

SCHRIFTENREIHE

**Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
Universität Kiel**



Nr. 65 (2005)

Jörg Voßbrink

**Bodenspannungen und Deformationen
in Waldböden durch Ernteverfahren**

Herausgeber: R. Horn, J. Lamp, B. Sattelmacher

(Nur für Dissertationen:)

**Gedruckt mit Genehmigung der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel**

**Vertrieb: Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel**

Olshausenstr. 40

D - 24107 Kiel

(e-Mail: smevlan@soils.uni-kiel.de)

ISSN 0933-680 X

Preis: Eur 10 (incl. Versandkosten)

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

Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren

Dissertation
Zur Erlangung des Doktorgrades
der Agrar – und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Diplom – Geograph Jörg Voßbrink
aus Wipperfürth

Kiel, 2004

Dekan: Prof. Dr. S. Wolffram
Erster Berichterstatter: Prof. Dr. R. Horn
Zweiter Berichterstatter: Prof. Dr. R. Duttmann
Tag der mündlichen Prüfung 02.02.2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Material und Methoden	5
2.1	Geologie	5
2.2	Bodenkundliches Ausgangsmaterial	6
2.3	Kontaktflächendruck	7
2.3.1	Nominal Ground Pressure (NGP) nach Mikkonen (1975)	7
2.3.2	Druckzonenmodell nach Ziesak und Matthies (2001)	8
2.4	Dynamische Spannungsmessung im Boden (SST/DTS)	9
2.4.1	Stress State Transducer (SST)	9
2.4.2	Displacement Transducer System (DTS)	12
2.4.3	Kombinierte SST/DTS Messung	12
2.4.4	Spannungsaufzeichnung komplexer Erntevorgänge mit dem SST/DTS	14
2.5	Vorbelastung (Pv)	17
2.6	Leitfähigkeiten	17
2.6.1	Luftleitfähigkeitsbeiwert (KI)	18
2.6.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	19
3	Ergebnisse	20
3.1	Impex 1650 „Königstiger“ / Forwarder Timberjack 810	20
3.1.1	Kontaktflächendruck	21
3.1.2	Spannungsmessung	22
3.1.3	Bodendeformation	23
3.1.4	Vorbelastung (Pv)	24
3.1.5	Leitfähigkeiten	26
3.1.5.1	Luftleitfähigkeit (KI)	26
3.1.5.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	27
3.2	Pferderückung „Schwarzwälder“	29
3.2.1	Kontaktflächendruck	30
3.2.2	Spannungsmessung	31
3.2.3	Vorbelastung (Pv)	32
3.2.4	Leitfähigkeiten	33
3.2.4.1	Luftleitfähigkeit (KI)	34
3.2.4.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	35
3.3	Impex 1880 „Hannibal“ / Forwarder Timberjack 810	36
3.3.1	Kontaktflächendruck	37
3.3.2	Spannungsmessung	38
3.3.3	Bodendeformation	39
3.3.4	Vorbelastung (Pv)	40
3.3.5	Leitfähigkeiten	41

3.3.5.1	Luftleitfähigkeit (KI)	41
3.3.5.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	43
3.4	Radharvester "Caterpillar 580"	44
3.4.1	Kontaktflächendruck	45
3.4.2	Spannungsmessung	46
3.4.3	Bodendeformation	47
3.4.4	Vorbelastung (Pv)	48
3.4.5	Leitfähigkeiten	49
3.4.5.1	Luftleitfähigkeitswerte (KI)	49
3.4.5.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	50
3.5	Valmet 911 Kettenharvester „Snake“ / Timberjack 1110 Forwarder	52
3.5.1	Kontaktflächendruck	52
3.5.2	Spannungsmessung	53
3.5.3	Bodendeformation	54
3.5.4	Vorbelastung (Pv)	55
3.5.5	Leitfähigkeiten	56
3.5.5.1	Luftleitfähigkeit (KI)	56
3.5.5.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	57
3.6	HSM 904 Forstspeziialschlepper – Standort 1	59
3.6.1	Kontaktflächendruck	60
3.6.2	Spannungsmessung	60
3.6.3	Bodendeformation	61
3.6.4	Vorbelastung (Pv)	63
3.6.5	Leitfähigkeiten	64
3.6.5.1	Luftleitfähigkeit (KI)	64
3.6.5.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	64
3.7	HSM 904 Forstspeziialschlepper – Standort 2	66
3.7.1	Kontaktflächendruck	67
3.7.2	Spannungsmessung	68
3.7.3	Bodendeformation	69
3.7.4	Vorbelastung (Pv)	70
3.7.5	Leitfähigkeiten	70
3.7.5.1	Luftleitfähigkeit (KI)	70
3.7.5.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	71
4	Diskusson	73
4.1	Maschinen und Methoden der forstlichen Praxis; Risikoabschätzung und Bewertung der ökologischen Folgen	73
4.1.1	Modelle zur Bodendruckberechnung und ihre Relevanz für die forstliche Praxis	73
4.1.2	Spannungseinträge durch Waldmaschinen	76
4.1.3	Bodendeformation und –versatz als Folgen der Holzernte und des	79

	Transports	
4.1.4	Einfluss der Holzernte und des Transports auf die Eigenstabilität	81
4.1.5	Änderungen der Leitfähigkeiten durch die Holzernte und den Transport	84
4.1.5.1	Luftleitfähigkeitsbeiwert(KI)	84
4.1.5.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	85
4.2	Zusammenfassende Diskussion	87
5	Zusammenfassung	93
6	Summary	95
7	Literatur	97
	Dank	

Abbildungen

Abbildung 1	Geologische Übersichtskarte von Südwestdeutschland (Geyer und Gwinner 1986, verändert)	5
Abbildung 2	Kontaktfläche eines Reifens mit angedeuteter Zonierung des Kontaktflächendrucks (Ziesak und Matthies 2001, verändert)	8
Abbildung 3	Messschema der funkgesteuerten SST/DTS Messapparatur zur Messung von Bodenspannungen und –deformationen	10
Abbildung 4	Nicht maßstabsgetreue Skizze des DTS (Kühner 1997)	12
Abbildung 5	Versuchsaufbau zur Spannungs- und Deformationsmessung unter Forstfahrzeugen (Kühner 1997, verändert)	13
Abbildung 6	Ansicht der Messgrube mit installierten SSTs und DTS für einen Befahrungsversuch mit dem CAT 580 Radharvester	14
Abbildung 7	Spannungsverläufe der Hauptspannung (σ_1) und der mittleren Normalspannung (MNS) in 20 cm Tiefe, Versuchsfahrzeug Radharvester CAT 580	15
Abbildung 8	Spannungsverläufe der Hauptspannung (σ_1) und der mittleren Normalspannung (MNS) in 40 cm Tiefe, Versuchsfahrzeug Radharvester CAT 580	16
Abbildung 9	"Multi Step Soil Compression Test" zur Bestimmung des uniaxialen Zeit- und Drucksetzungsverhaltens von ungestörten Bodenproben	17
Abbildung 10	Apparatur zur Bestimmung des Luftleitfähigkeitsbeiwerts (KI) von ungestörten Bodenproben	18
Abbildung 11	Bilder der Versuchsfahrzeuge Impex 1650 und Timberjack 810	21
Abbildung 12	Maximale Spannungswerte für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	23
Abbildung 13	Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST Sensors für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	24
Abbildung 14	Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	25
Abbildung 15	Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	27
Abbildung 16	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	28
Abbildung 17	Bild des Rückepferdes „Schwarzwälder“ mit Arbeitsgeschirr, Vorbereitung zum Kurzholzrücken	30
Abbildung 18	Maximale Spannungswerte für Rückepferd „Schwarzwälder“ in 20 cm Tiefe	31
Abbildung 19	Vorbelastungswerte der unbetretenen Standorte (Nullvarianten) und der	33

	Rückespuren für in 20 cm Tiefe	
Abbildung 20	Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbetretenen Standorte (Nullvarianten) und der Rückespuren für in 20 cm Tiefe	34
Abbildung 21	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbetretenen Standorte (Nullvarianten) und der Rückespuren für in 20 cm Tiefe	35
Abbildung 22	Maximale Spannungswerte für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	38
Abbildung 23	Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST Sensors für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	39
Abbildung 24	Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	41
Abbildung 25	Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	42
Abbildung 26	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	43
Abbildung 27	Bild des Versuchsfahrzeugs Caterpillar 580	45
Abbildung 28	Maximale Spannungswerte für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe	47
Abbildung 29	Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST Sensors für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe	48
Abbildung 30	Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe	49
Abbildung 31	Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe	50
Abbildung 32	Gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe	51
Abbildung 33	Bilder der Versuchsfahrzeuge Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110	52
Abbildung 34	Maximale Spannungswerte für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	53
Abbildung 35	Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST Sensors für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1100 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	54
Abbildung 36	Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	55
Abbildung 37	Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe	57
Abbildung 38	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Valmet 911 „Snake“ und	58

Timberjack 1110 "Forwarder" in 20 und 40 cm Tiefe

Abbildung 39	Bild des Versuchsfahrzeuges HSM 904 Rückeschlepper (HSM Maschineninformationen 2004)	60
Abbildung 40	Maximale Spannungswerte für den HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1	61
Abbildung 41	Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST-Sensors für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1	62
Abbildung 42	Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1	63
Abbildung 43	Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1	65
Abbildung 44	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1	65
Abbildung 45	Bild des Versuchsfahrzeuges HSM 904 bei der Überfahrt über den Versuchsstandort 2	67
Abbildung 46	Maximale Spannungswerte für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe	68
Abbildung 47	Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST-Sensors für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe	69
Abbildung 48	Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 2	70
Abbildung 49	Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 2	71
Abbildung 50	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 2	72
Abbildung 51	Maximale Spannungswerte von σ_1 , MNS und OCTSS bei allen Befahrungsversuchen in 20 cm Tiefe	76
Abbildung 52	Maximale Spannungswerte von σ_1 , MNS und OCTSS bei allen Befahrungsversuchen in 40 cm Tiefe	78
Abbildung 53	Fahrspuren und vertikaler Versatz bei verschiedenen Fahrzeugen, die Werte geben die maximale Tiefe des Sensors während der Befahrung an	80
Abbildung 54	Vorbelastungswerte (P_v) der unbefahrenen Flächen (Nullvarianten) und der Fahrspuren verschiedener Befahrungsversuche in 20 und 40 cm Tiefe bei der Vorentwässerung von -60 hPa	82
Abbildung 55	Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Flächen (Nullvarianten) und der Fahrspuren verschiedener Befahrungsversuche in 20 und 40 cm Tiefe bei der Vorentwässerung von -60 hPa	85
Abbildung 56	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Flächen (Nullvarianten) und der Fahrspuren verschiedener Befahrungsversuche in 20 und 40 cm Tiefe bei der Vorentwässerung von -60 hPa	86

Tabellen

Tabelle 1	Steingehalt, pH Wert, Korngrößenverteilung und Porengrößenverteilung einer Lockerbraunerde (BBI) als typischer Versuchsstandort im Hochschwarzwald	7
Tabelle 2	Messkopfspezifikationen der verschiedenen Modelle des Stress State Transducer (SST)	10
Tabelle 3	Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke Impex 1650 und Timberjack 810	22
Tabelle 4	Hufdimensionierung und Kontaktflächendrücke Rückepferd	30
Tabelle 5	Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke Impex 1880 und Timberjack 810	37
Tabelle 6	Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke CAT 580 Radharvester und Timberjack 8110	45
Tabelle 7	Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke Valmet 911 und Timberjack 1110	53
Tabelle 8	Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke HSM 904	60
Tabelle 9	Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke HSM 904	67
Tabelle 10	Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke verschiedener Ernte- und Rückefahrzeuge	74

Gleichungen

Gleichung 1	Berechnung des Nominal Ground Pressure, Mikkonen 1975	8
Gleichung 2	Druckzonenmodell nach Ziesak und Matthies (2001)	9
Gleichung 3	Berechnung des Luftleitfähigkeitsbeiwerts	19

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
σ_1	erste Hauptspannung
MNS	Mittlere Normalspannung
OCTSS	Octaedrische Scherspannung
SST	State Stress Transducer
DTS	Displacement Transducer System
NGP	Nominal Ground Pressure
Hpa	Hekto-Pascal
Kpa	Kilo-Pascal
Mg	Megagramm

1 EINLEITUNG

Böden bilden neben ihrer Funktion als Nährstoff- und Wasserspeicher auch den Produktionsstandort für Pflanzen; sie dienen des Weiteren der Filterung und Pufferung von Sickerwasser für die Produktion sauberen und ausreichenden Grund- und Trinkwassers. Außerdem dienen sie der Rohstoffgewinnung und sind als nicht vermehrbares Gut vorrangig auch unter dem Aspekt des historischen Zeugnisses zu schützen. Im Zusammenhang mit der Pflanzenproduktion besteht aber stets der Konflikt zu den Ansprüchen der Nutzer an den Boden als Untergrund auch für verschiedene forstliche Ernte- und Transportfahrzeuge (Schlaghamersky 1991).

Im Zuge der wirtschaftlichen und technischen Entwicklung ist, wie auch im Bereich der Landwirtschaft nachgewiesen, eine stetige Zunahme der Maschinenleistung und –gewichte zu beobachten (Rieppo 2001). Heutige Erntemaschinen erreichen Gesamtleergewichte von bis zu 30 Mg (Impex 1650 „Königstiger“) oder 45 Mg (Impex 1880 „Hannibal“) und können nach der Holzernte und Ladung bis zu 60 Mg wiegen.

Geht man davon aus, dass Böden generell nur eine begrenzte mechanische Tragfähigkeit besitzen und außerdem keine Reversibilität von Deformationen im Bereich der Erstverdichtung gegeben ist, dann wird deutlich, welche Anforderungen an die Forstwirtschaft auch hinsichtlich der nachhaltigen Pflege und Ernte der Bestände gestellt werden. Generell gilt es zu hohe auf den Boden aufgebrachte Lasten zu vermeiden, um nicht eine nachhaltige Schädigung des Bodens durch schädliche Bodenverdichtung zu induzieren. Jede über die Eigenfestigkeit hinausreichende Belastung führt zu einer entsprechenden Bodendeformation und über die Änderung der Porenquerschnitte und –funktionen dann anschließend auch zu einer irreversiblen Bodendegradation durch Gefügezerstörung (Horn et al. 2000, Pagliai und Jones 2002).

Wenn überhaupt eine Regeneration erzielt werden sollte, so erfordert dies eine langfristige Änderung der Bodenbewirtschaftung hin zu niedrigeren mechanischen Belastungen und Reduktion der Befahrungshäufigkeit auf das Minimum. Ebenso ist die mechanische Tragfähigkeit der Flächen für die Auswahl der eingesetzten Landmaschinen und die Verlegung von Erntevorgängen auf Zeiträume, in denen die Böden eine austrocknungsbedingte höhere Festigkeit zeigen, von entscheidender Bedeutung. Es bleibt daher die vorrangige Beurteilung der Interaktion Bodenfestigkeit und einwirkender Druck, der von Erntemaschinen ausgeht.

Mit den modernen forstwirtschaftlichen Ernteverfahren können durch den Einsatz immer schwererer Maschinen während des gesamten Jahres gefügenderstörende Bodenverdichtungen einschließlich einer Änderung der physikalischen Standorteigenschaften und Porenfunktionen hervorgerufen werden, die darüber hinaus auch physikchemische (Redoxreaktionen und Ionenmobilisierung) und biologische Vorgänge (Verringerung der Abundanzen und der Zusammensetzung, einschließlich deren Aktivität) nach sich ziehen (Scheffer & Schachtschabel 2002, Schaeffer 2001).

Auswirkungen einer Bodenbearbeitung durch Einsatz des Motorpfluges im Landbau auf die Bodenverdichtung sind bereits seit den 20er Jahren des vorherigen Jahrhunderts bekannt (Gröger 1921). Er beschrieb die Entstehung von weniger durchlässigen Schichten im Boden auf denen dann die Pflanzenwurzeln vorrangig zu finden seien. Ähnliche Ausführungen hat bereits Wollny (1895) gemacht, wobei er sich auch mit dem Scherwiderstand und der Wechselwirkung zum Bodengefüge auseinandergesetzt hat. Geringeres Pflanzenwachstum als Folge der Strukturzerstörung durch fehlerhafte Bodenbearbeitung veranlassten Görbing (1948) dazu, anhand seiner Spatenmethode ein entsprechendes Bewertungsschema für verschiedene Stufen der Gefügeschädigung zu entwickeln. Horn (1985, 1988) analysierte nicht nur den Einfluss der verschiedenen Bodenbewirtschaftungsverfahren auf die Bodenstabilität und den Erhalt der Porenfunktion, sondern es wurden auch die entsprechenden internen und externen Bodenprozesse im Hinblick auf die mechanische Stabilität und die Auswirkungen auf die Leitfunktionen verdeutlicht.

Bodenverdichtung kann die Morphologie und die Funktion des Wurzelsystems durch verschiedene biologische, chemische und physikalische Mechanismen verändern. Die Morphologie eines Wurzelsystems ist so sensibel, dass quasi jede auf locker gelagerten Boden applizierte Kraft diese verändert (Taylor & Brar 1991).

Bereits Anfang der 70er Jahre wurde in zahlreichen Arbeiten, u.a. von Flühler 1973, die Bedeutung des Porensystemes auf die Durchlüftung untersucht. Er beschrieb, dass eine ausreichende Durchlüftung einen Anteil von mindestens 10 Vol% LK erfordere, um eine ausreichende Sauerstoffdiffusionsrate im Boden für die Pflanzen zu gewährleisten. Dies bedeutet im Umkehrschluß aber auch, dass ein geringeres LK Volumen auch zu Ertragseinbußen führen wird. Glinski und Stepniewski (1985) haben die Ergebnisse zur Bodenbelüftung auch unter dem Gesichtspunkt der

Auswirkungen von Bodenverdichtung auf die Porenfunktion hin analysiert und entsprechende Grenzwerte für den scheinbaren Diffusionskoeffizienten als Funktion der Wasserspannung und Lagerungsdichte definiert. Die Unterbindung des kontinuierlichen Wasser-, Nährstoff- und Lufttransports und die dadurch resultierende verringerte Wasserversickerung mit dem Gefahrenpotential der Erosion und des Sauerstoffmangels wurden von Czeratzki bereits 1972 beschrieben. Schließlich finden sich seit Jahrzehnten für den Bereich der Landwirtschaft Hinweise auf Ertragsminderungen durch Verdichtungseffekte (Gameda et al. 1987, Rusanov 1991, Lindstrom & Voorhees 1994), während für den Bereich der Forstwirtschaft Überlegungen zum Problem der durch die Forsternte induzierten Bodenverdichtung und -zerscherung von Wronski und Murphy (1994) zusammengestellt worden sind. Zum Themenbereich der Druckfortpflanzung durch Maschinen wurden die ersten theoretischen Überlegungen bereits durch Boussinesque (1885) formuliert, wobei er elastisches Verhalten der Substrate voraussetzte. Fröhlich (1934) hat aufgrund des eher elastoplastischen Verhaltens von Böden die Boussinesque - Gleichung durch die Einführung des Konzentrationsfaktors erweitert und damit das Grundgerüst für die Prognose der tatsächlichen Spannungsverteilung im Boden gelegt. Söhne (1958) ermittelte erstmals für Ackerböden die Druckfortpflanzung unter diversen Landmaschinen. Horn (1981) sowie Horn et al. (1989) Ehlert et al. (2000), Werner et al. (2001), Horn et al. (2000) und Pagliai und Jones (2002) konnten zeigen, dass eine Strukturverbesserung einhergehend mit verbesserter Porenfunktionalität nur erreicht werden kann, wenn die mechanische Auflast immer geringer als die Eigenstabilität in den jeweiligen Horizonten ist, wobei zusätzlich durch starke Austrocknung Quell- und Schrumpfprozesse initiiert werden. Überlegungen zum bodenschonenden Maschineneinsatz in der Forstwirtschaft werden unter anderem von Schlaghamersky (1991), Matthies (1998), v. Wilpert (1998) und Rieppo et al. (2002) diskutiert. Gerdson und Graupner (1998) diskutieren verschiedene Modelle der Kalkulation des Kontaktflächendrucks und beschreiben experimentelle Ansätze, diese anhand eines Prüfstands zu ermitteln. Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Technikkonzepte zur Bodenschonung werden von Wehner (2001) aufgezeigt. Vor diesem Hintergrund verwundert es eigentlich, dass die gesetzlichen Rahmenbedingungen nach wie vor eine weitere Steigerung der Maschinenmassen erlauben, obwohl eigentlich klar sein müsste, dass Maschinengewichte, die

problemlos 40 Mg übersteigen, und damit nicht einmal mehr auf befestigten Straßen / Autobahnen fahren dürfen, unweigerlich zu Deformationen in dem unbefestigten Boden führen müssen.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Geologie

Das Untersuchungsgebiet liegt im Südwesten Deutschlands, in Baden-Württemberg. Der Großraum wird dominiert durch die „Süddeutsche Großscholle“. Der Sockel besteht aus kristallinem Grundgebirge, vor allem aus Metamorphiten und Magmatiten, welche alle paläozoisches und vorpaläozoisches Alter aufweisen (Geyer und Gwinner 1986).

Die anstehenden Deckgebirge stellen die Sedimenthüllen des Grundgebirges dar.

Die Lage des Untersuchungsgebiets im Grundgebirgszug des Hochschwarzwald ist in Abbildung 1 dargestellt.

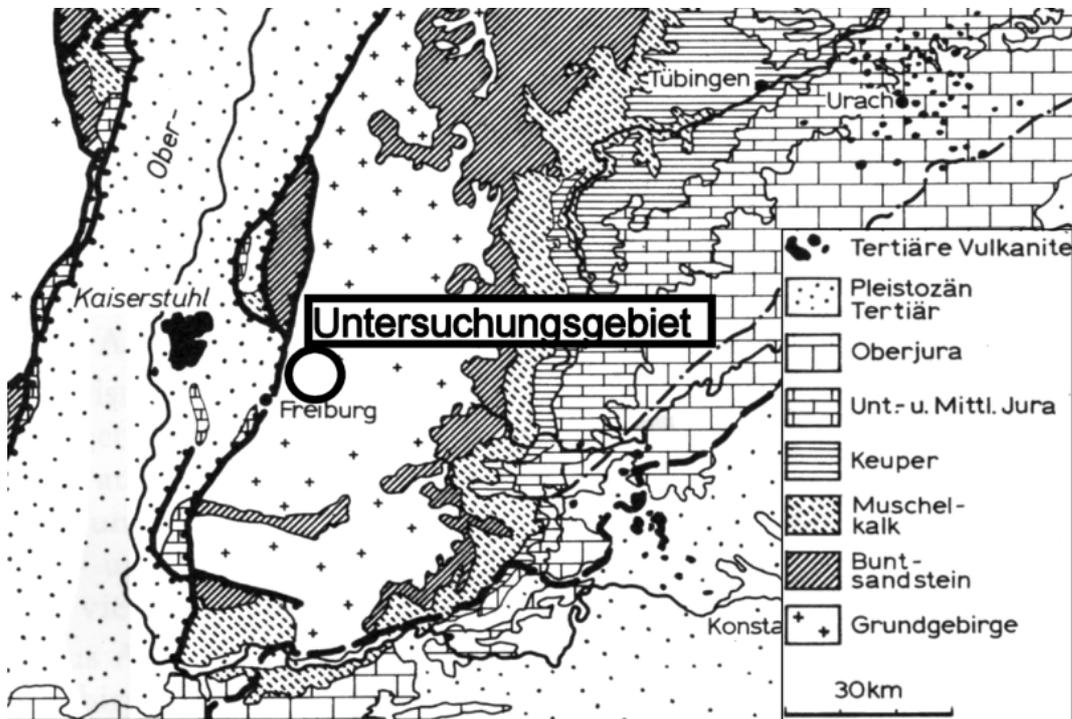


Abbildung 1 Geologische Übersichtskarte von Südwestdeutschland (Geyer und Gwinner 1986, verändert)

Der südliche Teil des Schwarzwalds, welcher im Süden durch das Rheintal und im Westen durch den Oberrheingraben begrenzt wird, ist der am höchsten gehobene Teil des Gebirges (Geyer und Gwinner 1986).

Die Entstehung des Mittelgebirges bis zu seiner heutigen Form ist zuletzt durch die letzte Heraushebung seit dem Tertiär bis ins Quartär begründet. Da hier Deckgebirge fast vollständig fehlen stehen kristalline, massig-körnige Granite und Gneise an. Die

Zentralschwarzwälder Gneismasse besteht aus prävariskischen Gneisen und Gneisanatexiten.

Im südlichen Hochschwarzwald steht das Grundgebirge sowohl in den Tälern als auch auf den Kuppen an. Dort herrschen auf den Höhen, bedingt durch die vergleichsweise homogene Beschaffenheit der massig-körnigen Granite und der Gneise, sanfte Geländeformen vor (Geyer et al, 1986)

2.2 Bodenkundliches Ausgangsmaterial

Bodentypologisch handelt es sich in diesen Hochlagen vor allem um Braunerden und Parabraunerden mit vereinzelt leichter Podsolierung. Ein typischer Versuchsstandort ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Lagerungsdichten dieser, nach forstlicher Standortkartierung aus Höhenlehmen bestehenden, Böden ist mit 0.8 bis 1 g/cm^3 sehr gering, die pH-Werte sind als sehr niedrig einzustufen. Die mittleren Jahresniederschläge sind mit bis zu 2000 mm / Jahr sehr hoch und erfordern eine entsprechend hohe hydraulische Leitfähigkeit zur unmittelbaren Versickerung und Speicherung im Boden. Bei einem sehr hohen Gesamtporenvolumen von 68% dominiert der Anteil an Grobporen mit 31% , während der Anteil an Mittel- und Feinporen körnungsabhängig in dem unbelasteten Boden Werte zwischen 21% für die Mittelporen und 17% für die Feinporen einnimmt.

Tabelle 1 Steingehalt, pH Wert, Korngrößenverteilung und Porengrößenverteilung einer Lockerbraunerde (BBI) als typischer Versuchsstandort im Hochschwarzwald

Horizont	Tiefe [cm]	Steingehalt [%]	pH CaCl ₂	Korngrößenverteilung < 2000 µm [%]									Bodenart	Porengrößenverteilung [%]						
				2000-630	630-200	200-63	Sand	63-20	20-6,3	6,3-2	Schluff	Ton		wGP	eGP	MP	FP	GPV		
L	5-2																			
Of	2-0														20 cm Tiefe					
Ah	0-5	10	3.28	15	17	12	44	11	15	14	25	16	SI4	24	7	21	17			69
Bv1	5-40	10	3.93	15	17	14	46	2	13	11	26	28	Lts		40 cm Tiefe					
Bv2	40-70	30	4.07	13	16	14	43	10	12	12	34	23	Ls3	29	5	19	14			67
BvC _v	70-95	50	4.22	11	16	15	42	20	16	10	46	12	Slu							
Cv	>95	70	4.36	13	24	24	61	12	13	9	34	5	Su3							

2.3 Kontaktflächendruck

Um die gemessenen Spannungen in Relation zu der Kontaktfläche, über die diese Spannungen im Boden fortgepflanzt werden, setzen zu können, wurden für alle Fahrzeuge die statischen Kontaktflächendrücke mit zwei verschiedenen Modellen gerechnet.

1. Der Nominal Ground Pressure NGP führt zu grossen Kontaktflächen und somit zu einem hypothetischen minimalen Kontaktflächendruck (Saarilahti, M. 2002). Karkassensteifigkeit, -durchmesser und Reifeninnendruck gehen in dieses Modell nicht ein.

2. Ziesak und Matthies (2001) (s. a. Saarilahti, M. 2002) gewichten dagegen die Eigenschaften des Reifens stärker und gehen von einer Zonierung des Kontaktflächendrucks aus. Unterhalb der Achse ist eine Zone des hohen Bodendrucks, welche zu den Seiten abnimmt. Die reifenspezifischen Eigenschaften Karkassensteifigkeit, Reifendurchmesser und -innendruck gehen in dieses Modell ein.

2.3.1 Nominal Ground Pressure (NGP)

Der Nominal Ground Pressure (NGP) beschreibt die Beziehung zwischen der Radlast W und der Reifenbreite b sowie dem Reifendurchmesser d .

Gleichung 1 Berechnung des Nominal Ground Pressure, Mikkonen 1975

$$p_c = \frac{W}{b * \frac{d}{2}}$$

Das Modell geht von einem Einsinken des Rads um 15% in den Boden aus. Dieses Modell ist in den *Nordic forestry researchs* (Mikkonen 1975) empfohlen; es wird von NOKIAN Renkaat ebenso wie von Skogforsk (svenska skogsbrukets forskningsinstitut, Forstliche Forschungsanstalt Schweden) angewendet (beide in Saarilahti, M. 2002). Reifen- oder bodenspezifische Faktoren gehen in die NGP-Berechnung nicht ein.

2.3.2 Druckzonenmodell nach Ziesak und Matthies (2001)

Die Autoren gehen davon aus, dass der Kontaktflächendruck nicht einfach durch die Radlast und die beobachtete Kontaktfläche berechnet werden kann, da die Druckverteilung unter flexiblen Reifen nicht gleichförmig sei (siehe Abbildung 6). Die Berechnung bezieht sich somit auf einen Bereich maximalen Drucks unter der Achsmittle. Die berechneten Drücke entsprechen damit in etwa den durchschnittlichen maximalen Kontaktflächendrücken.

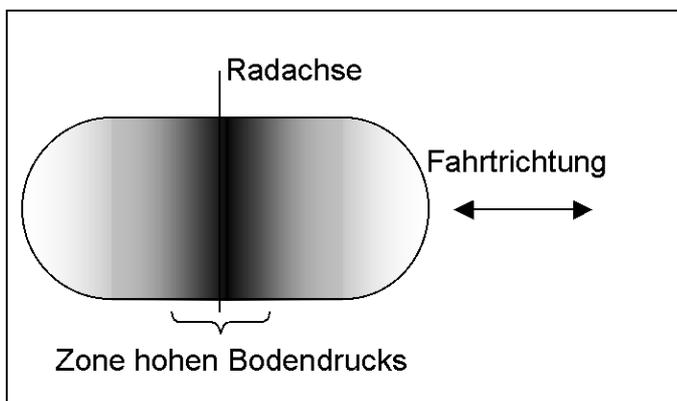


Abbildung 2: Kontaktfläche eines Reifens mit angedeuteter Zonierung des Kontaktflächendrucks (Ziesak und Matthies 2001, verändert)

Es wurden für alle Maschinen die entsprechenden Kontaktflächendrücke ermittelt, wobei in die Berechnungen folgende Kennwerte eingingen:

p_c = mittlerer Kontaktflächendruck [kPa]

W = Radlast [kN]

p_i = Reifeninnendruck [kPa]

PR = ply ratio,

b= Reifenweite [m]

d= Reifendurchmesser [m]

h= Karkassenhöhe [m]

Gleichung 2 Druckzonenmodell nach Ziesak und Matthies (2001)

$$p_c = -3947 + 0,000452 * \frac{W * PR * p_i}{b * d} + 29,4 * \ln\left(\frac{W}{9,81}\right) - \frac{4239}{p_i} - 253,3 * d^2 - \frac{1149,5}{b} \\ - 2911,8 * \ln(1000 * b) + 1807 * b * d + \frac{1,295 * W}{b * d} - 0,009 * W^2 - \frac{7117,3}{PR} - 440,6 * \ln(PR) \\ + \frac{1144,4}{h} + 3845 * \ln(h * 1000) - \frac{2,226 * b}{1000} * \left[\left(\frac{1000 * d}{2} \right)^2 - (500 * d - 1000 * h)^2 \right]$$

2.4 Dynamische Spannungsmessung im Boden (SST/DTS)

Mittels des SST Systems werden Bodenspannungen gemessen und anschließend damit der Spannungstensor des Bodens berechnet.

Die räumlich mehrdimensionale Bewegung während der Bodenbelastung wird durch das *Displacement Transducer System* (DTS) erfasst.

2.4.1 Stress State Transducer (SST)

Für die Erfassung der Bodenspannungen wird der 1987 erstmalig von Nichols et al. vorgestellte *Stress State Transducer* (SST) benutzt. Horn et al. (1992) haben darauf basierend das Modell *Kiel1* und Kühner (1997) das Modell *Kiel2* vorgestellt. Die neueste Entwicklung stellt das Messsystem *Kiel3* dar, welches ausführlich von Wiermann (1998) beschrieben und bei Gräsle (1999) diskutiert wird.

Das *SST3* hat eine Kugelform mit einem Radius von 33 mm und sechs Dehnungsmessstreifen von je 11 mm Radius. Die Ausrichtung der Messstreifen ist bei Nichols et al. (1987) oder Kühner (1997) ausführlich beschrieben, bei dem hier verwendeten *SST3* ist die Anordnung jedoch um 50,8° auf die vordere Halbkugel verschoben. Die technischen Daten sind aus Tabelle 2 ersichtlich.

Um die Sicherheitsvorschriften bei der Waldernte zu erfüllen und Personen aus dem Aktionsradius großer Maschinen fern zu halten wurde das System auf eine funkgesteuerte Datenübertragung umgebaut (siehe Abbildung 3).

Die SSTs sowie das DTS sind weiterhin an einen „Sample and Hold“-Verstärker (Analog Devices, USA) angeschlossen (siehe Kühner 1997).

Die Spannungsversorgung des Verstärkers mit 5V erfolgt nun über einen neu gestalteten SST/DTS Controller. Dieser besteht aus drei Bauteilen:

Ein Microcontroller der 8051-Familie nimmt die Aufgaben Ablaufsteuerung, Steuerung und Einlesen des Analog-Digitalwandlers sowie die einer Schnittstelle zum Benutzer mittels eines Direktdisplays und via Hauptrechner/Laptop wahr.

Der Analog Digital Wandler und Multiplexer hat eine Kapazität von $6 * 10$ Kanälen, für maximal 6 Geräte ($6 * SST$ oder $4 * SST$ und $2 * DTS$).

Das System kann sowohl mit 12V Gleichstrom über Bleigelakkus, wie auch über 220V Wechselspannung betrieben werden. Die Stromversorgung des Verstärkers (5V) erfolgt jeweils über den Controller.

Die digitalen Daten werden dann mit einem Funkmodem über eine RS232-Schnittstelle an das Labtop übertragen. Die Stromversorgung erfolgt ebenfalls mit 12V Gleichstrom über Bleigelakkus.

Das neue Messprogramm läuft unter Labview auf einem Standardlabtop.

Hier erfolgt sowohl die Auswahl der Messsensoren und des DTS sowie die Konfiguration der Messfrequenz und der Größe des Messfensters.

2.4.2 Displacement Transducer System (DTS)

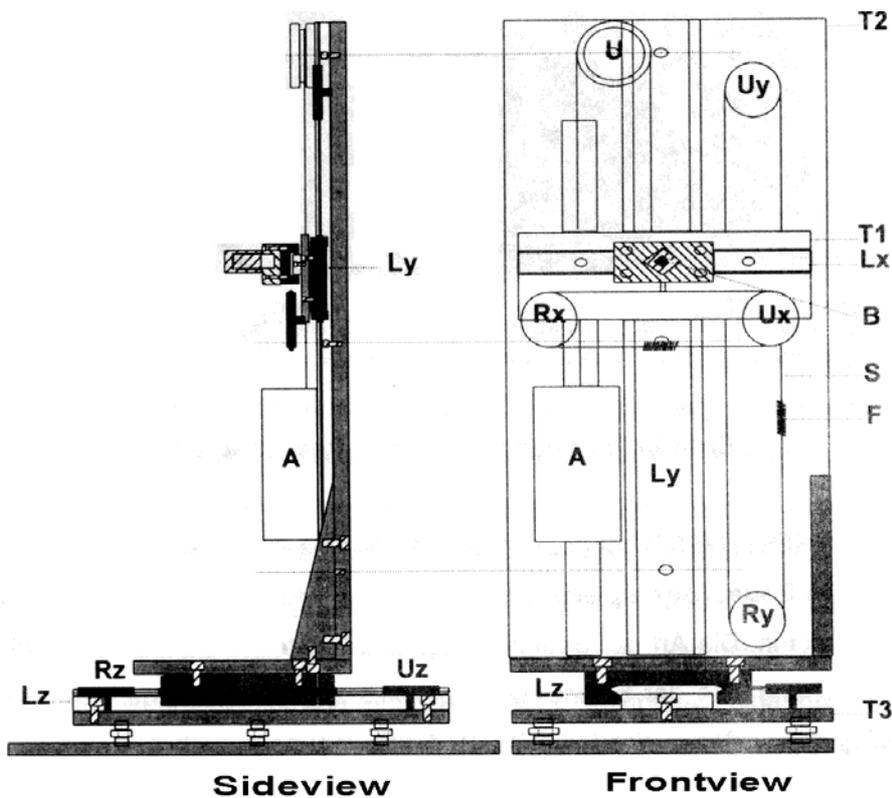


Abbildung 4 Nicht maßstabsgetreue Skizze des DTS (Kühner 1997)

Die räumlich mehrdimensionale Bewegung während der Bodenbelastung wird durch das *Displacement Transducer System* (DTS) erfasst (Siehe Abbildung 4). Hierbei wird die lineare Bodenbewegung in alle drei Richtungen (X, Y und Z) auf einen Bezugspunkt außerhalb des Bodenkörpers übertragen und anschließend die vollständige Bodendynamik berechnet. Der vollständige Aufbau und die Funktionsweise sind bei Kühner 1997 ausführlich beschrieben.

2.4.3 Kombinierte SST/DTS Messung

Neben der Fahrspur eines Fahrzeugs wurde eine 110 cm * 80 cm * 90 cm tiefe Grube ausgehoben. Die der Fahrspur zugewandte Seite wurde mit Hilfe eines 10 mm starken Stahlblechs, welches Aussparungen für die Messsensoren in 20, 40 und 60 cm Tiefe hat, geschützt. Die Platte wurde mit Grubenverschalungen fixiert und abgestützt, so dass eine Einbruchgefahr der Wand durch die Befahrung ausgeschlossen wurde.

Die Sensoren wurden von der Grube aus waagrecht in verschiedenen Tiefen unter die Fahrspur eingebracht. Der Abstand Grubenkante Sensorkopf-Mitte betrug in allen Versuchen 50 cm.

Das DTS wird anschließend auf einem ausgeloteten Podest in der Grube platziert. Die Metallstange des SSTs wird mittels eines Adapters mit dem DTS verbunden. Die Sensorstange läuft durch ein Kugellager, welches im Stahlblech fest verschraubt ist und so einen fixen Übertragungspunkt für die DTS Aufzeichnungen bietet. Es wurden entweder der Sensor in 20 cm Tiefe oder der in 40 cm Tiefe mit dem DTS verbunden. Der typische Versuchsaufbau im Gelände ist in Abbildung 5 zu sehen.

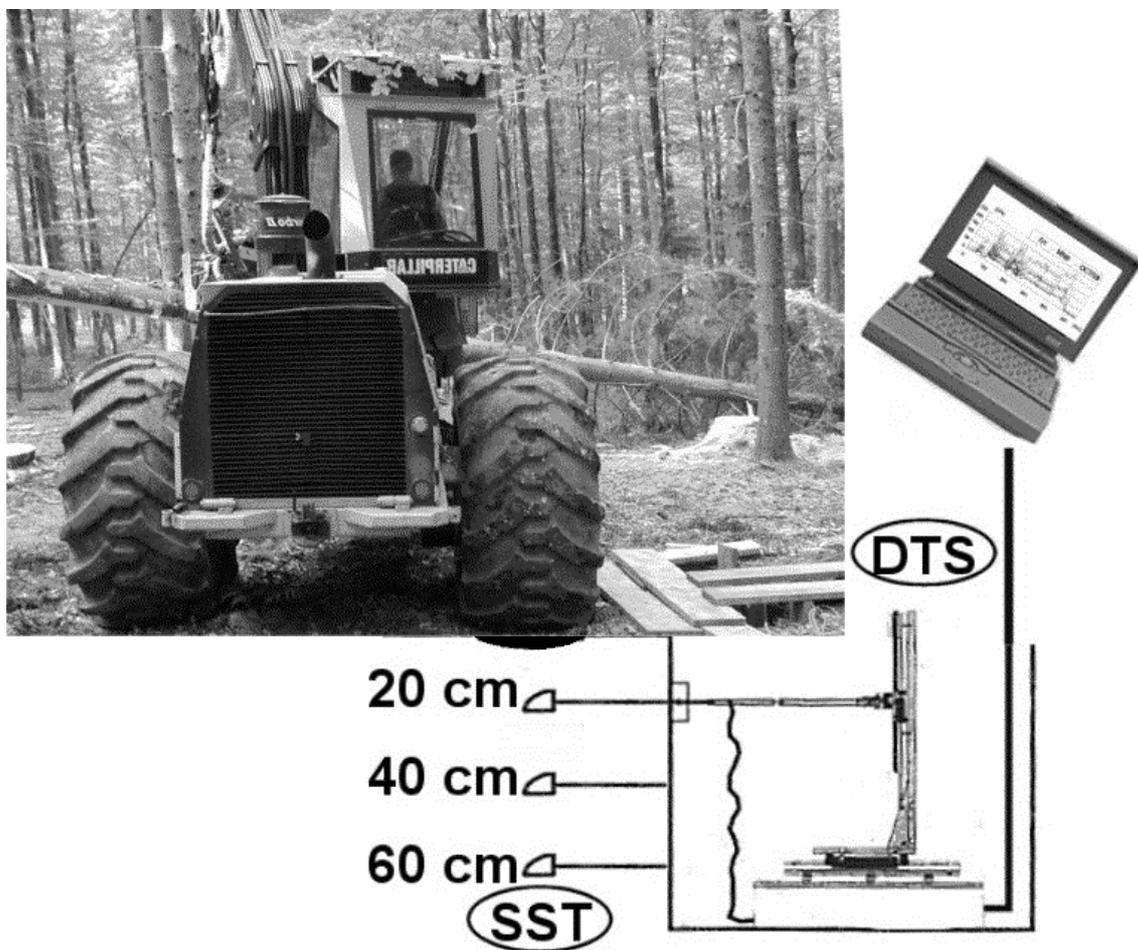


Abbildung 5 Versuchsaufbau zur Spannungs- und Deformationsmessung unter Forstfahrzeugen (Kühner 1997, verändert)

Um die Grube und die Messgeräte gegen herabstürzende Äste und umherfliegende Sägespäne zu schützen, wurde das DTS System mit einer Plexiglashülle geschützt und anschließend die Grube vollständig mit Holzplanken abgedeckt.

2.4.4 Spannungsaufzeichnung komplexer Erntevorgänge mit dem SST/DTS

Im folgenden sind exemplarisch die Spannungsverläufe für die erste Hauptspannung σ_1 und die mittlere Normalspannung (MNS) für einen Radharvester des Typs CAT 580 (vergleiche Kapitel 3.4) in Untersuchungstiefen von 20 und 40 cm dargestellt. In 20 cm Tiefe befanden sich 2, in 40 cm Tiefe 1 Sensor.



Abbildung 6 Ansicht der Messgrube mit installierten SSTs und DTS für einen Befahrungsversuch mit dem CAT 580 Radharvester

Die Spannungsverläufe in Abbildung 7 zeigen die verschiedenen Phasen der Ernte in 20 cm Tiefe, wobei die Messung unter dem Hauptlastrad erfolgte. Die beiden Messkurven für σ_1 und MNS sind bei einem Versuch durch zwei etwa 30 cm voneinander entfernt liegende Sensoren in 20 cm Tiefe aufgezeichnet worden.

Die Auffahrt (Bereich 12-13 s nach Messbeginn) verursacht bei beiden Sensoren eine erste Spannungsspitze, die Anfahrt und das Abbremsen des Fahrzeugs stellen immer ein hohe dynamische Belastung des Bodens dar.

Der Vergleich zwischen dem ersten und zweiten Sensor zeigt deutlich die unterschiedlichen Belastungen in Abhängigkeit vom Verlauf des Erntevorganges,

bedingt durch geringfügige Bewegungen des Fahrzeugs sowie eine Veränderung der Lasteintragsrichtung.

Während der ersten 2 Minuten (120 s) überschreiten die Spannungmaxima 200 kPa nicht, das Fahrzeug erntete auf der den Messgruben abgewandten Seite. Die Ernte auf der Grubenseite führte hingegen zu Belastungen bis 350 kPa.

Die mittlere Normalspannung ist, mit Werten über 50 kPa, in 20 cm Tiefe immer noch höher als die Vorbelastungswerte (siehe Kapitel 3.4.4)

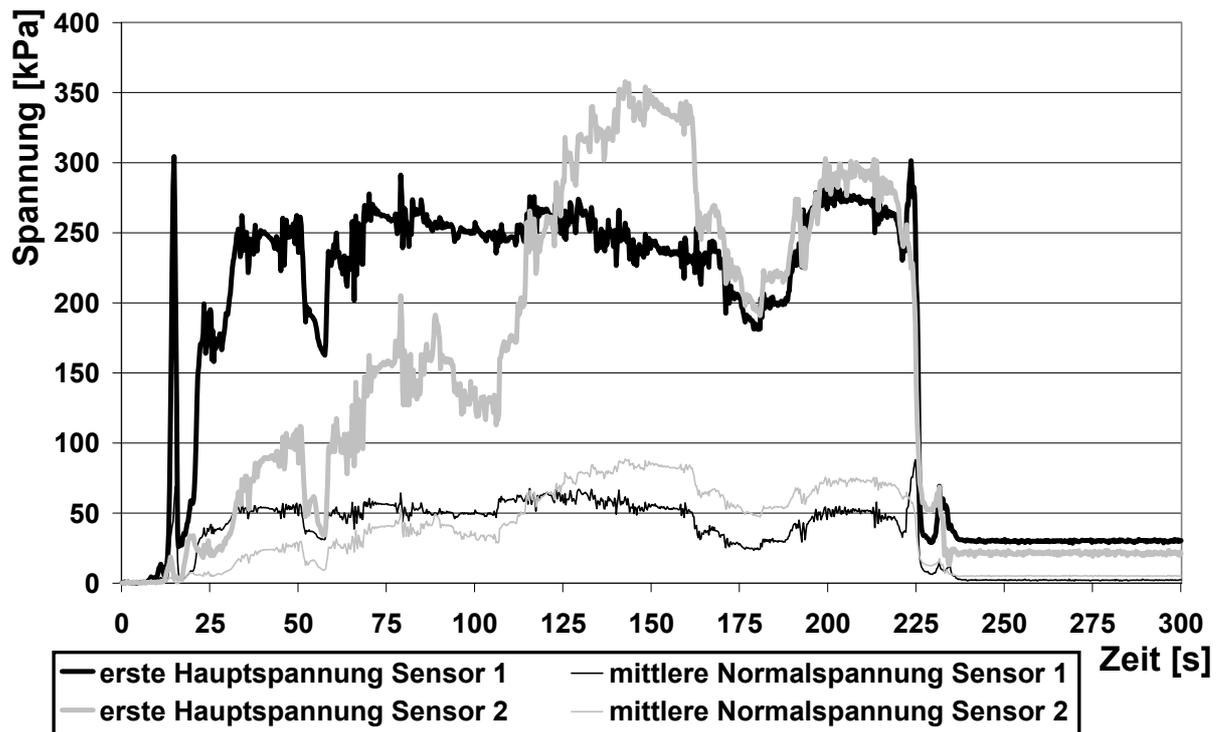


Abbildung 7 Spannungsverläufe der Hauptspannung (σ_1) und der mittleren Normalspannung (MNS) in 20 cm Tiefe, Versuchsfahrzeug Radharvester CAT 580

In 40 cm Tiefe (siehe Abbildung 8) wurden Spannungsspitzen von mehr als 250 kPa für σ_1 während der Anfahrt gemessen. Danach flachte die Kurve auf Werte zwischen 50 und 100 kPa ab, erst die erneute Anfahrt des Fahrzeugs zum Ende der Messung (230 s) bedeutete wieder eine Spannungsspitze von 150 kPa.

Die Unterschiede zwischen den sehr hohen Anfahrtswerten und den niedrigeren Erntewerten sind durch die Platzierung des Erntefahrzeugs auf der Standfläche zu erklären. Die Radmitte des Rads stand während des Befahrungsversuchs einige wenige cm rechts des zentralen SSTs, also zwischen den beiden SSTs in 20 cm

Tiefe. Nur bei der Auffahrt stand der Reifenmittelpunkt, und somit die Zone höchsten Drucks, genau vertikal über dem Sensorkopf in 40 cm Tiefe.

Während des ganzen Versuchs erreichten die Werte Beträge, welche größer als die Vorbelastung sind (siehe Kapitel 3.4.4). Eine plastisches Verhalten des Bodens ist die Folge.

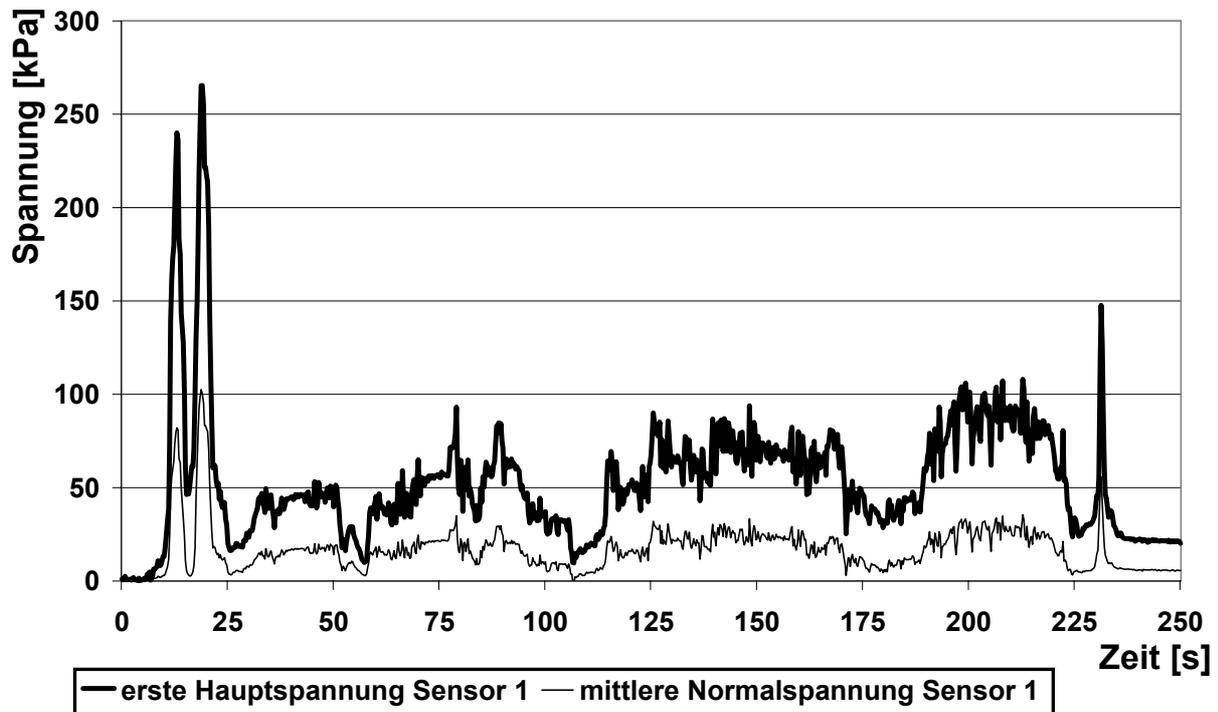


Abbildung 8 Spannungsverläufe der Hauptspannung (σ_1) und der mittleren Normalspannung (MNS) in 40 cm Tiefe, Versuchsfahrzeug Radharvester CAT 580

2.5 Vorbelastung (Pv)

Das Zeitsetzungsverhalten wurde mit dem „Multi Step Soil Compression Test“, einer uniaxialen Oedometerapparatur bei verhinderter Seitenausdehnung, unter drainierten Bedingungen (-60hPa pF 1,8) untersucht (Abbildung 9). Je Laststufe wurden die Proben 5 min belastet und die Änderung der Höhe und der lastabhängigen Wasserspannung erfasst. Aus den jeweiligen Endsetzungswerten der verschiedenen Auflasten wird die Vorbelastung (Pv) als Maß für die Bodenstabilität nach dem Verfahren nach Casagrande (1936) ermittelt. Pro Bodenhorizont und Behandlung wurden jeweils 3 Stechzylinder analysiert, so dass die Zeit- und Drucksetzungskurven den Mittelwert aus 3 Wiederholungen darstellen.

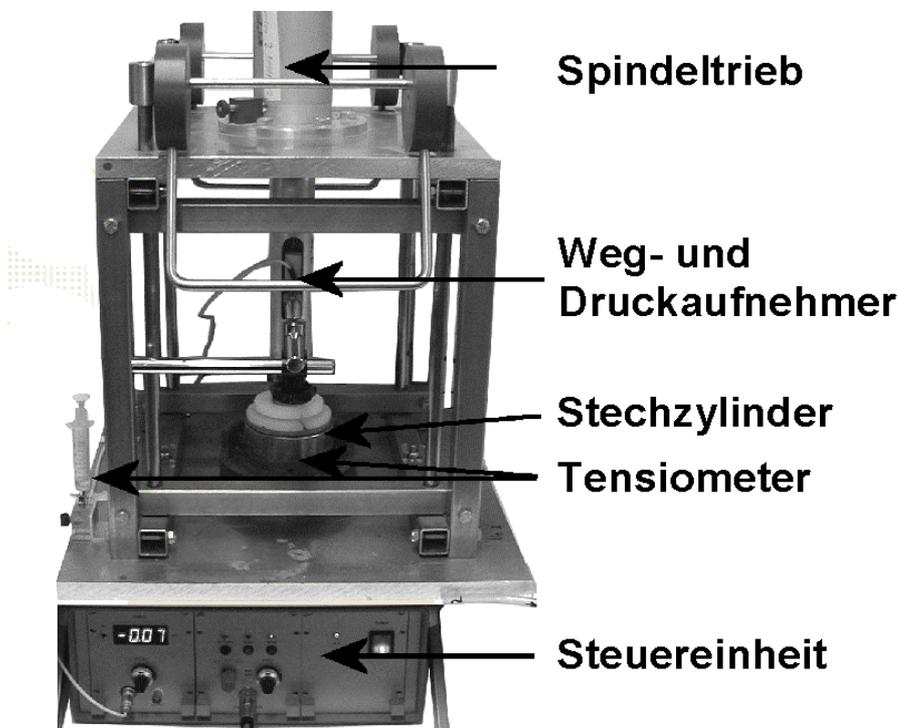


Abbildung 9 "Multi Step Soil Compression Test" zur Bestimmung des uniaxialen Zeit- und Drucksetzungsverhaltens von ungestörten Bodenproben

2.6 Leitfähigkeiten

An ungestörten Zylinderproben wurden sowohl die Luft- (KI) als auch die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) gemessen. Die Leitfähigkeiten dienen als Maß für die Luftversorgung von Pflanzenwurzeln und für die Fähigkeit der Böden, Wasser aus den oberen Schichten abzuleiten. Im Untersuchungsgebiet, mit Niederschlägen bis

zu 2000 mm / Jahr, besteht grundsätzlich die Gefahr der Staunässe und somit der Unterversorgung der Wurzeln mit Luft.

2.6.1 Luftleitfähigkeitsbeiwert (KI)

Für alle Stechzylinder (236cm^3) wurde der Luftleitfähigkeitsbeiwert (kl) ermittelt. Hierzu wurden die vollständig aufgesättigten Proben auf -60 hPa ($pF\ 1,8$) entwässert und dann mit einem Luftdruckgradienten von 1 hPa durchströmt.

Die Klassifizierung der Daten erfolgt dann nach Knoch & Hanus (1966).

Um die extrem lockeren und fragilen Proben ohne Beschädigung messen zu können wurde ein neues Gerät zur Erfassung der Luftleitfähigkeit gebaut.

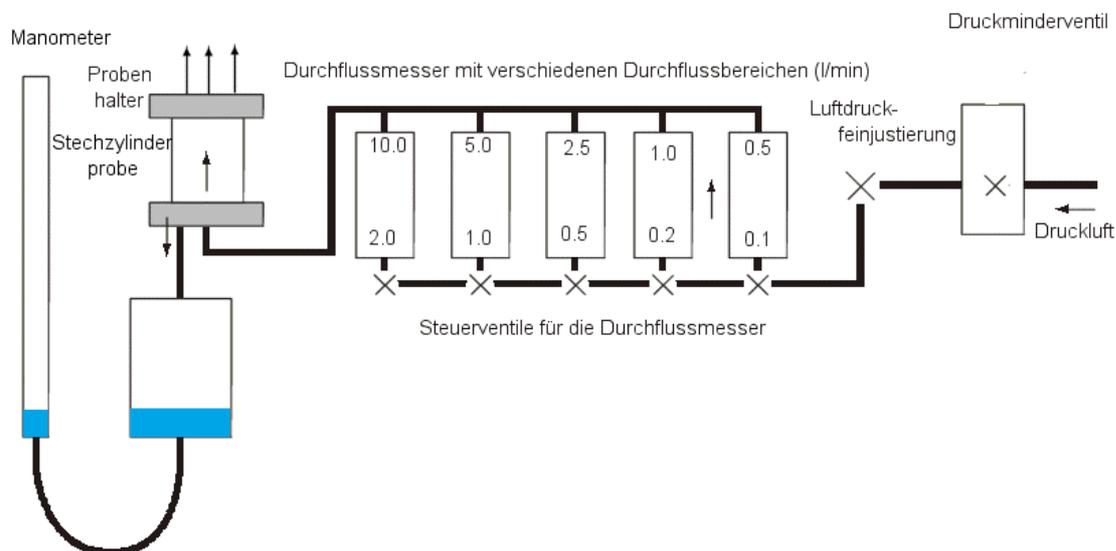


Abbildung 10 Apparatur zur Bestimmung des Luftleitfähigkeitsbeiwerts (KI) von ungestörten Bodenproben

Das Gerät besteht aus vier Bereichen:

- Die verfügbare Druckluft (15 Bar) wird mittels Feinregelventilen auf die gewünschte Durchflussmenge runtergeregelt.
- Die Luft durchströmt dann Durchflussmesser (Firma Key Instruments), welche die Messung der durchströmenden Luft in einem Bereich von $0,1\text{ l/min}$ bis 15 l/min ermöglichen.
- Anschließend wird die Probe durchströmt und die Luft fließt in die Raumluft.
- Unmittelbar vor der Probe wird der Luftdruckunterschied zwischen der Raumluft und der durchströmenden Luft der KI Apparatur mittels eines Manometers gemessen.

Aus den Durchflussmengen wird dann der Luftleitfähigkeitsbeiwert k_l ermittelt.

Gleichung 3 Berechnung des Luftleitfähigkeitsbeiwerts

$$K_l = \rho_l * g * \frac{\Delta V * l}{\Delta t * \Delta p * A}$$

mit

ρ_l = Dichte der Luft bei Messung [kg/m³]

g = Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s²]

ΔV = durch die Probe in der Zeit Δt durchgeströmte Menge Luft [m³]

l = Länge der Probe [m]

Δp = eingestellter Durchströmungsdruck [hPa]

A = Querschnittsfläche Zylinder [m²]

2.6.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist ein Maß für die Porenkontinuität und den Porendurchmesser. Sie reagiert deshalb sehr empfindlich sowohl auf eine Abnahme des Gesamtporenquerschnittes als auch auf die durch Scherung verursachte Unterbrechung der Porenkontinuität. Die Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit erfolgt nach Hartge & Horn (1992) mit einem Haubenpermeameter an je 5 Stechzylindern (100cm³) in 20 cm und 40 cm Tiefe, jeweils aus der Fahrspur und dem unbefahrenen Referenzboden.

3 ERGEBNISSE

3.1 Impex 1650 „Königstiger“ / Forwarder Timberjack 810

Im Fichten/Buchen/Tannen Mischbestand an der Hirschmatte im Forstbezirk St. Märgen wurden sowohl Befahrungen mit einem 30 Mg schweren Raupenharvester Impex 1650 („Königstiger“), als auch mit einem 10 Mg schweren Forwarder Timberjack 810 durchgeführt.

An drei verschiedenen Gassen wurden insgesamt fünf Messgruben angelegt. Die Messung der Bodenspannung (Einsatz des SST-Systems) wurde in zwei verschiedenen Tiefen (20 und 40 cm) durchgeführt, während die Erfassung der Bodendynamik (DTS Einsatz) entweder in 20 oder 40 cm Tiefe erfolgte.

Aufgrund der neuen Konfigurationen des Messsystems war es erstmalig möglich, Arbeitsabläufe des „Königstigers“ und des Forwarders über einen Zeitraum von neun Minuten aufzuzeichnen.

Die 9 Minuten langen Königstiger-Versuche waren wie folgt gegliedert:

- Auffahrt des Fahrzeugs auf die Messgrube, wobei die Kettenmitte genau über den Sensorköpfen positioniert wurde.
- Stop des Fahrzeugs und Aufnahme der Holzernte.
- Ernte von 5-6 Bäumen, bestehend aus: Greifen des Stamms mit dem Aggregat, Absägen des Baums in ca. 50 cm Höhe, Wurf des Stamms in den Bestand, Entfernen der Äste und Ablängen des Stamms auf 5-Meter-Stücke.
- Verlassen der Grube in Fahrtrichtung.

Es wurde sichergestellt, dass der Harvester ohne Drehung auf der Grube dieselbe geradeaus verlassen konnte, damit die Grubenabstützung nicht gefährdet wurde.

Die Holzaufnahme-Versuche mit dem Timberjack 810 gliederten sich wie folgt:

- Auffahrt des Fahrzeugs auf die Messgrube, wobei die Reifenmitte eines Reifens genau über einem Sensorkopf positioniert wurde.
- Stop des Fahrzeugs und Beginn der Stammaufnahme.
- Sukzessive wurden die vom Harvester am Gassenrand abgelegten Stämme mit dem Greifarm aufgenommen und auf der Ladefläche platziert.

Nach der vollständigen Aufnahme der Stämme wurde die Grube in gerader Flucht in Fahrtrichtung verlassen.

Anschließend erfolgte die Messung der Spurrillen und die vollständige Probenahme in der Fahrspur. Für die vergleichende Nullvariante wurde in unmittelbarer Nähe zu den Gassen eine noch unbefahrene Fläche beprobt.

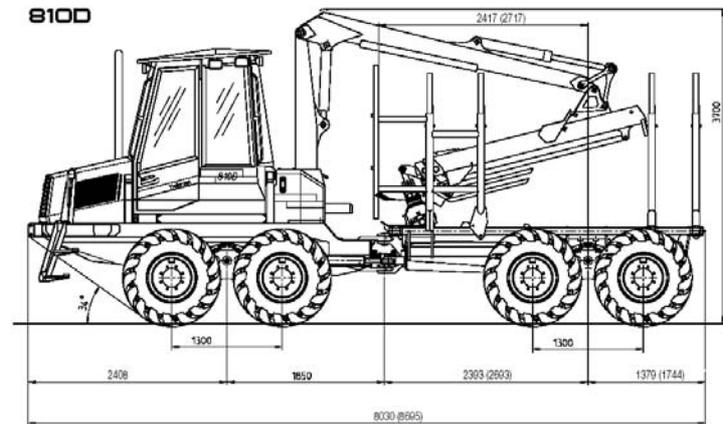


Abbildung 11 Bilder der Versuchsfahrzeuge Impex 1650 und Timberjack 810

3.1.1 Kontaktflächendruck

Um die gemessenen Bodenspannungseinträge mit Richtlinien und Empfehlungen für die Forstliche Praxis vergleichen zu können, wurden für die untersuchten Radfahrzeuge zwei gängige Modelle für die Ermittlung der Kontaktflächendrücke verwendet. Die Ermittlung der Kontaktflächendrücke bei den Kettenfahrzeugen erfolgte über die Standfläche und die Gesamtmasse des Fahrzeugs, wobei eine gleichmäßige Lastverteilung vorausgesetzt wurde (vergleiche Kapitel 2.3). Die nach den Modellen des Nominal Ground Pressures (NGP) (Mikkonen & Wuolijoki 1975) und nach Ziesak und Matthies (2001) (s. auch Saarilahti, M. 2002) zu erwartenden Kontaktflächendrücke für den Timberjack 810 sowie die Kontaktflächendrücke unter der Harvesterkette des Impex 1650 sind in Tabelle 3 dargestellt.

Die Kontaktflächendrücke des Impex 1650 betragen im Mittel 62,5 kPa. Bei dieser Rechnung wurde von einer starren Kette mit gleichmäßiger Auflast auf der ganzen Fläche ausgegangen. Stollen und reliefbedingte Zonen größerer Auflast finden keine Berücksichtigung.

Die modellierten Kontaktflächendrücke für den Forwarder Timberjack 810 zeigen eine deutliche Diskrepanz zwischen dem NGP und den von Ziesak und Matthies

postulierten Bereichen maximalen Drucks. Die Möglichkeiten, den Bodendruck durch geringere Reifeninnendrucke (100kPa) zu minimieren, betragen nach diesem Modell, mit den gegebenen Randbedingungen, rund 20%.

Beide Modelle berücksichtigen keine dynamischen Arbeitsabläufe. Weder die Ernte mit einem 10 m langen Greifarm und die Aufarbeitung der Stämme durch den Impex noch die Ladetätigkeit des Forwarders werden parametrisiert.

Tabelle 3 Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke Impex 1650 und Timberjack 810

Fahrzeugtyp	Anzahl Ketten / Räder	Ketten / Räder Größe und Luftdruck	Gewicht in Mg	Kontaktflächendruck [kPa]		
				NGP	Druckzonen-Modell	Druckzonenmodell Niedrigdruckreifen (100 kPa)
IMPEX 1650 "Königstiger"	2 Ketten	600 mm Breite 4000 mm Länge	30	63 ¹	63 ¹	63 ¹
Timberjack 810 Radforwarder	8 Räder	600/50 – 22,5 200 kPa	10	35	167 ²	136 ²

¹ Kontaktflächendrücke für Kettenfahrzeuge = Gesamtgewicht/Aufstandsfläche

² Radlast 1,25 Mg, Ply Ratio 12, Reifenweite 0,3 m, Karkassenhöhe 0,3m, Reifendurchmesser 1,15 m

3.1.2 Spannungsmessung

In Abbildung 12 sind die maximalen Spannungseinträge in 20 cm Bodentiefe für die beiden getesteten Fahrzeuge dargestellt.

Der Impex 1650 („Königstiger“) zeigt im ersten Versuch ein Maximum für die erste Hauptspannung (σ_1) von mehr als 500 kPa.

Die Oktaedrische Scherpannung (OCTSS) erreicht Spannungsmaxima von 300 kPa, während die Mittlere Normalspannung (MNS) Werte über 100 kPa aufweist.

Die Belastungsmaxima des zweiten Versuchs liegen unter denen des ersten Versuchs. Trotzdem sind die Spannungseinträge auch hier hoch, σ_1 erreicht 350 kPa, OCTSS liegt bei 120 kPa während MNS 100 kPa beträgt.

Der Forwarder führt insgesamt zu niedrigeren Bodenbeanspruchungen, welche aber weit über den noch zu beschreibenden Bodenstabilitäten der Standorte liegen. Durch

die verschiedenen Befahrungssituationen schwanken die maximalen Spannungseinträge für σ_1 zwischen 130 und 410 kPa, während die Scherspannung knapp 100 bis 300 kPa und der Mean Normal Stress 80 bis 200 kPa beträgt.

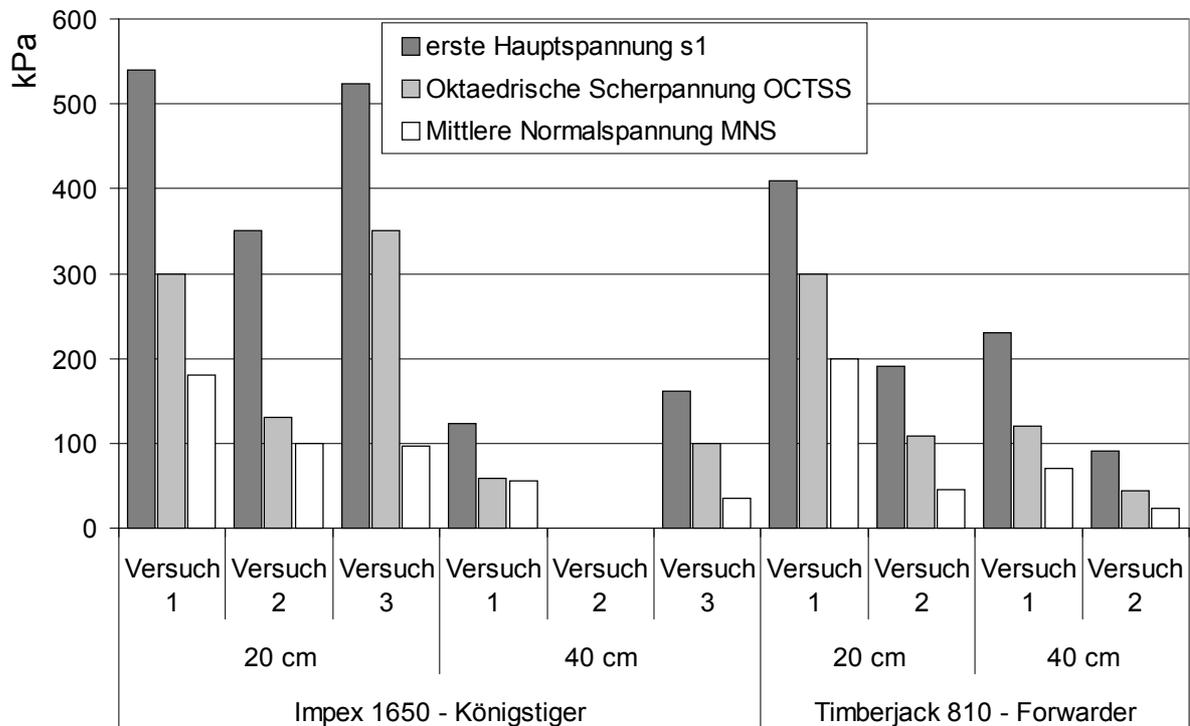


Abbildung 12 Maximale Spannungswerte für Impex 1650 „Königtiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

3.1.3 Bodendeformation

Die vertikale Bodendeformation durch die Befahrung wurde mit dem Displacement Transducer System (DTS) ermittelt, welches entweder in 20 oder 40 cm Tiefe mit dem zentralen SST verbunden war (siehe Kapitel 2.4.2).

Pro Befahrungsversuch konnte nur der Versatz eines Sensors bestimmt werden.

Die Fahrspuren wurden mittels Wasserwaage im Vergleich zum unbefahrenen Boden ermittelt.

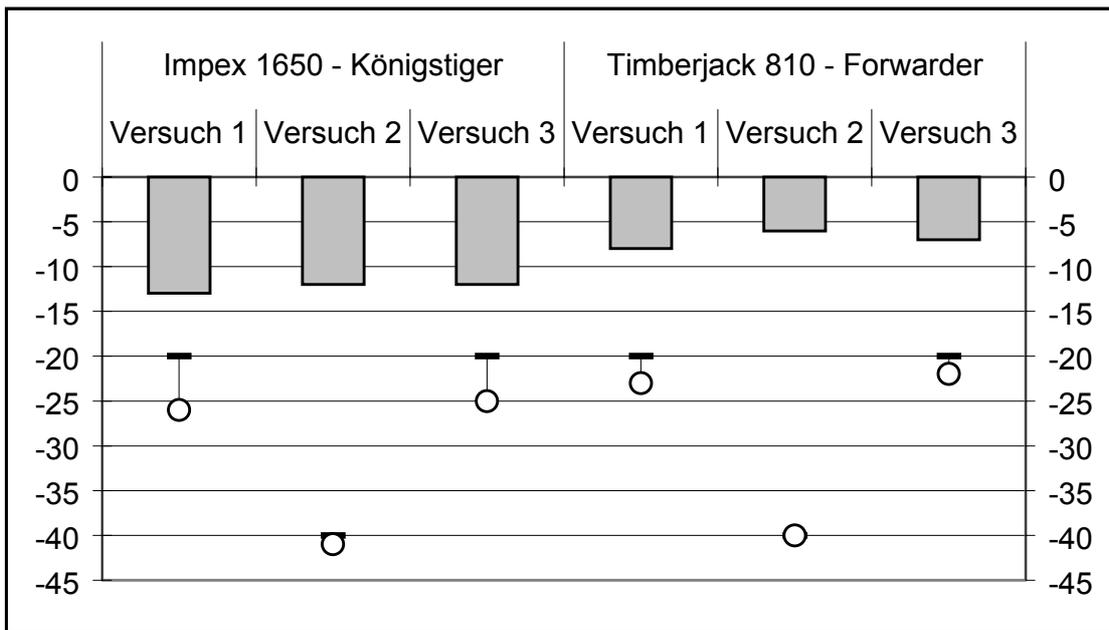


Abbildung 13 Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST Sensors für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die Abbildung 13 zeigt den vertikalen Versatz für den an das DTS angeschlossenen Sensor sowie die aufgetretenen Fahrspurtiefen während der Befahrungen.

Während des ersten Impex Versuchs war der Sensor in einer Tiefe von 20 cm eingebaut. Die Fahrspurtiefe betrug 13 cm, der vertikale Versatz war so stark, dass der Sensorkopf am Ende des Versuchs um 8 cm auf eine Tiefe von 28 cm gepresst wurde.

Daraus folgt, dass der Boden nicht nur im Oberboden verdichtet wurde, sondern dass das gesamte Bodenpaket tiefer gelegt wurde.

Die Fahrspurtiefen für die Harvesterbefahrung liegen bei 11-13 cm, der Versatz in 20 cm Tiefe betrug 5-8 cm, während der Versatz in 40 cm Tiefe rund 2 cm betrug.

Die Forwarderfahrspuren waren geringer und lagen bei 6-8 cm, der Versatz des Sensors betrug in 20 cm Tiefe 2-3 cm und war in 40 cm Tiefe < 1 cm.

3.1.4 Vorbelastung (Pv)

Die Vorbelastung wurde aus dem Drucksetzungsverhalten der Stechzylinderproben bei vorgegebener Zeitdauer mit dem „Multi Step Soil Compression Tests“, einer uniaxialen Oedometerapparatur bei verhinderter Seitenausdehnung, unter drainierten Bedingungen (-60 hPa oder pF 1,8) ermittelt (siehe Kapitel 2.5).

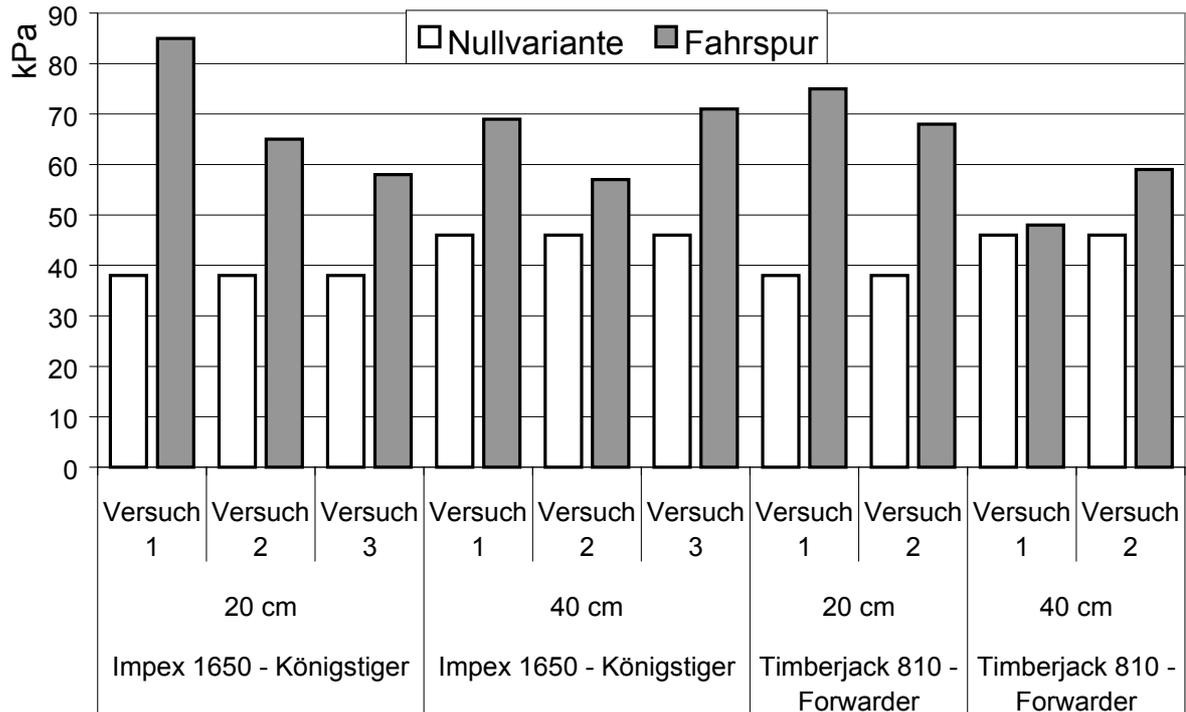


Abbildung 14 Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die Vorbelastungen (P_v) weisen auf eine geringe mechanische Tragfähigkeit der Waldböden hin. Die Eigenstabilität der Böden liegt **vor der Befahrung** in 20 cm Tiefe bei 38 kPa während sie in 40 cm Tiefe mit 45 kPa etwas größer ist. Die geringen Vorbelastungswerte erklären sich aus den geringen Lagerungsdichten der Lockerbraunerden mit ihren hohen Anteilen an weiten Grobporen.

Nach der Befahrung mit dem Impex 1650 liegen die Werte wesentlich höher.

Die im Oberboden (20 cm) ermittelten Vorbelastungen liegen zwischen 58 und 85 kPa. Die Vorbelastungen in 40 cm Tiefe liegen zwischen 56 und 72 kPa.

Eine Erhöhung der Vorbelastung konnte in allen Versuchen nachgewiesen werden, jedoch lag diese weit unterhalb der mit dem SST gemessenen Spannungsspitzen.

Die Vorbelastung bei den Forwarder-Versuchen erhöhte sich auf rund 70 kPa in 20 cm Tiefe und 50-60 kPa in 40 cm Tiefe.

Die Böden erreichen zumeist doppelt so hohe Vorbelastungswerte wie der unbelastete Referenzboden.

3.1.5 Leitfähigkeiten

3.1.5.1 *Luftleitfähigkeit (KI)*

Für alle Stechzylinder (236cm^3) wurde der Luftleitfähigkeitsbeiwert (KI) bei einer Vorentwässerung von -60 hPa gemessen.

Abbildung 15 zeigt, dass die KI-Werte sowohl in 20 als auch in 40 cm Tiefe stark abnehmen.

Der Luftleitfähigkeitsbeiwert in 20 cm Tiefe des unbefahrenen Referenzbodens liegen im geometrischen Mittel bei $5,4 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$. Diese verringert sich nach der Befahrung mit dem Impex 1650 um 56 bis 87%.

Der Luftleitfähigkeitsbeiwert in 20 cm Tiefe reduziert sich nach der Befahrung mit dem Timberjack 810 sogar um 85 bis 89%.

Der KI-Wert in 40 cm Tiefe liegt im Referenzboden bei $4,88 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ und somit etwas unter dem der 20 cm Tiefe.

Durch die Befahrung mit dem Impex 1650 sinken die Beiwerte in 40 cm Tiefe um 67 bis 86% während die Forwarder-Variante eine Erniedrigung um 55 bis 90% nach sich zieht.

Generell liegt die Abnahme des Luftleitfähigkeitsbeiwert durch die Befahrung zwischen 56 und 90 %.

Die Lockerbraunerden haben im unbefahrenen Zustand, bedingt durch ihre geringe Lagerungsdichte, sehr hohe Luftleitfähigkeitsbeiwerte (nach DVWK 1995). Diese nehmen durch die Befahrung mit den Forsternte- und Transportmaschinen ab; sie sind allerdings auch nach der Befahrung als Mittel (nach DVWK 1995) einzustufen.

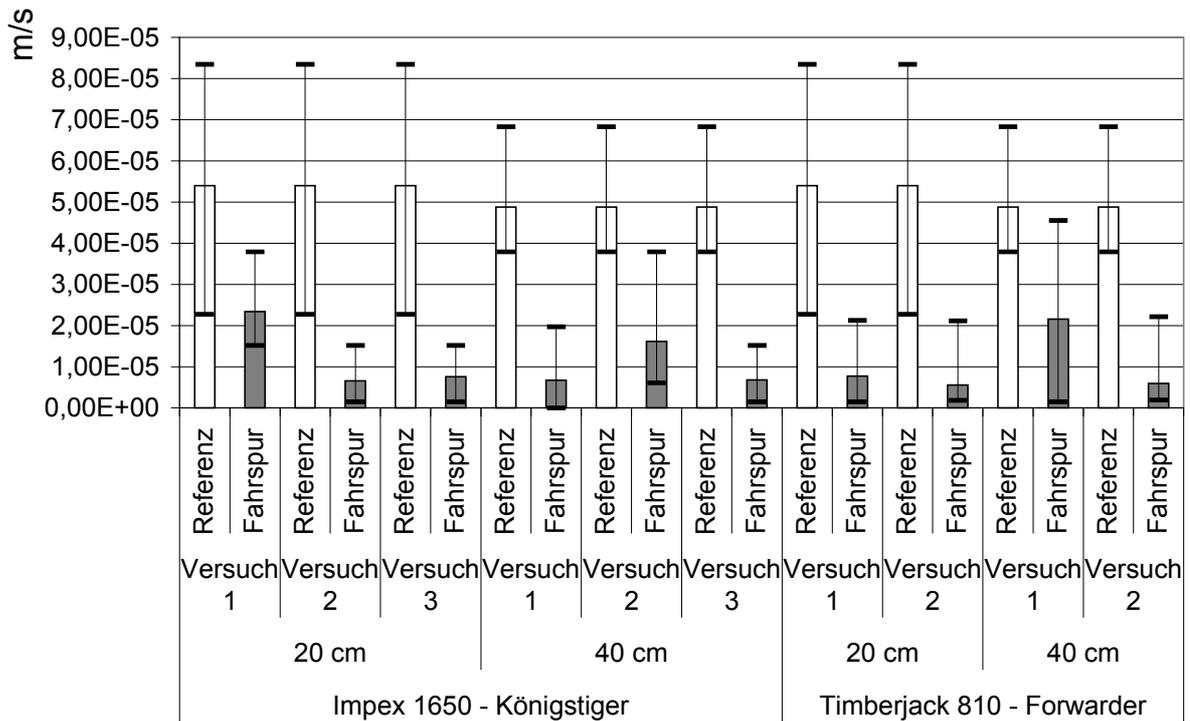


Abbildung 15 Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

3.1.5.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

Die k_f -Werte (gesättigte Wasserleitfähigkeit) zeigen Abnahmen der Leitfähigkeiten bis zu 95 % (Abbildung 16).

Die Referenzleitfähigkeit in 20 cm Tiefe liegt bei rund 1000 cm/Tag und 420 cm/Tag in 40 cm Tiefe.

Nach der Befahrung mit dem Harvester sinken diese auf weniger als 25 cm/Tag im Oberboden und 25 – 190 cm/Tag in 40 cm. Dies entspricht einer Abnahme von >98% in allen drei Versuchen im Oberboden und 54 bis 94% im Unterboden.

Die Leitfähigkeiten in den Fahrspuren des Timberjack sanken in 20 cm Tiefe um 86 bis 92%, während die Abnahme in 40 cm Tiefe 51% betrug.

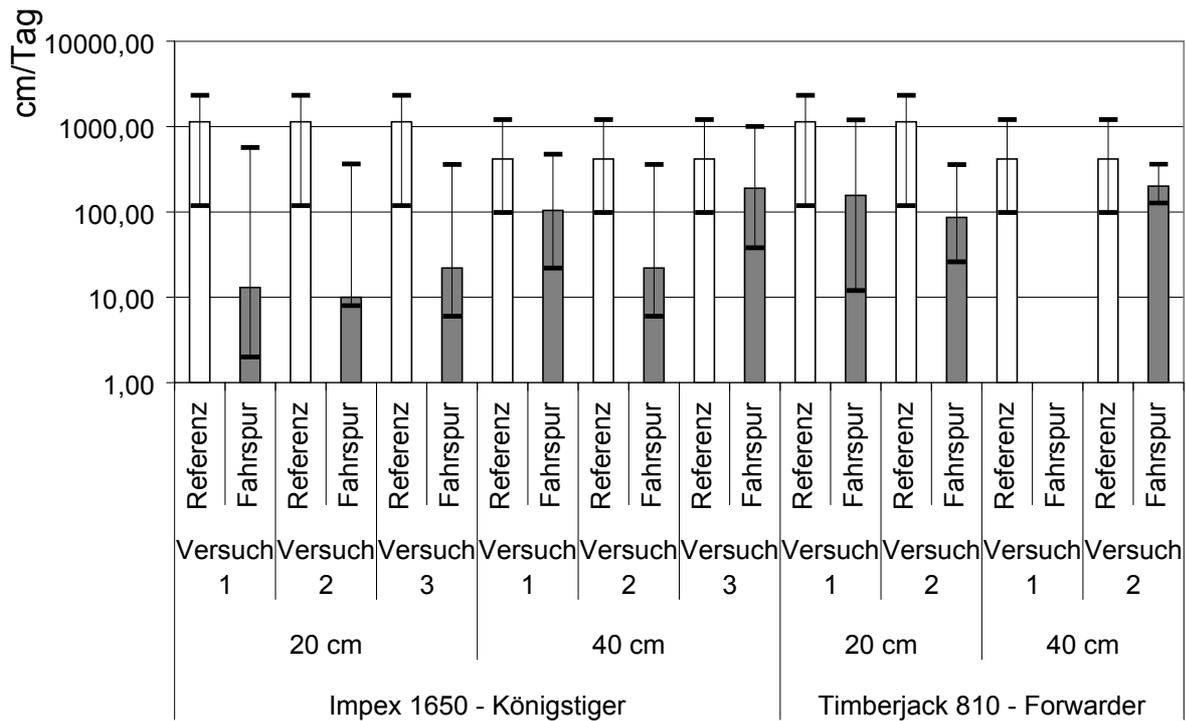


Abbildung 16 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1650 „Königstiger“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Dies ist durch eine Veränderung in der Porenverteilung und Beeinträchtigungen der Porenkontinuität zu erklären. Durch die starken Belastungen und die daraus resultierenden Bodenverdichtungen werden in den locker gelagerten Waldoberböden zuerst die weiten Grobporen der Bodenstruktur zerstört. Diese sind jedoch wesentlich für die Luft- und Wasserleitfähigkeit verantwortlich.

3.2 Pferderückung „Schwarzwälder“

Dieser Versuch erfolgte ebenfalls in den Wäldern St. Märgens, am Militärschlag. Im Gegensatz zur ersten Versuchsanordnung in St. Märgen (siehe Kapitel 3.1) wurde diesmal bewusst eine andere Art der Rückung analysiert. Während im Herbst 2000 besonders schweres Gerät zum Einsatz kam, wurden diesmal die Einflüsse von Rückepferden auf die Änderung der Porenanzahl, -größe und -funktion analysiert. Nach motormanuellem Einschlag in einem Fichten-Jungbuchenbestand wurde Kurzholz mit BHD (Brusthöhendurchmesser) bis 50cm an die Rückegasse vorgeliefert. Als Rückepferde kamen sowohl Süddeutsches als auch Schwarzwälder Kaltblut mit Körpergewichten zwischen 600 und 850 kg zum Einsatz.

Das Schwarzwälder Kaltblut ist ein mittelgroßes und mittelschweres Kaltblutpferd mit unkompliziertem Charakter, trockenem Fundament und schwungvollen Bewegungen (<http://www.schwarzwaelder-kaltblut.de/>). Das Zuchtziel beschreibt Pferde mit einer Größe von 148 bis 160 cm Stockmaß. In den sechziger Jahren wäre diese Rasse fast ausgestorben (<http://www.schwarzwaelder-pferde.de/>). Nach der roten Liste der Gesellschaft zur Erhaltung (GEH) alter und gefährdeter Haustierrassen fällt der Schwarzwälder in die Kategorie III (gefährdet). Das Land Baden-Württemberg unterstützt die Haltung und den Einsatz in der Forstwirtschaft durch eine Beihilferegelung (<http://www.pferdekutscher.de/.../schwarzwald.html>).



Abbildung 17 Bild des Rückepferdes „Schwarzwälder“ mit Arbeitsgeschirr, Vorbereitung zum Kurzholzrücken

Die Größe der Messfenster beim SST Einsatz betrug wieder 9 Minuten, so dass die Vorlieferung von mehreren Stämmen aufgezeichnet werden konnte. Die Probennahme erfolgte analog zum „Königstiger“-Versuch in St. Märgen, mit Probenahmen in der Schleif- und Trittspur der Rückepferde sowie in unveränderten Nullvarianten. Aufgrund der sehr schlechten Witterung wurden nur Proben in 20 cm Tiefe genommen.

3.2.1 Kontaktflächendruck

Die Kontaktflächendrücke sind genäherte Werte, welcher von der Annahme ausgehen, dass der Pferdehuf 10*15 cm groß ist, nach vorne einen Halbkreis beschreibt und vollständig aufliegt. Unter der Prämisse eines erhöhten Druckes unterhalb der Eisen sind höhere Kontaktflächendrücke möglich.

Tabelle 4 Hufdimensionierung und Kontaktflächendrücke Rückepferd

Fahrzeugtyp	Aufstandsfläche	Hufdimension	Gewicht in Mg	Kontaktflächendruck [kPa]	
				Lastverteilung Hinten 50% / 50%	Vorne / Lastverteilung Vorne / Hinten 30% / 70%
Schwarzwälder 4 Hufe		150 mm Breite	0,65	130 / 130	77 / 180
Rückepferd		100 mm Länge			

Die gerechneten Kontaktflächendrücke aus Tabelle 4 zeigen zum einen den Druck bei einer gleichverteilten Last auf alle vier Hufe und zum anderen eine Lastverteilung von 30% auf den Vorderhufen und 70% auf den Hinterhufen. Dies kommt der Arbeitssituation insofern näher, als die Tiere während der Rückung sich überwiegend mit den Hinterläufen abstoßen. Die berechneten Drücke sind höher als die der meisten Erntefahrzeuge. Die Aufstandsfläche und somit der Flächenverbrauch ist hingegen der geringste aller untersuchten Verfahren.

3.2.2 Spannungsmessung

Die Spannungsmessungen erfolgten mit jeweils drei SST Sensoren in 20 cm Bodentiefe. Aufgrund der Witterung wurden keine tieferen Sensoren eingebracht und auch das DTS nicht angeschlossen (Versuchsaufbau siehe Kapitel 2.4).

Die Spannungsmessungen zeigen, dass der Spannungseintrag eines Hufes durchaus dem grosser Fahrzeuge entspricht. Nur die belastete Fläche ist entsprechend klein, so dass sich die Druckzwiebel nur räumlich entsprechend begrenzt ausbildet. Die flächenhafte Belastung des Bodens ist somit als sehr gering anzusehen.

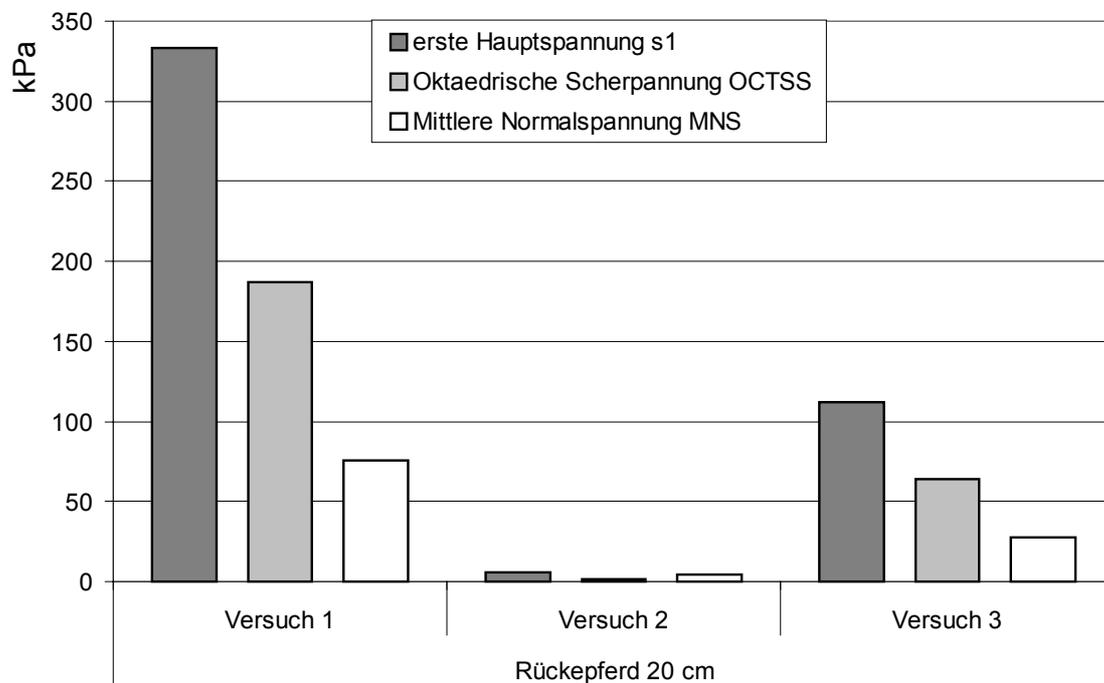


Abbildung 18 Maximale Spannungswerte für Rückepferd „Schwarzwälder“ in 20 cm Tiefe

Die Belastungen durch Rückepferde zeigten einen starken Unterschied zwischen unmittelbarer Punktbelastung und dem Spannungseintrag durch das gerückte Kurzholz.

Die Rückepferdeversuche zeigten, dass hohe Spannungen ausschließlich unmittelbar unter den Pferdehufen auftreten. Hier können Werte von 400 kPa in 20 cm Tiefe auftreten (siehe Abbildung 18). Im ersten Versuch traf das Pferd den Sensor mit dem Hinterhuf während des dritten Versuchs war es der Vorderhuf welcher einen Sensortreffer verzeichnen konnte. Bei beiden Versuchen waren noch zwei weitere Sensoren in 20 cm eingebaut, welche keine erhöhten Spannungswerte zeigten, da die Hufe mindestens 30 cm vom Sensor entfernt waren. Während des zweiten Versuchs war gar kein Huf in der Nähe eines Sensors, nur das Kurzholz wurde in der Rückespur über die Sensoren gezogen. Hierdurch war kein erhöhter Spannungseintrag messbar.

Die Messergebnisse zeigen, dass durch die Rückung mit Pferden kein linienartiger Eintrag von hohen Spannungen in den Boden nachzuweisen ist. Es traten nur punktuelle Spannungseinträge in tiefere Bodenschichten auf. Die durch Spannungseintrag betroffene Gesamtfläche ist dementsprechend als gering anzusehen.

3.2.3 Vorbelastung (P_v)

Die Eigenstabilität des Versuchsstandorts wurde mit Hilfe der Vorbelastung, welche am Zeitsetzungsverhalten von ungestörten Stechzylinderproben bestimmt wurde, ermittelt(siehe Kapitel 2.5).

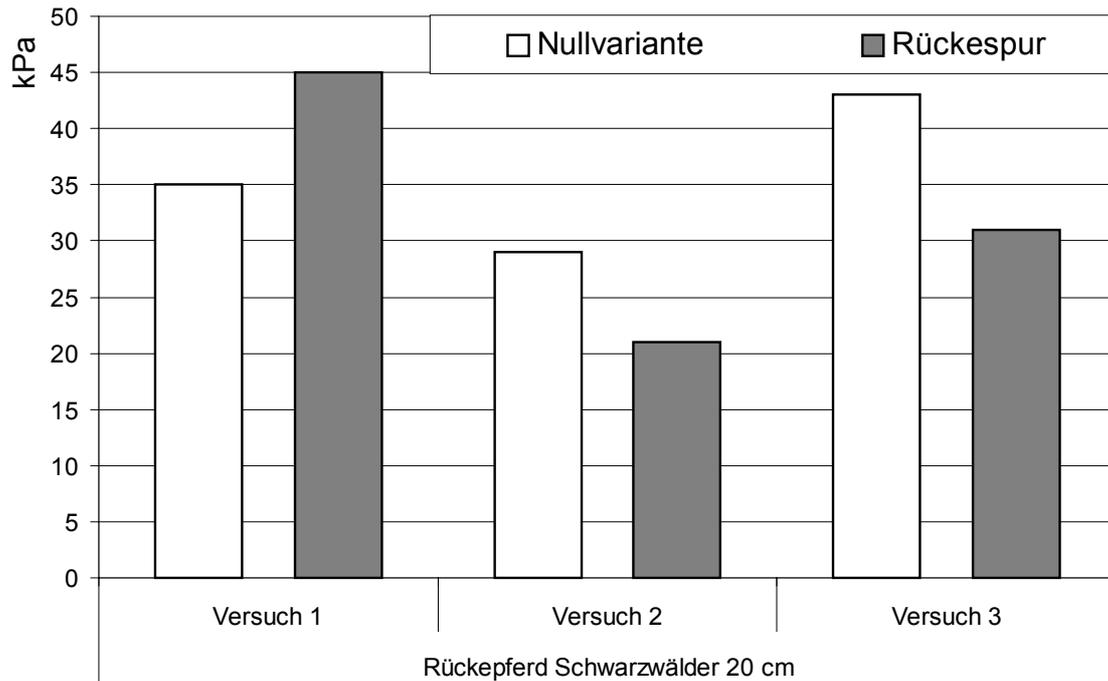


Abbildung 19 Vorbelastungswerte der unbetretenen Standorte (Nullvarianten) und der Rückespuren für in 20 cm Tiefe

Bedingt durch die geringen Lagerungsdichten von $< 1\text{g/cm}^3$ waren auch die Vorbelastungen mit Werten zwischen 28 und 43 kPa sehr gering. Die Eigenstabilität der Waldböden wurde durch das Rücken nicht flächig erhöht. In den Spuren der Vorlieferung lagen die Vorbelastungswerte im gleichen Bereich, die Böden reagierten elastisch auf die Beanspruchung.

Eine punktuelle Erhöhung unmittelbar unter einem Pferdehuf ist anzunehmen, allerdings konnte diese durch die mehrfachen Wiederholungen und die flächenintensive Probenahme messtechnisch nicht abgebildet werden.

3.2.4 Leitfähigkeiten

Gemessen wurden die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und die Luftleitfähigkeit an ungestörten Proben, welche in Stechzylindern, in 20 cm Tiefe, unter der Rückespur und unter einer unbelasteten Fläche genommen wurden. Die Probennahme in der Rückespur erfolgte linear unter der Schleifspur des Kurzholz. Eine gezielte punktuelle Einzelbeprobung unterhalb eines Huftrittes erfolgte nicht, so dass die Proben eine Mischung aus Huftritten und Schleifspur darstellen.

3.2.4.1 Luftleitfähigkeit (KI)

Analog zum ersten Großversuch mit dem Impex 1650 und dem Forwarder wurden auch bei den Rückeversuchen die Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) an Stechzylindern (236cm^3) gemessen. Aufgrund der Witterungsumstände wurde die Probennahme auf die Tiefe 20 cm in der Fahrspur und der unbelasteten Referenz beschränkt. Die aufgesättigten Proben wurden vorher auf -60 hPa entwässert ($pF\ 1,8$) und dann mit einem Luftdruckgradienten von 1 hPa durchströmt (siehe Kapitel 2.6.1).

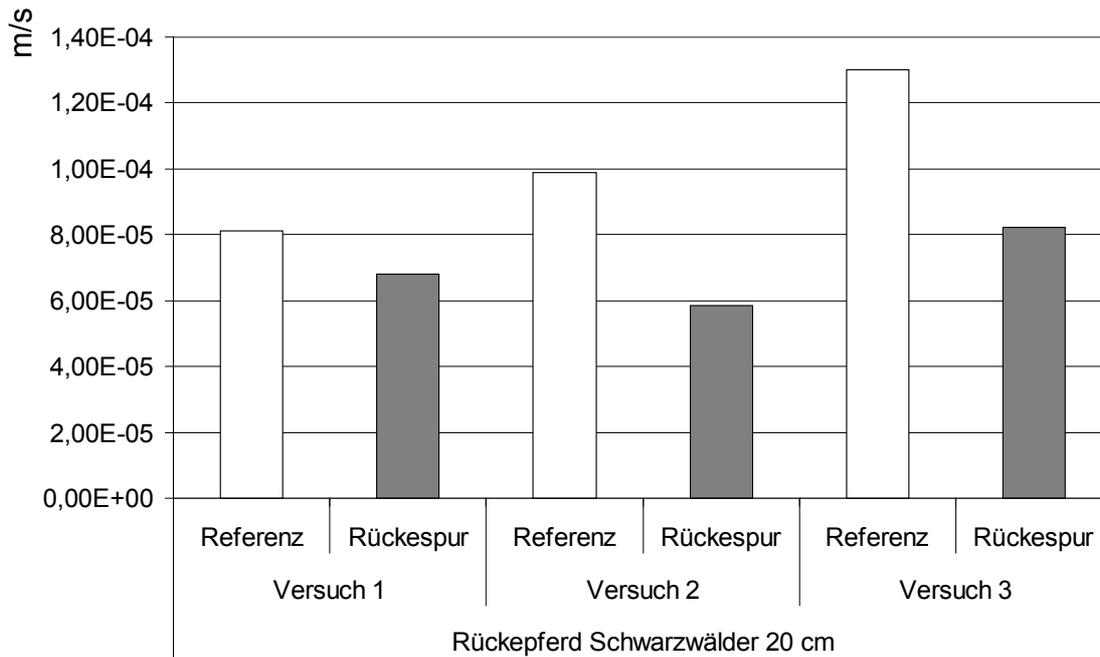


Abbildung 20 Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbetretenen Standorte (Nullvarianten) und der Rückespuren für in 20 cm Tiefe

Die Referenzproben zeigen ähnliche Leitfähigkeiten wie die unbelasteten Proben anderer Versuchsstandorte im Hochschwarzwald. Die geringen Lagerungsdichten führen zu Leitfähigkeiten zwischen $8,1 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ und $1,3 \cdot 10^{-4}\text{ m/s}$.

Mechanische Belastung durch die Rückung führt stets zu einer leichten Abnahme der Luftleitfähigkeit auf $5,5 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ bis $8,2 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$. Allerdings ist bei der natürlichen hohen Streuung der Werte und den weiterhin hohen Leitfähigkeiten eine ökologisch relevante Beeinträchtigung des Standorts durch die Pferderückung nicht festzustellen.

3.2.4.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

Die Messung der Leitfähigkeiten zeigt geringe Bodenveränderungen, welche durch die Kurzholzurückung mit Kaltblütern entstehen (siehe Abbildung 21). Die für diese Standorte charakteristischen sehr hohen Leitfähigkeiten bleiben erhalten. Eine signifikante Strukturänderung ist in den Rückewegen in einer Tiefe von 20 cm nicht mehr nachweisbar. Insgesamt streuen die Werte abhängig von präferenziellen Fließbahnen, wie Wurzelgängen, stark. Die geometrischen Mittel der Messungen liegen im zweiten Versuch in der Rückespur sogar etwas über denen in der Nullvariante. Die Unterschiede sind aber auf die natürliche Streuung der Messwerte zurückzuführen.

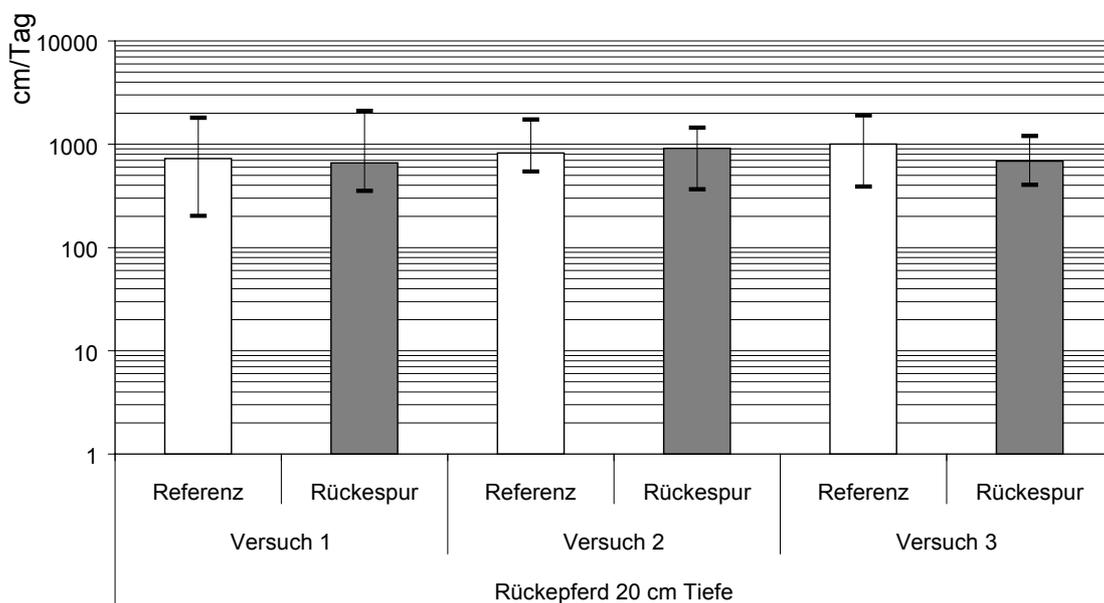


Abbildung 21 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) der unbetretenen Standorte (Nullvarianten) und der Rückespuren für in 20 cm Tiefe

3.3 Impex 1880 „Hannibal“ / Forwarder Timberjack 810

Dieser Großversuch beschreibt die Reaktionen im Boden unter dem Einfluss des schwersten überhaupt im Rahmen des Vorhabens im Südschwarzwald getesteten Erntegerätes. Das Leergewicht des „Hannibal“ Vollernters beträgt 45 Mg. Die Versuchsgassen waren in Mischbeständen auf Braunerden oder Parabraunerden angelegt. Es wurde Fichten-, Tannen- und Buchenkurzholz gesägt und anschließend mit einem Forwarder gerückt. Die bewährte Messfenstergröße von 9 min wurde analog zum Großversuch Impex 1650 („Königstiger“) für die Ernte beibehalten, für die Rückung mit dem Timberjack 810 wurde sie auf 4 min verkürzt.

Es wurden zwei Gassen mit insgesamt sechs Messgruben angelegt. Die drei Gruben der ersten Gasse wurden mit dem Impex 1880, die Gruben der zweiten Gasse mit dem Timberjack 810 befahren. Der erste Befahrungsversuch der ersten Gasse erfolgte ohne eine schützende Reisig-Schicht, die beiden anderen Gruben hatten jeweils eine etwa 50 cm hohe Schicht aus Reisig und dickeren Ästen.

Die Messung der Bodenspannung (Einsatz des SST-Systems) erfolgte in 20 und 40 cm Tiefe, während die Bodenbewegung (DTS Einsatz) entweder in 20 oder 40 cm Tiefe erfasst wurde.

Die Hannibalversuche waren wie folgt gegliedert:

- Auffahrt des Fahrzeugs auf die Messgrube, wobei die Kettenmitte genau über den Sensorköpfen positioniert wurde.
- Baumernte, bestehend aus: Greifen des Stamms mit dem Aggregat, Absägen des Baums in ca. 50 cm Höhe, Anheben und Manipulation des Stamms in Wurfrichtung, Wurf in den Bestand, Entfernen der Äste und Ablängen des Stamms auf 5-Meter-Stücke.
- Verlassen der Grube in Fahrtrichtung.

Der Harvester verließ die Versuchsfläche geradeaus und ohne Drehung.

Die Holzaufnahme-Versuche mit dem Timberjack 810 gliederten sich wie folgt:

- Auffahrt des Fahrzeugs auf die Messgrube, wobei die Reifenmitte eines Reifens genau über einem Sensorkopf positioniert wurde.
- Sukzessive wurden die vom Harvester am Gassenrand abgelegten Stämme mit dem Greifarm aufgenommen und auf der Ladefläche platziert.

Nach der vollständigen Aufnahme der Stämme wurde die Grube in gerader Flucht in Fahrtrichtung verlassen.

Unmittelbar darauf wurden sowohl die Spurrillen aufgenommen, als auch die vollständige Probenahme in der Fahrspur und auf der Referenzfläche durchgeführt.

3.3.1 Kontaktflächendruck

Der statische Kontaktflächendruck für den Impex wurde über die gesamte Auflagenfläche der Kette und die Gesamtmasse ermittelt.

Die Berechnung geht beim Timberjack 810 von einer gleichmäßigen Belastung aller Räder aus. Des Weiteren wird eine Aussage über die nach Ziehsack und Matthies (2001) minimal zu erwartenden Drücke beim Einsatz von Niederdruckreifen mit einem Innendruck von 100 kPa gemacht.

Tabelle 5 Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke Impex 1880 und Timberjack 810

Fahrzeugtyp	Anzahl Ketten / Räder	Ketten / Räder Größe und Luftdruck	Gewicht in Mg	Kontaktflächendruck [kPa]		
				NGP	Druckzonen-Modell	Druckzonenmodell Niedrigdruckreifen (100 kPa)
IMPEX 1880 "Königstiger"	2 Ketten	600 mm Breite 4600 mm Länge	45	82 ¹	82 ¹	82 ¹
Timberjack 810 Radforwarder	8 Räder	600/50 – 22,5 200 kPa	10	35	167 ²	136 ²

¹ Kontaktflächendrücke für Kettenfahrzeuge = Gesamtgewicht/Aufstandsfläche

² Radlast 12,5 Mg, Ply Ratio 12, Reifenweite 0,3 m, Karkassenhöhe 0,3m, Reifendurchmesser 1,15 m

Aufgrund der Kettendimensionierung ergeben sich für den Impex 1880, in Anbetracht einer Masse von 45 Mg, mit 82 kPa relativ niedrige statische Kontaktflächendrücke.

Dies legt nahe, dass eine bodenpflegliche Holzernte mit dem „Hannibal“ Impex 1880 grundsätzlich möglich sein könnte.

Die Werte für den Forwarder lassen bereits eine starke Bodenbelastung vermuten. Selbst bei der Verwendung von Niederdruckreifen (100 kPa) lägen die Werte noch bei 136 kPa Kontaktflächendruck.

3.3.2 Spannungsmessung

Das schwerere „Hannibal“ System verursachte trotz einer schützenden etwa 50 cm dicken Reisigmatte Spannungen bis 450 kPa. Der schützende Effekt der Reisigmatte wird deutlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass dieses System ein höheres Leergewicht und höhere statische Kontaktflächendrücke als der Impex 1650 („Königstiger“) hat (siehe Kapitel 3.1.1).

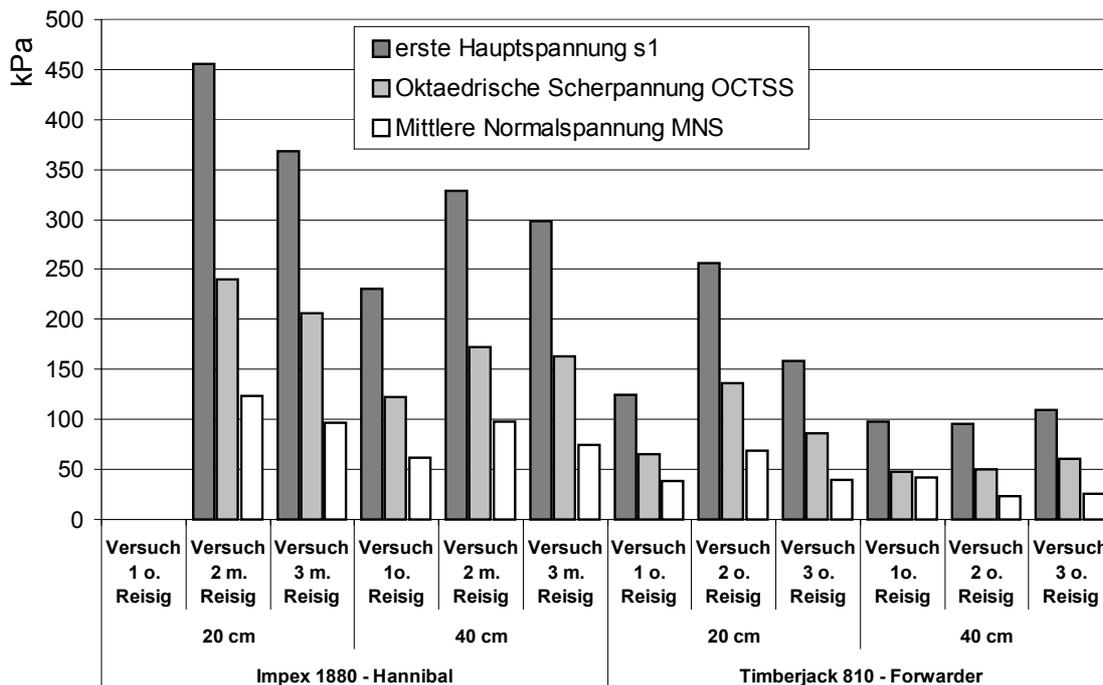


Abbildung 22 Maximale Spannungswerte für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die gemessenen Spannungsmaxima in einer Tiefe von 20 cm belegen die hohe dynamische Belastung des Bodens durch die Harvesterernte (Abbildung 22).

Der Impex 1880 zeigt in den zwei Versuchen Maxima für die erste Hauptspannung (σ_1) von 370 und 455 kPa. Dagegen erreicht die oktaedrische Scherspannung (OCTSS) Spannungsmaxima von 201 und 239 kPa. Die Werte der mittleren Normalspannung (MNS) sind deutlich reduziert.

Auch in 40 cm Tiefe sind die Spannungsspitzen immer noch höher als die Vorbelastung der Referenzböden (siehe Kapitel 3.3.4).

Die Bodenspannungen in 40 cm Tiefe sind etwas geringer als in 20 cm Tiefe, sie erreichen aber immer noch sehr hohe, und dabei die normalen Werte für die

Eigenfestigkeit bei weitem übersteigende, Beträge. Ähnliche vergleichende Aussagen lassen sich auch für die berechneten Werte für die Scherspannungsmaxima und die mittlere Normalspannung treffen.

Der Forwarder zeigt entsprechend den SST-Messergebnissen insgesamt niedrigere Bodenbeanspruchungen, sie liegen aber weit über den Bodenstabilitäten der Standorte.

Durch die verschiedenen Befahrungssituationen schwanken die maximalen Spannungseinträge in 20 cm Tiefe für σ_1 zwischen 125 und 256 kPa, während die Scherspannungen zwischen 65 und 136 kPa und die Normalspannung 38 bis 68 kPa betrug.

3.3.3 Bodendeformation

Die Auswirkungen der Befahrung auf die Bodenverformung und auf den vertikalen Versatz wurden mit dem kombinierten DTS/SST System entweder in 20 oder 40 cm Tiefe ermittelt (siehe Kapitel 2.4.2).

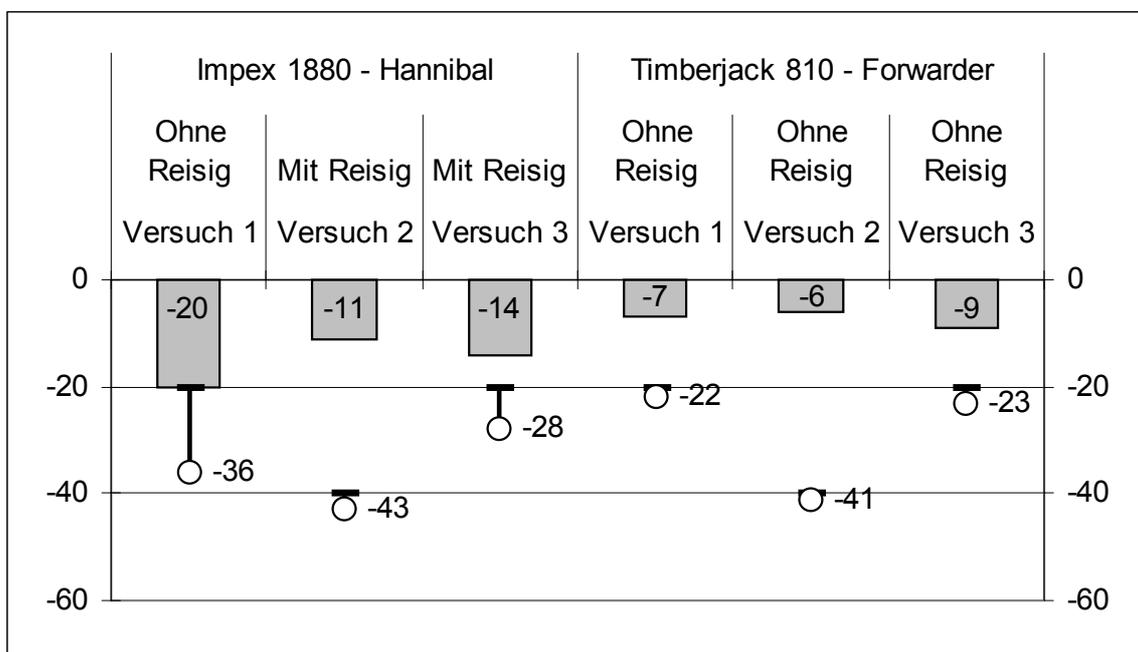


Abbildung 23 Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST Sensors für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die Bewegung des Sensors in Versuch 1 zeigte den größten, in einer Befahrung ermittelten, Bodenversatz. Bei der Hannibal Ernte ohne schützende Reisigschicht

wurde die Bodenoberfläche um 20 cm nach unten verschoben, während der in 20 cm Tiefe eingebaute DTS/SST Sensor durch die Befahrung um 13 cm nach unten verschoben wurde. Folglich wurde das ursprünglich 20 cm mächtige Bodenpaket oberhalb des Sensors um weitere 7 cm zusammengedrückt und um 13 cm vertikal versetzt. Es fand eine starke Bodenverdichtung sowie eine vertikale Scherung statt. Auch die durch eine Reisigmatte geschützten Befahrungsversuche mit dem Harvester zeigten mit 11 und 14 cm deutliche Fahrspuren und starken vertikalen Versatz. Das ursprüngliche 40 cm mächtige Bodenpaket wurde durch die Befahrung um 3 cm versetzt. Auch in dieser Tiefe werden die Böden sowohl verdichtet als auch geschert.

Die Forwarderversuche bewirkten Fahrspuren zwischen 6 und 9 cm, wobei der Versatz in 20 cm Tiefe 2 bis 3 cm betrug. In dem Versuch, in dem der Versatz in 40 cm Tiefe aufgezeichnet wurde, war dieser immer noch 1 cm groß.

3.3.4 Vorbelastung (Pv)

Die Eigenstabilität der Versuchsflächen wurde an Stechzylinderproben mit dem „Multi Step Soil Compression Test“ unter drainierten Bedingungen (pF 1,8) ermittelt (siehe Kapitel 2.5).

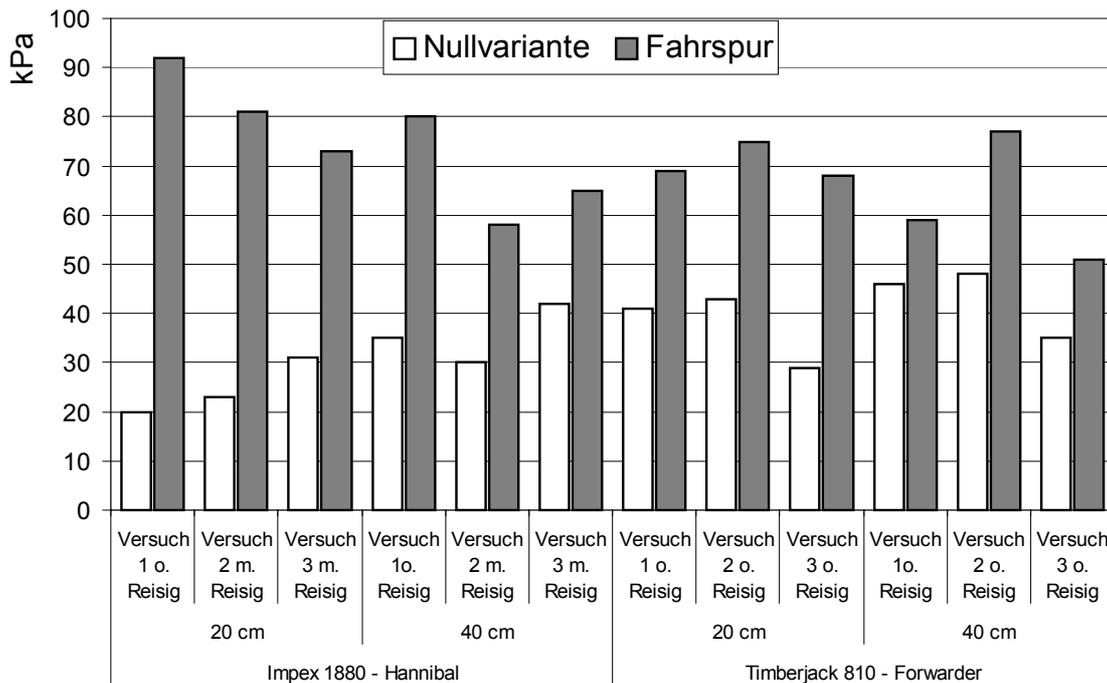


Abbildung 24 Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die Untersuchung der natürlichen Eigenstabilität der Waldböden zeigt, dass diese mit 20 bis 48 kPa als sehr niedrig anzusehen ist.

Die Befahrungsversuche mit dem Impex 1880 haben die Vorbelastungswerte verdoppelt und im Oberbodenbereich (20 cm Tiefe) sogar auf mehr als 90 kPa verdreifacht. In 40 cm Tiefe werden die Eigenstabilitäten ebenso erhöht, die Fahrspur zeigte hier Werte von 58 bis 80 kPa.

Der Versuch ohne Reisigmatte zeigte sowohl in 20 als auch in 40 cm Tiefe die höchsten Vorbelastungswerte.

Die Forwarderversuche haben die Vorbelastungswerte auf 68 bis 75 kPa angehoben, in 40 cm Tiefe lagen sie nach der Befahrung bei 51 bis 77 kPa.

3.3.5 Leitfähigkeiten

3.3.5.1 Luftleitfähigkeit (KI)

Der Luftleitfähigkeitsbeiwert (KI) wurde an aufgesättigten und auf -60 hPa entwässerten Stechzylindern (236cm^3) gemessen.

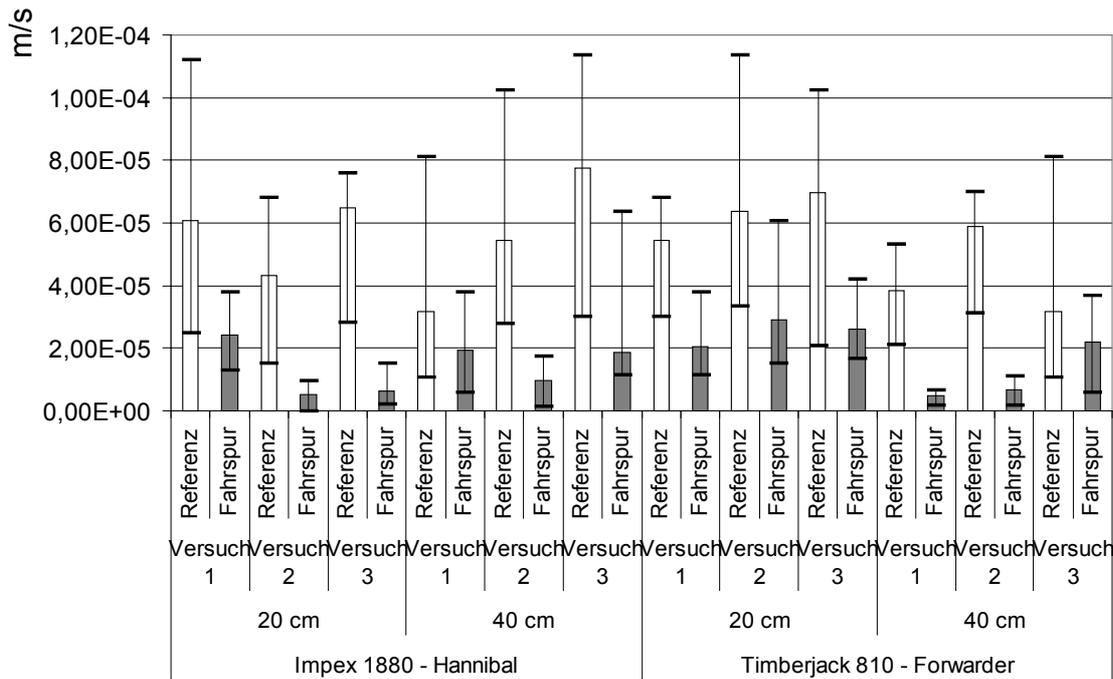


Abbildung 25 Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die Abbildung 25 zeigt, dass die Luftleitfähigkeitswerte (KI) sowohl in der 20 cm Tiefe als auch in der 40 cm Tiefe abnehmen. Generell liegt die Abnahme zwischen 30 und 90 %, wenn man berücksichtigt, dass die ungestörten Waldböden Leitfähigkeiten zwischen $4,3 \cdot 10^{-5}$ m/s bis $7,0 \cdot 10^{-5}$ m/s im Oberboden und $3,2 \cdot 10^{-5}$ m/s bis $7,6 \cdot 10^{-5}$ m/s aufwiesen.

Durch die Befahrung mit dem Harvester sanken die KI-Werte im Oberboden (20 cm) um 60 bis 90%, während die Abnahme im Unterboden 39 bis 82% betrug. Die für die Befahrungsversuche mit dem Hannibal eingesetzte Reisigmatte war nicht in der Lage, die Zerstörung des Porensystems, und somit die Einbrüche in der Luftleitfähigkeit, zu verhindern.

Die Forwarderversuche senkten den KI-Wert in 20 cm Tiefe um 55 bis 62%, in 40 cm Tiefe um 31 bis 87%.

Die schützende Wirkung der Reisigmatten während des ersten Versuchs war hier nicht nachweisbar. Dies könnte an einem erhöhten Anteil von weiten Grobporen durch Wurzeln gelegen haben.

3.3.5.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)

Die gesättigten Wasserleitfähigkeiten sind in Abbildung 26 dargestellt.

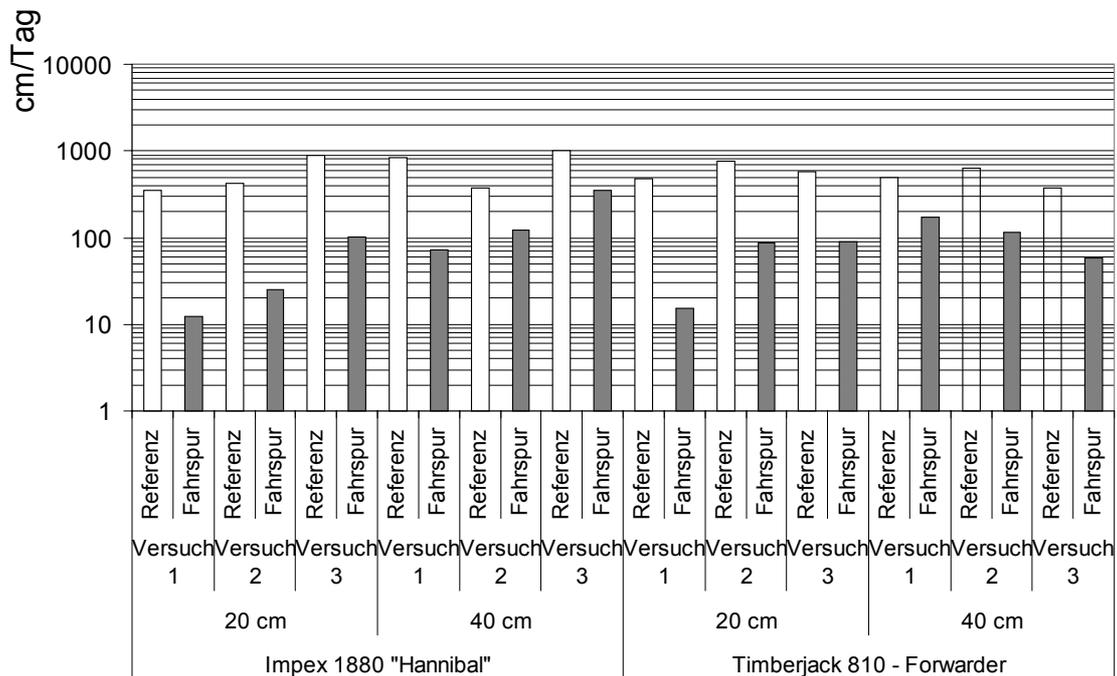


Abbildung 26 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Impex 1880 „Hannibal“ und Timberjack 810 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die kf-Werte zeigen Abnahmen der Leitfähigkeiten bis zu 97%.

Die natürlichen kf-Werte liegen hier bei 326 bis 890 cm/Tag im Oberboden und bei 368 bis 1004 cm/Tag in 40 cm.

Diese nehmen durch die Harvesterbefahrung um 89 bis 96% im Oberboden und um 66 bis 91% in 40 cm Tiefe ab.

Die KI-Werte zeigen wieder die geringsten Werte in den Harvesterfahrspuren bei der Befahrung ohne Reisigmatte.

Ähnliche Effekte zeigen sich auch nach der Forwarderbefahrung: die hohen Leitfähigkeiten sinken um 84 bis 97% im Oberboden und 65 bis 84% in 40 cm Tiefe.

3.4 Radharvester “Caterpillar 580”

Mit diesem Großversuch wurde ein größerer Radharvester der Firma Caterpillar im Hinblick auf seine verdichtende Wirkung im Zusammenhang mit der Holzernte untersucht. Das Leergewicht des „CAT 580“ Vollernters beträgt 17,5 Mg. Die Versuchsgassen waren in Mischbeständen auf Braunerden oder Parabraunerden angelegt. Es wurde Fichten-, Tannen- und Buchenkurzholz mit 5 m Länge geerntet und am Gassenrand gestapelt.

Der Versuchsablauf gestaltete sich wie folgt:

- Auffahrt auf die Versuchsfläche.
- Positionierung des Harvesters, so dass das Rad, welches die Hauptlast überträgt, direkt über den Sensorköpfen positioniert ist.
- Ernte der Bäume, inklusive Fällen, Wurf in die Gasse oder den Bestand, Entasten des Stamms, Ablängen auf 5 m und Stapeln des Kurzholzes am Gassenrand.
- Abfahrt in Fahrtrichtung.

Die bewährte Messfenstergröße von 9 min wurde beibehalten. Die Probennahme der Nullvarianten erfolgte unmittelbar neben den Versuchsflächen in 20 und 40 cm Tiefe, die Probennahme in der Fahrspur wurde im Standbereich des Fahrzeugs durchgeführt.



Abbildung 27 Bild des Versuchsfahrzeugs Caterpillar 580

3.4.1 Kontaktflächendruck

Die Kontaktflächendrücke wurden nach den Modellen des NGP und dem Druckzonen-Modell bestimmt.

Bei dem Radharvester wurde eine Lastverteilung von 40 % der Gesamtlast auf der Hinterachse und je 30 % auf die beiden Vorderachsen angenommen.

Tabelle 6 Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke CAT 580 Radharvester und Timberjack 8110

Fahrzeugtyp	Anzahl Ketten / Räder	Ketten / Räder Größe und Luftdruck	Gewicht in Mg	Kontaktflächendruck [kPa]		
				NGP	Druckzonen-Modell	Druckzonenmodell Niedrigdruckreifen (100 kPa)
Caterpillar 580 Radharvester	4/2 Räder vorne/hinten	600/55-26,5 (vorne) 700/55-34 (hinten)	17,5	65/61 ¹	221/121 ¹	181/98 ¹

¹ Lastverteilung Hinterachse 40%, zwei Vorderachsen je 30%

Die errechneten Kontaktflächendrücke (Tabelle 6) lassen bereits eine starke Beanspruchung des Bodens vermuten. Der Radharvester bringt nach dem NGP

bereits Drücke von > 60 kPa auf den Boden, das Druckzonenmodell von Ziesak & Matthies geht von statischen Drücken bis zu 220 kPa für die Hinterachse und 120 kPa jeweils für die einzelnen Vorderachsen aus. Selbst die Nutzung von Niedrigdruckreifen würde die Belastungen nicht unter 180 kPa (Hinterachse), beziehungsweise 100 kPa (Vorderachse) absenken.

3.4.2 Spannungsmessung

Die Abbildung 28 zeigt hohe Spannungsmaxima für den untersuchten Radharvester Caterpillar 580.

Die gemessenen Maxima der ersten Hauptspannung (σ_1), welche während der verschiedenen Befahrungsversuche auftraten, liegen weit oberhalb der im Südschwarzwald üblichen Bodenstabilitäten (siehe Kapitel 3.4.4). In zwei von drei Versuchen wurden Spannungen über 300 kPa erreicht, im dritten Versuch immerhin fast 200 kPa.

Die auftretenden Scherspannungen (OCTSS) sind allesamt als sehr hoch zu bewerten. Im Befahrungsversuch lagen die maximalen Werte bei bis zu 200 kPa. Dies zeigt die enorme Scherwirkung, welche der Caterpillar 580 auf die Bodenstruktur ausübt.

Die maximalen Spannungswerte der mittleren Normalspannung (MNS) verlaufen analog zu denen der ersten Hauptspannung und liegen zwischen 65 und 85 kPa.

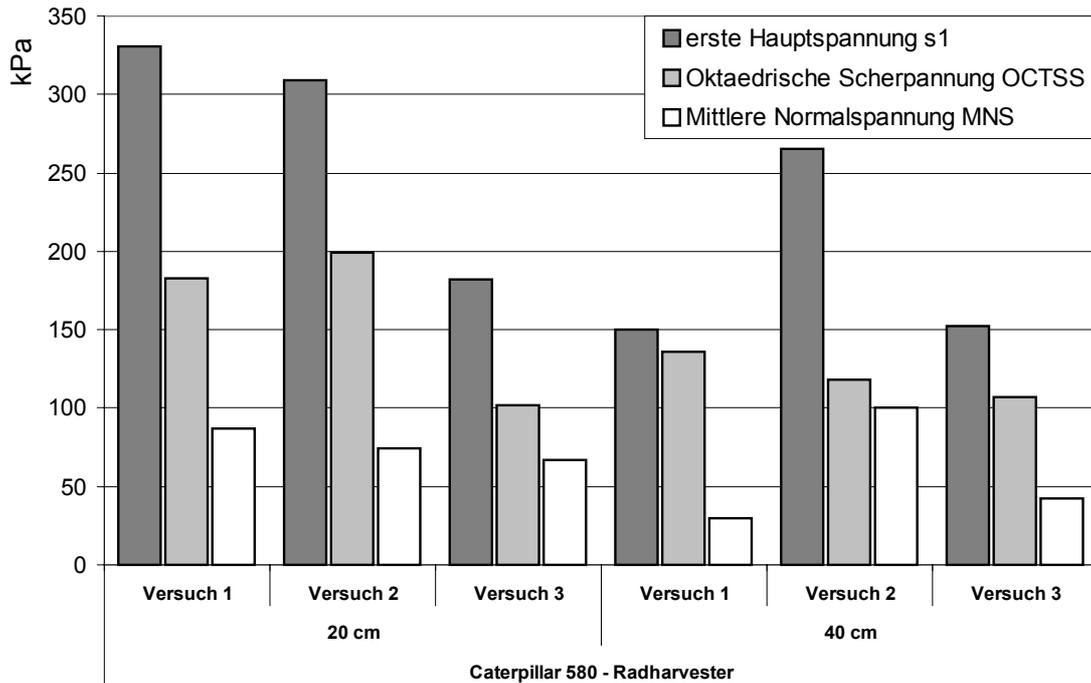


Abbildung 28 Maximale Spannungswerte für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe

3.4.3 Bodendeformation

Der Caterpillar verursachte Fahrspuren, die bis zu 11 cm tief waren und darüber hinaus den ursprünglich in 20 cm Tiefe installierten DTS um weitere 7 cm verdrückte. Der zusätzliche Versatz nimmt mit der Tiefe des Einbaus ab (siehe Abbildung 29). Der Bodenversatz in 20 cm Tiefe führte folglich zu einer kombinierten Verdichtung und Verscherung. Der Versatz in Versuch 2 betrug in 40 cm Tiefe immer noch 3 cm, was eine tiefgründige Strukturänderung des Waldbodens belegt.

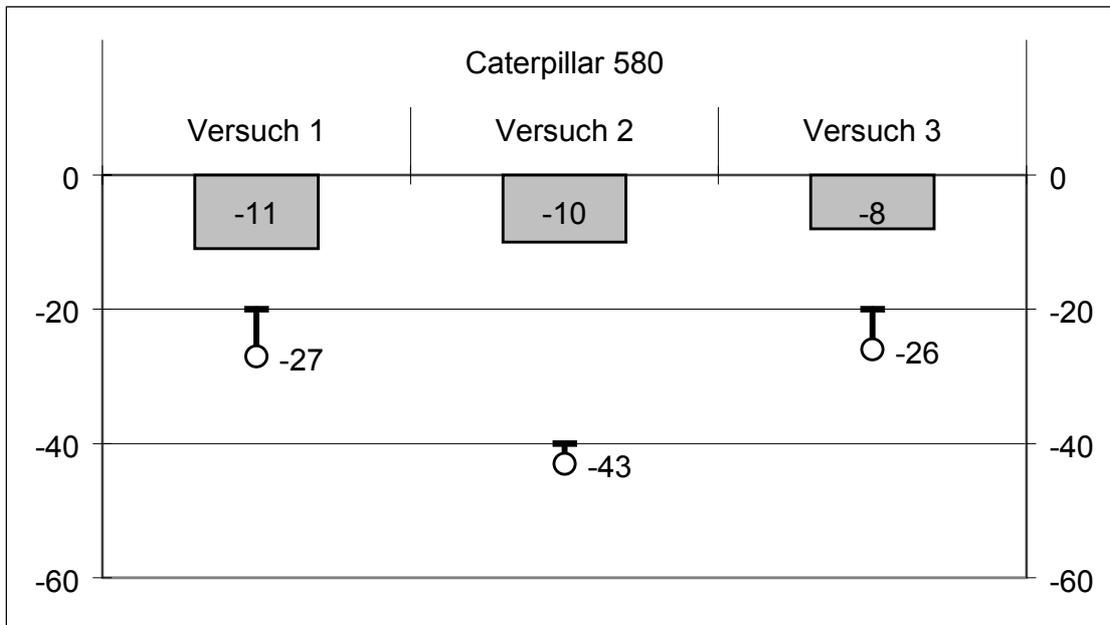


Abbildung 29 Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST Sensors für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe

3.4.4 Vorbelastung (Pv)

Die natürlichen Vorbelastungswerte liegen an diesem Standort sowohl für 20 als auch für 40 cm Tiefe in den zu erwartenden Bereichen für die locker gelagerten Schwarzwälder Höhenlehme.

Sowohl die Werte für 20 als auch 40 cm Tiefe zeigen in der Fahrspur eine Zunahme der Vorbelastungswerte. Während sich die Vorbelastung in 20 cm mehr als verdoppelte, stieg sie in 40 cm Tiefe immer noch um mindestens 40 % an.

Somit wurden die Böden plastisch verformt. Die Erhöhung der Vorbelastung durch den Radharvester 580 konnte in allen Versuchen nachgewiesen werden.

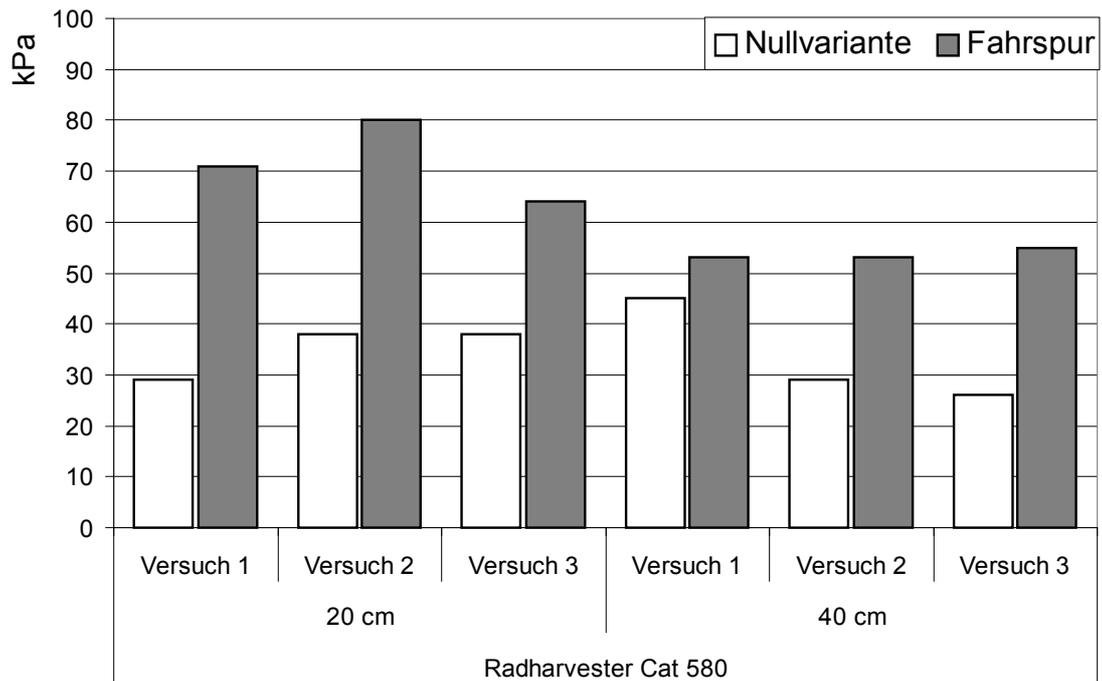


Abbildung 30 Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe

3.4.5 Leitfähigkeiten

Die Leitfähigkeiten wurden an ungestörten Stechzylindernproben aus 20 und 40 cm Tiefe gemessen.

Hierzu wurden sowohl die unbefahrenen Waldböden unmittelbar neben den Versuchsflächen als auch die Fahrspuren beprobt.

3.4.5.1 Luftleitfähigkeitswerte (KI)

Die untersuchten Standorte haben ursprünglich sämtlichst sehr hohe natürliche Luftleitfähigkeiten. Durch eine Holzernte mit dem Caterpillar 580 sank die Luftleitfähigkeit allerdings deutlich um bis zu 70% (Abb. 5).

Generell sind die Abnahmen in 40 cm Tiefe weniger stark ausgeprägt, an den Versuchsstandorten betragen sie zwischen 21 und 56%.

Alle Befahrungsversuche mit dem Radharvester CAT 580 hatten tiefgründige Änderungen der Leitfähigkeiten zur Folge. Man kann aufgrund dieser Ergebnisse postulieren, dass Bodenschädigungen über 40 cm Tiefe hinaus mit diesem Erntesystem unvermeidbar scheinen.

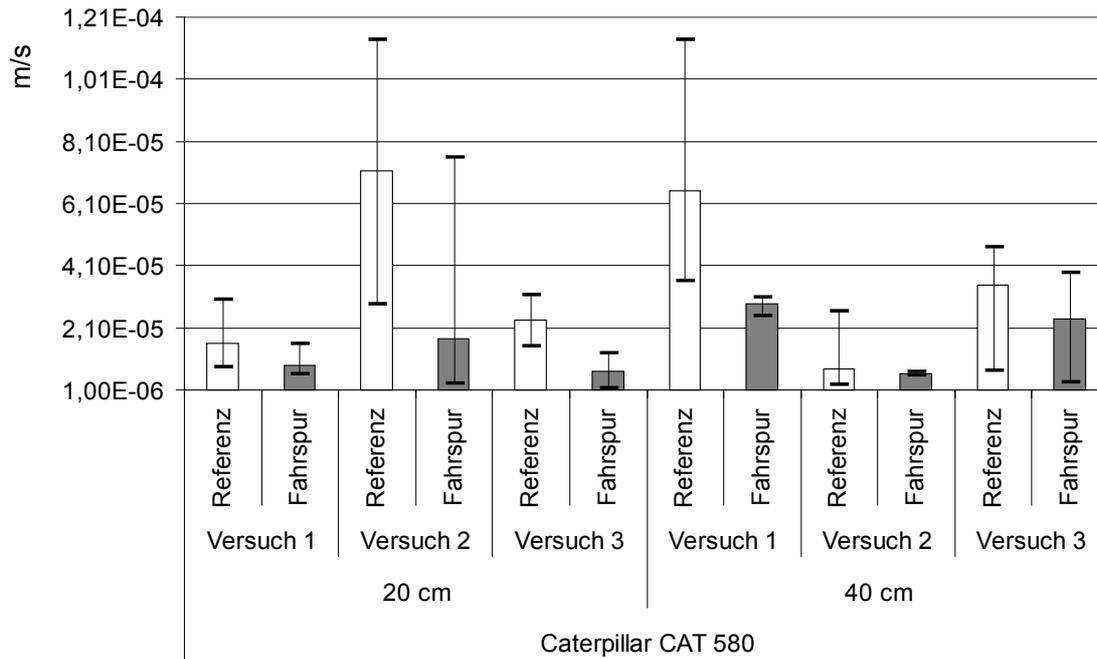


Abbildung 31 Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe

3.4.5.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

Die während der Radharvesterversuche befahrenen Waldböden zeigen in ihrem natürlichen Zustand sehr hohe Leitfähigkeiten. Die k_f -Werte erreichen teilweise bis zu 1000 cm/ Tag, da die Böden alle eine pedogen sehr geringe Lagerungsdichte und aufgrund der Wurzelgänge präferenzielle Fließbahnen aufwiesen.

Die Abnahmen der Wasserleitfähigkeit durch die Befahrung waren in allen Varianten nachweisbar.

In 20 cm Tiefe betrug die Abnahme der Leitfähigkeiten zwischen 43 und 84%.

In der zweiten Untersuchungstiefe lagen die Werte ähnlich hoch, bei 51 bis 85%.

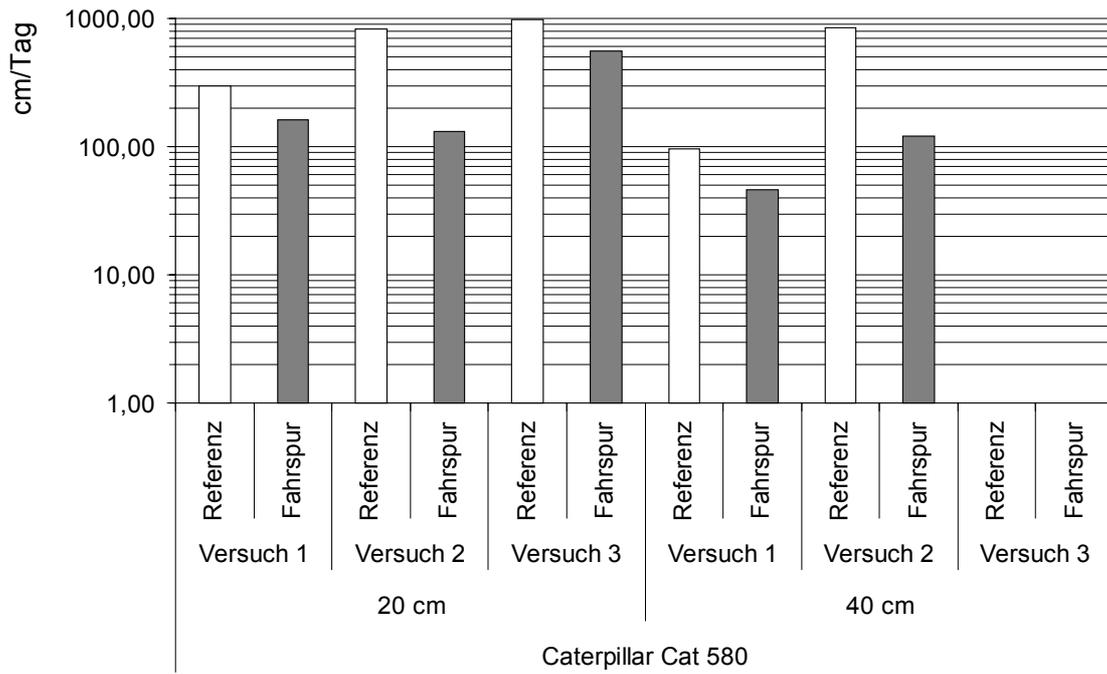


Abbildung 32 Gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Caterpillar 580 in 20 und 40 cm Tiefe

3.5 Valmet 911 Kettenharvester „Snake“ / Timberjack 1110 Forwarder

Dieser kombinierte Versuch aus automatisierter Holzfällung mit einem Harvester und klassischer Rückung mit einem größeren Forwarder (Timberjack 1110) fand im Sommer 2002 in unmittelbarer Nachbarschaft zum vorangegangenen „Hannibal“ Versuch statt.

Der Valmet 911 „Snake“ gilt mit einer Masse von 20 Mg als leichter Vollernter. Die charakteristische Knicklenkung und das Fahrwerk, welches aus vier Ketten besteht haben ihm die Bezeichnung „Snake“ eingebracht.

Die Versuchsgassen waren wieder in Mischbeständen auf Braunerden oder Parabraunerden angelegt. Es wurde Fichten-, Tannen- und Buchenkurzholz (5 m) aufgearbeitet und anschließend mit einem Forwarder gerückt.

Die Messfenstergröße für die einzelnen Befahrungsversuche wurde mit 9 min für die Ernte beibehalten, für die Forwarder Rückung waren es 4 min.

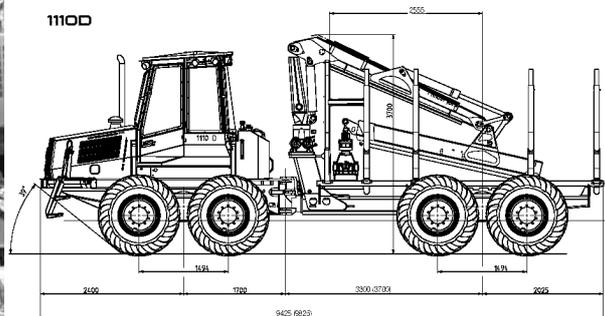


Abbildung 33 Bilder der Versuchsfahrzeuge Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110

3.5.1 Kontaktflächendruck

Die statische Betrachtung der Kontaktflächendrücke zeigt eine geringe statische Bodenbelastung durch den Einsatz des „Snakes“. Die Kontaktflächendrücke für den Valmet 911 liegen bei gerade 40 kPa und somit im Bereich der natürlichen Bodenstabilitäten.

Die Kontaktflächendrücke des Forwarders (Timberjack 1110) liegen beim NGP in der gleichen Größenordnung wie beim „Snake“, jedoch postulieren Ziesak und Matthies mit ihrem Modell Drücke von 187 kPa bei einem Reifeninnendruck von 200 kPa.

Selbst eine bodenschonende Absenkung der Innendrucke auf 100 kPa lassen Drücke von 157 kPa erwarten.

Tabelle 7 Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke Valmet 911 und Timberjack 1110

Fahrzeugtyp	Anzahl Ketten / Räder	Ketten / Größe und Räder Luftdruck	Gewicht in Mg	Kontaktflächendruck [kPa]		
				NGP	Druckzonen-Modell	Druckzonenmodell Niedrigdruckreifen (100 kPa)
Valmet 911 "Snake"	4 Ketten	500 mm Breite 500 mm Länge	45	40 ¹	40 ¹	40 ¹
Timberjack 1110 Radforwarder	8 Räder	700/50 – 26,5 200 kPa	12	39	187 ²	157 ²

¹ Kontaktflächendrücke für Kettenfahrzeuge = Gesamtgewicht/Aufstandsfläche

² Radlast 1,5 Mg, Ply Ratio 12, Reifenweite 0,7 m, Karkassenhöhe 0,35m, Reifendurchmesser 1,37 m

3.5.2 Spannungsmessung

Die Spannungsmessungen erfolgten analog zu den anderen Großversuchen mit dem SST System. Es wurden bei jeder Befahrung insgesamt 3 Sensoren unter der Fahrspur platziert. Diese waren entweder in 20 cm oder 40 cm Tiefe positioniert.

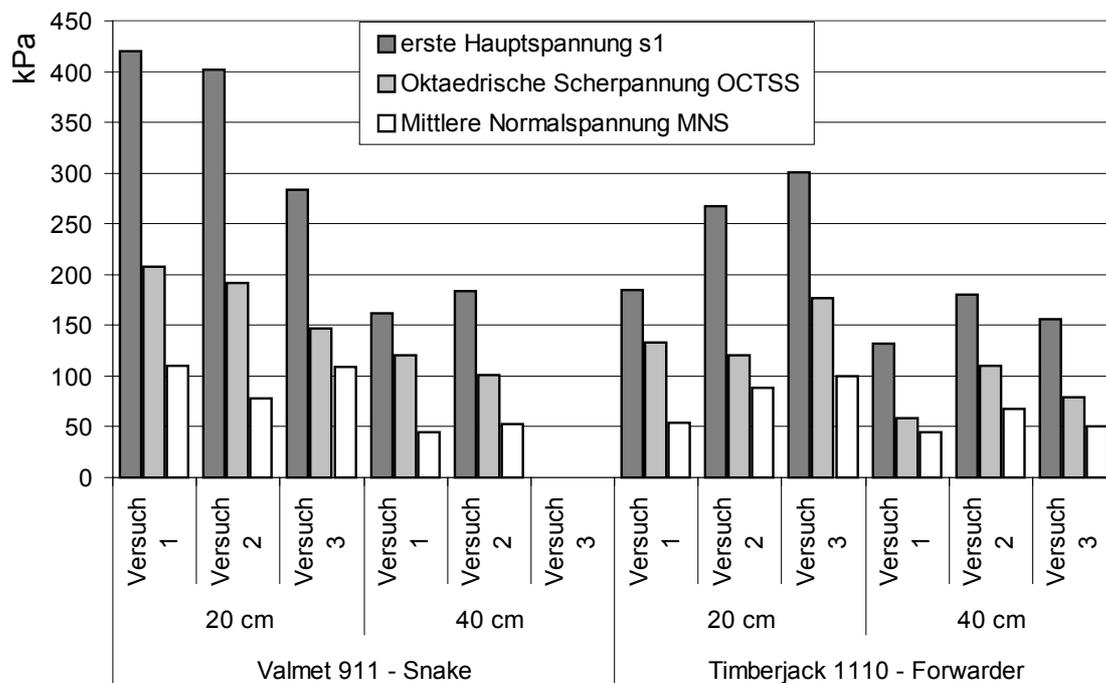


Abbildung 34 Maximale Spannungswerte für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die gemessenen Spannungsmaxima für den Valmet 911, in 20 cm Tiefe, zeigen trotz der, im Vergleich zu den anderen Harvestern geringen Kontaktflächendrücke, hohe Werte von 270 bis 420 kPa für die erste Hauptspannung σ_1 . Auch die hohen Werte für die Scherspannung und Normalspannung zeigen, dass mit plastischen Verhalten des Bodens gerechnet werden muss.

Auch die Spannungsmaxima in 40 cm Tiefe überschreiten die Eigenstabilität. (siehe Kapitel 3.5.4).

Die Spannungsspitzen für den Timberjack 1110 sind niedriger als die des Valmet, sie liegen im Bereich des kleineren Timberjack 810 aus den andern Harvesterversuchen. In jedem der drei Befahrungsversuche wurden aber fast 200 kPa oder mehr für die vertikale Hauptspannung σ_1 erreicht. Selbst in 40 cm Tiefe erreichte σ_1 bis zu 170 kPa.

3.5.3 Bodendeformation

Mit dem Displacement Transducer System (DTS) wurde die vertikale Bodendeformation durch die Befahrung ermittelt.

Außerdem wurden mittels Wasserwaage die Fahrspuren, im Vergleich zum unbefahrenen Boden, ermittelt.

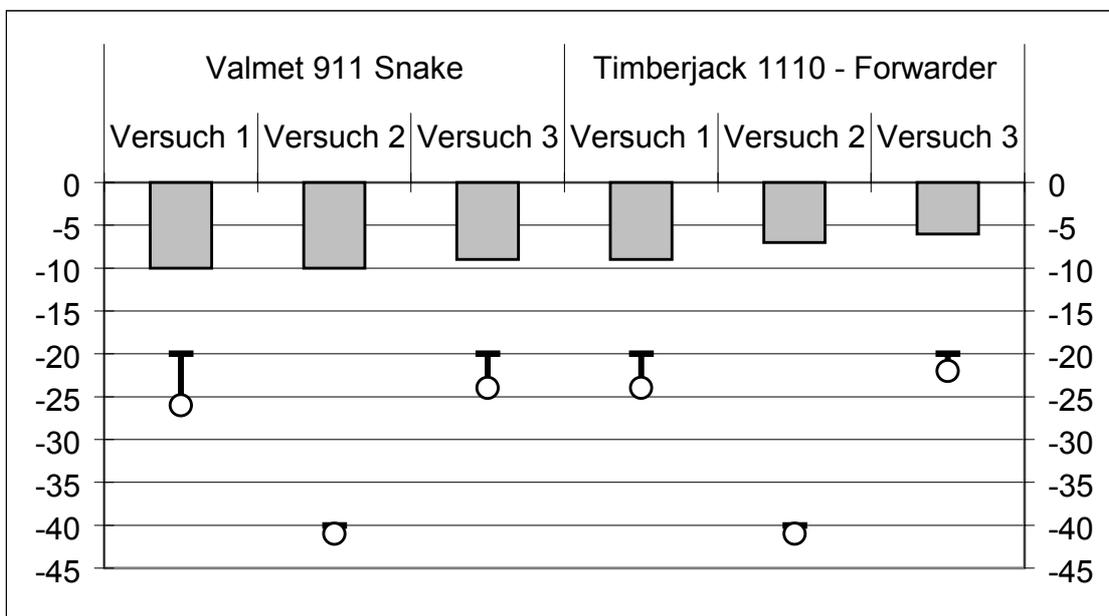


Abbildung 35 Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST Sensors für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1100 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Die Fahrspurtiefe des „Snake“ lag bei den drei Versuchen immer im Bereich von 9 bis 10 cm. Der vertikale Versatz des SST Kopfs betrug bei den Versuchen in 20 cm Tiefe 4 und 6 cm. Folglich wurde nicht nur der Oberboden verdichtet, sondern es erfolgte auch ein vertikaler Versatz. In 40 cm Tiefe wurde der Ausgangspunkt noch um einen cm versetzt.

Die Reifenabdrücke des Timberjacks waren mit 6 bis 9 cm etwas weniger tief als die des Harvesters. Auch der vertikale Versatz in 20 cm fiel mit – und 4 cm (20 cm Tiefe) und 1 cm (40 cm Tiefe) weniger stark aus wie beim „Snake“.

3.5.4 Vorbelastung (Pv)

Die Bestimmung der Eigenstabilität der unbelasteten Referenzböden erfolgte an Proben, welche unmittelbar neben den Versuchspartellen genommen wurden.

Die Proben für die belasteten Flächen wurden in der Fahrspur, im Bereich der Standfläche der Fahrzeuge genommen.

Die Vorbelastung der unbefahrenen Böden liegt in den Versuchsgassen bei 25 – 45 kPa. Dies entspricht den Werten der anderen Versuchsfelder der Umgebung.

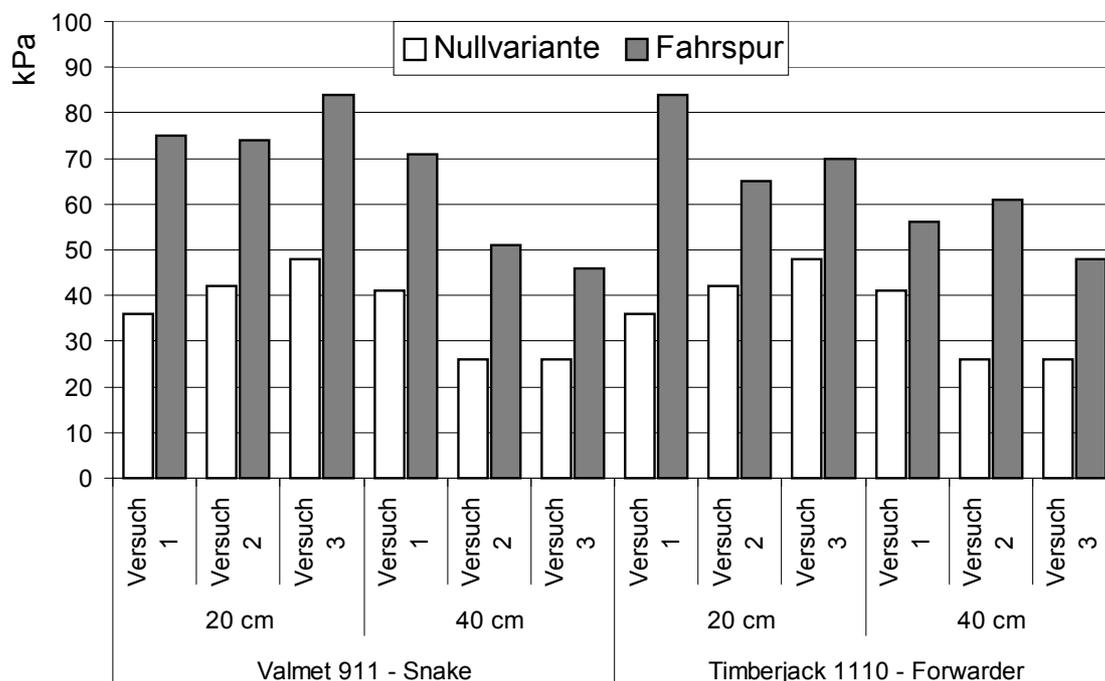


Abbildung 36 Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

Sowohl die Werte für 20 cm Tiefe als auch 40 cm Tiefe zeigen eine Zunahme der Vorbelastungswerte in der Fahrspur nach der Befahrung. In 20 cm Tiefe sind diese für beide Fahrzeugvarianten in der Fahrspur etwa gleich groß und liegen bei 70 bis 80 kPa. Auch die tieferen Bodenschichten zeigen eine Erhöhung der Vorbelastung; der Anstieg ist bei der Forwardervariante etwas größer als beim Snake.

Dies ist ein Beleg für eine permanente Veränderung des Bodens. Das bodenstützende Feinwurzelwerk kann die Verdichtung, auch bei dem in diesem Versuch untersuchten „leichten“ Harvester, nicht verhindern. Die Erhöhung der Vorbelastung durch Waldfahrzeuge konnte in allen Versuchen nachgewiesen werden.

3.5.5 Leitfähigkeiten

3.5.5.1 Luftleitfähigkeit (KI)

Zur Quantifizierung der Luftdurchlässigkeit wurden an allen Stechzylindern (236cm^3) nach Vorentwässerung auf -60 hPa ($pF\ 1,8$) die Durchflussmengen ermittelt.

Die unbefahrenen Böden haben KI Werte von $2,7 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ bis $7,1 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ in 20 cm und $2,1 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ bis $5,4 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ in 40 cm Tiefe

Abbildung 37 zeigt, dass die KI Werte sowohl in der Tiefe 20 cm als auch in der Tiefe 40 cm generell durch die Befahrung mit dem Snake um 18 bis 81 % abnehmen.

In 20 cm liegt die Abnahme für die Fahrspur bei 18 bis 81%, in 40 cm sind es 56% bis 80% .

Die Befahrung mit dem Forwarder Timberjack 1110 senkte die KI Werte um 35 bis 70% in 20 cm Tiefe während in 40 cm Tiefe die Leitfähigkeit einmal um 44% zunahm und einmal um 66% sank.

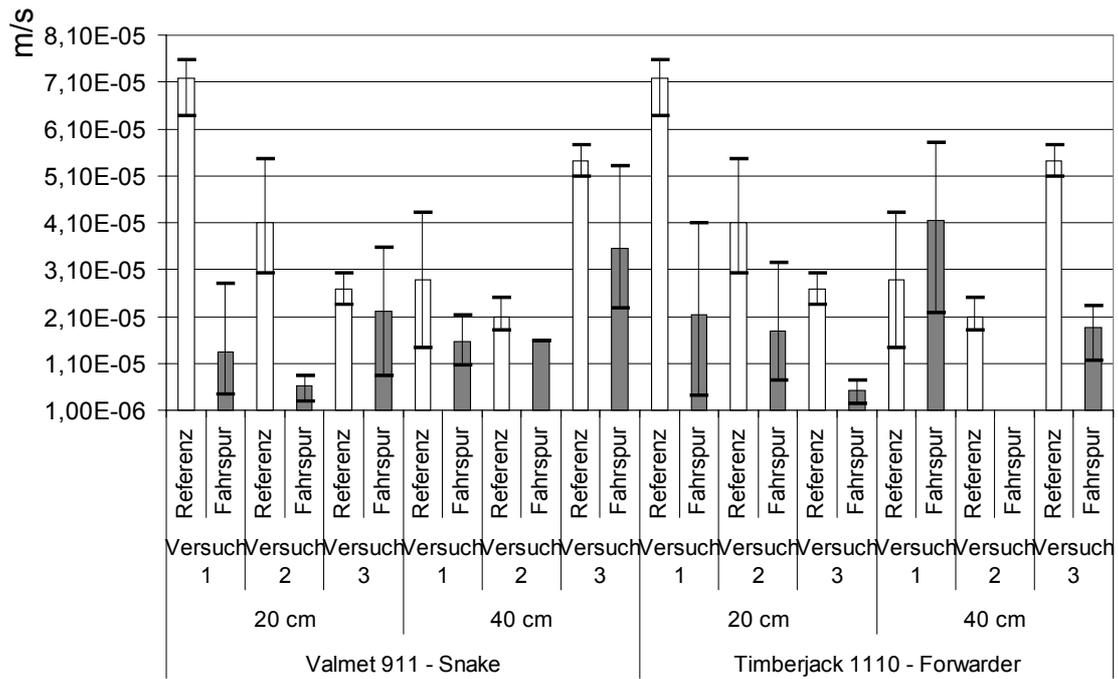


Abbildung 37 Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

3.5.5.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit nimmt unter dem Valmet Snake deutlich ab. Die unbelasteten Böden zeigen Leitfähigkeiten von 400 bis 800 cm/ Tag in 20 cm Tiefe, während die Fahrspuren lediglich 8% bis 44% der ursprünglichen Werte aufweisen (s. Abbildung 38).

Die Abnahme in 40 cm Tiefe fällt mit 45% bis 66% geringer aus, ist aber immer noch bei allen Befahrungsversuchen nachweisbar.

Die Leitfähigkeiten der Referenzböden liegen beim Timberjack 1110 zwischen 380 und 730 cm/Tag in 20 cm und 260 bis 780 cm/Tag in 40 cm Tiefe; in den Fahrspuren sinken sie um 47% bis 88% (20 cm) beziehungsweise um 21% bis 54% (40 cm).

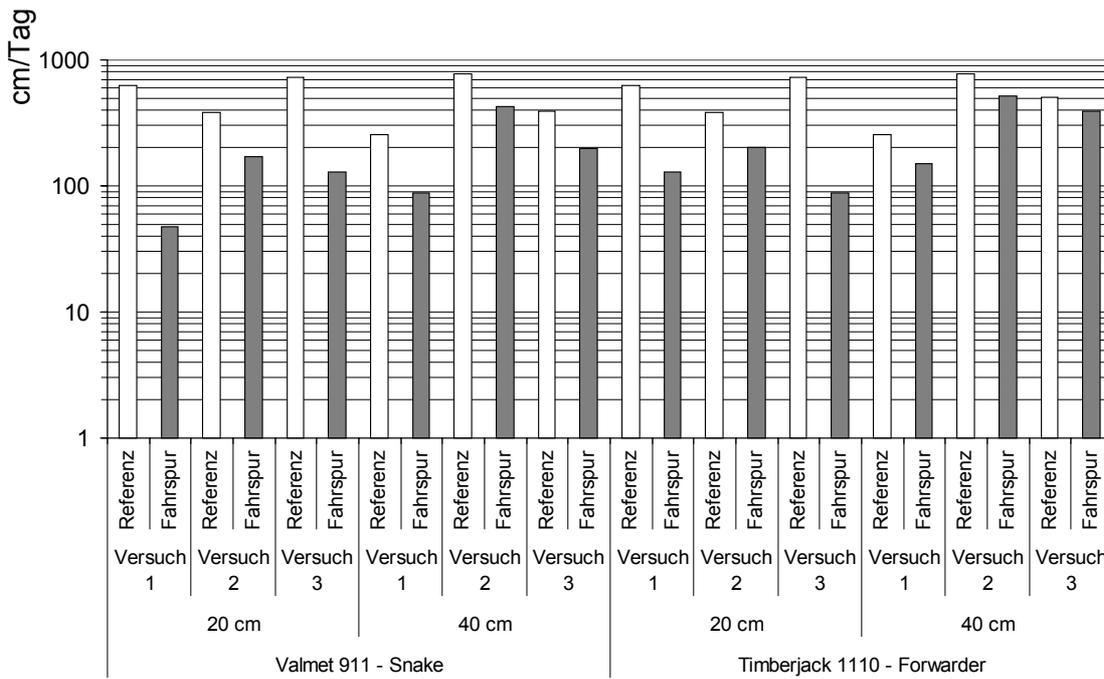


Abbildung 38 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für Valmet 911 „Snake“ und Timberjack 1110 „Forwarder“ in 20 und 40 cm Tiefe

3.6 HSM 904 Forstspezialschlepper – Standort 1

Diese Versuche zur Technikfolgenabschätzung fanden im September und Oktober 2002 im Forstrevier St. Märgen statt.

Zum Einsatz kam der Forstspezialschlepper 904 der Firma HSM. Dieser Spezialrückeschlepper verfügt sowohl über einen Rückekran des Typs Loglift F81 R, als auch über einen Seilauszug mit Klemmbank. Somit konnte das Langholz über den Seilzug beigerückt, oder, wenn nötig, mit Hilfe des Rückekrans manipuliert werden.

Da uns das Fahrzeug zwei mal zur Verfügung stand, wurde in einem weiteren Versuch ein zweiter Standort, welcher durch einen höheren Skelettanteil gekennzeichnet ist (siehe Kapitel 3.7).

Diese Befahrung fand auf vergleichbarem Material wie die vorhergehenden Versuche statt.

Die Versuche fanden in einer Gasse mit vier verschiedenen Standorten statt. Es wurden zwei Abläufe untersucht:

- Eine Überfahrt mit voller Last erfolgte an zwei Standorten. Hierbei wurde im Abstand von rund 10 Metern vom Versuchsstandort das Holz per Seilwinde oder per Kran beigerückt und an der Klemmbank fixiert. Mit dieser Fracht wurde dann die mit Sensoren versehene Rückegasse überfahren.
- Das Beirücken mittels hydraulischer Seilwinde wurde an den zwei weiteren Standorten inklusive der An- und Abfahrt untersucht. Zu Beginn fuhr das Fahrzeug auf die mit Sensoren versehene Standfläche. Im zweiten Schritt wurden unter Zuhilfenahme eines hydraulischen Seilzugs mehrere Stämme an das Fahrzeug gezogen. Der Versuch wurde durch das Verlassen des HSM vom Versuchsstandort beendet, wobei die Vollast hinter dem Fahrzeug her gezogen wurde.

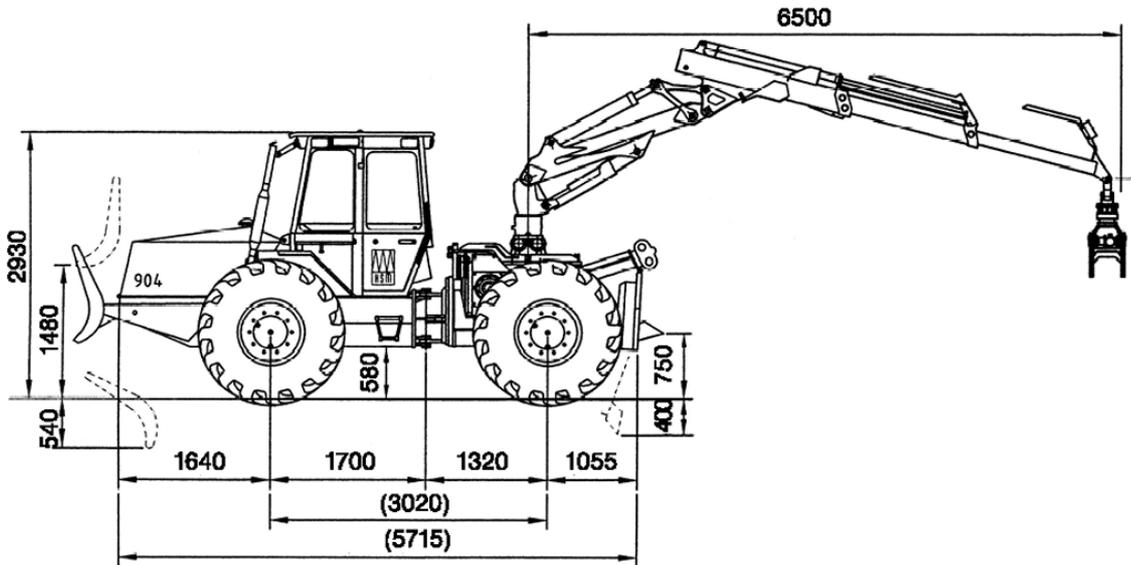


Abbildung 39 Bild des Versuchsfahrzeuges HSM 904 Rückeschlepper (HSM Maschineninformationen 2004)

3.6.1 Kontaktflächendruck

Trotz der geringen Masse des HSM 904 weisen die berechneten Werte für die Kontaktflächendrücke auf hohe zu erwartende Bodenspannungen hin. Der HSM 904 stützt seine 8,71 Mg auf nur 4 Rädern ab. Dies ist das einzige untersuchte Fahrzeug, dass mit nur 2 Achsen auskommt. Auch der Einsatz von Niederdruckreifen lässt die Bodenbeanspruchung nach dem Druckzonenmodell nicht unter 220 kPa fallen. Damit wäre der Bodendruck des HSM 904 rund 4 bis 5 mal so hoch wie der des 30 Mg schweren „Königstigers“.

Tabelle 8 Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke HSM 904

Fahrzeugtyp	Anzahl Ketten / Räder	Ketten / Größe / Luftdruck	Räder Gewicht und in Mg	Kontaktflächendruck [kPa]		
				NGP Modell	Druckzonen- Modell	Druckzonenmodell Niedrigdruckreifen (100 kPa)
HSM 904	4 Räder	600/60-30,5	8,71	49	277	221
Klemmbank- schlepper		250 kPa				

3.6.2 Spannungsmessung

Aufgrund technischer Probleme wurden nur an drei Gruben die Spannungen in 20 cm Tiefe aufgezeichnet. Die Messungen in 40 cm Tiefe mussten aufgrund der hohen

Steingehalte und eines Versagens des Messprogramms auf zwei Gruben begrenzt werden.

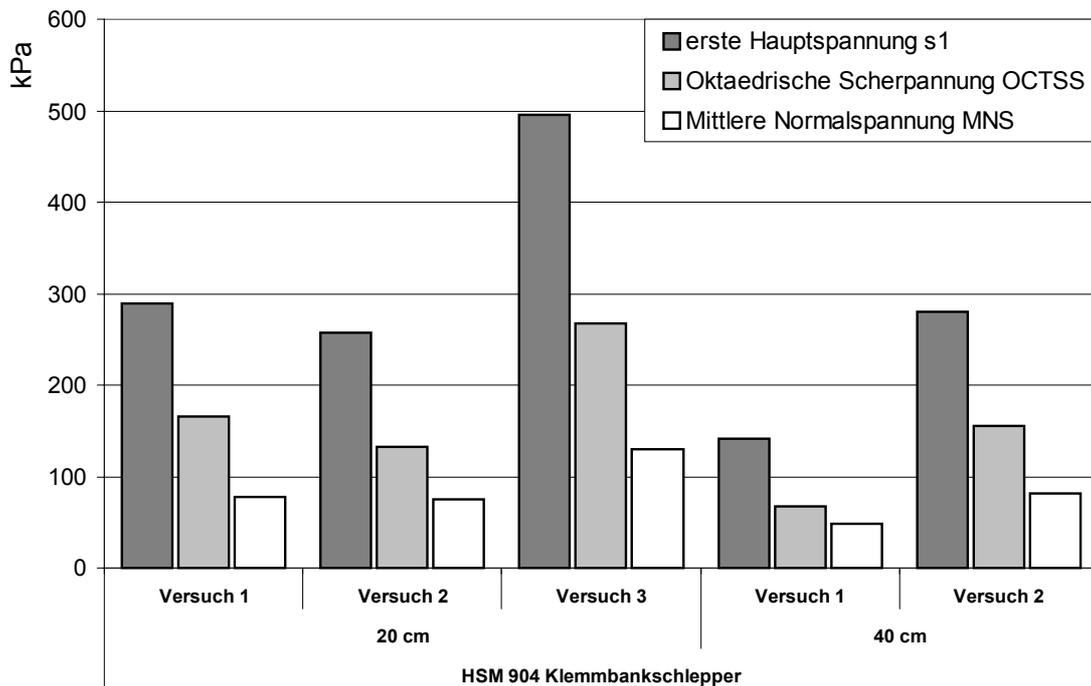


Abbildung 40 Maximale Spannungswerte für den HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1

Die Versuche zeigen den hohen Spannungseintrag in den Bodenkörper (siehe Abbildung 40). Der HSM 904 zeigt im Langholzurückungs- -Versuch maximale Bodenspannungen (σ_1) in 20 cm Tiefe von bis zu 500 kPa. Auch die oktaedrische Scherspannung (OCTSS) und die Mittlere Normalspannung MNS zeigen Werte zum Teil deutlich über 100 kPa.

Ähnliche Ergebnisse aus 40 cm Bodentiefe weisen darauf hin, dass auch dort die Werte für die Vorbelastung überstiegen werden (siehe Kapitel 3.6.4).

3.6.3 Bodendeformation

An drei Standorten konnte der Bodenversatz anhand des DTS ermittelt werden (siehe Abbildung 41).

Die Messungen des Bodenversatzes in 20 cm Tiefe ergaben ein Absenken des Sensorkopfs um 4 und 7 cm. Der Versatz korreliert mit der Ausprägung der Fahrspuren, welche im dritten Versuch auch tiefer waren als während des ersten Versuchs.

Die gemessenen Werte zeigen des Weiteren, dass die Böden sowohl vertikal verschoben als auch verdichtet werden.

Der Versatz in 40 cm Tiefe war im Versuch 2 gering ausgeprägt, betrug aber immer noch 1 cm bei einer Fahrspur von 7 cm.

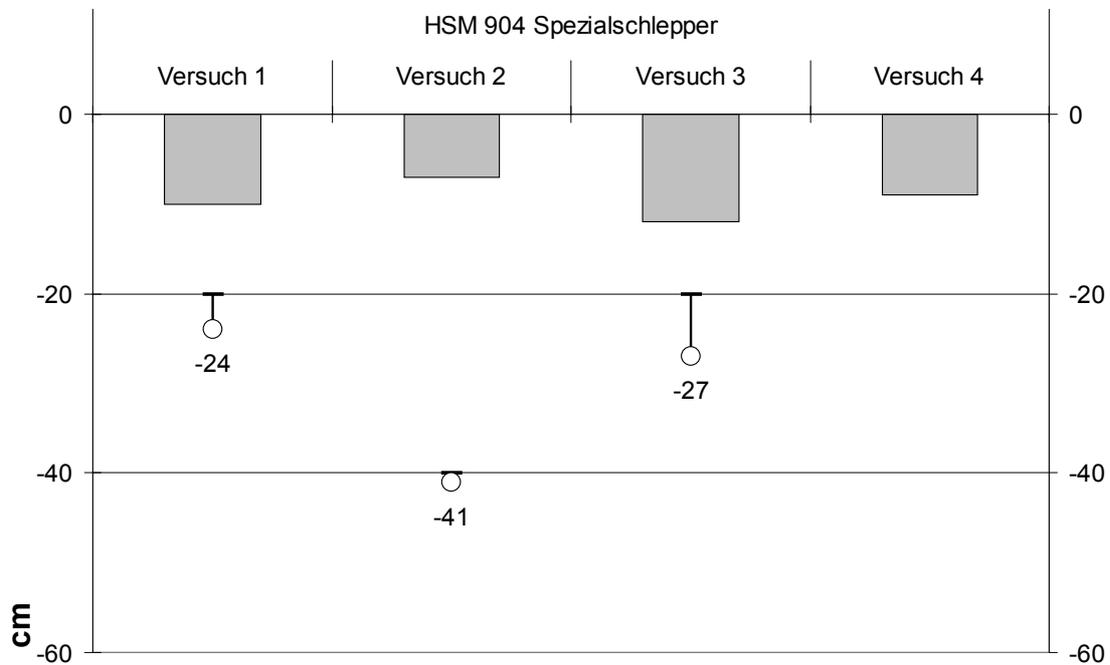


Abbildung 41 Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST-Sensors für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1

3.6.4 Vorbelastung (Pv)

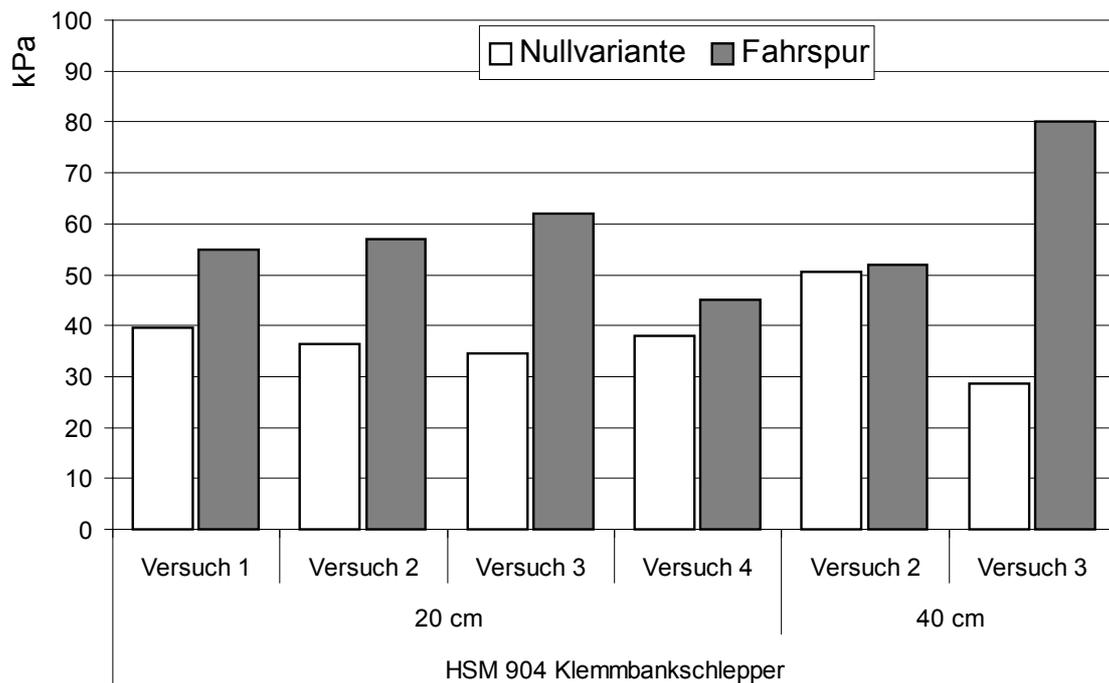


Abbildung 42 Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1

Die natürliche Eigenstabilität der Waldböden im Versuchsareal lag in 20 cm Tiefe zwischen 30 und 40 kPa, während die Vorbelastung im Unterboden zwischen knapp 30 und 50 kPa nach einer jeweils einheitlichen Vorentwässerung auf pF 1,8 (-60hPa) lag.

Die Befahrungsversuche haben die Vorbelastungswerte deutlich erhöht, im Oberboden stiegen die Vorbelastungen um 18 bis 79%, während sich die Vorbelastung im Unterboden in einem Versuch mit einem Anstieg von 180% fast verdreifacht.

3.6.5 Leitfähigkeiten

3.6.5.1 Luftleitfähigkeit (KI)

Die Luftleitfähigkeitsbeiwerte nach Vorentwässerung auf - 60 hPa zeigen im Vergleich zu den weiteren Freilandversuchen ein leicht heterogeneres Ergebnis (siehe Abbildung 43). In der Summe ist aber auch hier der Trend eindeutig: eine Veränderung der Luftleitfähigkeit erfolgt bis in Tiefen über 40 cm.

In 20 cm Tiefe war die Abnahme durch die Befahrung durchweg hoch, sie betrug zwischen 45 und 92%.

Die tieferen Bodeneinheiten wurden durch die Befahrung weniger stark beeinträchtigt. Während im zweiten Versuch die Abnahme noch bei 80 % lag, war diese im ersten mit 25% vergleichsweise gering.

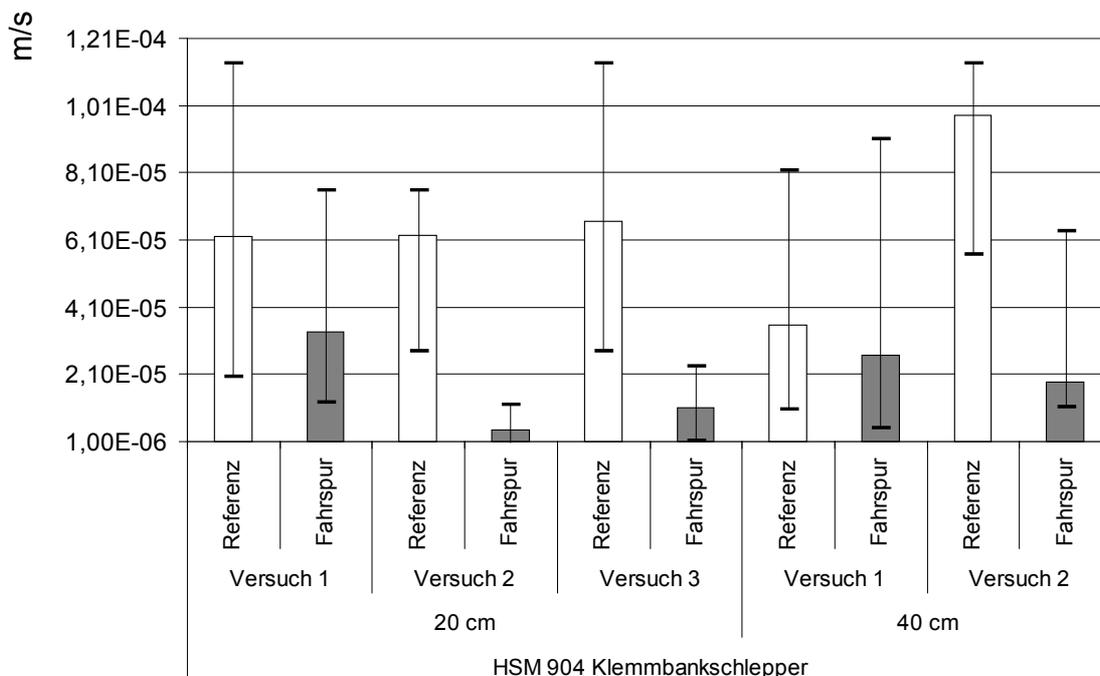


Abbildung 43 Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1

3.6.5.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)

Die Abbildung 44 zeigt die Wasserleitfähigkeitsänderungen nach der Befahrung mit dem HSM Forstspezialschlepper 904.

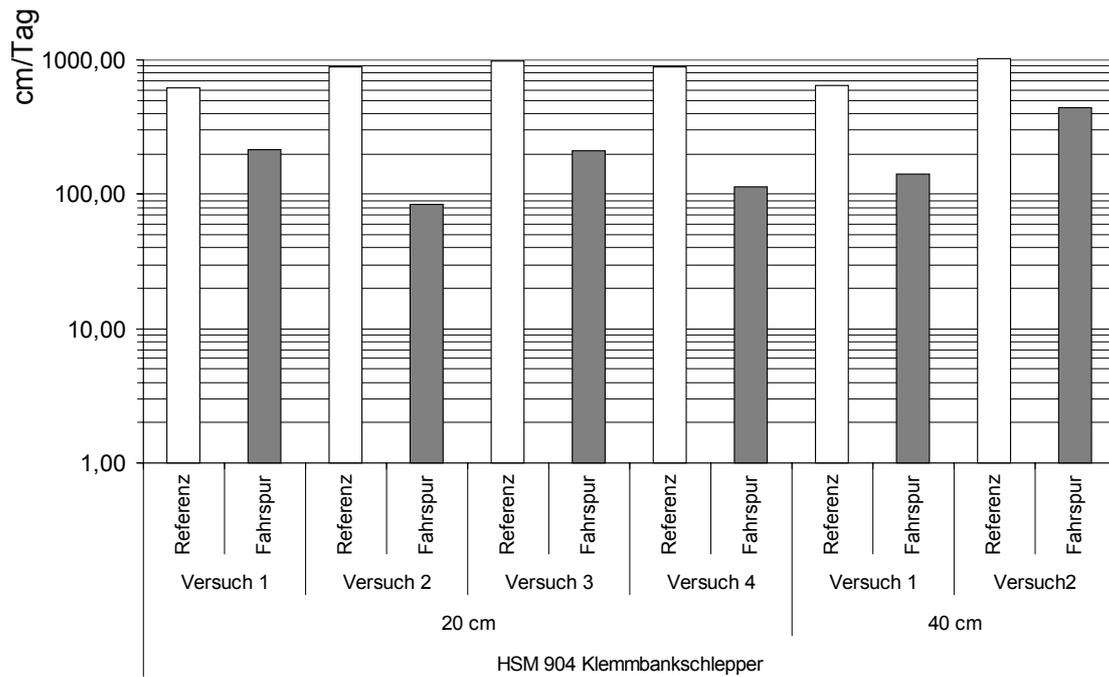


Abbildung 44 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 1

Die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit liegen bei den unbefahrenen Oberböden zwischen 621 und 975 cm/Tag, während sie durch die Rücketätigkeit um 65 bis 91% fielen.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich im Unterboden. Hier lagen die Werte bei den unbefahrenen Standorten ähnlich hoch wie Oberboden. Durch die Befahrung sanken sie um 57 bis 78%.

3.7 HSM 904 Forstspeziialschlepper – Standort 2

Der letzte Versuch zur Technikfolgenabschätzung fand im Oktober 2002 im Forstrevier St. Märgen statt. Zum Einsatz kam wieder der Forstspeziialschlepper 904 der Firma HSM.

In diesem Versuch wurden typische Arbeitseinsätze, analog zum ersten HSM Großversuch, analysiert. Zum einen wurde das Beirücken mittels hydraulischer Seilwinde aufgezeichnet, zum anderen die Überfahrt mit voller Last untersucht.

Im Gegensatz zum ersten Großversuch mit dem HSM 904 wurde diesmal Langholz an einem Standort mit höheren Grusanteil gerückt; der Steingehalt betrug hier 25 bis 35%.

Der Versuch wurde in einer aufgeschlagenen Gasse durchgeführt, in welcher vier Versuchsstandorte festgelegt wurden. Es wurden zwei typische Abläufe untersucht:

In zwei Versuchen wurde das Beirücken mittels hydraulischer Seilwinde inklusive der An- und Abfahrt aufgezeichnet. Hierbei fuhr das Fahrzeug zu Beginn auf die mit Sensoren versehene Standfläche. Im zweiten Schritt wurden unter Zuhilfenahme eines hydraulischen Seilzugs mehrere Stämme an das Fahrzeug gezogen. Der Versuch wurde durch das Verlassen des HSM vom Versuchsstandort beendet, wobei die Volllast hinter dem Fahrzeug her gezogen wurde.

In den anderen zwei Versuchen erfolgte jeweils eine Überfahrt mit voller Last. Hier wurde im Abstand von rund 10 Metern vom Versuchsstandort das Holz per Seilwinde oder per Kran beigerückt und an der Klemmbank fixiert. Mit dieser Fracht wurde dann die mit Sensoren versehene Rückegasse überfahren.



Abbildung 45 Bild des Versuchsfahrzeuges HSM 904 bei der Überfahrt über den Versuchsstandort 2

3.7.1 Kontaktflächendruck

Die Fahrzeugspezifikationen des HSM 904 entsprechen denen aus dem vorhergehenden Großversuch. Bereits durch die Berechnung der Kontaktflächendrücke sind hohe Bodenspannungen zu vermuten. Bei den Kontaktflächendrücken (nach dem NGP – Verfahren) ist mit Werten von 50 kPa zu rechnen, während das Druckzonenmodell maximale Drücke bis 280 kPa vorhersagt. Auch der Einsatz von Niederdruckreifen lässt die Bodenbeanspruchung nach dem Druckzonenmodell nicht unter 220 kPa fallen.

Tabelle 9 Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke HSM 904

Fahrzeugtyp	Anzahl Ketten / Räder	Ketten / Größe und Räder /Luftdruck	Gewicht in Mg	Kontaktflächendruck [kPa]		
				NGP	Druckzonen-Modell	Druckzonenmodell Niederdruckreifen (100 kPa)
HSM 904 Klemmbank-schlepper	4 Räder	600/60-30,5 kPa	2508,71	49	277	221

3.7.2 Spannungsmessung

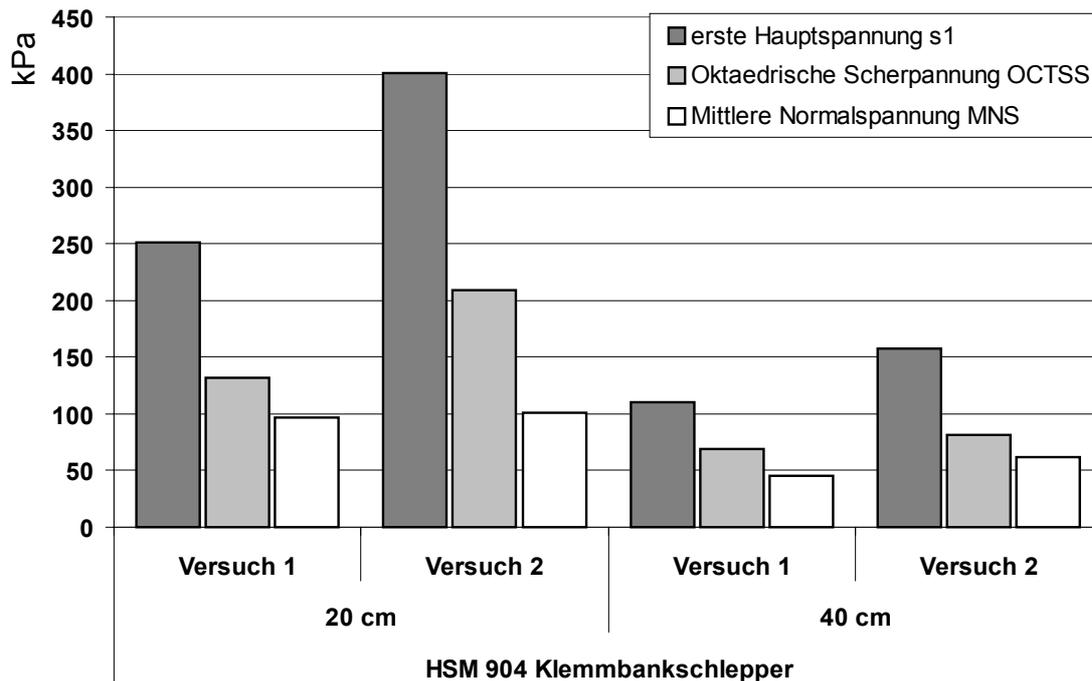


Abbildung 46 Maximale Spannungswerte für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe

Aufgrund der hohen Steingehalte und der Witterung konnten nur zwei Gruben mit dem DTS/SST-System ausgerüstet werden.

Die Spannungsmaxima im Oberboden sind ähnlich hoch wie die des vorangegangenen HSM-Versuchs. Im ersten Versuch werden für σ_1 250 kPa erreicht, beim zweiten sind es rund 400 kPa. Auch die Werte für die Scherspannung OCTSS und die mittlere Normalspannung MNS liegen über den zu erwartenden Vorbelastungswerten (siehe Kapitel 3.7.4).

Die Belastungen in 40 cm Tiefe sind ebenfalls hoch genug, um die Vorbelastung zu übersteigen, die erste Hauptspannung erreicht in einem Versuch mehr als 150 kPa.

Der sehr hohe Steingehalt dieses Standorts wirkt sich nicht abstützend auf das Bodengefüge aus. Die Spannungen in 20 und 40 cm Tiefe verhalten sich ähnlich denen früherer Versuche.

3.7.3 Bodendeformation

Durch die beschränkten Rahmenbedingungen konnten nur bei zwei Gruben die Deformationen anhand des DTS ermittelt werden (siehe Abbildung 47).

Während des ersten Versuchs wurde der Sensor aus einer Ausgangstiefe von 20 cm 6cm vertikal versetzt. Bei einer Fahrspurtiefe von 11 cm bedeutete dies, dass in 20 cm Tiefe der Boden sowohl vertikal versetzt als auch verdichtet wurde.

Die Fahrspur war im zweiten Versuch etwas ausgeprägter, der Versatz des Bodens auch noch in 40 cm Tiefe deutlich nachweisbar.

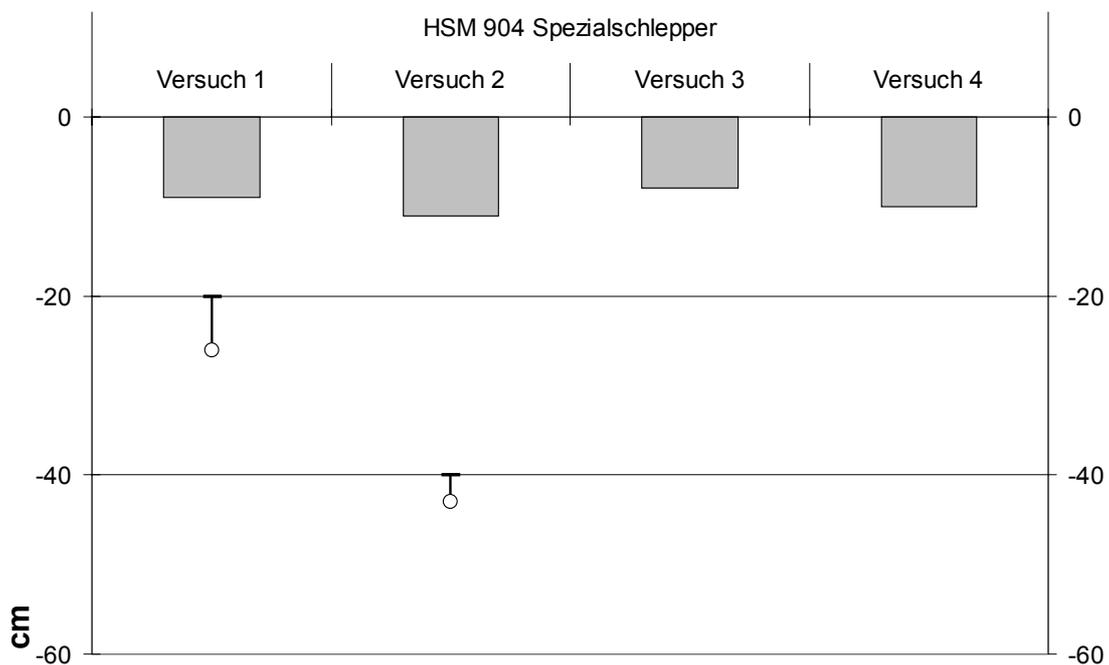


Abbildung 47 Fahrspurtiefe und vertikaler Versatz des SST-Sensors für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe

3.7.4 Vorbelastung (Pv)

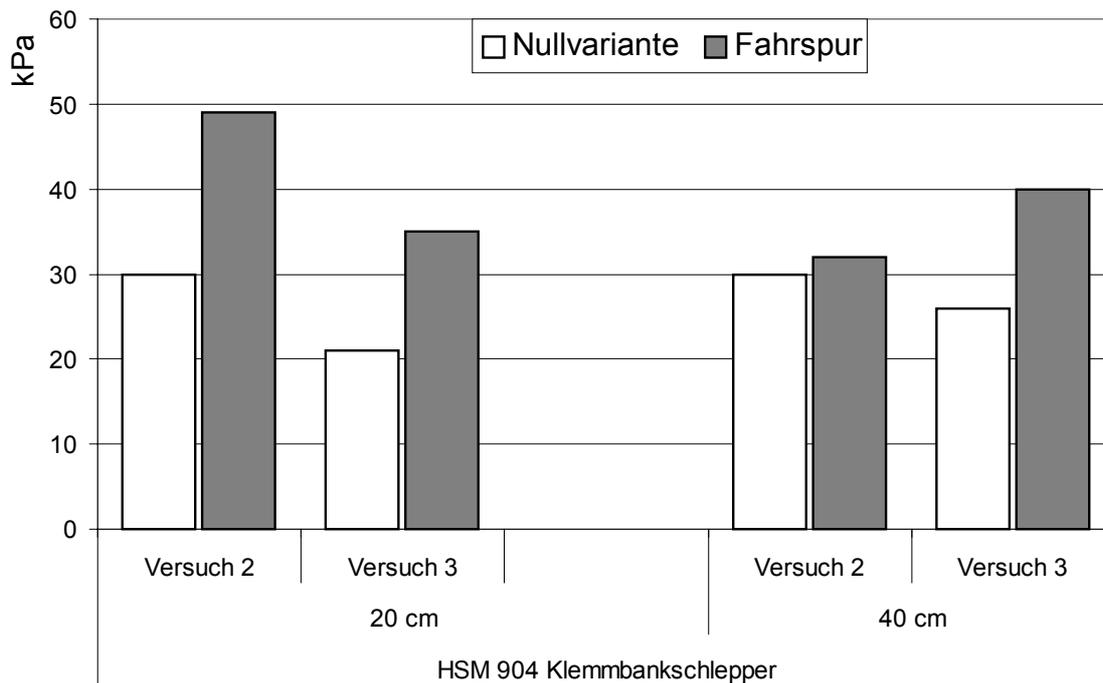


Abbildung 48 Vorbelastungswerte der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 2

Die Waldböden im Versuchsareal weisen eine Eigenstabilität von nur 20 bis 30 kPa auf. Hiermit unterscheiden sie sich nicht nennenswert von den anderen untersuchten Standorten, der hohe Steingehalt wirkt sich auch hier nicht aus.

Die Fahrspuren hingegen zeigen zwar erhöhte Vorbelastungswerte, im Oberboden stiegen sie um 50 bis 66% an; sie liegen aber unter den für die anderen Standorte in Fahrspuren ermittelten Werten. Dies könnte durch eine erhöhte Stabilität der Böden durch den hohen Skelettanteil begründet werden, wobei die sich als sehr schwierig gestaltete Probennahme, welche eine möglicherweise beeinträchtigte Probenqualität zur Folge haben könnte, zu berücksichtigen ist.

Die Vorbelastungswerte in 40 cm Tiefe sind ebenfalls nicht in dem gleichen Maße gestiegen, wie sie dies in vorhergehenden Versuchen getan haben. Auch hier ist der hohe Steingehalt zu diskutieren.

3.7.5 Leitfähigkeiten

3.7.5.1 Luftleitfähigkeit (KI)

Der Luftleitfähigkeitsbeiwert KI und seine Änderungen durch die Befahrung mit dem HSM 904 sind in Abbildung 49 dargestellt.

Die Befahrung führte zu nicht ganz einheitlichen Ergebnissen. Bei den Versuchen 2 bis 4 nahm der KI-Wert in 20 cm Tiefe um 38 bis 91% ab, während er im ersten Versuch quasi unverändert blieb.

Auch die Leitfähigkeiten in 40 cm Tiefe lieferten keine einheitlichen Ergebnisse, in den Versuchen 1 und 3 nahmen sie um 49 beziehungsweise 33% ab, während sie im 4. Versuch um 2% zunahm.

Auch hier kann die sehr schwierige Probennahme ein Grund für diese Ausreißer sein.

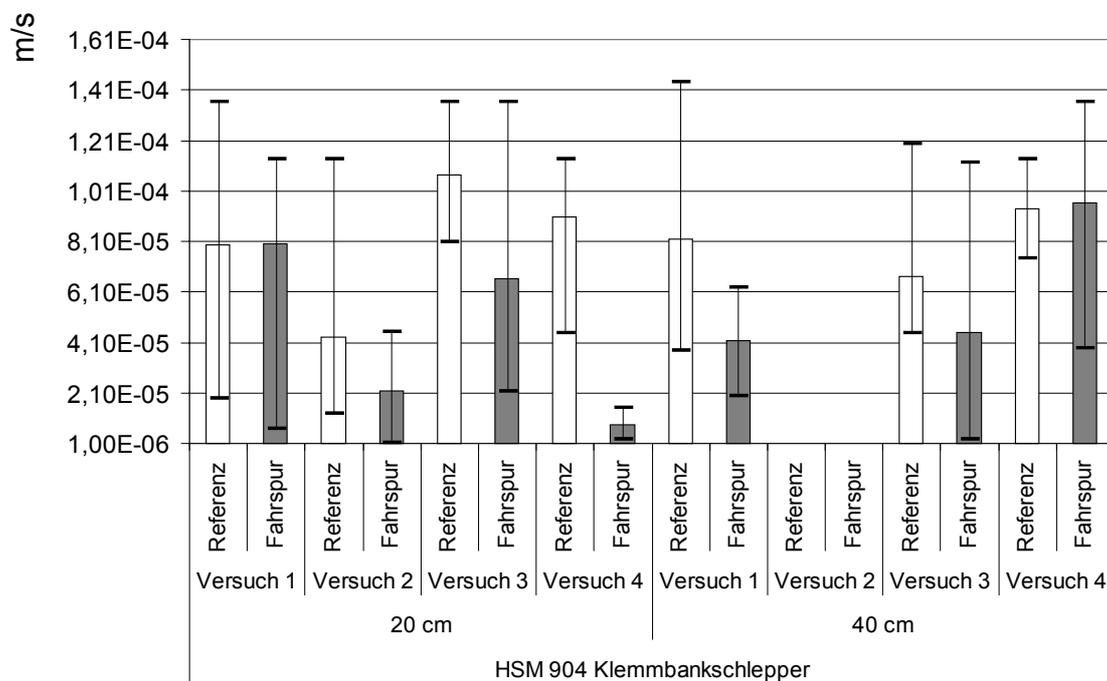


Abbildung 49 Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 2

3.7.5.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)

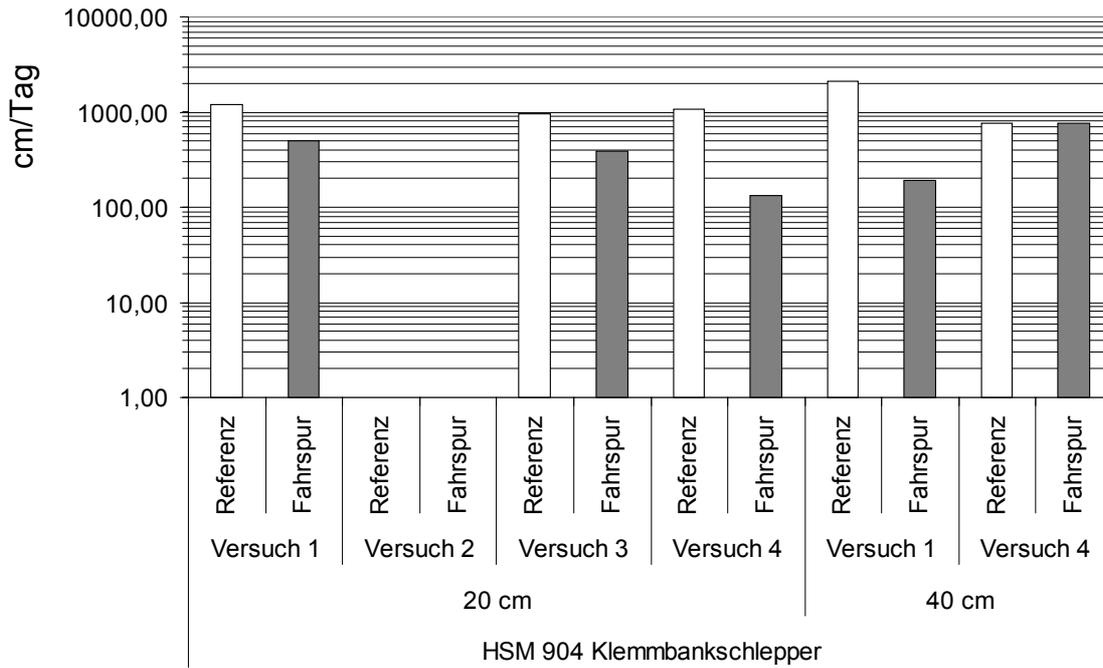


Abbildung 50 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Standorte (Nullvarianten) und der Fahrspuren für HSM 904 in 20 und 40 cm Tiefe, Standort 2

Die Änderungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit nach der Befahrung mit dem HSM Forstspezialschlepper 904 sind in Abbildung 44 dargestellt.

Die Änderung im Oberboden betrug zwischen 58 und 87%. Im Unterboden war das Bild weniger eindeutig, die Abnahme in Versuch 1 betrug 91%, während der kf-Wert für den zweiten Versuch quasi unverändert geblieben ist.

4 DISKUSSION

Der bodenschonende Einsatz von Waldmaschinen ist ein ökonomisches (Elonen 2002), ökologisches (Hildebrand 2002) und politisches Ziel (Richtlinie Feinerschließung 2003, Töpfer 2002) bei der Erschließung und Bewirtschaftung von Wirtschaftswäldern.

Um die Frage der Nachhaltigkeit verschiedener Ernte- und Rückesysteme besser beantworten zu können, wurden im Forstbezirk St. Märgen verschiedene, aus der forstlichen Praxis stammende Systeme untersucht.

Zudem wurden gängige Modelle zur Bewertung der entstehenden Bodendrücke durch die Fahrzeuge aufgegriffen und mit den Ergebnissen aus der Praxis ins Verhältnis gesetzt.

4.1 Maschinen und Methoden der forstlichen Praxis; Risikoabschätzung und Bewertung der ökologischen Folgen

4.1.1 Modelle zur Bodendruckberechnung und ihre Relevanz für die forstliche Praxis

Tabelle 10 zeigt die nach den beiden Verfahren Nominal Ground Pressure (NGP) (in Saarihahti. 2002) und dem Druckzonenmodell nach Ziesak und Matthies (2001) ermittelten Kontaktflächendrücke.

Tabelle 10 Fahrzeugdaten und Kontaktflächendrücke verschiedener Ernte- und Rückefahrzeuge

Fahrzeugtyp	Anzahl Ketten /	Ketten / Räder Größe und	Masse in Mg	Kontaktflächendruck [kPa]		
				NGP	Druckzonen	Druckzonenmodell, Niederdruckreifen
IMPEX 1650 "Königstiger"	2 Ketten	600 mm Breite	30	631	63 ¹	63 ¹
Kettenharvester IMPEX 1880 "Hannibal"	2 Ketten	4000 mm Länge 600 mm Breite	45	82 ¹	82 ¹	82 ¹
Kettenharvester Valmet 911 "Snake"	4 Ketten	4600 mm Länge 500 mm Breite	20	40 ¹	40 ¹	40 ¹
Kettenharvester Caterpillar 580	4/2 Räder	2500 mm Länge 600/55-26,5 (vorne)	17,5	65 ² /61 ³	221 ² /121 ³	181 ² /98 ³
Radharvester HSM 904	vorne/hinten 4 Räder	700/55-34 (hinten) 600/60 – 30,5	8,71	49	277	217
Klemmbank- schlepper Timberjack 810	8 Räder	250 kPa 600/50 – 22,5	10	35	167	136
Radforwarder Timberjack 1110	8 Räder	200 kPa 700/50 – 26,5	12	39	187	157
Radforwarder		200 kPa				
Rückepferd Schwarzwälder			0,65	130/130 ⁴ 77 ⁵ /180 ⁶	130/130 ⁴ 77 ⁵ /180 ⁶	130/130 ⁴ 77 ⁵ /180 ⁶

¹ Kontaktflächendrücke für Kettenfahrzeuge = Gesamtgewicht/Aufstandsfläche

² Vorderrad ³ Hinterrad

⁴ Lastverteilung der Hufe vorne / hinten 50%/50%

⁵ Lastverteilung der Hufe vorne 30%, ⁶ Lastverteilung der Hufe hinten 70%

Die modellierten Werte für den Nominal Ground Pressure überschreitet, bei den untersuchten Waldfahrzeugen, nicht den Wert von 65 kPa. Würde dies den tatsächlichen Bodendrücken entsprechen, dann müssten Befahrungen auf Böden mit Eigenstabilitäten > 65 kPa ohne Schäden möglich sein (Hartge und Horn 1999).

Die Werte nach Ziesak und Matthies (2001) liegen bei den untersuchten Maschinenkonfigurationen zwischen 167 kPa für den Timberjack 810 und 277 kPa für den HSM 904. Auf der Grundlage dieser Berechnungen sind die auftretenden Kontaktflächendrücke deutlich höher als die natürlichen Eigenstabilitäten unbefahrener Böden. Hiernach sind Schädigungen durch Befahrung für fast alle Böden anzunehmen (siehe Kapitel 4.1.4).

Die mit dem SST gemessenen Spannungswerte korrelieren deutlich stärker mit dem Druckzonenmodell von Ziesak und Matthies (2001) als mit dem des NGP, auch wenn

keines dieser Modelle in der Lage ist, die dynamischen Vorgänge abzubilden. Außerdem ist keines der Modelle in der Lage, die durch dynamische Belastungen induzierten Änderungen der Porenstruktur und –funktion zu berücksichtigen bzw. zumindest abzuschätzen. Nur wenn man ausschließlich eine grobe Einschätzung der auftretenden statischen Kontaktflächendrücke erhalten will, scheint das Druckzonenmodell brauchbar.

Der Einfluss der Faktoren Reifenparameter und Innendruck wird aus dem Vergleich Caterpillar 580 und HSM 904 deutlich. Während bei der NGP-Modellierung ein höherer Bodendruck für den Caterpillar Harvester vorhergesagt wird, berechnet das Druckzonenmodell für den HSM Schlepper höhere Werte.

Ein weiterer Anhaltspunkt für bodenschonendere Befahrung sind die kalkulierten Kontaktflächendrücke für Niederdruckreifen. Wenn man dem Grundgedanken folgt, dass ein niedrigerer Reifeninnendruck, bei gleichzeitig vergrößerter Kontaktfläche, positiv für die Bodenpfleglichkeit ist, dann könnte eine Absenkung der Reifeninnendrücke auf 100 kPa zu einer Reduzierung der Bodendrücke des CAT 580 um rund 45% führen. Das Druckminderpotential für den HSM 904 betrüge danach immerhin 21%, während bei den Timberjack Forwardern eine Absenkung der statischen Belastungen von 16 bis 19% zu erreichen wären.

Aber auch die Vorhersagen für die Niederdruckreifen lassen eine bodenschonende Befahrung nicht realistisch erscheinen.

4.1.2 Spannungseinträge durch Waldmaschinen

Die Möglichkeiten zum nachhaltigen Einsatz von Fahrzeugtypen sind je nach Maschinentyp unterschiedlich zu bewerten. Ein Vergleich der Spannungseinträge kann als Grundlage für eine differenzierte Bewertung über die bodenökologischen Folgen der Systeme dienen.

Hierbei wird unterschieden zwischen den Auswirkungen der verschiedenen Vollerntern und den Rücke- und Transportmethoden.

Aus den zeitlich aufgelösten Spannungseintragungen in die Böden während einer Holzernte unter den verschiedenen Maschinensystemen wurden die jeweiligen Spannungsmaxima ermittelt.

In Abbildung 51 sind die höchsten, mittels des SST Systems in 20 cm Tiefe, gemessenen Werte für die erste vertikale Hauptspannung (σ_1), die, als arithmetisches Mittel der ersten drei Hauptspannungen berechnete, mittlere Normalspannung (MNS) und, die Scherkräfte im Boden abbildende, oktaedrische Scherspannung (OCTSS) dargestellt.

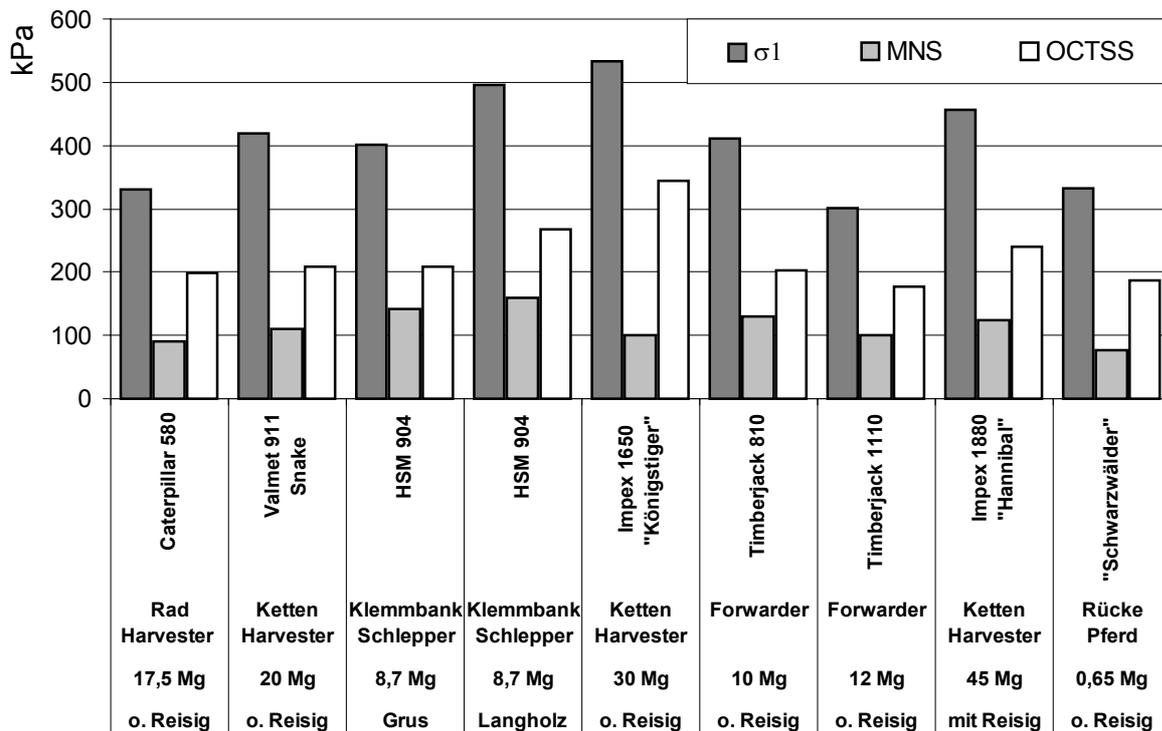


Abbildung 51 Maximale Spannungswerte von σ_1 , MNS und OCTSS bei allen Befahrungsversuchen in 20 cm Tiefe

Der Vergleich der im Verlauf der Untersuchungen analysierten Erntegeräte zeigt große Unterschiede zwischen den einzelnen Maschinen. Die höchsten Spannungen

wurden von den schweren Kettenfahrzeugen erzeugt, wobei der Impex 1650 bei der Ernte ohne Reisig eine vertikale Hauptspannung von über 500 kPa verursachte.

Der noch schwerere Impex 1880 „Hannibal“ verursachte, trotz einer mindestens 50 cm mächtigen Reisigmatte, immer noch σ_1 Werte von über 450 kPa.

Im Vergleich zu den beiden Impex Modellen verursacht der Valmet „Snake“ die geringsten Spannungseinträge aller Kettenharvester. Sein Systemgewicht ist aber, verglichen mit dem „Hannibal“ auch gering, er wiegt weniger als die Hälfte.

Der Caterpillar 580 ist der leichteste Vollernter und zudem der einzige Rad-basierte in den Untersuchungsreihen. Er verursachte in den Versuchen die niedrigsten Spannungseinträge aller Harvester.

Unter den Rückefahrzeugen war der Trend umgekehrt. Das leichteste Fahrzeug, der HSM 904, erzeugte die höchsten Bodenspannungen, wohingegen das schwerste Rückefahrzeug, der Timberjack 1110, die geringsten Bodenspannungen verursachte. Dies belegt, dass die Bodenbelastung sich nicht nur über die Systemgesamtwichte, sondern vor allem über die konkreten Lastabstützungen definiert. Der HSM 904 stützt die Gesamtlast nur über vier statt, wie bei den Forwardern, über acht Räder ab.

Bei den Messungen unter dem Huf eines, Stämme ziehenden Schwarzwälderpferdes wurden, bei allerdings deutlich kleinerer Aufstandsfläche, im Vergleich mit denjenigen unter Maschinen gemessenen Werten deutlich größere Spannungswerte als bei den Maschinen ermittelt. Die sehr kleinen Standflächen der Pferdehufe führen allerdings dazu, dass im Bestand weder lineare noch flächenhafte Zonen mit verdichteten und gestörten Böden entstehen. Somit sind die ökologischen Folgen der Kurzholzurückung mit Rückepferden als minimal einzustufen.

Die Spannungsmaxima in 40 cm Tiefe der verschiedenen Arbeitsgeräte ist in Abbildung 52 dargestellt.

Die Spannungseinträge in den Unterboden sind beim Impex 1880 „Hannibal“ am stärksten. Der leichteste Harvester, der CAT 580, erzeugte zumindest in einem Versuch höhere Spannungsmaxima als die schwereren Valmet „Snake“ und Impex 1650 „Königstiger“. Die Unschärfe über die Vorhersage von Spannungsverteilungen in tieferen Bodenschichten ist vor allem in der Wurzelverteilung begründet. Es kann nie ausgeschlossen werden, dass ein Sensor durch eine Hauptwurzel abgeschirmt wird. So sind, trotz hoher Bodenspannungen in 20 cm, die relativ niedrigen Werte im Unterboden für die letzt genannten Fahrzeuge zu erklären.

Alle für die Harvester gemessenen Spannungen sind aber höher als die natürliche Vorbelastung und führen somit zu plastischen Verformungen des Bodens.

Die Spannungen unter den Forwardern und Rückefahrzeugen sind in ihrer Dimension ähnlich verteilt wie in 20 cm Tiefe. Der HSM 904 verursachte auch in 40 cm Tiefe die größten Spannungsmaxima, der Timberjack 1110, obwohl der schwerste untersuchte Forwarder, zeigte die geringsten Werte während der Ernte.

Für die Kurzholzurückung mit Pferden wurden keine Spannungswerte in 40 cm Tiefe erhoben.

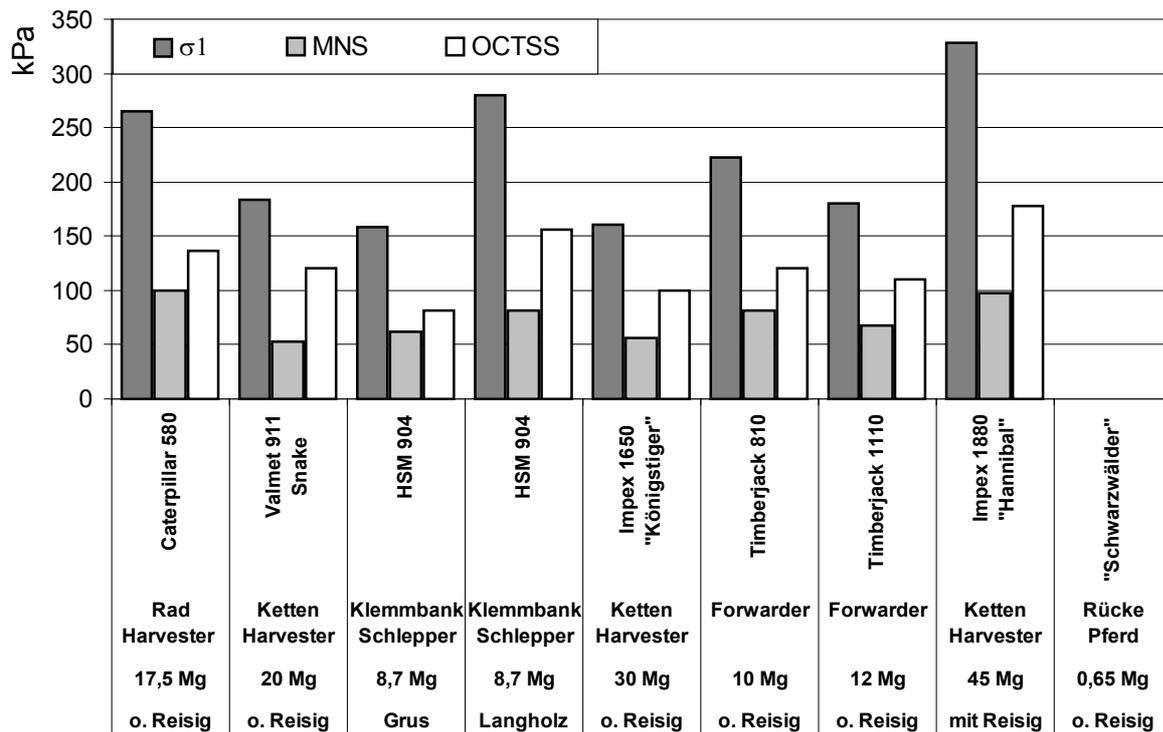


Abbildung 52 Maximale Spannungswerte von σ_1 , MNS und OCTSS bei allen Befahrungsversuchen in 40 cm Tiefe

4.1.3 Bodendeformation und –versatz als Folgen der Holzernte und des Transports

Die Auswertung des vertikalen Versatzes der Sensoren sowie der Fahrspuren bei den verschiedenen Befahrungen zeigt, sowohl in der Dimension als auch in der Art der Bodendeformation, Unterschiede für die verschiedenen Erntesysteme.

Die schweren Kettenfahrzeuge zeigten sowohl ausgeprägte Fahrspuren (Abbildung 53) als auch einen hohen Versatz der Sensoren in 20 cm Tiefe. Der Boden wird vertikal intensiv verschoben, aber im Oberbodenbereich vergleichsweise wenig komprimiert. Die Forwarder hingegen rufen eine deutlich stärkere Kompression des Oberbodens mit geringem Versatz des Sensors hervor.

Der erste Hannibalversuch wurde ohne eine schützende Reisigmatte durchgeführt, die weiteren zwei mit einer solchen. Die Reisigmatte dämpfte die Bodendeformation; sowohl die Fahrspuren als auch der Versatz in 20 cm Tiefe waren geringer als in den Versuchen ohne diesen Schutz. Reisigmatten sind somit in der Lage, die auftretenden Spannungen und Deformationen zu mildern, trotzdem rief der Impex1880 unter der Reisigmatte plastische Bodendeformationen hervor, da die Eigenstabilität der Böden durch die einwirkenden Drücke bei weitem überschritten wurde (siehe Kapitel 4.1.4). Zudem müssen für die forstliche Praxis die bei der Nutzung von Reisigmatten zu erwartenden Probleme, wie Eintrag weiterer organischer Substanz in die Oberböden, sowie Haftungsprobleme, verbunden mit größerer Schlupfgefahr für die Fahrzeuge bei fortschreitender Mineralisierung bedacht werden. Eine grundlegende Empfehlung von Reisigmatten kann somit nicht erfolgen.

Alle Fahrzeugvarianten zeigten auch eine Bodenstruktur zerstörende Tiefenwirkung. Alle Befahrungen versetzten das sich ursprünglich in 40 cm Tiefe befindende Bodenpaket weiter nach unten. Die stärksten Deformationen wurden unter dem Impex 1880 sowie unter dem Caterpillar 580 und dem HSM 904 gemessen. Die Timberjack Forwarder zeigten den geringsten Versatz des tiefen Bodensensors. Insgesamt waren die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugtypen allerdings nicht so stark ausgeprägt wie im Oberboden.

Allerdings muss hier die Stichprobenzahl berücksichtigt werden. In der Regel wurde nur bei einer Befahrung der Versatz im Unterboden erfasst. Eine abschließende quantitative Bewertung der Fahrzeuge ist somit nur eingeschränkt möglich.

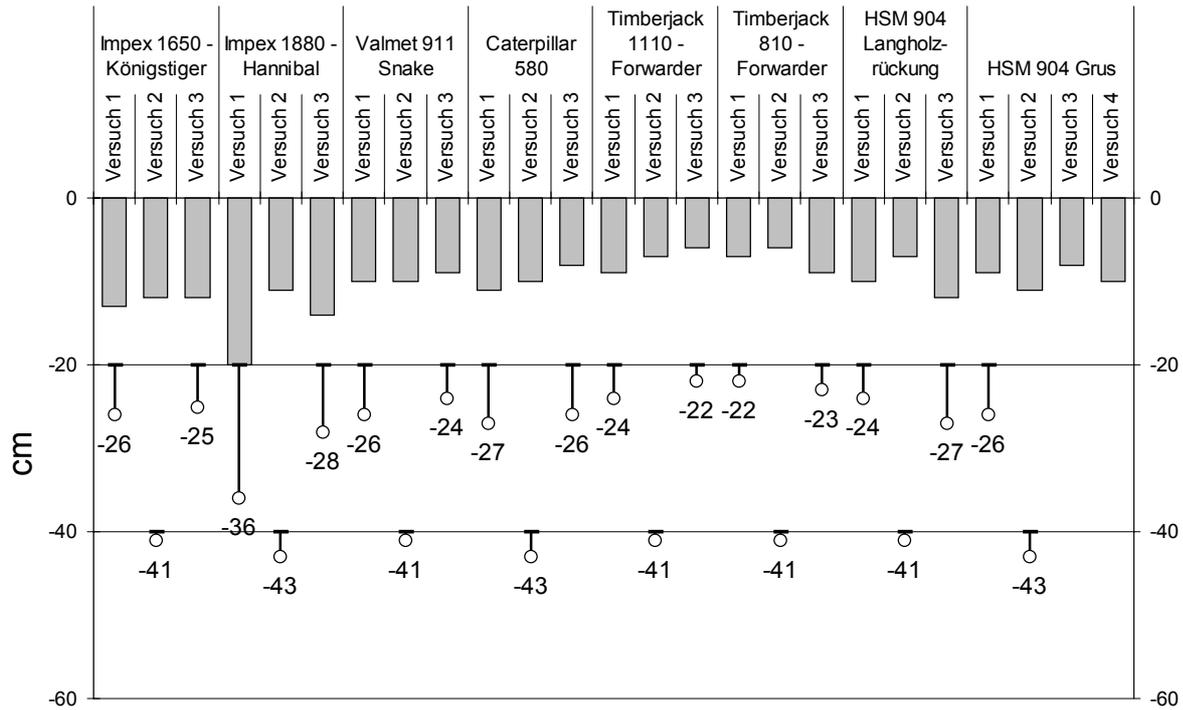


Abbildung 53 Fahrspuren und vertikaler Versatz bei verschiedenen Fahrzeugen, die Werte geben die maximale Tiefe des Sensors während der Befahrung an

Insgesamt sind diese Werte als deutliche Veränderung der natürlichen Bodenstruktur zu werten, zumal wenn man berücksichtigt, dass selbst der weiteste für den Lufthaushalt der Standorte relevante Grobporenquerschnitt mit max. 0.5 mm um Größenordnungen geringer ist. Bereits ein Abscheren von 5mm bedeutet ein Zerstören der präferentiellen Flussbahnen durch Regenwurmgänge oder Aggregatstrukturen. Dies wurde durch alle Fahrzeugtypen, egal ob eine schützende Reisigmatte zum Einsatz kam, verursacht.

4.1.4 Einfluss der Holzernte und des Transports auf die Eigenstabilität

Die Eigenstabilität von Waldböden kann unter anderem mit dem Wert seiner Vorbelastung beschrieben werden. Hierunter versteht man den Auflastbereich, bis zu welchem erneute mechanische Belastungen nicht zu bleibenden Verformungen führen. Eine Überschreitung der Vorbelastung führt zu einer Verdichtung im Erstverdichtungsbereich, es kommt zu einer plastischen Verformung der Böden. Wird der Boden mit Auflasten belastet, die geringer als die Vorbelastung sind, dann reagiert dieser, im Bereich der Wiederverdichtung, elastisch. Bei einer Bodenverdichtung auf dem Wiederverdichtungsast wird die Struktur nicht zerstört, während im Erstverdichtungsbereich die Struktur irreversibel geschädigt wird.

Die aus den Endsetzungswerten der verschiedenen Auflasten des „Multistep-Oedometers“ ermittelten Vorbelastungen (P_v) belegen die von Natur aus geringe mechanische Tragfähigkeit der Waldböden (siehe Abbildung 54). Ein Grund ist in der geringen Lagerungsdichte zu suchen. Die Eigenstabilität der Böden liegt vor der Befahrung generell unter 50 kPa und bedeutet, dass jegliche Belastung des entsprechenden Horizontes mit mehr als 50 kPa zu einer plastischen Verformung führt.

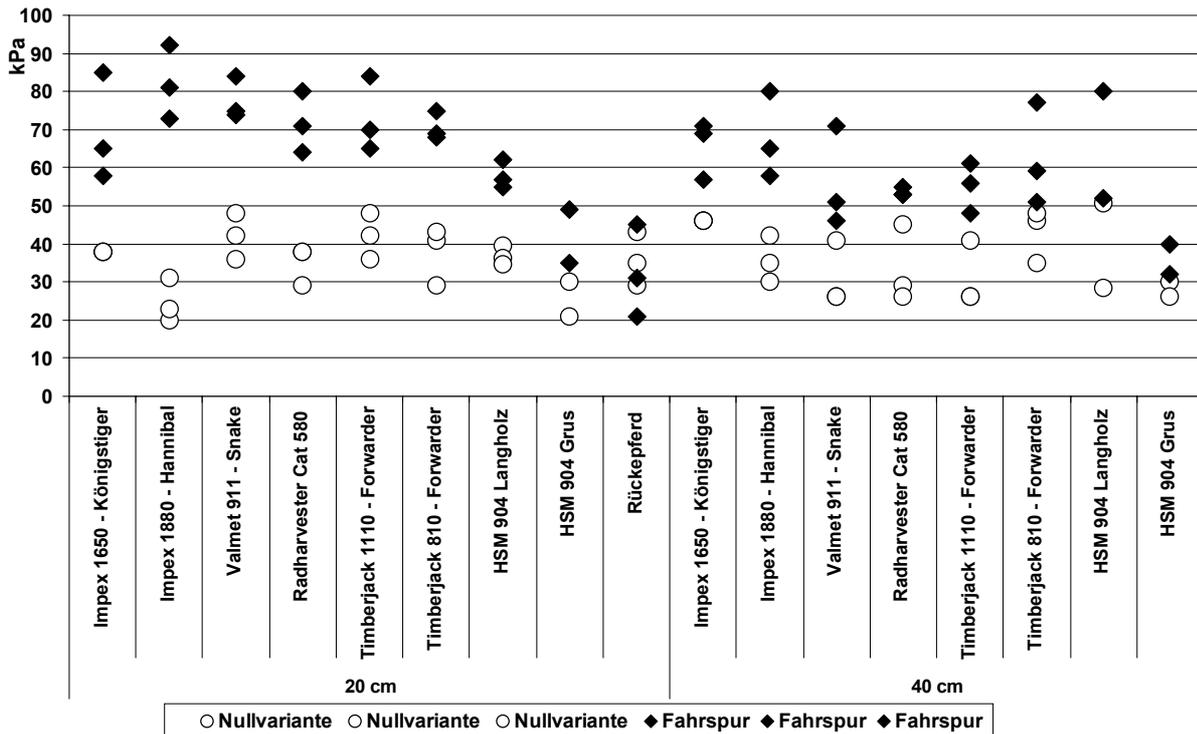


Abbildung 54 Vorbelastungswerte (Pv) der unbefahrenen Flächen (Nullvarianten) und der Fahrspuren verschiedener Befahrungsversuche in 20 und 40 cm Tiefe bei der Vorentwässerung von -60 hPa

Als Folge der Befahrungen/Holzernte steigen die Zahlenwerte entsprechend an und erreichen in 20 cm Tiefe bereits doppelt, zum Teil sogar dreimal so hohe Vorbelastungswerte durch eine einmalige Befahrung.

Ein deutlicher Unterschied zwischen den Befahrungssystemen ist allerdings nicht zu erkennen. Die Vorbelastungswerte in den Fahrspuren der Vollernter liegen in ähnlichen Bereichen. Auch die schwersten Harvester haben keine Werte über 100 kPa verursacht.

Die beiden Timberjackforwarder erhöhen die Pv Werte etwas stärker als die HSM Spezienschlepper. Ein Zusammenhang zwischen den Systemgewichten und der Änderung der Vorbelastung ist nicht erkennbar.

Die Eigenstabilität der Pferderückegasse wurde durch den Einsatz nicht beeinträchtigt. Die hohen Spannungseinträge unmittelbar unter dem Huf führen nicht zu linienhaften Erhöhungen der Vorbelastung. Der Waldboden wird in seiner Funktion nicht beschädigt.

Auch in 40 cm Tiefe kann eine Zunahme der Vorbelastungswerte nachgewiesen werden. Das bodenstützende Feinwurzelwerk kann folglich die Verdichtung durch die

eingesetzte Erntetechnik nicht verhindern. Die Erhöhung der Vorbelastung durch Waldfahrzeuge wurde in allen Versuchen nachgewiesen, unabhängig von der Versuchsorganisation oder den untersuchten Fahrzeugen.

Die Folgen durch die schweren Kettenharvester Impex 1650 und 1880 und des Valmet 911 sind hierbei stärker ausgeprägt als die Zunahme beim Caterpillar 580. Möglicherweise sind die großen Kontaktflächen der Ketten für eine tiefgreifendere Strukturveränderung verantwortlich.

Die Forwarder und Rückefahrzeuge zeigen, bis auf den HSM Versuch auf Grus, eine ähnliche Tendenz. Die Vorbelastung erhöht sich um 50 bis 100%.

Unter der Spur des Rückepferdes wurden keine Eigenstabilitätsbestimmungen in 40 cm Tiefe durchgeführt. Die unveränderten Werte in 20 cm Tiefe lassen nämlich bereits den Schluß zu, dass die Bodenstruktur durch den Einsatz von Schwarzwäldern nicht tiefgründig gestört wird.

In keinem Versuch konnten die hohen Spannungseinträge, welche durch die SST Messungen belegt wurden, nachgezeichnet werden. Obwohl die Spitzen für die erste Hauptspannung σ_1 oft über 400 kPa lagen, sind keine Vorbelastungswerte in diesen Größenordnungen festgestellt worden. Dies steht im Gegensatz zu Messungen in Böden landwirtschaftlicher Nutzung und in unstrukturierten Böden. Hier sind die Korrelationen zwischen maximalem Spannungseintrag und Vorbelastung deutlich besser (Wiermann 1998, Horn et al 2000, Kühner 1997). Mögliche Erklärungen hierfür liefert das feine Wurzelwerk, welches fein verästelt, den Boden dreidimensional durchzieht. Es ist in der Lage, die eingetragenen Spannungen abzuleiten und so den Boden zu stabilisieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Eigenstabilität der Böden aus Schwarzwälder Höhenlehmen (Lockerbraunerden aus stark verwitterten Gneisen und Graniten) nicht groß genug ist, um die Fahrzeuge ohne eine irreversible Bodendeformation zu stützen. Eine Ausnahme stellt lediglich die Kurzholzurückung mit Pferden dar. Hier ist zwar eine Zunahme der Vorbelastung unmittelbar unter den Hufen zu erwarten, in den Rückespuren war diese jedoch nicht erhöht.

4.1.5 Änderungen der Leitfähigkeiten durch die Holzernte und den Transport

4.1.5.1 Luftleitfähigkeitsbeiwert(KI)

Der Luftleitfähigkeitsbeiwert quantifiziert den konvektiven Gasaustausch des Bodens. Besonders im Oberboden wird der Gasaustausch vorrangig über Konvektion induziert, während in größerer Tiefe dann vorrangig diffusive, durch dieses Verfahren nicht erfasste Gasströme von Bedeutung sind. Abbildung 55 zeigt, dass die KI-Werte sowohl in der 20 als auch in 40 cm Tiefe generell durch die Befahrung/Holzernte um 30 und 70 % abnehmen.

Einzelne Werte aus den Fahrspuren, welche in der Punktwolke der Nullvarianten liegen, sind auf die weite Streuung der Grundgesamtheit und durch präferenziellen Fluss an Schrumpfrissen oder Wurzelgängen auftretenden Extrema zurückzuführen. Die Lockerbraunerden haben, bedingt durch ihre geringe Lagerungsdichte, sehr hohe natürliche Luftleitfähigkeitsbeiwerte. Damit kann der für diese Standorte erforderliche Gasaustausch im Oberboden gewährleistet werden. Wenn allerdings bereits durch die einmalige Überfahung diese Werte um bis zu 70 % abnehmen, dann ist dies gleichbedeutend mit einer entsprechend eingeschränkten Sauerstoffversorgung sowohl der Wurzeln als auch der Mikroorganismen bei gleichzeitiger Ableitung des im Boden durch mikrobielle Aktivität und Wurzelatmung gebildeten CO₂.

Die Vollernter sind in ihrer Konsequenz für den KI-Wert ähnlich, sie senken die Luftleitfähigkeit im Oberboden um rund 60% ab. Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Systemgewichte sind nicht zu erkennen.

Die Forwarder und Rückefahrzeuge sind bis auf die Befahrung auf Grus ebenfalls relativ einheitlich, die KI-Werte sinken 40 bis 50%.

Nur das Rückepferd hat keine nachweisbaren Konsequenzen in der Gasse hinterlassen.

In 40 cm Tiefe ist die Abnahme auch überall nachweisbar, jedoch fällt sie deutlich geringer aus als im Oberboden.

Die Harvester unterscheiden sich hier in ihren Konsequenzen. Die beiden Impex senken die KI Werte auf ein ähnlich niedriges Niveau, wie im Oberboden, wohingegen die leichteren Valmet 911 und Caterpillar 580 KI-Werte um die $3 \cdot 10^{-5}$ m/s aufweisen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Luftleitfähigkeit durch die Befahrung massiv geschädigt wird. Alle Versuche haben Abnahmen bis in den Unterboden belegt. In diesem Zusammenhang ist eine bodenschonende Befahrung durch Fahrzeugmodifikationen oder Optimierungen im Ernteablauf als unrealistisch anzusehen. Sensible Substrate werden in jedem Falle durch eine einmalige Befahrung in ihrer Struktur verändert und gestört. Mit Blick auf die zukunftsorientierte Waldwirtschaft soll der Bestand an Mischwäldern weiter ausgebaut werden. Dies erfordert vom Standort Wald einen tiefgründigen Wurzelraum. Aber genau dieser wird durch die Befahrung nachhaltig zerstört.

Die Leitfähigkeitswerte legen einen Totalverlust der Gassenflächen für die Holzproduktion nahe.

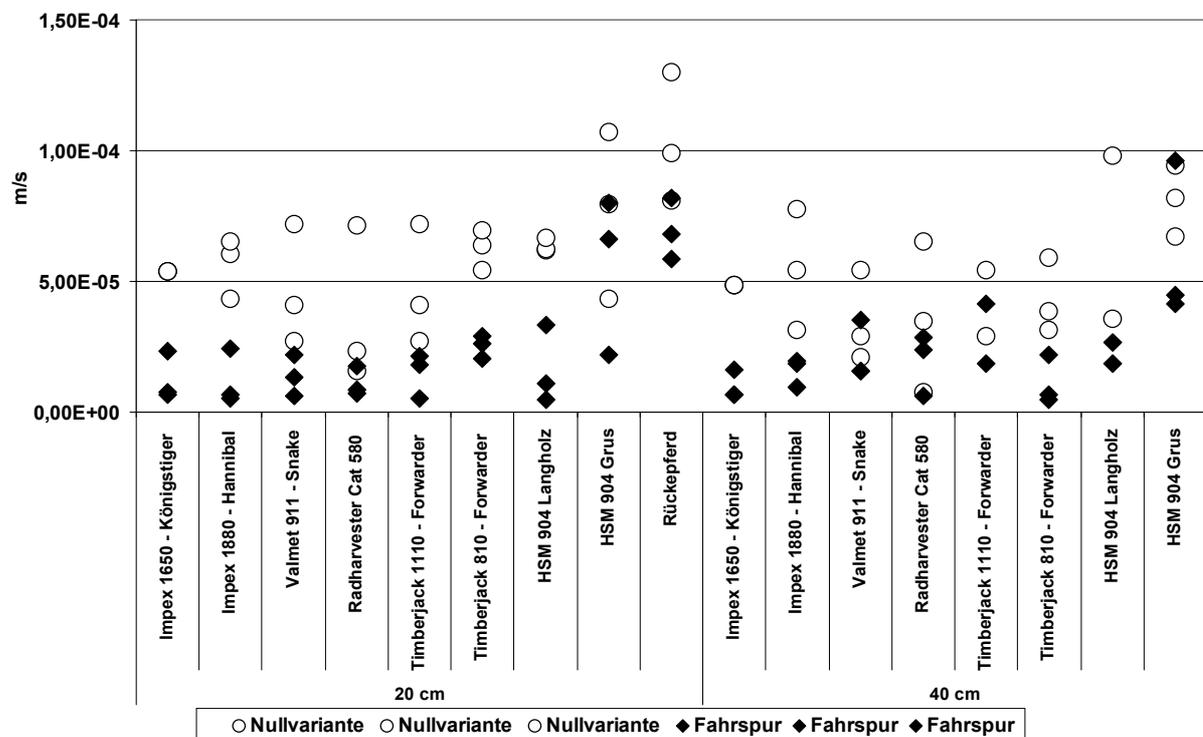


Abbildung 55 Luftleitfähigkeitsbeiwerte (KI) der unbefahrenen Flächen (Nullvarianten) und der Fahrspuren verschiedener Befahrungsversuche in 20 und 40 cm Tiefe bei der Vorentwässerung von -60 hPa

4.1.5.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

Die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit zeigen Abnahmen von bis zu 95 % (s. Abbildung 56).

Während die Werte für die gesättigte Wasserleitfähigkeit in den unbelasteten Böden zwischen 500 und 1000 cm/Tag variieren, sinken sie durch die Befahrung auf Werte zwischen 40 und 250 cm/Tag.

Die Reduktion der Leitfähigkeiten durch die schweren Impex Harvester senken die kf-Werte in 20 cm Tiefe um über 90%.

Die Abnahme bei den leichteren Vollerntern Valmet 911 und CAT 580 fällt, verglichen mit den Impex - Maschinen geringer aus; aber auch hier sinken die Werte um über 70 %.

Die Forwarder und Rückefahrzeuge verhalten sich ähnlich, nur der Timberjack 810 liefert mit Abnahmen in der Größenordnung der schweren Harvester, einen Ausreißer nach unten.

Die Rückung von Kurzholz durch Pferde konnte die kf-Werte nicht beeinflussen. Die Pferderückung zeigt auch hier keine negativen Auswirkungen auf die Standortökologie.

In 40 cm Tiefe ist das Bild ähnlich, die Abnahmen sind aber mit 50 bis 60 % weniger stark ausgeprägt als im Oberboden. Es gibt aber kein Fahrzeug welches keinen Einfluss auf die kf-Werte gehabt hat.

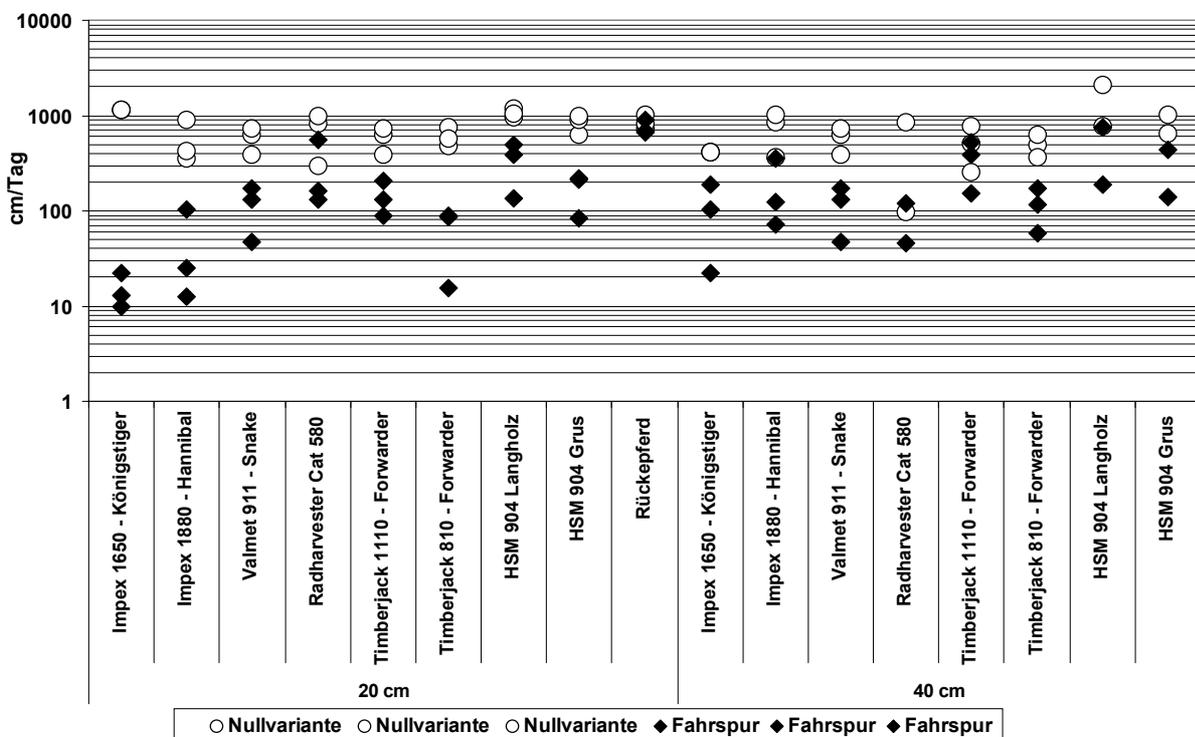


Abbildung 56 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der unbefahrenen Flächen (Nullvarianten) und der Fahrspuren verschiedener Befahrungsversuche in 20 und 40 cm Tiefe bei der Vorentwässerung von -60 hPa

4.2 Zusammenfassende Diskussion

Die Spannungsmessungen, welche im Südschwarzwald mittels des SST-Systems durchgeführt wurden, müssen als wichtiges Instrument für die Beurteilung der Folgen angesehen werden, welche durch den Einsatz von modernen Waldmaschinen entstehen.

Die gängigen Modelle zur Berechnung der Drücke, die auf der Bodenoberfläche, durch Maschinen der forstlichen Praxis, wirken, werden exemplarisch in dieser Arbeit in Form des Nominal Ground Pressure (Mikkonen 1975) und des Druckzonenmodells nach Ziesak und Matthies (2001) beschrieben. Allerdings sind beide Modelle nicht in der Lage, die dynamischen Spannungseinträge in Böden und deren Konsequenz für die Standortqualität aufzuzeigen. Dies ist um so bedeutender, da der NGP sowohl von den *Nordic forestry researchs* (Mikkonen 1975) empfohlen wird, als auch Anwendung beim NOKIAN Renkaat (in Saarilahti 2002) ebenso wie bei Skogforsk (svenska skogsbrukets forskningsinstitut, Forstliche Forschungsanstalt Schweden, in Saarilahti 2002) findet, und somit als ein Standard in der skandinavischen Waldwirtschaft dient. Das Modell des Nominal Ground Pressure hat nicht ansatzweise die gemessenen Bodenspannungen nachzeichnen können, die Werte für den Kontaktflächendruck lagen oft um 80 bis 90% unter den gemessenen Werten für σ_1 in 20 cm Tiefe.

Der Ansatz des Druckzonenmodells ist deutlich parametrisierter und scheint in seiner Ausprägung besser geeignet zu sein als Anhaltspunkt für die auftretenden statischen Drücke.

Eine weitere Verbesserung der Vorhersage für die Bodenschädlichkeit der Befahrung könnte eine Kombination des Druckzonenmodells mit dem ECOMODEL (Saarilathi 2002) sein. Dieses berechnet die Achs- und Radlasten abhängig von der Fahrzeugkonfiguration, der Menge und der Lage der Ladung sowie dem Relief. Somit könnte die Vorhersage für bestimmte Erntesituationen weiter verbessert werden.

Die im Rahmen der Projektkooperation durchgeführten eigenen Spannungsmessungen korrelieren größenordnungsmäßig mit ähnlich gearteten Befahrungen. Hohe, durch die Überfahrung mit leichten bis mittleren Traktoren (2,5 und 4 Mg) verursachte Bodenspannungen, über 250 kPa in 20 cm Tiefe, sind bei Alakukku (2002) beschrieben. Arvidsson (2002) maß bei einem Rübenvollernter mit

mittleren Kontaktflächendrücken von 166 kPa maximale dynamische Spannungsspitzen von 360 kPa in 30 cm Bodentiefe. Auch Horn (2000), Kühner (1997), Semmel (1993) und Wiermann (1998) haben Spannungseinträge für Landmaschinen in dieser Größenordnung gemessen.

Jede Auflast auf die Bodenoberfläche wird dreidimensional im Boden fortgepflanzt und verursacht dort nicht nur eine Bodenverdichtung, sondern auch dreidimensionalen Bodenversatz. Bodenspannungen induzieren durch Kompression und Scherung nicht nur eine Neuordnung der Partikel und erhöhen die Dichte, sie ändern auch die Porenwasserdrücke, da das Porensystem nicht starr ist.

Daher ist zwischen stärker negativen Wasserspannungen, bedingt durch ein Auffüllen von ehemals Luft gefüllten Poren, bis hin zu positiven Wasserspannungen durch eine vollständige Ausfüllung des Porenraums mit Wasser zu unterscheiden.

Bei der Bodendeformation sind weniger negative oder sogar positive Wasserspannungen von besonderer Bedeutung. Wenn das Verhältnis von spannungsabhängiger Volumenänderung und Luft gefüllter Poren größer als eins ist, sind weniger negative und sogar positive Wasserspannungen und somit geringere Bodenstabilitäten, durch den Übergang vom 3-Phasen zum 2-Phasen System, die Folge.

Die Ausmaße der Verformung wurden mit dem Displacement Transducer System (DTS) aufgezeichnet. Die tiefgreifenden Verformungen durch die Befahrung sind u.a. bei Kühner (1997), Wiermann (1998 und 2000) Wiermann et al. (1999 und 2000) dokumentiert. Die im Schwarzwald gemessenen Verformungen sind stärker ausgeprägt als dies zum Beispiel Horn et al. (2000) auf trockenen Tonböden ermittelt haben. In Anbetracht der enormen Systemgewichte und der starken dynamischen Lastwechsel während der Ernte sind die Werte aus dem Südschwarzwald gerade vor diesem Hintergrund zu erklären.

Die Verdichtung und der Versatz wirken sich nicht nur auf eine höhere Partikelmobilität und auf das Einregeln des Porensystems aus. In Kombination mit Scherkräften ist eine stärkere Homogenisierung und somit ein Wiedererlangen eines normalen Schrumpfungsverhaltens die Folge.

Diese Vorgänge können indirekt auch in situ belegt werden, wenn die Zeit abhängige Zunahme der Bodenspannungen mit den Ergebnissen von Gaerting und Hildebrandt

(2004) sowie von Schäffer und von Wilpert (2004) über die, bedingt durch Strukturschwächung, zunehmende laterale Bodenerosion und die reduzierte Gasdiffusion nach Auflasten zusammen gebracht werden.

Fleige (2000) konnte zeigen, dass die durch Scherung verursachte Verknetung ein ausgeprägteres Schrumpfungsverhalten in Fahrspuren bewirkt.

Des Weiteren ist die Abschätzung von spannungsmindernden Reisigauflagen auf die Änderungen der Bodenstabilität zu beachten. Selbst Reisigmatten mit einer Höhe von mehr als 50 cm waren nicht in der Lage, Spannungen, welche eine Überschreitung der Vorbelastung verursachten, zu verhindern.

Folglich ist die Stärkung des Bodensystems durch das Reisig zusammen mit der zunehmenden Scheroberfläche kleiner als die notwendige Auflastabmilderung, um Schäden zu vermeiden.

Wie weit Scheroberflächen wie Äste, Zweige oder Wurzeln die externen Drücke abmildern kann, zeigt die folgende bauingenieurmäßige Kalkulation: Ein rund acht Meter langer Stamm, mit fünf cm Durchmesser, ist in der Lage, eine Masse von 6 Mg zu tragen, wenn angenommen wird, dass ein vollständiger Kontakt zwischen Stamm und Boden besteht (Fredlund und Rahardjo 1993).

In wie weit solche Kalkulationen auch für Reisigauflagen aus Ästen und Zweigen als Maß für die Bodenverstärkung herangezogen werden können, kann endgültig nicht beantwortet werden. Die Messdaten zumindest zeigen, dass die Bruchfestigkeit der Reisigäste nicht effektiv genug ist, wenn diese in Fahrtrichtung ausgerichtet sind.

Eine rechtwinklige Anordnung der Äste zur Befahrungsrichtung sollte theoretisch die Abstützung verstärken und somit die Bodenauflasten durch eine Art Brückeneffekt vermindern. Weitere Untersuchungen sind hier nötig, um solche Brückeneffekte im Sinne der Nachhaltigkeit und der Waldernte quantifizieren zu können.

Die Vorbelastung ist ein Maß der Bodenstabilität. Sie gibt den Grenzwert an, bis zu welchem Auflasten keine Veränderungen im Porenvolumen, der Struktur oder der Funktion von Böden auftreten, der Boden somit elastisch auf den Druck reagiert. Darüber hinausgehende Belastungen verformen den Boden plastisch und mittelfristig irreversibel (Hartge und Horn 1999).

Die gemessenen Werte für die natürliche Bodenstabilität im Hochschwarzwald zeigen, dass alle Untersuchungsstandorte als „mittel“ bis „gering“ stabil klassifiziert werden müssen (Horn und Fleige 2003).

Änderungen der Vorbelastung durch schwere Baumaschinen sind durch Berli (2000) belegt, welcher auf die Bedeutung des Bodenfeuchtezustands zum Zeitpunkt der Befahrung hinweist. Die Standorte in St. Märgen waren aufgrund ihrer klimatischen Bedingungen (Jahresniederschlag 2000 mm/Jahr) immer mäßig feucht bis feucht. Auch Fleige (2002) zeigt den Anstieg der Vorbelastung bei erhöhter Austrocknung der Böden.

Die Folgen der Befahrung in der Landwirtschaft zeigen sich bei Wiermann (1998) oder Horn (2004). Die Anstiege der Vorbelastung in den, durch das Wurzelwerk strukturierten, Böden im Hochschwarzwald waren allerdings deutlich geringer als die Zunahmen in der Landwirtschaft. Während in der Landwirtschaft der Zusammenhang zwischen maximalem Spannungseintrag und Vorbelastung sichtbar war, konnte diese Korrelation in den Waldböden nicht angewendet werden. Das weitverzweigte Wurzelwerk scheint einen erheblichen Teil der auftretenden Lasten abzufangen und horizontal auf die Wurzelballen abzuleiten. Trotzdem war ein Anstieg der Vorbelastung in allen Befahrungsvarianten, bis auf die Kurzholzurückung durch Rückepferde, nachweisbar.

Die Auflasten während der Holzernte überschreiten bei weitem die Vorbelastung der natürlichen Waldböden; auch konnte das Konzept der Koppelung von Bodenstabilitäten und Auflasten nach Horn und Fleige (2003) durch die signifikanten Veränderungen der Bodenfunktionen belegt werden.

Dieses Konzept ist als hilfreiches Werkzeug zur Quantifizierung der horizontspezifisch akzeptablen mechanischen Belastungen akzeptiert und wird in Zusammenhang mit Konzentrationsfaktoren sowie Kontaktflächendrücken genutzt um plastische Bodenverformung zu vermeiden.

Als Konsequenz unserer Untersuchung zeigt sich die Möglichkeit, dieses Konzept zu nutzen, um die Nachhaltigkeit verschiedener Landnutzungen, welche in der deutschen Bodenschutzverordnung (Holzwarth, F. 1998) vorgeschrieben ist, zu evaluieren. Ein solches System ermöglicht die Differenzierung zwischen on-site und off-site Landnutzungssystemen und kann des Weiteren Entscheidungsmodelle für die nachhaltige Landnutzung liefern (Richter et al. 2003, Horn 2002, 2004).

Der Rückgang der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der Luftleitfähigkeiten kann, abhängig vom saisonalen Niederschlag und dessen Intensität, Auswirkungen auf die Infiltration und somit den Oberflächenabfluss haben.

Unsere Untersuchungen zeigen, dass die gängige forstliche Praxis irreversible Änderungen der Porenfunktionen und die Ausbildung von Fahrspuren hervorruft. Dies verhindert die Infiltration und bedingt damit Oberflächenabfluss sowie lateralen Wasserfluss an Hängen, mit Konsequenzen für den Gashaushalt, die Leitfähigkeiten und möglicherweise die Erosion. Boizard (2000) wies die Verschlechterung der hydraulischen Leitfähigkeiten in den verdichteten Pflugsohlen von Ackerstandorten nach.

Peth und Horn (2004) konnten Effekte auf hydraulische Eigenschaften ebenfalls für Trampelspuren durch Hufverdichtung nachweisen, mit identischen Folgen (für weitere Details siehe auch Lebert 1989 oder Richter et al. 2003).

Die Ergebnisse können somit als Grundlage für standort- und maschinenabhängige Verfahrenstechniken dienen. Überlegungen zur Minderung der ökologischen Folgen durch die Holzernte wurden unter anderem im ECOWOOD Projekt der Universität Helsinki angestellt. Haarlaa (2002) stellte hierbei Methoden zur Analyse der Sensibilität von Standorten vor. Verringerungsmöglichkeiten bei der Schadensbildung durch den Forwardereinsatz auf weichen Grundlagen wurden hierbei von Högnäs (2002) vorgestellt. Beide Arbeiten, so wie auch diejenige von Elonen (2002) gehen aber nicht von einer schadensfreien Befahrung der Böden aus. Im Gegensatz dazu stellten Jacke (1999) und Matthies und Kremer (1999) ein Modell in Aussicht, welches, bei der Bereitstellung einiger grundlegender bodenphysikalischer Parameter (v.a. Bodenfeuchte), die schadfreie Befahrung mit verschiedenen Fahrzeugen ermöglichen soll. Das Modell PROFOR (von Ziesak 1999) stand uns ebenfalls zur Verfügung.

Die meisten Befahrungen hätten, unter den gegebenen Bedingungen, an den verschiedenen Standorten durchgeführt werden können, ohne Bodenschädigungen hervorzurufen. Dies steht allerdings in einem klaren Widerspruch zu den ermittelten ökologischen Standortparametern. Sowohl die Erhöhung der Vorbelastung als auch die erheblichen Reduzierungen der Leitfähigkeiten zusammen mit den tiefgründigen Bodenverdichtungen und Verformungen lassen nur den Schluss zu, dass eine bodenverträgliche Befahrung mit den, in der forstlichen Praxis üblichen Fahrzeugen, nicht möglich ist.

Wenn die Erkenntnis, dass die Böden nicht starr genug sind, die Auflasten abzustützen und wir des Weiteren akzeptieren, dass ungestörte Infiltration und

Pflanzenatmung notwendig sind, dann ist die Anlegung permanenter Fahrspuren eine zwingende Notwendigkeit, um flächiges Befahren zu verhindern. Derartige Arbeitsweisen sind in intensiv bewirtschafteten Flächen z.B. des Gartenbaus seit langem Stand der allgemeinen Praxis und ermöglichen die hohen und zeitlich stabilen Flächenerträge. In der Forstwirtschaft wäre die Anlage permanenter Fahrspuren ebenfalls möglich und auch vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse zu fordern, um eine nachhaltige Flächennutzung zu gewährleisten.

Diese Spuren selbst sind dann zwar weitgehend undurchlässig für Gas, Wasser und Wurzeln, dafür sind sie stabil genug, die Fahrzeuglasten während der überwiegenden Zeit des Jahres abzustützen.

Eine solche Heterogenisierung ist empfohlen als nützliches Werkzeug für nachhaltige Landnutzung in der Landwirtschaft (beispielsweise das controlled traffic systems oder das Konzept der gantry application, Chamen et al. 2003, Hartge und Horn 1999), und dient der Vermeidung weiterer Bodendeformationen und somit Ausfällen an Produktionsfläche.

Wenn wir diese Erkenntnisse generell auf Waldflächen anwenden, dann sollte ein permanentes Fahrgassennetz obligatorisch werden.

Der Abstand zwischen den Rückegassen hängt ab von den örtlichen Gegebenheiten sowie von den technischen Möglichkeiten der Erntefahrzeuge. Sie sollte zwischen 20 und 40 Metern betragen. Ein Schritt in diese Richtung stellt die Richtlinie Feinerschließung (2003) des Landes Baden-Württemberg dar, welche die Einführung eines permanenten Rückegassensystems fordern und zusätzlich eine Befahrung auf das Notwendige beschränkt.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Zuge des BMBF Projekts „Zukunftsorientierte Waldwirtschaft“ wurden an Standorten des Hochschwarzwalds die Auswirkungen von Befahrungen auf standorttypische (Locker-) Braunerden bestimmt.

Durch den Einsatz von in situ Verfahren zur Spannungs- und Deformationsmessung unter realen Erntebedingungen konnten die Folgen des Fahrzeugeinsatzes im Bestand belegt werden. Für die Erfassung der Bodenspannungen und –verformung wurde ein kombiniertes Stress State Transducer (SST) und Displacement Transducer System (DTS) benutzt.

Anhand von ungestörten Stechzylinderproben konnte der Einfluss auf die bodenphysikalische Parameter Vorbelastung und die Leitfähigkeiten bestimmt werden

Die Versuche zeigen deutliche Beeinflussungen der Standortökologie durch schweres Walderntegerät.

Die Spannungsmessungen in verschiedenen Bodentiefen zeigen die Notwendigkeit, Bodenspannungen und Bodenverformungen als dynamische Prozesse zu analysieren. Die statische Beschreibung über Kontaktflächendrücke ist nicht ausreichend, um den tatsächlichen Spannungstensor im Boden zu beschreiben. Die dynamische hochauflösende Aufnahme der Bodenspannungen in verschiedenen Tiefen liefert eine gute Beschreibungen der vollständigen Ernte und Rückevorgänge. Die Bodenbewegung setzt sich zusammen aus einem Bodenversatz sowie Bodenverdichtung. Dies konnte bis in Tiefen von 40 cm nachgewiesen werden.

Die Erhöhung der Vorbelastung durch Waldfahrzeuge konnte in allen Versuchen nachgewiesen werden, unabhängig von der Versuchsorganisation oder den untersuchten Fahrzeugen.

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit nahm, durch die Befahrung, im Oberboden um 80 bis 90 % ab, in 40 cm Tiefe lagen die Werte immer über 50%. Die Luftleitfähigkeiten sanken im Oberboden um mehr als 50%, auch im Unterboden war die Abnahme nachweisbar.

Der Einbruch der Leitfähigkeiten ist durch eine Veränderung in der Porenverteilung und Beeinträchtigungen der Porenkontinuität zu erklären. Die durch die starken Belastungen resultierende Bodenverdichtung führte in den locker gelagerten Waldoberböden zur Zerstörung der Grobporen. Diese sind jedoch wesentlich für die Luft- und Wasserleitfähigkeit verantwortlich. Die tiefgreifenden Einbrüche der Leitfähigkeiten zeigen, dass nicht nur der Oberboden sondern auch die Unterböden von der Veränderung der Struktur betroffen sind.

Einzig die Rückung mit Rückepferden hatte keinen nachweisbaren Einfluß auf die Standortökologie. In den Rückespuren waren die bodenphysikalischen Parameter nicht verändert, obwohl unmittelbar unter den Hufen hohe Spannungen auftreten.

Wenn die Erkenntnis, dass die Böden nicht starr genug sind, die Auflasten abzustützen und wir dies weiterhin akzeptieren, dass ungestörte Infiltration und Pflanzenatmung notwendig sind, dann ist die Anlegung permanenter Fahrspuren eine zwingende Notwendigkeit, um flächiges Befahren zu verhindern. Ein Schritt in diese Richtung stellt die Richtlinie Feinerschließung (2003) des Landes Baden-Württemberg dar, welche die Einführung eines permanenten Rückegassensystems fordert und zusätzlich eine Befahrung auf das Notwendige beschränkt.

6 SUMMARY

“Close-to-nature forest stands” are one central key in the project “Future oriented Forest Management“ financially supported by the German Ministry for Science and Research (BMBF). The determination of ecological as well as economical consequences of mechanized harvesting procedures during the transformation from pure spruce stands to this close-to-nature mixed forest stands is one part of the “Southern Black Forest research cooperation.”

Working procedures of typical forest harvesting vehicles were analysed to examine the actual soil stresses and displacements in soil profiles and to reveal the changes in soil physical properties of the forest soils.

Soil stresses were determined by SST (Stress State Transducer systems) and DTS (Displacement Transducer System) at two depths: 20 cm and 40 cm. Complete harvesting and trunk logging processes with a total duration of 9 minutes were observed with a resolution of 20 readings per second.

The maximum vertical stresses for all experiments exceeded always 200 kPa and reached at 20 cm depth for some vehicles and sequences of harvesting operations 500 kPa or more. Even in the subsoil (40 cm depth) high stresses were inevitable.

Soil deformation was verifiably in all parts of the examined soils. In the top soils (20 cm) the vertical off-set was, under the “Hannibal” Harvester, as much as 13 cm, that means, the part of the soil which was originally positioned in 20 cm depth had moved downwards to 33 cm. Soil deformation took as well place in the subsoil, the vertical off-set varied between 1 and 3 cm.

To evaluate the impact of soil stresses on soil structure, the internal soil strength was determined by the precompression stress. The precompression stress values of forest soils at the field sites range from 20 to 50 kPa at 20 cm depth up to 25 to 60 kPa at 40 cm depth at a pore water pressure of -60 hPa. After wheeling the pre compression stresses were 2 to 3 times higher in the topsoil of the ruts than in the virgin soils. The plastic and therefor permanent deformation was traceable in the deeper parts as well.

The soil permeabilites decreased due to traffic by 70 to 90% for the saturated water permeability and up to 70% for the airpermeability. The degradation of the permeabilities was a matter of fact even the deeper parts.

The data obtained for the measured soil stresses and the natural bearing capacity prove that sustainable wheeling is impossible, irrespective of the vehicle type and the working process. Top and subsoil compaction, an increase in the precompression stresses, deep rut depth, vertical and horizontal soil displacement associated with shearing effects take place and affect the mechanical strength of forest soils.

In order to sustain the present “unwheeled” situation, no increase in mass but a decrease of the machine mass is required to minimize the compacted forest soils. This can be achieved with a permanent skid trail system. A first step to achieve this is done in the Federal state Baden-Württemberg. The new guideline for final opening with skid tracks (Landesforstverwaltung Baden-Württemberg 2003) proposes a permanent skid track system with a width of 20 to 40 m.

7 LITERATUR

- AG BODENKUNDE (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung; 4. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 392 S..
- ALAKUKKU, L. (1997): Properties of fine-textured subsoils as affected by high axle load traffic; In: Alakukku, L. (1997): Long-term soil compaction due to high axle load traffic; Academic Diss..
- ALAKUKKU, L. (2000): Response of annual Crops to Subsoil Compaction in a Field Experiment on Clay Soil Lasting 17 Years; In: Horn, R., J.J.H. van den Akker & J. Arvidsson [eds.] (2000): Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences; Advances in GeoEcology 32, Catena Publ., S. 205-208.
- ARVIDSSON, J., A. TRAUTNER, T. KELLER (2002): Influence of Tyre Inflation Pressure on Stress and Displacement in the Subsoil; In: Pagliai, M. & R. Jones [eds.] (2002): Sustainable Land Management – Environmental Protection; Advances in GeoEcology 35, Catena Publ., S. 331-338.
- BERLI, M., B. KULLI, W. ATTINGER, R. SCHULIN (2000): Subsoil Compaction of Agricultural Land by Heavy Construction Machinery - Soil Mechanical Aspects; In: Horn, R., J.J.H. van den Akker & J. Arvidsson [eds.] (2000): Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences; Advances in GeoEcology 32, Catena Publ., S. 226-232.
- BOIZARD, H., G. RICHARD, M. BRANCOURT-HULMEL, J. GUÉRIF (2000): Effect of Cropping Systems on Change in Bulk Density, Penetration Resistance and Hydraulic Conductivity in Subsoil; In: Horn, R., J.J.H. van den Akker & J. Arvidsson [eds.] (2000): Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences; Advances in GeoEcology 32, Catena Publ., S. 233-241.
- BOUSSINESQUE, J. (1885): Applications des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques ; Gauthier-Villars.

- CASAGRANDE, A. (1936): Characteristics of cohesive soils affecting the stability of slopes and earth fill; J. Boston Soc. Civil Eng. 23, S.13-22.
- CHAMEN, T., L. ALAKUKKU, S. PIRES, C. SOMMER, G. SPOOR, F. TIJINK & P. WEISSKOPF (2003): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2: Equipment and field practices. In: Soil and Till. Res. 73, S. 161-174.
- CZERATZKI, W. (1972): Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand; Landbauforschung, Völkenrode, 22, S. 29-36.
- DVWK (1995): Maßnahmen zum verstärkten Gewässerschutz im Verursacherbereich Landwirtschaft, Nr. 2, Bonn.
- EHLERS, W., D. WERNER, T. MÄHNER (2000): Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen; Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde, 160, S. 157-164.
- ELONEN, J. (2002): Guidelines for harvesting wood from sensitive sites; Aus: ECOWOOD studies made at the University of Helsinki, <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvaro/publications/31/>, Haarlaa, R. & J. Salo [eds.].
- ELONEN, J. (2002): On the amount of sensitive logging sites in Finland; Aus: ECOWOOD studies made at the University of Helsinki, <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvaro/publications/31/>, Haarlaa, R. und J. Salo [eds.].
- FLEIGE, H. & R. HORN (2000): Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion; In: Horn, R., J.J.H. van den Akker & J. Arvidsson [eds.] (2000): Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences; Advances in GeoEcology 32, Catena Publ., S. 251-258.
- FLEIGE, H., R. HORN & F. STANGE (2002): Soil mechanical parameters derived from the CA-database on subsoil compaction; In: Pagliai, M. & R. Jones [eds.]

- (2002): Sustainable Land Management – Environmental Protection; Advances in GeoEcology 35, Catena Publ., S. 359-366.
- FLÜHLER, H. (1973): Sauerstoffdiffusion im Boden; In: Mitteilgn. schweiz. Anst. forstl. Versuchswesen 49, S. 125–250.
- FREDLUND, D.G. & H. RAHARDJO (1993): Soil Mechanics for Unsaturated Soils; John Wiley Sons, Inc., New York, USA
- FRÖHLICH, O.K. (1934): Druckverteilung im Baugrunde; Verlag Julius Springer, Wien.
- FROEHLICH, H.A., D.W.R. MILES, R.W. ROBBINS (1985): Soil Bulk Density, Recovery on Compacted Skid Trails in Central Idaho; Soil Sci. Soc. of Am. Journal, Vol. 4, S. 1015-1017.
- GAMEDA, S., G.S.V RACHAVAN, E. MC KEYS, R. THERIAULT (1987): Subsoil compaction in clay soils I & II; In: Soil and Till. Res. 10, S. 113-122.
- GAERTIG, T. (2001): Bodengashaushalt, Feinwurzeln und Vitalität von Eichen; Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen 40, 157 S..
- GAERTIG, T. & E.E. HILDEBRAND (2004): A field tool for the classification of soil deformation in forest sites; EUROSIL 2004, September 4-12, Freiburg.
- GERDSEN, G. & J. GRAUPNER (1989): Der Kontaktflächendruck bei Forstmaschinen – eine wichtige Kennziffer zur Beurteilung der Bodenpfleglichkeit; Forsttechnische Informationen 3, S.35-36.
- GEYER, O.F. & M.P. GWINNER (1986): Geologie von Baden-Württemberg, Schweizerbart'sche Verlagsanstalt, 472 S..
- GLINSKI, J. & W. STEPNIEWSKI (1985): Soil Aeration and Its Role for Plants; CRC Press Inc., Florida.
- GÖRBING, J. (1948): Die Grundlage der Gare im praktischen Ackerbau; Vol. 1 & 2., Landbauverlag GmbH, München.

- GRÄSLE, W. (1999): Numerische Simulation mechanischer, hydraulischer und gekoppelter Prozesse in Böden unter Verwendung der Finite Elemente Methode; Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Band 48, 400 S..
- GRÖGER, E. (1921): Der Dampfpflug und seine wirtschaftliche und soziale Bedeutung unter Berücksichtigung des Lohnpflugbetriebes in Schlesien; Greifswalder Staatswissenschaftliche Abhandlungen 9.
- GYSI, M. (2001): Bodenverdichtung: Vorbelastung als Stabilitätsmaß; FAT Berichte 566, S.1-7.
- HAARLAA, R. , M. RANTALA & M. SAARILAHTI (2001): Assessment of the site sensitivity from harvesting operation point of view; Aus: ECOWOOD studies made at the University of Helsinki,
<http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvaro/publications/31/>, Haarlaa, R. & J. Salo [eds.].
- HAKANSSON, I. (1994): Subsoil compaction caused by heavy vehicles – a long-term threat to soil productivity; In: Soil and Till. Res. 29, S. 105-110.
- HARRIS, W.L. (1960): Dynamic stress transducers and the use of continuum mechanics in the study of various soil stress – strain relationships; Ph. D. Thesis, Michigan State University.
- HARTGE, K.H. & R. HORN (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden; Enke Verlag Stuttgart.
- HARTGE, K.H. & R. HORN (1999): Einführung in die Bodenphysik; Enke Verlag Stuttgart.
- HEINONEN, M., L. ALAKUKKU & E. AURA (2002): Effects on reduced tillage and light tractor traffic on the growth and yield of oats (*Avena sativa*); In: Pagliai, M. &

- R. Jones [eds.] (2002): Sustainable Land Management – Environmental Protection; *Advances in GeoEcology* 35, Catena Publ., S. 367-378.
- HILDEBRAND, E.E. (1998): Der Einfluss der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im Forstlichen Standort; In: *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* 102; S. 111-125.
- HILDEBRAND, E.E. (2002): Forstliche Bodennutzung – aktuelle Bodengefährdungen und langfristige Ziele; In: Blum, W.E.H., A. Kaemmerer & R. Stock [eds.]: *Neue Wege zu nachhaltiger Bodennutzung; Initiativen zum Umweltschutz*, Band 40, S. 47-59.
- HÖGNÄS, T. (2002): Improvement of the soft ground capacity of regular forwarders; Aus: ECOWOOD studies made at the University of Helsinki, <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvaro/publications/31/>, Haarlaa, R. & J. Salo [eds.].
- HOLZWARTH, F. (1998): *Bundes-Bodenschutzgesetz Handkommentar*; Verlag E. Schmidt, Berlin.
- HORN, R. (1981): Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngößen; *Habilitationsschrift, Schriftenreihe des FB 14 der TU Berlin*.
- HORN, R. (1985): Der Einfluß der Frostgare auf bodenphysikalische Kenngößen; *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 26, S. 314-319.
- HORN, R. (1988): Compressibility of Arable Land; In: Drescher, J., R. Horn & M. De Boodt [eds.]: *Impact of water and external forces on soil structure*; *Catena Supplement* 11, S. 27-47.
- HORN, R. (2002): Soil Mechanical Properties and Processes in Structured Unsaturated Soils under Various Landuse and Management Systems; In: Pagliai,

- M. & R. Jones [eds.] (2002): Sustainable Land Management – Environmental Protection; *Advances in GeoEcology* 35, Catena Publ., S. 305-318.
- HORN, R. (2004): Time Dependence of Soil Mechanical Properties and Pore Functions for Arable Soils; *Soil Sci. Soc. of Am. Journal*, Vol. 68, S.1131–1137.
- HORN, R., C.E. JOHNSON, H. SEMMEL, R.L. SCHAFER & M. LEBERT (1992): Räumliche Spannungsmessungen mit dem State Stress Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Böden – theoretische Betrachtung und erste Ergebnisse; *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 155, S. 269-274.
- HORN, R., J.J.H. VAN DEN AKKER, J. ARVIDSSON [eds.] (2000): Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences; *Advances in GeoEcology* 32, Catena Publ., 462 S.
- HORN, R. & H. FLEIGE (2003): A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils; In: *Soil and Till. Res.* 73, S. 89-99.
- JACKE, H. (1999): Öko-Controlling im Maschineneinsatz – oder: Wie man Leistung steigert, ohne der Umwelt zu schaden; In: *Forsttechnische Informationen* 5+6, S. 31-33.
- JOHNSON, C.E. (1994): SSTKIEL.EXE Program for 3D-stress transducer data analysis for the soil. Version 8/94; Nicht veröffentlicht.
- KMOCH, H.G.& H. HANUS (1965): Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft; *Z. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Band 111, S. 1-10.
- KÜHNER, S. (1997): Simultane Messungen von Spannungen und Bodenbewegungen bei statistischer und dynamischer Belastung zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung; *Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel*, Band 39.

- LEBERT, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden; Ph.D. thesis, Bayreuther Bodenkd. Ber..
- LINDSTROM, M. J. & W. B. VOORHEES (1994): Response of temperature crops in North America on soil compaction; In: Soane, B.D. & C. Van Ouwerkerk [eds.]: Soil Compaction in Crop Production; Elsevier, S. 265-286.
- MATTHIES, D. (1998): Das „Richtlinienhandbuch“ für den bodenverträglichen Maschineneinsatz im Wald; Forsttechnische Informationen 3, S. 23-29.
- MATTHIES, D. & J. KREMER (1999): Bodenmechanische und bodenphysikalische Ergebnisse im Rahmen des „Informationssystems zum bodenverträglichen Forstmaschineneinsatz“; In: Forsttechnische Informationen 5+6, S. 34-39.
- MIKKONEN, E. & E. WUOLIJOKI (1975): Pikatestausten suoritusmekaniikka, The technique of short term testing; Metsätieteiden katsaus 9.
- MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LÄNDLICHEN RAUM, Baden-Württemberg [eds.] (2003): Richtlinie der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zur Feinerschließung von Waldbeständen; Stuttgart, 27 S..
- NICHOLS, T.A., A.C. BAILEY, C.E. JOHNSON, R.D. GRISSO (1987): A Stress State Transducer for Soil; In: Transaction of the ASAE, Vol. 30, S. 1237-1241.
- NISSEN, B. (1999): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland - Bodenphysikalischer Ansatz; Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Band 50.
- PAGLIAI, M., R. JONES [eds] (2002): Sustainable Land Management – Environmental Protection: a Soil Physical Approach; Advances in GeoEcology 35, Catena Publ., , 588 S..

- PETH, S. & R. HORN (2004): Impacts of Grazing on Soil Physical Properties as a result of Reindeer Herding in Northern Scandinavia; In: Mitteilungen zur Kieler Polarforschung, Heft 20-2004, S.25-39.
- RICHTER, F.-H., R. HORN & H. FLEIGE (2003): Mechanical stability of soils derived from moraine material; Proceeding of 16 th triennial ISTRO Conference, S. 997-1002.
- RIEPPO, K. (2001): Forwarder werden immer schwerer; In: Forst und Technik, 2; S. 16-17.
- RIEPPO, K., A. KARINIEMI & R. HAARLAA (2002): Possibilities to develop machinery for logging operations on sensitive forest sites; University of Helsinki. Department of Forest Resource Management, Publication No. 29, 28 S..
- RUSANOV, V. A. (1991): Effect of wheels and tracker traffic on the soil and on crop growth and yield; In: Soil and Till. Res. 19; S. 131-143.
- SAARILAHTI, M. (2002): Soil interaction model, including eight Appendix reports and three computer software programmes and manuals; Aus: ECOWOOD studies made at the University of Helsinki, <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvaro/publications/31/>, Haarlaa, R. & J. Salo [eds.]
- SCHACK-KIRCHNER, H. (1994): Struktur und Gashaushalt von Waldböden; Berichte Forschungszentrum Waldökosysteme Univ. Göttingen, Reihe A Vol. 112, 145 S..
- SCHÄFFER, J., R. HARTMANN, K.V. WILPERT (2001): Effects of Timber Harvesting with Tracked Harvesters on Physical Soil Properties; In: Johannson, J. [eds.]: Proceedings from the third (final) meeting of a Concerted Action: Excavators and Backhoe Loaders as Base Machines in Forest Operations; Pisa, Italy, 20 Sept. to 22 Sept. 2000. SLU, Uppsala, Research Note No. 11, S.119-124.

- SCHÄFFER, J. & K.V. WILPERT (2004): Regeneration of soil disturbances caused by forest machinery; EUROSIL 2004, September 4-12, Freiburg.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (2002): Lehrbuch der Bodenkunde; 13. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHLAGHAMERSKY, A. (1991): Minderung von Bodenschäden durch die Beurteilung der Bodentragfähigkeit beim Befahren mit Forstmaschinen; In: Scientific Annals of the department of forestry and natural environment, 14, Aristotelian University of Thessaloniki.
- SEMMELE, H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Band 26.
- SÖHNE, W. (1958): Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires; Agriculture Engineering.
- SOMMER, C. (1998): Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzenbaulichen Produktion; Bodenschutz I, 3. Jahrgang, S. 12-16.
- TAYLOR, H.M., G.S. BRAR (1991): Effect of soil compaction on root development; In: Soil and Till. Res. 19, S. 111-119.
- TÖPFER, K. (2002): Nachhaltige Bodennutzung als globale Aufgabe – Umweltpolitik zurück auf den Boden bringen; In: Blum, W.E.H., A. Kaemmerer, R. Stock [eds.]: Neue Wege zu nachhaltiger Bodennutzung; Initiativen zum Umweltschutz, Band 40, S. 1-6.
- WEBB, R.H., J.W. Steiger, H.G. WILSHIRE (1986): Recovery of Compacted Soils in Mojave Desert Ghost Towns; Soil Sci. Soc. of Am. Journal, Vol. 50, S 1341-1344.
- WEHNER, T. (2001): Technikkonzepte und ihre Auswirkungen auf den Boden; Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Band 18, S. 97-107.

- WEISSKOPF, P. & M. GYSI (2002): Effects of Heavy Harvesting Machines on Soil Structure; In: Pagliai, M. & R. Jones [eds.] (2002): Sustainable Land Management – Environmental Protection; Advances in GeoEcology 35, Catena Publ., S. 415-428.
- WERNER, D., B. WERNER & M. HERZAU (1998): The effects of mechanical stress and regenerative soil processes on the structure of conventionally and conservationally tilled loess soil - soil physical and image analytical findings; In: Advances in Sugar Beet Research; Vol 1 - Soil compaction and compression in relation to sugar beet production, S. 21-34.
- WIERMANN, C. (1998): Auswirkung differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte; Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Band 45.
- WIERMANN, C., T. WAY, R. HORN, A.C. BAILEY & E.C. BURT (1999): Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk Sandy Loam; In: Soil and Till. Res. 50, S. 127–135.
- WIERMANN, C. & R. HORN (2000): Effect of Different Tillage Systems on the Recovery of Soil Structure Following a Single Compaction Event; In: Horn, R., J.J.H. van den Akker & J. Arvidsson [eds.] (2000): Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences; Advances in GeoEcology 32, Catena Publ., S. 339-350.
- WIERMANN, C., D. WERNER, R. HORN, J. ROSTECK, B. WERNER (2000): Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany; In: Soil and Till. Res. 53, S. 117-128.
- WILPERT, K.V. (1998): Möglichkeiten und Grenzen für die Definition einer ökologisch verträglichen Befahrbarkeit; Forsttechnische Informationen 3, S.29-34.

- WOLLNY, E. (1895): Untersuchungen über den Einfluß der mechanischen Bearbeitung auf die Fruchtbarkeit des Bodens; In: Forschungen auf dem Gebiet der Agrikultur-Physik, 20, S. 231-290.
- WRB, ISSS-ISRIC-FAO (1998): World Reference Base for Soil Resources; - FAO, World Soil Resources Report No. 84, Rome.
- WRONSKI, E.B. & G. MURPHY (1994): Responses of Forest Crops to Soil Compaction; In: Soane, B.D. & C. Van Ouwerkerk [eds.]: Soil Compaction in Crop Production; Elsevier, S. 317-342.
- ZIESACK, M. (1999): Ein Informationssystem für den bodenschonenden Einsatz von Forstmaschinen; In: Forsttechnische Informationen 5+6, S.45-47.
- ZIESAK, M. & D. MATTHIES (2001): Untersuchen zur last- und innendruckabhängigen Aufstandsfläche von Forstspezialreifen; KWF, Forsttechnische Informationen, FTI 9+10/2001, S. 104-110.

Dank

Herrn Prof. Dr. R. Horn danke ich für die Überlassung des Themas, die Möglichkeiten intensiv zu reisen, technische Entwicklungen ein wenig voran zu treiben und für seine Unterstützung und Geduld bis zur Fertigstellung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr R. Duttmann für die Übernahme des Koreferats.

Meinen Arbeitskollegen und allen HiWis am Institut, die mit intensiver Hilfe zu dieser Arbeit beigetragen und dabei für ein sehr angenehmes Arbeitsklima gesorgt haben. Mein namentlicher Dank gilt hierbei den Technischen Mitarbeitern Petra Köster, Stefan Becker und Jens Rostek, welche mir nicht nur den Laboralltag und seine Finessen näher brachten, sondern auch, mit viel Engagement und großer Spontaneität, die aufwendigen Messserien im Schwarzwald erst möglich machten. Für die wissenschaftlichen Diskussionen und große Hilfe im Gelände danke ich den wissenschaftlichen Mitarbeitern Frank Richter und Heiner Fleige.

Ole Olschwski übernahm engagiert und gewissenhaft eine Diplomarbeit im Projekt und war eine weitere Verstärkung im Gelände.

Ein besonderer Dank geht an meinen langjährigen HiWi und Freund Frank Hamann, der nicht nur herausragendes Engagement im Südschwarzwald zeigte, sondern der auch im Labor und bei der Erstellung dieser Arbeit bis zu Letzt aktiv war.

Die Mitarbeit im Forschungsverbund Südschwarzwald war mir eine große Freude. Die Kooperation mit den Arbeitsgruppen der Forstlichen Versuchsanstalt des Landes Baden-Württemberg und der Universität Freiburg funktionierten ausgezeichnet und gingen weit über das gewöhnliche Maß hinaus. Namentlich sei hier Thomas Wehner noch einmal für die vielen Stunden im Gelände, die langen Gespräche und große Hilfsbereitschaft gedankt.

Die Fahrer und die Betreiber der Waldmaschinen und die Pferderücker zeigten großes Verständnis und Interesse für unsere Arbeit, obwohl wir, für den Aufbau der Messapparaturen, oft stundenlang den Betrieb lahmgelegt haben.

Herr Kirsten, der Revierleiter des Forstamts St. Märgen, war immer für weitere Befahrungen zu gewinnen, obwohl wir manche Schneise in seinem Bestand hinterlassen haben.

Ein abschließender Dank geht an meine Eltern, welche mir das Studium ermöglichten und mich während der Promotion immer moralisch unterstützten und vor allem an meine Frau Christine, welche mein Rückhalt war, meine langen Abwesenheiten ertrug, unsere Kinder oft alleine betreute und immer ein offenes Ohr hatte für meine Sorgen und Nöte.

Lebenslauf

4. Jan 1973	Geboren in Wipperfürth, NRW, Deutschland
1992-1993	Zivildienst im <i>Mobilen Sozialen Hilfsdienst</i> der AWO, Wipperfürth
06/01	Heirat, Ehefrau Christine (geb. Lucas)
04/02, 09/03, 02/05	Geburt von Sohn Felix, Tochter Julika, Tochter Franziska
<hr/>	
1979-1992	Kath. Grundschule <i>St. Clement</i> und <i>Engelbert-vom-Berg</i> Gymnasium in Wipperfürth
1993-1995	Grundstudium der Geographie und Geologie an der <i>Universität zu Köln</i> sowie der Bodenkunde an der <i>Friedrich–Wilhelms- Universität zu Bonn</i>
11/95-02/96	Praktikum bei der <i>Landscape Geoagentur</i> , Köln
1996-2000	Hauptstudium an der <i>Christian-Albrechts-Universität zu Kiel</i> Geographie (Hauptfach), Geologie und Bodenkunde (Nebenfächer) Abschluss: Diplom Geograph
05/96–07/97	Mitarbeit in dem Planungsbüro Mordhorst GmbH
1993-2002	Exkursionen und Forschungsreisen: Luxemburg (1994), Dolomiten (1995), China (1997), Marokko (1998), Australien (1998 und 1999), Norwegen (2000), wiederholte Aufenthalte im Südschwarzwald (2000-2003), Italien (2001) Österreich (2001), Thailand (2002)
10/98-03/99	Expeditionsteilnehmer des <i>Australian National Antarctic Research Expeditions</i> Projekts 1083, Casey Station, East-Antarctica
06/00	Diplomarbeit (in Englisch): Generic relationships between soil distribution and vegetation cover on Clark Peninsula, Wilkes Land, East Antarctica
2000-2003	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotion am Lehrstuhl für Pflanzenernährung und Bodenkunde der CAU Kiel
12/2004	Einreichen der Doktorarbeit
02/02/05	Disputation
<hr/>	
03/01	Wissenschaftlicher Begleiter (Lektor) einer Antarktiskreuzfahrt mit der <i>MS Hanseatic</i>

Schriftenreihe des Instituts

Neuere vorrätige Titel

- Band 43 **Dirk Frey** (1998): Eignung des Systems Horsch als reduzierte Bodenbearbeitung zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit auf Böden des östlichen Hügellandes in Schleswig-Holstein
- Band 46 **Holger Brück** (1998): Varietal Differences in Yield, Root Size and Water-Use Efficiency in Perl Millet
- Band 47 **Stephan Hüttmann** (1998): Untersuchungen zur mikrobiellen Dynamik, Prozeßkontrolle und Beschleunigung des mikrobiellen Kohlenwasserstoffabbaus in mineralölverunreinigten Bodenmaterialien mit dem Mietenwendeverfahren
- Band 49 **Jörg Thienemann** (1999): Zur Bedeutung von Wassergehalt und Struktur für die mechanische Stabilität und hydraulische Dichtigkeit von mineralischen Deponieabdichtungen aus Geschiebemergel (15 Eur)
- Band 50 **Bernd Nissen** (1999): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland - bodenphysikalischer Ansatz -
- Band 51 **Angelika Hartmann** (1999): Die Bedeutung der Bodenstruktur und der hydraulischen Bodeneigenschaften für die Kationenaustausch- und -transportprozesse am Beispiel zweier Parabraunerden
- Band 52 **Thorsten Junge** (1999): Zur Bedeutung des Porenwasserdruckes für die Zugfestigkeit von Böden
- Band 53 **Heinrich Fleige** (2000): Ökonomische und ökologische Bewertung der Bodenerosion am Beispiel einer Jungmoränenlandschaft Ostholsteins
- Band 54 **Ulrich Weiss** (2000): Eignung von praxisorientierten Modellansätzen zur Schätzung von Stickstoffausträgen aus landwirtschaftlich genutzten Böden
- Band 55 **Angela Frahm** (2000): Das Edaphon in Oberböden einer norddeutschen Jungmoränenlandschaft unter dem Einfluß verschiedener Bewirtschaftungsmaßnahmen
- Band 56 **Ulrike Tigges** (2000): Untersuchungen zum mehrdimensionalen Wassertransport unter besonderer Berücksichtigung der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit
- Band 57 **Tjark Goerges** (2001): Untersuchung zur N - Dynamik von Böden nach Ausbringung von ¹⁵N- markierter Rindergülle
- Band 59 **Christian Uhlig** (2002): Airborne heavy metal pollution and its impacts on *Empetrum nigrum* and *Vaccinium myrtillus*
- Band 60 **Ruprecht Herbst** (2002): Bodenschätzung, geoelektrische Sondierung und pedostatistische Modellierung als Basis von digitalen Hof-Bodenkarten im Präzisen Landbau
- Band 61 **Götz Reimer** (2003): Spektrale Naherkundung und Ertragskartierung als Basis von digitalen Hof-Bodenkarten im Präzisen Landbau
- Band 62 **Thomas Baumgartl** (2003): Kopplung von mechanischen und hydraulischen Bodenzustandsfunktionen zur Bestimmung und Modellierung von Zugspannungen und Volumenänderungen in porösen Medien
- Band 63 **Frank Nahrwold** (2004): Bodenerosionsstudien und Möglichkeiten der Reliefmodellierung zur Reduzierung des Abtrages
- Band 64 **Stephan Peth** (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten