



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wald- und Boden-
wissenschaften

Wassergehalt im Forststraßenkörper und dessen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit

Masterarbeit

Erstellt von:

Michael Fritz

Betreuer:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer

Dipl.-Ing. Dr. Franz Holzleitner

Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wald- und Bodenwissenschaften
Institut für Forsttechnik

Wien, Februar 2019

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	7
1 EINLEITUNG	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung.....	3
2 STAND DER TECHNIK	4
2.1 Instandhaltung/Instandsetzung	4
2.2 Dimensionieren des Oberbaus von Forststraßen	7
3 MATERIAL UND METHODEN	9
3.1 Untersuchungsgebiet	9
3.1.1 Geografische Lage	9
3.1.2 Geologie.....	10
3.1.3 Klima	11
3.2 Aufbau und Daten des Hydra Probe Sensors	12
3.2.1 Kalibrierung des Sensors	14
3.2.2 Einbau der Hydra Probe in die Forststraße	16
3.3 Validierung der Sensoren mittels Darrschrankmethode	18
3.4 Sieblinie	19
3.5 Wetterstation	21
3.6 Leichtes Fallgewicht	22
3.6.1 Messungen mit dem leichten Fallgewicht.....	23
4 ERGEBNISSE	25
4.1 Kalibrierung des Hydra Probe Sensors	25
4.2 Validierung der Sensoren mittels Darrschrankmethode	27
4.3 Sieblinie	28
4.4 Niederschlag während des Untersuchungszeitraumes.....	29
4.5 Wassergehalt im Forststraßenkörper	30
4.6 Temperaturverlauf	31
4.7 Tragfähigkeitsmessungen.....	32
4.8 Einfluss des Niederschlags auf die Tragfähigkeit	34
4.8.1 Größte Niederschlagsmenge (85,7 mm)	34
4.8.2 Wetterextreme (Gewitter)	36
4.8.3 6,4 mm Niederschlag/16 h	38

4.8.4	14,9 mm Niederschlag/31 h	39
4.9	Ampelsystem	40
5	DISKUSSION	41
6	ZUSAMMENFASSUNG	42
7	LITERATURVERZEICHNIS	43
8	ANHANG	47
8.1	Abbildungsverzeichnis	47
8.2	Tabellenverzeichnis	48
8.3	Formelverzeichnis	48
8.4	Urtabellen der deskriptiven Auswertungen	49

Abstract

For the load-bearing capacity of truck passable forest roads, international literature currently recommends a guideline value of at least 40 MN / m². Whether this value is achieved, and in which way the water content in the forest road body affects the carrying capacity, is little known until yet. The objective of this work is to model the influence of water content in road construction and weather data.

For this purpose, a weather station is installed on site in the selected section in a forest operation in Waldviertel on the road section to be inspected. The water content of the road body is collected by means of side-mounted special sensors parallel to the weather data. The special sensors were calibrated with laboratory tests. In addition, load capacity measurements are carried out depending on weather events by dynamic light weight deflectometer test and the validation of the moisture sensors in the road body by means of oven dry method.

As a result, a traffic light system for the gentle driving on forest roads is developed. This could reduce damage occurring in the future due to improper driving during timber transport and thus keep the associated maintenance effort as low as possible. This would be an additional decision-making aid for forestry operations to provide the right time for logging.

Keywords: load-bearing capacity, water content, weather data

KURZFASSUNG

Für die Tragfähigkeit von LKW-befahrbaren Forststraßen empfiehlt die internationale Literatur aktuell einen Richtwert von mindestens 40 MN/m² zu erreichen. Ob dieser Wert tatsächlich erreicht wird, und in welcher Form der Wassergehalt im Forststraßenkörper die Tragfähigkeit beeinflusst, ist bis dato wenig bekannt. Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, den Einfluss des Wassergehaltes im Straßenaufbau und in Abhängigkeit von Wetterdaten zu modellieren.

Dazu wird in einem ausgewählten Forstbetrieb im Waldviertel auf dem zu untersuchenden Straßenabschnitt eine Wetterstation vor Ort installiert. Der Wassergehalt des Straßenkörpers wird mittels seitlich eingebauter Spezielsenoren parallel zu den Wetterdaten erhoben. Die Spezielsenoren wurden mit Laborversuchen kalibriert. Zusätzlich erfolgen Tragfähigkeitsmessungen in Abhängigkeit von Wetterereignissen mittels dynamischen Lastplattenversuchs und die Validierung der Feuchtigkeitssensoren im Straßenkörper mittels Darrschrankmethode.

Als Ergebnis soll ein Ampelsystem für die schonende Befahrung von Forststraßen entwickelt werden. Dies könnte in Zukunft auftretende Schäden durch unsachgemäße Befahrung im Zuge des Holztransportes reduzieren und somit den damit einhergehenden Instandhaltungsaufwand so gering als möglich halten. Dies würde sich für den Forstbetrieb als zusätzliche Entscheidungshilfe für den richtigen Zeitpunkt der Holzabfuhr anbieten.

Schlüsselwörter: Tragfähigkeit, Wassergehalt, Wetterdaten

VORWORT

An erster Stelle möchte ich mich beim Institut für Forsttechnik bedanken, das mir ermöglicht hat diese Masterarbeit durchzuführen. Ein großer Dank gilt Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer und Dipl.-Ing. Dr. Franz Holzleitner, die mir immer, wenn ich Fragen und Probleme hatte hilfreich zur Seite standen. Für die Hilfe bei der Installation der Wetterstation und der Aufbereitung der Wetterdaten möchte ich Dipl.-Ing. Dr. Christian Kanzian vom Institut für Forsttechnik und ARat Friedrich Zott vom Institut für Alpine Naturgefahren danken. Ebenso ein großes Dankeschön an Wolfgang Sokol vom Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft für die großzügige Hilfe bei der Kalibrierung der Hydra Probe Sensoren. Für die Hilfe bei der Erstellung der Sieblinie möchte ich mich bei ARätin Dr. Karin Wriessnig vom Institut für Angewandte Geologie bedanken.

Ich möchte auch Dipl.-Ing. Hubert Hofmann, dem Betriebsleiter des Gutes Persenbeug danken, da er mir ermöglicht hat in diesem Betrieb meine Daten aufzunehmen und eine Wetterstation zu installieren.

Ein großer Dank gilt auch meiner Familie, die mich während meiner gesamten Studienzeit finanziell unterstützt hat. Ohne diese Unterstützung wäre das Studium nicht möglich gewesen.

Ein letztes Dankeschön gilt all meinen Freunden und meiner Freundin Kathi, die für mich die Studentenzeit zu einem unvergesslichen Erlebnis und Abenteuer gemacht haben.

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Ein gut abgestimmtes Netz aus Forststraßen, welches an das öffentliche Straßennetz angeschlossen ist, bildet die Groberschließung der österreichischen Wälder. Neben der Erschließung und somit dem Zugang zu den Holzressourcen besteht eine der Hauptfunktionen der Forststraßen in der Ermöglichung des Abtransportes vom produzierten Rohstoff Holz aus dem Wald. Gleichzeitig ermöglicht das Forststraßennetz als ein zentrales Infrastrukturelement die zeitgemäße Bewirtschaftung des Waldes mit deren Abwicklung zentraler Holzernte- und Transportprozesse in der gesamten Bereitstellungskette (STAMPFER 2018, BRITO 2011).

Neben geometrischen und technischen Richtlinien für die Bauausführung von Forststraßen und seinen dazugehörigen Elementen stellt der vertikale Aufbau einschließlich Oberflächengestaltung des Straßenkörpers eine zentrale Einheit dar. Dieser hat unmittelbaren Einfluss auf die Tragfähigkeit und somit auf die einwandfreie Befahrbarkeit über die gesamte Lebensdauer und dadurch in weiterer Folge auch auf die laufenden Instandhaltungsmaßnahmen (BRITO 2011, JOHANSSON et al. 2007).

Nach Investition und Errichtung sind je nach Bauart, Beanspruchung und betrieblichen Gegebenheiten unterschiedliche Instandhaltungs- oder Instand-setzungsmaßnahmen für das Aufrechterhalten der Funktionen, wie Befahrbarkeit oder Wasserableitung unerlässlich. Durch die Befahrung, Niederschläge, Arbeiten während der Holzproduktion werden verschiedene Maßnahmen zur Instandhaltung notwendig. Diese Maßnahmen reichen vom Ausputzen der Spitzgräben bis hin zu einer Neugestaltung der Verschleißschicht des Forststraßenkörpers. Bedingt durch den unterschiedlichen Aufwand der verschiedenen Maßnahmen führen sie je nach Intensität auch zu unterschiedlich hohen Kosten (KESTLER et al. 2000).

Aktuell werden die durchschnittlichen Instandhaltungskosten für Forststraßen in Österreich mit zirka einem Euro pro Laufmeter und Jahr veranschlagt. Dies bedeutet einen zusätzlichen Aufwand in der Höhe der ursprünglichen Errichtungskosten bei einer Abschreibungsdauer von 30 Jahren für Forststraßen und Baukosten von 30 €/lfm im moderaten Baugelände. Ohne Rücksicht auf den bei der Befahrung herrschenden Straßenzustand, können notwendige Instandhaltungskosten jedoch rasch ansteigen. Laut dem österreichischen Testbetriebsnetz liegen die Instandhaltungskosten über die gesamten Laufmeter der Forststraßen bei 0,53€/lfm (ÖBF 2016, TOSCANI 2019).

Für die einwandfreie Befahrbarkeit von LKW befahrbaren Forststraßen werden aktuell 40 MN/m² als Richtlinie für die Tragfähigkeit empfohlen. Bis dato ist jedoch wenig bekannt, ob dieser Wert auf den betreffenden Forststraßen auch tatsächlich erreicht wird und welche Faktoren diese Tragfähigkeit hauptsächlich beeinflussen (DIETZ et al. 1984).

Ein wesentlicher Einfluss auf die Tragfähigkeit besteht jedoch durch den Wassergehalt im Straßenkörper, welcher wiederum im engen Zusammenhang mit der Wasserableitung der Forststraße steht. Die Auswirkungen und das Verhalten des Wassergehaltes im Forststraßenkörper bzw. ein Verlauf in Abhängigkeit von Wetterbedingungen sind bis dato jedoch nicht im Detail bekannt (DIETZ et al. 1984, KUONEN 1983).

Dies könnte jedoch die Einschätzung für eine schadlose bzw. eingeschränkte Befahrung mittels LKW ermöglichen. Somit könnte in weiterer Folge den betreffenden Entscheidungsträgern Unterstützung geboten werden, ob unter gegebenen Bedingungen die Befahrung eines ausgewählten Straßenabschnittes technisch noch möglich bzw. ökonomisch vertretbar ist. Hierzu bedarf es aber zuerst einer detaillierten Untersuchung zu den Auswirkungen des Wassergehalts im Forststraßenkörper auf die Tragfähigkeit und Instandhaltung inklusive dessen Verlauf unter bestimmten Witterungsbedingungen. Um die Auswirkungen des Wassergehalts im Forststraßenkörper auf die Tragfähigkeit und Instandhaltung zu erforschen muss ein eigenes Versuchssystem für Forststraßen entwickelt werden (CHRISTOFFERSSON und JOHANSSON 2012).

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin ein für die Fragestellung geeignetes Versuchslayout und -design, abgestimmt auf Forststraßen, zu entwickeln und dessen Anwendbarkeit unter realen Umgebungsbedingungen zu testen. In weiterer Folge soll daraus für den jeweiligen Standort der Forststraße das Verhalten und der jahreszeitliche Verlauf des Wassergehaltes im Straßenkörper abgeleitet werden. Zusätzlich gilt es noch die Tragfähigkeit in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen zu dokumentieren. Konkret sollen folgende Fragestellungen im Rahmen dieser Masterarbeit behandelt werden:

- Entwicklung eines geeigneten Versuchslayouts und –design
- Dokumentation des Wassergehaltes im Straßenkörper
- Erhebung des Tragfähigkeitsverlaufes in Abhängigkeit vom Niederschlag

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Instandhaltung/Instandsetzung

Die Instandhaltung bezweckt die dauernde Aufrechterhaltung der Befahrbarkeit und Verkehrssicherheit der Forststraße. Wird nach Bedarf – aber meistens jährlich durchgeführt. Nebst der Kontrolle und Reinigung umfasst sie die rasche Behebung (Reparatur) meist kleinerer Schäden und Schadstellen. Diese treten vorwiegend nach Starkregen, bei der Holzernte, durch unsachgemäße Schneeräumung, bei der Schneeschmelze, bei überdurchschnittlicher Verkehrsbelastung und vielen weiteren Belastungen auf. Währenddessen bezweckt die Instandsetzung die Verbesserung der Befahrbarkeit, das heißt die Anhebung des Befahrbarkeitswertes und die Substanzerhaltung des Straßenoberbaus. Die Maßnahmen zur Instandsetzung werden meist in einem Intervall von 6-12 Jahren durchgeführt. Die Maßnahmen bestehen meist in der Erneuerung oder Ergänzung der Deckschicht (HIRT 1996, STAMPFER 2018).

Das Ziel der Instandhaltung ist, den Weg so lang wie möglich in einem guten Zustand zu halten und so der Entstehung von größeren Schäden vorzubeugen. Bei der Instandsetzung werden eingetretene größere Schäden bereinigt. Die Instandsetzung geschieht überwiegend maschinell. Diese beiden Formen der Wegepflege lassen sich teilweise nur schwer abgrenzen und gehen fließend ineinander über (BISCHOFF et al. 2011).

Für die Instandhaltung wird auch oft der Begriff unperiodische Unterhaltung und für die Instandsetzung der Begriff periodische Unterhaltung verwendet. Wenn durch die Instandhaltungsmaßnahmen der gewünschte Straßenzustand nicht mehr erreicht werden kann, dann müssen Instandsetzungsmaßnahmen getroffen werden. Nach einigen Perioden mit Instandhaltungsmaßnahmen werden somit durch den Substanzverlust der Forststraße Instandsetzungsmaßnahmen nötig (Abbildung 1). Sämtliche Maßnahmen sind auch abhängig von den Baukosten der Forststraße. Je besser der Neubau einer Forststraße umso niedriger sind die nachfolgenden Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten (Abbildung 2).

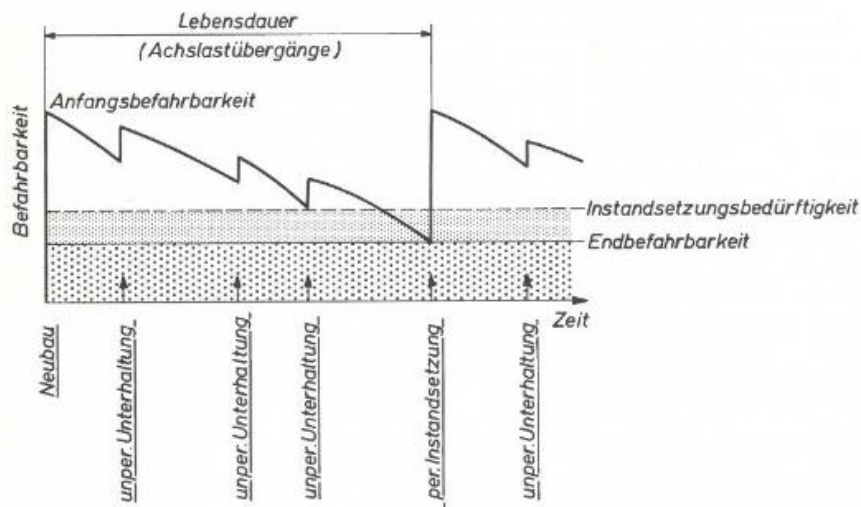


Abbildung 1: Beispiel für die zeitliche Abfolge von aperiodischen Maßnahmen der Unterhaltung und periodischen der Instandsetzung an einer Forststraße (BURLET 1982 in DIETZ et al. 1984).

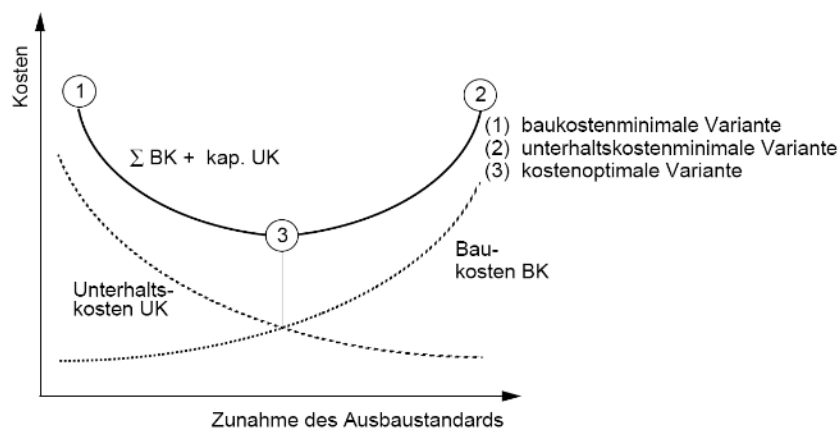


Abbildung 2: Neubau und Instandhaltungskosten in Abhängigkeit vom Ausbaustandard. 1 Minimalausbau, 2 Maximalausbau, 3 Optimalausbau (HIRT 1977 in DIETZ et al. 1984).

Die Schadenswahrscheinlichkeit bei Forststraßen steigt mit zunehmender Längsneigung, da die Erosion stärker wird und dadurch die Erosionsschäden zunehmen (Abbildung 3).

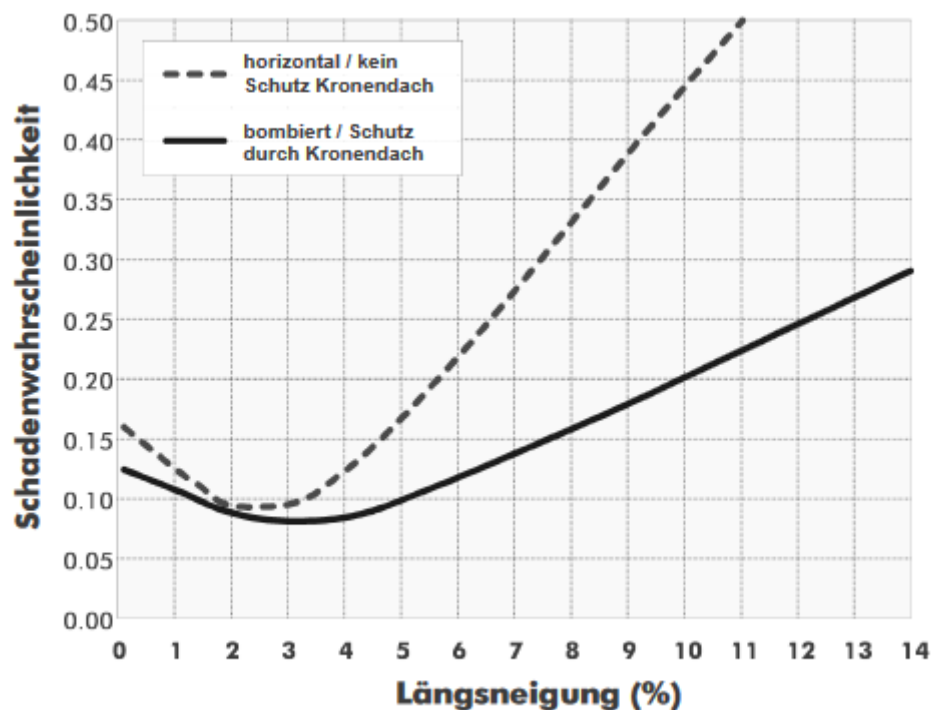


Abbildung 3: Schadenswahrscheinlichkeit bei ton-wassergebundenen Schichten (Naturstraßen) in Abhängigkeit der Längsneigung (HEINIMANN 2001)

Die Befahrbarkeit von Forststraßen wird durch den Verkehr und den klimatischen Beanspruchungen verschlechtert. Diese Oberflächenschäden werden durch Instandhaltungsmaßnahmen ausgebessert. Durch Abnutzung der Verschleiß- und Deckschicht nimmt die Qualität der Fahrbahn weiter ab. Diese Schäden werden durch Instandsetzungsmaßnahmen zirka alle 10 Jahre verbessert beziehungsweise die Verschleiß- und Deckschicht erneuert (HIRT 1996).

Die Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen betragen in Europa im Schnitt zwischen 0,2 und 2 €/lfm. Die große Spannweite lässt sich einerseits auf unterschiedliche Maßnahmen zurückführen, andererseits ist hier auch bereits der Einfluss unterschiedlicher Faktoren erkennbar. Für die USA werden im Schnitt 0,15 €/lfm angegeben (Tabelle 1).

Tabelle 1: Instandhaltungskosten in verschiedenen Ländern

Kosten [€/lfm]	Land	Quelle
0,2	Irland (Europa)	RYAN et al. 2004
0,15	Oregon/Northern California (Nordamerika)	WEAVER und HAGANS s.a.
0,5 - 2	Niederösterreich (Europa)	ÖLLERER 2013
0,5 - 1	Österreich (Europa)	ÖBF 2016

In der Zeit von 2008-2017 wurden im österreichischen Testbetriebsnetz die Instandhaltungskosten über alle Betriebe summiert und auf die Laufmeter aufgeteilt. Die Datengrundlage beträgt 100 Betriebe und zirka 1000 Datenpunkte. Als Ergebnis kam ein Durchschnittswert von 0,53€/lfm heraus. Hierbei handelt es sich nicht um die direkten, betroffenen Segmente, sondern um jenen Aufwand, welchen die Betriebe im Schnitt für ihr gesamtes Straßennetz aufbringen (TOSCANI 2019).

2.2 Dimensionieren des Oberbaus von Forststraßen

Die Dimensionierung des Oberbaus beeinflusst maßgeblich die Tragfähigkeit von Forststraßen. Entscheidenden Einfluss hat hier neben der Beschaffenheit des Untergrundes auch das Baumaterial (DIETZ et al. 1984).

Prinzipiell soll der Forststraßenkörper so dimensioniert sein, dass während eines bestimmten Zeitraumes und einem erwarteten Verkehr während dieses Zeitraumes keine unzulässige Verformung verursacht wird. KEZDI (1970) formuliert eine Verformung als zulässig, wenn keine Deformationen, Verschiebungen und Verkippungen eintreten, die die Nutzung des Bauwerkes beeinträchtigen und seine Standsicherheit auf ein unerwünschtes Maß herabsetzen (DIETZ et al. 1984).

Generell ist ein Ausgleich eines geringen Tragwertes des Untergrundes durch einen dickeren Oberbau möglich, allerdings ist dies mit einem höheren Kostenaufwand verbunden. Ab einem gewissen Punkt kann auch die niedrige Tragfähigkeit des Untergrundes nicht mehr durch einen stärkeren Oberbau kompensiert werden. Das Verhältnis von E_{v2} zu E_{vd} liegt je nach Verdichtungsgrad zwischen 1,80-2,00. Wie bereits in Punkt 1.1 beschrieben wird für LKW-befahrte Wege mit ungebundenen Tragschichten ein E_{vd} -Wert $\geq 40 \text{ MN/m}^2$ angestrebt. Als Grenzwerte für den Planumuntergrund wird ein E_{v2} -Wert von $\geq 20\text{-}30 \text{ MN/m}^2$ als Mindestwert angeführt. Die nachfolgende Tabelle 2 verschafft einen Überblick über E_{v2} -Werte, nach den ZTVE-StB. Die E_{vd} -Werte mit dem Faktor 2 umgerechnet stehen in Klammer daneben (DIETZ et al. 1984).

Tabelle 2: Tragwerte in Abhängigkeit vom Baustoff und der Dicke der ungebundenen Tragschicht nach ZTVE-StB (angelehnt an DIETZ et al. 1984)

Dicke der ungebundenen Tragschicht [cm]	Tragwert auf Fahrbahn E_{v2} [MN/m^2]		
	Baustoffe der Tragschicht		
	A	B	C
20-30	≥ 50 (25)	≥ 80 (40)	≥ 100 (50)
30-40	≥ 50 (25)	≥ 100 (50)	≥ 120 (60)
40-50	≥ 70 (35)	≥ 120 (60)	≥ 140 (70)

A:	Kies enggestufte Korngrößenverteilung Sand enggestufte Korngrößenverteilung Sand weitgestufte Korngrößenverteilung Sand intermittierend gestufte Korngrößenverteilung
B:	Kies weitgestufte Korngrößenverteilung Kies intermittierend gestufte Korngrößenverteilung Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 bis 0/32 mm
C:	Brechsand-Splitt-Schotter-Gemisch über 0/32 bis 0/56 mm

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Untersuchungsgebiet

Die Aufnahmen erfolgten im Forstbetrieb des Gutes Persenbeug, welcher im Besitz der Familie Habsburg-Lothringen ist. Der Betrieb umfasst eine Fläche von zirka 13.700 Hektar und wird von DI Hubert Hoffmann geleitet. Die Gesamtfläche gliedert sich in zwei gut arrondierte, voneinander getrennt liegende Teile, die sowohl geologisch als auch klimatisch völlig verschieden sind. Der südlich gelegene Teil besteht aus dem Westhang des Ostrongs und einem von Nord nach Süd zur Donau abfallenden Höhenrücken. Der zweite Teil liegt im Waldviertler Granithochland, dem Weinsberger Wald. Verwaltungstechnisch ist der Betrieb in sieben Reviere unterteilt (HLGP).

3.1.1 Geografische Lage

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Weinsberger Wald, einem Teil der böhmischen Masse, in der Gemeinde Bärnkopf (Bezirk Zwettl). Dieses Gebiet befindet sich im Hauptwuchsgebiet 9 (Böhmische Masse) und im Wuchsgebiet 9.2, dem Waldviertel. Abbildung 4 verdeutlicht zudem die geographische Lage im niederösterreichischen und oberösterreichischen Grenzgebiet. Die höchste Erhebung stellt der Weinsberg mit 1041 Meter dar (EICHINGER und ECKMÜLLNER 2012).



Abbildung 4: Lage des Weinsberger Waldes - Bärnkopf (NÖ - ATLAS)

3.1.2 Geologie

Das Grundgestein im Großteil des Weinsberger Waldes bildet der Weinsberger Granit. Er ist der älteste der moldanubischen Granite in Österreich und seine Entstehung ist auf magmatische Vorgänge zurückzuführen. In seinem Verbreitungsgebiet ist er sehr bedeutend für den Forststraßenbau, da die verwitterte Form, umgangssprachlich Flintschotter, den Unterbau der meisten Forststraßen im Untersuchungsgebiet bildet (KURAT 1965).

Die Hauptverbreitung des Weinsberger Granits liegt in der Grenzzone zwischen Ober- und Niederösterreich, und in Nord–Süd Richtung von der Donau bis nördlich von Gmünd. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Vorkommen dieses Gesteins nicht nur auf den Weinsberger Wald beschränkt ist. Generell tritt dieses Tiefengestein in vielen verschiedenen Erscheinungsformen auf. Aus der nachfolgenden Abbildung 5 geht hervor, dass die Erscheinungsform im Weinsberger Forst jedoch einheitlich und rein ist (DRAGOSITS 1966 und KURAT 1965).

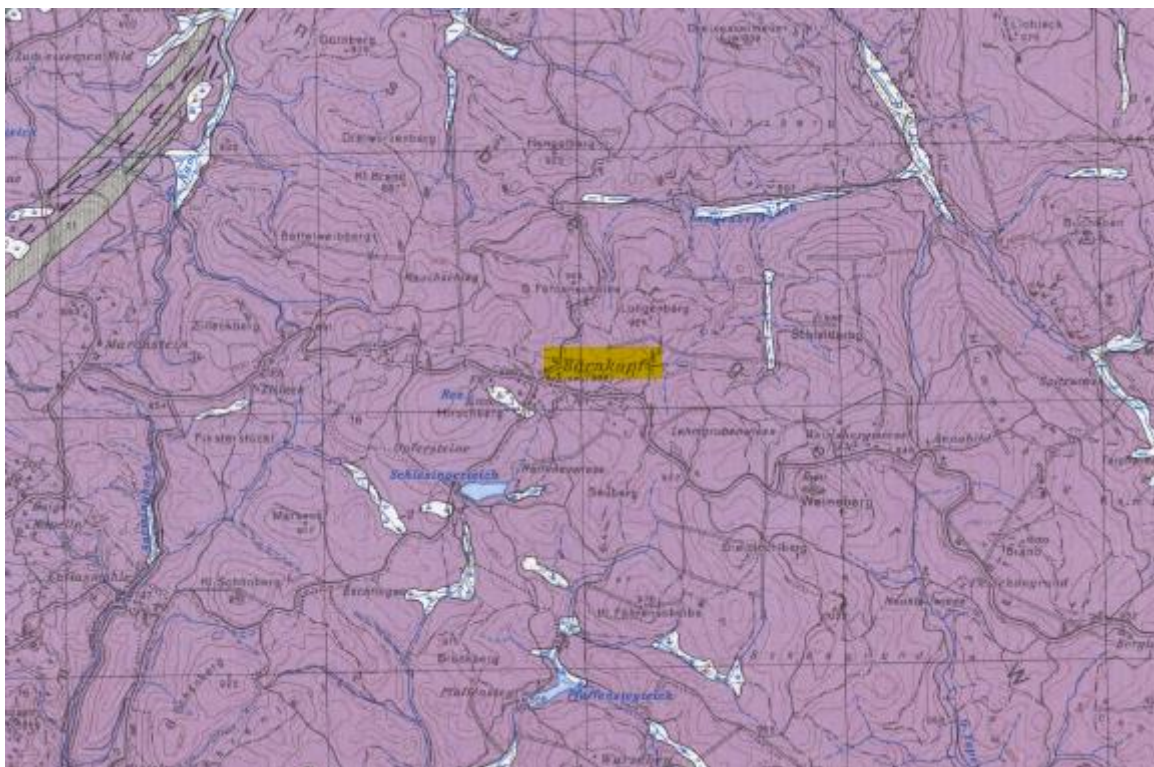


Abbildung 5: Ausschnitt aus der Geologischen Karte der Republik Österreich 1:50.000 - 35 Königswiesen (THIELE 1984), in lila gefärbt der Weinsberger Granit

3.1.3 Klima

Die Jahresmitteltemperatur beträgt im Untersuchungsgebiet 5,4 Grad Celsius, wobei in den Monaten Dezember, Jänner und Februar die Mittelwerte im Minusbereich liegen. Der Niederschlag konzentriert sich auf die Monate Juni und Juli, wo jeweils mehr als 100 Liter Niederschlag pro Quadratmeter fallen (Abbildung 6). Insgesamt ergibt sich ein Jahresniederschlag von zirka 940 Liter pro Quadratmeter. Von November bis Mai ist damit zu rechnen, dass der Niederschlag in Form von Schnee fällt. Im Schnitt gibt es im Jahr 120 Tage, an denen mindestens eine ein Zentimeter dicke Schneedecke vorhanden ist (ZAMG).

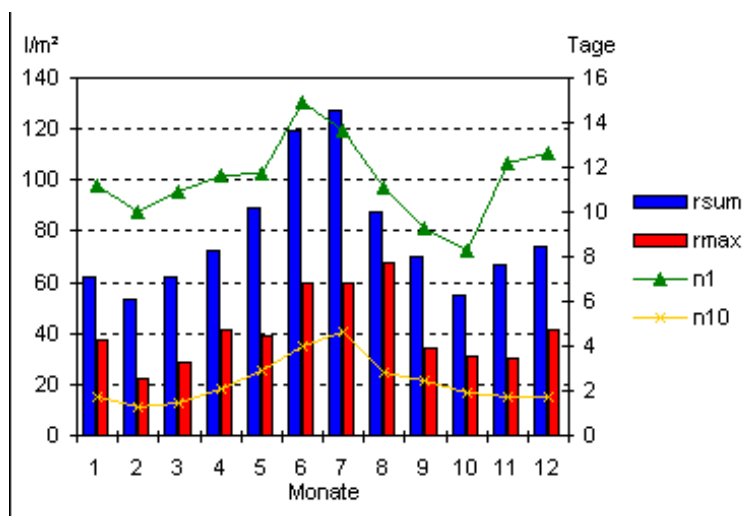


Abbildung 6: Aufteilung des Niederschlages über die Monate, rsum --> Niederschlagssumme, rmax -> größter Tagesniederschlag (ZAMG)

3.2 Aufbau und Daten des Hydra Probe Sensors

Der Stevens Hydra Probe Bodensensor ist ein Dielektrizitätskonstantsensor der die Bodentemperatur, Bodenfeuchtigkeit, Bodenleitfähigkeit und dielektrische Permittivität misst. Die Kosten eines Sensors betragen € 490. Die Sonde ist ein Frequenzdomänenreflektometer, in dem das Verhalten einer stehenden Welle gemessen wird, die durch die Reflexion einer elektromagnetischen Welle bei einer Radiofrequenz von 50 MHz erzeugt wird. Das Gehäuse ist vollständig in Wasser eintauchbar, und schützt die Elektronik auch gegen korrosive und reaktive Eigenschaften des Bodens. Die Zinken und die Basisplatte sind aus rostfreiem Stahl hergestellt (CAMPBELL SCIENTIFIC CORP. 2017 und STEVENS 2006).

Der Hydra Probe Sensor besteht aus drei Hauptkomponenten: einem Kabel zur Datenübertragung, einem Sensor sowie vier Zinken, welche im Boden eingebracht werden. Die Zinkenbaugruppe aus rostfreiem Stahl ist der Wellenleiter. Sie besteht aus den vier Metallstäben, welche aus der Grundplatte herausragen (Abbildung 7). Die elektromagnetischen Wellen werden von der Zentralzinke aus gesendet und empfangen. Im Kopf oder auch Körper der Sonde befinden sich die Leiterplatten, Mikroprozessoren und alle anderen elektronischen Bauteile. Das äußere Gehäuse besteht aus ABS Kunststoff, welcher zur Gruppe der hochschlagfesten Styrol-Copolymerisate gehört.

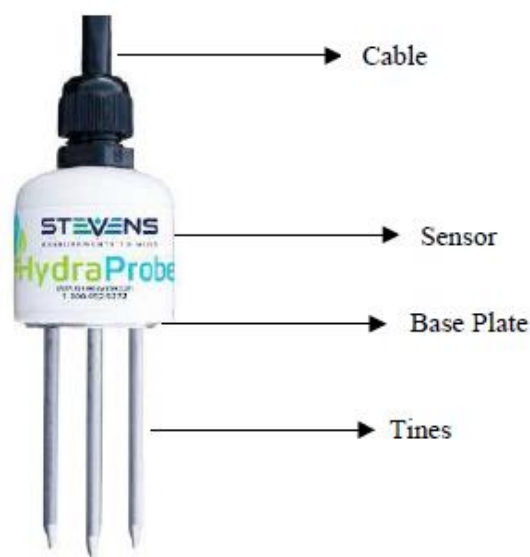


Abbildung 7: Aufbau des Sensors (CAMPBELL SCIENTIFIC CORP. 2017)

Die innere Elektronik ist mit einem steinharten Epoxidharz dauerhaft vergossen und somit ist der Kopf des Sensors eine sehr robuste Konstruktion. Das Kabel hat eine direkte Verschalung und besteht aus dem Strom -, Masse- und Datenkabel, welche alle an die innere Elektronik gelötet sind. Der bestimmungsgemäße Gebrauch der Hydra Probe besteht darin, in einer Tiefe von fünf Zentimeter bis zwei Meter, im Boden vergraben zu werden. Aufgrund dessen ist die robuste Bauweise der Sensoren essenziell (CAMPBELL SCIENTIFIC CORP. 2017).

3.2.1 Kalibrierung des Sensors

Da die vom Hersteller bereitgestellten Kalibrierungen nicht immer für alle Böden ausreichend genau sind, ist es nötig den Sensor auf den zu untersuchenden Boden, in diesem Fall für das Material des Straßenkörpers, selbst zu kalibrieren. Grundsätzlich werden zwei unterschiedliche Methoden zur Kalibrierung der Sensoren verwendet. Die derzeit gängigere Methode wird als Mischzellenmethode bezeichnet. Bei dieser Methode werden Zellen mit Erde, die einen unterschiedlichen Gehalt an Wasser beinhalten, beprobt. Folglich erhält man die Beziehung zwischen der dielektrischen Permittivität und den Wassergehalt des Bodens. Die zweite Methode wird als Infiltrations-Additionsmethode bezeichnet. Diese Methode bietet den Vorteil, dass sie relativ schnell durchgeführt werden kann und mehr Datenpunkte als bei der Mischzellenmethode analysiert werden (SEYFRIED et al. 2005).

In der vorliegenden Arbeit wurden die verwendeten Sensoren mit der Infiltrationsmethode kalibriert. Zunächst wurde geworbenes Material aus dem Straßenkörper (darrtrocken) in einen definierten Zylinder eingefüllt. Der Zylinder wurde anschließend gewogen und erneut tariert, um anschließend das Gewicht des Wassers ableiten zu können. Am unteren Rand des Zylinders befindet sich ein kleiner Schlauch, der das Wasser mittels einer Pumpe bis zur Sättigung ins Probenmaterial pumpt. Nach Erreichen des Sättigungspunktes wurde abgewartet bis das Ausgangsmaterial wieder einen Wassergehalt von 0 % erreichte. Der gesamte Vorgang dauerte zirka zwei Wochen je Durchgang. Die Messrate des Sensors betrug zehn Messungen pro Minute, welche auf einen externen Speicher übertragen wurde. Aufbauend auf den Daten des Sensors für den Wassergehalt wurden Sättigungs- und Abtrocknungskurven ermittelt, welche für die Entwicklung der Ausgleichskurven dienen (Abbildung 8).



Abbildung 8: Kalibrierungsvorgang des Sensors

Für die Kalibrierung der Hydra Probe Sensoren wurden drei Kalibrierungsdurchläufe durchgeführt. Die Versuche erfolgten am Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft unter Mithilfe von Wolfgang Sokol. Der Wert ϵ_r (echte Dielektrizitätskonstante) auf der x-Achse ist ein Messwert des Sensors und der dazugehörige Wert auf der y-Achse wurde wie folgt berechnet:

$\theta = \frac{\text{Volumen } H_2O [cm^3]}{\text{Füllvolumen korrigiert um Sondenstäbe } [cm^3]}$	Formel 1
---	----------

Das Volumen des Wassers und das Füllvolumen der Probe während des Kalibrierungsvorganges wurden mit folgenden Formeln berechnet:

$\text{Volumen } H_2O [cm^3] = \frac{\text{Masse Wasser } [g]}{\text{Dichte Wasser}}$	Formel 2
---	----------

Da man die Menge an Wasser weiß, welche in die Probe gepumpt wird, erhält man den Wert für Masse Wasser [g].

$\text{Füllvolumen korrigiert um Sondenstäbe } [cm^3] = \frac{(\text{Füllhöhe } [mm] \times ((\text{Durchmesser } [mm] \div 2)^2) \times \pi - \text{Sondenvolumen } [mm^3])}{1000}$	Formel 3
--	----------

Der Durchmesser des Probebehälters kann gemessen werden. Die Füllhöhe des Zylinders und das Sondenvolumen wurden ebenfalls berechnet.

$\text{Füllhöhe } [mm] = \text{Zylinderhöhe} - \text{Resthöhe} - \text{Stampfer}$	Formel 4
---	----------

Folglich können alle drei Komponenten dieser Formel gemessen werden.

$\text{Sondenvolumen } [mm^3] = 4 \times (57,1 \times 4 \times \pi)$	Formel 5
--	----------

Die Abmessungen der Sonde können vom Hersteller entnommen werden. Abschließend muss dieser Wert mit vier multipliziert werden, um das Volumen aller Sonden zu erhalten.

3.2.2 Einbau der Hydra Probe in die Forststraße

Zur Installation der Hydra Probe Sensoren wurde am Rand der Forststraße ein Profil gegraben. Dieses Straßenprofil hat eine Tiefe von 72 Zentimeter und eine Breite von etwa vierzig Zentimeter. Dieses Profil gliederte sich in drei verschiedene Schichten, die sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung eindeutig unterschieden. In jede Schicht wurde ein Sensor installiert. Die oberste Schicht bestand aus feinem Flintschotter und die mittlere Schicht bestand teilweise aus grobblockigerem Material. Zusammen bilden die oberen zwei Schichten den Oberbau der Forststraße. Die unterste der drei Schichten repräsentierte den Unterbau der Forststraße. Der erste Sensor wurde in sechzig Zentimeter Tiefe, in die unterste Schicht, eingebracht, der zweite Sensor kam in die mittlere Schicht bei zirka vierzig Zentimeter Tiefe und der dritte Sensor wurde in einer Tiefe von zwanzig Zentimetern installiert (Abbildung 9).

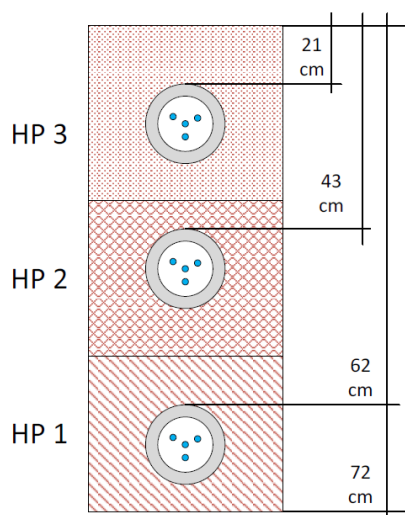


Abbildung 9: Links: Lage der Hydra Probe Sensoren im Straßenprofil, rechts: Lage höchstgelegener Sensor

Bevor die Sensoren in den Boden eingesetzt wurden, wurde bei jedem Sensor die Messwerte in Luft und Wasser ermittelt. In Luft sollte der Wert zirka Null betragen und in Wasser wird ein Wert von zirka Achtzig angestrebt.

Im Zuge der Grabungen wurde auch Probenmaterial geworben, um anschließend im Labor die Validierung der Sensoren mittels Darrschrankmethode durchzuführen und eine Sieblinie zu erstellen. Die Kabel, welche von den eingegrabenen Sensoren zur Wetterstation führen, wurden durch einen Gartenschlauch vor etwaigen Schäden geschützt (Abbildung 10).



Abbildung 10: links: Lage des Profils mit den Sensoren, rechts: Einbau des dritten Sensors

Der erste Schritt beim Einbau der Spezi­alsensoren war das Graben des Loches, indem anschließend die Sensoren eingebracht werden. Die Stirnfläche des Loches sollte möglichst begradigt werden, um etwaige Lufteinschlüsse beim Einsetzen der Sensoren zu vermeiden. Im nächsten Schritt wurden die Sensoren durch abwechselndes Auffüllen und Verdichten mit vorher geworbenem Material in gewünschter Tiefe eingesetzt. Bei Wiedererreichen des Niveaus der Forststraße wurde nochmals verdichtet.

3.3 Validierung der Sensoren mittels Darrschrankmethode

Beim Einbau der Hydra Probe Sensoren wurde Probematerial entnommen und in weiterer Folge im Labor analysiert, um die Plausibilität, der von den Sensoren übermittelten Werte mittels Darrschrankmethode zu prüfen. Das Probenmaterial war eine repräsentative Mischprobe über alle drei Horizonte, um Einblick in den Wassergehalt des Straßenkörpers zu erhalten.

Der Wassergehalt errechnet sich wie folgt:

$\frac{\text{Masse Wasser [g]}}{\text{Nettogewicht der feuchten Probe [g]}} \times 100 = \text{Wassergehalt [\%]}$	Formel 6
--	----------

Zu Beginn wurde das Tara Gewicht der Probebehälter gewogen, um ein Nettogewicht der feuchten Proben zu errechnen. Insgesamt wurden 36 Proben für 96 Stunden in den Darrschrank gestellt. Dabei wurde an zwei Tagen das Trockengewicht der Proben ermittelt und anschließend der Wassergehalt errechnet. Da der Unterschied an den beiden Tagen weniger als 1 Prozent betrug konnte der Versuch abgeschlossen werden.

3.4 Sieblinie

Beim Installieren der Hydra Probe Sensoren wurde gleichzeitig Probematerial des Forststraßenkörpers gewonnen, um im Labor eine Sieblinie zu erstellen. Das Probematerial war eine Mischprobe über die gesamte Tiefe von den 72 Zentimetern, welche das Profil aufweist.

Zuerst wurde der Größtkorndurchmesser bestimmt, um die Probenmenge zu ermitteln. Anhand der ÖNORM EN ISO 17892_4 kann in einer Tabelle die Menge abgelesen werden. Die Korngrößendurchmesser bis 2 Millimeter wurden anschließend gewaschen, getrocknet und abgewogen, um den Massenanteil zu erhalten. Die Korngrößenanalyse für die kleineren Fraktionen erfolgte durch eine Kombination aus Nasssiebung (Fraktionen $>20 \mu\text{m}$) und Sedimentationsanalyse mittels Micromeritics SediGraph III Particle Size Analyzer (Fraktionen $\leq 20 \mu\text{m}$).

50 g lufttrockener Boden wurden zur Dispergierung der Probe und Zerstörung der organischen Substanz über mehrere Tage mit insgesamt ca. 200 ml 10%igem Wasserstoffperoxid versetzt. Nach Beendigung der Reaktion wurde überschüssiges Wasserstoffperoxid durch Auskochen im Wasserbad bei 95°C entfernt. Nach Ultraschallbehandlung wurde die Probe gesiebt. Die Siebrückstände ($> 2000\mu\text{m}$, $> 630\mu\text{m}$, $> 200\mu\text{m}$, $> 63 \mu\text{m}$ und $> 20 \mu\text{m}$) wurden getrocknet und gewogen. Zur Bestimmung des Wassergehaltes wurde eine Teilprobe des lufttrockenen Bodens bei 105°C getrocknet.

Vom Siebdurchgang $< 20 \mu\text{m}$ wurde eine Teilprobe für die Sedimentationsanalyse eingedickt, mit 0,05 % Natriumpolyphosphatlösung versetzt und nach Ultraschallbehandlung im Sedigraphen gemessen.

Für die Ermittlung der Bodenart wurde das Texturdreieck nach Ö-Norm L 1050 verwendet.

Durch die Sieblinie wird die Korngrößenverteilung des untersuchten Materials bestimmt (Abbildung 11).

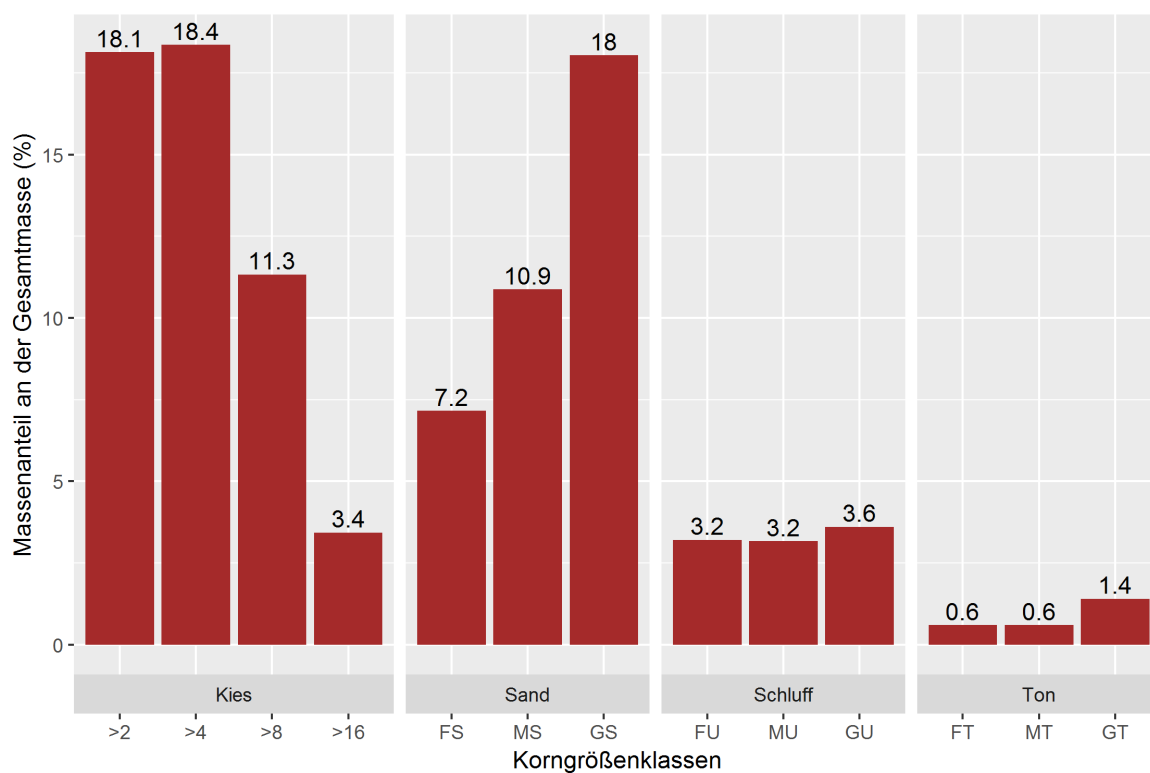


Abbildung 11: Korngrößenverteilung des Straßenmaterials

3.5 Wetterstation

Die Wetterstation wurde in einer Straßengabelung der Forststraße, auf der die Aufnahmen erfolgen, aufgestellt. Der gesamte Versuchsaufbau umfasst wie in Abbildung 12 ersichtlich 9 verschiedene Komponenten. Die wesentlichen Sensoren dieser Arbeit stellen der Niederschlagsmesser und die Hydra Probe Sensoren dar. Zudem stellt das Solarpanel die Stromversorgung sicher, um durchgehende Aufzeichnung der Daten und eine Übertragung auf den BOKU-Server zu ermöglichen. Die Kosten der Wetterstation beliefen sich auf zirka € 6.000.

Neben vielen verschiedenen Aspekten für die Auswahl des Standortes ist auch essentiell, dass eine uneingeschränkte Datenübertragung besteht. Sämtliche Messgeräte liefern alle dreißig Sekunden einen Messwert, wovon alle zehn Minuten ein Mittelwert gebildet wird. Die erhobenen Werte werden an einen zentralen Server an der BOKU gesendet.

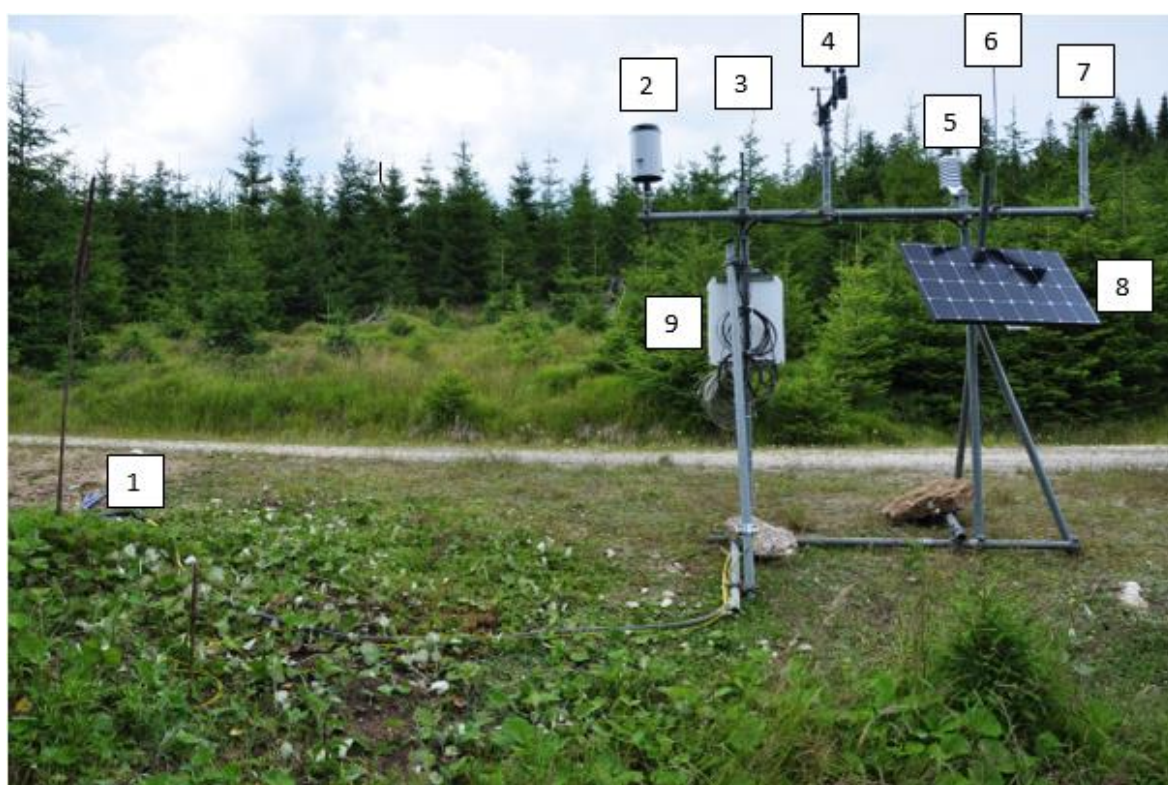


Abbildung 12: Bestandteile der Wetterstation: 1 Lage der Sensoren, 2 Niederschlagsmesser, 3 Antenne, 4 Schalenkreuzanemometer mit Windfahne, 5 Thermometer und Hygrometer, 6 Blitzableiter, 7 Solarstrahlungsmesser, 8 Solarpanel, 9 Anschlusskasten

3.6 Leichtes Fallgewicht

Mithilfe des leichten Fallgewichtes wird ein dynamischer Lastplattenversuch durchgeführt. Dabei wird auf eine kreisrunde Lastplatte mit dreißig Zentimeter Durchmesser eine zehn oder 15 Kilogramm schwere Masse fallen gelassen. Die Lastplatte leitet dabei den Stoß der aufprallenden Masse in die zu überprüfende Oberfläche. Gemessen wird die Bewegung der Platte während des Stoßes (Abbildung 13). Anhand der Setzung der Platte wird dann der E_{vd} Wert, eine Maßzahl für die Tragfähigkeit der Forststraße, berechnet (ARENZ et al. 2008 und RVS 08.03.04.). In der DIN – Norm 18134 findet man alle weiteren Hinweise zu Plattendruckversuchen.

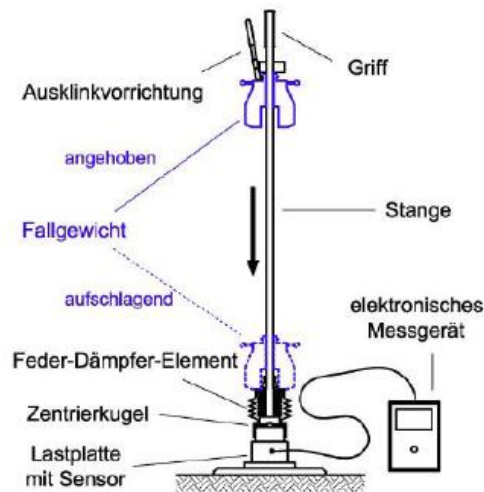


Abbildung 13: Komponenten der dynamischen Lastplatte (KOPF und ADAM 2003)

Das Verformungsmodul (E_{vd} – Wert) errechnet sich laut DIN-Norm 18134 wie folgt.

$E_{vd} [MN/m^2] = \frac{1,5 \times r \times \sigma}{s}$	Formel 7
--	----------

$r =$ Lastplattenradius [m]

$\sigma =$ Normalspannung [MN/m^2] wird mit $0,1 MN/m^2$ angenommen

$s =$ Setzung [m]

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird das leichte Fallgewichtsgerät Terra Test 3000 von der Firma Terratest verwendet. Der Preis für dieses Gerät mit Transportbox und zusätzlichem 15 Kilogramm Fallgewicht beträgt zirka € 5.500. Hierbei handelt es sich um eine dynamische Lastplatte in Form eines leichten Fallgewichtes.

Der Vorteil im Vergleich zu anderen Messmethoden liegt in der schnellen und einfachen Wiederholbarkeit an verschiedenen Messpunkten und unter verschiedenen Einflüssen wie zum Beispiel der Witterung oder einhergehend damit dem Feuchtegehalt der Forststraße (THOLEN et al. 1985).

3.6.1 Messungen mit dem leichten Fallgewicht

Die Messungen mit dem leichten Fallgerät erfolgten wöchentlich und nach Wetterereignissen wie zum Beispiel nach einem langanhaltenden Regen oder kurzen Starkregen. Mit den ersten Messungen wurde direkt neben der Wetterstation begonnen (Abbildung 14). Um Doppelmessungen zu vermeiden wurde in weiterer Folge ein halber Meter nach vorne beziehungsweise hinten gerückt. Grundsätzlich erfolgten die Messungen jeweils in der linken und rechten Spurrinne, da der Mittelstreifen für die Befahrung irrelevant ist.

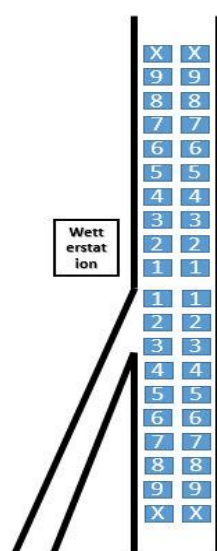


Abbildung 14: Versuchsaufbau der Tragfähigkeitsmessungen

Aufgrund der Tatsache, dass bei den ersten Messungen mit dem zehn Kilogramm Fallgewicht Werte über 100 MN/m^2 erreicht wurden, erfolgte ein Wechsel auf das 15 Kilogramm Fallgewicht. Begründet wird diese Vorgangsweise dadurch, dass mit dem zehn Kilogramm Fallgewicht Messungen bis 70 MN/m^2 zulässig sind während mit dem 15 kg Fallgewicht Messungen von $70 - 120 \text{ MN/m}^2$ durchgeführt werden sollen. Es wurde daher immer mit dem zulässigen Fallgewicht für die jeweiligen Tragfähigkeitswerte gemessen (TERRATEST GMBH 2012).

4 ERGEBNISSE

4.1 Kalibrierung des Hydra Probe Sensors

Die Kurven der drei Kalibrierungsdurchläufe (jeweils Sättigungs- und Abtrocknungskurve) verlaufen bis zu einem Wassergehalt von dreißig Prozent fast identisch. Aus dieser Erkenntnis lässt sich ableiten, dass die verwendeten Speziensensoren nicht nur für landwirtschaftliche Böden geeignet sind, sondern auch für steinigere Böden, wie die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Forststraße. Der Sättigungspunkt der analysierten Probe wurde zwischen 30 und 35 Volumprozent Wasseranteil erreicht, und verschob sich beim zweiten und dritten Kalibrierungsdurchlauf jeweils etwas weiter nach oben. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei jedem Durchgang Wasser in die Probe gepumpt wurde. Basieren auf diesen Pumpvorgang entstanden zunehmend Hohlräume, die das Material etwas umlagerten. Das untersuchte Probenmaterial repräsentiert jenes Material, indem der HP3 installiert wurde. Das bedeutet, dass beim höchsten Sensor ein Wasseranteil zwischen 30 und 35 Prozent nicht überschritten werden kann, da das Material innerhalb dieses Bereiches vollständig mit Wasser gefüllt ist. Eine lineare Ausgleichsgerade ist für den Wassergehalt im Forststraßenbau ausreichend, da es ohnehin nicht um die genauen Prozentwerte, sondern um Prozentklassen geht (Abbildung 15).

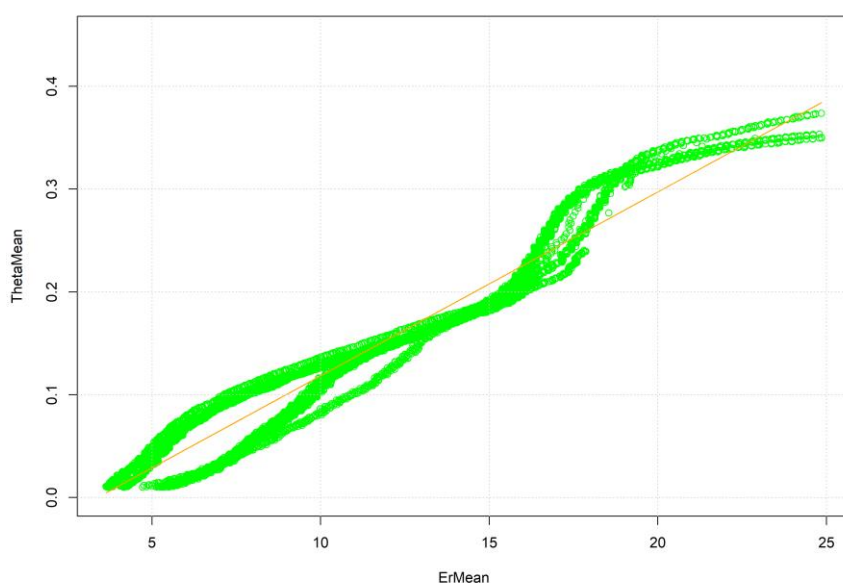


Abbildung 15: Kalibrierungsdurchläufe mit einer linearen Ausgleichsgerade

Die Funktion der Ausgleichsgerade lautet wie folgt:

$\textit{Theta Mean} = 0,01788 \times \textit{ErMean} - 0,0604$	Formel 8
---	----------

Ein Polynom dritter Ordnung überschätzt einerseits den Wassergehalt während Trockenperioden und unterschätzt ihn andererseits während Perioden mit hohem Wassergehalt (ROWLANDSON et al. 2013).

4.2 Validierung der Sensoren mittels Darrschrankmethode

Tabelle 3: Deskriptive Werte der Darrschrankmethode vom 09.07.2018

09.07.2018	n	Min	Max	Mittelwert	Standardabweichung
Brutto_feucht [g]	36	310,8	402,1	342,3	20,8
Netto_feucht [g]	36	302,0	393,0	333,4	20,8
Brutto_trocken [g]	36	288,0	375,2	317,4	19,3
Netto_trocken [g]	36	279,2	366,1	308,5	19,3
Masse Wasser [g]	36	21,7	29,0	24,9	1,8
Wassergehalt [%]	36	6,8	8,0	7,5	0,3

Tabelle 4: Deskriptive Werte der Darrschrankmethode vom 10.07.2018

10.07.2018	n	Min	Max	Mittelwert	Standardabweichung
Brutto_feucht [g]	36	310,8	402,1	342,3	20,8
Netto_feucht [g]	36	302,0	393,0	333,4	20,8
Brutto_trocken [g]	36	288,0	375,2	317,5	19,3
Netto_trocken [g]	36	279,2	366,1	308,6	19,3
Masse Wasser [g]	36	21,6	29,0	24,9	1,8
Wassergehalt [%]	36	6,8	7,9	7,5	0,3

Aus den Tabellen 3 und 4 können die Ergebnisse der Darrschrankmethode entnommen werden. Im Mittel hatten die Proben einen Wassergehalt von 7,5 % mit einer Standardabweichung von 0,3 % (Abbildung 16).

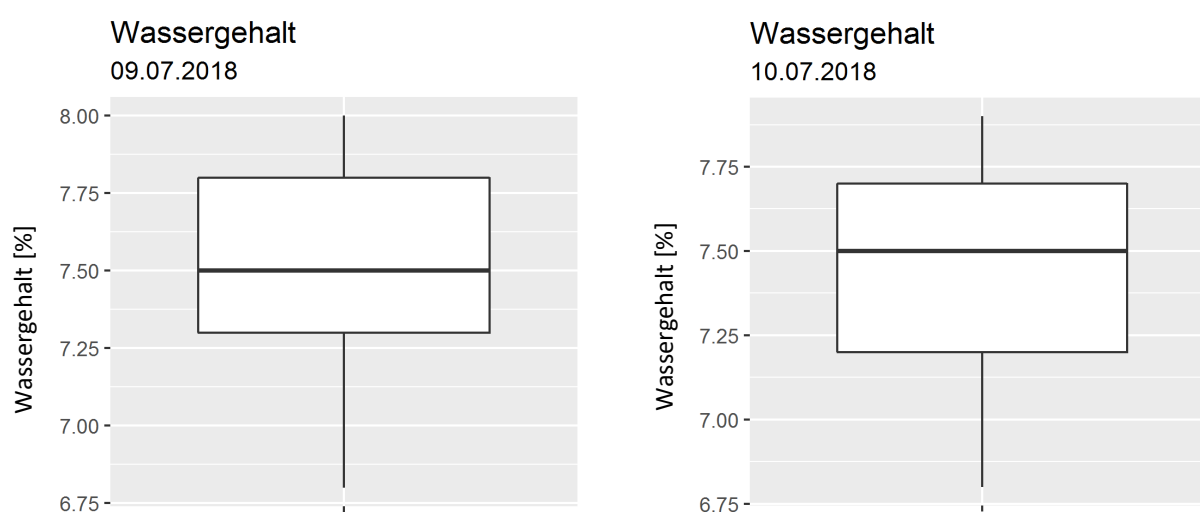


Abbildung 16: Boxplots für den Wassergehalt der Darrschrankmethode

4.3 Sieblinie

Durch die Sieblinie ist der Aufbau der Forststraße über die Korngrößenverteilung und prozentuelle Aufteilung von Kies/Grus, Sand, Schluff und Ton genau beschrieben. Kies/Grus hat mit 51% den größten Anteil, dahinter folgt Sand mit 36% und Schluff mit 10%. Der Tongehalt dieser Forststraße beträgt 2,5%. Bei der Korngrößenverteilung besitzen die Fraktionen <4, <2 und Großer Sand mit jeweils zirka 18% die größten Massenanteile. Mittlerer Sand und <8 haben beide zirka 11% der Massenanteile in der Korngrößenverteilung.

Ausgehend aus diesen Daten kann eine Kornsummenkurve erstellt werden. Vergleicht man diese Kurve mit jenen von HIRT, erkennt man, dass mehr feineres Material als vorgeschlagen vorhanden ist, bei der größten Fraktion, dem Kies sind die Steigungen der Kurven annähernd ident (Abbildung 17).

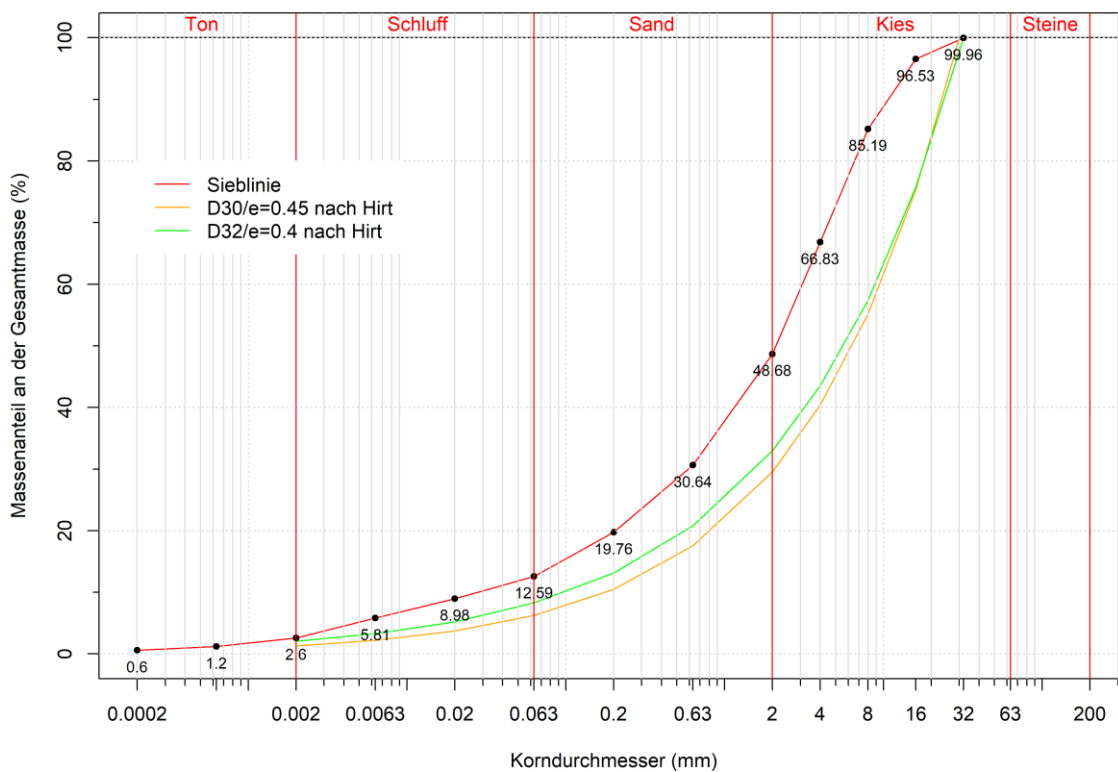


Abbildung 17: Kornsummenkurve der Sieblinie

4.4 Niederschlag während des Untersuchungszeitraumes

Während des Untersuchungszeitraumes von 05.07.2018 bis 31.08.2018 fielen insgesamt 138,3 Millimeter Niederschlag, wobei lange Perioden ohne Niederschlag zu verzeichnen waren. Mehr als die Hälfte des Niederschlags fiel an einem einzigen Tag (21.07.2018 – 22.07.2018). Aus einem Vergleich der ermittelten Daten und jener der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik aus Abbildung 5, lässt sich schlussfolgern, dass im Versuchszeitraum weniger Niederschlag als durchschnittlich gefallen ist (Abbildung 18).

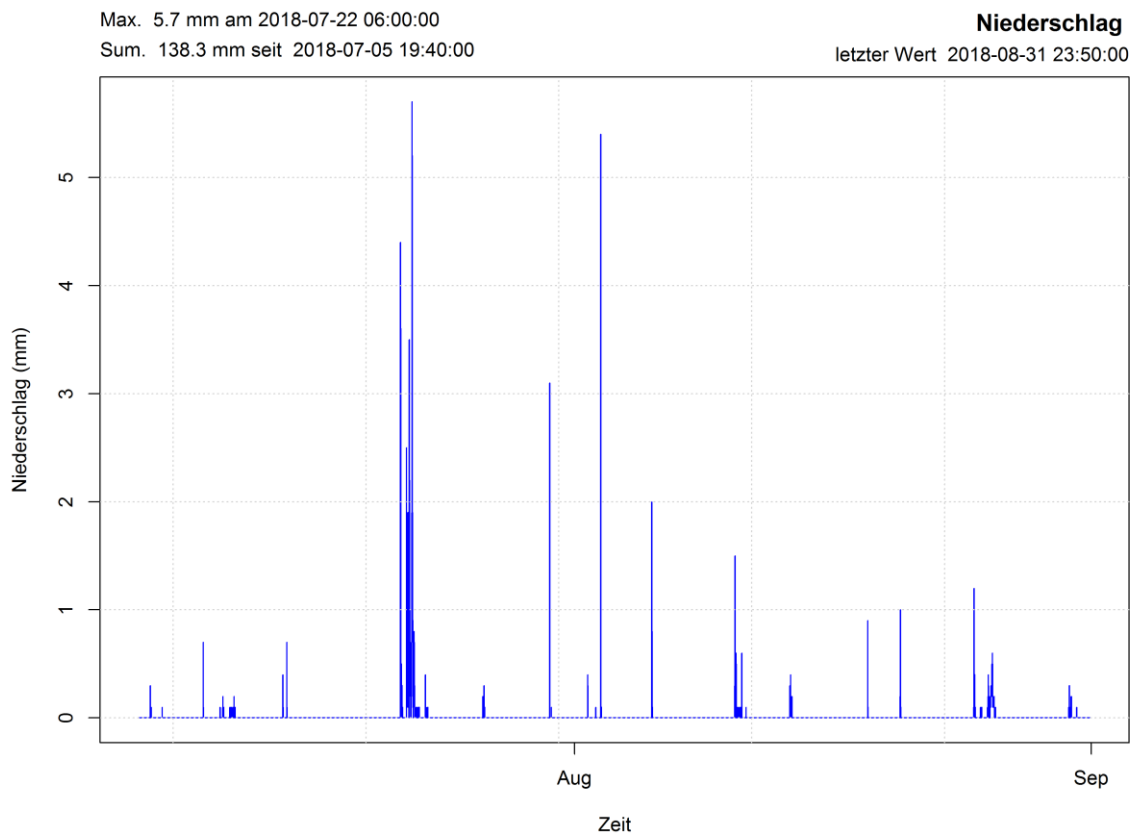


Abbildung 18: Niederschlag während des gesamten Untersuchungszeitraumes

4.5 Wassergehalt im Forststraßenkörper

Der Wert Wassergehalt [%] ist hier basierend auf den Voreinstellungen „Sand“ der Hydra Probe Sensoren ermittelt worden. Bei einer Tiefe von zirka 60 Zentimeter weist der untersuchte Boden einen durchschnittlichen Wassergehalt von 15 Prozent auf, in zwanzig Zentimeter Tiefe durchschnittlich acht Prozent. Zu den untersten beiden Sensoren sickerte nur einmal, beim größten Niederschlagsereignis am 21.07.2018, Wasser durch. Der Vorgang dauerte beim mittleren Sensor elf Stunden und beim tiefsten Sensor zwölf Stunden. In die mittlere Schicht konnte am meisten Wasser einsickern, dort lag der Sättigungspunkt bei zirka 38 Volumprozent Wasser im Vergleich dazu war der höchste Wert beim tiefsten Sensor bei 34,5 Volumprozent. Bei allen weiteren Ereignissen kam das Wasser maximal bis zum höchstgelegenen Sensor und sickerte nicht weiter in den Straßenkörper ein. Die Ursache für die Ausschweifungen des Sensors HP3 könnten Lufteinschlüsse zwischen den Sondenstäben sein (Abbildung 19).

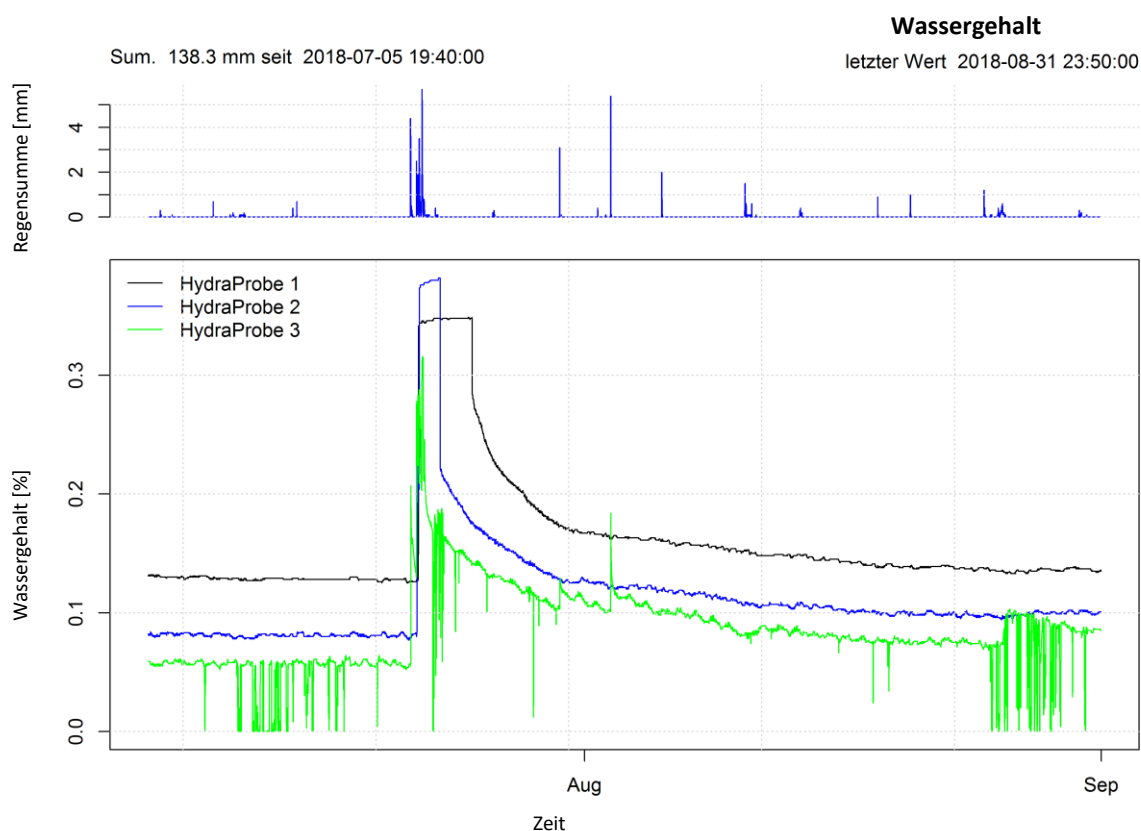


Abbildung 19: Wassergehalt der HP Sensoren während des gesamten Untersuchungszeitraumes

4.6 Temperaturverlauf

Die Temperaturkurven über den gesamten Untersuchungszeitraum verdeutlichen, dass mit zunehmender Bodentiefe, die Schwankungsbreite abnimmt und die Temperaturverläufe flacher werden. Zudem sanken bei größeren Niederschlagsereignissen die Temperaturkurven ab, wobei sie rasch wieder in die ursprünglichen Verläufe zurückkehrten. Die größten Schwankungen verzeichnete die Lufttemperatur. Während des Versuchszeitraumes lag die maximale Lufttemperatur bei 30,2 Grad Celsius der Minimalwert betrug hingegen zwei Grad Celsius (Abbildung 20).

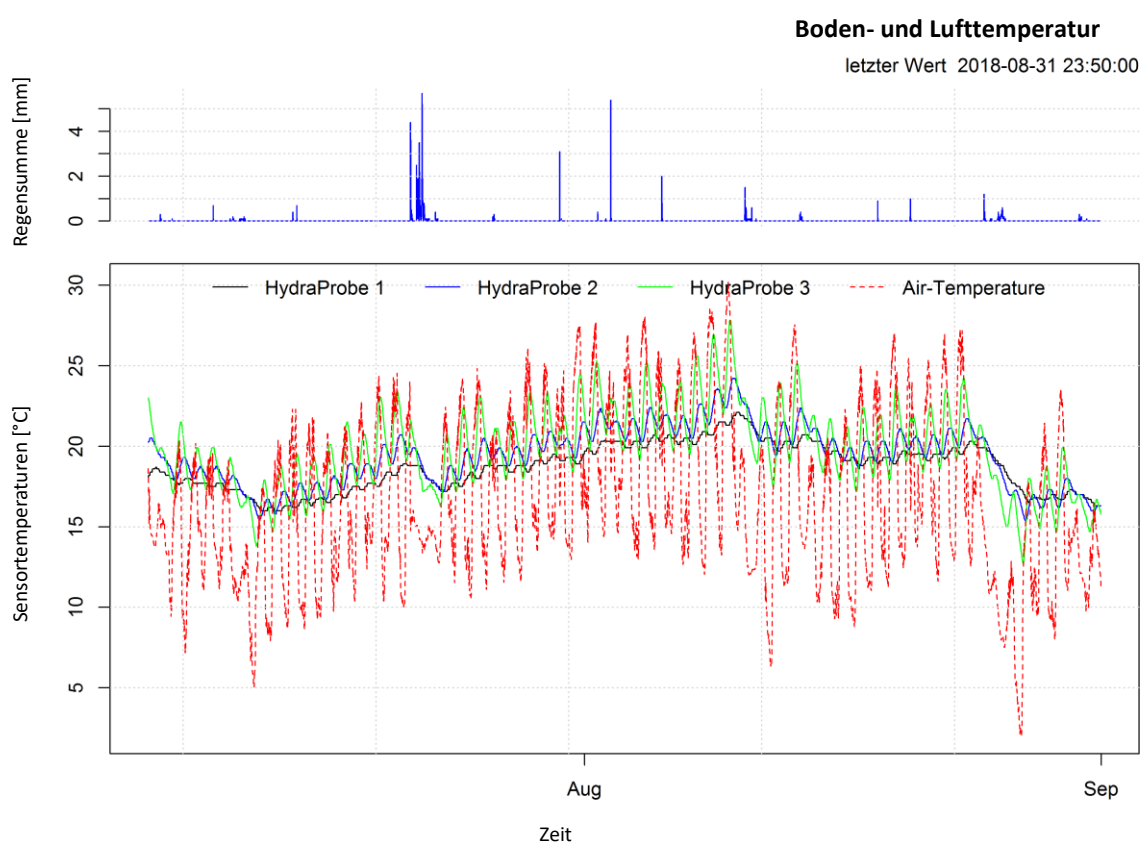


Abbildung 20: Luft- und Bodentemperatur während des gesamten Untersuchungszeitraumes

4.7 Tragfähigkeitsmessungen

Die Tragfähigkeitsmessungen erfolgten über einen Zeitraum von 51 Tagen. In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die Messwerte deskriptiv dargestellt mit anschließenden Boxplots (Abbildung 21).

Tabelle 5: Deskriptive Werte der Tragfähigkeitsmessungen

10.07.2018-29.08.2018	n	Min	Max	Mittelwert	Standardabweichung
Tragfähigkeit_talseitig [MN/m ²]	29	22	149	94	30
Tragfähigkeit_bergseitig [MN/m ²]	29	34	132	86	33

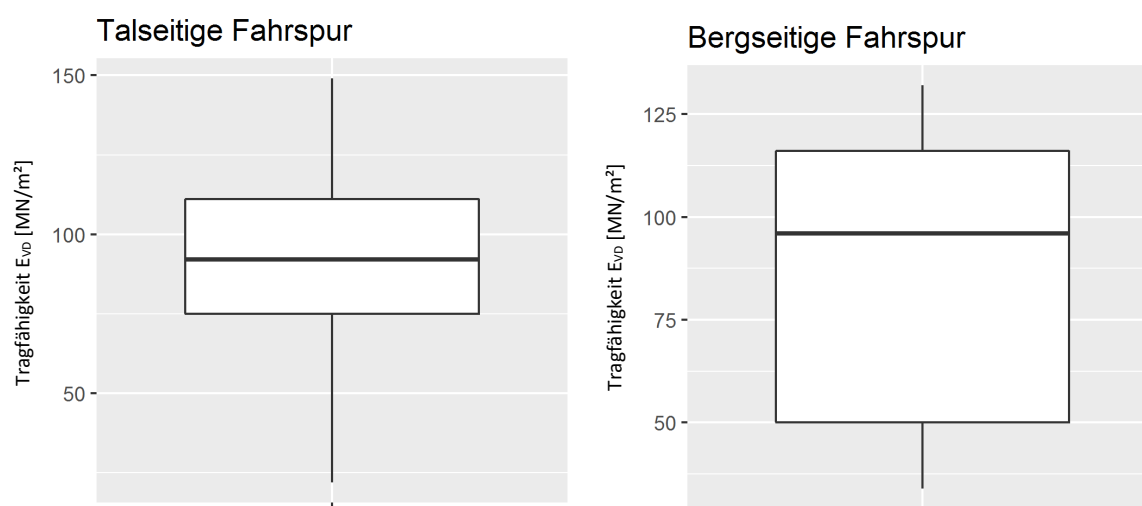


Abbildung 21: Boxplots für die talseitigen und bergseitigen Tragfähigkeitsmessungen

Daraus geht hervor, dass der Mittelwert über den Versuchszeitraum 90 MN/m² E_{VD} beträgt wobei die Spannweite zwischen 22 und 149 MN/m² E_{VD} liegt. Die Minimalwerte betragen 22 MN/m² E_{VD} talseitig und 34 MN/m² E_{VD} bergseitig. Bei insgesamt sechs Messungen fiel zumindest ein gemessener Wert unter den Sollwert von 40 MN/m² E_{VD}. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass an fünf von 51 Tagen eine Holzabfuhr Schäden an der Forststraße verursacht hätte. Im restlichen Zeitraum ist eine schadlose Befahrbarkeit möglich gewesen. Der niedrigste Messwert betrug 22 MN/m² E_{VD} und der höchste 149 MN/m² E_{VD}, beide wurden in der talseitigen Fahrspur gemessen.

Im nachfolgenden Diagramm ist der Tragfähigkeitsverlauf in Kombination mit dem Niederschlag über den Versuchszeitraum ersichtlich.

Tendenziell nimmt die Tragfähigkeit während Niederschlagsperioden ab, und kehrt nach einer kurzen Auftrocknungszeit wieder zu den ursprünglichen Werten von über 100 MN/m² E_{VD} zurück (Abbildung 22).

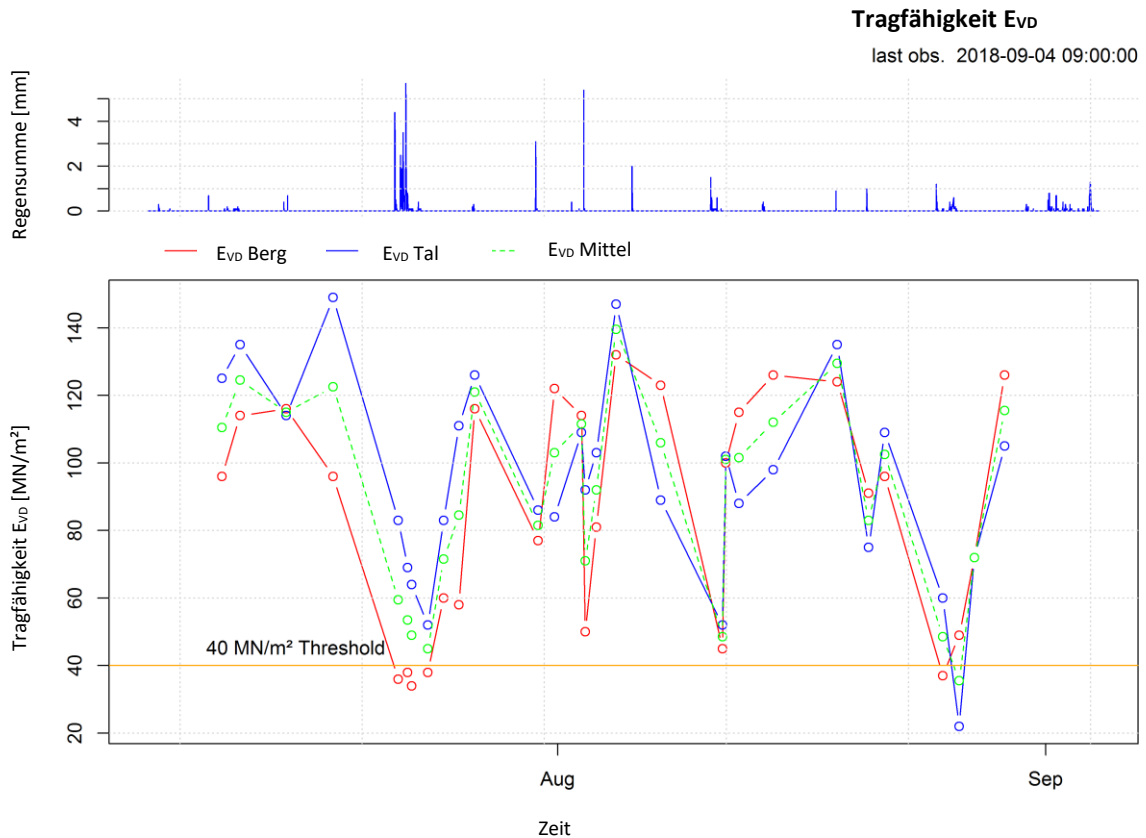


Abbildung 22: Tragfähigkeitsverlauf in Abhängigkeit des Niederschlags

4.8 Einfluss des Niederschlags auf die Tragfähigkeit

4.8.1 Größte Niederschlagsmenge (85,7 mm)

Beim größten Regenereignis des Versuchszeitraums fiel ein Gesamtniederschlag von 85,7 Millimeter, wobei sich die Hauptniederschlagsmenge von 21.07.2018 (13:00 Uhr) bis 22.07.2018 (10:00 Uhr) ereignete. Die Tragfähigkeit der Forststraße sank bereits am Abend des 21.07.2018 in den kritischen Bereich, da auf einer Fahrspur der Wert unter $40 \text{ MN/m}^2 E_{VD}$ lag. Die niedrigste Tragfähigkeit von $34 \text{ MN/m}^2 E_{VD}$ wurde am 22.07.2018 um 17:00 Uhr gemessen. Am Abend des 23.07.2018 begann die Tragfähigkeit wieder zu steigen und am 25.07.2018 erreichte sie wieder einen Mittelwert von $84,5 \text{ MN/m}^2 E_{VD}$. Daraus lässt sich schließen, dass ab diesem Zeitpunkt, also vier Tage nach Beginn des Ereignisses, die Forststraße wieder problemlos von LKWs befahren werden könnte (Abbildung 23).

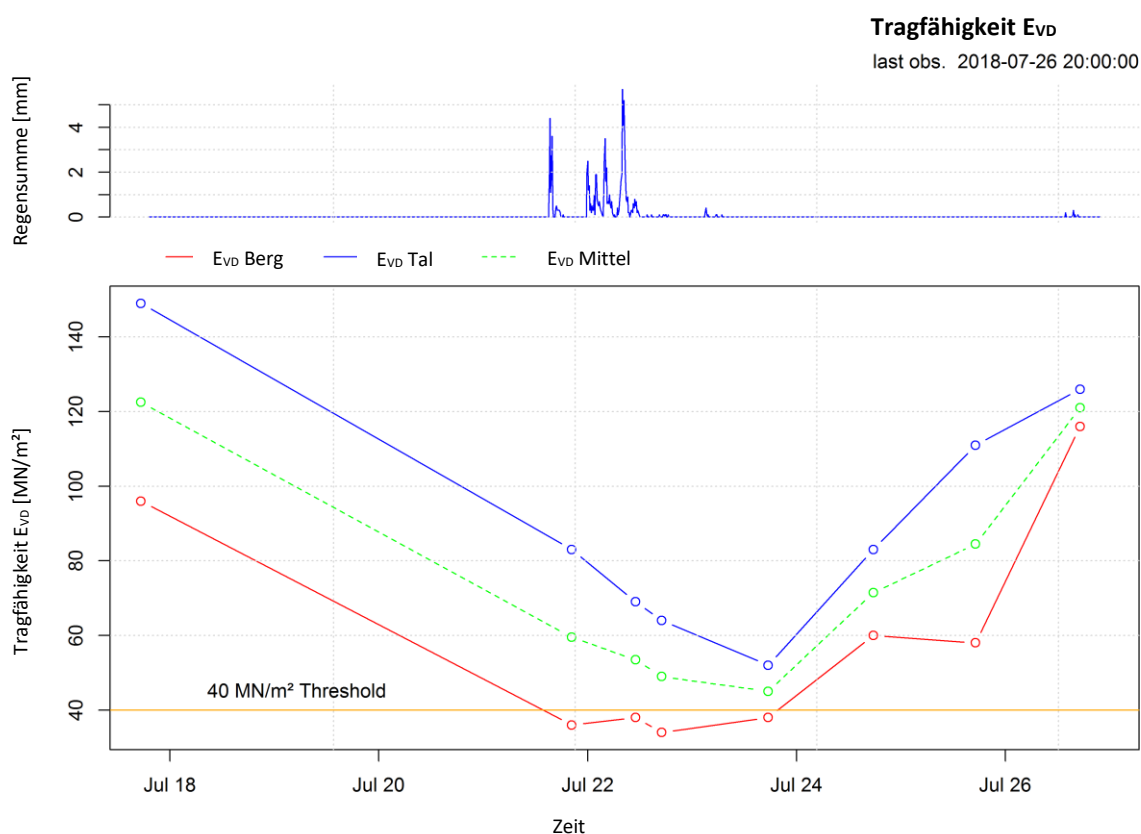


Abbildung 23: Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Niederschlags

Der Wassergehalt beim ersten Regenschauer stieg nur beim höchst gelegenen Sensor kurz an, während zu den tieferliegenden Sensoren kein Wasser durchsickerte. Zu Beginn des zweiten und länger andauernden Schauers konnte bei allen drei Sensoren ein sprunghafter Anstieg des Wassergehalts verzeichnet werden. Die Kurve des höchstgelegenen Sensors flachte jedoch am schnellsten wieder ab, da das Wasser bei diesem Material am schnellsten durchsickert. Der mittlere Sensor hingegen zeigte den stärksten Anstieg, ging aber nach einem Tag wieder sprunghaft in den Ausgangszustand zurück. Der tiefst gelegene Sensor wies vergleichsweise einen geringeren Anstieg auf, allerdings blieb der Wassergehalt über einen längeren Zeitraum gesättigt. Wie folgt kehrte der Wassergehalt erst am 25.07.2018 langsam wieder in den Ausgangszustand zurück. Die relativ hohe Temperatur während des Abtrocknungsvorganges, Höchsttemperatur 24,8 Grad und Tiefsttemperatur 10 Grad, könnten den Vorgang etwas beschleunigt haben. Zudem betrug die mittlere Windstärke über diesen Zeitraum 0,8 m/s (Abbildung 24).

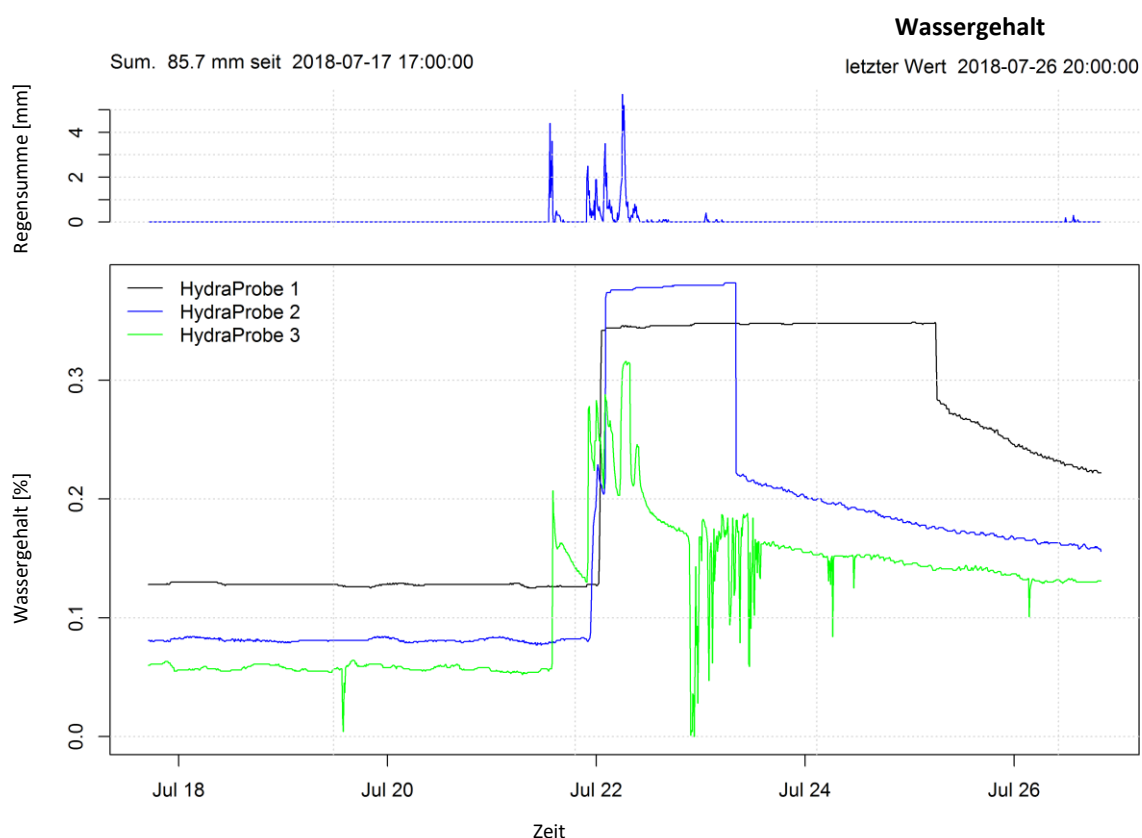


Abbildung 24: Wassergehalt der Sensoren in Abhängigkeit des Niederschlags

4.8.2 Wetterextreme (Gewitter)

as erste Gewitter fand am 30.7.2018 statt, bei diesem Ereignis fiel in einer halben Stunde 6,9 Millimeter Regen. Infolgedessen stieg der Wassergehalt am HP3 Sensor, in 20 Zentimetern Tiefe, um zirka drei Prozent an. Zu den untersten Sensoren drang das Wasser jedoch nicht vor. Die Tragfähigkeit sank nach dem Ereignis auf $77 \text{ MN/m}^2 E_{VD}$ ab, was für die Befahrung mittels LKW noch kein Problem darstellt. Beim zweiten Gewitter am 02.08.2018 zeichnete die Wetterstation 5,7 Millimeter Niederschlag, während eines Zeitraums von zwanzig Minuten, auf. Der Feuchtegehalt im obersten Sensor stieg im Vergleich zum ersten Gewitter um mehr als das Doppelte, bei den untersten Sensoren trat wiederum keine Änderung ein. Überdies fiel auch die Tragfähigkeit etwas stärker ab und erreichte einen Wert von $50 \text{ MN/m}^2 E_{VD}$. Daraus lässt sich ableiten, dass bei beiden Ereignissen ein Befahren der Forststraße ohne erhöhte Schäden möglich wäre. Allerdings ist zu erwarten, dass beim zweiten Ereignis nach mehrmaliger Befahrung Schäden entstehen könnten (Abbildung 25, 26).

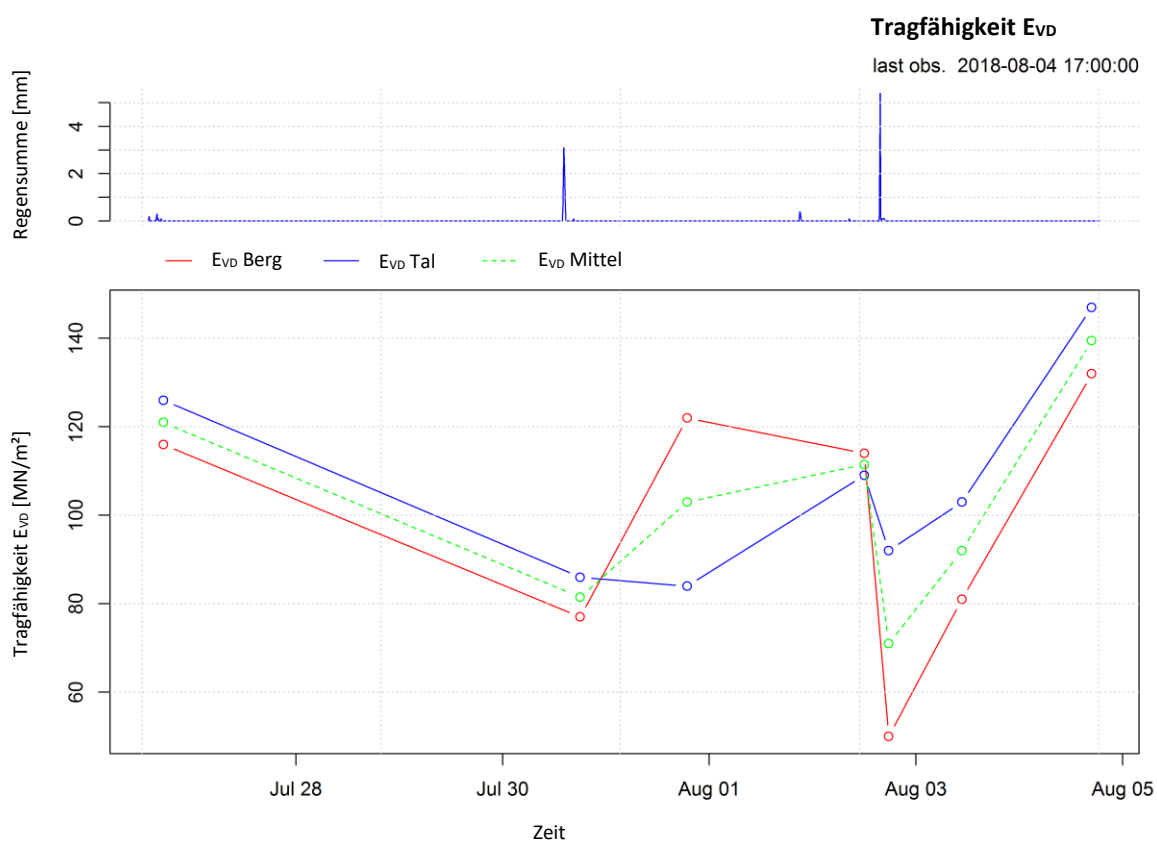


Abbildung 25: Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Niederschlags

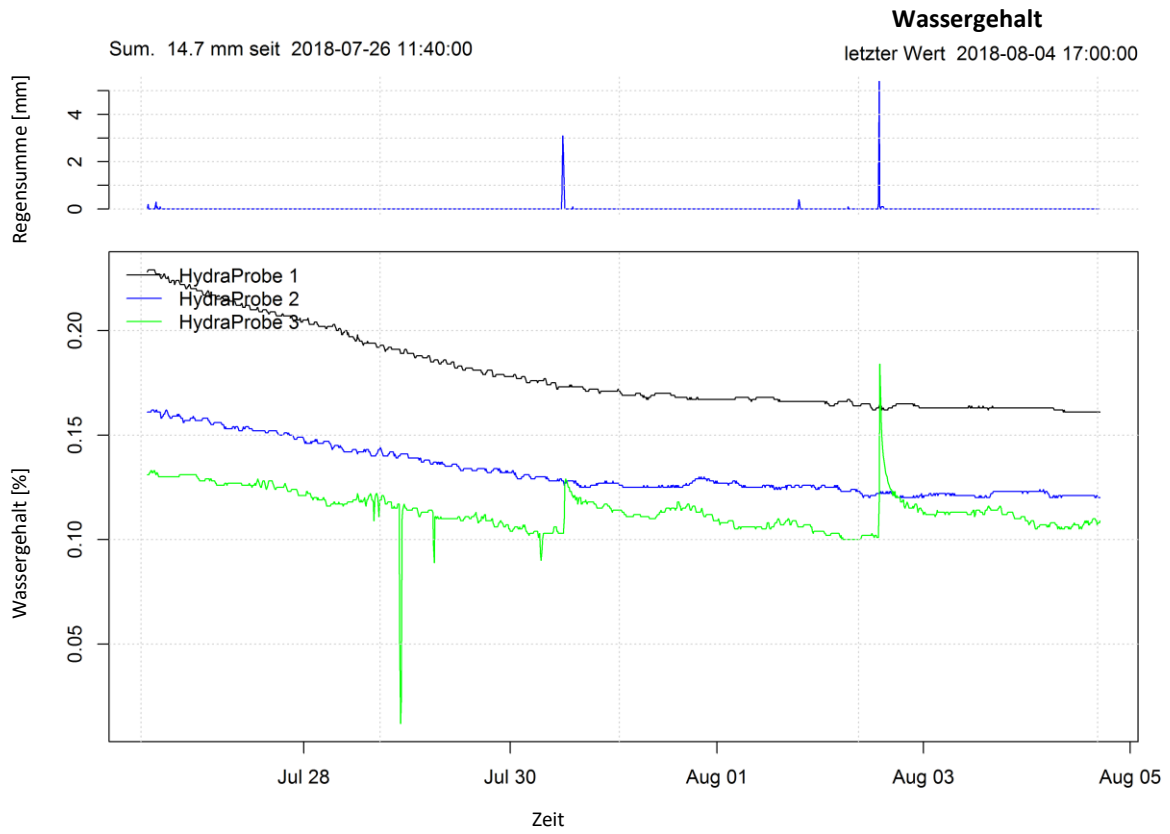


Abbildung 26: Wassergehalt der Sensoren in Abhängigkeit des Niederschlags

4.8.3 6,4 mm Niederschlag/16 h

Während eines Ereignisses, bei dem es innerhalb von 16 Stunden 6,4 Millimeter geregnet hat, konnte man keine Änderung im Wassergehalt erkennen, das heißt, dass das Wasser nicht einmal in eine Tiefe von zwanzig Zentimetern durchdringen konnte. Im Anschluss an den Regen sank allerdings die Tragfähigkeit für kurze Zeit auf einen kritischen Wert von 45 MN/m^2 E_{VD} ab, stieg jedoch noch am gleichen Tag wieder auf 100 MN/m^2 E_{VD} an. Dies lässt vermuten, dass während des Regens die Verschleißschicht der Forststraße aufgeweicht wird, sodass die Tragfähigkeit vermindert wird. Da das Wasser aber nicht in den Straßenkörper einsickerte, erfolgte eine rasche Trocknung der Fahrbahn und die Tragfähigkeit kehrte erneut zu ihren ursprünglichen Werten zurück (Abbildung 27).

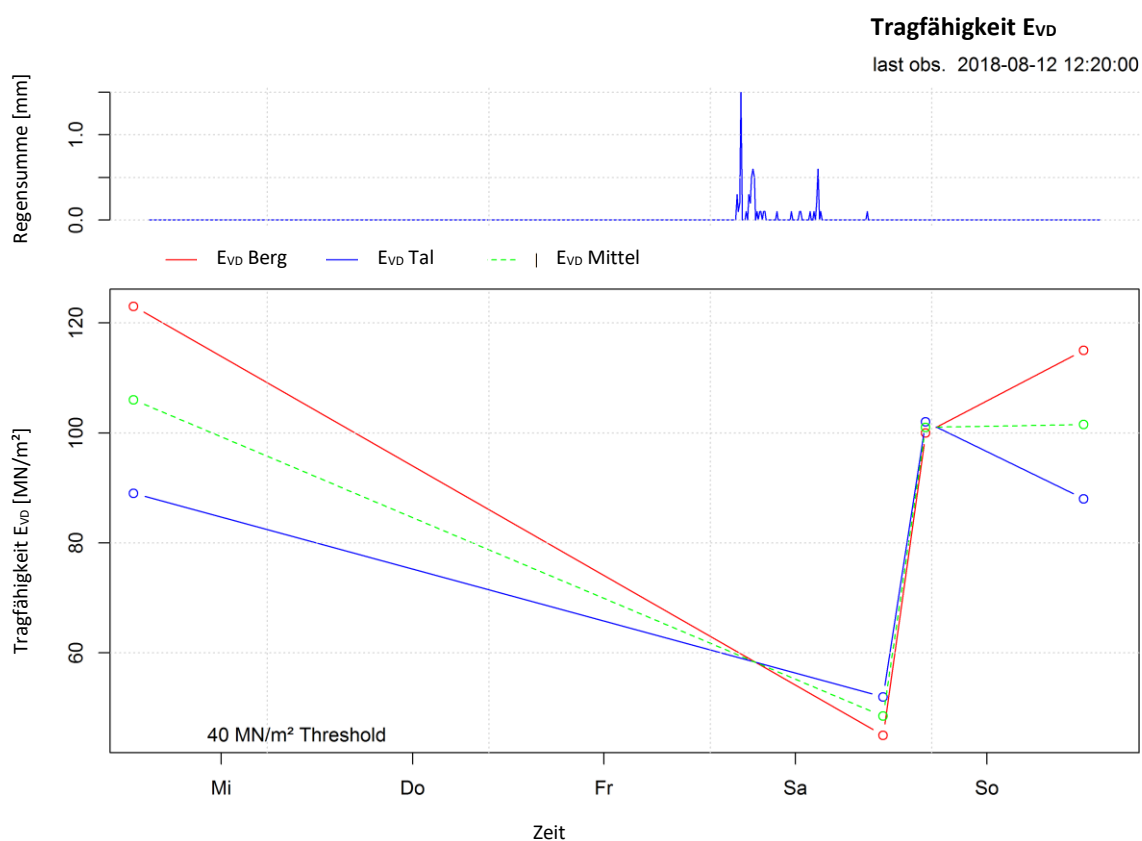


Abbildung 27: Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Niederschlags

4.8.4 14,9 mm Niederschlag/31 h

Beim letzten Ereignis während des Untersuchungszeitraumes fielen 14,9 Millimeter Niederschlag innerhalb von 31 Stunden. Es regnete vom Abend des 24.08.2018 bis am Morgen des 26.08.2018 wobei, zwei Spitzen zu erkennen sind. Zwölf Stunden nach Beginn des Niederschlags fiel die Tragfähigkeit schon unter die Mindestanforderungen ab. Auf einer Fahrspur wurde lediglich ein Wert von $37 \text{ MN/m}^2 E_{VD}$ gemessen. Auffallend ist, dass die Niederschlagsmenge bis zu diesem Zeitpunkt nur 4,8 Millimeter betrug. Dies lässt vermuten, dass die Tragschicht übermäßig aufgeweicht wurde, sodass die Tragfähigkeit auf diesen Wert absank. In den folgenden 19 Stunden fielen die restlichen zehn Millimeter Niederschlag. Der Minimalwert der Tragfähigkeit wurde am 26.08.2018 mit $22 \text{ MN/m}^2 E_{VD}$ gemessen. Einen Tag danach, am 27.08.2018, stieg die Tragfähigkeit wieder auf einen Wert von $72 \text{ MN/m}^2 E_{VD}$ an, der eine schadlose Befahrbarkeit zulassen würde. Am 29.08.2018 erreichte die Tragfähigkeit wieder die ursprünglichen Werte. Der Wassergehalt im Boden stieg nur beim obersten Sensor um zirka zwei Prozent an die anderen Sensoren blieben unverändert (Abbildung 28).

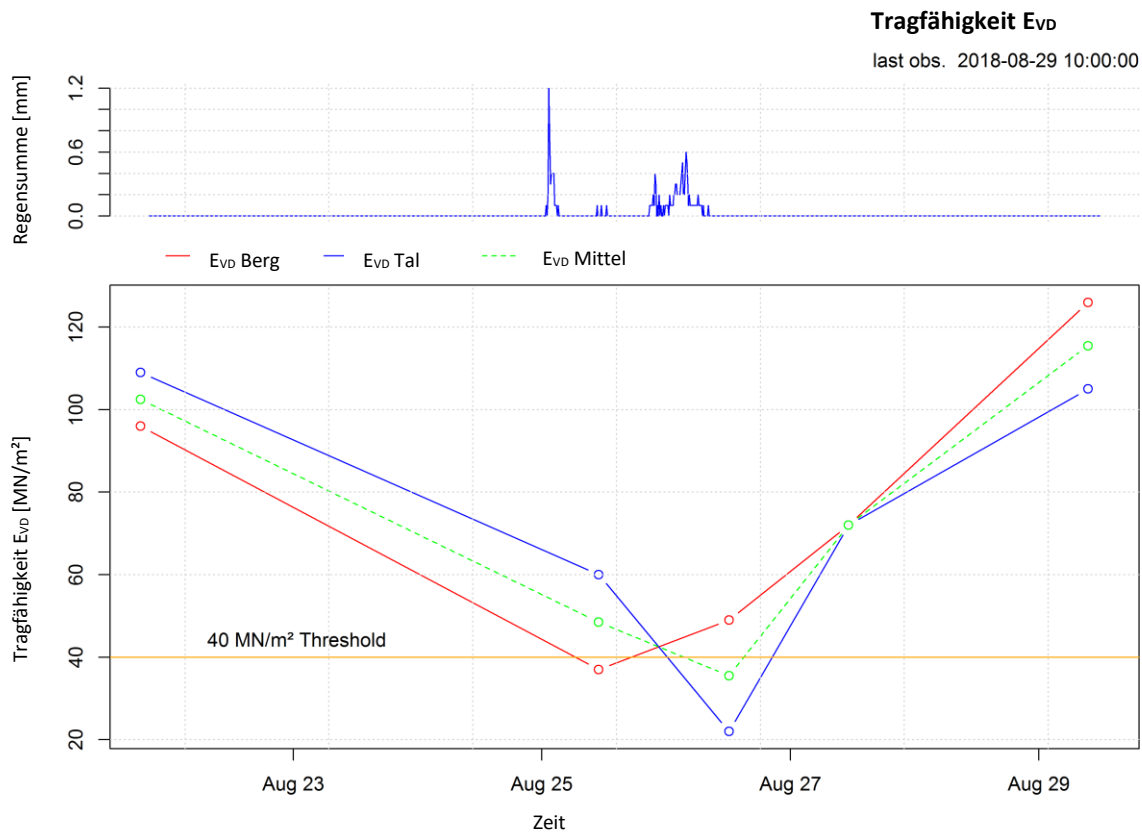


Abbildung 28: Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Niederschlags

4.9 Ampelsystem

Da die Tragfähigkeitsmessungen nicht täglich durchgeführt wurden, sondern nur bei Änderung der Witterungsverhältnisse wurde die Annahme getroffen, dass bei unveränderten Wetterbedingungen auch die Tragfähigkeitswerte annähernd gleichbleibend sind.

Das erarbeitete Ampelsystem wird für den Untersuchungszeitraum in einem Diagramm dargestellt. Bei den grün hinterlegten Bereichen ist eine schadlose Befahrung möglich, da die Tragfähigkeit Werte von mehr als 40 MN/m² E_{VD} aufweist. In den orangen Bereichen sollte man zu viele Lastübergänge vermeiden, da ansonsten Schäden an der Forststraße entstehen könnten. Die Tragfähigkeit im orangen Bereich beträgt zwischen 30 und 40 MN/m² E_{VD}. Die roten Bereiche kennzeichnen jene Tage, an denen die Forststraße nicht mit LKW befahren werden sollte, da ansonsten Schäden am Forststraßenkörper auftreten würden. Im roten Bereich sind die Tragfähigkeitswerte unter 30 MN/m² E_{VD} (Abbildung 29).

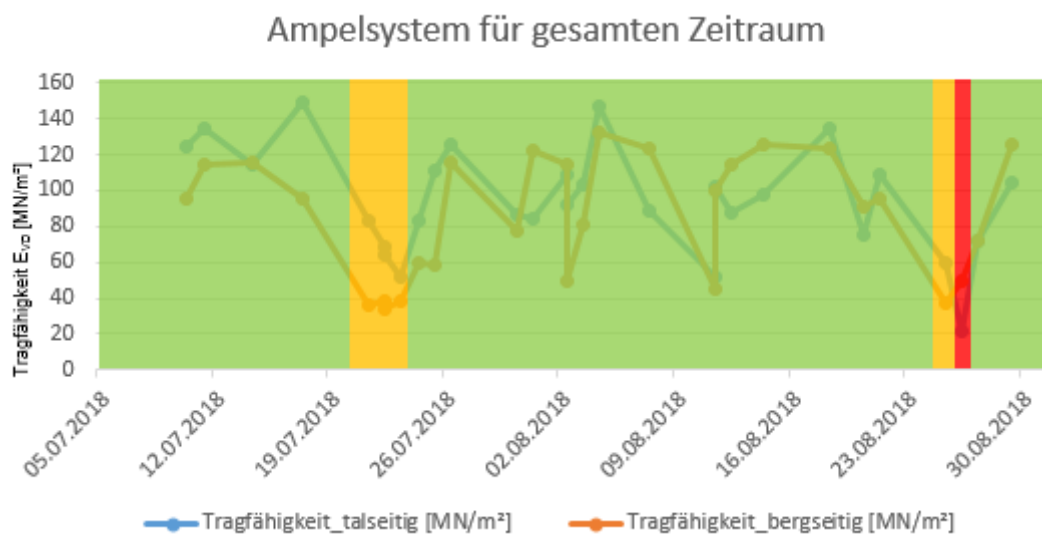


Abbildung 29: Ampelsystem über den gesamten Versuchszeitraum

5 DISKUSSION

Da diese Arbeit den Grundstein für weitere Arbeiten in diesem Bereich darstellt, bildet die verständliche und nachvollziehbare Beschreibung des Versuchsaufbaues einschließlich der Grundlagen den zentralen Bestandteil. Die Aufnahmen erfolgten über die Monate Juli und August 2018. Von weiterem Interesse wäre mit selbem Versuchsaufbau den Frostaufgang, mit den dazugehörigen Tragfähigkeiten und Wassergehältern der untersuchten Forststraße zu erfassen. Der Versuchsaufbau, mit den Hydra Probe Sensoren zur Wassergehaltsbestimmung erfolgte einwandfrei und kann für weitere Arbeiten nach dem gleichen Schema verwendet werden. Da die Voreinstellung „Sand“ der Hydra Probe Sensoren fast identisch ist, wie die spezifische Kalibrierung für dieses Material, könnte in Zukunft diese Voreinstellung verwendet werden.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass nach einer länger anhaltenden Regenperiode mindestens einen Tag abgewartet werden sollte bis wieder mit der Holzabfuhr begonnen werden kann. Nach Gewittern oder Ereignissen die nicht länger als einen Tag andauern, kann nach einem halben Tag die Forststraße wieder problemlos befahren werden. Meiner Meinung nach ist in den Sommermonaten, sofern keine extremen Niederschlagsereignisse eintreten, eine Holzabfuhr, die der Witterung angepasst ist für einen Forstbetrieb im untersuchten Gebiet relativ einfach zu managen.

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen nur einen kleinen Ausschnitt des Kalenderjahres und sind auch nur für das Untersuchungsgebiet anwendbar. Daher wäre es sinnvoll, vor allem den Frostaufgang zu beobachten und die Untersuchungen in anderen Gebieten mit unterschiedlichen Grundgesteinen und Straßenbauweisen durchzuführen. Interessant wäre, für jedes Wuchsgebiet ein derartiges Ampelsystem zu konzipieren. In weiterer Folge könnte man ein Modell erstellen, welches ausgehend vom Niederschlag den Wassergehalt und die Tragfähigkeit der jeweiligen Forststraße vorhersagt (KESTLER et al. 2000).

Der Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und der Tragfähigkeit einer Forststraße konnte, wie auch schon von DIETZ et al. 1984 und KUONEN, 1983 beschrieben, festgestellt werden. Davon ausgehend können nun weitergehende Forschungen dieser Thematik durchgeführt werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, die Auswirkungen des Niederschlages auf die Tragfähigkeit von Forststraßen zu untersuchen. Zudem ist die vorliegende Arbeit als Grundstein und als Anleitung für nachfolgende Forschungsarbeiten zu sehen, da diese Thematik bisher nur unzureichend erforscht ist.

Die Spezi­alsensoren der Firma Hydra Probe wurden, kalibriert und für den Einsatz in einer Forststraße vorbereitet. Am Standort wurde eine Wetterstation mit drei Hydra Probe Sensoren installiert, um über den Versuchszeitraum sämtliche Wetter- und Bodendaten zu erhalten. Um die Plausibilität der Werte von den Sensoren zu überprüfen wurde eine Validierung mittels Darrschrankmethode durchgeführt. Analog dazu wurden die Tragfähigkeitsmessungen mit dem Terra Test 3000 durchgeführt. Die Messungen erfolgten wöchentlich und während Niederschlagsereignissen. Weiters wurde auch noch eine Sieblinie einer Mischprobe des Straßenmaterials erstellt.

Die Tragfähigkeit änderte sich bereits bei sehr geringen Niederschlagsmengen, bei denen noch keine Veränderung des Wassergehalts bei den Sensoren festgestellt werden konnte. Bei einem Niederschlag von 14,9 mm/31 h sank die Tragfähigkeit der Forststraße nach nur 4,8 Millimeter Niederschlag auf einen Wert von 37 MN/m² E_{VD}. Sinkt der Wert unter 40 MN/m² E_{VD} sollte von einer Befahrung mit LKWs abgesehen werden, um etwaige Schäden zu vermeiden. Innerhalb des Untersuchungszeitraumes wurde als niedrigster Wert 22 MN/m² E_{VD} nach einer Niederschlagsmenge von 14,9 Millimeter gemessen. Zu diesem Zeitpunkt konnte man lediglich beim HP3 einen Anstieg von zirka zwei Prozent Wassergehalt erkennen. Beim Starkregenereignis mit einem Niederschlag von 85 mm/48 h war die Forststraße für vier Tage nicht schadlos mit LKW befahrbar. Während dieses Ereignisses stieg auch bei den zwei untersten Sensoren der Wassergehalt an.

Anhand der Ergebnisse konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen Niederschlag und Tragfähigkeit der Forststraße festgestellt werden.

7 LITERATURVERZEICHNIS

Arenz, B., Berger, W., Burg, A., Essel, R., 2008. Netzmeister: Technisches Grundwissen Gas Wasser Fernwärme Bereich Umwelt. Oldenbourg Industrieverlag. 2. Auflage, S. 765

Bischoff, G., Blaschke, M., Bode, M., Böhm, V., 2011. Der Forstwirt. Stuttgart: Eugen Ulmer KG. S. 687

Brito, L. A. T., 2011. Design Methods for low Volume Roads. The University of Nottingham, Department of Civil Engineering. S. 237

Burlet, E., 1982. Dimensionierung und Verstärkung von Straßen mit geringem Verkehr und flexiblem Oberbau. Forstarch. S. 79

Christoffersson, P., Johansson, S., 2012. Rehabilitation of the Timmerleden Forest Road. Condition Survey, Design Proposals, Construction and Quality Control. A Roadex Demonstration Project. ROADEX "Implementing Accessibility" Lead Partner: The Swedish Transport Administration, Northern Region, Box 809, S-971 25 Luleå. S. 39

Dietz, P., Knigge, W., Löffler, H., 1984. Walderschließung. Ein Lehrbuch für Studium und Praxis unter besonderer Berücksichtigung des Waldwegebaus. Hamburg, Berlin: Parey Verlag. S. 426

Dragosits, F., 1966. Vergleichende Standortsdynamik zweier Waldbestände auf Weinsberger Granit. Einzelne Standortsfaktoren und ihre Auswirkungen auf die Bonität. Dissertationsarbeit: BOKU Wien. S. 69

Eichinger, M., Eckmüllner, O., 2012. 60 Jahre Waldbodenkalkung im Habsburg Lothring'schen Gut Persenbeug. Eine ökonomische und ökologische Auswertung. Höhere Lehranstalt für Umwelt und Wirtschaft des Zisterzienserstiftes Zwettl, 3683 Yspertal. S. 54

Floss, R., 1979. Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, ZTVE – StB 76. Kirschbaum Verlag. Bonn-Bad Godesberg. S. 454

Heinimann, H., R., 2001. Erschließungsanlagen I. Unterlagen zur Vorlesung Forstliches Ingenieurwesen. Ausgabe SS01. ETH Zürich. S.48

Hirt, R., 1996. Technische Minimalanforderungen im Güter- und Waldstraßenbau. Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammetrie, genie rural. 94 (8): 433-437

Johansson, S., Johansson K., Ekedahl, F., 2007. Policies for Forest Roads-Some Proposals. ROADEX III Northern Periphery. S. 42

Kestler, M. A., Knight, T., Krat, A. S., 2000. Thaw Weakening and Load Restriction Practices on Low Volume Roads. US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center. S. 13

Kezdi, A., 1970. Handbuch der Bodenmechanik, Band II Bodenmechanik im Erd-, Grund- und Strassenbau. VEB Verlag für Bauwesen Berlin, Akademiai Kiado Budapest. S. 309

Kopf, F., Adam, D., 2003. Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz. 4. Österreichische Geotechniktagung, Tagungsbeiträge, ÖIAV/MANZ, Wien, S. 19

Kuonen, V., 1983. Wald und Güterstraßen. Planung – Projektierung – Bau. Eigenverlag. S. 743

Kurat, G., 1965. Der Weinsberger Granit im südlichen Österreichischen Moldanubikum. Mineralogy and Petrology, 9, 202-227. Wien: Springer Verlag. S. 25

ÖBF, 2016. Juristische und politische Aspekte der Freigabe von Forststraßen aus Sicht der österreichischen Bundesforste AG. Präsentation von Gernot Strasser 15.09.2016

Ohne Verfasser (CAMPBELL SCIENTIFIC CORP.), 2017. Instruction Manual. HydraProbe Steven´s Water Soil Sensor. Campbell Scientific (Canada) Corp. S. 25

Ohne Verfasser (STEVENS), 2006. The Parameters of the Hydra Probe. Stevens Water Monitoring Systems, Inc. S. 13

Ohne Verfasser (TERRATEST GMBH), 2012. Katalog-TERRATEST-3000-GPS. Dianastraße 4, 16565 Lehnitz/Berlin, Germany. S.22

Rowlandson, T. L., Berg, A. A., Bullock, P. R., Ojo, E. R., McNairn, H., Wiseman, G., Cosh, M. H., 2013. Evaluation of several calibration procedures for a portable soil moisture sensor. *Journal of Hydrology* 498 (2013) 335-344, Canada, USA. S. 10

Ryan, T., Phillips, H., Ramsay, J., Dempsey, J., 2004. *Forest Road Manual. Guidelines for the design, construction and management of forest roads.* COFORD, Dublin. S. 170

Seyfried, M. S., Grant, L. E., Du, E., Humes, K., 2005. Dielectric Loss and Calibration of the Hydra Probe Soil Water Sensor, *Vadose Zone J.*, Vol. 4, November 2005, S. 10

Stampfer, K., 2018. *Forstliches Ingenieurwesen. Vorlesungsunterlagen Studienjahr 2018/2019.* Universität für Bodenkultur. Wien.

Tholen, O., Sharma, J., Terrel, R.L., 1985. Comparison of Falling Weight Deflectometer with other Deflection Testing Devices, *Transportation Research Record N1007, Nondestructive Pavement Evaluation and Overlay Design.* S. 7

Toscani, P., 2019. *Instandhaltungskosten österreichisches Testbetriebsnetz.* mündliche Mitteilung, Wien

Weaver, W., Hagans, D., 2009 *Road upgrading, Decommissioning and Maintenance – Estimating Costs on Small and Large Scales.* McKinleyville. S. 24

Internetquellen:

http://habsburg.at/gut_persenbeug.html, 13.03.2018.

[http://atlas.noel.gv.at/webgisatlas/\(S\(hmqzj3rxuilnbmfrax22izf\)\)/init.aspx?karte=atlas_gst](http://atlas.noel.gv.at/webgisatlas/(S(hmqzj3rxuilnbmfrax22izf))/init.aspx?karte=atlas_gst),
13.03.2018

http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm, 13.03.2018

<https://noe.lko.at/forststra%C3%9Fen-brauchen-pflege+2500+2425372>, 26.02.2018.

https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=GK0035_000_A.pdf, 13.03.2018

Normen:

DIN-Norm 18134 Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch

RVS 08.03.04 Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches

ÖNORM EN ISO 17892-4: 2017 05 01 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016)

ÖNORM L 1050: 2016 03 15 Boden als Pflanzenstandort - Begriffe und Untersuchungsverfahren

8 ANHANG

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für die zeitliche Abfolge von aperiodischen Maßnahmen der Unterhaltung und periodischen der Instandsetzung an einer Forststraße (BURLET 1982 in DIETZ et al. 1984).	5
Abbildung 2: Neubau und Instandhaltungskosten in Abhängigkeit vom Ausbaustandard. 1 Minimalausbau, 2 Maximalausbau, 3 Optimalausbau (HIRT 1977 in DIETZ et al. 1984).....	5
Abbildung 3: Schadenswahrscheinlichkeit bei ton-wassergebundenen Schichten (Naturstraßen) in Abhängigkeit der Längsneigung (HEINIMANN 2001)	6
Abbildung 4: Lage des Weinsberger Waldes - Bärnkopf (NÖ - ATLAS)	9
Abbildung 5: Ausschnitt aus der Geologischen Karte der Republik Österreich 1:50.000 - 35 Königswiesen (THIELE 1984), in lila gefärbt der Weinsberger Granit	10
Abbildung 6: Aufteilung des Niederschlages über die Monate, rsum --> Niederschlagssumme, rmax --> größter Tagesniederschlag (ZAMG)	11
Abbildung 7: Aufbau des Sensors (CAMPBELL SCIENTIFIC CORP. 2017).....	13
Abbildung 8: Kalibrierungsvorgang des Sensors	14
Abbildung 9: Links: Lage der Hydra Probe Sensoren im Straßenprofil, rechts: Lage höchstgelegener Sensor	16
Abbildung 10: links: Lage des Profils mit den Sensoren, rechts: Einbau des dritten Sensors .	17
Abbildung 11: Korngrößenverteilung des Straßenmaterials	20
Abbildung 12: Bestandteile der Wetterstation: 1 Lage der Sensoren, 2 Niederschlagsmesser, 3 Antenne, 4 Schalenkreuzanemometer mit Windfahne, 5 Thermometer und Hygrometer, 6 Blitzableiter, 7 Solarstrahlungsmesser, 8 Solarpanel, 9 Anschlusskasten.....	21
Abbildung 13: Komponenten der dynamischen Lastplatte (KOPF und ADAM 2003).....	22
Abbildung 14: Versuchsaufbau der Tragfähigkeitsmessungen	23
Abbildung 15: Kalibrierungsdurchläufe mit einer linearen Ausgleichsgerade.....	25
Abbildung 16: Boxplots für den Wassergehalt der Darrschrankmethode.....	27
Abbildung 17: Kornsummenkurve der Sieblinie	28
Abbildung 18: Niederschlag während des gesamten Untersuchungszeitraumes	29
Abbildung 19: Wassergehalt der HP Sensoren während des gesamten Untersuchungszeitraumes.....	30
Abbildung 20: Luft- und Bodentemperatur während des gesamten Untersuchungszeitraumes	31
Abbildung 21: Boxplots für die talseitigen und bergseitigen Tragfähigkeitsmessungen.....	32
Abbildung 22: Tragfähigkeitsverlauf in Abhängigkeit des Niederschlags	33
Abbildung 23: Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Niederschlags	34
Abbildung 24: Wassergehalt der Sensoren in Abhängigkeit des Niederschlags.....	35
Abbildung 25: Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Niederschlags.....	36

Abbildung 26: Wassergehalt der Sensoren in Abhängigkeit des Niederschlags.....	37
Abbildung 27: Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Niederschlags	38
Abbildung 28: Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Niederschlags	39
Abbildung 29: Ampelsystem über den gesamten Versuchszeitraum	40

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Instandhaltungskosten in verschiedenen Ländern	7
Tabelle 2: Tragwerte in Abhängigkeit vom Baustoff und der Dicke der ungebundenen Tragschicht nach ZTVE-StB (angelehnt an DIETZ et al. 1984).....	8
Tabelle 3: Deskriptive Werte der Darrschrankmethode vom 09.07.2018.....	27
Tabelle 4: Deskriptive Werte der Darrschrankmethode vom 10.07.2018.....	27
Tabelle 5: Deskriptive Werte der Tragfähigkeitsmessungen	32
Tabelle 6: Urtablette der Darrschrankmethode vom 09.07.2018	49
Tabelle 7: Urtablette der Darrschrankmethode vom 10.07.2018	50
Tabelle 8: Urtablette der Tragfähigkeitsmessungen	51

8.3 Formelverzeichnis

Formel 1:	15
Formel 2:	15
Formel 3:	15
Formel 4:	15
Formel 5:	15
Formel 6:	18
Formel 7:	22
Formel 8:	26

8.4 Urtabellen der deskriptiven Auswertungen

Tabelle 6: Urtablette der Darrschrankmethode vom 09.07.2018

ID	Tara [g]	Brutto feucht [g]	Netto feucht [g]	Brutto_trocken [g] 09.07.2018	Netto_trocken [g] 09.07.2018	Masse Wasser [g] 09.07.2018	Wassergehalt [%] 09.07.2018
135	9,0	321,9	312,9	298,5	289,5	23,4	7,5
129	8,9	348,7	339,8	323,4	314,5	25,3	7,4
159	8,9	319,8	310,9	296,0	287,1	23,8	7,7
136	8,9	363,2	354,3	335,7	326,8	27,5	7,8
43	8,9	327,0	318,1	302,5	293,6	24,5	7,7
41	8,8	310,8	302,0	288,0	279,2	22,8	7,5
164	8,9	324,5	315,6	302,8	293,9	21,7	6,9
58	9,2	340,2	331,0	316,0	306,8	24,2	7,3
40	8,9	335,5	326,6	311,1	302,2	24,4	7,5
54	9,1	402,1	393,0	375,2	366,1	26,9	6,8
122	8,8	349,6	340,8	323,0	314,2	26,6	7,8
39	9,0	345,9	336,9	322,4	313,4	23,5	7,0
119	8,9	321,1	312,2	297,8	288,9	23,3	7,5
132	8,7	332,6	323,9	309,1	300,4	23,5	7,3
57	8,9	357,8	348,9	333,0	324,1	24,8	7,1
161	8,9	350,3	341,4	324,5	315,6	25,8	7,6
176	8,9	339,4	330,5	314,8	305,9	24,6	7,4
56	8,7	348,0	339,3	321,5	312,8	26,5	7,8
126	8,9	358,2	349,3	330,9	322,0	27,3	7,8
154	8,7	327,5	318,8	304,7	296,0	22,8	7,2
46	8,9	347,2	338,3	323,1	314,2	24,1	7,1
116	9,1	338,2	329,1	312,5	303,4	25,7	7,8
166	8,9	356,1	347,2	330,5	321,6	25,6	7,4
175	8,9	382,9	374,0	353,9	345,0	29,0	7,8
118	8,8	340,8	332,0	315,0	306,2	25,8	7,8
106	8,8	330,3	321,5	307,5	298,7	22,8	7,1
137	8,8	312,4	303,6	289,1	280,3	23,3	7,7
51	8,9	341,7	332,8	317,0	308,1	24,7	7,4
133	9,1	313,1	304,0	289,8	280,7	23,3	7,7
160	8,9	389,7	380,8	362,0	353,1	27,7	7,3
45	8,5	320,4	311,9	297,5	289,0	22,9	7,3
123	9,0	320,9	311,9	298,9	289,9	22,0	7,1
66	8,8	354,7	345,9	329,4	320,6	25,3	7,3
68	8,7	356,8	348,1	328,9	320,2	27,9	8,0
134	8,9	337,6	328,7	311,7	302,8	25,9	7,9
103	8,9	356,2	347,3	328,4	319,5	27,8	8,0

Tabelle 7: Urtafel der Darrschrankmethode vom 10.07.2018

ID	Tara [g]	Brutto feucht [g]	Netto feucht [g]	Brutto_trocken [g] 10.07.2018	Netto_trocken [g] 10.07.2018	Masse Wasser [g] 10.07.2018	Wassergehalt [%] 10.07.2018
135	9,0	321,9	312,9	298,3	289,3	23,6	7,5
129	8,9	348,7	339,8	323,2	314,3	25,5	7,5
159	8,9	319,8	310,9	295,8	286,9	24,0	7,7
136	8,9	363,2	354,3	335,6	326,7	27,6	7,8
43	8,9	327,0	318,1	302,6	293,7	24,4	7,7
41	8,8	310,8	302,0	288	279,2	22,8	7,5
164	8,9	324,5	315,6	302,9	294,0	21,6	6,8
58	9,2	340,2	331,0	315,8	306,6	24,4	7,4
40	8,9	335,5	326,6	310,8	301,9	24,7	7,6
54	9,1	402,1	393,0	375,2	366,1	26,9	6,8
122	8,8	349,6	340,8	322,8	314,0	26,8	7,9
39	9,0	345,9	336,9	322,2	313,2	23,7	7,0
119	8,9	321,1	312,2	297,9	289,0	23,2	7,4
132	8,7	332,6	323,9	309,2	300,5	23,4	7,2
57	8,9	357,8	348,9	332,9	324,0	24,9	7,1
161	8,9	350,3	341,4	324,6	315,7	25,7	7,5
176	8,9	339,4	330,5	315,2	306,3	24,2	7,3
56	8,7	348,0	339,3	321,8	313,1	26,2	7,7
126	8,9	358,2	349,3	331,2	322,3	27,0	7,7
154	8,7	327,5	318,8	304,7	296,0	22,8	7,2
46	8,9	347,2	338,3	323	314,1	24,2	7,2
116	9,1	338,2	329,1	312,6	303,5	25,6	7,8
166	8,9	356,1	347,2	330,2	321,3	25,9	7,5
175	8,9	382,9	374,0	353,9	345,0	29,0	7,8
118	8,8	340,8	332,0	315,1	306,3	25,7	7,7
106	8,8	330,3	321,5	307,6	298,8	22,7	7,1
137	8,8	312,4	303,6	289,6	280,8	22,8	7,5
51	8,9	341,7	332,8	317,2	308,3	24,5	7,4
133	9,1	313,1	304,0	289,9	280,8	23,2	7,6
160	8,9	389,7	380,8	362,4	353,5	27,3	7,2
45	8,5	320,4	311,9	297,5	289,0	22,9	7,3
123	9,0	320,9	311,9	298,9	289,9	22,0	7,1
66	8,8	354,7	345,9	329,7	320,9	25,0	7,2
68	8,7	356,8	348,1	329,2	320,5	27,6	7,9
134	8,9	337,6	328,7	312	303,1	25,6	7,8
103	8,9	356,2	347,3	328,8	319,9	27,4	7,9

Tabelle 8: Urtablette der Tragfähigkeitsmessungen

Datum	Uhrzeit	Tragfähigkeit_talseitig [MN/m ²]	Tragfähigkeit_bergseitig [MN/m ²]	Mittelwert [MN/m ²]
10.07.2018	13:30	125	96	111
11.07.2018	17:10	135	114	125
14.07.2018	15:50	114	116	115
17.07.2018	15:20	149	96	123
21.07.2018	18:20	83	36	60
22.07.2018	09:00	69	38	54
22.07.2018	15:00	64	34	49
23.07.2018	15:30	52	38	45
24.07.2018	15:40	83	60	72
25.07.2018	15:10	111	58	85
26.07.2018	15:10	126	116	121
30.07.2018	16:00	86	77	82
31.07.2018	16:50	84	122	103
02.08.2018	10:00	109	114	112
02.08.2018	15:40	92	50	71
03.08.2018	08:40	103	81	92
04.08.2018	14:50	147	132	140
07.08.2018	11:00	89	123	106
11.08.2018	09:00	52	45	49
11.08.2018	14:20	102	100	101
12.08.2018	10:10	88	115	102
14.08.2018	14:30	98	126	112
18.08.2018	16:00	135	124	130
20.08.2018	16:00	75	91	83
21.08.2018	16:30	109	96	103
25.08.2018	09:00	60	37	49
26.08.2018	10:10	22	49	36
27.08.2018	09:15	72	72	72
29.08.2018	07:30	105	126	116