



UNIVERSITÄT
KOBLENZ · LANDAU



Fachbereich 3: Institut für Integrierte Naturwissenschaften
B.Sc. BioGeoWissenschaften

Bachelorarbeit:

**GIS-basierte Analyse der bodenphysikalischen Folgen von
forstwirtschaftlicher Nutzung auf Andosol-Standorten im
nördlichen Rheinland-Pfalz
– Ein multimodaler Ansatz unter Verwendung von
Feldkartierung und Interpolationsmethoden**

Vorgelegt von: Alexander Klein

(215200249)

25.03.2019

1. Gutachter: Dr. J. Zemke
2. Gutachter: Dr. M. Tempel

Tag der Mündlichen Prüfung: 03. April 2019

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	ii
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	v
TABELLENVERZEICHNIS	vii
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	ix
1. EINLEITUNG	1
1.1 Grundlagen.....	2
1.1.1 Bodenverdichtung	2
1.1.1.1 Ursache der Bodenverdichtung.....	2
1.1.1.2 Folge der Bodenverdichtung	3
1.1.2 Bims.....	4
1.2 Untersuchungsgebiet.....	5
1.2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes.....	5
1.2.2 Das Klima im Untersuchungsgebiet.....	6
1.2.3 Geologie und Böden	7
1.2.3.1 Geologie	7
1.2.3.2 Böden	7
1.2.4 Tourismus	8
1.2.5 Rohstoffnutzung	8
2. MATERIAL UND METHODEN	10
2.1 Standortbeschreibung.....	10
2.2 Probennahme.....	12
2.2.1 Standortaufnahme.....	12
2.2.2 Aufnahme der Oberfläche der einzelnen Probenpunkte	12
2.2.3 Entnahme der Bodenproben	12
2.3 Probenverarbeitung	14
2.3.1 Trocknung	14
2.3.2 Siebung	15
2.3.3 Fingerprobe.....	15
2.4 Datenverarbeitung.....	15
2.4.1 Klassifizierung der Daten.....	15
2.4.2 Test auf Normalverteilung.....	17

2.4.3 Prozeption der Daten.....	17
2.4.4 Lagerungsdichte	18
2.4.4.1 Kategoriespezifische Lagerungsdichte	18
2.4.4.2 Tiefenspezifische Lagerungsdichte	18
2.4.4.3 Neigungsspezifische Lagerungsdichte	18
2.4.4.4 Befahrungsspezifische Lagerungsdichte	19
2.4.5 Relative Bodenfeuchte.....	19
2.4.5.1 Kategoriespezifische Bodenfeuchte.....	19
2.4.5.2 Tiefenspezifische Bodenfeuchte.....	19
2.4.6 Interpolation und Visualisierung	20
2.4.7 Korrelationsanalyse.....	20
2.4.7.1 Korrelationsanalyse der Lagerungsdichte	20
2.4.7.2 Korrelationsanalyse der relativen Bodenfeuchte.....	20
3. ERGEBNISSE	21
3.1 Zu beachtende Hinweise	21
3.1.1 Normalverteilung	21
3.1.2 Datenbeschriftung	21
3.2 Fingerprobe	21
3.3 Lagerungsdichte.....	23
3.3.1 Interpolation der Lagerungsdichte.....	23
3.3.2 Lagerungsdichte Kategorie.....	28
3.3.3 Tiefenspezifische Lagerungsdichte.....	30
3.3.4 Neigungsspezifische Lagerungsdichte	32
3.3.5 Befahrungsspezifische Lagerungsdichte.....	33
3.4 Relative Bodenfeuchte.....	34
3.4.1 Interpolation der relativen Bodenfeuchte.....	34
3.4.2 Relative Bodenfeuchte.....	37
3.4.3 Relative Bodenfeuchte nach Tiefenkategorien	37
3.5 Korrelation	39
3.5.1 Korrelation Lagerungsdichte.....	39
3.5.2 Korrelation tiefenspezifisch.....	40
3.5.3 Korrelation neigungsspezifisch.....	41
3.5.4 Korrelation befahrungsspezifisch	43
3.5.5 Korrelation relative Bodenfeuchte.....	45
3.5.6 Tiefenspezifische Korrelation der relativen Bodenfeuchte	45
4. DISKUSSION	48

4.1 Methodische Fehler und zu beachtende Hinweise.....	48
4.1.1 Fingerprobe.....	48
4.1.2 Lagerungsdichte.....	48
4.1.3 Korrelationsanalysen.....	49
4.2 Ursachen der Bodenverdichtung	50
4.2.1 Feinboden	53
4.2.2 Hangneigung	60
4.2.3 Befahrung.....	62
4.3 Folgen der Bodenverdichtung	64
4.4 Schutzmaßnahmen.....	67
5. FAZIT	70
6. QUELLEN	72
7. ANHANG.....	79
EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG	97

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung	1	Verbreitung der LST über a) Mitteleuropa, b) um den Laacher-See (PARK & SCHMINCKE, 2009).....	S.	4
Abbildung	2	Geologische Karte des Untersuchungsgebiets, Kartengrundlage: Geologische Karte von Preußen und benachbarten Ländern, Preußische Geologische Landesanstalt, Blatt 3215 – Bendorf, 1927.....	S.	79
Abbildung	3	Bimsreste einer Bodenprobe, eigene Aufnahme 2019.....	S.	80
Abbildung	4	Detailaufnahme Bims, eigene Aufnahme 2019.....	S.	80
Abbildung	5	Übersichtskarte, Kartengrundlage: DTK 1:25.000 ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP 2018, dl-de/by-2-0, http://www.lvermgeo.rlp.de...	S.	6
Abbildung	6	Klimadiagramm Grenzau, Datengrundlage: AGRARMETEROLOGIE RHEINLAND-PFALZ, 2018.	S.	80
Abbildung	7	Bodenkarte des Untersuchungsgebiets, Kartengrundlage: Bodenkarte von Rheinland-Pfalz 1:25.000, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Blatt 5511 – Bendorf, 2002.....	S.	81
Abbildung	8	Bimsabbau im Untersuchungsgebiet (14.11.2018), eigene Aufnahme 2018.....	S.	82
Abbildung	9	Detailkarte des Untersuchungsgebiets Kartengrundlage: DTK 1:25.000 ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP 2018, dl-de/by-2-0, http://www.lvermgeo.rlp.de...	S.	10
Abbildung	10	a) Blick von Transekt 3 Richtung Norden (Transekt 2); b) Blick von Transekt 10 Richtung Norden (Transekt 9), eigene Aufnahme 2018.....	S.	82
Abbildung	11	Orthofoto des Untersuchungsgebiets Kartengrundlage: ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP (2019), dl-de/by-2-0, http://www.lvermgeo.rlp.de...	S.	11
Abbildung	12	Höhenprofil der untersuchten Rückegasse.....	S.	11
Abbildung	13	Kategoriebeschriftung eines Transekt (13) Blick Richtung Transekt 12, eigene Aufnahme 2018.....	S.	83
Abbildung	14	Kontrolle der Abstände des Maßbands, eigene Aufnahme 2018.....	S.	83
Abbildung	15	Über Transekt 7 gespanntes Maßband, die blauen dünnen Pfeile markieren die Bodennägel, die schwarzen dicken das gespannte Maßband, eigene Aufnahme 2018.....	S.	83
Abbildung	16	Temperatur- und Niederschlagsverlauf vor und während der Probennahme, Datengrundlage: AGRARMETEROLOGIE RHEINLAND-PFALZ (2018).....	S.	13
Abbildung	17	Trocknung der Proben auf einem gut belüfteten Dachboden, eigene Aufnahme 2018.....	S.	14
Abbildung	18	Bodenartendreieck (AD-HOC-AG BODEN, 2005).....	S.	84

Abbildung	19	Hangneigung der untersuchten RG und der untersuchten Transekte (rote Punkte), unterhalb der orangenen Linie kann die Hangneigung als flach, darüber als steil, klassifiziert werden (Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 2003)	S.	16
Abbildung	20	Blick von Transekt 8 auf Transekt 7, die untersuchte RG verläuft rechts, geradeaus verläuft eine weitere RG, eigene Aufnahme 2018.....	S.	90
Abbildung	21	Interpolierte Lagerungsdichten der Transekte 1 bis 8; oben 1, unten 8, • = Probenpunkt (Stechzylinder).....	S.	24
Abbildung	22	Interpolierte Lagerungsdichten der Transekte 9 bis 16; oben 9, unten 16, • = Probenpunkt (Stechzylinder).....	S.	25
Abbildung	23	Lagerungsdichte der Kategorien Wald, Fahrspur und Zwischenspur, angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	29
Abbildung	24	Lagerungsdichte der Tiefenstufe 0 cm, angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	31
Abbildung	25	Lagerungsdichte der Tiefenstufe: 30 cm, angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	31
Abbildung	26	Lagerungsdichte der Tiefenstufe: > 30 cm, angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	32
Abbildung	27	Lagerungsdichte nach Hangneigung für die Neigungsklassen flach und steil, angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	33
Abbildung	28	Befahrungsspezifische Lagerungsdichte, angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	33
Abbildung	29	Interpolation der relativen Bodenfeuchte der Transekte 1 bis 8; oben 1, unten 9, • = Probenpunkt (Stechzylinder).....	S.	35
Abbildung	30	Interpolation der relativen Bodenfeuchte der Transekte 9 bis 16; oben 9, unten 16, • = Probenpunkt (Stechzylinder).....	S.	36
Abbildung	31	Relative Bodenfeuchte, Angeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	37
Abbildung	32	Relative Bodenfeuchte der Tiefenstufe 0 cm, Angeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	38
Abbildung	33	Relative Bodenfeuchte der Tiefenstufe 30 cm, Angeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	38
Abbildung	34	Relative Bodenfeuchte der Tiefenstufe > 30 cm, Angeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q ₂₅ /Q ₇₅ (Box); Q ₁₀ /Q ₉₀ (Whisker).....	S.	38
Abbildung	35	Verwendeter Stechzylinder, eigene Aufnahme 2018.....	S.	90

Abbildung	36	Sterndiagramme der Häufigkeit der einzelnen Bodenarten der Kategorien Wald, Fahrspur und Zwischenspur.....	S.	50
Abbildung	37	Forwarder des Typs Komatsu 845, eigene Aufnahme 2018.....	S.	91
Abbildung	38	Lagerungsdichte der Fahrspur links und rechts, Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q_{25}/Q_{75} (Box); Q_{10}/Q_{90} (Whisker).....	S.	91
Abbildung	39	Schadverdichtungsgefährdungsklasse (MURER, 2009).....	S.	92
Abbildung	40	Potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der Bodenart des Feinbodens (MURER, 2009).....	S.	56
Abbildung	41	Spurtypen als Indikator der Befahrung (KREBS et al., 2017).....	S.	57
Abbildung	42	Wurftest (BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2010).....	S.	92
Abbildung	43	Interpolierte Tiefe des Bims unterhalb der EOF, Kartengrundlage: DTK 1:25.000 ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP 2018, dl-de/by-2-0, http://www.lvermgeo.rlp.de...	S.	93
Abbildung	44	Unterschiedliche Bismmächtigkeit, eigene Aufnahme 2018.....	S.	93
Abbildung	45	Interpolierte Eindringwiderstände für verschiedene Tiefenstufen, Kartengrundlage: DTK 1:25.000 ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP 2019, dl-de/by-2-0, http://www.lvermgeo.rlp.de...	S.	96

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle	1	Vollständige Messergebnisse.....	S.	85
Tabelle	2	Spannbreite der Korngrößen der einzelnen Bodenarten nach AD-HOC-AG BODEN (2005) und berechnete Mittelwerte.....	S.	88
Tabelle	3	Klassifizierung der Hangneigung nach AD-HOC-AG BODEN (2005) sowie ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2003).....	S.	88
Tabelle	4	Ergebnisse des Test auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test).....	S.	89
Tabelle	5	Durchschnittliche Bodenart der Transekte.....	S.	22
Tabelle	6	Änderung der Bodenartanteile pro Tiefenstufe.....	S.	22
Tabelle	7	Vergleich der Lagerungsdichten der Transekte (prozentuale Unterschiede zum Wald).....	S.	30

Tabelle	8	Korrelationskoeffizient nach BORSIUS (2011).....	S.	39
Tabelle	9	Korrelationsanalyse kompletter Datensatz, N für gesamten Datensatz: 220; N für Wald: 86; N für Fahrspur: 89; N für Zwischenspur: 44.....	S.	39
Tabelle	10	Korrelationsanalyse für die Tiefenstufe 0 cm, N für gesamten Datensatz: 80; N für Wald: 32; N für Fahrspur: 32; N für Zwischenspur: 16.....	S.	40
Tabelle	11	Korrelationsanalyse für die Tiefenstufe 30 cm, N für gesamten Datensatz: 80; N für Wald: 32; N für Fahrspur: 32; N für Zwischenspur: 16.....	S.	41
Tabelle	12	Korrelationsanalyse für die Hangneigung – flach N für gesamten Datensatz: 138; N für Wald: 55; N für Fahrspur: 55; N für Zwischenspur: 28.....	S.	42
Tabelle	13	Korrelationsanalyse für die Hangneigung – steil N für gesamten Datensatz: 82; N für Wald: 31; N für Fahrspur: 34; N für Zwischenspur: 16.....	S.	43
Tabelle	14	Korrelationsanalyse der Befahrung – wenig N für gesamten Datensatz: 102; N für Wald: 38; N für Fahrspur: 42; N für Zwischenspur: 20.....	S.	44
Tabelle	15	Korrelationsanalyse der Befahrung – viel N für gesamten Datensatz: 118; N für Wald: 47; N für Fahrspur: 47; N für Zwischenspur: 24.....	S.	44
Tabelle	16	Korrelationsanalyse der relativen Bodenfeuchte N für gesamten Datensatz: 220; N für Wald: 86; N für Fahrspur: 89; N für Zwischenspur: 44.....	S.	45
Tabelle	17	Korrelationsanalyse der relativen Bodenfeuchte für die Tiefenstufe 0 cm N für gesamten Datensatz: 80; N für Wald: 32; N für Fahrspur: 32; N für Zwischenspur: 16.....	S.	46
Tabelle	18	Korrelationsanalyse der relativen Bodenfeuchte für die Tiefenstufe 30 cm N für gesamten Datensatz: 80; N für Wald: 32; N für Fahrspur: 32; N für Zwischenspur: 16.....	S.	47
Tabelle	19	Häufigste Lagerungsdichten nach BACHMANN, HORN, PETH (2014), ermittelte Lagerungsdichten für die Transekte 1 - 16....	S.	53
Tabelle	20	Einstufung der Lagerungsdichten nach AD-HOC-AG BODEN (2005) und BLUME et al. (2016).....	S.	54
Tabelle	21	Klassifizierung von Fahrspuren (LÜSCHER, 2010; BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012).....	S.	57
Tabelle	22	Interpretation der Wurftestergebnisse (BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012).....	S.	58
Tabelle	23	Klassifizierung der Hangneigung (NEMESTOTHY, 2015).....	S.	61
Tabelle	24	Oberflächendaten der Transekte.....	S.	94
Tabelle	25	Verringerung der Durchwurzelbarkeit für verschiedene Bodenarten (GREGORY, 2006).....	S.	66

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ca.	circa
EOF	Erdoberfläche
EW	Eindringwiderstand
Hnk	Hankneigungsklasse
Hrsg.	Herausgeber
Ld	Lagerungsdichte
LLST	Lower Laacher See-Tephra
LST	Laacher See-Tephra
LSV	Laacher See-Vulkan
MLST	Middle Laacher See-Tephra
o.J.	ohne Jahr
pVe	potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit
rel.	relativ
RG	Rückegasse
SVGK	Schadverdichtungsgefährdungsklasse
ULST	Uper Laacher See-Tephra
vgl.	vergleich
ZS	Zwischenspur

1. EINLEITUNG

„An Wälder werden vielfach forstliche und gesellschaftliche Ansprüche gestellt, so z.B. [...] nachhaltige Holzproduktion, sie sollen als naturnaher Lebensraum Pflanzen und Tiere zur Verfügung stehen und darüber hinaus werden sie als wertvollen Erholungsraum [...] genutzt“ (WILPERT, 2001, S.1). Die besonderen Eigenschaften und Funktionen des Waldes sind nach WILPERT (2001) vor allem auf die Waldböden zurückzuführen. Böden erfüllen bedingt durch das Porensystem eine Puffer- und Filterwirkung für Nährstoffe, Wasser, Kohlenstoff aber auch Schadstoffe.

Dabei wird der Wald in Mitteleuropa seit Tausenden Jahren vom Menschen sowohl als Rohstoffquelle genutzt als auch gerodet, um Platz für Siedlungs- und Ackerland zu gewinnen (BURGGRAFF & KLEEFELD, 1998; HARTZ, WENDL, SCHNIEDERMEIER, 2013).

Der Nutzungsdruck nahm im Laufe der Zeit – vor allem im Mittelalter – durch den gestiegenen Bedarf an Feuerholz, Holzkohle und Baumaterial immer weiter zu (HAMPICK 2013; BURGGRAFF & KLEEFELD, 1998). Zum Ende des 19. Jahrhunderts wurde das entstandene Ödland, bestehend aus Magerwiesen und Heiden, durch die Preußen in einer staatlich verordneten Maßnahme, vor allem mit der standortfremden Fichte zur schnellen und günstigen Holzproduktion, wieder aufgeforstet (HAMPICK 2013; HARTZ, WENDL, SCHNIEDERMEIER, 2013). Für die heutige Zeit ist nach BARTSCH & RÖHRIG (2016) vor allem der Klimawandel, schädigende Immissionen und die fortschreitende Industrialisierung der Holzwirtschaft problematisch für den Wald. So wurde noch bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts das geschlagene Holz zum größten Teil mit sogenannten „Rückepferden“, relativ bodenschonend aus dem Forst gezogen. Ab 1985 wurde nahezu das gesamte geschlagene Holz mit Schleppern abtransportiert. Zudem steigt der Einsatz von Spezialmaschinen (BIWER, 2019; HAMBERGER, 2003). Heutzutage kommen immer größere und vollspezialisierte Maschinen zum Einsatz. Große Forwarder können voll beladen ein Gewicht von bis zu 40 t aufweisen (ELIASSON, 2005; HAMBERGER, 2003). Solch große und vor allem schwere Maschinen können neben sichtbaren Spuren, wie Fahrspuren, auch für das Auge erstmal unsichtbare Spuren in Form von Bodenverdichtung hinterlassen (GEBHART et al., 2011; NEMESTOTHY, 2015). Die Spuren, die vor allem durch den mechanisierten Holzschlag und Abtransport erfolgten, bleiben über Jahre bis Jahrzehnte erhalten und können die bodenökologischen Kapazitäten des Waldbodens mindern (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORTEINRICHTUNG, 2003; NEMESTOTHY, 2015). Daher rückt nach ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2003) der Bodenschutz immer mehr in den Fokus „zur Erhaltung und ggf. Wiederherstellung der Naturkräfte“ (S.15).

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, welche Faktoren sich bei einer Befahrung mit Forstmaschinen, auf eine Bodenverdichtung auf Andosol-Waldstandorten, auswirken. Dazu werden Faktoren wie die Anzahl der Befahrung, die Neigung sowie die Bodenart betrachtet

und analysiert. Es zeigt sich, ob ein vermuteter positiver Zusammenhang zwischen der Anzahl der Befahrung, einer steileren Hangneigung sowie der Körnung des Bodens besteht und in welchem Maße sich die genannten Faktoren auf den Grad der (Boden-)Verdichtung auswirken.

Dazu wird der Waldboden, der als unbeeinflusst angenommen wird, als Ausgangssituation angenommen und die Fahrspuren sowie die Mittelspur mit diesem verglichen. Zusätzlich wird eine Differenzierung im Tiefenprofil vorgenommen, um zu untersuchen, ob sich die Befahrung mit zunehmender Bodentiefe unterschiedlich manifestiert.

1.1 Grundlagen

1.1.1 Bodenverdichtung

Bodenverdichtung ist das Resultat einer Zunahme der Lagerungsdichte (L_d), infolge einer Belastung, vornehmlich durch Befahrung über die – konsistenzabhängige – Tragfähigkeit eines Bodens (GEBHARDT et al., 2011; BLUME et al., 2016).

1.1.1.1 Ursache der Bodenverdichtung

Abhängig ist die Bodenverdichtung, beziehungsweise der Grad der Bodenverdichtung von verschiedenen Faktoren. Diese lassen sich in zwei Klassen, standortbedingte Faktoren sowie befahrungsspezifische Faktoren, gliedern.

Standortbedingte Faktoren

Unter die standortbedingten Faktoren fallen die bodeninternen Ausgangssituationen. Diese sind Bodenart, Lagerungsdichte, beziehungsweise Vorverdichtung, Bodenfeuchte (bei Befahrung), Organikanteil und die Hangneigung.

Nach MURER (2009) sind Böden mit einem hohen Anteil an Schluff und vor allem an Ton anfälliger für Verdichtungen als gröbere Böden mit einem höheren Anteil an Sand. BLUME et al. (2016) führen des Weiteren neben der Korngröße noch die Beschaffenheit der Körner an. Je feiner und glatter die Körnung, desto leichter lassen sich Böden verdichten. Bei bereits vorverdichteten Böden, beziehungsweise Böden mit einer höheren Lagerungsdichte, ist die Folge einer weiteren Befahrung mit dem gleichen Gewicht weniger gravierend als die Erstbefahrung, beziehungsweise als auf lockerer gelagerten Böden (SCHÄFFER, 2002; WILPERT & SCHÄFFER, 2004).

Die Bodenfeuchte hat einen großen Einfluss auf die Verdichtbarkeit eines Bodens. So gilt, dass mit zunehmendem Wassergehalt der Boden leichter verdichtet werden kann. Des Weiteren können deutlichere (Fahr-)Spuren im Boden auftreten. Neben Böden mit geringer

relativer Bodenfeuchte sind gefrorene Böden ebenfalls weniger anfällig gegenüber befahrungsinduzierter Verdichtung (HEUBAUM, 2015; BLUME et al., 2016).

Ein hoher Organikanteil, vor allem im Oberboden, kann die entstehende Gewichtsaufgabe bei einer Befahrung bis zu einem gewissen Grad abpuffern (BLUME et al., 2016; BACHMANN, HORN, PETH, 2014). Eine Auflage aus Ästen vergrößert die Auflagefläche und kann somit die Gewichtsaufgabe reduzieren (NEMESTOTHY, 2009).

Bei gleicher Bodenart kommt es bei höheren Hangneigungen zu höherem Schlupf und letztendlich auch bei gleicher Befahrung zu einer potenziell stärkeren Verdichtung (NEMESTOTHY, 2009; BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012).

Befahrungsbedingte Faktoren

In diese Kategorie fallen Faktoren, die durch die Befahrung eines Bodens auftreten. Diese sind Bauart des Fahrzeugs (Gewicht, Fahrwerk – Räder oder Ketten), Reifentypus, Reifendruck, Benutzung von sogenannten Bogiebänder oder Traktionshilfen, Anzahl und Art der Befahrungen und die Beladung.

Baulich gibt es bei Forstmaschinen ein großes Spektrum, hinsichtlich der Aufgaben, des Leergewichts und der Anzahl der Reifen oder Ketten. Fahrzeuge mit Reifen sind in Mitteleuropa deutlich häufiger vertreten als reine Kettenfahrzeuge (PADBERG & HEUBAUM, 2015).

Die Achsenanzahl bei Fahrzeugen ohne Ketten liegt zwischen zwei und fünf. In den letzten Jahren geht der Trend zu mehr Achsen (BIWER, 2018; PADBERG & HEUBAUM, 2015). Der Einfluss der Reifen, kann zum einen durch die Art des Reifens, zum anderen durch den verwendeten Reifendruck verändert werden (NEMESTOTHY, 2015; MATTHIES, 2009). Nach KREMER & SCHARDT (2007) kann die Verwendung von Bogiebändern die Bodenbelastung reduzieren. Nachteil sei allerdings, dass die Fahrspuren dabei deutlich größer seien und vermehrt Wurzelschäden auftreten können als bei Befahrungen ohne Bänder. Die Anzahl der Befahrungen kann ebenfalls einen Einfluss auf die Verdichtung des Bodens haben. Allerdings ist festzuhalten, dass die erste Belastung (Befahrung) den größten Einfluss auf die Zunahme der Lagerungsdichte hat (NEMESTOTHY, 2015; SCHÄFFER, 2002). Des Weiteren sollte beim Befahren darauf geachtet werden Schlupf zu vermeiden (HEUBAUM, 2015).

Forstmaschinen sind in den letzten Jahren immer größer und schwerer geworden. Mit zunehmenden Ladungs- und Fahrzeuggewichten nimmt ebenfalls die Gefahr beziehungsweise die Verdichtung des Bodens zu (MATTHIES, 2009; BLUME, HORN, THIELEBRUHN, 2011).

1.1.1.2 Folge der Bodenverdichtung

Die Folgen der Bodenverdichtung sind vielfältig. Eine Zunahme der Lagerungsdichte führt zu

einer Erhöhung der Tragfestigkeit des Bodens (vgl. Kapitel 1.1.1.1) (BLUME, HORN, THIELE-BRUHN, 2011). Des Weiteren verändert sich die Porenzusammensetzung des Bodens. Die Anzahl der Grob- und Mittelporen nimmt, bei einer gleichzeitigen Zunahme der Feinporen, ab. Grobsande bilden dabei eine Ausnahme. Bei diesem Bodentyp nimmt die Anzahl der Mittelporen zu (BLUME, HORN, THIELE-BRUHN, 2011).

Verändert sich die Porenzusammensetzung wie beschrieben, wirkt sich dies negativ auf den Wasser- und Gashaushalt des Bodens aus. So nimmt in der Regel die Infiltrationskapazität von verdichteten Böden ab (GEBHARDT et al., 2011). Als Folge der gesunkenen Infiltrationsleistung kann es bei Niederschlagsereignissen, vor allem Starkniederschlag, zu Horton'schem Abfluss kommen (LIEBSCHER, 2019). Dieser kann zu einer stärkeren Bodenerosion führen (BLUME, HORN, THIELE-BRUHN, 2011; BLUME et al., 2016).

Durch eine Reduktion des Gasaustauschs zwischen Boden und Atmosphäre kann es zu einer Abnahme des Sauerstoffgehalts, bei gleichzeitiger Zunahme des Kohlendioxidgehalts, im Boden kommen. Dadurch kann sich die (Boden-)Fauna verändern (GAERTIG & GREEN, 2009; FREY, 2010). Eine Zunahme des Kohlendioxidgehalts im Boden kann als Indikator für eine Bodenverdichtung dienen (AMAN, SCHÄFER, WILPERT, 2009).

Die Folgen einer Bodenverdichtung können nach NEMESTOTHY (2015) auch nach über 25 Jahren festgestellt werden.

1.1.2 Bims

Der Laacher See-Vulkan (LSV) ist nach HOFBAUER (2016) vor 12.900 ± 560 Jahren in einer sogenannten Plinischen Eruption ausgebrochen und hat dabei ungefähr 16 km^3 Tephra ausgeschleudert. Die Laacher See-Tephra (LST) wurde, aufgrund der damals ebenfalls vorherrschenden Westwinde, äolisch über weite Teile Mitteleuropas verbreitet (Abbildung 1a).

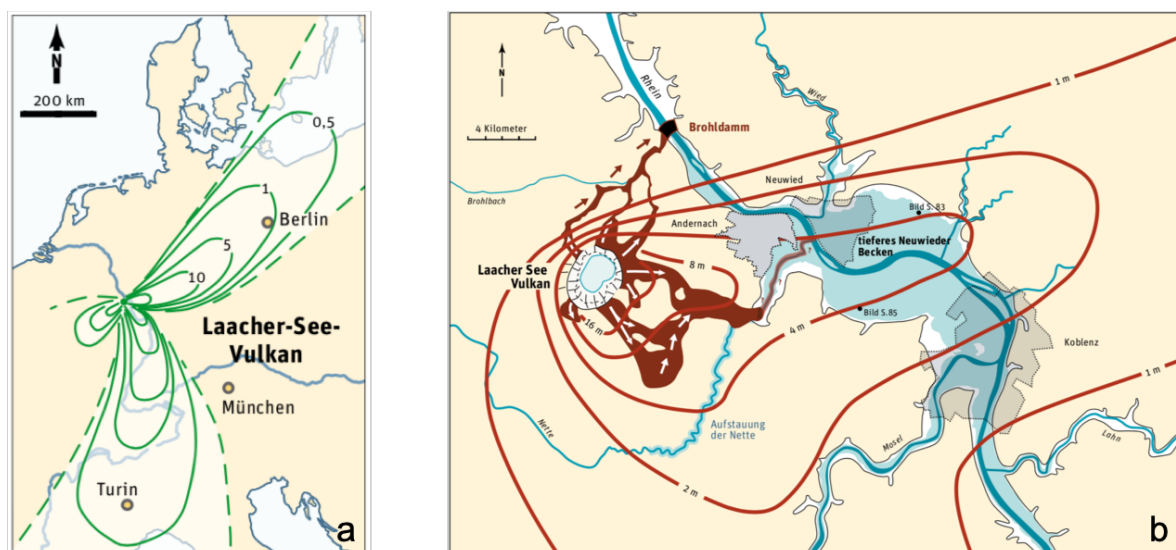


Abbildung 1, Verbreitung der LST über a) Mitteleuropa, b) um den Laacher-See (PARK & SCHMINCKE, 2009)

In Abbildung 1b ist die Verbreitung der LST für die nähere Umgebung des Laacher-Sees aufgeführt. Innerhalb dieser Verbreitung befindet sich, ca. 20 km östlich des Laacher-Sees, das Untersuchungsgebiet (GRAAFEN, 2006; BOGAARD & SCHMINCK, 1973).

Während des Transports unterlag die LST erheblichen Sortierungsprozessen. Die Depositionen der einzelnen Eruptionen unterscheiden sich geochemisch sowie mineralogisch voneinander (HAHN & OPP, 2011).

Für das Gebiet im Bendorfer Stadtwald können nach BOGAARD & SCHMINCK (1973) vor allem Lower Laacher See-Tephra (LLST) und Middle Laacher See-Tephra (MLST), genauer MLST B und MLST C1, festgestellt werden.

MLST sowie LLST sind im Vergleich zur Uper Laacher See-Tephra (ULST) relativ glasreich (HAHN & OPP, 2011).

Im Bendorfer Stadtwald können Bimsablagerungen von bis zu 4 m Mächtigkeit, vor allem an erosionsgeschützten Osthängen, auftreten (Abbildung 2) (HAUBRICH, 1970; LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND PFALZ, 2015).

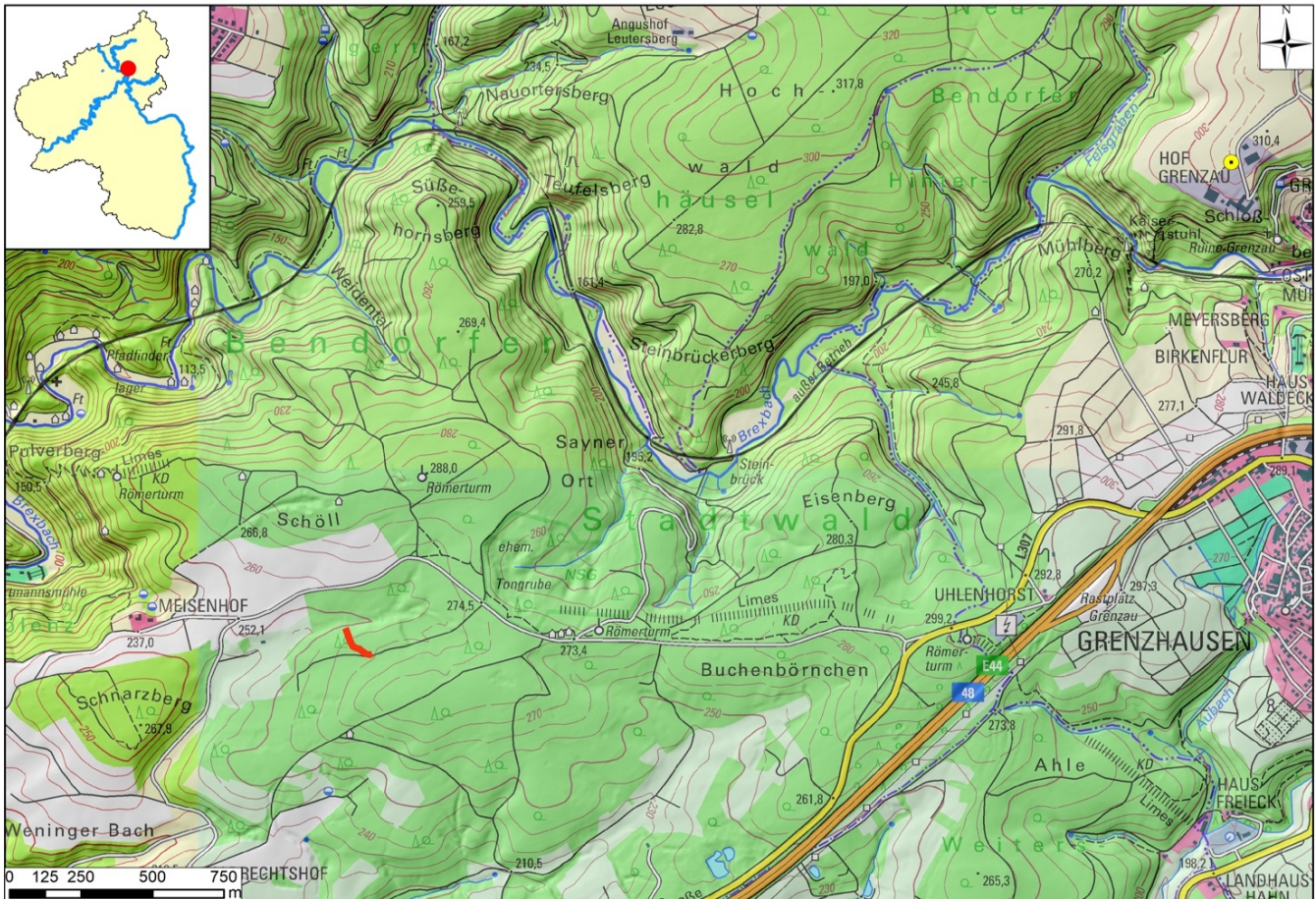
Aus der abgelagerten Bimstephra, kann bei den in Mitteleuropa vorherrschenden Klimabedingungen der letzten 13.000 Jahre, unter anderem eine Lockerbraunerde entstehen (BLUME et al., 2016; LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ, 2015).

Bims zeichnet sich durch eine Dichte von ungefähr 0,24 bis 0,3 g/cm³ aus und weist folglich eine geringere Dichte als Wasser auf. Die Mohshärte beträgt 5. Das Porenvolumen kann bis zu 85 % betragen. Die Farbe kann zwischen weiß, hellgrau und gelblich bis hin zu rötlichen oder dunklen Farben variieren (PURLE, 2015; OKRUSCH & MATTHES, 2014). Der im Bendorfer Stadtwald vorgefundene Bims zeichnet sich durch eine weiße bis hellgraue Farbe aus (Abbildungen 3 und 4).

1.2 Untersuchungsgebiet

1.2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt annähernd zentral im „Bendorfer Stadtwald“ bei 32 U 0401287 5588125. Der Bendorfer Stadtwald liegt im Nordosten von Rheinland-Pfalz zwischen den Gemeinden Bendorf, Bendorf-Stromberg, Nauort und Höhr-Grenzhausen (Abbildung 5). Die nächstgrößere Stadt – Koblenz – ist ungefähr 8,5 km in südliche Richtung gelegen. Das Stadtgebiet von Bendorf ist nach LEINZ (2015) zu circa 50 % bewaldet. Die bewaldete Fläche macht dabei ungefähr 1.200 ha aus. Damit ist nach SCHARFSTEIN (2019) Bendorf die Gemeinde mit dem größten Waldbesitz im Landkreis Mayen-Koblenz. Der Bendorfer Stadtwald erstreckt sich von ca. 50 m ü. NN in den Bachtälern bis



Legende

- Wetterstation Grenzhäuser
- Rückegasse

Bearbeiter: Alexander Klein

Abbildung 5, Übersichtskarte,
 Kartengrundlage: DTK 1:25.000 ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP 2018, dl-de/by-2-0, <http://www.lvermgeo.rlp.de>

ca. 320 m ü. NN (HUMBICK, 1970). Die höchste Erhebung ist mit 323 m ü. NN „Oben am Glasau“ (SCHARFSTEIN, 2019).

Naturräumlich gehört das Gebiet des Bendorfer Stadtwaldes zum Niederwesterwald, genauer zur Kannenbäcker Hochfläche (HAUBRICH, 1970; SABEL & FISCHER, 1992).

Als natürliche Vegetation für die Kannenbäcker Hochfläche führen SABEL & FISCHER (1992) einen Hainsimsen-Buchenwald an. Die Krautschicht ist durch verschiedene Farne, Waldveilchen und in Senken, vor allem durch Arten wie das Flattergras oder die Winkelsegge gekennzeichnet.

Aktuell befindet sich im Bendorfer Stadtwald ein Laubmischwald. Die Arten Rot-Buche (*Fagus sylvatica*), Stieleiche (*Quercus robur*) und Gemeine Fichte (*Picea abies*) sind dabei am dominantesten vertreten.

1.2.2 Das Klima im Untersuchungsgebiet

Das Klima im Untersuchungsgebiet ist ganzjährig humid, das Niederschlagsmaximum befindet sich in den Sommermonaten (Abbildung 6) (SABEL & FISCHER, 1992; AGRARMETEOROLOGIE

RHEINLAND-PFALZ, 2018). In 3,5 km Entfernung in nordöstlicher Richtung befindet sich die auf 319 m ü. NN gelegene Agrarmeteorologische Wetterstation Grenzau (Abbildung 5). Diese ist seit dem 20.03.1990 aktiv. Das Jahresmittel der letzten 28 Jahre beträgt 9,7 °C bei im Schnitt 807,2 mm Niederschlag. Das kälteste und trockenste, an dieser Station gemessene Jahr, war 1997 mit im Schnitt 7,6 °C bei 566,6 mm Niederschlag. 2002 fiel mit 1080,9 mm der meiste Niederschlag. Das vergangene Jahr (2018) war mit 11,1 °C das wärmste und mit 574,2 mm das zweittrockenste Jahr in mehr als 28 Jahren Aufzeichnung dieser Wetterstation (AGRARMETEOROLOGIE RHEINLAND-PFALZ, 2018).

Das Gebiet kann somit als „ozeanisches wintermildes feuchtes Hügellandklima“ (SABEL & FISCHER, 1992 S.19) klassifiziert werden.

1.2.3 Geologie und Böden

1.2.3.1 Geologie

„[Der Westerwald] ist, überregional gesehen, ein Teil der rhenoherynischen Zone des Rheinischen Schiefergebirges. Das Grundgebirge wird aus devonischen bis unterkarbonischen Sedimentgestein aufgebaut. Sie wurden im Rahmen der variskischen Gebirgsbildung zu Sätteln und Mulden aufgefaltet und entlang von meist streichenden Störungen gegeneinander verschoben“ (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ, 2015 S. 16). Die heutige Landschaft ist durch Gesteine des Tertiärs und Ablagerungen des Quartärs geprägt. Oberflächlich überdecken pleistozäne Fließerden sowie LST die älteren Gesteine (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ, 2015; FISCHER, 1991). In Abbildung 2 ist die ausgehende Geologie des Untersuchungsgebietes aufgeführt.

1.2.3.2 Böden

In Abbildung 7 ist die Bodenkarte für das Untersuchungsgebiet aufgeführt. Die untersuchte Rückegasse (RG) liegt innerhalb von Lockerbraunerden.

Um das Untersuchungsgebiet können, neben der Lockerbraunerde, vor allem Braunerde und Regosol aufgefunden werden. Nördlich der RG, in einem Bachtal, befindet sich Gley, weiter westlich in dem Bachtal Kullovisol. Westlich der Lockerbraunerde des Untersuchungsgebiets kann erodierte Braunerde vorgefunden werden.

Die Braunerden und Regosole um das Untersuchungsgebiet sind zum Teil auf unterschiedlichen Ausgangsgesteinen entstanden und wurden für diese Ausarbeitung, da der Fokus auf der Lockerbraunerde liegt, zusammengefasst.

Lockerbraunerden zeichnen sich nach AD HOC-AG BODEN (2005) sowie BLUME et al. (2016) durch eine Lagerungsdichte von unter 0,8 g/cm³, einen Porenvolumen von häufig über 60 %

sowie niedrigen pH-Werten – meist niedriger als 4,8 – aus. Des Weiteren sind Lockerbraunerden häufig tiefreichend humos und enthalten zum Teil Allophan. „Allophane sind wasserreiche, sekundäre Aluminiumsilicate [...]“ (BLUME et al., 2016, S. 18). Nach MÜCKENHAUSEN & LEENHEER (1966) kommt Allophan vor allem in relativ jungen Böden vor. Die Horizontfolge einer Norm-Lockerbraunerde wird als Ah/(Ah-)Bfv/IIC angegeben. Vor allem der Bfv-Horizont weist sowohl eine sehr geringe Lagerungsdichte als auch ein hohes Porenvolumen auf (BLUME et al., 2016; AD HOC-AG BODEN, 2005). Böden aus vulkanischen Aschen sind vor allem für hohe Grobbodenanteile bekannt (GEBHARDT et al., 2010). Lockerbraunerden können nach BLUME et al. (2016) aus zwei Ausgangsgesteinen entstehen. Zum einen können diese in höheren Berglagen aus magmatischem Gestein, zum anderen aus vulkanischen Tuffen entstehen. Letzteres ist im Untersuchungsgebiet der Fall. Als vulkanischer Tuff liegt hier äolisch abgelagerter Bims aus dem Lacher See-Vulkan vor, vgl. Kapitel 1.1.2.

1.2.4 Tourismus

Touristisch ist der Bendorfer Stadtwald durch diverse Fernwanderwege und einige kleinere Rundwanderwege erschlossen. Zu nennen sind hier vor allem die Fernwanderwege Saynsteig und Rheinsteig. Des Weiteren verlaufen durch den Stadtwald überregionale Radwege, wie der Limesradweg und der Rheinradweg (STADTVERWALTUNG BENDORF, 2019). Sehenswürdigkeiten sind der 1912 rekonstruierte und 2009/2010 restaurierte Römerturm am Pulverberg sowie der seit 2005 als UNESCO Weltkulturerbe gelistete Obergermanisch-Raetische Limes (STADTVERWALTUNG BENDORF, 2019; UNESCO-WELTERBESTÄTTEN DEUTSCHLAND E.V., 2019). Dieser verläuft unmittelbar am Untersuchungsgebiet vorbei (Abbildung 5).

1.2.5 Rohstoffnutzung

Seit dem Jahre 1724 wird in der „Grube Werner“ unter anderem Sederit abgebaut (LEINZ, 1999; SCHORN, 2019). Neben der Grube Werner gab es im Bendorfer Stadtwald noch weitere kleinere, wirtschaftlich nahezu unbedeutende Gruben (LEINZ, 1999; FISCHER, 1991). Der Abbau von eisenhaltigen Erzen in der oben genannten Grube Werner konnte allerdings fast 200 Jahren erfolgen, bis aufgrund mangelnder Rentabilität der Abbau eingestellt werden musste (LEINZ, 1999). Sederit besteht bis zu 50 % aus Eisen und lässt sich relativ leicht und kostengünstig verhütten (SCHORN, 2019).

Das Landschaftsbild des Niederwesterwaldes wird auch heute noch von einigen Tongruben geprägt (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ, 2015). Der Ton stammt

aus der „zweiten Westerwälder Tonserie“ und ist Folge einer Sedimentation von feinem Abtragungsmaterial im ausgehenden Oligozän (SABEL & FISCHER 1992). Die Tonvorkommen wurden und werden (zum Teil) noch heute im Kannenbäckerland abgebaut. Im Laufe der Zeit entstand eine keramische Industrie, die vor allem für Ihre Kannen und Töpfe, in der heutigen Zeit aber auch für technische Produkte, bekannt ist. So lässt sich aus der Töpferindustrie nicht nur der umgangssprachliche Name, sondern auch der des Kulturrums „Kanne(n)bäckerland“ ableiten (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ, 2015; LANDESAMT FÜR UMWELT, WASSERWIRTSCHAFT UND GEWERBEAUF SICHT RHEINLAND-PFALZ, 2010).

Im Bendorfer Stadtwald wurde bis in die 1930er Jahre in mehreren Tongruben Ton, vor allem Kaolinit, ein sehr feiner und weißer Ton, abgebaut (FISCHER, 1991; SCHARFSTEIN, 2019). Unweit des Untersuchungsgebiets befindet sich die ehemalige ca. 19 ha große Tongrube „Hüttwohl“ (Abbildung 5). Diese war eine der am längsten genutzten und größten Tongruben im Stadtgebiet von Bendorf und wurde 1980 unter Naturschutz gestellt (SCHARFSTEIN, 2019; KORBACH, 1980).

Seit ungefähr 1950 wird im Niederwesterwald – auch im Gebiet des Bendorfer Stadtwaldes – kommerziell Bims abgebaut (FISCHER, 1991; BIWER, 2019). Der im Tagebau geförderte Bims wird mit Wasser und Zement vermischt, zu Steinen geformt und in sogenannten „Arken“ für mehrere Wochen zum Trocknen gelagert (GRAAFEN, 2006; SIEWERS, 2019). Die so entstandenen Bimssteine werden, unter anderem im Hausbau eingesetzt und zeichnen sich durch zahlreiche positive Eigenschaften aus (URLBERGER, 2012).

Der Schwerpunkt der Bimsindustrie lag in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts im Gebiet von Nauort und Caan. Gefördert wurde der Bims sowohl auf landwirtschaftlich, als auch auf forstwirtschaftlich genutzten Flächen. Für den Abbau erwirbt die abbauende Firma das Recht für den Abbau des Bimsvorkommens. Dabei bleibt das Eigentum an Grund und Boden unverändert. Die Firmen, die die Abbaurechte bekommen, müssen verschiedene Auflagen, wie zum Beispiel Abtragen und separates Lagern des Oberbodens oder Rekultivierungsmaßnahmen (vor allem auf forstwirtschaftlich genutzten Flächen), erfüllen. (FISCHER, 1991).

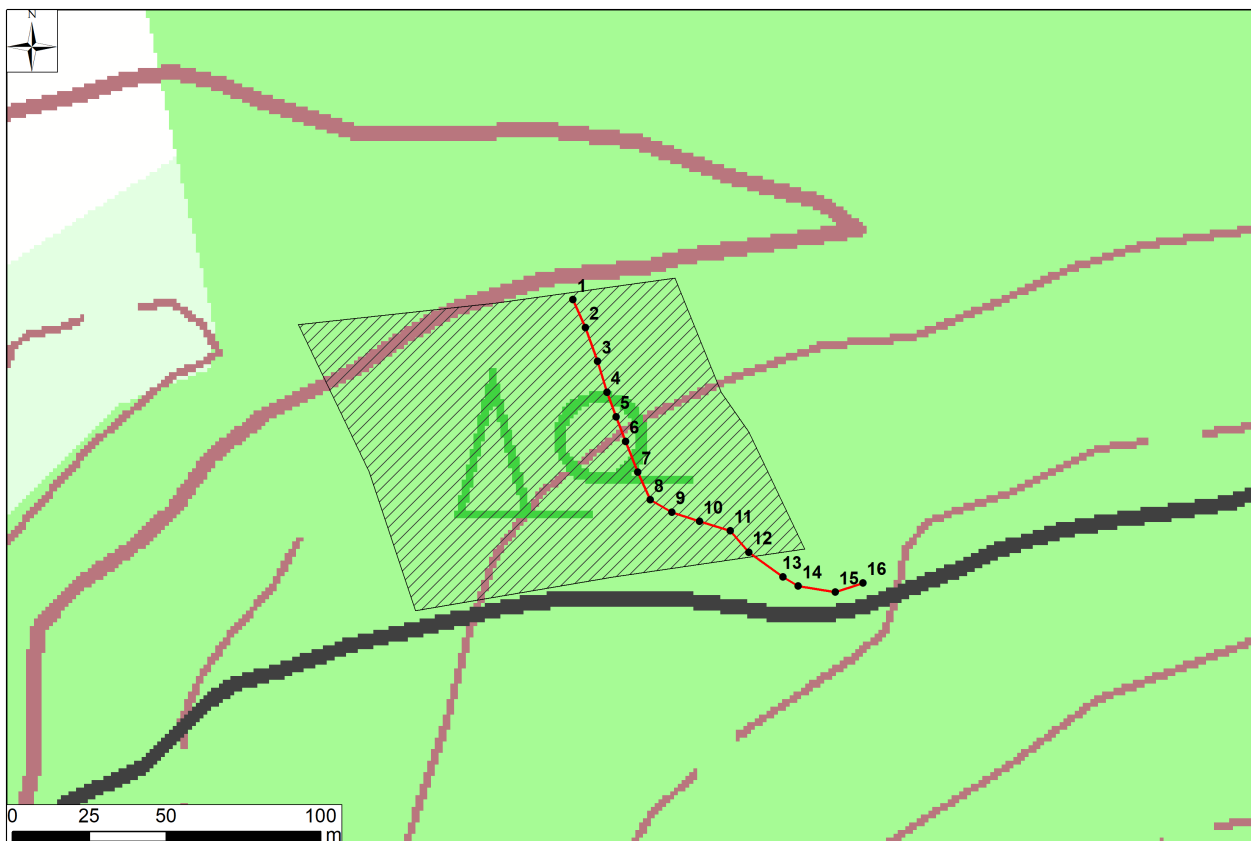
Im Bendorfer Stadtwald wird zur Zeit Bims durch die in Bendorf ansässige Firma KANN Beton GmbH & Co. KG abgebaut. Die KANN Beton GmbH & Co. KG haben noch bis 2027 das Recht, im Bendorfer Stadtwald Bims abzubauen (BIWER, 2019). Der Abbau von Bims wird in Rheinland-Pfalz durch das Landesrecht und nicht durch das Bergrecht geregelt (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ, 2019; PURLE, 2015).

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Standortbeschreibung

Die nähere Umgebung der Rückegasse wurde im Winter 2017/2018 vollständig gerodet (BIWER, 2018). Dies war Erforderlich, da hier ab November 2018 das Bimsvorkommen (Abbildung 2) durch die Firma KANN Beton GmbH & Co. KG ausgebimt wird (Abbildung 8). In Abbildung 9 ist schraffiert das Bimsabbaugebiet zu erkennen. Diese stellt gleichzeitig die gerodete Fläche dar und reicht ungefähr bis Transekt 12. Auf Höhe von Transekt 12 beginnt ein Buchenwald. Zum Zeitpunkt der Probennahme befanden sich auf dem zukünftigen Abbaugbiet noch vereinzelt gefällte Baumstämme auf dem Boden sowie eine einjährige Primärvegetation (Abbildung 10 a,b).

Aufgrund der Tatsache, dass die Fläche in Laufe des Jahres (2018) ausgebimt wurde, entschied der örtliche Revierleiter, bei eigentlich ungünstigen Wetterbedingungen – Auftauen des Bodens – das geschlagene Holz aus dem zukünftigem Abbaugbiet abzutransportieren (BIWER, 2018). Durch dieses Vorgehen entstanden teilweise bis zu 50 cm tiefe Fahrspuren.



Legende

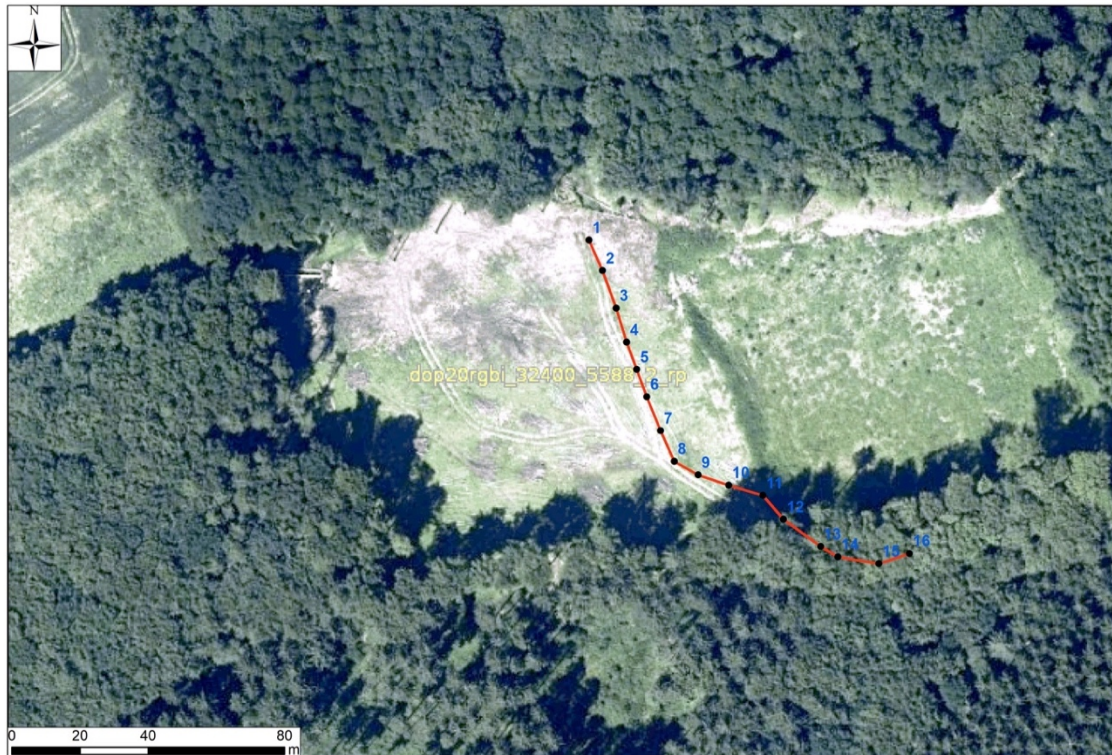
- Probenpunkte
- Rückegasse
- ▨ Bimsabbaugebiet

Bearbeiter: Alexander Klein

Abbildung 9, Detailkarte des Untersuchungsgebietes
Kartengrundlage: DTK 1:25.000 ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP 2018, dl-de/by-2-0, <http://www.lvermgeo.rlp.de>

Es wurde versucht, die Rückegassen (Abbildung 11) in diesem Gebiet auf schon vorhandene Rückegassen zu legen. BIWER (2018) schätzt, dass die Ausgangsrückegassen ca. 40 bis 50 Jahren alt sind.

Die untersuchte Rückegasse ist ungefähr 150 m lang und erstreckt sich von 250 m ü. NN (Transekt 1) bis auf ca. 265 m ü. NN bei Transekt 16 (Abbildung 12). Die Transekte 15 und 16 befinden sich auf einer Forststraße (Abbildung 9).



Legende

- Probenpunkte
- Rückegasse

Bearbeiter: Alexander Klein

Abbildung 11, Orthofoto des Untersuchungsgebiets

Kartengrundlage: ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP (2019), dl-de/by-2-0, <http://www.lvermgeo.rlp.de>

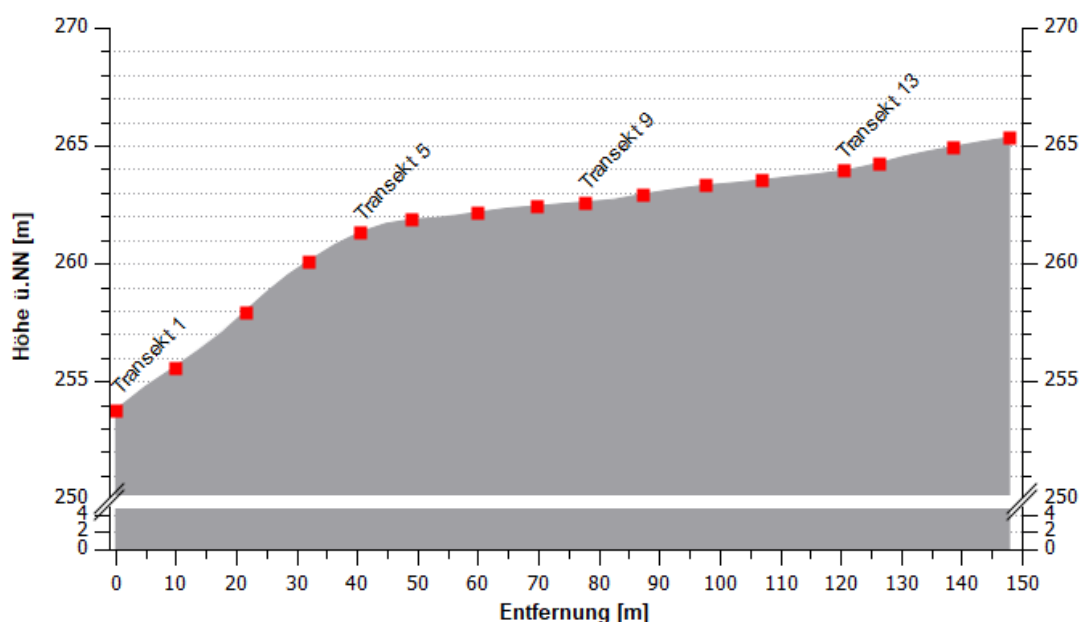


Abbildung 12, Höhenprofil der untersuchten Rückegasse

2.2 Probennahme

2.2.1 Standortaufnahme

Zunächst wurde ein Fixpunkt am unteren Ende der zu untersuchenden Rückegasse auf der linken Seite (Blickrichtung den Hang hinauf) festgelegt. Dieser Punkt wurde mit Hilfe eines GPS-Gerätes (Garmin etrex 10) auf ca. 80 cm Genauigkeit eingemessen.

Von diesem Fixpunkt wurde mit Hilfe eines Maßbandes alle 10 Meter ein weiterer Fixpunkt festgelegt, insgesamt 16 Punkte. Alle befinden sich auf der linken Seite der Rückegasse (Blickrichtung den Hang hinauf / südliche Richtung).

Die Fixpunkte wurden nach abgeschlossener Probennahme ebenfalls mit oben genannten GPS-Gerät eingemessen. Die Genauigkeit lag dabei bei allen (Fix-)Punkten bei mindestens 2,30 m.

2.2.2 Aufnahme der Oberfläche der einzelnen Probenpunkte

An jedem Fixpunkt wurde ein Transekt orthogonal über die Rückegasse gelegt.

Jedes Transekt kann im Querschnitt in fünf Kategorien – Wald links, Fahrspur links, Zwischenspur, Fahrspur rechts und Wald rechts – unterteilt werden (Abbildung 13).

Über jedes der 16 Transekte wurde ein Maßband im rechten Winkel über die Rückegasse gespannt. Das Maßband wurde so angelegt, dass die Kategorien Wald links und Wald rechts jeweils mindestens 1 m breit waren.

Das Maßband bestand aus einer Lotschnur, die im Abstand von 10 cm Markierungen aufwies. (Abbildung 14). Der Abstand der Markierungen wurde vor jeder Probennahme kontrolliert, es kam hierbei zu keinen Verschiebungen.

Das Band wurde mit zwei Bodennägeln fixiert und mit Hilfe einer Wasserwaage waagrecht ausgerichtet (Abbildung 15). Anschließend wurde der Abstand zwischen Erdoberfläche (EOF) und dem Maßband - alle 10 cm - gemessen und notiert. Des Weiteren wurden die Abmessungen der einzelnen Kategorien notiert.

2.2.3 Entnahme der Bodenproben

Die Probennahme umfasste insgesamt sechs Wochen, an insgesamt elf Terminen. In Abbildung 16 ist der Temperatur- und Niederschlagsverlauf während und etwa ein Monat vor der Probennahme aufgeführt. In dieser Zeit fielen insgesamt 50,1 mm Niederschlag bei durchschnittlich 20,1 °C. Mit 8,9 mm fiel am 13.08.2018 der meiste Niederschlag an einem Tag. Im Tagesschnitt war mit 28,2 °C der 07.08.2018 der wärmste Tag.

In den Tagen vor den ersten drei Probenahme ist kein Regen gefallen. Ansonsten konnte an den Tagen der weiteren Probenahme, am Tag selber oder am Tag davor geringe Niederschlagsmengen festgestellt werden (Abbildung 16).

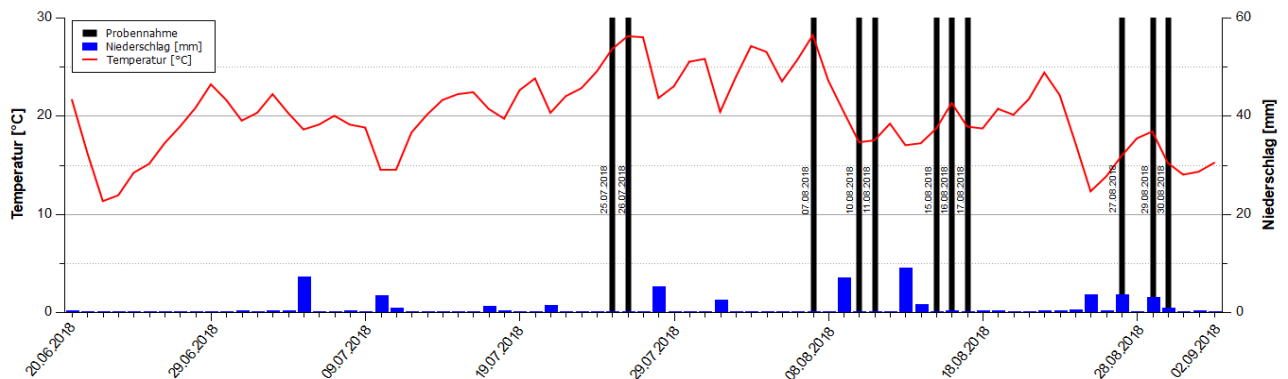


Abbildung 16, Temperatur- und Niederschlagsverlauf vor und während der Probenahme
Datengrundlage: AGRARMETEOROLOGIE RHEINLAND-PFALZ (2018)

In jeder Kategorie wurde ungefähr mittig eine Schürfgrube angelegt. Die Grube wurde dabei so schmal angelegt, dass sich diese innerhalb der jeweiligen Begrenzung der einzelnen Kategorie befand. Die Bodenproben wurden mit Hilfe von Stechzylindern der Firma Eijkelkamp mit passender Einschlaghilfe sowie Hammer gewonnen. Die Stechzylinder haben ein genormtes Volumen von 100 cm³ und ermöglichen, eine ungestörte Probe aus dem Bodengefüge zu entnehmen. Nachdem der Stechzylinder bis zur Markierung in den Boden eingeschlagen wurde, wurde dieser vorsichtig aus dem Boden genommen. Große überstehende Steine oder Wurzeln wurden vorsichtig entfernt, so dass der Zylinder nach Möglichkeit vollständig gefüllt blieb. Sollte der Zylinder nicht vollständig gefüllt aus dem Boden entnommen oder beim Herausziehen Probenmaterial verloren gegangen sein, wurde die Probe verworfen und erneut entnommen (HARTGE & HORN, 2009).

Die Schürfgruben wiesen alle eine Tiefe von ca. 30 cm auf. Ausnahme bildeten dabei die Schürfe der Transekte 2, 4, 12 und 15. Diese wurden bis auf 80 cm ausgehoben, um einen Eindruck der Auswirkungen der Befahrung auf den anstehenden Bimshorizont zu erhalten. Der erste Stechzylinder wurde senkrecht außerhalb der Schürfgrube in den Oberboden eingeschlagen. Innerhalb der Schürfgrube wurde eine weitere Stechzylinderprobe, ebenfalls senkrecht im Boden des Schürfs, bei 30 cm genommen.

Bei Auffinden von Bims wurde der Schürf vertieft, so dass die Probe horizontal bei 30 cm Tiefe entnommen werden konnte. Durch diese Vorgehensweise wurde verhindert, dass Material beim Herausziehen verloren ging. Dies kam bei 17 von 220 gewonnenen Stechzylindern vor (Tabelle 1).

Bei den tieferen Transekten (2, 4, 12 und 15) wurde innerhalb der Schürfgrube alle 20 cm eine

Stechzylinderprobe horizontal aus der Schürfgrubenwand genommen. Am Boden des Schürfs wurde die letzte Probe senkrecht entnommen. Der Stechzylinder der Oberbodenprobe wurde auch hier außerhalb der Schürfgrube senkrecht aus dem Oberboden entnommen. Nach der Entnahme der Stechzylinder wurde das Probenmaterial in beschriftete und vorab gewogene (Waage: Ascher I-2000) Tüten umgefüllt und verschlossen.

2.3 Probenverarbeitung

2.3.1 Trocknung

Nach der Probennahme wurden die Proben inklusive der Tüte gewogen (Ascher I-2000). Das Feuchtgewicht brutto (feuchte Bodenprobe inklusive Tüte) wurde notiert. Da das Gewicht jeder Tüte bekannt war, konnte das Feuchtgewicht netto (feuchte Bodenprobe) berechnet werden. Die Proben wurden in den geöffneten Tüten für mindestens sieben Wochen auf einem trockenen, gut belüfteten Dachboden (Abbildung 17) getrocknet. Nach dem Trocknen wurden die Proben wieder inklusive der Tüte gewogen und das Gewicht notiert (Trockengewicht brutto). Für das Trockengewicht netto wurde ebenfalls das Gewicht der jeweiligen Tüte abgezogen.

Die Differenz aus Feuchtgewicht netto und Trockengewicht netto gibt den Wasserverlust in Gramm [g] an.



Abbildung 17, Trocknung der Proben auf einem gut belüfteten Dachboden, eigene Aufnahme 2018

2.3.2 Siebung

Die getrockneten Proben wurden mit einem Sieb der Firma VWR™ International auf eine Größe von 2 mm gesiebt.

Beim Trocknen können sich Aggregate, vor allem aus Schluff und Ton, bilden (HARTGE & HORN, 2009; AD-HOC-AG BODEN, 2005). Da diese größer als 2 mm sein können und somit das wahre Verhältnis aus Grob- und Feinboden verfälschen könnten, wurden die Aggregate vorsichtig gemörsert. Dabei war vor allem darauf zu achten, dass mögliche Bimssteine nicht zerstört wurden.

Nach dem Sieben wurden sowohl der Grob-, als auch der Feinbodenanteil gewogen (KERN® PCB 3500 – 2). Aus dessen Verhältnis zum gesamten trockenen Boden, konnten die prozentualen Anteile an Grob- und Feinboden der einzelnen Bodenprobe ermittelt werden.

2.3.3 Fingerprobe

Um die genaue Bodenart der Bodenproben zu bestimmen, wurde mit jeder Probe eine Fingerprobe durchgeführt. Bei der Fingerprobe handelt es sich um eine Methode, um vor allem im Gelände, die Bodenart schnell bestimmen zu können (BLUME, 2012; AD-HOC-AG BODEN, 2005).

Die vorliegenden Proben wurden, nach der leicht modifizierten Methode des Geologischen Dienstes von Nordrhein-Westfalen, bestimmt (ARNOLD, 2018).

In Abbildung 18 ist zu erkennen, dass jede Bodenart eine gewisse Spannweite für den prozentualen Ton- und Schluffgehalt aufweist.

Für weitere Berechnungen wurde von diesen Spannen der Mittelwert der Ton- und Schluffgehalte berechnet und addiert. Die durchschnittlichen Sandgehalte für die jeweilige Bodenart berechnen sich aus der Differenz von 100 zu den addierten Durchschnittswerten von Ton und Schluff (Tabelle 2).

2.4 Datenverarbeitung

2.4.1 Klassifizierung der Daten

Der Gesamtdatensatz wurde in mehrere (Daten-)Klassen eingeteilt.

Für jede Einteilung wurde sowohl ein Gesamtdatensatz, als auch ein kategoriespezifischer Datensatz (Wald, Fahrspur, Zwischenspur) gebildet.

- **Einteilung nach Tiefe**

Für diese wurde der Datensatz in die Tiefenstufe 0 cm, 30 cm sowie > 30 cm aufgeteilt. Anzumerken ist hierbei, dass für die Tiefenstufe 30 cm bei den bis 80 cm beprobten Transekten (2, 4, 12 und 15) die Tiefenstufe aus dem Mittelwert der Tiefen 20 cm und 40 cm berechnet wurde.

- **Einteilung nach Neigung**

Die Hangneigung jedes Transekts im Untersuchungsgebiets wurde mittels Esri ArcGis (Version 10.3.1) aus einem digitalen Geländemodell mit einer Auflösung von 5 m berechnet (Abbildung 19). Klassifiziert wurde die Hangneigung nach AD-HOC-AG BODEN (2005) und ARBEITSGEMEINSCHAFT FORTEINRICHTUNG (2003) (Tabelle 3).

- **Einteilung nach Befahrungen**

Die Anzahl der Befahrungen der untersuchten RG, konnte nicht geklärt werden. Daher kann die Befahrungsintensität nur qualitativ abgeschätzt werden. Zwischen Transekt 7 und 8 trifft eine weitere Rückegasse auf die untersuchte (Abbildung 11 und 20). Daher ist davon auszugehen, dass die RG ab Transekt 8 häufiger befahren wurde als diese bis Transekt 7.

Die Transekte 1 bis 7 wurden in wenig(er) befahren und die Transekte 8 bis 16 in häufig(er) befahren eingeteilt.

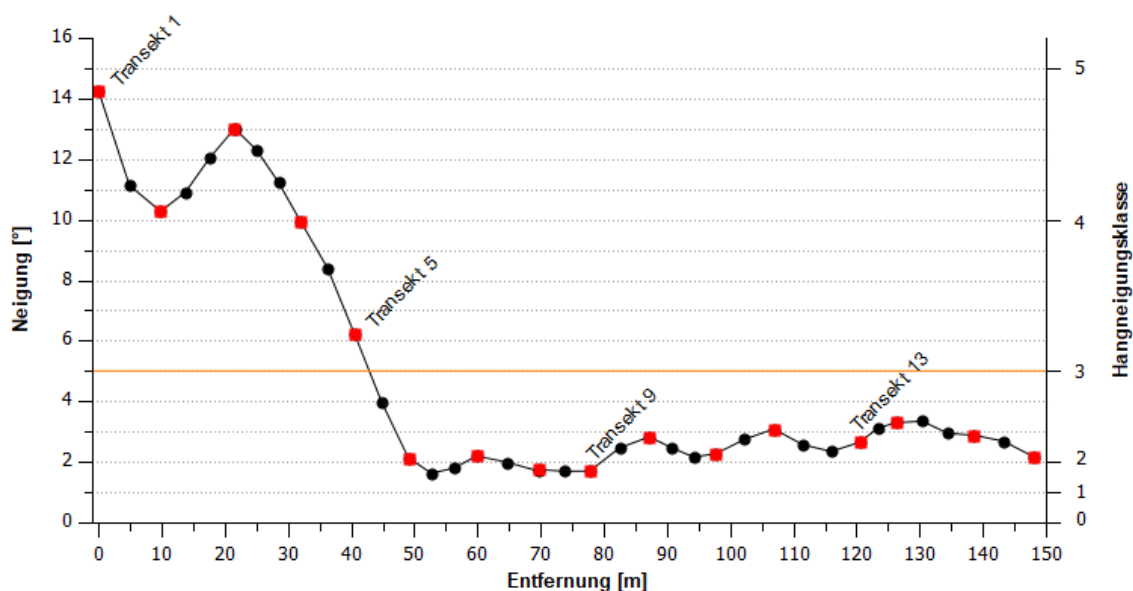


Abbildung 19, Hangneigung der untersuchten RG und der untersuchten Transekte (rote Punkte), unterhalb der orangenen Linie kann die Hangneigung als flach, darüber als steil, klassifiziert werden (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG, 2003)

2.4.2 Test auf Normalverteilung

Mit Hilfe von SPSS 25 von IBM wurden die Daten mittels Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung der Parameter Lagerungsdichte, relative Bodenfeuchte und den Anteilen von Grus, Feinboden, Sand, Schluff sowie Ton getestet. Der Shapiro-Wilk-Test ist vor allem auch für kleine Datensätze geeignet. Auf Grundlage der Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung, kann unter anderem die folgende Korrelationsmethode festgelegt werden (BORSIUS, 2011; GRÜNWARD, 2019).

Folgende Datensätze wurden getestet:

- Gesamter Datensatz. Dieser umfasst dabei alle Daten (der jeweiligen Einteilung)
- Kategorien. Diese umfassen dabei jeweils die Kategorie Wald (Wald links und Wald rechts zusammengelegt), Fahrspur (Fahrspur links und Fahrspur rechts zusammengelegt) und Zwischenspur.

- Rohdatensatz jeweils:
 - Gesamter Datensatz
 - Kategorien
- Tiefenspezifisch (0 cm, 30 cm und > 30 cm) jeweils:
 - Gesamter Datensatz
 - Kategorien
- Neigungsspezifisch (flach, steil) jeweils:
 - Gesamter Datensatz
 - Kategorien
- Befahrungsspezifisch (wenig, viel) jeweils:
 - Gesamter Datensatz
 - Kategorien

2.4.3 Prozession der Daten

Der kleinste Abstand (bei jedem Transekt) zwischen EOF und Maßband wurde verwendet, um die tatsächliche Tiefe der entnommenen Stechzylinder und die Kontur des Geländes eines Transektes zu berechnen. Für die Oberflächenkontur wurden die aufgenommenen Tiefenwerte von dem kleinsten Abstand (zwischen EOF und Maßband) subtrahiert. Die Tiefen der Stechzylinder wurden mit Hilfe der prozessierten Oberflächenhöhe an diesem Probenpunkt ermittelt. Hierzu wurden die Tiefen der Stechzylinder von der Oberfläche subtrahiert.

Die Verortung der Stechzylinder der Zwischenspur wurde für alle Transekte als Nullpunkt festgelegt. Der negative Bereich ist demnach links und umfasst Fahrspur links und Wald links. Der positive Bereich umfasst die rechten Kategorien Fahrspur rechts und Wald rechts.

2.4.4 Lagerungsdichte

Mit dem Trockengewicht der Proben wurde die Lagerungsdichte nach BLUME, STAHR & LEINWEBER (2011) mit folgender Formel berechnet:

$$\text{Lagerungsdichte (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Trockengewicht (g)}}{\text{Stechzylindervolumen (cm}^3\text{)}}$$

2.4.4.1 Kategoriespezifische Lagerungsdichte

Für den gesamten Datensatz sowie die Kategorien – Wald, Fahrspur und Zwischenspur – wurde der Median der Lagerungsdichte berechnet.

Der Median der Lagerungsdichte der Fahrspur wurde im Verhältnis zu dem Median der Lagerungsdichte des Waldes gesetzt, um durch ein prozentuales Verhältnis die relative Verdichtung zu erhalten.

Des Weiteren wurde das Verhältnis von Wald zu Zwischenspur und Fahrspur zu Zwischenspur berechnet.

Die Daten wurden mit Hilfe von QtiPlot als Boxplotdiagramme visualisiert.

2.4.4.2 Tiefenspezifische Lagerungsdichte

Für die tiefenspezifische Lagerungsdichte wurde der Median der Lagerungsdichte des gesamten Datensatzes sowie der drei Kategorien für die Tiefenstufe 0 cm, 30 cm und > 30 cm berechnet.

Die tiefenspezifische Lagerungsdichte der Fahrspur wurde jeweils in das Verhältnis zum Wald gesetzt, um die relative Verdichtung zu berechnen. Die Daten wurden mit Hilfe von QtiPlot als Boxplotdiagramme visualisiert.

2.4.4.3 Neigungsspezifische Lagerungsdichte

Für die neigungsspezifische Lagerungsdichte wurde der Median der Lagerungsdichte des gesamten Datensatzes sowie der drei Kategorien für die Neigungsklassen flach und steil berechnet.

Die neigungsspezifische Lagerungsdichte der Fahrspur wurde in das Verhältnis zum Wald gesetzt, um die relative Verdichtung zu berechnen. Die Daten wurden mit Hilfe von QtiPlot als Boxplotdiagramme visualisiert.

2.4.4.4 Befahrungsspezifische Lagerungsdichte

Für die befahrungsspezifische Lagerungsdichte wurde der Median der Lagerungsdichte des gesamten Datensatzes sowie der drei Kategorien für die Befahrungsklassen wenig und viel berechnet.

Die befahrungsspezifische Lagerungsdichte der Fahrspur wurde jeweils in das Verhältnis zum Wald gesetzt, um die relative Verdichtung zu berechnen. Die Daten wurden mit Hilfe von QtiPlot als Boxplotdiagramme visualisiert.

2.4.5 Relative Bodenfeuchte

Mit der Formel: $\frac{\text{Bodenprobe feucht (g)} - \text{Bodenprobe trocken (g)}}{\text{Bodenprobe trocken (g)}}$ wurde die relative Bodenfeuchte nach HARTGE & HORN (2009) berechnet.

2.4.5.1 Kategoriespezifische Bodenfeuchte

Für den gesamten Datensatz sowie die Kategorien – Wald, Fahrspur und Zwischenspur – wurde der Median der relativen Bodenfeuchte berechnet. Dabei wurde der Median der relativen Bodenfeuchte der Fahrspur im Verhältnis zu dem Median des Waldes gesetzt, um durch ein prozentuales Verhältnis die relativen Unterschiede der Bodenfeuchte zu erhalten.

Des Weiteren wurde das Verhältnis von Wald zu Zwischenspur und Fahrspur zu Zwischenspur berechnet.

Die Daten wurden mit Hilfe von QtiPlot als Boxplotdiagramme visualisiert.

2.4.5.2 Tiefenspezifische Bodenfeuchte

Für die tiefenspezifische relative Bodenfeuchte wurde der Median der relativen Bodenfeuchte des gesamten Datensatzes sowie der drei Kategorien für die Tiefenstufen 0 cm, 30 cm und > 30 cm berechnet.

Die tiefenspezifische relative Bodenfeuchte der Fahrspur wurde in das Verhältnis zum Wald gesetzt, um die relativen Unterschiede der Bodenfeuchte berechnen zu können. Die Daten wurden mit Hilfe von QtiPlot als Boxplotdiagramme visualisiert.

2.4.6 Interpolation und Visualisierung

Die Interpolation und Visualisierung der Lagerungsdichte sowie der relativen Bodenfeuchte erfolgte mit Surfer 13 der Firma GOLDEN SOFTWARE, LLC und wurde mit dem Kriging-Verfahren durchgeführt. Die prozessierte Geländeoberfläche sowie die Probenpunkte der Stechzylinder wurden ebenfalls in die Diagramme eingefügt. Interpolierte Bereiche oberhalb der Geländeoberfläche wurden mit Hilfe von GIMP 10 ausgeschnitten.

2.4.7 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalysen wurden mit Hilfe von IBM SPSS 25 durchgeführt. Alle Analysen wurden nach der Methode von Sperman-Rho durchgeführt. Bei dieser handelt es sich um eine Rangkorrelation (BORSIUS, 2011; BAUSINGER, CHRIST, 2003).

2.4.7.1 Korrelationsanalyse der Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte wurde mit den Anteilen von Grus, Feinboden, Sand, Schluff sowie Ton korreliert.

Korrelationen wurden auf Grundlage folgender Datensätze durchgeführt:

- Gesamter Datensatz (+ Kategorien)
- Tiefenspezifisch (0 cm und 30 cm)
- Neigungsspezifisch (flach, steil)
- Befahrungsspezifisch (wenig, viel)

2.4.7.2 Korrelationsanalyse der relativen Bodenfeuchte

Die relative Bodenfeuchte wurde mit der Lagerungsdichte sowie den Anteilen von Grus, Feinboden, Sand, Schluff und Ton korreliert.

Folgende Korrelationen wurden dabei durchgeführt:

- Gesamter Datensatz (+ Kategorien)
- Tiefenspezifisch (0 cm, 30 cm)

3. ERGEBNISSE

3.1 Zu beachtende Hinweise

3.1.1 Normalverteilung

Die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Die Daten und Datengruppen sind zum Großteil nicht normalverteilt und werden alle, trotz einiger Ausnahmen, dementsprechend behandelt. Nur so können alle Daten miteinander verglichen werden.

Formulierungen wie „durchschnittlich“, „im Schnitt“ und ähnliche beziehen sich im Folgenden immer auf den Median.

3.1.2 Datenbeschriftung

Bei einer Nennung von einzelnen Probenpunkten im Text wird folgende Schreibweise verwendet: Transektnummer(Breite in cm/ Tiefe in cm).

Zum Beispiel bedeutet: 1(-180/ -46,5), dass die Probe von Transekt 1 stammt und bei einer Breite von -180 cm (linke Seite) und einer Tiefe von -46,5 cm genommen wurde. Die Zahlen geben jeweils die referenzierten Breiten beziehungsweise Tiefen an. Negative Zahlen bei der Breite bedeuten, dass die Probe aus Wald links oder Fahrspur links stammt. 0 kennzeichnet die Zwischenspur und positive Zahlen die Kategorie Fahrspur rechts sowie Wald rechts.

3.2 Fingerprobe

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Mediane der einzelnen Transekte für den relativen Anteil an Sand, Schluff und Ton sowie die daraus resultierenden Bodenarten und die Bodenartengruppen nach AD-HOC-AG BODEN (2005) aufgeführt.

Zu erkennen ist, dass die relativen Anteile von Sand von Transekt 1 zu 16 abnehmen, während die relativen Anteile von Ton eher zunehmen. Die Anteile von Schluff sind bis auf zwei Ausnahmen (Transekt 10 und 14) nahezu konstant.

Für die Tiefenstufe 30 cm ist ein ähnlicher Trend wie für den gesamten Datensatz – Abnahme der Sandgehalte von Transekt 1 zu 16 mit einer Zunahme des Tongehaltes – zu beobachten, allerdings sind hier die Veränderungen weniger stark ausgeprägt.

Für 0 cm ist grundsätzlich dieser Trend für die Anteile Sand und Ton ebenfalls feststellbar. Der relative Anteil von Schluff nimmt in dieser Tiefenstufe hingegen leicht ab. Für die Tiefenstufe > 30 cm ist der Trend des kompletten Datensatzes ebenfalls zu erkennen.

Allerdings nimmt hier der Anteil von Schluff von Transekt 2 bis 15 zu. In Tabelle 6 sind die prozentualen Unterschiede der Tiefenstufen zueinander aufgeführt. Zu erkennen ist, dass der Sandgehalt, bei gleichzeitiger Abnahme der Schluffgehalte, steigt. Der Anteil von Ton steigt mit zunehmender Tiefe ebenfalls an. Im Gegensatz zu Sand und Grus nimmt der Tonanteil im Vergleich von 30 cm zu > 30 cm ab. Der Grusanteil nimmt bis 30 cm über alle Transekte ab. Ab 30 cm nimmt der Anteil um 15 % zu.

Tabelle 5, durchschnittliche Bodenart der Transekte

Transekt	Bodenarten - Gruppe	Bodenart		rel. Anteil Sand [%]	rel. Anteil Schluff [%]	rel. Anteil Ton [%]
1	Sandlehme	SI4	stark lehmiger Sand	52	21	15
2	Lehmsand	SI3	lehmiger Sand	46	20	9
3	Sandlehme	SI4	stark lehmiger Sand	41	24	14
4	Normallehme	Ls4	stark sandiger Lehm	60	22	20
5	Schluffsande	Su3	schluffiger Sand	57	22	6
6	Normallehme	Ls4	stark sandiger Lehm	49	21	17
7	Lehmsand	SI3	lehmiger Sand	43	20	9
8	Lehmsand	SI3	lehmiger Sand	40	19	8
9	Lehmsand	SI3	lehmiger Sand	46	19	7
10	Sandlehme	St3	toniger Sand	48	10	18
11	Sandlehme	SI4	stark lehmiger Sand	39	18	11
12	Normallehme	Ls4	stark sandiger Lehm	37	18	20
13	Tonlehme	Lts	sand-toniger Lehm	34	20	25
14	Normallehme	Lt2	schwach toniger Lehm	27	37	29
15	Tonlehme	Lts	sand-toniger Lehm	28	22	38
16	Tonlehme	Lts	sand-toniger Lehm	36	12	36

Tabelle 6, Änderung der Bodenartanteile pro Tiefenstufe

Tiefenstufe	Änderung des Grusanteils [%]	Änderung des Sandanteils [%]	Änderung des Schluffanteils [%]	Änderung des Tonanteils [%]
0 cm zu 30 cm	- 47	+ 1	- 8	+ 59
0 cm zu > 30 cm	- 39	+ 6	- 20	+ 2
30 cm zu > 30 cm	+ 15	+ 5	- 13	- 36

3.3 Lagerungsdichte

3.3.1 Interpolation der Lagerungsdichte

In den Abbildungen 21 und 22 sind die Interpolationen der Lagerungsdichten der einzelnen Transekte abgebildet. Zu erkennen ist, dass die Lagerungsdichte in allen Kategorien von Transekt 1 bis 16 schrittweise zunimmt. So ist zum Beispiel Transekt 16 im Schnitt mehr als doppelt so dicht gelagert als Transekt 1.

Transekt 1

Die rechte Seite, sowohl Wald als auch Fahrspur, weisen eine höhere Lagerungsdichte als die linke Seite auf. Der Oberboden der Fahrspur rechts weist dabei die höchste Lagerungsdichte innerhalb dieses Transekts auf. Die am lockersten gelagerten Bereiche sind die Oberbodenproben der Fahrspur links und der Zwischenspur.

Auffällig ist, dass die Lagerungsdichten von Wald links, Fahrspur links und der Zwischenspur im Unterboden höher sind als im Oberboden. Bei der Fahrspur rechts und dem Wald rechts ist dies umgekehrt.

Transekt 2

Die höchste Lagerungsdichte im zweiten Transekt befindet sich im Oberboden der Fahrspur rechts. Bei einer Tiefe von ca. -50 cm unterhalb der EOF befindet sich in allen Kategorien ein etwas dichter gelagerter Horizont. Unterhalb dieser Schicht nimmt die Lagerungsdichte mit zunehmender Tiefe ab. Die niedrigsten Lagerungsdichten befindet sich in der Fahrspur rechts (ca. -110 cm unter EOF) und im Wald rechts (ca. ab -100 cm unter der EOF).

Transekt 3

Im dritten Transekt weist der Oberboden der linken Fahrspur die höchste Lagerungsdichte auf. Die Zwischenspur ist im Oberboden am lockersten gelagert. Für die Zwischenspur, Fahrspur rechts und Wald rechts ist mit zunehmender Tiefe eine höhere Lagerungsdichte zu beobachten. Die Fahrspur weist dabei die höchste Lagerungsdichte mit ca. $1,1 \text{ g/cm}^3$ auf. Für Wald links und Fahrspur links ist dieser Tiefengradient umgekehrt. Hier nimmt die Lagerungsdichte mit zunehmender Tiefe ab. Die Fahrspur ist dabei bei ca. -70 cm unterhalb der EOF am lockersten gelagert.

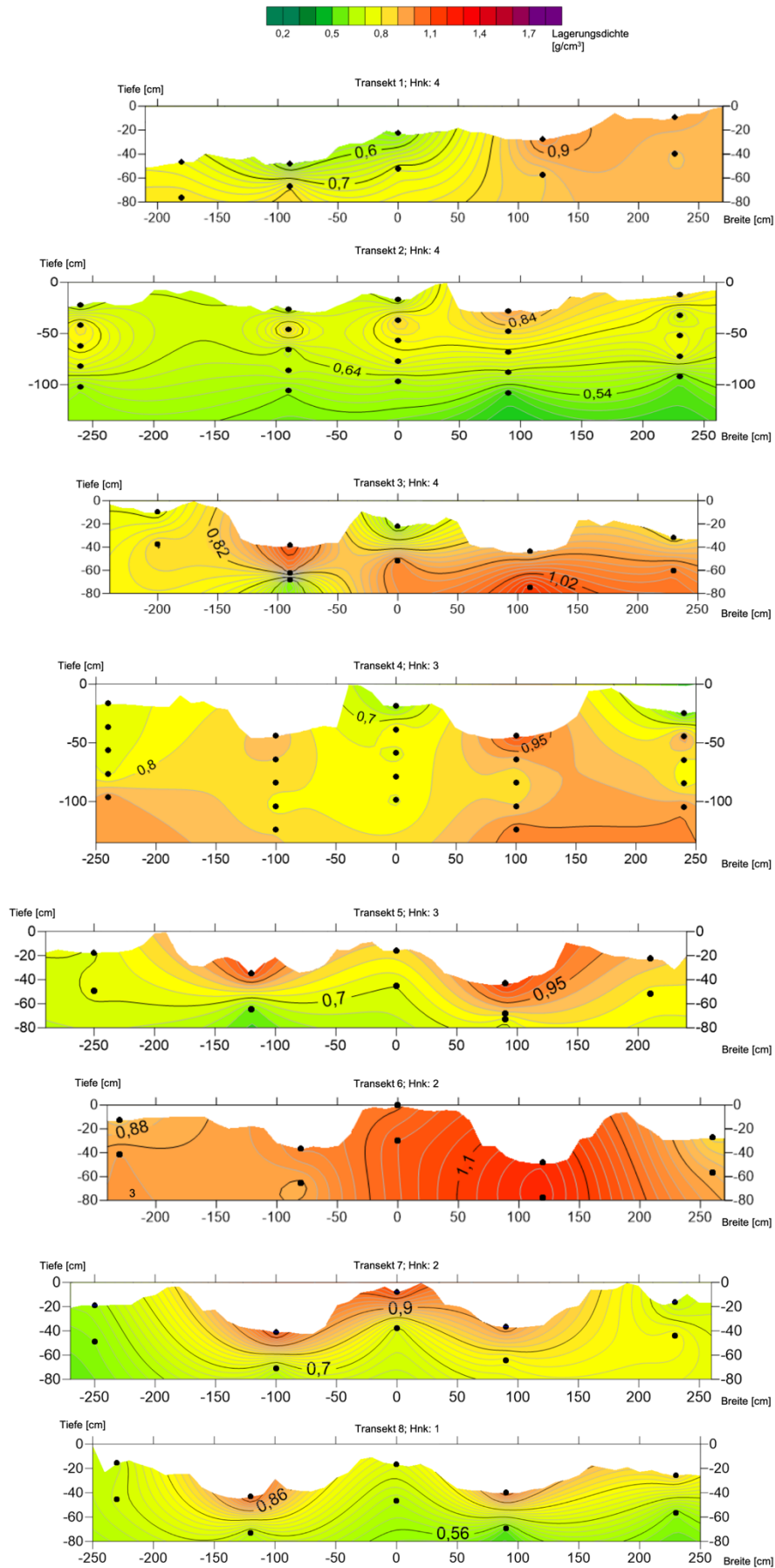


Abbildung 21, Interpolierte Lagerungsdichten der Transekte 1 bis 8; oben 1, unten 8
 • = Probenpunkt (Stechzylinder)

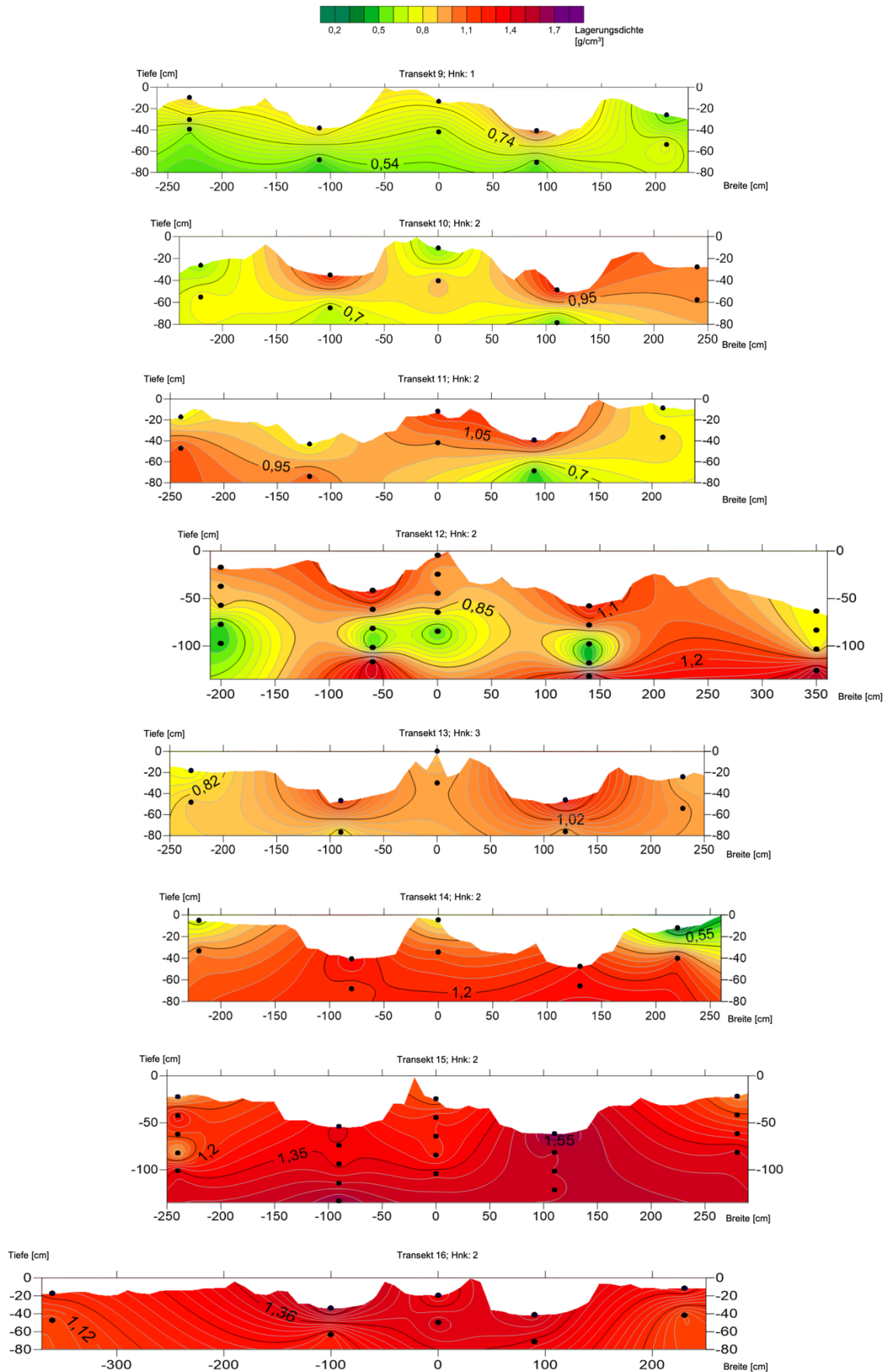


Abbildung 22, Interpolationen der Lagerungsdichten der Transekte 9 bis 16; oben 9, unten 16, • = Probenpunkt (Stechzylinder)

Transekt 4

Für die Kategorien Wald und Zwischenspur ist eine Zunahme der Lagerungsdichte mit größer werdender Tiefe zu erkennen. Die Fahrspuren weisen oberflächlich die höchsten Lagerungsdichten auf. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Lagerungsdichte der linken Fahrspur leicht ab und bleibt dann konstant. Bei der Fahrspur rechts nimmt bis ca. -70 cm unterhalb der EOF die Lagerungsdichte geringfügig ab. Anschließend steigt mit zunehmender Tiefe die Lagerungsdichte an.

Transekt 5

Zu erkennen ist eine deutlich höhere Lagerungsdichte im Oberboden der beiden Fahrspuren, im Vergleich zu den anderen Kategorien. Allgemein festzuhalten ist, dass hier in allen Kategorien die höchsten Lagerungsdichten im Oberboden gemessen wurden und mit zunehmender Tiefe diese abnehmen. Die niedrigste Lagerungsdichte befindet sich in der linken Fahrspur bei einer Tiefe von ca. -65 cm unterhalb der Geländeoberfläche.

Transekt 6

Dieser Transekt weist im Vergleich zu den vorigen eine höhere Lagerungsdichte auf. Die Fahrspur rechts ist dabei am dichtesten gelagert. Mit zunehmender Tiefe nimmt in allen Kategorien dieses Transekts die Lagerungsdichte zu. Allerdings ist der Tiefengradient nur gering ausgeprägt.

Transekt 7

Mit zunehmender Tiefe nimmt in diesem Transekt die Lagerungsdichte ab. Eine Ausnahme von diesem Trend bildet der Wald rechts. Dort ist der Oberboden lockerer gelagert als der Unterboden. Die Oberböden der linken Fahrspur sowie der Zwischenspur weisen die höchsten Lagerungsdichten in diesem Transekt auf. Der Oberboden der rechten Fahrspur ist geringfügig lockerer gelagert, allerdings immer noch fester als die beiden Wald-Standorte.

Transekt 8

Hier ist eine höhere Lagerungsdichte im Oberboden der beiden Fahrspuren im Vergleich zu den anderen Kategorien erkennbar. Mit zunehmender Tiefe nimmt bei allen Kategorien die Lagerungsdichte ab. Die geringsten Lagerungsdichten befinden sich im Unterboden der Fahrspur rechts sowie im Wald rechts.

Transekt 9

In diesem Transekt nimmt die Lagerungsdichte mit zunehmender Bodentiefe ebenfalls ab. Ausnahme bildet dabei die Kategorie Wald rechts. Dort ist die Lagerungsdichte an der EOF

am geringsten und nimmt mit zunehmender Tiefe zu. Die rechte Fahrspur weist im Oberboden die höchste Lagerungsdichte auf.

Transekt 10

Die Fahrspuren weisen im Oberboden eine höhere Lagerungsdichte als die Kategorien Wald und Zwischenspur auf. Für die rechte Fahrspur konnte dabei die höchste Lagerungsdichte dieses Transekts festgestellt werden. In den beiden Fahrspuren nimmt die Lagerungsdichte mit zunehmender Tiefe ab. Im Wald rechts ist dies ebenfalls der Fall, allerdings ist hier die Abnahme weniger stark ausgeprägt. Für den Wald links ist eine leichte Zunahme der Lagerungsdichte zu verzeichnen. Bei der Zwischenspur nimmt die Lagerungsdichte bis ca. -40 cm unterhalb der Geländeoberfläche zu. Ab ca. -50 cm Tiefe wird der Boden hier etwas lockerer.

Transekt 11

Dieser Transekt weicht von den übrigen geringfügig ab. Die höchsten Lagerungsdichten befinden sich in der Fahrspur rechts sowie in der Zwischenspur im Oberboden. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Lagerungsdichte in diesen Kategorien ab. Für Wald links, Wald rechts sowie Fahrspur links ist ein umgekehrter Trend zu beobachten. Hier nimmt die Lagerungsdichte mit zunehmender Tiefe zu.

Transekt 12

In Transekt 12 ist für alle Kategorien, ausgenommen Wald rechts, eine relativ hohe Lagerungsdichte an der EOF zu erkennen. Mit zunehmender Bodentiefe nimmt diese ab. Für Wald rechts ist bis -100 cm unterhalb der Geländeoberfläche kaum eine Veränderung der Lagerungsdichte zu erkennen. Ab -100 cm Tiefe nimmt diese deutlich zu. Für die beiden Fahrspuren und die Zwischenspur ist anzumerken, dass die Lagerungsdichte ab einer Tiefe von ca. -110 cm bis -120 cm unterhalb der Geländekante wieder zunimmt.

Transekt 13

Die Kategorien Wald rechts und Zwischenspur weisen im Tiefenverlauf der Interpolation kaum eine Veränderung der Lagerungsdichte auf. Bei Wald links nimmt diese mit zunehmender Tiefe zu. Für die Fahrspuren ist ein umgekehrter Trend zu beobachten. Die Lagerungsdichte ist im Oberboden am höchsten und nimmt mit zunehmender Tiefe geringfügig ab. Die rechte Fahrspur ist dabei etwas dichter gelagert als die linke.

Transekt 14

Die Oberböden der Kategorien Wald links und Wald rechts sowie Zwischenspur weisen sehr geringe Lagerungsdichten auf. Besonders Wald rechts ist aufgrund sehr geringer Werte auffällig. Die Fahrspuren weisen im Oberboden eine deutlich höhere Lagerungsdichte auf. Für alle Kategorien ist eine Zunahme der Lagerungsdichte mit der Tiefe zu erkennen. Die Veränderung im Tiefenprofil ist für die Fahrspuren deutlich geringer als für den Wald.

Transekt 15

Der 15. Transekt zeichnet sich durch allgemein hohe Lagerungsdichten aus. Der Oberboden der rechten Fahrspur weist dabei, nicht nur die höchste Lagerungsdichte in diesem Transekt, sondern aller Transekte auf.

Für die Kategorien Fahrspur links, Zwischenspur und Wald rechts ist eine leichte Zunahme der Lagerungsdichte im Tiefenverlauf zu erkennen. Bei der rechten Fahrspur verändert sich die Lagerungsdichte mit zunehmender Tiefe kaum, geringfügig wird diese ab ca. -120 cm unterhalb der Geländeoberfläche lockerer. Für Wald links ist bis ca. -60 cm unterhalb der EOF eine Zunahme der Lagerungsdichte zu verzeichnen. Ab einer Tiefe von -80 cm unterhalb der Geländeoberfläche nimmt die Lagerungsdichte wieder zu.

Transekt 16

Die Lagerungsdichte ist über das gesamte Transekt nahezu gleich. Tendenziell ist eine geringfügige Abnahme dieser mit zunehmender Bodentiefe feststellbar. Die Fahrspuren weisen eine höhere Lagerungsdichte als der Wald und die Zwischenspur auf. Dabei konnte die höchste Lagerungsdichte in diesem Transekt in der Fahrspur links im Oberboden festgestellt werden.

3.3.2 Lagerungsdichte Kategorie

In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass die Kategorie Wald sowohl den niedrigsten Wert ($0,22 \text{ g/cm}^3$) bei 14(220/ -12) als auch den niedrigsten Median ($0,80 \text{ g/cm}^3$) aufweist. Der Median der Fahrspur ($0,93 \text{ g/cm}^3$) ist um 17 % höher als der des Waldes. Auch wurde die höchste Lagerungsdichte ($1,67 \text{ g/cm}^3$) [15(110/ -61,5)] in dieser Kategorie gemessen. Der Median der Zwischenspur liegt mit $0,83 \text{ g/cm}^3$ zwischen den Medianen von Wald und Fahrspur. Dieser ist um 4 % höher als der des Waldes und um 11 % lockerer als der der Fahrspur.

Sowohl die Spannweite des Interquartilbereichs als auch die gesamte Spannweite der Daten

der Fahrspur fällt am größten aus. Die Zwischenspur liegt auch hier zwischen den Kategorien Wald und Fahrspur.

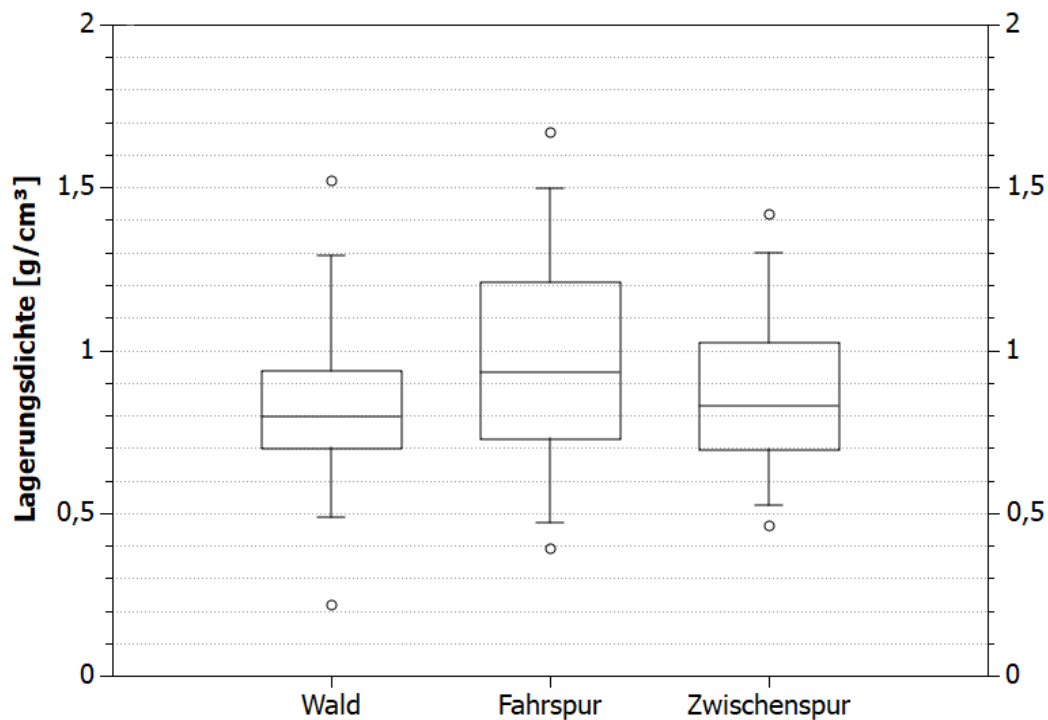


Abbildung 23, Lagerungsdichte der Kategorien Wald, Fahrspur und Zwischenspur
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittelinie); Q_{25}/Q_{75} (Box); Q_{10}/Q_{90} (Whisker)

In Tabelle 7 sind die Lagerungsdichten der Kategorien für jedes Transekt aufgeführt. Bis auf die Transekte 1, 2 und 9 weist die Fahrspur im Schnitt eine höhere Lagerungsdichte als der Wald auf. Die Zwischenspur weist bis auf vier Transekte (1, 3, 4 und 10) eine höhere Lagerungsdichte als der Wald auf. In Transekt 9 ist die durchschnittliche Ld für Wald und Zwischenspur gleich.

In Transekt 14 ist mit 54 % der größte Unterschied zwischen Wald und Fahrspur gemessen worden. Für Transekt 2 ist der größte negative Unterschied gemessen worden. Hier ist die Fahrspur um 11 % lockerer gelagert als der Wald.

Tabelle 7, Vergleich der Lagerungsdichte der Transekte
(prozentuale Unterschiede zum Wald)

Transekt	Ld Wald [g/cm ³]	Ld Fahrspur [g/cm ³]	Ld Zwischenspur [g/cm ³]
1	0,83	0,82 (-1 %)	0,62 (-25 %)
2	0,71	0,64 (-11 %)	0,71 (+1%)
3	0,81	0,96 (+19 %)	0,76 (-6%)
4	0,76	0,85 (+12 %)	0,74 (-2%)
5	0,75	0,85 (+14 %)	0,76 (+2%)
6	0,86	1,06 (+22 %)	1,02 (+18%)
7	0,60	0,84 (+39 %)	0,87 (+45%)
8	0,64	0,81 (+27 %)	0,65 (+1%)
9	0,69	0,66 (-5 %)	0,69 (0%)
10	0,87	0,91 (+5 %)	0,70 (-20 %)
11	0,81	0,90 (+11 %)	1,05 (+30 %)
12	0,77	1,03 (+34 %)	0,93 (+22 %)
13	0,86	1,00 (+16 %)	0,88 (+2 %)
14	0,82	1,26 (+54 %)	0,92 (+12 %)
15	1,14	1,49 (+30 %)	1,25 (+9 %)
16	1,13	1,39 (+23 %)	1,37 (+21 %)

3.3.3 Tiefenspezifische Lagerungsdichte

In den Abbildungen 24 bis 26 sind die Lagerungsdichten der Kategorien tiefenspezifisch, in 0 cm, 30 cm sowie > 30 cm, aufgeteilt.

Für die Tiefenstufe 0 cm (Abbildung 24) ist die Lagerungsdichte der Fahrspur im Schnitt um 46 % höher als der Wald. Der niedrigste Wert konnte für diese Tiefenstufe im Wald bei 14(220/ -12) mit 0,22 g/cm³, der höchste Wert in der Fahrspur bei 15(110/ -61,5) mit 1,67 g/cm³ gemessen werden. Die Zwischenspur weist einen 6 % höheren Median als der Wald auf. Der Interquartilbereich der Zwischenspur weist die größte Spannweite auf, der des Waldes die geringste.

Abbildung 25 zeigt die Boxplotdiagramme für die Tiefenstufe 30 cm. Hier ist festzustellen, dass der Median der Fahrspur um 2 % niedriger als der des Waldes ist. Sowohl der niedrigste (0,46 g/cm³) bei 11(90/ -69) als auch der höchste Wert (1,35 g/cm³) [16(90/ -71)] wurde in dieser Tiefenstufe in der Fahrspur gemessen. Des Weiteren weist die Fahrspur den größten Interquartilbereich auf. Die Zwischenspur weist im Median mit 0,90 g/cm³ die höchste

Lagerungsdichte auf. Um 6 % beziehungsweise 8 % ist diese höher als im Wald beziehungsweise in der Fahrspur.

Für die Tiefenstufe > 30 cm (Abbildung 26) lässt sich im Schnitt eine Verdichtung der Fahrspur im Vergleich zum Wald von 6 % feststellen. Die niedrigste Lagerungsdichte mit $0,39 \text{ g/cm}^3$ bei 12(140/ -60) sowie die höchste [12(140/ -74)] ($1,66 \text{ g/cm}^3$) wurden bei dieser Tiefenstufe in der Fahrspur festgestellt. Des Weiteren weist in dieser Tiefenstufe der Interquartilbereich der Fahrspur ebenfalls die größte Spannweite auf. Der Median der Zwischenspur und des Waldes sind identisch. Allerdings ist bei der Zwischenspur der Interquartilbereich größer, für den Wald dagegen die Spannweite der Whisker, vor allem des oberen Whisker.

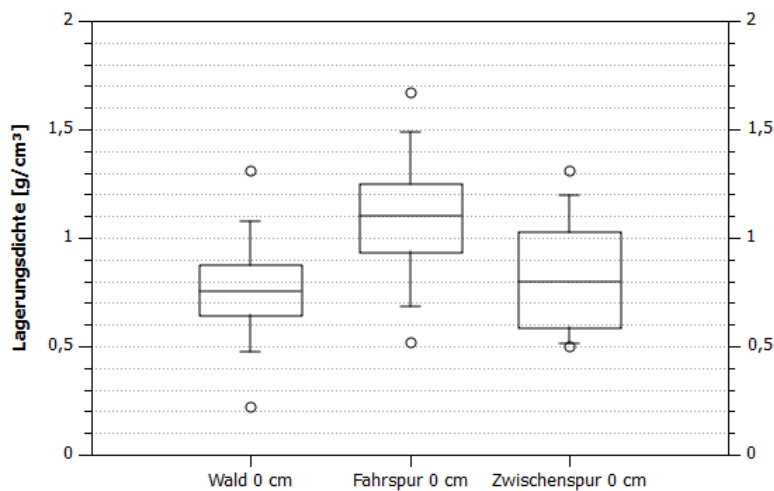


Abbildung 24, Lagerungsdichte der Tiefenstufe: 0 cm
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q_{25}/Q_{75} (Box); Q_{10}/Q_{90} (Whisker)

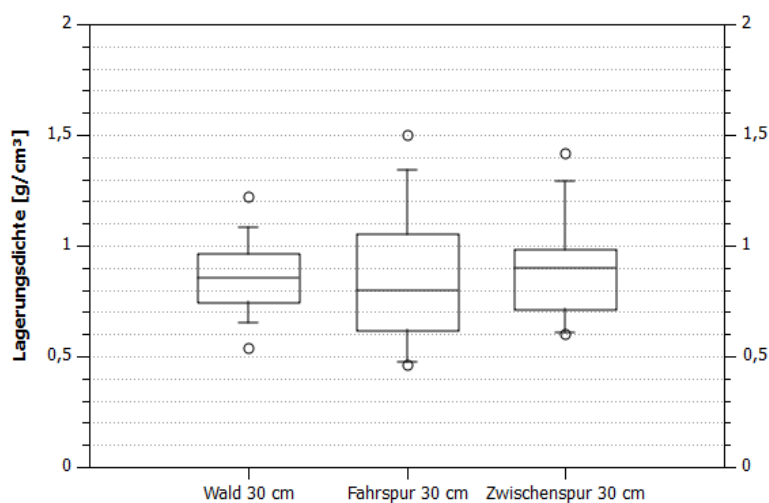


Abbildung 25, Lagerungsdichte der Tiefenstufe: 30 cm
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q_{25}/Q_{75} (Box); Q_{10}/Q_{90} (Whisker)

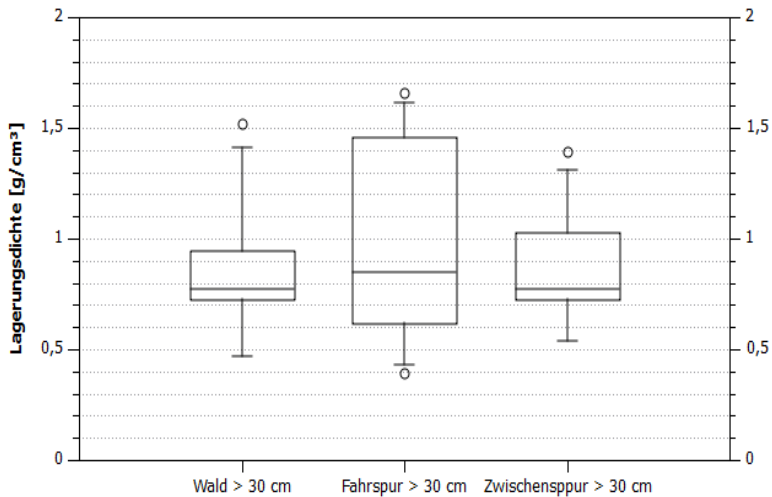


Abbildung 26, Lagerungsdichte Tiefenstufe: > 30 cm
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q₂₅/Q₇₅ (Box); Q₁₀/Q₉₀ (Whisker)

3.3.4 Neigungsspezifische Lagerungsdichte

Abbildung 27 zeigt die Lagerungsdichte der Kategorien Fahrspur und Wald für die beiden Neigungsklassen: flach und steil.

Sowohl im Flachen als auch im Steilen ist die Fahrspur im Mittel dichter gelagert als der Wald. Um 10 % im Steilen und um 30 % im Flachen. Die geringste Lagerungsdichte wurde bei 14(220/ -12) mit 0,22 g/cm³ im Wald flach, die höchste mit 1,67 g/cm³ bei 15(110/ -61,5) (Fahrspur flach) festgestellt.

Für die steile Kategorie konnte eine minimale Lagerungsdichte von 0,47 g/cm³, sowohl in der Fahrspur [2(90/-118)] als auch im Wald [4(240/ -24,5)], gemessen werden. Die höchste Lagerungsdichte im Steilen wurde mit 1,14 g/cm³ in der Fahrspur bei 5(90/ -43) gemessen. Auffällig ist, dass Wald und Fahrspur im Steilen lockerer gelagert sind als im Flachen. Der Unterschied von flach zu steil beträgt im Wald 11 % und in der Fahrspur 25 %. Die Interquartilbereiche haben für die steilen Kategorien eine kleinere Spannweite als bei den flachen. Den größten Interquartilbereich hat die Fahrspur flach.

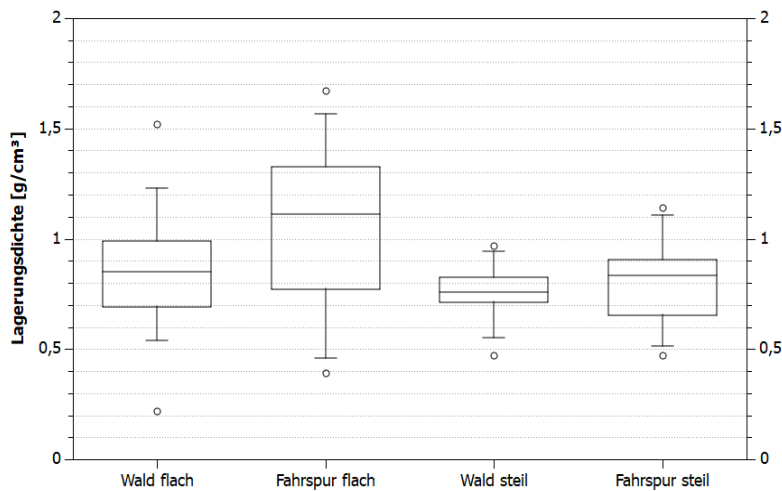


Abbildung 27, Lagerungsdichte nach Hangneigung für die Neigungsklasse flach und steil
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q₂₅/Q₇₅ (Box); Q₁₀/Q₉₀ (Whisker)

3.3.5 Befahrungsspezifische Lagerungsdichte

Die Rückegasse wurde qualitativ in zwei Befahrungsklassen – wenig befahren (Transekt 1 bis 7) und viel befahren (Transekt 8 bis 16) – eingeteilt. Abbildung 28 zeigt die Lagerungsdichte von Wald sowie Fahrspur für die beiden Befahrungsklassen.

Im Mittel sind die Fahrspuren jeweils dichter gelagert als der Wald derselben Neigungsklasse. Um 12 % im wenig befahrenen Bereich und um 39 % im viel befahrenen Bereich. Auffällig ist, dass der Wald in der viel befahrenen Kategorie im Schnitt um 14 % dichter gelagert ist als der Wald in der wenig befahrenen Kategorie. Die Fahrspuren des viel befahrenen Bereichs sind im Median um 43 % dichter gelagert als der Median des wenig befahrenen Bereichs.

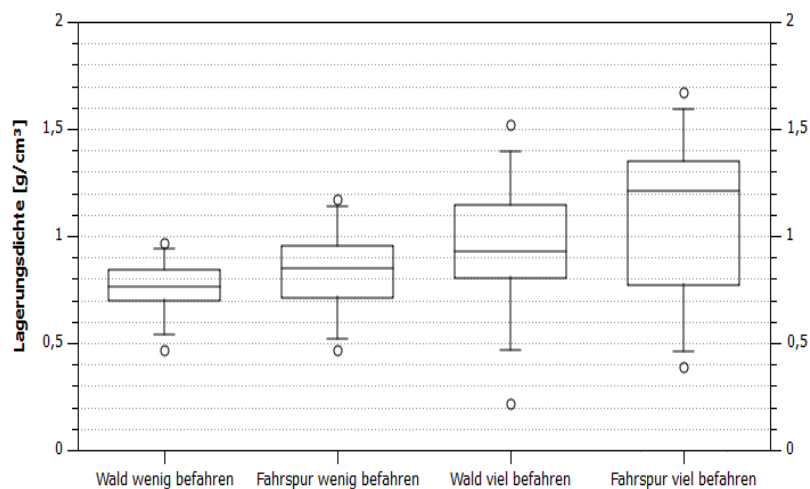


Abbildung 28, Befahrungsspezifische Lagerungsdichte
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie); Q₂₅/Q₇₅ (Box); Q₁₀/Q₉₀ (Whisker)

Die geringste Lagerungsdichte wurde mit $0,47 \text{ g/cm}^3$ bei 14(220/ -12) (Wald viel befahren), die höchste mit $1,67 \text{ g/cm}^3$ bei 15(110/ -61,5) (Fahrspur viel befahren). Die Spannweiten der Interquartilbereiche der viel befahrenen Kategorien sind größer als die der wenig befahrenen. Der Interquartilbereich der Fahrspur ist dabei der Größte.

3.4 Relative Bodenfeuchte

3.4.1 Interpolation der relativen Bodenfeuchte

Die relative Bodenfeuchte ist bei nahezu allen Transekten mit zunehmender Tiefe höher als im Oberboden (Abbildungen 28 und 29).

Bei den Transekten 13, 14, 15 und 16 ist die Veränderung mit zunehmender Tiefe im Farbverlauf kaum wahrzunehmen. Die Veränderung beträgt hier lediglich zwischen 1 und 2,5 Prozentpunkten.

Bei den Transekten 5, 7 und 8 ist ebenfalls ein wie oben beschriebener Tiefengradient zu erkennen. Allerdings unterscheiden sich diese drei Transekte dadurch, dass in der Fahrspur (bei Transekt 8 zusätzlich Wald rechts) die Abnahme deutlich höher ausfällt als in den übrigen Transekten.

Für Transekt 7 ist anzumerken, dass für den Probenpunkt 7(0/ -38) eine negative relative Bodenfeuchte festgestellt wurde. Dieser Messwert wurde für alle folgenden Berechnungen sowie Darstellungen nicht berücksichtigt.

Die Transekte 1 und 4 weisen dieses Schema (positiver Tiefengradient) nicht auf. Bei diesen beiden Transekten ist die relative Bodenfeuchte des Oberbodens höher als im Unterboden.

Der Transekt 11 liegt zwischen diesen beiden Tendenzen. Auf der linken Seite des Transekts (Wald links und Fahrspur links) weist der Oberboden eine höhere Feuchte auf. Die rechte Seite (Fahrspur rechts und Wald rechts) hat im Unterboden eine höhere relative Bodenfeuchte, die zum Oberboden hin abnimmt.

Zu Transekt 12 ist noch zu nennen, dass die Zunahme der Bodenfeuchte mit der Tiefe in der Kategorie Wald rechts kaum vorhanden ist. Am stärksten ist diese bei Wald links ausgeprägt. Für die Fahrspuren sowie die Zwischenspur ist anzumerken, dass die relative Bodenfeuchte ab einer referenzierten Tiefe von ca. -100 bis -110 cm unterhalb der EOF leicht ansteigt. In den Fahrspuren ist dieser Effekt stärker ausgeprägt als in der Zwischenspur.

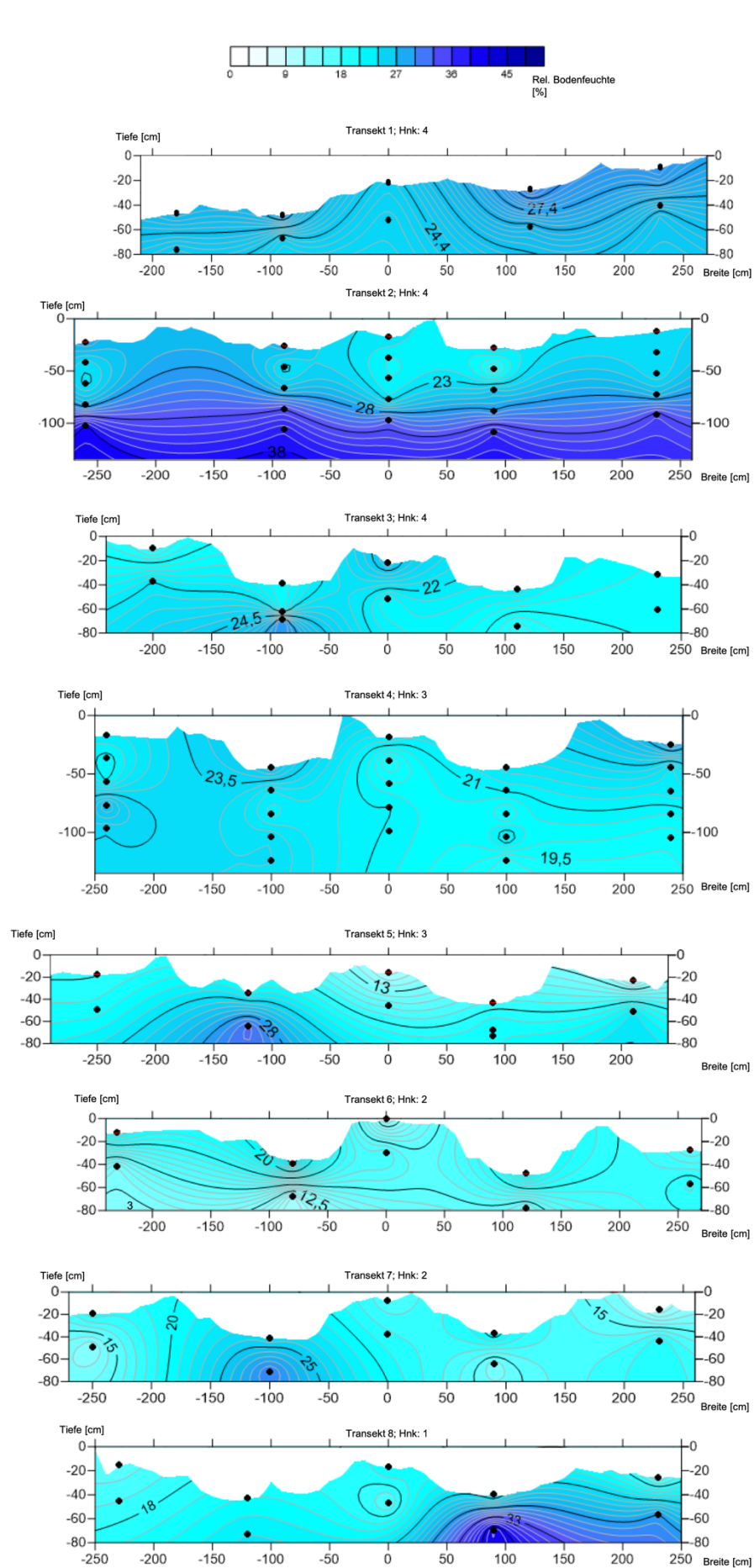


Abbildung 29, Interpolationen der relativen Bodenfeuchte der Transekte 1 bis 8; oben 1, unten 9, • = Probenpunkt (Stechzylinder)

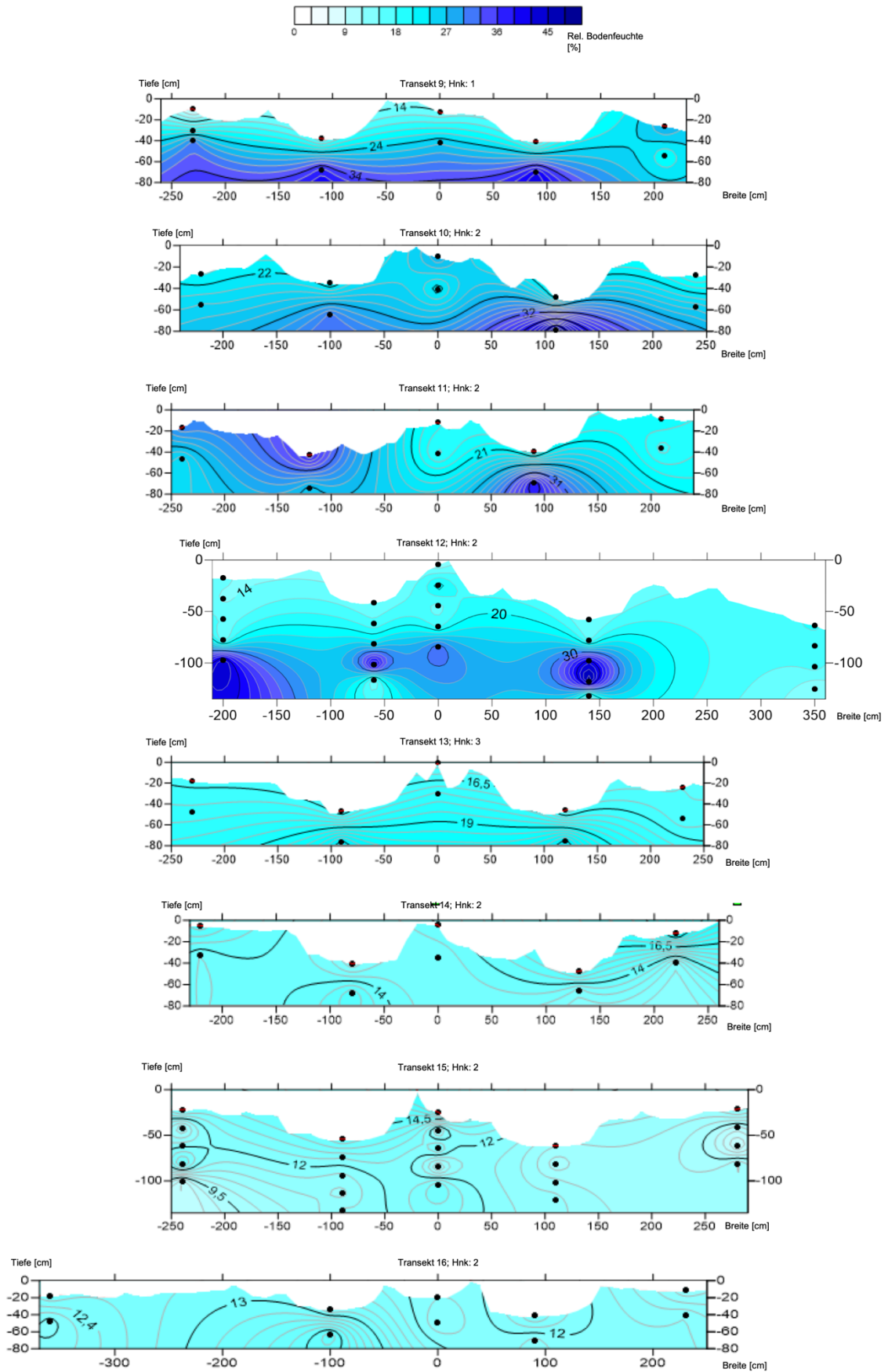


Abbildung 30, Interpolationen der relativen Bodenfeuchte der Transekte 9 bis 16; oben 9, unten 16, • = Probenpunkt (Stechzylinder)

3.4.2 Relative Bodenfeuchte

Die relativen Bodenfeuchten für die Kategorien Wald, Fahrspur und Zwischenspur sind in Abbildung 31 als Boxplot-Diagramme aufgetragen worden. Die Fahrspur ist hierbei im Median um 5 % feuchter als der Wald. Die höchste relative Bodenfeuchte wurde mit 48 % bei 12(140/ -118) in der Fahrspur, die niedrigste mit 7 % bei 9(-230/ -9,5) im Wald gemessen. Die Zwischenspur weist im Median die niedrigste relative Bodenfeuchte auf. Dieser ist um 9 % niedriger, als der des Waldes und um 14 % niedriger als der Median der Fahrspur. Der Interquartilbereich der Fahrspur weist die größte Spannweite auf.

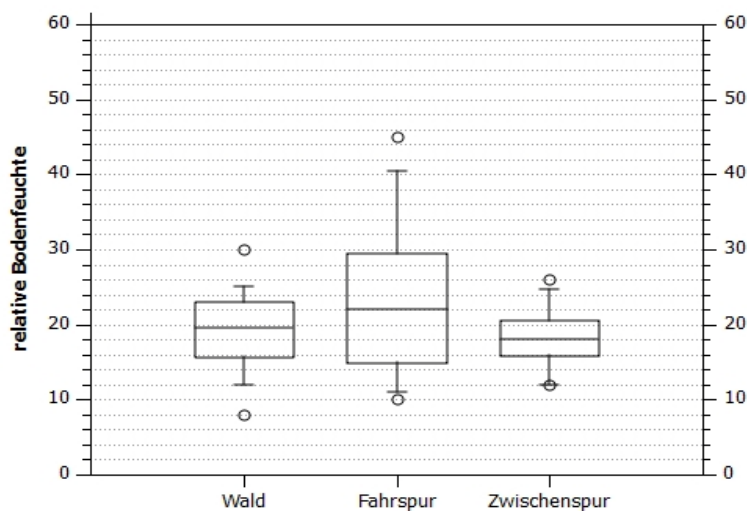


Abbildung 31, relative Bodenfeuchte
Angegeben sind: Min/Max (°), Median (Mittellinie), Q₂₅/Q₇₅ (Box), Q₁₀/Q₉₀ (Whisker)

3.4.3 Relative Bodenfeuchte nach Tiefenkategorien

In den Abbildungen 32, 33 und 34 sind die relativen Bodenfeuchten nach Tiefenstufe (Abbildung 32 = 0 cm, 33 = 30 cm und 34 > 30 cm) aufgeführt.

Für die Tiefenstufe 0 cm ist auffällig, dass der Median der Fahrspur um 6 % höher ist als der des Waldes, die Spannweiten der Interquartilbereiche bei beiden aber nahezu gleich sind. Der Wald weist bei 9(-230/ -9,5) den niedrigsten Wert, die Fahrspur bei 11(-120/ -47) den höchsten Wert in dieser Tiefenstufe auf. Die Zwischenspur ist im Median mit einem Unterschied von 12 % zum Wald, die Kategorie mit der niedrigsten relativen Bodenfeuchte. Auch weist die Zwischenspur die größte Spannweite des Interquartilbereiches auf.

Bei 30 cm ist der Median der Fahrspur um 11 % höher als der des Waldes. Auch hier weist die Zwischenspur im Schnitt die niedrigsten Werte auf. Um 10 % niedriger als der Wald und um 19 % niedriger als die Fahrspur. Wie in der Tiefenstufe 0 cm weist der Wald die geringste relative Bodenfeuchte mit 8 % [15(280/ -51,5)] und die Fahrspur mit 45 % bei 10(110/ -78,5)

die höchste relative Bodenfeuchte auf. Die Fahrspur weist die größte Spannweite der Daten sowie des Interquartilbereichs auf.

Der Tiefenbereich > 30 cm fällt durch die bisher größten Spannweiten der Daten auf. Dies umfasst alle Kategorien. Allerdings ist die Spannweite der Kategorien Wald und Fahrspur größer als die der Zwischenspur. Die Fahrspur weist zusätzlich noch die größte Spannweite des Interquartilbereichs auf. Der Median der Fahrspur ist um 12 % höher als der des Waldes und um 11 % höher als der Median der Zwischenspur. Damit weisen Wald und Zwischenspur im Schnitt nahezu die gleichen relativen Bodenfeuchten auf.

Ebenfalls wurde der niedrigste Wert im Wald bei 15(280/ -61,5) mit 7 % gemessen. Der höchste gemessene Wert in dieser Tiefenstufe wurde mit 48 % bei 12(-60/ -116,5) (Fahrspur) festgestellt.

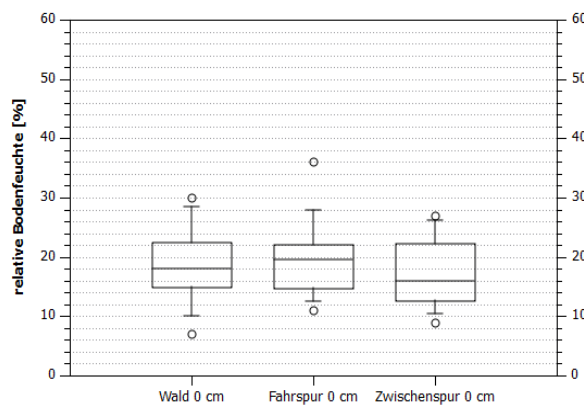


Abbildung 32, relative Bodenfeuchte für 0 cm
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie);
 Q₂₅/Q₇₅ (Box); Q₁₀/Q₉₀ (Whisker)

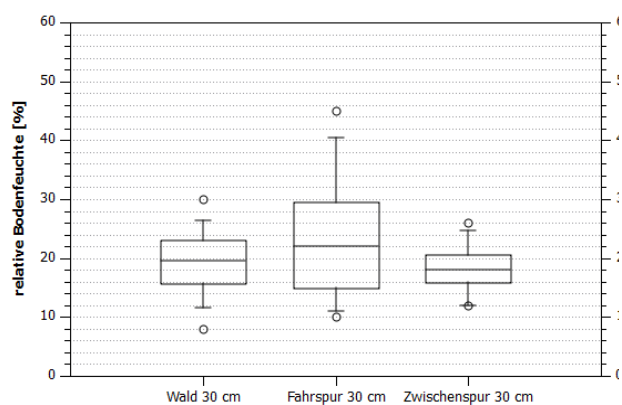


Abbildung 33, relative Bodenfeuchte für 30 cm
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie);
 Q₂₅/Q₇₅ (Box); Q₁₀/Q₉₀ (Whisker)

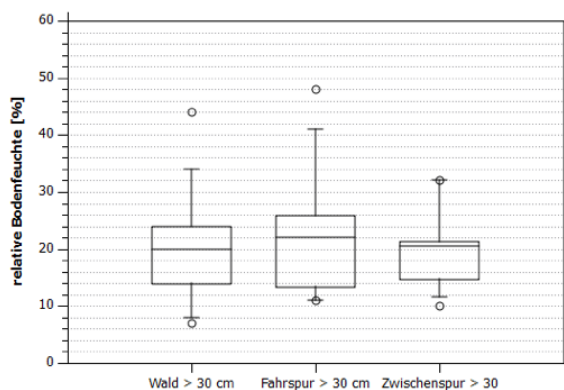


Abbildung 34, relative Bodenfeuchte für > 30 cm
 Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittellinie);
 Q₂₅/Q₇₅ (Box); Q₁₀/Q₉₀ (Whisker)

3.5 Korrelation

Nach BORISUS (2011) lassen sich Korrelationen nach Tabelle 8 einteilen.

Tabelle 8, Korrelationskoeffizient nach BORSIUS (2011)

Betrag des Korrelationskoeffizienten	Mögliche Interpretation
0	keine Korrelation
> 0 bis 0,2	sehr schwache Korrelation
> 0,2 bis 0,4	schwache Korrelation
> 0,4 bis 0,6	mittlere Korrelation
> 0,6 bis 0,8	starke Korrelation
> 0,8 bis < 1	sehr starke Korrelation
1	perfekte Korrelation

3.5.1 Korrelation Lagerungsdichte

Tabelle 9, Korrelationsanalyse kompletter Datensatz

N für gesamten Datensatz: 220; N für Wald: 86; N für Fahrspur: 89; N für Zwischenspur: 44

		Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz	Korrelationskoeffizient	-0,596**	0,596**	-0,295**	0,260**	0,740**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Wald	Korrelationskoeffizient	-0,572**	0,572**	-0,184	0,072	0,677**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,090	0,513	0,000
Fahrspur	Korrelationskoeffizient	-0,737**	0,737**	-0,251*	0,412**	0,864**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000
Zwischenspur	Korrelationskoeffizient	-0,356*	0,356*	-0,572**	0,328*	0,669**
	Sig. (2-seitig)	0,018	0,018	0,000	0,030	0,000
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant						
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant						

In Tabelle 9 sind die Korrelationsanalysen nach Spearman-Rho für den gesamten Datensatz sowie die drei Kategorien – Wald, Fahrspur, Zwischenspur – aufgeführt. Bis auf die Korrelation von Sand und Schluff mit der Lagerungsdichte im Wald sind alle Korrelationen signifikant. Die Korrelationen mit Grus sowie mit Sand zeigen eine negative

Abhängigkeit. Die Korrelationen mit Ton sind bis auf die in der Zwischenspur nach BORSIUS (2011) als stark und in der Fahrspur als sehr starke Korrelation einzuordnen. Die Korrelationen in der Fahrspur mit Grus und Feinboden können ebenfalls als stark eingestuft werden.

3.5.2 Korrelation tiefenspezifisch

In den Tabellen 10 und 11 sind die Korrelationsanalysen tiefenspezifisch für 0 und 30 cm aufgeführt.

Für 0 cm (Tabelle 10) zeigt sich, dass Schluff weder in einer Kategorie, noch im gesamten Datensatz signifikant mit der Lagerungsdichte korreliert. Des Weiteren sind im Wald alle Korrelationen, bis auf Ton, in der Fahrspur die Korrelation mit Sand und in der Zwischenspur mit Grus und Feinboden nicht signifikant.

Die Korrelationen mit Ton im gesamten Datensatz und in der Fahrspur können nach BORSIUS (2011) als stark eingeordnet werden. Die übrigen Korrelationen können als mittel beziehungsweise für die restlichen im gesamten Datensatz als schwach klassifiziert werden. Bei den Korrelationen mit Grus und Sand ist zu beachten, dass es sich hierbei um negative Korrelationen handelt.

Tabelle 10, Korrelationsanalyse für 0 cm

N für gesamten Datensatz 0 cm: 80; N für Wald 0 cm: 32; N für Fahrspur 0 cm: 32; N für Zwischenspur: 16

		Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz 0 cm	Korrelationskoeffizient	-0,258*	0,258*	-0,264*	-0,062	0,678**
	Sig. (2-seitig)	0,021	0,021	0,018	0,582	0,000
Wald 0 cm	Korrelationskoeffizient	-0,074	0,074	-0,199	-0,046	0,555**
	Sig. (2-seitig)	0,687	0,687	0,276	0,802	0,001
Fahrspur 0 cm	Korrelationskoeffizient	-0,490**	0,490**	-0,135	-0,042	0,669**
	Sig. (2-seitig)	0,004	0,004	0,463	0,821	0,000
Zwischenspur 0 cm	Korrelationskoeffizient	0,265	-0,265	-0,544*	0,191	0,500*
	Sig. (2-seitig)	0,322	0,322	0,029	0,478	0,049
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant						
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant						

Die tiefenspezifische Korrelation für die Tiefenstufe 30 cm ist in Tabelle 11 aufgeführt. Auffällig sind hier die nach BORSIUS (2011) starken und sehr starken Korrelationen für Grus, Feinboden und Ton in allen drei Kategorien sowie im gesamten Datensatz. Bei den Korrelationen von Grus, Feinboden und Ton in der Fahrspur sowie Ton im gesamten Datensatz handelt es sich um sehr starke Korrelationen. Im Wald ist die Korrelation von Sand und Schluff, in der Fahrspur mit Sand und in der Zwischenspur mit Schluff nicht signifikant. Für Grus und Sand ist eine negative Abhängigkeit mit der Lagerungsdichte festzustellen.

Tabelle 11, Korrelationsanalyse für 30 cm
 N für gesamten Datensatz 30 cm: 80; N für Wald 30 cm: 32; N für Fahrspur 30 cm: 32;
 N für Zwischenspur 30 cm: 16

		Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz 30 cm	Korrelationskoeffizient	-0,763**	0,763**	-0,296**	0,299**	0,801**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,008	0,007	0,000
Wald 30 cm	Korrelationskoeffizient	-0,728**	0,728**	-0,296	-0,06	0,781**
	Sig. (2-seitig)	0,001	0,000	0,100	0,744	0,000
Fahrspur 30 cm	Korrelationskoeffizient	0,876**	0,876**	-0,166	0,514**	0,861**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,363	0,003	0,000
Zwischenspur 30 cm	Korrelationskoeffizient	-0,671**	0,671**	-0,588*	0,244	0,794**
	Sig. (2-seitig)	0,004	0,004	0,017	0,362	0,000
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant						
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant						

3.5.3 Korrelation neigungsspezifisch

Tabelle 12 zeigt die Korrelationsanalysen der Lagerungsdichte mit dem Anteil von Grus, Feinboden, Sand, Schluff und Ton für die Hangneigungsklasse flach (Hnk 1 und 2). Ton, Grus sowie Feinboden korrelieren im gesamten Datensatz sowie im Wald stark und in der Fahrspur sehr stark (BORSIUS, 2011). Für die Zwischenspur ist nur die Korrelation mit Ton als stark zu klassifizieren.

Zu erwähnen ist, dass Grus sowie Sand in allen Kategorien negativ mit der Lagerungsdichte korrelieren. Des Weiteren ist im Wald Sand sowie Schluff, in der Fahrspur Sand und in der Zwischenspur Schluff nicht signifikant korrelat.

Tabelle 12, Korrelationsanalyse Hangneigung – flach

N für gesamter Datensatz: 138; N für Wald: 55; N für Fahrspur: 55; N für Zwischenspur: 28

		Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz flach	Korrelationskoeffizient	-0,740**	0,740**	-0,294**	0,221**	0,785**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000
Wald flach	Korrelationskoeffizient	-0,755**	0,755**	-0,184	0,134	0,743**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,178	0,330	0,000
Fahrspur flach	Korrelationskoeffizient	-0,859**	0,859**	-0,220	0,428**	0,856**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,107	0,001	0,000
Zwischenspur flach	Korrelationskoeffizient	-0,575**	0,575**	-0,577**	0,205	0,691**
	Sig. (2-seitig)	0,001	0,001	0,001	0,295	0,000
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant						
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant						

Die Korrelationsanalysen für die Hangneigung steil (Hnk 3 & 4) sind in Tabelle 13 aufgeführt. Im Vergleich zu Tabelle 12 fällt auf, dass es nach BORSIUS (2011) weniger starke und keine sehr starken Korrelationsergebnisse gibt. Stark korreliert in der Fahrspur Grus, Feinboden und Ton. In der Zwischenspur korreliert ebenfalls der Ton stark mit der Lagerungsdichte (BORSIUS, 2011). Sand korreliert in keiner Kategorie signifikant, Schluff korreliert nur im gesamt Datensatz sowie in der Fahrspur. In der Zwischenspur korreliert, wie oben bereits erwähnt, nur Ton signifikant.

Tabelle 13, Korrelationsanalyse Hangneigung – steil

N für gesamter Datensatz: 82; N für Wald: 31; N für Fahrspur: 34; N für Zwischenspur: 16

		Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz steil	Korrelationskoeffizient	-0,463**	0,463**	-0,076	0,359**	0,496**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,498	0,001	0,000
Wald steil	Korrelationskoeffizient	-0,373*	0,373*	0,042	0,002	0,471**
	Sig. (2-seitig)	0,039	0,039	0,822	0,991	0,008
Fahrspur steil	Korrelationskoeffizient	-0,683**	0,683	-0,083	0,577**	0,646**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,00	0,641	0,000	0,000
Zwischenspur steil	Korrelationskoeffizient	-0,190	0,190	0,414	0,396	0,600*
	Sig. (2-seitig)	0,481	0,481	0,111	0,128	0,014
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant						
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant						

3.5.4 Korrelation befahrungsspezifisch

Die Ergebnisse der befahrungsspezifischen Korrelationsanalysen sind in den Tabellen 14 und 15 aufgeführt. Tabelle 14 zeigt die Korrelation für die Klasse wenig befahren, 15 die Klasse für viel befahren.

Für die Korrelationsanalyse der Klasse wenig befahren (Tabelle 14) ist auffällig, dass nach BORSIUS (2011) nur eine Korrelation (Lagerungsdichte mit Ton in der Fahrspur) als stark zu klassifizieren ist. Sand korreliert in keiner Kategorie signifikant. Für den Wald ist ebenfalls keine signifikante Korrelation mit Schluff festzustellen. In der Zwischenspur korreliert nur Ton signifikant.

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse für die Befahrung in der Klasse viel befahren aufgeführt. Sand korreliert in den Kategorien Wald und Fahrspur nicht signifikant mit der Lagerungsdichte, dasselbe gilt für Schluff im Wald und in der Zwischenspur. Grus und Sand korrelieren negativ mit der Lagerungsdichte in allen Kategorien. Die Korrelationen mit Grus sowie Feinboden können für den gesamten Datensatz und die Kategorien Wald und Zwischenspur als stark bis sehr stark (Fahrspur) klassifiziert werden (BORSIUS, 2011). Ton korreliert nach BORSIUS (2011) in allen Kategorien sowie im gesamten Datensatz stark, in der Fahrspur sehr stark.

Tabelle 14, Korrelationsanalyse der Befahrung – wenig

N für gesamter Datensatz: 102; N für Wald: 38; N für Fahrspur: 42; N für Zwischenspur: 20

		Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz wenig	Korrelationskoeffizient	-0,407**	0,407	-0,086	0,263**	0,524**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,391	0,008	0,000
Wald wenig	Korrelationskoeffizient	-0,417**	0,417**	0,023	0,052	0,524**
	Sig. (2-seitig)	0,009	0,009	0,893	0,756	0,001
Fahrspur wenig	Korrelationskoeffizient	-0,583**	0,583**	0,036	0,423**	0,641**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,820	0,005	0,000
Zwischenspur wenig	Korrelationskoeffizient	-0,198	0,198	-0,387	0,344	0,652**
	Sig. (2-seitig)	0,403	0,403	0,092	0,138	0,002
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant						
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant						

Tabelle 15, Korrelationsanalyse der Befahrung – viel

N für gesamter Datensatz: 118; N für Wald: 47; N für Fahrspur: 47; N für Zwischenspur: 24

		Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz viel	Korrelationskoeffizient	-0,764**	0,764**	-0,309**	0,246**	0,789**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,001	0,007	0,000
Wald viel	Korrelationskoeffizient	-0,768**	0,768**	-0,150	0,158	0,721**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,313	0,290	0,000
Fahrspur viel	Korrelationskoeffizient	-0,847**	0,847**	-0,216	0,400**	0,847**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,145	0,005	0,000
Zwischenspur viel	Korrelationskoeffizient	-0,547**	0,547**	-0,579**	0,217	0,694**
	Sig. (2-seitig)	0,006	0,006	0,003	0,307	0,000
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant						
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant						

3.5.5 Korrelation relative Bodenfeuchte

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Korrelationen der relativen Bodenfeuchte mit der Lagerungsdichte, Grus, Feinboden, Sand, Schluff und Ton nach Spearman-Rho für den gesamten Datensatz sowie den drei Kategorien aufgeführt. Die Korrelation mit Schluff im Wald sowie dem Feinboden in der Zwischenspur ist nicht signifikant.

Mit Grus und Sand korreliert die relative Bodenfeuchte positiv. Die übrigen Parameter sind in einer negativen Abhängigkeit.

Nach BORSIUS (2011) können die Korrelationen mit der Lagerungsdichte, Grus, Feinboden sowie Ton in der Fahrspur und Lagerungsdichte in der Zwischenspur sowie im gesamten Datensatz als starke Korrelation eingestuft werden.

Tabelle 16, Korrelationsanalyse der relativen Bodenfeuchte
N für gesamten Datensatz: 220; N für Wald: 86; N für Fahrspur: 89; N für Zwischenspur:44

		Ld	Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz	Korrelationskoeffizient	-0,686**	0,453**	-0,453**	0,339**	-0,339**	-0,560**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Wald	Korrelationskoeffizient	-0,565**	0,257*	-0,257*	0,348**	-0,206	-0,349**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,017	0,017	0,001	0,057	0,001
Fahrspur	Korrelationskoeffizient	-0,854**	0,684**	-0,684**	0,277**	-0,452**	-0,747**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000
Zwischen- spur	Korrelationskoeffizient	-0,688**	0,219	-0,219	0,428**	-0,334*	-0,456**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,153	0,153	0,004	0,027	0,002
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant							
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant							

3.5.6 Tiefenspezifische Korrelation der relativen Bodenfeuchte

In den tiefenspezifischen Korrelationen der Tiefenstufe 0 cm (Tabelle 17) korreliert die Lagerungsdichte in allen Kategorien sowie für den Gesamtdatensatz und in der Fahrspur Sand sowie Ton signifikant. Die übrigen Parameter korrelieren nicht signifikant mit der relativen Bodenfeuchte.

Für die Lagerungsdichte und für Ton ist zu beachten, dass es sich hierbei um negative Korrelationen handelt. Die Korrelationen mit der Lagerungsdichte der Fahrspur und der Zwischenspur können nach BORSIUS (2011) als starke Korrelation interpretiert werden.

Tabelle 17, Korrelationsanalyse der relativen Bodenfeuchte für 0 cm
N für gesamten Datensatz: 80; N für Wald: 32; N für Fahrspur: 32; N für Zwischenspur: 16

		Ld	Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz 0 cm	Korrelationskoeffizient	-0,491**	0,034	-0,034	0,352**	-0,159	-0,249*
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,767	0,767	0,001	0,160	0,026
Wald 0 cm	Korrelationskoeffizient	-0,505**	-0,042	0,042	0,249	-0,153	-108
	Sig. (2-seitig)	0,003	0,818	0,818	0,169	0,405	0,556
Fahrspur 0 cm	Korrelationskoeffizient	-0,731**	0,228	-0,228	0,356*	-0,072	-0,433*
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,210	0,210	0,045	0,696	0,013
Zwischen- spur 0 cm	Korrelationskoeffizient	-0,711**	-0,009	0,009	0,449	-0,421	-0,361
	Sig. (2-seitig)	0,002	0,974	0,974	0,081	0,104	0,170
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant							
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant							

In Tabelle 18 sind die tiefenspezifischen Korrelationsanalysen der relativen Bodenfeuchte für die Tiefenstufe 30 cm aufgeführt. Im Wald korreliert Grus, Feinboden und Schluff nicht signifikant mit der relativen Bodenfeuchte. In der Fahrspur betrifft dies Sand. Für die Zwischenspur konnte keine signifikante Korrelation festgestellt werden.

Die Lagerungsdichte, Feinboden, Schluff und Ton sind negativ abhängig. Um starke Korrelationen handelt es sich in der Fahrspur bei der Korrelation der relativen Bodenfeuchte mit dem Feinboden und Ton sowie im gesamten Datensatz mit der Lagerungsdichte (BORSIUS, 2011). Im gesamten Datensatz korreliert die relative Bodenfeuchte ebenfalls stark mit der Lagerungsdichte.

Tabelle 18, Korrelationsanalyse der relativen Bodenfeuchte für 30 cm
 N für gesamten Datensatz: 80; N für Wald: 32; N für Fahrspur: 32; N für Zwischenspur: 16

		Ld	Grus	Feinboden	Sand	Schluff	Ton
Gesamter Datensatz 30 cm	Korrelationskoeffizient	-0,673**	0,566**	-0,566**	0,258*	-0,314**	-0,567**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,000	0,010	0,005	0,00
Wald 30 cm	Korrelationskoeffizient	-0,533**	0,336	-0,336	0,522**	-0,150	-0,466**
	Sig. (2-seitig)	0,001	0,060	0,060	0,002	0,413	0,007
Fahrspur 30 cm	Korrelationskoeffizient	-0,858**	0,795**	-0,795	0,159	-0,485**	-0,720**
	Sig. (2-seitig)	0,000	0,000	0,000	0,386	0,006	0,000
Zwischenspur 30 cm	Korrelationskoeffizient	-0,330	0,235	-0,235	0,327	-0,182	-0,157
	Sig. (2-seitig)	0,212	0,381	0,381	0,217	0,500	0,562
* Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant							
** Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant							

4. DISKUSSION

4.1 Methodische Fehler und zu beachtende Hinweise

4.1.1 Fingerprobe

Die Bestimmung der Bodenart mittels Fingerprobe ist eine für das Gelände entwickelte Methode, um einen schnellen Überblick über die anstehende Bodenart zu erhalten (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Für eine genauere Bestimmung der Bodenart kann zum Beispiel das Verfahren nach Köhn (DIN19683-2:04.73) angewendet werden (SPÖRLEIN & JONECK, 2003). Das Verfahren nach Köhn ist jedoch sehr arbeits- und zeitintensiv. Aufgrund des relativ knappen Zeitfensters und dem Datenumfang dieser Arbeit wurde hier auf das Köhnverfahren verzichtet und die Fingerprobe nach der veränderten Methode des Geologischen Dienstes NRW verwendet (ARNOLD, 2018).

Des Weiteren muss beachtet werden, dass es sich bei den Angaben der Korngrößenanteile jeder Bodenart um Mittelwerte handelt. Die Mittelwerte beruhen auf die in AD-HOC-AG BODEN (2005) oder BLUME et al. (2016) beschriebenen Spannweiten der einzelnen Bodenarten. In Tabelle 2 sind die in der Literatur beschriebenen Spannweiten sowie deren Mittelwerte für jede Bodenart aufgeführt.

4.1.2 Lagerungsdichte

Potenzielle Fehlerquellen für die Lagerungsdichte stellen die verwendeten Stechzylinder dar. Die Stechzylinder weisen zum Teil gravierende Gebrauchsspuren auf, sodass das Risiko besteht, dass diese nicht mehr das genormte Volumen von 100 cm^3 aufweisen könnten. Da dieser Fehler nicht vermeidbar war, wurden alle Proben mit dem gleichen Stechzylinder entnommen. Dieser wies, wie in Abbildung 35 zu erkennen, ebenfalls geringfügige Verformungen auf. Im Laufe der Untersuchungen war an diesem aber keine visuelle Veränderung zu erkennen, wodurch eine Vergleichbarkeit der Proben mit gleichen Volumen gegeben ist.

Die in der Literatur empfohlenen drei Replikate und anschließende Mittelung wurden hier nicht durchgeführt (HARTGE & HORN, 2009).

Für die Lagerungsdichte der Tiefenstufe 30 cm ist anzumerken, dass es sich bei den Transekten 2, 4, 12 und 15 um Mittelwerte handelt. Bei diesen vier Transekten wurde die Beprobung in 20 cm Schritten bis zu einer Tiefe von 80 cm durchgeführt. Aufgrund dieser

Gegebenheit wurde aus den Tiefenstufen 20 cm und 40 cm ein Mittelwert für 30 cm berechnet. Dies bezieht sich neben der Lagerungsdichte auch auf die weiteren untersuchten Parameter.

4.1.3 Korrelationsanalysen

Die statistische Korrelationsanalyse ist umso aussagekräftiger je größer der Datensatz (N) ist. Bei stark streuenden Variablen sollte ebenfalls ein möglichst großer Datensatz verwendet werden (PÜTZ, 2003; GRÜNWALD, 2019).

So führt PÜTZ (2003) für eine Korrelationsanalyse einen Datensatz von mindestens 30 Einzeldaten pro Variable an. Bei den durchgeführten Korrelationsanalysen ist dies für die Zwischenspur, sowohl bei der Lagerungsdichte als auch bei der relativen Bodenfeuchte nur bei dem gesamten Datensatz gegeben.

Die weiteren Kategorien erfüllen die Mindestanzahl von 30 Datenpunkten. Anzumerken ist, dass auf eine Korrelationsanalyse für die Tiefenstufe > 30 cm verzichtet wurde, da hier die Datensätze zu gering gewesen wären, um nach PÜTZ (2003) aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Mit einer Erhöhung des Datensatzes könnte, auch für die Zwischenspur, der nach PÜTZ (2003) empfohlene Mindestdatensatz von 30 erreicht werden. Zusätzlich steigt die Aussagekraft aller Korrelationen durch einen größeren Datensatz.

Die Korrelationsanalyse wurde für alle Datensätze nach Spearman-Rho durchgeführt. Diese Korrelationsmethode ist, vor allem bei nicht normalverteilten Daten, genauer (BORSIUS, 2011; BAUSINGER & CHRIST, 2003). Anzumerken ist, dass zum Teil einzelne Datensätze normalverteilt sind (Tabelle 4). Für normalverteilte Daten wäre eine Korrelation nach Pearson geeigneter und genauer, allerdings sollte für eine bessere Vergleichbarkeit die gleiche Korrelationsmethode angewendet werden (BORSIUS, 2011). Daher wurde für alle Daten die Analyse nach Spearman-Rho durchgeführt.

Damit die Korrelationsanalysen ausgewertet werden können, ist von einem homogenen Boden – sprich über den gesamten Transekt die gleiche Bodenart – auszugehen. Unter der Annahme dieser Grundprämisse ist bei einer Verdichtung der Fahrspur und einer gleichzeitigen stärkeren Korrelation der Lagerungsdichte der Fahrspur mit zum Beispiel Ton die Annahme zu treffen, dass die Bodenverdichtung auf den Feinbodenanteil (in diesem Beispiel Ton) zurückzuführen ist.

Da es unter natürlichen Bedingungen nicht zu einer homogenen Bodenbildung kommt, ist die oben erläuterte Grundprämisse kritisch zu bewerten (BLUME et al., 2016; GEBHARDT et al., 2011).

Dennoch wird diese Prämisse als Grundprinzip angenommen, um eine Vergleichbarkeit sowie Aussagekraft der Korrelationsanalysen zu gewährleisten.

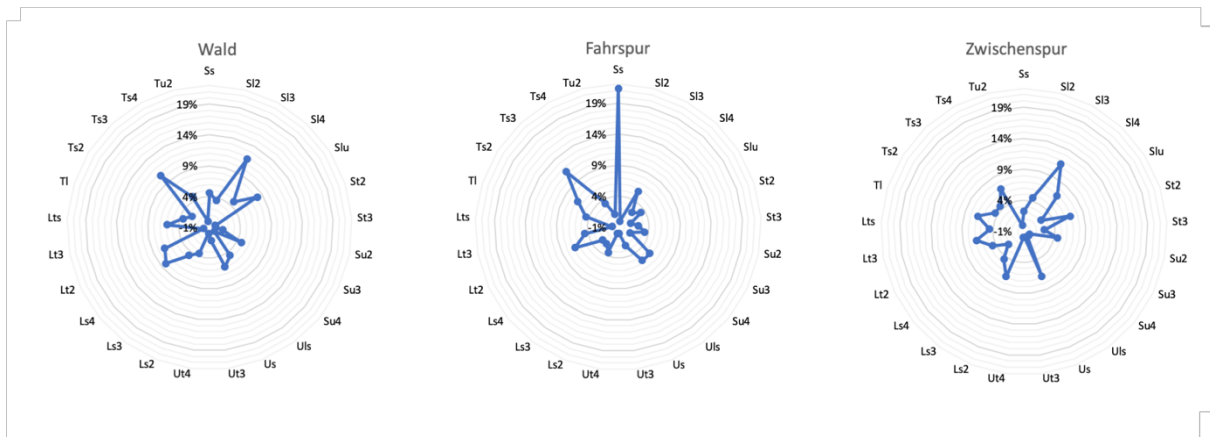


Abbildung 36, Sterndiagramme der Häufigkeit der einzelnen Bodenarten der Kategorien Wald, Fahrspur und Zwischenspur

In der Abbildung 36 sind für die drei Kategorien die Anteile der einzelnen Bodenarten aufgeführt. Beim Vergleich fällt auf, dass, wie bereits oben beschrieben, Unterschiede zwischen den Kategorien zu erkennen sind. Dennoch weisen die Diagramme eine relativ ähnliche Verteilung der einzelnen Bodenarten auf. Die Kategorie Fahrspur weist mit dem deutlich höheren Anteil der Bodenart Sand aus, dies lässt sich mit dem höheren Bimsanteil der Fahrspur erklären.

4.2 Ursachen der Bodenverdichtung

Andosole zeichnen sich durch „vulkanische Auswurfprodukte oder Gläser“ aus und weisen häufig Minerale wie Allophane, Imogolite und Ferrihydrite auf (IUSS WORKING GROUP WRB, 2007, S. 74). Allophane und Imogolite konnten in Böden aus Laacher See-Tephra im Neuwieder Becken nachgewiesen werden (JARITZ, 1967). Andosole stellen in der Regel fruchtbare Böden dar, die leicht zu bearbeiten, gut durchwurzelbar sind und eine hohe Wasserkapazität aufweisen (IUSS WORKING GROUP WRB, 2007).

Nach IUSS WORKING GROUP WRB (2007) können die Eigenschaften von Andosolen nach andic oder vitric unterschieden werden.

Mit den erhobenen Daten und den durchgeführten Untersuchungen lässt sich nicht klar definieren, welche (Boden-)Eigenschaft im Untersuchungsgebiet vorliegt. GROH (2019) konnte auf einer benachbarten ungestörten Fläche Organikgehalte zwischen 13 % und 18 % bestimmen. Nach IUSS WORKING GROUP WRB (2007) zeichnet sich die Eigenschaft andic durch Gehalte an organischer Substanz von über 5 % aus. Auch das diagnostische Kriterium der Lagerungsdichte von maximal $0,9 \text{ g/cm}^3$ ist hier gegeben. Für die weiteren Kriterien: $(\text{Al}_{\text{ox}} + \frac{1}{2}\text{Fe}_{\text{ox}})$ -Gehalt von mindestens 2 %; Phosphatretention von

mindestens 85 % sowie ein Gehalt an organischem Kohlenstoff von weniger als 25 % liegen keine Zahlen vor (IUSS WORKING GROUP WRB, 2007). HAHN & OPP (2011) konnten für Lockerbraunerden bei Neuhäusel (9,5 km südöstlich des Untersuchungsgebietes) einen Anteil von 5 % Fe_2O_3 im B-Horizont feststellen.

Böden mit der Eigenschaft andic können Thixotropie aufweisen (IUSS WORKING GROUP WRB, 2007). Bei der Fingerprobe konnte beobachtet werden, dass die Proben Thixotropie aufweisen.

Aufgrund der oben aufgeführten Punkte wird davon ausgegangen, dass die Böden im Untersuchungsgebiet die Eigenschaft andic aufweisen. Für eine eindeutige Aussage bezüglich der diagnostischen Kriterien der Eigenschaften eines Andosols nach IUSS WORKING GROUP WRB (2007), müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Fahrspur(en) sowie die Zwischenspur sind im Mittel um 17 % beziehungsweise um 4 % dichter gelagert als der Wald (Abbildungen 21, 22 und 23; Tabelle 1). Wird der Standort Wald als unberührte Ausgangssituation angenommen, kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrspuren sowie, in einem geringeren Maße auch die Zwischenspur, durch die Befahrung mit Forstmaschinen einer Verdichtung unterlegen sind.

BRUNOTTE (2007) klassifiziert Verdichtung in Bodenverdichtung und in Bodenschadverdichtung. Bodenverdichtung sei dabei durch eine Zunahme der Lagerungsdichte nach Befahrung klassifiziert. Bodenschadverdichtung bezeichnet eine Bodenverdichtung, die sich zusätzlich negativ auf die Funktionsweise (Infiltration, Stoffumsatz, Lebensfunktion sowie Ertrag) eines Bodens auswirkt (BRUNOTTE, 2007). Aufgrund der erfassten Parameter kann in dieser Ausarbeitung lediglich von einer Bodenverdichtung gesprochen werden. Dabei ist nicht auszuschließen, dass es sich bei der beobachteten Verdichtung um eine Bodenschadverdichtung nach BRUNOTTE (2007) handeln könnte. Dies könnte nur durch weitergehende Untersuchungen exakt geklärt werden.

Die untersuchte Fläche beziehungsweise die Rückegasse(n) wurde(n) unter anderem mit einem Forwarder der Firma Komatsu, Typ 845 befahren (Abbildung 37). Der Komatsu 845 ist ein 8-Rad Forwarder, mit einem Leergewicht von 16.600 kg und einer zulässigen Zuladung von 12.000 kg. Das maximale zulässige Gesamtgewicht beträgt demnach 28.600 kg. Der Forwarder ist mit einem Greifarm ausgestattet, der auf eine Länge von bis zu 10 m ausgefahren werden kann (KOMATSU FOREST GMBH, 2016).

Beim Aufnehmen von Holz mit vollständig ausgefahrenem Greifarm konnte beobachtet werden, wie sich der gesamte – zum Teil beladene – Forwarder beim Anheben des Holzes zur Seite neigte und das Fahrzeuggewicht demnach auf nur einer Fahrzeugseite ruhte. Die rechte Fahrspur der untersuchten Rückegasse ist im Median um 8 % dichter gelagert als

die linke (Abbildung 38, Tabelle 1). Ob dieser Unterschied auf das Aufnehmen des Holzes mit dem Greifarm zurückzuführen ist, kann nur vermutet werden.

In den Abbildungen 21 und 22 sowie Tabelle 7 ist zu erkennen, dass die Verdichtungen der Fahrspuren jedes Transektes unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Zusätzlich unterscheidet sich die Verortung der Verdichtung der Transekte voneinander. Die dargestellten Differenzen sind vermutlich auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. So ist zum Beispiel für den Oberboden der beiden Fahrspuren für die Transekte 4 bis 16 eine Verdichtung festzustellen. Dabei fällt der Unterschied zwischen Fahrspur und Wald in jedem Transekt sowie zwischen linker Fahrspur/Wald und rechter Fahrspur/Wald unterschiedlich stark aus. Für die Transekte 1 und 2 ist nur in der rechten Fahrspur, für Transekt 3 in der linken eine Verdichtung im Oberboden festzustellen. Die andere Fahrspur weist entweder keine Verdichtung oder sogar eine geringere Lagerungsdichte als die Vergleichsfläche (Wald) auf.

Für 13 Transekte kann im Schnitt eine Verdichtung der Fahrspur festgestellt werden (Tabelle 7). Dass die Fahrspuren der übrigen drei Transekte (1, 2 und 9) im Schnitt lockerer gelagert sind, kann mehrere Ursachen haben. Ein Erklärungsansatz für Transekt 1 und 2 könnte das Durchdrehen der Reifen, bedingt durch die im Vergleich hohen Hangneigungen dieser beiden Transekten sein (Abbildung 19). Dadurch könnte Oberbodenmaterial beim Anfahren verlagert werden und so zu einer Auflockerung (im Oberboden) führen. Gestützt wird die Hypothese dadurch, dass für Transekt 2 die höchste Lagerungsdichte 20 cm unterhalb der Oberfläche gemessen wurde (Tabelle 1).

Ein weiterer Ansatz für die geringen Lagerungsdichten der Fahrspuren in den drei aufgeführten Transekten könnte der höhere Grusanteil im Unterboden der Fahrspuren, im Vergleich zum Wald sein. Die Fahrspur von Transekt 2 weist im Schnitt 126 % mehr Grus auf als der Wald. Für Transekt 9 liegt das Verhältnis geringfügig niedriger bei 60 %. Anzumerken ist hierbei, dass bei Transekt 9 die Fahrspur im Schnitt nur um 5 % lockerer als der Wald gelagert ist, im Unterschied zu 11 % für Transekt 2 (Tabelle 1).

Als Grus wird die Korngröße zwischen 2,0 – 6,3 mm bezeichnet, die sich im Gegensatz zu Kies durch eckige Kanten auszeichnet (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Es wird vermutet, dass der Grusanteil maßgeblich vom Bimsgehalt bestimmt wird. Daher werden beide im Folgenden gleichgesetzt.

Allgemein gilt, je feuchter ein Boden, desto gravierender die Folgen der Befahrung (BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT; 2012, BRUNOTTE, 2012; LÜSCHER, 2010). Für die untersuchte Rückegasse sind die genauen Witterungsbedingungen bei Befahrung nicht bekannt. Laut BIWER (2018) wurde ein Teil der Befahrungen bei Tauwetter durchgeführt. Damit ist zumindest für diese Befahrungen von einer hohen Bodenfeuchte

auszugehen. Für die Analyse der Daten wäre es aufschlussreich zu wissen, bei welchen Bodenfeuchten die Befahrung(en) stattgefunden haben.

Im Folgenden werden die möglichen Ursachen der Fahrspurverdichtung erläutert und verglichen.

4.2.1 Feinboden

BACHMANN, HORN, PETH (2014) führen an, dass mit abnehmender Korngröße die Lagerungsdichte abnimmt, sofern die Lagerungsdichte nicht anders beeinflusst wird. Dies hängt mit Zunahme der Porenvolumina bei kleiner werdender Korngröße zusammen. Bei einer Bodenverdichtung nimmt häufig das Porenvolumen ab (CRAMER, 2009; BLUME, HORN, THIELE-BRUHNE, 2011).

In Tabelle 19 sind, unter anderem, die häufigsten Lagerungsdichten für die Bodenarten Hauptgruppen Sand, Lehm, Schluff und Ton aufgeführt. Hierbei fällt auf, dass Lehmböden eine höhere Lagerungsdichte aufweisen können als die gröberen Sandböden. BACHMANN, HORN, PETH (2014) begründen dies unter anderen damit, dass Lehme sehr dicht gepackt sein können und daher sehr geringe Porenvolumina und folglich hohe Lagerungsdichten aufweisen können.

Beim Vergleich der Literaturwerte (Tabelle 19) mit den minimalen und maximalen Lagerungsdichten der 16 Transekte fällt auf, dass alle Werte zum Teil deutlich unterhalb der maximalen und häufig auch unterhalb der minimalen Literaturwerten liegen.

Tabelle 19, häufigste Lagerungsdichte nach BACHMANN, HORN, PETH (2014), ermittelte Lagerungsdichte für Transekt 1 - 16

Literaturwerte [g/cm ³]			Gemessene Werte [g/cm ³]															
			Transekt 1		Transekt 2		Transekt 3		Transekt 4		Transekt 5		Transekt 6		Transekt 7		Transekt 8	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.		
Sandböden	1,19	1,67	0,52	0,94	0,47	0,83	0,56	0,96	0,74	0,98	0,55	1,10	0,85	1,17	0,54	1,07	0,50	0,83
Lehmböden	1,19	1,96	0,79	0,85	0,72	0,83	0,50	1,12	0,71	0,94	0,83	1,14	0,92	0,99			1,01	1,01
Schluffböden	1,19	1,53			0,59	0,91	0,82	1,06	0,47	0,55			0,81	0,81	0,75	0,75	0,63	0,63
Tonböden	0,92	1,32	0,89	0,89			0,86	0,97	0,73	1,10			0,88	0,96	0,93	1,07	1,02	1,02
∅ Transekt 1 - 16			Transekt 9		Transekt 10		Transekt 11		Transekt 12		Transekt 13		Transekt 14		Transekt 15		Transekt 16	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Sandböden	0,54	0,88	0,48	0,82	0,47	0,61	0,46	1,03	0,39	0,58	0,73	0,73	0,22	0,22			1,18	1,31
Lehmböden	0,86	1,09	0,84	0,84	0,96	0,99			0,76	1,24	0,91	1,11	1,07	1,32	0,88	1,49	1,08	1,44
Schluffböden	0,77	0,87	1,00	1,00			0,86	0,86	0,90	0,90	0,85	0,89	0,65	0,70	0,87	1,38		
Tonböden	0,92	1,17			0,79	1,24	1,08	1,26	0,75	1,66	0,79	0,93	0,99	0,99	1,23	1,61	1,07	1,55

Für Sand-, Lehm- und Schluffböden liegen die durchschnittlich gemessenen maximalen Lagerungsdichten unterhalb der in der Literatur angegeben häufigen Minimalwerte dieser Haupt-Bodenarten (BACHMANN, HORN, PETH, 2014).

Die Tonböden liegen, bis auf die Transekte 15 und 16, innerhalb der angegebenen

Spannweite. Transekt 15 und 16 weisen jeweils einen höheren Maximalwert auf. Im Schnitt sind die Maximalwerte der 16 Transekte für Ton niedriger als der Literaturmaximalwert, bei gleichem Minimalwert.

Dass die gemessenen Werte deutlich niedriger als die häufigsten Literaturwerte sind, lässt sich sehr wahrscheinlich auf den Bims zurückführen. Aus Bims kann, bei den rezenten Klimabedingungen der letzten 13.000 Jahre, Lockerbraunerde entstehen (BLUME et al., 2016). In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass dies im Untersuchungsgebiet der Fall ist. Wie in Kapitel 1.2.3.2 beschrieben, zeichnen sich Lockerbraunerden unter anderem durch sehr geringe Lagerungsdichten unter $0,8 \text{ g/cm}^3$ aus (AD-HOC-AG BODEN, 2005; BLUME et al., 2016).

Die dennoch in Tabelle 1 und 19 zum Teil deutlich erkennbaren Schwankungen der Lagerungsdichten aller Transekte, können zum Teil mit der in Kapitel 4.2 beschriebenen Verdichtung der Fahrspuren erklärt werden. Die höchste Lagerungsdichte jedes Transekts wurde in der Fahrspur gemessen (Tabelle 1). Jedoch liegt für die Hälfte der Transekte (1, 2, 3, 5, 8, 10, 11 und 12) die minimale Lagerungsdichte ebenfalls in der Fahrspur vor. Dieser Widerspruch lässt sich vermutlich auf den, unter der Lockerbraunerde, anstehenden Laacher See-Bims zurückführen. Dieser weist eine Lagerungsdichte zwischen $0,24$ und $0,3 \text{ g/cm}^3$ auf (PURLE, 2015).

Lagerungsdichten können nach BLUME, HORN, THIELE-BRUHN (2011) in sechs Stufen klassifiziert werden.

In Tabelle 20 wurden die Lagerungsdichten von Wald, Fahrspur und Zwischenspur zu diesen Stufen zugeordnet und die Anzahl sowie deren Anteil in der jeweiligen Kategorie berechnet.

Tabelle 20, Einstufung der Lagerungsdichte nach BLUME, HORN, THIELE-BRUHN (2011)

Ld [g/cm ³]	Stufe	Wald		Fahrspur		Zwischenspur	
		Anzahl	% - Anteil	Anzahl	% - Anteil	Anzahl	% - Anteil
< 0,9	extrem gering	63	72	43	48	26	59
0,9 – 1,2	sehr gering	18	21	22	25	12	27
1,2 – 1,4	gering	3	5	14	16	5	11
1,4 – 1,6	mittel	2	2	7	8	1	2
1,6 – 1,8	hoch	-	-	3	3	-	-
≥ 1,8	sehr hoch	-	-	-	-	-	-

Für den gesamten Datensatz können 60 % der Werte der Lagerungsdichte als extrem gering klassifiziert werden. Über 80 % der Daten weisen eine Lagerungsdichte von $1,2 \text{ g/cm}^3$ oder weniger auf (Stufen: sehr gering und extrem gering). Dass ein Großteil der Daten solch niedrige Lagerungsdichten aufweist, ist auf die bereits oben beschriebene vorherrschende niedrige Lagerungsdichte von Lockerbraunerden ($< 0,8 \text{ g/cm}^3$) zurückzuführen (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

Der Anteil der Lagerungsdichte der nach BLUME, HORN, THIELE-BRUHN (2011) als extrem

gering klassifiziert werden kann, ist im Wald mit 72 % am höchsten, in der Fahrspur mit 48 % am niedrigsten (Tabelle 20). Die Zwischenspur liegt mit 59 % nahe dem Wert des gesamten Datensatzes. Die Fahrspur weist als einzige Kategorie insgesamt drei Probenpunkte auf, deren Lagerungsdichte nach BLUME, HORN, THIELE-BRUHN (2011) als hoch klassifiziert werden kann.

Unter der Annahme, dass die Bodenart über die gesamte Breite des Transekts homogen verteilt ist und in etwa dieselbe Lagerungsdichte aufweist, unterstützt Tabelle 20, die in Kapitel 4.2 festgestellten Verdichtungen im Bereich der Fahrspuren sowie eine geringere Verdichtung für die Zwischenspur.

Die Anfälligkeit eines Bodens gegenüber Verdichtung kann unter anderem anhand von drei Modellen – Schadensverdichtungsgefährdungsklasse, potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit und Typisierung von Fahrspuren – beschrieben beziehungsweise erklärt werden.

Die Schadensverdichtungsgefährdungsklasse (SVGK) eines Bodens kann über die Bodenart abgeleitet werden und geht auf Studien von Petelkau zurück (MURER, 2009; CRAMER, 2006). In Abbildung 39 ist die jeweilige SVGK der Bodenarten aufgeführt. Nach der SVGK „[...] reagiert ein Boden mit zunehmendem Sandanteil empfindlicher auf mechanische Belastung“ (CRAMER, 2006, S. 102). Somit seien Tone im Gegensatz zu Sanden weniger verdichtungsempfindlich (MURER, 2009; CRAMER, 2006). Weiter führt CRAMER (2006) an, dass sich nach Literaturmeinungen allerdings gerade bei schluffreichen Böden durch Belastung (Befahrung) ein verdichtungsbedingter Luftmangel einstellt. Auch sei die ökologische Folgen für sandreiche Böden geringer als für andere, da die geringe nutzbare Feldkapazität dieser, bei Verdichtung zunehme und ein Luftmangel sich aufgrund von großen Poren relativ spät auswirke.

Die Abweichung zwischen der Literaturmeinung und den Studienergebnissen von Petelkau können nach MURER (2009) und CRAMER (2006), vor allem auf die Versuchsdurchführung der Studien zurückgeführt werden. Die Böden wurden hierfür vor der Belastung gesiebt und somit die natürliche, bodengenetische Gefügestruktur zerstört. Für nichtbindige Böden führe das Sieben zu einem Fehlen der bildungsbedingten Stabilitätsbrücken, wobei bei bindigen Böden die Einzelaggregatstabilität trotz Sieben noch hoch sei (CRAMER, 2006).

Die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit (pVe) wird von MURER (2009) als weitere Möglichkeit aufgeführt, um die Bodenempfindlichkeit durch zum Beispiel Befahrung abzuschätzen.

Über die pVe kann für jede Bodenart die potenzielle Gefahr durch Belastung angegeben werden (Abbildung 40).

Die potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit bezieht sich auf den obersten Horizont eines Bodens und kann durch mehrere Faktoren sowohl positiv, als auch negativ beeinflusst werden. Faktoren sind die bodenkundliche Feuchtstufe, der Humusgehalt, der Carbonatgehalt sowie der Grobbodenanteil (MURER, 2009).

Die Einstufung von Böden kann so nach der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit unter Berücksichtigung der beeinflussenden Faktoren in 7 Klassen von 0, wie keine Gefährdung, bis 6, äußerst hohe Gefährdung, gegliedert werden (MURER, 2009).

Beispielsweise wird für einen Tu2 (potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit: 6), der die bodenkundliche Feuchtstufe 2 aufweist, die potenzielle Gefährdungsstufe um 4 Stufen reduziert. Demnach wäre der Boden nur noch gering (Stufe 2) gefährdet. Mit steigender Feuchtstufe nimmt die Empfindlichkeit für alle Bodenarten (unterschiedlich stark) zu (MURER, 2009).

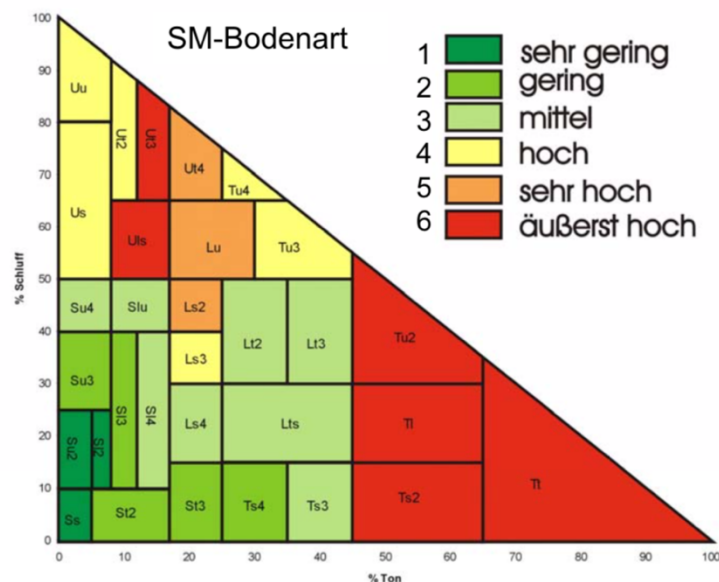


Abbildung 40, Potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der Bodenart des Feinbodens (MURER, 2009)

Die Typisierung von Fahrspuren (Abbildung 41) ist im Gegensatz zu den ersten zwei genannten Modellen eine Methode, die im Gelände angewendet wird und vor allem erst greift, nachdem eine Befahrung stattgefunden hat. Hierzu wird die entstandene Fahrspur in drei Klassen aufgeteilt (Tabelle 21, Abbildung 41) (LÜSCHER, 2010; BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012; KREBS et al., 2017).

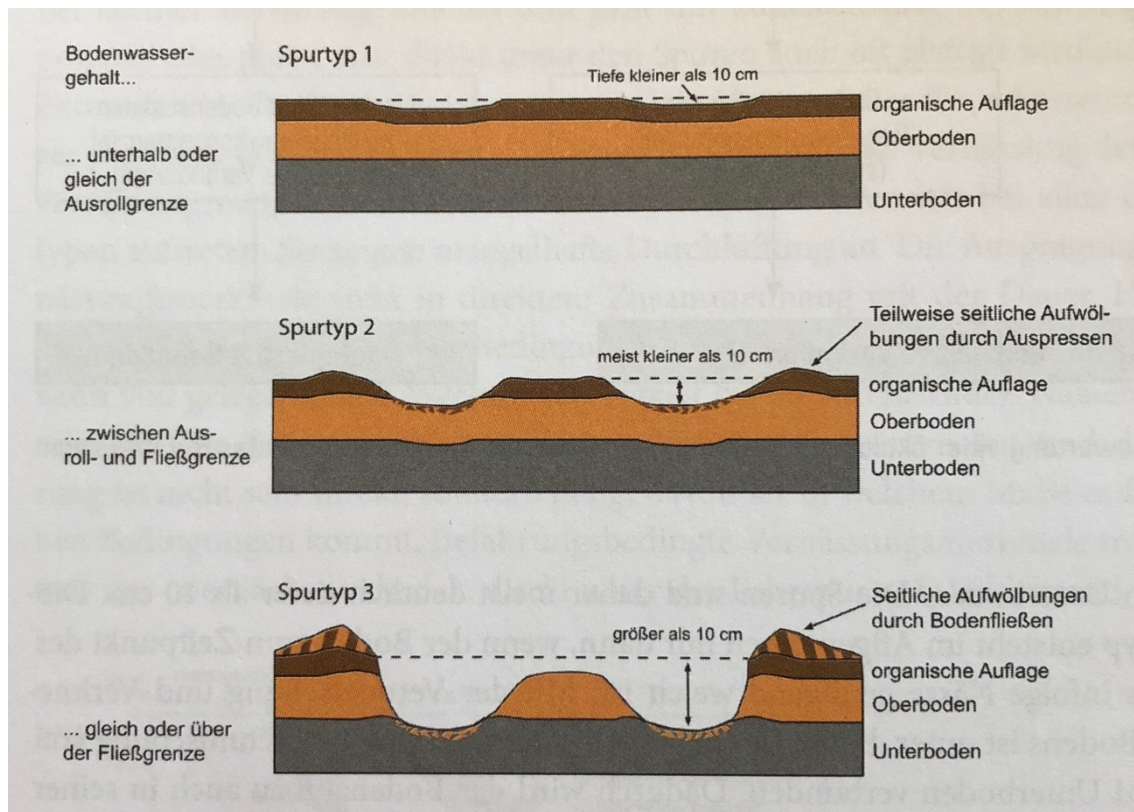


Abbildung 41, Spurtypen als Indikator der Befahrung (KREBS et al., 2017)

Tabelle 21, Klassifizierung von Fahrspuren (LÜSCHER, 2010; BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012)

Kriterium	Spurtyp 1	Spurtyp 2	Spurtyp 3
Spurtiefe	5 bis max. 10 cm in Oberbodenhorizonten	< 10 cm	> 10 cm bis in Unterbodenhorizonte
Aufbau Oberboden	nicht gestört	± gestört	gestört
Verformung	keine	± vorhanden	ausgeprägt
Merkmale	elastische Verformung - meist nur Stollenabdrücke od. org. Auflage verpresst	plastische Verformung - deutliche Eintiefung	Grundbruch - ausgeprägte randliche Aufwölbung
Einflussfaktor des Bodens			
Wassergehalt	trocken		feucht
Bodenart	grob		fein
Hangneigung	flach		steil

Die Folgen der Befahrung sind für jeden Spurtyp unterschiedlich stark ausgeprägt. LÜSCHER (2010) führt für alle Spurtypen eine Erhöhung der Lagerungsdichte an. Dabei ist die Verdichtung des Bodens stärker ausgeprägt, je höher die Spurtypnummer ist. Auch setzt sich die Verdichtung in größere Tiefen fort. Die BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND

FORSTWIRTSCHAFT (2012) führt einen sogenannten Wurftest und gegebenenfalls eine anschließende Testfahrt als Verfahren an, um die Befahrbarkeit des Bodens zu testen.

Anhand des Wurftests kann der Spurtyp, der bei Befahrung entsteht, prognostiziert werden und somit das Risiko der Befahrung abgeschätzt werden. Bei dem Wurftest wird eine Bodenprobe, idealerweise ohne organische Auflage, zu einer Kugel geformt und gegen eine glatte Oberfläche geworfen.

In Tabelle 22 sind die möglichen Ergebnisse des Wurftests und die Folgen für den Boden aufgeführt. Für den zweiten Fall empfiehlt die BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2012) eine Testfahrt durchzuführen.

Tabelle 22, Interpretation der Wurftestergebnisse (BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012)

Ergebnis des Wurftest:			
Erscheinungsbild:	Risse in der Oberfläche, fällt ggf. ab	Oberfläche geschlossen & flach	„Spritzer“ unregelmäßig & flach
Wassergehalt:	gering	mittel	hoch
Tragfähigkeit:	hoch	mittel bis gering	nicht ausreichend
Risiko:	gering	mittel bis hoch	Bodenschaden unvermeidbar
Befahrung:	möglich	zu prüfen	nie
Wahrscheinlicher Spurtyp:	1	2	3

Sofern sich bei der Befahrung der Spurtyp 2 zeigt, kann der Boden befahren werden. Falls Spurtyp 3 als Folge der Testfahrt entsteht, müssen Maßnahmen wie zum Beispiel absenken des Reifendrucks, Reduzierung der Ladung oder ähnliches getroffen werden.

Ändert sich trotz Gegenmaßnahmen der Spurtyp nicht, ist die Befahrung abubrechen (Abbildung 42) (BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012).

Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen zeigen, sowohl für den gesamten Datensatz als auch für die Tiefenstufen 0 cm und 30 cm, dass die Korrelationskoeffizienten von Ton mit der Lagerungsdichte in der Fahrspur höher als die im Wald und in der Zwischenspur sind. Für die Tiefenstufe 0 cm ist lediglich die Korrelation von Ton im gesamten Datensatz stärker als die in der Fahrspur. Bei Schluff können ebenfalls stärkere Korrelationen in der Fahrspur im Vergleich zum Wald festgestellt werden. Wenn auch nach BORSIUS (2011) diese Korrelationen geringfügig schwächer ausfallen als die Korrelationen der Lagerungsdichte mit Ton. Unter der

Annahme, dass der ausgehende Boden vor Befahrung über die gesamte Breite der Transekte homogen ist, ist nach MURER (2009) vor allem Ton für die Verdichtung verantwortlich. Damit spiegelt sich die nach MURER (2009) beschriebene höhere Empfindlichkeit von feinkörnigeren Böden in der untersuchten Rückegasse wider.

BACHMANN, HORN, PETH (2015) beschreiben natürlicherweise eine Zunahme der Lagerungsdichte mit zunehmender Bodentiefe. Begründet wird diese mit der Auflast des darüber liegenden Bodens.

Für die untersuchten 16 Transekte ist dieser Tiefengradient der Lagerungsdichte nicht für alle Transekte beziehungsweise alle Kategorien zu erkennen (Abbildungen 21 und 22, Tabelle 1). Diese Abweichung kann auf die sehr niedrige Lagerungsdichte ($0,24 - 0,3 \text{ g/cm}^3$) des anstehenden Ausgangsgesteins – Laacher See-Tephra – zurückgeführt werden (PURLE, 2015).

Über den Verlauf der Rückegasse steht Bims in unterschiedlichen Tiefen an. Auf Abbildung 43, die auf Rohdaten von PÖHLER (2019) und STEGMAN (2019) sowie auf den eigenen Datensatz beruht, ist über die Bimsabbaufäche die Tiefe des Bimshorizonts unterhalb der EOF interpoliert. Die für die Interpolation verwendeten Punkte sind als Probenpunkte gekennzeichnet.

Zu erkennen ist, dass die Bimstiefe über die gesamte Fläche relativ uneinheitlich ist. Der Bimshorizont erstreckt sich ab ca. 30 cm unterhalb der EOF bis tiefer als 100 cm. Der südöstliche Bereich zeichnet sich durch eine geringe Tiefe des anstehenden Bimshorizontes aus. In der nordöstlichen Ecke ist der Abstand zwischen EOF und Bimshorizont mit über 90 cm am größten. Der Großteil der Bimsabbaufäche weist eine Bimstiefe von 45,1 bis 60 cm unterhalb der Geländeoberfläche auf (Abbildung 43).

Des Weiteren ist anzumerken, dass die Mächtigkeit der Bimsschicht unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Bei Transekt 12 beträgt die Mächtigkeit der Bimsschicht zum Beispiel nur um die 30 bis 40 cm (Tabelle 1, Abbildung 44), im Unterhang (bei zum Beispiel Transekt 2) mindestens 60 cm, da hier nicht tiefer beprobt wurde, kann die exakte Dicke der Bimsschicht nicht festgestellt werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Mächtigkeit im Unterhang ähnlich der wiederaufgeforsteten Fläche ist. Diese Fläche grenzt im Osten unmittelbar an die Untersuchungsfläche. Dort wurde 2015 der anstehende Bims abgebaut. Für den Unterhang konnten Mächtigkeiten von 2 – 3 m festgestellt werden (BIWER, 2018).

Die unterschiedliche Mächtigkeit der Bimsschicht zeigt sich ebenfalls in den Boxplot-Diagrammen der Tiefenstufe > 30 cm (Abbildung 26). Vor allem für die Fahrspur ist die größte Spannweite des Interquartilbereichs zu erkennen. Dies resultiert zum einen aus sehr geringen Lagerungsdichten in den Bimshorizonten, zum anderen aus deutlich höheren Lagerungsdichten aus Horizonten, die sich unterhalb des Bims befinden. So wurde zum Beispiel bei Transekt 12 ein toniger Boden unterhalb des Bims festgestellt (Tabelle 1).

Die in Abbildung 25 im Mittel dargestellte geringere Lagerungsdichte der Fahrspur im Vergleich zum Wald lässt sich ebenfalls mit dem anstehenden Bims erklären. Alle Proben wurden im gleichen Tiefenabstand – 30 cm unterhalb der Geländeoberfläche – entnommen. Zum Teil liegen die Fahrspuren bis zu 50 cm tiefer als die ungestörten Waldstandorte (Tabelle 24). Dadurch wurden die Oberflächenproben der Fahrspur zum Teil aus derselben oder einer ähnlichen Tiefe wie die 30 cm tiefen Proben des Waldes entnommen. Dies kommt bei Transekten 4, 7, 8, 9, 11, 13, 14 und 15 vor (Tabelle 1, Abbildungen 21 und 22). Mit tiefer liegenden Probenpunkte in der Fahrspur können die Proben für die Tiefenstufe 30 cm näher am oder im Bimshorizont liegen als die Vergleichsproben derselben Tiefenstufe im Wald oder der Zwischenspur. Probenpunkte im Bims weisen wie oben beschrieben sehr geringe Lagerungsdichten auf. Durch diese Tiefenverschiebung der Probenpunkte ist die im Median geringere Lagerungsdichte der Fahrspur zum Wald zu erklären.

Das der Bims selbst in der Fahrspur nur einer geringen Verdichtung unterliegt, obwohl sich eine Befahrung bis zu einer Tiefe von 1,50 m auswirken kann (CRAMER, 2006), liegt nach BACHMANN, HORN, PETH (2014) an der geringen Verdichtbarkeit von vulkanischen Aschen. Ab einen Wassergehalt von 60 % sinkt die maximale Verdichtbarkeit noch weiter.

Die Korrelationsergebnisse verdeutlichen den Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte und dem Bimsanteil. Grus korreliert bei allen Analysen und Tiefenstufen negativ mit der Lagerungsdichte (Tabellen 9, 10 und 11).

Im Allgemeinen könnte der Anteil von Grus in allen Tiefenstufen, aber vor allem in der Tiefenstufe 30 cm, die geringen Lagerungsdichten, auch zum Teil nach der Befahrung, erklären.

4.2.2 Hangneigung

Die Hangneigung kann bei einer Befahrung einen Einfluss auf die Verdichtung des Bodens haben. EZZATI et al. (2010), BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2012) und NEMESTOTHY (2015) führen an, dass mit steigender Hangneigung die Gefahr der Bodenverdichtung größer wird, da mit zunehmender Steigung der Schlupf der Räder ansteigt. NEMESTOTHY (2015) untergliedert die Hangneigung in drei Befahrungsklassen (Tabelle 23). Für das Untersuchungsgebiet beziehungsweise die untersuchte Rückegasse konnte eine maximale Hangneigung von $\alpha = 14,26^\circ$ festgestellt werden. Demnach ist eine Befahrung der Rückegasse ohne weiteres möglich (NEMESTOTHY, 2015).

Tabelle 23, Klassifizierung der Hangneigung
(NEMESTOTHY, 2015)

Hangneigung		Befahrbarkeit
[%]	[°]	
< 30	< 17	möglich
30 – 60	17 – 31	eingeschränkt
> 60	> 31	nicht befahrbar

Für die Befahrbarkeit in Abhängigkeit der Hangneigung muss berücksichtigt werden, dass es dabei in erster Linie um eine technische Befahrbarkeit von Hängen geht und nur in zweiter Linie um den möglicherweise entstehenden Schaden am oder im Boden. HITTENBECK (2013) führt für einen möglich geringen ökologischen Schaden am Boden einen maximalen Schlupf von 25 % an.

Gegeben sei dies bei mittleren Verhältnissen bei Hangwinkeln zwischen $\alpha = 9,6^\circ$ und $25,7^\circ$. Eine höhere Bodenfeuchte kann dazu führen, dass die ökologische Grenze von 25 % Schlupf auch bei geringeren Hangwinkeln erreicht wird (NEMESTOTHY, 2015; HITTENBECK, 2013). Bogiebänder oder Traktionsketten können für mehr Traktion sorgen und somit die Befahrung, auch für steilere Neigungswinkel beziehungsweise die gleichen Winkel bei schlechteren Befahrungsverhältnissen, ermöglichen (BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012; NEMESTOTHY, 2015). Für die untersuchte Rückegasse fand zumindest ein Teil der Befahrung bei schlechten Befahrungsverhältnissen statt (BIWER, 2018). Eine Traktionswinde – eigentlich eingesetzt für sehr steile Hänge – kann, sofern richtig verwendet, den Schlupf und damit die Folgen von Befahrungen im Hang reduzieren (LÜSCHER et al., 2010). Aufgrund der geringen Hangneigung im Untersuchungsgebiet von im Schnitt $\alpha = 4,9^\circ$ ist die Verwendung von Traktionswinden nicht rentabel und führt zu einem hohen Mehraufwand. Des Weiteren wird empfohlen bei Last mit dem Hang zu rücken. Also mit beladenem Forwarder hangabwärts zu fahren (LÜSCHER et al., 2010). Da sich die nächstgelegene Forststraße hangaufwärts befindet, ist dies auf der untersuchten Rückegasse nicht möglich (Abbildung 9 und 12).

Abbildung 27 zeigt, dass in der Fahrspur sowohl in flachen als auch in steilen Hanglagen eine Verdichtung des Bodens stattgefunden hat. Die höhere Verdichtung der Fahrspur der Transekte mit geringer Hangneigung steht im Widerspruch zur Literatur (EZZATI et al., 2010; LÜSCHER et al., 2010; BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012).

Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass selbst die Neigung der steilen Abschnitte noch im Bereich der Hangneigungsklasse liegt, die nach NEMESTOTHY (2015) ohne größere Probleme zu befahren ist (Tabelle 23) (Hangneigungen wurden nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 sowie ARBEITSKREIS STANDORTKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG, 2003

gegliedert). Die schlechte Witterung kann bei der Befahrung für ein Herabsinken dieser Klasse gesorgt haben. Die Verwendung von sogenannten Bogiebändern könnte wiederum die Traktion verbessert und somit diesen Effekt entgegengewirkt haben.

Daher ist es wahrscheinlich, dass weitere Faktoren die Verdichtung beeinflussten. So könnte, neben der Hangneigung, die Bodenart einen Einfluss auf die Verdichtung haben. In den Korrelationsanalysen der Fahrspur zeigt sich eine nach BORSIUS (2011) stärkere Korrelation zwischen Ton und der Lagerungsdichte für die flacheren Transekte als für die steileren (Tabellen 12 und 13). Eine feinere Bodenart in den flacheren Transekten könnte eine stärkere Verdichtung begünstigen haben (LÜSCHER et al., 2010; MURER, 2009).

Aber auch andere Faktoren könnten für die untypische geringere Verdichtung der Fahrspuren der steileren Transekten gesorgt haben. Eine geringere Beladung und damit einhergehend eine geringe Auflast auf den Boden könnte eine Ursache sein (BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012; CRAMER, 2006). Zusätzlich könnte die Anzahl der Befahrungen eine Rolle spielen. Die Transekte, die nach AD-HOC-AG BODEN (2005) und ARBEITSKREIS STANDORTKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2003) als steil klassifiziert wurden, stimmen ebenso mit den Transekten überein, die anhand des Orthofotos (Abbildung 11) als weniger befahren klassifiziert wurden. Auf den Aspekt der Anzahl der Befahrungen wird in Kapitel 4.2.3 genauer eingegangen.

Abschließend lässt sich mit den vorhandenen Daten kein Faktor herausstellen, der für die Verdichtung im Hang hauptverantwortlich ist. Die Verdichtung wird aufgrund der erhobenen Daten und durchgeführten Analysen eher auf die Bodenart zurückgeführt. Allerdings ist dabei anzumerken, dass es sich hierbei um eine Hypothese handelt, die durch weitere Untersuchungen besser beurteilt werden könnte.

4.2.3 Befahrung

Die Anzahl der Befahrungen wurde anhand Abbildung 11 des LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION (2019) sowie den Feldbeobachtungen (Abbildung 20) klassifiziert. Auf dieser Abbildung ist zu erkennen, dass zwischen Transekt 7 und 8 eine weitere Rückegasse, die sich wiederum in zwei Rückegassen aufteilt, auf die untersuchte RG trifft. Daher ist davon auszugehen, dass die untersuchte Rückegasse ab Transekt 8 häufiger befahren wurde, da das geschlagene Holz der anderen beiden RG ab dort ebenfalls über die untersuchte Rückegasse transportiert wurde. Allerdings lässt sich quantitativ nicht abschätzen wie häufig die untersuchte Rückegasse ab Transekt 8 beziehungsweise bis Transekt 7 befahren wurde.

Anhand des Orthofotos ist zu erkennen, dass die aufgenommenen Probenpunkte zum Teil nicht exakt auf der Rückegasse liegen. So weichen vor allem die Transekte 10 und 11 deutlich

ab. Ab Transekt 12 verläuft die Rückegasse im Wald, somit ist die Lage der eingemessenen Probenpunkte zur Rückegasse auf Abbildung 11 nicht zu beurteilen. Die vorhandenen Abweichungen lassen sich mit der Ungenauigkeit des GPS-Gerätes (Garmin etrex 10) erklären. Im freien Feld ist die Genauigkeit deutlich höher als im Wald oder am Waldrand (LOOSE & ZANDER, 2005). Dies betrifft nur die digitale Darstellung der Punkte.

Die Anzahl der Befahrungen kann einen Einfluss auf die Ausprägung beziehungsweise die Tiefe der Fahrspuren haben. Mit steigender Anzahl an Überfahrten nimmt die Tiefe der Fahrspuren zu (EZZATI et al., 2012; SAKAI et al., 2008). Dieser Zusammenhang kann auch für die untersuchte Rückegasse beobachtet werden. Dazu wurde der Mittelwert aus den tiefsten referenzierten Punkten der Fahrspuren, sowohl für die Klasse wenig befahren als auch für viel befahren, ermittelt. Für die wenig befahrenen Bereiche ergibt sich so eine durchschnittliche maximale Tiefe der Fahrspuren von 43,1 cm unterhalb der EOF, für die viel befahrenen Bereiche eine durchschnittliche maximale Tiefe von 48,6 cm (Tabelle 24).

HENDRISON (1990) führt als Folge der Befahrung für den Oberboden (0 – 10 cm) eine starke Verdichtung für die ersten vier Befahrungen an. Anschließend nimmt die Lagerungsdichte mit steigender Anzahl an Befahrungen kontinuierlich, aber deutlich schwächer, zu. Für eine Bodentiefe von 30 – 40 cm führt HENDRISON (1990) eine geringere Verdichtung bei der ersten Überfahrt an. Ab der zweiten Überfahrt nimmt die Lagerungsdichte, kontinuierlich mit steigender Anzahl der Überfahrten, zu. SITKEI (1971) ergänzt, dass bei einer statischen Belastung des Bodens, dieser weniger stark belastet wird als bei wiederholter dynamischer Belastung. Die Befahrung mit einer Forstmaschine stellt eine dynamische Belastung dar (AGERER, 2009). Des Weiteren konnte SITKEI (1971) feststellen, dass die Verdichtung von Böden nach etwa 9 bis 10 dynamischen Belastungen das Maximum erreicht. SITKEI (1971) und HENDRISON (1990) unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl an Überfahrten, die zu einer maximalen Verdichtung führen. HENDRISON (1990) führte Untersuchungen bis 14 Überfahrten durch, wobei die Lagerungsdichte kontinuierlich anstieg. NEMESTOTHY (2015) und SCHÄFFER (2002) hingegen führen an, dass vor allem die Erstbefahrung den größten Schaden am (Ober-)Boden anrichtet. Sofern die nachfolgenden Überfahrten mit demselben Gewicht stattfinden, kommt es zu keiner weiteren Verdichtung des Bodens.

Für die untersuchte Rückegasse kann für die viel befahrenen Transekte eine stärkere Zunahme der Lagerungsdichte im Vergleich zum Wald beobachtet werden als in den weniger befahrenen Transekten (Abbildung 28). Die erhobenen Daten unterstützen die Aussagen nach HENDRISON (1990) und SITKEI (1971), dass die Lagerungsdichte beziehungsweise die Verdichtung mit zunehmender Anzahl an Überfahrten steigt. Allerdings ist, wie oben beschrieben, die genaue Anzahl der Überfahrten nicht bekannt. So könnte die Anzahl der Befahrungen selbst in den wenig befahrenen Transekten der Rückegasse bereits schon in

dem Bereich liegen, in dem nach SITKEI (1971) die maximale Verdichtung gegeben sein sollte. Sofern dies der Fall ist, müsste die Ursache der stärkeren Verdichtung der viel befahrenen Transekte durch andere Faktoren bedingt sein. Auch hier könnte die Bodenart einen entscheidenden Einfluss auf die Verdichtung haben. Dafür spricht, dass die Korrelationsergebnisse der Lagerungsdichte mit Ton für die Fahrspur der viel befahrenen Transekte nach BORSIUS (2011) stärker als in den wenig befahrenen sind (Tabellen 15 und 16). Dagegen wäre die stärkere negative Korrelation von Grus für die viel befahrenen Transekte anzuführen.

Unterschiedliche Beladungen könnten die Unterschiede zwischen den Kategorien wenig und viel befahren ebenfalls erklären. Da es jedoch über die genaue Beladung sowie die Anzahl der Überfahrten keine Daten gibt, lässt sich dies nicht abschätzen.

Abschließend ist nicht exakt zu klären, welche Ursache die gemessene stärkere Bodenverdichtung der Transekte 8 bis 16, im Bereich der Fahrspur, hat. Die Daten zeigen einen Zusammenhang zwischen dem Grad der Verdichtung und der Anzahl der Überfahrten. SITKEI (1971) sowie HENDRISON (1990) bestätigen diesen Zusammenhang. Für eine genaue Aussage, wie sich mehrmalige Befahrungen auf Lockerbraunerden auswirken und inwieweit weitere Faktoren einen Einfluss haben, wären weitere Untersuchungen nötig. Vor allem müsste die Anzahl der Befahrungen sowie das jeweilige Gewicht bei der Überfahrt protokolliert werden, idealerweise auf einem bisher anthropogen ungestörten Boden.

4.3 Folgen der Bodenverdichtung

Für den gesamten Datensatz sowie für alle drei Tiefenstufen ist die relative Bodenfeuchte in der Fahrspur höher als im Wald (Abbildungen 29, 30 und 31; Tabelle 1). Die Korrelationen zeigen für alle Tiefenstufen eine positive Korrelation mit Grus. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Größe der Korrelationskoeffizienten der relativen Bodenfeuchte mit steigendem Grusanteil zu. Des Weiteren ist die Korrelation in der Fahrspur nach BORSIUS (2011) stärker als im Wald. Die Lagerungsdichte korreliert negativ mit der Bodenfeuchte, über alle Tiefenstufen (Tabellen 16).

Der Tiefengradient der Korrelation mit Grus ist zum einem mit der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Zunahme von Grus mit zunehmender Tiefe zu erklären, zum anderen durch die Eigenschaften von Grus. GEBHARDT et al. (2013) führen für Böden aus vulkanischen Aschen einen hohen Grobporenanteil an (Abbildung 4). Da nach BACHMANN, HORN, PETH (2014) von einer geringen Verdichtbarkeit eben dieser Böden auszugehen ist, ist es wahrscheinlich, dass der hohe Grobporenanteil der Bimshorizonte auch nach einer Befahrung

noch vorhanden ist. Des Weiteren ist Bims ein sehr porenreiches Gestein (PURLE, 2015; OKRUSCH & MATTHES, 2014). In diesen zum Teil sehr feinen (Bims-)Poren kann sich ebenfalls Wasser anhaften (GEBHARDT et al., 2013).

Da die Bodenfeuchte in den Fahrspuren höhere Werte als im Wald aufweist, kann auf die durchschnittlich höheren Lagerungsdichten der Fahrspur zurückgeführt werden. Durch die Verdichtung nimmt das Porenvolumen des Bodens der Fahrspur ab. Genauer sinkt die Anzahl der Grobporen, bei gleichzeitigem Anstieg der Feinporen (BLUME et al., 2004; CRAMER, 2006). Durch diese Veränderung sinkt zum einen die Infiltrationskapazität, zum anderen steigt die Feldkapazität (GERHARDT et al., 2013; BLUME et al., 2004). Durch kleinere Poren steigen die Kapillarkräfte, wodurch das Wasser stärker gebunden ist (BACHMANN, HORN, PETH, 2014; BLUME et al., 2004).

So konnte für das Untersuchungsgebiet, im Vergleich zum Wald, eine Verringerung der Infiltrationskapazität in Fahrspuren von Rückegassen sowie ein erhöhter oberflächiger Abfluss festgestellt werden (SKUBSKI, 2019; ENDERLING, 2019). Dadurch kann es bei (stark) Niederschlagsereignissen zu Horton'schem Oberflächenabfluss kommen. In Folge dessen, kann es zu einer höheren Bodenerosion kommen (BLUME, HORN, THIELE-BRUHN, 2011; BLUME et al., 2016)

Die Witterung um den Probenzeitraum war durch hohe Temperaturen und sehr wenig Niederschlag gekennzeichnet (Abbildung 16). So zeigen sich generell relativ niedrige relative Bodenfeuchten. Die Verteilung der gemessenen relativen Bodenfeuchten lässt sich durch die oben beschriebene höhere Feldkapazität als Folge der Bodenverdichtung in der Fahrspur sowie dem Grusanteil erklären.

Nach GISI et al. (1997) kann es ab einer Lagerungsdichte von $1,4 \text{ g/cm}^3$ zu einer Verringerung der Durchwurzelbarkeit für Pflanzen kommen. Ab einem Wert von $1,8 \text{ g/cm}^3$ sei der Boden extrem verdichtet und eine Durchwurzelung nochmals erschwert. Für die untersuchte Rückegasse konnten 13 Probenpunkte mit einer Lagerungsdichte über $1,4 \text{ g/cm}^3$ festgestellt werden. Davon liegen zehn Probenpunkte in der Fahrspur, zwei im Wald und ein Probenpunkt in der Zwischenspur (Tabelle 1).

GREGORY (2006) führt ähnlich wie GISI et al. (1997) eine Lagerungsdichte an, ab der das Wurzelwachstum gehemmt wird. Allerdings unterscheidet sich GREGORY (2006) zum einen durch höhere Lagerungsdichten, zum anderen durch eine Differenzierung nach Bodentypen (Tabelle 25). Je feiner die Bodenart, desto niedriger die Lagerungsdichte, ab der es zu einer Einschränkung des Wurzelwachstums kommen kann.

Tabelle 25, Verringerung der Durchwurzelbarkeit für verschiedene Bodenarten (Gregory, 2006)

bulk density [g/cm³]	type of soil
1,55	clay loams
1,65	silt loams
1,80	fine sandy loams
1,85	loamy fine sands

BACHMANN, HARTGE, PETH (2014) führen hingegen an, dass ab einer Achslast von mehr als 10 t Ertragseinbußen auftreten. Für eine agrarisch genutzte Fläche kann dies durch Düngung ausgeglichen werden, sodass die Folgen der Bodenverdichtung oder nach BRUNOTTE (2007) wahrscheinlich sogar Bodenschadverdichtung, kaum auffallen würde. FROELICH (1979) konnte für verdichtete Böden auf Forststandorten eine Reduktion der Wachstumsrate von Bäumen feststellen. Die Wachstumsrate kann je nach Verdichtung, Standort und Baumart zwischen 6 und 12 % abnehmen, im Vergleich zu Bäumen, die auf unbeeinflussten Böden wachsen.

NEMESTOTHY (2015) stellt einen linearen Zusammenhang zwischen der Bodenverdichtung und der Reduktion des Höhenwachstums dar. Eine Ursache dafür ist das beschränkte Wurzelwachstum als Folge von hohen Lagerungsdichten (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Die Kraft, die eine Wurzel aufbringen muss, kann mithilfe eines Penetrometers gemessen werden. Dieser kann den Eindringwiderstand (EW) für zum Beispiel jeden Zentimeter messen. Ab einen Eindringwiderstand von ungefähr 2,5 MPa wird das Eindringen, beziehungsweise das Wachstum von Pflanzenwurzeln stark vermindert (BODNER, 2012).

In Abbildung 45 sind die interpolierten Eindringwiderstände für das Untersuchungsgebiet für verschiedene Tiefenstufen aufgeführt. Die erhobenen Daten sowie die Interpolation beruhen auf HENN (2019). Die interpolierten Flächen veranschaulichen die Eindringwiderstände für einen Großteil der Bimsabbaufäche und weitere Bereiche östlich dieser. Zu erkennen ist, dass in den ersten 10 cm des Bodens auf der gesamten interpolierten Fläche die Eindringwiderstände relativ gering sind und unter dem von BODNER (2012) angegebenen Wert von 2,5 MPa liegen. Mit zunehmender Tiefe nehmen die EW zu. Die höchsten Eindringwiderstände wurden für den südlichen Bereich errechnet. Sowohl Teile der untersuchten Rückegasse (Transekte 10 – 14) als auch eine Forststraße liegen in diesem Bereich.

Im Vergleich mit Abbildung 43 fällt auf, dass hohe Eindringwiderstände häufig in Bereichen mit Bimshorizonten nahe der EOF gemessen wurden. Eine Hypothese für diesen Zusammenhang ist, dass das Penetrometer beim Eindringen in den Bimshorizont vermeintlich höhere EW misst, als unter natürlichen Bedingungen für Wurzeln vorliegen. Ursache dafür könnte sein,

dass sich die Spitze des Messgeräts an den Bimssteinen verkantet. Ein Indiz bezüglich dieser Hypothese liefert das Gebiet östlich des Bimsabbaugebietes. Die Flächen sind, ausgenommen der Tiefenstufe 10 bis 20 cm, durch relativ geringe EW gekennzeichnet. Auffallend ist, dass die Eindringwiderstände im Tiefenverlauf abnehmen. LÜSCHER et al. (2010) führt eine Zunahme der EW mit zunehmender Bodentiefe an, da tiefere Horizonte durch das auflagernde Gewicht des Bodens höhere Lagerungswerte aufweisen (BACHMANN, HORN, PETH, 2015). Unterschied zwischen der untersuchten Bimsabbaufläche und der östlichen Fläche ist, dass diese 2015 durch die Firma KANN Beton GmbH & Co. KG ausgebimt wurde (BIWER, 2018). Diese Tatsache könnte zwar die unterschiedlichen EW beider Flächen erklären, jedoch nicht den nach LÜSCHER et al. (2010) ungewöhnlichen Tiefengradient. Um die genauen Ursachen zu klären, wären weitere Untersuchungen nötig. Eine weitere Erklärung könnte der anstehende, vom Bims überlagerte, Boden sein. Für Transekt 12 konnte unterhalb der Bimsschicht unter anderem lehmiger Ton mit Lagerungsdichten von über $1,5 \text{ g/cm}^3$ beprobt werden (Tabelle 1). So könnte der überlagerte Boden für die zum Teil hohen Eindringwiderstände verantwortlich sein. Es ist nicht bekannt, welcher Boden unterhalb des Bims auf der untersuchten Fläche beziehungsweise auf der benachbarten Fläche ansteht.

Als Folge einer Verdichtung ändert sich der Gashaushalt des Bodens. So kann in der Regel im Boden von Fahrspuren eine geringere Sauerstoffkonzentration, bei gleichzeitig höheren Kohlenstoffdioxidgehalten, festgestellt werden (SCHÄFFER, 2002; FREY, 2010). Rückegassen können durch die veränderte Gaszusammensetzung, beziehungsweise durch eine Veränderung der Mikroorganismenzusammensetzung klassifiziert werden (FREY, 2010). Rückegassen des Spurtyps 1 sind vor allem durch eine Abnahme von ammoniumoxidierenden Bakterien gekennzeichnet. Für den Spurtyp 2 ist eine Zunahme an lachgasproduzierenden Mikroorganismen festzustellen. Ein Anstieg von methanproduzierenden Bakterien ist für Spurtyp 3 zu beobachten (FREY, 2010).

4.4 Schutzmaßnahmen

Als Schutzmaßnahmen sind solche zu verstehen, die die Bodenbelastung durch Befahrung reduzieren oder im Idealfall gänzlich verhindern. Die Maßnahmen unterscheiden sich hinsichtlich der Effektivität sowie deren Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Ein Abtransport des geschlagenen Holzes durch (Klein-)Krananlagen kann für gefährdetet und/ oder steile Standorte eine Möglichkeit darstellen (OBERER, 2011). Solch kleinen und modernen Krananlagen können nach OBERER (2011) schnell sowie relativ flexibel eingesetzt

werden und erbringen dabei eine hohe Arbeitsleistung. Die Rentabilität für flache Hänge ist dabei allerdings fraglich (LÜSCHER et al., 2010).

Eine weitere Lösung, um die Auflast zu reduzieren, seien Traktionshilfswinden (HEUBAUM, o.J.). Diese ermöglichen bei richtiger Verwendung die Reduzierung des Schlupfs und bei Benutzung von externen Systemen zusätzlich eine Minderung der Maschinenlast von bis zu 3 t (HEUBAUM, o.J.; LÜSCHER et al., 2010). Ein weiterer Vorteil externer Traktionshilfssystemen, die nicht am Forwarder oder Harvester befestigt sind, ist, dass keine Ankerbäume benötigt werden und folglich keine Rindenquetschungen auftreten (HEUBAUM, o.J.).

Wie in Kapitel 1.1.1.1 beschrieben kann über eine Veränderung des Reifendrucks die Bodenbelastung reduziert werden. Dabei reduzieren vor allem niedrige Reifendrücke die Auflast (ELIASSON, 2005; BRUNOTTE, 2007). Bei einem Reifendruck um 100 kPa (1 bar) sind die Bodenbelastungen am geringsten. Bezüglich höherer Reifendrücke zwischen 300 kPa und 600 kPa sind kaum Unterschiede festzustellen. Ein Druck von lediglich 100 kPa ist je nach Geländesituation im Forst nicht, beziehungsweise kaum nutzbar, da mit geringerem Druck das Risiko eines Reifenschadens steigt (ELIASSON, 2005). Die Reduzierung des Reifendrucks sorgt für eine größere Auflagefläche bei gleichbleibender Last. So verteilt sich die Last auf eine größere Fläche im Boden (CRAMER, 2006).

Die Auflagefläche kann durch sogenannte Bogiebänder vergrößert und gleichzeitig der Schlupf reduziert werden. Des Weiteren wird die Fahrspurtiefe durch Bogiebänder reduziert (HEUBAUM, o.J.; KREMER & SCHARDT, 2007). Dabei gibt es auf dem Markt unterschiedliche Ausführungen dieser Traktionsbänder, die sich in ihren Vor- und Nachteilen unterscheiden (PADBERG & HEUBAUM, 2015). LÜSCHER et al. (2010) führen an, dass „die wissenschaftlichen Untersuchungen zu den Wirkungen von Bogiebändern auf den Boden [...] komplex und noch nicht abgeschlossen [sind].“ (S. 10).

Eine größere Auflagefläche und damit geringe Kontaktflächendrücke bieten Kettenlaufwerke. Neben der großen Kontaktfläche ist ein weiterer Vorteil der Kettenfahrwerke, dass mit diesen auch hohe Steigungswinkel befahren werden können (LÜSCHER et al., 2010; RIGGERT et al., 2013). Bei unebenem Gelände können starre Kettenlaufwerke allerdings für eine punktuelle Belastung des Bodens führen. Auch führen Richtungsänderungen zu hohen seitlichen Scherkräften (Lüscher et al., 2010). Verbesserungen, zum Beispiel vier kleine Raupenfahrwerke mit pendelnd aufgehängtem Fahrwerk sowie gummibesetzten Ketten, können die Belastung des Bodens reduzieren (LÜSCHER et al., 2010).

Eine günstige und leicht anzuwendende Maßnahme ist das Ausbringen einer Reisigauflage. Diese kann die Auflagefläche der Reifen ebenfalls vergrößern und somit (visuelle) Schäden reduzieren (NEMESTOTHY, 2009; LÜSCHER et al., 2010). Je dicker die Auflage desto besser der Schutz. Ideal wäre nach NEMESTOTHY (2009) eine Mächtigkeit von mindestens 15 – 20 kg pro m². Allerdings sei im Gelände kaum mehr als eine Mächtigkeit von 6 – 7 kg zu

verwirklichen. LÜSCHER et al. (2010) führen zusätzlich noch die Art des Holzes der Auflage an. So weisen Reisigauflagen aus Nadelholz eine höhere Schutzwirkung als Auflagen aus Laubholz auf.

Die Klassifizierung der (Forst-)Böden nach der potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit (vgl. Kapitel 4.2.1) stellt eine weitere Möglichkeit dar, um die Gefahr der Boden(schad)verdichtung im Vorfeld abschätzen zu können und somit gegebenenfalls Gegenmaßnahmen zu treffen. Dazu ist eine einmalige Untersuchung des Gebietes erforderlich.

Zur Regeneration von Waldböden führen KREBS et al. (2017, S. 267) an, dass „[bisher erst wenig darüber bekannt ist], wie weit sich die Bodenstruktur nach einer Verdichtung wieder regenerieren kann, welche Prozesse sich abspielen, [...], wie die Regeneration durch künstliche Maßnahmen beschleunigt werden kann“. Des Weiteren führen KREBS et al. (2017) an, dass eine maschinelle Auflockerung, wie in der Landwirtschaft eingesetzt, im Wald kaum möglich oder zielführend ist. Vielversprechend ist hingegen die Setzung von Schwarzerlensetzlingen in Fahrspuren. Diese besitzen eine hohe Toleranz gegenüber Verdichtung und verbessern innerhalb relativ kurzer Zeit die Bodeneigenschaften bis zu einer Tiefe von 30 cm (KREBS et al., 2017).

Verdichtung durch Bepflanzung zu reduzieren ist nur auf Rückegassen einzusetzen, die nicht mehr benutzt werden.

5. FAZIT

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, welche Faktoren sich auf die Bodenverdichtung eines Andosol-Standortes auswirken.

Für die Bodenart konnte ein starker Zusammenhang zwischen Feinboden, vor allem Schluff sowie Ton, und der Lagerungsdichte festgestellt werden.

Ein Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Verdichtung des Bodens konnte anhand der untersuchten Rückegasse nicht festgestellt werden. Dies ist vermutlich Folge der geringen Hangneigung – im Schnitt $\alpha = 4,9^\circ$ und maximal $\alpha = 14,6^\circ$ – im Untersuchungsgebiet. Die Anzahl der Befahrungen scheint im Untersuchungsgebiet mit dem Grad der Verdichtung einherzugehen. Die Literatur ist bei der Bewertung des Einflusses der Anzahl der Befahrungen auf die Bodenverdichtung uneinig. NEMESTOTHY (2015) und SCHÄFFER (2002) führen an, dass die erste Befahrung den größten Schaden verursacht, sofern die nachfolgenden Belastungen mit dem gleichen Gewicht erfolgen. Hingegen führen HENDRISON (1990) und SITKEI (1971) an, dass die Verdichtung mit der Anzahl der Befahrungen ansteigt.

So lässt sich letztendlich die Verdichtung nicht auf einen einzelnen Parameter zurückführen. Es ist davon auszugehen, dass alle aufgeführten Parameter bei der Befahrung einen Einfluss haben (BLUME et al., 2016; LÜSCHER et al., 2010). Vorzustellen ist, dass ein steiler Standort mit einem gröberen Boden weniger verdichtungsanfällig ist als ein flacher Standort mit sehr feinem Boden (LÜSCHER et al., 2010). Dieser Zusammenhang deckt sich mit den Korrelationsanalysen. Der beschriebene Zusammenhang trifft neben der Hangneigung auch auf die Anzahl der Befahrungen zu. Ein wichtiger Parameter, der sich auf die Verdichtung bei Befahrung auswirken kann, ist die Bodenfeuchte. Hierbei gilt der Grundsatz: Je feuchter der Boden ist, desto gravierender sind die Folgen der Befahrung (LÜSCHER et al., 2010; NEMESTOTHY, 2015; BRUNOTTE, 2007).

Anzumerken ist, dass die Verdichtung der Rückegasse auf Lockerbraunerden mit bis zu 54 % (im Schnitt 17 %) zum Teil sehr stark ausfällt. Die Lagerungsdichten der Fahrspur können jedoch zum Großteil nach AD-HOC-AG BODEN (2005) noch als gering bis mittel eingestuft werden. Somit scheint es, dass die Befahrung, selbst bei ungünstigen Bedingungen, relativ geringe Folgen hat. Dennoch gehen als Folge der Verdichtung die positiven ökologischen Eigenschaften der Lockerbraunerde – geringe Lagerungsdichte, hohes Porenvolumen – verloren. Zusätzlich verringert sich die Infiltrationskapazität. Folglich kann bei starken Niederschlagsereignissen Oberflächenabfluss und damit verbunden, Bodenerosion entstehen.

Eine wichtige Eigenschaft von Böden mit andic-Eigenschaften gilt es dabei zu beachten: Thixotropie. Bei Böden mit Thixotropie kann „[...] unter Druck oder beim Zerreiben [ein] Wechsel des Bodenmaterials vom plastisch-festen Zustand in einen verflüssigten Zustand und

zurück [erflogen].“ (IUSS WORKING GROUP WRB, 2007, S. 45). Für die Proben der untersuchten RG konnte bei der Durchführung der Fingerprobe Thixotropie beobachtet werden. Ob sich der Boden bei Befahrung ähnlich verhält und der Zustand des Bodens sich verändert, gilt es durch weitere Untersuchungen herauszufinden. Sofern dies der Fall ist, stellt eine Befahrung auch bei sonst günstigen Bedingungen ein bodenökologisches Risiko dar.

Der Schutz des Bodens wird in Deutschland durch das Bundes-Bodenschutzgesetz geregelt. „Zweck dieses Gesetzes ist es, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen.“ (BBODSCHG, 2017, S. 303). Ziel ist es, unter anderem schädliche Bodenveränderungen und Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen zu vermeiden (BBODSCHG, 2017).

In diesem Sinne sollte bei einer Befahrung immer darauf geachtet werden, die Schäden am Boden, auch im wirtschaftlichen Interesse, so gering wie möglich zu halten. Schutzmaßnahmen, wie die in Kapitel 4.4 aufgeführten, können vorbeugend zum Schutz des Bodens durchgeführt werden. Des Weiteren empfiehlt es sich, vor jeder Fahrt die Befahrbarkeit des Bodens zu testen. Beispielsweise durch den von BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2012) empfohlenen Wurftest (vgl. Kapitel 4.2.1).

6. QUELLEN

- AG BODEN – AD-HOC-ARBEITSGRUPPE DER STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTE UND DER BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND [Hrsg.] (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Schweizerbart, Stuttgart.
- AGERER, M.S. (2009): Belastungsarten – Technische Mechanik. Online unter: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/festigkeitslehre/155-belastungsarten> (Eingesehen am 27.02.2019)
- AGRARMETEROLOGIE RHEINLAND-PFALZ (2019): Wetterstation Grenzau. Online unter: <http://www.am.rlp.de/Internet/AM/NotesAM.nsf/amweb/e856257cd5b37a8dc1257171002e8a31?OpenDocument>. (Eingesehen am 07.01.2019).
- AMAN, S., SCHÄFER, J., WILPERT, K. (2009): Heterogenität von Bodenbelüftung und Bodenstrukturierung in Fichtenbeständen Oberschwabens. – In: Walderschließung und Bodenschutz, Bodenverformung Erosion Hochwasserschutz, Freiburg. S. 71 – 82
- ARBEITSKREIS STANDORTKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG. [Hrsg.](2003): Forstliche Standortaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 6. Auflage. IHW, München.
- ARNOLD G. (2018): Fingerprobe zur Bestimmung der Bodenarten in Anlehnung an DIN 19682-2 und KA5. Online unter www.gd.nrw.de/zip/bo_Bestimmungsschluesel-Bodenart.pdf. (09.07.2018).
- BACHMANN, J., HORN, R., PETH, S. (2014): Einführung in die Bodenphysik. 4. Auflage. Schweizbart, Stuttgart
- BARTSCH, N., RÖHRIG, E. (2016): Waldökologie. Einführung für Mitteleuropa. 1. Auflage. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg.
- BAUSINGER T., CHRIST T. (2003): Statistische Verfahren in der Geographie: Quantitative Methoden. 2. Auflage. Mainzer Skript zum Geographiestudium, Mainz.
- BAYERISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT [Hrsg.] (2012): Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. – In: Merkblatt 22. Jg. 2012, Nr. 12. S. 1 – 4.
- BBODSCHG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG 1998). – BGBl. I S. 502 idF der Bekanntmachung vom 17. März 1998, zuletzt geändert durch Artikel 101 Zehnte ZuständigkeitsanpassungsVO vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474)
- BIWER J. (2018): Persönliches Gespräch im Gelände. 16 August 2018. – Bendorf
- BIWER J. (2018): Telefonate im August und September 2018. – Bendorf
- BIWER J. (2019): Persönliches Gespräch. 18 Januar 2019. – Hillscheid

- BLUME, H.-P. [Hrsg.] (2004): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und -belastung Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 3. Auflage. ecomed Biowissenschaften, Landsberg am Lech
- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G.W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETSCHMAR, R., STAHR, K., WILKE, B.-M. (2016): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg.
- BLUME, H.-P., HORN, R., THIELE-BRUHN, S. [Hrsg.] (2011): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung Vorbeugen und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim
- BLUME, H.P., STAHR, K., LEINWEBER P. (2011): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Auflage Spektrum. Heidelberg
- BODENER, G. (2012): Die Bedeutung der Wurzel für die Leistung der Zwischenfruchtbegrünung im Boden- und Grundwasserschutz. – In: 3. Umweltökologisches Symposium. Wirkung von Maßnahmen zu, Boden und Gewässerschutz, 2012, S. 73 – 79
- BOGAARD, P., SCHMINCKE, H.-U. (1973): The Eruptive Center of the Late Quaternary Laacher See Tephra. Online unter: https://www.researchgate.net/publication/252354045_The_eruptive_center_of_the_late_Quaternary_Laacher_See_tephra/download (Eingesehen am 15.01.2019)
- BORSIUS F. (2011): SPSS 19. 1. Auflage. Mitp, Heidelberg München Landsberg Frechen Hamburg.
- BRUNOTTE, J. (2007): Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtung, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft. Braunschweig.
- BURGGRAAFF, P., KLEEFLED, K.-D. (1998): Historische Kulturlandschaft und Kulturlandschaftselemente. – In: Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) Angewandte Landschaftsökologie, Bonn-Bad Godesberg. Heft 20
- CRAMER, B., (2006): Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. Dissertation der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn.
- ELIASSON, L. (2005): Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. *Silva Fennica* 39(4): 549-557.
- ENDERLING, M. (2019): Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Titel noch nicht bekannt, Universität Koblenz Landau, Campus Koblenz, Fachbereich
- EZZATI, S., NAJAFI, A., RAB, M.A., ZENNER, E.K. (2012): Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran. – In: *Silva Fennica*, 46(4): 521–538.

- FISCHER F. (1991): Vegetationsgeographische Untersuchungen auf der Kannenbäcker Hochfläche. Ein Beitrag zur „Naturräumlichen Gliederung Deutschlands. – In: Koblenzer Geographisches Kolloquium. Jg. 13, Sonderheft.
- FREY, B. (2010): Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen. – In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 2010, Jg. 161, Heft 12, S. 498 – 503.
- FROELICH, H.A. (1979): Soil compaction from logging equipment: Effects on growth of young ponderosa pine. – In: Journal of Soil and Water, Conservation, 1979, Jg. 34, Heft 6, S. 276 – 278
- GAERTIG, T., GREEN, K. (2009): Die Waldbodenvegetation als Wegweiser für Bodenstrukturstörungen. – In: Walderschließung und Bodenschutz, Bodenverformung Erosion Hochwasserschutz, Freiburg. S. 71 – 82
- GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER, P. [Hrsg.] (2011): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. 2. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- GISI, U., SCHENKER, R., SCHULIN, R., STADELMANN, F.X., STICHER, H. (1997): Bodenökologie. 2. Auflage. Thieme, Stuttgart, New York
- GRAAFEN, R. (2006): Bimsgewinnung und Bimsbaustoffindustrie im Mittelrheinischen Becken. – In: GRAAFEN, R., KÖNIG, D. [Hrsg.] (2019): Das Rheinische Schiefergebirge in den Exkursionsgebieten Eifel, Hunsrück, Mittelrheinisches Becken, Oberes Mittelrheintal, Westerwald und Taunus. Koblenz. S. 23 – 29.
- GREGORY, P.J. (2006): Plant Roots. Growth, Activity and Interaction with Soils. 1. Auflage, Blackwell Publishing, Oxford
- GROH, I. (2019): Unveröffentlichte Bachelorarbeit mit dem Titel: Veränderung der ökologischen Standorteigenschaften von Oberböden nach Bimsabbau auf Andosol-Standorten im nördlichen Rheinland-Pfalz – Ein multimodaler Ansatz unter Verwendung von Feldkartierung, Laboranalytik, GIS und Interpolationsmethoden, Universität Koblenz Landau, Campus Koblenz, Fachbereich 3
- GRÜNWARD, R. (2019): Test auf Normalverteilung: Shapiro Wilk Test SPSS. Online unter: <https://novustat.com/statistik-glossar/test-auf-normalverteilung-shapiro-wilk-test-spss.html>. (Eingesehen am: 10.01.2019)
- HAHN, J., OPP, J. (2011): Böden verstehen – Böden nutzen – Böden fit machen. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG 2011, Berlin, September 2011.
- HAMBERGER, J. (2003): Wie Mechanisierung und Umweltvorsorge die Forstwirtschaft veränderten. – In: LWF aktuell 39, S. 33 – 36.
- HAMPICKE, U. (2013): Kulturlandschaft und Naturschutz. Probleme – Konzepte – Ökonomie. 1. Auflage. Springer Fachmedien. Wiesbaden
- HARTGE, K.H., HORN, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. Auflage. Schweizbart, Stuttgart

- HARTZ, A., WENDL, P., SCHNIEDERMEIER, L. (2013): Konkretisierung der landesweiten bedeutsamen historischen Kulturlandschaften zur Festlegung, Begründung und Darstellung von Ausschlussflächen und Restriktionen für den Ausbau der Windenergienutzung. Online unter: https://mdi.rlp.de/fileadmin/isim/Unsere_Themen/Landesplanung_Abteilung_7/Landesplanung/KuLa_RLP_Fachgutachten_A1_KuLa-Entw._25Juli2013.pdf. (Eingesehen am 10.01.2019)
- HAUBRICH, H. (1970): Morphologische Studien im Niederwesterwald. Beitrag zur tertiären und quartären Entwicklungsgeschichte Beiheft 1 Beiträge zur Landespflege in Rheinland-Pfalz
- HENDRISON, J. (1990): Damage-controlled logging in managed tropical rain forest in Suriname. Dissertation der Wagening Agricultural University
- HENN, R.C.A. (2019): Unveröffentlichte Bachelorarbeit mit dem Arbeitstitel: Einfluss des Bimsabbaus auf die Lagerungsdichte der Böden des Bendorfer Forst und Maßnahmen zur Verbesserung des Standorts, Universität Koblenz Landau, Campus Koblenz, Fachbereich 3
- HEUBAUM, F. (2015): Bodenscherfestigkeit auf Rückegassen. – In: Forst & Technik. Jg. 2015 Nr. 8. S. 18 – 22.
- HEUBAUM, F. (o.J.): Bodenschutz im Staatsbetrieb Sachsenforst. Projekt zur Technologieerprobung. Online unter: https://www.sbs.sachsen.de/download/Bodenschutz_Projekte_2015_09_30.pdf (Eingesehen am: 04.03.2019)
- HOFBAUER, G. (2016): Vulkanismus in Deutschland. 1. Auflage, Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt.
- HITTENBECK, J. (2013): Estimation of trafficable grades from traction performance of a forwarder. – In: Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 34(1), 71-81.
- IUSS WORKING GROUP WRB (2007): World Reference Base for Soil Resources 2006. Erstes Update 2007. Deutsche Ausgabe. – Übersetzt von Peter Schad. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- JARITZ, G. (1967): Ein Vorkommen von Imogolit in Bimsböden Westdeutschlands. – In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Jg. 117, Heft 1, S. 65 – 77.
- KORBACH, H. (1980): Rechtsverordnung über das Naturschutzgebiet „Tongrube Hüttwohl“. Bezirksregierung Koblenz. Online unter: natureschutz.rlp.de/Dokumente/rvo/nsg/pdf/NSG-7137-049.pdf. (Eingesehen am 11.01.2019).
- KREBS, R., EGLI, M., SCHULIN, R., TOBIAS, S. [Hrsg.] (2017): Bodenschutz in der Praxis. 1. Auflage, utb, Stuttgart
- KREMER, J., SCHARDT, M. (2007): Vergleich der Bogiebänder Eco-Track und Eco-Baltic. – In: LWF aktuell Jg. 59, S. 3 – 5.
- KOMATSU FOREST GMBH (2016): Komatsu 845. Bodenschonender Holztransport bei maximaler Produktivität. Online unter: <https://www.komatsuforest.de/forstmaschinen/forwarder/845> (Eingesehen am 27.02.2019)

- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ [Hrsg] (2002): Bodenkarte von Rheinland-Pfalz 1:25.000, Blatt 5511 Bendorf, Mainz.
- LANDESAMT FÜR UMWELT, WASSERWIRTSCHAFT UND GEWERBEAUF SICHT RHEINLAND-PFALZ [Hrsg.] (2010): Naturräumliche Gliederung von Rheinland-Pfalz. Liste der Naturräume. Online unter: https://lfu.rlp.de/fileadmin/lfu/Naturschutz/Dokumente/naturraum_tabelle.pdf. (Eingesehen am 10.03.2019)
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND PFALZ [Hrsg.] (2015): Hydrogeologische Kartierung des Westerwaldkreis. Online unter: <https://www.edoweb-rlp.de/resource/edoweb:7004916/data>. (Eingesehen am 10.01.2019)
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND PFALZ [Hrsg.] (2019): Steckbrief von Rohstoff und Erden in Rheinland-Pfalz. Online unter: http://www.lgb-rlp.de/fileadmin/service/lgb_downloads/rohstoffe/steckbriefe_-_charakteristik_rheinland-pfaelzischer_steine_und_erden.pdf. (Eingesehen am 06.02.2019)
- LEINZ, G. (2015): Zur Geschichte der Stadt Bendorf am Rhein, mit den Stadtteilen: Bendorf, Sayn, Mülhofen und Stromberg. Gesellschaft für Geschichte und Heimatkunde. Online unter: <http://www.bendorf-geschichte.de/index.htm>. (Eingesehen am 09.01.2019).
- LIEBSCHER, H.-J. (2019): Hortonscher Landoberflächenabfluss. Online unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/hortonscher-landoberflaechenabfluss/7119>. (Eingesehen am 22.01.2019)
- LÜSCHER, P. (2010): Bodenveränderungen und Typisierung von Fahrspuren nach physikalischer Belastung. – In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 2010, Jg. 161, Heft 12, S. 504 – 509.
- LÜSCHER, P., FRUTIG, F., SCIACCA, S., SPJEVAK, S., THEES, O. (2010): Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. – In: Merkblatt Praxis, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 45, 2010
- LOOSE, J., ZANDER, J. (2005): Neue Wege der Flächenermittlung in der Forstwirtschaft. GIS und GPS im Wald. – In: LWF aktuell, 2005, Heft 50, S. 28 – 30.
- MATTHIES, D. (2009): Forsttechnik unter Druck, Waldböden setzen noch schwereren Maschinen Grenzen – eine Ursachenanalyse. – In: LWF aktuell. Jg. 2009, Nr 68. S. 47 – 49.
- MÜCKENHAUSEN, E., DE LEENHEER, L. (1966): Bodentypen und Bodenarten. – In: Abrahamczik, E. et al. [Hrsg] Boden und Düngemittel. Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung. 1. Auflage, Springer, Vienna
- MURER, E. (2009): Bericht über die Überprüfung der Anwendbarkeit von Modellen zur Beurteilung der Bodenverdichtung. Bundesamt für Wasserwirtschaft Österreich, Wien.
- NEMESTOTHY, N. (2009): Boden unter Druck – sind Bodenschutz und Holzernte vereinbar? – In: BFW-Praxisinformation. Jg. 2009, Nr. 19. S. 9 – 13.
- NEMESTOTHY, N. (2015): Bedeutung der Bodenverdichtung für Ertrag und Nachhaltigkeit. – In: BFW-Praxisinformation. Jg. 2015, Nr. 39. S. 8 – 13.

- OBERER, F. (2011): Kurz aber mobil. – In: Wald und Holz 2011, Jg. 92, Heft 11, S. 36 – 37.
- OHLIG, P. P. (1951): „Heimat in vergangenen Tagen“. – In: Zur Frühgeschichte der Stadt Bendorf. Online unter: <http://www.bendorf-geschichte.de/bdf-0013.htm>. (Eingesehen am 11.01.2019)
- OKRUSCH, M., MATTHES, P. (2014): Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 9. Auflage. Spektrum, Berlin, Heidelberg
- PADBERG, A., HEUBAUM, F. (2015): Praxisprojekte zur bodenschonenden Holzernte auf befahrungssensiblen Standorten. Online unter: https://www.sbs.sachsen.de/download/sbs/02_Padberg_Heubaum_Bodenschonende_Holzernte.pdf. (Eingesehen am 15.01.2019)
- PARK, C., SCHMINCKE, H.-U. (2009): Apokalypse im Rheintal. – In: Spektrum der Wissenschaft, Jg. 2009, Heft 2, S. 78 – 87.
- PÖHLER, J. (2019): Unveröffentlichte Bachelorarbeit mit dem Arbeitstitel: Messung und Modellierung anthropogen veränderter Bodenerodierbarkeit auf von Bimsabbau betroffenen Forststandorten im nördlichen Rheinland-Pfalz, Universität Koblenz Landau, Campus Koblenz, Fachbereich 3
- PREUßISCHE GEOLOGISCHE LANDESANSTALT [Hrsg] (1927): Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern 1:25.000, Blatt 3215 Bendorf, Berlin.
- PURLE, T. (2015): Steine und Minerale. Bims Mineralien-Steckbrief. Online unter: <http://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=3&l=B&name=Bims>. (Eingesehen am 06.02.2019)
- PÜTZ R. (2003): Statistische Methoden in der Geographie. Mainzer Skripten zum Geographiestudium, Mainz.
- RIGGERT, R., FLEIGE, H., KIETZ, B., GAERTIG, T., HORN, R. (2013): Einfluss von üblichen Forst- und Spezialmaschinen auf die Bodenstruktur und -Stabilität. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DGB 2015, Rostock, September 2013.
- SABEL, K.-J., FISCHER, E. (1992): Boden und vegetationsgeographische Untersuchungen im Westerwald. (Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D - Physische Geographie, Bd. 7). Frankfurt am Main. 2. Auflage
- SAKAI, H., NORDFJELL, T., SUADICANI, K., TALBOT, B., BØLLEHUUS, E. (2008): Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. – In: Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 2008, Jg. 29, Heft 1, S. 15 – 27.
- SCHÄFFER, J. (2002): Befahren von Waldböden – ein Kavaliersdelikt? – In: Der Waldwirt, Jg. 29, Heft 12, S. 21-23
- SCHARFSTEIN, H. (2019): Der Wald unsere Heimat. Online unter: <http://www.bendorf-geschichte.de/bdf-0226.htm>. (Eingesehen am 10.01.2019)
- SCHORN, S. (2019): Mineralien – Fossilienatlas: Grube Werner. Online unter: <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Deutschland/Rheinland-Pfalz/Mayen-Koblenz-Kreis/Bendorf/Grube%20Werner>. (Eingesehen am 10.01.2019)

- SIEWERS, U. (2019): Auf den Spuren des Bims. Online unter: <http://www.osteifel-aktiv.de/41527/619501.html>. (Eingesehen am 04.02.2019)
- SITKEI, G. (1971): Bodenverdichtung bei den Schlepper- und Bodenbearbeitungsarbeiten. Lehrstuhl für Landmaschinenbau, Technische Universität Budapest
- SKUBSKI, M. (2019): Unveröffentlichte Bachelorarbeit mit dem Titel: Auswirkung des Bimsabbaus in Waldeinzugsgebieten auf den dezentralen Wasserrückhalt. Eine kleinräumige Analyse der Infiltrationspotenziale von Andosolen im nördlichen Rheinland-Pfalz, Universität Koblenz Landau, Campus Koblenz, Fachbereich 3
- SPÖRLEIN, P., JONECK, M. (2003): Methodvalidierung. Korngrößenbestimmung mittel Köhn und Sedigraph. Bayrisches Geologisches Landesamt. Online unter: www.lfu.bayern.de/boden/bodenschutzgesetz/zielsetzung/doc/bericht_validierung. (Eingesehen am 08.01.2019)
- STADTVERWALTUNG BENDORF (2019): Römerturm auf dem Pulverberg. Online unter www.bendorf.de/tourismus-kultur/sehenswuerdigkeiten/welterbe-limes-mit-roemerturm/. (Eingesehen am 09.01.2019).
- STADTVERWALTUNG BENDORF (2019): Die Wanderwege. Online unter: <https://www.bendorf.de/tourismus-kultur/wandern-und-klettern/>. (Eingesehen am 09.01.2019).
- STADTVERWALTUNG BENDORF (2019): Radwege. Online unter: <https://www.bendorf.de/tourismus-kultur/radwege/>. (Eingesehen am 09.01.2019).
- STEGMAN, S. (2019): Unveröffentlichte Bachelorarbeit mit dem Titel: Physikalische Modellierung von Erosionsprozessen auf durch Bimsabbau gekennzeichneten Flächen, Universität Koblenz Landau, Campus Koblenz, Fachbereich 3
- UNESCO-WELTERBESTÄTTEN DEUTSCHLAND E.V. (2019): Grenzen des Römischen Reiches – Obergermanisch-raetischer Limes. Online unter: <https://welterbedeutschland.de/grenzen-des-roemischen-reiches-obergermanisch-raetischer-limes/>. (Eingesehen am 22.01.2019)
- URLBERGER, A. (2012): Bauen mit Bimsstein: Pro und Contra. Online unter: <https://www.bau-plus.de/post/24107/bauen-mit-bimsstein-pro-und-contra> (Eingesehen am 06.02.2019)
- WILPERT, K. (2001): Waldböden – Grundlage für die Multifunktionalität von Wäldern. Online unter: https://www.waldwissen.net/wald/boden/fva_waldboden_multifunktion/fva_waldboden_multifunktion.pdf. (Eingesehen am 10.01.2019)
- WILPERT, K., SCHÄFFER, J. (2004): Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. 125: 129-138

7. ANHANG

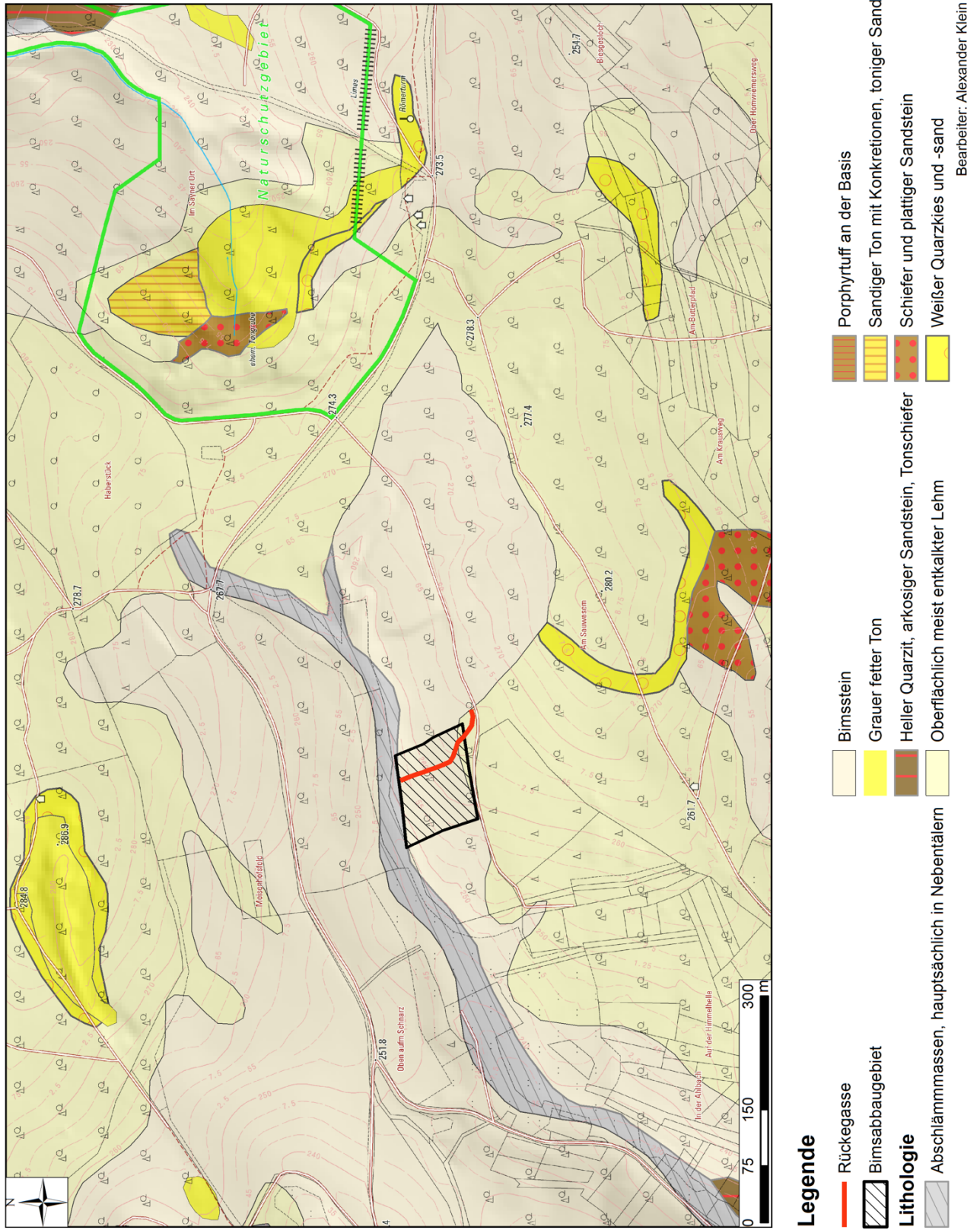


Abbildung 2, Geologische Karte des Untersuchungsgebiets, Kartengrundlage: Geologische Karte von Preußen und benachbarten Ländern, Preußische Geologische Landesanstalt, Blatt 3215 – Bendorf, 1927



Abbildung 3, Bimsreste einer Bodenprobe, eigene Aufnahme 2019



Abbildung 4, Detailaufnahme Bims, eigene Aufnahme 2019

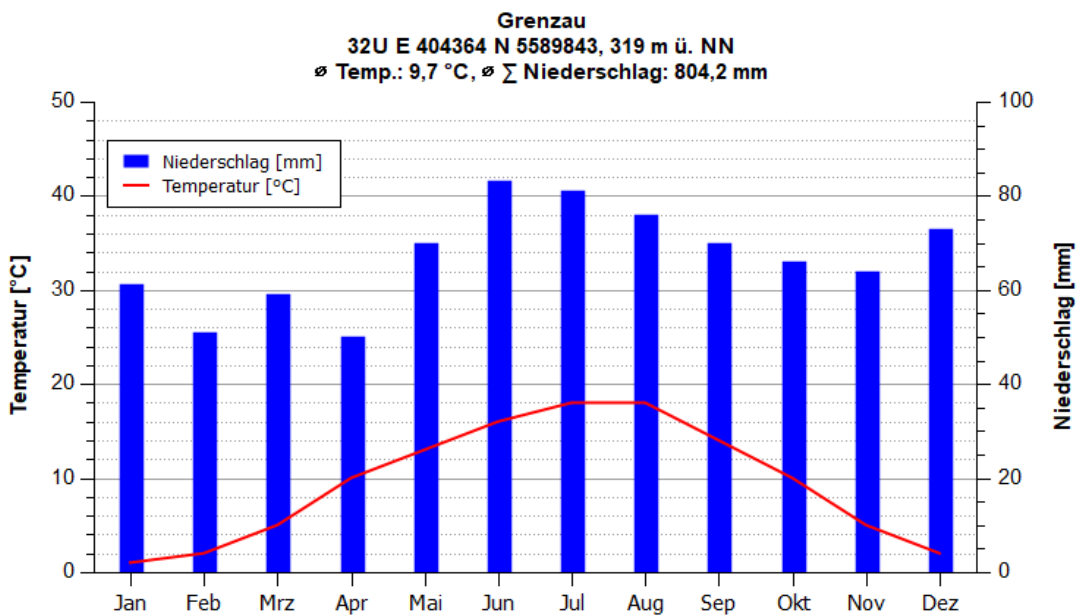
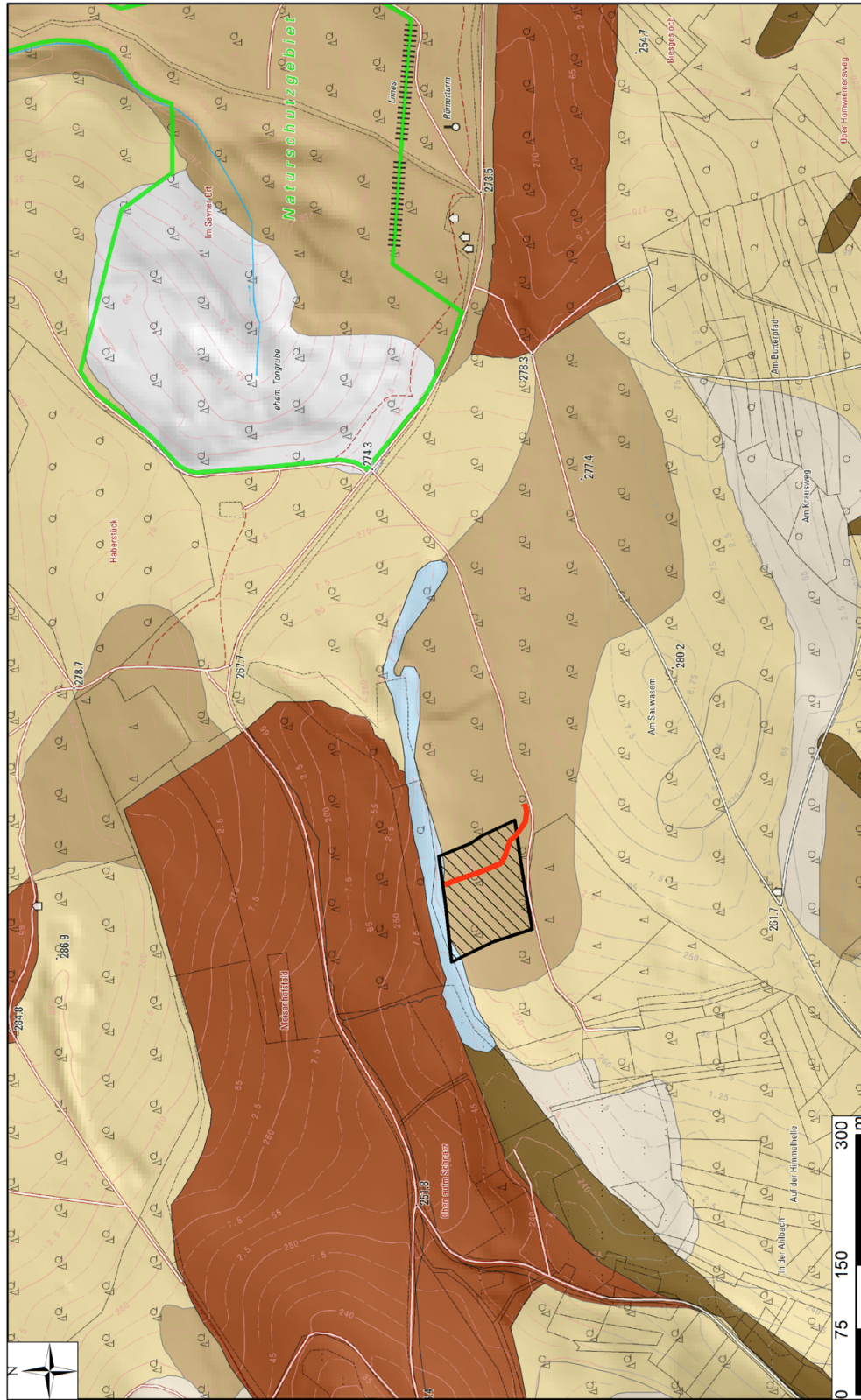


Abbildung 6, Klimadiagramm Grenzau,
 Datengrundlage: AGRARMETEOROLOGIE RHEINLAND-PFALZ, 2018



Legende

- Rückegasse
- ▨ Bimsabbaugebiet
- Regosol
- Gley
- Kolluvisol
- erodierte Braunerde
- Abgrabungs- und Aufschüttungsflächen
- Braunerde
- Lockerbraunerde

Bearbeiter: Alexander Klein

Abbildung 7, Bodenkarte des Untersuchungsgebiets,
 Kartengrundlage: Bodenkarte von Rheinlad-Pfalz 1:25:000, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Blatt
 5511 – Bendorf, 2002



Abbildung 8, Bimsabbau im Untersuchungsgebiet (14.11.2018), eigene Aufnahme 2018



Abbildung 10, a) Blick von Transekt 3 Richtung Norden (Transekt 2), b) Blick von Transekt 10 Richtung Norden (Transekt 9); eigene Aufnahme, 2018

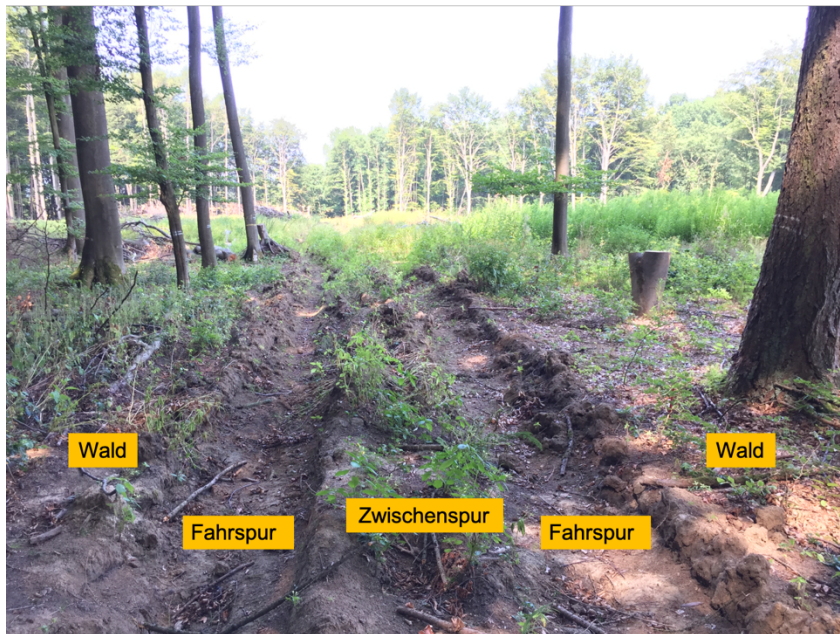


Abbildung 13, Kategoriebeschriftung eines Transekt (13), Blick Richtung Transekt 12, eigene Aufnahme, 2018



Abbildung 14, Kontrolle der Abstände des Maßbands, eigene Aufnahme 2018



Abbildung 15, Über Transekt 7 gespanntes Maßband, die blauen dünnen Pfeile markieren die Bodennägel, die schwarzen dicken das gespannte Maßband, eigene Aufnahme 2018

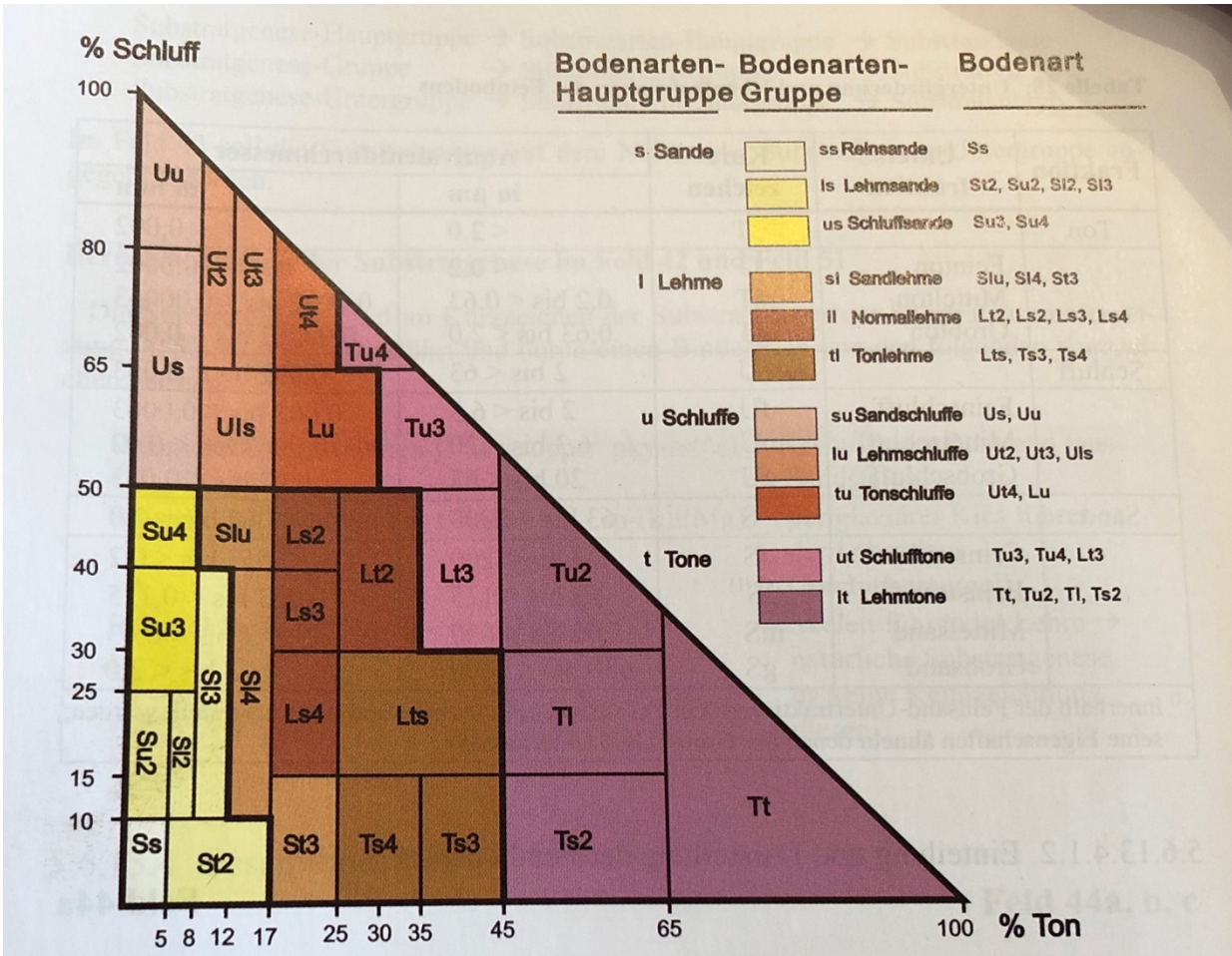


Abbildung 18, Bodenartendreieck (Ad-Hoc-AG BODEN, 2005)

Tabella 1, Vollständige Messergebnisse

Transakt	Datum	Koordinat	Titel	Position	Breite	Tiefe	tiefe	Coaxial	Feuchtweg	Feuchtweg	Trockengewicht	Trockengewicht	Wasser	Relative	Lagerung	Grobbodenanteil	relativer	relativer	relativer	Bodenart		
		genauigkeit		[m]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	brutto [g]	netto [g]	brutto [g]	netto [g]	[g]	Bochleuchte	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[%]			
1	25.07.19	5588181	D01268	1	Wald links	30	-180	-46,5	2,54	103,07	100,53	76,54	74	26,53	26	0,74	74	90	38	40	SI1	
				2	Wald links	30	-180	-76,5	2,98	107,92	105,36	82,05	79,49	25,87	25	0,79	25	0,79	79	91	25	SI2
				3	Wald links	30	-180	-106,5	3,42	112,77	110,21	87,12	84,56	26,72	26	0,82	26	0,82	82	93	37	SI3
				4	Wald links	120	-30	-136,5	3,86	117,62	115,06	92,97	90,41	27,56	27	0,85	27	0,85	85	95	50	SI4
				5	Zwischenspur	210	0	-220	2,69	108,86	106,30	84,44	81,88	26,92	26	0,82	26	0,82	82	95	80	SI5
				6	Zwischenspur	210	0	-320	2,69	96,64	94,08	74,37	71,81	22,27	22	0,74	22	0,74	74	88	63	SI6
				7	Faunspur rechts	330	120	-27,5	2,56	135,11	132,55	96,52	93,96	38,59	37	0,94	37	0,94	94	52	22	SI7
				8	Faunspur rechts	330	120	-57,5	2,56	115,86	113,30	86,24	83,68	29,62	28	0,84	28	0,84	84	63	59	SI8
				9	Wald recht	440	230	-118	2,97	126,65	124,09	91,95	89,39	34,7	33	0,89	33	0,89	89	47	7	SI9
				10	Wald recht	440	230	-148	2,97	116,69	114,12	86,17	83,61	28,52	27	0,86	27	0,86	86	53	21	SI10
				2	11.08.19	5588172	D01170	86	Wald links	10	-260	-87,81	5,67	87,81	85,25	84,77	83,4	23,04	23	0,59	83,4	86
87	Wald links	10	-260					-117,81	5,68	104,47	101,91	85,73	84,15	24,42	23	0,60	23	0,60	60	36	30	SI2
88	Wald links	10	-260					-147,81	5,69	121,13	118,57	91,59	90,01	25,80	24	0,61	24	0,61	61	36	30	SI3
89	Wald links	10	-260					-177,81	5,70	137,79	135,23	97,94	96,36	27,09	26	0,62	26	0,62	62	51	20	SI4
90	Wald links	10	-260					-207,81	5,71	154,45	151,89	104,30	102,72	28,47	27	0,63	27	0,63	63	54	12	SI5
91	Wald links	180	-90					-102,0	5,72	97,04	95,46	82,04	80,46	35	34	0,56	34	0,56	56	47	18	SI6
92	Faunspur links	180	-90					-132,0	5,73	113,70	112,12	98,50	96,92	36,88	35	0,57	35	0,57	57	44	8	SI7
93	Faunspur links	180	-90					-162,0	5,74	130,36	128,78	104,94	103,36	38,76	37	0,58	37	0,58	58	47	2	SI8
94	Faunspur links	180	-90					-192,0	5,75	147,02	145,44	111,18	109,60	40,64	39	0,59	39	0,59	59	48	2	SI9
95	Faunspur links	180	-90					-222,0	5,76	163,68	162,10	117,42	115,84	42,52	41	0,60	41	0,60	60	44	3	SI10
3	25.07.19	5588161	D01274					101	Zwischenspur	270	0	-37,0	5,59	93,41	91,83	87,82	86,24	27,88	27	0,60	86,24	90
				102	Zwischenspur	270	0	-67,0	5,60	110,07	108,49	94,18	92,60	28,76	27	0,61	27	0,61	61	44	3	SI2
				103	Faunspur rechts	360	90	-40	5,61	126,73	125,15	99,42	97,84	30,58	29	0,62	29	0,62	62	44	3	SI3
				104	Faunspur rechts	360	90	-70	5,62	143,39	141,81	105,66	104,08	32,46	31	0,63	31	0,63	63	44	3	SI4
				105	Faunspur rechts	360	90	-100	5,63	160,05	158,47	111,90	110,32	34,34	33	0,64	33	0,64	64	44	3	SI5
				106	Wald recht	500	230	-120	5,64	176,71	175,13	118,14	116,56	36,22	35	0,65	35	0,65	65	44	3	SI6
				107	Wald recht	500	230	-150	5,65	193,37	191,79	124,38	122,80	38,10	37	0,66	37	0,66	66	44	3	SI7
				108	Wald recht	500	230	-180	5,66	210,03	208,45	130,62	129,04	39,98	38	0,67	38	0,67	67	44	3	SI8
				109	Wald recht	500	230	-210	5,67	226,69	225,11	136,86	135,28	41,86	40	0,68	40	0,68	68	44	3	SI9
				110	Wald recht	500	230	-240	5,68	243,35	241,77	143,10	141,52	43,74	42	0,69	42	0,69	69	44	3	SI10
				4	15.08.19	5588151	D01277	111	Wald links	40	-200	-9,5	2,61	86,89	84,28	72,16	70	17,73	17	0,70	70	95
112	Wald links	40	-200					-39,5	2,62	103,55	100,94	88,42	85,81	22,74	21	0,71	21	0,71	71	29	29	SI2
113	Faunspur links	150	-90					-69,5	2,63	120,82	118,21	104,46	101,85	27,61	26	0,72	26	0,72	72	29	29	SI3
114	Faunspur links	150	-90					-99,5	2,64	138,09	135,48	120,73	118,12	32,61	31	0,73	31	0,73	73	29	29	SI4
115	Wald links	10	-240					-129,5	3,05	123,4	120,79	94,94	92,33	30,56	29	0,74	29	0,74	74	100	34	SI5
116	Faunspur links	150	-100					-159,5	3,46	139,66	137,05	106,66	104,05	35,61	34	0,75	34	0,75	75	100	34	SI6
117	Faunspur links	150	-100					-189,5	3,87	155,92	153,31	122,88	120,27	40,66	39	0,76	39	0,76	76	94	53	SI7
118	Faunspur links	150	-100					-219,5	4,28	172,18	169,57	139,16	136,55	45,71	44	0,77	44	0,77	77	99	71	SI8
119	Faunspur links	150	-100					-249,5	4,69	188,44	185,83	155,44	152,83	50,76	49	0,78	49	0,78	78	94	68	SI9
120	Faunspur links	150	-100					-279,5	5,10	204,70	202,09	171,72	169,11	55,81	54	0,79	54	0,79	79	94	68	SI10
5	26.07.19	5588143	D01280					121	Zwischenspur	250	0	-40	5,53	96,93	94,32	84,81	83,23	28,58	27	0,73	83,23	98
				122	Zwischenspur	250	0	-70	5,54	113,59	110,98	91,05	89,47	29,46	28	0,74	28	0,74	74	98	61	SI2
				123	Zwischenspur	250	0	-100	5,55	130,25	127,64	97,22	95,64	30,34	29	0,75	29	0,75	75	98	61	SI3
				124	Zwischenspur	250	0	-130	5,56	146,91	144,30	103,49	101,91	31,22	30	0,76	30	0,76	76	98	61	SI4
				125	Faunspur rechts	350	100	-160	5,57	163,57	160,96	109,78	108,20	32,10	31	0,77	31	0,77	77	98	61	SI5
				126	Faunspur rechts	350	100	-190	5,58	180,23	177,62	126,06	124,48	32,98	31	0,78	31	0,78	78	98	61	SI6
				127	Faunspur rechts	350	100	-220	5,59	196,89	194,28	142,44	140,86	33,86	32	0,79	32	0,79	79	98	61	SI7
				128	Faunspur rechts	350	100	-250	5,60	213,55	210,94	158,80	157,22	34,74	33	0,80	33	0,80	80	98	61	SI8
				129	Faunspur rechts	350	100	-280	5,61	230,21	227,60	175,16	173,58	35,62	34	0,81	34	0,81	81	98	61	SI9
				130	Faunspur rechts	350	100	-310	5,62	246,87	244,26	191,52	189,94	36,50	35	0,82	35	0,82	82	98	61	SI10

Fortsetzung Tabelle 1

Transekt	Datum	Koordinaten + genauigkeit	Tüte	Position	Breite [cm]	Breite referenziert [cm]	Tiefe [cm]	Tiefe referenziert [cm]	Gewicht Tüte [g]	Feuchtgewicht brutto [g]	Feuchtgewicht netto [g]	Trockengewicht brutto [g]	Trockengewicht netto [g]	Wassergehalt [g]	Relative Bodenfeuchte [%]	Lagerungsdichte [g/cm ³]	Relativer Grobbodenanteil [%]	relativer Feinbodenanteil [%]	relativer Sandanteil [%]	relativer Schluffanteil [%]	relativer Tonanteil [%]	Bodenart				
6	10.08.18	5588135 0401283	2,3 3		60 Wald links	10	-230	0	-12,5	5,61	111,77	106,16	90,44	84,83	21,33	20	0,85	12	88	37	40	11	Su			
					61 Wald links	10	-230	-29	-41,5	5,6	111,55	105,95	97,8	92,2	83,75	13	30	0,92	3	97	55	22	20	Ls4		
					62 Fahrspar links	160	-80	0	-39,0	5,63	130,87	125,24	101,79	96,16	29,08	23	0,96	27	5,73	46	74	4	4	22	Ss4	
					63 Fahrspar links	160	-80	-29	-68,0	5,55	104,56	99,01	84,41	88,86	10,15	4	10	0,89	20	80	74	4	2	2	Ss	
					64 Zwischenspur	240	0	0	0,0	5,57	117,32	111,75	104,91	99,34	12,41	11	10,94	13	30	0,99	13	87	37	20	30	Ls
					65 Zwischenspur	240	0	-30	-30,0	5,55	130,11	124,56	109,54	103,99	20,57	17	16,4	6	94	1,04	6	94	50	7	38	Ls3
7	10.08.18	5588125 0401287	2,3 3		66 Fahrspar rechts	360	120	0	-48,0	5,55	150,91	145,36	121,25	115,7	29,66	20	1,16	3	87	53	22	13	13	Ss4		
					67 Fahrspar rechts	360	120	-30	-78,0	5,64	141,59	135,95	123	117,36	18,59	14	1,17	3	87	63	24	10	10	Ss3		
					68 Wald recht	500	260	0	-27,0	5,69	101,71	96,02	86,9	81,21	14,81	15	0,81	18	82	25	47	10	10	Uls		
					69 Wald recht	500	260	-30	-57,0	5,66	113,36	107,71	93,78	88,12	19,58	18	0,88	7	93	49	47	7	37	37	Ls3	
					70 Wald links	20	-250	0	-19,0	5,61	81,82	76,21	62,91	57,3	18,91	15	0,63	17	83	25	53	20	8	8	Ss3	
					71 Wald links	20	-250	-30	-49,0	5,7	71,59	65,89	56,7	54	11,89	18	0,54	41	59	45	10	4	4	4	Ss2	
8	10.08.18	5588116 0401291	1,8 3		72 Fahrspar links	170	-100	0	-41,0	5,72	135,97	130,25	112,89	107,17	23,08	18	1,07	20	72	38	5	29	29	Ls3		
					73 Fahrspar links	170	-100	-30	-71,0	5,78	98,49	93	68,49	62,71	30,29	33	0,63	39	61	56	3	2	2	Ss		
					74 Zwischenspur	270	0	0	-8,0	5,76	128,69	122,93	112,53	106,77	16,16	13	1,07	10	95	40	43	12	12	Su		
					75 Zwischenspur	270	0	-30	-38,0	5,64	130,11	124,56	109,54	103,99	20,57	17	16,4	6	94	1,04	6	94	50	7	38	Ls3
					76 Fahrspar rechts	360	90	0	-36,5	5,71	119,88	114,17	98,68	92,97	21,2	11	10,94	13	30	0,99	13	87	37	20	30	Ls3
					77 Fahrspar rechts	360	90	-28	-64,5	5,75	93,66	87,91	80,57	74,82	13,09	15	0,75	23	77	24	50	3	26	26	Ls2	
9	07.08.18	5588112 0401298	2,3 3		78 Wald recht	480	230	0	-25,5	5,71	102,91	97,2	88,77	83,06	14,14	15	0,83	25	75	49	19	8	8	Ss3		
					79 Wald recht	480	230	-31	-56,5	5,59	81,37	75,78	59,9	54,31	21,47	28	0,54	41	59	54	3	1	1	Ss		
					80 Wald links	30	-230	0	-9,5	5,54	95,17	89,63	89,33	83,79	5,84	7	0,84	17	83	25	33	25	33	25	Ls2	
					81 Wald links	30	-230	-30	-39,5	5,74	83,33	77,59	69,69	64,81	13,29	17	0,65	18	82	35	37	3	3	3	Ss	
					82 Wald links	30	-230	-21	-30,5	5,72	94,37	88,65	77,14	71,42	17,23	30	0,54	43	57	53	6	11	11	11	Su	
					83 Fahrspar links	150	-110	0	-38,0	5,67	100,76	95,09	87,48	81,81	13,28	14	0,82	20	80	42	6	36	38	11	11	Su
10	07.08.18	5588109 0401307	2,3 3		84 Fahrspar links	150	-110	0	-13,0	5,78	82,81	77,15	66,88	61,37	13,28	14	0,48	23	77	46	19	11	11	Ss4		
					85 Zwischenspur	260	0	0	-13,0	5,78	82,81	77,15	66,88	61,37	13,28	14	0,48	23	77	46	19	11	11	11	Ss4	
					86 Zwischenspur	260	0	-29	-42,0	5,79	86,12	82,33	66,88	61,37	13,28	14	0,77	16	84	55	21	8	8	8	Ss3	
					87 Zwischenspur	260	0	-29	-42,0	5,79	86,12	82,33	66,88	61,37	13,28	14	0,77	16	84	55	21	8	8	8	Ss3	
					88 Fahrspar rechts	350	90	0	-40,5	5,67	120,57	114,9	105,17	99,5	15,4	13	1,00	13	87	26	50	11	11	11	Uls	
					89 Fahrspar rechts	350	90	-30	-70,5	5,67	89,48	83,91	55,44	50,1	33,99	40	0,50	60	40	37	2	1	1	1	1	Ss
11	16.08.18	5588106 0401317	2,3 3		90 Wald recht	470	210	0	-26,0	5,49	72,51	67,02	53,38	47,89	19,13	29	0,48	35	65	43	16	7	7	Ss3		
					91 Wald recht	470	210	-28	-54,0	5,59	92,38	86,79	75	69,41	17,38	20	0,69	21	79	50	26	3	3	3	Su3	
					92 Wald links	20	-220	0	-26,0	5,64	75,83	70,19	61,24	55,6	14,59	21	0,56	20	80	52	20	8	8	8	Ss3	
					93 Wald links	20	-220	-29	-55,0	5,63	109,14	103,51	84,23	78,6	24,91	24	0,79	4	96	60	7	29	29	29	Ls4	
					94 Fahrspar links	140	-100	0	-35,0	5,69	158,43	152,74	126,67	120,98	31,76	24	1,21	6	94	50	7	38	38	38	Ls3	
					95 Fahrspar links	140	-100	-30	-65,0	5,72	94,03	88,31	67,09	61,37	26,94	31	0,61	30	70	56	12	2	2	2	Su2	
11	16.08.18	5588106 0401317	2,3 3		96 Zwischenspur	240	0	0	-10,5	5,71	74,45	68,74	55,79	50,08	18,66	27	0,50	35	65	42	16	7	7	Ss3		
					97 Zwischenspur	240	0	-30	-40,5	5,65	118,56	112,91	94,61	88,96	23,95	21	0,89	8	92	48	7	37	37	Ls3		
					98 Fahrspar rechts	350	110	0	-48,5	5,59	162,29	156,7	129,57	123,88	32,72	21	1,24	8	92	48	7	37	37	Ls3		
					99 Fahrspar rechts	350	110	-30	-78,5	5,58	91,73	86,15	72,62	67,04	39,11	45	0,47	68	42	39	2	1	1	1	Ss	
					100 Wald recht	480	240	0	-27,5	5,61	127,55	121,94	104,88	99,27	22,67	19	0,99	27	73	25	33	15	15	15	Ls2	
					101 Wald recht	480	240	-30	-57,5	5,62	132,81	127,19	101,38	95,76	31,43	25	0,96	6	94	41	33	20	20	20	Ls3	
11	16.08.18	5588106 0401317	2,3 3		102 Wald links	10	-240	0	-17,0	5,68	113,78	108,1	81,54	75,86	33,24	30	0,76	22	78	47	19	11	11	Ss4		
					103 Wald links	10	-240	-30	-47,0	5,72	147,74	141,02	114,71	107,99	30,03	23	1,08	5	95	50	7	38	38	38	Ls3	
					104 Fahrspar links	130	-120	0	-43,0	5,7	118,5	112,8	81,52	75,82	42,68	36	0,76	36	64	42	16	6	6	6	Ss3	
					105 Fahrspar links	130	-120	-31	-74,0	5,57	144,3	138,73	109	103,43	35,3	25	1,03	24	76	32	34	10	10	10	Su	
					106 Zwischenspur	250	0	0	-12,0	5,66	149,23	143,57	121,47	115,81	17,46	19	1,16	33	67	25	5	2	2	2	Ls2	
					107 Zwischenspur	250	0	-30	-42,0	5,64	120,56	114,92	100,21	94,57	20,35	18	0,95	20	80	48	20	12	12	12	Ss4	
11	16.08.18	5588106 0401317	2,3 3		108 Fahrspar rechts	340	90	0	-39,0	5,65	158,27	152,62	131,25	125,6	27,02	18	1,26	8	92	48	7	37	37	Ls3		
					109 Fahrspar rechts	340	90	-30	-69,0	5,71	78,75	73,04	51,52	45,81	27,23	37	0,46	61	39	36	2	1	1	1	Ss	
					110 Wald recht	460	210	0	-8,5	5,78	93,8	88,02	76,24	70,46	17,56	20	0,70	24	76	32	34	9	9	9	Su	
					111 Wald recht	460	210	-28	-36,5	5,69	109,88	104,19	81,64	75,86	18,24	18	0,86	8	92	28	28	53	12	12	12	Uls

Transakt	Datum	Koordinaten + Genauigkeit	Title	Position	Breite referenziert [cm]	Tiefe referenziert [cm]	Tiefe [cm]	Gewicht Tüte [g]	Feuchtwicht brutto [g]	Feuchtwicht netto [g]	Trockengewicht brutto [g]	Trockengewicht netto [g]	Wassergehalt [g]	Relative Bodenfeuchte [%]	Legerungs-dichte [g/cm ³]	Relativer Grobbonenanteil [%]	Relativer Feinbonenanteil [%]	relativer Sandanteil [%]	relativer Schluffanteil [%]	relativer Tonanteil [%]	Bodenart				
12	20.08.18	32U 0401323 5588098	199	Wald links	10	-200	0	5,37	116,17	116,17	104,66	98,29	16,88	15	0,99	30	70	37	5	28	18,3				
			200	Wald links	10	-200	0	5,37	116,17	116,17	104,66	98,29	16,88	15	0,99	30	70	37	5	28	18,3				
			201	Wald links	10	-200	0	5,37	116,17	116,17	104,66	98,29	16,88	92,26	86,79	13,64	14	0,87	6	95	50	7	38	18,3	
			202	Wald links	10	-200	0	5,37	116,17	116,17	104,66	98,29	16,88	92,26	86,79	13,64	14	0,87	6	95	50	7	38	18,3	
			203	Wald links	10	-200	0	5,37	116,17	116,17	104,66	98,29	16,88	92,26	86,79	13,64	14	0,87	6	95	50	7	38	18,3	
			204	Fahrspur links	150	-60	0	-41,5	5,72	88,2	87,28	87,28	51,65	45,97	36,51	44	0,46	57	40	40	17	3	53	18,3	
			205	Fahrspur links	150	-60	0	-41,5	5,72	88,2	87,28	87,28	51,65	45,97	36,51	44	0,46	57	40	40	17	3	53	18,3	
			206	Fahrspur links	150	-60	0	-41,5	5,72	88,2	87,28	87,28	51,65	45,97	36,51	44	0,46	57	40	40	17	3	53	18,3	
			207	Fahrspur links	150	-60	0	-41,5	5,72	88,2	87,28	87,28	51,65	45,97	36,51	44	0,46	57	40	40	17	3	53	18,3	
			208	Fahrspur links	150	-60	0	-41,5	5,72	88,2	87,28	87,28	51,65	45,97	36,51	44	0,46	57	40	40	17	3	53	18,3	
			209	Fahrspur links	150	-60	0	-41,5	5,72	88,2	87,28	87,28	51,65	45,97	36,51	44	0,46	57	40	40	17	3	53	18,3	
			210	Zwischenspur	210	0	-44,5	5,63	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19
			211	Zwischenspur	210	0	-44,5	5,63	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19
			212	Zwischenspur	210	0	-44,5	5,63	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19	119,19
			213	Fahrspur rechts	350	140	0	-58,0	5,44	72,8	72,8	72,8	44,21	33,77	24,88	14	0,43	129	89	89	31	41	19	15,2	
			214	Fahrspur rechts	350	140	0	-58,0	5,44	72,8	72,8	72,8	44,21	33,77	24,88	14	0,43	129	89	89	31	41	19	15,2	
			215	Fahrspur rechts	350	140	0	-58,0	5,44	72,8	72,8	72,8	44,21	33,77	24,88	14	0,43	129	89	89	31	41	19	15,2	
			216	Fahrspur rechts	350	140	0	-58,0	5,44	72,8	72,8	72,8	44,21	33,77	24,88	14	0,43	129	89	89	31	41	19	15,2	
			217	Fahrspur rechts	350	140	0	-58,0	5,44	72,8	72,8	72,8	44,21	33,77	24,88	14	0,43	129	89	89	31	41	19	15,2	
			218	Fahrspur rechts	350	140	0	-58,0	5,44	72,8	72,8	72,8	44,21	33,77	24,88	14	0,43	129	89	89	31	41	19	15,2	
			219	Fahrspur rechts	350	140	0	-58,0	5,44	72,8	72,8	72,8	44,21	33,77	24,88	14	0,43	129	89	89	31	41	19	15,2	
			220	Wald recht	560	350	0	-42,0	5,39	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61
221	Wald recht	560	350	0	-42,0	5,39	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61			
222	Wald recht	560	350	0	-42,0	5,39	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61	97,61			
223	Wald links	20	-230	0	-18,0	5,56	92,91	92,91	92,91	78,66	73,1	14,25	16	0,73	16	84	54	21	8	3	S13				
224	Wald links	20	-230	0	-18,0	5,56	92,91	92,91	92,91	78,66	73,1	14,25	16	0,73	16	84	54	21	8	3	S13				
225	Fahrspur links	160	-90	0	-46,5	5,63	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12			
226	Fahrspur links	160	-90	0	-46,5	5,63	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12			
227	Fahrspur links	160	-90	0	-46,5	5,63	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12			
228	Zwischenspur	250	0	0	0,0	5,72	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92			
229	Zwischenspur	250	0	0	0,0	5,72	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92			
230	Zwischenspur	250	0	0	0,0	5,72	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92	105,92			
231	Fahrspur rechts	370	120	0	-46,0	5,66	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24			
232	Fahrspur rechts	370	120	0	-46,0	5,66	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24			
233	Fahrspur rechts	370	120	0	-46,0	5,66	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24	153,24			
234	Wald recht	480	230	0	-24,0	5,5	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28			
235	Wald recht	480	230	0	-24,0	5,5	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28			
236	Wald recht	480	230	0	-24,0	5,5	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28			
237	Wald recht	480	230	0	-24,0	5,5	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28			
238	Wald recht	480	230	0	-24,0	5,5	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28	108,28			
239	Wald links	10	-220	0	-5,0	5,63	92,42	92,42	92,42	76,79	70,23	64,6	12,19	16	0,65	30	70	22	45	3	U5				
240	Wald links	10	-220	0	-5,0	5,63	92,42	92,42	92,42	76,79	70,23	64,6	12,19	16	0,65	30	70	22	45	3	U5				
241	Fahrspur links	160	-90	0	-46,0	5,63	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12			
242	Fahrspur links	160	-90	0	-46,0	5,63	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12			
243	Fahrspur links	160	-90	0	-46,0	5,63	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12	137,12			
244	Zwischenspur	230	0	-4,5	5,67	94	88,33	88,33	88,33	81,64	75,97	12,36	14	0,76	21	75	25	52	3	U5					
245	Zwischenspur	230	0	-4,5	5,67	94	88,33	88,33	88,33	81,64	75,97	12,36	14	0,76	21	75	25	52	3	U5					
246	Zwischenspur	230	0	-4,5	5,67	94	88,33	88,33	88,33	81,64	75,97	12,36	14	0,76	21	75	25	52	3	U5					
247	Fahrspur rechts	360	130	0	-30,4	5,63	128,74	128,74	128,74	123,11	112,69	40,76	16,05	13	1,07	20	38	39	39	39	13,3				
248	Fahrspur rechts	360	130	0	-30,4	5,63	128,74	128,74	128,74	123,11	112,69	40,76	16,05	13	1,07	20	38	39	39	13,3					
249	Fahrspur rechts	360	130	0	-30,4	5,63	128,74	128,74	128,74	123,11	112,69	40,76	16,05	13	1,07	20	38	39	39	13,3					
250	Fahrspur rechts	360	130	0	-30,4	5,63	128,74	128,74	128,74	123,11	112,69	40,76	16,05	13	1,07										

Tabelle 2, Spannbreite der Korngröße der einzelnen Bodenarten nach AD-HOC-AG BODEN (2005) und berechnete Mittelwerte

Mittelwerte der Korngröße der einzelnen Bodenarten					Spannbreite nach AD-HOC AG BODEN (2005)			
Kürzel	Bodenart	∅ Sand %	∅ Schluff %	∅ Ton %	Schluff		Ton	
					min.	max.	min.	max.
S / Ss	Sand	92,5	5,0	2,5	0,0	10,0	0,0	5,0
Sl2	schwach lehmiger Sand	76,0	17,5	6,5	10,0	25,0	5,0	8,0
Sl3	lehmiger Sand	65,0	25,0	10,0	10,0	40,0	8,0	12,0
Sl4	stark lehmiger Sand	60,5	25,0	14,5	10,0	40,0	12,0	17,0
Slu	schluffig-lehmiger Sand	42,5	45,0	12,5	40,0	50,0	8,0	17,0
St2	schwach toniger Sand	84,0	5,0	11,0	0,0	10,0	5,0	17,0
St3	toniger Sand	71,5	7,5	21,0	0,0	15,0	17,0	25,0
Su2	schwach schluffiger Sand	80,0	17,5	2,5	10,0	25,0	0,0	5,0
Su3	schluffiger Sand	63,5	32,5	4,0	25,0	40,0	0,0	8,0
Su4	stark schluffiger Sand	51,0	45,0	4,0	40,0	50,0	0,0	8,0
U / Uu	Schluff	6,0	90,0	4,0	80,0	100,0	0,0	8,0
Uls	sandig-lehmiger Schluff	30,0	57,5	12,5	50,0	65,0	8,0	17,0
Us	Sandiger Schluff	31,0	65,0	4,0	50,0	80,0	0,0	8,0
Ut2	schwach toniger Schluff	11,0	79,0	10,0	65,0	93,0	8,0	12,0
Ut3	toniger Schluff	8,5	77,0	14,5	65,0	89,0	12,0	17,0
Ut4	stark toniger Schluff	5,0	74,0	21,0	65,0	83,0	17,0	25,0
Ls2	schwach sandiger Lehm	34,0	45,0	21,0	40,0	50,0	17,0	25,0
Ls3	sandiger Lehm	44,0	35,0	21,0	30,0	40,0	17,0	25,0
Ls4	stark sandiger Lehm	56,5	22,5	21,0	15,0	30,0	17,0	25,0
Lt2	schwach toniger Lehm	30,0	40,0	30,0	30,0	50,0	25,0	35,0
Lt3	toniger Lehm	20,0	40,0	40,0	30,0	50,0	35,0	45,0
Lts	sand-toniger Lehm	42,5	22,5	35,0	15,0	30,0	25,0	45,0
Lu	schluffiger Lehm	19,0	57,5	23,5	50,0	65,0	17,0	30,0
T / Tt	Ton	0,0	17,5	82,5	0,0	35,0	65,0	100,0
Tl	lehmiger Ton	22,5	22,5	55,0	15,0	30,0	45,0	65,0
Ts2	schwach sandiger Ton	37,5	7,5	55,0	0,0	15,0	45,0	65,0
Ts3	sandiger Ton	52,5	7,5	40,0	0,0	15,0	35,0	45,0
Ts4	stark sandiger Ton	62,5	7,5	30,0	0,0	15,0	25,0	35,0
Tu2	schwach schluffiger Ton	2,5	42,5	55,0	30,0	55,0	45,0	65,0
Tu3	schluffriger Ton	5,0	57,5	37,5	50,0	65,0	30,0	45,0
Tu4	stark schluffiger Ton	0,0	70,0	30,0	65,0	75,0	25,0	35,0

Tabelle 3, Klassifizierung der Hangneigung nach AD-HOC-AG BODEN (2005) sowie ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2003)

Neigung		Bezeichnung	Stufe	Klassifizierung	Transekte
[°]	[%]				
< 1	< 2	nicht geneigt	Hnk 0	Flachlagen	8; 9 6; 7; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16
1 bis < 2	2 bis < 3,5	sehr schwach geneigt	Hnk 1		
2 bis < 5	3,5 bis < 9	schwach geneigt	H2k 2		
5 bis < 10	9 bis < 18	mittel geneigt	Hnk 3	Hanglagen	4; 5 1; 2; 3
10 bis < 15	18 bis < 27	stark geneigt	Hnk 4		
15 bis < 20	27 bis < 36	sehr stark geneigt	Hnk 5		
20 bis > 30	36 bis > 58	steil	Hnk 6		

Tabelle 4, Test auf Normalverteilung

	Gesamter Datensatz	Wald gesamt	Fahrspur gesamt	ZS gesamt	Gesamt 0 cm	Gesamt 30 cm	Wald 0 cm	Wald 30 cm	Fahrspur 0 cm	Fahrspur 30 cm
Lagerungsdichte	0,000	0,044	0,000	0,000	0,090	0,000	0,324	0,869	0,075	0,137
Bodenfeuchte	0,000	0,014	0,046	0,161	0,737	0,046	0,486	0,541	0,959	0,032
rel. Grobboden	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,091	0,000	0,002	0,004
rel. Feinboden	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,091	0,000	0,002	0,004
rel. Sand	0,011	0,131	0,059	0,053	0,035	0,052	0,034	0,058	0,057	0,148
rel. Schluff	0,000	0,001	0,000	0,004	0,000	0,000	0,069	0,006	0,001	0,001
rel. Ton	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,001	0,101	0,304	0,000

	Wald flach	Wald steil	Fahrspur flach	Fahrspur steil	ZS flach	ZS steil	Wald wenig	Wald viel	Fahrspur wenig	Fahrspur viel
Lagerungsdichte	0,680	0,202	0,023	0,159	0,861	0,556	0,392	0,943	0,184	0,005
Bodenfeuchte	0,000	0,078	0,000	0,019	0,000	0,072	0,604	0,000	0,250	0,000
rel. Grobboden	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
rel. Feinboden	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
rel. Sand	0,098	0,302	0,673	0,510	0,066	0,243	0,319	0,164	0,524	0,307
rel. Schluff	0,004	0,192	0,000	0,002	0,021	0,046	0,089	0,005	0,000	0,000
rel. Ton	0,001	0,094	0,000	0,001	0,011	0,336	0,014	0,003	0,000	0,001



Abbildung 20, Blick von Transekt 8 auf Richtung Transekt 7, die untersuchte RG verläuft rechts, geradeaus verläuft eine weitere RG, eigene Aufnahme 2018



Abbildung 35, Verwendeter Stechzylinder, eigene Aufnahme 2018



Abbildung 37, Forwarder des Typs Komatsu 845, eigene Aufnahme 2018

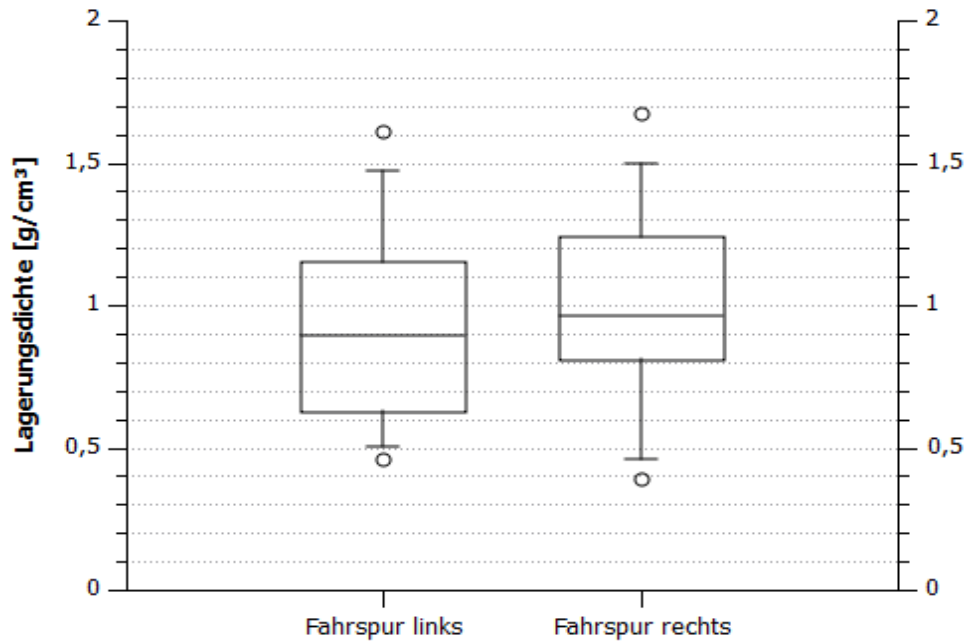


Abbildung 38, Lagerungsdichte der Fahrspur links und rechts, Angegeben sind: Min/Max (°); Median (Mittelinie); Q₂₅/Q₇₅ (Box); Q₁₀/Q₉₀ (Whisker)

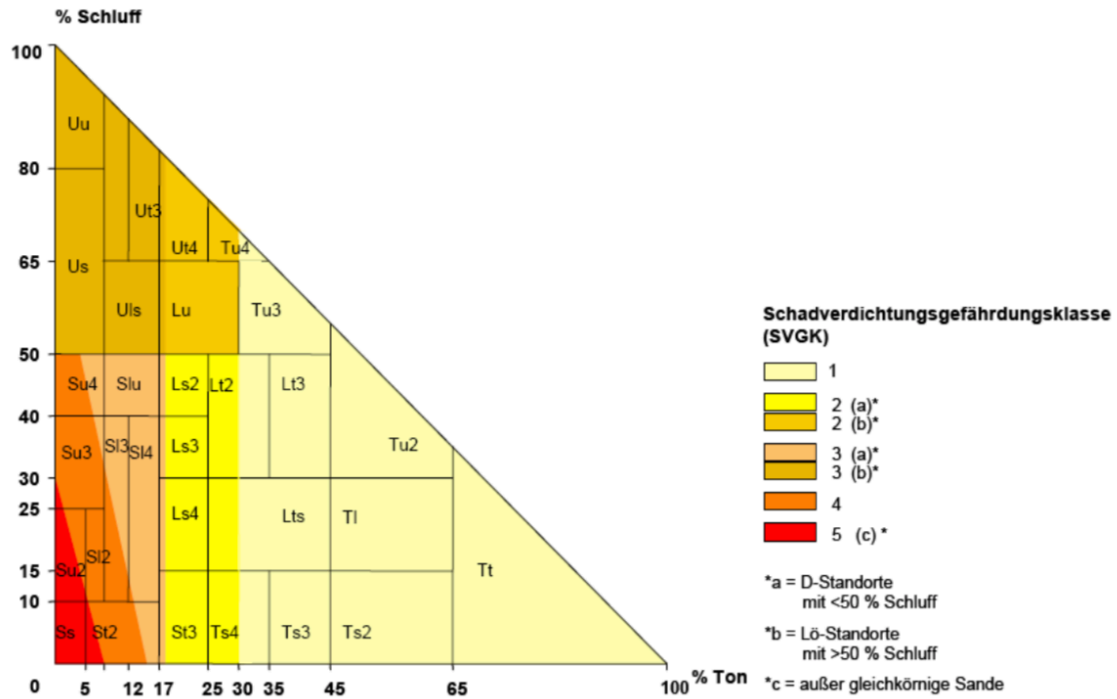


Abbildung 39, Schadverdichtungsgef6hrdungsklasse (MURER, 2009)

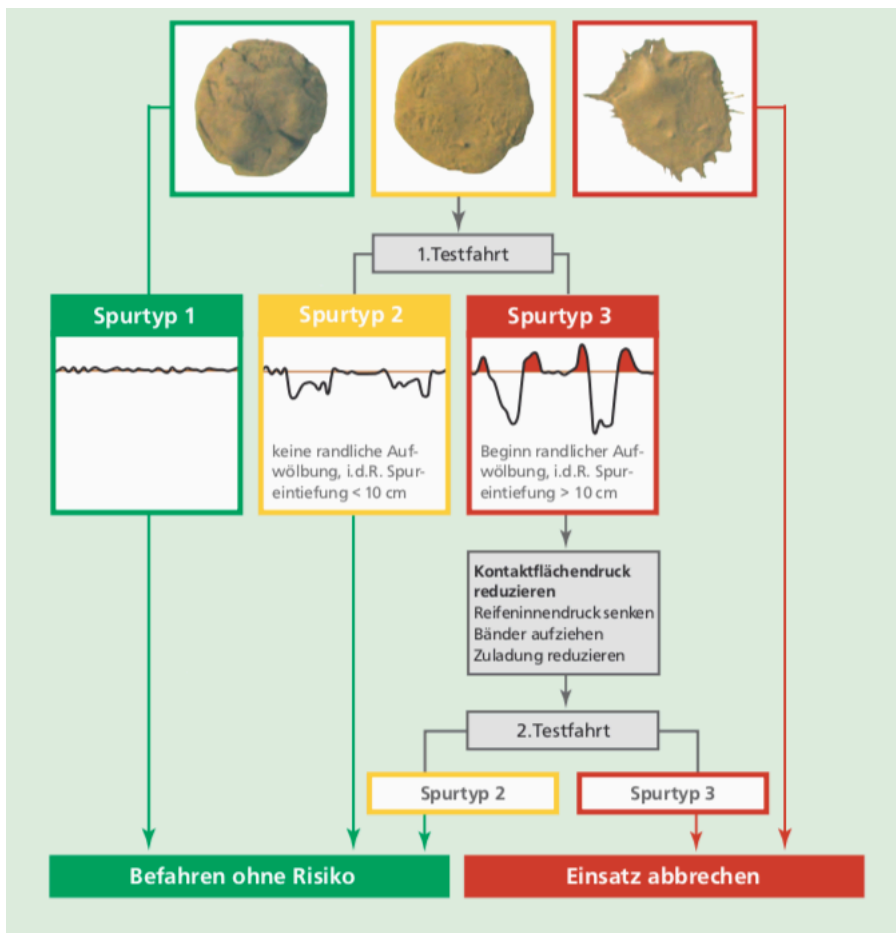


Abbildung 42, Wurftest (BAYERISCHEN LANDESANSTALT F6R WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2010)



Legende

Tiefe des anstehenden Bims unter EOF

- | | | |
|----------------|----------------|------------------|
| bis 30 cm | 45,1 bis 60 cm | 70,1 bis 90 cm |
| 30,1 bis 45 cm | 60,1 bis 70 cm | tiefer als 90 cm |

- Probenpunkte
- Rückegasse
- Bimsabbaugebiet

Bearbeiter: Alexander Klein

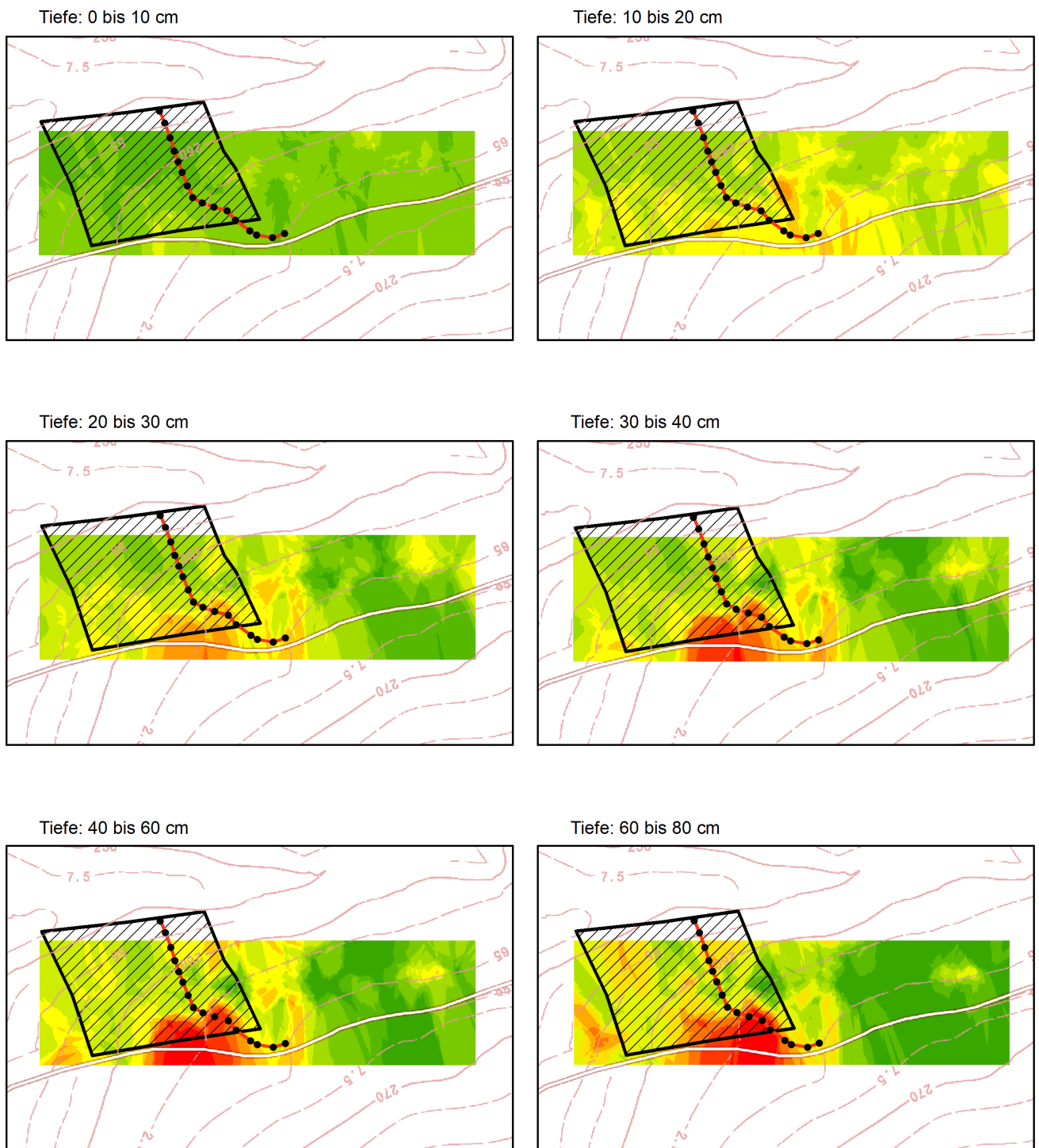
Abbildung 43, Interpolierte Tiefe des Bims unter der EOF
 Kartengrundlage: DTK 1:25.000 ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP 2018, dl-de/by-2-0, <http://www.lvermgeo.rlp.de>



Abbildung 44, Unterschiedliche Bismmächtigkeit, eigene Aufnahme 2018

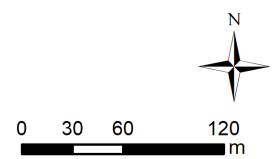
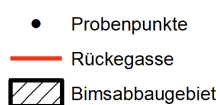
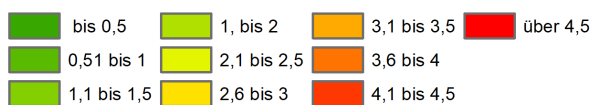
Tabelle 24, Oberflächendaten der Transekte

Transektt	1		2		3		4		5		6		7		8	
	Breite [cm]	gemessene Oberfläche [cm ²]	Breite referenziert [cm]	referenzierte Oberfläche [cm ²]	Breite referenziert [cm]	gemessene Oberfläche [cm ²]	Breite referenziert [cm]	referenzierte Oberfläche [cm ²]	Breite referenziert [cm]	gemessene Oberfläche [cm ²]	Breite referenziert [cm]	gemessene Oberfläche [cm ²]	Breite referenziert [cm]	gemessene Oberfläche [cm ²]	Breite referenziert [cm]	gemessene Oberfläche [cm ²]
0	-210	60	-270	23,5	-240	8	-250	18,5	-260	24,5	-270	33,5	-280	24,5	-290	6
10	-270	38,5	-330	22	-340	8	-350	18,5	-360	22	-370	22,5	-380	16	-390	16
20	-180	58,5	-240	32	-250	8,5	-260	18	-270	23,5	-280	31,5	-290	21,5	-300	21,5
30	-180	55,5	-240	32	-250	8,5	-260	18	-270	23,5	-280	31,5	-290	21,5	-300	21,5
40	-170	55,5	-230	35	-240	12	-250	18,5	-260	24,5	-270	31,5	-280	24,5	-290	19
50	-160	48	-220	34,5	-230	10,5	-240	20	-250	25	-260	31	-270	31	-280	22,5
60	-140	52	-200	20	-210	5,5	-220	20	-230	24	-240	25	-250	20	-260	25,5
70	-140	52	-200	20	-210	5,5	-220	20	-230	24	-240	25	-250	20	-260	25,5
80	-130	53	-190	19,5	-200	6	-210	17	-220	18	-230	16,5	-240	16,5	-250	30
90	-120	50,5	-180	23,5	-190	8	-200	15,5	-210	18	-220	16,5	-230	16,5	-240	30
100	-110	57,5	-170	20	-180	8	-190	15,5	-200	8,5	-210	16	-220	16	-230	41
110	-100	56	-160	23	-170	10	-180	21	-190	7,5	-200	24	-210	17	-220	46
120	-90	57	-150	27,5	-160	35	-170	22,5	-180	26	-190	36	-200	35	-210	49
130	-80	55	-140	34,5	-150	38	-160	38	-170	35	-180	44,5	-190	44,5	-200	50,5
140	-70	54	-130	36	-140	40,5	-150	47	-160	36	-170	44,5	-180	44,5	-190	49
150	-60	52	-120	38,5	-130	42	-140	45,5	-150	45	-160	51	-170	47	-180	41
160	-50	42,5	-110	41	-120	41	-130	45,5	-140	44	-150	51	-160	47	-170	34
170	-40	39,5	-100	35	-110	41	-120	42	-130	32	-140	40	-150	34	-160	42,5
180	-30	39,5	-90	39	-100	41	-110	41,5	-120	42	-130	40	-140	34	-150	44
190	-20	35	-80	40,5	-90	38,5	-100	38,5	-110	33,5	-120	37	-130	34	-140	44
200	-10	29	-70	42	-80	42,5	-90	38	-100	36	-110	37	-120	35	-130	44,5
210	0	31	-60	40,5	-70	42	-80	38	-90	36	-100	37	-110	35	-120	44,5
220	10	32,5	-50	39	-60	40,5	-70	41	-80	41	-90	49	-100	49	-110	47
230	20	31,5	-40	30,5	-50	35	-60	15	-70	39,5	-80	45	-90	49	-100	34
240	30	30,5	-30	28,5	-40	30,5	-50	15	-60	35	-70	45	-80	45	-90	19
250	40	28,5	-20	27,5	-30	29,5	-40	18	-50	35	-60	45	-70	45	-80	19
260	50	28,5	-10	26,5	-20	29,5	-30	21	-40	30	-50	45	-60	45	-70	19
270	60	30	0	30	-10	23	-20,5	20	-30	15,5	-40	30	-50	30	-60	22
280	70	30,5	10	28,5	-10	23	-20,5	20	-30	15,5	-40	30	-50	30	-60	22
290	80	33	20	20,5	-20	16,5	-14	30	-17,5	-10	23	17,5	-45	10	17,5	20,5
300	90	36	30	14,5	-30	17,5	-14	40	-22,5	-21	0	23	-15,5	20	13	40
310	100	36	40	13	-40	39,5	-37	50	-38	-21	10	21,5	-14	60	16	40
320	110	37	50	28	-50	42,5	-40	60	-43	-41,5	20	24,5	-17	70	37	40
330	120	38,5	60	41	-60	42,5	-40	70	-45	-43,5	30	30,5	-23	80	37	40
340	130	35	70	41,5	-70	46	-43,5	80	-47,5	-46	40	41,5	-34	90	46	40
350	140	32,5	80	41,5	-80	47	-44,5	90	-47,5	-46	40	41,5	-34	100	50	40
360	150	31	90	41	-90	46	-43,5	100	-47,5	-46	40	41,5	-34	110	50	40
370	160	26,5	100	39,5	-100	45	-42,5	110	-45,5	-44	70	50	-42,5	120	51,5	40
380	170	21	110	42	-110	44	-41,5	120	-43	-44	130	51,5	-48	130	51,5	40
390	180	14	120	40	-120	40	-37,5	130	-41	-43	140	48,5	-45	140	48,5	40
400	190	19	130	38	-130	38	-34,5	140	-36	-38,5	150	31,5	-28	150	31,5	40
410	200	18,5	140	26	-140	35	-31,5	150	-28,5	-31,5	160	29,5	-26	160	29,5	40
420	210	18,5	150	27,5	-150	33,5	-29	160	-27	-30,5	170	16	-22	170	16	40
430	220	20	160	22	-160	31,5	-26	170	-24	-27,5	180	9,5	-19	180	9,5	40
440	230	18	170	22	-170	29,5	-24	180	-22	-25,5	190	9	-18,5	190	9	40
450	240	15	180	20	-180	28,5	-22	190	-20	-23,5	200	19	-15,5	200	19	40
460	250	15	190	29,5	-190	26	-20,5	200	-18	-21,5	210	24,5	-21	210	24,5	40
470	260	11	200	28,5	-200	24	-17,5	210	-16	-19,5	220	32	-23,5	220	32	40
480	270	9	210	27,5	-210	22	-15,5	220	-14,5	-17,5	230	32	-23,5	230	32	40
490	280	25	220	25	-220	20	-13,5	230	-12,5	-15,5	240	30	-21,5	240	30	40
500	290	23	230	23	-230	18	-11,5	240	-10,5	-13,5	250	28	-19,5	250	28	40
510	300	21	240	21	-240	16,5	-9,5	250	-8,5	-11,5	260	26	-17,5	260	26	40
520	310	21	250	21	-250	15,5	-7,5	260	-6,5	-9,5	270	24	-15,5	270	24	40
530	320	20,5	260	20,5	-260	14,5	-5,5	270	-4,5	-6,5	280	22	-13,5	280	22	40
540	330	20,5	270	20,5	-270	13,5	-3,5	280	-2,5	-4,5	290	20	-11,5	290	20	40
550	340	20,5	280	20,5	-280	12,5	-1,5	290	-1,5	-2,5	300	18,5	-9,5	300	18,5	40
560	350	20,5	290	20,5	-290	11,5	0	300	0	-1,5	310	16,5	-7,5	310	16,5	40
570	360	20,5	300	20,5	-300	10,5	0	310	0	-2,5	320	14,5	-5,5	320	14,5	40
580	370	20,5	310	20,5	-310	9,5	0	320	0	-3,5	330	12,5	-3,5	330	12,5	40
590	380	20,5	320	20,5	-320	8,5	0	330	0	-4,5	340	10,5	-1,5	340	10,5	40
600	390	20,5	330	20,5	-330	7,5	0	340	0	-5,5	350	8,5	0	350	8,5	40
610	400	20,5	340	20,5	-340	6,5	0	350	0	-6,5	360	6,5	0	360	6,5	40
620	410	20,5	350	20,5	-350	5,5	0	360	0	-7,5	370	4,5	0	370	4,5	40



Legende

Eindringwiderstände [MPa]



Bearbeiter: Alexander Klein

Abbildung 45, Interpolierte Eindringwiderstände für verschiedene Tiefenstufen
 Kartengrundlage: ©GeoBasis-DE / LVermGeoRP (2019), dl-de/by-2-0, <http://www.lvermgeo.rlp.de>

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, Alexander Klein, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe. Alle wörtlich oder dem Inhalt nach aus fremden Arbeiten entnommenen Stellen, bildlichen Darstellungen und dergleichen habe ich als solche genau kenntlich gemacht.



Alexander Klein

Koblenz, den 25. März 2019