



Methodenvergleich und praktische Untersuchungen zur Ermittlung von Schadverdichtung auf Forststandorten

Zur Erlangung des Grades Bachelor of Science

Lina Schütte

Fachbereich: Landschaftswissenschaften und Geomatik

Studiengang: Naturschutz und Landnutzungsplanung

Abgabe: 24.02.2022

Neubrandenburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Maik Stöckmann

Zweitprüfer: Dipl.-Geol. Mischel Eismann

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2021-0242-3

Inhalt

1. Einleitung.....	3
2. Stand der Technik	6
2.1 Technische Möglichkeiten.....	6
2.2 Kategorien und Maßnahmen.....	10
3. Methodik	14
3.1 Standortbeschreibung.....	15
3.2 Ablauf.....	17
3.3 Beschreibung der Versuche	22
4. Ergebnisse	24
4.1 Voruntersuchung	24
4.2 Hauptuntersuchung	27
5. Diskussion.....	31
5.1 Voruntersuchung	31
5.2 Hauptuntersuchung	34
6. Fazit und Ausblick.....	41
Abbildungsverzeichnis	44
Tabellenverzeichnis	45
Anhang.....	46
Literaturverzeichnis	55
Eidesstaatliche Erklärung.....	56

1. Einleitung

Die Belastung von Forstböden ist seit den 50er Jahren stark gestiegen Jahren (Ziesak 2004, S. 11). Verstärkt wird sie noch durch die immer schwerer werdenden Maschinen, die in den letzten Jahren für die Holzernte genutzt werden. Die Folge daraus sind steigende Belastungen für den Boden und Verdichtungen (Lüscher et al. 2016, S. 21). Diese Bodenverdichtung zeigt sich an manchen Standorten besonders durch zerfahrene Rückegassen und Stauwasseransammlungen. Eine solche Bodenverdichtung kann nicht nur ein Problem für Förster:innen sein, sondern ist auch ein Faktor für die öffentliche Anerkennung der Forstwirtschaft. Tiefe Spuren und Wasseransammlungen auf den Rückegassen wirken auf Waldbesucher:innen häufig abschreckend, daraus folgt nicht selten eine negative Berichterstattung der Medien (Borchert 2012, S. 65).

Dabei ist Bodenschutz und Bodenverdichtung nicht nur ein Thema in den Medien und der öffentlichen Wahrnehmung, es ist in Deutschland und Mecklenburg-Vorpommern auch gesetzlich verankert. In § 1 Nummer 1 des Bundeswaldgesetzes (BWaldG) ist festgelegt, dass der Wald zu erhalten ist, unter anderem aufgrund seiner Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit. Ebenfalls erwähnt ist dieser Punkt in dem Waldgesetz für das Land Mecklenburg-Vorpommern (LWaldG) in § 1. Erweitert wird dies in § 12, der besagt, dass der „Boden und die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten sowie ein flächiges Befahren des Waldes [durch den Waldbesitzer] zu vermeiden [ist]“ (§ 12 Absatz 1 Nummer 1 LWaldG). Weitergehend wird in § 18 Absatz 1 LWaldG die Zerstörung des Waldbodens verboten und später in § 51 als Ordnungswidrigkeit eingestuft. Zusätzlich zu den Gesetzen, die den Wald direkt betreffen, gibt es in Deutschland auch das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG). Es legt fest, dass schädliche Bodenveränderungen „Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen [sind], die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen“ (§ 2 Absatz 3 BodSchG). Was genau ein erheblicher Nachteil ist und wann ein Eingriff trotzdem angemessen ist, muss im Einzelfall abgewogen werden.

Das flächige Befahren des Forstes und damit die flächige Verdichtung des Bodens soll mit dem Festlegen von Rückegasse in Mecklenburg-Vorpommern verhindert werden (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004, S. 4). „Rückegassen sind einfache, auf Dauer angelegte und für Forstmaschinen befahrbar gehaltene bestockungs- und hindernisfreie Linien zur Erschließung von Beständen“ (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004, S. 4). Sie haben einen Regelabstand von 20 Metern, eine Regelbreite von 4 Metern und sollen möglichst parallel zueinander verlaufen (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004, S. 5). Durch diese Maßnahme wird auf der einen

Seite das flächige Befahren des Forstes verhindert, auf der anderen Seite führt sie auf manchen Standorten zu Problemen. Die Rückegassen werden durch die Befahrung zunehmend beansprucht und der Boden verdichtet. Ist die Beeinträchtigung so hoch, dass die Gasse nicht weiter befahren werden kann, kommt es zu Einschränkung oder sogar dem Ausfall der Holzernte.

Bei einer Verdichtung des Bodens kommt es zu Veränderung des Bodengefüges – beispielsweise in Folge der Befahrung mit immer schweren Erntemaschinen. Das Verhältnis der sich im Boden befindenden Poren- und Hohlräumen verändert sich so, dass der Festsubstanzanteil zunimmt (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg Vorpommern o. J., S. 12). In jedem Boden befinden sich Fein-, Mittel- und Grobporen. Sie enthalten sowohl Wasser als auch Luft. Die Verteilung der Porengrößen ist von der Korngrößenzusammensetzung des Bodens abhängig und in jedem Boden individuell. Ohne anthropogene Einflüsse ist dieses Gefüge relativ stabil (Scheffer und Schachtschabel 2008, 165 ff). Die Verteilung der Poren ist dabei wichtig, weil diese abhängig von ihrer Größe unterschiedliche Funktionen im Boden innehaben. Die Feinporen enthalten meist Wasser. Die Hohlräume sind jedoch so klein, dass dieses Wasser für Pflanzen nicht erreichbar ist, weshalb es auch Totwasser genannt wird (Stahr et al. 2008, 133 f.). Das pflanzenverfügbare Wasser findet sich vor allem in den Mittelporen, da die Grobporen meist eine Rolle in der Belüftung des Bodens und weniger im Wasserhaushalt spielen (Scheffer und Schachtschabel 2008, S. 163). Wird durch die Verdichtung das Bodengefüge verändert, nimmt vor allem der Anteil an Grob- und Mittelporen ab, sodass sich die Transportleistung von Wasser und Luft im Boden verringert (Lüscher et al. 2016, S. 53). Dies hat zur Folge, dass für die Pflanzen weniger Wasser zur Verfügung steht, sie also schlechter oder gar nicht wachsen können. Dabei ist nicht nur die Verringerung der Poren an sich ein Problem, sondern gleichzeitig das Vermindern der Porenkontinuität. Diese beschreibt die Verbindung zwischen den Poren, die den Austausch an Wasser und Luft gewährleistet (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004, S. 3). Hat der Boden eine erhöhte Wassersättigung, nach beispielsweise Niederschlag, wird die Verdichtung begünstigt. Das sich im Boden befindende Wasser dient dann als eine Art Gleitfilm und die Veränderung des Gefüges wird, sowohl in der Tiefe als auch in der Breite (Geischeder 2011, S. 53), verstärkt (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg Vorpommern o. J., S. 12). Neben einem erhöhten Wassergehalt entscheidet außerdem die Korngrößenverteilung über die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens. Feinkörnige Böden sind ihr gegenüber stärker anfällig als grobkörnige (Marahrens 2012, S. 3). Nicht jede Verdichtung ist jedoch eine Gefahr für den Boden. Was genau eine „Schadverdichtung“ darstellt ist nicht einheitlich definiert. Der Konsens bei den Definitionen ist, dass Schadverdichtung eine Strukturveränderungen des Bodens ist, die zur Folge hat, dass die Porengrößenverteilung oder die Porenkontinuität verändert wird und es damit zu einem dauerhaften

Schaden der Bodenfunktionen kommt (Buchter et al. 2004). Einige Definitionen nennen explizit die technogene Überbelastung als Auslöser dieser Schadverdichtung (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg Vorpommern o. J., S. 13). In einer auf die Wald- und Forstarbeit bezogenen Auslegung gilt als Schaden alles, was den langfristigen Erhalt der Fruchtbarkeit des Bodens stört. Die durch die Naturverjüngung erreichte Selbsterhaltung des Waldes muss gewährleistet werden, ansonsten liegt eine Schadverdichtung vor (Lüscher et al. 2016, S. 57). Dabei ist vor allem die oben genannte verringerte Transportleistung von Wasser und Luft nach einer Verdichtung eine Einschränkung für die Naturverjüngung und das Wurzelwachstum der Bäume (Lüscher et al. 2016, S. 53).

Verstärkt wird das Problem der Verdichtung auf Forstflächen dadurch, dass, im Gegensatz zu landwirtschaftlich genutzten Flächen, der Boden nicht bearbeitet werden kann. Eine Aufarbeitung der Verdichtung durch das Auflockern des Bodens ist nicht möglich (Borchert 2012, S. 62). Trotzdem tritt das Problem nicht an jedem Forststandort gleichermaßen auf. Die unterschiedlichen Böden können das Befahren unterschiedlich stark auffangen, sodass die Schäden an vielen Standorten reversibel sind. Es gibt jedoch anfällige Standorte, wo das Befahren und die damit verbundene Verdichtung Strukturveränderungen und Spurbildungen nach sich ziehen. Diese Schäden sind dann dauerhaft, auch nach 25 Jahren tritt auf empfindlichen Böden keine Regeneration der Verdichtung auf (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004, S. 4).

Bisher gibt es keine umfangreichen Karten oder Kartierungen über verdichtungsempfindliche Böden in Forsten, da meist innerhalb eines Waldabschnittes die Böden heterogen und somit nicht einheitlich beurteilbar sind (Lüscher et al. 2016, S. 19). Es werden also einfache und praxisnahe Möglichkeiten gesucht, um die Verhinderung von Schäden und eine reibungslose Holzernte zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist es zum einen, einige bestehende Ansätze exemplarisch aufzuzeigen, um Möglichkeiten darzustellen, wie an anderen Orten bisher mit dem Problem der Schadverdichtung umgegangen wird. Zum anderen sollen Untersuchungen auf einem Problemstandort aus anderen Bereichen zur Messung von Verdichtung ausprobiert werden und gleichzeitig der Boden auf die bisherigen Veränderungen durch das Befahren untersucht werden, um einen Eindruck der Problematik in der Praxis zu bekommen. Dabei bildet die vorliegende Arbeit einen ersten Einstieg in das Thema und birgt verschiedene Ansätze, die in Folgearbeiten aufgegriffen und spezifisch untersucht werden könnten.

Dem Ziel entsprechend wird zunächst eine Auswahl an bestehenden Ansätzen zur Lösung des Problems der Schadverdichtung dargestellt. Diese sind teilweise unabhängig voneinander zu betrachten, häufig jedoch auch miteinander kombinierbar. Danach folgt eine Darstellung eigens durchgeführter Versuche. Es wurden zunächst in einer Voruntersuchung zwei Versuche aus der Landwirtschaft und dem Erdbau auf einem Forststandort getestet. Es sollte

überprüft werden, ob diese einfach umzusetzenden Methoden sich für diesen Standort eignen. Zusätzlich wurden erste Laboruntersuchungen durchgeführt. Das Ziel der darauffolgenden Hauptuntersuchung war im Gegensatz dazu, zu erkennen, inwieweit das Untersuchungsgebiet bisher durch die Befahrung beeinträchtigt wurde und weshalb dieses verdichtungsempfindlich auf das Befahren reagiert. Zu diesem Zweck wurden Proben sowohl im ungestörten Bereich des Forstes als auch auf der bestehenden Rückegasse entnommen.

2. Stand der Technik

Das Problem der Bodenverdichtung auf den Rückegassen im Forst ist schon seit längerer Zeit bekannt und es wurden verschiedene Ansätze erarbeitet, um die Verdichtung zu verringern oder zu verhindern. Im Folgenden werden einige dieser Konzepte aus Deutschland, Österreich und der Schweiz exemplarisch dargestellt.

Grundsätzlich gilt für das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern die zuvor schon erwähnte „Richtlinie zur Feinerschließung im Landeswald M-V“ des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei. Die Nutzung von festgelegten Rückegassen soll die flächige Befahrung des Forstes verhindern und so den Boden schonen (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004, S. 4). Damit gewährleistet werden kann, dass die Rückegassen dauerhaft befahrbar sind, sollen technische Maßnahmen bei der Holzernte ergriffen werden, die verhindern, dass sich tiefe Spuren bilden. Zudem sollte die Holzernte nicht zu einem Zeitpunkt erfolgen, an dem der Boden eine hohe Wassersättigung hat (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004, S. 7).

2.1 Technische Möglichkeiten

Um die Befahrung von wassergesättigten und / oder verdichtungsempfindlichen Böden zu gewährleisten, wird bisher vor allem auf technische Lösungen gesetzt. Im Folgenden findet sich eine beispielhafte Aufstellung solcher Lösungen.

Wie stark und langanhaltend die Verdichtung des Bodens ist, ist abhängig von dem Druck, der durch die Erntemaschine ausgeübt wird (Ebel 2006, S. 93). Der auf den Boden wirkende Druck wird dabei als Kontaktflächendruck bezeichnet. Grundsätzlich lässt sich sagen, steigt die Radlast oder sinkt die Kontaktfläche, steigt auch der Kontaktflächendruck. Die Radlast ist das Gewicht, das auf einem einzelnen Rad liegt, die Kontaktfläche, die Fläche der Maschine, die Kontakt zum Boden hat (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg Vorpommern o. J., S. 19). Gleichzeitig spielt die Tragfähigkeit des Bodens eine Rolle für die Verdichtungsempfindlichkeit. Neben der Korngrößenverteilung und dem Wassergehalt kann

auch der Humusgehalt und die Hangneigung eine Rolle für die Tragfähigkeit der Böden spielen (Ziesak 2004, S. 27).

Reduktion der Radlast

Eine simple, wenn auch teilweise schwierig umzusetzende Maßnahme ist, vorzugsweise leichte Maschinen zu nutzen und diese mit einem geringen Gewicht zu beladen, um eine verringerte Radlast zu erreichen (Lüscher et al. 2016, S. 111 ff.). Eine mögliche Umsetzung dieser Option ist das Rücken mit halber Ladung. Versuche ergaben, dass der Boden bei der viermaligen Befahrung mit ganzer Ladung stärker verdichtet wird als bei dem achtmaligen Befahren mit halber Ladung. Der Versuch wurde auf Braunerden und Parabraunerden aus mehrheitlich sandigem Lehm mit lokalen Stauwassereinfluss durchgeführt. Es wurden zwei parallele, schon bestehende Rückegassen, sowie eine neue, noch nicht zuvor belastete Gasse untersucht. Sowohl die Bodenverdichtung als auch ihre Tiefenwirkung waren bei dem Rücken mit halber Ladung geringer. Gleichzeitig ergab die Untersuchung, dass die Erstbefahrung des Bodens in einem möglichst trockenen Zustand erfolgen sollte, um eine bessere Ausgangslage für künftige Befahrungen zu schaffen (Frutig und Lüscher 2015, S. 49 ff.).

Vergrößerung der Kontaktfläche

Abbildung 1 zeigt eine beispielhafte Auswirkung einer Befahrung auf einem hier als „normal gelagerten und normal feuchten Boden“ beschriebenen Untergrund. Eine Definition, was ein normal gelagerter und normal feuchter Boden ist, erfolgte nicht. Die gezeigten Werte sind dementsprechend nicht direkt auf einen anderen Boden übertragbar. Sie dienen vielmehr dazu, die Veränderung, die durch unterschiedliche Kontaktflächen erlangt werden kann, exemplarisch aufzuzeigen. In der Abbildung wird der Boden mit der immer gleichen Radlast von 710 Kiloponds (kp) befahren, es verändert sich lediglich der Reifendruck. Wird dieser gesenkt, erhöht sich die Kontaktfläche, also die Auflagefläche der Maschine auf den Boden, wodurch sich auch der Kontaktflächendruck verringert. Durch die erhöhte Kontaktfläche wird die Last stärker verteilt und die Verdichtung wirkt sich weniger tief in den Boden aus (Geischeder 2011, S. 51). Abgebildet sind sogenannte Druckzwiebeln. Sie zeigen auf, wie viel der ursprünglichen Last in verschiedenen Tiefen wirkt. Verändert man beispielsweise den Reifendruck, und somit den Kontaktflächendruck, von 3 auf 0,75 bar, verringert sich auch die Last auf den Boden. In einer Tiefe von 40 cm würde er dementsprechend von $0,6 - 0,4 \text{ kg/cm}^2$ auf nur $0,4 - 0,2 \text{ kg/cm}^2$ sinken. Ebenfalls eine Senkung des Reifendrucks auf 1,5 bar Reifendruck vermindert die Last in dieser Tiefe bereits auf unter $0,4 \text{ kg/cm}^2$.

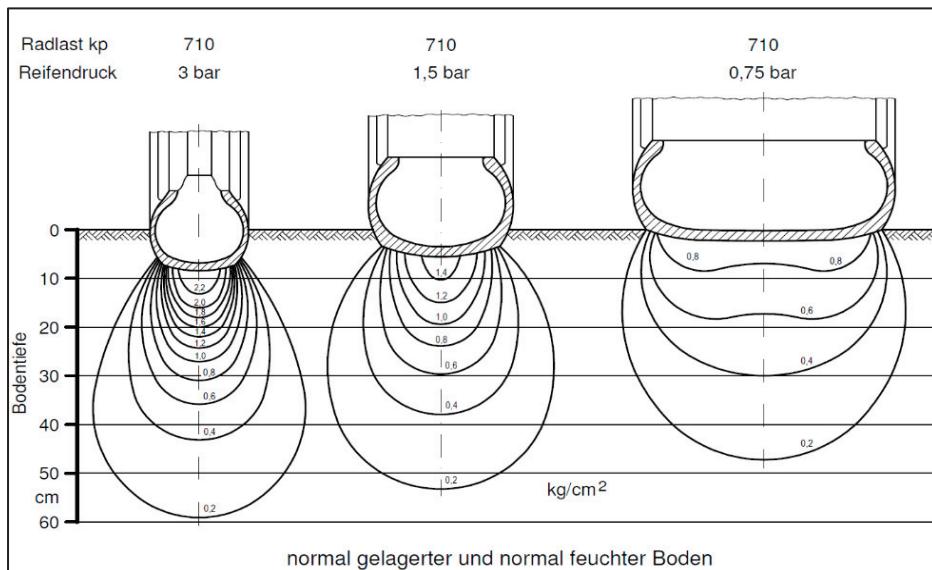


Abbildung 1: Tiefenwirkung der Befahrung von Boden mit Radialreifen in Abhängigkeit des Reifendrucks/des Kontaktflächendrucks (Geischeder 2011, S. 51).

Um vor allem die Druckspitzen in der Mitte der Reifen zu reduzieren (Borchert 2012, S. 66), kann der Reifenfülldruck auf 1,5 – 2 bar gesenkt und / oder es können breitere Reifen genutzt werden. Eine stärkere Senkung auf beispielsweise 0,75 bar, wie in der Abbildung gezeigt, gefährdet jedoch die Funktionalität der Maschine und ist deshalb bisher nicht umsetzbar. Trotzdem erhöht sich sowohl durch die Verringerung des Reifendrucks als auch durch die Verwendung von breiteren, sogenannten Radialreifen, die Kontaktfläche der Reifen mit dem Boden und das Gewicht wird auf einen größeren Bereich verteilt, was zu einer geringeren Verdichtung führt. Zwar schont auch diese Maßnahme den Boden, sie ist jedoch weniger effektiv als die Reduktion der Radlast (Lüscher et al. 2016, S. 111 ff.).

Zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche dienen des Weiteren sogenannte Bogebänder, die es in verschiedenen Varianten gibt. Moorbänder zum Beispiel haben eine hohe Kontaktfläche und somit einen geringen Kontaktflächendruck, was bedeutet, dass sie das Gewicht der Maschine auf eine große Fläche verteilen. Sie sind gut einsetzbar bei flachem oder leicht geneigtem Gelände, können jedoch bei Schnee Probleme bereiten. Traktionsbänder hingegen haben eine hohe Traktionsunterstützung, dafür aber nur eine geringere Druckverteilung und eignen sich deshalb vor allem für Hanglagen bis zu 30 % Neigung. Als Kompromiss zwischen einer Traktionsunterstützung und einer Druckverteilung gelten Kombibänder. Sie sind bei Hangneigungen von 0 – 30 % einsetzbar (Lüscher et al. 2016, S. 111 ff.). Abbildung 2 zeigt drei Bogebänder der Firma Olofsfors im Vergleich.



Abbildung 2: Exemplarische Darstellung dreier Bogiebänder der Firma Olofsfors zum Vergleich. Links das Moorband "Baltic", in der Mitte das Kombiband "KovaX" und rechts das Traktionsband "Ex". (Bildquelle: <https://www.olofsfors.com/products/eco-tracks/> [letzter Zugriff 03.02.2022]).

Allerdings ist bei Bogiebändern deren Gewicht nicht zu vernachlässigen. Dieses summiert sich zu dem bestehenden Gewicht der Erntemaschine und des Holzes. Bisher fehlen genauere Untersuchungen zu dem Nutzen der Bänder in der praktischen Umsetzung (Lüscher et al. 2016, S. 111 ff.).

Reisigmatten

Für Reisigmatten werden die geernteten Stämme so entastet, dass die entfernten Äste auf die Rückegassen gelegt werden. Die Erntemaschinen fahren dementsprechend nicht direkt über den Boden, sondern über einen sogenannten „Astteppich“. Durch diesen Astteppich werden die Traktionskräfte zunächst auf die Reisigmatten und erst danach auf den Boden geleitet,

wodurch sich vor allem die Spurbildung vermindert. Zusätzlich wird die Radlast durch die Reisigmatten auf eine größere Fläche verteilt, sodass der Kontaktflächendruck vermin- dert und die Druckzwiebel ab- geflacht wird (Abbildung 3) (Lüscher et al. 2016, S. 125).

Diese Methode ist nicht in jedem Forst anwendbar, da sich

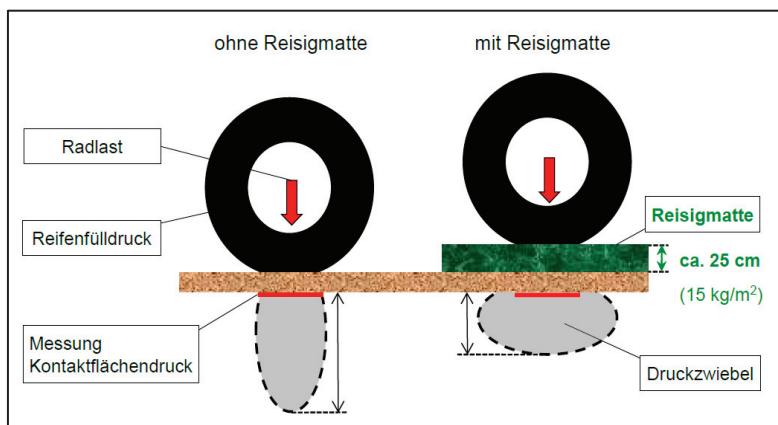


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Wirkung von Reisigmatten (Lüscher et al. 2016, S. 125).

nicht alle Baumarten im gleichen Maße für Reisigmatten eignen. Laubbaumarten haben einen geringen Nutzen als vor allem Fichten und Tannen. Zusätzlich kann es zu einem Problem mit Reisigmatten kommen, da sie das Abtrocknen des Bodens verhindern und zusätzliche Biomasse auf den Rückegassen bedeuten. Dies kann auf längere Sicht dazu führen, dass sich die Tragfähigkeit des Bodens weiter verschlechtert. Außerdem muss bedacht werden, dass

Reisigmatten, vor allem bei Hangneigungen von 40 - 50 %, eine Rutschgefahr bilden (Lüscher et al. 2016, S. 125).

Knüppeldämme

Neben dem Astwerk, wie bei den Reisigmatten, können auch Stammteile für eine Befestigung der Rückegasse genutzt werden. Die Stammteile werden während der Holzernte quer auf die Rückegasse gelegt und bilden so einen Knüppeldamm. Da bei dieser Methode jedoch vergleichsweise viel Holz und somit Ertrag verloren geht, lohnt sie sich nur für kurze verdichtungsanfällige Gassenabschnitte (Borchert 2012, S. 68).

2.2 Kategorien und Maßnahmen

Da die technischen Möglichkeiten begrenzt sind und häufig die Verdichtung des Bodens nur verringert und nicht verhindert werden kann, gibt es andere Ansätze, um bewerten zu können, ob das Befahren des Bodens zu empfehlen ist oder nicht. Dabei gibt es verschiedene Theorien, die unterschiedliche Kategorien zur Beurteilung des Bodens zu Rate ziehen. Im Folgenden werden einige Ansätze kurz dargestellt, es handelt sich jedoch lediglich um eine exemplarische Übersicht der Bandbreite an Ansätzen.

Richt- und Prüfwerte

Buchter et al. (2004) haben in ihrem Positionspapier einen Vorschlag zur Aufstellung von verschiedenen Richt- und Prüfwerten zur Beurteilung der Schadverdichtung im Boden in der Schweiz erarbeitet. Die zu prüfenden Messwerte sind dabei die gesättigte Wasserleitfähigkeit, die effektive Lagerungsdichte, das Grobporenvolumen und der Eindringwiderstand. Für diese vier Variablen wurden Versuche empfohlen, um die Werte in der Praxis ermitteln zu können. Weitergehend wurden Richt- und Prüfwerte festgelegt, anhand derer Aussagen über die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens getroffen werden können (Buchter et al. 2004, S. 28 ff.). So wird zum Beispiel empfohlen, den Eindringwiderstand mit Hilfe eines dynamischen Ramm penetrometers, einer PANDA-Sonde, zu messen. Es sollten zehn Messungen mit 20 – 50 cm Abstand durchgeführt werden. Der entscheidende Wert ist die Mittelwertskurve mit Vertrauensintervall (95 %) der Widerstände. Es sind sowohl ein Richt- als auch ein Prüfwert für landwirtschaftliche Flächen und für Waldoberböden angegeben, die bis zu einer maximalen Tiefe von 60 cm gelten (Buchter et al. 2004, S. 29 f.). Bei Überschreitung des Richtwertes ist dies als erster Hinweis auf eine langfristige Beeinträchtigung des Bodens zu sehen, bei Überschreitung des Prüfwertes muss eine Gefährdung der Flora und Fauna geprüft und die Bodennutzung gegebenenfalls eingeschränkt werden. Welche Art der Einschränkung gewählt wird, muss im Einzelfall festgelegt werden (Buchter et al. 2004, S. 28 ff.).

Spurtiefen und Ausrolltest

Aufbauend auf den Richtwerten von Buchter et al. (2004) wurden drei Spurtypen festgelegt. Deren Vorteil ist, dass sie direkt bei Arbeiten im Forst Aufschlüsse über die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens zulassen. Es sind keine weiteren Messmethoden oder Prüfverfahren notwendig, um die Bodennutzung an die Gegebenheiten anzupassen (Lüscher et al. 2016, S. 53f). Die Spurtypen lassen sich anhand optischer Merkmale nach einmaliger oder mehrfacher Überfahrt während der Holzernte einteilen. In Abbildung 4 sind die verschiedenen Spurtypen beschrieben, sie werden im Folgenden kurz erläutert.

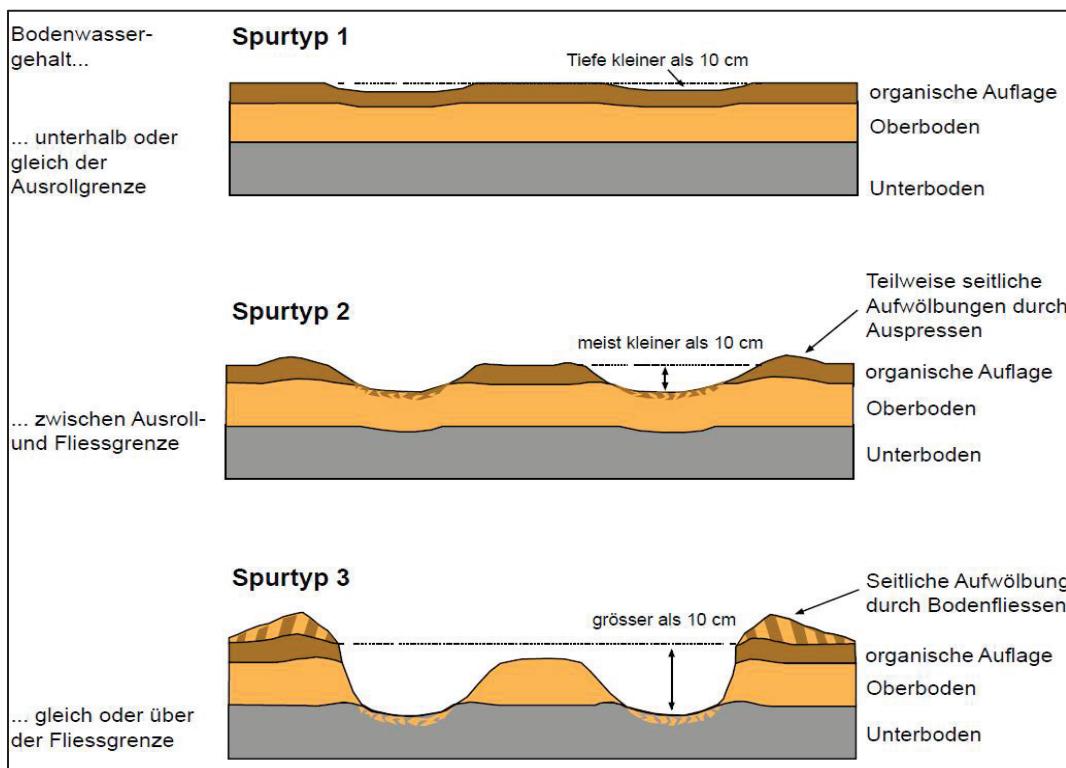


Abbildung 4: Merkmale der drei Spurtypen (Lüscher et al. 2016, S. 54).

Spurtyp 1 hat eine Spurtiefe von 5 – 10 cm und zeigt eine leichte Beeinträchtigung des Bodens, sodass die Horizontabfolge nicht gestört wird (Lüscher et al. 2016, S. 53ff.). Böden ohne anthropogenen Einfluss verfügen über eine natürlichen und klare Horizontabfolge. Wird diese Abfolge vermischt, ändert sich der Aufbau des Bodens erheblich (Lüscher et al. 2016, S. 32). Dies geschieht bei Spurtyp 1 nicht. Hierbei ist der Boden elastisch verformt, die Verformung ist unter guten Bedingungen reversibel. Bei Spurtyp 2 ist die Spurtiefe weniger als 10 cm und es treten neben der Sackung, also der Verdichtung nach unten hin, zusätzlich seitliche Aufwölbungen auf. Es liegt eine mittlere Bodenbeeinträchtigung vor, was bedeutet, dass der Boden plastisch verformt wurde und die Schädigung zu Teilen nicht mehr reversibel ist. Die Bodenstruktur wurde nicht vollständig zerstört, der Oberbodenaufbau aber beeinträchtigt. Spurtyp 3 hingegen stellt eine Spurtiefe von über 10 cm dar. Der hohe Wassergehalt des Bodens führt zu einem seitlichen „Wegfließen“ dessen. Die Bodenhorizonte wurden dadurch

durchmischt und die seitlichen Aufwölbungen sind ausgeprägt. Es liegt eine viskoplastische Verformung vor, die nicht reversibel ist. Spurtyp 3 zeigt an, dass die Richtwerte überschritten sind und dementsprechend die Holzerne abgebrochen werden sollte (Lüscher et al. S. 2016, 53ff.). Die Beeinträchtigung bei Spurtyp 3 wurde durch die Untersuchung des Eindringwiderstandes deutlich. Dort waren Unterschiede der Widerstände zwischen den befahrenden und nicht befahrenden Standorten bis in eine Tiefe von 75 cm messbar (Lüscher et al. 2016, S. 82).

Ergänzend zu den Einteilungen in Spurtypen schlägt Borchert (2012) den Ausrolltest vor. Dieser sollte vor der Befahrung gemacht werden. Dabei wird etwas Boden zwischen den Händen ausgerollt. „Ist der Mineralboden so trocken, dass er sich in der Hand nicht zu einer Wurst ausrollen lässt, kann die Rückegasse ohne Bedenken befahren werden. Lässt er sich ausrollen, ist eine Sackungsverdichtung zu erwarten“ (Borchert 2012, S. 66). Eine Sackungsverdichtung entspricht einer Schadverdichtung. Ist diese zu erwarten, sollten die Spurtypen nach den jeweiligen Befahrungen bewertet werden. Verschmiert der Boden bei dem Versuch ihn auszurollen, weil er zu nass ist, ist eine Schadverdichtung wahrscheinlich. Als Konsequenz sollte der Boden ohne technische Hilfsmittel nicht mehr befahren werden (Borchert 2012, S. 66).

Bei der Einteilung der Spurtypen ist jedoch zu beachten, dass das Wurzelgeflecht im Boden die Bodentragsfähigkeit beeinflusst und sie zeitweise erhöht. Die Folge ist, dass die Verdichtung zunächst geringer erscheinen kann als sie tatsächlich ist. Reißt das Wurzelgeflecht jedoch nach anhaltender Belastung, erhöht sich die Verdichtungsempfindlichkeit und die Maschine sinkt ein (Borchert 2012, S. 66).

Verdichtungsempfindlichkeit nach Bodenart und Verdichtungsempfindlichkeitsklassen

Die Einteilung nach potentiellen Schadverdichtungsgefährdungsklassen (SVGK) und Verdichtungsempfindlichkeitsklassen (SM) ist ursprünglich ein Vorschlag aus Österreich für landwirtschaftlich genutzte Flächen. Hier werden sie dennoch kurz dargestellt, da sie, im Gegensatz zu den anderen Methoden, zum Ziel haben, eine einfache und schnelle Übersicht über die Empfindlichkeit der Böden darzustellen (Murer 2009, S. 8ff).

Die SVGK werden in Mecklenburg-Vorpommern im Bereich der Landwirtschaft bereits angewandt (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg Vorpommern o. J., S. 25 ff.). Sie teilen den Boden anhand des obersten Horizonts der Bodenkartierung in verschiedene Klassen ein. So soll eine einfache Übersicht über die potentiell verdichtungsgefährdeten Böden entstehen. Die Einteilung nach SM hingegen nimmt diese Klassifizierung als Grundlage und erweitert sie durch ein Zahlensystem mit Zu- und Abschlägen. Jede Bodenart bekommt festgelegte Zu- und Abschläge in den Kategorien bodenkundliche Feuchtestufen, Humusgehalt, Verfestigungsgrad bei Podsolen, Carbonatgehalt und Grobbodenanteil (Murer 2009, S.

8ff). Tabelle 1 dient dafür als Beispiel. Hier sind die Zu- und Abschläge der verschiedenen Bodenarten in der Kategorie „Bodenkundliche Feuchtestufen“ zu sehen. Nach Ermittlung der bodenkundlichen Feuchtestufe kann dort abgelesen werden, welcher Wert addiert oder subtrahiert werden muss. Nach der Festlegung aller Variablen ergibt sich ein Zahlenwert, anhand dessen der Boden in eine der sechs potentiellen Verdichtungsempfindlichkeitsklassen von „keine“ bis „äußerst hoch“ eingeteilt werden kann.

Auch wenn die SM bereits detaillierter und mehr Bezug zu den realen Bedingungen vor Ort aufweisen als die SVGK, gibt es an beiden Methoden Kritik. Die Einteilung sei oberflächig und ermögliche zwar eine strikte Abgrenzung und schnelle Übersicht, sie beziehe sich jedoch nicht auf die Gegebenheiten vor Ort (Murer 2009, S. 13ff). Gerade die SVGK setzen voraus, dass

Tabelle 1: Zu- und Abschläge die bodenkundlichen Feuchtestufen betreffend (Murer 2009, S. 11).

Bodenart des Feinbodens nach AG BODEN	Bodenkundliche Feuchtestufe									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sl3, St2	-2	-1	-1	-	-	-	-	-	+1	+2
Su4, St3, Slu, Sl4	-2	-2	-1	-	-	-	-	+1	+1	+2
Ut2, Us, Uu	-2	-2	-1	-1	-	-	-	+1	+2	+2
Ts4, Ls4	-3	-2	-1	-1	-	-	-	+1	+2	+3
Ls3, Lt2	-3	-2	-2	-1	-	-	-	+1	+2	+3
Ut3, Ut4, Ul3, Ls2, Lu, Tu4	-4	-3	-2	-1	-1	-	-	+1	+2	+3
Lts, Lt3, Tu3, Ts3	-3	-2	-2	-1	-1	-	-	+1	+2	+3
Tu2, Ts2, Tl, Tt	-4	-4	-3	-2	-1	-	-	+1	+2	+2

es genaue Bodenkartierungen gibt. In der Realität seien diese jedoch häufig nicht ausreichend detailliert und die Böden oft nicht homogen auf einem Standort (Murer 2009, S. 31). Laut Murer (2009) ist es deshalb nicht zu empfehlen, den Boden nur auf Grundlage der Bodenkartierung zu kategorisieren.

Das Informationssystem ProFor

Ein anderer Ansatz wurde von Ziesak (2004) in seiner Dissertation erarbeitet. Es wurde ein Informationssystem entwickelt, dass die Belastungsgrenzen des Bodens in Abhängigkeit des Bodens, des Wassergehalts und des Fahrzeuges ermittelt. Dabei ging es vor allem um verlässliche Werte und eine hohe Praxistauglichkeit.

Die genaue Einbindung der Datenquellen in das Informationssystem wird an dieser Stelle nicht weiter erläutert, da sie für die Erklärung des dessen keine Rolle spielen.

Die Nutzer:innen von ProFor pflegen in das Programm Daten über den Boden und das Ernefahrzeug ein. Daraus ermittelt ProFor den höchsten tolerierbaren Wassergehalt des Bodens. Bis zu diesem Wert ist eben jener Boden ohne starke Beeinträchtigungen mit dem

angegebenen Fahrzeug zu befahren (Ziesak 2004, S. 76). Die notwendigen Bodendaten können die Nutzer:innen entweder in den Standorterkundungswerken der Bundesländer finden oder, wenn dies nicht zur Verfügung steht, mit der „Fingerprobe“ vor Ort ermitteln (Ziesak 2004, S. 94). Dabei wird Bodenmaterial zwischen den Finger zerrieben und anhand der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) eingestuft (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 142 ff.). Die Funktionalität und Genauigkeit von ProFor wurde durch mehrere Testanwendungen in Nordrhein-Westfalen sichergestellt (Ziesak 2004, S. 86). Bisher gibt es nur die Möglichkeit, die Daten zu dem vorliegenden Boden und der Maschine einzupflegen und den maximal tolerierbaren Wassergehalt daraufhin zu ermitteln. Es soll in Zukunft unter anderem möglich sein, die Daten zum Boden und dessen aktuellen Wassergehalt anzugeben, um das größtmögliche Fahrzeug für die Befahrung als Ergebnis zu erhalten (Ziesak 2004, S. 95).

Organisation der Holzernte

Bei vielen der bisher aufgeführten Ansätze ist die Folge, dass vor Ort oder erst während der Holzernte festgestellt wird, dass der zu dem Zeitpunkt verdichtungsempfindliche Boden nicht weiter befahren werden sollte, um den Boden zu schonen. Bei der bisherigen Planung in der Forstwirtschaft würden in einem solchen Fall hohe Kosten auftreten, da die bestellten Arbeitskräfte und Maschinen untätig wären (Lüscher et al. 2016, S. 127). Zum einen sollten folglich die befahrungsempfindlichen Standorte in den voraussichtlich trockenen Perioden des Jahres befahren werden, um mögliche Ausfälle zu verhindern (Lüscher et al. 2016, S. 102). Zum anderen sollte die Holzernte so geplant werden, dass es Ausweichflächen gibt, sodass kurzfristig auf den Zustand des Bodens reagiert und die Holzernte trotzdem an anderer Stelle durchgeführt werden kann (Borchert 2012, S. 67). Ist die Arbeitsvorbereitung, die Planung und Organisation der Holzernte ausführlich genug, kann durch das Bereitstellen von Ausweichflächen ein Anfallen von Kosten verhindert werden (Lüscher et al. 2016, S. 127).

3. Methodik

Neben der vorangegangenen Zusammenstellung einiger Beispiele bisheriger Ansätze zur Vermeidung oder Feststellung von Bodenverdichtung, werden im kommenden Teil dieser Arbeit verschiedene praktische Untersuchungen im Feld und im Labor zu dem Thema durchgeführt und ausgewertet. Als Untersuchungsgebiet dient dabei ein vermutlich verdichtungsempfindlicher Forststandort in Mecklenburg-Vorpommern. Dabei wurden einige der in Kapitel 2 beschriebenen Ansätze genutzt, diese dann mit der technischen Umsetzbarkeit der vorhandenen Möglichkeiten der Hochschule Neubrandenburg abgewogen und schließlich so ausgewählt, dass sie sich in den zeitlichen Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit einfügen ließen. Ziel

war es zum einen, einfache praxisnahe Methoden aus anderen Bereichen auf einem Forststandort auszutesten und zum anderen herauszufinden, inwieweit die bisherige Belastung den Boden beeinträchtigt hat und warum dieser Standort verdichtungsempfindlich ist. Die Untersuchungen erfolgten in zwei Schritten. Zunächst wurde sich in einer Voruntersuchung mit dem Gelände vertraut gemacht, erste Versuche durchgeführt und diese anschließend auf ihre Aussagekraft und Praktikabilität geprüft, um letztlich einen Arbeitsplan für die eigentliche Hauptuntersuchung aufstellen zu können.

Zur Beschreibung der Standorte werden die Begriffe ungestörter und gestörter Bereich genutzt. Der gestörte Bereich ist in dieser Arbeit der befahrende Bereich, also die Rückegasse. Es wird aufgrund der Richtlinie zur Feinerschließung in MV (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004) davon ausgegangen, dass lediglich die Rückegassen und Forstwege befahren werden. Der nicht befahrende Bereich liegt entsprechend zwischen den Rückegassen und bildet den ungestörten Bereich.

3.1 Standortbeschreibung

Das Untersuchungsgebiet gehört zu dem Forstamt Dargun und liegt in dem Revier Fürstenhof. Es ist in Besitz der Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern. Die Fläche liegt nord-westlich der Ortschaft Finkenthal (s. Abbildung 5) zwischen den Städten Gnoien und Dargun im Landkreis Rostock in Mecklenburg-Vorpommern (Klötz 2015). Der Boden ist eiszeitlich geprägt; er besteht aus Geschiebelehm beziehungsweise Geschiebemergel der Grundmoräne (Geologische Karte Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtskarte 1:500.000, herausgegeben von Geologischen Landesamt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin 1994). Den tiefsten Punkt bildet eine Freifläche, die auf der Abbildung in einem hellen Gelb dargestellt ist, das Gelände der Untersuchung ist dementsprechend abschüssig in Richtung Norden. Zu erwarten sind dort nach der Bodenübersichtskarte 1:200.000 die Bodentypen Parabraunerde und Parabraunerde-Pseudogleye.

Anzeichen für die Befahrungsempfindlichkeit zeigen sich sowohl bei der Betrachtung der Rückegassen vor Ort, als auch in den standortkundlichen Kurzgutachten der Landesforste Mecklenburg-Vorpommern. Laut diesem wechselt der Wasserhaushalt dort stark, wodurch es nach starken Niederschlägen zu einer hohen Befahrungsempfindlichkeit kommt (Klötz 2015). Diese könnte in Zukunft noch weiter verstärkt werden, da der Niederschlag in den letzten Jahren in Mecklenburg-Vorpommern zugenommen hat und auch für die Zukunft ein weiterer Anstieg in allen Teilen des Jahres prognostiziert wird (Deutscher Wetterdienst 2018, S. 22 ff.).

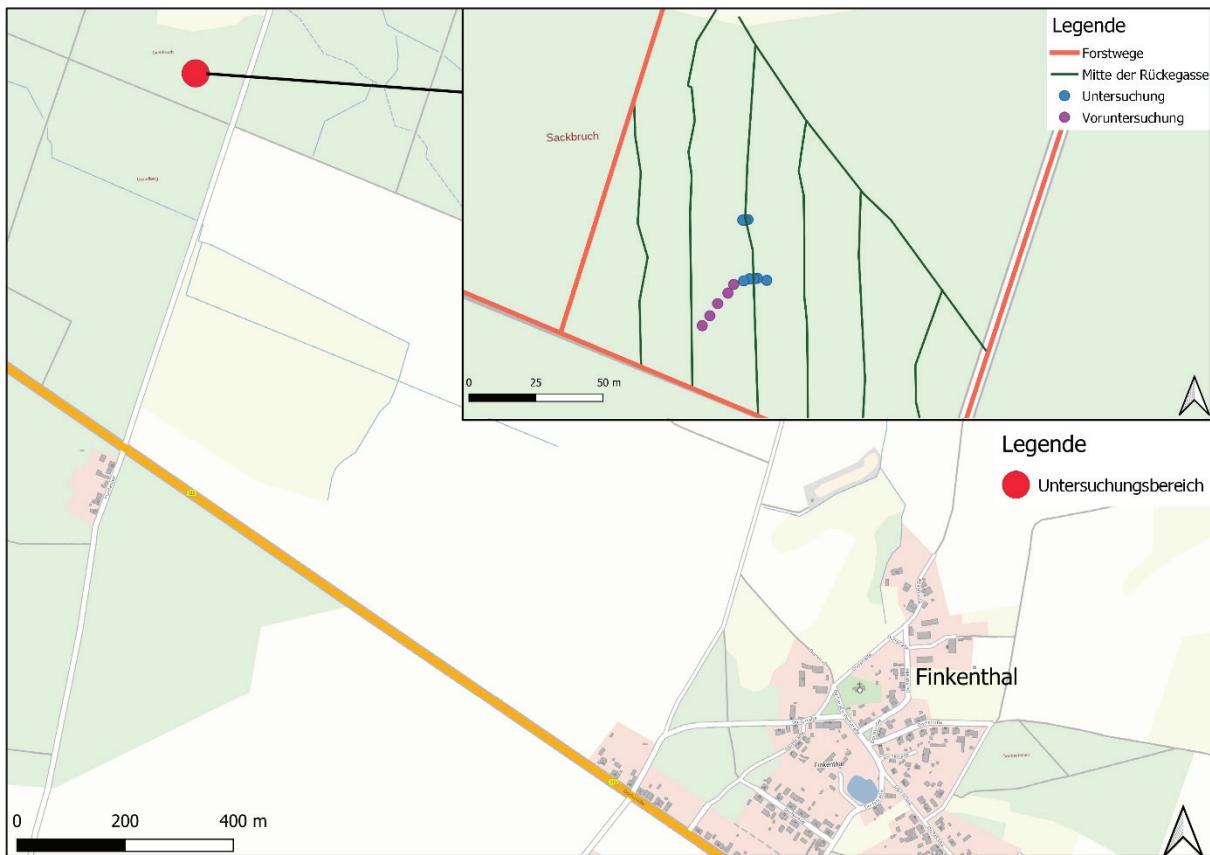


Abbildung 6: Übersichtskarte. Rückgassen eingezeichnet nach einem selbst berechneten DGM 0,4 und drei graphische Ableitungen im Koordinatensystem EPSG:5650 (Stöckmann, 2021). Kartengrundlage: © GeoBasis-DE / BKG (2022).

Forstlich genutzt wird die Fläche durch die Bepflanzung, Pflege und Ernte vor allem der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) (Klötz 2015). Dabei erfolgte der letzte Eingriff bis zum Zeitpunkt dieser Arbeit im Jahr 2015.

Es wurde ein manueller Holzeinschlag vorgenommen und das Holz dann mit Hilfe eines Forwarders Typ: Ponsse Wisent (s. Abbildung 6), einem 8-Rad Tragerückschlepper von 17.300 kg, einer maximalen Tragelast von 12.000 kg und einer Bereifung mit 75 cm breiten Radialreifen, abtransportiert (Gottlob 2021).



Abbildung 5: Forwarder Ponsse Wisent (Bildquelle: <https://www.herzog-reinhardt.de/forsttechnik/ponsse-maschinen/forwarder> [letzter Zugriff 03.02.2022]).

3.2 Ablauf

Die Untersuchungen erfolgten in zwei Schritten. Im ersten, der Voruntersuchung, wurde zum einen das Ziel verfolgt, die Übertragbarkeit einfach zu bedienender und schnell auswertbarer Methoden aus anderen Bereichen, wie der Landwirtschaft, auf den Forststandort zu prüfen. Zum anderen sollten Versuche zur Darstellung des vorhandenen Bodens durchgeführt werden, um einen ersten Eindruck des Untersuchungsgebietes sowie der Versuche zu bekommen. Die daraus erlangten Erkenntnisse ergaben das weitere Vorgehen für die Hauptuntersuchung. Der Schwerpunkt lag dabei, auf Grund mangelnder Übertragbarkeit der Versuche zur Feststellung der Befahrbarkeit, auf einer Untersuchung des Bodens. Es sollte herausgearbeitet werden, inwiefern sich der Boden durch die bisherige Befahrung der Rückegasse verändert hat, warum der Boden in dem Gebiet verdichtungsempfindlich ist und ob sich daraus mögliche Konsequenzen für die Holzernte ableiten lassen.

Die Koordinaten der im Folgenden vorgestellten Untersuchungspunkten wurden mit einem ppm10xx GNSS Sensor der Firma ppm GmbH in Kombination mit einem Samsung Galaxy Tab Active2 aufgenommen. Sie wurden mit dem Programm QField (Version 1.9.6) erfasst und festgehalten, um anschließend mit dem Plug-In Q-Field-Sync in ein bestehendes QGIS-Projekt übertragen zu werden.

Voruntersuchung

Für die Voruntersuchung wurde eine 20 Meter lange Probenstrecke ausgewiesen (s. Abbildung 7). Sie befindet sich zwischen zwei Rückegassen und gilt als ungestörter Bereich, da

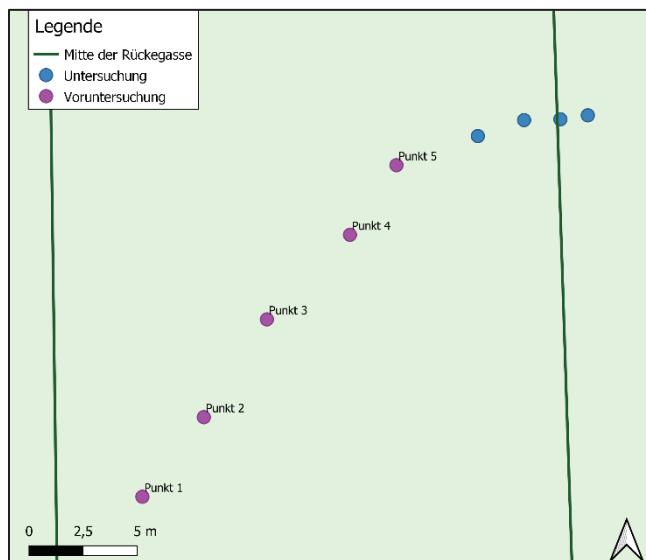


Abbildung 7: Übersicht Untersuchungspunkte der Voruntersuchung. Rückegassen eingezeichnet nach einem selbst berechneten DGM 0,4 und drei graphische Ableitungen im Koordinatensystem EPSG:5650 (Stöckmann, 2021). Kartengrundlage: © GeoBasis-DE / BKG (2022).

davon ausgegangen wird, dass lediglich die Rückegassen befahren werden. Insgesamt liegen auf der Probenstrecke fünf Punkte in einem Abstand von jeweils 5 Metern zueinander. Gekennzeichnet sind sie mit den Bezeichnungen Punkt 1, Punkt 2, Punkt 3, Punkt 4, und Punkt 5. Insgesamt wurden vier verschiedene Versuche an den Punkten durchgeführt. Vor Ort erfolgten Versuche mit einer dynamischen Fallplatte und einem Penetrometer. Ausgewählt wurden diese beiden Verfahren, da sie, sollten sie sich als umsetzbar und zuverlässig erweisen, eine schnelle Einordnung des Zustandes

des Bodens noch vor Ort ermöglichen. Nach der Aufstellung von Grenzwerten könnten genaue und eindeutige Aussagen über die Befahrbarkeit des Bodens getroffen werden. Das Penetrometer findet bisher vor allem in der Landwirtschaft Verwendung, die dynamische Fallplatte stammt aus dem Bereich des Erdbaus oder des Straßenbaus. Ziel dieser beiden Versuche war es, die Übertragbarkeit jener in die Forstwirtschaft zu überprüfen und eine erste Einschätzung abzugeben, ob Messungen nach diesem Verfahren weiterverfolgt werden sollten. Zu dem Zweck wurden Versuche mit der dynamischen Fallplatte an den Punkten 1 bis 5 jeweils zwei Mal durchgeführt. Da die dynamische Fallplatte eine ebene Auflagefläche benötigt, wurden bei Punkt 1 bis Punkt 3 die aufliegenden Blätter entfernt. Die Ergebnisse waren jedoch so schwankend, dass bei Punkt 4 und Punkt 5 zusätzlich 1 – 2 cm des oberen Bodens abgetragen wurden, um eine gleichmäßige Auflagefläche der Platte zu ermöglichen. Das Penetrometer wurde als Ersatz für die, bereits in Kapitel 2.2 erwähnte, PANDA-Sonde genutzt. Diese wird vor allem in der Schweiz angewandt, es handelt sich dabei, wie bei dem Penetrometer, auch um eine Rammsonde. Das Penetrometer wurde zunächst mit dem Konus Nr. 2 mit einer Basisoberfläche von 2 cm^2 an Punkt 1 drei Mal genutzt. Da der gemessene Eindringwiderstand die Möglichkeiten des Gerätes überstieg, wurde der Konus gewechselt. Anschließend wurden fünf Messungen an Punkt 2 mit dem Konus Nr. 1 (Basisoberfläche 1 cm^2) durchgeführt.

Um im Labor den Feinkornanteil und die Trockendichte zu bestimmen, wurden im Feld Bodenproben entnommen. Zunächst wurden an Punkt 1, 3 und 5 mit einem 1 m langem Pürckhauer Bohrungen gemacht. Ein Pürckhauer ist ein Hohlmeißelbohrer, der in den Boden geschlagen wird, um anschließend Bodenmaterial herauszuheben, ohne den Aufbau des Bodens zu zerstören (s. Abbildung 8). Anhand der Farbe, Konsistenz und des Kalkgehaltes wurden noch vor Ort die Bodenhorizonte abgegrenzt, protokolliert und mit Hilfe der Fingerprobe eine Ansprache



Abbildung 8: Pürckhauer inklusive entnommenen Bodenmaterial. Foto: L. Schütte.

der Bodenart durchgeführt (s. Kapitel 2.2). In der untersten Schicht ließ sich bei allen drei Punkten Kalk unter Verwendung von Salzsäure nachweisen. Aus jedem Horizont wurde abschließend Bodenmaterial aus dem Pürckhauer gesammelt. Zusätzlich wurde an Punkt 3 und Punkt 5 Material mit Hilfe von Zylindern entnommen, aus den oberen 20 cm ein $868,59 \text{ cm}^3$ großer Zylinder, in einer Tiefe von ungefähr 35 – 45 cm jeweils ein 100 cm^3 großer Zylinder. Die größeren Zylinder haben den Vorteil mehr Bodenmaterial zu beinhalten. Die größere Probe weist ein realeres Bild der Zusammensetzung und Verdichtung auf als kleinere Proben und unterliegt einer geringeren Anfälligkeit gegenüber Messungenauigkeiten. Die Entnahme

ist jedoch auch deutlich aufwendiger, sodass in den tieferen Bereichen nach einer Abwägung von Aufwand und Nutzen die kleineren Zylinder genutzt wurden. Alle mit Hilfe der Zylinder entnommenen Proben wurden auf ihre Trockendichte untersucht. Proben aus allen Tiefen bei Punkt 3 und Punkt 5 wurden mittels Abschlämnen auf ihren Feinkornanteil hin untersucht. Unter Feinkorn wird der Anteil im Boden, der aus Schluff und Ton besteht, also alle Körner mit einem geringeren Durchmesser als 0,063 mm, verstanden. Körner größer als das werden als Sandkorn bezeichnet (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 141). Wichtig ist der Feinkornanteil vor allem, weil ein erhöhter Feinkornanteil auch eine erhöhte Verdichtungsempfindlichkeit nach sich zieht. Der Humusgehalt wurde bei allen Horizonten der Probenstrecke ab einer Tiefe von 20 cm bestimmt. Auf Grund des hohen Anteils an Wurzeln wurde er jedoch lediglich anhand der Farbe bestimmt.

Zusätzlich wurde aus dem Bereich der angrenzenden Rückegasse eine Probe (RG1) aus den oberen 20 cm des Bodens mit einem Spaten entnommen. Diese wurde mittels Sieb- / Schlämmanalyse auf ihre Korngrößenverteilung untersucht. Dies diente vor allem des Kennlernens des Versuchs selbst.

In Tabelle 2 sind alle durchgeführten Versuche an den jeweiligen Punkten zusammengefasst, wobei die Anzahl der Durchführungen außer Acht gelassen wurde.

Tabelle 2: Übersicht zu allen in der Voruntersuchung durchgeführten Versuchen je Punkt.

Versuch	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	RG1
Penetrometer	X	X	X	X	X	
dynamische Fallplatte	X	X	X		X	
Trockendichte			X		X	
Feinkornanteil			X		X	
Pürckhauer	X		X		X	
Humusgehalt (Farbe)			X		X	
Sieb- / Schlämmanalyse						X

Hauptuntersuchung

In Abbildung 9 sind die Untersuchungspunkte der Hauptuntersuchung – gekennzeichnet mit HP1 – HP8 (HP entspricht Haupt-Punkt) – eingezeichnet. Die Punkte teilen sich in zwei Probenstrecken. Die erste Entnahme erfolgte auf Höhe der Voruntersuchung mit fünf Punkten, die zweite weiter nördlich mit drei Punkten. Angelehnt an die Richt- und Prüfwerte aus dem Positionspapier von Buchter et al. (2004) wurde eine Maximaltiefe von 60 cm gewählt. Das Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (2004) spricht von einer Mindesttiefe von 40 cm bei Schadverdichtung, weshalb in der Tiefe von

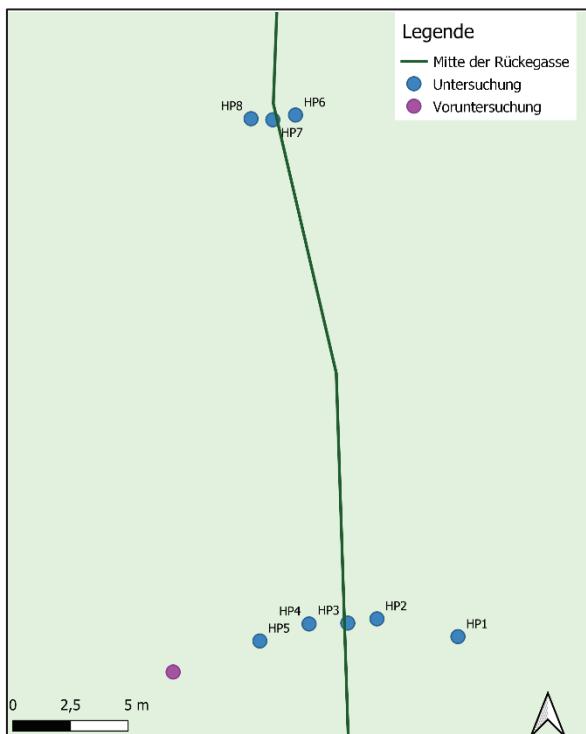


Abbildung 9: Übersicht Untersuchungspunkte der Hauptuntersuchung. Rückgassen eingezeichnet nach einem selbst berechnetes DGM 0,4 und drei graphische Ableitungen im Koordinatensystem EPSG:5650 (Stöckmann, 2021). Kartengrundlage: © GeoBasis-DE / BKG (2022).

liegen HP1 und HP5 außerhalb des gestörten Bereichs, HP2 und HP4 auf der Mitte der jeweiligen Fahrspuren auf der Rückegasse und HP3 auf der erhöhten Mitte zwischen diesen Spuren. Die Rückegasse wurde exemplarisch ausgewählt und hebt sich optisch nicht von dem Durchschnittszustand der vorhandenen Rückgassen ab.

Die zweite Untersuchungsreihe bestehend aus HP6, HP7 und HP8 liegt nördlich der ersten auf der gleichen Rückegasse. Nach dem Abwiegen von Zeitaufwand und Nutzen wurde auf

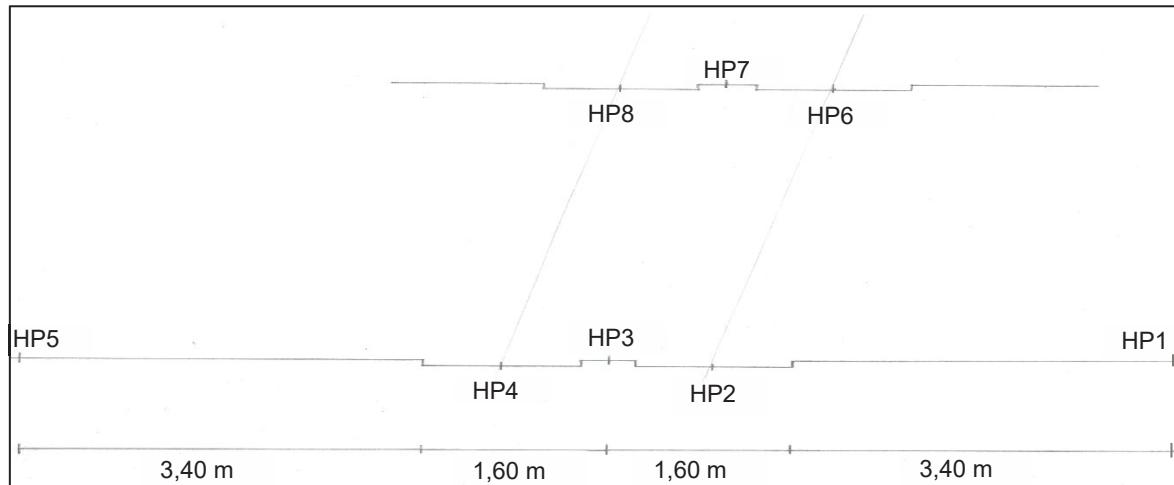


Abbildung 10: Schnitt der Untersuchungspunkte der Hauptuntersuchung.

30 – 40 cm ebenfalls eine Probe entnommen wurde. Zusätzlich erfolgte eine Entnahme aus den oberen 20 cm.

Der Fokus der Hauptuntersuchung lag darauf, zu klären, wie sich die bereits bestehende Fahrspur von dem ungestörten Bereich unterscheidet. Zusätzlich wurde die Fahrspur von der weniger befahrenden Mitte der Rückegasse getrennt und die Unterschiede an diesem Punkt untersucht. Es sollte geklärt werden, wie stark sich das bisherige Befahren des Bodens in den Messwerten widerspiegelt, warum der Boden so verdichtungsempfindlich ist und ob sich daraus mögliche Lösungen für den zukünftigen Umgang mit der Holzernte ableiten lassen.

Abbildung 10 stellt einen skizzierten Schnitt der beiden Probenreihen dar. HP1, HP2, HP3, HP4 und HP5 bilden die erste Reihe, dabei lie-

die weitere Untersuchung des ungestörten Bereichs verzichtet. HP6 und HP8 liegen auf der Mitte der jeweiligen Fahrspur, HP7 auf dem erhöhten Bereich dazwischen.

An allen acht Punkten wurden in einer Tiefe von 0 – 20 cm mit Hilfe eines 868,59 cm³ großen Zylinders Bodenmaterial entnommen. In den Tiefen 30 – 40 cm und 50 – 60 cm wurden an allen Punkten Bodenmaterial in 100 cm³ großen Zylindern entnommen. Alle Proben wurden auf ihre Trockendichte und HP1 – HP3 auf ihre Korngrößenverteilung mittels Sieb- / Schlämmanalyse untersucht. Dieses Verfahren wurde gewählt, da es, im Gegensatz zum Abschlämnen, nicht nur den Feinkornanteil ergibt, sondern die genaue Korngrößenverteilung. Da die dazugehörige Sedimentation 24 Stunden exklusive der Vor- und Nachbereitung dauert, wurde diese lediglich je einmal für den ungestörten Bereich, die Fahrspur und die Mitte der Rückengasse durchgeführt. Zusätzlich wurden die Proben der oberen 20 cm bei HP1, HP2 und HP3 der Humusgehalt bestimmt. Dabei wurden alle erkennbaren Wurzeln vor dem Versuch händisch aus den Proben gesammelt, um einen Einblick in den reellen Humusgehalt im Boden zu haben, der nicht durch den hohen Anteil an Wurzeln verfälscht wird. Trotzdem sind die Ergebnisse des Humusgehaltes somit nur Annäherungen und keine repräsentativen Aussagen.

Eine Übersicht aller durchgeführten Versuche der Hauptuntersuchung findet sich in Tabelle 3. Die Untersuchung der Trockendichte und der Kornverteilung erfolgte jeweils in drei verschiedenen Tiefen.

Des Weiteren wurde westlich von HP 8 im ungestörten Bereich eine Mischprobe aus der Tiefe von 20 – 60 cm entnommen, um einen Proctor-Versuch daran durchzuführen.

Tabelle 3: Übersicht zu allen in der Hauptuntersuchung durchgeführten Versuchen je Punkt.

Versuch	HP1	HP2	HP3	HP4	HP5	HP6	HP7	HP8
Trockendichte	X	X	X	X	X	X	X	X
Kornverteilung	X	X	X					
Humusgehalt (Glühverlust)	X	X	X					

3.3 Beschreibung der Versuche

Dynamische Fallplatte

Die dynamische Fallplatte ist ein Gerät zur Bestimmung der Bodenverdichtung. Sie wird vor allem genutzt, um die Tragfähigkeit bei Böden festzustellen, und kommt damit beispielsweise bei Arbeiten im Erd- und Straßenbau zum Einsatz. Die dynamische Fallplatte besteht aus drei Teilen: eine Lastplatte mit einem Durchmesser von 30 cm, einer Belastungsvorrichtung inklusive eines 10 kg schweren Gewichts und einem Messcomputer (s. Abbildung 11). Es wurde ein Gerät der Firma Wille Geotechnik mit einer Fallhöhe von 74 cm genutzt. Bei Durchführung des Versuchs wird das Fallgewicht drei Mal aus der immer gleichen Fallhöhe auf die Lastplatte fallengelassen, wobei das Messgerät, mit Hilfe eines sich in der Lastplatte befindenden Beschleunigungssensors, das Verformungsmodul (Evd) errechnet. Der Wert wird in Meganewton pro Quadratmeter (MN/m^2) angegeben.



Abbildung 11:
Abbildung der
genutzten dyna-
mischen Fall-
platte ohne den
Messcomputer.
Foto: L. Schütte.

Penetrometer

Das Penetrometer wird vor allem in der Landwirtschaft genutzt und gibt den Eindringwiderstand des Bodens an. Am oberen Ende des Penetrometers ist ein Manometer angebracht, an dem sich der Manometerwert der Messung ablesen lässt. Darunter befinden sich zwei Handgriffe und der Messkörper. Mit dem Messkörper sind über einen Plunger und eine Verlängerungsstange eine Sondierstange und ein Konus verbunden. Die Größe des Konus wird je nach Bodenart ausgewählt, es stehen dabei vier verschiedene Größen zur Verfügung. Je höher die Verdichtung ist, desto kleiner sollte der gewählte Konus sein. Das Penetrometer wird nach Auswahl des passenden Konus mit einer konstanten Geschwindigkeit in den Boden gedrückt und alle 5 cm der Manometerwert protokolliert. Es wurde ein Penetrometer der Firma Eijkelkamp für Messungen bis zu 1 m Tiefe genutzt. Das Manometer gibt dabei sowohl den gerade auftretenden Widerstand als auch den maximalen Widerstand der Messung an. Die Einheit des Manometerwertes ist Kilonewton (kN). Der Eindringwiderstand kann anschließend mit Hilfe folgender Formel errechnet werden und wird in Newton (N) angegeben:

$$\text{Eindringwiderstand} = \text{Manometerwert} / \text{Basisoberfläche Konus}$$

Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte (ρ) wird in g/cm³ angegeben und ergibt sich aus der „Trockenmasse einer Bodenprobe in natürlicher Lagerung und ihrem Volumen“ (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 412). Die Bestimmung erfolgte nach DIN 18125-1:1997-08. Da für die Errechnung der Trockenrohdichte ein definierbares Volumen (V) der Probe von Nöten ist, wurden die Proben mit dem Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18125-2:1999-08 entnommen. Es konnten dementsprechend nur Proben untersucht werden, die mit einem Zylinder entnommen wurden. Diese Proben wurden bei 105°C getrocknet und anschließend die Trockenmasse (m_d) gewogen. Die Trockenrohdichte wurde mit folgender Formel errechnet:

$$\rho = m_d / V$$

Feinkornanteil / Korngrößenverteilung

Zur Bestimmung der Kornverteilung wurden zwei verschiedene Verfahren genutzt, das Abschlämnen und die Sieb- / Schlämmanalyse der Bodenprobe. Das Abschlämnen erfolgte angelehnt an DIN ISO 11277:2002-08. Mit diesem Verfahren konnte der Feinkornanteil bestimmt werden.

Um die Korngrößenverteilung genauer ermitteln und die Bodenart bestimmen zu können, erfolgten teilweise eine Sieb- / Schlämmanalyse anstatt des Abschlämmens. Beides wurde in Anlehnung an DIN 18123:1996:11 durchgeführt. Für die Siebung erfolgte eine Maschinensiebung mit dem Gerät Haver EML 200 digital N der Firma Haver&Boecker mit einer Siebdauer von 10 Minuten. Die Sedimentation wurde mit Hilfe eines Aräometers durchgeführt, welches in festgelegten Abständen 24 Stunden lang abgelesen wurde.

Die gemessenen Werte der Siebung und Sedimentation wurde mit Hilfe des Programms GGU-Sieve (Version 16.10 08.12.2020) ausgewertet und grafisch dargestellt.

Humusgehalt

Als Humus bezeichnet man die Gesamtheit der organischen Substanz in einem Boden. Sie setzt sich zusammen aus den Streustoffen, Nichthumininstoffen und Huminstoffen, welche in stark wechselnden Zusammensetzungen auftreten (Scheffer und Schachtschabel 2008, S. 51).

Der Humusgehalt wurde bei der Voruntersuchung anhand der MUNSELL-Farbtafel 10YR 5/ und der KA5 (Ad-Hoc-AG Boden 2005, 110 ff.) bestimmt. Bei der Hauptuntersuchung erfolgte die Bestimmung durch einen Glühverlust nach DIN 18128:1190-11 für die Proben von HP1, HP2 und HP3 in den oberen 20 cm. Dabei wurde die jeweilige Probe nach Vorbereitung in einem Muffelofen bei 550°C vier Stunden geäugt, wonach der Humusgehalt in Masse-Prozent errechnet werden konnte.

Proctor-Versuch

Der Proctor-Versuch wurde nach DIN 18127:1997-11 durchgeführt. Er dient dazu eine kontrollierte Verdichtung einer Bodenprobe bei gleichbleibender Verdichtungsenergie durchzuführen, bei der nur die Variable des Wassergehaltes verändert wird. Der Versuch wurde mit Wassergehalten von 10 %, 12 %, 14 %, 16 % und 18 % durchgeführt.

Es wurde ein automatischer, das heißt motorisierter, Proctorverdichter Typ 760 der Firma Strassentest Baustoff-Prüfsysteme für den Versuch genutzt. Daraufhin erfolgte eine drei-teilige Verdichtung mit jeweils 25 Schlägen. Die erlangten Daten wurden mit Hilfe des Programms GGU-COMPACT (Version 9.00 15.02.2019) grafisch aufbereitet.

4. Ergebnisse

4.1 Voruntersuchung

Dynamische Fallplatte

Die Ergebnisse des Versuchs mit der dynamischen Fallplatte ergaben keine einheitlichen Werte. Das dynamische Verformungsmodul wies bei Punkt 1 in zwei Durchgängen einen Unterschied von 2,9 MN/m² auf (s. Tabelle 4). Bei späteren Versuchen ab Versuchsnummer 7 wurden durch die veränderte Durchführung (s. Kapitel 3.2) gleichmäßigere Ergebnisse erlangt. Das dynamische Verformungsmodul wies dabei zwischen zwei Messungen an einem Punkt nur einen Unterschied von 0,1 MN/m² auf.

Tabelle 4: Ergebnisse der Messungen mit der dynamischen Fallplatte; Voruntersuchung.

Punkt	Versuchsnummer	Mittlere Setzung [mm]	Dynamisches Verformungsmodul [MN/m ²]
1	1	7,5	3
	2	3,84	5,9
2	3	3,18	7,1
	4	4,1	5,5
3	5	4,92	4,9
	6	3,82	5,9
4	7	2,62	8,6
	8	2,63	8,5
5	9	3,78	5,9
	10	3,77	6

Penetrometer

Die mit dem Konus Nr. 2 durchgeführten Versuche ergaben einen hohen Eindringwiderstand auf. Wie in Tabelle 5 erkennbar ist, musste der Versuch mit der Versuchsnummer 1 ab einer Tiefe von 20 cm abgebrochen werden, da der Widerstand die Messleistung des Penetrometers überstieg. Mit dem Konus Nr. 1 konnten die Versuche bis zu einer Tiefe von 45 cm durchgeführt werden. Die Ergebnisse schwanken dabei je nach Versuchsnummer. So ist beispielsweise der höchste Wert bei Versuch Nummer 7 bei einer Tiefe von 30 und 35 cm mit 440 N/cm² erreicht. Bei Versuch Nummer 8 liegt der Wert bei 570 N/cm² in einer Tiefe von 35 cm.

Tabelle 5: Ergebnisse Versuch 1, 7 und 8 Penetrometer; Voruntersuchung.

Punkt	Versuchsnummer	Tiefe [cm]	Widerstand [N]	Konus-oberfläche [cm ³]	Eindringwiderstand [N/cm ²]
1	1	5	100	2	50
		10	200	2	100
		15	740	2	370
		20	-	2	-
2	7	5	100	1	100
		10	130	1	130
		15	180	1	180
		20	200	1	200
		25	400	1	400
		30	440	1	440
		35	440	1	440
		40	300	1	300
		45	330	1	330
2	8	5	100	1	100
		10	200	1	200
		15	350	1	350
		20	410	1	410
		25	550	1	550
		30	560	1	560
		35	570	1	570
		40	550	1	550
		45	500	1	500

Bodenhorizonte und -arten

In Tabelle 6 sind die Horizonte und Bodenarten aufgeführt, die sich aus der Einteilung der

Tabelle 6: Bodenhorizonte und Bodenarten; Voruntersuchung.

Punkt	Grenzen Bodenhorizonte in cm	Bodenart
1	0-16	
	16-45	SI3
	45-75	Ls4
	75-100	Ls4
3	0-12	
	12-25	SI3
	25-45	Ls4
	45-100	Ls4
5	0-14	
	14-40	SI3
	40-53	Ls4
	53-100	Ls4
Mitte der Rückegasse	0-20	
	20-60	
	60-92	
	92-100	

Probe aus dem Pürckhauer und der Fingerprobe ergeben haben. SI3 steht für einen mittel lehmigen Sand, Ls4 für einen stark sandigen Lehm. Der Unterschied zwischen den beiden Bodenarten liegt vor allem in ihrem Tonanteil. Ein mittel lehmiger Sand hat 8 – 12 Masseprozent (Ma%) Ton, wohingegen ein stark sandiger Lehm 17 – 25 Ma% hat. Trotzdem liegen die beiden Bodenarten in dem Feinbodenartendiagramm nah beieinander, das heißt sie sind sich in der Zusammensetzung sehr ähnlich.

Trockendichte

In einer Tiefe von 35 – 45 cm ergab sich eine Trockendichte von rund 1,7 g/cm³ an den Punkten 3 und 5 (s. Tabelle 7). An der Oberfläche hingegen lagen die Werte bei ungefähr 1,3 g/cm³. Die tieferen Proben wiesen demnach eine höhere Trockendichte auf als die Oberfläche.

Tabelle 7: Trockendichte Punkt 3 und Punkt 5; Voruntersuchung.

Punkt	Tiefe [cm]	ϱ_t [g/cm ³]	w [%]
3	0 - 20	1,362	14,3
	35 - 45	1,684	9,2
5	0 - 20	1,241	11,8
	34 - 45	1,71	10,7

Korngrößenverteilung

Die Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse des Abschlämmens. Der Boden an den beiden untersuchten Punkten bestand in allen Schichten bis zu einer Tiefe von 100 cm aus einem Feinkornanteil von um die 50 %. Beide Punkte waren sich in der Verteilung ähnlich.

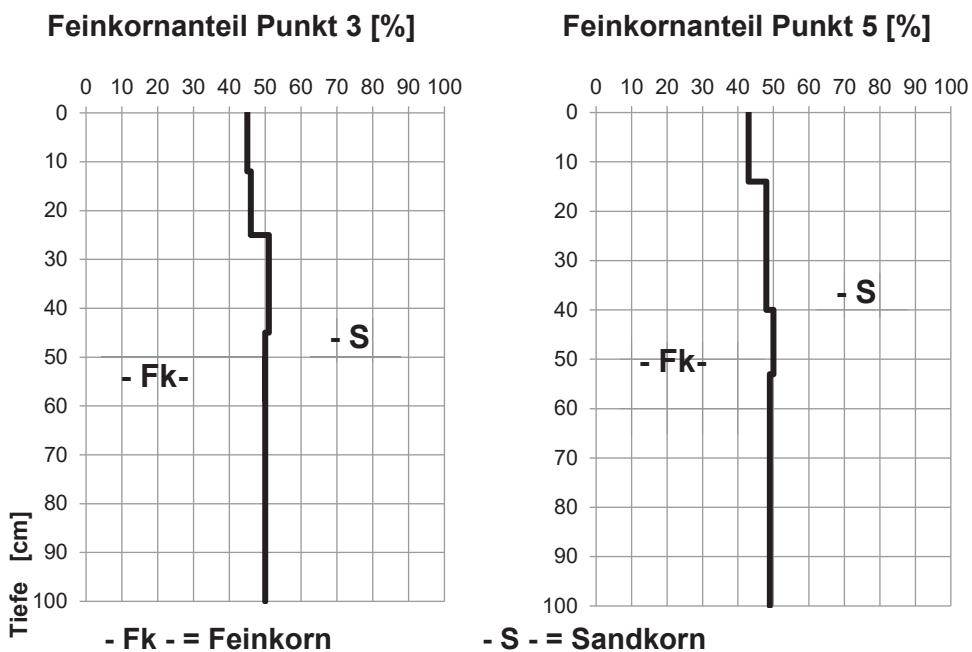


Abbildung 12: Diagramme über den Feinkornanteil an Punkt 3 und Punkt 5; Voruntersuchung.

Für die neben dem Abschlämmen durchgeführte Siebung und Sedimentation der Probe RG1 aus der Rückegasse erfolgte die Auswertung durch das Programm GGU-SIEVE. Aufgrund der Korngrößenverteilung ergab sich die Bodenart Ls4, ein stark sandiger Lehm, welcher zu den Normallehmern gehört (Ad-Hoc-AG Boden 2005, 142 ff.).

Humus

Der Humusgehalt der Proben wechselte nach der Bewertung der Farbe nach KA5 zwischen h1 – sehr schwach humos und h3 – mittel humos. Der Wert h1 steht dabei bei forstlicher Nutzung für unter 1 Ma% Humus, h3 für 2 – 5 Ma% (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 112). Bei Punkt 3 findet sich nach der Bestimmung anhand der MUNSELL-Farbtafel 10YR 5/ überall h1, außer in 12 – 25 cm Tiefe. Bei Punkt 5 hingegen war überall eine Einschätzung von h3 nachweisbar, außer in einer Tiefe von 53 – 100 cm, dort war es h1.

4.2 Hauptuntersuchung

Trockendichte

Die Ergebnisse des Versuchs zur Trockendichte sind in Tabelle 8 dargestellt. In einer Tiefe von 50 – 60 cm finden sich die Werte der ersten Probenstrecke (HP1 – HP5) in einer Spanne von 1,85 g/cm³ bis 1,88 g/cm³. Bei HP7 – HP8 liegen die Werte zwischen 1,64 g/cm³ und 1,73 g/cm³. Für die Tiefe 30 – 40 cm ergaben sich Trockendichten zwischen 1,73 g/cm³ und 1,93 g/cm³. Beide Probestrecken wiesen ähnliche Werte auf, lediglich HP2 bildet mit 1,93 g/cm³

einen höheren Wert als die übrigen Punkte. In den oberen 20 cm des Bodens sind größere Schwankungen ermittelt worden. Der ungestörte Bereich bei HP1 und HP5 ergab bei beiden Punkten den Wert $1,27 \text{ g/cm}^3$. Auf der Fahrspur der Rückegasse liegen die Werte zwischen $1,40 \text{ g/cm}^3$ und $1,54 \text{ g/cm}^3$, in der Mitte der Fahrspur bei $1,19 \text{ g/cm}^3$ und $1,29 \text{ g/cm}^3$.

Tabelle 8: Übersicht Trockendichte, Hauptuntersuchung.

HP	Tiefe [cm]	$\varrho_t [\text{g/cm}^3]$
HP1	0-20	1,27
	30-40	1,75
	50-60	1,85
HP2	0-20	1,40
	30-40	1,93
	50-60	1,88
HP3	0-20	1,19
	30-40	1,77
	50-60	1,85
HP4	0-20	1,54
	30-40	1,78
	50-60	1,86

HP	Tiefe	$\varrho_t [\text{g/cm}^3]$
HP5	0-20	1,27
	30-40	1,73
	50-60	1,87
HP6	0-20	1,42
	30-40	1,77
	50-60	1,64
HP7	0-20	1,29
	30-40	1,75
	50-60	1,73
HP8	0-20	1,45
	30-40	1,80
	50-60	1,70

Humus

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse des Versuchs zum Glühverlust aufgeführt. Der ungestörte Bereich (HP1) weist mit 6,13 % einen geringeren Humusgehalt als HP2 und HP3 auf. Die Proben aus der Fahrspur der Rückegasse und der Mitte der Rückegasse weisen einen Humusgehalt zwischen 8,08 und 8,18 % auf. Da es sich um einen Standort mit forstlicher Nutzung handelt, werden alle drei Punkte nach der KA5 als „stark humos“ mit dem Kurzzeichen h4 eingestuft (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 112).

Tabelle 9: Humusgehalt, Hauptuntersuchung.

HP	Tiefe [cm]	Glühverlust [%]	Einstufung nach KA5
HP1	0-20	6,13	h4
HP2	0-20	8,08	h4
HP3	0-20	8,18	h4

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung teilt sich in vier Bereiche. Körner unter einer Größe von 0,002 mm bilden Ton, 0,002 – 0,063 mm große Körner gelten als Schluff, 0,063 – 2 mm als Sand und alle Körner größer als 2 mm gehören zu der Kategorie Kies (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 141).

Die Bestimmung der Kornverteilung der drei Punkte HP1, HP2 und HP3 erfolgte in den drei beprobten Schichten. Die Verteilung ist in Tabelle 10 dargestellt. Abbildung 13 zeigt

beispielhaft das durch GGU-Sieve erstellte Diagramm zur Auswertung der Kornverteilung der Sieb- / Schlämmanalyse für HP1.

Tabelle 10: Kornverteilung von HP1, HP2 und HP3; abgelesen von den mit GGU-Sieve erstellten Diagrammen.

HP	Tiefe [cm]	Tonanteil [%]	Schluffkorn-anteil [%]	Sandkornanteil [%]	Kieskorn [%]
HP1	0-20	5	23	71	1
	30-40	17	26	50	7
	50-60	9	23	65	3
HP2	0-20	6	39	53	2
	30-40	17	34	47	2
	50-60	18	33	47	2
HP3	0-20	8	37	53	2
	30-40	21	34	44	1
	50-60	16	28	54	2

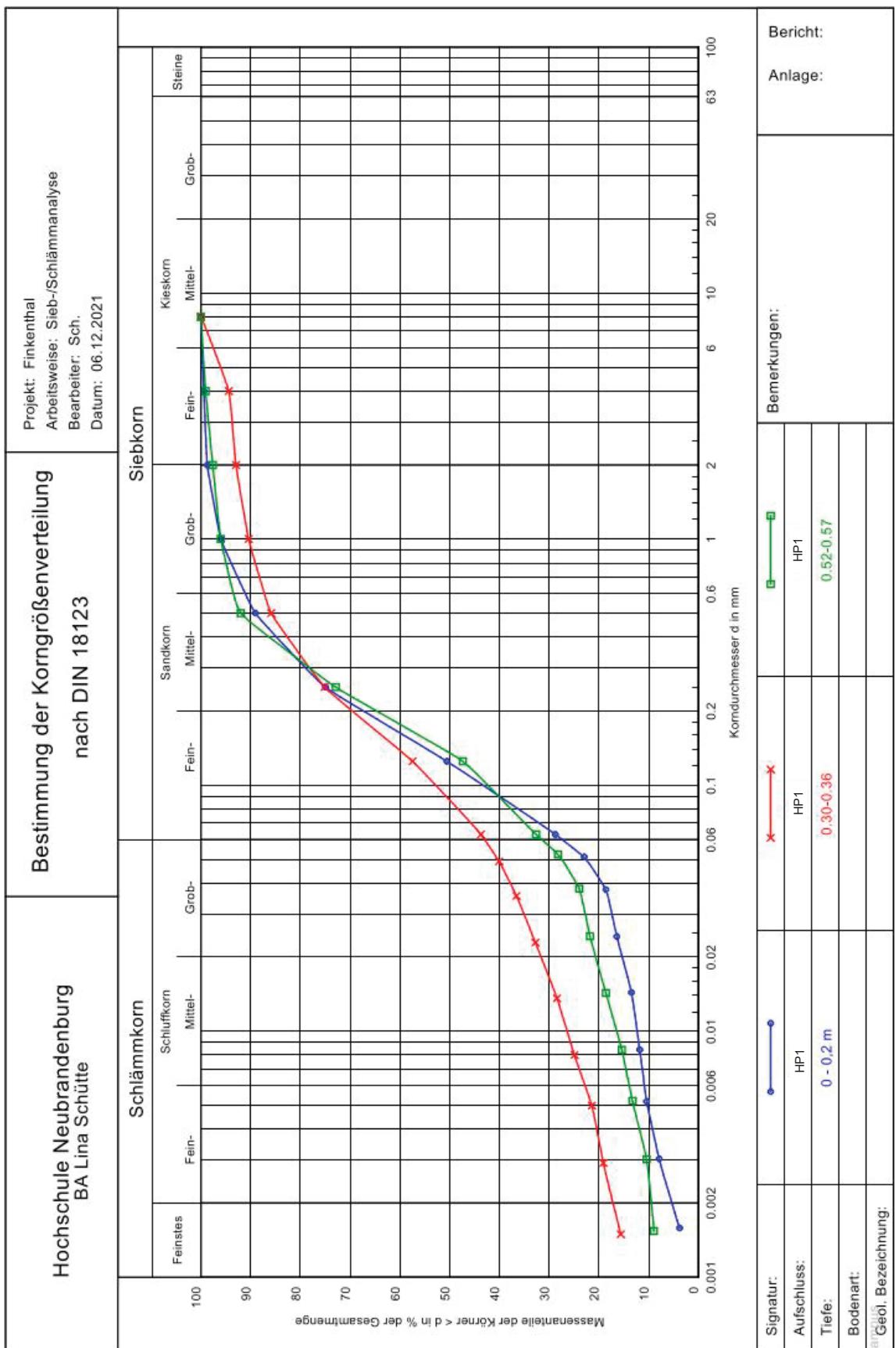


Abbildung 13: Diagramm Korngrößenverteilung HP1; Hauptuntersuchung.

Proctor

In Abbildung 14 sind die Ergebnisse der einzelnen Verdichtungen während des Proctor-Versuchs dargestellt. Die höchste Verdichtung von $1,94 \text{ g/cm}^3$ wurde bei einem Wassergehalt von 10 % erreicht. Dieser Wert entspricht zudem der mit Hilfe des Programms GGU-COMPACT errechneten Proctordichte.

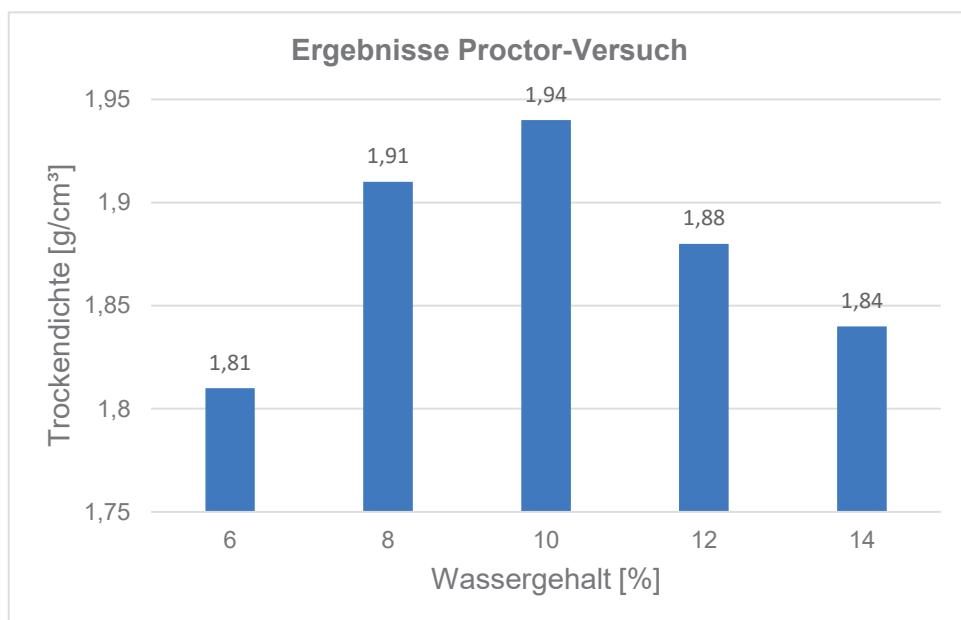


Abbildung 14: Ergebnisse Proctor-Versuch; Hauptuntersuchung.

5. Diskussion

5.1 Voruntersuchung

Dynamische Fallplatte

Für eine korrekte Durchführung sollte die dynamische Fallplatte eine glatte, ebene Auflagefläche auf dem Boden haben. In der Praxis auf einem Forststandort stellte sich das als eine Herausforderung dar. Es wurde zunächst das auf dem Boden aufliegende Laub entfernt und die Platte auf eine möglichst gerade Fläche aufgelegt, ohne viel Bodenmaterial zu entfernen. Bei Punkt 1, Punkt 2 und Punkt 3 wurden jeweils Messungen auf diese Art durchgeführt. Da die Ergebnisse an einem Punkt um $2,9 \text{ MN/m}^2$ variierten, wurde diese Umsetzung als nicht aussagekräftig gewertet. Als Alternative wurden bei Punkt 4 und Punkt 5 die ersten 1 – 2 cm des Bodens abgetragen und somit eine gerade Auflagefläche für den Versuch geschaffen. Bei dieser Variante lagen die Ergebnisse in zwei Versuchsdurchgängen deutlich näher beieinander. Die Abweichung betrug $0,1 \text{ MN/m}^2$. Trotzdem wurde diese Umsetzung ebenfalls als nicht stellvertretend für den Punkt eingestuft, da zum einen durch das Abtragen des Bodenmaterials eine Verfälschung der Ergebnisse nicht auszuschließen ist und zum anderen das Problem auftrat, dass der Boden stark federte. Während eines Durchgangs lag die Platte nicht starr auf

einer Stelle, sondern bewegte sich durch das Federn horizontal über den Boden. Dadurch wurde die Verdichtung nicht auf ein und dieselbe Stelle ausgeübt und das Ergebnis ist nicht repräsentativ. Das Federn erfolgte wahrscheinlich durch das Wurzelgeflecht im Boden, aber auch durch Hohlräume, verursacht durch im Boden lebende Tiere.

Durch diesen Umstand wurde in der Hauptuntersuchung nicht erneut mit der dynamischen Fallplatte gearbeitet. Sollte sie dennoch noch einmal genutzt werden, müsste sichergestellt werden, dass sie während eines Messdurchgangs starr auf dem Boden aufliegt.

Penetrometer

Der zuerst genutzte Konus Nr. 2 führte häufig bereits in einer Tiefe von 20 cm zu so hohen Widerständen, dass der Versuch abgebrochen werden musste, um das Gerät nicht zu schädigen. Mit dem kleineren Konus Nr. 1 konnten die Messungen mit dem Penetrometer wie vorgesehen bis zu einer Tiefe von 45 cm durchgeführt werden. Hier ergab sich das Problem, dass Messungen am gleichen Punkt verschiedene Ergebnisse aufwiesen. Die Eindringwiderstände bei dem Konus Nr. 1 lagen an einem Punkt bei einer Tiefe von 15 cm beispielsweise zwischen 180 und 380 N. Eine Erklärung für diese unterschiedlichen Ergebnisse wären auf der einen Seite Wurzeln oder Steine im Boden, die das Eindringen des Penetrometers erschweren und zum anderen Hohlräume, die es begünstigen. Diese Hohlräume werden wahrscheinlich durch im Boden lebende Tiere verursacht.

Das Penetrometer ermöglicht keine flächigen, sondern lediglich punktuelle Messungen, was auf einem heterogenen Standort wie dem untersuchten Forst ein Problem darstellt. Es könnten tiefergehende Ergebnisse erzielt werden, indem die Probenmenge stark erhöht wird. Da dies den Umfang der vorliegenden Arbeit überschritten hätte, ist darauf verzichtet worden diesen Ansatz in der Hauptuntersuchung weiterzuverfolgen.

Trockendichte

Da ausschließlich der ungestörte Teil des Untersuchungsgebietes beprobt wurde, kann an dieser Stelle keine Wertung hinsichtlich der möglichen Verdichtung durch das Befahren getroffen werden. Eingeordnet werden können die Werte jedoch nach der KA5. Dort sind fünf Abstufungen der Trockendichte dargestellt, von ϱ_t 1 – sehr geringe Verdichtung – bis hin zu ϱ_t 5 – sehr hohe Verdichtung. Daraus ergibt sich, dass die Verdichtung an der Oberfläche im ungestörten Bereich an Punkt 3 und Punkt 5 zu der Kategorie ϱ_t 2 – geringe Verdichtung – und die Verdichtung in einer Tiefe von 35 – 45 cm zu der Kategorie ϱ_t 4 – hohe Verdichtung – gehören (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 126).

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Trockendichte an beiden Punkten in den jeweiligen Tiefen einheitlich war, was zunächst auf eine Homogenität der Dichten hinweist. Die Stichprobenmenge ist jedoch deutlich zu gering, um dies als gegeben festzuhalten.

Um weitere Aussagen über die mögliche Veränderung der Trockendichte treffen zu können, werden in der Hauptuntersuchung alle Proben in einem gestörten und ungestörten Bereich hierauf untersucht.

Feinkornanteil

Im Gegensatz zu den Versuchen im Feld, die auf eine Heterogenität des Bodens schließen ließen, zeigt das Abschlämmen, dass das Verhältnis zwischen Fein- und Sandkorn an Punkt 3 und Punkt 5 sehr ähnlich ist. Ein möglicher Grund für die trotzdem vorhandene unterschiedliche Empfindlichkeit des Bodens könnte erneut das Wurzelgeflecht sein. Dieses ist im Boden nicht gleichmäßig verteilt und wirkt sich deshalb unterschiedlich stark auf eine Verdichtung aus. Gleichzeitig könnten kleinräumig Tonverlagerungen auftreten, die Stauschichten bilden, sodass sich dort Pseudogleye formen. Ansätze dafür fanden sich vor allem im optischen Eindruck des Bodens, da dort immer wieder eine für diese Bodenart typische Schichtung zu erkennen war. Für eine anknüpfende Untersuchung werden in der Hauptuntersuchung weitere Proben mit Hilfe der Sieb- / Schlämmanalyse untersucht, um eine genaue Korngrößenverteilung zu erhalten. Mögliche Tonverlagerungen und andere Unterschiede werden dadurch deutlicher.

Nach DIN 1896:1988-10 sind Böden dann als feinkörnig einzustufen, wenn sie einen Feinkornanteil von über 40% aufweisen. Dem entsprechen die untersuchten Proben. Dieser hohe Feinkornanteil stützt die These, dass der Boden im Untersuchungsgebiet eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit hat, da wie zuvor erwähnt, besonders feinkörnige Böden dafür anfällig sind. Eine Einordnung der Sieb- / Schlämmanalyse von RG1 ist ohne Vergleich nicht möglich. Die Durchführung dieses Versuchs diente vor allem dem Zweck, sich mit dem Versuchsaufbau und dem Ablauf bekannt zu machen.

Humus

Die Bestimmung des Humusgehaltes, vor allem auf stark bewachsenen Flächen wie im Forst, wird durch die bestehenden Wurzeln erschwert. Bei Entnahme der Probe werden die Wurzeln mit entnommen. Sie verhalten sich bei möglichen Versuchen wie der Humus, zählen jedoch nicht zu dieser Kategorie, da sie ein Bestandteil der noch lebenden Flora sind. Hier wurde der Humusgehalt zunächst nur über die Farbe des Bodens in Abhängigkeit zur Bodenart bestimmt. Dieses Vorgehen ist jedoch ungenau, da die Einschätzung der Farbe von den herrschenden Lichtverhältnissen und dem Feuchtegrad der Probe abhängt. Die Ergebnisse der

Voruntersuchung zeugen von einem relativ hohen Humusgehalt, jedoch an beiden Punkten unterschiedlich in den Tiefen verteilt. Diese Verschiebung ist aufgrund der Ungenauigkeit der Methode nicht in Gänze aussagekräftig.

Durch die hohen Schwankungen in der Bestimmung des Humusgehaltes anhand der Farbe wurde für die Hauptuntersuchung mit einem Versuch zur Bestimmung des Glühverlustes gearbeitet, wobei im Vorfeld die nach optischem Eindruck erkennbaren Wurzeln entfernt wurden.

5.2 Hauptuntersuchung

Trockendichte

In einer Tiefe von 50 – 60 cm wiesen alle Proben eine hohe Trockendichte auf. Die Werte sind innerhalb der einzelnen Probenstrecken homogen, unterscheiden sich jedoch zwischen den Strecken (s. Abbildung 15).

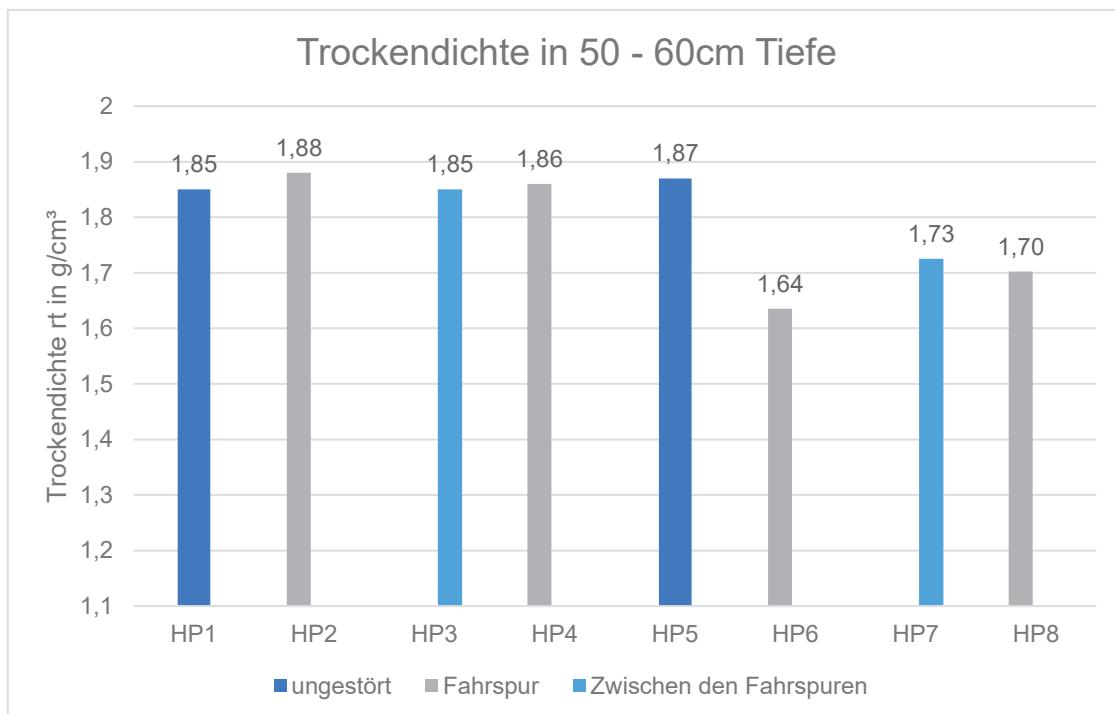


Abbildung 15: Diagramm zur Trockendichte in 50 – 60 cm Tiefe, Hauptuntersuchung.

Bei HP1 bis HP5 liegt eine Trockendichte zwischen $1,85 \text{ g}/\text{cm}^3$ und $1,88 \text{ g}/\text{cm}^3$ vor. Nach der KA5 sind die Werte in die Kategorie „ ρ_t 5 – sehr hoch“ einzuordnen. Das ist die höchste der fünf ausgewiesenen Einstufungen (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 126). Bei der zweiten Probenreihe liegt der Wert niedriger. Die hier erreichten Trockendichten befinden sich in der Kategorie „ ρ_t 4 – hoch“ (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 126).

Diese Werte zeigen auf, dass in einer Tiefe von 50 – 60 cm kein Unterschied zwischen dem gestörten und ungestörten Bereich zu erkennen ist. Die bisherige Befahrung scheint

dementsprechend bis zu dieser Tiefe keine Schäden hinterlassen zu haben. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass der Boden auf dem gesamten Standort nicht homogen ist. Es gibt kleinräumige homogene Bereiche, die sich aber zu den Umliegenden zu unterscheiden scheinen.

Auch in einer Tiefe von 30 – 40 cm ist kein Unterschied zwischen den gestörten und ungestörten Bereichen zu erkennen (s. Abbildung 16).

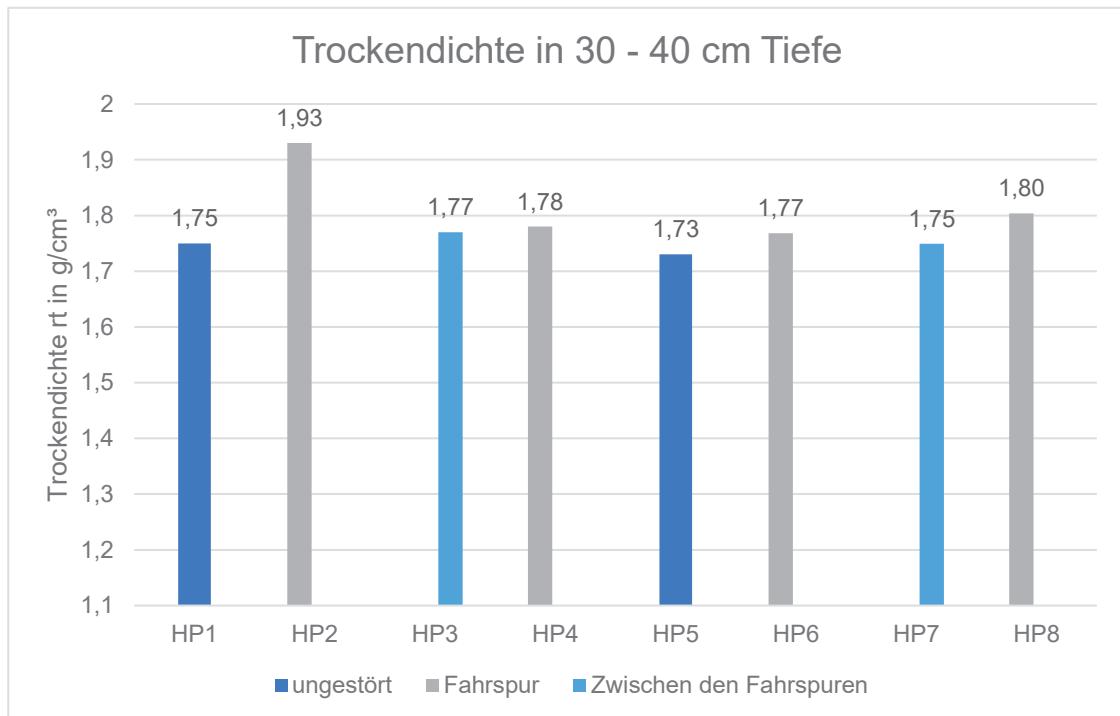


Abbildung 16: Diagramm zur Trockendichte in 30 - 40 cm Tiefe, Hauptuntersuchung.

Auffällig ist hierbei, dass sich die Werte in dieser Tiefe an beiden Standorten sehr ähneln. Während bei der ersten Probenstrecke (HP1 bis HP 5) der Wert niedriger ist als in der Tiefe von 50 – 60 cm, ist er bei der zweiten Probenstrecke (HP6 bis HP7) höher. In der tieferen Schicht wurden Trockendichten von 1,64 – 1,73 g/cm^3 gemessen, in der höheren Schicht lagen die Werte zwischen 1,75 und 1,80 g/cm^3 . Der Boden ist demnach in einer Tiefe von 30 – 40 cm stärker verdichtet als zwischen 50 – 60 cm. Diese Werte deuten darauf hin, dass sich der Boden bei HP6, HP7 und HP8 in einer Tiefe bis mindestens 40 cm durch die Belastung der Holzernte verdichtet hat. Bei den anderen Punkten scheint die Verdichtung jedoch weniger tief gewirkt zu haben. Die Werte auf der Rückegassen unterscheiden sich an den Punkten nicht wesentlich von denen, die im ungestörten Bereich lagen. Einzig die hohe Trockendichte bei HP2 mit 1,93 g/cm^3 sticht heraus. Dieser hohe Wert könnte durch Messungenauigkeiten erklärt werden oder durch ein zerrissenes Wurzelgeflecht an dieser Stelle, welches für eine stärkere Verdichtung verantwortlich sein könnte.

Insgesamt wird hier, wie schon bei den Werten aus der Tiefe 50 – 60 cm, deutlich, dass der Boden kleinflächig homogen ist, auf die ganze Fläche betrachtet sich die Gegebenheiten aber immer wieder ändern und der Boden insgesamt heterogen ist. Daraus folgt, dass auch die

Befahrung unterschiedliche Folgen auf den Boden hat. Die Empfindlichkeit gegenüber der Verdichtung ändert sich kleinräumig, wodurch das Abschätzen der Verdichtungsgefahr bei der Holzernte schwieriger wird.

Klare Auswirkungen der Befahrung lassen sich in einer Tiefe von 0 – 20 cm erkennen. Hier liegen die Werte der Fahrspur deutlich über den Werten des ungestörten Bereichs (s. Abbildung 17).

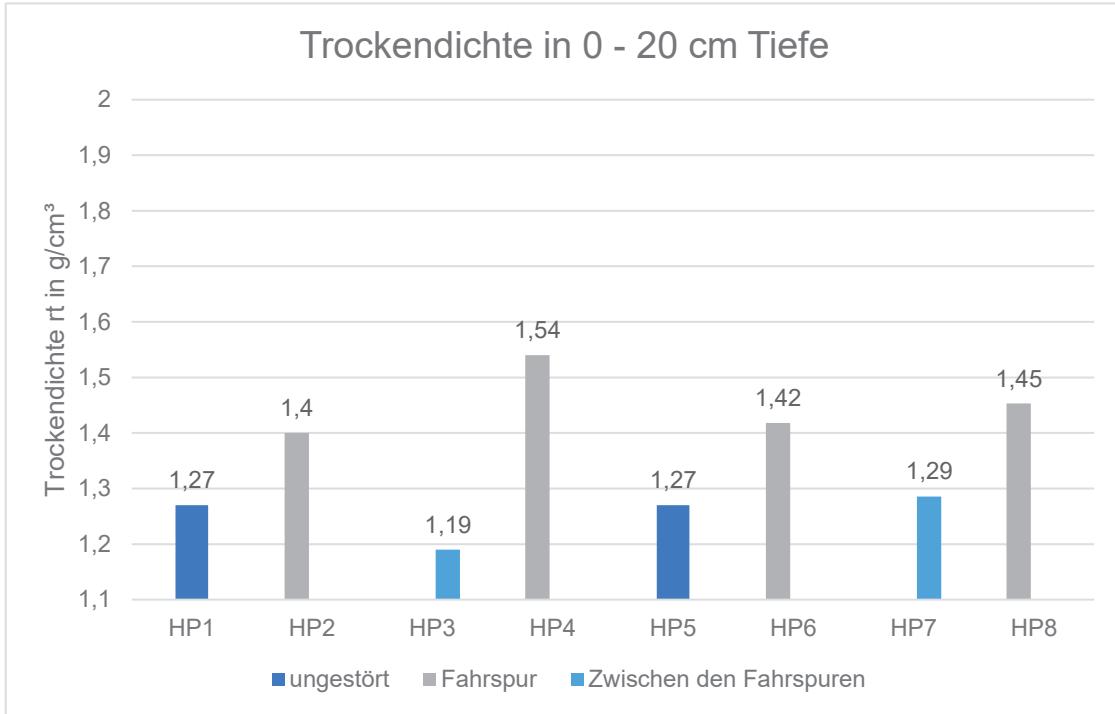


Abbildung 17: Diagramm zur Trockendichte in 0 - 20 cm Tiefe, Hauptuntersuchung.

Während die Trockendichten im ungestörten Bereich bei $1,27 \text{ g/cm}^3$ und damit in der Kategorie „ ϱ_t 2 – gering“ liegen, sind sie in der Fahrspur bei beiden Probenstrecken zwischen 1,4 und $1,54 \text{ g/cm}^3$, was einer Kategorie von „ ϱ_t 3 – mittel“ entspricht. Beide Einteilungen stammen aus der KA5 (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 126). Die Mitte der Rückegasse weist bei beiden Probestrecken einen geringeren Wert als die Fahrspur selbst auf. Bei HP3 ist der Wert mit $1,19 \text{ g/cm}^3$ sogar geringer als die Trockendichten des ungestörten Bereichs. Ob dieser Unterschied ein Ausreißer oder die Regel war, lässt sich an dieser Stelle nicht nachweisen, da bei der zweiten Probenstrecke keine Werte aus dem ungestörten Bereich vorliegen. Ein Vergleich mit den Werten der Voruntersuchung ist an dieser Stelle durch die kleinräumigen Unterschiede der Verdichtung nicht angebracht. Es könnte sein, dass sich durch das Befahren der Rückegasse auch die Bodenstruktur des weniger befahrenden Bereichs in der Mitte geändert hat, wodurch sich auch dessen Trockendichte verändert. Wird zum Beispiel der Boden während des Befahrens nicht mehr verdichtet, sondern weicht zur Seite aus (vgl. Spurtyp 3 in Kapitel 2.2), wird das verdrängte Bodenmaterial möglicherweise auch zwischen den Fahrspuren angesammelt. Durch diese Umstrukturierung des Bodens könnte der niedrigere Wert erklärt

werden. Die beschriebene Annahme ist jedoch nur eine Theorie, die in weiteren Untersuchungen bestätigt werden müsste.

Insgesamt zeigt die Analyse der Trockendichte auf, dass der Boden in diesem Forst nicht einheitlich auf die Verdichtung reagiert. Es gibt eine kleinräumige Homogenität, großflächig betrachtet ist der Boden jedoch heterogen, wodurch eine Abschätzung der Verdichtung erschwert wird. Die Untersuchung weist darauf hin, dass die bisherige Verdichtung vor allem in den oberen 20 cm Spuren hinterlassen hat und wahrscheinlich an einigen Stellen bis zu einer Tiefe von 40 cm geht. In der Tiefe von 50 – 60 cm waren keine Veränderungen mehr erkennbar. Diese Werte sind auf Grund der geringen Probenmenge ein erster Trend.

Humus

Durch die zuvor beschriebenen Probleme bei der eindeutigen Bestimmung des Humusgehaltes, wurde dieser nur in einem geringen Umfang untersucht.

Der Humusgehalt der drei Proben, bestimmt mittels Glühverlust, wird nach der KA5 in die gleiche Kategorie (h4 – stark humos) eingeordnet. Trotzdem ist der Unterschied zwischen dem ungestörten Bereich und der Rückegasse deutlich. Während die Rückegasse einen Humusgehalt von um die 8% aufweist, wurde in dem ungestörten Bereich ein Wert von ungefähr 6% gemessen. Wie schon zuvor erwähnt ist die Messung des Humusgehaltes schwierig, da sich viele größere Wurzeln in den Proben befinden, die das Ergebnis beeinflussen können. Trotzdem lassen sich die Werte als Trend identifizieren. Unter der Voraussetzung, dass sich auf allen Messpunkten ähnlich viel Pflanzenmaterial ansammelt und dort zersetzt wird, könnte der höhere Humusgehalt im Bereich der Rückegasse auf eine verlangsamte Zersetzung hinweisen. Ein dauerhaft erhöhter Wassergehalt, wahrscheinlich hervorgerufen durch Staunässe in Folge der Verdichtung, führt zu dem Fehlen von Sauerstoff. Diese anaeroben Verhältnisse begünstigen die Anreicherung von organischem Material, da die Zersetzung verhindert und sogar gänzlich verhindert wird (Scheffer und Schachtschabel 2008, S. 454). Gleichzeitig zeigt dieser erhöhte Humusgehalt, wie sich das Problem der Schadverdichtung und Spurbildung bei fehlender Regelung selbst verstärkt. Ein erhöhter Humusgehalt sorgt für eine erhöhte Verdichtung nach einer Belastung, was wiederum zu mehr Staunässe und einer höheren Humuskumulation führt (Ziesak 2004, S. 27).

Korngrößenverteilung

Anhand des Ton- und Schluffanteils (s. Tabelle 8) lassen sich die Bodenarten der Proben bestimmen. In Abbildung 18 ist das sogenannte Feinbodenartendiagramm dargestellt. Daraus lassen sich die Bodenarten wie folgt ableiten.

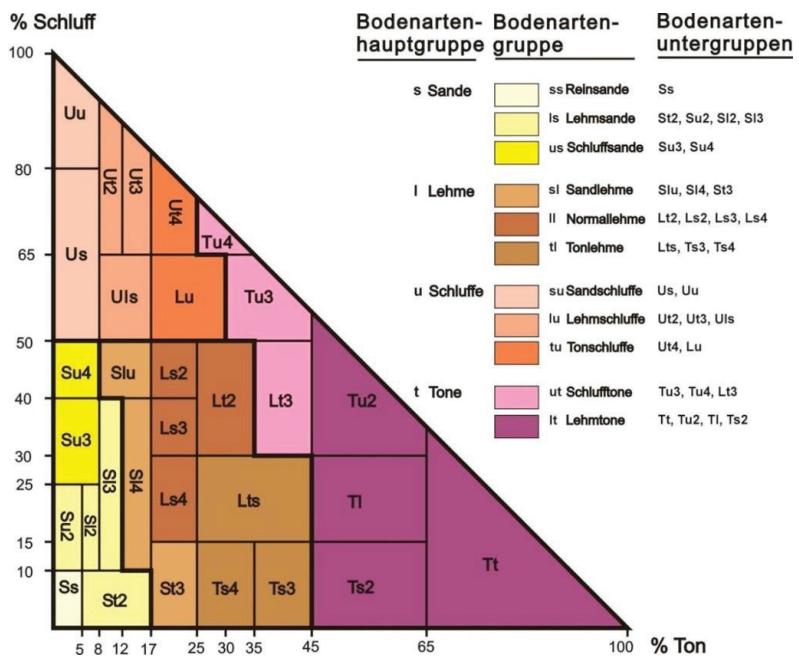


Abbildung 18: Feinbodenartendiagramm (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 142).

In den oberen 20 cm des Bodens finden sich an allen drei Punkten Sande. Während bei HP1 ein Lehmsand (Su2 / Sl2) auftritt, findet sich bei HP2 und HP3 ein Schluffsand (Su3), der Schluffgehalt ist hier höher als bei einem Lehmsand. Insgesamt liegen alle Werte jedoch nah beieinander. Ähnlich sieht es bei der Tiefe von 30 – 40 cm aus. Hier schwanken die Bodenarten zwischen Sand- und Normallehmen (Sl4 / Ls3), wobei ebenfalls diese Kornverteilungen sich sehr ähneln. Ein Unterschied wird erst bei den Proben aus 50 – 60 cm Tiefe deutlich. Während sich bei HP1 ein Lehmsand (Sl3) findet, besteht die Probe im gestörten Bereich der Fahrspur aus Normallehmen (Ls3) und in der Mitte der Rückegasse aus Sandlehmen (Sl4). Die Rückegasse weist dementsprechend einen höheren Schluff- und Tongehalt auf als der ungestörte Bereich. Das deutet darauf hin, dass die Befahrung der Rückegasse die Kornverteilung verändert hat. Dabei weicht die Fahrspur weiter von dem ungestörten Bereich ab als die Mitte der Rückegasse. Zu sehen ist diese Veränderung auch in Abbildung 19. Hier ist der Gesamtfeinkornanteil der drei Punkte dargestellt. Die Differenz der oberen 20 cm lässt sich vor allem durch den Humusgehalt erklären, welcher den Feinkornanteil erhöht. Durch den hohen Humusgehalt kann eine Sieb- / Schlämmanalyse verfälscht werden, wodurch die Ergebnisse nur bedingt gewertet werden können.

In der Tiefe von 30 – 40 cm sind die Feinkornanteile hingegen ähnlich, während sie sich in der Tiefe von 50 – 60 cm wieder unterscheiden. Der hier auf der Rückegasse auftretende Feinkornanteil von 50 – 55 % spricht nach DIN 1896:1988-10 für einen feinkörnigen Boden. Der hohe vorhandene Feinkornanteil stützt die These, dass der Boden des Untersuchungsgebietes verdichtungsempfindlich ist, da – wie zuvor erwähnt – je feinkörniger ein Boden ist, desto anfälliger gegenüber Verdichtung ist er (Lüscher et al. 2016, S. 41).

Der erhöhte Feinkornanteil bei den Werten der Rückegasse in 50 – 60 cm Tiefe ist vor allem auf einen erhöhten Tongehalt zurückzuführen (s. Abbildung 20). Dieser deutet darauf hin, dass hier, wie durch die Bodenübersichtskarte zu erwarten war, Parabraunerden in dem Untersuchungsgebiet auftreten (Stahr et al. 2008, S. 151). Der hohe Tongehalt kann zu Stauschichten führen. Diese sind Schichten im Boden, die eine geringe Wasserleitfähigkeit haben, wodurch darüber Staunässe entsteht (Scheffer und Schachtschabel 2008, S. 209). Insgesamt sind Parabraunerden durch die vorhandene Lessivierung –die Verlagerung des Tons – anfällig für eine Pseudovergleyung (Lüscher et al. 2016, S. 37).

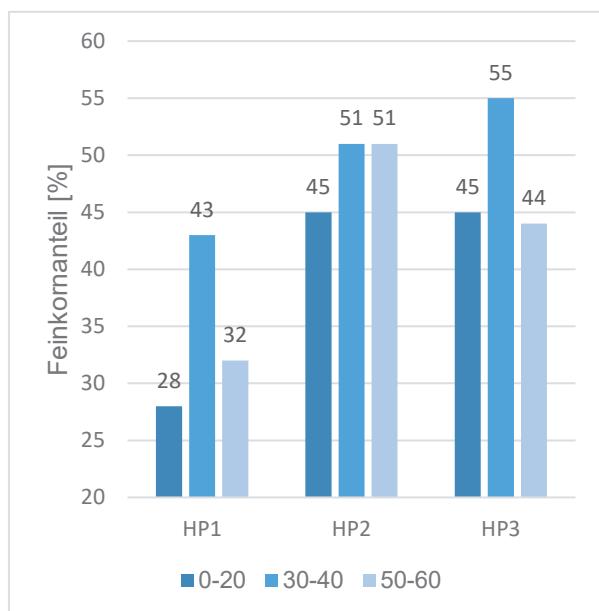


Abbildung 19: Diagramm zur Darstellung des Feinkornanteils bei HP1, HP2 und HP3, abgelesen aus der Auswertung der Sieb- / Schlämmanalyse; Hauptuntersuchung.

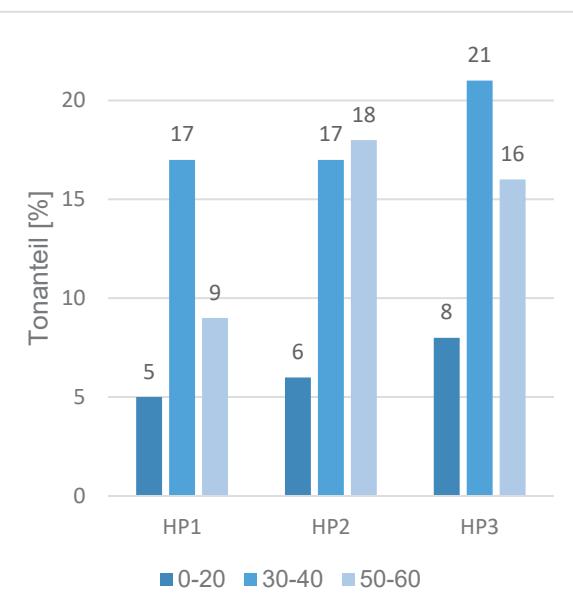


Abbildung 20: Diagramm zur Darstellung des Tongehaltes bei HP1, HP2 und HP3, abgelesen aus der Auswertung der Sieb- / Schlämmanalyse; Hauptuntersuchung.

Proctor

Nach der Auswertung des Proctor-Versuchs ergibt sich eine sogenannte Proctorkurve (s. Abbildung 21). Der Versuch selbst stammt aus dem Erd-, Grund- und Straßenbau und hat die Zielsetzung, den Wassergehalt zur optimalen Verdichtung eines Bodens zu errechnen. Dieser Wassergehalt, bei dem vorliegenden Boden 9,8 %, lässt sich insofern auf die bisherigen Untersuchungen übertragen, dass bei diesem Wassergehalt der Boden nicht befahren werden sollte, wenn eine Verdichtung verhindert werden soll. Wichtiger für die Einordnung der bisherigen Ergebnisse sind jedoch die verschiedenen ermittelten Dichten und die Proctordichte. Insgesamt ist an der Proctorkurve nochmals zu erkennen, dass die gleiche Belastung eines Bodens bei unterschiedlichen Wassergehalten auch verschiedene Dichten nach sich zieht. Bis hin zu der Proctordichte von 1,941 g/cm³ bei 9,8 % Wassergehalt wird der Boden verdichtet.

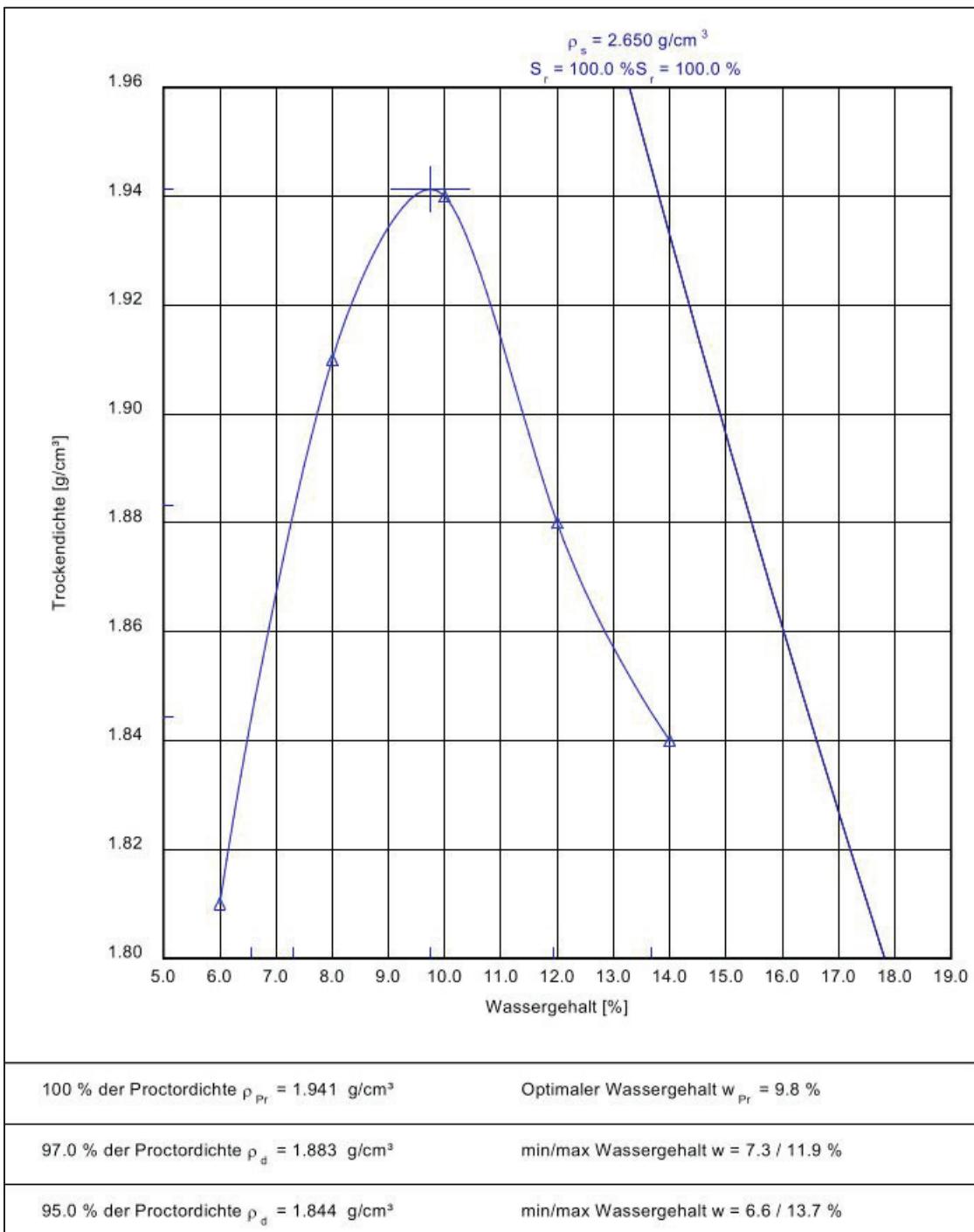


Abbildung 21: Prockorkurve ausgewertet mit GGU-Compact; Hauptuntersuchung.

Wird dieser Wassergehalt jedoch überschritten, sinkt die Verdichtung, der Boden wird stattdessen seitlich verdrängt. Dies erfolgt zum Beispiel ebenfalls bei dem Spurtypen 3 (vgl. Kapitel 2.2). Das seitliche Wegfließen des Bodens statt der Verdichtung führt zu einer noch stärkeren Schädigung des eigentlich Bodenaufbaus, da die Horizontabfolge dadurch verschoben wird.

6. Fazit und Ausblick

Dass die zunehmende Befahrung mit schweren Maschinen den Forstboden belastet, ist eindeutig. Es ist ebenfalls nicht anzunehmen, dass diese Belastung in den kommenden Jahren sinkt. Dabei sind nicht alle Standorte gleichermaßen betroffen, viele können die Belastung abfangen. Die, die es nicht können, werden jedoch zunehmend durch verdichtete und zerfahrende Rückegassen, auf denen sich das Wasser staut, zu einem Problem.

Bisher gibt es weder auf Bundesebene noch in Mecklenburg-Vorpommern eine einheitliche Lösung zur Eindämmung der Belastung von verdichtungsempfindlichen Forststandorten. Es gibt jedoch aus der Fachwelt verschiedene Ansätze, dieses Problem zu vermindern. Auf der einen Seite werden technische Lösungen wie Bogiebänder oder verringelter Luftdruck in den Rädern vorgeschlagen. Auf der anderen Seite erfolgen Vorschläge zur Aufstellung von Richt- und Prüfwerten oder dem Abschätzen und Einteilen der Spurturen. Häufig verbunden sind diese Ideen mit dem Ruf nach einer Umstrukturierung der Planung der Holzernte auf solchen Problemstandorten. Diese sollte so geplant werden, dass nach einer negativen Prüfung des Bodens die Holzernte nicht abgebrochen werden muss, sondern auf einen Ausweichstandort zurückgegriffen werden kann, sodass durch die Schonung des Bodens keine hohen Mehrkosten auftreten. Zusätzlich dazu wurden Lösungen wie das Informationssystem ProFor entwickelt. Dieses ermöglicht es dem / der Anwender:in die Belastung des spezifischen Bodens in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der gewählten Maschine einzuschätzen und gegebenenfalls die Holzernte daran anzupassen.

Die durchgeföhrten Untersuchungen auf einem Problemstandort nahe Finkenthal der Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern ergaben verschiedene Erkenntnisse. Die anfangs durchgeföhrten Messungen mit einer dynamischen Fallplatte und einem Penetrometer haben sich als schwierig umsetzbar herausgestellt. Beide Messmethoden stammen ursprünglich aus anderen Bereichen und wurden ausgewählt, weil sie von Laien bedienbar sind und schnelle Ergebnisse hervorbringen. Eine Übertragung in den Forstbereich funktioniert nicht ohne Einschränkungen. Bei den Messungen mit einer dynamischen Fallplatte entstand das Problem, dass zum einen eine gerade Auflagefläche geschaffen werden musste und zum anderen die Platte während der Durchführung durch das starke Federn des Bodens nicht fest an einem Ort liegen blieb, sondern horizontal über den Boden wanderte. Der Versuch müsste dementsprechend so angepasst werden, dass das „Wandern“ der Platte verhindert wird. Die Entwicklung einer solchen Vorrichtung wäre ein nächster Schritt, anschließend könnten weitere Messungen durchgeführt und auf ihre Aussagekraft hin geprüft werden. Zusätzlich könnten angepasste Höchstwerte bestimmt werden, sodass die gemessenen Werte direkte Aussagen über die Befahrbarkeit des Bodens liefern. Das gleiche gilt auch für das Penetrometer. Auch bei der Arbeit mit dem Penetrometer ergaben sich Schwierigkeiten. Die Messungen sind punktuell und

deshalb anfällig gegenüber kleinsten Veränderungen im Boden. Geringe Stichprobenmengen, wie sie hier gemacht wurden, sind dementsprechend nur gering aussagekräftig. In anschließenden Arbeiten könnte überprüft werden, ob sich die Werte durch größere Stichprobenmengen und anschließende Mittelwertsberechnungen legitimieren lassen und somit als Instrument zur Bestimmung der Befahrbarkeit der Rückegassen eingesetzt werden können. Dabei müsste ein Umgang mit Fehlerquellen wie Hohlräumen und Steinen im Boden gefunden werden, die gegebenenfalls aus den Ergebnissen herausgenommen werden müssen. Gleichzeitig tritt bei beiden Versuchen das Problem auf, dass der Boden durch das vorhandene Wurzelgeflecht während diesen Versuchen eine höhere Tragfähigkeit aufweist. Bei einer realen Belastung durch das Befahren reißt das Geflecht möglicherweise und die Tragfähigkeit sinkt schlagartig stark (Borchert 2012, S. 66).

Durch die Untersuchungen der Trockendichten, Kornverteilungen und des Humusgehaltes konnte für das Untersuchungsgebiet bestätigt werden, dass es sich um den Bodentyp Parabraunerde handelt, der teilweise Pseudogleye beinhaltet. Vor allem in den unteren Schichten der Rückegasse fanden sich hohe Anteile an Feinkorn, besonders Ton. Diese werden in Folge der Befahrung zu Stauschichten, wodurch sich auf der Rückegasse Wasser ansammelt. Der erhöhte Wassergehalt findet sich auch in den Ergebnissen des Humusgehaltes. Bei den Stichproben war der Trend zu erkennen, dass die Rückegasse einen höheren Humusgehalt in den oberen 20 cm aufweist als der ungestörte Bereich, was auf eine geringere Zersetzung in Folge von Sauerstoffmangel hindeutet. Gleichzeitig begünstigt ein höherer Humusgehalt bei einer erneuten Befahrung eine höhere Verdichtung (Ziesak 2004, S. 27).

Durch das bisherige Befahren des Rückegasse, was zuletzt vor fünf Jahren mit einer Forwar der Typ Wisent der Firma Ponsse geschehen ist, konnte teilweise eine Veränderung der Trockendichte bis in eine Tiefe von 40 cm gemessen werden. In der tieferen Probe bis 60 cm war kein Unterschied zwischen den gestörten und ungestörten Bereichen erkennbar. Die Untersuchungen haben ebenfalls gezeigt, dass der Boden kleinräumig unterschiedlich auf die Belastung reagiert hat. Die Trockendichten an den beiden Untersuchungspunkten der Hauptuntersuchung wiesen unterschiedliche Werte auf. Während bei der ersten Probenstrecke die Verdichtung in einer Tiefe von 40 cm kaum bis gar nicht zu messen war, zeigte die zweite Probenstrecke in der Tiefe von 30 – 40 cm eine höhere Verdichtung als in der tieferen Probe. Das deutet darauf hin, dass der Boden in dem Untersuchungsgebiet heterogen ist. Um diese Tendenz zu bestätigen, könnten mehrere Versuche zu der Trockendichte, aber auch dem Humusgehalt in anschließenden Arbeiten durchgeführt werden. Die Erkenntnisse könnten anschließend dazu genutzt werden, die richtigen Maßnahmen zum Schutz des Bodens vor Schadverdichtung aufzugreifen. Bei weiteren Untersuchungen sollten größere Probenmengen genommen werden, um eine weiterreichende Übersicht über das Untersuchungsgebiet zu erhalten. Außerdem müsste abgewogen werden, ob in allen Tiefen die größeren Zylinder genutzt

werden sollten. Der Aufwand durch die Entnahme ist auf der einen Seite deutlich höher als mit den kleinen, auf der anderen Seite sind die erlangten Resultate durch größere Probenmengen genauer.

Eine Lösung für das Problem der Schadverdichtung auf empfindlichen Forststandorten konnte nicht gefunden werden, war allerdings kein Ziel der vorliegenden Untersuchungen. Die durchgeführten Untersuchungen haben jedoch verdeutlicht, dass das Problem der Verdichtung in dem Forst bei Finkenthal besteht und näher herausgearbeitet, warum dies der Fall ist. Neben vorher erwähnten weiterführenden Ansätzen zu Untersuchung des Gebietes und den Messmethoden dynamische Fallplatte und Penetrometer, sollten ebenfalls die verschiedenen schon bestehenden Methoden abgewogen werden, um einen möglichen Umgang mit der Problematik zu finden. Neben den technischen Ansätzen scheint vor allem die Veränderung der Planung der Holzernte in Kombination mit der Festlegung von Richt- und Prüfwerten, ob in Form von Messungen vor Ort, Spurtypen oder kombinierten Varianten sei dahingestellt, die Lösung zu sein.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tiefenwirkung der Befahrung von Boden mit Radialreifen in Abhängigkeit des Reifendrucks/des Kontaktflächendrucks (Geischeder 2011, S. 51).....	8
Abbildung 2: Exemplarische Darstellung dreier Bogiebänder der Firma Olofsfors zum Vergleich. Links das Moorband "Baltic", in der Mitte das Kombiband "KovaX" und rechts das Traktionsband "Ex". (Bildquelle: https://www.olofsfors.com/products/eco-tracks/ [letzter Zugriff 03.02.2022]).....	9
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Wirkung von Reisigmatten (Lüscher et al. 2016, S. 125).	9
Abbildung 4: Merkmale der drei Spurtypen (Lüscher et al. 2016, S. 54).	11
Abbildung 5: Forwarder Ponsse Wisent (Bildquelle: https://www.hertzog-reinhardt.de/forsttechnik/ponsse-maschinen/forwarder [letzter Zugriff 03.02.2022]).	16
Abbildung 6: Übersichtskarte. Rückegassen eingezeichnet nach einem selbst berechneten DGM 0,4 und drei graphische Ableitungen im Koordinatensystem EPSG:5650 (Stöckmann, 2021). Kartengrundlage: © GeoBasis-DE / BKG (2022).	16
Abbildung 7: Übersicht Untersuchungspunkte der Voruntersuchung. Rückegassen eingezeichnet nach einem selbst berechneten DGM 0,4 und drei graphische Ableitungen im Koordinatensystem EPSG:5650 (Stöckmann, 2021). Kartengrundlage: © GeoBasis-DE / BKG (2022).	17
Abbildung 8: Pürckhauer inklusive entnommenen Bodenmaterial. Foto: L. Schütte.....	18
Abbildung 9: Übersicht Untersuchungspunkte der Hauptuntersuchung. Rückegassen eingezeichnet nach einem selbst berechnetes DGM 0,4 und drei graphische Ableitungen im Koordinatensystem EPSG:5650 (Stöckmann, 2021). Kartengrundlage: © GeoBasis-DE / BKG (2022).	20
Abbildung 10: Schnitt der Untersuchungspunkte der Hauptuntersuchung.	20
Abbildung 11: Abbildung der genutzten dynamischen Fallplatte ohne den Messcomputer. Foto: L. Schütte.....	22
Abbildung 12: Diagramme über den Feinkornanteil an Punkt 3 und Punkt 5; Voruntersuchung.	27
Abbildung 13: Diagramm Korngrößenverteilung HP1; Hauptuntersuchung.....	30
Abbildung 14: Ergebnisse Proctor-Versuch; Hauptuntersuchung.	31
Abbildung 15: Diagramm zur Trockendichte in 50 – 60 cm Tiefe, Hauptuntersuchung.	34
Abbildung 16: Diagramm zur Trockendichte in 30 - 40 cm Tiefe, Hauptuntersuchung.	35
Abbildung 17: Diagramm zur Trockendichte in 0 - 20 cm Tiefe, Hauptuntersuchung.	36
Abbildung 18: Feinbodenartendiagramm (Ad-Hoc-AG Boden 2005, S. 142).	38
Abbildung 19: Diagramm zur Darstellung des Feinkornanteils bei HP1, HP2 und HP3, abgelesen aus der Auswertung der Sieb- / Schlämmanalyse; Hauptuntersuchung.	39
Abbildung 20: Diagramm zur Darstellung des Tongehaltes bei HP1, HP2 und HP3, abgelesen aus der Auswertung der Sieb- / Schlämmanalyse; Hauptuntersuchung.	39
Abbildung 21: Proctorkurve ausgewertet mit GGU-Compact; Hauptuntersuchung.	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zu- und Abschläge die bodenkundlichen Feuchtestufen betreffend (Murer 2009, S. 11).....	13
Tabelle 2: Übersicht zu allen in der Voruntersuchung durchgeföhrten Versuchen je Punkt. .	19
Tabelle 3: Übersicht zu allen in der Hauptuntersuchung durchgeföhrten Versuchen je Punkt.	21
Tabelle 4: Ergebnisse der Messungen mit der dynamischen Fallplatte; Voruntersuchung....	24
Tabelle 5: Ergebnisse Versuch 1, 7 und 8 Penetrometer; Voruntersuchung.	25
Tabelle 6: Bodenhorizonte und Bodenarten; Voruntersuchung.	26
Tabelle 7: Trockendichte Punkt 3 und Punkt 5; Voruntersuchung.....	26
Tabelle 8: Übersicht Trockendichte, Hauptuntersuchung.....	28
Tabelle 9: Humusgehalt, Hauptuntersuchung.....	28
Tabelle 10: Kornverteilung von HP1, HP2 und HP3; abgelesen von den mit GGU-Sieve erstellten.....	29

Anhang

1. Penetrometer (Voruntersuchung)

Versuche bei Punkt 1 mit Konus Nr.2:

Versuchsnummer	Tiefe in cm	Widerstand [N]	Eindringwiderstand [N/cm²]
1	5	100	50
	10	200	100
	15	740	370
	20	-	-
2	5	140	70
	10	140	70
	15	140	70
	20	170	85
	25	140	70
	30	-	-
3	5	100	50
	10	200	100
	15	700	350
	20	-	-
4	5	200	100
	10	500	250
	15	-	-
5	5	200	100
	10	300	150
	15	300	150
	20	1000	500
	25	-	-

Versuche bei Punkt 2 mit Konus Nr. 1:

Versuchsnr.	Tiefe in cm	Widerstand [N]	Eindringwiderstand [N/cm²]
6	5	100	100
	10	160	160
	15	380	380
	20	440	440
	25	550	550
	30	500	500
	35	470	470
	40	440	440
	45	400	400
7	5	100	100
	10	130	130
	15	180	180
	20	200	200
	25	400	400
	30	440	440
	35	440	440
	40	300	300
	45	330	330
8	5	100	100
	10	200	200
	15	350	350
	20	410	410
	25	550	550
	30	560	560
	35	570	570
	40	550	550
	45	500	500

2. Trockendichte (Voruntersuchung)

Punkt	Tiefe [cm]	$m + m_z$ [g]	m_s [g]	m_s [g]	$m + m_s$ [g]	$m_t + m_s$ [g]	m [g]	m_t [g]	V_z [cm ³]	ρ_t [g/cm ³]	w [%]
3	0-20	1934,84	580,86	582,75	1934,95	1765,36	1352,2	1182,61	868,59	1,362	14,3
	35-45	280,493	96,155	159,677	343,577	328,086	183,9	168,409	100	1,684	9,2
5	0-20	1803,63	585,85	563,67	1769,17	1641,97	1205,5	1078,3	868,59	1,241	11,8
	35-45	285,07	95,375	108,555	297,951	279,576	189,4	171,021	100	1,71	10,7

m = Masse feucht
 V_z = Volumen Zylinder

m_z = Masse Zylinder
 w = Wassergehalt

m_s = Masse Schale

m_t = Masse trocken

ρ_t = Trockendichte

3. Feinkornanteil (Voruntersuchung)

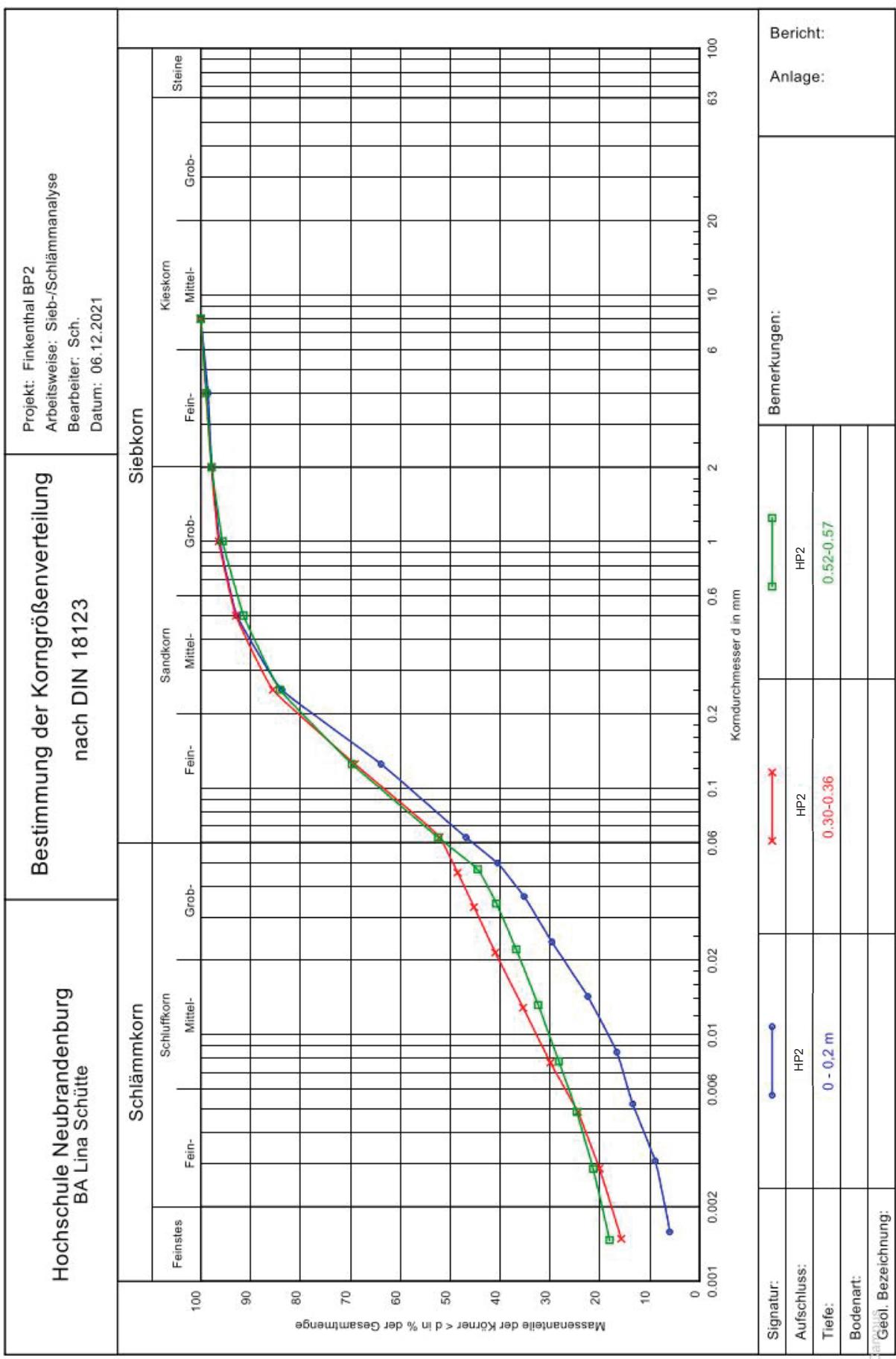
Bestimmung des Feinkornanteils in Anlehnung an DIN ISO 11277 für die Voruntersuchung

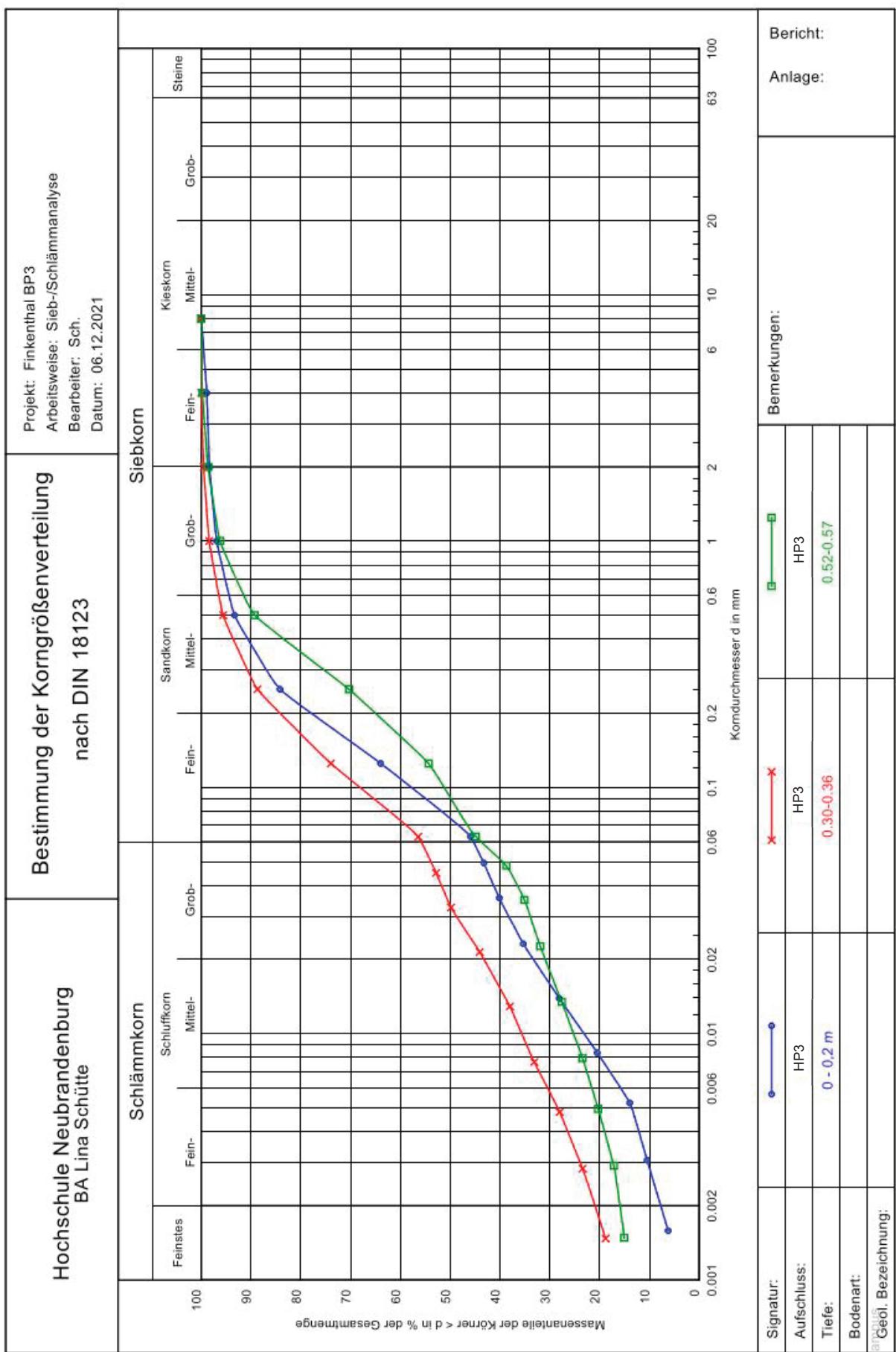
	Punkt:	3	5	3	5	3	5	RG	5	3	3
Tiefe [cm]:	35-45	35-45	45-100	53-95	45-53	40-52	0-20	0-14	0-12	12-25	
Schalen-Nr.:	Forst 04	Forst 03	Forst 05	Forst 06	12	2	6	7	8	9	
Massen Schale	m_s [g]	159,077	108,555	163,403	161,023	163,456	144,789	187,697	150,055	160,435	
trockene Probe + Schale	$m_1 = m_f + m_s$ [g]	343,577	297,951	268,149	240,247	426,954	346,018	450,323	240,48	254,74	
Trocken- masse (vorher)	m_f [g]	184,5	189,396	104,746	79,224	263,498	201,229	262,626	90,425	94,305	
abge- schl. Probe + Schale	$m_2 = m_f + m_s$ [g]	249,236	205,673	216,642	201,244	310,191	244,611	322,833	201,542	212,374	
Verlust	$\Delta m = m_1 - m_2$ [g]	94,341	92,278	51,507	39,003	116,763	101,407	127,49	38,938	42,366	
Feinkorn- anteil	$\Delta m / m_{100}^f$ [%]	51,133333	48,722254	49,173238	49,231294	44,31267	50,39383	48,544318	43,0611	44,924447	

4. Trockendichte (Hauptuntersuchung)

HP	Tiefe	$m + m_z$ (in g)	m_z (in g)	m_s (in g)	$m + m_s$ (in g)	$m_t + m_s$ (in g)	m	Vz	m_t	ϱ_t	$m = \text{Masse feucht}$
HP1	0-20	1989,57	580,74	606,09	2009,7	1708,17	1408,83	868,59	1102,08	1,27	$m_z = \text{Masse Zylinder}$
HP1	30-40	306,3	97,37	154,52	363,09	338,6	208,93	100	184,08	1,75	
HP1	50-60	296,61	96,16	150,82	350,22	336,17	200,45	100	185,35	1,85	
HP2	0-20	2151,16	581,49	595,97	2163,41	1809,35	1569,67	868,59	1213,38	1,40	$m_s = \text{Masse Schale}$
HP2	30-40	313,13	93,93	163,58	382,25	356,51	219,2	100	192,93	1,93	
HP2	50-60	312,32	95,1	157,55	374,22	345,34	217,22	100	187,79	1,88	$m_t = \text{Masse trocken}$
HP3	0-20	1999,89	579,61	576,46	1994,08	1609,15	1420,28	868,59	1032,69	1,19	
HP3	30-40	304,86	94,98	151,97	361,14	329,18	209,88	100	177,21	1,77	
HP3	50-60	309,4	95,27	162,06	375,71	347,33	214,13	100	185,27	1,85	$\varrho_t = \text{Trockendichte}$
HP4	0-20	2270,61	583,3	561,82	2246,23	1901,64	1687,31	868,59	1339,82	1,54	
HP4	30-40	300,44	94,86	155,2	359,68	333	205,58	100	177,8	1,78	
HP4	50-60	309,6	95,3	168,57	382,27	355,06	214,3	100	186,49	1,86	
HP5	0-20	2000,56	587,43	605,46	2012,64	1710,09	1413,13	868,59	1104,63	1,27	
HP5	30-40	300,35	95,22	161,71	365,38	334,87	205,13	100	173,16	1,73	$Vz = \text{Volumen Zyliner}$
HP5	50-60	306,88	95,34	152,43	363,35	339,34	211,54	100	186,91	1,87	
HP6	0-20	2187,28	580,74	593,45	2189,13	1825,09	1595,68	868,59	1231,64	1,42	
HP6	30-40	299,86	97,37	105,96	307,89	282,8	201,93	100	176,84	1,77	
HP6	50-60	279,13	96,16	175,38	357,22	338,91	181,84	100	163,53	1,64	
HP7	0-20	2078,45	581,49	592,2	2084,65	1709,02	1492,45	868,59	1116,82	1,29	
HP7	30-40	300,87	93,93	154,47	359,35	329,37	204,88	100	174,9	1,75	
HP7	50-60	300,23	95,1	167,34	371,31	339,87	203,97	100	172,53	1,73	
HP8	0-20	2210,38	579,61	586,66	2208,59	1848,67	1621,93	868,59	1262,01	1,45	
HP8	30-40	304,5	94,98	108,2	316,69	288,56	208,49	100	180,36	1,80	
HP8	50-60	295,83	95,27	170,6	371,63	340,82	201,03	100	170,22	1,70	

5. Korngrößenverteilung (Hauptuntersuchung)





6. Humusgehalt (Hauptuntersuchung)

Bestimmung des Humusgehaltes mittels Glühversuch nach DIN 18128				
Aufschluss:		HP1	HP2	HP3
Tiefe [cm]:		0-20	0-20	0-20
Masse Schale	m_s [g]	81,695	75,137	83,794
trockene Probe + Schale	$m_1 = m_f + m_s$ [g]	119,740	173,090	132,15
geglühte Probe + Schale	$m_2 = m_{gl} + m_s$ [g]	117,409	165,174	128,196
Verlust	$\Delta m_{gl} = m_1 - m_2$ [g]	2,331	7,916	3,954
trockene Probe	m_f [g]	38,045	97,953	48,356
Glühverlust	$V_{gl} = \frac{\Delta m_{gl}}{m_f} \cdot 100$ [%]	6,13	8,08	8,18
Einstufung nach KA5		h4	h5	h5

7. Proctorversuch (Hauptuntersuchung)

Proctorversuch - DIN 18127						
Zylinderdurchmesser	d_1	10	cm	Bodenmaterial: Mischprobe nahe HP8		
Zylinderhöhe	h_1	12	cm			
Fallgewicht	m	2,5	kg			
Anzahl der Schichten		3				
Schläge pro Schicht		25				
Probenherstellung mit bestimmtem Wassergehalt						
	Behälter-Nr.	1	2	3	4	5
trockene Probe	m_d [g]	171,29	142,98	109,23	138,99	115,905
einzustellender Wassergehalt	$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100$ [%]	6	8	10	12	14
Masse Wasser	$m_w = w \cdot m_d$ [g]	10,28	11,44	10,92	16,68	16,23
Bestimmung des Feuchtdichte						
Versuch Nr.		1	2	3	4	5
feuchte Probe+Zyl.	$m_1 + m_z$ [g]	4287,1	4418,4	4481,8	4463,1	4453,5
Zylinder	m_z [g]	2477,2 7	2477,2 7	2477,27	2477,2 7	2477,27
feuchte Probe	m [g]	1809,8 3	1809,8 3	2004,53	1985,9 3	1976,23
Zylindervolumen	V [cm³]	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48
Dichte	$\rho = \frac{m}{V}$ [g/cm³]	1,92	2,06	2,127	2,107	2,10
Bestimmung der Trockendichte						
Trockendichte	$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$ [g/cm³]	1,81	1,91	1,94	1,88	1,84

Literaturverzeichnis

Ad-Hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen. 5., verb. und erw. Aufl. Hannover: Bundesanstalt für Geowissen und Rohstoffe; Schweizerbart (Informationen aus den Bund-Länder-Arbeitsgruppen der Geologischen Dienste).

Borchert, H. (2012): Bewertung und Vermeidung von Bodenschadverdichtungen im Wald. In: *Diskussionsformen Bodenwissenschaften. Bodenschadverdichtung- Vermeidung, Regeneration, Überwachung* (12), S. 62–70.

Buchter, B.; Häusler, S.; Schulin, R.; Weisskopf, P.; Toias, S. (2004): Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Unter Mitarbeit von Bernhard Buchter und et al. Zollikofen: LmZ (BGS-Dokument, 13).

Deutscher Wetterdienst (2018): Klimareport Mecklenburg-Vorpommern. Fakten bis zur Gegenwart - Erwartungen für die Zukunft. 1. Auflage. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main.

Ebel, A. (2006): Druckverteilung auf Kontaktflächen unter Forstreifen. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.

Frutig, F.; Lüscher, P. (2015): Was bringt das Rücken mit halber Ladung? Bodenverdichtung und Spurbildung auf Rückegassen. In: *Wald und Forst. Zeitschrift für Wald, Waldwirtschaft, Holzmarkt und Holzverwendung* 2015, 2015 (8/15), S. 49–52.

Geischeder, R. (2011): Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen. Dissertation. Technische Universität München, München.

Gottlob, Thomas (2021): Informationen zum letzten Eingriff auf der Untersuchungsfläche, 13.12.2021. E-Mail an Lina Schütte. E-Mail.

Klötze, G. (2015): Standortkundliches Kurzgutachten. (nach Kartieranweisung: SEA 95). Hg. v. Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern BT Forstplanung/ Forstl. Versuchsw. Friedrichsmoor.

Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg Vorpommern (o. J.): Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Güstrow.

Lüscher, P.; Frutig, F.; Thees, O. (2016): Physikalischer Bodenschutz im Wald. Waldbewirtschaftung im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Erhaltung der physikalischen Bodeneigenschaften. Bern (Umwelt Wissen, 1607).

Marahrens, S. (2012): Bewertung und Ausmaß von Bodenverdichtung für die landwirtschaftliche Produktionsfläche in Deutschland. In: *Diskussionsformun Bodenwissenschaften. Bodenschadverdichtung- Vermeidung, Regeneration, Überwachung* (12), S. 1–15.

Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (2004): Heft F1 - Richtlinie zur Feinerschließung im Landeswald M-V. Schwerin.

Murer, E. (2009): Bericht über die Überprüfung der Anwendbarkeit von Modellen zur Beurteilung der Bodenverdichtung. Petzenkirchen.

Scheffer, Fritz; Schachtschabel, Paul (2008): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl., [Nachdr.]. Hg. v. Hans-Peter Blume. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. (Spektrum-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://swHPlus.bsz-bw.de/bsz276229541cov.htm>.

Stahr, Karl; Kandeler, E.; Herrmann, L.; Streck, T. (2008): Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.

Ziesak, M. (2004): Entwicklung eines Informationssystems zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz. Dissertation. Technische Universität München, München.

Eidesstaatliche Erklärung

Ich, Lina Schütte, erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema „Methodenvergleich und praktische Untersuchungen zur Ermittlung von Schadverdichtung auf Forststandorten“ selbstständig und ohne Benutzung anderer als angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift