichaamstrillingen van de chauffeur, indien de vergelijking wordt gemaakt met een standaard band waarvan de druk toelaatbaar verlaagd is tot een niveau vergelijkbaar met die van de PneuTrac banden. Dit geldt voor elk van de trillingsrichtingen. Wel is er een duidelijk effect als de vergelijking wordt gemaakt met de standaard banden op normale druk en rijdend over bevroren ondergrond. Dit effect is hoofdzakelijk zichtbaar in verticale trillingsrichting. In welke mate de banddruk en de bevroren ondergrond gescheiden aan dit effect bijdragen is niet uit deze metingen af te leiden. De rijsnelheid bleek iets lager op bevroren ondergrond (13.5 km/uur) dan in de verlaagde banddruk situatie (14.4 km/uur).

### 3.5 Interpretatie naar een werkdag

In bijlage A zijn de RMS, VDV en spinale compressie data weergegeven voor elke trekker in de standaard gemeten situatie voor beide rijsnelheden en beide typen ondergrond. Ook is de meetduur en de gemiddelde rijsnelheid gegeven. Onderaan elke tabel is steeds de interpretatie naar een werkdag gegeven, gegeven de eerder genoemde uitgangspunten (i.e.: gras en pad tellen mee in dezelfde verhouding als in de test, de langzame en snelle ritten geven een beeld van de blootstellingen in de praktijk, en de blootstellingen zijn beperkt tot vier uur per werkdag met een gelijke verdeling over rustig en snel rijden). Blootstellingswaarden zijn weergegeven per trillingsrichting. De statische compressie waarden  $D$ ,  $S_e$  and  $S_{ed}$  zijn berekend volgens ISO-2631-5 (2004).

De wet schrijft voor dat de maximale dagelijkse blootstelling wordt bepaald door de trillingsrichting met de hoogste waarde. Dat is voor alle geteste smalspoortrekkers op-één-na de zijwaartse richting (Y). Voor de New Holland trekker was dit verticaal (Z). Alleen de Deutz-Fahr trekker bleef, gegeven de genoemde uitgangspunten, voor alle trillingsrichtingen onder de wettelijke actiewaarde. Indien de uitgangspunten correct zijn betekent dit dat het rijden op deze trekker geen gezondheidsrisico zal inhouden. Deze conclusie wordt versterkt door de lage waarde van de  $S_{ed}$  van deze trekker (0.36 MPa), welke tevens aangeeft dat de risico's door schokken gering zijn. Wat dit laatste betreft loopt de berijder van de geteste New Holland trekker een groot risico: 1.48 MPa, een waarde ver boven de risicogrens van 0.9 MPa bij meer dan 120 dagen per jaar gebruik.

De volgende tabel 6 geeft de maximale rijtijd op een dag weer indien de hoogste waarde van de in drie richtingen gemeten  $a_w$  hiervoor wordt gebruikt.

Tabel 6: maximale rijtijd (in uren) op een werkdag voor de smalspoorttrekkers op basis van de gemeten trillingswaarde  $a_w$  voor de hoogste van de drie trillingsrichtingen (Y=zijwaarts, Z=verticaal).

	Case IH 100 Quantum	Claas 240 ve Nexos	Kubota M5101 Narrow	Deutz Fahr 5100 DS	John Deere 5090 GV	Fendt 209 v Vario	New Holland T4 100n
Trillingsrichting	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Z
Trillingswaarde $a_w$ (m/s <sup>2</sup> )	0.57	0.61	0.61	0.42	0.62	0.66	0.70
Maximale dagelijkse rijduur (uren)	3.1	2.7	2.7	5.8	2.6	2.3	2.0

### 3.6 Kantelhoek

Onderstaande tabel 7 geeft de resultaten van de schatting van de kantelhoek van de geteste trekkers. Een korte bespreking van de resultaten: de smalspoorttrekkers van Kubota, John Deere en Claas blijken het minst gevoelig voor kantelen, en hebben een geschatte kantelhoek rond 30° (zonder rekening te houden met de bandbreedte). Wordt wel rekening gehouden met de breedte van de gemonteerde achterband, daarbij aannemend dat de bodem vast is en niet inzakt onder druk van de zijwaarts kantelende band, dan zal de kantelhoek zo'n 8° groter worden. De zijwaartse stabiliteit van de genoemde trekkers wordt vooral veroorzaakt door de relatief lage ligging van het massazwaartepunt (28-35 cm boven de achteras) ten opzichte van bijvoorbeeld de Fendt (48 cm), maar bovenal de Deutz-Fahr (58 cm) trekker. Omdat de Fendt trekker daarnaast een duidelijk smallere wielbasis heeft dan de andere trekkers komen de Fendt en Deutz-Fahr trekkers op een vergelijkbare kantelhoek van 23-24°. De New Holland en Case IH trekkers vallen wat kantelhoek betreft hier tussenin: 26°. Opvallend is verder dat voor alle trekkers het massazwaartepunt in het horizontale vlak vrijwel boven de lengteas ligt met een kleine verschuiving (2-14 cm) naar achteren ten opzichte van het geometrisch midden.

De toegepaste methode kent zijn beperkingen. Allereerst kent de gebruikte weegplaat een onnauwkeurigheid van  $\pm 10$  kg. Verder is in gekantelde toestand alleen de lage zijde gemeten, dit vanwege de stabiele en harde ondergrond. Het gewicht aan de contralaterale zijde kwam voort uit de aanname dat de som van de gewichten die wordt gemeten onder de beide achterwielen constant blijft, dus onafhankelijk is van de mate van kanteling. En verder is aangenomen dat de voorwielen niet bijdragen aan de zijwaartse stabiliteit vanwege een scharnierpunt in het midden. Bij de berekening van de kantelhoek is het midden van de vooras steeds als constant aangenomen. Het vormt dus een vast punt van de lijn waarlangs de kanteling zou plaatsvinden. Daarbij is geen rekening gehouden met een veranderde gewichtsverdeling over beide voorwielen: deze is steeds dezelfde gehouden als in de horizontale uitgangssituatie. De vraag is of dit de werkelijkheid benadert: het scharnierpunt heeft maar een beperkte uitslag van meerdere centimeters, en er is wel degelijk een veranderde gewichtsverdeling over de voorwielen waargenomen. En met name bij de trekkers van Deutz-Fahr en Fendt, met de actieve voorasvering, hoeft deze aanname niet correct te zijn en zal het voorwiel wél kunnen bijdragen aan de zijwaartse stabiliteit. En tot slot zijn de gewichten bepaald in de situatie zonder chauffeur op de stoel. Een chauffeur zal ook nog een verandering in de ligging van het massazwaartepunt veroorzaken. Vanwege de genoemde onzekerheden is de kantelhoek tevens berekend indien de meting een onderschatting van de werkelijkheid zou zijn: doorgerekend is met waarden die 50%

en 100% hoger liggen. Kantelhoeken blijken dan voor alle trekker 3-4° lager te liggen in de 50% situatie. En tevens is doorgerekend met een overschatting van de werkelijkheid: -50%.

*Tabel 7: berekende ligging van het massazwaartepunt in de voor-achterwaartsrichting ( $MZ_x$ ), zijwaarts-richting ( $MZ_y$ ) en verticale richting ( $MZ_z$ ), gerekend in centimeters vanuit het geometrisch midden van de trekker op hoogte van de achteras. Bij  $MZ_z+$  is gecorrigeerd voor de achterashoogte en het is daarmee de hoogte vanaf het rijoppervlak. Een positieve waarde betekent meer naar achter of rechts (vanuit een rijdende chauffeur gezien) dan het geometrisch midden, of hoger dan het centrum van de achteras. Kantelhoek is de berekende kantelhoek in graden indien het midden van de band (van bovenaf gezien) als steunpunt wordt beschouwd. Het is de hoek waarbij het massazwaartepunt juist boven de lijn tussen het middensteunpunt van de achterband en midvoor zou komen. Kantelhoek+ is de berekende kantelhoek in graden waarbij tevens rekening gehouden is met de breedte van de band. Voor iedere trekker zijn drie situaties berekend: het resultaat van de meting zelf (Gewichtstoename linksachter = "meting"), en drie situaties waarbij enerzijds een 50% lager dan gemeten gewichtstoename is doorgerekend, en anderzijds de gewichtstoename respectievelijk 50% en 100% hoger werd aangenomen.*

	Gewichts- toename linksachter	$MZ_x$ (cm)	$MZ_y$ (cm)	$MZ_z$ (cm)	$MZ_z+$ (cm)	Kantel- hoek (°)	Kantel- hoek+ (°)
Case IH 100 Quantum	meting	6.4	0.0	43.7	101.2	26	33
	-50%	6.4	0.0	21.9	79.4	32	40
	+50%	6.4	0.0	65.6	123.1	22	29
	+100%	6.4	0.0	87.5	145.0	19	25
Claas 240 ve Nexos	meting	7.4	0.6	34.9	90.9	28	36
	-50%	7.4	0.6	22.4	78.4	31	40
	+50%	7.4	0.6	47.4	103.4	25	33
	+100%	7.4	0.6	59.8	115.8	22	30
Kubota M5101 Narrow	meting	10.7	0.0	27.9	83.9	31	39
	-50%	10.7	0.0	14.0	70.0	36	45
	+50%	10.7	0.0	41.9	97.9	27	35
	+100%	10.7	0.0	55.8	111.8	24	32
Deutz Fahr 5100 DS	meting	1.7	0.0	57.6	110.6	24	31
	-50%	1.7	0.0	28.8	81.8	31	39
	+50%	1.7	0.0	86.4	139.4	20	25
	+100%	1.7	0.0	115.2	168.2	16	21
John Deere 5090 GV	meting	11.8	0.0	35.0	91.0	28	36
	-50%	11.8	0.0	17.5	73.5	33	42
	+50%	11.8	0.0	52.4	108.4	24	32
	+100%	11.8	0.0	69.9	125.9	21	28
Fendt 209 v Vario	meting	13.7	0.4	48.0	104.0	23	31
	-50%	13.7	0.4	27.1	83.1	28	36
	+50%	13.7	0.4	68.8	124.8	19	26
	+100%	13.7	0.4	89.7	145.7	17	23
New Holland T4 100n	meting	13.2	0.0	41.0	97.0	26	34
	-50%	13.2	0.0	20.5	76.5	32	40
	+50%	13.2	0.0	61.4	117.4	22	29
	+100%	13.2	0.0	81.9	137.9	19	25



In de praktijk wordt voor dijken wel een helling van 1:3 aangenomen, dit is ongeveer  $18^\circ$ . Alle trekkers lijken hierop veilig te kunnen rijden, aannemend dat de meting de juiste schatter geeft. Indien veiligheidshalve met 50% onderschatting van de meting wordt gerekend komen de eerder genoemde Fendt en Deutz-Fahr trekkers wel dicht in de buurt van de dijkelling (nogmaals: geen rekening houdend met het mogelijk stabiliserend effect van de aanwezige voorasvering). Maar ook moet worden geconstateerd dat een gemiddelde hellingshoek geen rekening houdt met oneffenheden en kuilen die kunnen leiden tot een plotselinge verandering van de hoek. Dan zouden dus de Fendt en Deutz-Fahr trekkers het meeste risico lopen. Let wel dat de metingen hier zijn gedaan aan lege trekkers. Indien hulpmiddelen (maaibalk of rotorarm) zou worden gemonteerd zal het massazwaartepunt wat lager komen te liggen, waarmee de combinatie aan stabiliteit kan winnen.



## 4 Conclusies en aanbevelingen

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Smalspoortrekkers zijn, meer dan de normale landbouwtrekkers, gevoelig voor zijwaartse instabiliteit. De blootstelling aan lichaamstrillingen is dan ook voor de zijwaartse richting het hoogst.
- De verschillen in blootstelling aan lichaamstrillingen tussen de trekkers zijn aanzienlijk. Als alleen naar de zijwaartse trillingen gekeken wordt is er één trekker, Deutz-Fahr, die een duidelijk lagere blootstelling laat zien dan alle andere. Dit geldt ook voor de voor-achterwaartse trillingen, alleen zijn daar de blootstellingsniveaus lager en de verschillen minder prominent. Voor de blootstelling aan verticale trillingen zijn er naast de genoemde Deutz-Fahr trekker meer trekkers die eveneens een gunstig lage blootstelling laten zien: de Case IH, Kubota en Fendt trekkers.
- Van één trekker, New Holland, bleek de verticale trillingsblootstelling opvallend hoger dan voor alle andere. Daarbij is voor deze geteste trekker geconstateerd dat de blootstelling aan schokken te hoog is om veilig (d.w.z. met een lage kans op rugschade na jaren gebruik) mee te kunnen werken. De gemonteerde stoel blijkt van alle het minst effectief in het isoleren van de trillingen. De fabrikant wordt geadviseerd een andere (en betere) stoel op de trekker te monteren.
- Een gegeven van smalspoortrekkers is dat door de smalle basis zijwaartse versnellingen van de trekker eerder en heviger zullen worden opgewekt. Opvallend is dat die trillingen op de stoelzitting sterker zijn dan gemeten aan de cabinebodem. Dat kan worden verklaard vanwege de hogere ligging. Wel zou kunnen worden getest of door middel van trillingsisolatie in zijwaartse richting in de stoel er een verlaging van de blootstelling in die richting kan worden bereikt.
- Dit laatste zou zeer de moeite waard zijn, gezien de uitkomst dat met alle geteste trekkers behalve de Deutz-Fahr er geen “normale” werkdag mee kan worden voltooid. Op grond van de gemeten trillingsblootstellingen varieert de dagelijkse maximale werkduur op een smalspoortrekker tussen 2.0 uur en 3.1 uur, met als uitzondering 5.8 uur voor de Deutz-Fahr trekker. Wel moet bij deze tijden de aantekening worden gemaakt dat aangenomen is dat het gereden parcours van de test en de rij snelheden maatgevend zijn voor gebruik in de praktijk. Die omstandigheden kunnen natuurlijk verschillen. Wel blijft dat de omstandigheden voor alle trekkers dezelfde waren, zodat de onderlinge verschillen duidelijk werden.
- Het inschakelen van een voorasvering heeft geen enkel effect op de blootstelling aan lichaamstrillingen in elk van de drie trillingsrichtingen.
- Hetzelfde geldt voor PneuTrac banden indien de vergelijking wordt gemaakt met normale banden die op vergelijkbare (maar: toelaatbare) druk worden gebracht: geen effect voor elke trillingsrichting.
- Kantelhoeken van de trekkers verschillen behoorlijk. Geen poging is gedaan de exacte kanteelhoek te bepalen. Wel is een benadering toegepast, waarbij de gewichtsverdeling over de banden is gemeten. Vanwege de meerdere aannames kunnen de werkelijke waarden verschillen. Vergelijkenderwijs blijken de Kubota, Claas en John Deere trekkers het minst gevoelig voor kantelen, en de Fendt en Deutz-Fahr trekkers het meest. De eerstgenoemde groep trekkers blijkt een lage ligging van het massazwaartepunt te hebben. De laatste groep juist een hoge ligging. Daarnaast is de Fendt trekker duidelijk smaller dan de anderen.



## Referenties

- EU, 2002 - Richtlijn 2002/44/EG van het Europees Parlement en de Raad van 25 juni 2002 betreffende de minimumvoorschriften inzake gezondheid en veiligheid met betrekking tot de blootstelling van werknemers aan de risico's van fysische agentia (trillingen) (zestiende bijzondere richtlijn in de zin van artikel 16, lid 1, van Richtlijn 89/391/EEG) - Gezamenlijke verklaring van het Europees Parlement en de Raad. Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen, L 177 (6.7.2002), 13-19.
- Giordano, D.M., Facchinetti, D., & D. Pessina, 2015 - Comfort Efficiency of the Front Axle Suspension in Off-Road Operations of a Medium-Powered Agricultural Tractor. *Contemporary Engineering Sciences* 8 (28), 1311 – 1325.
- ISO-2631-1, 1997 – Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General Requirements. ISO, Geneva, pp. 31.
- ISO-2631-5, 2004 – Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks. ISO, Geneva, pp. 20.
- ISO-8041-1, 2017 – Human response to vibration – Measuring instrumentation – Part 1: general purpose vibration meters. ISO, Geneva, pp. 106.
- Oude Vrielink, H.H.E., 2007 – Analyse van de blootstelling aan trillingen bij gebruik van landbouwtrekkers (Analysis of the exposure to whole-body and hand-arm vibrations using agricultural tractors). ErgoLab Research B.V., Bennekom, rapport 2007-02, 75 pp.
- Oude Vrielink, H.H.E., 2009 – Exposure to whole-body vibration and effectiveness of chair damping in high-power agricultural tractors having different damping systems in practice. ErgoLab Research B.V., Bennekom, report 2009-10-1, 46 pp.
- Oude Vrielink, H.H.E., 2012 – Comparison of high-power agricultural tractors: effect of whole-body vibration exposure during a standardized test in practice. ErgoLab Research B.V., Bennekom, report 2012-0601, 53 pp.
- G.S. Paddan, & M.J. Griffin, 2002 - Effect of seating on exposures to whole-body vibration in vehicles. *Journal of Sound and Vibration* 253, 215-241.
- Staatsblad, 2005 – Besluit van 5 juli 2005 tot wijziging van het Arbeidsomstandighedenbesluit (voorschriften inzake veiligheid en gezondheid met betrekking tot blootstelling van werknemers aan risico's van fysische agentia (mechanische trillingen)). Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden 372, 1-18.



# Bijlage A – Meetwaarden van de blootselling aan lichaams-trillingen en schokken

*Gebruikte terminologie:*

- reference axis : axis of the vibration measurement
- $t_m$  : total measurement time in s
- average speed : average driving speed in km/hour
- meas. (n) : number of measurements
- $a_w$  : mean frequency-weighted rms acceleration (including k-factor) for WBV in  $m/s^2$
- VDV : vibration dose in  $m/s^{1.75}$
- D : acceleration dose according to ISO-2631-5 (2004) in  $m/s^2$
- $S_e$  : equivalent of static compression stress according to ISO-2631-5 (2004), in MPa
- $t_d$  : assumed exposure time on a working day in s
- 8h VDV : vibration dose over a working day of 8 hours, given  $t_d$ , in  $m/s^{1.75}$
- $S_{ed}$  : equivalent of daily static compression dose according to ISO-2631-5 (2004), in MPa

<b>Sitting on seat of tractor standing stationary with engine running idle</b>												
reference axis	tractor	task	$t_m$ (s)	average speed (km/h)	meas. (n)	$a_w$ ( $m/s^2$ )	VDV ( $m/s^{1.75}$ )	D ( $m/s^2$ )	$S_e$ (MPa)	$t_d$ (s)	8h VDV ( $m/s^{1.75}$ )	$S_{ed}$ (MPa)
x						0.01	0.03	0.000				
y	Case IH	idle	23	0	1	0.01	0.03	0.53	0.02			
z						0.06	0.15	0.37				
x						0.01	0.03	0.148				
y	Claas	idle	39	0	1	0.06	0.17	0.32	0.01			
z						0.04	0.11	0.17				
x						0.03	0.09	0.166				
y	Kubota	idle	35	0	1	0.02	0.07	0.48	0.02			
z						0.14	0.39	0.66				
x						0.02	0.07	0.226				
y	Deutz-Fahr	idle	45	0	1	0.03	0.10	0.33	0.02			
z						0.14	0.41	0.58				
x						0.02	0.05	0.695				
y	John Deere	idle	46	0	1	0.06	0.17	0.72	0.03			
z						0.03	0.10	0.40				
x						0.01	0.04	0.120				
y	Fendt	idle	92	0	3	0.01	0.06	0.14	0.01			
z						0.08	0.30	0.28				
x						0.01	0.05	0.190				
y	New Holland	idle	70	0	2	0.01	0.05	0.15	0.01			
z						0.02	0.09	0.14				
x						0.01	0.05	0.166				
y	all	idle	350	0	10	0.02	0.07	0.33	0.02			
z						0.06	0.15	0.37				

<b>Whole-body vibration exposure data while driving with a narrow track tractor at two different speeds over frozen path and grass land</b>												
reference	tractor	task	average	$t_m$	meas.	$a_w$	VDV	D	$S_e$	$t_d$	8h VDV	$S_{ed}$
axis			speed (km/h)	(s)	(n)	( $m/s^2$ )	( $m/s^{1.75}$ )	( $m/s^2$ )	(MPa)	(s)	( $m/s^{1.75}$ )	(MPa)
x	Case IH	Path	7.3	730	3	0.37	3.18	4.74	0.20			
y						0.68	5.01	5.68				
z						0.42	2.81	3.66				
x	Case IH	Grass	7.2	139	3	0.28	1.32	2.48	0.16			
y						0.59	3.19	4.70				
z						0.38	1.57	1.90				
x	Case IH	Path	13.6	482	8	0.68	4.59	12.52	0.48			
y						0.95	6.47	11.15				
z						0.70	5.56	14.16				
x	Case IH	Grass	13.6	72	4	0.61	2.62	5.20	0.16			
y						0.68	2.93	4.65				
z						0.50	2.11	2.98				
x	Working day					0.38				14400	9.23	0.74
y						0.57						
z						0.40						

<b>Whole-body vibration exposure data while driving with a narrow track tractor at two different speeds over frozen path and grass land</b>												
reference	tractor	task	average	$t_m$	meas.	$a_w$	VDV	D	$S_e$	$t_d$	8h VDV	$S_{ed}$
axis			speed (km/h)	(s)	(n)	( $m/s^2$ )	( $m/s^{1.75}$ )	( $m/s^2$ )	(MPa)	(s)	( $m/s^{1.75}$ )	(MPa)
x	Claas	Path	7.4	963	4	0.35	2.95	4.57	0.23			
y						0.75	5.98	6.39				
z						0.64	4.58	4.72				
x	Claas	Grass	7.6	180	4	0.27	1.36	2.26	0.18			
y						0.71	4.00	5.25				
z						0.53	2.49	2.66				
x	Claas	Path	13.4	502	8	0.62	4.01	6.66	0.31			
y						1.01	6.83	8.42				
z						0.97	6.04	7.29				
x	Claas	Grass	13.5	72	4	0.43	1.65	3.01	0.15			
y						0.74	2.91	4.07				
z						0.90	3.27	3.86				
x	Working day					0.34				14400	7.87	0.48
y						0.61						
z						0.57						

<b>Whole-body vibration exposure data while driving with a narrow track tractor at two different speeds over frozen path and grass land</b>												
reference	tractor	task	average	$t_m$	meas.	$a_w$	VDV	D	$S_e$	$t_d$	8h VDV	$S_{ed}$
axis			speed (km/h)	(s)	(n)	( $m/s^2$ )	( $m/s^{1.75}$ )	( $m/s^2$ )	(MPa)	(s)	( $m/s^{1.75}$ )	(MPa)
x	Kubota	Path	7.5	929	4	0.40	3.40	5.21	0.24			
y						0.74	5.92	6.68				
z						0.46	3.19	4.20				
x	Kubota	Grass	7.6	174	4	0.32	1.60	2.62	0.18			
y						0.72	4.01	5.24				
z						0.41	1.86	2.17				
x	Kubota	Path	13.6	491	8	0.71	4.71	7.84	0.34			
y						0.99	6.72	9.48				
z						0.76	5.22	7.61				
x	Kubota	Grass	13.7	72	4	0.48	1.91	3.63	0.19			
y						0.74	3.08	5.32				
z						0.67	2.73	3.88				
x	Working day					0.39				14400	9.27	0.53
y						0.61						
z						0.44						



<b>Whole-body vibration exposure data while driving with a narrow track tractor at two different speeds over frozen path and grass land</b>												
reference	tractor	task	average	$t_m$	meas.	$a_w$	VDV	D	$S_e$	$t_d$	8h VDV	$S_{ed}$
axis			speed (km/h)	(s)	(n)	( $m/s^2$ )	( $m/s^{1.75}$ )	( $m/s^2$ )	(MPa)	(s)	( $m/s^{1.75}$ )	(MPa)
x	Deutz-Fahr	Path	7.7	932	4	0.31	2.82	4.19	0.18			
y						0.55	4.46	5.20				
z						0.46	3.17	3.48				
x	Deutz-Fahr	Grass	7.7	174	4	0.22	1.17	3.43	0.18			
y						0.60	3.38	4.99				
z						0.40	1.76	3.14				
x	Deutz-Fahr	Path	13.7	499	8	0.47	3.09	4.83	0.23			
y						0.63	4.35	6.38				
z						0.60	3.66	4.81				
x	Deutz-Fahr	Grass	13.7	66	4	0.26	1.07	2.01	0.12			
y						0.48	1.99	3.38				
z						0.49	1.77	2.24				
x	Working day					0.27				14400	6.33	0.36
y						0.42						
z						0.37						

<b>Whole-body vibration exposure data while driving with a narrow track tractor at two different speeds over frozen path and grass land</b>												
reference	tractor	task	average	$t_m$	meas.	$a_w$	VDV	D	$S_e$	$t_d$	8h VDV	$S_{ed}$
axis			speed (km/h)	(s)	(n)	( $m/s^2$ )	( $m/s^{1.75}$ )	( $m/s^2$ )	(MPa)	(s)	( $m/s^{1.75}$ )	(MPa)
x	John Deere	Path	7.6	934	4	0.33	2.78	4.51	0.25			
y						0.75	5.98	7.03				
z						0.59	3.99	4.70				
x	John Deere	Grass	7.7	176	4	0.26	1.31	2.07	0.19			
y						0.73	3.94	5.31				
z						0.54	2.35	2.58				
x	John Deere	Path	13.7	490	8	0.58	4.45	8.12	0.33			
y						1.02	6.81	9.21				
z						0.93	5.80	7.52				
x	John Deere	Grass	13.4	78	4	0.45	1.93	3.49	0.16			
y						0.76	3.20	4.39				
z						0.81	2.89	3.48				
x	Working day					0.32				14400	8.63	0.52
y						0.62						
z						0.54						

<b>Whole-body vibration exposure data while driving with a narrow track tractor at two different speeds over frozen path and grass land</b>												
reference	tractor	task	average	$t_m$	meas.	$a_w$	VDV	D	$S_e$	$t_d$	8h VDV	$S_{ed}$
axis			speed (km/h)	(s)	(n)	( $m/s^2$ )	( $m/s^{1.75}$ )	( $m/s^2$ )	(MPa)	(s)	( $m/s^{1.75}$ )	(MPa)
x	Fendt	Path	7.9	907	4	0.38	3.31	4.75	0.24			
y						0.84	6.57	6.71				
z						0.51	3.51	4.82				
x	Fendt	Grass	7.9	167	4	0.26	1.30	2.21	0.20			
y						0.81	4.84	5.68				
z						0.40	1.78	1.98				
x	Fendt	Path	13.8	488	8	0.56	3.77	6.39	0.31			
y						1.06	6.94	8.53				
z						0.72	4.79	7.11				
x	Fendt	Grass	13.9	78	4	0.30	1.23	2.23	0.15			
y						0.78	3.28	4.37				
z						0.53	1.96	2.48				
x	Working day					0.32				14400	7.65	0.48
y						0.66						
z						0.43						

Whole-body vibration exposure data while driving with a narrow track tractor at two different speeds over frozen path and grass land												
reference	tractor	task	average	t <sub>m</sub>	meas.	a <sub>w</sub>	VDV	D	S <sub>e</sub>	t <sub>d</sub>	8h VDV	S <sub>ed</sub>
axis			speed (km/h)	(s)	(n)	(m/s <sup>2</sup> )	(m/s <sup>1.75</sup> )	(m/s <sup>2</sup> )	(MPa)	(s)	(m/s <sup>1.75</sup> )	(MPa)
x						0.32	2.71	4.34				
y	New Holland	Path	7.8	923	4	0.68	5.47	5.83	0.21			
z						0.50	5.22	4.72				
x						0.24	1.18	1.94				
y	New Holland	Grass	7.8	172	4	0.61	3.43	4.29	0.15			
z						0.39	2.06	2.19				
x						0.68	4.59	7.99				
y	New Holland	Path	13.8	491	8	0.90	5.91	7.79	0.97			
z						1.37	12.68	30.21				
x						0.43	1.80	3.42				
y	New Holland	Grass	13.8	78	4	0.71	2.75	4.21	0.16			
z						0.92	5.00	4.18				
x						0.36					8.85	
y	Working day					0.55				14400	12.30	1.48
z						0.70					24.16	

## Bijlage B – De geteste trekkers en configuratie



1. Case IH 100 Quantum



2. Claas 240 ve Nexos



3. Kubota M5101 Narrow



4. Deutz Fahr 5100 DS



5. John Deere 5090 GV



6. Fendt 209 v Vario



7. New Holland T4 100n



Voorband: Trelleborg TM 700



Achterband: Trelleborg TM 700



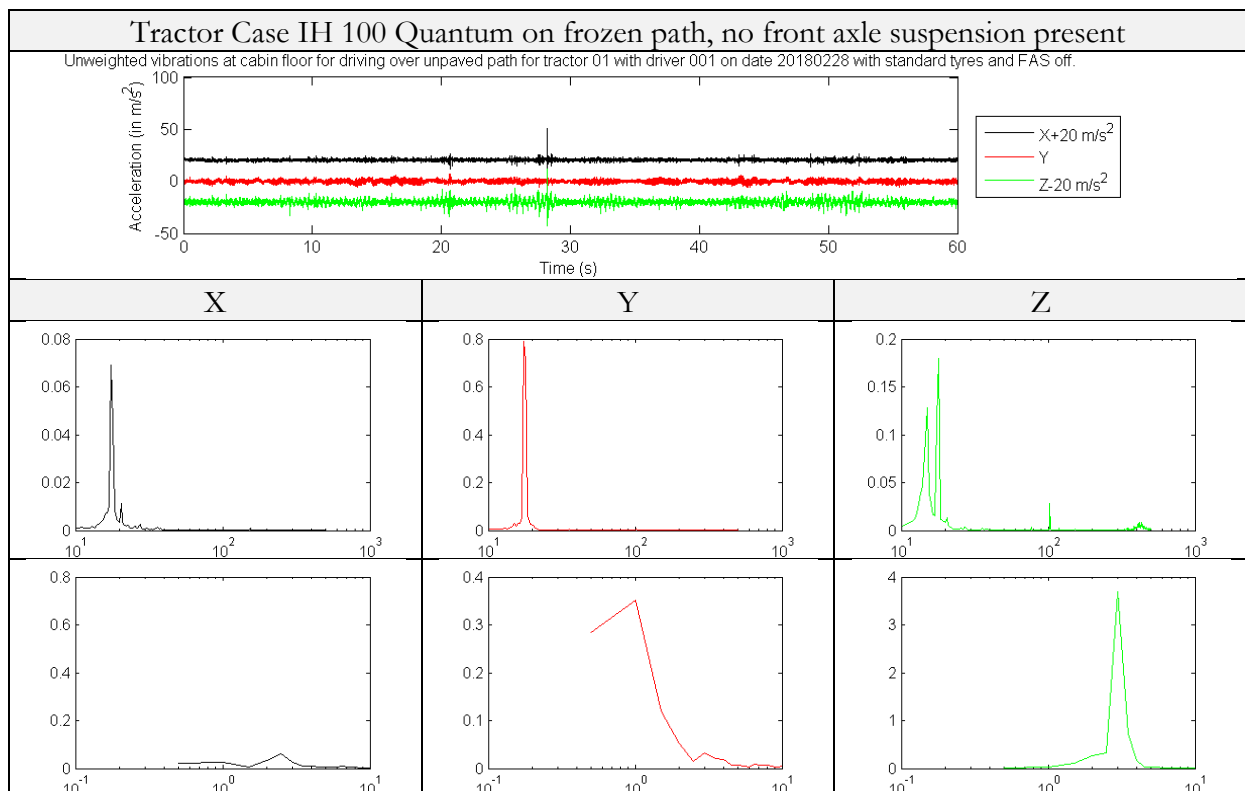
Stoel COBO SC84-M97/3



Stoel Grammer MSG 93/511

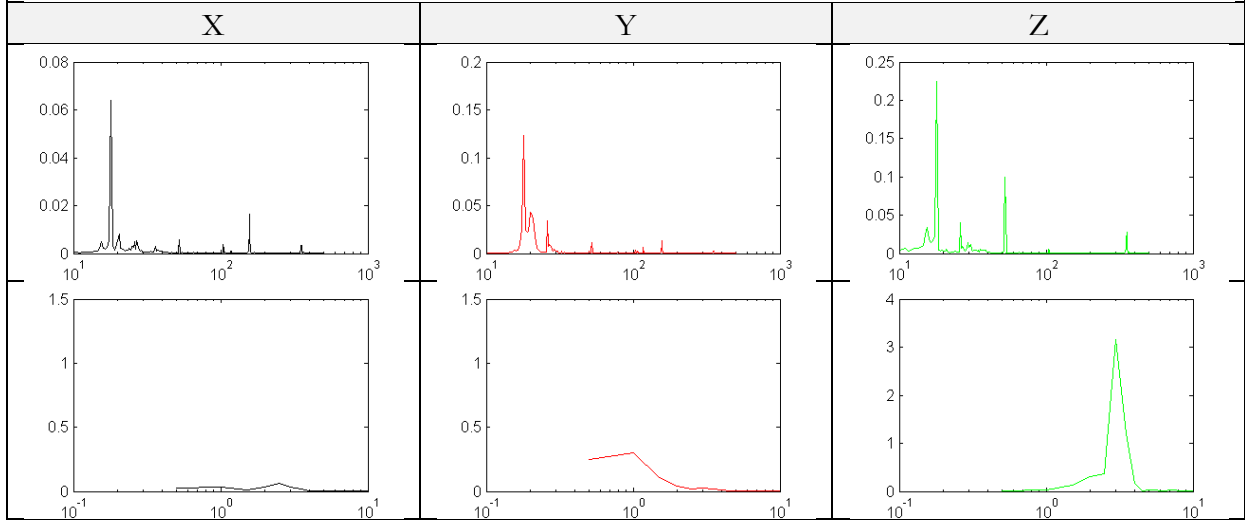
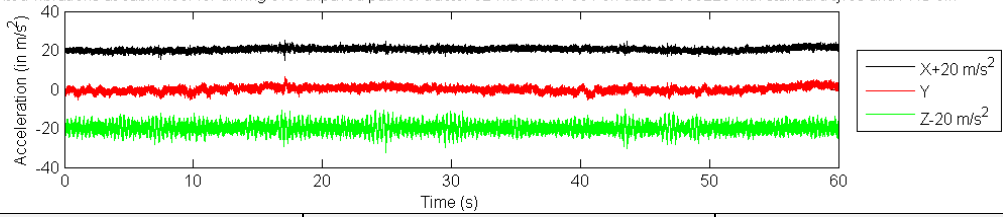
## Bijlage C – Frequentiespectra

Tijdseries en frequentiespectra van ruwe (ongewogen) signalen gemeten aan de cabinebodemplaat onder de stoel, voor één chauffeur bij 13-14 km/u rechtuit rijden over een identiek segment (rijduur steeds 60") van het bevroren onverhard pad (standaard banden; voorasvering (FAS) aan of uit) en niet-bevroren onverhard pad (bij PneuTrac en standaard lage druk banden). Zie de titel van de tijdserie voor de weergegeven situatie. Frequentiespectra zijn weergegeven per trillingsrichting X, Y en Z, en in twee bereiken (horizontale as): 10-1000 Hz (boven) en 0.1-10 Hz (onder). De verticale as geeft de "power" weer, de mate waarin een frequentie in het signaal voorkomt.



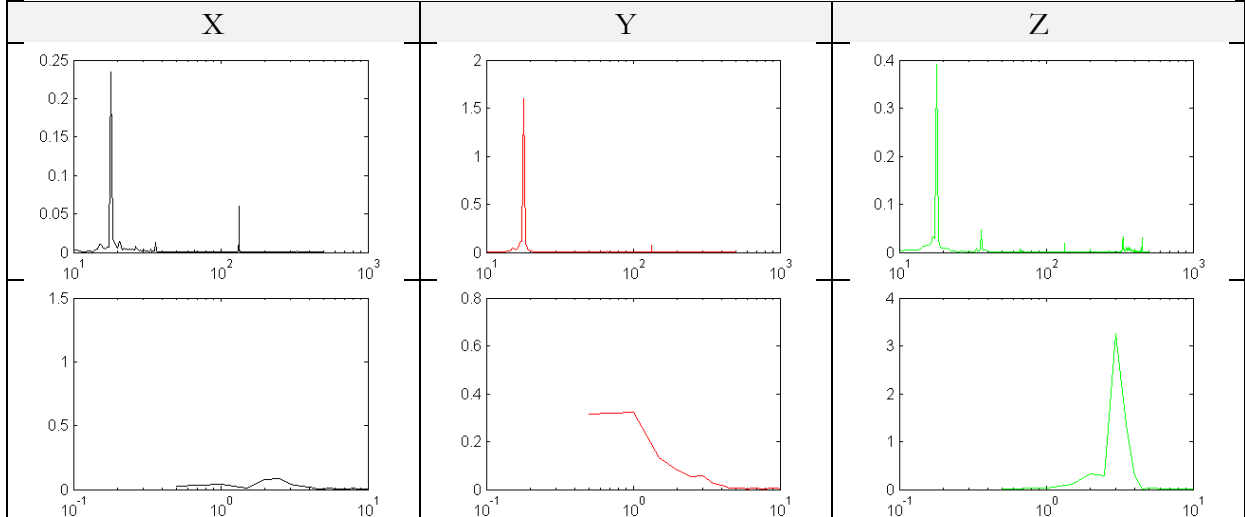
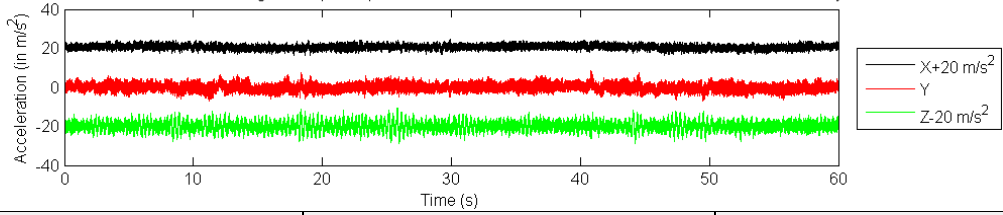
### Tractor Claas 240 ve Nexos on frozen path, no front axle suspension present

Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 02 with driver 001 on date 20180228 with standard tyres and FAS off.



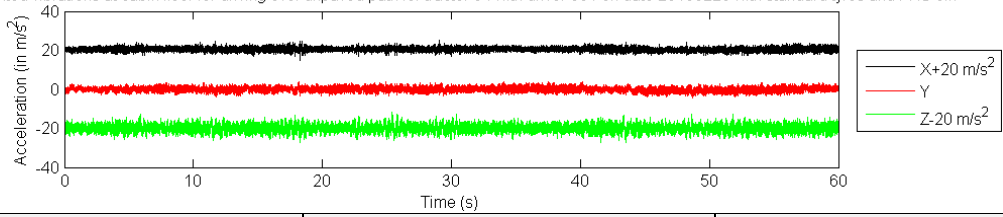
### Tractor Kubota M5101 Narrow on frozen path, no front axle suspension present

Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 03 with driver 001 on date 20180228 with standard tyres and FAS off.



### Tractor Deutz Fahr 5100 DS on frozen path, front axle suspension off

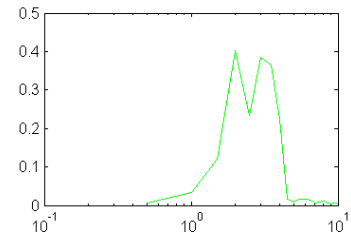
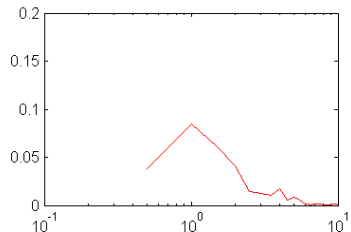
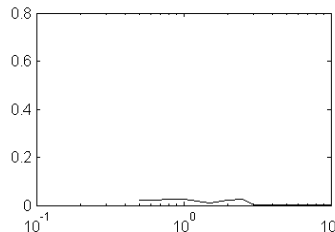
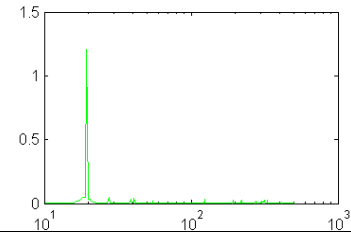
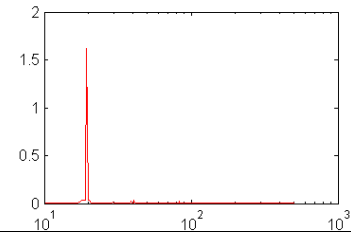
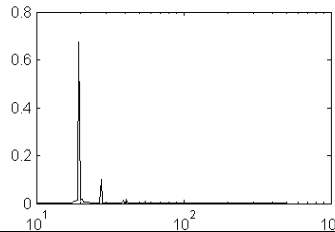
Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 04 with driver 001 on date 20180228 with standard tyres and FAS off.



X

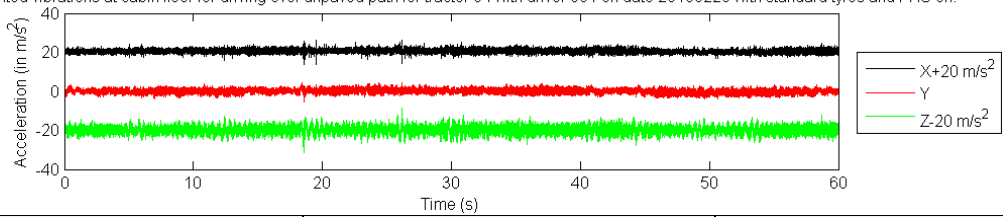
Y

Z



### Tractor Deutz Fahr 5100 DS on frozen path, front axle suspension on

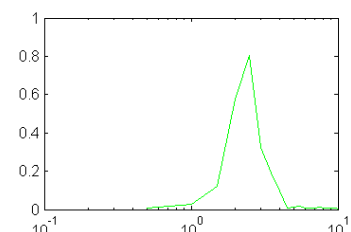
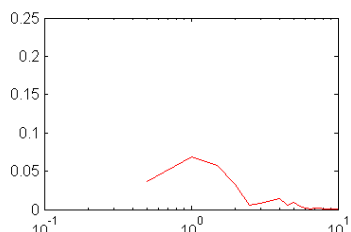
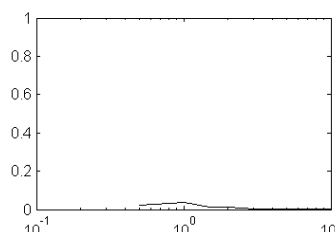
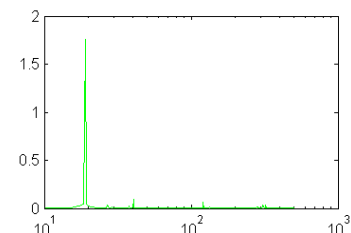
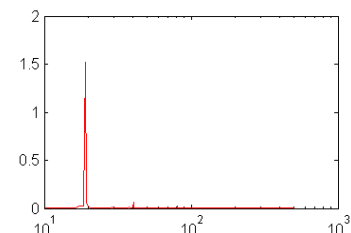
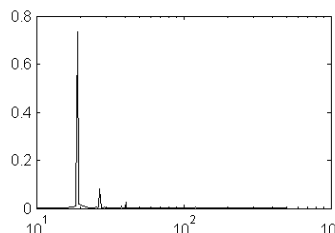
Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 04 with driver 001 on date 20180228 with standard tyres and FAS on.



X

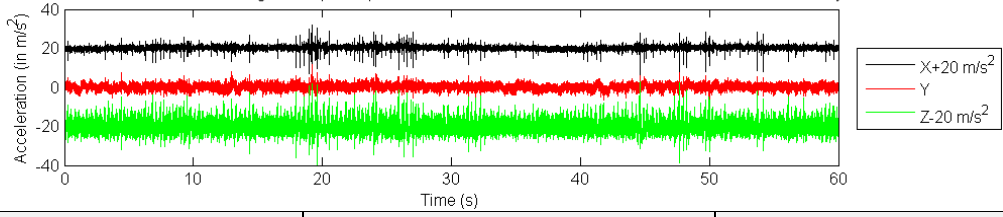
Y

Z



### Tractor John Deere 5090 GV on frozen path, no front axle suspension present

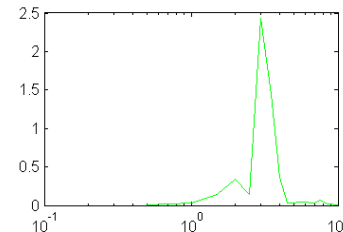
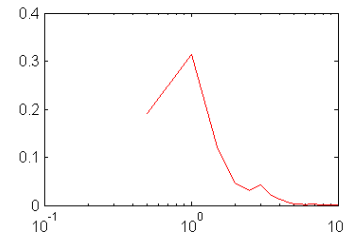
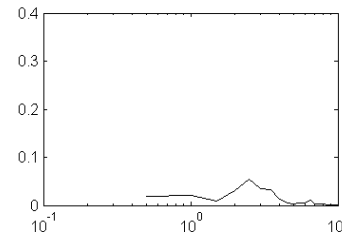
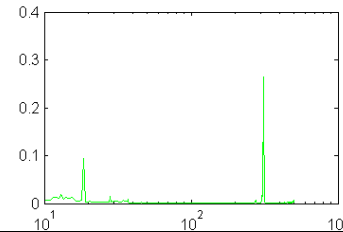
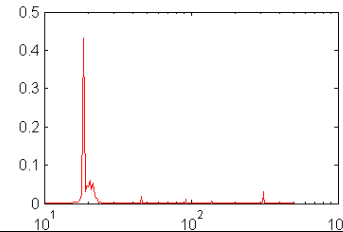
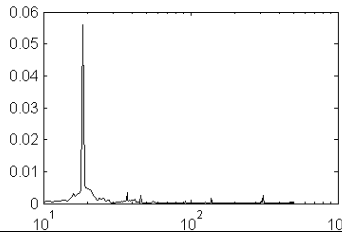
Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 05 with driver 001 on date 20180302 with standard tyres and FAS off.



X

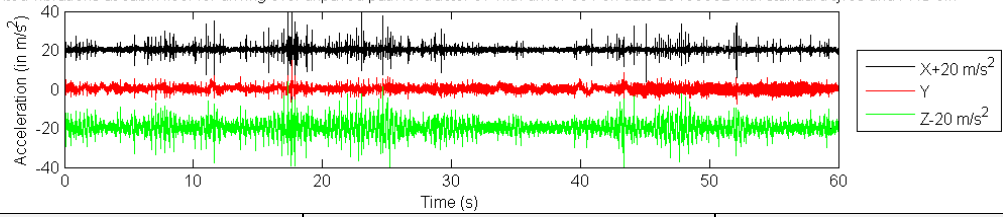
Y

Z



### Tractor New Holland T4 100n on frozen path, no front axle suspension present

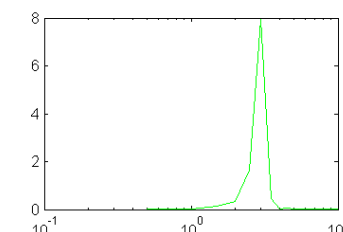
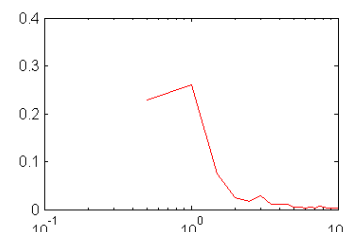
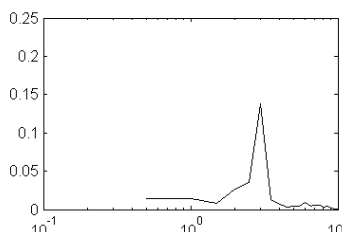
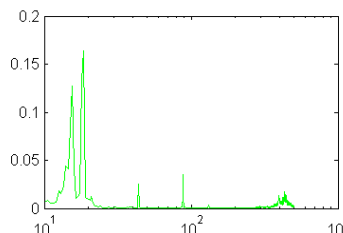
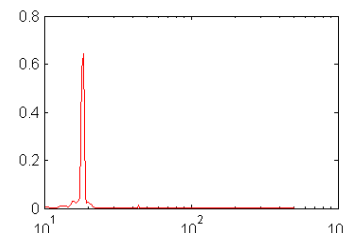
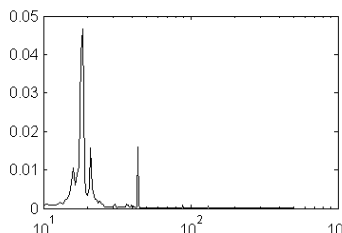
Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 07 with driver 001 on date 20180302 with standard tyres and FAS off.



X

Y

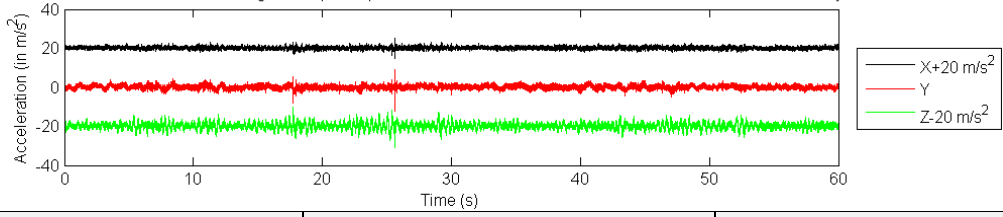
Z





### Tractor Fendt 209 v Vario on frozen path, front axle suspension off

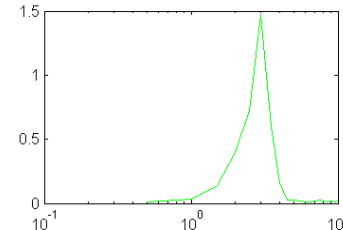
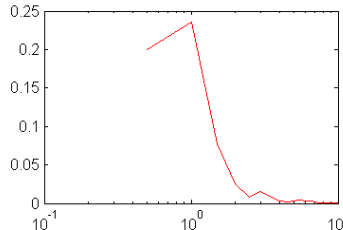
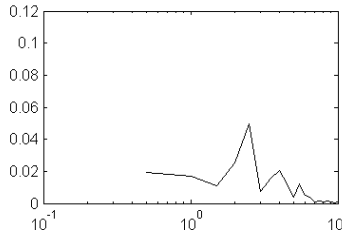
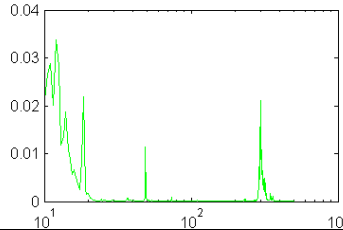
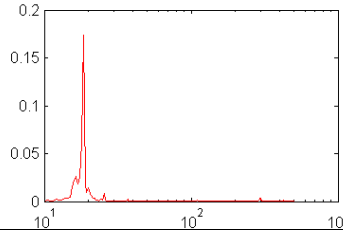
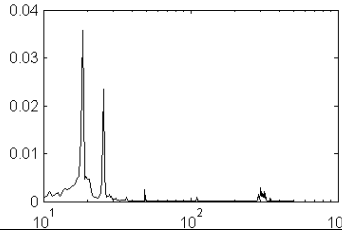
Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 06 with driver 001 on date 20180302 with standard tyres and FAS off.



X

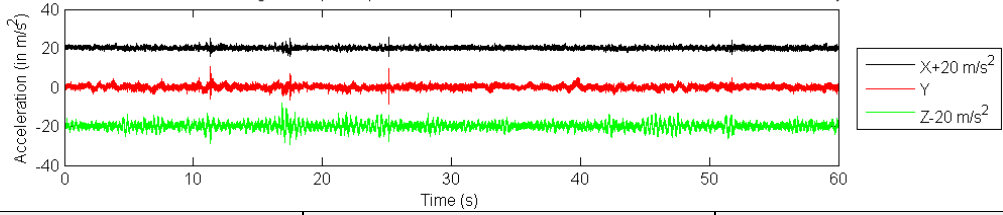
Y

Z



### Tractor Fendt 209 v Vario on frozen path, front axle suspension on

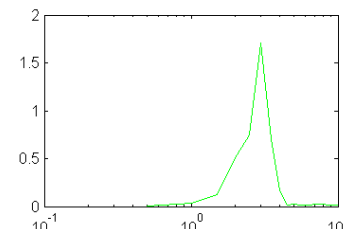
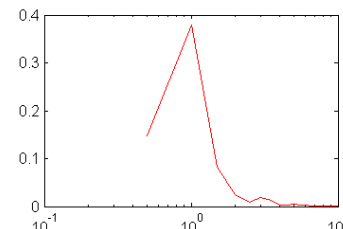
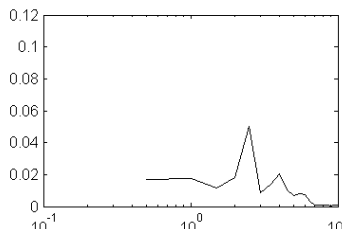
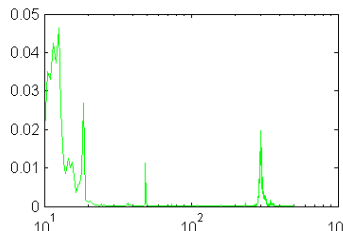
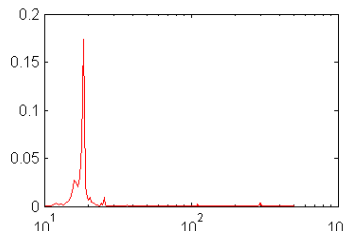
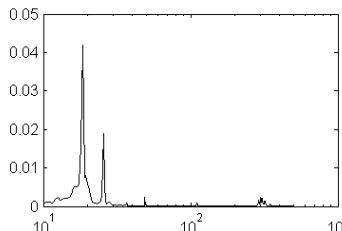
Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 06 with driver 001 on date 20180302 with standard tyres and FAS on.



X

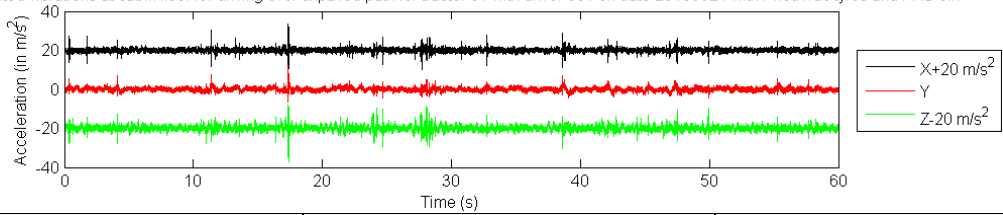
Y

Z



### Tractor Case IH 100 Quantum on PneuTrac tyres, unfrozen path, no front axle suspension

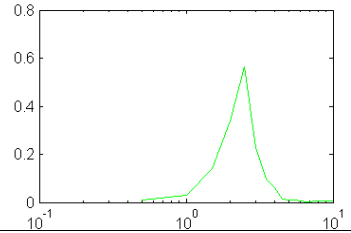
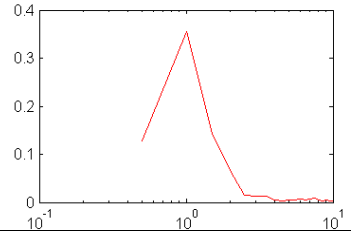
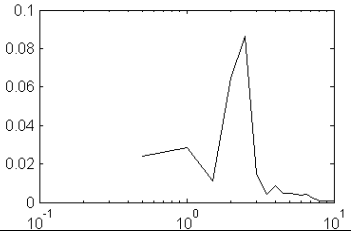
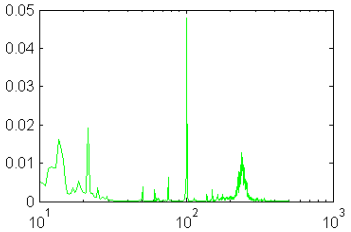
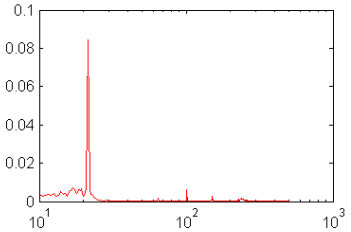
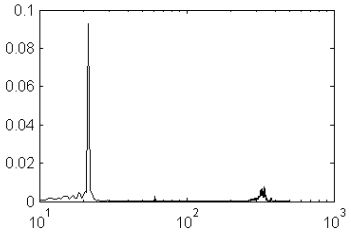
Unweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 01 with driver 001 on date 20180321 with PneuTrac tyres and FAS off.



X

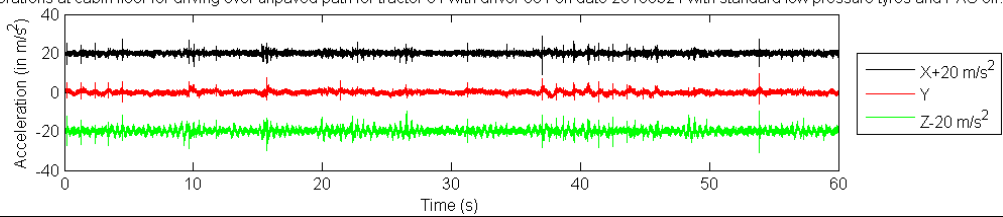
Y

Z



### Tractor Case IH 100 Quantum on low pressure tyres, unfrozen path, no front axle suspension

Inweighted vibrations at cabin floor for driving over unpaved path for tractor 01 with driver 001 on date 20180321 with standard low pressure tyres and FAS off.



X

Y

Z

