

Aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Spannungseinträge unter Holzerntemaschinen und Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

M. Sc. Roland Riggert

aus Uelzen

Kiel 2015

Dekan: Prof. Dr. Eberhard Hartung

1. Gutachter: Prof. Dr. Rainer Horn
2. Gutachter: Prof. Dr. Rainer Duttmann

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Zielsetzung.....	9
2	Material und Methoden.....	10
2.1	Lage, Geologie sowie Böden der Versuchsstandorte.....	10
2.2	Eingesetzte Maschinen.....	13
2.2.1	Holzerntemaschinen.....	13
2.2.2	Sonstige Maschinen.....	15
2.2.3	Maschinenmodifikationen.....	16
2.3	Methodik.....	17
2.3.1	Versuchsdesign.....	17
2.3.1.1	Versuchsdesign für die Standorte Reinshof, Vaake und Silberborn.....	17
2.3.1.2	Versuchsdesign für den Standort Göttingen.....	18
2.3.1.3	Versuchsdesign für den Standort Hasbruch.....	18
2.3.1.4	Versuchsdesign für den Standort Lenglern.....	19
2.3.1.5	Versuchsdesign für die Standorte Wiedelah und Wülperode.....	20
2.3.2	Probenentnahme und Feldmessungen.....	20
2.3.3	Laboranalytik.....	21
2.3.4	Spannungsmessungen.....	22
2.3.5	Auswertung und Bewertung der Ergebnisse.....	24
2.3.5.1	Statistische Auswertung.....	24
2.3.5.2	Bewertung der bodenphysikalischen Parameter.....	24
2.3.5.3	Bewertung der technischen Befahrbarkeit.....	25
2.3.5.4	Auswertung des Drucksetzungsverhaltens von Setzung und Matrixpotenzial.....	26
2.3.5.5	Auswertung mittels linearer Regression.....	27
3	Ergebnisse.....	29
3.1	Einzelauswertung der Befahrungsversuche.....	29
3.1.1	Versuchsstandort Reinshof.....	29
3.1.1.1	Bodencharakteristika und Maschinenparameter.....	29
3.1.1.2	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter.....	30
3.1.1.3	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens.....	31
3.1.2	Versuchsstandort Vaake.....	33
3.1.2.1	Bodencharakteristika und Maschinenparameter.....	33
3.1.2.2	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter.....	34
3.1.2.3	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens.....	35

3.1.3	Versuchsstandort Silberborn.....	37
3.1.3.1	Bodencharakteristika und Maschinenparameter	37
3.1.3.2	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter.....	38
3.1.3.3	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens	39
3.1.4	Versuchsstandort Göttingen.....	41
3.1.4.1	Bodencharakteristika und Maschinenparameter	41
3.1.4.2	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter.....	42
3.1.4.3	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens	44
3.1.5	Versuchsstandort Hasbruch	47
3.1.5.1	Bodencharakteristika und Maschinenparameter	47
3.1.5.2	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter.....	48
3.1.5.3	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens	49
3.1.6	Versuchsstandort Lengler	51
3.1.6.1	Bodeneigenschaften und Maschinencharakteristika	51
3.1.6.2	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter.....	52
3.1.6.3	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens	53
3.1.7	Versuchsstandort Wiedelah	56
3.1.7.1	Bodencharakteristika.....	56
3.1.7.2	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter.....	56
3.1.8	Versuchsstandort Wülperode.....	58
3.1.8.1	Bodencharakteristika.....	58
3.1.8.2	Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter.....	58
3.2	Zusammenfassende Betrachtung der Einzelergebnisse.....	60
3.2.1	Einfluss eines modernen Holzertezyklus auf die Bodenstruktur	60
3.2.1.1	Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter.....	60
3.2.1.2	Spannungsverteilung der getesteten Maschinen.....	63
3.2.2	Technische Möglichkeiten zur Spannungsreduktion	64
3.2.2.1	Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen auf die Bodenstruktur.....	64
3.2.2.2	Spannungsverteilung der getesteten Maschinen.....	66
3.2.2.3	Versuch zur Bestimmung von extremen Spannungsereignissen.....	67
3.2.3	Natürliche Möglichkeiten zur Spannungsreduktion	68
3.2.3.1	Auswirkungen auf die Bodenstruktur	68
3.3	Interaktion verschiedener Bodenparameter untereinander	70
3.3.1	Bedeutung des Matrixpotenzials auf Bodenstabilität.....	70
3.3.1.1	Überfahrungsversuche bei einem Matrixpotenzial von -70 hPa.....	70
3.3.1.2	Überfahrungsversuche bei einem Matrixpotenzial von -30 hPa.....	71
3.3.2	Korrelationsanalyse	72
3.3.2.1	Auswirkungen von Kontaktflächendruck, Matrixpotenzial und Befahrungintensität auf die Spannungseinträge	72
3.3.2.2	Auswirkungen der Textur auf die Spannungseinträge	76
3.3.2.3	Auswirkungen von zunehmenden Werten von σ_1 auf bodenphysikalische Parameter.....	77
3.3.2.4	Auswirkungen von zunehmenden Vorbelastungswerten auf andere bodenphysikalische Parameter	78

4	Diskussion	79
4.1	Auswirkungen eines typischen Holzerntezyklus auf die Bodenstruktur	79
4.1.1	Spannungseinträge und die Abhängigkeit von externen und internen Bodenfaktoren.....	82
4.1.1.1	Auflast/Kontaktflächendruck	86
4.1.1.2	Befahrungintensität.....	88
4.1.1.3	Bodengefüge	91
4.1.1.4	Matrixpotenzial	93
4.2	Möglichkeiten zur Spannungsreduzierung und nachhaltigeren Nutzung von Böden	95
4.2.1	Einsatz von Maschinenmodifikationen (Bogiebänder).....	95
4.2.2	Einsatz einer Spezialmaschine	97
4.2.3	Einsatz von kleineren Maschinen	98
4.2.4	Wurzelarmierung und Reisigauflage.....	100
5	Fazit.....	102
5.1	Empfehlungen für die Forstpraxis.....	107
6	Zusammenfassung.....	108
7	Abstract.....	110
8	Literaturverzeichnis	111
9	Anhang	135

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1. Übersicht und Bezeichnung der Versuchsstandorte in Niedersachsen, Deutschland (Quelle: (2015)).</i>	10
<i>Abbildung 2. Zeitliche Entwicklung des Matrixpotenzials und der Setzung in Abhängigkeit von der Auflast, dargestellt als Normalspannung.</i>	26
<i>Abbildung 3. Auswirkungen der Überfahrungen mit John Deere 1270e, Ponsse Buffalo und Befahrungintensitäten auf bodenphysikalische Parameter in Reinshof.</i>	30
<i>Abbildung 4. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Reinshof.</i>	31
<i>Abbildung 5. Auswirkungen der Überfahrungen mit John Deere 1270e, Ponsse Buffalo und Befahrungintensitäten auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Vaake.</i>	34
<i>Abbildung 6. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Vaake.</i>	35
<i>Abbildung 7. Auswirkungen der Überfahrungen mit John Deere 1270e, Ponsse Buffalo und Befahrungintensitäten auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Silberborn.</i>	38
<i>Abbildung 8. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Silberborn.</i>	39
<i>Abbildung 9. Auswirkungen der unterschiedlichen Befahrungintensitäten auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Göttingen.</i>	42
<i>Abbildung 10. Auswirkungen der Überfahrungen mit verschiedenen Maschinenspezifikationen auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Göttingen.</i>	43
<i>Abbildung 11. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der zehnten Überfahrt am Versuchsstandort Göttingen.</i>	44
<i>Abbildung 12. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der zehnten Überfahrt am Versuchsstandort Göttingen.</i>	45
<i>Abbildung 13. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der zehnten Überfahrt am Versuchsstandort Göttingen.</i>	46

<i>Abbildung 14. Auswirkungen der Überfahrungen mit Rottne F14 und EMB Elliator auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Hasbruch.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 15. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der dritten bzw. siebten Überfahrt am Versuchsstandort Hasbruch.....</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 16. Auswirkungen der Überfahrungen mit John Deere 6320, Hägglunds und Holzanhänger auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Lenglern</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 17. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität des John Deere 6320 (JD6) im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Lenglern.</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 18. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität des Hägglunds (HG) im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Lenglern.</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 19. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität des Holzanhängers (SCH) im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Lenglern.</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 20. Auswirkungen der Überfahrungen mit Häckslers New Holland FR 9600 auf zwei unterschiedlich genutzte Produktionsflächen hinsichtlich bodenphysikalischer Parameter in Wiedelah.....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 21. Auswirkungen der Überfahrungen mit Häckslers New Holland FR 9600 auf zwei unterschiedlich genutzte Produktionsflächen hinsichtlich bodenphysikalischer Parameter in Wülperode</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 22. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Reinshof.....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 23. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Vaake</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 24. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Silberborn</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 25. Darstellung der dynamischen Spannungseinträge (σ_1) während eines Holzerntezyklus für die Versuchsstandorte Reinshof, Vaake und Silberborn</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 26. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Göttingen</i>	<i>64</i>

<i>Abbildung 27. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Hasbruch</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 28. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Lenglern.....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 29. Darstellung der dynamischen Spannungseinträge (σ_1) der verschiedenen technischen Möglichkeiten zur Spannungsreduktion an den Versuchsstandorten Göttingen, Hasbruch und Lenglern.....</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 30. Normale und extrem Spannungseinträge von einem starren Kettenlaufwerk (John Deere 6320) und einem variablen Kettenlaufwerk (Hägglunds) am Versuchsstandort Lenglern in 20 cm und 40 cm Bodentiefe.....</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 31. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzungsvarianten am Versuchsstandort Wülperode</i>	<i>68</i>
<i>Abbildung 32. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzungsvarianten am Versuchsstandort Wiedelah.....</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 33. Einfluss des Kontakflächendrucks, des Matrixpotentials und der Befahrungsintensität für Spannungseinträge > 200 kPa (links unten) und < 200 kPa (rechts unten) auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 20 cm Tiefe unter den getesteten Holzerntemaschinen.....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 34. Einfluss des Kontakflächendrucks, des Matrixpotentials und der Befahrungsintensität für Spannungseinträge > 200 kPa (links unten) und < 200 kPa (rechts unten) auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 40 cm Tiefe unter den getesteten Holzerntemaschinen.....</i>	<i>73</i>
<i>Abbildung 35. Einfluss des Kontakflächendrucks, des Matrixpotentials und der Befahrungsintensität für Spannungseinträge > 200 kPa (links unten) und < 200 kPa (rechts unten) auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 60 cm Tiefe unter den getesteten Holzerntemaschinen.....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 36. Einfluss der Textur auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 20 cm Tiefe unter den getesteten Holzerntemaschinen.....</i>	<i>76</i>
<i>Abbildung 37. Einfluss der Textur auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 40 cm Tiefe unter den getesteten Holzerntemaschinen.....</i>	<i>77</i>
<i>Abbildung 38. Auswirkungen von steigenden Werten der 1. Hauptspannung (σ_1) auf die Vorbelastung (P_v), die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), das Gesamtporenvolumen (GPV) und der Luftkapazität (LK) in allen Tiefen.....</i>	<i>78</i>

- Abbildung 39. Einfluss von steigenden Vorbelastungswerten (P_v) auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_p), das Gesamtporenvolumen (GPV) und der Luftkapazität (LK) in allen Tiefen..... 78*
- Abbildung 40. Schema zur Bodenverdichtung und die Auswirkungen auf die physikalischen Bodenparameter (gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_p), Luftkapazität (LK), Vorbelastung (P_v) und Lagerungsdichte (ρ_B) und die technische Befahrbarkeit in Abhängigkeit der internen und externen Bodenausgangsfaktoren und ihre beschriebenen Parameter Vorbelastung (P_v), Scherwiderstand (τ) und 1. Hauptspannung (σ_1)..... 102*

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1. Geografische Lage, Zeitraum, Nutzung und geologische Einheit der Versuchsstandorte.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabelle 2. Übersicht und allgemeine Eigenschaften der getesteten Holzerntemaschinen.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabelle 3. Übersicht der getesteten Maschinen mit speziellen Antriebssystemen.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 4. Übersicht der Bogiebandmodifikationen für den Forwarder Ponsse Buffalo.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabelle 5. Übersicht der Versuchsvarianten an den Standorten Reinshof, Vaake und Silberborn.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 6. Übersicht der Versuchsvarianten am Standort Göttingen.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 7. Übersicht der Versuchsvarianten für den Standort Hasbruch.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 8. Übersicht der Versuchsvarianten für den Standort Lenglern.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 9. Übersicht der Versuchsvarianten für die Standorte Wiedelah und Wülperode.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 10. Übersicht des Probenumfangs für alle Standorte, Varianten und Tiefe.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabelle 11. Übersicht der Spannungsmessungen je Standort, Maschinenvariante und Überfahrtenanzahl.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 12. Tabelle zur Klassifizierung der bodenphysikalischen Parameter (AD-hoc-AG Boden, 2005; DVWK, 1995; 1997).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 13. Tabelle zur Bewertung der bodenphysikalischen Parameter.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 14. Übersicht der verschiedenen Korrelationsanalysen mit den analysierten Parametern und Vorkommen in zugehöriger Abbildung.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 15. Übersicht der getesteten Varianten und Tiefen für die jeweilige Korrelationsanalyse.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 16. Bodeneigenschaften des Parabraunerde-Pseudogleys aus Löss am Versuchsstandort Reinshof.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 17. Standortspezifische Maschineneigenschaften von John Deere 1270e und Ponsse Buffalo am Versuchsstandort Reinshof.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 18. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von John Deere 1270e und Ponsse Buffalo differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Reinshof.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabelle 19. Bodeneigenschaften des Parabraunerde-Pseudogleys aus Löss am Versuchsstandort Vaake.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 20. Standortspezifische Maschineneigenschaften von John Deere 1270e und Ponsse Buffalo am Versuchsstandort Vaake.....</i>	<i>33</i>

<i>Tabelle 21. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von John Deere 1270e und Ponsse Bufallo differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Vaake.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabelle 22. Bodeneigenschaften der (Norm-)Braunerde aus lösshaltiger Fließerde am Versuchsstandort Silberborn.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabelle 23. Standortspezifische Maschineneigenschaften von John Deere 1270e und Ponsse Buffalo am Versuchsstandort Silberborn.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabelle 24. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von John Deere 1270e und Ponsse Bufallo differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Silberborn.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabelle 25. Bodeneigenschaften des (Norm-)Pseudogleys aus Löss am Versuchsstandort Göttingen.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 26. Standortspezifische Maschineneigenschaften des Ponsse Buffalo am Versuchsstandort Göttingen.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 27. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von Ponsse Bufallo, Ponsse Bufallo mit Moorband und Ponsse Bufallo mit Traktionsband differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Göttingen.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabelle 28. Bodeneigenschaften des (Norm-)Pseudogleys aus Geschiebelehm am Versuchsstandort Hasbruch.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 29. Standortspezifische Maschineneigenschaften von Rottne F14 und EMB Elliator am Versuchsstandort Hasbruch.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 30. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von Rottne F14 und EMB Elliator differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Hasbruch.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabelle 31. Bodeneigenschaften der (Norm-)Parabraunerde aus Löss am Versuchsstandort Lenglern.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabelle 32. Spezielle Maschineneigenschaften von John Deere 6320, Hägglunds Bv206 und des Holzanhängers am Versuchsstandort Lenglern.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabelle 33. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von John Deere 6320, Hägglunds und Holzanhänger differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Lenglern.....</i>	<i>55</i>

<i>Tabelle 34. Bodeneigenschaften der Vega aus Auensedimenten am Versuchsstandort Wiedelah.</i>	<i>56</i>
<i>Tabelle 35. Bodeneigenschaften des Auengleys aus Auensedimenten am Versuchsstandort Wülperode.</i>	<i>58</i>
<i>Tabelle 36. Auflastbedingte Änderung von Wasserspannung und Setzung während der Drucksetzung für die Varianten Ref, JD, PB und PB5 am Versuchsstandort Reinshof.</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 37. Auflastbedingte Änderung von Wasserspannung und Setzung während der Drucksetzung für die Varianten Ref, EMB und F14 am Versuchsstandort Hasbruch.</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 38. Zusammenfassung der Ergebnisse zu den bodenphysikalischen Parametern und der technischen Befahrbarkeit im Ober- und Unterboden (40 cm) der verschiedenen Versuchsstandorte</i>	<i>104</i>

Abkürzungsverzeichnis

CaCl ₂	Kalziumchlorid Lösung
C _{org}	organischer Kohlenstoffgehalt [%]
eGP	enge Grobporen [Ψ_m : - 60 und - 300 hPa]
EMB	Variante: Spezial-Forwarder <i>EMB Elliator</i>
F14	Variante: Forwarder <i>Rottne F14</i>
FP	Feinporen [Ψ_m : > - 15.000 hPa]
GPV	Gesamtporenvolumen [Vol.-%]
HG	Variante: Spezialmaschine <i>Hägglunds Bv206</i>
JD	Variante: Harvester <i>John Deere 1270e</i>
JD6	Variante: Ackerschlepper <i>John Deere 6320</i>
k _f	gesättigte Wasserleitfähigkeit [$cm \cdot d^{-1}$]
k _l	Luftleitfähigkeit [$cm \cdot d^{-1}$]
KUP	Variante: Kurzumtriebsplantage
l, m, n	Kosini der Winkel zwischen den Senkrechten der Berechnungsebenen und den Richtungen x, y, z
LK	Luftkapazität [Vol.-%]
MB	Variante: Moor-Bogieband
MNS	mittlere Normalspannung [kPa]
MP	Mittelporen [Ψ_m : - 300 und -15.000 hPa]
NH	Variante: <i>New Holland FR 9060</i>
OCTSS	oktaedrische Scherspannung
PB	Variante: Forwarder <i>Ponsse Buffalo</i>
PB 5	Variante: <i>Ponsse Buffalo</i> mit fünf Überfahrten
PB 10	Variante: <i>Ponsse Buffalo</i> mit zehn Überfahrten
P _v	Vorbelastungswert [kPa]
SCH	Variante: Holzanhänger (Schlitten) auf Kufen
SST	Stress State Transducer System
TB	Variante: Traktions-Bogieband
Ü1, Ü2, ..., Ü10	1., 2. ..., 10. Überfahrt
wGP	weite Grobporen [Ψ_m : 0 und - 60 hPa]
WI	Variante: Wiese

Symbolverzeichnis

Ψ_m	Matrixpotenzial [<i>hPa</i>]
φ	Winkel der inneren Reibung [°]
ρ_B	Lagerungsdichte [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
σ	Standardabweichung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	1., 2., 3. Hauptspannung [<i>kPa</i>]
σ_n	Normalspannung [<i>kPa</i>]
$\sigma_{x, y, z}$	orthogonale Normalspannungen [<i>kPa</i>] der Ebenen x, y, z
τ	Scherwiderstand [<i>kPa</i>]
$\tau_{xy, xz, yz}$	oktaedrische Scherspannungen [<i>kPa</i>] in Richtung x, y, z
\bar{x}_{arth}	Arithmetisches Mittel

1 Einleitung

Die Landesfläche Deutschlands beträgt 35.720.780 Hektar, wovon 32 % (ca. 11 Mio. Hektar) als Waldfläche ausgewiesen sind. Innerhalb der Europäischen Union sind 42 % der Landesfläche mit Wald bedeckt, was ungefähr 180 Millionen Hektar entspricht (Eurostat, 2013). Der Waldanteil der einzelnen Flächen-Bundesländer schwankt zwischen 11 % in Schleswig-Holstein und 42 % in Hessen bzw. Rheinland-Pfalz. Die Waldlandschaft in Deutschland wird dabei geprägt von vier Baumarten: der Fichte (*Picea*), der Kiefer (*Pinus*), der Buche (*Fagus*) und der Eiche (*Quercus*). Zusammen dominieren sie die Waldlandschaft mit einem Anteil von 73 %. Auf die Fichte entfällt dabei mit 25 % der größte Anteil, gefolgt von der Kiefer mit 22 %, der Buche mit 15 % und der Eiche mit 10 % (BWI 3, 2012). Allerdings spiegeln diese Anteile nicht die natürliche Waldvegetation wider, denn Deutschland liegt in der Vegetationszone „Sommergrüner Laubwald“. Die dominierende natürliche Baumart Mitteleuropas und somit auch Deutschlands ist die Buche. Eiche, Fichte und Kiefer sind Bäume, die natürlicherweise nur an Grenzstandorten, wie beispielsweise in höheren Lagen, kälteren oder wärmeren Regionen vorkommen (Ellenberg, 1986). Die Aufstockung des Nadelwaldes insbesondere mit Fichte und Kiefer ging mit der Intensivierung der Forstwirtschaft einher. Allerdings beträgt der Laubbaumanteil heute schon wieder 43 % und ist im Vergleich zu den vorherigen Bundeswaldinventuren von 1987 und 2002 jeweils um 7 % gestiegen (BWI 2, 2002; BWI 3, 2012). Aus den Daten der Eigentumsverhältnisse der dritten Bundeswaldinventur (BWI 3, 2012) geht hervor, dass rund 48 % des Waldes in Deutschland im privaten Besitz sind. Die restlichen 52 % teilen sich auf in 4 % Staatswald des Bundes, 29 % Staatswald der Länder und 19 % Körperschaftswald.

Die Daten des *Statistischen Bundesamtes* (2013) verdeutlichen eine konstante Zunahme der Waldfläche und der anwachsenden Holzvorräte in Deutschland seit 1993. Auch die Preise für Rohholz unterliegen seit 1994 einem steigenden Trend. Von den 11,4 Millionen Hektar stehen rund 96 % der Flächen als Wirtschaftswald zur Verfügung. Alleine im Jahr 2012 wurde Holz im Wert von ca. 2 Milliarden Euro eingeschlagen, was rund 40 Millionen Tonnen Holz entspricht. Der Wert des Holzvorrates in deutschen Wäldern wird auf rund 69 Milliarden Euro beziffert (Statistische Bundesamt, 2013). Aus diesen Daten wird die enorme Wirtschaftskraft des Waldes deutlich und das Interesse an einer intensiven Forstwirtschaft in Deutschland verständlich.

Seit Jahren werden immer größere Holzerntemaschinen konstruiert und eingesetzt. Neben kräftigeren Motoren, steigen die Abmaße und die Gesamtgewichte der neuen Maschinengeneration analog zur Landwirtschaft (Apel, 2001; Hameberger, 2003; Rieppo, 2001). Ein moderner Forwarder kann bei maximaler Auslastung leicht ein Gesamtgewicht von 40 Mg überschreiten. Als Beispiel dienen der fünfachsiges *Ponsse Elephantking* (Ponsse, 2015a) mit bis zu 43 Mg oder der vierachsige *John Deere 1910e* (John Deere, 2014) mit bis zu 41 Mg. Aber auch ein Harvester, die „kleinere“ Maschine im Holzerntezyklus, erzielt Gewichte von über 20 Mg, wie zum Beispiel der *Ponsse Scorpionking* (Ponsse, 2015b). Bei den Harvestern spielen die Gesamtgewichte eine entscheidende Rolle für die Stabilität der Maschine. Bei Kranarbeitsweiten von bis zu zwölf Metern, ist es in der Praxis üblich die Reifen der Maschinen mit Wasser zu befüllen, um die Standfestigkeit zu erhöhen. Diese Maßnahme führt folglich zu einer weiteren Zunahme der Gesamtgewichte.

Die Auswirkungen von Holzerntemaschinen auf die Struktur- sowie Funktionsänderungen des Bodens unterliegen bereits einer Zeitspanne intensiver Forschung (Cambi et al., 2015). Die Bodenverdichtung als Funktion der mechanischen Belastung von Holzerntemaschinen wird anhand verschiedenster Parameter von einer Vielzahl an Autoren aufgezeigt. Eine Abnahme von Porenvolumina und Anzahl von Makroporen (Ampoorter et al., 2007; Aust et al., 1998; Berisso et al., 2012; Berli et al., 2004; Kutílek et al., 2006; Lenhard, 1986; Seixas & Mc Donald, 1997) sowie zunehmende Staunässe und Erosion in Form von Oberflächenabfluss (Christopher & Visser, 2007; Croke et al., 2001; Rab, 1996; Startsev & McNabb, 2000) werden dokumentiert. Außerdem beobachten *Ares et al.* (2005), *Arthur et al.* (2013), *Currie* (1984), *Frey et al.* (2009) und *van der Weert* (1974) negative Korrelationen von Bodenverdichtung, Wasserinfiltration bzw. Leitfähigkeit und Sauerstoffversorgung. Positive Korrelationen einhergehend mit der Bodenverdichtung zeigen die Parameter: Lagerungsdichte (Ampoorter et al., 2007; Schack-Kirchner et al., 2007), Eindringwiderstand (Ampoorter et al., 2010; Lüscher et al., 2010) und Vorbelastung (Horn et al., 2004). Neben diesen bodenphysikalischen Parametern ist zusätzlich ein Anstieg der CO₂-Konzentration im Bodenbereich der Fahrspuren, als Konsequenz der Befahrung, von mehreren Autoren nachgewiesen worden (Bekele et al., 2007; Conlin & Van den Driesche, 2000; Fernandez et al., 1993; Goutal et al., 2012; Goutal et al., 2013b; Magagnotti et al., 2012). Außerdem veranschaulicht *Teepe et al.* (2004), dass als Folge der Verdichtung weniger Methangas imitiert werden kann und so der Boden als Methansenke nicht mehr zur Verfügung steht.

Die intensivierte Forstwirtschaft führt allerdings nicht nur zu direkten Schäden am Waldboden, sondern auch zur Beeinträchtigung der Bodenfauna (Battigelli et al., 2004; Bottinelli et al., 2014; Brussaard & van Faassen, 1994; Heisler, 1995; Marshall, 2000; Radford et al., 2001). Zusätzlich zu den zuvor aufgezeigten Schäden an der Bodenstruktur und seiner Lebewesen, verursacht die intensive Befahrung ein vermindertes Wurzel- (Gaertig et al., 2002; Kozłowski, 1999; Qi et al., 1994; Schäffer et al., 2012; Taylor & Brar, 1991; Viswanathana et al., 2011; Whalley et al., 1995) und Baumwachstum (Blouin et al., 2005; Brais, 2001; Demir et al., 2010; Egnell & Valinger, 2003; Gomez et al., 2002; Smith, 2003).

Um der, durch die Forstwirtschaft verursachten, Bodendegradation entgegen zu wirken, beschlossen einzelne Bundesländer, u.a. Niedersachsen, Bayern, Sachsen und Mecklenburg-Vorpommern, Richtlinien für eine bodenschonende Holzernte zu erlassen (Landesforst Mecklenburg-Vorpommern, 2004; LWF, 2012; NLF, 2013; SMUL, 2006). Obwohl sich diese Richtlinien im Detail unterscheiden, setzen sie die Abkehr von einer flächigen Befahrung und die Implementierung eines permanenten Rückegassensystems durch, um die Befahrung und die Verdichtung des Waldbodens auf ein Minimum zu beschränken (Froehlich et al., 1981). Die *niedersächsischen Landesforsten* fordern die Installation eines Rückegassensystems im Abstand von 20 Metern unter normalen waldbaulichen und bodenkundlichen Bedingungen. Dieses System soll dauerhaft und für alle künftigen Holzernten genutzt werden. Die Rückegassen sollen dabei eine Breite von vier Metern besitzen, um den waldbaulichen Anforderungen gerecht zu werden (NLF, 2013). Daraus resultiert, dass 10 - 20 % der Waldfläche befahren werden und 80 - 90 % in Zukunft vor Verdichtung und Degradation verschont werden sollen.

Für die nachhaltige Bewirtschaftung des Holzanbaus ist es jedoch wichtig eine Differenzierung der auftretenden Schäden vorzunehmen. Die vorherigen Ausführungen dokumentieren, dass der Einsatz von Forst- oder Landmaschinen einen Einfluss auf die physikalischen Parameter des Bodens, besonders in den oberen Dezimetern, hat. Ob eine Rückegasse jedoch weiter befahren werden kann, hängt maßgeblich von der Tiefe der Fahrspuren und nicht direkt von den ökologischen Kenngrößen des Bodens ab. Aus diesem Grund ist eine differenzierte Beurteilung zum Thema „technische Befahrbarkeit“ und „biologische Rekultivierbarkeit“ von großer Bedeutung (KWF, 2010). Während sich die technische Befahrbarkeit als permanente Komponente darstellt und der Zustand dauerhaft erhalten werden soll, ist die biologische Rekultivierbarkeit temporär, so dass sie nach jeder erneuten Belastung von vorne beginnt. Das Potenzial der Rekultivierbarkeit ist von

der Qualität der Schäden an den bodenphysikalischen Funktionen abhängig. Um den Anteil der unbefahrenen Waldfläche (80 - 90 %) konstant zu halten, ist es von großer Bedeutung zumindest die permanente technische Befahrbarkeit zu sichern.

Die Qualität und Quantität einer potentiellen Bodenverdichtung auf den befahrenen Arealen ist von mehreren Faktoren abhängig. Diese Faktoren lassen sich grundsätzlich grob in zwei übergeordnete Bereiche aufteilen. Der erste Bereich wird durch die Eigenschaften des Bodenausgangssubstrates bestimmt, während sich im zweiten Bereich alle Parameter rund um die Holzerntemaschine und deren Einsatz sammeln. Untersuchungen haben ergeben, dass beispielsweise eine niedrige initiale Lagerungsdichte des Waldbodens einen Verdichtungseffekt begünstigen (Hillel, 1998; Powers et al., 2005). Zu den weiteren Parametern im Bereich „Boden“, welche die Verdichtungsempfindlichkeit steigern, gehören außerdem eine erhöhte Bodenfeuchte (Han et al., 2006; McDonald & Seixas, 1997; Raper, 2005; Williamson & Neilsen, 2000), ein erhöhter Anteil an organischer Substanz (Aragón et al., 2000; Johnson & Curtis, 2001; Soane, 1990) und größere Steigungen (Jourgholami et al., 2014). Während bei zu hohen Feuchtigkeitsgehalten des Bodens der Anteil an wassergefüllten und somit inkompressiblen Poren steigt (Amooortter et al., 2012), was bei Porenwasserüberdrücken die Ausbildung eines „Schmierfilms“ zur Folge haben kann, liegt der Grund für die erhöhte Empfindlichkeit bei größeren Steigungen in der Konzentration der Lasteinträge auf eine geringere Aufstandsfläche (Agherkakli et al., 2010). Die organische Substanz wirkt als „Bindemittel“ und führt wie ein erhöhter Aggregierungsgrad des Bodens zu einer Stärkung der Bodenstruktur (Page-Dumroese et al., 2006).

Der Forstwirt hat allerdings nur begrenzte Möglichkeiten, um kurzfristig auf diese Faktoren Einfluss zu nehmen. Während die Parameter Aggregatstabilität und organische Substanz nur mittelfristig leicht begünstigt werden können, ist eine bedeutende Einflussnahme auf die Korngrößenverteilung und die Steigung nahezu unmöglich bzw. nur unter hohem Kostenaufwand umsetzbar. Der Parameter Bodenfeuchtigkeit unterliegt jedoch kurzfristigen Schwankungen, verursacht durch Trocken- und Feuchtperioden und stellt somit die einzige Stellschraube aus dem übergeordneten Bereich „Boden“ dar. Obwohl es sich nur um einen Parameter handelt, beeinflusst die Bodenfeuchtigkeit zum Beispiel die Gleisbildung und ist somit der bedeutendste Einflussfaktor. Besonders effektiv wäre beispielsweise eine Holzernte bei gefrorenem Boden. Šušnjar et al. (2006) verdeutlichen in ihrer Studie die Vorteile einer Holzernte unter diesen Bedingungen. In den zweiten Bereich „Maschine“ fallen alle Faktoren, welche der Holzerntemaschine und ihrem

Einsatz zugeordnet werden können. Die Anzahl der Überfahrten (Brais & Camiré, 1998; Wallbrink et al., 2002) und das Maschinengewicht (Jansson & Wästerlund, 1999; Voßbrink & Horn, 2004) haben einen großen Einfluss auf die Degradation des Bodens. Mit steigenden Gewichten und vermehrter Überfahrung steigen die Auswirkungen an. *Jourgholami et al. (2014)* finden zudem heraus, dass eine hangaufwärts gerichtete Ernte deutlich höhere Auswirkungen auf die Bodenstruktur hat, als eine hangabwärts gerichtete. Weitere wichtige Faktoren sind der Kontaktflächendruck (Sakai et al., 2008) und der Reifeninnendruck (Alakukku et al., 2003). Mit fallenden Werten dieser beiden Parameter sinkt auch das Verdichtungspotenzial.

Angepasst an diese Erkenntnisse haben die genannten Bundesländer zusätzlich Handlungsempfehlungen für die bodenschonende Holzernte ausgesprochen. Bezogen auf die Bodenfeuchte gekoppelt mit einer Gleisbildung lautet zum Beispiel die Empfehlung für Niedersachsen:

- *Für eher sandige bzw. skeletthaltige Böden der Gefährdungsstufe I (sandige und skeletthaltige Böden) im Tiefland und Bergland werden maximal 15 cm als Spurtiefe auf 90 % der Rückegassenlänge toleriert.*
- *Auf den eher bindigen Böden der Gefährdungsstufen II-IV (Feinlehme, Tone) darf die Toleranzgrenze mit einer Spurtiefe von maximal 20 cm auf 90 % der Rückegassenlänge nicht überschritten werden.*
- *Bei Böden der Gefährdungsstufe III ist das Risiko von Bodenschäden bei hoher Bodenfeuchte deutlich größer als bei geringer Bodenfeuchte. Deshalb muss hier besonders auf die aktuelle Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Holzerntemaßnahme/der Befahrung geachtet werden.*
- *Böden der Gefährdungsstufe IV sind besonders empfindlich und daher nur in Ausnahmefällen befahrbar.*

(NLF, 2013)

Im Vergleich dazu wird in Thüringen eine Fahrspurausbildung von mehr als 30 cm auf einer Länge von 20 % der Rückegasse toleriert (TMNLU, 2008). Um der Gleisbildung während der Holzerntearbeiten vorzubeugen, liefern die *Niedersächsischen Landesforsten* neben der Bestimmung zur Spurtiefe auch technische Ansätze. Dabei wird der Einsatz von Bogiebändern während feuchter Perioden oder der Einsatz von Spezialmaschinen, wie zum Beispiel des *EMB Elliators*, den Forstwirten nahegelegt. Im Merkblatt 22 der *Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* (LWF, 2012) ist zudem eine vereinfachte Handlungsempfehlung für Forstwirte bzw. Ma-

schinenführer veröffentlicht. Demnach sollen bei einer Gleisbildung von mehr als 10 cm Maßnahmen getroffen werden, um ein weiteres Einsinken der Maschine zu verhindern. Dazu gehören beispielsweise die Reduktion des Reifeninnendrucks und der Zuladung, sowie das Aufziehen von Bogiebändern. Bei Erfolg dieser Maßnahmen, definiert über die folgende Gleisbildung von weniger als 10 cm während einer erneuten Testfahrt, kann der Arbeitseinsatz fortgeführt werden. Sollten jedoch auch nach Anpassung der genannten Maschinenparameter weiter seitliche Aufwölbungen und Eintiefungen von größer 10 cm beobachtet werden, soll der Einsatz gemäß dieser Empfehlung abgebrochen werden. Das *Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft* schafft in ihrer Richtlinie unterschiedliche Befahrungsklassen, welche hauptsächlich von der Hangneigung und der „Sensibilität“ der Böden abhängig ist. Mit Hilfe der unterschiedlichen Befahrungsklassen werden Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Bogiebändern für Harvester und Forwarder gegeben (SMUL, 2006).

Obwohl es unterschiedliche Ansichten der einzelnen Landesbehörden hinsichtlich der Spurtiefenausbildung gibt, weisen alle auf die Bedeutung der planerischen Komponenten für einen Holzernteeinsatz hin. Grob lässt sich die bodenschonende Holzernte in drei Maßnahmenkategorien aufteilen. Neben den organisatorischen Elementen sind technische und waldbauliche Maßnahmen zu ergreifen. In den planerischen Bereich fällt zum Beispiel die initiale Anlegung des Rückegassensystems (Rückegassenabstand, -länge usw.) über geeignete Bodenareale. Besonders feuchte Standorte sollten gemieden werden und die Länge der Gassen sollte mit Rücksicht auf die Überrollhäufigkeit sorgfältig geplant werden. Auch die Festlegung eines geeigneten Zeitpunktes für die Holzernte (Trocken- oder Frostperioden für sensible Standorte) sowie die Auswahl eines geeigneten Arbeitsverfahrens, zum Beispiel der Einsatz von Seilwinden auf besonders steilen oder empfindlichen Bereichen, ist von großer Bedeutung für die planerische Ebene (KWF, 2010; Landesforst Mecklenburg-Vorpommern, 2004; LWF, 2012; NLF, 2013; SMUL, 2006; TMNLU, 2008). Technische Möglichkeiten zur Optimierung am Fahrzeug während der Holzernte wurden bereits in den vorherigen Abschnitten näher erläutert.

Als drittes Element werden waldbauliche Maßnahmen angegeben, welche das Widerstandspotenzial des Bodens gegen äußere Einwirkungen erhöhen. Neben den langfristig wirkenden Maßnahmen wie Waldkalkung, nachhaltige Humuswirtschaft und Eingriffshäufigkeit ist zum Beispiel der Einsatz von Reisigmatten ein hervorzuhebendes kurzfristig wirkendes Element. Untersuchungen dazu werden beispielsweise von *Eliasson & Wästerlund (2007)* und *Gerasimov & Katarov*

(2010) durchgeführt. *Jacke et al.* (2008) zeigt, dass akzeptable Reduktion von Spannungseinträgen bei einer Masse von ca. 20 kg Reisig pro Quadratmeter erzielt werden. Allerdings fallen beispielsweise bei einer Fichtendurchforstung nur ca. 6 kg Reisig pro Quadratmeter an. Ein flächendeckender Einsatz ist somit unrealistisch. Dennoch ist die Verwendung von Reisig auf besonders feuchten Abschnitten einer Rückegasse oder zur Verhinderung von Schlupf und Scherung sowie zur Minderung der Gleisbildung möglich und sinnvoll.

Eine weitere Möglichkeit der waldbaulichen Maßnahmen ist die Bepflanzung der potenziellen Rückegassen, um eine armierende Wirkung durch die Wurzeln der angepflanzten Baumarten zu erzielen und so die Spannungseinträge der Holzerntemaschinen zu reduzieren. Untersuchungen von *Burylo et al.* (2011), *Comino et al.* (2010) und *Trükmann* (2011) veranschaulichen, dass Wurzeln zur Bodenstabilisierung beitragen. Die Kombination aus Zugfestigkeit von Wurzeln und Kompressionsvermögen des Bodens soll ein stabileres Bodengebilde schaffen als beide Komponenten für sich allein (Gray & Leiser, 1989) und ähnlich wie ein Beton-Stahl-Mix wirken (Schiechl, 1985). *Wu et al.* (1979) verdeutlichte bereits früh die Beziehung von Wurzeln und der erhöhten Scherfestigkeit des Bodens. Bei Voruntersuchungen von *Lüscher et al.* (2008) mit Erlenwurzeln zum Thema Wurzelarmierung wird beobachtet, dass diese in der Lage sind verdichtete Bodenareale zu durchstoßen und zu regenerieren. Sie scheinen somit auch für eine potenzielle Armierung im Verdichtungsbereich der Rückegasse geeignet. Untersuchungen mit Buche, Eiche und Fichte zeigen, dass eine Erschließung nur im geringen Umfang bzw. nicht möglich ist (Eppinger et al., 2002; Gaertig & Green, 2009; Gaertig et al., 2002; Hetsch et al., 1990) und somit hinsichtlich der Wurzelarmierung nicht in Betracht kommen. Ein neuer Ansatz ist die mögliche Armierung mit Hilfe des Wurzelgeflechts von schnellaustreibenden Kurzumtriebsgehölzen. Das Forschungsprojekt RÜWOLA (AGIP, 2015) befasst sich aktuell, neben Fragen zur Regeneration von Rückegassen, auch mit der armierenden Wirkung von Wurzeln der Kurzumtriebsgehölze. Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des RÜWOLA-Projektes entstanden, wurde aus Landesmitteln des *Niedersächsischen Ministeriums für Kunst und Wissenschaft* Vorab gefördert und präsentiert unter anderem Ergebnisse zu diesem Thema. Das Projekt RÜWOLA ist eine Kooperation der *Hochschule Osnabrück* und der *Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminden/Göttingen*.

Ein Problem für sämtliche Richtlinien der Landesbehörden ist ihre Unverbindlichkeit. Die behördlichen Einrichtungen sind bemüht ihre Forderung zur bodenschonenden Holzernte umzuset-

zen und geben strikte Anweisungen an ihre Mitarbeiter. Aber selbst wenn bei allen staatlich durchgeführten Holzernten die Empfehlungen eingehalten werden, kann von einer bodenschonenden Holzernte nur auf maximal 52 % der Waldflächen in Deutschland die Rede sein. Denn wie zu Beginn erwähnt, entfallen die restlichen 48 % auf private Eigentümer (BWI 3, 2012), welche keinerlei gesetzliche Bindung an Vorgaben zur bodenschonenden Holzernte haben.

Umso wichtiger erscheint es den aktuellen Zustand der Holzerntemaschinen zu überprüfen und zu untersuchen, ob die jahrelange Forschung zum Thema bodenschonende Holzernte und deren Erkenntnisse in die Praxis umgesetzt werden konnten. Werden moderne Holzerntemaschinen aus dem Jahr 2013 diesem Ziel gerecht und können ohne technische Hilfsmittel die Anforderungen an den Bodenschutz erfüllen? Genauso interessant erscheinen die Untersuchung von technischen Möglichkeiten zur Reduktion der Spannungseinträge bzw. natürliche Möglichkeiten um die Widerstandskraft des Bodens zu erhöhen. Die detaillierten Fragestellungen, welche in dieser Arbeit beantwortet werden sollen, sind im folgenden Kapitel spezifiziert.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen typischen Holzerntezyklus, bestehend aus einer modernen Erntemaschine (Harvester) und einer modernen Transportmaschine (Forwarder) zu simulieren und zu bewerten. Um diese Simulation so realitätsnah wie möglich zu gestalten, werden Maschinen eingesetzt, welche auch in der Praxis häufig zum Einsatz kommen. Um zusätzlich die größtmöglichen Auswirkungen der Maschinen zu erfassen, werden befahrungsempfindliche Lössstandorte ausgewählt, welche unter anderem repräsentativ für die bewaldeten Hänge der nördlichen deutschen Mittelgebirge sind und dem Einsatzgebiet der Holzerntemaschinen entsprechen. Die Ergebnisse zu diesen Versuchen bilden den Grundstock für alle weiteren Untersuchungen.

Im zweiten Teil wird die Frage bearbeitet, ob die Weiterentwicklungen von Spezialmaschinen und Spezialequipment in der Lage sind, die Ausgangssituation, definiert über die Auswirkungen des typischen Holzernteeinsatzes, zu verbessern. Für diesen Teil wird neben technischen Möglichkeiten, wie zum Beispiel dem Einsatz einer neukonstruierten Kettenspezialmaschine (*EMB Elliator*), dem Einsatz von neuartigen speziellen Bogiebändern oder die Weiterentwicklungen von geeigneten Antriebsystemen untersucht. Zusätzlich zu den technischen Parametern, ist auch eine natürliche Möglichkeit zur Stärkung der Widerstandsfähigkeit des Bodens stärker in den Fokus gerückt. Untersuchungen mit schnellwachsenden Baumarten sollen Aufschluss darüber geben, ob das austreibende Wurzelgeflecht, von beispielsweise Pappel oder Weide, in der Lage ist, die Spannungseinträge der Holzerntemaschinen zu kompensieren und somit die Bodenstruktur zu schützen. Um einen potenziellen Nachweis der armierenden Wirkung zu dokumentieren, werden insbesondere die Auswirkungen auf den Unterboden, bzw. der Bodenhorizonte unterhalb des Wurzelgeflechtes detailliert beprobt und untersucht. Um den Beweis zu führen, werden armierte Flächen mit nicht-armierten Flächen unter einheitlichen Bedingungen verglichen.

Die Auswertung aller Daten beinhaltet eine Aufteilung der Ergebnisse hinsichtlich zweier Aspekte. Wie in der Einleitung bereits erwähnt, ist die Differenzierung der Schäden hinsichtlich ihrer Auswirkung auf physikalische Bodenparameter und der technischen Befahrbarkeit von großer Bedeutung. Von daher wird in dieser Arbeit ein Weg vorgestellt, um diesem Anspruch gerecht zu werden. Der Einfluss der Holzerntemaschinen auf die Bodenstruktur einer Rückegasse wird differenziert für die bodenphysikalischen Parameter sowie die technische Befahrbarkeit quantifiziert und mittels eines einheitlichen Systems bewertet.

2 Material und Methoden

2.1 Lage, Geologie sowie Böden der Versuchsstandorte

Die Versuchsstandorte konzentrierten sich auf Grund einer Kooperation mit den *Niedersächsischen Landesforsten*, welche einen Großteil der Holzernemaschinen für die Untersuchungszwecke gestellt haben, auf das Bundesland Niedersachsen. Fünf Versuchsstandorte liegen im südlichen Niedersachsen in der Region Göttingen, einer in Hessen ② und ein weiterer in Sachsen-Anhalt ⑧, jeweils direkt an der Landesgrenze zu Niedersachsen. Die Versuche mit einer Spezialmaschine (*EMB Elliator*) am Standort ⑤ Hasbruch, westlich der Stadt Bremen, konnten aus logistischen Gründen nicht im südlichen Niedersachsen stattfinden. Während der Versuchsperiode, von Oktober 2012 bis April 2014, wurden bodenkundliche Untersuchungen auf diesen acht Standorten durchgeführt. Eine Übersicht der Versuchsstandort und deren grobe Lage veranschaulicht Abbildung 1.

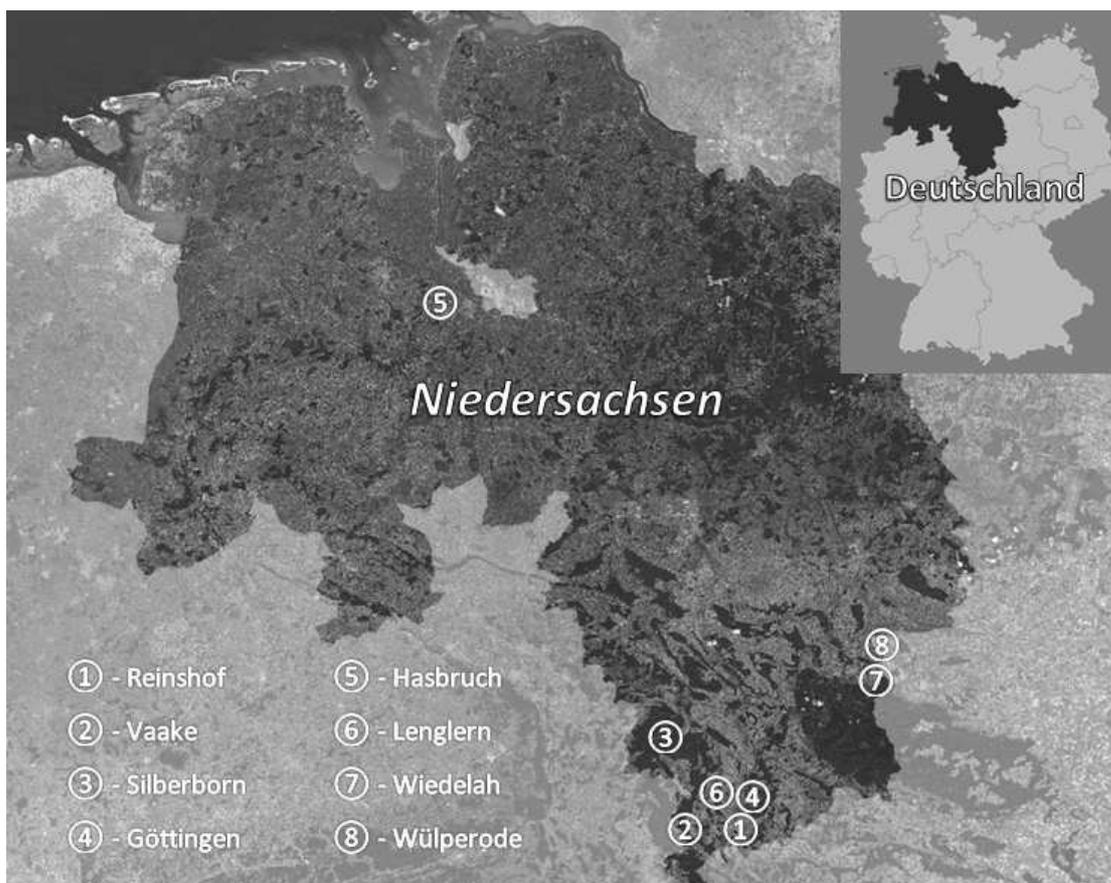


Abbildung 1. Übersicht und Bezeichnung der Versuchsstandorte in Niedersachsen, Deutschland (Quelle: geodus).

Im Ballungsraum Göttingen sind drei Versuchsflächen im Lössverbreitungsgebiet zu finden. Neben dem Standort ⑥ Lenglern, einem Eichenmischwald, wurden mit den Standorten ① Reinshof und ④ Göttingen zwei landwirtschaftliche genutzte Versuchsflächen des Klostersgutes Reinshof für die Untersuchungen ausgewählt. Sie weisen, wie der Standort ⑥ Lenglern, eine mächtige Lössauflage auf und können unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten als äußerst produktiv eingestuft werden. Das Klostersgut Reinshof ist ein Versuchsbetrieb für Agrartechnik und –ökonomie der Georg-August-Universität Göttingen. Die vorherrschenden Bodengesellschaften in dieser Region sind Parabraunerden sowie Pseudogleye (NIBIS, 2015). Alle Versuchsstandorte wurden mit Hilfe von GPS vermessen. Die detaillierte Lage der Standorte sowie weitere Charakteristika sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Geografische Lage, Zeitraum, Nutzung und geologische Einheit der Versuchsstandorte.

Standort	Lage	Bundesland	Beprobungszeitraum	Nutzung	Ausgangssubstrat
① Reinshof	51°29'19" 9°55'41"	Niedersachsen (bei Göttingen)	April 2013	Acker, gepflügt	Löss
② Vaake	51°29'2" 9°36'30"	Hessen (bei Hann.-Münden)	Oktober 2012	KUP (Weide)	Löss
③ Silberborn	51°45'47" 9°36'8"	Niedersachsen (bei Höxter)	Oktober 2013	Wald (Fichte)	Löss – Fließerde
④ Göttingen	51°33'56" 9°55'5"	Niedersachsen	April 2014	Acker, konservierend	Löss
⑤ Hasbruch	53°41'6" 8°29'42"	Niedersachsen (bei Bremen)	März 2013	Wald (Eiche-Hainbuche)	Geschiebemergel
⑥ Lenglern	51°34'45" 9°53'39"	Niedersachsen (bei Göttingen)	April 2013	Wald (Buche)	Löss
⑦ Wiedelah	51°57'27" 10°35'30"	Niedersachsen (bei Wolfenbüttel)	März 2014	KUP (Weide) & Wiese	Auensediment
⑧ Wülperode	51°58'40" 10°36'13"	Sachsen-Anhalt (bei Wolfenbüttel)	März 2014	KUP (Weide) & Wiese	Auensediment

Parabraunerden und Pseudogleye sind ebenfalls charakteristische Bodentypen in der Lössregion des Versuchsstandortes ② Vaake. Die Fläche nahe Vaake, welche als Kurzumtriebsplantage (KUP) genutzt wird, liegt an der direkten Landesgrenze zu Niedersachsen in Hessen, nördlich von Hannoversch Münden in der Nähe der Weser. Bei diesem Standort handelt es sich um eine Versuchsfläche der *Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt*, welche 1992 zu Versuchen mit Kurzumtriebsgehölzen der Baumart Weide bepflanzt worden ist. Das Untersuchungsgebiet ③ Silberborn befindet sich im deutschen Mittelgebirge Solling. Die Versuche im Solling fanden auf einer Rückegasse in einem Fichtenforst statt. Geologisch gehört auch dieses Gebiet zum Lössverbreitungsgebiet. Es dominieren dort Fließerden sowie Braunerden. Die Versuchsfläche ⑤ Hasbruch liegt in einem Naturschutzgebiet in der norddeutschen Altmoränenlandschaft, ge-

prägt von saalezeitlichem Geschiebemergel. Bodentypologisch dominieren Pseudogleye. Die Versuche wurden auf einer Waldwiese eines Buchenmischwalds durchgeführt.

Die Standorte ⑦ Wiedelah und ⑧ Wülperode liegen südlich von Braunschweig im Okertal. Die vorherrschenden Bodentypen in diesem Gebiet sind Auenböden, Gleye, Kolluvisole und Parabraunerden. Beide Untersuchungsstandorte teilen sich in zwei unterschiedlich genutzte Flächen auf. An jedem Standort wurden zum einem Untersuchungen auf einer Kurzumtriebsplantage (KUP) und zum anderen auf einer angrenzenden Wiese (WI) vorgenommen.

2.2 Eingesetzte Maschinen

2.2.1 Holzerntemaschinen

Während der Messperiode wurden fünf Holzerntemaschinen eingesetzt. Neben dem Harvester *John Deere 1270e* (JD), wurden zusätzlich drei Rückezüge und ein Häcksler getestet. Zu den Rückezügen gehören der Forwarder *Ponsse Buffalo* (PB), der Forwarder *Rottne F14* (F14) und der Spezialforwarder *EMB Elliator* (EMB). Bei dem Häcksler handelt es sich um das Model *New Holland FR 9060*, einem landwirtschaftlichen Häcksler mit speziellem Ernteaufsatz für Kurzumtriebsgehölze.

Die Besonderheit des dreiachsigen Harvesters *John Deere 1270e* liegt in der erhöhten Reichweite des Auslegers, welcher eine Ernte in bis zu 11,70 m Entfernung ermöglicht. Um dennoch eine gewisse Stabilität zu gewährleisten, sind die Reifen zusätzlich mit Wasser gefüllt, so dass er ein Gewicht von ca. 20 Mg erreicht. Die beiden vierachsigen Forwarder *Ponsse Buffalo* und *Rottne F14* weisen ähnliche Maschineneigenschaften auf. Ihr Leergewicht liegt bei rund 19 Mg und jeweils ca. 15 Mg können zugeladen werden. Das Leergewicht des *EMB Elliators* liegt bei rund 24 Mg. Ein Grund für das hohe Gewicht des Spezial-Forwarders ist ein große Kettenlaufwerk. Das Laufwerk weist eine Länge von sieben Metern und eine Breite von einem Meter auf. Maximal 15 Mg können zusätzlich geladen werden. Das Leergewicht des Häckslers liegt laut Werksangabe bei rund 13 Mg. Mit dem speziellen Schneidwerk erreicht der *New Holland FR 9060* ein Gesamtgewicht von ca. 15 Mg. Eine Übersicht der Holzerntemaschinen und deren allgemeinen Maschineneigenschaften sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2. Übersicht und allgemeine Eigenschaften der getesteten Holzertemaschinen.

Maschine	Bild	Typ	Kürzel	Reifentyp	Leergewicht	Zuladung
John Deere 1270e		Harvester	JD	vorne: 710 R26,5 hinten: 710 R34	19 Mg*	-
Ponsse Buffalo		Forwarder	PB	710 R26	17 Mg*	14 Mg*
Rottne F14		Forwarder	F14	710 R26,5*	17 Mg*	14 Mg*
EMB Elliator		Ketten Forwarder	EMB	Spezialanfertigung	24 Mg*	15 Mg*
New Holland FR 9060		Häcksler	NH	vorne: 800 R32* hinten: 710 R42*	12,6 Mg**	-

*Werksangaben ** Werksangabe ohne Gewicht des Schneidwerks

2.2.2 Sonstige Maschinen

Neben den Holzerntemaschinen wurden weitere Maschinen für forstwirtschaftliche Zwecke untersucht. Der Ackerschlepper *John Deere 6320* (JD6) wurde wegen seines speziellen Deltalaufwerks getestet. Es handelt sich bei dieser Version um einen normalen Ackerschlepper von *John Deere* des Typs 6320, an welchen das starre Spezialkettenlaufwerk montiert worden ist. In diesem Zustand erreicht der *John Deere* ein Testgewicht von 6,5 Mg. Das zweiteilige Kettenfahrzeug des THW Eutin der *Bv206 Högglunds* wurde ausgewählt, da es im Gegensatz zum *John Deere 6320* über ein variables Kettenlaufwerk als Antriebssystem verfügt. Das Testgewicht inklusive Beladung liegt bei 6,6 Mg. Zusätzlich wurde ein umgebauter Holzanhänger getestet. Der auf Kufen laufende Holzschlitten erreicht ein Testgewicht von 6,1 Mg. Eine Übersicht dieser Maschinen und deren Eigenschaften ist in Tabelle 3 zu finden.

Tabelle 3. Übersicht der getesteten Maschinen mit speziellen Antriebssystemen.

Maschine	Bild	Typ	Kürzel	Laufwerk	Testgewicht
John Deere 6320		Ackerschlepper	JD6	Delta-Laufwerk	6,5 Mg*
Bv206 Högglunds		THW-Hilfsfahrzeug	HG	variable Ketten	6,6 Mg*
Holzschlitten		Holzanhänger	SCH	Kufen	6,1 Mg*

* gemessen

2.2.3 Maschinenmodifikationen

Während der Messkampagne wurden ebenfalls zwei Maschinenmodifikationen, ein Traktionsband und ein Moorband, getestet. Bei dem Moorband handelt es sich um eine Spezial-Gummi-Anfertigung der Firma *Felasto PUR*, welches die Aufstandsfläche der Reifen erhöhen soll. Das Stahl-Traktionsband wird von den *Niedersächsischen Landesforsten* zur besseren Traktion an Steilhängen eingesetzt. Eine Übersicht der beiden Bänder ist in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4. Übersicht der Bogiebandmodifikationen für den Forwarder Ponsse Buffalo.

Maschine	Bild	Typ	Kürzel	Reifentyp
für Ponsse Buffalo		Moorband	MB	für 710 R26
für Ponsse Buffalo		Traktionsband	TB	für 710 R26

2.3 Methodik

2.3.1 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign orientiert sich stark an den beiden Leitfragen und ist für alle Versuchsstandorte identisch aufgebaut, um die Auswirkungen der Befahrung zu quantifizieren. Die Beprobungen einer unbelasteten Referenz (Ausgangszustand) wurde mit belasteten Bereichen der verschiedenen Maschinenvarianten verglichen. Zusätzlich wurden an den jeweiligen Standorten bodenphysikalische Untersuchungen und Spannungsmessungen in verschiedenen Tiefen durchgeführt. Da an verschiedenen Standorten unterschiedliche Maschinen eingesetzt wurden und die Fragestellung für die einzelnen Standorte hinsichtlich Untersuchungsart, -tiefe sowie -zeitpunkt differieren, wird in den folgenden Kapiteln eine detaillierte Beschreibung vorgenommen.

2.3.1.1 Versuchsdesign für die Standorte Reinshof, Vaake und Silberborn

An den Standorten ① Reinshof (Ackerfläche), ② Vaake (Kurzumtriebsplantage) und ③ Silberborn (Wald) wurde ein typischer Holzerntezyklus mit dem Harvester *John Deere 1270e* und dem Forwarder *Ponsse Buffalo* simuliert. Die Simulation beinhaltet eine Erstüberfahrt des Harvester, welcher zwecks Holzernte eine potentielle Rückegasse einmalig befährt. Um das Holz aus dem Wald zu transportieren, folgt dem Harvester der Forwarder weitere vier Mal. An den Standorten wurde außerdem auch eine Erstüberfahrt des Forwarders untersucht. So ergeben sich für die drei Standorte vier Varianten, welche in Tabelle 5 aufgeführt sind.

Tabelle 5. Übersicht der Versuchsvarianten an den Standorten Reinshof, Vaake und Silberborn.

Nr.	Name	Abk.	Tiefen	Bodenphysikalische Untersuchungen	Spannungsmessungen
1	Referenz	Ref	20, 40 & 60 cm	vor den Überfahrten & Grundanalytik	–
2	John Deere 1270e	JD	20, 40 & 60 cm	nach Ü1 mit JD	für Ü1
3	Ponsse Buffalo	PB	20, 40 & 60 cm	nach Ü1 mit PB	für Ü1
4	Ponsse Buffalo	PB5	20, 40 & 60 cm	nach Ü5 (1x JD und 4x PB)	für Ü2 - Ü5

Die Ergebnisse aus diesem Versuchsaufbau sollen Aufschlüsse über die Spannungsverläufe während eines typischen Arbeitseinsatzes im Wald unter Holzerntemaschinen aufzeigen und klären, in wie weit sich Einzel- und Mehrfach-Überfahrten sowie die unterschiedlichen Holzerntemaschinen auf die Bodenstruktur und –funktionen auswirken. Die Versuche fanden auf einem Acker, einer KUP und im Wald statt, um unterschiedliche Durchwurzelungsgrade zu simulieren.

2.3.1.2 Versuchsdesign für den Standort Göttingen

Die Versuche am Standort ④ Göttingen sind ausschließlich mit dem Forwarder *Ponsse Buffalo* durchgeführt worden und lassen sich in zwei Bereiche aufteilen. Zum einen sollten die Auswirkungen von Mehrfach-Überfahrten untersucht werden. Dazu wurde neben der Referenz je ein Bereich für eine einmalige, eine fünfmalige und eine zehnmahlige Überfahrt beprobt. Zum anderen wurden zwei Bogiebänder, eine Traktionskette und ein Moorband, welche an die Räder des Forwarders montiert wurden, auf zwei weiteren Arealen getestet. Die Beprobung fand nach zehnmahliger Überfahrt mit dem jeweiligen Band statt. In Tabelle 6 sind alle Varianten für den Standort Göttingen aufgelistet. Auf Grund einer Vorverdichtung des Referenzstandortes (Fahrspur verdeckt durch den Arbeitsschritt einer minimalen Bodenbearbeitung) wurden die bodenphysikalischen Parameter des Oberboden an dem Referenzstandorts, durch die Werte des vergleichbaren Versuchsstandortes Reinshof ersetzt.

Tabelle 6. Übersicht der Versuchsvarianten am Standort Göttingen.

Nr.	Name	Abk.	Tiefen	Bodenphysikalische Untersuchungen	Spannungsmessungen
1	Referenz	Ref	20, 40 & 60 cm	vor den Überfahrten & Grundanalytik	-
2	Ponsse Buffalo	PB	20, 40 & 60 cm	nach Ü1 mit PB	für Ü1
3	Ponsse Buffalo	PB5	20, 40 & 60 cm	nach Ü5 mit PB	für Ü1 - Ü5
4	Ponsse Buffalo	PB10	20, 40 & 60 cm	nach Ü10 mit PB	für Ü1 - Ü10
3	Ponsse Buffalo (Moorband)	MB	20, 40 & 60 cm	nach Ü10 mit MB	für Ü1 - Ü10
4	Ponsse Buffalo (Traktionsband)	TB	20, 40 & 60 cm	nach Ü10 mit TB	für Ü1 - Ü10

Die Ergebnisse dieses Versuches sollen genutzt werden, um den Einfluss der Mehrfachüberfahrten in einzelnen Etappen auf die Bodenstruktur und -funktionen zu quantifizieren und um zu klären, ob Bogiebänder in der Lage sind, die auftretenden Spannungseinträge zu reduzieren und dadurch bodenschonender zu arbeiten.

2.3.1.3 Versuchsdesign für den Standort Hasbruch

Am Standort ⑤ Hasbruch wurde der Spezialforwarder *EMB Elliator* mit einem üblichen Rad-Forwarder *Rottne F14* verglichen. Auf Grund der feuchten Bodenbedingungen konnten die Spannungsmessungen für die Maschinen nur in 20 cm Bodentiefe und die physikalischen Bodenuntersuchungen nur in 20 cm sowie 40 cm durchgeführt werden. Da der *Rottne F14* während den Überfahrten stark in den Boden einsank, wurden die Versuche nach der dritten Überfahrt abge-

brochen. Der *EMB Elliator* überfuhr den Messbereich sieben Mal. Die drei verschiedenen Varianten sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Ergebnisse aus diesem Versuchsteil sollen dokumentieren, ob die Spezialmaschine die Auswirkungen auf die Bodenstruktur reduzieren kann.

Tabelle 7. Übersicht der Versuchsvarianten für den Standort Hasbruch.

Nr.	Name	Abk.	Tiefen	Bodenphysikalische Untersuchungen	Spannungsmessungen
1	Referenz	Ref	20 & 40cm	vor den Überfahrten & Grundanalytik	-
2	Rottne F14	F14	20 & (40cm)	nach Ü3 mit F14	für Ü1 - Ü3
3	EMB Elliator	EMB	20 & (40cm)	nach Ü7 mit EMB	für Ü1 - Ü7

2.3.1.4 Versuchsdesign für den Standort Lenglern

In ⑥ Lenglern wurden drei verschiedene Fahrzeuge zur möglichen Weiterentwicklung eines Forwarders untersucht. Ziel dieser Untersuchungen war die Identifikation von bestmöglichen Antriebskomponenten zur Konstruktion eines neuartigen Forwarders, welcher in der Lage sein soll, die Auswirkungen auf die Bodenfunktionen zu minimieren. Als Basis diente das Fahrwerk des *Hägglunds*, welches bei einer potenziellen Neuentwicklung etwas vergrößert werden soll. Verglichen wurde das variable Kettenlaufwerk des *Hägglunds* mit einem starren Delta-Kettenlaufwerke, welches an einen *John Deere 6320* montiert wurde (Tabelle 8).

Tabelle 8. Übersicht der Versuchsvarianten für den Standort Lenglern.

Nr.	Name	Abk.	Tiefen	Bodenphysikalische Untersuchungen	Spannungsmessungen
1	Referenz	Ref	20, 40 & 60 cm	vor den Überfahrten & Grundanalytik	-
2	John Deere 6320	JD6	20, 40 & 60 cm	nach Ü5 mit JD6	für Ü1 - Ü5
3	Hägglunds	HG	20, 40 & 60 cm	nach Ü5 mit HG	für Ü1 - Ü5
4	Schlitten	SCH	20, 40 & 60 cm	nach Ü5 mit SCH	für Ü1 - Ü5

Da der *Hägglunds*-Forwarder trotz leichter Vergrößerung weniger Holz zuladen kann, soll er um einen Holzanhänger erweitert werden. Die Idee für den Holzanhänger ist ein spezielles Kufenlaufwerk was über den Boden gleiten soll und nicht direkt angetrieben wird. Beide Kettenlaufwerke wurden zusätzlich mit dem Holzschlitten verglichen. Die physikalischen Bodenuntersuchungen fanden jeweils nach der fünften Überfahrt statt. Außerdem wurden die beiden Kettensysteme zu einem Extrem-Spannungseintrags-Test herangezogen. Beide Maschinen führen zur Si-

mulation eines solchen Events über einen Baumstamm (Durchmesser 14 cm), welcher direkt über dem Sensorkopf in 20 cm bzw. 40 cm Bodentiefe auf der Bodenoberfläche platziert wurde. Diese Daten sollen Aufschluss darüber geben, ob eines der beiden Systeme in der Lage ist die entstehenden, konzentrierten Spannungen besser zu kompensieren.

2.3.1.5 Versuchsdesign für die Standorte Wiedelah und Wülperode

Das Versuchsdesign für die Standorte ⑦ Wiedelah und ⑧ Wülperode weicht leicht von den bisherigen Designs ab. Ziel dieser Messungen war die Quantifizierung eines potentiellen Wurzelarmierungseffektes auf die Druckkompensation im Wurzelraum. Allerdings konnten aus logistischen Gründen keine Spannungsmessungen an diesen Standorten stattfinden. Es wurden lediglich die Fahrspuren eines Häcksler (*New Holland Fr 9060*) auf einer Kurzumtriebsplantage (Bepflanzung: Weide) und auf einer angrenzenden Wiese nach einmaliger Überfahrt an beiden Standorten untersucht. Auch die Proben für die unbelastete Referenz wurden jeweils auf der Wiese gesammelt. Auf Grund von anstehendem Kies konnte in Wülperode die Tiefe 60 cm nicht beprobt werden. Die drei Varianten sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9. Übersicht der Versuchsvarianten für die Standorte Wiedelah und Wülperode.

Nr.	Name	Abk.	Tiefen	Bodenphysikalische Untersuchungen	Spannungsmessungen
1	Referenz	Ref	20, 40 & 60 cm	vor den Überfahrten & Grundanalytik	-
2	Wiese	WI	20, 40 & 60 cm	nach Ü1 mit NH	-
3	KUP	KUP	20, 40 & 60 cm	nach Ü1 mit NH	-

Bei einer potenziellen Wurzelarmierung durch die Kurzumtriebsgehölze sollten die Auswirkungen im Unterboden, auf Grund des ausgeprägten Wurzelgeflechts bei der Variante „KUP“ geringer ausfallen, als bei der Variante „Wiese“.

2.3.2 Probenentnahme und Feldmessungen

Für die bodenphysikalischen Untersuchungen der Belastungsvarianten und der Referenzen wurden ungestörte Proben in Form von vertikal eingeschlagenen Stechzylindern tiefenabhängig in 20-25 cm, 40-45 cm und 60-65 cm entnommen. In der Arbeit werden diese Tiefenintervalle einfachheitshalber mit 20 cm, 40 cm und 60 cm definiert. Insgesamt wurden pro Horizont und Variante je 15 Zylinder (100 cm^3) für die Bestimmung der Porengrößenverteilung, der Lagerungsdichte (ρ_B) und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f) sowie acht Zylinder für die Ermittlung des

Druck-, Zeitsetzungsverhaltens, der Berechnung der Vorbelastung (P_v) und der Änderung der Luftleitfähigkeit (k_l) als Funktion der Behandlung nach Vorentwässerung auf -60 hPa entnommen (Tabelle 10). Zusätzlich wurde an den Referenzstandorten auch gestörtes Material für die Grundanalytik: Körnung, organischer Kohlenstoffgehalt sowie pH-Wert entnommen. An den Referenzstandorten erfolgte eine detaillierte Profilansprache mit Hilfe des vereinfachten Aufnahmebogens nach *AD-hoc-AG Boden* (2005).

Tabelle 10. Übersicht des Probenumfangs für alle Standorte, Varianten und Tiefe.

Anzahl	Zylinder	Größe	Tiefen	Bestimmte Parameter
8	Groß	263 cm ³	20, 40 & 60 cm	P_v & k_l
10	Klein	100 cm ³	20, 40 & 60 cm	k_f
5	Klein	100 cm ³	20, 40 & 60 cm	Porengrößenverteilung & ρ_B

2.3.3 Laboranalytik

Gestörtes Bodenmaterial wurde zunächst luftgetrocknet und auf < 2 mm gesiebt. Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehalts (C_{org}) erfolgte nach (DIN EN 15936, 2012) mit coulometrischer Titration und Veraschung im *Ströhlein Coulomat 702*. Die Korngrößenverteilung wurde mittels der Sieb- und Pipettanalyse (DIN ISO 11277, 2002) nach (Hartge & Horn, 2009) ermittelt und der pH-Wert in 0,01 M CaCl₂ Lösung (Blume et al., 2011; DIN ISO 10390, 2005) gemessen. Alle drei Parameter wurden in Klassen nach *AD-hoc-AG Boden* (2005) eingeteilt und bewertet.

An den ungestörten entnommen Stechzylinderproben wurden folgende Untersuchungen durchgeführt. Die Bestimmung von k_f erfolgte nach dem instationären Verfahren mit dem Haubenpermeameter (Hartge, 1993; Hartge & Horn, 2009) an zehn Stechzylindern mit je drei Wiederholungsmessungen. Die Porengrößenverteilung, der Wassergehalt und ρ_B wurden gravimetrisch über Trocknung (24 h bei 105° C) und Wägung bestimmt (DIN ISO 11465, 1996) und als arithmetischer Mittelwert aus fünf Wiederholungen dargestellt. Hierbei wurden die ungestörten Stechzylinderproben nach Aufsättigung schrittweise mit Hilfe einer keramischen Unterdruck- und Überdruckapparatur entwässern (DIN ISO 11274, 2001). Die Einteilung der Porenklassen in weite Grobporen (wGP: Matrixpotential zwischen 0 hPa und -60 hPa; >50 μ m), enge Grobporen (eGP: Matrixpotential zwischen -60 hPa und -300 hPa; > 10 μ m), Mittelporen (MP: Matrixpo-

tential zwischen -300 hPa und -15.000 hPa; $> 0,2 \mu\text{m}$) und Feinporen (FP: Matrixpotential größer -15.000 hPa; $< 0,2 \mu\text{m}$), erfolgte nach *K45* (AD-hoc-AG Boden, 2005) und *Harte & Horn* (2014). Der Anteil der weiten Grobporen entspricht der Luftkapazität (LK) und der Anteil aller vier Porenklassen dem Gesamtporenvolumen (GPV) (AD-hoc-AG Boden, 2005).

Die Bestimmung von k_1 erfolgte in ein Arcryldurchflussmessgerät mit eingebautem Schwebekörper bei einem definierten Gradienten von 1 hPa (Peth, 2004). Anschließend wurden die gleichen Proben (feldfeucht) zur Bestimmung von P_v über einen eindimensionalen Kompressionsversuch mit verhinderter Seitenausdehnung in eine Multistepdrucksetzungsanlage überführt und schrittweise zunehmend pneumatisch belastet unter Beobachtung des Porenwasserdrucks (DIN 18136, 2007). Die Belastung erfolgte in acht Stufen ($20, 40, 60, 80, 100, 150, 300$ und 400 hPa) mit einer Belastungszeit von zwei Stunden je Stufe und einer Entlastungsphase von einer Stunde. Die Auswertung der Kurvenverläufe des Drucksetzungs-Verhaltens und Ableitung von P_v erfolgte mit der grafischen Bestimmung nach *Casagrande* (1936).

2.3.4 Spannungsmessungen

Die Bestimmung der dynamischen Lasteinträge während eines Überführungsexperiments wurden mit dem *STRESS STATE TRANSDUCER SYSTEM* (SST), durchgeführt. Das aktuelle Messsystem *SST Kiel 3* basiert auf den Ideen von *Harris* (1960) zur Messung von gerichteten Spannungen. Die von *Nichols* (1987) modifizierte und kontinuierlich weiterentwickelten Bodensensoren (Gräsle, 1999; Horn et al., 1992; Horn et al., 1998; Kühner, 1997; Semmel, 1993; Wiermann, 1998) enthalten sechs Dehnmessstreifen, verklebt auf Aluminiummembranen, ermöglichen die Messungen des Spannungszustandes im Boden für ein theoretisch kleinstmögliches Punkt (Kezdi, 1969; Koolen & Kuipers, 1983). Eine detaillierte Beschreibung zum Aufbau des SST ist bei *Kühner* (1997) und *Gräsle* (1999) zu finden. Aus den mit dem SST gemessenen sechs gerichteten Normalspannungen lassen sich drei Hauptspannungen ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), die mittlere Normalspannung (MNS) sowie die oktaedrische Scherspannung (OCTSS) berechnen (Zink, 2009):

$$\sigma_n = (l^2)\sigma_x + (m^2)\sigma_y + (n^2)\sigma_z + 2(l)(m)\tau_{xy} + 2(m)(n)\tau_{xz} + 2(n)(l)\tau_{yz} \quad \text{Gl. 1}$$

σ_n = Normalspannungen der Berechnungsebene ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)

$\sigma_{x, y, z}$ = orthogonale Normalspannungen der Ebenen x, y, z

$\tau_{xy, xz, yz}$ = oktaedrische Scherspannung

l, m, n = Kosini der Winkel zwischen den Senkrechten der Berechnungsebenen und den Richtungen x, y, z

Zum Zeitpunkt des maximalen dynamischen Lasteintrages der Maschine ist die Belastung direkt senkrecht über dem Sensor und die Normalspannungskomponente MNS sowie die tangentielle Spannungskomponente OCTSS beschreiben den vollständigen Spannungszustand im Boden (Zink, 2009). Für die Darstellung der Ergebnisse dieser Arbeit wurde ausschließlich die senkrecht wirkende 1. Hauptspannung (σ_1) zum Zeitpunkt des maximalen Spannungseintrages bewertet und dargestellt.

Für die Installation der Sensoren im ungestörten Boden, wurden Kanäle (Durchmesser 6 cm) in den Tiefen 20 cm, 40 cm und 60 cm senkrecht in eine Grubenwand eingeschlagen. Die extra für die Überfahrungen angelegten Gruben haben eine Tiefe von 80 cm und eine quadratische Fläche von ca. 1 m². Ein optimierter Einbau ist in Zink (2009) beschrieben. Aus Tabelle 11 wird deutlich, dass es sich bei den Messungen um Einfachmessungen (z.B. JD6, HG & SCH: Lenglern) und um Messungen mit bis zu sechs Wiederholungen (F14: Hasbruch) handelt. Ein Hauptgrund für die unterschiedliche Anzahl an Wiederholung waren die unterschiedlich langen Versuchszeiträume für welche die einzelnen Maschinen, auch in Abhängigkeit ihrer Betriebskosten, zur Verfügung gestellt werden konnten.

Tabelle 11. Übersicht der Spannungsmessungen je Standort, Maschinenvariante und Überfahrtenanzahl.

Standort	Reinshof & Vaake			Silberborn			Göttingen			Hasbruch		Lenglern		
Maschine	JD	PB	PB	JD	PB	PB	PB	MB	TB	F14	EMB	JD6	HG	SCH
Überfahrt	1	1	2-5	1	1	2-4	1-10	1-10	1-10	1-3	1-7	1-5	1-5	1-5
Tiefe	20, 40 & 60 cm			20, 40 & 60 cm			20, 40 & 60 cm			20 cm		20, 40 & 60 cm		
Anzahl der Messungen	3	1	3	2	1	2	3	3	2	6	3	1	1	1

Zur Verifizierung der Spannungseinträge wurden zusätzlich die Kontaktflächendrücke der einzelnen Maschinen errechnet. Dafür wurden zum einen die Radlasten der Maschinen mit Hilfe von einer mobilen Waage im Gelände auf einer ebenen Fläche bestimmt. Die Maschinen des Versuchsstandortes Lenglern wurden mit Hilfe einer stationären Waage im Landhandel gemessen. Wegen seiner großen Ketten konnte der *EMB Elliator* nicht gewogen werden. Seine Gewichtsbestimmung erfolgte durch Addition von gemessener Zuladung und Leergewicht (Werksangabe). Die Kontaktflächen der Maschinen wurden durch Abstreuen der Reifen- bzw. Kettenumrisse mit Mehl im unbefahrenen repräsentativen Umfeld auf der Versuchsfläche markiert. Die Umrise wurden anschließend senkrecht mit Maßstab abfotografiert und mit der Software Corel PHOTO-

PAINT 12 fotoanalytisch bearbeitet. Mit dem Programm SCION Image 4.0.3 erfolgte über Pixelbestimmung die Berechnung der Kontaktflächen. Mit beiden Parametern konnten die mittleren Kontaktflächendrücke, ohne Berücksichtigung der heterogenen Spannungsverteilung, der Maschinen errechnet werden. Neben der Bestimmung der Aufstandsflächen erfolgte im gleichen Schritt die Messung der Spurtiefen entlang eines Transektes über die Fahrpurbreite der jeweiligen Maschine mit mindestens acht Messpunkten (sowohl Steg- als auch Stollenbereich). Aus diesen Einzelwerten wurde ein arithmetischer Mittelwert gebildet und notiert.

2.3.5 Auswertung und Bewertung der Ergebnisse

2.3.5.1 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung und Darstellung der bodenphysikalischen Parameter gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), Luftleitfähigkeit (k_l), Vorbelastung (P_v), Lagerungsdichte (ρ_B), Luftkapazität (LK) und Gesamtporenvolumen (GPV) sowie der Spannungsverteilung der 1. Hauptspannung (σ_1) erfolgte mit dem Statistikprogramm R (2014) und startete mit der Definition eines geeigneten statistischen Modells. Die Parameter P_v , ρ_B , GPV, LK und σ_1 sind als normalverteilt und homoskedastisch anzusehen. Diese Annahmen basieren auf einer grafischen Residuen-Analyse. Das statistische Modell beinhaltet je Standort die Variante und Tiefe sowie die Interaktionen untereinander. Darauf basierend wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) je Versuchsstandort durchgeführt. Anschließend wurden multiple Kontrasttests durchgeführt (Bretz et al., 2011), um die verschiedenen Niveaus der jeweiligen Parameter zu vergleichen. Ein entsprechendes Zellenmittelmodell (Schaarschmidt & Vaas, 2009) wurde für die verschiedenen Faktoren angewendet. Die Parameter k_f und k_l sind nicht normalverteilt, sondern rechtsschief. Für die Auswertung dieser Daten wurde ein nichtparametrischer multipler Kontrasttest nach Konietschke (2012) angewendet. Alle Werte wurden als Mittelwerte (ggf. Einzelwerte) berechnet und dargestellt, lediglich die grafischen Auswertungen der bodenphysikalischen Parameter bzw. von σ_1 (wie z. B. Abbildung 3 oder Abbildung 25) enthalten Medianwerte.

2.3.5.2 Bewertung der bodenphysikalischen Parameter

Die bodenphysikalischen Parameter wurden zusätzlich nach *AD-hoc-AG Boden* (2005) und *DVWK* (1995; 1997) in Stufen von *sehr gering* bis *extrem hoch* klassifiziert. Als Grundlage der tendenziellen Abweichungen wurde ein Grenz-Prozentwert mit Hilfe der Klassen aus der folgenden Tabelle 12 bestimmt.

Tabelle 12. Tabelle zur Klassifizierung der bodenphysikalischen Parameter (AD-hoc-AG Boden, 2005; DVWK, 1995; 1997).

Bezeichnung	Stufe	P_v kPa	k_f $cm \cdot d^{-1}$	k_l $cm \cdot d^{-1}$	ρ_B $g \cdot cm^{-3}$	LK Vol.-%	GPV Vol.-%
Sehr gering	1	< 30	< 1	< 48	< 1,2	< 2	< 30
Gering	2	30 - 60	1 - 10	48 - 104	1,2 - 1,4	2 - 5	30 - 38
Mittel	3	60 - 90	10 - 40	104 - 216	1,4 - 1,6	5 - 13	38 - 46
Hoch	4	90 - 120	40 - 100	216 - 475	1,6 - 1,8	13 - 26	46 - 54
Sehr hoch	5	120 - 150	100 - 300	> 475	> 1,8	> 26	> 54
Extrem hoch	6	> 150	> 300	-	-	-	-

Für die Parameter k_f und k_l liegt dieser Grenz-Prozentwert bei 73 % (k_f) bzw. 54 % (k_l). Dieser Wert entspricht der mittleren Abnahme des Parameters um mindestens eine Klasse. Für die deutlich sensitiveren Parameter wurde ebenfalls ein mittlerer Grenz-Prozentwert für eine tendenzielle Abweichung berechnet. Diese Grenz-Prozentwerte 20 % (P_v), 5 % (ρ_B), 19 % (LK) und 6 % (GPV) entsprechen für den jeweiligen Parameter der mittleren Abnahme von 1/3 Klasse.

Tabelle 13. Tabelle zur Bewertung der bodenphysikalischen Parameter.

Bezeichnung	Bewertung	P_v	k_f	k_l	ρ_B	LK	GPV
keine	Abweichung	$\uparrow \leq 20\%$	$\downarrow \leq 73\%$	$\downarrow \leq 54\%$	$\uparrow \leq 5\%$	$\downarrow \leq 19\%$	$\downarrow \leq 6\%$
tendenziell	Abweichung	$\uparrow > 20\%$	$\downarrow > 73\%$	$\downarrow > 54\%$	$\uparrow > 5\%$	$\downarrow > 19\%$	$\downarrow > 6\%$
signifikant	Niveau	$\alpha \leq 0,05$	$\alpha \leq 0,05$	$\alpha \leq 0,05$	$\alpha \leq 0,05$	$\alpha \leq 0,05$	$\alpha \leq 0,05$

2.3.5.3 Bewertung der technischen Befahrbarkeit

Um einen potentiellen Verlust der technischen Befahrbarkeit aufzuzeigen, müssen weitere Parameter untersucht werden. Das Verhältnis von σ_1 zu P_v lässt sich nach Horn & Fleige (2003; 2009) klassifizieren und gibt somit erste Anzeichen über die Stabilitätsverhältnisse des Bodens. Ist der Quotient beider Parameter $< 0,8$ können instabile bzw. bei $> 1,2$ stabile Bodenverhältnisse angenommen werden. Liegt der Wert zwischen 0,8 und 1,2 spricht man von labilen Bodenstabilitäten. Zusätzlich zu diesem Wert wurde außerdem der Spannungsverlauf von σ_1 bei fortschreitender Überföhrung detaillierter betrachtet. Ein fortlaufender Anstieg der Spannungswerte wurde als Anzeichen für den (künftigen) Verlust der technischen Befahrbarkeit gewertet. Abfallende Werte sind ein Zeichen für die Einstellung eines neuen Gleichgewichtes zwischen P_v und Spannungs-

eintrag und sind somit nicht direkt mit einem Verlust der technischen Befahrbarkeit gleichzusetzen. Dies gilt auch für konstante Spannungswerte.

2.3.5.4 Auswertung des Drucksetzungsverhaltens von Setzung und Matrixpotenzial

Die auflastbedingte Änderung von Setzung und Matrixpotenzial (Ψ_M) während einer Belastung wurden beispielhaft für die Ergebnisse aus dem Drucksetzungsverhalten der Versuchsstandorte Reinshof und Vaake ausgewertet. In Abbildung 2 sind die Kurvenverläufe der Normalspannung, der Setzung und von Ψ_M für eine exemplarische Zylinderprobe mit einer Belastungszeit von 16 Stunden und einer Entlastungszeit von einer Stunde dargestellt. Anhand dieser Kurvenverläufe wurden für jede Zylinderprobe der betreffenden Standorte (P_V -Proben) die Werte zum Startzeitpunkt (0 kPa), zum Zeitpunkt der maximalen Auflast (400 kPa) und zum Zeitpunkt der Entlastung (wieder 0 kPa) ausgewertet und als Mittelwerte in Tabelle 36 (Versuchsstandort Reinshof) und Tabelle 37 (Versuchsstandort Hasbruch), sortiert nach Tiefe und Variante, dargestellt. Die Kreuze in der Abbildung 2 zeigen den dokumentierten Wert der jeweiligen Kurve auf.

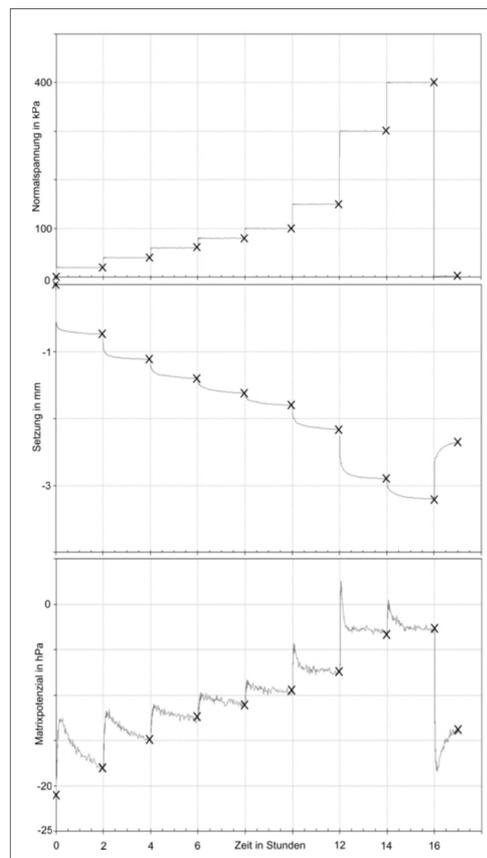


Abbildung 2. Zeitliche Entwicklung des Matrixpotenzials und der Setzung in Abhängigkeit von der Auflast, dargestellt als Normalspannung.

2.3.5.5 Auswertung mittels linearer Regression

Um den Einfluss der Überfahrungen auf unterschiedliche Parameter aufzuzeigen, wurden verschiedene Korrelationsanalysen erstellt. Die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes und die Darstellung der linearen Regression wurden mit dem Statistikprogramm *R* (2014) durchgeführt. In Tabelle 14 sind die für die jeweilige Korrelation benutzten Parameter aufgelistet und einer Nummer zugeordnet. Außerdem enthält die Tabelle Information zu den Abbildungen, in welchen die durchgeführten Regressionsanalysen zu finden sind. Für die Korrelationen wurden hauptsächlich die Daten der Holzerntemaschinen (*John Deere 1270e* und *Ponsse Buffalo*) ausgewertet.

Tabelle 14. Übersicht der verschiedenen Korrelationsanalysen mit den analysierten Parametern und Vorkommen in zugehöriger Abbildung.

Korrelation	Parameter y-Achse	Parameter x-Achse	Abbildung
1	σ_1	Kontaktflächendruck	33 - 35
2	σ_1	Ψ_M	33 - 35
3	$\sigma_1 > 200$ kPa	Anzahl der Überfahrten	33 - 35
4	$\sigma_1 < 200$ kPa	Anzahl der Überfahrten	33 - 35
5	σ_1	Textur	36, 37
6	σ_1	%-Änderung P_v	38
7	σ_1	%-Änderung k_f	38
8	σ_1	%-Änderung GPV	38
9	σ_1	%-Änderung LK	38
10	%-Änderung P_v	Änderung k_f	39
11	%-Änderung P_v	Änderung GPV	39
12	%-Änderung P_v	Änderung LK	39

Für die erste Korrelation wurden beispielsweise alle getesteten Maschinen, unterteilt nach Horizont, berücksichtigt. Um einen besseren Überblick zu erhalten, welche Maschinenvarianten für die jeweilige Korrelation berücksichtigt wurden, sind in Tabelle 15 alle untersuchten Varianten, aufgeteilt nach Standort und Tiefen, für jede der zwölf durchgeführten linearen Regressionen aufgelistet.

Tabelle 15. Übersicht der getesteten Varianten und Tiefen für die jeweilige Korrelationsanalyse.

Korrelation	Reinshof			Vaake			Silberborn			Göttingen			Hasbruch		Lutter		
	JD	PB	PB5	JD	PB	PB5	JD	PB	PB5	PB	PB5	PB10	EMB	F14	JD6	HG	SCH
1	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	20	20	20	20	20
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	40	-	-	-	-	40	40	40
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	60	-	-	-	-	60	60	60
2	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	60	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	20*	-	-	20*	-	-	20*	-	-	20*	-	20*	-	-	-
	-	-	40*	-	-	40*	-	-	40*	-	-	40*	-	-	-	-	-
	-	-	60*	-	-	60*	-	-	60*	-	-	60*	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20**	-	20**	-	20**
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40**	-	40**
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60**	-	60**
5	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	20	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	60	-	-	-	-	-	-	-
6	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	20	20	-	20	20	-	20	20	-	20	-	-	-	-	-	-	-
	40	40	-	40	40	-	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	60	-	60	60	-	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* für die Bestimmung der Befahrungsintensität wurden alle Überfahrten bis auf die erste berücksichtigt

** für die Bestimmung der Befahrungsintensität wurden alle Überfahrten berücksichtigt

3 Ergebnisse

3.1 Einzelauswertung der Befahrungsversuche

3.1.1 Versuchsstandort Reinshof

3.1.1.1 Bodencharakteristika und Maschinenparameter

Der Bodentyp am Versuchsstandort Reinshof wurde als Parabraunerde-Pseudogley aus Löss angesprochen. Alle Charakteristika dieses Versuchsstandortes sind in Tabelle 16 aufgelistet. Bei der Bodenart handelt es sich um *stark tonige Schluffe* mit Schluffgehalten bis zu 70 %. Der Tongehaltssprung vom lessivierten zum angereicherten Bt-Horizont beträgt 6 %. Im Unterboden konnten oxidierende (40 cm) und reduzierende Merkmale (60 cm) in Form von Eisen- und Mangan- ausfällungen beobachtet werden. Über die Tiefe sind abnehmende Grobporen sowie zunehmende Werte von ρ_B zu beobachten. Der Boden pH-Wert liegt im *sehr schwach sauren* und der Oberboden im *schwach humosen* Bereich. Während alle Werte von k_1 als *hoch* und alle Werte von GPV als *mittel* zu klassifizieren sind, schwanken die Ergebnisse von k_f zwischen *extrem hoch* im Oberboden und *mittel* in 60 cm Tiefe. P_v steigt von *gering* (20 cm) zu *mittel* (40 cm & 60 cm) an, wohingegen die Werte von LK von *mittel* zu *gering* abnehmen. Obwohl die Werte von ρ_B relativ ähnlich sind, schwanken sie zwischen den Klassen *mittel* (20 cm) und *hoch* (Unterboden).

Tabelle 16. Bodeneigenschaften des Parabraunerde-Pseudogleys aus Löss am Versuchsstandort Reinshof.

Tiefe cm	Horizont Symbol	Sand	Schluff	Ton	Textur Symbol	pH CaCl ₂	C _{org} %	ρ_B g · cm ⁻³	GPV	wGP	eGP	MP	FP	P _v kPa	k ₁ cm · d ⁻¹	k _f
		----- Gew. % -----								-----Vol.- % -----						
20	Ap	13	68	19	Ut4	6,5	1,0	1,57	42	8	4	20	10	35	366	602
40	Al-Sw	12	70	18	Ut4	6,2	0,6	1,65	38	5	3	18	12	67	336	51
60	Bt-Sd	10	66	24	Ut4	6,1	0,3	1,63	40	4	3	20	13	82	245	16

Die Maschinen *John Deere 1270e* und *Ponsse Bufallo* hatten ein Testgewicht von 24 Mg bzw. 28 Mg und eine Radlast von 4,1 Mg bzw. 4,4 Mg. Die maximale Radlast wurde bei beiden Maschinen an der jeweils dritten Achse gemessen. Die Zuladung des Forwarders betrug 9 Mg. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Kontaktflächen ergeben sich Kontaktflächendrücke von 155 kPa und 216 kPa für die beiden getesteten Maschinen (Tabelle 17). Bei der einfachen Befahrung wurden Spurtiefen von 6 cm (JD) bzw. 8 cm (PB) und nach mehrfacher Befahrung von 15 cm (PB5) gemessen.

Tabelle 17. Standortspezifische Maschineneigenschaften von John Deere 1270e und Ponsse Buffalo am Versuchsstandort Reinshof.

Maschine	Abkürzung	Testgewicht	Zuladung	Radlast	Kontaktfläche	Kontaktflächendruck	Spurtiefe
		Mg	Mg	Mg	m ²	kPa	cm
John Deere 1270e	JD	24	-	4,1*	0,26	155	6**
Ponsse Buffalo	PB	28	9	4,4*	0,20	216	8**; 15***

* 3. Achse; ** nach $\ddot{U}1$; *** nach $\ddot{U}5$

3.1.1.2 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter

Die bodenphysikalischen Parameter zeigen einen deutlichen Einfluss der drei Befahrungsvarianten (Kapitel 2.3.1.1) im gepflügten Oberboden auf, welcher meist signifikant ist (Abbildung 3).

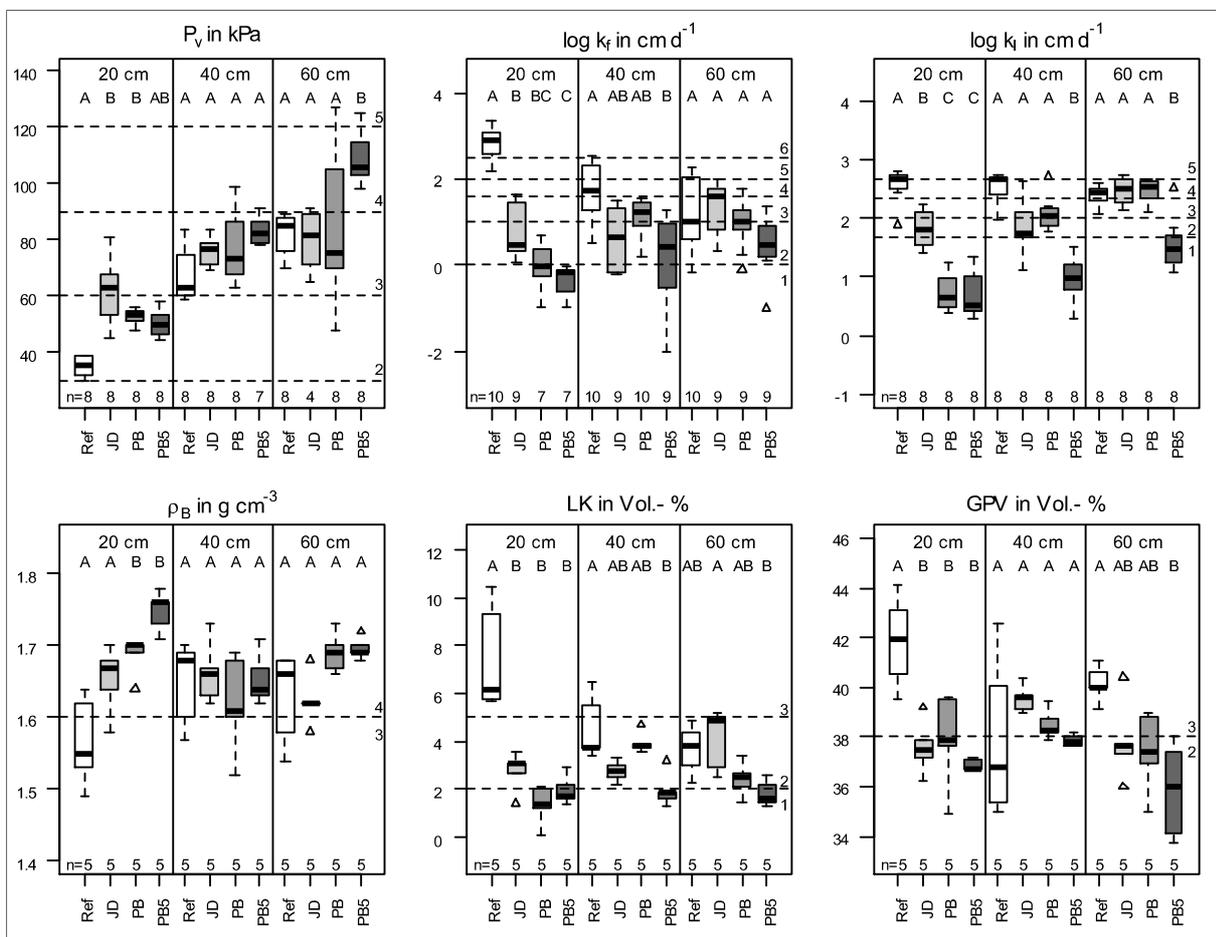


Abbildung 3. Auswirkungen der Überfahrungen mit John Deere 1270e, Ponsse Buffalo und Befahrungsintensitäten auf bodenphysikalische Parameter in Reinshof (Ref = Referenz; JD = John Deere 1270e [$\ddot{U}1$]; PB = Ponsse Buffalo [$\ddot{U}1$]; PB5 = Kombination aus JD [$\ddot{U}1$] und PB [$\ddot{U}2$ - $\ddot{U}5$]).

Außerdem sind die Ergebnisse der Mehrfach-Überfahrten von k_f und k_l zu den Einfach-Befahrungen verändert (statistisch). Signifikante Unterschiede im Unterboden lassen sich nur bei der Mehrfach-Überfahrt (PB5) beobachten. In 40 cm Tiefe liegen beide Leitfähigkeitswerte sowie LK und in 60 cm Tiefe die P_v , k_l , LK und GPV auf einem anderen Signifikanzniveau als die Referenz. Tendenziell zeigen die beiden anderen Belastungsvarianten im Unterboden negative Veränderungen der Bodenfunktionen auf Grund der Befahrung. Während beide Leitfähigkeitsparameter über alle Klassenbreiten schwanken, verteilen sich die P_v -Werte (*gering bis hoch*), ρ_B (*mittel bis hoch*), LK (*sehr gering bis mittel*) und GPV (*gering bis mittel*) auf maximal drei unterschiedliche Klassen.

3.1.1.3 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens

Die Spannungseinträge der beiden Maschinen liegen in 20 cm und 40 cm deutlich über den P_v -Werten des Bodens und erreichen während der ersten Überfahrt (*John Deere 1270e*) ihre maximalen Werte von 403 kPa (20 cm) und 226 kPa (40 cm) (Abbildung 4).

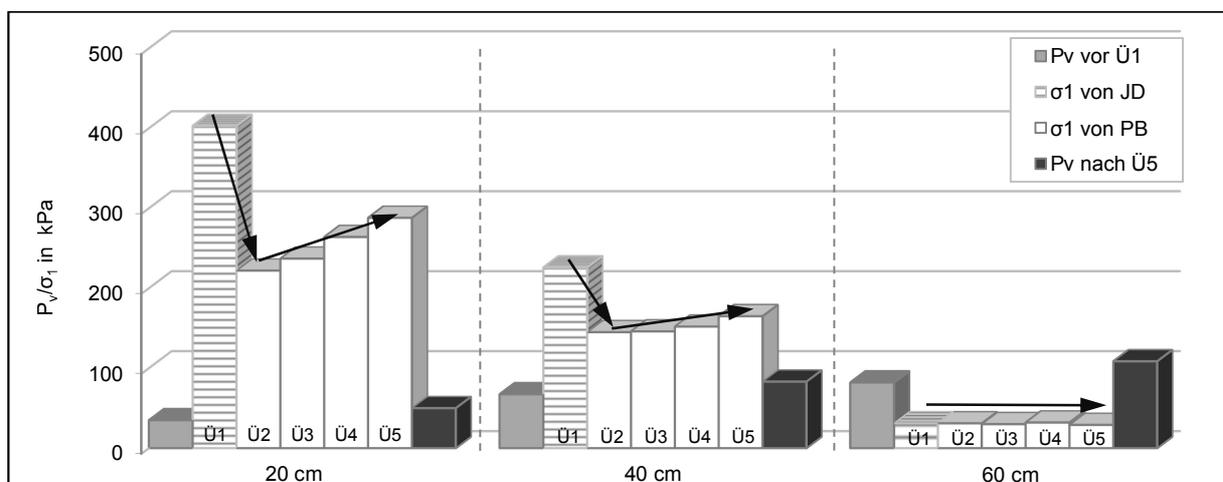


Abbildung 4. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Reinshof (Ü1 = John Deere 1270e; Ü2-Ü5 = Ponsse Buffalo).

Nach einer zunächst deutlich ausgeprägten Abnahme steigen die Spannungseinträge mit zunehmender Anzahl an Überfahrten (Überfahrt zwei bis fünf; *Ponsse Buffalo*) im Oberboden und in 40 cm Tiefe wieder an. Im untersten Horizont verlaufen die Spannungseinträge konstant auf einem niedrigen Niveau (ca. 30 kPa) und überschreiten die Referenz- P_v -Werte (82 kPa) nicht. Nach fünfmaliger Überfahrt liegen in allen drei Tiefen die P_v -Werte auf einem höheren Niveau. Im

Oberboden steigen die Werte von 35 kPa auf 50 kPa, in 40 cm von 67 kPa auf 83 kPa und in 60 cm von 82 kPa auf 109 kPa. Bei einer Erst-Überfahrt mit dem Forwarder *Ponsse Buffalo* wurden noch höhere Spannungseinträge in den obersten beiden Horizonten gemessen (20 cm: 526 kPa & 40 cm: 247 kPa) (Tabelle 18). Die Bewertung der Bodenstabilität als Verhältnis von σ_1 und P_v des Bodens zeigt instabile Verhältnisse für alle Überfahrten in den obersten beiden Horizonten mit Werten zwischen 0,1 und 0,5. In 60 cm Bodentiefe schwanken die Werte zwischen 2,6 und 2,8 mit leicht steigender Tendenz. Das Matrixpotential während der Befahrungsversuche lag zwischen -70 hPa im Oberboden und -120 hPa im Unterboden.

Tabelle 18. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von John Deere 1270e und Ponsse Buffalo differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: <0,8; labil: >0,8 und <1,2; stabil: >1,2) bei vorliegendem Matrixpotential (Ψ_M) am Versuchsstandort Reinshof.

Maschine	Tiefe cm	Ψ_M hPa	P_v kPa	σ_1 ----- kPa -----					P_v/σ_1				
				Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5
John Deere 1270	20	-70	35	403	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-
	40	-120	67	226	-	-	-	-	0,3	-	-	-	-
	60	-80	82	31	-	-	-	-	2,6	-	-	-	-
Ponsse Buffalo	20	-70	35	526	222	237	26	288	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
	40	-120	67	247	145	146	152	165	0,3	0,5	0,5	0,4	0,4
	60	-80	82	36	31	30	32	29	2,3	2,6	2,7	2,6	2,8

3.1.2 Versuchsstandort Vaake

3.1.2.1 Bodencharakteristika und Maschinenparameter

Am Versuchsstandort Vaake wurde ebenfalls ein Parabraunerde-Pseudogley aus Löss kartiert. Bei der Bodenart handelt es sich um *mittel* bis *stark tonige* Schluffe mit homogenen Schluffgehalten zwischen 67 % und 69 %. Alle drei Horizonte weisen eine ähnliche Zusammensetzung auf, nur in 60 cm Tiefe ist der Tonanteil leicht erhöht (um 4 %). Deutliche Hydromorphiemerkmale sind wie am Versuchsstandort Reinshof im Unterboden gefunden worden. Abnehmende Tendenzen sind für LK sowie GPV und zunehmende Tendenzen für den pH-Wert, ρ_B und P_v zu beobachten. Der Boden pH-Wert liegt im *stark sauren* und der Oberboden im *schwach humosen* Bereich. P_v kann für alle Horizonte als *gering* eingestuft werden, wohingegen die Leitfähigkeitswerte horizonspezifisch zwischen den Klassen *extrem hoch* und *mittel* schwanken (Tabelle 19). GPV und LK liegen größtenteils im *mittleren* Bereich. Die ρ_B -Werte variieren von *gering* (20 cm) bis *mittel* (60 cm).

Tabelle 19. Bodeneigenschaften des Parabraunerde-Pseudogleys aus Löss am Versuchsstandort Vaake.

Tiefe cm	Horizont Symbol	Sand ----- Gew. % -----	Schluff ----- Gew. % -----	Ton ----- Gew. % -----	Textur Symbol	pH CaCl ₂	C _{org} %	ρ_B g · cm ⁻³	GPV	wGP	eGP	MP	FP	P_v kPa	k_l cm · d ⁻¹	k_f
20	rAp	18	69	13	Ut3	4,3	0,7	1,24	45	10	3	22	9	33	541	1135
40	Al-Sw	17	69	14	Ut3	4,6	0,6	1,50	41	6	3	23	9	50	247	65
60	Bt-Sd	15	67	18	Ut4	4,7	0,4	1,59	40	4	3	20	13	56	125	18

Die Voraussetzungen an diesem Versuchsstandort wurden identisch zum Standort *Reinshof* gewählt und so unterscheiden sich die Gewichte beider Maschinen und die Zuladung des Forwarder zum Standort Reinshof nicht (Tabelle 20). Auch bei den Spurtiefen sind ähnliche Werte zu beobachten (JD: 6 cm; PB: 7 cm bzw. 14 cm).

Tabelle 20. Standortspezifische Maschineneigenschaften von John Deere 1270e und Ponsse Buffalo am Versuchsstandort Vaake.

Maschine	Abkürzung	Testgewicht Mg	Zuladung Mg	Radlast Mg	Kontaktfläche m ²	Kontaktflächendruck kPa	Spurtiefe cm
John Deere 1270e	JD	24	–	4,1*	0,25	161	6***
Ponsse Buffalo	PB	28	9	4,7**	0,19	243	7***; 14****

* 3. Achse; ** 4. Achse; *** nach Ü1; **** nach Ü5

3.1.2.2 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter

Der Vergleich der Belastungsvarianten mit der Referenz offenbart eine signifikante Beeinflussung aller Parameter im Oberboden (Abbildung 5). Bei den Parametern P_v und LK weist die Mehrfach-Überfahung ein weiteres Signifikanzniveau zu den Einzel-Überfahrten auf und zeigt somit stärkere Auswirkungen auf die Bodenstruktur an. In 40 cm Bodentiefe weisen die Parameter: P_v , LK und GPV keine statistisch relevanten Veränderungen zur unbelasteten Variante auf.

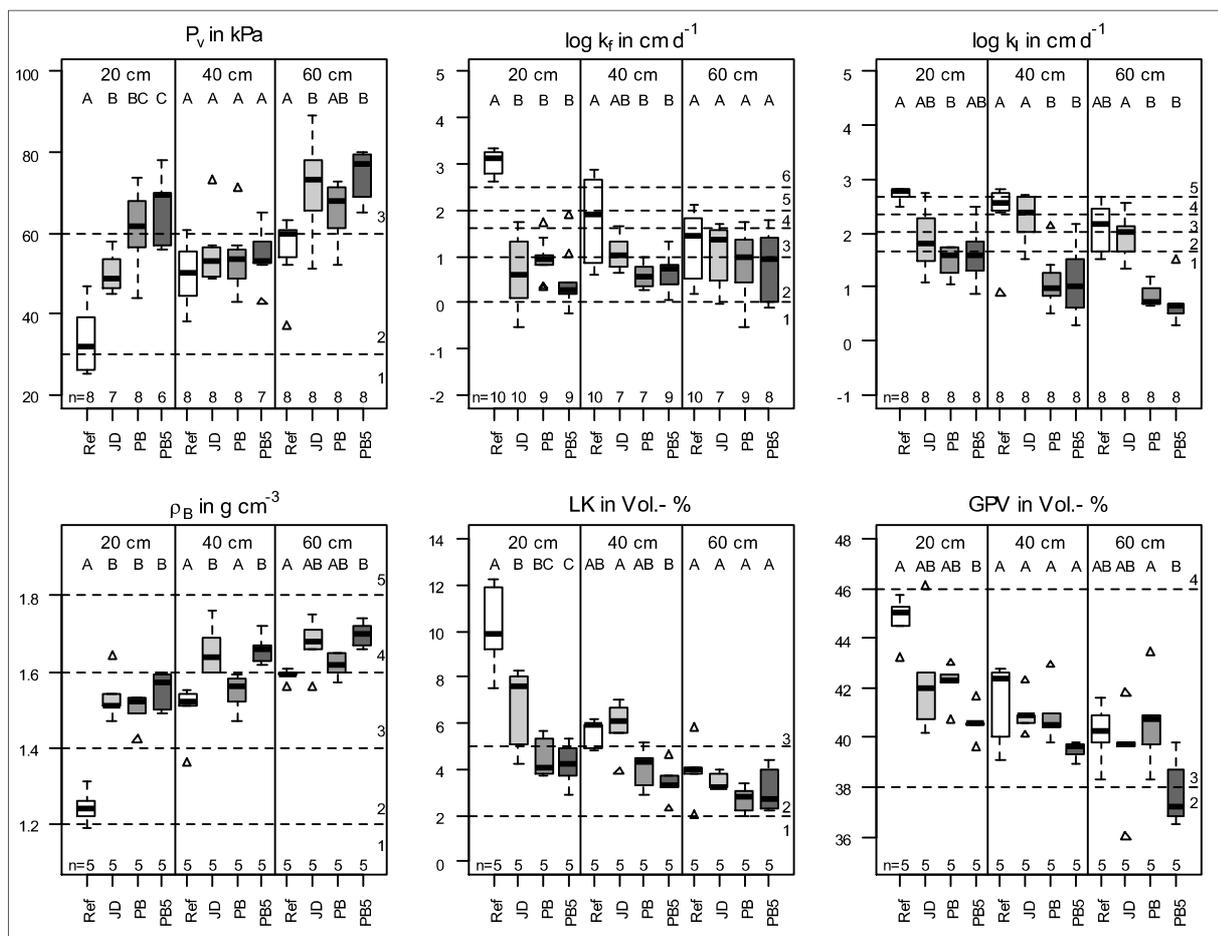


Abbildung 5. Auswirkungen der Überfahrungen mit John Deere 1270e, Ponsse Buffalo und Befahrungintensitäten auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Vaake (Ref = Referenz; JD = John Deere 1270e [Ü1]; PB = Ponsse Buffalo [Ü1]; PB5 = Kombination aus JD [Ü1] und PB [Ü2-Ü5]).

Dennoch lässt sich bei LK und GPV eine tendenzielle Abnahme als Folge der Mehrfach-Überfahung von der Referenz beobachten. Bei den anderen drei Parametern (k_f , k_l & ρ_B) liegt jeweils die Mehrfach-Überfahung signifikant verändert in zweimaliger Kombination mit der Variante PB und einmalig mit der Variante JD. Im untersten Horizont liegen die Varianten JD

und PB5 bei P_v und PB5 bei ρ_B auf einem anderen Signifikanzniveau. Andere bodenphysikalische Parameter sind nicht statistisch verändert. Die Parameter: P_v , LK und GPV schwanken zwischen den Klassen *mittel* und *gering*. Bei k_f und k_l wurde eine Streuung vom höchsten bis zum niedrigsten Wertebereich dokumentiert. ρ_B liegt hauptsächlich in den Bereichen *mittel* und *hoch*, nur der Referenzwert im Oberboden erhält nach Definition die Bewertung *gering*.

3.1.2.3 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens

Die Spannungseinträge beider Maschinen überschreiten P_v der Referenz im Oberboden und im Unterboden (40 cm) deutlich. Das Maximum der Spannungseinträge (20 cm: 478 kPa; 40 cm: 303 kPa) in diesen Tiefen wird bei der ersten Überfahrt des Harvesters *John Deere 1270e* erzielt (Abbildung 6).

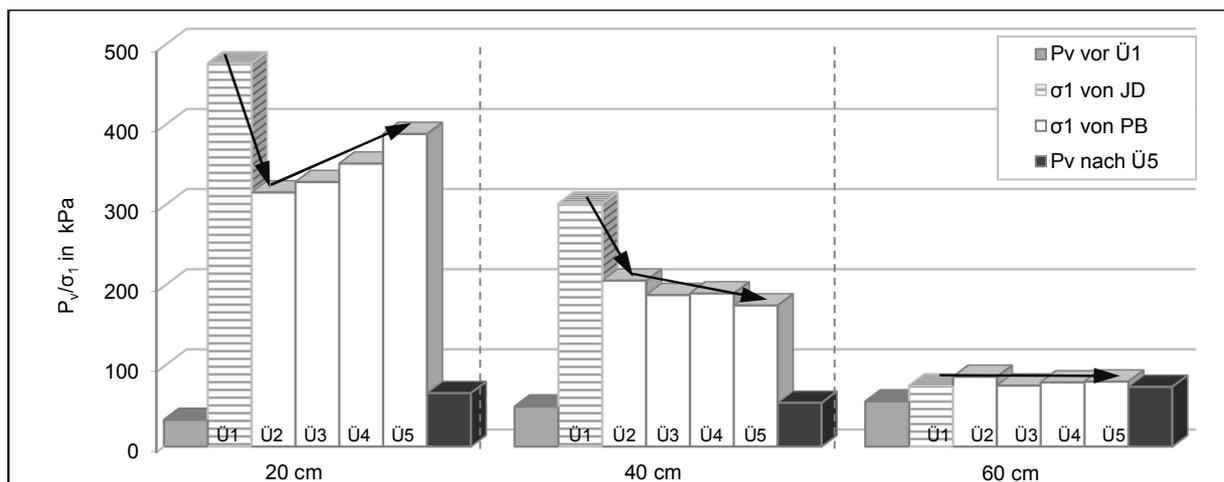


Abbildung 6. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Vaake (Ü1 = John Deere 1270e; Ü2-Ü5 = Ponsse Buffalo).

Im Oberboden nimmt σ_1 nach einmaliger Abnahme wieder zu, wohingegen in 40 cm Tiefe eine kontinuierliche Abnahme zu beobachten ist. Im untersten Horizont verlaufen die Spannungseinträge (~ 80 kPa) nahezu konstant und liegen leicht über den P_v -Werten der Referenz (56 kPa). In allen drei Tiefen findet eine Erhöhung von P_v nach fünfmaliger Überfahrt statt.

Aus Tabelle 21 zur Bewertung der Stabilität geht hervor, dass zu jedem Zeitpunkt der Befahrung in allen Tiefen instabile Verhältnisse sowohl beim *John Deere 1270e* als auch beim *Ponsse Buffalo* vorlagen. Die Werte im Oberboden und in 40 cm liegen mit einem Verhältnis von 0,1 bis

0,3 deutlich im instabilen Bereich und steigen in 60 cm auf 0,5 bis 0,7 an. Die Befahrungen fanden bei Matrixpotentialen um -100 hPa statt. Die Tabelle zeigt außerdem, dass bei einer potentiellen Erst-Überfahrt mit dem *Ponsse Buffalo* Spannungseinträge von bis zu 647 kPa im Oberboden, 442 kPa in 40 cm und 113 kPa in 60 cm gemessen wurden, welche die Maximalwerte des *John Deere 1270e* während der Erst-Überfahrt deutlich überschreiten.

Tabelle 21. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von *John Deere 1270e* und *Ponsse Buffalo* differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Vaake.

Maschine	Tiefe cm	Ψ_M hPa	P_v kPa	σ_1 ----- kPa -----					P_v/σ_1				
				Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5
John Deere 1270	20	-100	33	478	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-
	40	-110	50	303	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-
	60	-100	56	76	-	-	-	-	0,7	-	-	-	-
Ponsse Buffalo	20	-100	33	647	317	330	353	390	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	40	-110	50	442	207	18	191	176	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3
	60	-100	56	113	87	76	80	81	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7

3.1.3 Versuchsstandort Silberborn

3.1.3.1 Bodencharakteristika und Maschinenparameter

Eine (Norm-)Braunerde aus lösshaltiger Fließerde mit drei unterschiedlichen Texturen: *stark lehmiger Sand*, *sandiger Schluff* und *sandig-lehmiger Schluff* zeigt Schluffgehalte zwischen 31 % im Oberboden und 61 % in 40 cm Bodentiefe. Der pH-Wert ist über die Tiefe nahezu konstant und liegt zwischen 4,1 und 4,2 (*stark sauer*). Der Gehalt von 2,5 % organischer Substanz wird als *sehr stark humos* definiert. k_f liegt in allen Tiefen im *sehr hohen* bzw. *extrem hohen* Wertebereich, wohingegen P_v nach Klassifikation als *gering* und GPV als *mittel* einzustufen ist. k_1 und ρ_B schwanken jeweils in diesen beiden Wertebereichen. Alle Zahlenwerte zu den einzelnen Parametern befinden sich für den Versuchsstandort Silberborn in Tabelle 22.

Tabelle 22. Bodeneigenschaften der (Norm-)Braunerde aus lösshaltiger Fließerde am Versuchsstandort Silberborn.

Tiefe cm	Horizont Symbol	Sand ----- Gew. % -----	Schluff ----- Gew. % -----	Ton ----- Gew. % -----	Textur Symbol	pH CaCl ₂	C _{org} %	ρ_B g · cm ⁻³	GPV	wGP	eGP	MP	FP	P_v kPa	k_1 cm · d ⁻¹	k_f cm · d ⁻¹
20	Bv/Ah	53	31	16	Sl4	4,2	2,5	1,29	46	6	3	26	11	51	86	144
40	Bv1	33	61	6	Us	4,1	0,8	1,35	45	6	4	21	14	55	193	443
60	Bv2	30	58	12	Uls	4,1	0,6	1,47	40	3	2	22	12	51	87	524

Wie auch an den beiden Standorten zuvor wurden in Silberborn die Maschinen *John Deere 1270e* und *Ponsse Buffalo* getestet. Mit 10 Mg ist die Zuladung im Vergleich zu den vorherigen beiden Standorten um 1 Mg erhöht. Die maximale Radlast wurde bei beiden Maschinen an der dritten Achse gemessen und erreicht beim *John Deere 1270e* 4,2 Mg und beim *Ponsse Buffalo* 4,4 Mg. Aus den Kontaktflächen von 0,28 m² (JD) und 0,23 m² (PB), ergeben sich für die Maschinen Kontaktflächendrücke von 147 kPa und 188 kPa (Tabelle 23). Eine Spurtiefe von 5 cm wurde für JD und PB nach einmaliger und 11 cm nach mehrfacher Befahrung (PB5) dokumentiert.

Tabelle 23. Standortspezifische Maschineneigenschaften von *John Deere 1270e* und *Ponsse Buffalo* am Versuchsstandort Silberborn.

Maschine	Abkürzung	Testgewicht Mg	Zuladung Mg	Radlast Mg	Kontaktfläche m ²	Kontaktflächendruck kPa	Spurtiefe cm
John Deere 1270e	JD	24	–	4,2*	0,28	147	5**
Ponsse Buffalo	PB	29	10	4,4*	0,23	188	5** bzw. 11***

* 3. Achse; ** nach Ü1; *** nach Ü5

3.1.3.2 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter

Die Auswertung der bodenphysikalischen Kennwerte aus Abbildung 7 ergibt für P_v und k_f in keiner Tiefe signifikante Veränderungen. Für P_v ist in den oberen beiden Horizonten teilweise eine Verschiebung der Klassen (P_v : von *gering* zu *mittel*) festzustellen, die jedoch nicht statistisch signifikant ist. Bei k_f erfolgt eine signifikante Abnahme von der Referenz zu allen Maschinenvarianten in allen Tiefen. Die Werte verschieben sich von *sehr hoch* bzw. *extrem hoch* bis hin zu *gering*. Ergebnisse von ρ_B zeigen im Oberboden einen tendenziellen Anstieg, welcher sich für die Variante PB5 über alle Tiefen fortsetzt und in 60 cm signifikant ist. Die Werte liegen in den Klassen *gering* bis *hoch*.

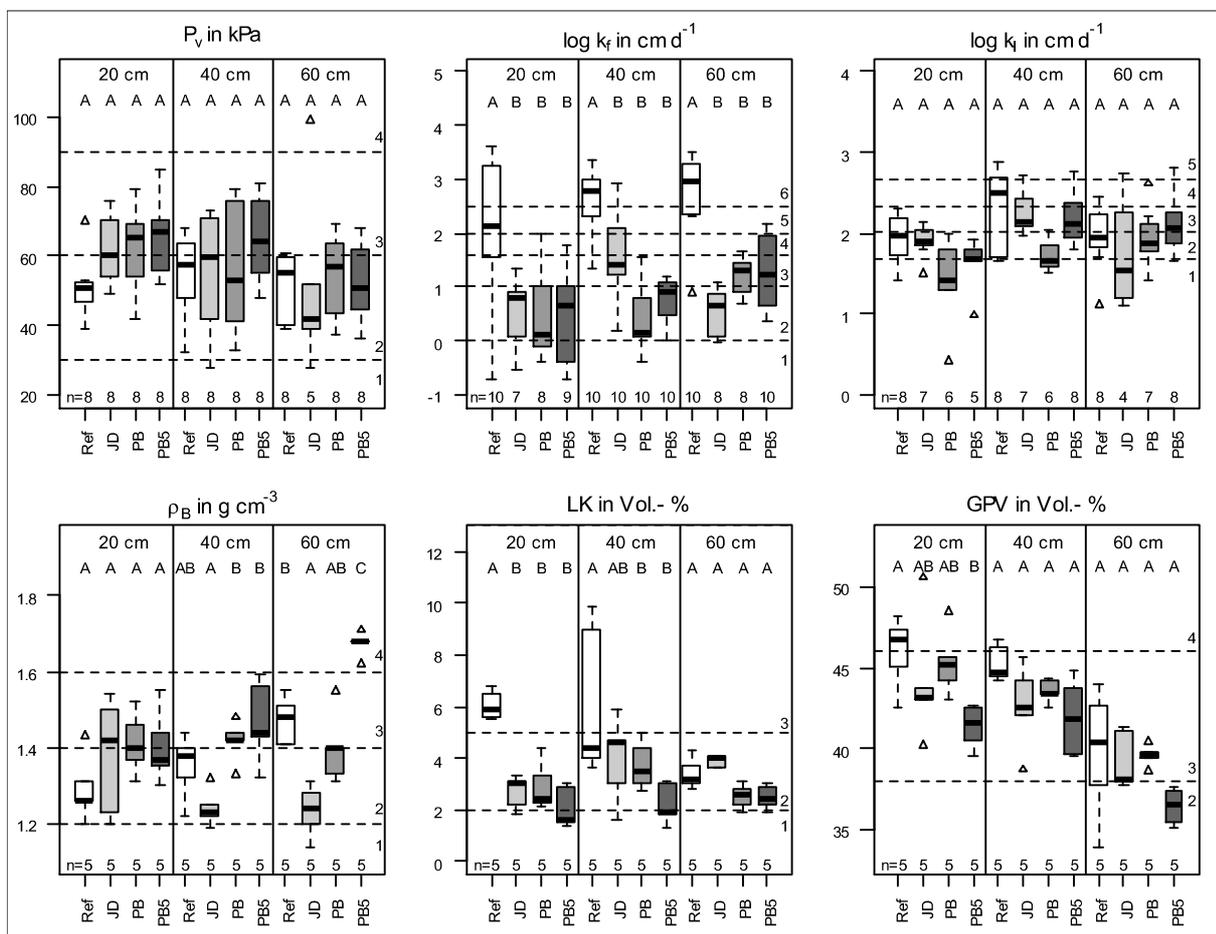


Abbildung 7. Auswirkungen der Überfahrungen mit John Deere 1270e, Ponsse Buffalo und Befahrungintensitäten auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Silberborn (Ref = Referenz; JD = John Deere 1270e [Ü1]; PB = Ponsse Buffalo [Ü1]; PB5 = Kombination aus JD [Ü1] und PB [Ü2-Ü4]).

Die Kapazitätsparameter GPV und LK zeigen abnehmende Werte für die Belastungsvarianten über die Tiefe und sind in 20 cm (LK: JD, PB & PB5; GPV: PB5) und 40 cm (LK: PB & PB5) teilweise signifikant. Die Werte sind für LK als *sehr gering* bis *mittel* und für GPV als *gering* bis *hoch* zu klassifizieren.

3.1.3.3 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens

Bei den dynamischen Lasteinträgen der Maschinen am Standort Silberborn ergibt sich besonders im Oberboden ein anderes Bild als bei den Versuchsstandorten Reinshof und Vaake. Nach der ersten Überfahrt mit dem *John Deere 1270e* steigen die Spannungseinträge für jede weitere Überfahrt mit dem *Ponsse Buffalo* weiter an und erreichen nach der vierten Überfahrt ihr Maximum von 435 kPa (Abbildung 8). Ein ähnliches Bild ist auch in Tiefe 40 cm zu beobachten. Nach der vierten Überfahrt liegt das Maximum dort bei 256 kPa. In diesen beiden Tiefen übersteigen die Werte von σ_1 deutlich die Werte von P_v , welche nach den Überfahrungsversuchen im Vergleich zu vorher angestiegen sind. Im untersten Bodenhorizont nehmen die Spannungseinträge nach der ersten Überfahrt ab und überstiegen P_v nur leicht, so dass diese nach der vierten Überfahrt nur unwesentlich erhöht sind.

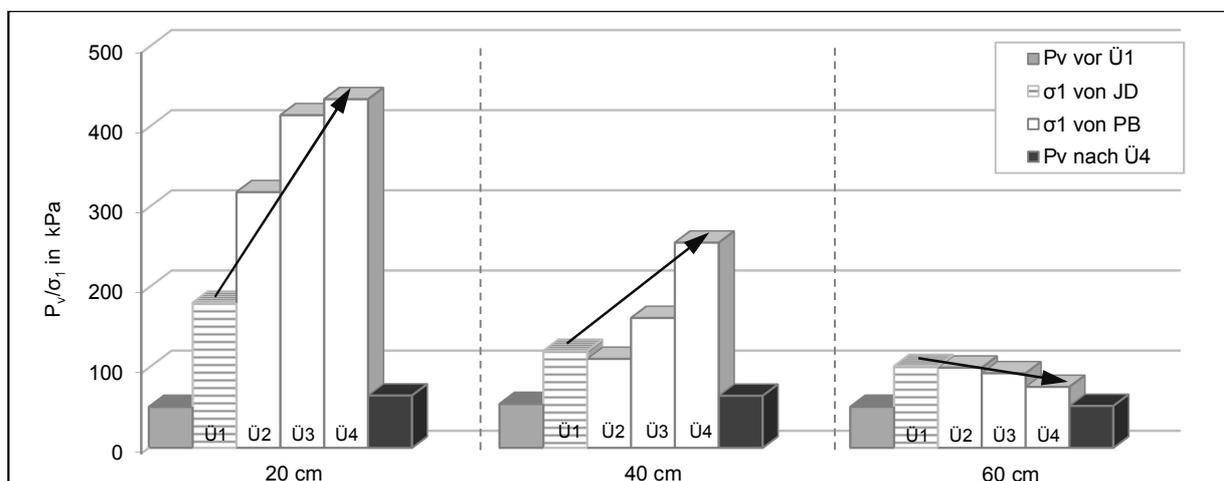


Abbildung 8. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Silberborn (Ü1 = John Deere 1270e; Ü2-Ü5 = Ponsse Buffalo).

Die Stabilitätswerte aus Tabelle 24 verdeutlichen auch an diesem Standort die zu hohen Gewichte der eingesetzten Holzerntemaschinen. Zu keinem Zeitpunkt der Messung und in keiner Tiefe sind *stabile* Verhältnisse für die Bodenstruktur dokumentiert. Alle Werte liegen im *instabilen* Bereich

zwischen 0,1 und 0,7. Eine Erst-Überfahrt mit dem *Ponsse Buffalo* (Verhältnis von 0,2 bzw. 0,4) wirkt sich auf Grund der höheren Spannungseinträge stärker auf die Bodenstabilität aus als die Erst-Überfahrt des *John Deere 1270e* (Verhältnis von 0,3 bzw. 0,5). Die Messungen fanden bei einem Matrixpotential von ca. -60 hPa statt.

Tabelle 24. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von *John Deere 1270e* und *Ponsse Buffalo* differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotential (Ψ_M) am Versuchsstandort Silberborn.

Maschine	Tiefe cm	Ψ_M hPa	P_v kPa	σ_1 ----- kPa -----					P_v/σ_1				
				Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5
John Deere 1270	20	-60	51	181	-	-	-	-	0,3	-	-	-	-
	40	-60	55	121	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-
	60	-50	51	102	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-
Ponsse Buffalo	20	-60	51	302	319	415	435	-	0,2	0,2	0,1	0,1	-
	40	-60	55	150	111	162	256	-	0,4	0,5	0,3	0,2	-
	60	-50	51	128	100	93	76	-	0,4	0,5	0,5	0,7	-

3.1.4 Versuchsstandort Göttingen

3.1.4.1 Bodencharakteristika und Maschinenparameter

Ein primärer (Norm-)Pseudogley aus Löss wurde am Versuchsstandort Göttingen mit *schwach* und *stark tonigem Schluff* angesprochen. Die Schluffgehalte liegen zwischen 74 % im Oberboden und 88 % in 40 cm Tiefe (Tabelle 25). Der Oberboden ist als *mittel humos* und *sehr schwach alkalisch* (pH-Wert von 7,2) definiert. Der Unterboden liegt ebenfalls im *sehr schwach alkalischen* Bereich, weist in 40 cm *hohe* Werte von P_v und gleichzeitig *sehr hohe* (k_i) bzw. *extrem hohe* (k_f) Leitfähigkeitswerte auf. Die Werte von ρ_B , LK und GPV können größtenteils als *mittel* eingestuft werden.

Tabelle 25. Bodeneigenschaften des (Norm-)Pseudogleys aus Löss am Versuchsstandort Göttingen.

Tiefe	Horizont	Sand	Schluff	Ton	Textur	pH	C_{org}	ρ_B	GPV	wGP	eGP	MP	FP	P_v	k_i	k_f
cm	Symbol	----- Gew. % -----			Symbol	$CaCl_2$	%	$g \cdot cm^{-3}$	-----Vol.- % -----				kPa	$cm \cdot d^{-1}$		
20	Ap	4	74	22	Ut4	7,2	1,6	1,57	42	8	4	20	10	35	366	602
40	Sw1	3	88	9	Ut2	7,3	0,5	1,53	41	7	3	7	24	92	549	761
60	Sw2	3	80	17	Ut4	7,4	0,2	1,64	38	4	2	9	23	85	1687	191

Für die Überfahrungsversuche wurde ausschließlich der Forwarder *Ponsse Buffalo* genutzt. Im Grundzustand ohne montierte Bänder erzielte die Maschine ein Gesamtgewicht von 29 Mg mit einer Radlast von 4,5 Mg, einer Kontaktfläche von 0,2 m² und einem resultierenden Kontaktflächendruck von 221 kPa (Tabelle 26). Die genannten Daten beziehen sich auf die dritte Achse der Maschine. Die Zuladung betrug ca. 10 Mg, was einer Auslastung von 71 % entspricht. Nach einfacher Überfahrt wurde eine Spurtiefe von 4 cm, nach fünf- und zehnfacher Überfahrt eine Spurtiefe von 8 cm gemessen. Für die beiden Bogieband-Varianten wurden 6 cm (MB) bzw. 8 cm (TB) nach zehnmaliger Befahrung notiert.

Tabelle 26. Standortspezifische Maschineneigenschaften des Ponsse Buffalo am Versuchsstandort Göttingen.

Maschine	Abkürzung	Testgewicht	Zuladung	Radlast	Kontaktfläche	Kontaktflächendruck	Spurtiefe
		Mg	Mg	Mg	m ²	kPa	cm
Ponsse Buffalo	PB	29	10	4,5*	0,20	221	4,6,8,9**

* 3. Achse; ** unterschiedliche Varianten

3.1.4.2 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter

Die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Befahrungintensität (1-fach, 5-fach & 10-fach Überfahung) zeigen im Oberboden fast bei allen Varianten und Parametern signifikante Abweichungen zur Referenz (Abbildung 9).

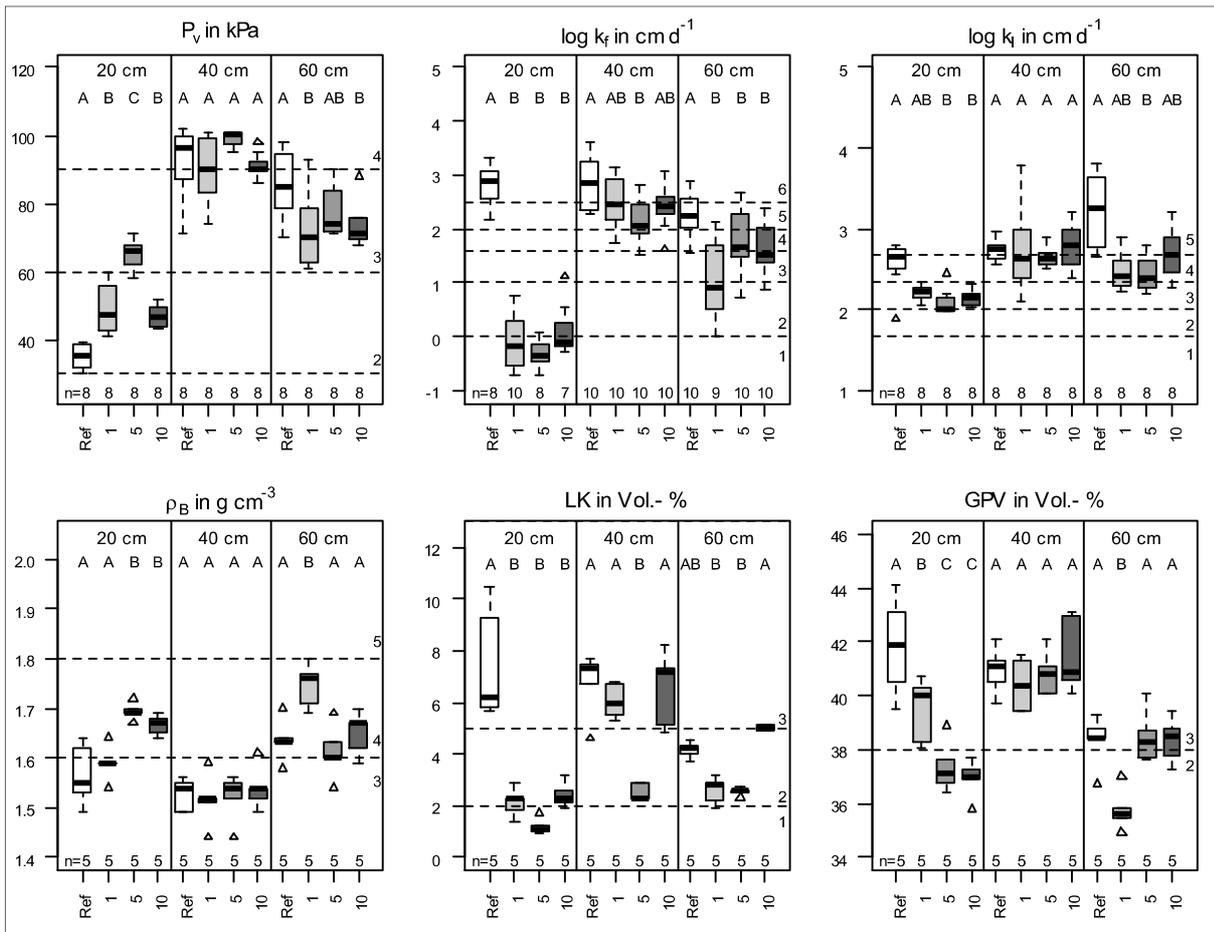


Abbildung 9. Auswirkungen der unterschiedlichen Befahrungintensitäten auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Göttingen (Ref = Referenz; 1 = Ponsse Buffalo [Ü1]; 5 = Ponsse Buffalo [Ü1-Ü5]; 10 = Ponsse Buffalo [Ü1-Ü10]).

Auffällig ist, dass bei der fünffachen Befahrungen die größten Abweichungen zum Referenzwert festzustellen sind. So erreicht P_v dieser Variante ein weiteres Signifikanzniveau und unterscheidet sich zusätzlich von der Einfach- und der Zehnfach-Variante. Die k_f -Werte fallen nach Klassifikation von *extrem hoch* auf *sehr gering*. Alle anderen Parameter ändern sich nur um eine Klasse, mit Ausnahme von LK der Fünffach-Variante, welche von *mittel* auf *sehr gering* sinkt. In 40 cm Bodentiefe treten wiederum bei der fünffachen Überfahung nur bei k_f und LK statistische Abwei-

chungen auf. Ansonsten liegen die Werte oft in derselben Klasse (Ausnahme k_f : 1, 5 & 10 & LK: 5). In 60 cm nehmen die signifikanten Änderungen wieder zu, allerdings lassen sich hier keine eindeutigen Tendenzen der Belastungsvarianten erkennen. Die Auswirkungen der Varianten mit unterschiedlichen Bogiebändern zeigen im Oberboden außer beim Parameter k_1 signifikante Veränderungen im Vergleich zur Referenzbeprobung. Allerdings lassen sich keine eindeutigen Tendenzen zwischen den einzelnen Varianten feststellen. Bei P_v liegt die Veränderung nach Überfahrt mit dem Moorband zusätzlich signifikant höher als die der anderen beiden Belastungsvarianten. In 40 cm Tiefe lässt sich nur eine statistisch relevante Abweichung von k_f der Variante TB zur Referenz finden.

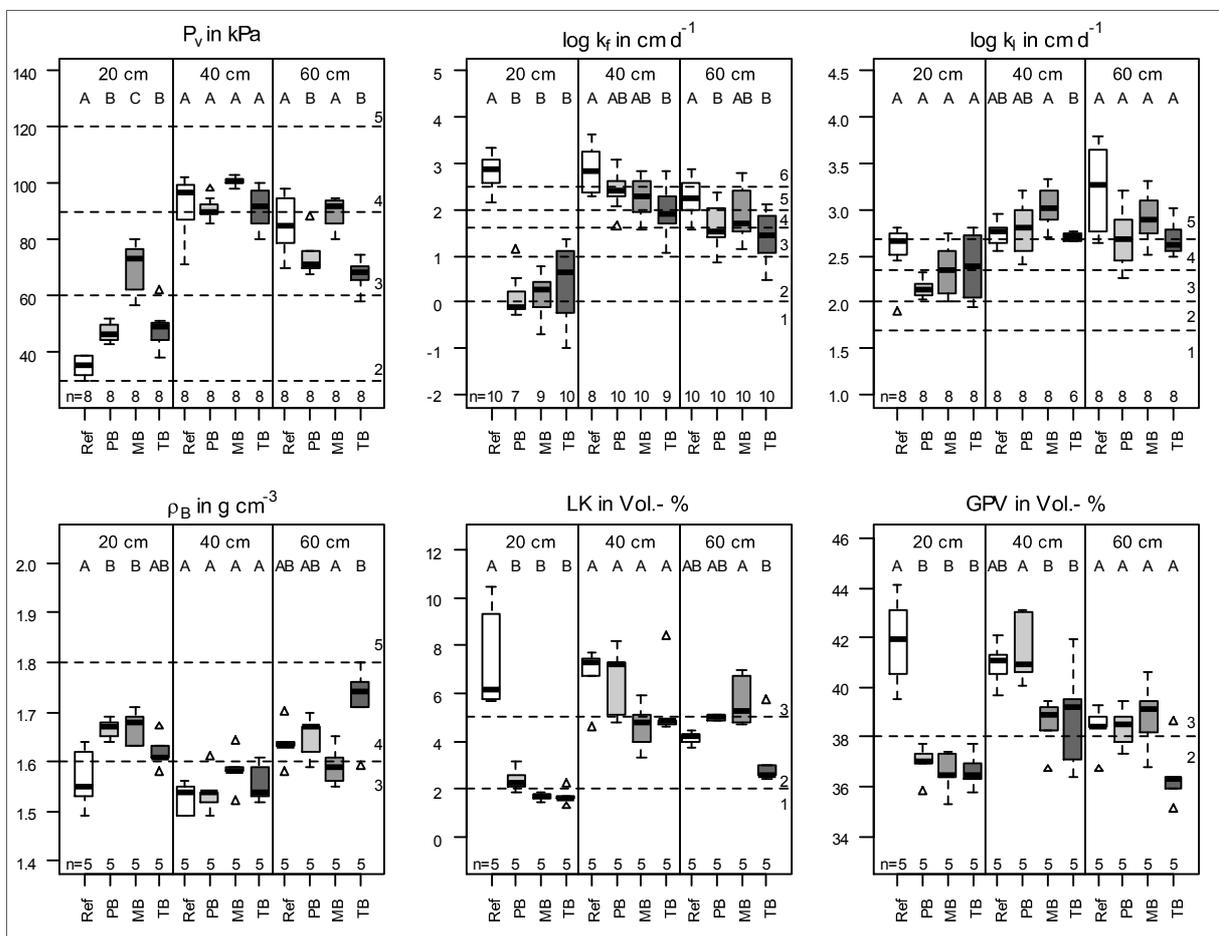


Abbildung 10. Auswirkungen der Überfahrten mit verschiedenen Maschinenspezifikationen auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Göttingen (Ref = Referenz; PB = Ponsse Buffalo [Ü1-Ü10]; MB = Ponsse Buffalo mit Moorband [Ü1-Ü10]; TB = Ponsse Buffalo mit Traktionsband [Ü1-Ü10]).

Der Parameter k_1 weist in keiner Tiefe eine statistisch relevante Veränderung zur Referenz auf, allerdings ist in 20 cm und 60 cm jeweils eine Abnahme um eine Klassenbreite zu beobachten.

Die signifikanten Unterschiede nehmen in 60 cm Bodentiefe wieder leicht zu, bilden aber auch hier kein eindeutiges Bild zwischen den unterschiedlichen Belastungsvarianten. Deutliche Klassenunterschiede (mehr als zwei Klassen) sind ausschließlich bei k_f (von *extrem* hoch bis *sehr gering*) und bei LK in 20 cm (von *mittel* zu *sehr gering*) zu beobachten.

3.1.4.3 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens

Der maximale Spannungseintrag für die Überfahrt ohne Band wurde mit ca. 500 kPa während der ersten Überfahrt in 20 cm Bodentiefe gemessen. Nach einem ausgeprägten Abfall der Werte bei der zweiten Überfahrt steigen sie für jede weitere Überfahrt wieder an (Abbildung 11). Dieses Phänomen kann auch in 40 cm Bodentiefe beobachtet werden. Dort sind die Spannungseinträge der ersten und der zehnten Überfahrt wieder fast identisch (Ü1: 209 kPa zu Ü10: 198 kPa). In diesen beiden Horizonten überschreiten die Werte von σ_1 deutlich die Werte von P_v der Referenz, so dass eine Erhöhung dieser nach der zehnten Überfahrt im Oberboden festzustellen ist. In 60 cm Bodentiefe übersteigen die Spannungseinträge P_v nicht. Eine tendenzielle Abnahme ist zu erkennen.

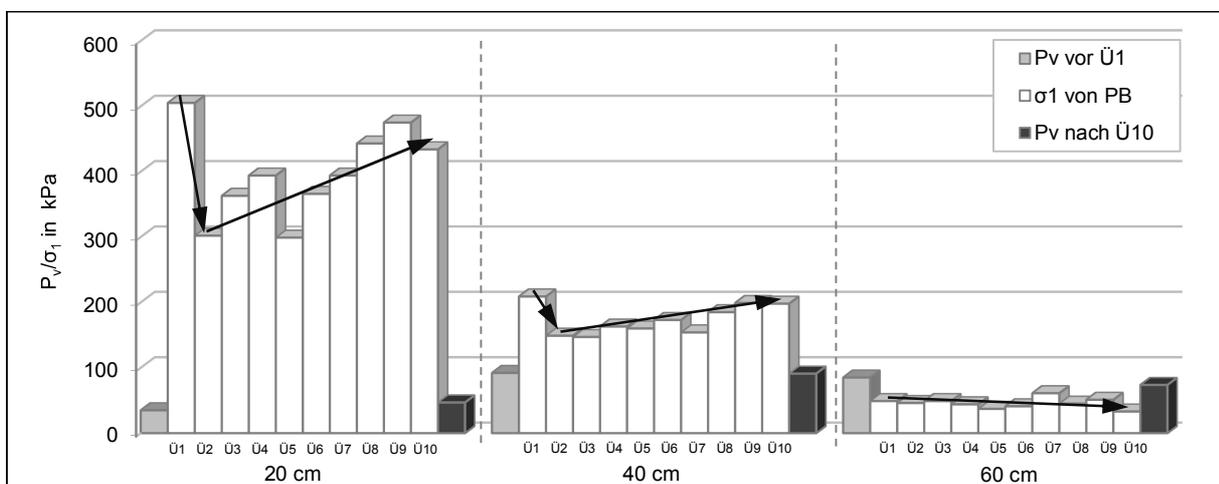


Abbildung 11. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der zehnten Überfahrt am Versuchsstandort Göttingen (Ü1-Ü10 = Ponsse Buffalo [PB]).

Abbildung 12 zeigt für die Variante MB eine abnehmende Tendenz von der ersten bis zur zehnten Überfahrt in den obersten beiden Horizonten. Im Oberboden fallen die Werte von 446 kPa auf 280 kPa und in 40 cm Tiefe von 176 kPa auf 131 kPa. In beiden Horizonten übersteigen die Wer-

te von σ_1 die Werte von P_v , so dass ein Anstieg von 35 kPa auf 70 kPa (20 cm) bzw. von 92 kPa auf 101 kPa (40 cm) nach der zehnten Überfahrt beobachtet werden kann.

Im untersten Horizont verlaufen die Werte von σ_1 auf einem nahezu konstanten Niveau von ca. 50 kPa und überschreiten P_v nicht, welche bei ca. 85 kPa liegt.

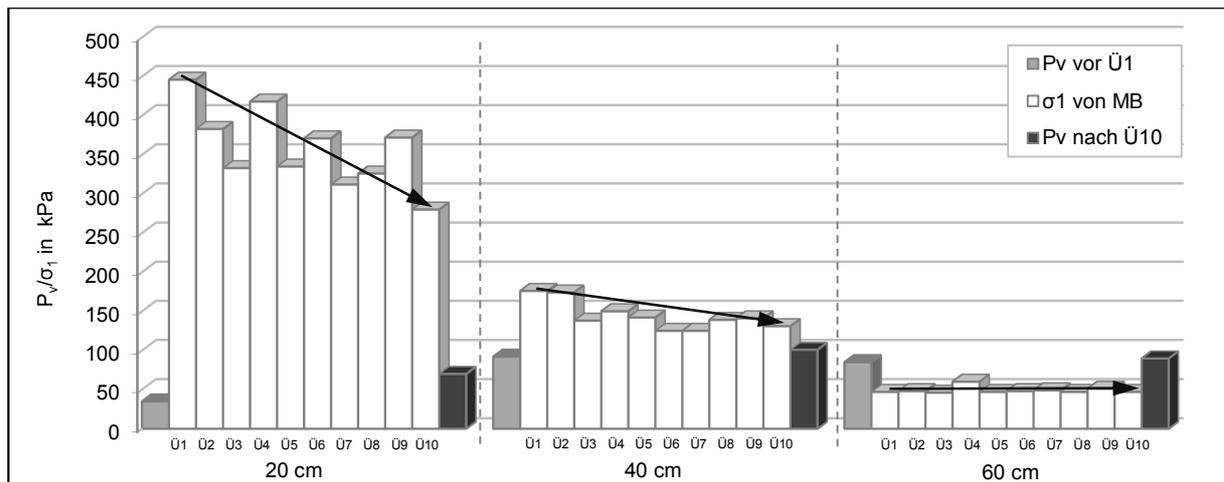


Abbildung 12. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der zehnten Überfahrt am Versuchsstandort Göttingen (Ü1-Ü10 = Ponsse Buffalo mit Moorband [MB]).

Der Versuch mit dem Traktionsband liefert ähnliche Ergebnisse wie die Überfahrungsvariante ohne Band. Im Oberboden findet nach Erreichen des Maximalwertes von 632 kPa zunächst eine Abnahme bis zur dritten Überfahrt statt, danach lässt sich wiederum eine Zunahme von σ_1 auf 513 kPa beobachten (Abbildung 13).

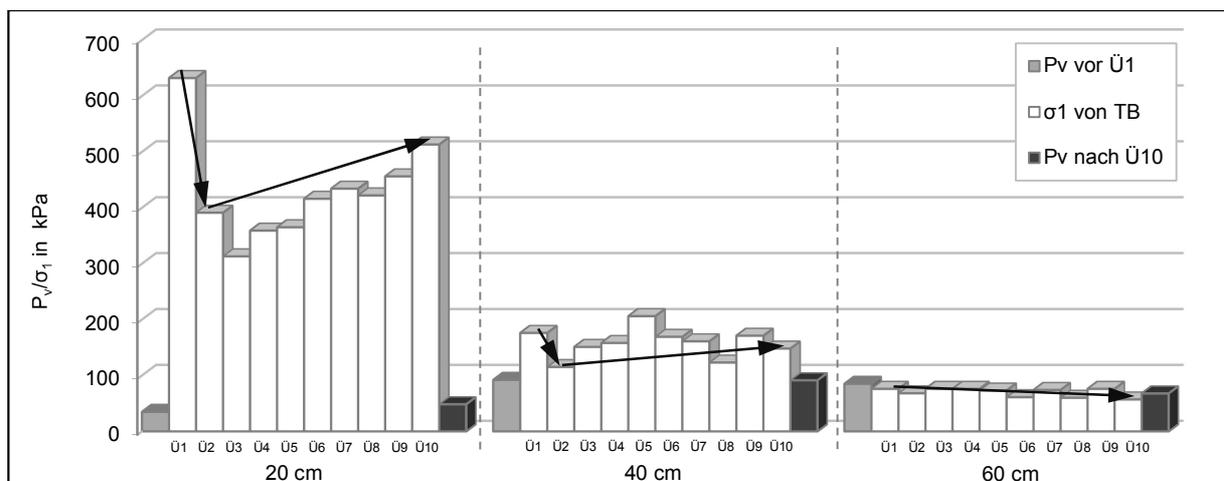


Abbildung 13. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der zehnten Überfahrt am Versuchsstandort Göttingen (Ü1-Ü10 = Ponsse Buffalo mit Traktionsband [TB]).

Der Vergleich der verschiedenen Varianten zeigt, dass das Moorband deutlich reduzierte Spannungseinträge liefert (Ü1 von MB im Vergleich zu TB um ca. 30 % reduziert) (Tabelle 27). Nach der zehnten Überfahrt liegt diese Differenz sogar bei 45 %. Dennoch weisen alle Maschinenvarianten in den oberen beiden Horizonten instabilste Verhältnisse (Verhältnis von 0,1) auf. Nur in 60 cm Tiefe sind die Variante ohne Band und die Variante Moorband im *stabilen* Bereich. Beim Traktionsband schwanken die Werte zwischen *labil* und *stabil*. Die Überfahrungsversuche fanden bei einem Matrixpotential von –65 hPa bis –100 hPa statt.

Tabelle 27. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von Ponsse Buffalo, Ponsse Buffalo mit Moorband und Ponsse Buffalo mit Traktionsband differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (*instabil*: <0,8; *labil*: >0,8 und <1,2; *stabil*: >1,2) bei vorliegendem Matrixpotential (Ψ_M) am Versuchsstandort Göttingen.

Maschine	Tiefe cm	Ψ_M hPa	P_v kPa	σ_1 ----- kPa -----					P_v/σ_1				
				Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü10	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü10
Ponsse Buffalo	20	-65	35	505	302	363	394	434	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	40	-100	92	209	149	147	163	198	0,4	0,6	0,6	0,6	0,5
	60	-100	85	49	46	49	44	33	1,7	1,8	1,7	1,9	2,6
Ponsse Buffalo Moorband	20	-65	35	446	383	333	418	280	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	40	-100	92	176	174	138	150	131	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7
	60	-100	85	47	48	46	60	47	1,8	1,8	1,8	1,4	1,8
Ponsse Buffalo Traktionsband	20	-65	35	632	391	313	359	513	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	40	-100	92	176	115	151	158	148	0,5	0,8	0,6	0,6	0,6
	60	-100	85	76	68	76	76	57	1,1	1,3	1,1	1,1	1,5

3.1.5 Versuchsstandort Hasbruch

3.1.5.1 Bodencharakteristika und Maschinenparameter

Der Boden am Versuchsstandort Hasbruch wurde als (Norm-)Pseudogley aus Geschiebelehm angesprochen. Die Bodenart in allen drei Horizonten ist relativ homogen mit ca. 65 % Sand, 20 % Schluff und 15 % Ton und ist als *stark lehmiger Sand* klassifiziert (Tabelle 28). Der Oberboden ist als *stark sauer* und *mittel humos* einzustufen. Der pH-Wert steigt über die Tiefe bis zur Stufe *schwach sauer* an. Im Vergleich zum Unterboden lassen sich für den Oberboden deutliche Unterschiede in der Bodenstruktur erkennen. Bis auf P_v , welche Werte sich in allen drei Horizonten bei ca. 50 kPa befinden, liegen alle anderen bodenphysikalischen Parameter im Unterboden mindestens eine Klasse nach Definition auseinander (ρ_B : *gering* zu *hoch*; GPV: *hoch* zu *mittel*; LK: *mittel* zu *gering*; k_i : *mittel* zu *sehr gering*; k_f : *sehr hoch* zu *gering*).

Tabelle 28. Bodeneigenschaften des (Norm-)Pseudogleys aus Geschiebelehm am Versuchsstandort Hasbruch.

Tiefe	Horizont	Sand	Schluff	Ton	Textur	pH	C _{org}	ρ_B	GPV	wGP	eGP	MP	FP	P_v	k_i	k_f
cm	Symbol	----- Gew. % -----			Symbol	CaCl ₂	%	$g \cdot cm^{-3}$	----- -Vol.- % -----				kPa	$cm \cdot d^{-1}$		
20	Ah	66	20	14	Sl4	4,5	1,7	1,31	48	9	8	20	11	53	203	191
40	Sw1	65	19	16	Sl4	5,2	0,2	1,75	34	3	5	17	9	52	28	6
60	Sw2	60	23	17	Sl4	5,5	0,2	1,57	35	4	7	12	12	49	23	11

Für die moderne Radmaschine *Rottne F14* hat die Wägung ein Testgewicht von 25 Mg ergeben (Zuladung: 8 Mg). Die maximale Radlast wurde an der vierten Achse mit 3,9 Mg gemessen, was in einem Kontaktflächendruck von 89 kPa resultiert (Kontaktfläche: 0,43 m²). Nach drei Überfahrten wurden 30 cm Spurtiefe bestimmt. Die Auswertung der Daten der Spezialmaschine *EMB Elliator* ergibt einen Kontaktflächendruck von 22 kPa und eine Spurtiefe von 5 cm nach sieben Überfahrten. Bei gleicher Beladung wurde ein Testgewicht von 32 Mg bestimmt, was zu einer Rad- bzw. Kettenlast von 16 Mg führt. Die Kettenkontaktfläche ist ca. 7 m² groß (Tabelle 29).

Tabelle 29. Standortspezifische Maschineneigenschaften von *Rottne F14* und *EMB Elliator* am Versuchsstandort Hasbruch.

Maschine	Abkürzung	Testgewicht	Zuladung	Radlast	Kontaktfläche	Kontaktflächendruck	Spurtiefe
----------	-----------	-------------	----------	---------	---------------	---------------------	-----------

		Mg	Mg	Mg	m ²	kPa	cm
Rottne F14	F14	25	8	3,9*	0,43	89	30***
EMB Elliator	EMB	32	8	16**	7,00	22	3****

* 4. Achse; ** Kette; *** nach Ü3; **** nach Ü7

3.1.5.2 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter

Die Auswertung der bodenphysikalischen Parameter zeigt besonders im Oberboden eine deutlich ausgeprägte Veränderung der Werte für beide Maschinen. k_f unterliegt im Oberboden einer signifikanten Abnahme, wobei die Variante F14 außerdem signifikant unterschiedlich zur Variante EMB ist. Die Werte schwanken zwischen den Klassen *hoch* und *sehr gering*. k_l liefert keine statistisch relevanten Daten, obwohl in 20 cm eine abnehmende Tendenz für den *Rottne F14* zu erkennen ist und die Werte ebenfalls zwischen den Klassen *sehr hoch* und *gering* variieren.

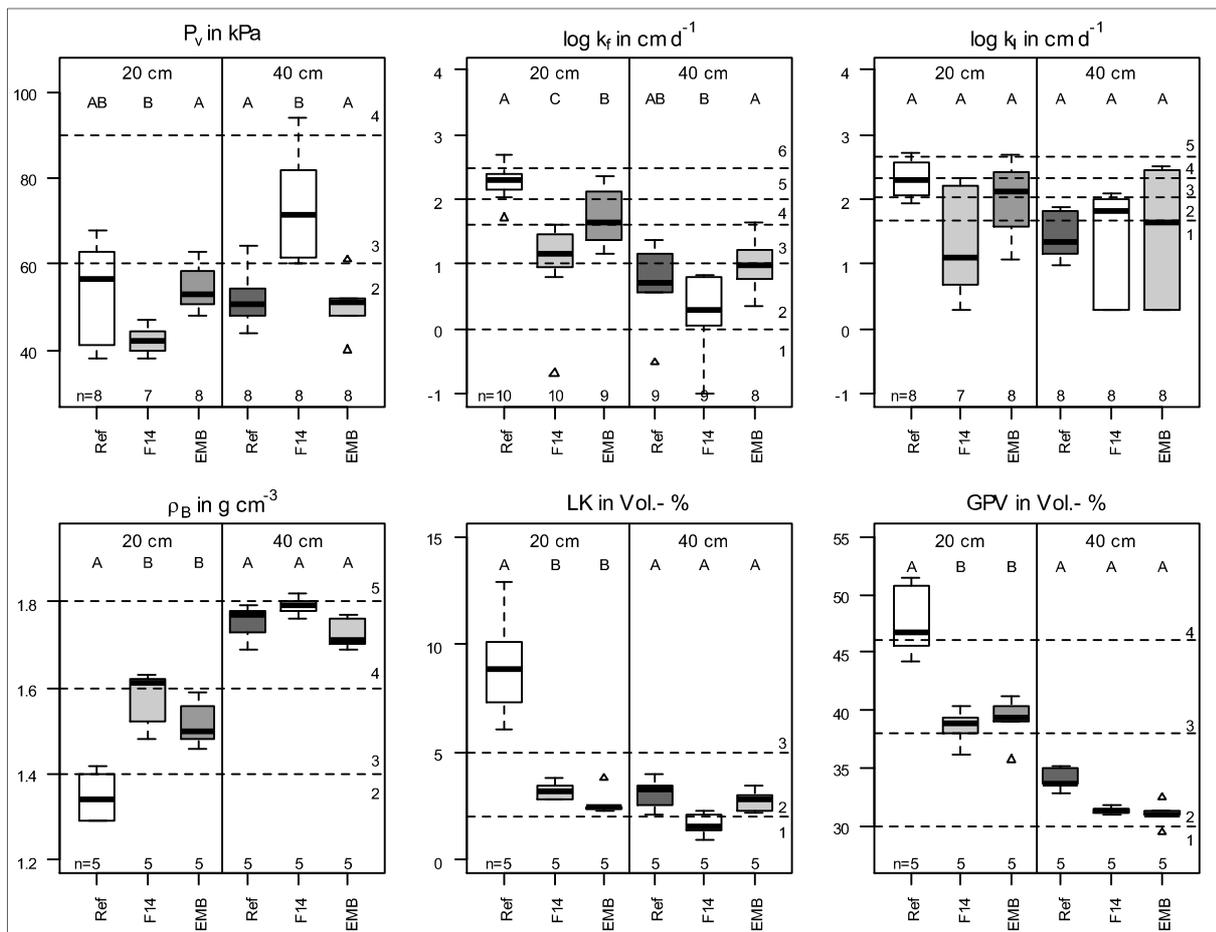


Abbildung 14. Auswirkungen der Überfahrungen mit Rottne F14 und EMB Elliator auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Hasbruch (Ref = Referenz; F14 = Rottne F14 [Ü1-Ü3]; EMB = EMB Elliator [Ü1-Ü7]).

Bei den Parametern ρ_B , LK und GPV zeigt sich im Ober- sowie im Unterboden ein ähnliches Verhalten dieser drei Parameter. In 20 cm beeinflussen beide Maschinen die Bodenstruktur signifikant, während sich in 40 cm Tiefe nur Tendenzen ableiten lassen. Die Variante F14 weist in beiden Horizonten überwiegend stärkere Abweichungen zur Referenz als die Variante EMB auf. Die Werte von ρ_B und GPV liegen in den Bereichen *hoch* bis *gering* und die Werte von LK in den Bereichen *mittel* bis *sehr gering*. Die P_v -Werte des *EMB Elliators* sind in beiden Horizonten nahezu identisch mit den Referenzwerten, wohingegen im Oberboden die Werte des *Rottne F14* deutlich abnehmen und in 40 cm Tiefe signifikant ansteigen. Bis auf diesen Wert (*mittel*) sind alle anderen Werte von P_v als *gering* zu klassifizieren.

3.1.5.3 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens

Die Ergebnisse der Spannungsmessungen zeigen für den *Rottne F14* eine ausgeprägte Abnahme zwischen erster und zweiter Überfahrt ($\ddot{U}1$: 315 kPa & $\ddot{U}2$: 218 kPa). Die Werte von σ_1 liegen nach einer weiteren Überfahrt auf dem Niveau der vorherigen (219 kPa). Beim *EMB Elliator* ist eine konstante Abnahme über alle sieben Überfahrten zu beobachten (Abbildung 15). Die Werte von σ_1 beim *Rottne F14* übersteigen P_v deutlich und führen zu einer Abnahme von P_v in 20 cm Bodentiefe. Beim *EMB Elliator* nähert sich σ_1 dem Wert von P_v über die Zeit an. Eine Erhöhung von P_v ist nach der siebten Überfahrt nicht zu erkennen.

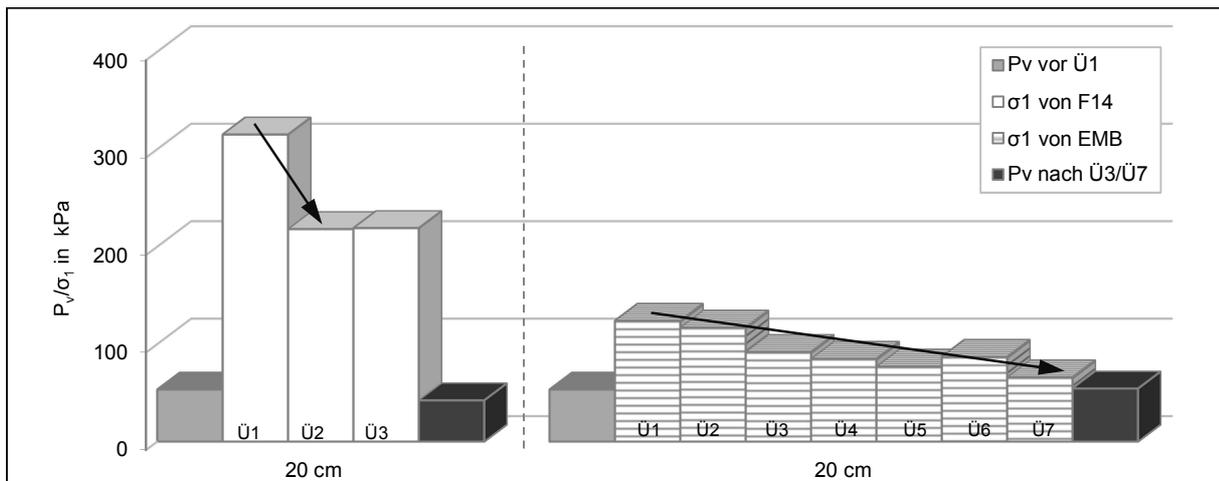


Abbildung 15. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der dritten bzw. siebten Überfahrt am Versuchsstandort Hasbruch (F14 = Rottne F14; EMB = EMB Elliator).

Obwohl die Spezialmaschine *EMB Elliator* die Spannungseinträge bei gleicher Beladung (8 Mg) reduzieren kann (bei erster Überfahrt um ca. 60 %), liegt auch dort der Stabilitätsindikator im instabilen Bereich (Tabelle 30). Lediglich bei der siebten Überfahrt zeigt der Indikator labile Bodenverhältnisse (Wert von 1) an. Die niedrigsten Werte erzielt der *Rottne F14* mit Werten von 0,2 (Ü1 – Ü3). Die Versuche fanden bei feuchten Bedingungen statt (Ψ_M : -30 hPa).

Tabelle 30. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von Rottne F14 und EMB Elliator differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: <0,8; labil: >0,8 und <1,2; stabil: >1,2) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Hasbruch.

Maschine	Tiefe cm	Ψ_M hPa	P_v kPa	σ_1 ----- kPa -----					P_v/σ_1				
				Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü7	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü7
Rottne F14	20	-30	53	315	218	219	-	-	0,2	0,2	0,2	-	-
EMB Elliator	20	-30	53	124	117	92	85	66	0,4	0,5	0,6	0,6	1,0

3.1.6 Versuchsstandort Lenglern

3.1.6.1 Bodeneigenschaften und Maschinencharakteristika

Eine (Norm-)Parabraunerde aus Löss ist am Versuchsstandort Lenglern dokumentiert worden. Der Al-Horizont weist in 20 cm und 40 cm eine sehr homogene Texturzusammensetzung auf (Tabelle 31). Der Schluffgehalt liegt bei 83 % bzw. 82 %. Bei einem Tonanteil von 13 % ergibt sich die Bodenart *mittel toniger Schluff*. Die für die Parabraunerde charakteristische Tonverlagerung in den Bt-Horizont drückt sich deutlich mit einer Zunahme des Tongehalts auf 23 % aus. Die Bodenart wechselt zu *stark tonigem Schluff*. Der pH-Wert liegt in 20 cm Tiefe im *sehr stark sauren* Bereich (pH-Wert von 3,7), steigt aber auf pH 5,8 in 60 cm an (*schwach sauer*).

Tabelle 31. Bodeneigenschaften der (Norm-)Parabraunerde aus Löss am Versuchsstandort Lenglern.

Tiefe	Horizont	Sand	Schluff	Ton	Textur	pH	C _{org}	ρ _B	GPV	wGP	eGP	MP	FP	P _v	k _i	k _f
cm	Symbol	----- Gew. % -----			Symbol	CaCl ₂	%	g · cm ⁻³	----- -Vol.- % -----				kPa	cm · d ⁻¹		
20	Ahl	4	83	13	Ut3	3,7	0,9	1,35	40	8	4	23	5	42	143	267
40	Al	5	82	13	Ut3	4,4	0,5	1,50	38	5	3	24	6	65	173	78
60	Bt	6	71	23	Ut4	5,8	0,3	1,56	39	2	2	22	13	66	65	4

Der Anteil an organischer Substanz im obersten Horizont beträgt noch 0,9 % und liegt im *schwach humosen* Bereich. Dort wurden *sehr hohe* Werte von k_f, *mittlere* von LK, k_i und GPV sowie *geringe* von P_v und ρ_B ermittelt. Außerdem nehmen die Werte von k_f, LK und GPV über die Tiefe ab, während P_v und ρ_B ansteigen.

Die getesteten Maschinen in Lenglern (*John Deere 6320*, *Hägglunds* und *Holzanhänger*) hatten ein Testgewicht zwischen 6,1 Mg und 6,6 Mg inklusive Zusatzgewicht (Tabelle 32). Auf Grund der Lastverteilung wurden die maximalen Radlasten bei den Kettenfahrzeugen an der zweiten Kette gemessen.

Tabelle 32. Spezielle Maschineneigenschaften von *John Deere 6320*, *Hägglunds Bv206* und des *Holzanhängers* am Versuchsstandort Lenglern.

Maschine	Abkürzung	Testgewicht	Radlast	Kontaktfläche	Kontaktflächendruck	Spurtiefe
		Mg	Mg	m ²	kPa	cm
John Deere 6320	JD6	6,5	1,9*	0,35	53	5
Hägglunds Bv206	HG	6,6	1,7*	1,05	16	2
Holzanhänger	SCH	6,1	3,1**	0,90	34	5

* 2. Kette; ** Kufe; *** nach Ü5

Durch die unterschiedlichen Kontaktflächen (zwischen 0,35 m² und 1,05 m²) ergeben sich mittlere Kontaktflächendrücke von 53 kPa für den *John Deere 6320*, 16 kPa für den *Hägglunds* und 34 kPa für den Holzanhänger (Schlitten). 2 cm Spurtiefe wurden für den *Hägglunds* und jeweils 5 cm für den *John Deere 6320* und den Holzanhänger nach fünfacher Überfahrt dokumentiert.

3.1.6.2 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter

In 20 cm können signifikante Veränderungen für den *John Deere 6320* bei allen Parametern, für den *Hägglunds* bei P_v und für den Holzanhänger bei P_v und LK beobachtet werden (Abbildung 16).

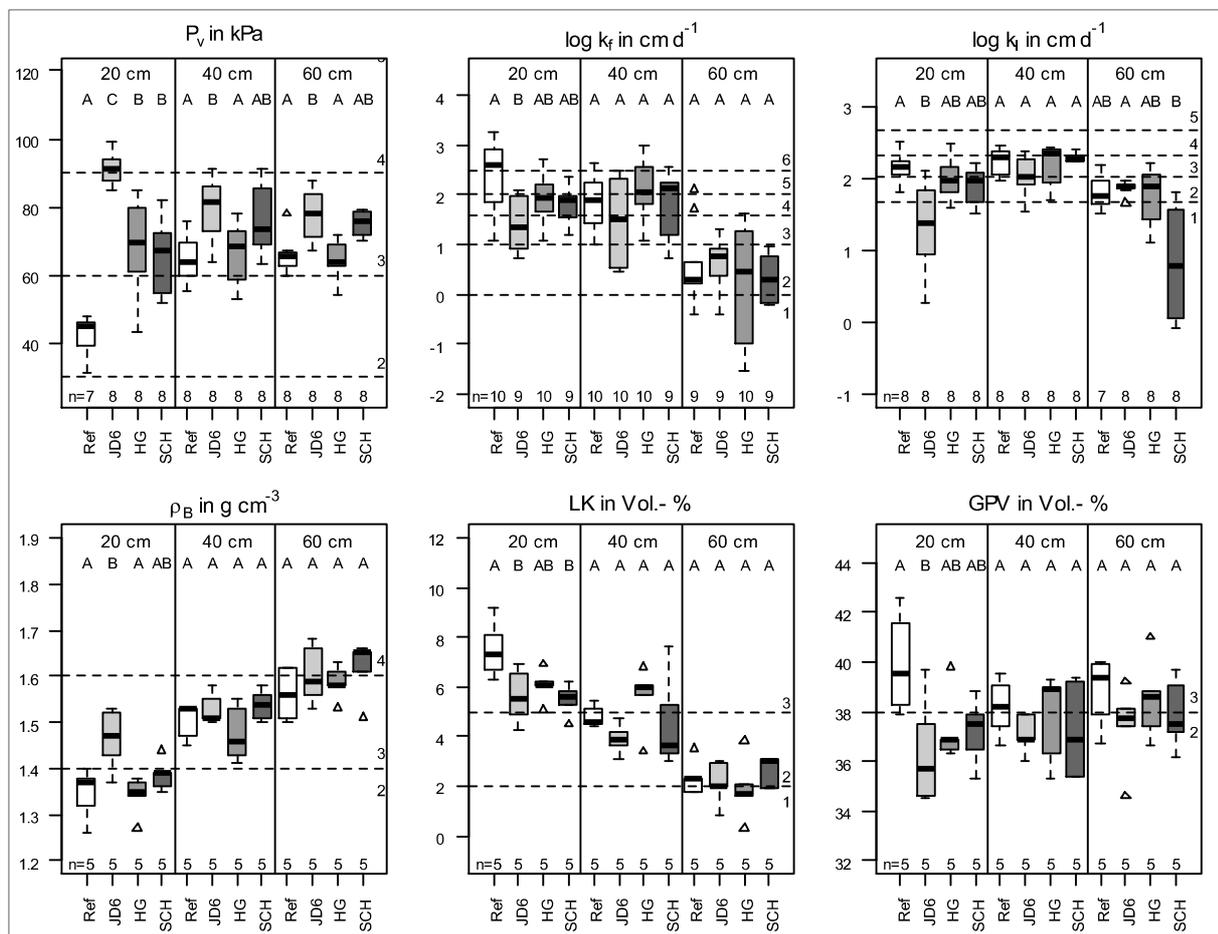


Abbildung 16. Auswirkungen der Überfahrten mit John Deere 6320, Hägglunds und Holzanhänger auf bodenphysikalische Parameter am Versuchsstandort Lenglern (Ref = Referenz; JD6 = John Deere 6320 [Ü1-Ü5]; HG = Hägglunds [Ü1-Ü5]; SCH = Holzanhänger [Ü1-Ü5]).

Der Wert von P_v nach Überfahrt mit dem *John Deere 6320* liegt außerdem auf einem anderen Signifikanzniveau als das der beiden anderen Belastungsvarianten. Außer für P_v sind im Unterboden keine weiteren signifikanten Unterschiede zu beobachten. Der Wert von P_v des *John Deere 6320* ist in beiden Tiefen signifikant erhöht. Es zeigt sich, dass der *Hägglands* die geringsten Abweichungen zur Referenz aufweist. Die Werte von ρ_B und P_v können mit den Klassen *gering* bis *hoch* und LK sowie GPV mit den Klassen *gering* bis *mittel* charakterisiert werden. Nur die Variante HG in 60 cm liegt bei LK an der Grenze zum *sehr geringen* Bereich. Die Leitfähigkeitswerte schwanken zwischen *extrem* bzw. *sehr hoch* und *gering* bzw. *sehr gering*.

3.1.6.3 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf die technische Befahrbarkeit des Bodens

Die Ergebnisse der Spannungsverteilung aus Abbildung 17 zeigen für den *John Deere 6320* eine Abnahme von σ_1 in allen gemessenen Tiefen. Zusätzlich lässt sich beobachten, dass P_v nach der fünften Überfahrt der Maschine im Vergleich zur unbelasteten Variante in allen Tiefen deutlich angestiegen sind (20 cm: von 42 kPa auf 91 kPa; 40 cm: von 65 kPa auf 80 kPa & 60 cm: von 66 kPa auf 78 kPa). Auffällig ist, dass auch eine Erhöhung von P_v im untersten Horizont stattfindet, obwohl die Werte von σ_1 kleiner sind als die Werte von P_v .

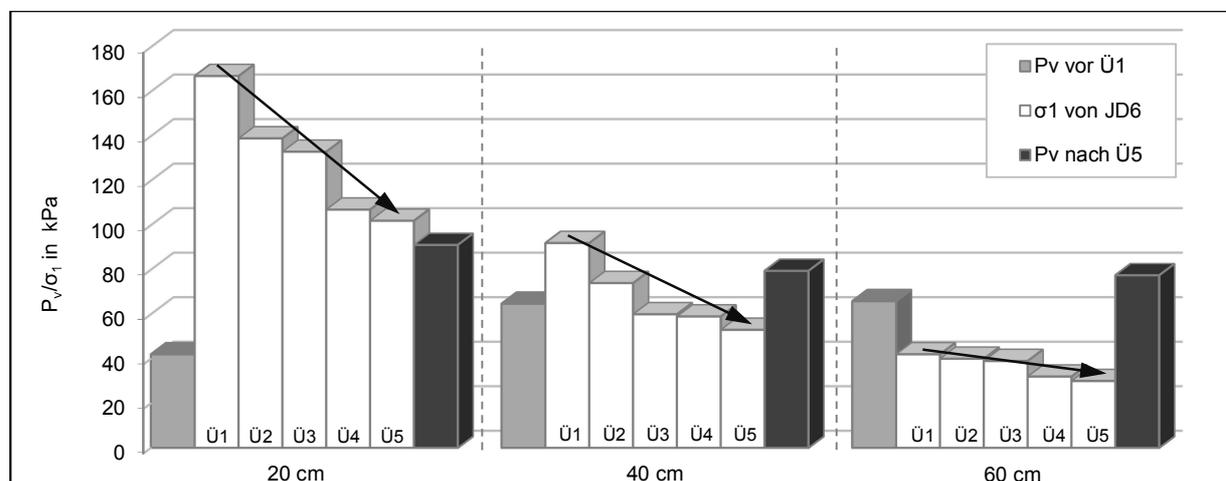


Abbildung 17. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität des *John Deere 6320* (JD6) im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Lengler.

Die maximalen Spannungseinträge wurden während der ersten Überfahrt in 20 cm Tiefe gemessen (167 kPa). In 40 cm Tiefe nehmen die Werte von 92 kPa auf 53 kPa und in 60 cm Bodentiefe von 42 kPa auf 30 kPa ab. Die Auswertung der Spannungseinträge des *Hägglunds* in Abbildung 18 lässt eine Abnahme von σ_1 von der ersten bis zur fünften Überfahrt in jeder Tiefe erkennen. Allerdings liegen die absoluten Werte auf einem deutlich niedrigeren Niveau. In 20 cm Tiefe wird ein Maximalwert von 37 kPa erzielt. In 60 cm liegen die gemessenen Werte bei nur ca. 10 kPa. Wegen dieser absolut niedrigen Werte übersteigen die Spannungseinträge zu keinem Zeitpunkt P_v . In 40 cm und 60 cm lassen sich daher auch keine Erhöhungen dieser Werte nach der fünften Überfahrt feststellen. Allerdings steigt P_v in 20 cm nach fünfmaliger Überfahung von 4 kPa auf 68 kPa an.

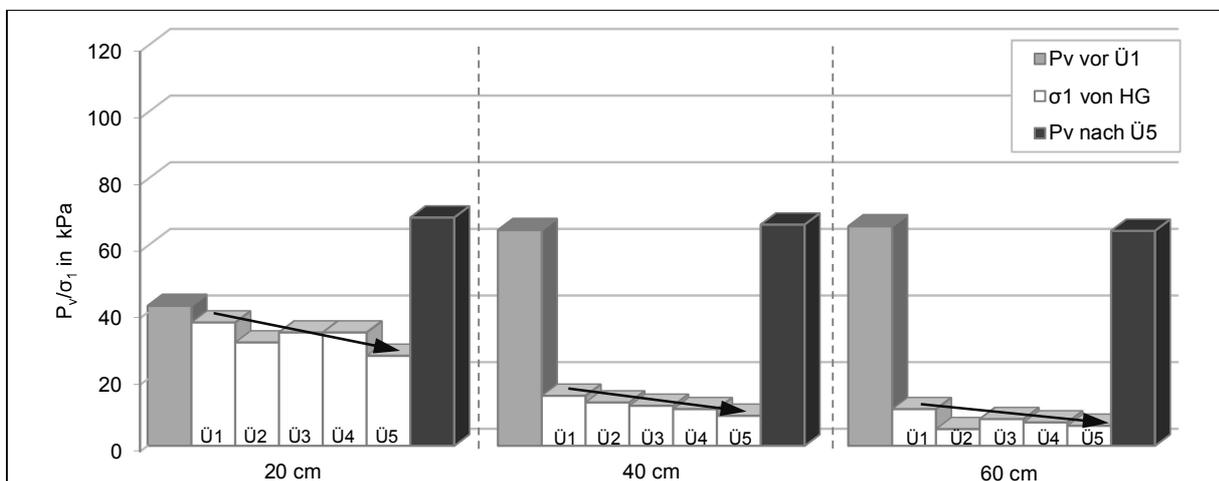


Abbildung 18. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungsintensität des Hägglunds (HG) im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Lenglern.

Sinkende Spannungseinträge bei erhöhter Befahrungsintensität lassen sich ebenfalls für die Variante Holzanhänger (SCH) in allen Tiefen feststellen (Abbildung 19). Der Maximalwert liegt bei 120 kPa während der ersten Überfahrt in 20 cm Tiefe und sinkt nach der fünften Überfahrt auf 84 kPa. In diesem und dem mittleren Horizont übersteigen die Werte von σ_1 die Werte von P_v und führen folglich zu Erhöhung dieser nach fünfmaliger Überfahrt (20 cm: 42 kPa zu 65 kPa & 40 cm: 65 kPa zu 76 kPa). Eine Erhöhung von P_v ist auch in 60 cm Bodentiefe zu beobachten. Dort steigt der Wert von 66 kPa auf 75 kPa, obwohl die Werte von σ_1 von 36 kPa auf 21 kPa sinken.

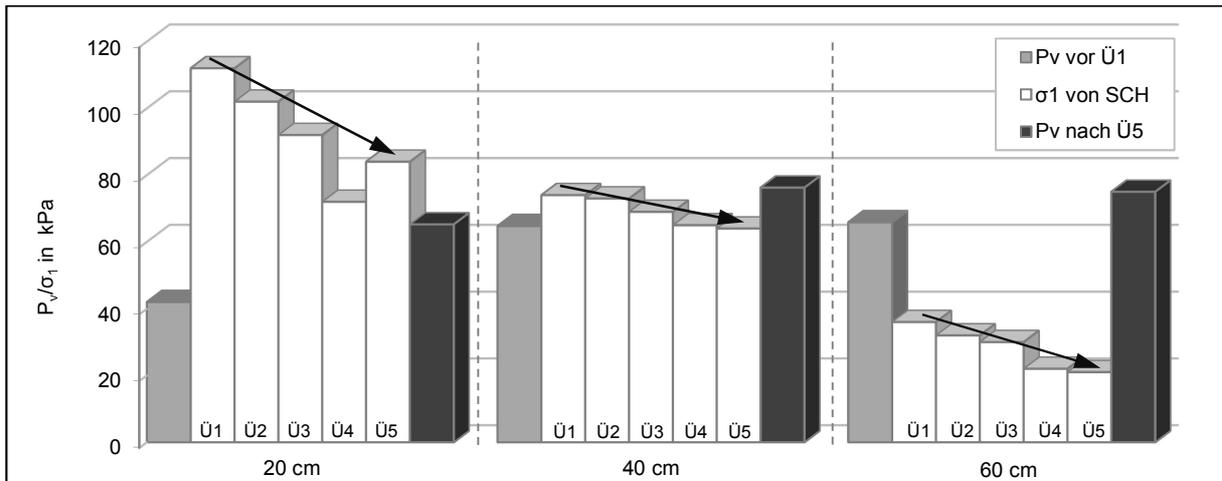


Abbildung 19. Entwicklung der Spannungseinträge mit zunehmender Befahrungintensität des Holzanhängers (SCH) im Vergleich zur Eigenstabilität des Bodens vor der ersten und nach der fünften Überfahrt am Versuchsstandort Lenglern.

Auch die erste Überfahrt des *John Deere 6320* in 40 cm Bodentiefe wird als instabil eingestuft. Die folgenden Überfahrten in dieser Tiefe, ausgenommen die vierte, sowie die Werte des Holzanhängers in 40 cm liegen im *labilen* Stabilitätsbereich. Zu diesem Bereich kann außerdem die erste Überfahrt des *Hägglunds* in 20 cm hinzugefügt werden. Alle anderen Messungen des *Hägglunds* zeigen *stabile* Verhältnisse an. Zu diesem Klassifikationsbereich gehören außerdem die Werte des *John Deere 6320* und des Holzanhängers in 60 cm Bodentiefe.

Tabelle 33. Vorbelastungswerte der Referenz (P_v), Spannungseinträge (σ_1) von *John Deere 6320*, *Hägglunds* und Holzanhängers differenziert nach Überfahrten sowie das Verhältnis beider Parameter als Stabilitätsindikator (instabil: $<0,8$; labil: $>0,8$ und $<1,2$; stabil: $>1,2$) bei vorliegendem Matrixpotenzial (Ψ_M) am Versuchsstandort Lenglern.

Maschine	Tiefe cm	Ψ_M hPa	P_v kPa	σ_1 ----- kPa -----					P_v/σ_1				
				Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5
John Deere 6320	20	-200	42	167	139	133	107	102	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
	40	-130	65	92	74	60	59	53	0,7	0,9	1,1	1,4	1,2
	60	-90	66	42	40	39	32	30	1,6	1,6	1,7	2,1	2,2
Hägglunds	20	-200	42	37	31	34	34	27	1,1	1,4	1,2	1,2	1,6
	40	-130	65	15	13	12	11	9	4,3	5,0	5,4	5,9	7,2
	60	-90	66	11	5	8	7	6	6,0	13	8,2	9,4	11
Holzanhängers	20	-200	42	112	102	92	72	84	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5
	40	-130	65	74	73	69	65	64	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
	60	-90	66	36	32	30	22	21	1,8	2,1	2,2	3,0	3,1

3.1.7 Versuchsstandort Wiedelah

3.1.7.1 Bodencharakteristika

Der tiefhumose Versuchsstandort Wülperode wird als Vega, entstanden aus Auensedimenten definiert. Bei relativ konstanten Tongehalten (20 % – 23 %) schwanken die Schluffgehalte zwischen 38 % (20 cm) und 51 % (60 cm). Daraus resultieren die Bodenarten *mittel sandiger Lehm* (20 cm), *schwach sandiger Lehm* (40 cm) und *schluffiger Lehm* (60 cm). Der pH-Wert liegt konstant bei 6,7 im *sehr schwach sauren* Bereich. Der für den Bodentyp charakteristisch hohe Gehalt an organischer Substanz liegt auch in 40 cm Tiefe noch bei 2,0 %. Daraus ergibt sich für diesen Horizont sowie dem Oberboden die Humusklasse *stark humos*. Die P_v -Werte aller untersuchten Horizonte liegen im *geringen*, die Werte von ρ_B (20 cm: gering), GPV und LK (60 cm: gering) im *mittleren*, k_i im *hohen* bis *sehr hohen* und k_f im *extrem hohen* Bereich (Tabelle 34).

Tabelle 34. Bodeneigenschaften der Vega aus Auensedimenten am Versuchsstandort Wiedelah.

Tiefe	Horizont	Sand	Schluff	Ton	Textur	pH	C_{org}	ρ_B	GPV	wGP	eGP	MP	FP	P_v	k_i	k_f
cm	Symbol	----- Gew. % -----			Symbol	CaCl ₂	%	$g \cdot cm^{-3}$	-----Vol.- %-----					kPa	$cm \cdot d^{-1}$	
20	aAh	42	38	20	Ls3	6,7	2,3	1,35	43	8	2	17	16	39	705	1136
40	aM	34	46	20	Ls2	6,7	2,0	1,43	43	6	2	17	17	54	399	611
60	aGo-M	26	51	23	Lu	6,7	1,0	1,48	41	4	1	18	18	47	433	464

3.1.7.2 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter

Die bodenphysikalischen Daten zeigen signifikante Veränderungen bei allen Parameter für mindestens eine der beiden belasteten Varianten im Vergleich zur Referenz in 20 cm und 40 cm Bodentiefe (Abbildung 20). Zusätzlich ist dieser statistische Einfluss auch bei den Leitfähigkeitsparametern in 60 cm Tiefe zu finden. Bei k_i ist eine signifikante Abnahme an beiden Varianten als Konsequenz der Überfahrt zu beobachten, wohingegen bei k_f lediglich die Variante KUP statistisch unterschiedlich ist. In beiden Fällen zeigt diese Variante auch tendenziell die niedrigeren Werte. Im Oberboden lässt sich für die Parameter P_v , k_i und LK ein signifikanter Einfluss für beide Varianten auf gleichem Niveau beobachten, wohingegen ein statistisch relevanter Einfluss bei den anderen drei Parametern (k_i , ρ_B & GPV) ausschließlich für die Variante WI zu verzeichnen ist. Ein Vergleich der Varianten WI und KUP zeigt in fünf von sechs Fällen einen größeren Einfluss der Überfahrt mit dem Häcksler *New Holland FR 9060* bei der Variante WI. In 40 cm Tiefe lässt sich keine eindeutige Tendenz bezüglich des Einflusses auf die Parameter feststellen.

In zwei Fällen (ρ_B & LK) sind beide Varianten signifikant schlechter als die Referenz, in zwei Fällen (k_f & k_j) nur die Variante KUP und in zwei weiteren Fällen (P_v & GPV) nur die Variante WI. Die Werte von GPV liegen trotz unterschiedlicher Signifikanzniveaus der unbelasteten und der belasteten Varianten in der Klasse *mittel*, wohingegen P_v , ρ_B und LK zwischen *gering* und *mittel* (P_v & LK) sowie zwischen *mittel* und *hoch* (ρ_B) schwanken. Ausschließlich die Leitfähigkeitswerte variieren von *extrem hoch* bzw. *sehr hoch* bis zu *gering*.

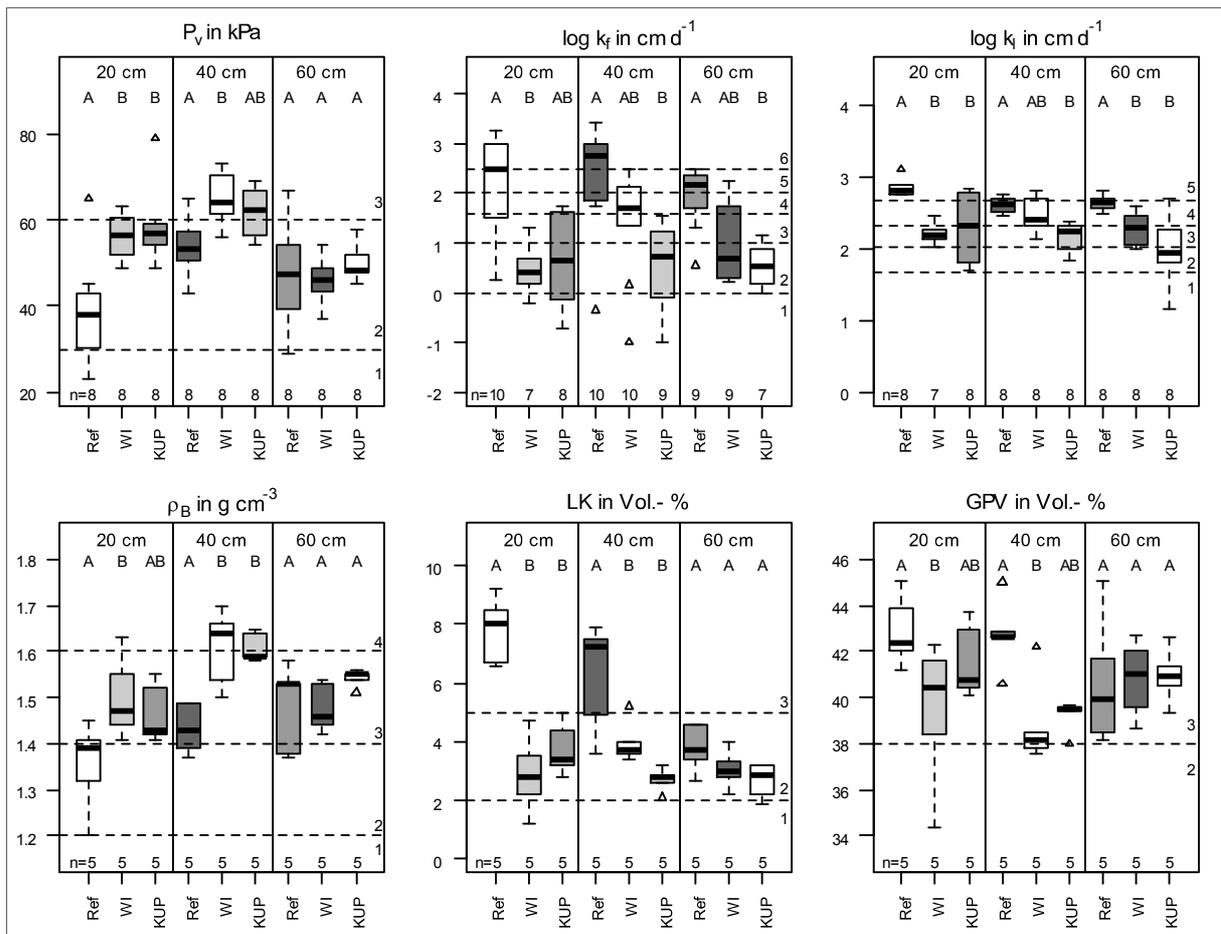


Abbildung 20. Auswirkungen der Überfahrungen mit Häcksler New Holland FR 9600 auf zwei unterschiedlich genutzte Produktionsflächen hinsichtlich bodenphysikalischer Parameter in Wiedelah (Ref = Referenz; WI = Wiese; KUP = Kurzumtriebsplantage).

3.1.8 Versuchsstandort Wülperode

3.1.8.1 Bodencharakteristika

Als Auengley wurde der Bodentyp am Standort Wiedelah als Folge der Auendynamik der angrenzenden Oker klassifiziert. Die Kenngrößen der einzelnen Parameter sind in Tabelle 34 dargestellt. Während in 40 cm deutlich oxidierende Hydromorphiemerkmale charakteristisch für den aGo-Horizont waren, ließen sich im aGr-Horizont ausschließlich reduzierende Merkmale feststellen. Über die Tiefe ist eine Abnahme des Tonanteils von 46 % auf 34 % zu beobachten, so dass sich die Bodenart von *schwach schluffigem Ton* über *mittel tonigem Lehm* zu *schwach tonigem Lehm* ändert. Der pH-Wert des Bodens kann in allen Tiefen als *sehr schwach sauer* definiert werden. Die organische Substanz hat im Oberboden einen Anteil von 1,4 %, was der Humusklasse *mittel* entspricht. Die Werte von GPV, ρ_B , und LK in 20 cm und 40 cm liegen im *mittleren* Klassifikationsbereich und P_v sowie LK in 60 cm im Bereich *gering*. Die Werte von k_i können als *gering* bis *mittel* eingestuft werden. Im Oberboden wurde k_f als *mittel*, in 40 cm als *extrem hoch* und in 60 cm als *sehr gering* klassifiziert (Tabelle 35).

Tabelle 35. Bodeneigenschaften des Auengleys aus Auensedimenten am Versuchsstandort Wülperode.

Tiefe	Horizont	Sand	Schluff	Ton	Textur	pH	C _{org}	ρ_B	GPV	wGP	eGP	MP	FP	P_v	k_i	k_f
cm	Symbol	----- Gew. % -----			Symbol	CaCl ₂	%	$g \cdot cm^{-3}$	-----Vol.- % -----					kPa	$cm \cdot d^{-1}$	
20	aAp	11	43	46	Tu2	6,5	1,4	1,55	45	5	3	14	23	52	167	37
40	aGo	12	49	40	Lt3	6,3	0,7	1,52	44	5	1	17	21	57	98	604
60	aGr	22	44	34	Lt2	6,8	0,4	1,50	43	3	2	15	23	56	140	1

3.1.8.2 Auswirkungen der dynamischen Belastung auf bodenphysikalische Parameter

Die Auswertung der bodenphysikalischen Daten am Versuchsstandort *Wülperode* zeigt einen deutlichen Einfluss der beiden Belastungsvarianten im Oberboden (Abbildung 21). Die Variante KUP zeigt einen signifikanten Einfluss bei allen sechs untersuchten Parametern und weist zusätzlich bei LK und GPV ein weiteres Signifikanzniveau zur Variante WI auf. In 40 cm Tiefe ändert sich das Beobachtete leicht. Bei P_v ist zwar eine tendenzielle Veränderung für beide Varianten zu erkennen, diese ist jedoch nicht statistisch abgesichert. Die Werte von P_v können in die Bereiche *gering* bis *mittel* eingestuft werden. Für die Parameter k_f (Klassifikationsbereich: *sehr hoch* bis *gering*) und ρ_B (Klassifikationsbereich: *mittel* bis *hoch*) zeigen wiederum beide Belastungsvarianten statistisch belegbare Unterschiede auf.

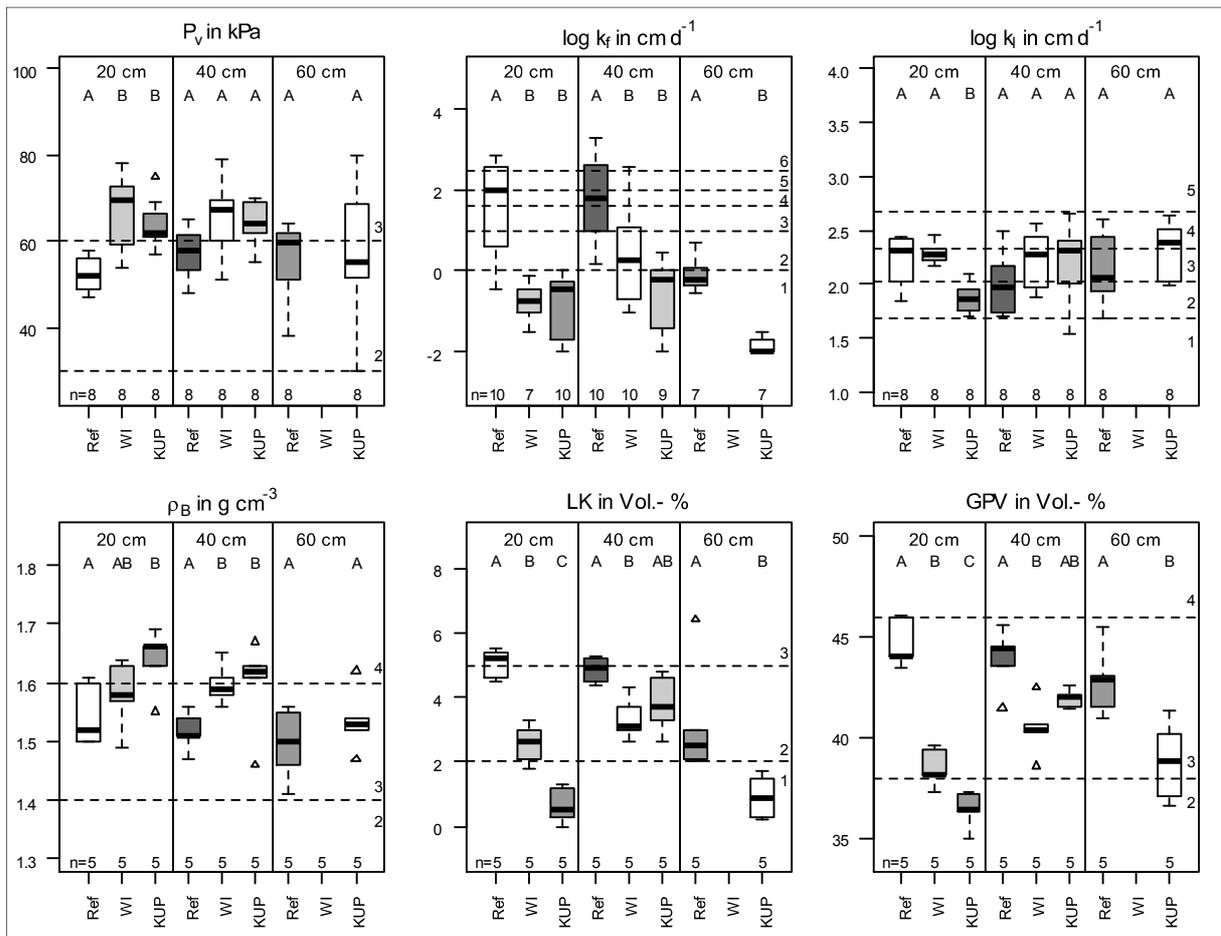


Abbildung 21. Auswirkungen der Überfahrungen mit Häckslers New Holland FR 9600 auf zwei unterschiedlich genutzte Produktionsflächen hinsichtlich bodenphysikalischer Parameter in Wülperode (Ref = Referenz; WI = Wiese; KUP = Kurzumtriebsplantage).

Für die Kapazitätsparameter LK (Klassifikationsbereich: *sehr gering* bis *mittel*) und GPV (Klassifikationsbereich: *gering* bis *mittel*) ist jedoch nur für die Variante WI ein signifikanter Einfluss zu beobachten. Aber auch die Werte der Variante KUP zeigen zumindest eine tendenzielle Veränderung. In 60 cm Bodentiefe wurde nur die Variante KUP betrachtet (s. Kapitel 2.3.1.5). Diese Variante zeigt eine signifikante Veränderung für die Parameter k_f , LK und GPV.

3.2 Zusammenfassende Betrachtung der Einzelergebnisse

3.2.1 Einfluss eines modernen Holzerntezyklus auf die Bodenstruktur

3.2.1.1 Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter

In den folgenden Abbildungen werden signifikante und tendenzielle Veränderungen, welche auf eine Verdichtung schließen lassen, berücksichtigt. Die Auswertung der Daten für den Versuchsstandort Reinshof in Abbildung 22 zeigt für alle drei getesteten Varianten, eine einfache Überfahrt mit *John Deere 1270e* (JD) bzw. mit *Ponsse Buffalo* (PB) sowie der Kombination aus *John Deere 1270e* und *Ponsse Buffalo* negative Veränderungen der Bodenstruktur bei allen Parametern (6/6) im Oberboden im Vergleich zur Referenz. Im Unterboden nimmt der Einfluss für die Einzelvarianten deutlich ab und der Anteil an veränderten Parametern liegt zwischen eins von sechs und drei von sechs. Die Mehrfach-Überfahrung zeigt in den untersten beiden Horizonten weiter große Veränderungen für die bodenphysikalischen Parameter (4/6 bis 5/6) auf.

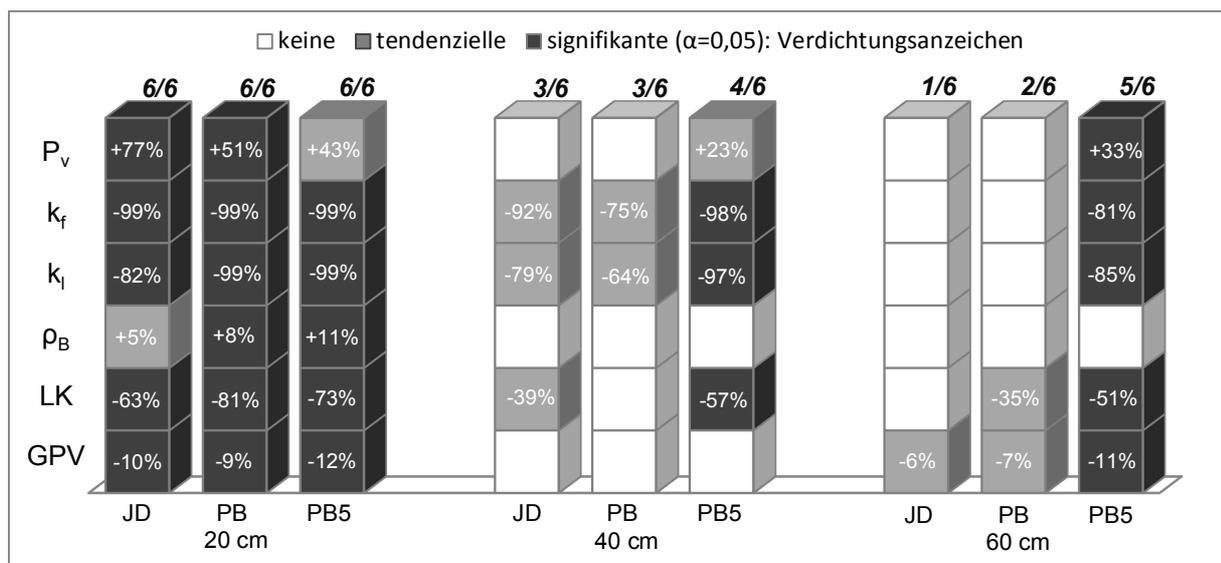


Abbildung 22. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Reinshof (JD = John Deere 1270e [1x]; PB = Ponsse Buffalo [1x]; PB5 = Kombination aus JD [1x] und PB [4x]).

Der starke Einfluss auf die Struktur des Oberbodens kann auch an den Standorten Vaake und Silberborn bestätigt werden (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24). Dort liegt der Anteil negativ veränderter Parameter zwischen vier von sechs und sechs von sechs. An diesen Standorten lässt sich für den Oberboden außerdem beobachten, dass die größten Abweichungen zur Referenz, in acht von neun Fällen, jeweils bei der kombinierten Variante zu beobachten sind. Übereinstimmend mit den Ergebnissen zum Versuchsstandort Reinshof sind außerdem die besonders starken Auswirkungen der Mehrfach-Überfahrt im Unterboden. Auch an diesen beiden Standorten liegt der Einfluss der veränderten Parameter zwischen vier von sechs und fünf von sechs und weist so horizontspezifisch jeweils den maximalen Einfluss auf. Eine weitere Erkenntnis aus den Versuchsstandorten Vaake und Silberborn für die Einzel-Überfahrt ist, dass in allen Unterbodenhorizonten jeweils die größeren Auswirkungen für die schwerere Maschine *Ponsse Buffalo* zu verzeichnen ist. In Vaake liegt der Unterschied der beeinflussten Parameter zwischen zwei von sechs und drei von sechs (40 cm) bzw. einer von sechs und zwei von sechs (60 cm) und in Silberborn zwischen zwei von sechs und vier von sechs (40 cm) bzw. einer von sechs und zwei von sechs (60 cm).

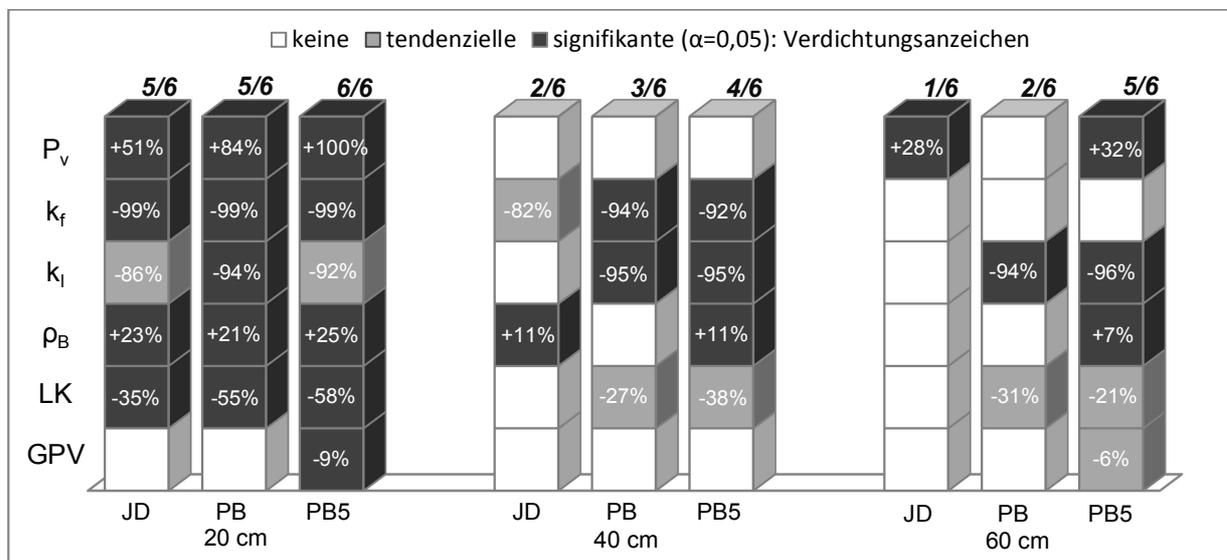


Abbildung 23. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Vaake (JD = John Deere 1270e [1x]; PB = Ponsse Buffalo [1x]; PB5 = Kombination aus JD [1x] und PB [4x]).

Am Versuchsstandort Silberborn lässt sich außerdem anschaulich der abnehmende Einfluss der verschiedenen Belastungsvarianten über die Tiefe beobachten. Der Anteil negativ beeinflusster Parameter sinkt beim *John Deere 1270e* von fünf von sechs über zwei von sechs auf einer von sechs, beim *Ponsse Buffalo* von fünf von sechs über vier von sechs auf zwei von sechs und bei der Kombination von fünf von sechs auf vier von sechs.

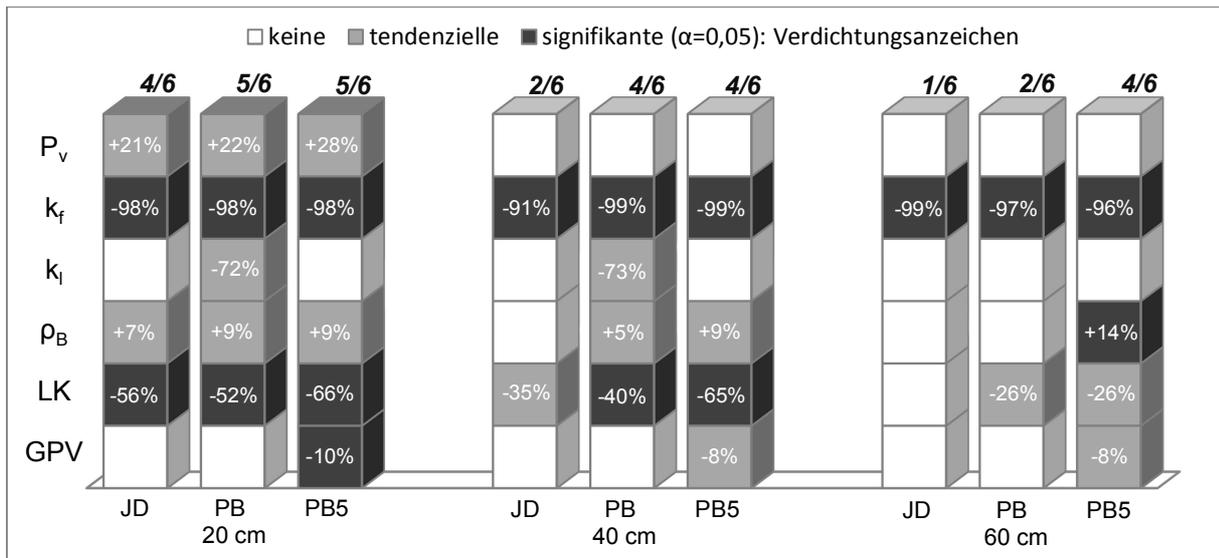


Abbildung 24. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Silberborn (JD = John Deere 1270e [1x]; PB = Ponsse Buffalo [1x]; PB5 = Kombination aus JD [1x] und PB [4x]).

3.2.1.2 Spannungsverteilung der getesteten Maschinen

Die Ergebnisse der Spannungsverteilung aus Abbildung 25 zeigen, dass im Oberboden aller drei Standorte eine Erhöhung der Spannungseinträge von der ersten Überfahrt mit dem *John Deere 1270e* zur ersten Überfahrt mit dem *Ponsse Buffalo* zu beobachten ist. Die Spannungseinträge steigen in Reinshof um 36 %, in Vaake um 52 % und in Silberborn um 67 %. Außerdem ist ein Anstieg um 46 % auch in 40 cm am Standort Vaake dokumentiert worden. Der Verlauf eines typischen Arbeitseinsatzes (Ü1: Harvester, Ü2 bis Ü5: Forwarder) veranschaulicht für die Standorte Reinshof und Vaake eine signifikante Abnahme von σ_1 von 35 % bzw. 27 % in 20 cm Tiefe zwischen erster Überfahrt mit dem Harvester und zweiter bis fünfter Überfahrt mit dem Forwarder. Selbst in 40 cm Tiefe ist noch eine Abnahme an den beiden Versuchsstandorten zu erkennen. In Reinshof liegt die Abnahme bei 31 % und in Vaake bei 37 % (signifikant). Am Versuchsstandort Silberborn ist hingegen eine Zunahme der Spannungseinträge nach erstmaliger Überfahrt zu beobachten. Die Spannungseinträge steigen in 20 cm um 116 % und in 40 cm um 57 %. Allerdings lassen sich auf Grund der geringen Wiederholungsanzahl keine Aussagen zur Signifikanz treffen. Der unterste Bodenhorizont zeigt für alle drei Standorte nur geringe Spannungseinträge und somit auch nur geringfügige Differenzen der verschiedenen Maschinenvarianten an.

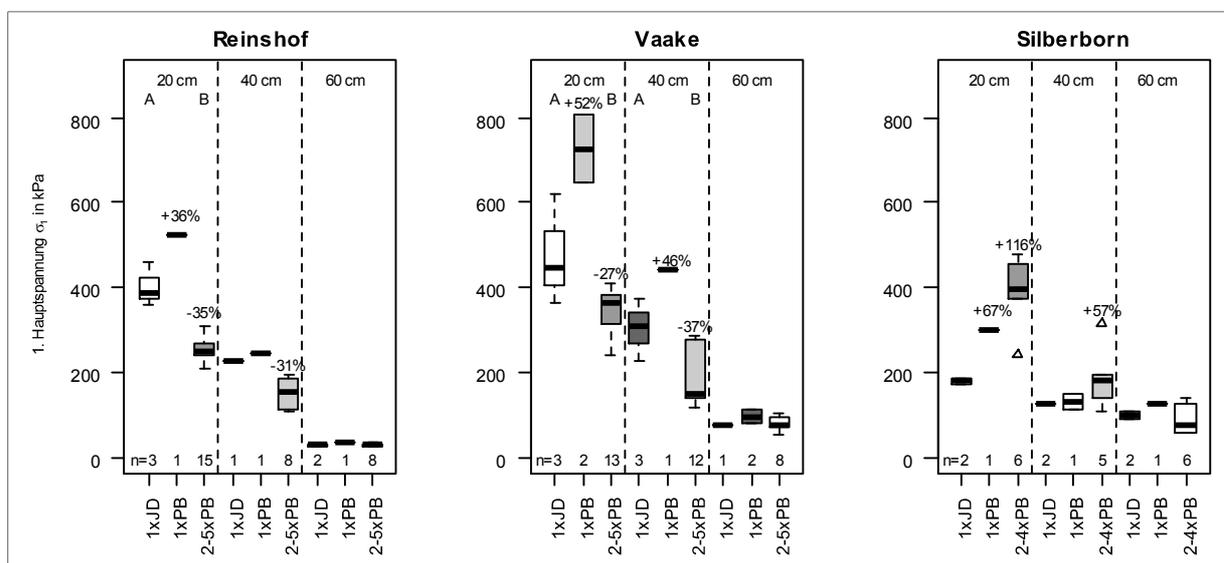


Abbildung 25. Darstellung der dynamischen Spannungseinträge (σ_1) während eines Holzerntezyklus für die Versuchsstandorte Reinshof, Vaake und Silberborn (1xJD = 1. Überfahrt John Deere 1270e; 1xPB = 1. Überfahrt Ponsse Buffalo; 5xPB = 2. – (4.) 5. Überfahrt Ponsse Buffalo).

3.2.2 Technische Möglichkeiten zur Spannungsreduktion

3.2.2.1 Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen auf die Bodenstruktur

Die Ergebnisse aus Göttingen in Abbildung 26 zeigen abermals die qualitativen Auswirkungen der Maschinen auf die Struktur des Oberbodens. Vier der sechs Parameter sind mindestens signifikant (max. 6/6) verändert zur Referenz. Auch in den folgenden beiden Bodenhorizonten sind deutliche Einflüsse dokumentiert worden (bis 3/6). Auffällig ist der erhöhte Wert von P_v der Variante MB im Oberboden. Eindeutige Tendenzen zum Auswirkungsgrad liefern die Ergebnisse nicht. Viel mehr zeigen sie eine Heterogenität der Datenstruktur, da jede Variante horizontspezifisch sowohl den höchsten als auch den geringsten Einfluss aufweist.

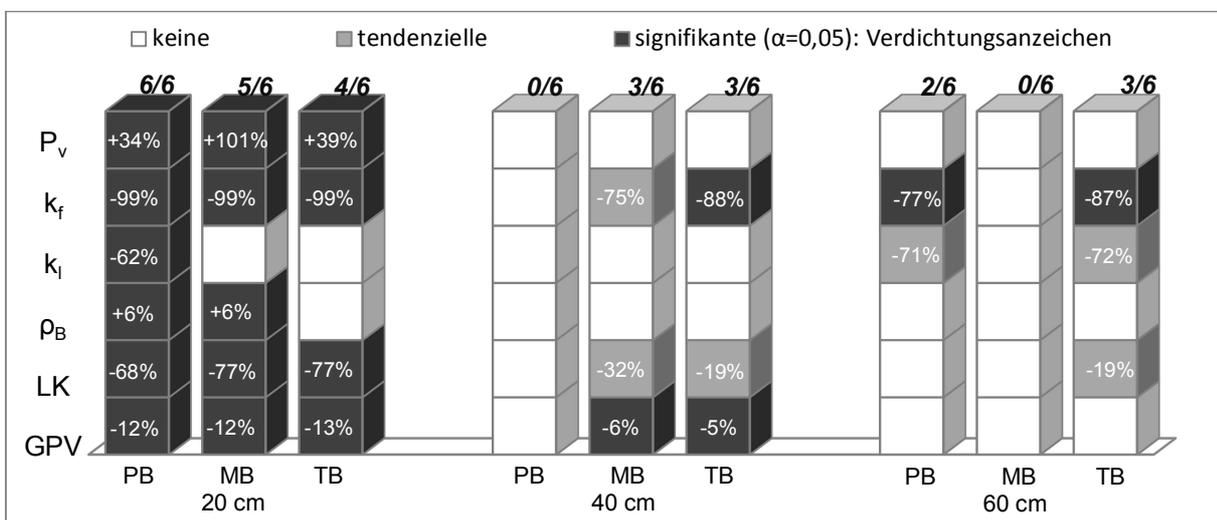


Abbildung 26. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Göttingen (PB = Ponsse Buffalo [10x]; MB = PB mit Moorband [10x]; TB = PB mit Traktionsband [10x]).

Die Auswertung der tendenziellen und signifikanten Veränderung der Bodenstruktur, zeigen für den Standort *Hasbruch* signifikante Einflüsse im Ober- und Unterboden (Abbildung 27). Der Gesamteinfluss des *Rottne F14* beträgt im Oberboden 100 % (6/6) und der des *EMB Elliators* liegt bei vier von sechs Parametern. Bei drei von vier gemeinsam veränderten Parametern (k_f , ρ_B , LK & GPV) weist der *Rottne F14* die größeren Auswirkungen auf. Auffällig ist die signifikante Abnahme von P_v der Variante F14. Im Unterboden beeinflusst der *EMB Elliator* nur noch GPV tendenziell. Die Ergebnisse für den F14 zeigen hingegen eine Veränderung für die Parameter P_v , LK und GPV, womit der beeinflusste Anteil drei von sechs beträgt.

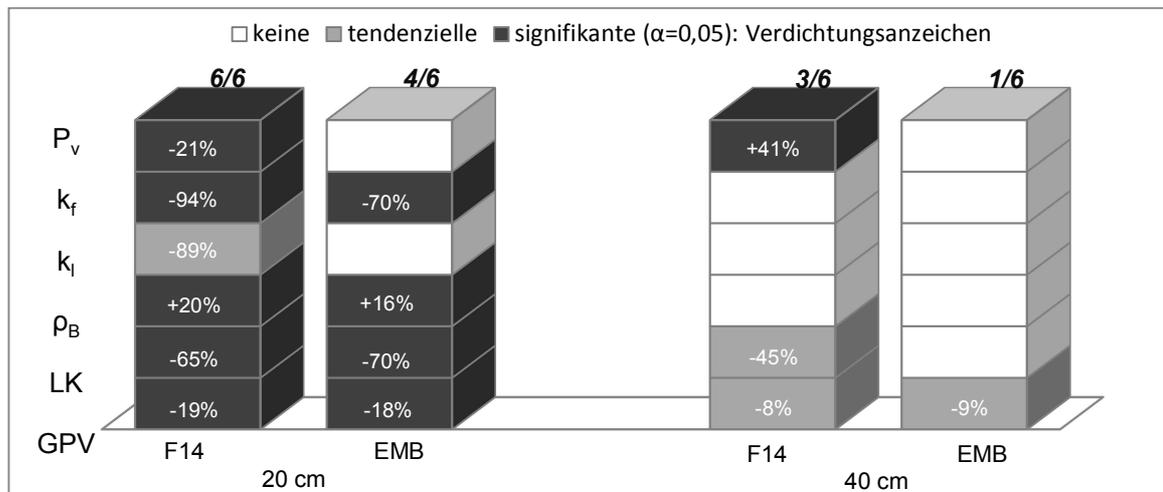


Abbildung 27. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Hasbruch (F14 = Rottne F14 [3x]; EMB = EMB Elliator [7x]).

Am Versuchsstandort *Lenglern* sind die Auswirkungen des Traktors *John Deere 6230* mit sechs von sechs Parametern im Oberboden deutlich am stärksten, gefolgt vom Holzanhänger (4/6) und der Spezialmaschine *Hägglunds* (2/6). Bis auf den Parameter LK zeigt der *John Deere 6230* auch die größten Veränderungen innerhalb der Parameter im Vergleich zur Referenz. So beträgt beispielsweise die Zunahme von P_v ca. 120 % und die Abnahme von k_f ca. 90 %.

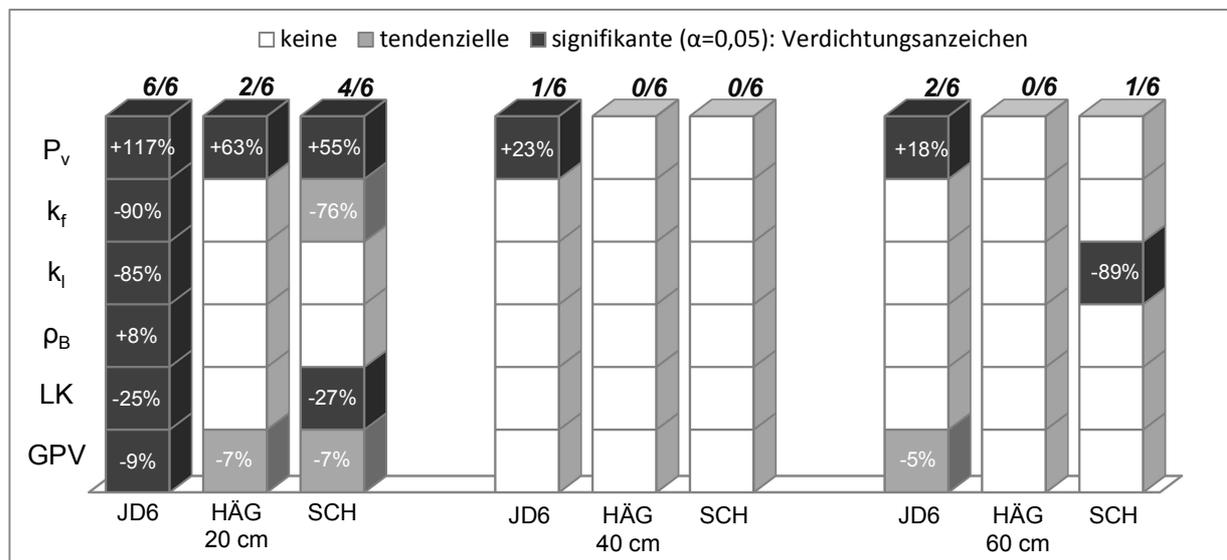


Abbildung 28. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsvarianten am Versuchsstandort Lenglern (JD6 = John Deere 6230 [5x]; HÄG = Hägglunds [5x]; SCH = Holzanhänger [5x]).

3.2.2.2 Spannungsverteilung der getesteten Maschinen

Der Vergleich der beiden Bogiebänder mit der einfachen Maschinenvariante am Standort Göttingen zeigt Werte von σ_1 über die Tiefe (vgl. Abbildung 29). Statistische Unterschiede lassen sich nur im Oberboden erkennen. Dort sind die mittleren Werte von σ_1 bei der Variante MB signifikant um 13 % reduziert. Alle anderen Ergebnisse sind horizontspezifisch auf einem ähnlichen Niveau und können nicht weiter differenziert werden. Die Ergebnisse des *EMB Elliator* am Versuchsstandort Hasbruch veranschaulichen die potenziellen Vorteile dieser Maschine. Die Werte von σ_1 sind im Vergleich zum *Rottne F14* signifikant um 64 % reduziert. Auch am Standort Lenglern lässt sich eine statistisch beweisbare Reduktion von Spannungseinträgen feststellen. Im Oberboden weisen alle drei Maschinenvarianten unterschiedliche Signifikanzniveaus auf. Die Werte des *Hägglunds* liegen im Vergleich zum Traktor *John Deere 6320* um 74 % niedriger auf einem anderen statistischen Niveau. Auch die Werte des Holzanhängers (SCH) sind im Vergleich zum Traktor um 31 % reduziert und liegen auf einem weiteren Signifikanzniveau zwischen Traktor und *Hägglunds*. Im Unterboden zeigen Traktor und Holzanhänger ähnlich hohe Spannungseinträge und unterscheiden sich statisch nicht weiter. Der *Hägglunds* hingegen schafft es die Werte von σ_1 in 40 cm um 80 % und in 60 cm um 82 % signifikant zu reduzieren.

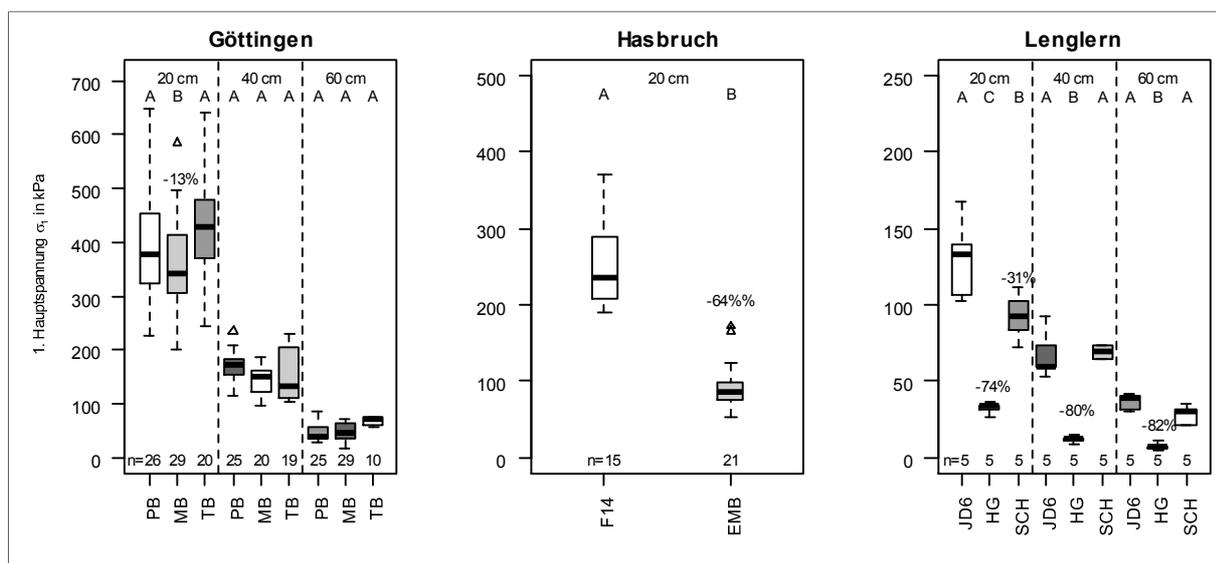


Abbildung 29. Darstellung der dynamischen Spannungseinträge (σ_1) der verschiedenen technischen Möglichkeiten zur Spannungsreduktion an den Versuchsstandorten Göttingen, Hasbruch und Lenglern (PB = 1.-10. Überfahrt Ponsse Bufallo; MB = 1.-10. Überfahrt Ponsse Bufallo mit Moorband; TB = 1.-10. Überfahrt Ponsse Bufallo mit Traktionsband; F14 = 1.-3. Überfahrt Rottne F14; EMB = 1.-7. Überfahrt EMB Elliator; JD6 = 1.-5. Überfahrt John Deere 6320; HG = 1.-5. Überfahrt Hägglunds; SCH = 1.-5. Überfahrt Schlitten).

3.2.2.3 Versuch zur Bestimmung von extremen Spannungsereignissen

Abbildung 30 veranschaulicht die Ergebnisse zu den Spannungsmessungen während eines Ereignisses mit extremen Spannungseinträgen beispielsweise verursacht durch einen Baumstamm. Aus der Abbildung geht hervor, dass sich der Spannungseintrag im Oberboden beim Traktor *John Deere 6320* von 130 kPa auf 348 kPa erhöht. Auch beim *Hägglunds* ist ein Anstieg von σ_1 von 33 kPa auf 142 kPa zu beobachten. In 40 cm Tiefe ist jedoch zu erkennen, dass lediglich bei der Variante mit dem starren Kettenlaufwerk (JD6) eine Zunahme von σ_1 stattfindet. Die Werte steigen von 68 kPa auf 140 kPa. Beim *Hägglunds* bleibt eine Zunahme aus.

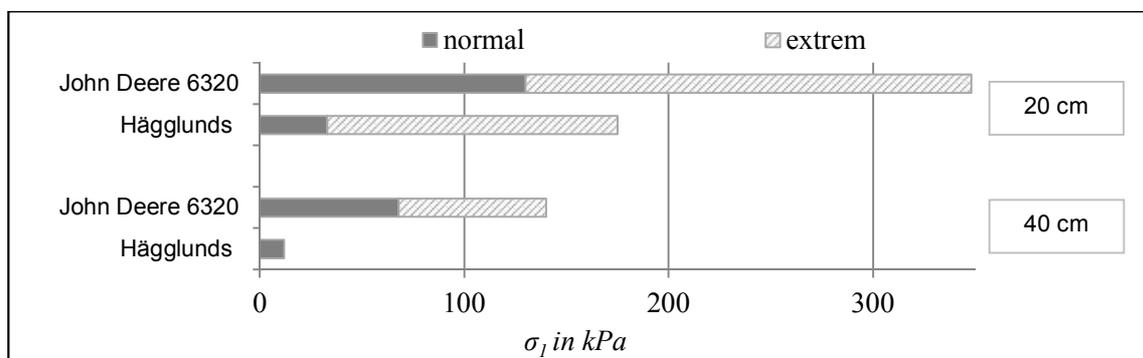


Abbildung 30. Normale und extrem Spannungseinträge von einem starren Kettenlaufwerk (John Deere 6320) und einem variablen Kettenlaufwerk (Hägglunds) am Versuchsstandort Lengler in 20 cm und 40 cm Bodentiefe.

3.2.3 Natürliche Möglichkeiten zur Spannungsreduktion

3.2.3.1 Auswirkungen auf die Bodenstruktur

Sowohl die Ergebnisse der Untersuchung in Wülperode als auch die Ergebnisse aus Wiedelah zeigen einen deutlich Einfluss des Häckslers *New Holland FR 9600* im Vergleich zur Referenz. Abbildung 31 dokumentiert, dass der Einfluss auf die bodenphysikalischen Parameter in Wülperode in den obersten beiden Horizonten zwischen drei von sechs und sechs von sechs Parametern liegt.

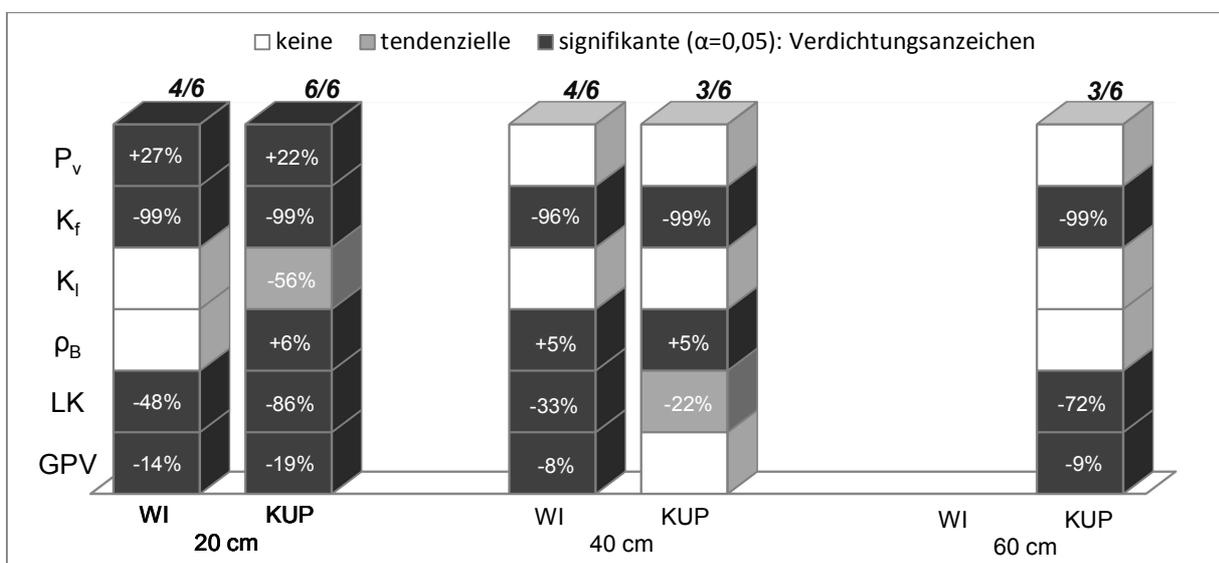


Abbildung 31. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzungsvarianten am Versuchsstandort Wülperode (WI = Wiese [1x]; KUP = Kurzumtriebsplantage [1x]).

Selbst in 60 cm Bodentiefe sind bei der Variante KUP noch drei der sechs Parameter negativ verändert. Für die Variante WI liegen in dieser Tiefe keine Ergebnisse vor (vgl. Kapitel 2.3.1.5). Aus den Daten zum diesem Standort geht hervor, dass die Variante KUP im Unterboden zumindest in 40 cm etwas weniger negativ beeinflusst worden ist als die Variante WI. Allerdings ist der Unterschied nur minimal (4/6 zu 3/6). Der veränderte Anteil an Parametern beläuft sich im Oberboden am Versuchsstandort Wiedelah auf sechs von sechs für die Variante WI und auf fünf von sechs für die Variante KUP (Abbildung 32). Über die Tiefe nimmt der prozentuale beeinflusste Anteil für beide Nutzungsvarianten stetig ab. Die absoluten Abweichungen zur Referenz variieren zwischen den einzelnen Nutzungsvarianten stark, so dass für keine der beiden Varianten ein stärkerer Einfluss dokumentiert werden kann. Während in 20 cm die Auswirkungen für die Variante KUP

noch um einen Parameter niedriger sind, liegen in 40 cm beide Varianten mit fünf von sechs Parametern gleich auf. In 60 cm sind die Veränderungen der Variante KUP sogar etwas größer (KUP: 3/6 & WI: 2/6)

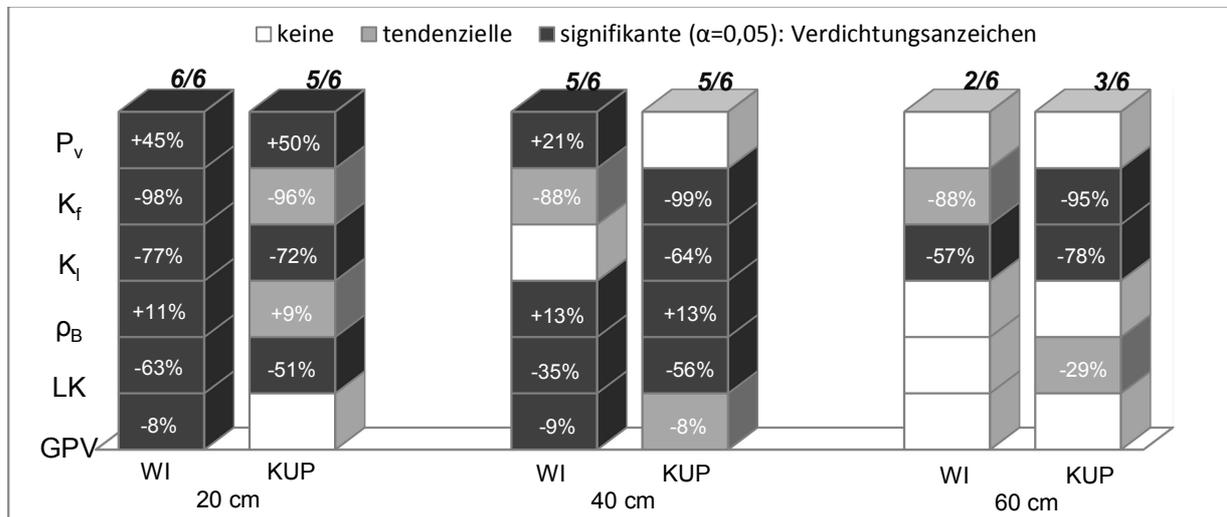


Abbildung 32. Signifikante und tendenzielle Veränderung der bodenphysikalischen Parameter als prozentuale Abweichung zur Referenz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzungsvarianten am Versuchsstandort Wiedelah (WI = Wiese [1x]; KUP = Kurzumtriebsplantage [1x]).

3.3 Interaktion verschiedener Bodenparameter untereinander

3.3.1 Bedeutung des Matrixpotenzials auf Bodenstabilität

3.3.1.1 Überfahrungsversuche bei einem Matrixpotenzial von -70 hPa

Bei der Auswertung des Drucksetzungsverhalten für den Versuchsstandort Reinshof zeigte sich im Oberboden eine deutliche Steigerung des Matrixpotenzials bei maximaler Auflast (400 kPa) von der Referenz über die beiden Einfach-Befahrungen zur Mehrfach-Befahrung (s. Tabelle 36). Die Werte steigen von -17 hPa auf bis zu -3 hPa an. Dieser Trend setzt sich auch in den beiden Unterbodenhorizonten fort. Dort liegen die Varianten Ref, JD und PB jedoch deutlich unter den Werten des Oberbodens (-22 hPa bis -135 hPa). Bei Mehrfach-Überfahrung wurden hingegen weiter zunehmende Werte dokumentiert, welche sogar im positiven Bereich (Porenwasserüberdruck) liegen. Nach der Entlastung fällt das Matrixpotenzial bei allen Varianten wieder ab. Die Auswertung der Setzung verdeutlicht besonders im Oberboden die auflastabhängige Entwicklung. Bei der unbelasteten Variante ist die Setzung bei maximaler Belastung am größten. Bei den Belastungsvarianten steigt die Setzung in Abhängigkeit von der Auflast und der Befahrungsintensität an. Nach der Belastung, während der Entlastungsphase, gehen die Werte wieder leicht zurück.

Tabelle 36. Auflastbedingte Änderung von Wasserspannung und Setzung während der Drucksetzung für die Varianten Ref, JD, PB und PB5 am Versuchsstandort Reinshof.

Tiefe	Variante	----- Matrixpotenzial -----			----- Setzung -----		
		keine Auflast hPa	Auflast (400 kPa) hPa	Entlastung hPa	keine Auflast mm	max. Auflast (400 kPa) mm	Entlastung mm
20	Ref	-67	-17	-75	0	6,8	6,0
	JD	-44	-8	-42	0	3,3	2,6
	PB	-37	-4	-35	0	3,5	2,8
	PB5	-26	-3	-28	0	3,6	2,8
40	Ref	-123	-135	-187	0	3,3	1,0
	JD	-53	-24	-72	0	2,9	2,1
	PB	-52	-29	-99	0	3,8	2,8
	PB5	-39	4	-32	0	3,9	2,8
60	Ref	-80	-81	-118	0	3,1	2,3
	JD	-50	-63	-90	0	3,6	2,7
	PB	-20	-22	-62	0	3,4	2,7
	PB5	-40	2	-39	0	3,9	2,7

3.3.1.2 Überfahrungsversuche bei einem Matrixpotenzial von -30 hPa

An dem feuchteren Versuchsstandort Hasbruch (-30 hPa) wurden bei maximaler Auflast von 400 kPa positive Matrixpotenziale für alle drei Varianten in 20 cm Tiefe beobachtet, wobei der positivste Wert der Variante F14 zuzuordnen ist (vgl. Tabelle 37). Für diese Variante wurde außerdem bei einer Auflast von 80 kPa bereits ein Porenwasserüberdruck dokumentiert. In beiden ausgewerteten Horizonten lassen sich deutliche Tendenzen erkennen. Die Matrixpotenziale der Referenz liegen bei jeder Laststufe am niedrigsten, gefolgt von der Variante EMB, gefolgt von der Variante F14. Bei der Setzung wurden die höchsten Werte bei der Referenz (5,6 mm bzw. 3,5 mm) und die niedrigsten bei der Variante EMB (4,5 mm bzw. 2,9 mm) festgestellt. Während der Entlastung kann wiederum eine Verminderung der Gesamtsetzung bei allen Varianten beobachtet werden.

Tabelle 37. Auflastbedingte Änderung von Wasserspannung und Setzung während der Drucksetzung für die Varianten Ref, EMB und F14 am Versuchsstandort Hasbruch.

Tiefe <i>cm</i>	Variante	----- Matrixpotenzial -----				----- Setzung -----		
		keine Auflast <i>hPa</i>	Auflast (80 kPa) <i>hPa</i>	Auflast (400 kPa) <i>hPa</i>	Entlastung <i>hPa</i>	keine Auflast <i>mm</i>	max. Auflast (400 kPa) <i>mm</i>	Entlastung <i>mm</i>
20	Ref	-31	-14	1	-40	0	-5,6	-4,1
	EMB	-30	-8	0	-25	0	-4,5	-3,4
	F14	-26	1	3	-16	0	-5,2	-4,1
40	Ref	-26	-16	-7	-31	0	-3,5	-2,8
	EMB	-31	-18	-4	-34	0	-2,9	-2,5
	F14	-32	-9	-4	-37	0	-3,0	-2,2
60	Ref	-26	-43	-15	-37	0	-3,7	-3,1

3.3.2 Korrelationsanalyse

3.3.2.1 Auswirkungen von Kontaktflächendruck, Matrixpotenzial und Befahrungintensität auf die Spannungseinträge

Die Korrelationsanalyse mit σ_1 und den Faktoren Kontaktflächendruck, Matrixpotenzial und Überrollhäufigkeit hat für den Oberboden einen deutlichen Zusammenhang für jeden Faktor aufgezeigt (Abbildung 33).

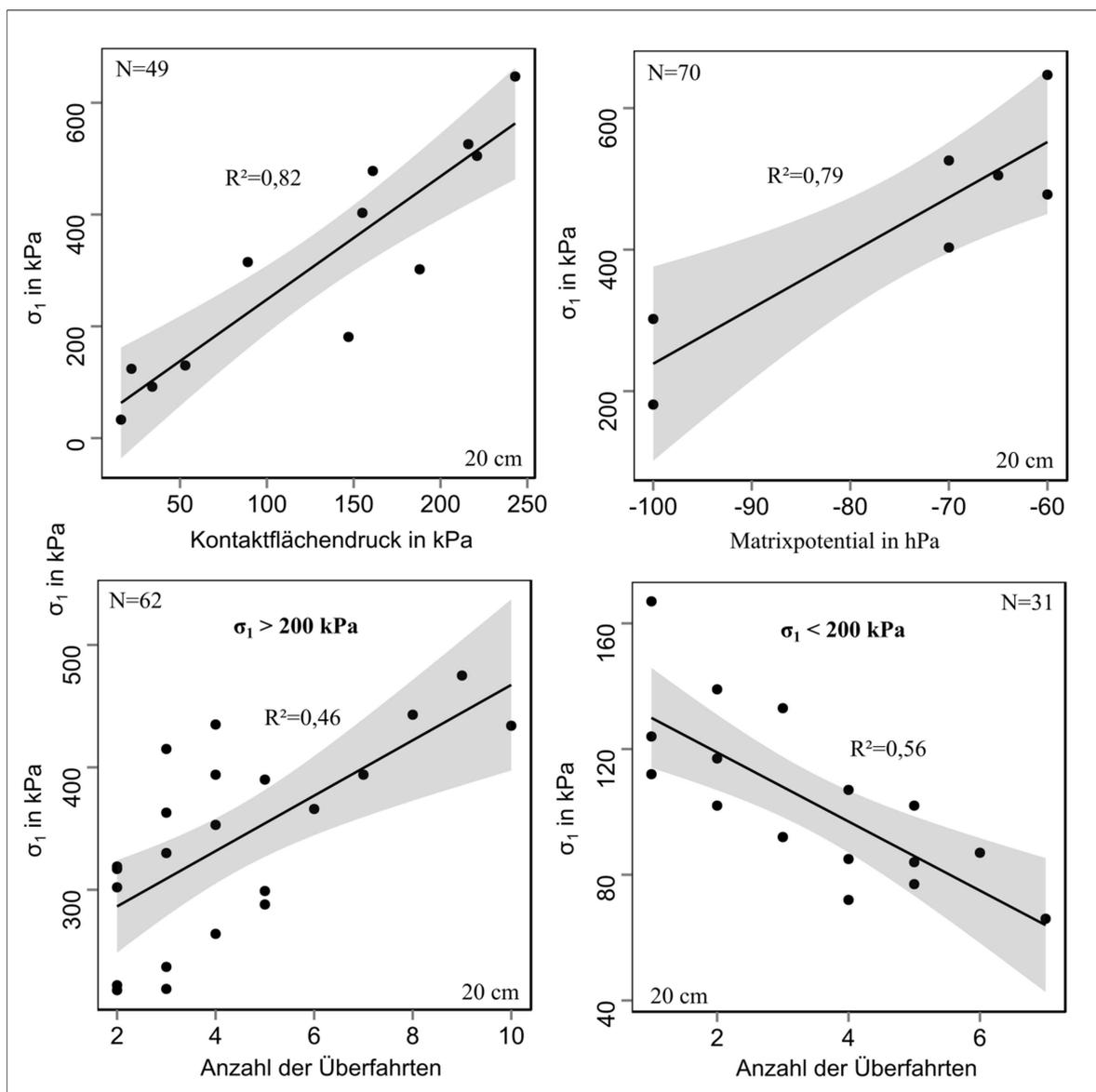


Abbildung 33. Einfluss des Kontaktflächendrucks, des Matrixpotentials und der Befahrungintensität für Spannungseinträge > 200 kPa (links unten) und < 200 kPa (rechts unten) auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 20 cm Tiefe unter den getesteten Holzermaschinen (Konfidenzintervall von 95 %).

Mit zunehmenden Kontaktflächendrücken und zunehmenden Matrixpotenzialen steigen die Werte von σ_1 ($R^2 = 0,82$ bzw. $R^2 = 0,79$). Bei der Anzahl der Überfahrten ergeben sich zwei unterschiedliche Tendenzen, so gelten für Spannungseinträge > 200 kPa steigende Werte von σ_1 ($R^2 = 0,46$) und für Spannungseinträge < 200 kPa fallende Werte ($R^2 = 0,56$) bei einer erhöhten Befahrungintensität.

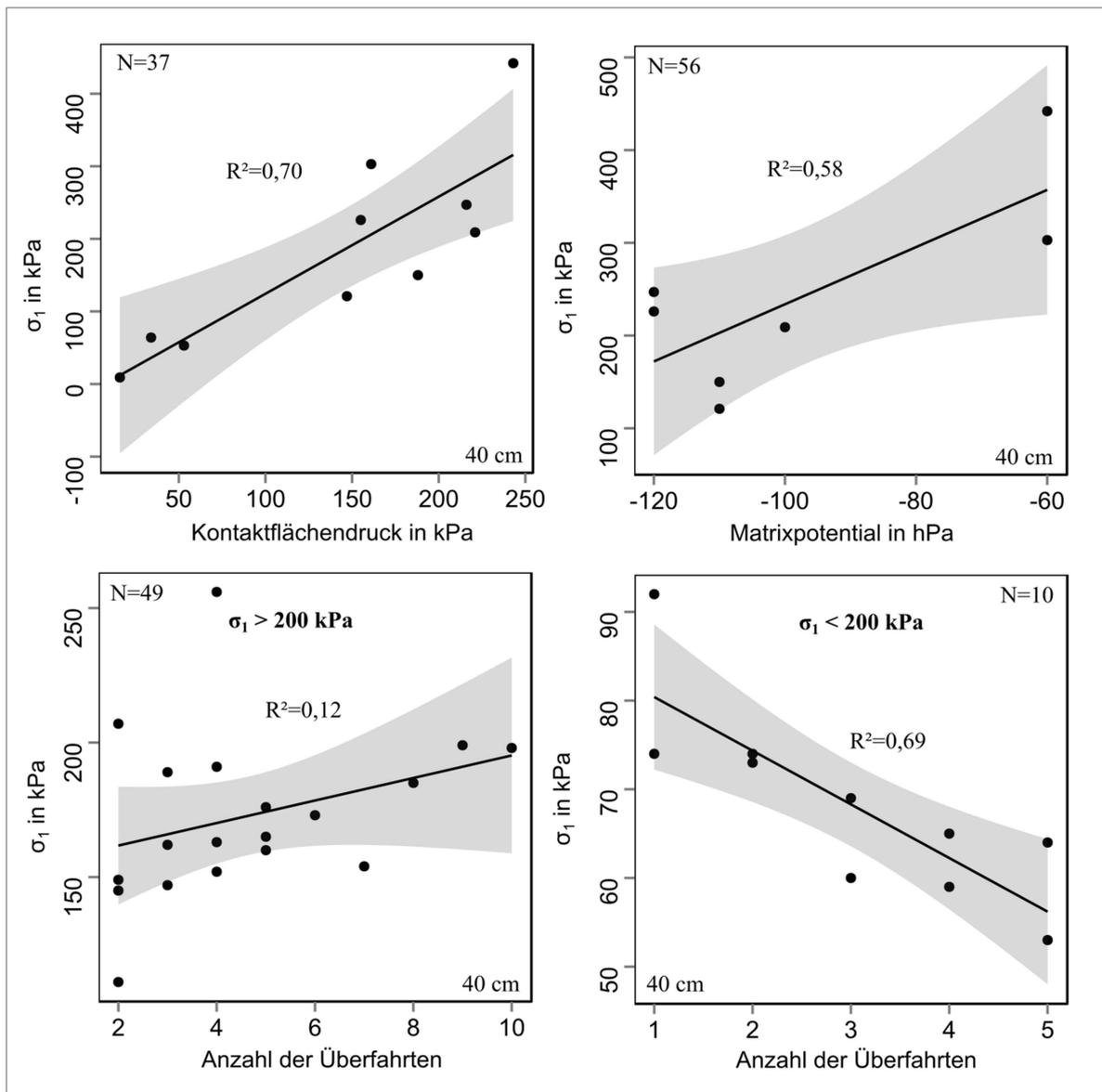


Abbildung 34. Einfluss des Kontaktflächendrucks, des Matrixpotentials und der Befahrungintensität für Spannungseinträge > 200 kPa (links unten) und < 200 kPa (rechts unten) auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 40 cm Tiefe unter den getesteten Holzernemaschinen (Konfidenzintervall von 95 %).

Die vergleichende Analyse in 40 cm Bodentiefe ergibt für die Parameter Kontaktflächendruck und Matrixpotenzial ähnliche Beziehungen wie im Oberboden. Die Werte des Bestimmtheitsmaßes liegen bei $R^2 = 0,70$ bzw. $R^2 = 0,58$ für steigende Werte von σ_1 bei zunehmenden Werten von Kontaktflächendruck bzw. Matrixpotenzial (vgl. Abbildung 34).

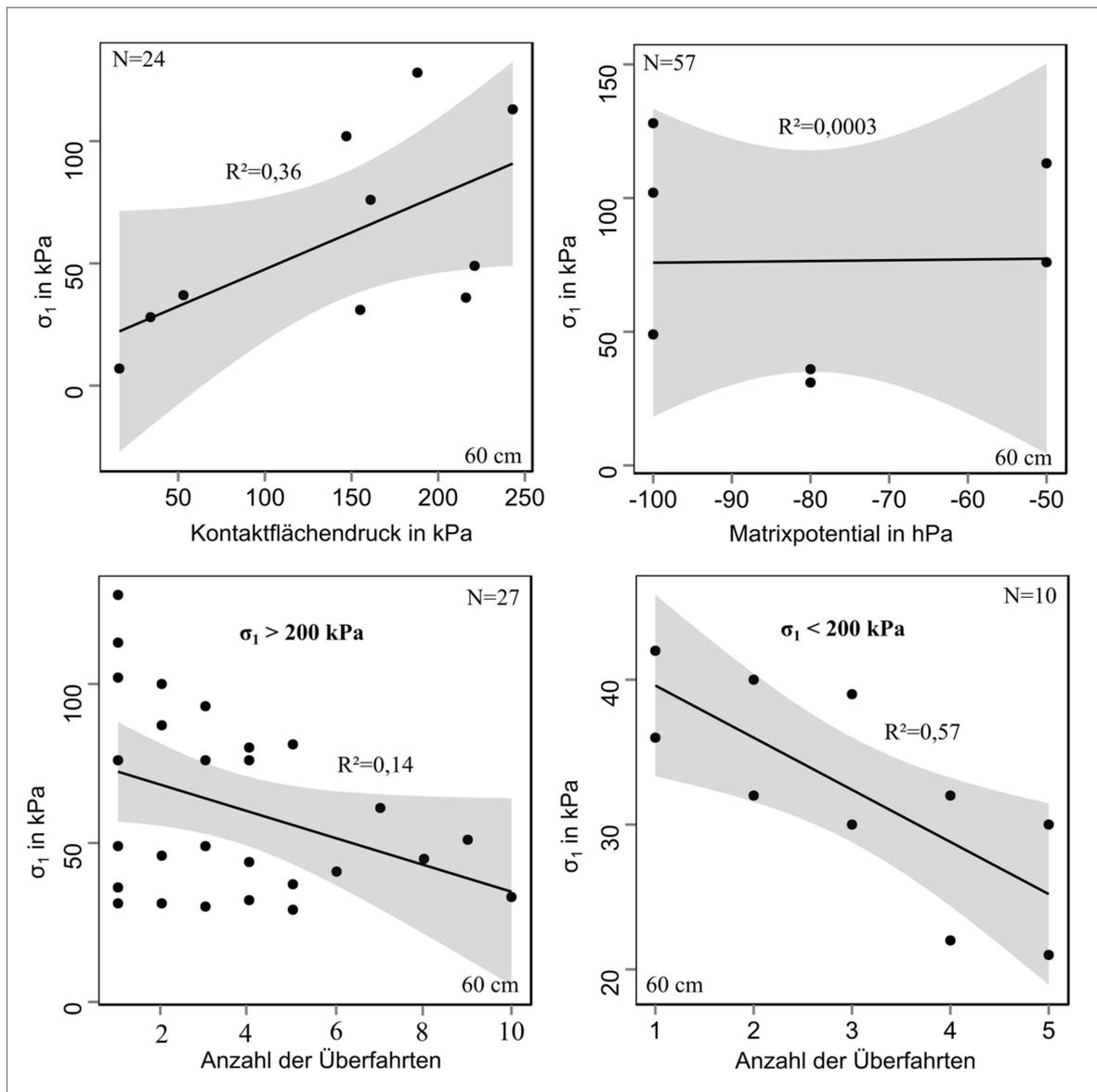


Abbildung 35. Einfluss des Kontaktflächendrucks, des Matrixpotentials und der Befahrungintensität für Spannungseinträge > 200 kPa (links unten) und < 200 kPa (rechts unten) auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 60 cm Tiefe unter den getesteten Holzerntemaschinen (Konfidenzintervall von 95 %).

Analog zu den Beobachtungen in 20 cm Tiefe verläuft auch die negative Spannungsentwicklung von Spannungseinträgen < 200 kPa bei erhöhter Befahrungintensität ($R^2 = 0,69$). Für die Spannungseinträge > 200 kPa sind tendenziell steigende Werte von σ_1 bei zunehmender Überrollung zu beobachten, allerdings liegt das Bestimmtheitsmaß bei nur $R^2 = 0,12$. In 60 cm Bodentiefe kann nur für die Faktoren Kontaktflächendruck und Befahrungintensität bei Spannungseinträgen < 200 kPa ein Zusammenhang wie in den oberen beiden Horizonten bestätigt werden (s. Abbildung 35). Die Werte des Bestimmtheitsmaßes liegen bei $R^2 = 0,36$ bzw. $R^2 = 0,57$. Für das Matrixpotenzial kann in dieser Tiefe keine Beziehung festgestellt werden und für die Befahrungintensität für Spannungseinträge > 200 kPa, können abnehmender Werte bei Steigerung der Überfahrtenanzahl nur tendenziell aufgezeigt werden ($R^2 = 0,14$).

3.3.2.2 Auswirkungen der Textur auf die Spannungseinträge

Die Korrelation von σ_1 und Textur, dargestellt in Abbildung 36, zeigt für den Oberboden einen deutlichen Zusammenhang zwischen steigenden Sand- bzw. Schluffgehalten und fallenden bzw. steigenden Werten von σ_1 ($R^2 = 0,64$ bzw. $R^2 = 0,73$). Zwischen dem Tonanteil und der Entwicklung der Spannungseinträge ist keine Tendenz zu erkennen.

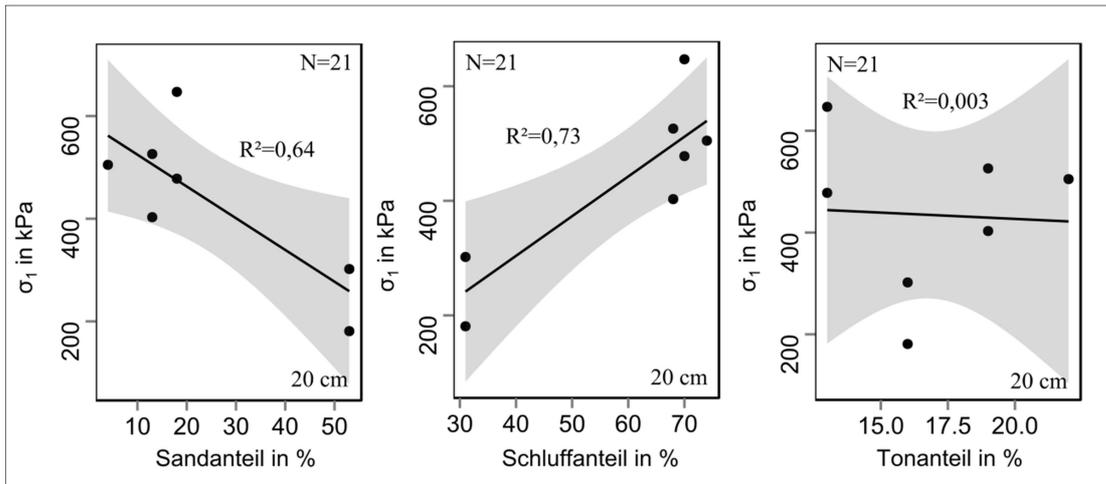


Abbildung 36. Einfluss der Textur auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 20 cm Tiefe unter den getesteten Holzertemaschinen (Konfidenzintervall von 95 %).

In 40 cm Tiefe lässt sich eine ähnliche Tendenz, allerdings bei geringeren Werten des Bestimmtheitsmaßes ($R^2 = 0,17$), festhalten (Abbildung 37). Mit zunehmenden Tongehalten lassen sich in dieser Tiefe steigende Werte von σ_1 beobachten ($R^2 = 0,31$).

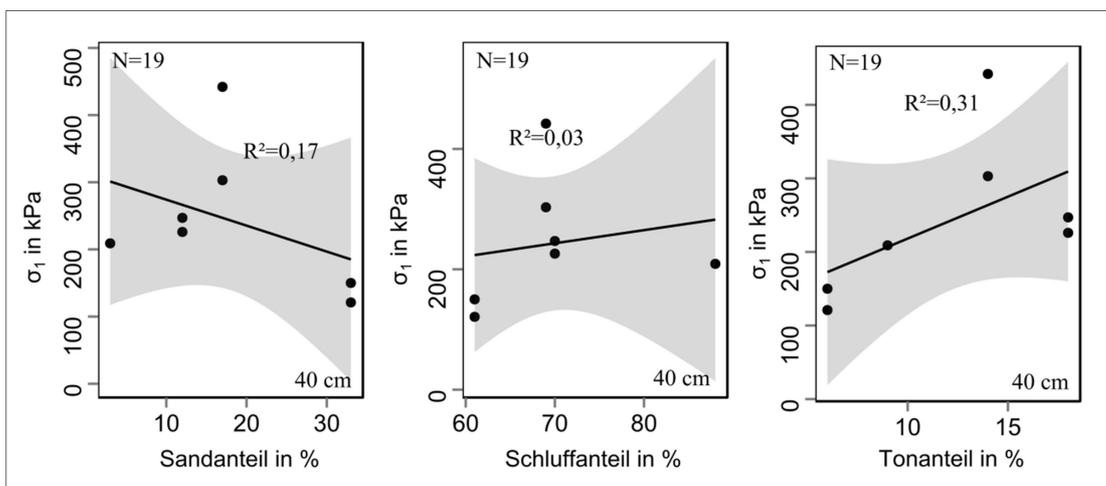


Abbildung 37. Einfluss der Textur auf die Entwicklung der 1. Hauptspannung (σ_1) in 40 cm Tiefe unter den getesteten Holzernemaschinen (Konfidenzintervall von 95 %).

3.3.2.3 Auswirkungen von zunehmenden Werten von σ_1 auf bodenphysikalische Parameter

In Abbildung 38 sind die Auswirkungen von σ_1 auf die prozentuale Änderung von P_v , k_f , GPV und LK, für alle Tiefen zusammengefasst, dargestellt. Aus der Korrelationsanalyse wird deutlich, dass zunehmende Spannungseinträge, steigende Werte von P_v ($R^2 = 0,62$) und sinkende Werte von k_f ($R^2 = 0,37$) sowie GPV ($R^2 = 0,35$) bedeuten. Außerdem ist eine negative Entwicklung von LK zu beobachten, allerdings liegt das Bestimmtheitsmaß bei nur 0,16.

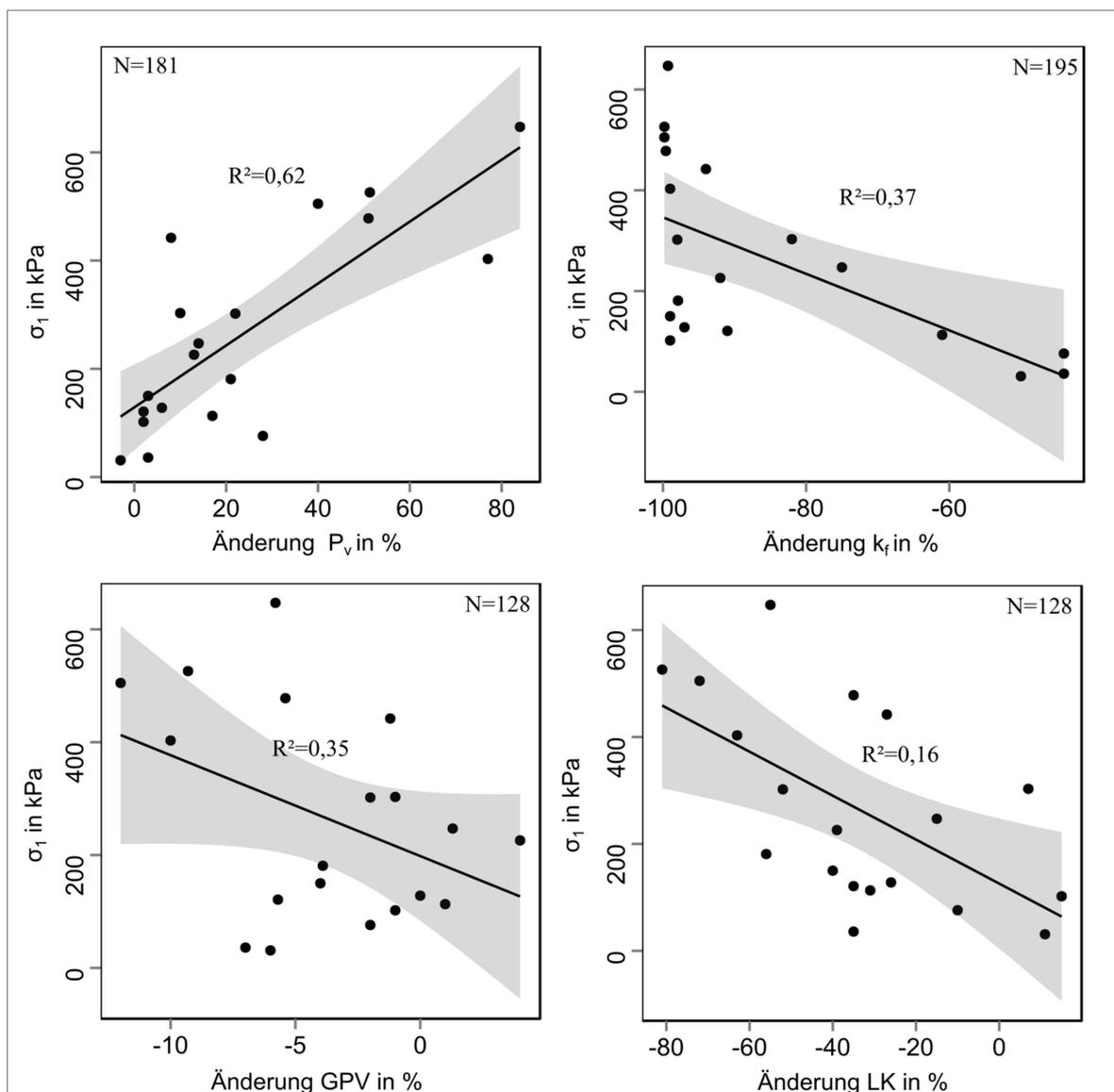


Abbildung 38. Auswirkungen von steigenden Werten der 1. Hauptspannung (σ_1) auf die Vorbelastung (P_v), die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), das Gesamtporenvolumen (GPV) und der Luftkapazität (LK) in allen Tiefen (Konfidenzintervall von 95 %).

3.3.2.4 Auswirkungen von zunehmenden Vorbelastungswerten auf andere bodenphysikalische Parameter

Als Folge der auflastbedingten Erhöhung von P_v sinken die Werte von k_f ($R^2 = 0,48$), GPV ($R^2 = 0,28$) und LK ($R^2 = 0,62$) (vgl. Abbildung 39). Die lineare Regression wurde mit Daten aus allen drei Tiefen durchgeführt.

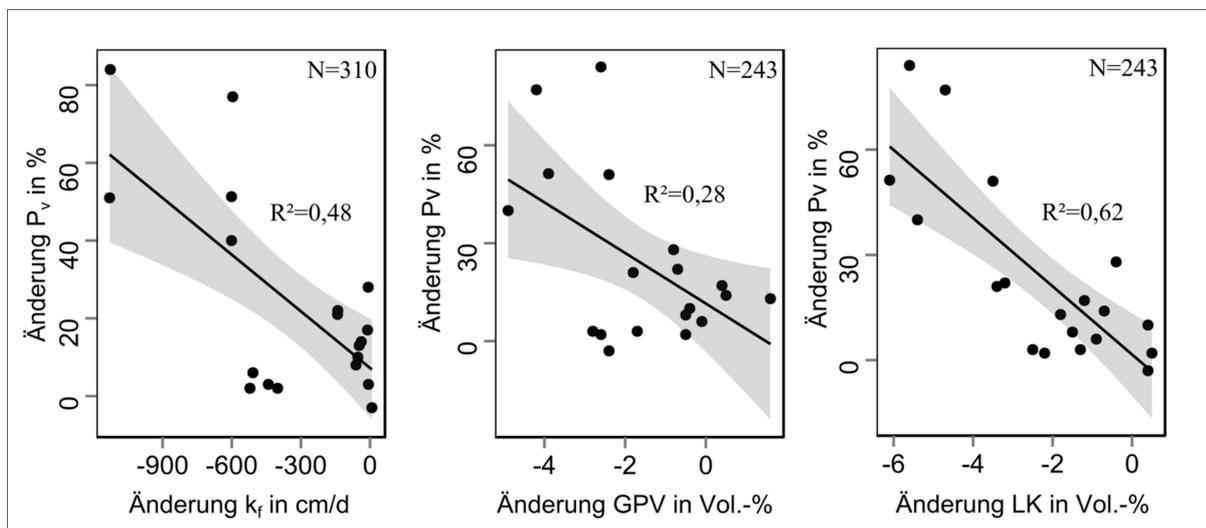


Abbildung 39. Einfluss von steigenden Vorbelastungswerten (P_v) auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), das Gesamtporenvolumen (GPV) und der Luftkapazität (LK) in allen Tiefen (Konfidenzintervall von 95 %).

4 Diskussion

4.1 Auswirkungen eines typischen Holzerntezyklus auf die Bodenstruktur

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der Holzernte auf die bodenphysikalischen Funktionen diskutiert. Insbesondere wird ein Fokus auf die Lössböden (Reinshof, Vaake, Silberborn und Göttingen) gelegt, da diese auf Grund ihrer mächtigen Auflage und labilen Struktur besonders anfällig für Verdichtung erscheinen. *Cambi et al.* (2015) verdeutlichen mit einem Review-Artikel zum Thema Bodenverdichtung in der Forstwirtschaft, dass der Einsatz von Holzerntemaschinen einen erheblichen Einfluss auf verschiedenen Bodenfunktionen hat. Anhand von Überfahrungsversuchen werden die negativen Auswirkungen der Holzernte auf die ausgewählten bodenphysikalische Parameter bestätigt. Grundsätzlich werden steigende Vorbelastungen (P_v), Lagerungsdichten (ρ_B) sowie fallende Werte der gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), der Luftleitfähigkeit (k_l), des Gesamtporenvolumen (GPV) und der Luftkapazität (LK) dokumentiert.

Überfahrungsversuche kombiniert mit Spannungsmessungen an Lössstandorten und die Quantifizierung ihrer Auswirkungen auf bodenphysikalische Funktionen werden auch von *Wiermann* (1998) und *Zink et al.* (2010) durchgeführt. Die kartierten Bodentypen der Lössstandorte der vorliegenden Arbeit: (Norm-)Parabraunerde (Lenglern), Parabraunerde-Pseudogley (Reinshof, Vaake) und (Norm-)Pseudogley (Göttingen) sind in ihren Eigenschaften ähnlich zu den Böden der genannten Autoren und charakteristisch für die untersuchten Regionen (NIBIS, 2015). Die Studie von *Wiermann* (1998) zur Spannungsverteilung unter Landmaschinen wird ebenfalls am Versuchsgut Reinshof (Pseudogley-Parabraunerde) durchgeführt und zeigt, dass bei einer Überschreitung der Eigenstabilität des Bodens zunächst eine Kompaktierung der Bodenstruktur erfolgt und bei wiederholter Befahrung und Überschreitung in einer Strukturzerstörung resultiert. Die Bodenarten variieren in beiden Arbeiten zwischen *schwach* und *stark tonigem* Schluff. Die Ergebnisse (P_v , ρ_B , k_f und k_l) von *Zink* (2009) auf einem Ackerstandort (Löss) in Nordrhein-Westfalen zeigen extrem hohe Werte von k_f und k_l und niedrige Werte von P_v und ρ_B im Oberboden auf, was auch mit den Referenzprofile dieser Arbeit übereinstimmt. Im Vergleich zu den Lössstandorten sind die anderen untersuchten Bodentypen weniger von Schluff dominiert. Der Anteil von Sand und Ton nimmt zu. Der durch die Saale-Eiszeit geprägte Versuchsstandort Hasbruch ist von der Bodencharakteristik ähnlich zu den untersuchten Böden (u.a. Pseudogley-Parabraunerde und Parabraunerde von *Pytko* (2005) und *Zink* (2009) unter Geschiebelehm.

Als Folge der Befahrung werden erhöhte P_v -Werte dokumentiert. Der lockergelagerte Oberboden verfügt im Ausgangszustand über wenig direkte Korn-zu-Korn Kontakte. Unter Kornkontakten versteht man die vorliegenden Berührungspunkte der einzelnen Bodenpartikel untereinander. Naturgemäß ist die spezifische Kontaktzahl in Sanden größer als in feintexturierten Böden und in komprimierten größer als in unverdichteten Böden (von Engelhardt, 1960). Niedrige Kontaktzahlen führen zu großen Porenzwischenräumen (Hartge & Horn, 2014). Durch die Belastung werden diese Porenzwischenräume komprimiert und die Anzahl der Korn-zu-Korn Kontakte steigt (Hartge & Horn, 1984), was zu einem Stabilitätsgewinn des Bodens führt, welcher sich wiederum durch die Erhöhung von P_v ausdrückt (Horn & Fleige, 2009).

Infolge der mechanischen Belastung treten sowohl elastische, als auch plastische Verformungen auf. Während der Teil der elastischen Verformung kurzzeitige reversible Änderungen an der Bodenstruktur verursacht, führt die plastische Verformung zu einer irreversiblen Schädigung der Bodenstruktur und zu einer Abnahme der Makroporen (Alaoui et al., 2011; Ampoorter et al., 2010; Schäffer et al., 2007; Wiermann et al., 2000), welche nach *Horn & Smucker* (2005) besonders wichtig für die Belüftung des Bodens und außerdem von der Textur sowie Struktur abhängig sind. Die schlechte Belüftung des Bodens resultiert in anaeroben Verhältnissen und hat beispielsweise negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum (Czyz, 2004; Hakansson, 2005). Abnahmen von LK nach der Befahrung beobachten auch *Yavuzcan et al.* (2005) sowie *Zink* (2009). Beide Studien bestätigen eine Reduktion von LK bis in den Unterboden und ihre Abhängigkeit von der Befahrungsintensität. Die Komprimierung des Bodens resultiert des Weiteren in einem Anstieg von ρ_B , was zudem Auswirkungen auf die Porendurchmesser hat und hauptverantwortlich für die Abnahme der Leitfähigkeitswerte ist (Horn & Smucker, 2005). *Czyz* (2004) und *Stepniowski & Stepniowska* (2009) dokumentieren außerdem eine verminderte Sauerstoffverfügbarkeit infolge erhöhter Werte von ρ_B .

Die Korrelationen aus der vorliegenden Arbeit von σ_1 und P_v verdeutlichen diesen Effekt mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,62$. Weitere Korrelationsanalysen (vgl. Abbildung 39) zeigen, infolge der Komprimierung und Zerstörung der Porenkontinuität (Ampoorter et al., 2012; Ampoorter et al., 2007; Berisso et al., 2012; Zink et al., 2011), außerdem die Beziehung von steigenden P_v -Werten und abnehmenden k_f ($R^2 = 0,48$) sowie LK-Werten ($R^2 = 0,62$).

Als besonders sensitiver Parameter, um die Folgen einer Befahrung zu quantifizieren, erweist sich der Wert der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_f . An allen vier Lössstandorten in Kombination mit dem *John Deere 1270e* bzw. *Ponsse Buffalo* sinkt k_f bereits nach der ersten Überfahrt im Oberboden um mindestens 98 % (vgl. Kap. 3.2.1) im Vergleich zur unbelasteten Referenz. Abnahmen von k_f um 90 % dokumentieren auch *Yavuzcan et al.* (2005) bei Versuchen mit einem Rübenroder. Auch *Alakukku et al.* (2003) bestätigen bei ihren Verdichtungsversuchen k_f als sensitivsten Parameter. Neben k_f ist k_l ein weiterer Parameter, mit welchem der Massenfluss im Boden beschrieben wird. Beide Leitfähigkeitsparameter beschreiben den zeitabhängigen Durchfluss ihres Mediums durch eine definierte Bodenquerschnittsfläche und sind nach *Hartge* (1967) geeignet, um Aussagen über die Kontinuität des Porensystem zu geben. Sie werden häufig für die Interpretation auflastabhängiger Verdichtungsprozesse als Kennwerte genutzt (*Horn & Fleige*, 2009; *Lebert et al.*, 2007; *Petelkau et al.*, 1998; *Zink et al.*, 2011). Eine ausführliche Beschreibung der Fehleranfälligkeit für die Bestimmung von k_f und k_l führt *Zink* (2009) durch. Aus seinen Ergebnissen geht außerdem hervor, dass die Abnahme von k_f bereits nach der ersten Überfahrt auf die verminderte Porenkontinuität zurückgeführt werden kann, selbst wenn k_l noch nicht reagiert. Auch in der vorliegenden Arbeit sind die Auswirkungen der Befahrungsversuche auf k_l qualitativ und quantitativ geringer (vgl. Kapitel 3.2.1.1).

Eine Lockerung der verdichteten Rückegassen-Fahrspuren wird normalerweise und im Gegensatz zur Landwirtschaft nicht durch Maßnahmen der Oberbodenbearbeitung erreicht. Viel mehr ist eine natürliche Regeneration der verdichteten Flächen nötig, welche zumindest Jahrzehnte dauern kann. So findet *Schack-Kirchner* (1994) auch nach zehn Jahren noch keine Anzeichen einer Regeneration auf einem Versuchsstandort aus Lösslehm. Auch *von Wilpert & Schaffer* (2006) können nach rund 20 Jahren nur geringe Regenerationsansätze im Oberboden einer Rückegasse feststellen. Einen positiven Effekt hinsichtlich der Bodenentwicklung, in Form einer erhöhten Quellungs- und Schrumpfrate, dokumentieren *Pagenkemper et al.* (2014) beim Einsatz von Luzerne auf landwirtschaftlichen Flächen. Auch bei Versuchen mit Regenwürmern unter Ackernutzung (schluffiger Lehm) erfolgt nach 24 Monaten erfolgt bei neutralem pH-Wert eine Erhöhung der Porenanteile (*Capowiez et al.*, 2009). Ein erneutes Durchporen ursprünglich verdichteter Bereiche wird auch von *Ponder et al.* (2000) und *Langmaack et al.* (2002) beschrieben. Allerdings ist ein Großteil der Regenwürmer auf höhere pH-Werte angewiesen (*Graefe & Beylich*, 2003), was unter forstlichen Bedingungen nicht gegeben ist. In diesem Fall müsste eine Bodenkalkung

oder eine gezielte Ausbringung von säureresistenteren Regenwürmern, wie zum Beispiel des *Lumbricus badensis*, erfolgen. Eine Kalkung der Rückegassen aktiviert neben den Regenwürmern zusätzliche Organismen der Bodenfauna und trägt zu einer Regeneration der Rückegassen in Form von Strukturbildung bei (Haynes & Naidu, 1998; Potthoff et al., 2008).

Die Zusammenführung aller Ergebnisse verdeutlicht, dass der Oberboden einer Rückegasse auf Grund seiner geringen Distanz zum Ort des Spannungseintrags hochgradig gefährdet ist und ein Einsatz der Holzerntemaschinen grundsätzlich zu einer gravierender Minderung der ökologischen Bodenfunktionen führt (Cambi et al., 2015; Matthies, 2009). Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass diese Schäden, verursacht durch die plastische Verformung, bereits nach der ersten Überfahrt entstehen und so die Bodenstruktur irreversibel schädigen (Schäffer, 2002; Voßbrink, 2005). Eine natürliche Regeneration, ohne weitere Beeinflussung, würde Jahrzehnte in Anspruch nehmen, wie von *Wilpert & Schaffer* (2006) zeigen. Ein problemloser Einsatz der radgetriebenen Holzerntemaschinen, hinsichtlich einer nachhaltigen Nutzungsstrategie, scheint nicht möglich zu sein. Ähnliche Beobachtungen werden auch von weiteren Autoren dokumentiert (Ampoorter et al., 2007; Ballard, 2000; Horn et al., 2007; Huang et al., 1996; McNabb et al., 2001).

4.1.1 Spannungseinträge und die Abhängigkeit von externen und internen Bodenfaktoren

Die Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter und die Bewertung der Bodenstabilität, dem Vergleich von P_v und σ_1 , sind insbesondere von der Höhe der vertikalen Spannungseinträge (σ_1) der Holzerntemaschinen abhängig. Aus diesem Grund erfolgt in dieser Arbeit lediglich die Auswertung und Darstellung von σ_1 . Zunächst wird ein Vergleich der gemessenen Spannungseinträge von anderen Autoren vorgenommen, um einen Überblick zu den bisher durchgeführten Messungen in der Forst- und Landwirtschaft zu bekommen und die ermittelten Werte der vorliegenden Arbeit besser einordnen zu können.

Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten maximalen Spannungseinträge der radgetriebenen Holzerntemaschinen im Oberboden von über 800 kPa liegen deutlich über den maximalen Werten, welche beispielsweise von *Voßbrink* (2005) auf Lockerbraunerden im Schwarzwald gemessen werden. *Voßbrink* ermittelt für den Forwarder *Timberjack 810* (Reifenbreite 600 mm) bei einem Gewicht von 10 Mg maximal 400 kPa und für den Forwarder *Timberjack 1110* (Reifenbreite 700 mm) bei einem Gewicht von 12 Mg maximal 300 kPa im Oberboden. Im Vergleich

zum *Ponsse Buffalo* (Reifenbreite 710 mm) werden beide Maschinen ohne Zuladung getestet und wiegen somit deutlich weniger, was die niedrigeren Spannungseinträge erklärt. Ein ähnliches Bild ist auch im Unterboden in 40 cm Bodentiefe zu beobachten. Während beim *Ponsse Buffalo* deutlich höhere Werte von über 400 kPa gemessen werden, liegen die Werte von σ_1 für die älteren *Timberjacks* im Bereich von 200 kPa bis 250 kPa. Auch die Werte des moderneren Harvesters *John Deere 1270e* liegen deutlich über den Werten des *Caterpillar 580*. Während beim *John Deere 1270e* (Radbreite 710 mm) mit einem Gewicht von ca. 22 Mg maximale Werte von 620 kPa (20 cm) und 380 kPa (40 cm) dokumentiert werden, erreicht σ_1 beim *Caterpillar 580* (Radbreite 700 mm) nur Werte von ca. 320 kPa (20 cm) bzw. 250 kPa (40 cm). Beim Vergleich der Kettenmaschinen aus beiden Arbeiten ist jedoch ein umgekehrter Trend zu beobachten. Die maximalen Werte von σ_1 liegen für den Harvester *Impex 1650 – Königstiger* im Oberboden mit einem Gewicht von 30 Mg bei ca. 550 kPa und bei ungefähr 180 kPa in 40 cm. Für den Harvester *Impex 1880 – Hannibal* (45 Mg) liegen sie trotz schützender Reisigauflage bei ca. 450 kPa im Oberboden und bei ca. 350 kPa in 40 cm Tiefe. Die Werte des *EMB Elliators*, welche aus den genannten Gründen nur im Oberboden bestimmt werden konnten, liegen lediglich bei knapp über 100 kPa. Die Vergleiche zu dieser Studie verdeutlichen zum einen die wachsende Maschinengröße innerhalb der letzten zehn Jahre (Apel, 2001; Rieppo, 2001) bei minimaler Vergrößerung der Reifenbreite und somit deutlich steigender Kontaktflächendrücke, was die höheren Spannungseinträge in dieser Arbeit erklärt. Zum anderen zeigt der Vergleich der Kettenmaschinen, dass die Spannungseinträge auf Grund modernerer und größerer Laufwerke bei heutigen Spezialmaschinen deutlich reduziert werden können.

Untersuchungen mit dem identischen SST-Messsystem von *Seehusen et al.* (2014) zeigen, dass bei Radlasten von 4,1 Mg, vergleichbar zu den Radlasten von *John Deere 1270e*, *Ponsse Buffalo* und *Rottne F14*, in der Landwirtschaft Spannungseinträge von um die 400 kPa bei einem Kontaktflächendruck von 130 kPa im Oberboden gemessen werden können. Die Werte von σ_1 erreichen in 40 cm Tiefe Werte von über 300 kPa. Allerdings finden die Überfahrungsversuche während deutlich trockenerer Bedingungen (Ψ_M -1000 hPa) statt.

Zink (2009) ermittelt bei wiederholten Messungen für unterschiedliche Radlasten und Tiefen ähnliche Werte von σ_1 auf einem Parabraunerde-Pseudogley aus Lösslehm und einer Pseudogley-(Para-)Braunerde aus Geschiebelehm mit dem SST. Bei einer Radlast von 3,3 Mg werden maximale Spannungseinträge von um die 460 kPa (20 cm), 290 kPa (40 cm) und 120 kPa (60 cm) ge-

messen. Die Steigerung der Radlast auf 6,3 Mg führt zum Anstieg auf maximal rund 710 kPa (20 cm), 410 kPa (40 cm) und 220 kPa (60 cm). Bei einer Radlast von 7,5 Mg werden σ_1 -Werte von bis zu 1000 kPa dokumentiert. Der Vergleich mit *Zink* (2009) zeigt, dass die hohen Spannungseinträge, welche unter anderem in der vorliegenden Arbeit dokumentiert werden, keine Ausnahmen sind. Die vertikalen Spannungseinträge von bis zu 1000 kPa übersteigen die Eigenstabilität des Bodens um ein Vielfaches, was die erheblichen Folgen für die bodenphysikalische Parameter erklärt (vgl. Kapitel 4.1).

Da die Werte von σ_1 ebenfalls um ein Vielfaches größer als die Kontaktflächendrücke sind, stehen sie augenscheinlich im Widerspruch. Allerdings beruht der ermittelte Faktor Kontaktflächendruck auf der Annahme einer homogenen Gewichtsverteilung auf der Lastfläche. Untersuchungen zur Spannungsverteilung unter Reifen von zahlreichen Autoren zeigen jedoch, dass insbesondere die profilierte Bereifung zu einer heterogenen Verteilung führt (Alakukku et al., 2003; Arvidsson & Keller, 2007; Burt et al., 1987; Cui et al., 2007; Keller et al., 2014; Raper et al., 1995; Roth & Darr, 2011; Tijink et al., 1995; Way & Kishimoto, 2004; Way et al., 2000; Wood et al., 1991). So spricht *Horn* (2003) von einer stark ausgeprägten Heterogenität der Spannungseinträge, mit einer Differenz von bis zu 300 %, zwischen den einzelnen Stollen und ihren Stollenzwischenräumen. Neben den sogenannten Stolleneffekten spielt die Zentrierung des Reifens eine wesentliche Rolle für die Höhe der Spannungseinträge. Aus den Arbeiten von *Burt et al.* (1989), *Döll* (1999) und *Febo* (1999) geht hervor, dass der Spannungseintrag mittig unter einem Reifen um das Zwölffache erhöht sein kann. Aus diesen beiden Erkenntnissen wird deutlich, dass alle Spannungseinträge, welche über den mittleren Kontaktflächendruck abgeleitet werden, besonders im Oberboden unterschätzt werden. Außerdem bedeutet dies für die Messverfahren zur Bestimmung von σ_1 , wie dem SST, dass eine Wiederholung der Messungen nötig ist, um Stollen- oder Zentrierungseffekte auszuschließen, gleichzeitig aber eine Erklärung für die teils extrem hohen Werte von σ_1 liefern.

Neben der Bestimmung von σ_1 mittels des SST (Fazekas, 2005; Kühner, 1997; Semmel & Horn, 1994; Wiermann, 1998; Zink, 2009) werden in der Literatur noch weitere Messverfahren beschrieben. Mit Hilfe der Bollingsonde (Bolling, 1986; Bolling & Söhne, 1982) werden Untersuchungen von *Brunotte* (2007) und *Geischeder & Demmel* (2006) zur Bestimmung von Spannungseinträgen unter Landmaschinen vollzogen. *Brümmer* (2001) ermittelt mit der Sonde bei einer Radlast von 2,5 Mg Spannungswerte von ca. 250 kPa. Ähnliche Werte bestimmt auch *Wilde*

(1998) bei der Rübenernte. Mit Hilfe von Einzelmessdosen messen auch *Arvidsson et al.* (2002), *Alakukku et al.* (2003) und *Keller et al.* (2014) Spannungseinträge unter Landmaschinen bzw. leiten diese aus Kontaktflächendrücken ab. Bei ihren Untersuchungen werden Werte von σ_1 zwischen 250 kPa und 300 kPa für den Oberboden bestimmt.

Im Gegensatz zu den anderen Messsystemen wird mit dem SST, neben der vertikalen Spannungskomponente, der gesamte Spannungszustand im Boden erfasst (2. und 3. Hauptspannung, mittlere Normalspannung und oktaedrische Scherspannung). *Gräsle* (1999) verdeutlichte in seiner Arbeit die Vorteile der SST-Spannungsmessungen anhand der sechs erfassten Normalspannungen zur Beschreibung des kompletten Spannungstensors sowie des Einbaus der Sensoren in ungestörtes Bodenmaterial. Diese Art der Spannungsmessung ermöglicht eine verbesserte Vergleichbarkeit mit anderen gesammelten Parametern, welche ebenfalls als ungestörten Bodenproben entnommen werden (u.a. P_v , k_f , LK). Allerdings zeigt *Gräsle* auch die Grenzen dieses Messsystems auf. Die gemessenen Werte des SST überschätzen die tatsächlichen Werte von σ_1 , da der Sensorkopf, besonders in locker gelagerten Bodenhorizonten, während der Überfahrt nicht komprimiert werden kann und so einen Konzentrationspunkt für die Spannungseinträge bildet. Die gemessenen Werte von σ_1 nehmen zu (*Kirby*, 1999). *Zink* (2009) bestätigt diese Theorie mit einem Vergleich seiner gemessenen Spannungen mit dem SST und berechneten Spannungen nach *DVWK* (1997).

Der Vergleich der in dieser Arbeit ermittelten Spannungseinträge mit denen anderer Autoren zeigt, dass insbesondere σ_1 von der Auflast beeinflusst wird. Außerdem spielt neben den internen Bodenfaktoren, wozu das Bodengefüge und das Matrixpotenzial zählt, auch die Befahrungintensität als externer Bodenfaktor eine wichtige Rolle bei der vollständigen Betrachtung. Von daher wird in den folgenden Unterkapiteln eine Abhängigkeit der Spannungseinträge von den jeweiligen Faktoren diskutiert.

4.1.1.1 Auflast/Kontaktflächendruck

Die Ergebnisse aus Kapitel 3.2.1.2 verdeutlichen einen auflastabhängigen Effekt der Bodenverdichtung (Fazekas & Horn, 2005; Raper, 2005). Mit steigenden Radlasten sind auf den Versuchsfeldern Reinshof, Vaake und Silberborn die Spannungseinträge der ersten Überfahrt vom *John Deere 1270e* zum *Ponsse Buffalo* angestiegen (Zunahmen zwischen 36 % und 67 %, vgl. Abbildung 25). Eine höhere Auflast führt zur stärkeren plastischen Verformung bis hin zur Bildung von Plattenstrukturen und zu einem erhöhten Setzungsverhalten, was den negativen Einfluss auf die Bodenfunktionen weiter verstärkt (Horn et al., 2004; Zink et al., 2011). Den linearen Zusammenhang zwischen steigenden Spannungseinträgen und höheren P_v -Werten zeigt auch die Korrelationsanalyse aus Kapitel 3.3.2.3, mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,62$.

Die steigenden Werte von σ_1 lassen sich jedoch nicht ausschließlich auf den Faktor Radlast zurückführen. Die Radlasterhöhung fällt teilweise nur gering aus, aber die Spannungseinträge steigen deutlich an. Von großer Bedeutung ist das Verhältnis der vertikalen Gewichtskraft, ausgeübt von der Holzerntemaschine, zur Lastfläche, welches der Kontaktfläche des Reifens entspricht. Der resultierende Kontaktflächendruck ist maßgeblich für die auflastbedingte Druckfortpflanzung. Fazekas (2005), Raper (2005) und Wood et al. (1991) dokumentieren, dass steigende Radlasten zur Erhöhung des Kontaktflächendrucks führen. Im Gegensatz dazu stellen Seehusen et al. (2014) fest, dass bei einer Erhöhung der Radlast von 4,1 Mg auf 6,6 Mg eine durchschnittliche Reduktion von σ_1 um 100 kPa in 20 cm Tiefe gemessen wird. Diese Ergebnisse setzen aber eine deutliche Erhöhung der Kontaktfläche und somit eine gleichzeitige Reduktion des Kontaktflächendrucks von 130 kPa auf 77 kPa voraus. Die steigenden Lasteinträge des Forwarders *Ponsse Buffalo* in der vorliegenden Arbeit lassen sich folgerichtig mit dem Produkt aus steigenden Radlasten und verkleinerter Lastfläche erklären. Die Korrelationsanalyse von Kontaktflächendruck und Spannungseintrag zeigen deutlich den Zusammenhang zwischen steigenden Werten von σ_1 als Ursache von erhöhten Kontaktflächendrücken. Im Oberboden wird diese Beziehung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,82$ belegt (vgl. Abbildung 33). Auch in den anderen beiden Horizonten wird dieser Zusammenhang bestätigt (40 cm: $R^2 = 0,70$; 60 cm: $R^2 = 0,36$; Abbildung 34 und Abbildung 35).

Zur vollständigen Betrachtung der auflastabhängigen Druckfortpflanzung müssen jedoch noch weitere Theorien und Einflussgrößen erörtert werden. Bei zunehmenden Rad- bzw.- Achslasten

und konstanten Kontaktflächen, folglich erhöhten Kontaktflächendrücken, werden die Spannungen tiefer in den Boden eingetragen (Hakansson, 2005; Hartge & Horn, 2014; Lamande et al., 2007; Trautner & Arvidsson, 2003). *Boussinesq* (1885) zeigt mit seinem Walzenmodell, dass unter der Annahme der vollständigen Elastizität des Bodens, Spannungseinträge über die Tiefe gleichmäßig zu allen Seiten und unabhängig von der Textur bzw. der Stabilität abgebaut werden. Aus diesem Modell kann des Weiteren abgeleitet werden, dass die Spannungseinträge lotrecht unter einer Punktlast am größten sind und dass mit zunehmender Tiefe immer größer werdende Bodenvolumina deformiert werden (Boussinesq, 1885; Hartge & Horn, 2014). Nach der Theorie von *Fröhlich* (1934) muss das Walzenmodell jedoch noch um den Konzentrationsfaktor erweitert werden, um die elastoplastischen Eigenschaften des Bodens zu berücksichtigen. Der Konzentrationsfaktor beinhaltet zunächst die Textur und Bodenfeuchte der jeweiligen Böden. Lebert (1989) zeigt, dass für die mechanische Belastbarkeit von Böden jedoch noch weitere Faktoren, wie Scherparameter und Vorbelastung, von Bedeutung sind. In den *DVWK*-Merkblättern (1995) ist daher ein modifizierter Konzentrationsfaktor aufgeführt, welcher zusätzlich zur Textur und Bodenfeuchte auch die Strukturentwicklung der Böden, in Form von verschiedenen Vorbelastungsstufen, berücksichtigt. So führen stabilere Böden zur Senkung des Faktors und somit zu einer verminderten Spannungsausbreitung in die Tiefe.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die auflastbedingte Druckfortpflanzung ist der Reifeninnendruck. Die Kontaktfläche einer Maschine lässt sich über die Minderung des Reifeninnendrucks vergrößern und so den Kontaktflächendruck bei gleicher Radlast senken (Arvidsson & Keller, 2007; Brandt et al., 2007; Danfors, 1994; Ebel, 2006; Frielinghaus et al., 2002; Jun et al., 2004; Keller & Arvidsson, 2004; Lamandé & Schjøning, 2011; Zink, 2009). Der Reifeninnendruck beeinflusst somit indirekt die Druckfortpflanzung. In der Forstwirtschaft ist jedoch die Erhöhung des Reifeninnendrucks während der Holzernte mit Bogiebändern üblich. Die normalen Reifendrucke beim Forwarder *Ponsse Buffalo* und Harvester *John Deere 1270e* liegen während ihrer Einsatzzeiten bei den niedersächsischen Landesforsten bei ca. 350 kPa. Beim potenziellen Einsatz von Bogiebändern wird der Druck aber auf bis zu 700 kPa erhöht, um ein Verrutschen der Bänder zu verhindern und die Stabilität zu gewährleisten. Da nur wenige Holzerntemaschinen mit einem regelbaren Reifendruckventil ausgestattet sind, ergeben sich Momente, an denen die Maschinen ohne Bänder und mit hohem Reifeninnendruck auf Rückegassen unterwegs sind. Dies

bedeutet einen erhöhten Kontaktflächendruck als Konsequenz von verminderter Lastfläche und führt somit zu unnötig hohen Spannungseinträgen.

4.1.1.2 Befahrungsintensität

Als weiterer Faktor für die Druckfortpflanzung der Spannungseinträge in Böden ist die Befahrungsintensität zu berücksichtigen. Die Überrollhäufigkeit einer Rückegasse ist von der Länge, der geernteten Holzmenge und der Ladekapazität abhängig (FVA-BW, 2003). Neben der Erstüberfahrt mittels Harvester zur Ernte, folgt der Abtransport mit dem Forwarder (Apel, 2001). In dieser Arbeit werden drei Effekte während der wiederholten Befahrung dokumentiert. Dabei unterscheidet sich die erste Beobachtung von den beiden weiteren in der unterschiedlichen hohen Intensität der eingetragenen Spannungen im Oberboden:

(1) Bei Werten von $\sigma_1 < 200$ kPa im Oberboden, werden in allen drei Tiefen abnehmende Werte von σ_1 mit zunehmender Überfahrtenanzahl registriert. Die Korrelationen für das Verhalten von gesteigerter Überrollhäufigkeit und abnehmender Spannungseinträge zeigen im Oberboden ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,56$, in 40 cm Tiefe von $R^2 = 0,69$ und in 60 cm Tiefe von $R^2 = 0,57$ (vgl. Abbildung 33, Abbildung 34 & Abbildung 35). Diese Beobachtungen teilen auch *Becher* (2004), *Seehusen et al.* (2014), *Semmel* (1993), *Wiermann et al.* (1999) und *Zink* (2009) in ihren Studien.

(2) Bei Werten von $\sigma_1 > 200$ kPa wird an den Versuchsstandorten Reinshof, Vaake, Göttingen und Hasbruch eine hohe Spannungsabnahme von der ersten zur zweiten Überfahrt in den oberen beiden Horizonten festgestellt. Jede weitere Überfahrt sollte theoretisch zur fortschreitenden Kompaktierung beitragen. Für den zuvor beschriebenen Konzentrationsfaktor hätte dieser Prozess sinkende Werte zur Folge, da der Boden stabiler gegenüber mechanischer Auflast wird. Diese Stabilisierung drückt sich in der Erhöhung von P_v aus (Horn & Fleige, 2004). Der, durch die Erstverdichtung, kleiner gewordene Konzentrationsfaktor beeinflusst wiederum die Druckfortpflanzung positiv und die eingetragenen Spannungen werden während der zweiten Überfahrt besser seitlich abgebaut, die Werte von σ_1 in der Tiefe sinken. *Hamza & Anderson* (2005) und *Soane et al.* (1980) bestätigen, dass der ersten Überfahrt das größte Verdichtungspotenzial für den Oberboden zugeschrieben wird, während die Auswirkungen auf den Unterboden erst nach mehrfacher Befahrung zu beobachten sind.

(3) Auf die Abnahme von σ_1 zwischen erster und zweiter Überfahrt folgt an den Standorten Reinshof, Vaake, Silberborn und Göttingen (partiell) keine weitere Reduktion der Spannungseinträge, sondern eine Zunahme mit gesteigerter Befahrungintensität. Am Standort Silberborn werden konstant steigende Werte von σ_1 in 20 cm und 40 cm Bodentiefe festgestellt. Die durchgeführte Korrelationsanalyse verdeutlicht tendenziell den Zusammenhang von steigenden Spannungseinträgen und steigender Überfahrtenanzahl mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,46$ (20 cm) im Oberboden. Beobachtungen von steigenden Spannungseinträgen bei mehrfacher Befahrung machen auch *Horn & Rostek* (2000), *Horn et al.* (2003) und *Pytka* (2005). Durch die additive Wirkung einer Mehrfach-Überfahung und der fortschreitenden Setzung wird σ_1 tiefer in den Boden eingetragen und erhöht gleichzeitig die Gefahr der Unterbodendegradierung (*Horn et al.*, 2003; *Petelkau et al.*, 1998; *Semmel & Horn*, 1994). So liegen beispielsweise die Gesamtauswirkungen in Reinshof in der Tiefe 60 cm bei fünf von sechs Parametern für die Mehrfach-Überfahrt und bei „nur“ zwei von sechs Parameter für die Einfach-Überfahrt (vgl. Abbildung 22).

Als Folge aus dem unter Punkt (3) beschriebenen Spannungsanstieg kann ein Grundbruch resultieren (*Borchert*, 2008; *LWF*, 2012; *Nemestothy*, 2009). Nicht zu verwechseln mit dem Grundbruch ist das Einsinken der Maschine in die Humusaufgabe (*Borchert*, 2008), denn ein Grundbruch beschreibt das Durchbrechen der organischen Auflage und des Oberbodens mit seitlichen Aufwölbungen aus durchmischtem Material (*Lüscher et al.*, 2010). *Lüscher et al.* (2005) unterscheiden drei Typen der Fahrspurausbildung. Typ I (Fahrspurtiefe $\ll 10$ cm) wird durch das Einsinken der Holzerntemaschine in den Oberboden charakterisiert, wohingegen bei dem Typ II die organische Auflage durchbrochen wird und die Maschine in den Oberboden einsinkt. Typ III (Fahrspurtiefe $\gg 10$ cm) stellt den Grundbruch mit Eindringen in den Unterboden dar.

In der Bodenmechanik wird der Grundbruch durch das Wegbrechen des Bodens unter zu starker Krafteinwirkung charakterisiert. Die Scherfestigkeit des Bodens wird überschritten und daraus resultiert ein seitlicher Versatz des Bodenmaterials entlang einer Gleitfuge (*Hartge & Horn*, 2014). Nach der *Rankine*-Theorie, welche den Boden in eine aktive und passive Zone, sowie einem radialen Gleitbereich zwischen diesen Zonen einteilt, tritt eine seitliche Aufwölbung von verschobenem Bodenmaterial im Winkel von $45^\circ - \varphi/2$ (φ = Winkel der inneren Reibung) zur Oberfläche einhergehend mit dem Prozess des Grundbruchs ein. Der aktive Bereich definiert dabei den Bereich direkt unterhalb der Lastfläche, die weiter in den Boden eingetrieben wird. Die Maschine „sinkt“ hierdurch in den Boden ein. Damit wird aber gleichzeitig auch die den Druck

kompensierende Scherfläche zu allen Seiten hin erhöht. Neben der aktiven „Fläche“ im zweidimensionalen Raum ergibt sich beidseitig ein Zwischenbereich, welcher gedreht wird. Hieran schließt sich dann das Bodenvolumen und die Scherflächen, die als passiver Bereich angehoben werden. Die Bruchflächen verlaufen stets im Winkel von $45^\circ + \varphi/2$ zu den eigetragenen Spannungen. Aus der Winkelbeziehung ergibt sich, dass die durch die einsinkende Maschine verdrängte Bodenmasse im passiven Bereich kompensiert wird.

Die beobachteten steigenden Spannungseinträge der Holzerntemaschinen während der Überfahrungsversuche sind die Konsequenz aus dem Einsinken der Maschine in den Boden und das Verdrängen des Bodenmaterials zur Seite. Durch das kontinuierliche Einsinken mit gesteigerter Anzahl an Überfahrten verkleinert sich die Distanz zwischen Sensorkopf und Reifen und die Werte von σ_1 steigen, was als Indiz des Grundbruchs gewertet wird. Durch die steigende Spannungseinträge entstehen in den geringeren Bodenvolumina irreversible Schäden an der Bodenstruktur, was anhand der Ergebnisse mit den absolut größten Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter nach der Mehrfach-Überfahrt bestätigt wird (vgl. Kapitel 3.2.1). Die Differenz zwischen σ_1 und P_v des Bodens ist so groß, dass die Widerstandskraft des Bodens nicht ausreicht, um der punktuellen Auflast entgegen zu wirken. Diesen Zustand verdeutlichen die Ergebnisse aus der Stabilitätsbewertung (σ_1/P_v) nach *Horn & Fleige* (2003). Das Verhältnis aus Spannungseintrag und Eigenstabilität des Bodens an den Standorten Reinshof, Vaake und Silberborn im Oberboden befindet sich zwischen 0,1 und 0,3 (z.B. Tabelle 24) und in 40 cm Tiefe zwischen 0,2 und 0,5 und liegt in beiden Tiefen deutlich im instabilen Bereich.

Aus der Kombination von geringen Stabilitätswerten und der Grundbruchtheorie, infolge von zunehmenden Spannungseinträgen bei erhöhter Befahrungsintensität, lässt sich eine direkte Beziehung zur technischen Befahrbarkeit ableiten. Die Bodenmatrix ist nicht in der Lage die Auflast der getesteten Holzerntemaschinen zu tragen und es kommt als Folge des Grundbruchs zum Verlust der Tragfähigkeit. Die beobachteten Spurtiefen mit seitlichen Aufwölbungen an den jeweiligen Versuchsstandorten bestätigen diese Theorie. Neben den aufgezeigten Einflüssen auf die bodenphysikalischen Parameter (vgl. Kapitel 4.1) ist ebenfalls ein vollständiger Verlust der technischen Befahrbarkeit bei weiterer Befahrung zu befürchten. Mit dem Einsatz des *John Deere 1270e* und des *Ponsse Buffalo* wird auf den Lössstandorten auch das Minimalziel „Erhaltung der technischen Befahrbarkeit“ verfehlt.

4.1.1.3 Bodengefüge

Natürliche Alterungsprozesse im Boden, wie zum Beispiel Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge, führen zur Ausbildung von Aggregaten und Strukturierung des Bodens und überlagern die alleinigen Textureffekte. Die Prozesse der Bodengenese haben Einfluss auf die Bodenstabilität, welche wiederum Auswirkungen auf die Spannungseinträge haben (Horn, 1990; Horn & Dexter, 1989; Horn et al., 1994). *Baumgartl & Horn* (1991) zeigen zum Beispiel, dass die Bodenstabilität mit steigendem Aggregierungsgrad weiter zunimmt, so dass Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge in tonhaltigen Böden zur deutlichen Stabilitätssteigerung beitragen. Die Bodenstabilität steigt mit zunehmender Gefügeentwicklung von Kohärent- < Prismen- < Polyeder- < Subpolyedergefüge (*Horn & Peth*, 2009). Durch mehrmaliges Be- und Entwässern des Bodens wird die Gefügeentwicklung begünstigt (*Peng et al.*, 2007), Risse entstehen und Bodenpartikel werden umgeordnet bzw. neu gebildet (*Smiles*, 2000). Überschreitet der aktuelle Grad der Austrocknung nicht die jemals Stärkste, so finden kaum Änderung innerhalb der Bodenstruktur statt (*Peng et al.*, 2007).

Neben der stabilisierenden Wirkung der Gefügeentwicklung haben organische Stoffe, Oxide, Carbonate und viele andere Stoffgruppen ebenfalls einen positiven Einfluss auf die Bodenstabilität (*Baumgarten et al.*, 2013; *Markgraf et al.*, 2012; *Zhang & Horn*, 2001). Eine Verkittung von einzelnen Tonteilchen mit Eisen oder Aluminiumoxiden führt zum Beispiel zur Ausbildung von Pseudosand, welcher im Gelände die Eigenschaften eines Sandes aufzeigt und erst strukturbereinigt seine „wahre Identität“ offenbart. Neben der natürlichen Alterung und Verkittung unterliegen sämtliche Böden einer Belastungsgeschichte. *Horn* (1981) veranschaulicht mit dem Konzept zur Vorbelastung, dass Böden, beispielsweise durch Eiszeiten, bereits eine Vorverdichtung erfahren haben. Diese Vorverdichtung kann auch in der jüngeren Vergangenheit durch extreme Austrocknung aber auch durch andere Befahrungsereignisse oder generell in tieferen Bodenhorizonten durch das Eigengewicht des Bodens erfolgt sein. Ein alleiniger Effekt der Textur ohne Berücksichtigung der Bodenstruktur und Bodengeschichte führt folglich zu einer verzerrten Darstellung und sollte beim folgenden Vergleich der texturabhängigen Spannungsausbreitung berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der texturabhängigen Korrelationsanalyse (Abbildung 36 & Abbildung 37) veranschaulichen, dass im Oberboden ein deutlicher Zusammenhang zwischen Abnahme des Schluff-

anteils ($R^2 = 0,73$) bzw. Zunahme des Sandanteils ($R^2 = 0,64$) und der Höhe des Spannungseintrages besteht. In 40 cm Tiefe lässt sich allerdings bei geringeren Werten des Bestimmtheitsmaßes eine ähnliche Tendenz beobachten. In 60 cm Bodentiefe werden auf Grund der geringen Spannungseinträge keine Effekte mehr beobachtet. Mit Hilfe eines möglichen Textureffektes könnte auch die ausbleibende Abnahme von σ_1 zwischen erster und zweiter Überfahrt in Silberborn gedeutet werden. Der Sandanteil am Versuchsstandort Silberborn ist deutlich erhöht und im Vergleich zu den feineren Strukturen Schluff und Ton, liegen bei dem Sand im unverdichteten Zustand grundsätzlich direkte Korn-zu-Korn Kontakte vor, was die Stabilität erhöht (Boussinesq, 1885; Fröhlich, 1934). Dieser Theorie entsprechen die deutlich höheren P_v -Werte der Referenz in Silberborn (vgl. Tabelle 22). Als Folge dieser Konstellation findet während der erstmaligen Befahrung keine ausgeprägte Setzung statt, wie an den anderen Lössstandorten und die Spannungseinträge steigen bereits nach der ersten Überfahrt an (vgl. Abbildung 8).

Eine Abhängigkeit der Spannungseinträge vom Ausgangssubstrat wird in der Literatur bislang nicht eindeutig nachgewiesen. So können *Zink et al.* (2010) in ihrer Studie keine Unterschiede bei der Ausbreitung von σ_1 für unterschiedliche Ausgangssubstrate (Geschiebelehm und Löss) feststellen. Bei der vergleichenden Betrachtung ihrer Standorte ermitteln sie eine Abnahme der Spannungseinträge um 40 % von 20 cm auf 40 cm Bodentiefe und um 75 % von 20 cm auf 60 cm analog für beide Substrate. Allerdings ist die Streubreite der Spannungseinträge an den Geschiebemergelstandorten größer, was auf die höhere Texturheterogenität zurückgeführt wird. Zu ähnlichen Schlüssen gelangen auch *Kühner* (1997) und *Pytka* (2005). Beide unternehmen Überfahrungsversuche auf sandig-lehmigen (z. B. Bodenart Sl4) und tonig-schluffig texturierten (z. B. Bodenart Ut2) Böden und können keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Druckfortpflanzung bzw. des Gesamtspannungseintrages dokumentieren. Lediglich ein erhöhter Skelettanteil trägt zu unterschiedlicher Fortpflanzung der Spannungseinträge in den Unterboden bei. *Horn* (1986) führt die unterschiedliche Spannungsausbreitung bei seinen Untersuchungen in Süddeutschland auf den hohen Skelett-Anteil (>35 %) und nicht auf die Zusammensetzung der Bodentextur zurück. Allerdings beobachten *Pytka et al.* (2006) und *Pytka* (2010) bei weiteren Spannungsmessungen mit Maschinen auf Sand- und Lössböden tendenziell höhere Spannungseinträge auf dem Lössboden, welche aber nicht signifikant sind.

4.1.1.4 Matrixpotenzial

Einen Zusammenhang von Matrixpotenzial und Ausprägung der Spannungseinträge wird bei Versuchen mit Baumaschinen auf einem Lössboden dokumentiert. Auf Parzellen mit zusätzlicher Bewässerung, folglich höherem Matrixpotenzial, werden höhere Spannungseinträge dokumentiert als auf den benachbarten unbewässerten Versuchszellen. (Berli et al., 2003; Berli et al., 2004). Ähnliche Beobachtungen macht auch *Fenner* (1997) bei seinen Untersuchungen. *Hakansson & Reeder* (1994) und *Olsen* (1994) zeigen in ihren Studien, dass Spannungseinträge bei feuchten Bedingungen zu einer erhöhten Unterbodenverdichtung führen. *Hakansson & Reeder* (1994) dokumentieren des Weiteren, dass eine Achslast von 10 Mg bis in eine Tiefe von 50 cm wirkt und irreversibel ist. Die Abhängigkeit der Bodenstabilität von der Bodenfeuchte und der Strukturierung wird anhand mehrerer Studien dokumentiert (*Baumgartl & Horn*, 1991; *Horn et al.*, 1994; *Lebert & Horn*, 1991) und wurde bereits im vorherigen Kapitel detailliert erläutert. Die Autoren beschreiben stabileres Verhalten bei trockneren Bedingungen sowie zunehmender Aggregation des Bodens.

Neben der Korrelationsanalyse zwischen Matrixpotenzial und Spannungseinträgen, welche einen positiven linearen Zusammenhang von steigenden Matrixpotenzialen und höheren Spannungseinträgen im Oberboden mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,79$ (Abbildung 33) und in 40 cm Tiefe mit Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,58$ (Abbildung 34) aufzeigen, sind die Ergebnisse des Drucksetzungsverhaltens bezüglich des Matrixpotenzials ein weiteres Indiz für diese Theorie. *Baumgartl* (2003) und *Junge* (1999) zeigen, dass die Bodenstabilität als Folge eines erhöhten Sättigungsgrades des Porensystems und eines resultierenden Verlustes der kapillaren Kohäsion sinkt.

Die Auswertung der Entwicklung des Matrixpotenzials bei Befahrungsversuchen auf Böden, die mit -60 hPa (Feldkapazität) die hydraulischen Bedingungen des zeitigen Frühjahrs widerspiegeln, veranschaulicht die auflastbedingte und von der Befahrungsintensität abhängige Zunahme des Matrixpotenzials bis zu -3 hPa bei einer statischen Belastung von 400 kPa (vgl. Tabelle 36). Da der Wert von -3 hPa erst nach einer 2-stündigen Konsolidierungsphase dokumentiert wird, sind anfängliche Porenwasserüberdrücke realistisch (vgl. Abbildung 2). Als Folge der Kompression und sinkenden k_f -Werten wird freies Porenwasser nicht abgeführt und die abfließende Wassermenge übersteigt die Leitfähigkeit des Bodens (*Horn et al.*, 1995). Solange das mobilisierte Was-

ser nicht abfließt, trägt die inkompressible Wasserphase einen Teil der Auflast. Als Folge dieses Zustands finden bei hohen Auflasten Knetungsprozesse statt, so dass es zu einer Homogenisierung der Bodenstruktur kommt und die horizontspezifischen Bodenstabilitäten in Form von P_v sinken (Fazekas, 2005; Fazekas & Horn, 2005). Die Abhängigkeit der Bodenstabilität von der Bodenfeuchte und der Strukturierung wird anhand mehrerer Studien dokumentiert (Baumgartl & Horn, 1991; Horn et al., 1994; Lebert & Horn, 1991). Die Autoren beschreiben stabileres Verhalten bei trockneren Bedingungen sowie zunehmender Aggregierung. Der Prozess der Homogenisierung lässt sich bei sehr feuchten Bedingungen (Ψ_M -30 hPa) für die Variante *Rottne F14* am Versuchsstandort Hasbruch beobachten. Aus Tabelle 37 ist zu entnehmen, dass bei einer Belastung von 80 kPa bereits positive Matrixpotenziale (Porenwasserüberdrücke) auftreten. Der *Rottne F14* erzielt σ_1 -Werte um die 300 kPa während der Feldversuche und verursacht Porenwasserüberdrücke was zur Homogenisierung führt. Gebhardt et al. (2009) und Schafer-Landefeld et al. (2004) vertreten die Meinung, dass hohe Bodenwassergehalte die Knetungsprozesse fördern und zur Strukturzerstörung beitragen. Infolge der Homogenisierung sinkt die Bodenstabilität und resultiert dann in texturbedingten Leitfähigkeitswerten (Dexter, 1988). Die eigenen Untersuchungen zeigen neben den negativen Auswirkungen auf sämtliche Bodenfunktionen auch sinkende P_v -Werte im Oberboden (vgl. Abbildung 27), welche den Nachweis zum Homogenisierungsprozess und dem vollständigen Verlust der Befahrbarkeit liefern. Auch die Betrachtung der Spurtiefen verdeutlicht den Prozess der Homogenisierung. Während bei trockneren Bedingungen eine fünf-fache Überfahrt (*Ponsse Buffalo*) zu Spurtiefen von 10-15 cm führt, erreicht der *Rottne F14* nach dreimaliger Überfahrt bereits Spurtiefen von 30 cm. Im Vergleich zu diesen Werten zeigen Einfach-Befahrungen mit Holzerntemaschinen Werte um die 8 cm Spurtiefe auf.

Die Auswertung zum Matrixpotenzial verdeutlicht einen erheblichen Einfluss des Matrixpotenzi- als auf die Bodenstabilität und somit auch auf die Spannungseinträge. Die Änderung des Matrixpotenzi- als als Folge der mechanischen Belastung beschreibt die Veränderungen der hydraulischen Bodenverhältnisse über die Zeit während eines Druck-Setzungs-Verhaltens. Ansteigende Matrixpotenziale, bis hin zu Porenwasserüberdrücken, infolge gesteigerter Auflast führen durch die Ausbildung von Wasserfilmen zu Strukturdegradierung sowie zu einer geringeren Belastbarkeit des Bodens. Infolge dieser Destabilisierung sinken die Maschinen in den Boden ein und verursachen tiefe Fahrspuren mit seitlichen Aufwölbungen wie sie in der Grundbruchtheorie beschrieben werden (vgl. Kapitel 4.1.1.2.).

4.2 Möglichkeiten zur Spannungsreduzierung und nachhaltigeren Nutzung von Böden

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Versuchsstandorte Göttingen, Hasbruch, Lenglern, Wiedelah und Wülperode hinsichtlich ihres Potenzials zur Spannungsreduktion einzeln diskutiert, da an jedem Versuchsstandort unterschiedliche technische bzw. natürliche Möglichkeiten untersucht werden und die Fragestellungen variieren. In Göttingen werden die Versuche mit Bogiebändern, im Hasbruch mit der Spezial-Kettenmaschine (*EMB Elliator*) und in Lenglern mit Spezial-Laufwerken (z.B. *Hägglunds*) sowie grundsätzlich niedrigeren Maschinengewichten durchgeführt. An den Standorten Wiedelah und Wülperode wird eine potenzielle Wurzelarmierung untersucht.

4.2.1 Einsatz von Maschinenmodifikationen (Bogiebänder)

Ein Studie von *Bygdén et al.* (2003) dokumentiert, dass Bogiebänder die Ausbildung von Fahrspuren um 40 % im Vergleich zur Radvariante reduzieren können, obwohl sie zusätzliches Gewicht ($\sim 1,7$ Mg) mit sich bringen. Außerdem zeigen ihre Ergebnisse, dass der relative Rollwiderstand durch die Verwendung von Bogiebändern nicht erhöht wird und somit keine zusätzliche Kraft ausgeübt werden muss. Der Eindringwiderstand in den Fahrspuren ist um 10 % reduziert. Folglich haben Bogiebänder einen positiven Effekt, denn sie führen zu geringerer Bodenverdichtung.

Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit kann allerdings kein positiver Einfluss der Bogiebänder auf die bodenphysikalischen Parameter nachgewiesen werden. Im Oberboden liegt der Anteil der negativ veränderten Parameter bei sechs von sechs für die Variante PB (ohne Bogieband), bei fünf von sechs für die Variante MB (Moorband) und bei vier von sechs für die Variante TB (Traktionsband). Betrachtet man zusätzlich die Tiefen 40 cm und 60 cm, ergeben sich variierende Tendenzen, so dass ein möglicher Vorteil der Bändervarianten umgehend entkräftet wird (vgl. Abbildung 26). Das Verhältnis von σ_1 und P_v liegt im Oberboden für alle drei Varianten und jede Überfahrt bei 0,1 und verdeutlicht die instabilen Verhältnisse. *Gerasimov & Katarov* (2010) zeigen ebenfalls, dass Bogiebänder an einem dreiachsigen Forwarder *Ponsse ELK* (Zuladung 13 Mg) die Fahrspurtiefe minimieren können. Unter feuchten Bedingungen auf Schlufflehmen (Bodenfeuchte von 93 %) dokumentieren sie Spurtiefen, welche um 23 cm und unter trockneren Bedingungen (Bodenfeuchte von 80 %) um 18 cm reduziert werden können. Nach zehnfacher Über-

fahrung können keine Unterschiede für ρ_B zwischen der Bogieband-Variante und der Radvariante festgestellt werden. *Ansorge & Godwin* (2007) dokumentieren ebenfalls geringere Fahrspurausbildungen unter Gummibändern als unter einfachen Reifen in Laborversuchen.

Eine mögliche Reduktion der Spurtiefe durch den Einsatz eines Bogiebandes kann in der vorliegenden Arbeit nur für die Variante Moorband bestätigt werden. Die Ergebnisse der Spannungsläufe in Abbildung 12 zeigen abnehmende Spannungseinträge in 20 cm und 40 cm Tiefe und ansteigende Werte von P_v . In diesem Fall entsteht zwischen den Spannungseinträgen und P_v ein neues Gleichgewicht und der Boden kann hinsichtlich der technischen Befahrbarkeit als stabil eingestuft werden (Horn & Fleige, 2004). Die Entwicklungen der Spannungseinträge der Varianten ohne Bogieband und mit Traktionsband verlaufen, nach den bereits gewonnenen Erkenntnissen, erwartungsgemäß. Im Oberboden und in abgeschwächter Form in 40 cm Tiefe fallen die Werte von σ_1 auf dem schluffigen Standort nach der ersten Überfahrt zunächst deutlich ab und steigen dann mit zunehmender Überfahrtenanzahl wieder an. Sie liegen nach der zehnten Überfahrt bei der Variante PB bei ca. 400 kPa und bei der Variante TB bei ca. 500 kPa. So ein Effekt wurde bereits bei der Befahrung mit den Holzerntemaschinen an den Standorten Reinshof, Vaake und Silberborn festgestellt und in Kapitel 4.1.1.2 mit der Theorie des Grundbruches erläutert. Für die Varianten PB und TB gelten dieselben Bedingungen und ein Verlust der technischen Befahrbarkeit kann vorausgesagt werden.

Auf Grund der unterschiedlichen Konstruktionsweise des Traktionsbandes können die Spannungseinträge nicht wie beim Moorband reduziert werden. Das Traktionsband ist zum Einsatz der Holzerntemaschinen im steilen Gelände bzw. zur besseren Traktion entwickelt worden (Culshaw, 1988; Edlund et al., 2013; Pijuan et al., 2012; Potau et al., 2011). Durch kantige Stahlstege, welche in den Boden greifen, soll die Traktion erhöht und Schlupf vermieden werden. Aus diesem Grund können bei dieser Variante auch die maximalen Spannungseinträge gemessen werden, da unter den schmalen Stegen eine Spannungskonzentration deutlich messbar zum Tragen kommt (Horn, 2003).

Der Vergleich der Spannungseinträge nach der zehnten Überfahrt verdeutlicht die unterschiedliche Wirkung beider Bänder. Mit ca. 270 kPa sind die Spannungseinträge des Moorbandes im Vergleich zu den anderen beiden Varianten um 130 kPa (kein Band) bzw. 230 kPa reduziert (Traktionsband). Durch die deutlich vergrößerte Aufstandsfläche des Moorbandes kann die Last

der Maschine auf ein größeres Bodenareal verteilt werden und die Spannungseinträge sinken (Ansorge & Godwin, 2007; Arvidsson et al., 2011; Boussinesq, 1885). Da aber auch bei dieser Variante anfangs eine sehr hohe Differenz zwischen Spannungseintrag und Eigenstabilität des Bodens dokumentiert wird und diese Differenz nur langsam abgebaut werden kann, sind die Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter ähnlich gravierend wie für die Varianten ohne Band (PB) und mit Traktionsband (TB).

4.2.2 Einsatz einer Spezialmaschine

Arvidsson et al. (2011) vergleichen Spannungseinträge unter Einfach- und Doppelbereifung sowie Gummikette und deren Auswirkungen auf den Eindringwiderstand des Bodens, ρ_B und k_f . Die Ergebnisse zeigen signifikante Unterschiede zwischen Kette und Reifen. Neben einem geringeren Anstieg von ρ_B und des Eindringwiderstandes sind die Abnahmen von k_f unter der Kette geringer als unter der Einzelradvariante. Außerdem bestätigt die Studie die Annahme von geringerem Schlupf unter Ketten, wie es bereits von Okello et al. (1994) beschrieben wird.

Deutliche Vorteile hinsichtlich der Spannungseinträge zeigen auch die Befahrungsversuche mit dem *EMB Elliator*. Die Werte von σ_1 können im Vergleich zum *Rottne F14* um 64 % bei identischer Zuladung (9 Mg) reduziert werden (vgl. Abbildung 29). Auch die Tiefe der Fahrspuren fällt deutlich geringer aus (EMB: 7 cm; Rottne F14 >25 cm). Positive Effekte von Ketten bzw. Bändern hinsichtlich der Fahrspurausbildung veranschaulichen auch andere Autoren mit Versuchen im Labor und im Gelände (Ansorge & Godwin, 2007; Gerasimov & Katarov, 2010). Edlund et al. (2012) zeigen in ihrer Studie jedoch, dass die Vorteile von Bandlaufwerken nur auf einem linearen Abschnitt zum Tragen kommen, während auf einem S-förmigen Kurs tiefere Fahrspuren als bei Radmaschinen dokumentiert werden.

Obwohl die Spannungseinträge deutlich reduziert und keine zunehmenden Werte von P_v als Folge der auflastbedingten Verdichtung dokumentiert werden, sind dennoch Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter zu beobachten. Die Werte von k_f , ρ_B , LK sowie GPV unterliegen einem signifikanten Einfluss. Das starre Laufwerk des *EMB Elliators* verursacht durch 21 kleine Laufrollen leichte Vibrationen, welche während der Überföhrung deutlich zu beobachten sind. Die Vibrationen verursachen wiederum einen ähnlichen Effekt wie für die Thixotropie beschrieben wird (Ackermann, 1948). Durch die Erschütterungen bzw. Vibration werden einzelne Bodenpartikel eingeregelt was zur Verringerung des Porenanteils und somit zum Verlust von weiten

Grobporen (LK) bei gleichzeitigem Anstieg von ρ_B führt. Die deutliche Abnahme der gesättigten Leitfähigkeit lässt sich durch scherende Effekte der Kette erklären (Horn, 2003). *Horn* zeigt in seinen Untersuchungen dass beim Einsatz eines Gummibands der horizontale Bodenversatz (40 mm) in 10 cm Bodentiefe deutlich stärker ausfällt als der Vertikale (8 mm) und einen erheblichen Einfluss auf die Porenkontinuität hat. Die durch die Laufrollen des *EMB Elliators* erzeugten Vibrationen können auch mit dem Vorgang der zyklischen Belastung mit 21 Belastungszyklen gleichgesetzt werden. *Krümmlbein et al.* (2008) veranschaulichen in ihrer Studie, dass infolge zyklischer Belastung eine weitere Aufsättigung der Proben zu beobachten ist und eine Art Pumpwirkung einsetzt. Zusätzliches Porenwasser wird mobilisiert bzw. umverteilt und kann bei einer hohen Belastungsfrequenz zur Bodenverflüssigung (Liquefaction) führen. Dieser Effekt kann im Gelände jedoch nicht beobachtet werden. Aus den gesammelten Erkenntnissen wird deutlich, dass die Spezialmaschine die Spannungseinträge deutlich reduzieren kann und so selbst bei sehr feuchten Bedingungen keine Gefahr für die technische Befahrbarkeit besteht. Allerdings werden auch bei dieser Variante erhebliche Einflüsse auf die bodenphysikalischen Parameter im Oberboden beobachtet. Der Grund hierfür kann eindeutig auf die vibrierende Wirkung des starren Kettenlaufwerks zurückgeführt werden.

4.2.3 Einsatz von kleineren Maschinen

Die am Versuchsstandort Lengler eingesetzten Maschinen weisen im Vergleich zu den getesteten Holzerntemaschinen deutlich niedrigere Gewichte und Radlasten auf. Die Gewichtsreduktion führt zu deutlich verminderten Spannungseinträgen und geringeren negativen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen. Besonders im Bereich der Unterbodendegradierung haben die „kleineren“ Maschinen einen deutlichen Vorteil. Der im Unterboden beeinflusste Anteil an Parametern beträgt maximal 33 % nach der fünften Überfahrt (Abbildung 28). *Zink* (2009) verdeutlicht anhand einer umfassenden Studie den Zusammenhang von höheren Auflasten und abnehmenden Bodenfunktionswerten mit Radlasten von 3,3 Mg, 6,3 Mg und 7,5 Mg bei verschiedenen Ausgangssubstraten (Geschiebemergel und Löss). In einer weiteren Studie zeigt *Zink* mittels des *Compaction Verification Tools*, dass besonders hohe Radlasten (in dem Fall 7,5 Mg) schadhafte Konsequenzen für die Unterbodenverdichtung aufweisen (*Zink et al.*, 2011).

Die Forderung einer Radlastbeschränkung ist die logische Konsequenz und existiert bereits seit geraumer Zeit. *Danfors* (1994) unterstreicht mit Versuchen auf lehmigen Böden in Schweden

seine bereits Anfang der 70er Jahre aufgestellte Forderung der Radlastbegrenzung für die Landwirtschaft von 6 Mg. Im Zuge der Zeit werden die Begrenzungen durch weitere Versuche auf unterschiedlich texturierten Böden weiter nach unten korrigiert. *Semmel & Horn* (1994) zeigen bei Versuchen auf einer Parabraunerde auf Löss, dass die Radlasten im Sinne des Bodenschutzes 4 Mg nicht überschreiten sollten, während *Horn & Fleige* (2009) eine Beschränkung auf 3,3 Mg bei Feldkapazität einer Pseudogley-Parabraunerde aus Geschiebemergel für angebracht halten. *Petelkau* (1998) spricht sogar von Grenzen zwischen 1,5 Mg und 2 Mg. Die Ergebnisse der genannten Autoren lassen sich durch die ähnlichen Ausgangsbedingungen direkt auf diese Arbeit übertragen und veranschaulichen, dass an den meisten Standorten die geforderten Radlastbegrenzungen überschritten werden. Neben den Forderungen zur Radlastbeschränkung gibt es auch Vorschläge zur Begrenzung des Kontaktflächendruckes und eines tiefenabhängigen maximalen Spannungseintrages (*Hakansson*, 2005; *Rusanov*, 1994; *Tijink et al.*, 1995).

Eine deutliche Reduktion des Kontaktflächendrucks erzielt die getestete Maschine *Hägglunds*. Durch die Kombination aus geringem Gewicht und erhöhter Aufstandsfläche sind die mit Abstand geringsten Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter zu beobachten. Während im Oberboden nur P_v signifikant und GPV tendenziell negativ beeinflusst werden, finden sich im Unterboden keine schadhafte Veränderungen. Die Betrachtung der Bodenstabilitätsanalyse ergeben für den *Hägglunds* überwiegend stabile Verhältnisse, selbst im Oberboden. Für die Varianten JD6 und SCH (Holzanhänger) zeigt die Auswertung instabile Verhältnisse für den Oberboden, größtenteils labile Verhältnisse für den Bv1-Horizont und stabile Verhältnisse für den Bv2-Horizont (Tabelle 33). Aus der Betrachtung der Spannungsverläufe wird deutlich, dass für keine Maschine ein Verlust der technischen Befahrbarkeit zu befürchten ist. Die Spannungseinträge der Varianten JD6 und SCH nähern sich schnell einem steigenden P_v -Wert an, die des *Hägglunds* sind grundsätzlich niedriger und somit nicht im Bereich einer nachhaltigen Schädigung.

Der Unterschied zwischen variablem und starrem Kettenlaufwerk ist bis zum jetzigen Zeitpunkt der Diskussion, ausschließlich auf die deutlich kleinere Kontaktfläche des starren Laufwerks (JD6) zurückzuführen. Aus diesem Grund wurde in Lenglern ein Extremtest mit beiden Varianten simuliert. Die Ergebnisse der einfachen Baumstamm-Überfahung (Durchmesser 14 cm) dokumentieren eine deutliche Erhöhung der Spannungseinträge für beide Kettenlaufwerke im Oberboden. In 40 cm wurde allerdings nur beim starren Laufwerk eine deutliche Erhöhung von σ_1 festgestellt (vgl. Abbildung 30). Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass das variab-

le Laufwerk durch die Anpassung der einzelnen Laufrollen die Spannungen insgesamt besser abbauen kann als das starre Laufwerk. Die gemessene Eindringtiefe des Baumstammes (starres Laufwerk: 12 cm, variables Laufwerk: 4-5 cm) unterstützt diese Theorie. Vibrationen können bei diesem Versuch weder für das starre noch das variable Laufwerk festgestellt werden.

4.2.4 Wurzelarmierung und Reisigauflage

Der Einsatz von Reisigmaterial auf der Bodenoberfläche einer Rückegasse oder ein intensives Durchwurzeln des Bodens haben zum Ziel, die fragile Oberbodenstruktur eines Waldbodens zu schützen und zu stabilisieren. Die punktuellen Spannungseinträge der Holzerntemaschinen während einer Befahrung sollen besser abgeleitet werden und so die Auswirkungen auf die Bodenfunktionen und die -struktur zu minimieren. Die Theorie zur armierenden Wirkung von Wurzeln wird bereits in der Einleitung vorgestellt und beruht auf der Kombination von der Zugfestigkeit der Wurzeln, dem erhöhten Oberflächeneffekt und dem durch die durchgehenden Wurzeln verringerten Kompressionsvermögen des Bodens (Gray & Leiser, 1989). Diese Annahme wird von weiteren Autoren durch *in situ* Schertests und Laborversuche bestätigt (Docker & Hubble, 2008; Fan & Su, 2009; Operstein & Frydman, 2000; Tengbeh, 1993; Wu & Watson, 1998). In welchem Ausmaß die Wurzeln jedoch zur Bodenstabilisierung beitragen können, ist abhängig von der Wurzelmasse, dem Wurzeldurchmesser, der Durchwurzeltiefe, der Wurzelarchitektur, der Reißfestigkeit und der Auszugsfestigkeit (Dupuy et al., 2005; Loades et al., 2010; Mickovski et al., 2007; Norris, 2005; Reubens et al., 2007; Stokes et al., 2009; Stokes et al., 1996; Wu et al., 1979). Eine ausführliche Betrachtung der stabilisierenden Wirkung von Wurzeln ist in der Studie von Trükmann (2011) beschrieben. Die Autorin beschreibt, dass der Scherwiderstand durchwurzelter Bodenproben im Vergleich zu undurchwurzelter Proben maximal um 15 kPa erhöht ist und führt den Stabilitätsgewinn auf gestiegene Werte der Kohäsion zurück. Die feinen elastischen Wurzeln, welche stark im Boden verankert sein müssen, erhöhen die Adhäsion zwischen Bodenpartikeln und Wurzeloberfläche, kompensieren einen Teil der auftretenden Scherspannung und leiten den Rest an den umliegenden Boden weiter (Styczen & Morgan, 1995). Neben der Kohäsion spielt der Winkel der Reibung eine entscheidende Rolle für den Scherwiderstand. Graf et al. (2009) zeigen, dass Wurzeln bei homogenisiertem Material eine Aggregation beschleunigen und zur Partikelverklebung beitragen, was eine Erhöhung des Winkels der inneren Reibung zur Folge hat und so zur Stabilisierung beiträgt.

Die Ergebnisse der beiden Versuchsstandorte Wiedelah und Wülperode zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen der Wurzel- und der Nullvariante (Wiese) auf die bodenphysikalischen Parameter. Eine stabilisierende Wirkung bzw. eine Armierung der Spannungseinträge von Wurzel aus Kurzumtriebsgehölzen kann aus den eigenen Ergebnissen folglich nicht bestätigt werden. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von *Trükmann* (2011) zur Untersuchung von Wurzeln der Grünlandpflanzen (Gräser und Leguminosen), ist die nicht vorhandene positive Wirkung der Wurzeln nicht verwunderlich. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass nur bis zu einer maximalen Auflast von 100 kPa eine Erhöhung des Scherwiderstandes festgestellt wird. Da der getestete Häcksler (Häcksler *New Holland FR*), bezogen auf die Radlast, ähnlich zu modernen Holzerntemaschinen ist, überlagern seine hohen Spannungseinträge den armierenden Effekt bzw. überschreiten die Widerstandskraft des Boden-Wurzel-Gefüges. Außerdem ist eine praktische Anwendung aus forstbaulicher Sicht zweifelhaft, da die Kurzumtriebsgehölze in einem geschlossenen Bestand etabliert werden müssen.

Hinsichtlich einer Armierung der Spannungseinträge mittels Reisigauflage wurden in dieser Arbeit keine Versuche durchgeführt, da in der Literatur von keinem nachweisbaren Effekt berichtet wird. Erst bei einer großen Menge an Reisig, welche zum Beispiel bei Fichten nicht gegeben ist, können *Jacke et al.* (2008) einen positiven Effekt nachweisen. *Eliasson und Wästerlund* (2007) veranschaulichen bei Versuchen mit schweren Holzerntemaschinen (bis zu 37 Mg) eine Abhängigkeit der Fahrspurtiefenausbildung von der Befahrungintensität jedoch keiner Abhängigkeit von einer Reisigauflage. Sie untersuchen Reisigauflagen von 10 cm und 20 cm Mächtigkeit.

5 Fazit

In Abbildung 40 ist ein zusammenfassendes Schema der untersuchten Verdichtungsprozesse dieser Arbeit und derer Einflussfaktoren dargestellt.

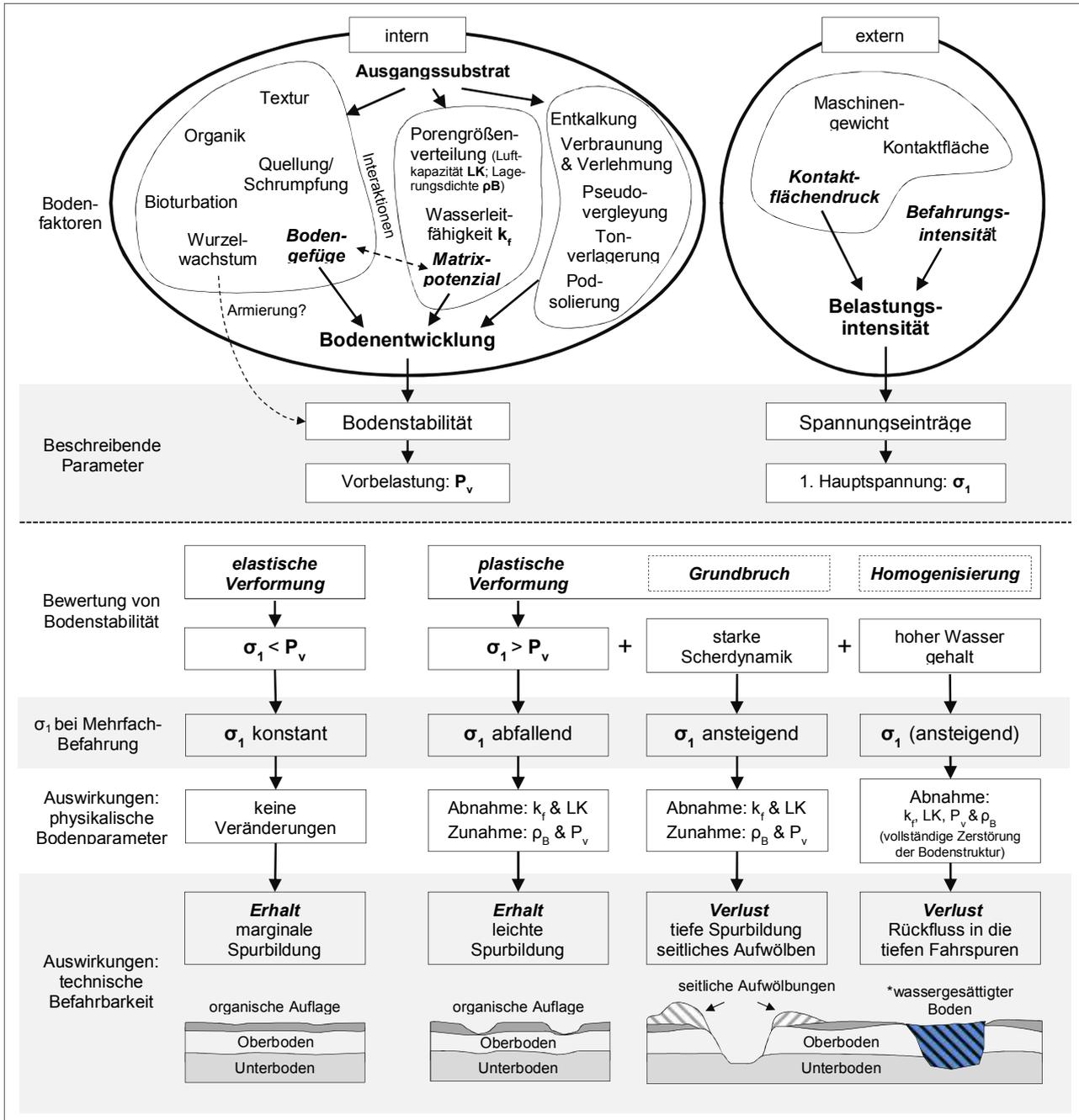


Abbildung 40. Schema zur Bodenverdichtung und die Auswirkungen auf die physikalischen Bodenparameter (gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), Luftkapazität (LK), Vorbelastung (P_v) und Lagerungsdichte (ρ_B) und die technische Befahrbarkeit in Abhängigkeit der internen und externen Bodenausgangsfaktoren und ihre beschriebenen Parameter Vorbelastung (P_v), Scherwiderstand (τ) und 1. Hauptspannung (σ_1).

Die Abbildung beschreibt das Zusammenspiel von bodeninternen Faktoren, welche zur Ausbildung der Bodenstabilität beitragen und bodenexternen Faktoren, welche die Belastungsintensität darstellen. Die Bodenstabilität ist übergeordnet abhängig von dem Bodengefüge und dem Matrixpotenzial, die zur Bodenentwicklung unter Berücksichtigung des Ausgangsmaterials beitragen. Außerdem ist in dem Schema eine mögliche Wurzelarmierung als Stabilisierungsparameter angedeutet. Prozesse der Bodengenese wie zum Beispiel die Entkalkung werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, zur Vollständigkeit aber aufgeführt. Zwischen den Elementen des Bodengefüges und des Matrixpotenzials gibt es zahlreiche Interaktionen. So beeinflusst beispielsweise die Textur die Porengrößenverteilung und das Matrixpotenzial ist ausschlaggebend für Quellungs- und Schrumpfungsprozesse. Den internen Faktoren gegenüber stehen die Parameter, die für die Belastungsintensität (Kontaktflächendruck und Befahrungsintensität) verantwortlich sind. Während sich die Vorbelastung (P_v) und der Scherwiderstand (τ) als geeignete Bodenstabilitätsparameter erweisen, spiegelt die 1. Hauptspannung (σ_1) den Faktor der Belastungsintensität am besten wider. Die Bewertung von P_v und σ_1 klassifiziert elastische und plastische Bodenverformung, wohingegen das Verhältnis von τ und σ_1 Aussagen zu weiteren Verformungsprozessen macht. So tritt bei starken Scherdynamiken, welche bei hoher Belastung aus ansteigenden Matrixpotenzialen während des Drucksetzungsverhaltens resultieren, ein Grundbruch auf. In Kombination mit einem hohen Wassergehalt des Bodens findet durch Knetungsprozesse eine vollständige Zerstörung der Bodenstruktur statt. Dieser Effekt wird in dem Schema als Homogenisierung bezeichnet. Abschließend werden die Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter: gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), Luftkapazität LK, Vorbelastung (P_v) sowie Lagerungsdichte (ρ_B) und auf die technische Befahrbarkeit (Verlust oder Erhalt und Spurtiefentyp) aufgeschlüsselt und bewertet.

Anhand dieses Schemas werden alle durchgeführten Untersuchungen bewertet. Eine Übersicht aller Ergebnisse mit Aufschlüsselung der Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter und die technische Befahrbarkeit sind in Tabelle 38 aufgeführt. Die zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass der Einsatz von radgetriebenen Holzerntemaschinen einen erheblichen Einfluss auf die Bodenstruktur nach sich zieht. Die Versuche mit dem Harvester *John Deere 1270e* und dem Forwarder *Ponsse Buffalo* an den Lössstandorten Reinshof, Vaake und Silberborn zeigen dass im Oberboden eine Mehrzahl der untersuchten Parameter negativ beeinflusst wird. Der Vergleich von Einfach- und Mehrfach-Überfahrt offenbart, dass die Steigerung der Befahrungsintensität die Parameter stärker und tieferreichender beeinflusst. Außerdem wird ein

auflastabhängiger Effekt dokumentiert. Die relativ größten Schäden werden nach der ersten Überfahrt und die absolut größten nach der Mehrfach-Überfahrt gemessen.

Tabelle 38. Zusammenfassung der Ergebnisse zu den bodenphysikalischen Parametern und der technischen Befahrbarkeit im Ober- und Unterboden (40 cm) der verschiedenen Versuchsstandorte .

Standort	Variante	Überfahrt	-- phy. Bodenparameter --							----- Technische Befahrbarkeit -----		
			P _v	k _f	k _i	ρ _B	LK	GPV	σ ₁ /P _v	Verlauf σ ₁	Verlust	Spurtiefe
Reinshof Oberboden	JD	1	++	--	--	+	--	--	--	Einzelbefahrung	/	6 cm
	PB	1	++	--	--	++	--	--	--	Einzelbefahrung	/	8 cm
	PB5	5	+	--	--	++	--	--	--	↑ - Grundbruch	ja	15 cm
Reinshof Unterboden	JD	1	o	-	-	o	-	o	--	Einzelbefahrung	/	/
	PB	1	o	-	-	o	o	o	--	Einzelbefahrung	/	/
	PB5	5	+	--	--	o	--	o	--	↑ - (Grundbruch)	/	/
Vaake Oberboden	JD	1	++	--	-	++	--	o	--	Einzelbefahrung	/	6 cm
	PB	1	++	--	--	++	--	o	--	Einzelbefahrung	/	7 cm
	PB5	5	++	--	-	++	--	--	--	↑ - Grundbruch	ja	12 cm
Vaake Unterboden	JD	1	o	-	o	++	o	o	--	Einzelbefahrung	/	/
	PB	1	o	--	--	o	-	o	--	Einzelbefahrung	/	/
	PB5	5	o	--	--	++	-	o	--	↓ - plastische Verf.	/	/
Silberborn Oberboden	JD	1	+	--	o	+	--	o	--	Einzelbefahrung	/	5 cm
	PB	1	+	--	-	+	--	o	--	Einzelbefahrung	/	5 cm
	PB5	5	+	--	o	+	--	--	--	↑ - Grundbruch	ja	11 cm
Silberborn Unterboden	JD	1	o	--	o	o	-	o	--	Einzelbefahrung	/	/
	PB	1	o	--	-	+	--	o	--	Einzelbefahrung	/	/
	PB5	5	o	--	o	+	--	-	--	↑ - (Grundbruch)	/	/
Göttingen Oberboden	PB	10	++	--	--	++	--	--	--	↑ - Grundbruch	ja	8 cm
	MB	10	++	--	o	++	--	--	--	↓ - plastische Verf.	nein	6 cm
	TB	10	++	--	o	o	--	--	--	↑ - Grundbruch	ja	8 cm
Göttingen Unterboden	PB	10	o	o	o	o	o	o	--	↑ - (Grundbruch)	/	/
	MB	10	o	-	o	o	-	--	--	↓ - plastische Verf.	/	/
	TB	10	o	--	o	o	-	--	--	↑ - (Grundbruch)	/	/
Hasbruch Oberboden	F14	3	--	--	-	++	--	--	--	(↑) - Homogenisierung	ja	30 cm
	EMB	7	o	--	o	++	--	--	-(-)	↓ - plastische Verf.	nein	5 cm
Hasbruch Unterboden	F14	3	++	o	o	o	-	-	/	/	/	/
	EMB	7	o	o	o	o	o	-	/	/	/	/
Lenglern Oberboden	JD6	5	++	--	--	++	--	--	--	↓ - plastische Verf.	nein	5 cm
	HG	5	++	o	o	o	o	-	+	↓ - elastische Verf.	nein	2 cm
	SCH	5	++	-	o	o	--	-	--	↓ - plastische Verf.	nein	5 cm
Lenglern Unterboden	JD6	5	++	o	o	o	o	o	-	↓ - (elastische) Verf.	/	/
	HG	5	o	o	o	o	o	o	+	↓ - elastische Verf.	/	/
	SCH	5	o	o	o	o	o	o	-	↓ - (elastische) Verf.	/	/

physikalische Bodenparameter: +/- = signifikante Zu- bzw. Abnahme; +/- = tendenzielle Zu- bzw. Abnahme; o = keine Veränderung
Technische Befahrbarkeit: -- = instabil; - = labil; + = stabil; ↑/↓ = Zu- bzw. Abnahme von σ₁; / = keine Aussagen möglich;

Neben den negativen Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter zeigen die Untersuchungen zur Bodenstabilität und die Auswertung der Spannungsverläufe, dass die technische Befahrbarkeit als Folge eines Grundbruchs nicht länger gegeben ist und ein zusätzlicher Flächenverlust bevorsteht.

Eine problemlose Holzernte ist mit den getesteten und repräsentativen Holzerntemaschinen auf den sensibel reagierenden Lössstandorten nicht möglich. Neben den beschriebenen externen Bodenfaktoren Auflast/Kontaktflächendruck und Befahrungintensität ist das Matrixpotenzial eine wichtige Einflussgröße für die Spannungsausbreitung und die Bodenstabilität. Die Versuche im Hasbruch mit dem *Rottne F14* zeigen, dass unter besonders feuchten Bedingungen eine Homogenisierung des Bodens stattfindet, was zum sofortigen Verlust der technischen Befahrbarkeit führt und irreversible Schäden an der Bodenstruktur zur Folge hat.

Der Einsatz von Bogiebändern sollte differenziert betrachtet werden. Während ein Traktionsband erwartungsgemäß keinerlei Vorteile gegenüber der Radmaschine bezüglich der bodenphysikalischen Parameter und der technischen Befahrbarkeit hat, zeigt sich bei der Untersuchung eines Spezial-Moor-Bogiebands zumindest ein Vorteil für die technische Befahrbarkeit. Obwohl auch bei dieser Variante erhebliche Folgen für den Oberboden dokumentiert werden und die Eigenstabilität des Bodens deutlich überschritten wird, nähert sich P_v und die abnehmenden Spannungseinträge einem neuen Gleichgewicht an, so dass ein Verlust der Befahrbarkeit und eine unerwünschte tiefe Fahrspurausbildung unter den getesteten Bedingungen nicht zu befürchten sind. Zu berücksichtigen ist jedoch der erhöhte Reifeninnendruck, welcher für die ordnungsgemäße Montage der Bogiebänder nötig ist. Bei der Demontage der Bänder kann der Reifeninnendruck an den meisten Holzerntemaschinen noch nicht reguliert werden, so dass als Folge Befahrungen mit hohen Reifeninnendrücken erfolgen könnten. Daraus resultieren eine geringere Kontaktfläche, erhöhte Kontaktflächendrücke sowie Spannungseinträge und die damit verbundenen Konsequenzen für die bodenphysikalischen Parameter.

Durch den Einsatz der Spezialkettenmaschine *EMB Elliator* können die Spannungseinträge im Vergleich zum *Rottne F14*, bei gleicher Zuladung, um bis zu 65 % reduziert werden. Obwohl die Versuche bei sehr feuchten Bedingungen ($\Psi_M -30\text{hPa}$) stattgefunden haben und die Befahrung mit dem *Rottne F14* nach der dritten Überfahrt abgebrochen werden mussten, steht ein Verlust der technischen Befahrbarkeit und eine tiefe Fahrspurausbildung für den *EMB Elliator* nicht zur

Diskussion. Der Verlauf von σ_1 ist stark abnehmend. Allerdings werden bei der Bewertung der bodenphysikalischen Parameter auch für diese Variante deutlich negativ veränderte Parameter festgestellt. Die Auswertung zeigt, dass die Effekte nicht auflastbedingt, sondern durch leichte Vibrationen des starren Kettenlaufwerks verursacht werden. Die Diskussion zu diesem Teil verdeutlicht, dass Kettenmaschinen, insbesondere auf kurvigen Strecken, auf Grund der scheren Wirkung der Ketten deutliche Nachteile haben. Wegen des linearen Versuchsaufbaus können diese Nachteile jedoch nicht bestätigt werden.

Aus dem Versuchsteil in Lenglern, dem Einsatz von kleineren Spezialmaschinen, geht hervor, dass keine der Varianten (*John Deere 6320*, *Hägglunds* und *Holzanhänger auf Kufen*) negative Konsequenzen für die technische Befahrbarkeit verursachen. Bei allen stellt sich schnell ein neues Gleichgewicht zwischen Spannungseintrag und Eigenstabilität des Bodens ein. Im Fall des *Hägglunds* wird die Eigenstabilität nicht überschritten. Während beim *John Deere 6320* und zum Teil auch beim Holzanhänger die bodenphysikalischen Parameter im Oberboden deutlich beeinträchtigt werden, ist der Einfluss des *Hägglunds* auf die bodenphysikalischen Parameter nur gering. Von daher könnte eine Holzerntemaschine auf Basis und Dimension des *Hägglunds* einer bodenschonenden Holzernte größtenteils gerecht werden. Die Kombination aus geringem Gewicht, großer Kontaktfläche und variablem Laufwerk zeigt von allen getesteten Maschinen die geringsten Auswirkungen auf die Bodenstruktur. Auch beim Test eines extremen Spannungseintrages zeigt das variable Laufwerk eine bessere Spannungskompensation als das starre Laufwerk des *John Deere 6320*. Die in dieser Arbeit nicht zu beantwortende Frage, betrifft die Wirtschaftlichkeit eines potenziellen *Hägglunds-Forwarders*. Eine erhöhte Arbeitsgeschwindigkeit könnte die geringere Ladekapazität ausgleichen. Allerdings müssten zuvor die geschwindigkeitsbedingten Auswirkungen auf die Bodenstruktur untersucht werden.

Eine armierende Wirkung von Wurzeln der Kurzumtriebsgehölzen kann in dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden. Ein Grund hierfür kann die hohe Radlast des Häckslers *New Holland FR 9060* sein, welche die Reißfestigkeit der Wurzel deutlich übersteigt. Um einen armierenden Effekt durch Wurzeln nachzuweisen, müssen erneute Versuche mit geringerem Maschinengewicht erfolgen. Außerdem wären Spannungsmessungen unter der Wurzelschicht von großem Vorteil, um die Druckfortpflanzung detaillierter beobachten zu können.

5.1 Empfehlungen für die Forstpraxis

Aus den gewonnenen Erkenntnissen dieser Arbeit lassen sich folgende Empfehlungen für die Forstpraxis ableiten. Um das Mindestziel „Erhaltung der technischen Befahrbarkeit auf Rückegassen“ zu erreichen, ist der Einsatz von Moor-Bogiebändern auf geradlinig verlaufenden Rückegassen sinnvoll. Zusätzlich sollten alle Holzerntemaschinen mit regulierbaren Reifeninnendruckanlagen ausgestattet werden. Bei der Bogiebandmontage könnte der Reifeninnendruck problemlos erhöht und bei Demontage wieder reduziert werden. Außerdem ermöglicht dies eine Aufstandsflächenerhöhung im Gelände, allerdings gilt die heterogene Spannungsverteilung unter den Reifen zu berücksichtigen. Um die Gefahr des Porenwasserüberdrucks und eine resultierende Homogenisierung des Bodens zu minimieren, sollten Holzernten auf sensiblen Standorten wie den getesteten Lössböden grundsätzlich nur während Trockenperioden ($\Psi_M > -300$ hPa) stattfinden. Eine Ableitung dieser Standorte wäre aus den Daten der forstlichen Standortkartierung ohne großen Aufwand möglich. Auf sensiblen Böden kann trotz aller Maßnahmen jedoch weiter ein Verlust der Befahrbarkeit drohen, da die eingetragenen Spannungen der Holzerntemaschinen die Eigenstabilität des Bodens deutlich überschreiten. Für die nachhaltige Nutzung und langfristige Sicherung der Bodenstruktur auf Rückegassen, ist eine Reduktion der Gesamtgewichte der Holzerntemaschinen zwingend erforderlich. Aber auch eine alleinige Reduktion der Maschinengewichte wird nicht zwangsläufig zum Erfolg führen. Vielmehr ist eine Verknüpfung von verschiedensten Maßnahmen nötig. Das Beispiel des *Hägglunds-Forwarders* scheint vielversprechend, da durch die Kombination von geringem Gewicht, großer Aufstandsfläche und variablem Laufwerk akzeptable Bedingungen geschaffen werden. Durch die weitere Verknüpfung von natürlicher Stärkung des Bodens, wie zum Beispiel einer positiven Humuswirtschaft, Waldkalkung oder einer potenziellen Wurzelarmierung und der Nutzung von Reisigaufgaben während der Holzernte, könnten die negativen Einflüsse weiter vermindert werden, so dass eine nachhaltige Forstwirtschaft möglich ist.

6 Zusammenfassung

Auf acht Versuchsstandorten wurden von Oktober 2012 bis April 2014 Überfahrungsversuche ($n = 175$) mit verschiedenen Forst- und Spezialmaschinen in Norddeutschland durchgeführt, um die Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter und die technische Befahrbarkeit zu quantifizieren. Die Untersuchungen fanden überwiegend auf Parabraunerden, Pseudogleyen und deren Übergangssubtypen aus Löss statt. Zu den getesteten Holzerntemaschinen gehörten der Harvester *John Deere 1270e* (19 Mg), die Forwarder *Ponsse Buffalo* (28 Mg) und *Rottne F14* (25 Mg) sowie der Spezial-Forwarder *EMB Elliator* (32 Mg). Des Weiteren wurde der Häcksler *New Holland FR9060* (12,5 Mg) für die Ernte von Kurzumtriebsplantagen und Maschinen mit speziellen Laufwerken, der *John Deere 6320* mit Deltalaufwerk, der *Hägglunds* mit variablem Kettenlaufwerk und ein Holzanhänger auf Kufen (alle um 6 Mg), getestet. Neben diesen Spezialmaschinen wurden außerdem zwei Bogiebänder und ein Armierungseffekt von Wurzeln untersucht, um die Folgen der Befahrung zu reduzieren. Zur Auswertung der bodenphysikalischen Parameter wurden Lagerungsdichte (ρ_B), Vorbelastung (P_v), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), Luftleitfähigkeit (k_l), Gesamtporenvolumen (GPV) und Luftkapazität (LK) für jeden Standort und jede Maschinenvariante im Vergleich zu einer unbelasteten Referenz analysiert. Die Untersuchungen erfolgten differenziert für die Tiefen 20 cm, 40 cm und 60 cm sowie für unterschiedliche Befahrungsintensitäten (Beprobung z.B. nach der ersten, der fünften und der zehnten Überfahrt). Außerdem sind Spannungsmessungen mit dem *Stress State Transducer System* (SST) in den genannten Tiefen durchgeführt worden. Die Auswertung der vertikalen Spannungseinträge (σ_1) für sich und in Kombination mit P_v geben Auskunft über die Bodenstabilität während der Befahrung. Somit können zusätzlich Aussagen zur technischen Befahrbarkeit an jedem Standort gegeben bzw. abgeleitet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von radgetriebenen Holzerntemaschinen einen erheblichen Einfluss auf die bodenphysikalischen Parameter hat, welcher besonders stark von den bodenexternen Faktoren Auflast/Kontaktflächendruck und Befahrungsintensität abhängig ist. Neben den externen werden auch die internen Faktoren Matrixpotenzial und Textur quantifiziert. Es zeigen sich deutliche Korrelationen zwischen steigendem Kontaktflächendruck bzw. Matrixpotenzial und erhöhten Spannungseinträgen ($R^2 = 0,82$ bzw. $R^2 = 0,79$) im Oberboden. Dieser Effekt ist in abgeschwächter Form auch im Unterboden zu beobachten. Die Auswertung zur Bodenstabilität (P_v/σ_1) veranschaulicht, dass je schwerer die Maschine und je häufiger die Überrollung,

desto größer und tieferreichender sind die Auswirkungen auf die Bodenstruktur. Diese Annahme kann mit der Auswertung der bodenphysikalischen Parameter verifiziert werden. Als besonders sensibler Parameter erweist sich k_f . Bereits nach der ersten Überfahrt sinken die Werte im Oberboden bei allen Varianten der Holzerntemaschinen um mindestens 98 % im Vergleich zur Referenz.

Die Spannungseinträge der Holzerntemaschinen übersteigen die Eigenstabilität des Bodens um ein Vielfaches, was bei wiederholter Befahrung in einem Grundbruch resultiert und einen Verlust der technischen Befahrbarkeit nach sich zieht. Die Auswertung von σ_1 zeigt steigende Werte und verdeutlicht, dass ein Verlust der Befahrbarkeit droht. Als Konsequenz der Befahrung bei besonders feuchten Bedingungen ist eine Homogenisierung der gesamten Bodenstruktur zu beobachten, wie die Versuche mit dem *Rottne F14* und die sinkenden Werte von P_v veranschaulichen. Die Spezialmaschine *EMB Elliator* kann die Spannungseinträge bei gleicher Beladung zur Referenzmaschine um bis zu 65 % reduzieren. Allerdings werden auch bei dieser Maschine signifikante Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter als Folge der verursachten Vibrationen des starren Kettenlaufwerks dokumentiert. Die Versuche mit den Spezial-Bogiebändern zeigen keine positiven Effekte für die bodenphysikalischen Parameter. Jedoch kann zumindest die technische Befahrbarkeit für die Variante Moorband als sicher eingestuft werden. Im Vergleich zu der Variante ohne Band und mit Traktionsband werden bei dem Moorband abnehmende Werte von σ_1 mit zunehmenden Überfahrten gemessen, so dass ein neues Gleichgewicht zwischen σ_1 und P_v entsteht und die Tragfähigkeit des Bodens erhalten bleibt.

Stabile Bodenverhältnisse und die Sicherung der technischen Befahrbarkeit werden auch für die kleineren Maschinen (Gesamtgewicht < 10 Mg; *John Deere 6320*, *Hägglunds* und *Holzanhänger*) beobachtet. Die Kombination aus geringem Gewicht und großer Kontaktfläche (*Hägglunds*) zeigt nur sehr geringe Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Parameter im Oberboden. Im Unterboden werden keine negativen Veränderungen registriert. Auch der Einfluss der anderen kleineren Maschinen fällt im Unterboden sehr gering aus. Bei den Versuchen zur Wurzelarmierung können keine positiven Effekte des Wurzelgeflechtes zur Spannungsreduktion dokumentiert werden. Die hohen Radlasten des getesteten Häckslers überlagern einen potenziellen Armierungseffekt.

7 Abstract

From October 2012 to April 2014 wheeling experiments with different forestry machinery (harvester: *John Deere 1270e* (19 Mg); forwarders: *Ponsse Buffalo & Rottne F14* (28 Mg); shredder: *New Holland FR 9060* (12 Mg); special tracked machines: *EMB Elliator* (22 Mg); *John Deere 6320*, *Hägglunds* and wood trailer (all about 6 Mg)) were done mainly on *Haplic Luvisol*, *Stagnic Luvisol* and *Haplic Stagnosol* derived from loess. The consequences for physical soil functions and trafficability of skid trails were quantified on eight study sites in Northern Germany. Furthermore bogie tracks and the reinforcement of roots were investigated. To evaluate consequences on physical soil functions undisturbed soil samples were analyzed. Bulk density, precompression stress, saturated hydraulic conductivity, air conductivity, total pore volume and air capacity were determined for every single study site in 20 cm, 40 cm and 60 cm depth and were compared with samples after different number of wheeling (for example after first and fifth wheeling) for each tested machine. In addition stress measurements with *Stress State Transducer System* (SST) were carried out in known depth for every machine variant. Evaluation of stress impacts for itself and in combination with precompression stress of soil are indicators for soil stability and allow a statement for trafficability of skid trails.

The results show a considerable impact of forestry machinery on physical soil functions, which is mainly affected by load/ground pressure and number of wheeling. The heavier the machines and the higher the number of wheeling, the higher is the impact on soil functions and the deeper are the consequences on soil structure. The saturated hydraulic conductivity can be characterized as the most sensitive parameter. After first wheeling saturated hydraulic conductivity decrease about 98 % in comparison to an unloaded reference profile. Results for soil stability and development of stress impacts indicate unstable conditions for every study site. The consequence is a failure of bearing capacity and a loss of trafficability. At wetter conditions a homogenization and a complete destruction of soil structure can be predicted, as tests with *Rottne F14* confirm. The investigations with special machine *EMB Elliator* demonstrate, that stress impacts can be reduced about 65 %. Tests with bogie tracks show negative effects for soil functions, but one track (moor-bogie track) is able to reduce stress impacts and to save trafficability. The influence on soil functions of tested smaller machines (*John Deere 6320* etc.) is limited to top soil. There are also no negative consequences for trafficability. A reinforcement of roots and a reduction of stress impacts were not observed, due to the high wheel loads of tested *New Holland Fr 9060*.

8 Literaturverzeichnis

- Ackermann, E. (1948): Thixotropie und Fließeigenschaften feinkörniger Böden. *Geologische Rundschau*, S. 10-29.
- AD-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. verbesserte und erweiterte Auflage. *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.*
- Agherkakli, B., A. Najafi and S. Sadeghi (2010): Ground based operation effects on soil disturbance by steel tracked skidder in a steep slope of forest. *Journal of Forest Science* 56, S. 278-284.
- AGIP (2015): Projekt RÜWOLA - Rückegassen als Feinerschließungssysteme im Wald - Optimierung durch natürliche Regeneration. <http://agip.fh-hannover.de/270.html#c737> letzter Aufruf: 12.02.2015.
- Alakukku, L., P. Weisskopf, W.C.T. Chamen, F.G.J. Tjink, J.P. van der Linden, S. Pires, C. Sommer and G. Spoor (2003): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research* 73, S. 145-160.
- Alaoui, A., J. Lipiec and H.H. Gerke (2011): A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research* 115–116, S. 1-15.
- Ampoorter, E., R. Goris, W.M. Cornelis and K. Verheyen (2007): Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management* 241, S. 162-174.
- Ampoorter, E., L. Van Nevel, B. De Vos, M. Hermy and K. Verheyen (2010): Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management* 260, S. 1664-1676.
- Ampoorter, E., A. de Schrijver, L. van Nevel, M. Hermy and K. Verheyen (2012): Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of Forest Science* 69, S. 533-542.
- Ansorge, D. and R.J. Godwin (2007): The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction, Part 1: Single axle-studies. *Biosyst Eng* 98, S. 115-126.

- Apel, K. (2001): Wandel der Arbeitswelt der Waldarbeiter im Übergang zum 21. Jahrhundert. *AFZ/Der Wald* Nr. 1, S. 14-16.
- Aragón, A., M.G. García, R.R. Filgueira and Y.A. Pachepsky (2000): Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test;: The relationship with organic carbon and water content. *Soil and Tillage Research* 56, S. 197-204.
- Ares, A., T. Terry, R. Miller, H. Anderson and B. Flaming (2005): Ground-based forest harvesting effects on soil physical properties and Douglas-fir growth. *Soil Science Society of America Journal* 69, S. 1822-1832.
- Arthur, E., P. Schjønning, P. Moldrup, M. Tuller and L.W. de Jonge (2013): Density and permeability of a loess soil: Long-term organic matter effect and the response to compressive stress. *Geoderma* 193–194, S. 236-245.
- Arvidsson, J., A. Trautner and T. Keller (2002): Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. In: M. Pagliari, Jones, R. (Hrsg.) *Sustainable Land Management - Environmental Protection – A Soil Physical Approach, Advances in Geoecology* 35, S. 331-338.
- Arvidsson, J. and T. Keller (2007): Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil and Tillage Research* 96, S. 284-291.
- Arvidsson, J., H. Westlin, T. Keller and M. Gilbertsson (2011): Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research* 117, S. 103-109.
- Aust, W.M., J.A. Burger and E. Carter (1998): Visually Determined Soil Disturbance Classes Used as Indices of Forest Harvesting Disturbance. *Southern Journal of Applied Forestry* 22, S. 245-250.
- Ballard, T.M. (2000): Impacts of forest management on northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133, S. 37-42.
- Battigelli, J.P., J.R. Spence, D.W. Langor and S.M. Berch (2004): Short-term impact of forest soil compaction and organic matter removal on soil mesofauna density and oribatid mite diversity. *Canadian Journal of Forest Research* 34, S. 1136-1149.

- Baumgarten, W., J. Dörner and R. Horn (2013): Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile. *Soil and Tillage Research* 129, S. 48-60.
- Baumgartl, T. and R. Horn (1991): Effect of Aggregate Stability on Soil Compaction. *Soil & Tillage Research* 19, S. 203-213.
- Baumgartl, T. (2003): Kopplung von mechanischen und hydraulischen Bodenzustandsfunktionen zur Bestimmung und Modellierung von Zugspannungen und Volumenaänderungen in porösen Medien. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany.*
- Becher, H.H. (2004): Is the concentration factor K of an aggregated soil constant as the determining measure for the stress distribution in soils? Reply. *J Plant Nutr Soil Sc* 167, S. 762-763.
- Bekele, A., L. Kellman and H. Beltrami (2007): Soil Profile CO₂ concentrations in forested and clear cut sites in Nova Scotia, Canada. *Forest Ecology and Management* 242, S. 587-597.
- Berisso, F.E., P. Schjonning, T. Keller, M. Lamande, A. Etana, L.W. de Jonge, B.V. Iversen, J. Arvidsson and J. Forkman (2012): Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil & Tillage Research* 122, S. 42-51.
- Berli, M., J.M. Kirby, S.M. Springman and R. Schulin (2003): Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Research* 73, S. 57-66.
- Berli, M., B. Kulli, W. Attinger, M. Keller, J. Leuenberger, H. Fluhler, S.M. Springman and R. Schulin (2004): Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. *Soil & Tillage Research* 75, S. 37-52.
- Blouin, V.M., M.G. Schmidt, C.E. Bulmer and M. Krzic (2005): Mechanical disturbance impacts on soil properties and lodgepole pine growth in British Columbia's central interior. *Canadian Journal of Soil Science* 85, S. 681-691.
- Blume, H.-P., K. Stahr and P. Leinweber (2011): *Bodenkundliches Praktikum*. 3., neubearbeitete Auflage. *Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.*
- Bolling, J. and W. Söhne (1982): Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. *Landtechnik* 2, S. 54-57.

- Bolling, J. (1986): Beanspruchung des Bodens beim Schlepper- und Maschineneinsatz. *KTBL-Schrift "Bodenverdichtungen"* 308, S. 49-71.
- Borchert, H. (2008): Bodenschutz bei der Holzernte. *LWF aktuell* 67, S. 3-4.
- Bottinelli, N., Y. Capowiez and J. Ranger (2014): Slow recovery of earthworm populations after heavy traffic in two forest soils in northern France. *Applied Soil Ecology* 73, S. 130-133.
- Boussinesq, J. (1885): Stresses in a soil masses. *Gauthier Vellars, Paris*.
- Brais, S. and C. Camiré (1998): Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). *Canadian Journal of Soil Science* 78, S. 197-206.
- Brais, S. (2001): Persistence of soil compaction and effects on seedling growth in northwestern Quebec. *Soil Science Society of America Journal* 65, S. 1263-1271.
- Brandt, A.A., A. Zink, J.M. Reichert, D.J. Reinert and R. Horn (2007): Effect of the straw in the surface of the soil under the traffic of agricultural machines. *Congresso Brasileiro de Engenharia Agricola, Bonito, MS*.
- Bretz, F., T. Hothorn and P. Westfal (2011): Multiple Comparisons Using R. *Chapman & Hall CRC, London*.
- Brümmer, G.W. (2001): Schadverdichtungen in Ackerböden - Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. *14. Wissenschaftliche Fachtagung Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn*.
- Brunotte, J. (2007): Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. *Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig Sonderheft 305, S. 159*.
- Brussaard, L. and H.G. van Faassen (1994): Chapter 10 - Effects of Compaction on Soil Biota and Soil Biological Processes. In: *Developments in Agricultural Engineering*. Eds. B.D. Soane and C.v. Ouwerkerk. pp S. 215-235. Elsevier.
- Burt, E.C., A.C. Bailey and R.K. Wood (1987): Effects of soil and operational parameters on soil-tire interface stress vectors. *Journal of Terramechanics* 24, S. 235-246.

- Burt, E.C., R.K. Wood and A.C. Bailey (1989): Effects of Dynamic Load on Normal Soil-Tire Interfaces Stresses. *T Asae* 32, S. 1843-1846.
- Burylo, M., C. Hudek and F. Rey (2011): Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena* 84, S. 70-78.
- BWI 2 (2002): Bundeswaldinventur². *Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft*.
- BWI 3 (2012): Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur *Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft*.
- Bygdén, G., L. Eliasson and I. Wästerlund (2003): Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. *Journal of Terramechanics* 40, S. 179-190.
- Cambi, M., G. Certini, F. Neri and E. Marchi (2015): The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management* 338, S. 124-138.
- Capowiez, Y., S. Cadoux, P. Bouchand, J. Roger-Estrade, G. Richard and H. Boizard (2009): Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biol Biochem* 41, S. 711-717.
- Casagrande, A. (1936): The determination of preconsolidation load and its practical significance. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Harvard University, Cambridge, Massachusetts, S. 60-64.
- Christopher, E. and R. Visser (2007): Methodology for evaluating post harvest erosion risk for the protection of water quality. *New Zealand Journal of Forestry Science* 52, S. 20-25.
- Comino, E., P. Marengo and V. Rolli (2010): Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results. *Soil and Tillage Research* 110, S. 60-68.
- Conlin, T.S.S. and R. Van den Driesche (2000): Response of soil CO₂ and O₂ concentrations to forest soil compaction at the Long-term Soil Productivity sites, Central British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science* 80, S. 625-632.

- Croke, J., P. Hairsine and P. Fogarty (2001): Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management* 143, S. 3-12.
- Cui, K., P. Defosseze and G. Richard (2007): A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict the compaction of cultivated soils by using the PLAXIS code. *Soil & Tillage Research* 95, S. 277-287.
- Culshaw, D. (1988): Rubber tracks for traction. *Journal of Terramechanics* 25, S. 69-80.
- Currie, J.A. (1984): Gas diffusion through soil crumbs: the effects of compaction and wetting. *Journal of Soil Science* 35, S. 1-10.
- Czyz, E.A. (2004): Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil & Tillage Research* 79, S. 153-166.
- Danfors, B. (1994): Changes in Subsoil Porosity Caused by Heavy Vehicles. *Soil & Tillage Research* 29, S. 135-144.
- Demir, E., E. Makineci, A. Comez and E. Yilmaz (2010): Impacts of repeated timber skidding on the chemical properties of topsoil, herbaceous cover and forest floor in an eastern beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stand. *Journal of Environmental Biology* 31, S. 477-482.
- Dexter, A.R. (1988): Advances in Characterization of Soil Structure. *Soil & Tillage Research* 11, S. 199-238.
- DIN 18136 (2007): Bestimmung des Drucksetzungsverhaltens (Ödometerversuch) (DIN 18136). Hrsg: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). In: Handbuch der Bodenuntersuchungen (2000), Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich.
- DIN EN 15936 (2012): Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffes (TOC) mittels trockener Verbrennung (DIN EN 15936). Hrsg: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). In: Handbuch der Bodenuntersuchungen (2000), Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich.
- DIN ISO 10390 (2005): Bodenbeschaffenheit- Bestimmung des pH-Wertes (DIN ISO 10390). Hrsg: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). In: Handbuch der Bodenuntersuchungen (2000), Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

- DIN ISO 11274 (2001): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren (DIN ISO 11274). Hrsg: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). In: Handbuch der Bodenuntersuchungen (2000), Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich.
- DIN ISO 11277 (2002): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation (DIN ISO 11277). Hrsg: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). In: Handbuch der Bodenuntersuchungen (2000), Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich.
- DIN ISO 11465 (1996): Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Massebasis (DIN ISO 11465). Hrsg: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). In: Handbuch der Bodenuntersuchungen (2000), Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich.
- Docker, B.B. and T.C.T. Hubble (2008): Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. *Geomorphology* 100, S. 401-418.
- Döll, H. (1999): Bewertung von Landwirtschaftsreifen nach agrotechnischen, ökologischen und technisch- energetischen Kriterien. Proceedings of the Conference "Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community". *Commission of the European Communities, Directorate General for Agriculture*, S. 86-94.
- Dupuy, L., T. Fourcaud and A. Stokes (2005): A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant Soil* 278, S. 119-134.
- DVWK (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden; Teil 1: Mechanische Belastbarkeit. *DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft* 234.
- DVWK (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden; Teil 2: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. *DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft* 235.
- Ebel, A. (2006): Druckverteilung auf Kontaktflächen unter Forstreifen. *Dissertationsschrift an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg August-Universität Göttingen*.
- Edlund, J., U. Bergsten and B. Löfgren (2012): Effects of two different forwarder steering and transmission drive systems on rut dimensions. *Journal of Terramechanics* 49, S. 291-297.
- Edlund, J., E. Keramati and M. Servin (2013): A long-tracked bogie design for forestry machines on soft and rough terrain. *Journal of Terramechanics* 50, S. 73-83.

- Egnell, G. and E. Valinger (2003): Survival, growth, and growth allocation of planted Scots pine trees after different levels of biomass removal in clear-felling. *Forest Ecology and Management* 177, S. 65-74.
- Eliasson, L. and I. Wästerlund (2007): Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *Forest Ecology and Management* 252, S. 118-123.
- Ellenberg, H. (1986): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. *Ulmer Verlag*.
- Eppinger, M., H. Schack-Kirchner and E.E. Hildebrand (2002): Rückegassen als Wurzelraum. *AFZ Der Wald* 10, S. 489 - 491.
- Eurostat (2013): Agriculture, forestry and fishery statistics - 2013 edition. *eurostat - European Commission Publications Office of the European Union*.
- Fan, C.C. and C.F. Su (2009): Effect of soil moisture content on the deformation behaviour of root-reinforced soils subjected to shear. *Plant Soil* 324, S. 57-69.
- Fazekas, O. (2005): Bedeutung der Bodenstruktur und Wasserspannungen als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany*.
- Fazekas, O. and R. Horn (2005): Interaction between mechanically and hydraulically affected soil strength depending on time of loading. *J Plant Nutr Soil Sc* 168, S. 60-67.
- Febo, P. (1999): Research and experiences on agricultural tyres to minimize soil compaction. Proceedings of the Conference "Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community". *Commission of the European Communities, Directorate General for Agriculture*.
- Fenner, S. (1997): Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Standort. *Z Pflanz Bodenkunde* 160, S. 157-164.
- Fernandez, I.J., Y.W. Son, C.R. Kraske, L.E. Rustad and M.B. David (1993): Soil carbon-dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Science Society of America Journal* 57, S. 1115-1121.

- Frey, B., J. Kremer, A. Rüdts, S. Sciacca, D. Matthies and P. Lüscher (2009): Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology* 45, S. 312-320.
- Frielinghaus, M., H. Petelkau, K. Seidel, B. Winnige and L. Völker (2002): Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern-Bodenverdichtung. *Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung ZALF e.V., Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.)*.
- Froehlich, H.A., D.E. Aulerich and R. Curtis (1981): Designing skid trail systems to reduce soil impacts from tractive logging machines. *Forest Research Laboratory, School of Forestry, Oregon State University*.
- Fröhlich, O.K. (1934): Druckverteilung im Baugrund. *Springer, Wien*
- FVA-BW (2003): Richtlinie zur Feinerschließung. *Hrsg.: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg - Abt. Waldnutzung und Abt. Bodenkunde*.
- Gaertig, T., H. Schack-Kirchner, E.E. Hildebrand and K. von Wilpert (2002): The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. *Forest Ecology and Management* 159, S. 15-25.
- Gaertig, T. and K. Green (2009): Die Waldbodenvegetation als Weiser für Bodenstrukturstörungen. In *Walderschließung und Bodenschutz: Bodenverformung – Erosion - Hochwasserschutz. Berichte Freiburger Forstliche Forschung Heft 79*, S. 83-105.
- Gebhardt, S., H. Fleige and R. Horn (2009): Effect of compaction on pore functions of soils in a Saalean moraine landscape in North Germany. *J Plant Nutr Soil Sc* 172, S. 688-695.
- Geischer, R. and M. Demmel (2006): Landtechnische Möglichkeiten zur Vermeidung von schädigenden Bodenbelastungen im Ackerbau. *Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)* 21, S. 75-88.
- Geodus (2015): Niedersachsen Karte; letzter Aufruf 01.05.2015. <http://www.geodus.com/de/karten-deutsche-bundeslaender-1.htm>.
- Gerasimov, Y. and V. Katarov (2010): Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering* 31, S. 35-45.

- Gomez, A., R.F. Powers, M.J. Singer and W.R. Horwath (2002): Soil CO₂ concentration and efflux as affected by heavy traffic in forest in northeast France. *Soil Science Society of America Journal* 63, S. 1334-1343.
- Goutal, N., F. Prarent, P. Bonnaud, J. Demaison, G. Nourisson, D. Epron and J. Ranger (2012): Soil CO₂ concentration and efflux as affected by heavy traffic in forest in northeast France. *European Journal of soil Science* 63, S. 261-271.
- Goutal, N., P. Renault and J. Ranger (2013b): Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France. *Geoderma* 193–194, S. 29-40.
- Graefe, U. and A. Beylich (2003): Critical values of soil acidification for annelid species and the decomposer. *Newsletter on Enchytraeidae* 8, S. 51-55.
- Graf, F., M. Frei and A. Böll (2009): Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. *Forest Snow & Landscape Research* 82, S. 61-77.
- Gräsle, W. (1999): Numerische Simulation mechanische, hydraulischer und gekoppelter Prozesse in Böden unter Verwendung der Finite Elemente Methode. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany.*
- Gray, D.H. and A.T. Leiser (1989): Biotechnical slope protection and erosion control *Van Nostrand Reinhold Co, New York.* pp. 271 S.
- Hakansson, I. and R.C. Reeder (1994): Subsoil Compaction by Vehicles with High Axle Load Extent, Persistence and Crop Response. *Soil & Tillage Research* 29, S. 277-304.
- Hakansson, I. (2005): Machinery-Induced Compaction of Arable Soils - Incidence - Consequences - Counter - Measures. *Swedish University of Agricultural Sciences Department of Soil Science, Uppsala*, 109 S.
- Hameberger, J. (2003): Wie Mechanisierung und Umweltvorsorge die Forstwirtschaft veränderten. *LWF Aktuell* 39, S. 33-36.
- Hamza, M.A. and W.K. Anderson (2005): Soil compaction in cropping systems - A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82, S. 121-145.

- Han, H.-S., D.S. Page-Dumroese, S.-K. Han and J. Tirocke (2006): Effect of slash, machine passes, and soil moisture on penetration resistance in a cut-to-length harvesting. *International Journal of Engineering Science* 17, S. 11-24.
- Harris, W.L. (1960): Dynamic stress transducer and the use of continuum mechanics in the study of various soil stress-strain relationship. *PhD Thesis, Michigan State University, Ann Arbor*.
- Hartge, K.H. (1967): Der Zusammenhang zwischen Luft- und Wasserpermeabilität in Bodenproben. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 117, S. 97-107.
- Hartge, K.H. and R. Horn (1984): Untersuchungen zur Gültigkeit des Hook'schen Gesetzes bei der Setzung von Böden bei wiederholter Belastung. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 153, S. 200-207.
- Hartge, K.H. (1993): Saturated hydraulic conductivity measurement at soil core samples and its evaluation. *Soil Technology* 6, S. 115-121.
- Hartge, K.H. and R. Horn (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. *Schweizerbart'sche Vertragsbuchhandlung, Stuttgart 2009*.
- Hartge, K.H. and R. Horn (2014): Einführung in die Bodenphysik. 4. vollständige überarbeitete und erw. Auflage. *Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart*.
- Haynes, R.J. and R. Naidu (1998): Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutr Cycl Agroecosys* 51, S. 123-137.
- Heisler, C. (1995): Collembola and Gamasina - bioindicators for soil compaction. *Acta Zoologica Fennica* 196, S. 229-231.
- Hetsch, W., S. Hesse and M. Münte (1990): Absterben von Buchen auf pseudovergleyten Böden nach starker Befahrung. *Allgemeine Forst Zeitschrift* 45, S. 481-483.
- Hillel, D. (1998): Environmental Soil Physics. *Academic Press, San Diego, CA*.
- Horn, R. (1981): A method for the determination of the preconsolidation load. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 22, S. 20-26.

- Horn, R. (1986): Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift* 149, S. 9-18.
- Horn, R. and A.R. Dexter (1989): Dynamics of Soil Aggregation in an Irrigated Desert Loess. *Soil & Tillage Research* 13, S. 253-266.
- Horn, R. (1990): Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil and Tillage Research* 17, S. 265-289.
- Horn, R., C. Johnson, H. Semmel, R. Schafer and M. Lebert (1992): Raumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Boden - theoretische Betrachtungen und erste Ergebnisse. *Z Pflanz Bodenkunde* 155, S. 269-274.
- Horn, R., H. Taubner, M. Wuttke and T. Baumgartl (1994): Soil physical properties related to soil structure. *Soil and Tillage Research* 30, S. 187-216.
- Horn, R., T. Baumgartl, R. Kayser and S. Baasch (1995): Effect of aggregate strength and stress distribution in structured bulk soils. . In: *Soil structure - Its Development and Function*. Hartge, K.H. & Stewart, B.A., Advances in soil science.
- Horn, R., B.G. Richards, W. Grasle, T. Baumgartl and C. Wiermann (1998): Theoretical principles for modelling soil strength and wheeling effects - A review. *Z Pflanz Bodenkunde* 161, S. 333-346.
- Horn, R. and J. Rostek (2000): Subsoil Compaction Processes - State of Knowledge. *Advances in Geocology* 32, S.44-54.
- Horn, R. (2003): Stress-strain effect in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma* 1126, S. 77-88.
- Horn, R. and H. Fleige (2003): A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil and Tillage Research* 73, S. 89-99.
- Horn, R., T. Way and J. Rostek (2003): Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil & Tillage Research* 73, S. 101-106.

- Horn, R. and H. Fleige (2004): Bedeutung des Bodenstruktur land- und forstwirtschaftlich genutzter Böden für die mechanische Belastbarkeit. *Schriftenreihe Christina Albertina, in Vorbereitung*.
- Horn, R., J. Vossbrink and S. Becker (2004): Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil & Tillage Research* 79, S. 207-219.
- Horn, R. and A. Smucker (2005): Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil & Tillage Research* 82, S. 5-14.
- Horn, R., J. Vossbrink, S. Peth and S. Becker (2007): Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management* 248, S. 56-63.
- Horn, R. and H. Fleige (2009): Risk assesment of subsoil compaction for arable soils in Nortwest Germany. *Soil & Tillage Research* 102, S. 201-208.
- Horn, R. and S. Peth (2009): Soil structure formation and management effects on gas emission. *Biologia* 64, S. 449-453.
- Huang, J., S.T. Lacey and P.J. Ryan (1996): Impact of forest harvesting on the hydraulic properties of surface soil. *Soil Sci* 161, S. 79-86.
- Jacke, H., H. Brokmeier and A. Senfpiel (2008): PrAllCon-Slash: Druckverteilung von Forstreifen unter Reisisgarmierung. *ifa-Mitteilungen Reihe A Heft 5*.
- Jansson, K.J. and I. Wästerlund (1999): Effect of traffic by lightweight forest machinery on the growth of young *Picea abies* trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14, S. 581-588.
- John Deere (2014): Handout for forwader 1910e; letzter Aufruf: 24.11.2014. http://www.deere.de/de_DE/docs/product/equipment/forwarders/1910e_model/brochure/1910e_specs_de.pdf.
- Johnson, D.W. and P.S. Curtis (2001): Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* 140, S. 227-238.
- Jourgholami, M., S. Soltanpour, M. Etehadi Abari and E.K. Zenner (2014): Influence of slope on physical soil disturbance due to farm tractor forwarding in a Hyrcanian forest of northern Iran. *iForest* 7, S. 342-348.

- Jun, H.-g., T.R. Way, B. Löfgren, M. Landström, A.C. Bailey, E.C. Burt and T.P. McDonald (2004): Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. *Journal of Terramechanics* 41, S. 209-222.
- Junge, T. (1999): Zur Bedeutung des Porenwasserdruckes für die Zugfestigkeit von Böden. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany.*
- Keller, T. and J. Arvidsson (2004): Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil and Tillage Research* 79, S. 191-205.
- Keller, T., M. Berli, S. Ruiz, M. Lamande, J. Arvidsson, P. Schjonning and A.P.S. Selvadurai (2014): Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil & Tillage Research* 140, S. 106-117.
- Kezdi, M. (1969): Handbuch der Bodenmechanik. *VEB Verlag, Berlin.*
- Kirby, M. (1999): Soil Stress Measurement: Part I. Transducer in a Uniform Stress Field. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72, S. 151-160.
- Konietschke, F., L.A. Hothorn and E. Brunner (2012): Rank-based multiple test procedures and simultaneous confidence intervals. *Electronic Journal of Statistics* 6, S. 738-759.
- Koolen, A.J. and W. Kuipers (1983): Agricultural Soil Mechanics. *Advanced Series in Agricultural Sciences 13, Springer Verlag, Heidelberg.*
- Kozlowski, T.T. (1999): Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14, S. 596-619.
- Krümmelbein, J., S. Peth and R. Horn (2008): Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil and Tillage Research* 99, S. 139-148.
- Kühner, S. (1997): Simultante Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany.*

- Kutílek, M., L. Jendele and K.P. Panayiotopoulos (2006): The influence of uniaxial compression upon pore size distribution in bi-modal soils. *Soil and Tillage Research* 86, S. 27-37.
- KWF (2010): Bodenschonende Holzernte - Abschlussbericht zum Auftrag der FCK an das KWF *Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.*
- Lamande, M., P. Schjonning and F.A. Togersen (2007): Mechanical behaviour of an undisturbed soil subjected to loadings: Effects of load and contact area. *Soil & Tillage Research* 97, S. 91-106.
- Lamandé, M. and P. Schjøning (2011): Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil and Tillage Research* 114, S. 71-77.
- Landesforst Mecklenburg-Vorpommern (2004): Richtlinie zur Feierschließung im Landeswald M-V. *Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern* Heft F1.
- Langmaack, M., S. Schrader, U. Rapp-Bernhardt and K. Kotzke (2002): Soil structure rehabilitation of arable soil degraded by compaction. *Geoderma* 105, S. 141-152.
- Lebert, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. *Dissertation Universität Bayreuth, Bayreuther Bodenkundliche Berichte*
- Lebert, M. and R. Horn (1991): A Method to Predict the Mechanical Strength of Agricultural Soils. *Soil & Tillage Research* 19, S. 275-286.
- Lebert, M., H. Boken and F. Glante (2007): Soil compaction - indicators for the assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal Soil Protection Act. *Journal of Environmental Management* 82, S. 388-397.
- Lenhard, R.J. (1986): Changes in void distribution and volume during compaction of a forest soil. *Soil Science Society of America Journal* 50, S. 462-464.
- Loades, K.W., A.G. Bengough, M.F. Bransby and P.D. Hallett (2010): Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. *Ecological Engineering* 36, S. 276-284.
- Lüscher, P., F. Frutig and O. Thees (2005): Physikalischer Bodenschutz. *Züricher Wald* 6, S. 10-13.

- Lüscher, P., S. Sciacca and M. Halter (2008): Regeneration von Wurzelraumfunktionen nach mechanischer Belastung. *LWF Aktuell* 67, S. 9-12.
- Lüscher, P., F. Frutig, S. Sciacca, S. Spjevak and O. Thees (2010): Merkblatt für die Praxis - Physikalischer Bodenschutz im Wald. *Eidg. Forschungsanstalt WSL, 2. Auflage* 45.
- LWF (2012): Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. *Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Merkblatt* 22
- Magagnotti, N., R. Spinelli, O. Güldner and J. Erler (2012): Site impact after motor-manual and mechanised thinning in Mediterranean pine plantations. *Biosyst Eng* 113, S. 140-147.
- Markgraf, W., C.W. Watts, W.R. Whalley, T. Hrkac and R. Horn (2012): Influence of organic matter on rheological properties of soil. *Applied Clay Science* 64, S. 25-33.
- Marshall, V.G. (2000): Impacts of forest harvesting on biological processes in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133, S. 43-60.
- Matthies, D. (2009): Forsttechnik unter Druck. *LWF aktuell* 68, S. 47-49.
- McDonald, T.P. and F. Seixas (1997): Effect of slash on forwarder soil compaction. *Journal of Forest Engineering* 8, S. 43-60.
- McNabb, D.H., A.D. Startsev and H. Nguyen (2001): Soil Wetness and Traffic Level Effects on Bulk Density and Air-Filled Porosity of Compacted Boreal Forest Soils. *Soil Science Society of America Journal* 65, S. 1238-1247.
- Mickovski, S.B., A.G. Bengough, M.F. Bransby, M.C.R. Davies, P.D. Hallett and R. Sonnenberg (2007): Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems. *European Journal of soil Science* 58, S. 1471-1481.
- Nemestothy, N. (2009): Boden unter Druck - sind Bodenschutz und Holzernte vereinbar? *BFW-Praxisinformationen* 19, S. 9-13.
- NIBIS (2015): NIBIS-Kartenserver - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen. <http://nibis.lbeg.de/> letzter Abruf: 14.01.2015.

- Nichols, T.A. (1987): A Stress State Transducer for Soil. *American Society of Agricultural Engineers* 30, S. 1237-1241.
- NLF (2013): Merkblatt Bodenschutz. *Niedersächsischen Landesforsten*.
- Norris, J.E. (2005): Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England. *Plant Soil* 278, S. 43-53.
- Okello, J.A., M.J. Dwyer and F.B. Cottrell (1994): The Tractive Performance of Rubber Tracks and a Tractor Driving Wheel Tyre as Influenced by Design Parameters. *Journal of Agricultural Engineering Research* 59, S. 33-43.
- Olsen, H.J. (1994): Calculation of subsoil stresses. *Soil & Tillage Research* 29, S. 111-123.
- Operstein, V. and S. Frydman (2000): The influence of vegetation on soil strength. *Ground Improvement* 4, S. 81-89.
- Page-Dumroese, D.S., M.F. Jurgensen, A.E. Tiarks, F. Ponder Jr, F.G. Sanchez, R.L. Fleming, J.M. Kranabetter, R.F. Powers, D.M. Stone, J.D. Elioff and D.A. Scott (2006): Soil physical property changes at the North American Long-Term Soil Productivity study sites: 1 and 5 years after compaction. *Canadian Journal of Forest Research* 36, S. 551-564.
- Pagenkemper, S.K., D.U. Puschmann, S. Peth and R. Horn (2014): Investigation of Time Dependent Development of Soil Structure and Formation of Macropore Networks as Affected by Various Precrop Species. *International Soil and Water Conservation Research* 2, S. 51-66.
- Peng, X., R. Horn and A. Smucker (2007): Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles. *Soil Science Society of America Journal* 71, S. 1095-1104.
- Petelkau, H., K. Seidel and M. Frielinghaus (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtung. In: *Bodenbearbeitung und Bodenschutz* 266, S. 56-79.
- Peth, S. (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel*.

- Pijuan, J., M. Comellas, M. Nogués, J. Roca and X. Potau (2012): Active bogies and chassis levelling for a vehicle operating in rough terrain. *Journal of Terramechanics* 49, S. 161-171.
- Ponder, F., F.M. Li, D. Jordan and E.C. Berry (2000): Assessing the impact of *Diplocardia ornata* on physical and chemical properties of compacted forest soil in microcosms. *Biol Fert Soils* 32, S. 166-172.
- Ponsse (2015a): Ponsse Elephantking - Technische Details. <http://www.ponsse.com/de/produkte/forwarder/elephantking>; letzter Aufruf: 28.01.2015.
- Ponsse (2015b): Ponsse Scorpionking - Technische Details. <http://www.ponsse.com/de/produkte/harvester/scorpionking>; letzter Aufruf: 28.01.2015.
- Potau, X., M. Comellas, M. Nogués and J. Roca (2011): Comparison of different bogie configurations for a vehicle operating in rough terrain. *Journal of Terramechanics* 48, S. 75-84.
- Potthoff, M., N. Asche, B. Stein, A. Muhs and F. Beese (2008): Earthworm communities in temperate beech wood forest soils affected by liming. *European Journal of Soil Biology* 44, S. 247-254.
- Powers, R.F., D. Andrew Scott, F.G. Sanchez, R.A. Voldseth, D. Page-Dumroese, J.D. Elioff and D.M. Stone (2005): The North American long-term soil productivity experiment: Findings from the first decade of research. *Forest Ecology and Management* 220, S. 31-50.
- Pytko, J. (2005): Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil & Tillage Research* 82, S. 77-88.
- Pytko, J., J. Dabrowski, M. Zajac and P. Tarkowski (2006): Effects of reduced inflation pressure and vehicle loading on off-road traction and soil stress and deformation state. *Journal of Terramechanics* 43, S. 469-485.
- Pytko, J. (2010): Determination of snow stresses under vehicle loads. *Cold Regions Science and Technology* 60, S. 137-145.
- Qi, J.E., J.D. Marshall and K.G. Mattson (1994): High soil carbon dioxide concentrations inhibit root respiration of Douglas fir. *New Phytologist* 128, S. 435-442.

- R Core Team (2014): R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*.
- Rab, M.A. (1996): Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the Eucalyptus regnans forest of southeastern Australia. *Forest Ecology and Management* 84, S. 159-176.
- Radford, B.J., A.C. Wilson-Rummenie, G.B. Simpson, K.L. Bell and M.A. Ferguson (2001): Compacted soil affects soil macrofauna populations in a semi-arid environment in central Queensland. *Soil Biology and Biochemistry* 33, S. 1869-1872.
- Raper, R.L., A.C. Bailey, E.C. Burt, T.R. Way and P. Liberati (1995): Inflation Pressure and Dynamic Load Effects on Soil Deformation and Soil-Tire Interface Stresses. *T Asae* 38, S. 685-689.
- Raper, R.L. (2005): Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics* 42, S. 259-280.
- Reubens, B., J. Poesen, F. Danjon, G. Geudens and B. Muys (2007): The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees-Struct Funct* 21, S. 385-402.
- Rieppo, K. (2001): Forwarder werden immer schwerer. *Forst und Technik* 2, S. 16-17.
- Roth, J. and M. Darr (2011): Data acquisition system for soil-tire interface stress measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 78, S. 162-166.
- Rusanov, V.A. (1994): Ussr Standards for Agricultural Mobile Machinery - Permissible Influences on Soils and Methods to Estimate Contact Pressure and Stress at a Depth of 0.5-M. *Soil & Tillage Research* 29, S. 249-252.
- Sakai, H., T. Nordfjell, K. Suadiciansi, B. Talbot and E. Bollehuus (2008): Soil compaction on forest soils from different kinds of tyres and tracks and possibility of accurate estimate. *Croatian Journal of Forest Engineering* 29, S. 15-27.
- Schaarschmidt, F. and L. Vaas (2009): Analysis of Trials with Complex Treatment Structure Using Multiple Contrast Tests. *Hortscience* 44, S. 188-195.

- Schack-Kirchner, H. (1994): Struktur und Gashaushalt von Waldböden. *Forschungszentr. Waldökosysteme der Uni. Göttingen. Reihe A Bd. 112*, 145 S.
- Schack-Kirchner, H., P.T. Fenner and E.E. Hildebrand (2007): Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil eformation by logging machinery on a Ferrasol under native forest. *Soil Use Management* 23, S. 286-293.
- Schafer-Landefeld, L., R. Brandhuber, S. Fenner, H.J. Koch and N. Stockfisch (2004): Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. *Soil & Tillage Research* 75, S. 75-86.
- Schäffer, B., M. Stauber, R. Muller and R. Schulin (2007): Changes in the macro-pore structure of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery: a morphometric study. *European Journal of soil Science* 58, S. 1062-1073.
- Schäffer, J. (2002): Befahren von Waldböden – ein Kavaliersdelikt? *Der Waldwirt* 29, S. 21-23.
- Schäffer, J., H. Buberl and K. von Wilpert (2012): Deformation damages in forest topsoils—an assessment based on Level-I soil monitoring data from Baden-Württemberg (SW Germany). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift* 175, S. 24-33.
- Schiechtel, H.M. (1985): Pflanzen als Mittel zur Bodenstabilisierung. *Jahrbuch der Gesellschaft für Ingenieurbioogie Aachen* 2, S. 50-62.
- Seehusen, T., H. Riley, R. Riggert, H. Fleige, T. Borresen, R. Horn and A. Zink (2014): Traffic-induced soil compaction during manure spreading in spring in South-East Norway. *Acta Agr Scand B-S P* 64, S. 220-234.
- Seixas, F. and T. Mc Donald (1997): Soil compaction effects of forwarding and its relationship with 6- and 8-wheel drive machines. *Forest Products Journal* 47, S. 46-52.
- Semmel, H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany.*
- Semmel, H. and R. Horn (1994): Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von Bodentyp- und Maschinenspezifischen Grenzwerte. *Landbauforschung Völkenrode* 147, S. 41-61.

- Smiles, D.E. (2000): Hydrology of swelling soils: a review. *Aust J Soil Res* 38, S. 501-521.
- Smith, C.W. (2003): Does soil compaction on harvesting extraction roads affect long-term productivity of Eucalyptus plantations in Zululand, South Africa? *South Forest* 199, S. 41-53.
- SMUL (2006): Holzerntetechnologien - Richtlinie zur Anwendung im Staatswald des Freistaates Sachsen. *Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft*.
- Soane, B.D., P.S. Blackwell, J.W. Dickson and D.J. Painter (1980): Compaction by agricultural vehicles: A review II. Compaction under tyres and other running gear. *Soil & Tillage Research* 1, S. 373-400.
- Soane, B.D. (1990): The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research* 16, S. 179-201.
- Startsev, A.D. and D.H. McNabb (2000): Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* 80, S. 617-624.
- Statistische Bundesamt (2013): Umweltnutzung und Wirtschaft. *Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen*.
- Stepniewski, W. and Z. Stepniewska (2009): Selected oxygen-dependent process-Response to soil management and tillage. *Soil & Tillage Research* 102, S. 193-200.
- Stokes, A., J. Ball, A.H. Fitter, P. Brain and M.P. Coutts (1996): An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting. *Ann Bot-London* 78, S. 415-421.
- Stokes, A., C. Atger, A.G. Bengough, T. Fourcaud and R.C. Sidle (2009): Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant Soil* 324, S. 1-30.
- Styczen, M.E. and R.R.C. Morgan (1995): Engineering properties of vegetatio. In: *Morgan, R.P.C. & Rickson, R.J. (Hrsg.) Slope stabilization and erosion control: A bioengineering approach. E & FN Spon, London, S. 5-58.*
- Šušnjar, M., D. Horvat and J. Šešelj (2006): Soil compaction in timber skidding in winter conditions. *Croatian Journal of Forest Engineering* 27, S. 3-15.

- Taylor, H.M. and G.S. Brar (1991): Effect of soil compaction on root development. *Soil & Tillage Research* 19, S. 111-119.
- Teepe, R., R. Brumme, F. Beese and B. Ludwig (2004): Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. *Soil Science Society of America Journal* 68, S. 605-611.
- Tengbeh, G.T. (1993): The Effect of Grass-Roots on Shear-Strength Variations with Moisture-Content. *Soil Technology* 6, S. 287-295.
- Tijink, F.G.J., H. Doll and G.D. Vermeulen (1995): Technical and Economic-Feasibility of Low Ground Pressure Running Gear. *Soil & Tillage Research* 35, S. 99-110.
- TMNLU (2008): Bodenschutz und Holzernte. *Broschüre des Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Natur und Umwelt*.
- Trautner, A. and J. Arvidsson (2003): Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. *Soil & Tillage Research* 73, S. 107-118.
- Trükmann (2011): Quantifizierung der Stabilisierungseffekte von Pflanzenwurzeln als Möglichkeit zur Reduzierung der mechanischen Bodendeformation im Grünland. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany*.
- van der Weert, R. (1974): Influence of mechanical forest cleaning on soil conditions and the resulting effects on root growth. *Trop. Agr.* 51, S. 325-331.
- Viswanathana, B., A. Volder, W.T. Watson and J.A. Aitkenhead-Peterson (2011): Impervious and pervious pavements increase soil CO₂ concentrations and reduce root production of American sweetgum (*Liquidambar styraciflua*). *Urban Forestry & Urban Greening* 10, S. 133-139.
- von Engelhardt, W. (1960): Der Porenraum der Sedimente. *Springer, Heidelberg, Berlin*.
- von Wilpert, K. and J. Schaffer (2006): Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research* 125, S. 129-138.

- Voßbrink, J. and R. Horn (2004): Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 79, S. 207-219.
- Voßbrink, J. (2005): Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.*
- Wallbrink, P.J., B.P. Roddy and J.M. Olley (2002): A tracer budget quantifying soil redistribution on hillslopes after forest harvesting. *Catena* 47, S. 179-201.
- Way, T.R., T. Kishimoto, E.C. Burt and A.C. Bailey (2000): Soil-Tire Interface Pressures of a Low Aspect Ratio Tractor Tire. In: R. Horn, J. J. H. van den Akker & J. Arvidsson, *Subsoil Compaction, Advances in Geoecology* 32, S. 82-92.
- Way, T.R. and T. Kishimoto (2004): Interface Pressures of a Tractor Drive Tyre on Structured and Loose Soils. *Biosyst Eng* 87, S. 375-386.
- Whalley, W.R., E. Dumitru and A.R. Dexter (1995): Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research* 35, S. 53-68.
- Wiermann, C. (1998): Auswirkung differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.*
- Wiermann, C., T.R. Way, R. Horn, A.C. Bailey and E.C. Burt (1999): Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. *Soil & Tillage Research* 50, S. 127-135.
- Wiermann, C., D. Werner, R. Horn, J. Rostek and B. Werner (2000): Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil & Tillage Research* 53, S. 117-128.
- Wilde, T. (1998): Rübenernte - Wirkungen der Gross Maschine auf den Boden. *Landtechnik* 53, S. 72-73.
- Williamson, J.R. and W.A. Neilsen (2000): The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. *Canadian Journal of Forest Research* 30, S. 1196-1205.

-
- Wood, R.K., E.C. Burt and C.E. Johnson (1991): Dynamic Load Effects on Thrust Components Along The Soil-Tire Contact Zone. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 34, S. 43-46.
- Wu, T.H., W.P. Mckinnell and D.N. Swanston (1979): Strength of Tree Roots and Landslides on Prince-of-Wales-Island, Alaska. *Can Geotech J* 16, S. 19-33.
- Wu, T.H. and A. Watson (1998): In situ shear tests of soil blocks with roots. *Can Geotech J* 35, S. 579-590.
- Yavuzcan, H.G., D. Matthies and H. Auernhammer (2005): Vulnerability of Bavarian silt loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. *Soil & Tillage Research* 84, S. 200-215.
- Zhang, B. and R. Horn (2001): Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma* 99, S. 123-145.
- Zink, A. (2009): Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge auf physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany.*
- Zink, A., H. Fleige and R. Horn (2010): Load Risks of Subsoil Compaction and Depths of Stress Propagation in Arable Luvisols. *Soil Science Society of America Journal* 74, S. 1733-1742.
- Zink, A., H. Fleige and R. Horn (2011): Verification of harmful subsoil compaction in loess soils. *Soil & Tillage Research* 114, S. 127-134.

9 Anhang

Tabelle A 1. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Reinshof vor der ersten Überfahrt für die Variante Referenz.

Reinshof - Referenz							
Tiefe	Wdh.	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _r cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	44,1	9,3	39	2,97	2,78	1,49
	2	43,1	10,5	33	3,11	2,58	1,53
	3	41,9	6,2	30	2,58	2,45	1,55
	4	40,5	5,8	37	2,96	2,65	1,62
	5	39,5	5,7	31	2,61	2,65	1,64
	6	-	-	38	2,80	2,71	-
	7	-	-	32	3,33	2,81	-
	8	-	-	39	2,20	1,89	-
	9	-	-	-	3,08	-	-
	10	-	-	-	2,16	-	-
		\bar{x}_{arth}	41,8	7,5	35	2,78	2,56
	σ	1,7	2,0	4	0,37	0,28	0,06
40 cm	1	35,0	3,7	60	2,30	2,72	1,68
	2	42,6	5,5	60	0,51	2,67	1,60
	3	36,8	3,4	84	1,29	2,66	1,70
	4	40,1	6,5	63	2,55	2,71	1,57
	5	35,4	3,7	59	0,94	2,38	1,69
	6	-	-	63	2,13	2,40	-
	7	-	-	69	1,47	1,96	-
	8	-	-	81	1,67	2,71	-
	9	-	-	-	2,43	-	-
	10	-	-	-	1,80	-	-
		\bar{x}_{arth}	38,0	4,6	67	1,71	2,53
	σ	2,9	1,2	9	0,64	0,25	0,05
60 cm	1	40,0	3,0	88	2,07	2,59	1,68
	2	40,0	3,8	71	1,07	2,23	1,66
	3	39,1	4,9	81	0,83	2,46	1,54
	4	40,6	2,3	88	2,28	2,06	1,68
	5	41,1	4,4	89	0,48	2,37	1,58
	6	-	-	70	0,99	2,43	-
	7	-	-	85	1,96	2,43	-
	8	-	-	85	0,61	2,54	-
	9	-	-	-	2,05	-	-
	10	-	-	-	-0,15	-	-
		\bar{x}_{arth}	40,2	3,7	82	1,22	2,39
	σ	0,7	0,9	7	0,78	0,16	0,06

Tabelle A 2. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Reinshof nach der ersten Überfahrt für die Variante JD.

Reinshof - JD							
Tiefe	Wdh.	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	37,9	3,6	65	1,47	2,21	1,58
	2	39,2	1,4	81	0,49	1,75	1,67
	3	36,2	2,7	64	1,62	1,88	1,64
	4	37,5	3,1	71	0,48	1,40	1,70
	5	37,2	3,1	45	0,18	1,61	1,68
	6	-	-	62	1,43	1,50	-
	7	-	-	49	0,46	2,25	-
	8	-	-	57	0,08	1,98	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	37,6	2,8	62	0,78	1,82
	σ	1,0	0,7	11	0,58	0,29	0,04
40 cm	1	39,6	2,5	79	-0,15	2,64	1,66
	2	39,0	3,3	84	1,49	1,88	1,62
	3	40,4	2,8	78	-0,22	1,75	1,63
	4	39,1	3,0	76	0,62	1,73	1,67
	5	39,7	2,2	79	0,68	1,70	1,73
	6	-	-	69	-0,15	1,61	-
	7	-	-	72	1,30	2,34	-
	8	-	-	71	1,47	1,12	-
	9	-	-	-	0,23	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	39,6	2,8	76	0,58	1,85
	σ	0,5	0,4	5	0,67	0,43	0,04
60 cm	1	37,6	2,5	90	1,85	2,58	1,68
	2	37,7	5,2	72	0,82	2,40	1,62
	3	37,3	5,0	91	1,58	2,73	1,58
	4	40,4	4,9	84	1,99	2,12	1,62
	5	36,0	2,9	65	0,34	-	1,62
	6	-	-	71	1,79	-	-
	7	-	-	88	0,83	-	-
	8	-	-	79	1,36	-	-
	9	-	-	-	1,78	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	37,8	4,1	80	1,37	2,46
	σ	1,4	1,2	9	0,54	0,23	0,03

Tabelle A 3. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Reinshof nach der ersten Überfahrt für die Variante PB.

Reinshof - PB							
Tiefe	Wdh.	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	34,9	1,4	55	0,48	1,25	1,70
	2	37,6	0,1	53	-0,05	0,71	1,70
	3	37,9	1,2	56	0,28	0,40	1,69
	4	39,5	2,1	51	-1,00	0,58	1,70
	5	39,6	2,0	54	0,67	-	1,64
	6	-	-	52	-0,40	-	-
	7	-	-	53	-0,15	-	-
	8	-	-	48	-	-	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	37,9	1,4	53	-0,02	0,73	1,69
	σ	1,7	0,7	2	0,53	0,32	0,02
40 cm	1	38,3	3,9	88	1,18	1,89	1,69
	2	37,9	3,8	99	1,54	1,96	1,68
	3	38,2	3,7	71	1,25	1,76	1,60
	4	38,7	4,7	76	0,75	2,13	1,61
	5	39,4	3,6	63	0,20	2,16	1,52
	6	-	-	70	1,52	2,71	-
	7	-	-	85	1,46	1,88	-
	8	-	-	65	0,93	2,20	-
	9	-	-	-	1,25	-	-
	10	-	-	-	1,02	-	-
	\bar{x}_{arth}	38,5	3,9	77	1,11	2,09	1,62
	σ	0,5	0,4	12	0,39	0,28	0,06
60 cm	1	38,8	2,5	127	1,75	2,41	1,69
	2	36,9	2,1	92	1,03	2,29	1,66
	3	35,0	1,5	118	1,00	2,51	1,73
	4	37,4	2,7	78	0,23	2,11	1,67
	5	39,0	3,4	48	0,81	2,65	1,70
	6	-	-	73	1,49	2,68	-
	7	-	-	68	0,94	2,61	-
	8	-	-	71	-0,10	2,54	-
	9	-	-	-	1,26	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,2	3,7	82	1,22	2,39	1,63
	σ	0,7	0,9	7	0,78	0,16	0,06

Tabelle A 4. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Reinshof nach der fünften Überfahrt für die Variante PB5.

Reinshof – PB5							
Tiefe	Wdh.	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	36,7	2,9	58	-1,00	0,51	1,71
	2	37,2	1,7	53	-0,15	1,35	1,76
	3	37,1	1,4	46	-0,10	1,20	1,78
	4	36,7	1,6	51	-0,52	0,81	1,73
	5	36,7	2,2	53	-0,15	0,28	1,76
	6	-	-	48	-0,05	0,51	-
	7	-	-	44	-0,70	0,41	-
	8	-	-	47	-	0,41	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	36,9	2,0	50	-0,38	0,68
	σ	0,2	0,5	4	0,34	0,37	0,02
40 cm	1	37,8	1,6	91	0,98	0,28	1,62
	2	38,2	1,3	91	-2,00	1,29	1,63
	3	38,0	3,2	82	1,30	0,99	1,64
	4	37,6	1,9	82	-2,00	1,51	1,71
	5	37,6	1,9	79	-0,15	1,11	1,67
	6	-	-	79	0,76	0,95	-
	7	-	-	78	-0,52	0,59	-
	8	-	-	0	1,23	0,98	-
	9	-	-	-	0,40	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	37,8	2,0	73	0,00	0,96
	σ	0,2	0,6	28	1,21	0,36	0,03
60 cm	1	37,4	1,6	101	0,45	1,46	1,69
	2	38,0	2,6	98	1,17	1,21	1,69
	3	33,7	1,3	121	0,91	1,85	1,70
	4	36,0	1,5	105	0,59	1,59	1,68
	5	34,1	2,2	125	0,18	2,51	1,72
	6	-	-	108	0,23	1,06	-
	7	-	-	106	0,11	1,29	-
	8	-	-	105	1,35	1,46	-
	9	-	-	-	-1,00	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	35,8	1,8	109	0,44	1,55
	σ	1,7	0,5	9	0,66	0,43	0,01

Tabelle A 5. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Vaake vor der ersten Überfahrt für die Variante Referenz.

Vaake - Referenz							
Tiefe	Wdh.	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	44,5	9,2	28	3,24	2,82	1,24
	2	45,7	12,2	26	3,10	2,50	1,22
	3	45,3	11,9	25	2,76	2,82	1,19
	4	45,0	9,9	36	3,28	2,82	1,26
	5	43,2	7,5	38	3,33	2,81	1,31
	6	-	-	26	3,08	2,76	-
	7	-	-	40	2,78	2,59	-
	8	-	-	47	2,63	2,76	-
	9	-	-	-	3,18	-	-
	10	-	-	-	3,17	-	-
	\bar{x}_{arth}	44,7	10,1	33	3,06	2,73	1,24
	σ	0,9	1,7	8	0,23	0,11	0,04
40 cm	1	42,4	5,9	47	1,80	2,61	1,52
	2	42,8	5,9	42	2,05	0,89	1,36
	3	39,1	4,9	38	2,89	2,82	1,51
	4	40,0	4,8	52	0,86	2,80	1,55
	5	42,6	6,2	57	2,68	2,40	1,54
	6	-	-	48	2,65	2,47	-
	7	-	-	54	2,37	2,49	-
	8	-	-	61	1,42	2,67	-
	9	-	-	-	0,59	-	-
	10	-	-	-	0,81	-	-
	\bar{x}_{arth}	41,4	5,5	50	1,81	2,39	1,50
	σ	1,5	0,6	7	0,81	0,58	0,07
60 cm	1	38,3	4,1	61	0,53	2,28	1,56
	2	39,8	2,0	56	1,22	1,52	1,59
	3	41,6	5,8	37	1,58	2,14	1,60
	4	40,3	4,0	52	1,81	2,21	1,59
	5	40,9	3,8	61	2,10	1,72	1,61
	6	-	-	63	1,54	1,59	-
	7	-	-	59	2,02	2,65	-
	8	-	-	61	1,39	2,66	-
	9	-	-	-	0,18	-	-
	10	-	-	-	0,23	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,2	3,9	56	1,26	2,10	1,59
	σ	1,1	1,2	8	0,67	0,42	0,02

Tabelle A 6. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Vaake nach der ersten Überfahrt für die Variante JD.

Vaake - JD							
Tiefe	Wdh.	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	40,2	8,3	45	0,45	2,57	1,47
	2	40,7	5,1	50	-0,52	1,95	1,54
	3	42,6	7,6	58	0,69	1,45	1,51
	4	42,0	4,2	49	0,86	1,10	1,64
	5	46,1	8,0	57	1,32	1,54	1,51
	6	-	-	47	0,04	1,80	-
	7	-	-	46	0,52	1,84	-
	8	-	-	-	0,11	2,75	-
	9	-	-	-	1,47	-	-
	10	-	-	-	1,73	-	-
		\bar{x}_{arth}	42,3	6,6	44	0,67	1,88
	σ	2,1	1,7	17	0,66	0,52	0,06
40 cm	1	40,9	3,9	49	0,65	1,88	1,76
	2	40,6	5,6	73	1,23	1,50	1,64
	3	42,3	6,7	57	1,67	2,58	1,69
	4	40,1	6,1	56	0,89	2,20	1,60
	5	40,9	7,0	49	1,01	2,71	1,60
	6	-	-	55	1,44	2,22	-
	7	-	-	50	0,63	2,71	-
	8	-	-	51	-	2,65	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	41,0	5,9	55	1,08	2,31
	σ	0,7	1,1	7	0,36	0,41	0,06
60 cm	1	39,6	3,8	89	1,37	1,57	1,71
	2	39,8	3,2	70	1,46	2,20	1,56
	3	41,8	4,0	77	1,72	1,98	1,68
	4	36,0	3,2	68	-0,05	2,08	1,75
	5	39,7	3,2	78	1,66	2,58	1,66
	6	-	-	78	0,34	1,76	-
	7	-	-	63	0,64	2,06	-
	8	-	-	51	-	1,35	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	39,4	3,5	72	1,02	1,95
	σ	1,9	0,3	11	0,65	0,36	0,06

Tabelle A 7. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Vaake nach der ersten Überfahrt für die Variante PB.

Vaake - PB							
Tiefe	Wdh.	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	42,5	5,7	68	0,81	1,75	1,53
	2	43,0	5,3	63	0,30	1,73	1,52
	3	42,3	4,1	61	0,96	1,51	1,53
	4	40,7	3,8	44	0,81	1,73	1,42
	5	42,2	3,7	52	1,70	1,05	1,49
	6	-	-	68	0,34	1,05	-
	7	-	-	61	0,95	1,50	-
	8	-	-	74	1,39	1,71	-
	9	-	-	-	1,04	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	42,1	4,5	61	0,92	1,50	1,50
	σ	0,8	0,8	9	0,42	0,28	0,04
40 cm	1	40,4	4,5	43	0,79	1,01	1,47
	2	40,5	5,2	48	0,36	0,88	1,58
	3	42,9	4,3	53	0,97	1,11	1,56
	4	41,0	3,3	71	0,72	2,13	1,59
	5	39,8	2,9	50	0,54	0,80	1,52
	6	-	-	54	0,34	0,92	-
	7	-	-	57	0,28	1,41	-
	8	-	-	55	-	0,51	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,9	4,0	54	0,57	1,09	1,54
	σ	1,1	0,8	8	0,24	0,46	0,04
60 cm	1	43,4	3,4	71	0,11	0,70	1,57
	2	40,9	3,1	73	0,43	0,91	1,65
	3	40,7	2,2	52	0,97	0,76	1,62
	4	38,3	2,0	61	1,61	1,18	1,60
	5	39,7	2,8	72	-0,52	0,71	1,65
	6	-	-	68	0,89	0,71	-
	7	-	-	68	1,38	1,03	-
	8	-	-	62	1,20	0,65	-
	9	-	-	-	1,74	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,6	2,7	66	0,87	0,83	1,62
	σ	1,7	0,5	7	0,70	0,18	0,03

Tabelle A 8. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Vaake nach der fünften Überfahrt für die Variante PB5.

Vaake – PB5							
Tiefe	Wdh.	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P_v kPa	$\log k_f$ $cm \cdot d^{-1}$	$\log k_l$ $cm \cdot d^{-1}$	ρ_B $g \cdot cm^{-3}$
20 cm	1	40,6	4,2	70	0,04	1,25	1,49
	2	41,6	5,3	70	1,05	1,65	1,50
	3	39,6	4,9	56	0,45	1,58	1,60
	4	40,6	3,7	78	0,18	2,50	1,57
	5	40,5	2,9	69	0,28	0,88	1,59
	6	–	–	57	1,87	1,62	–
	7	–	–	–	-0,22	1,35	–
	8	–	–	–	0,23	2,06	–
	9	–	–	–	0,40	–	–
	10	–	–	–	–	–	–
		\bar{x}_{arth}	40,6	4,2	67	0,47	1,61
	σ	0,6	0,9	8	0,59	0,46	0,05
40 cm	1	39,7	4,6	53	0,73	0,72	1,67
	2	39,8	3,7	53	1,22	0,89	1,72
	3	39,3	2,3	54	0,04	2,15	1,66
	4	38,9	3,2	52	1,34	1,15	1,63
	5	39,6	3,3	62	0,71	0,51	1,62
	6	–	–	43	0,20	1,65	–
	7	–	–	65	0,79	0,28	–
	8	–	–	–	0,38	1,37	–
	9	–	–	–	0,83	–	–
	10	–	–	–	–	–	–
		\bar{x}_{arth}	39,5	3,4	55	0,69	1,09
	σ	0,3	0,7	7	0,41	0,58	0,04
60 cm	1	36,5	2,2	80	0,11	0,58	1,72
	2	36,8	2,3	80	1,78	0,71	1,74
	3	38,7	2,7	65	1,06	0,71	1,67
	4	39,8	4,0	79	1,31	0,65	1,70
	5	37,2	4,4	66	0,81	1,49	1,66
	6	–	–	75	-0,10	0,65	–
	7	–	–	72	-0,10	0,28	–
	8	–	–	79	1,50	0,41	–
	9	–	–	–	–	–	–
	10	–	–	–	–	–	–
		\bar{x}_{arth}	37,8	3,1	75	0,80	0,69
	σ	1,3	0,9	6	0,69	0,33	0,03

Tabelle A 9. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Silberborn vor der ersten Überfahrt für die Variante Referenz.

Silberborn – Referenz							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	46,8	6,5	49	-0,70	1,98	1,31
	2	42,5	5,6	52	2,41	1,95	1,43
	3	47,4	6,8	48	1,55	1,88	1,26
	4	45,1	5,9	70	1,86	2,08	1,26
	5	48,2	5,5	53	3,54	1,58	1,20
	6	-	-	52	1,34	2,29	-
	7	-	-	45	3,14	2,29	-
	8	-	-	39	1,56	1,41	-
	9	-	-	-	3,61	-	-
	10	-	-	-	3,26	-	-
	\bar{x}_{arth}	46,0	6,1	51	2,16	1,94	1,29
	σ	2,0	0,5	8	1,26	0,29	0,08
40 cm	1	44,7	3,6	44	2,66	2,38	1,38
	2	46,3	4,0	52	2,33	1,71	1,40
	3	46,7	9,9	62	3,37	2,76	1,22
	4	44,5	4,4	58	3,01	2,60	1,44
	5	44,2	9,0	57	2,94	2,89	1,32
	6	-	-	68	2,04	1,65	-
	7	-	-	65	1,36	1,71	-
	8	-	-	32	2,63	2,59	-
	9	-	-	-	2,91	-	-
	10	-	-	-	3,22	-	-
	\bar{x}_{arth}	45,3	6,2	55	2,65	2,29	1,35
	σ	1,0	2,7	11	0,57	0,48	0,08
60 cm	1	42,7	3,7	56	3,09	1,92	1,51
	2	33,9	2,8	40	3,46	1,95	1,48
	3	40,4	3,0	54	2,43	2,44	1,41
	4	37,7	4,3	61	2,81	1,92	1,55
	5	44,0	3,2	59	3,29	1,11	1,41
	6	-	-	60	2,34	2,21	-
	7	-	-	39	2,31	2,26	-
	8	-	-	40	3,09	1,71	-
	9	-	-	-	3,51	-	-
	10	-	-	-	0,88	-	-
	\bar{x}_{arth}	39,7	3,4	51	2,72	1,94	1,47
	σ	3,6	0,5	9	0,75	0,38	0,06

Tabelle A 10. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Silberborn nach der ersten Überfahrt für die Variante JD.

Silberborn – JD							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	50,6	3,1	59	0,91	1,50	1,23
	2	43,2	1,8	49	0,90	1,98	1,42
	3	43,0	3,0	71	0,23	1,88	1,20
	4	40,2	3,3	76	0,79	2,12	1,54
	5	43,8	2,2	61	1,35	1,89	1,50
	6	–	–	59	-0,10	2,11	–
	7	–	–	49	-0,52	1,81	–
	8	–	–	69	–	–	–
	9	–	–	–	–	–	–
	10	–	–	–	–	–	–
		\bar{x}_{arth}	44,2	2,7	62	0,51	1,90
	σ	3,5	0,6	9	0,61	0,20	0,14
40 cm	1	42,6	4,6	35	2,09	2,10	1,23
	2	44,2	4,7	28	2,93	2,12	1,19
	3	38,7	3,0	51	1,37	1,98	1,22
	4	42,1	1,6	49	1,05	2,08	1,25
	5	45,7	5,9	71	1,25	2,27	1,32
	6	–	–	73	1,49	2,71	–
	7	–	–	68	2,03	2,57	–
	8	–	–	71	1,21	–	–
	9	–	–	–	0,18	–	–
	10	–	–	–	2,60	–	–
		\bar{x}_{arth}	42,7	4,0	56	1,62	2,26
	σ	2,3	1,5	17	0,76	0,25	0,04
60 cm	1	37,7	3,6	42	0,89	1,80	1,28
	2	41,1	4,1	39	0,04	1,10	1,20
	3	38,0	4,1	28	1,09	1,28	1,31
	4	41,3	4,0	52	-0,05	2,73	1,14
	5	38,1	3,6	99	0,64	–	1,24
	6	–	–	–	0,83	–	–
	7	–	–	–	0,70	–	–
	8	–	–	–	0,08	–	–
	9	–	–	–	–	–	–
	10	–	–	–	–	–	–
		\bar{x}_{arth}	39,2	3,9	52	0,53	1,73
	σ	1,6	0,2	25	0,41	0,63	0,06

Tabelle A 11. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Silberborn nach der ersten Überfahrt für die Variante PB.

Silberborn – PB							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	45,2	4,4	70	0,83	0,41	1,46
	2	43,0	3,3	42	0,18	1,41	1,31
	3	45,7	2,1	52	2,00	1,28	1,52
	4	44,2	2,3	62	0,04	1,98	1,37
	5	48,5	2,4	68	1,17	1,81	1,40
	6	-	-	68	-0,40	1,41	-
	7	-	-	79	0,04	-	-
	8	-	-	56	-0,22	-	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	45,3	2,9	62	0,45	1,38	1,41
	σ	1,8	0,9	11	0,76	0,50	0,07
40 cm	1	42,6	2,7	79	-0,30	1,65	1,48
	2	43,4	3,0	75	-0,40	1,68	1,44
	3	44,3	4,4	77	0,32	1,58	1,42
	4	43,4	5,0	55	1,12	1,84	1,33
	5	44,2	3,5	43	1,55	2,05	1,42
	6	-	-	33	0,15	1,50	-
	7	-	-	51	0,15	-	-
	8	-	-	39	0,08	-	-
	9	-	-	-	0,79	-	-
	10	-	-	-	0,11	-	-
	\bar{x}_{arth}	43,6	3,7	57	0,36	1,72	1,42
	σ	0,6	0,9	17	0,59	0,18	0,05
60 cm	1	39,8	1,9	37	1,65	1,88	1,40
	2	39,7	2,6	69	1,44	1,76	1,31
	3	39,4	2,8	53	1,38	1,80	1,33
	4	40,4	3,1	62	1,44	2,01	1,40
	5	38,6	2,2	65	1,24	1,41	1,55
	6	-	-	37	0,69	2,62	-
	7	-	-	50	0,69	2,22	-
	8	-	-	61	1,10	-	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	39,6	2,5	54	1,20	1,96	1,40
	σ	0,6	0,4	11	0,33	0,35	0,08

Tabelle A 12. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Silberborn nach der fünften Überfahrt für die Variante PB5.

Silberborn – PB5							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	39,5	3,0	52	1,01	1,65	1,55
	2	42,5	2,9	69	1,68	1,80	1,30
	3	41,6	1,4	85	-0,70	0,98	1,44
	4	42,7	1,6	69	0,64	1,92	1,37
	5	40,5	1,5	53	-0,40	1,68	1,35
	6	-	-	58	-0,70	-	-
	7	-	-	71	0,77	-	-
	8	-	-	65	0,23	-	-
	9	-	-	-	1,76	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	41,4	2,1	65	0,48	1,61
	σ	1,2	0,7	10	0,89	0,33	0,09
40 cm	1	41,8	3,0	71	0,82	1,95	1,43
	2	44,8	1,9	81	1,09	1,96	1,44
	3	39,5	3,1	62	0,00	2,40	1,56
	4	43,7	1,3	81	1,00	2,20	1,32
	5	39,7	1,8	63	1,20	2,01	1,59
	6	-	-	48	0,71	2,36	-
	7	-	-	48	0,30	2,76	-
	8	-	-	65	1,08	1,81	-
	9	-	-	-	0,46	-	-
	10	-	-	-	1,02	-	-
		\bar{x}_{arth}	41,9	2,2	65	0,77	2,18
	σ	2,1	0,7	12	0,38	0,29	0,10
60 cm	1	37,4	2,9	41	1,34	2,80	1,68
	2	37,6	2,2	65	2,16	2,14	1,62
	3	35,4	2,4	49	0,36	2,16	1,68
	4	35,1	1,9	48	0,86	2,36	1,71
	5	36,5	3,0	52	1,97	1,65	1,68
	6	-	-	68	1,16	1,98	-
	7	-	-	59	2,08	1,95	-
	8	-	-	36	0,65	1,81	-
	9	-	-	-	0,58	-	-
	10	-	-	-	1,64	-	-
		\bar{x}_{arth}	36,4	2,5	52	1,28	2,11
	σ	1,0	0,4	10	0,63	0,33	0,03

Tabelle A 13. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Göttingen vor der ersten Überfahrt für die Variante Referenz.

Göttingen – Referenz							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	44,1	9,3	39	2,97	2,78	1,49
	2	43,1	10,5	33	3,11	2,58	1,53
	3	41,9	6,2	30	2,58	2,45	1,55
	4	40,5	5,8	37	2,96	2,65	1,62
	5	39,5	5,7	31	2,61	2,65	1,64
	6	-	-	38	2,80	2,71	-
	7	-	-	32	3,33	2,81	-
	8	-	-	39	2,20	1,89	-
	9	-	-	-	3,08	-	-
	10	-	-	-	2,16	-	-
	\bar{x}_{arth}	41,8	7,5	35	2,78	2,56	1,57
	σ	1,7	2,0	4	0,37	0,28	0,06
40 cm	1	42,1	7,7	102	3,22	2,80	1,55
	2	39,7	4,6	96	3,60	2,81	1,56
	3	41,3	6,7	98	2,48	2,78	1,49
	4	40,5	7,5	101	2,30	2,62	1,49
	5	41,1	7,3	82	3,25	2,66	1,54
	6	-	-	71	2,36	2,55	-
	7	-	-	97	3,62	2,74	-
	8	-	-	92	2,29	2,96	-
	9	-	-	-	3,09	-	-
	10	-	-	-	2,60	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,9	6,8	92	2,88	2,74	1,53
	σ	0,8	1,1	10	0,51	0,12	0,03
60 cm	1	38,4	4,5	79	2,01	3,80	1,64
	2	38,8	4,3	94	2,57	3,80	1,63
	3	39,3	3,7	98	1,55	2,65	1,70
	4	36,7	4,2	95	2,13	3,32	1,58
	5	38,4	4,0	78	2,08	2,85	1,63
	6	-	-	87	2,79	2,70	-
	7	-	-	70	1,96	3,50	-
	8	-	-	83	2,45	3,20	-
	9	-	-	-	2,87	-	-
	10	-	-	-	2,39	-	-
	\bar{x}_{arth}	38,3	4,1	86	2,28	3,23	1,64
	σ	0,9	0,3	9	0,39	0,43	0,04

Tabelle A 14. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Göttingen nach der ersten Überfahrt für die Variante PB.

Göttingen – PB							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	38,1	1,8	60	0,76	2,05	1,54
	2	40,3	2,3	45	-0,52	2,23	1,59
	3	40,0	2,9	57	-0,15	2,25	1,59
	4	38,3	1,4	42	-0,22	2,32	1,64
	5	40,7	2,3	43	0,58	2,12	1,59
	6	-	-	54	0,28	2,22	-
	7	-	-	49	-0,52	2,33	-
	8	-	-	41	-0,70	2,20	-
	9	-	-	-	-0,22	-	-
	10	-	-	-	-0,05	-	-
		\bar{x}_{arth}	39,5	2,1	49	-0,08	2,22
	σ	1,1	0,5	7	0,46	0,09	0,03
40 cm	1	40,4	6,8	80	2,39	3,32	1,44
	2	41,5	6,0	93	2,32	2,44	1,59
	3	39,4	5,5	100	1,75	2,66	1,52
	4	39,4	5,3	86	2,91	3,80	1,52
	5	41,3	6,7	74	1,99	2,33	1,51
	6	-	-	98	2,18	2,64	-
	7	-	-	101	3,12	2,61	-
	8	-	-	87	2,76	2,10	-
	9	-	-	-	3,14	-	-
	10	-	-	-	2,52	-	-
		\bar{x}_{arth}	40,4	6,1	90	2,51	2,74
	σ	0,9	0,6	9	0,45	0,52	0,05
60 cm	1	35,6	3,2	85	2,12	2,27	1,69
	2	35,5	2,9	70	0,90	2,65	1,71
	3	35,8	2,2	62	1,19	2,89	1,80
	4	37,0	2,8	61	0,52	2,46	1,77
	5	34,9	1,9	72	0,65	2,55	1,76
	6	-	-	70	0,18	2,30	-
	7	-	-	63	1,87	2,23	-
	8	-	-	93	0,00	2,38	-
	9	-	-	-	1,72	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	35,8	2,6	72	1,02	2,47
	σ	0,7	0,5	11	0,71	0,21	0,04

Tabelle A 15. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Göttingen nach der fünften Überfahrt für die Variante PB5.

Göttingen – PB5							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	38,9	1,2	67	-0,30	2,00	1,69
	2	37,6	0,9	65	-0,70	2,03	1,69
	3	36,8	1,0	62	-0,52	1,97	1,72
	4	36,4	1,7	68	0,08	1,97	1,70
	5	37,1	1,1	71	-0,40	1,97	1,67
	6	-	-	62	-0,40	2,45	-
	7	-	-	58	-0,05	2,10	-
	8	-	-	67	-0,22	2,19	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	37,4	1,2	65	-0,31	2,09	1,69
	σ	0,9	0,3	4	0,23	0,15	0,02
40 cm	1	41,1	2,9	99	1,51	2,89	1,44
	2	40,8	2,3	101	2,47	2,64	1,55
	3	40,1	2,3	101	2,75	2,72	1,52
	4	42,1	2,9	100	1,54	2,60	1,54
	5	40,1	2,2	96	2,10	2,51	1,56
	6	-	-	101	2,04	2,54	-
	7	-	-	95	2,82	2,63	-
	8	-	-	101	1,93	2,69	-
	9	-	-	-	1,94	-	-
	10	-	-	-	2,18	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,8	2,5	99	2,13	2,65	1,52
	σ	0,7	0,3	2	0,43	0,11	0,04
60 cm	1	37,6	2,6	82	1,49	2,79	1,54
	2	38,3	2,7	71	2,51	2,20	1,60
	3	40,1	2,5	75	1,64	2,44	1,60
	4	37,7	2,6	73	1,66	2,22	1,63
	5	38,7	2,3	72	2,05	2,70	1,69
	6	-	-	72	2,29	2,50	-
	7	-	-	90	0,74	2,34	-
	8	-	-	86	1,08	2,31	-
	9	-	-	-	2,67	-	-
	10	-	-	-	1,70	-	-
	\bar{x}_{arth}	38,5	2,5	78	1,78	2,44	1,61
	σ	0,9	0,1	7	0,58	0,20	0,05

Tabelle A 16. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Göttingen nach der zehnten Überfahrt für die Variante PB10.

Göttingen – PB10							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	37,7	3,2	49	0,53	2,20	1,64
	2	35,8	1,9	43	1,12	2,10	1,67
	3	37,3	2,3	48	-0,22	2,32	1,65
	4	37,0	2,6	44	-0,10	2,03	1,69
	5	36,9	2,1	50	-0,05	2,10	1,68
	6	-	-	52	-0,30	2,03	-
	7	-	-	45	-0,10	2,20	-
	8	-	-	44	-	2,18	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	36,9	2,4	47	0,13	2,15
	σ	0,6	0,5	3	0,48	0,09	0,02
40 cm	1	43,1	7,2	90	1,63	2,40	1,54
	2	43,0	8,2	86	2,87	2,85	1,52
	3	40,6	7,3	90	2,49	2,70	1,49
	4	40,1	5,1	90	2,35	2,42	1,54
	5	40,9	4,8	98	2,61	3,10	1,61
	6	-	-	89	3,08	3,20	-
	7	-	-	90	2,07	2,76	-
	8	-	-	95	2,57	2,90	-
	9	-	-	-	2,28	-	-
	10	-	-	-	2,29	-	-
		\bar{x}_{arth}	41,5	6,5	91	2,42	2,79
	σ	1,3	1,3	4	0,39	0,27	0,04
60 cm	1	37,8	4,9	72	0,87	2,61	1,67
	2	39,4	5,1	76	2,38	2,75	1,62
	3	37,3	4,9	76	1,21	2,29	1,70
	4	38,8	5,0	69	1,38	2,62	1,59
	5	38,5	5,1	70	1,89	2,26	1,67
	6	-	-	70	2,04	2,85	-
	7	-	-	88	1,41	3,20	-
	8	-	-	68	2,21	2,96	-
	9	-	-	-	1,48	-	-
	10	-	-	-	1,55	-	-
		\bar{x}_{arth}	38,4	5,0	74	1,64	2,69
	σ	0,7	0,1	6	0,45	0,30	0,04

Tabelle A 17. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Göttingen nach der zehnten Überfahrt für die Variante MB.

Göttingen – MB							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	36,5	1,5	66	-0,10	2,16	1,71
	2	37,3	1,6	76	0,48	2,01	1,69
	3	37,4	1,9	58	0,28	2,18	1,63
	4	35,3	1,8	57	0,45	2,03	1,63
	5	36,4	1,7	80	0,76	2,58	1,68
	6	-	-	77	-0,15	2,55	-
	7	-	-	71	0,28	2,73	-
	8	-	-	75	0,08	2,52	-
	9	-	-	-	-0,70	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	36,6	1,7	70	0,15	2,34
	σ	0,8	0,1	8	0,40	0,26	0,03
40 cm	1	36,7	4,0	101	2,12	3,32	1,52
	2	38,3	3,3	102	2,17	3,20	1,64
	3	38,9	4,8	100	2,36	3,02	1,58
	4	39,2	5,1	101	1,94	3,20	1,59
	5	39,4	5,9	103	2,54	2,96	1,58
	6	-	-	101	1,80	2,71	-
	7	-	-	100	2,81	2,81	-
	8	-	-	98	2,79	3,03	-
	9	-	-	-	1,56	-	-
	10	-	-	-	2,64	-	-
		\bar{x}_{arth}	38,5	4,6	101	2,27	3,03
	σ	1,0	0,9	1	0,41	0,19	0,04
60 cm	1	40,6	7,0	93	2,41	2,79	1,61
	2	39,4	6,7	93	2,30	2,69	1,56
	3	39,1	4,8	82	1,58	3,32	1,65
	4	36,8	4,7	80	2,79	2,50	1,55
	5	38,2	5,3	91	1,52	3,10	1,59
	6	-	-	95	1,70	2,90	-
	7	-	-	89	1,17	2,90	-
	8	-	-	95	2,56	3,10	-
	9	-	-	-	1,32	-	-
	10	-	-	-	1,69	-	-
		\bar{x}_{arth}	38,8	5,7	90	1,90	2,91
	σ	1,3	1,0	5	0,54	0,24	0,04

Tabelle A 18. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Göttingen nach der zehnten Überfahrt für die Variante TB.

Göttingen – TB							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P_v kPa	$\log k_f$ $cm \cdot d^{-1}$	$\log k_l$ $cm \cdot d^{-1}$	ρ_B $g \cdot cm^{-3}$
20 cm	1	36,9	1,6	48	-0,40	2,03	1,61
	2	36,3	1,7	50	0,65	1,94	1,61
	3	35,8	1,6	43	1,10	2,18	1,58
	4	36,5	2,2	38	-1,00	2,07	1,63
	5	37,7	1,3	50	0,61	2,80	1,67
	6	-	-	45	1,27	2,76	-
	7	-	-	62	1,35	2,62	-
	8	-	-	51	0,83	2,71	-
	9	-	-	-	-0,10	-	-
	10	-	-	-	-0,22	-	-
		\bar{x}_{arth}	36,6	1,7	48	0,41	2,39
	σ	0,6	0,3	7	0,75	0,34	0,03
40 cm	1	39,2	4,9	83	2,70	2,66	1,59
	2	37,1	4,7	100	2,00	2,77	1,53
	3	41,9	8,4	91	1,72	2,74	1,52
	4	39,5	4,9	88	1,06	2,68	1,61
	5	36,4	4,6	80	2,29	2,70	1,54
	6	-	-	93	1,36	2,66	-
	7	-	-	100	1,93	-	-
	8	-	-	95	1,73	-	-
	9	-	-	-	2,84	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	38,8	5,5	91	1,96	2,70
	σ	1,9	1,5	7	0,55	0,04	0,04
60 cm	1	35,9	3,0	70	0,46	2,65	1,71
	2	36,3	2,6	70	1,85	2,90	1,76
	3	36,4	2,6	58	1,60	2,50	1,80
	4	35,1	2,4	67	1,07	2,58	1,74
	5	38,6	5,7	71	1,35	2,52	1,59
	6	-	-	66	1,89	2,68	-
	7	-	-	75	2,14	3,02	-
	8	-	-	65	1,07	2,58	-
	9	-	-	-	0,88	-	-
	10	-	-	-	1,57	-	-
		\bar{x}_{arth}	36,5	3,3	68	1,39	2,68
	σ	1,2	1,2	5	0,49	0,18	0,07

Tabelle A 19. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Hasbruch vor der ersten Überfahrt für die Variante Referenz.

Hasbruch – Referenz							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	45,6	6,1	42	2,69	2,50	1,34
	2	46,7	7,3	64	2,41	2,03	1,40
	3	50,8	10,1	61	2,33	2,60	1,29
	4	44,2	8,9	62	2,28	2,53	1,42
	5	51,5	12,9	68	2,60	2,07	1,12
	6	-	-	38	2,22	2,72	-
	7	-	-	40	2,15	1,93	-
	8	-	-	52	1,72	2,09	-
	9	-	-	-	2,04	-	-
	10	-	-	-	2,38	-	-
	\bar{x}_{arth}	47,8	9,1	53	2,28	2,31	1,31
	σ	2,9	2,4	11	0,26	0,29	0,11
40 cm	1	33,7	3,3	50	1,16	1,35	1,77
	2	33,7	2,6	64	0,71	1,35	1,79
	3	34,9	4,0	57	1,38	1,78	1,73
	4	32,8	2,1	48	0,99	0,98	1,78
	5	35,2	3,5	44	0,54	1,89	1,69
	6	-	-	48	0,56	1,11	-
	7	-	-	52	1,34	-	-
	8	-	-	51	0,72	-	-
	9	-	-	-	-0,52	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	34,1	3,1	52	0,76	1,41	1,75
	σ	0,9	0,7	6	0,54	0,33	0,04

Tabelle A 20. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter nach am Versuchsstandort Hasbruch nach der dritten Überfahrt für die Variante F14.

Hasbruch – F14							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	38,9	2,8	44	0,94	1,09	1,61
	2	36,1	2,8	41	-0,70	0,28	1,52
	3	39,4	3,2	47	0,80	0,28	1,48
	4	40,4	3,8	39	1,46	1,09	1,62
	5	38,0	3,5	42	1,14	2,20	1,63
	6	-	-	45	1,62	2,35	-
	7	-	-	38	1,20	2,21	-
	8	-	-	-	1,55	-	-
	9	-	-	-	1,26	-	-
	10	-	-	-	0,94	-	-
		\bar{x}_{arth}	38,6	3,2	42	1,02	1,36
	σ	1,5	0,4	3	0,63	0,83	0,06
40 cm	1	30,9	0,9	94	0,82	0,28	1,76
	2	31,8	2,1	79	0,08	0,28	1,82
	3	31,2	1,6	82	0,81	0,28	1,79
	4	31,1	2,3	82	-1,00	1,70	1,78
	5	31,5	1,4	60	0,81	2,02	1,80
	6	-	-	62	0,00	2,08	-
	7	-	-	61	0,11	-	-
	8	-	-	64	0,48	-	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	31,3	1,7	73	0,26	1,10
	σ	0,3	0,5	12	0,58	0,83	0,02

Tabelle A 21. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchstandort Hasbruch nach der siebten Überfahrt für die Variante EMB.

Hasbruch – EMB							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	41,2	3,8	55	2,13	2,14	1,46
	2	40,3	2,5	61	2,35	1,11	1,56
	3	39,4	2,3	63	1,36	2,69	1,48
	4	35,7	2,4	56	2,22	1,07	1,59
	5	39,0	2,5	50	1,63	2,18	1,50
	6	-	-	51	1,17	2,10	-
	7	-	-	48	1,98	2,69	-
	8	-	-	51	1,35	2,03	-
	9	-	-	-	1,62	-	-
	10	-	-	-	1,62	-	-
	\bar{x}_{arth}	39,1	2,7	54	1,74	2,00	1,52
	σ	1,9	0,6	5	0,39	0,58	0,05
40 cm	1	31,3	2,2	61	0,67	0,30	1,77
	2	30,9	3,0	48	1,03	0,30	1,76
	3	29,4	2,8	52	1,64	0,96	1,69
	4	32,4	3,5	51	0,95	0,30	1,71
	5	31,0	2,3	51	1,08	2,29	1,70
	6	-	-	40	1,38	2,49	-
	7	-	-	48	0,86	2,39	-
	8	-	-	52	0,34	2,50	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	31,0	2,8	50	0,99	1,44	1,73
	σ	1,0	0,5	5	0,37	1,00	0,03

Tabelle A 22. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Lengler vor der ersten Überfahrt für die Variante Referenz.

Lengler – Referenz							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	42,6	9,2	40	2,21	2,20	1,38
	2	39,5	6,3	38	1,84	2,15	1,37
	3	41,6	7,3	45	2,46	2,51	1,40
	4	38,3	8,1	45	1,61	2,15	1,26
	5	37,9	6,7	48	1,10	2,09	1,32
	6	–	–	31	2,75	2,31	–
	7	–	–	47	3,27	2,02	–
	8	–	–	–	2,91	1,81	–
	9	–	–	–	3,21	–	–
	10	–	–	–	2,90	–	–
		\bar{x}_{arth}	40,0	7,5	42	2,43	2,15
	σ	1,8	1,0	6	0,68	0,19	0,05
40 cm	1	37,4	4,5	65	1,91	2,02	1,53
	2	39,1	5,1	68	1,88	1,97	1,47
	3	39,5	5,4	59	1,01	2,09	1,53
	4	36,6	4,4	55	1,84	2,30	1,45
	5	38,2	4,6	76	1,45	2,32	1,53
	6	–	–	71	1,45	2,36	–
	7	–	–	63	2,27	2,46	–
	8	–	–	61	2,24	2,38	–
	9	–	–	–	2,64	–	–
	10	–	–	–	2,23	–	–
		\bar{x}_{arth}	38,2	4,8	65	1,89	2,24
	σ	1,1	0,4	6	0,46	0,17	0,03
60 cm	1	36,7	1,8	60	1,73	1,64	1,51
	2	40,0	1,8	66	0,28	1,64	1,62
	3	39,4	2,3	65	0,65	2,07	1,62
	4	37,9	2,3	78	0,20	2,19	1,50
	5	39,9	3,5	61	2,11	1,51	1,56
	6	–	–	67	0,58	1,85	–
	7	–	–	64	-0,22	1,77	–
	8	–	–	66	-0,40	–	–
	9	–	–	–	0,30	–	–
	10	–	–	–	–	–	–
		\bar{x}_{arth}	38,8	2,3	66	0,58	1,81
	σ	1,3	0,6	5	0,79	0,23	0,05

Tabelle A 23. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Lenglern nach der fünften Überfahrt für die Variante JD6.

Lenglern – JD6							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	34,5	4,9	95	0,89	0,80	1,47
	2	34,6	4,3	85	2,09	0,28	1,53
	3	35,7	5,5	99	0,75	1,10	1,52
	4	37,5	6,5	93	1,64	1,10	1,43
	5	39,7	6,9	89	1,25	1,76	1,37
	6	-	-	91	2,03	1,92	-
	7	-	-	91	1,34	2,10	-
	8	-	-	86	1,99	1,68	-
	9	-	-	-	0,93	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	36,4	5,6	91	1,43	1,34	1,46
	σ	2,0	1,0	4	0,50	0,58	0,06
40 cm	1	37,9	4,2	82	2,09	2,36	1,51
	2	36,9	4,7	84	2,38	1,98	1,51
	3	36,0	3,1	75	1,39	2,38	1,50
	4	36,9	3,6	71	1,19	1,55	1,55
	5	37,9	3,9	91	1,62	1,88	1,58
	6	-	-	81	0,46	2,04	-
	7	-	-	88	2,35	1,99	-
	8	-	-	64	0,46	2,16	-
	9	-	-	-	2,47	-	-
	10	-	-	-	0,53	-	-
	\bar{x}_{arth}	37,1	3,9	80	1,49	2,04	1,53
	σ	0,7	0,5	8	0,77	0,25	0,03
60 cm	1	34,6	0,8	86	0,93	1,85	1,53
	2	38,1	2,0	88	1,26	1,67	1,66
	3	37,7	2,0	71	0,23	1,97	1,68
	4	39,2	3,0	71	-0,40	1,88	1,59
	5	37,4	2,9	81	0,77	1,92	1,56
	6	-	-	67	1,31	1,88	-
	7	-	-	78	0,52	1,85	-
	8	-	-	78	0,87	1,90	-
	9	-	-	-	0,36	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	37,4	2,1	78	0,65	1,87	1,60
	σ	1,5	0,8	7	0,51	0,08	0,06

Tabelle A 24. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Lengler nach der fünften Überfahrt für die Variante HÄG.

Lengler - HÄG							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	36,5	6,2	61	1,40	2,20	1,27
	2	36,3	6,1	78	1,78	2,11	1,35
	3	36,9	5,1	85	2,73	1,58	1,38
	4	36,9	6,1	69	2,15	2,08	1,34
	5	39,8	6,9	43	2,44	2,48	1,37
	6	-	-	61	1,68	1,80	-
	7	-	-	81	2,21	1,80	-
	8	-	-	70	1,10	1,85	-
	9	-	-	-	1,70	-	-
	10	-	-	-	2,10	-	-
		\bar{x}_{arth}	37,3	6,1	69	1,93	1,99
	σ	1,3	0,6	13	0,47	0,27	0,04
40 cm	1	38,9	5,7	78	1,07	2,35	1,55
	2	35,3	3,4	68	1,84	2,35	1,43
	3	39,0	6,0	57	2,77	1,71	1,53
	4	39,3	6,8	60	2,56	2,41	1,46
	5	36,3	6,1	69	2,99	2,41	1,41
	6	-	-	77	1,96	2,43	-
	7	-	-	69	2,47	1,98	-
	8	-	-	53	1,81	1,92	-
	9	-	-	-	2,12	-	-
	10	-	-	-	1,67	-	-
		\bar{x}_{arth}	37,8	5,6	66	2,13	2,19
	σ	1,6	1,2	8	0,55	0,26	0,05
60 cm	1	38,6	3,8	71	1,26	1,11	1,53
	2	37,4	1,6	72	-0,70	1,89	1,58
	3	36,6	0,3	54	0,88	1,46	1,58
	4	38,8	1,7	67	-1,52	2,13	1,63
	5	41,0	2,1	64	0,67	2,20	1,61
	6	-	-	63	-1,00	1,88	-
	7	-	-	63	-1,00	1,41	-
	8	-	-	62	0,28	1,98	-
	9	-	-	-	1,62	-	-
	10	-	-	-	1,62	-	-
		\bar{x}_{arth}	38,5	1,9	65	0,21	1,76
	σ	1,5	1,1	5	1,12	0,36	0,03

Tabelle A 25. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Lenglern nach der fünften Überfahrt für die Variante SCH.

Lenglern – SCH							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	37,5	5,6	73	1,45	1,76	1,39
	2	36,5	4,5	82	1,56	2,13	1,44
	3	38,8	5,3	52	1,20	2,20	1,35
	4	35,3	5,8	53	2,00	2,04	1,36
	5	37,9	6,2	72	2,37	1,98	1,39
	6	-	-	56	1,98	1,98	-
	7	-	-	69	1,60	1,58	-
	8	-	-	65	2,27	1,50	-
	9	-	-	-	1,88	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	37,2	5,5	65	1,81	1,90	1,39
	σ	1,2	0,6	10	0,37	0,24	0,03
40 cm	1	35,4	3,6	69	1,40	2,40	1,51
	2	39,2	7,6	90	1,19	2,26	1,50
	3	36,9	3,3	91	0,80	2,25	1,58
	4	39,4	5,3	81	2,58	2,34	1,56
	5	35,4	3,0	69	2,23	2,25	1,54
	6	-	-	69	0,73	2,30	-
	7	-	-	63	2,55	2,27	-
	8	-	-	78	2,26	2,24	-
	9	-	-	-	2,16	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	37,3	4,6	76	1,77	2,29	1,54
	σ	1,8	1,7	10	0,70	0,05	0,03
60 cm	1	39,1	3,1	79	0,78	1,65	1,66
	2	39,7	3,0	70	0,97	1,51	1,65
	3	37,2	1,9	71	0,23	1,81	1,61
	4	36,2	3,1	78	0,30	1,35	1,51
	5	37,5	1,9	79	-0,15	-0,10	1,65
	6	-	-	72	-0,15	-0,10	-
	7	-	-	74	0,32	0,18	-
	8	-	-	77	-0,22	0,23	-
	9	-	-	-	0,88	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	37,9	2,6	75	0,33	0,82	1,62
	σ	1,3	0,6	3	0,43	0,78	0,06

Tabelle A 26. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Wülperode vor der ersten Überfahrt für die Variante Referenz.

Wülperode – Referenz							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	43,5	4,6	48	0,21	2,24	1,50
	2	44,0	5,5	47	2,67	2,43	1,52
	3	46,0	5,2	52	-0,47	2,10	1,61
	4	46,1	4,5	52	2,42	1,85	1,60
	5	44,0	5,4	56	2,84	2,42	1,50
	6	-	-	58	2,27	2,42	-
	7	-	-	50	0,60	2,38	-
	8	-	-	56	0,90	1,94	-
	9	-	-	-	1,70	-	-
	10	-	-	-	2,55	-	-
		\bar{x}_{arth}	44,7	5,0	52	1,57	2,22
	σ	1,1	0,4	4	1,11	0,22	0,05
40 cm	1	41,5	4,5	51	1,69	1,71	1,54
	2	44,4	4,4	61	1,05	1,76	1,51
	3	44,5	5,2	62	1,87	1,95	1,47
	4	45,6	4,9	65	0,17	2,12	1,51
	5	43,6	5,3	58	1,00	2,00	1,56
	6	-	-	56	0,57	1,70	-
	7	-	-	58	2,62	2,50	-
	8	-	-	48	3,30	2,21	-
	9	-	-	-	2,61	-	-
	10	-	-	-	2,92	-	-
		\bar{x}_{arth}	43,9	4,9	57	1,78	1,99
	σ	1,4	0,4	5	1,01	0,26	0,03
60 cm	1	42,9	2,5	63	-0,57	2,43	1,46
	2	43,1	2,1	58	-0,42	2,61	1,50
	3	45,5	2,0	61	-0,22	1,68	1,41
	4	41,5	3,0	38	0,69	2,46	1,55
	5	41,0	6,4	64	0,21	2,08	1,56
	6	-	-	54	-0,32	1,84	-
	7	-	-	61	-0,10	2,06	-
	8	-	-	48	-	2,03	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	42,8	3,2	56	-0,10	2,15
	σ	1,6	1,6	8	0,40	0,30	0,06

Tabelle A 27. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Wülperode nach der ersten Überfahrt für die Variante WI.

Wülperode – WI							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	37,3	1,8	72	-1,52	2,24	1,58
	2	39,6	2,6	78	-0,59	2,46	1,63
	3	39,4	2,1	73	-0,77	2,35	1,64
	4	38,2	3,0	71	-1,22	2,17	1,57
	5	38,2	3,3	68	-0,12	2,26	1,49
	6	-	-	58	-0,30	2,32	-
	7	-	-	54	-0,85	2,20	-
	8	-	-	60	-	2,29	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	38,5	2,6	67	-0,77	2,29	1,58
	σ	0,9	0,6	8	0,45	0,09	0,05
40 cm	1	42,5	3,1	68	0,73	1,98	1,65
	2	40,4	2,6	67	2,55	1,88	1,58
	3	40,7	4,3	79	0,18	1,95	1,56
	4	38,6	3,0	69	0,31	2,22	1,61
	5	40,3	3,7	57	1,09	2,57	1,59
	6	-	-	70	0,21	2,48	-
	7	-	-	63	-0,85	2,42	-
	8	-	-	51	-0,72	2,34	-
	9	-	-	-	1,28	-	-
	10	-	-	-	-1,05	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,5	3,3	66	0,37	2,23	1,60
	σ	1,2	0,6	8	1,05	0,25	0,03

Tabelle A 28. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Wülperode nach der ersten Überfahrt für die Variante KUP.

Wülperode – KUP							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _i cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	37,2	0,3	69	-0,59	1,83	1,66
	2	37,3	0,5	75	-0,25	1,96	1,63
	3	36,3	0,0	62	-0,25	1,76	1,69
	4	36,4	1,2	64	0,03	1,89	1,66
	5	35,0	1,3	57	-2,00	2,10	1,55
	6	-	-	61	-2,00	1,70	-
	7	-	-	61	-0,38	1,94	-
	8	-	-	62	-1,30	1,75	-
	9	-	-	-	-1,70	-	-
	10	-	-	-	-0,07	-	-
		\bar{x}_{arth}	36,4	0,7	64	-0,85	1,87
	σ	0,8	0,5	5	0,77	0,12	0,05
40 cm	1	42,6	4,8	63	0,03	2,28	1,62
	2	41,5	3,7	65	-1,70	2,36	1,61
	3	42,1	2,6	69	-2,00	2,35	1,63
	4	42,0	3,3	69	-1,40	2,20	1,67
	5	41,4	4,6	62	-0,23	1,54	1,46
	6	-	-	55	-0,74	1,80	-
	7	-	-	70	0,27	2,43	-
	8	-	-	62	0,46	2,65	-
	9	-	-	-	-0,07	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	41,9	3,8	64	-0,60	2,20
	σ	0,4	0,8	5	0,85	0,34	0,07
60 cm	1	41,3	0,3	80	-2,00	2,35	1,53
	2	37,1	1,5	65	-2,00	2,04	1,52
	3	38,8	1,7	72	-2,00	2,01	1,54
	4	36,6	0,9	55	-1,70	1,99	1,47
	5	40,2	0,2	52	-2,00	2,64	1,62
	6	-	-	30	-1,70	2,52	-
	7	-	-	55	-1,52	2,41	-
	8	-	-	51	-	2,52	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
		\bar{x}_{arth}	38,8	0,9	58	-1,85	2,31
	σ	1,8	0,6	14	0,19	0,24	0,05

Tabelle A 29. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Wiedelah vor der ersten Überfahrt für die Variante Referenz.

Wiedelah- Referenz							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	41,2	8,5	38	1,99	2,90	1,20
	2	43,9	8,0	41	1,52	2,90	1,39
	3	45,1	6,6	45	0,32	2,76	1,45
	4	42,0	9,2	33	2,54	2,82	1,41
	5	42,4	6,7	28	3,21	2,76	1,32
	6	-	-	38	0,26	2,78	-
	7	-	-	23	3,29	2,78	-
	8	-	-	65	2,64	3,10	-
	9	-	-	-	2,45	-	-
	10	-	-	-	3,00	-	-
	\bar{x}_{arth}	42,9	7,8	39	2,12	2,85	1,35
	σ	1,4	1,0	12	1,05	0,11	0,09
40 cm	1	40,6	4,9	55	1,74	2,50	1,49
	2	42,6	7,5	57	-0,36	2,68	1,39
	3	42,6	3,6	43	1,88	2,46	1,49
	4	45,0	7,9	50	2,99	2,50	1,37
	5	42,9	7,2	65	3,42	2,75	1,43
	6	-	-	58	2,68	2,58	-
	7	-	-	51	3,27	2,64	-
	8	-	-	52	2,15	2,70	-
	9	-	-	-	2,83	-	-
	10	-	-	-	2,81	-	-
	\bar{x}_{arth}	42,7	6,2	54	2,34	2,60	1,43
	σ	1,4	1,7	6	1,04	0,10	0,05
60 cm	1	41,7	3,4	50	2,20	2,60	1,37
	2	38,5	4,6	38	2,18	2,54	1,58
	3	45,1	2,7	48	2,28	2,75	1,38
	4	38,2	3,7	67	1,31	2,62	1,53
	5	39,9	4,6	58	2,44	2,80	1,53
	6	-	-	47	0,54	2,64	-
	7	-	-	29	2,47	2,50	-
	8	-	-	41	2,12	2,64	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,7	3,8	47	1,94	2,64	1,48
	σ	2,5	0,7	11	0,63	0,09	0,09

Tabelle A 30. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Wiedelah nach der ersten Überfahrt für die Variante WI.

Wiedelah – WI							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	42,3	2,2	53	0,34	2,30	1,55
	2	34,4	2,8	51	0,86	2,46	1,63
	3	38,4	1,2	63	0,54	2,26	1,44
	4	41,6	3,5	56	1,30	2,14	1,47
	5	40,4	4,7	63	0,40	2,12	1,41
	6	–	–	49	0,04	2,20	–
	7	–	–	58	-0,22	2,03	–
	8	–	–	57	–	–	–
	9	–	–	–	–	–	–
	10	–	–	–	–	–	–
		\bar{x}_{arth}	39,4	2,9	56	0,47	2,22
	σ	2,8	1,2	5	0,47	0,13	0,08
40 cm	1	37,6	3,6	73	2,51	2,35	1,64
	2	37,8	3,4	72	2,32	2,41	1,66
	3	38,2	3,7	69	-1,00	2,38	1,54
	4	38,5	4,0	63	1,37	2,12	1,70
	5	42,2	5,2	56	1,51	2,80	1,50
	6	–	–	62	1,71	2,30	–
	7	–	–	65	1,73	2,73	–
	8	–	–	61	0,15	2,68	–
	9	–	–	–	1,93	–	–
	10	–	–	–	2,15	–	–
		\bar{x}_{arth}	38,9	4,0	65	1,44	2,47
	σ	1,7	0,6	5	1,02	0,22	0,08
60 cm	1	38,7	3,0	45	1,59	2,03	1,42
	2	42,7	2,2	49	0,71	2,60	1,54
	3	39,6	4,0	54	0,20	2,05	1,44
	4	41,0	3,3	43	0,30	1,99	1,53
	5	42,0	2,8	37	1,76	2,57	1,46
	6	–	–	47	2,24	2,28	–
	7	–	–	49	0,30	2,31	–
	8	–	–	44	0,23	2,36	–
	9	–	–	–	2,04	–	–
	10	–	–	–	–	–	–
		\bar{x}_{arth}	40,8	3,1	46	1,04	2,27
	σ	1,5	0,6	5	0,80	0,22	0,05

Tabelle A 31. Einzel-, Mittelwerte und Standardabweichungen der bodenphysikalischen Parameter am Versuchsstandort Wiedelah nach der ersten Überfahrt für die Variante KUP.

Wiedelah – KUP							
Tiefe	Wdh	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	P _v kPa	log k _f cm · d ⁻¹	log k _l cm · d ⁻¹	ρ _B g · cm ⁻³
20 cm	1	40,4	3,2	58	1,60	2,74	1,43
	2	40,8	2,8	60	1,63	2,85	1,55
	3	43,7	4,4	79	0,56	2,65	1,52
	4	40,1	3,4	55	1,76	2,80	1,41
	5	43,0	5,0	57	-0,52	1,98	1,42
	6	-	-	53	0,30	1,85	-
	7	-	-	49	-0,70	1,71	-
	8	-	-	57	0,77	1,76	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	41,6	3,8	59	0,68	2,29	1,47
	σ	1,5	0,8	8	0,90	0,48	0,06
40 cm	1	39,5	2,6	69	1,44	2,28	1,59
	2	38,0	2,1	54	0,75	2,26	1,59
	3	39,7	3,2	63	-1,00	2,20	1,64
	4	39,6	2,9	59	1,25	2,38	1,65
	5	39,4	2,8	62	0,08	2,35	1,58
	6	-	-	65	1,57	1,85	-
	7	-	-	54	-1,00	1,92	-
	8	-	-	69	1,01	2,06	-
	9	-	-	-	-0,10	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	39,2	2,7	62	0,44	2,16	1,61
	σ	0,6	0,4	6	0,94	0,19	0,03
60 cm	1	39,3	2,2	48	1,14	2,70	1,54
	2	40,5	3,2	58	0,00	2,41	1,55
	3	41,4	1,9	51	0,36	1,98	1,51
	4	42,6	2,9	48	0,67	1,93	1,56
	5	40,9	3,2	53	0,54	1,92	1,55
	6	-	-	49	1,08	2,13	-
	7	-	-	48	0,04	1,15	-
	8	-	-	45	-	1,68	-
	9	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	\bar{x}_{arth}	40,9	2,7	50	0,55	1,99	1,54
	σ	1,1	0,5	4	0,42	0,44	0,02

Tabelle A 32. Einzelwerte der Wiederholungen, Mittelwerte und Standardabweichungen der 1. Hauptspannung (σ_1) am Versuchsstandort Reinshof für die Überfahrungsvarianten JD und PB.

Reinshof – σ_1									
Maschine	Tiefe	Überfahrt	1. Wdh	2. Wdh	3. Wdh	\bar{x}_{Wdh}	σ	\bar{x}_{Ges}	σ
	cm	Nummer	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
John Deere 1270e	20	1	360	387	461	403	43	403	43
	40	1	226	–	–	226	–	226	–
	60	1	29	32	–	31	2	31	2
Ponsse Buffalo	20	1	526	–	–	526	–	526	–
		2	211	–	242	222	14	250	28
		3	214	251	245	237	16		
		4	252	250	290	264	18		
		5	256	297	311	288	23		
	1	247	–	–	247	–	247		
	40	2	110	180	–	145	35	157	37
		3	107	185	–	146	39		
		4	113	190	–	152	39		
		5	134	195	–	165	31		
1		36	–	–	36	–	36		
60	2	29	32	–	31	2	31	3	
	3	28	32	–	30	2			
	4	29	34	–	32	3			
	5	25	33	–	29	4			
	1	36	–	–	36	–			36

Tabelle A 33. Einzelwerte der Wiederholungen, Mittelwerte und Standardabweichungen der 1. Hauptspannung (σ_1) am Versuchsstandort Vaake für die Überfahrungsvarianten JD und PB.

Vaake – σ_1									
Maschine	Tiefe	Überfahrt	1. Wdh	2. Wdh	3. Wdh	\bar{x}_{Wdh}	σ	\bar{x}_{Ges}	σ
	cm	Nummer	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
John Deere 1270e	20	1	367	619	449	478	105	478	105
	40	1	308	376	226	303	61	303	61
	60	1	76	–	–	76	–	76	–
Ponsse Buffalo	20	1	647	808	–	728	81	728	81
		2	376	334	241	317	56	348	47
		3	373	325	292	330	33		
		4	389	364	305	353	35		
		5	410	396	365	390	19		
	1	442	–	–	442	–	442		
	40	2	289	177	155	207	59	191	68
		3	284	141	142	189	67		
		4	289	141	144	191	69		
		5	276	136	117	176	71		
1		113	81	–	97	28	97		
60	2	71	103	–	87	16	81	6	
	3	71	81	–	76	5			
	4	56	104	–	80	24			
	5	73	88	–	81	8			
	1	113	81	–	97	28			97

Tabelle A 34. Einzelwerte der Wiederholungen, Mittelwerte und Standardabweichungen der 1. Hauptspannung (σ_1) am Versuchsstandort Silberborn für die Überfahrungsvarianten JD und PB.

Silberborn – σ_1									
Maschine	Tiefe cm	Überfahrt Nummer	1. Wdh kPa	2. Wdh kPa	3. Wdh kPa	\bar{x}_{Wdh} kPa	σ kPa	\bar{x}_{Ges} kPa	σ kPa
John Deere 1270e	20	1	175	186	–	181	6	181	6
	40	1	114	127	–	121	7	121	7
	60	1	92	111	–	102	10	102	10
Ponsse Buffalo	20	1	302	–	–	302	–	302	–
		2	396	242	–	319	77	390	75
		3	454	376	–	415	39		
		4	477	393	–	435	42		
	40	1	150	–	–	150	–	150	–
		2	111	–	–	111	–	189	70
		3	183	140	–	162	22		
		4	315	197	–	256	59		
	60	1	128	–	–	128	–	128	–
		2	139	60	–	100	40	89	32
		3	128	58	–	93	35		
		4	80	71	–	76	5		

Tabelle A 35. Einzelwerte der Wiederholungen, Mittelwerte und Standardabweichungen der 1. Hauptspannung (σ_1) am Versuchsstandort Hasbruch für die Überfahrungsvarianten F14 und EMB.

Hasbruch – σ_1									
Maschine	Tiefe cm	Überfahrt Nummer	1./4. Wdh kPa	2./5. Wdh kPa	3./6. Wdh kPa	\bar{x}_{Wdh} kPa	σ kPa	\bar{x}_{Ges} kPa	σ kPa
Rottne F14	20	1	371	293	284	310	46	255	56
			315	237	361				
		2	205	189	207	218	25		
			266	207	233				
EMB Elliator	20	3	226	195	236	219	17	93	30
		1	172	81	119	124	37		
		2	166	87	98	117	35		
		3	124	66	86	92	24		
		4	99	75	81	85	10		
		5	94	60	76	77	14		
		6	102	73	86	87	12		
7	84	53	62	66	13				

Tabelle A 36. Einzelwerte der Wiederholungen, Mittelwerte und Standardabweichungen der 1. Hauptspannung (σ_1) am Versuchsstandort Göttingen für die Überfahrungsvarianten PB.

Göttingen – σ_1 (PB)									
Maschine	Tiefe cm	Überfahrt Nummer	1. Wdh kPa	2. Wdh kPa	3. Wdh kPa	\bar{x}_{Wdh} kPa	σ kPa	\bar{x}_{Ges} kPa	σ kPa
Ponsse Buffalo	20	1	428	633	455	505	91	410	122
		2	249	355	–	302	53		
		3	294	478	316	363	82		
		4	228	596	359	394	152		
		5	299	–	–	299	–		
		6	339	392	–	366	27		
		7	366	395	422	394	23		
		8	291	645	392	443	149		
		9	337	648	441	475	129		
		10	325	627	349	434	137		
Ponsse Buffalo	40	1	209	–	–	209	–	169	27
		2	144	161	142	149	9		
		3	157	168	116	147	22		
		4	156	182	150	163	14		
		5	171	185	125	160	26		
		6	173	173	–	173	0		
		7	180	126	156	154	22		
		8	186	184	–	185	1		
		9	198	163	236	199	30		
		10	195	200	–	198	3		
Ponsse Buffalo	60	1	43	64	40	49	11	46	14
		2	35	67	35	46	15		
		3	39	59	–	49	10		
		4	34	64	34	44	14		
		5	37	37	–	37	0		
		6	30	58	35	41	12		
		7	37	85	–	61	24		
		8	36	64	36	45	13		
		9	38	56	58	51	9		
		10	33	–	–	33	–		

Tabelle A 37. Einzelwerte der Wiederholungen, Mittelwerte und Standardabweichungen der 1. Hauptspannung (σ_1) am Versuchsstandort Göttingen für die Überfahrungsvarianten MB.

Göttingen – σ_1 (MB)									
Maschine	Tiefe cm	Überfahrt Nummer	1. Wdh kPa	2. Wdh kPa	3. Wdh kPa	\bar{x}_{Wdh} kPa	σ kPa	\bar{x}_{Ges} kPa	σ kPa
Ponsse Buffalo mit Moorband	20	1	412	342	584	446	102	356	88
		2	340	314	496	383	80		
		3	331	201	466	333	108		
		4	355	481	-	418	63		
		5	304	312	388	335	38		
		6	379	266	469	371	83		
		7	286	225	425	312	84		
		8	372	283	324	326	36		
		9	344	322	451	372	56		
		10	229	255	355	280	54		
Ponsse Buffalo mit Moorband	40	1	179	173	-	176	3	144	25
		2	186	162	-	174	12		
		3	116	159	-	138	22		
		4	126	174	-	150	24		
		5	123	160	-	142	19		
		6	98	152	-	125	27		
		7	107	143	-	125	18		
		8	122	156	-	139	17		
		9	126	156	-	141	15		
		10	111	151	-	131	20		
Ponsse Buffalo mit Moorband	60	1	55	19	66	47	20	49	17
		2	53	18	73	48	23		
		3	48	25	64	46	16		
		4	50	70	-	60	10		
		5	46	29	66	47	15		
		6	47	27	70	48	18		
		7	43	35	70	49	15		
		8	46	30	65	47	14		
		9	46	36	71	51	15		
		10	43	30	67	47	15		

Tabelle A 38. Einzelwerte der Wiederholungen, Mittelwerte und Standardabweichungen der 1. Hauptspannung (σ_1) am Versuchsstandort Göttingen für die Überfahrungsvarianten TB.

Göttingen – σ_1 (TB)									
Maschine	Tiefe cm	Überfahrt Nummer	1. Wdh kPa	2. Wdh kPa	3. Wdh kPa	\bar{x}_{Wdh} kPa	σ kPa	\bar{x}_{Ges} kPa	σ kPa
Ponsse Buffalo mit Traktionsband	20	1	639	624	–	632	8	430	99
		2	460	322	–	391	69		
		3	358	267	–	313	46		
		4	472	246	–	359	113		
		5	340	390	–	365	25		
		6	440	386	–	413	27		
		7	453	414	–	434	20		
		8	386	457	–	422	36		
		9	493	419	–	456	37		
		10	538	487	–	513	26		
Ponsse Buffalo mit Traktionsband	40	1	205	146	–	176	30	155	45
		2	124	106	–	115	9		
		3	188	114	–	151	37		
		4	204	111	–	158	47		
		5	206	–	–	206	–		
		6	205	133	–	169	36		
		7	218	104	–	161	57		
		8	124	122	–	123	1		
		9	231	111	–	171	60		
		10	188	107	–	148	41		
Ponsse Buffalo mit Traktionsband	60	1	76	–	–	76	–	70	7
		2	68	–	–	68	–		
		3	76	–	–	76	–		
		4	76	–	–	76	–		
		5	73	–	–	73	–		
		6	61	–	–	61	–		
		7	74	–	–	74	–		
		8	60	–	–	60	–		
		9	76	–	–	76	–		
		10	57	–	–	57	–		

Tabelle A 39. Einzelwerte der Wiederholungen, Mittelwerte und Standardabweichungen der 1. Hauptspannung (σ_1) am Versuchsstandort Lenglem für die Überfahrungsvarianten JD6, HG und SCH.

Lenglem – σ_1									
Maschine	Tiefe cm	Überfahrt Nummer	1. Wdh kPa	2. Wdh kPa	3. Wdh kPa	\bar{x}_{Wdh} kPa	σ kPa	\bar{x}_{Ges} kPa	σ kPa
John Deere 6320	20	1	167	-	-	167	-	133	24
		2	139	-	-	139	-		
		3	133	-	-	133	-		
		4	107	-	-	107	-		
		5	102	-	-	102	-		
John Deere 6320	40	1	92	-	-	92	-	60	14
		2	74	-	-	74	-		
		3	60	-	-	60	-		
		4	59	-	-	59	-		
		5	53	-	-	53	-		
John Deere 6320	60	1	42	-	-	42	-	39	5
		2	40	-	-	40	-		
		3	39	-	-	39	-		
		4	32	-	-	32	-		
		5	30	-	-	30	-		
Hägglunds	20	1	37	-	-	37	-	34	3
		2	31	-	-	31	-		
		3	34	-	-	34	-		
		4	34	-	-	34	-		
		5	27	-	-	27	-		
Hägglunds	40	1	15	-	-	15	-	12	2
		2	13	-	-	13	-		
		3	12	-	-	12	-		
		4	11	-	-	11	-		
		5	9	-	-	9	-		
Hägglunds	60	1	11	-	-	11	-	7	2
		2	5	-	-	5	-		
		3	8	-	-	8	-		
		4	7	-	-	7	-		
		5	6	-	-	6	-		
Schlitten	20	1	112	-	-	112	-	92	14
		2	102	-	-	102	-		
		3	92	-	-	92	-		
		4	72	-	-	72	-		
		5	84	-	-	84	-		
Schlitten	40	1	74	-	-	74	-	69	4
		2	73	-	-	73	-		
		3	69	-	-	69	-		
		4	65	-	-	65	-		
		5	64	-	-	64	-		
Schlitten	60	1	36	-	-	36	-	30	6
		2	32	-	-	32	-		
		3	30	-	-	30	-		
		4	22	-	-	22	-		
		5	21	-	-	21	-		

Danksagung

Ohne die Mitwirkung vieler hilfsbereiter und wissbegieriger Menschen wäre die Abfassung dieser Dissertation nicht möglich gewesen. Von daher möchte ich mich an dieser Stelle ganz herzlichst bei allen Helfern bedanken.

Prof. Prof. h.c. Dr. Dr. h.c. Rainer Horn danke ich für die Möglichkeit der Promotion am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, die Möglichkeit auf nationalen und internationalen Tagungen viele wertvolle Erfahrungen sammeln zu dürfen und selbstverständlich für die Begutachtung und Begleitung meiner Arbeit mit großem Wissensinput zu jeder Zeit.

Bei Prof. Dr. Rainer Duttmann bedanke ich mich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats.

Dr. Heiner Fleige danke ich herzlichst für die vielen Anregungen und Verbesserungsvorschläge, welche sich nicht nur auf die Dissertation beschränkten, sondern auch in vielen anderen Bereichen sehr hilfreich waren.

Mein Dank gilt allen Kollegen aus Göttingen und Osnabrück für die Möglichkeit an ihrem Projekt RÜWOLA teilzuhaben. Prof. Dr. Thorsten Gaertig und Prof. Dr. Bettina Kietz haben mich stets unterstützt und mir mit Rat zur Seite gestanden. Dafür bin ich ihnen sehr dankbar. An dieser Stelle möchte ich Corinna Ebeling hervorheben, die mich auch nach meiner Zeit in Göttingen stets auf dem Laufenden gehalten hat. Danke.

Außerdem möchte ich mich bei allen Projektpartnern und Förderern bedanken. Namentlich zu erwähnen sind die Niedersächsischen Landesforsten, die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, die Firma Felasto Pur und die Arbeitsgruppe um Prof. Bombosch.

Die Analyse der Proben im Labor wäre ohne die Unterstützung vieler helfender Kollegen nicht möglich gewesen. Besonders Veronika, Sabine, Andreas und Jens haben dazu beigetragen.

Für die moralische und fachliche Unterstützung während der Promotion möchte ich mich bei allen „Mitgliedern“ der täglichen Mensa-/ Mittagsrunde bedanken, insbesondere bei Thomas, Sebastian und Nina.

Ein Dank geht an alle HiWi's, die mit mir auf Tour waren und zum Gelingen beigetragen haben. An dieser Stelle sind besonders Arne Hanssen und Robert Minkler hervorzuheben, die an fast allen Probenahmen beteiligt waren.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meiner Familie und meiner Murre bedanken, ohne die ich niemals so weit gekommen wäre. Vielen Dank für alles!

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Roland Riggert
Geburtsdatum: 03. Juli 1987
Geburtsort: Uelzen
Nationalität: deutsch
Familienstand: ledig

Schulische Ausbildung

07/1993-06/1997 Grundschule Soltendieck
07/1997-06/1999 Orientierungsstufe Bad Bodenteich
07/1999-06/2006 Herzog-ernst-Gymnasium Uelzen
06/2006 ***allgemeine Hochschulreife***

Universitäre Ausbildung

09/2006-01/2007 Studium der Geophysik
01/2007-12/2011 Studium der Agrarwissenschaften
Schwerpunkt: Umweltwissenschaften der Agrarlandschaften
04/2004 ***Abschluss Bachelor of Science der Agrarwissenschaften***
12/2011 ***Abschluss Master of Science der Agrarwissenschaften***

Beruflicher Werdegang

07/2010-07/2011 **studentische Hilfskraft**
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
02/2012-02/2012 **studentische Hilfskraft**
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
03/2012-02/2015 **wissenschaftlicher Mitarbeiter**
Fakultät Ressourcenmanagement, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim/ Holzminden/Göttingen
03/2015-08/2015 **wissenschaftlicher Mitarbeiter**
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

M. Sc. Roland Riggert

Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Titel „Spannungseinträge unter Holzerntemaschinen und Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter“ selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe und dass ich die Arbeit noch keinem anderen Fachbereich bzw. noch keiner anderen Fakultät vorgelegt habe.

Kiel, den 04.05.2015

Roland Riggert

Unterschrift

Hiermit erkläre ich, dass gegen mich kein strafrechtliches Ermittlungsverfahren schwebt.

Kiel, den 04.05.2015

Roland Riggert

Unterschrift

Hiermit erkläre ich, dass die Dissertation nach den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis (Standard wissenschaftlichen Arbeitens nach den Empfehlungen der DFG) abgefasst wurde.

Kiel, den 04.05.2015

Roland Riggert

Unterschrift