

# Abschlussbericht

des Projekts

## Aktive Regeneration von Befahrungsschäden an Waldböden – Erstellung eines Praxiskonzepts

*gefördert durch*



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

**Az:** 27766

**Projektbeginn:** 01.01.2012

**Laufzeit:** 36 Monate

Dr. H. Schack-Kirchner, Dr. A. Kühne  
Albert-Ludwigs Universität Freiburg,  
Professur für Bodenökologie

PD Dr. K. von Wilpert  
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA),  
Abt. Boden und Umwelt

Freiburg, 28.04.2015



Professur für  
Bodenökologie



Forstliche Versuchs-  
und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg

# Vorwort, Danksagung

Im vorliegenden Projektbericht ist die Durchführung des Projektes „Aktive Regeneration von Befahrungsschäden an Waldböden – Erstellung eines Praxiskonzepts“ dokumentiert. Dieses Projekt wurde während seiner 3-jährigen Laufzeit von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) finanziell gefördert und für diese Unterstützung möchten wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken.

Bei der Durchführung des Projekts waren eine Vielzahl von Mitarbeitern beider Projektpartner, zwei Doktoranden, viele studentische Hilfskräfte sowie Bachelor- und Masterstudenten beteiligt. Ihnen allen sei für ihren großen Einsatz und die gezeigte Leistungsbereitschaft ebenfalls herzlich gedankt.

Dr. Helmer Schack-Kirchner  
Projektleitung

PD Dr. Klaus von Wilpert  
Projektverantwortlicher (FVA)

Dr. Anke Kühne  
Projektkoordinatorin &  
Berichtsredaktion

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Projekthintergrund.....	1
1.2. Innovativer Charakter des Projektes.....	4
1.3. Zielsetzung und Hypothesen.....	5
<b>2. Methode.....</b>	<b>7</b>
2.1. Standort und Lage der Versuchsflächen (ALU & FVA).....	7
2.1.1 Merklingen.....	7
2.1.2 Mooswald.....	9
2.1.3 Schönberg.....	10
2.1.4 Ettenheim.....	11
2.2. Versuche mit krautigen Pflanzen (ALU).....	12
2.2.1 Ausbringung des Saatgutes.....	12
2.2.2 Installation von insitu-Probenzylindern.....	15
2.2.3 Bestimmung bodenchemischer und -physikalischer Kenngrößen.....	21
2.2.4 Bestimmung des Mikroreliefs.....	21
2.2.5 Vegetationsbestimmungen.....	23
2.2.6 Verformungsschaden.....	24
2.2.7 Regenwurmabundanz.....	24
2.2.8 Bestimmung der Keimfähigkeit des Saatguts.....	25
2.3. Versuche mit holzigen Pflanzen (FVA).....	26
2.3.1 Vorbereitung und Vorbehandlung der Fläche.....	26
2.3.2 Bepflanzung der Fläche.....	28
2.3.3 Rhizotronkammern (in situ-Beobachtung des Wurzelwachstums).....	29
2.3.4 Gashaushaltsuntersuchungen.....	32
2.3.5 Feld pF-Messplots.....	33
2.3.6 Bestimmung der Diffusionskoeffizienten.....	34
2.3.7 Wurzelaufnahmen und Vegetationsaufnahmen von <i>Juncus effusus</i> .....	35
2.3.8 Bodenstruktur und Feinwurzeluntersuchungen an Bohrkernen.....	35
<b>3. Ergebnisse.....</b>	<b>36</b>
3.1. Teilprojekt zum Einfluss krautiger Pflanzen (ALU).....	36
3.1.1 Mikrorelief und kleinräumige Vegetationsverteilung.....	36
3.1.2 Vegetation und Vegetationsentwicklung auf den Aussaatflächen.....	41
3.1.3 Bodenparameter in Abhängigkeit von den Versuchspflanzen.....	49
3.1.4 Zylinder (- insitu) -Versuche .....	51
3.1.5 Saatgutuntersuchungen.....	54
3.1.6 Regenwurmaktivität.....	57

---

3.2. Teilprojekt zum Einfluss holziger Pflanzen (FVA).....	61
3.2.1 Fahrspureintiefung neu angelegter Rückegassen.....	61
3.2.2 Überlebensraten der Gehölze.....	62
3.2.3 Größe und Wachstumsraten der Gehölze.....	64
3.2.4 Gashaushaltsuntersuchungen.....	65
3.2.5 Bodenvegetation, Bodenchemischer Zustand, Bodenstruktur und Feinwurzeldichten.....	70
3.2.6 Dynamik des Wurzelwachstums (April – August 2014).....	78
3.3. Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen.....	80
<b>4. Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>83</b>
4.1. Bodenregeneration durch krautige Pflanzen (ALU).....	84
4.1.1 Diskussion der Durchführung und Ergebnisse des Projektvorhabens.	84
4.1.2 Abschließendes Fazit.....	86
4.2. Bodenbearbeitung und Einsatz holzige Pflanzen (FVA).....	87
4.2.1 Durchführung der geplanten Projektarbeiten.....	87
4.2.2 Zusammenfassende Bewertung der Projektergebnisse.....	88
<b>5. Literatur .....</b>	<b>92</b>
<b>6. Anhang.....</b>	<b>94</b>

# 1. Einleitung

Aufgrund der sehr langen natürlichen Regenerationszeiten der Bodenstruktur in Waldböden von Jahrzehnten bis Jahrhunderten haben sich Befahrungsschäden durch flächige Befahrungen mit forstwirtschaftlichen Maschinen in der Vergangenheit entsprechend akkumuliert. Auch wenn die gesetzliche Durchsetzung einer permanenten angelegten Feinerschließungsrichtlinie einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung der Neuverformungsrate von Waldböden darstellt, so verhindert dies jedoch nicht alle künftigen Schäden abseits der permanenten Rückewege. Durch eintretende „übergesetzliche Notstände“, wie z.B. nach Sturmwürfen, werden die Beschränkungen zur Vermeidung neuer Schäden außer Kraft gesetzt. Um nun die Wiederherstellung der standortstypischen Bodenfunktion im Bereich von alten wie neuen Befahrungsschäden zu beschleunigen, ist es erstrebenswert, die natürlichen Prozesse durch aktive bodenbiologische sowie bodenmechanische Maßnahmen zu unterstützen.

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, ein naturwissenschaftlich optimiertes und praxistaugliches Verfahren zu entwickeln, welches routinemäßig in die Erntemaßnahmen integriert werden kann, um so die mechanisierte Holzernte und den Bodenschutz noch besser miteinander zu versöhnen.

Um die für dieses Vorhaben aktuell noch bestehenden Kenntnislücken zu schließen, werden von den beiden Projektpartnern, der Professur für Bodenökologie an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (ALU) und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg (FVA), praktische Versuche auf unterschiedlichen Fahrspuren mit einer aktiven Einbringung von krautigen und holzigen Pflanzen sowie durch eine vorbereitende Bodenbearbeitung und/oder Kalkung durchgeführt. Die hierbei als erfolgreich identifizierten Maßnahmen werden dann zu einem Praxiskonzept verknüpft und in Form einer konkreten Handlungsanweisung veröffentlicht, welche alle wesentlichen Aspekte zur Umsetzung berücksichtigt.

## 1.1. Projekthintergrund

So lange in Waldbeständen eine unregelmäßige Befahrung stattfand, wirkten die dadurch verursachten Bodenverformungen aufgrund der sehr langen Regenerationszeiten (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) weitgehend kumulativ. Dadurch entstanden großflächig „Altlasten“ verformter Böden mit teilweise dramatisch eingeschränkten Bodenfunktionen. Aber auch nachdem permanente Feinerschließungssysteme als Regelfall für Waldpflege und Holzernte gelten, ist nicht mit einer vollständigen Rückfüh-

---

---

rung der Neuverformungsrate auf 0 zu rechnen. Gründe dafür sind Defizite bei der Wiederauffindbarkeit neu konzipierter Erschließungssysteme (z.B. bei Personalwechsel auf Revierebene), Veränderungen von Erntesystemen und Waldbauverfahren sowie aufgrund des prognostizierten Klimawandels vermehrte „Noternten“ nach Sturmwurf. Die Beobachtung zeigt, dass Sturmwurfkatastrophen häufig hinsichtlich des Bodenschutzes einen subjektiv gerechtfertigten „übergesetzlichen Notstand“ erzeugen, da andere, durch den Windwurf diktierten, zeitkritische Kriterien wie z.B. die Vermeidung der Entwertung des Sturmholzes durch Pilzbefall, die Beseitigung der Gefahr von Insektenkalamitäten oder die Erhöhung der Arbeitssicherheit den auf Bodenschutz ausgerichteten Normalfall außer Kraft setzen.

Neben den bestehenden verformten Altflächen ist daher auch in Zukunft mit einer beachtlichen Neuverformungsrate von Waldböden zu rechnen. Die aktive Restauration verformter Böden mit einem naturwissenschaftlich optimierten, praxistauglichen und routinemäßig in Erntemaßnahmen zu integrierenden Verfahren könnte helfen, mechanisierte Holzernte und Bodenschutz noch besser miteinander zu versöhnen. Dazu muss in diesem Vorhaben die Erfüllung folgender Voraussetzungen geschaffen werden:

- Es sollte ein optimiertes Verfahren entwickelt werden, mit dem die standortstypischen Bodenfunktionen beschleunigt wieder hergestellt werden. Die Beobachtung der natürlicher Pflanzensukzessionen auf manchen Fahrspuren gibt Hinweise, dass dabei der Bioautomation große Bedeutung zukommt: Die Besiedlung verformter Böden durch Pionierpflanzen mit Aerenchymen stellt häufig einen ersten Schritt zur Restauration des Belüftungssystems verformter Böden dar. Wir wollen daher solche Arten (einzeln und gemischt) gezielt in vorhandene sowie experimentell hergestellte Fahrspuren aussäen bzw. pflanzen (Holzgewächse) und die Wirkungen auf die Verbesserung der Bodenfunktionen messen (Gasdiffusion). Daneben werden auch die mechanische Oberboden-Lockerung (Schwinggrubber) sowie die Erhöhung der Bioturbation durch Kalkung einzeln und in Kombination mit dem Hilfspflanzenanbau getestet.
- Um ein optimiertes Verfahren anwenden zu können, müssen neben der Verbreitung des „know-how“ auch die Ressourcen zur Realisierung leicht und flächendeckend zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund sind bereits in der Versuchsphase auf Wildpflanzen spezialisierte Pflanzenzuchtbetriebe integriert. Sie sollen am Projektende in der Lage sein, im Hinblick auf das Regenerationspotenzial optimierte und gebrauchsfertige Saatgutmischungen bzw. Stecklings- und Forstpflanzenkombinationen in ausreichender Menge herzustellen und zu vermarkten

---

Die Ergebnisse sollen in einer verbindliche Arbeitsanleitung münden, in der die optimierten Verfahren beschrieben und bewertet werden.

Die Verminderung der Bodenfunktionen durch mechanische Verformung ist zur Zeit das größte „hausgemachte“ Bodenschutzproblem der mitteleuropäischen Forstwirtschaft. Die Durchsetzung permanenter Feinerschließung ist sicher ein wesentlicher Beitrag zur Verringerung der Neuverformungsrate. Aufgrund der sehr langen natürlichen Regenerationszeiten (v. WILPERT & SCHÄFFER 2006, FROELICH et al. 1985) in der Größenordnung von Jahrzehnten bis Jahrhunderten, akkumulieren sich Befahrungsschäden auf der Fläche, wenn die Befahrung nicht auf permanente, gut dokumentierte Trassen beschränkt wird. In den vergangenen 40 – 50 Jahren, in denen relevante Befahrungsintensitäten aufgetreten sind, haben sich sowohl die technischen Arbeitsverfahren als auch Organisationskonzepte erst allmählich entwickelt und wurden mehrfach geändert. Aus diesem Grund existieren in vielen Waldgebieten umfangreiche Erblasten der Bodenverformung.

In der forstlichen Praxis ist die Frage des Umgangs mit aufgelassenen Fahrtrassen hochaktuell. In der Feinerschließungsrichtlinie des Ministeriums Ländlicher Raum Baden-Württemberg (MLR 2003) wird die Befahrung von Waldböden auf Rückegassen im Abstand von 40 m konzentriert, wobei Zwischengassen mit 20m Abstand möglich sind, die nach den Erstdurchforstungen im Stangenholzalder aufgelassen werden sollen. Gerade hier wäre eine rasche Wiederherstellung der standortstypischen Bodenfunktionen wünschenswert. Das gleiche gilt, wenn irreguläre, über Jahrzehnte kumulierte Befahrungsschäden regeneriert werden sollen, oder wenn flächige Bodenschäden nach Sturmwurfbedingten „Noternten“ die Begründung eines Folgebestandes erschweren.

Über Optionen, Möglichkeiten und Grenzen einer aktiven Regeneration verformter Waldböden gibt es einzelne und isolierte Untersuchungsergebnisse, jedoch kein ganzheitliches und operationales Konzept. Wir wollen bekannte und neue Ansätze für die aktive Steuerung von Regenerationsprozessen in verdichteten Böden kombinieren und in standardisierten Praxisversuchen deren Effizienz testen. Da die Literatur zu diesem Thema sehr spärlich ist, muss das Wissensdefizit durch eigene Experimente verkleinert werden (LÜSCHER et al. 2008, GODEFROID & KOEDAM 2004, KREMER 2008).

In einer der Bioautomation verpflichteten Forstwirtschaft ist es geboten, ökologisch verträglichere Alternativen zu den in der Landwirtschaft üblichen kosten- und energieintensiven mechanischen Bodenbearbeitungen zu prüfen. Dabei wollen wir insbesondere das Regenerationspotenzial wurzelintensiver, aerenchymhaltiger Pionierpflanzen nutzen. Die erfolgreichen Einzel- und Kombinationsverfahren werden zu einem Praxiskonzept verknüpft und in Form einer konkreten Handlungsanweisung veröffentlicht. Dabei werden alle wesentlichen Aspekte wie z.B. technische Vorgehensweisen, Bezugsquellen, Randbedingungen etc. integriert.

Die Professur für Bodenökologie (ehemals: Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre) der Universität Freiburg (ALU) besitzt eine langjährige Erfahrung im Bereich der bodenphysikalischen, wurzelökologischen und forstpraktischen Aspekte der Bodenverformung (HILDEBRAND, 1983). Zu diesem Thema sind wir häufig angefragte Gutachter sowie als der einschlägigen Gremien an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Praxis tätig.

Die Abteilung Boden und Umwelt der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) besitzt sowohl in der ökologischen Bewertung von Befahrungsschäden in Waldböden deutschland- und europaweit anerkannte Expertise, und hat aus den langjährigen Forschungsergebnissen zu Befahrungsschäden für das Land Baden-Württemberg detaillierte Praxisrichtlinien zur Steuerung der Befahrung abgeleitet.

## **1.2. Innovativer Charakter des Projektes**

Zum ersten Mal werden Maßnahmen des aktiven Bodenschutzes integraler Teil der technisierten Waldpflege bzw. Holzernte. Innovativ ist dabei die Ausnutzung und Verstärkung von Prozessen der direkten aktiven Lebensraumgestaltung im Boden durch Pflanzen und indirekt durch Bodentiere. Dabei werden eine initiale mechanische Lockerung und Kalkung zur Herstellung günstiger Rahmenbedingungen für bodenbiologische Aktivität in die Versuchsanstellung einbezogen. Eine solche, durch den Menschen angestoßene und verstärkte Bioautomation zur Wiederherstellung des standortstypischen Lebensraumes „Boden“ hat gegenüber einer konventionellen Bodenbearbeitung folgende Vorteile:

- Das durch Bioautomation geschaffene Porenvolumen ist ein zeitlich stabiles Fließgleichgewicht, während mechanisch - z.B. durch alleiniges Pflügen, Abbruchlockerung etc. - erzeugte Makroporen bodenphysikalisch eine instabile „Überlockerung“ darstellen. Solche überlockerten Substrate streben durch Sackung wieder dem Ausgangszustand zu, d.h. intensive mechanische Bodenbearbeitungen, welche durch starke Gradienten der Bodenfeuchte und/oder -temperatur das Bodenleben schädigen, zwingen zur ständigen Wiederholung. Dies ist im Wald weder möglich (Risiko von Wurzelverletzungen und -infektionen) noch erwünscht (hoher Einsatz von Primärenergie).

- Der Einsatz fossiler Primärenergie verringert sich um den Anteil an der Bodenlockerung, der durch Bioautomation geleistet wird. Die biogene Porenbildung erfolgt letztendlich mit Hilfe der Sonnenenergie. Aus diesem Grund sind auch die Kosten weitaus niedriger.
- Durch biologische Transportvektoren (z.B. Wurzeln, Bodentiere) gelangt auch wieder vermehrt Kohlenstoff in den Mineralboden, das Potenzial der C-Sequestrierung ist verbessert.
- Böden mit restaurierter Wurzelraumfunktion können auch in Hinblick auf den Wasserkreislauf die erwartungsgemäßen Funktionen als Speicher (Ausgleich von Wassermengen) und Regler (Verbesserung der Wasserqualität) erfüllen.

Unser Projekt erhebt den Anspruch, neben der naturwissenschaftlichen Verfahrensoptimierung und dem Wissenstransfer auf die Revierebene auch gleichzeitig alle logistischen Erfordernisse, die an die Realisierung geknüpft sind, zu berücksichtigen und langfristig zu lösen. D.h. je nach den Ergebnissen der Pflanzversuche wird entsprechendes Saatgut bzw. Pflanzenmaterial zur Verfügung stehen.

### **1.3. Zielsetzung und Hypothesen**

Unser Vorhaben beruht auf folgenden forschungsleitenden Hypothesen:

1. Es ist möglich, natürliche Regenerationsprozesse in verformten Waldböden zielgerichtet durch bodenbiologische und/oder bodenmechanische Eingriffe zu beschleunigen. Die Kombination dieser Maßnahmen bietet die Option „Bestverfahren“ zu identifizieren, die eine beschleunigte Wiederherstellung standorttypischer Bodenfunktionen erlauben.
2. Pflanzensukzessionen in Fahrspuren zeigen, dass verformte Waldböden Sonderstandorte sind, auf denen sich wurzelintensive Spezies durchsetzen (GAERTIG 2007). Offensichtlich gibt es Pflanzen, die das Potenzial besitzen, auch auf stark verdichtetem Substrat aktiv einen durchwurzelbaren Raum zu schaffen. Die initiale Wurzelerschließung durch solche Pionierpflanzen führt zu einer Beschleunigung der Entwicklung in Richtung „standorttypischer Wurzelraum“. Es werden zunächst initiale Makroporen geschaffen und mit dem C-input in den Mineralboden wird die Voraussetzung weiterer

bodenspezifischer Nahrungsketten etabliert. Damit entsteht auch die Grundlage porenschaffender Prozesse durch Bodentiere.

3. Durch Aussaat von krautigen Pflanzen oder (Stecklings-)pflanzung von Gehölzen ist es möglich, diese Pflanzen in hoher Dichte zu etablieren und damit den Regenerationsprozess stark zu intensivieren. Flankierende Bodenbearbeitung und/oder Kalkung können helfen, diesen bioautomatischen Regenerationsprozess zu sichern bzw. zu beschleunigen.
4. Geeignet dafür sind insbesondere solche Pflanzen, die an die Lichtverhältnisse des Waldbodens und an verformte/verdichtete Böden angepasst sind. Das sind bei den krautigen Pflanzen z.B. Winkel- oder Waldsegge bzw. bei den Gehölzen Faulbaum oder Erle. Der Anpassungsmechanismus an den sauerstoffarmen Boden der Fahrspuren ist i.d.R. die Bildung eines leistungsfähigen Aerenchyms, das für einen Sauerstofftransport aus der Atmosphäre in die Wurzeln sorgt.

Oberziel des Projektes ist eine Bündelung und Integration vorhandener (Teil-) Erkenntnisse zu einem operationalen Praxiskonzept der aktiv gesteuerten Fahrspurregeneration. Noch offene Forschungslücken wollen wir mit experimentellen Ansätzen schließen. Es wird eine Arbeitsanleitung erstellt, welche standörtlich optimierte Verfahren der aktiven Melioration verformter Waldböden aufzeigt. Bei den Hilfspflanzenmischungen ist die Naturnähe der eingesetzten krautigen Pflanzen sowie der Strauch- und Baumarten ein zentrales Kriterium. Aus Naturschutzgründen werden züchterisch bearbeitete Pappeln und Weiden keine Verwendung finden. Durch Einbeziehung kommerzieller Pflanzenzuchtbetriebe mit spezifischer Erfahrung für Wildpflanzensaat und -pflanzung werden alle Ressourcen zur Realisierung des erarbeiteten Praxiskonzeptes verfügbar gemacht.

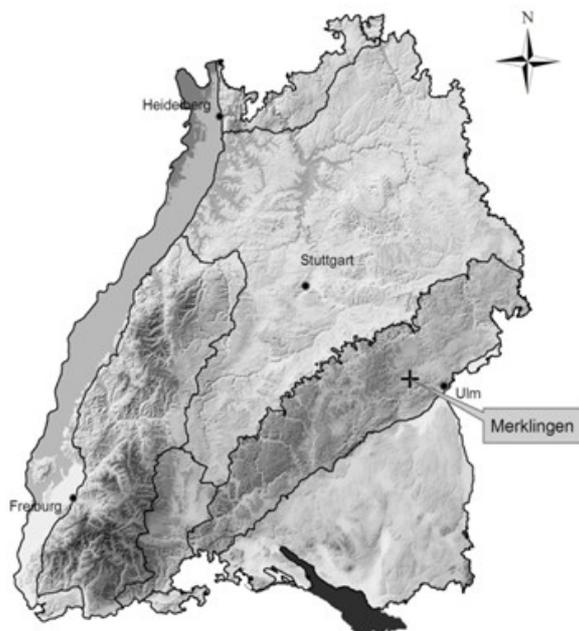
## 2. Methode

### 2.1. Standort und Lage der Versuchsflächen (ALU & FVA)

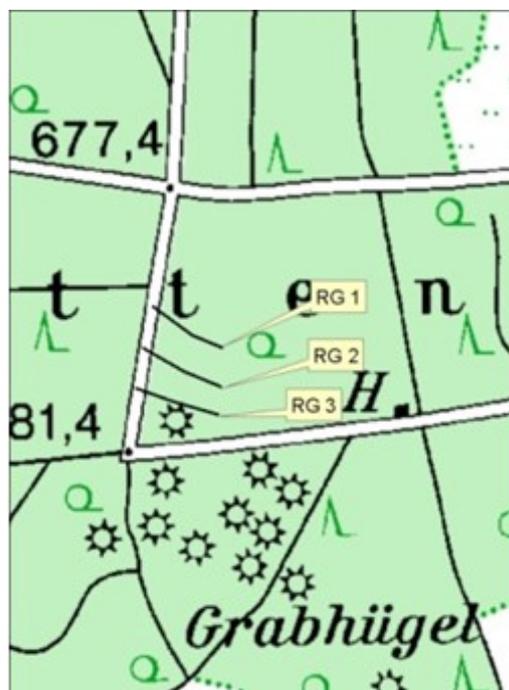
Als Praxis-Fahrspuren sind 4 Versuchsstandorte ausgewählt worden, die ein Textur-Spektrum von lehmigem Ton bis zu lehmigem Sand umfassen. Eine bodenkundliche Charaktisierung der Standorte anhand ungestörter Bodenprofile findet sich im Anhang (Abbildungen A1 - A3, Tabellen A1 - A3).

#### 2.1.1 Merklingen

Nach intensiver Flächenrecherche wurde eine Versuchsfläche im Staatswald des Alb-Donau-Kreises (Distrikt 40, Abteilung 11), im östlichen Landesteil Baden-Württembergs ausgewählt (Abbildung 1). Diese liegt ca. 14 km östlich von Ulm und 3 km nördlich von Blaubeuren in einer Höhenlage von rund 680 m über NN (submontane Höhenstufe). Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt ca. 7.2°C und die Jahresniederschlagssumme ca. 840 mm (Durchschnittswerte für die Periode 1961 bis 1990).



**Abbildung 1:** Lage der Versuchsfläche



**Abbildung 2:** Lage der Fahrtrassen im Distrikt 40, Abteilung 11

Die Versuchsfläche liegt geologisch im Bereich der liegenden Bankkalke (Einheit: tIL, Geologische Karte von Baden-Württemberg, 1:25000) des Weißen Jura. Nach der Standortkartierung ist die Fläche der regionalen Einheit der „Mittleren Flächenalb“ im Wuchsgebiet „Schwäbische Alb“ zuzuordnen; sie liegt im Bereich der Wuchsbezirksgruppe 6.05a. Ausgangssubstrat für die Bodenbildung sind periglaziale äolische Sedimente. In der Standortkarte ist die Einheit als mäßig frischer Feinlehm kartiert.



**Abbildung 3:** Praxis-Fahrspurbereich 1 am Standort 'Merklingen'



**Abbildung 4:** Praxis-Fahrspurbereich 2 am Standort 'Merklingen'

Der **Vorbestand** auf der Versuchsfläche war ein Fichtenbestand, der von Osten nach Westen sukzessive geräumt wurde. Die letzte Nutzung im Bereich der Versuchsfläche erfolgte im Jahr 2010. Die Bepflanzung mit Fichte und Douglasie wurde im Jahr 2011 und 2012 (Nachbesserungen) durchgeführt. Auf der Fläche befinden sich ältere Fichtenverjüngungsgruppen und im Osten geht die Fläche in ein Fichtenstangenholz über. Auf der Versuchsfläche war zum Zeitpunkt der Befahrung eine Altersschliebung vorhanden, die orthogonal zu den neu angelegten Gassen verlief. Die letzte Nutzung dieses Altgassensystems im Zuge der Holzernte erfolgte im September 2010. Die westlichste Gasse dieses Systems wurde im Zuge der Pflanzaktion 2011 neu angelegt. Die Altgassen wurden letztmalig im April 2011 bei der maschinell unterstützten Pflanzung mit einem Forwarder befahren.

Am Standort 'Merklingen' wurden für die Versuche zwei benachbarte Fahrspuren ausgewählt. Auf dem ersten Fahrspurbereich (Abbildung 3) wurden die Voruntersuchungen (ALU) im Jahr 2012 durchgeführt. Für die Installation der Aussaat-Versuchsflächen (ALU), der Versuchszylinder (ALU) und der Untersuchung des *Juncus*-Wachstums (FVA) wurde dann der andere Fahrspurbereich genutzt (Abbildung 4).

### 2.1.2 Mooswald

Die Untersuchungsfläche befindet sich im südlichen Mooswald bei Freiburg im Breisgau. Die ausgewählte Fahrspur wurde im Sommer 2011 zuletzt befahren und befindet sich im Forstrevier St. Georgen, östlich der A5. Sie verläuft zwischen dem Tiengerer Grenzweg und dem Arlesheimer Waldweg (Abbildung 5). Gemäß der nächstgelegenen Klimastation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Schallstadt-Mengen (215 m ü. NN) liegt die Jahresmitteltemperatur bei 10,3 °C (Klimanormalperiode von 1961 – 1990) und die jährliche Niederschlagssumme bei 761,0 mm (Klimanormalperiode von 1961 – 1990).

Die Mooswälder, in denen sich die Untersuchungsfläche befindet bilden kein einheitliches Waldgebiet, sondern vielmehr ein Komplex aus mehreren Waldtypen unter Einschluss gewisser sekundär waldfreier Partien (BAMMERT, 2008). Am Standort nimmt Laubholz fast die gesamte Fläche ein, nur auf rund 2 % wächst Nadelholz. Esche (22,5 %), Eiche (19,3 %) und Roteiche (11,7 %) sind die häufigsten Laubbaumarten.



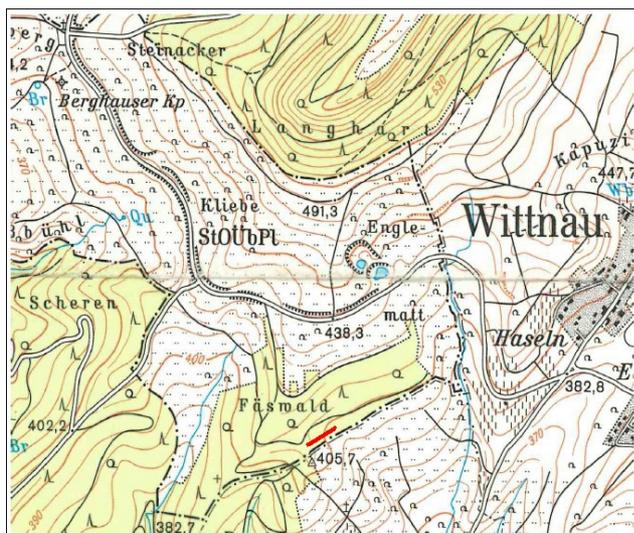
**Abbildung 5:** Lage Fahrspur am Standort 'Mooswald'



**Abbildung 6:** Fahrspurbereich am Standort 'Mooswald'

### 2.1.3 Schönberg

Der Standort 'Schönberg' liegt im Gemeindewald Ebringen des Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald, Abteilung 9, Fäsacker des Distriktes 1, Hohfirst und gehört zum Revier Schönberg-Mooswald. Es handelt sich um eine Parabraunerde-Terra Fusca (Humusform: F- Mull) mit schwach bis mittelschluffiger Ton (Tu2 – Tu3) über alle Tiefenstufen. Der Buchenwald in Mischwuchsregulierung am Schönberg besteht zu 70% aus Weißtannen (*Abies alba* L.), und 30% Rotbuchen (*Fagus sylvatica* L.). Der Naturverjüngungsvorrat setzt sich 65% Weißtanne aus 15% Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.), 5% Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und 15% Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) zusammen. Die mittlere jährliche Lufttemperatur beträgt ca. 9,1 °C bei einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 956 mm. Die Fläche befindet sich auf einer Höhe von ca. 400 m über NN. Die für den Versuchsaufbau ausgewählte Fahrspur (Abbildung 7 + 8) wurde Ende des Jahres 2012 im Rahmen von routinemäßigen Forstarbeiten neu angelegt. Sie weist eine Ost-Südost-Exposition auf mit einer Neigung von <math>< 5^\circ</math> im oberen Bereich auf.



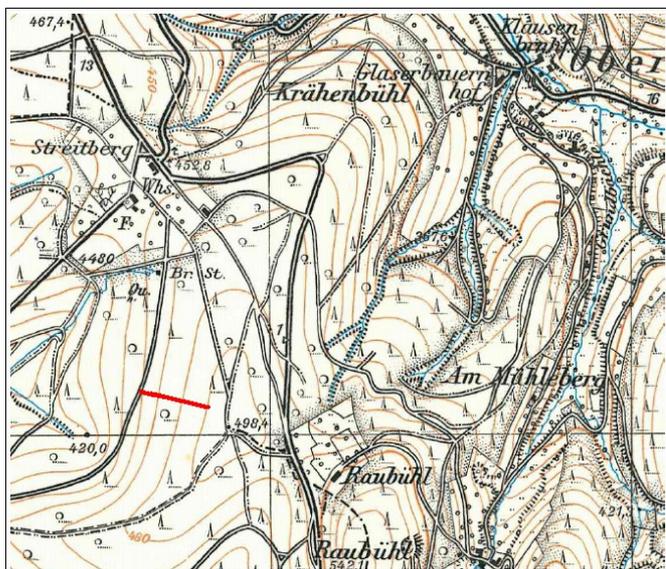
**Abbildung 7:** Lage der Fahrspur (rot) am Standort 'Schönberg'



**Abbildung 8:** Fahrspurbereich am Standort 'Schönberg'

### 2.1.4 Ettenheim

Eine weitere Versuchsfläche findet sich am Streitberg des staatlichen Klosterwaldes der Gemeinde Ettenheimmünster, welcher zum Landratsamt Ortenaukreis gehört. Der Standort ist in die Abteilung 27 des Distriktes 21 einzuordnen. Es handelt sich um einen primären Pseudogley (Humusform: mullartiger Moder) mit schwach bis mittelsandigem Lehm (Ls2-Ls3) bis zu schluffig-lehmigem bis stark lehmigem Sand (Slu und Sl4) über alle Tiefenstufen. Die pH-Werte (in H<sub>2</sub>O) liegen mit Werten von 4,36 bis 4,93 im sauren Bereich. Die umgebende Waldgesellschaft ist ein Buchen-Tannenwald, der sich aus 50% Rotbuchen (*Fagus sylvatica* L.), 15% Tannen (*Abies alba* L.), 15% Lärchen (*Larix decidua* MILL.), 10% Fichten (*Picea abies* (L.) H.KARST.), 5% Eichen (*Quercus robur* L.) und 5% Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (MIRBEL) FRANCO) zusammensetzt. Der Naturverjüngung bestehen aus 40% Tannen, 35 % Rotbuchen, 10% Fichten sowie 5% Douglasien. Die durchschnittliche Lufttemperatur beträgt ca. 9,1 °C und die Niederschlagsmenge beträgt ca. 1912 mm. Die an diesem Standort ausgewählte Fahrspur liegt ca. zwischen 460 und 490 m über NN mit einer West-Nordwest-Exposition (Neigung: 5-10 °C) und einer leichten Terrassierung.



**Abbildung 9:** Lage der Fahrspur (rot) am Standort 'Ettenheim'



**Abbildung 10:** Fahrspurbereich am Standort 'Ettenheim'

## 2.2. Versuche mit krautigen Pflanzen (ALU)

Aufgrund des erst nach Projektbeginns im April 2012 gestartenden Arbeitsbeginns von Frau Dr. Anke Kühne und des ungünstigen Aussaatzeitpunktes (Samenkeimung bedarf der Brechung der Keimruhe, entweder natürlich im Freiland oder auch per Kalt-Nass-Stratifizierung im Labor über mehrere Wochen), wurde die Ausbringung des Gräser-Saatgutes auf die Vegetationsperiode im Jahr 2013 verschoben.

Die Aussaatflächen (Plots) wurden entlang der jeweils auf den Standorten ausgewählten Fahrspur direkt aneinander grenzend angelegt (Abbildungen 11 - 14). Jeder Plot misst dabei 3 m in der Länge und zwischen 3 – 5 m in der Breite. Für die Installation der Versuchszylinder wurden jeweils am Anfang der Fahrspurbereiche zwischen den Plots für die Aussaat jeweils 5 Flächen angelegt, die nur 2 m lang sind. Am Standort 'Merklingen' wurden zudem auf den letzten Metern der speziell angelegten und behandelten Fahrspuren der FVA (RG 2: Mulch, RG 3: Mulch + Kalk) ebenfalls Aussaatflächen mit den entsprechenden Abmessungen angelegt.

### 2.2.1 Ausbringung des Saatgutes

Die Aussaat erfolgte nach einer Kalt-Nass-Stratifikation (Lagerung der Samen in feuchtem Sand bei +4°C über 12 Wochen) im Frühjahr 2013 an allen Standorten. Aussaatdichte betrug auf allen Flächen 3-5 g/m<sup>2</sup>. Als Zuschlagsstoff wurde Sand verwendet, welcher unter das stratifizierte Saatgut gemischt wurde, um eine gleichmäßige Verteilung auf der gesamten Fläche bei der händischen Ausbringung zu gewährleisten. Im Spätherbst 2013 erfolgte eine Nachsaat mit nicht-stratifiziertem Saatgut auf allen Versuchsplots aller Standorte.

Folgende Varianten wurden auf den Flächen ausgesät:

- *Juncus effusus* L.
- *Carex remota* L.
- *Carex sylvatica* HUDS
- Mischung (alle 3 o.g. Arten in einem gleichmäßigem Gewichtsverhältnis)
- Null-Variante/Kontrolle (keine Saatgut-Ausbringung)

Für jede dieser Varianten wurden an jedem Standort 4 Wiederholungen angelegt. Die Verteilungsmuster wurden dabei zufällig gewählt (Losverfahren). Auf den Fahrspuren der FVA (RG 2 und RG 3) wurden zusätzlich noch an die o.g. Aussaatversuchsflächen Raps-Samen (*Brassica napus* L.) ausgebracht (Abbildung 11).

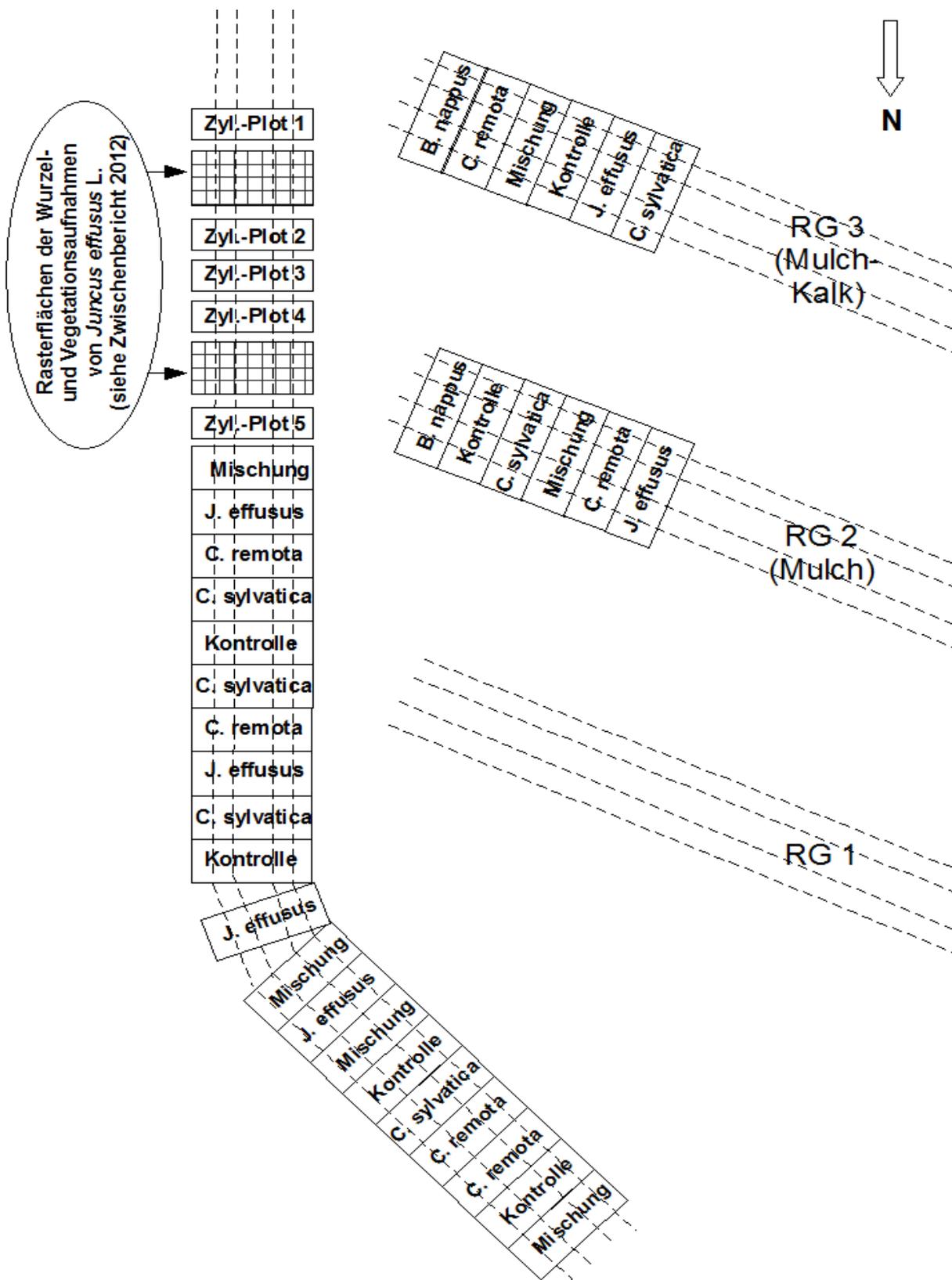
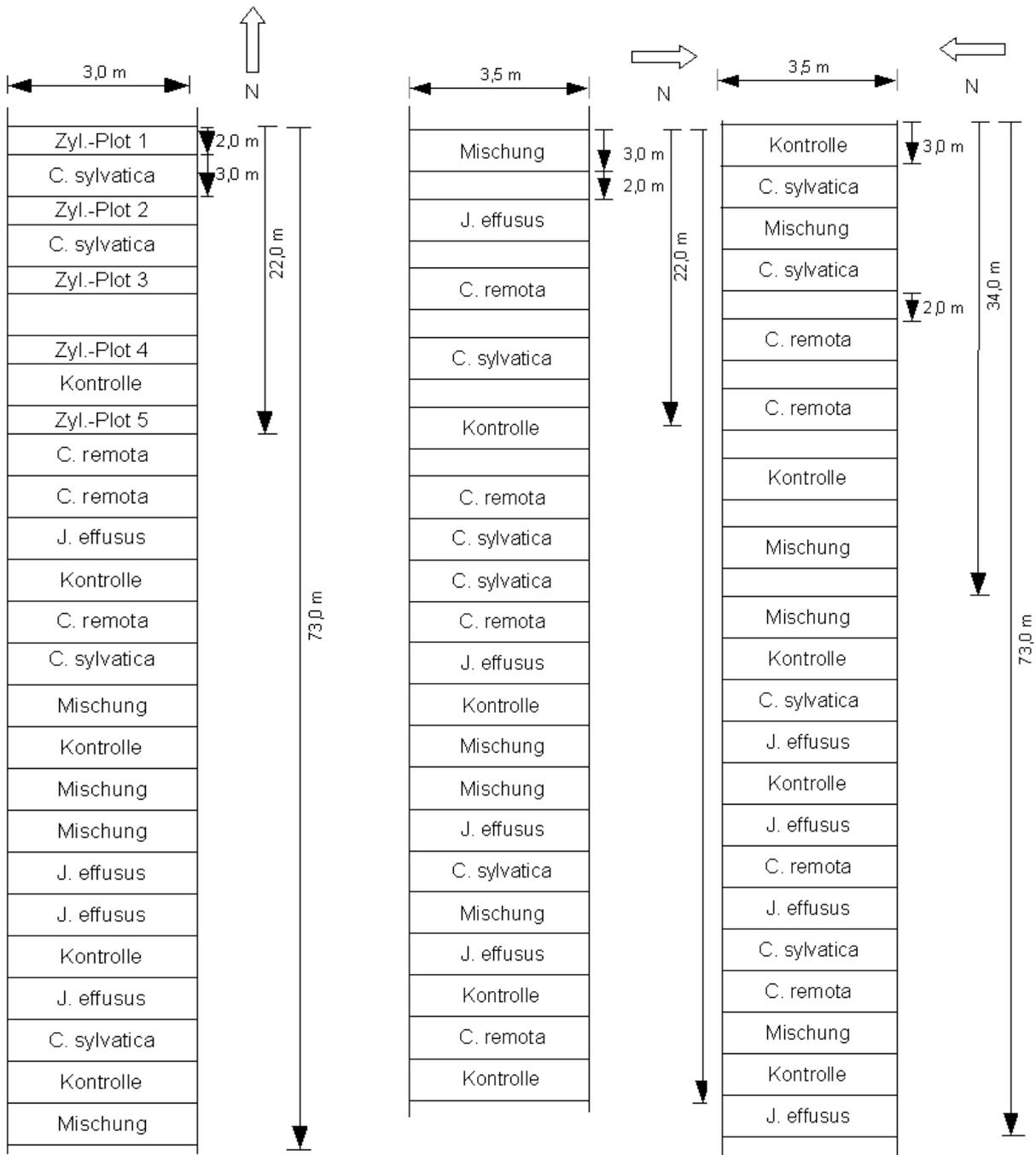


Abbildung 11: Aussaatflächen am Standort 'Merklingen' (nicht maßstabsgetreu, einzelne Plots sind 2-3 m lang und 3-5 m breit)



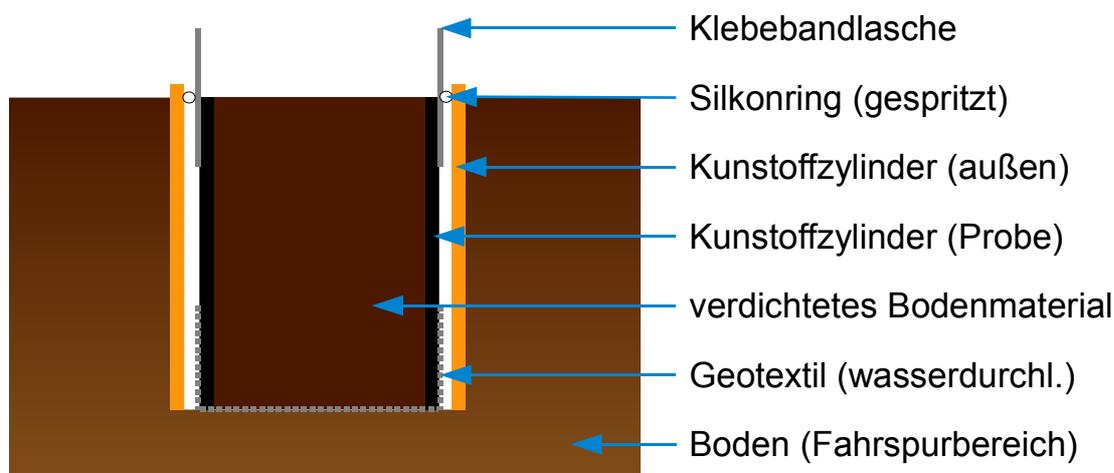
**Abbildung 12:**  
Aussaafächen am Standort  
'Mooswald'  
(nicht maßstabsgetreu)

**Abbildung 13:**  
Aussaafächen am Standort  
'Schönberg'  
(nicht maßstabsgetreu)

**Abbildung 14:**  
Aussaafächen am Standort  
'Ettenheim'  
(nicht maßstabsgetreu)

## 2.2.2 Installation von insitu-Probenzylindern

Im Rahmen des Promotionsvorhabens von Herrn Dipl. Geograph Johannes Haas (geb. Fritz) mit dem Arbeitstitel „Funktionelle Zusammenhänge zwischen pflanzlicher Artenvielfalt und Strukturregeneration in verformten Waldböden“, welche durch die Graduiertenschule „Environment, Society and Global Change“ im Bereich „Biodiversity and Conservation“ der Universität Freiburg gefördert wird, sind im Frühjahr 2013 auf zwei der Versuchstandorte ('Merklingen' und 'Mooswald') Probenzylinder für einen insitu-Versuch mit Saatgut installiert worden (Abbildung 15).



**Abbildung 15:** Installationsaufbau der *insitu*-Versuchszylinder

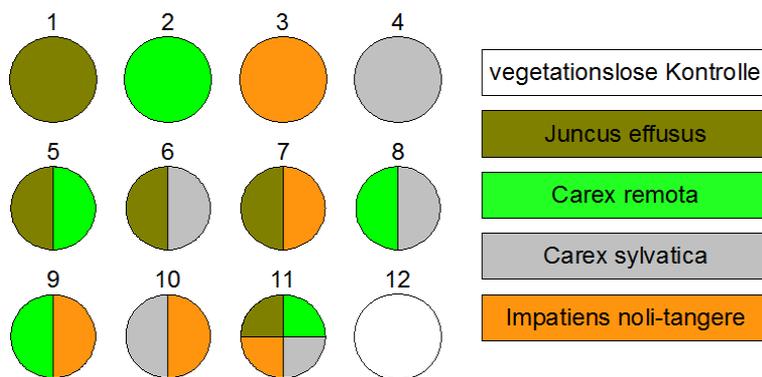
Die Kunststoffzylinder ( $\sim 900 \text{ cm}^2$ , schwarz), welche mit künstlich verdichtetem Bodenmaterial (Trockenraumdicke:  $\approx 1,6 \text{ g/cm}^2$ ) gefüllt sind, wurden auf der Unterseite mit einem wasserdurchlässigen Geotextil (Artikel-Nr. 050100 von PFK-Tarp e.K., Uedem) umschlossen, um so das Eindringen von Bodenorganismen und eine daraus resultierende nicht-pflanzeninduzierte Strukturbildung zu verhindern. Über die komplette Fahrspurbreite wurden diese Proben-Zylinder in den Bereichen der im Projekt untersuchten Fahrspuren eingebracht. Um für kommende Untersuchungen eine leichte Entnahme und auch erneute Ausbringung zu ermöglichen, wurden zum Einen mit Gewebeband zwei kleine Laschen an den Probenzylindern angebracht und zum Anderen etwas breitere und längere Zylinderstücke im Boden eingegraben (Führungszylinder, orange), in die dann jeweils ein Probenzylinder eingesetzt wurde. Der dabei verbleibende kleine Bereich zwischen den Zylinderwänden wird dabei an der Oberseite mit Sanitärsilikon abgedichtet. Das für die Proben-Zylinder verwendete Bodenmaterial stammt aus ungestörten Bereichen des Oberbodens des jeweiligen Standorts. Auf der Oberseite der gefüllten Proben-Zylinder wurden die innerhalb des Projektes verwendeten Pflanzenarten (*Juncus effusus* L., *Carex remota* L., *Carex sylvatica* HUDS. und *Impatiens noli-tangere* L.) jeweils einzeln als auch in Mi-

schungsvarianten ausgesät (Abbildung 18), wobei hier zur besseren Haftung der Samen (ca. 0,5 – 1 g/Zylinder) die Bodenoberfläche mit einer Drahtbürste leicht ange-  
 raut wurde. Das Saatgut von *Juncus* und den *Carex*-Arten ist dabei wie für die Aus-  
 saatsversuche zuvor stratifiziert worden. *Impatiens* wurde ohne Vorbehandlung aus-  
 gebracht. Im weiteren Versuchsverlauf sollen diese Zylinder über 2 Vegetationsperi-  
 oden im Freiland verbleiben. Jeweils zum Ende der Vegetationsperiode werden die  
 Zylindern im Labor untersucht (u.a. Vegetationserfassung, Messung der Gasdurch-  
 lässigkeit). Während des Versuchs im Freiland werden an jedem Standort die Boden-  
 feuchte und Bodentemperatur an einem Messpunkt kontinuierlich erfasst.



**Abbildung 16:** Einbau der Versuchszylinder am Standort 'Merklingen'

**Abbildung 17:** Fertig eingesetzte Versuchszylinder am Standort 'Merklingen'



**Abbildung 18:** Basisblock des Versuchsdesigns mit den vier Testspezies, allen möglichen Zweierkombinationen sowie der Viererkombination; der Basisblock wird für jeden Standort mit fünf Wiederholungen angelegt (Abstand zwischen den einzelnen Blöcken 3 m)

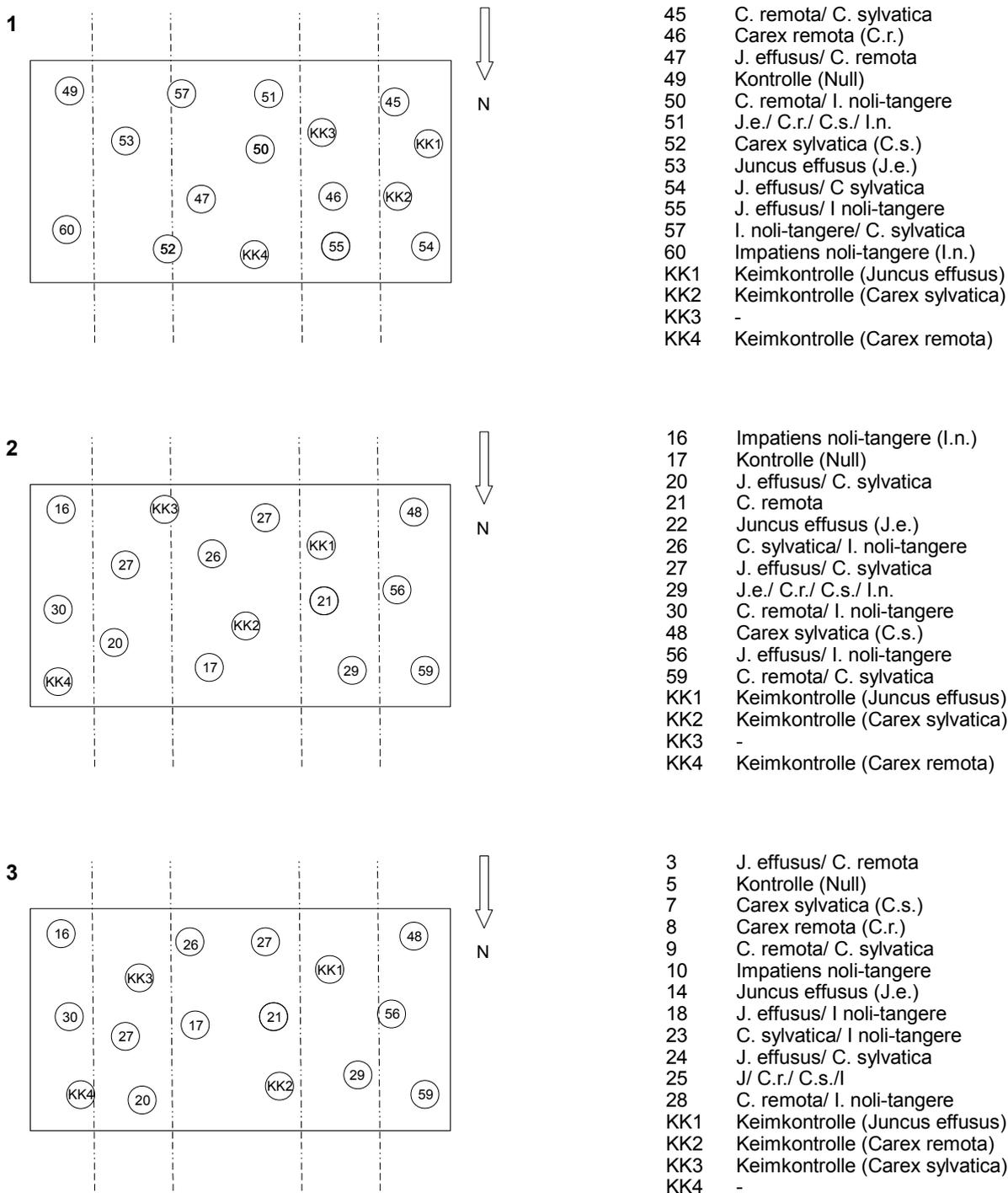
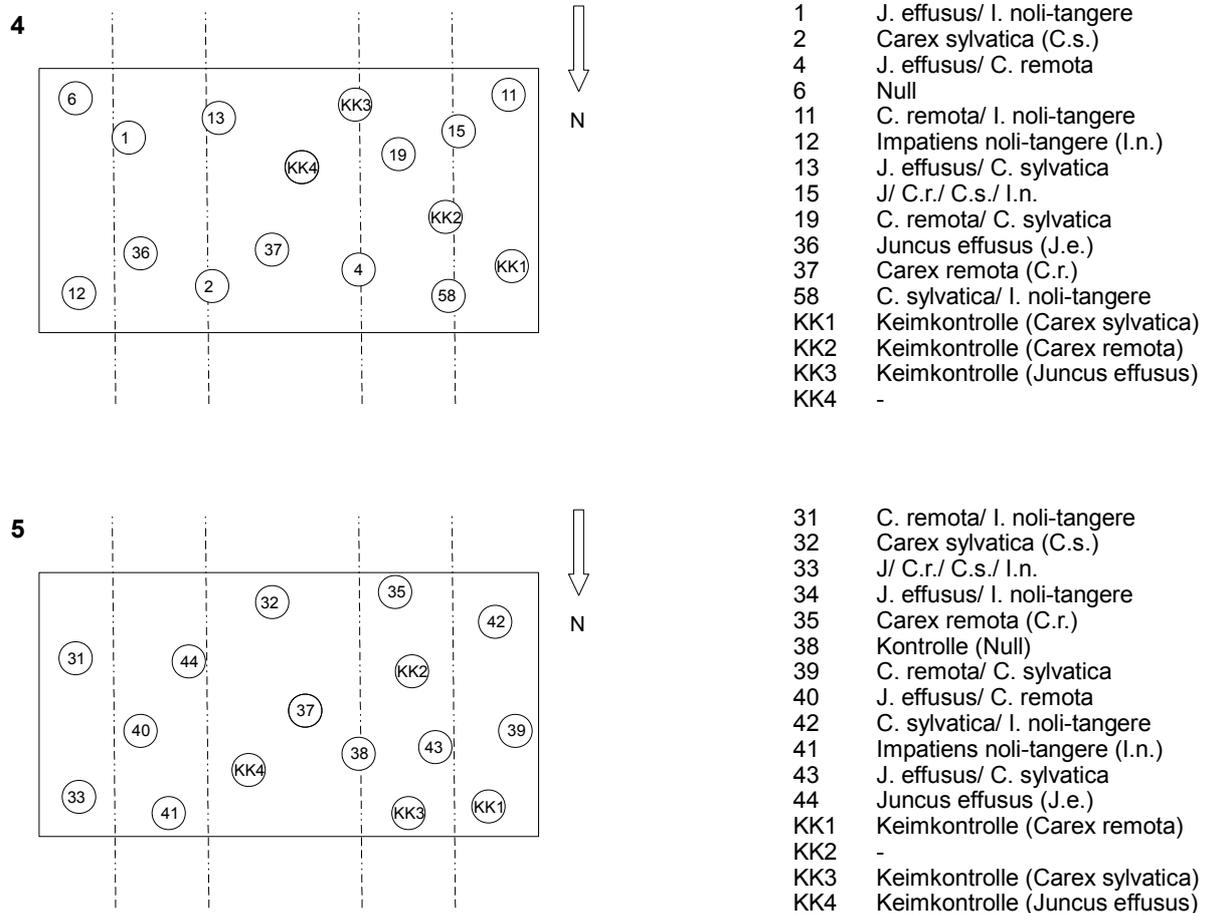
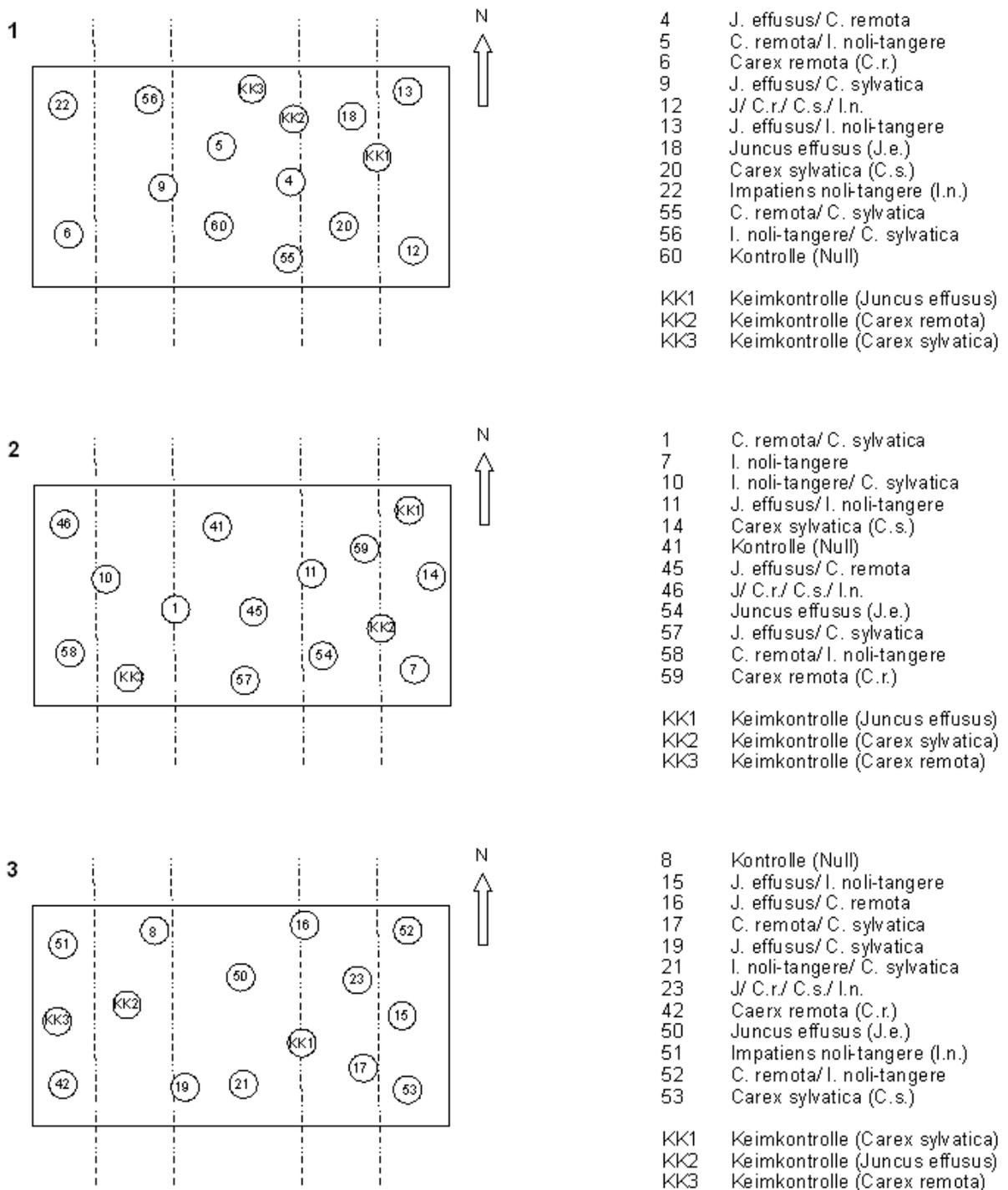


Abbildung 19: zufällige Verteilung der insitu-Versuchszylinder am Standort 'Merklingen' (Plots 1-3)

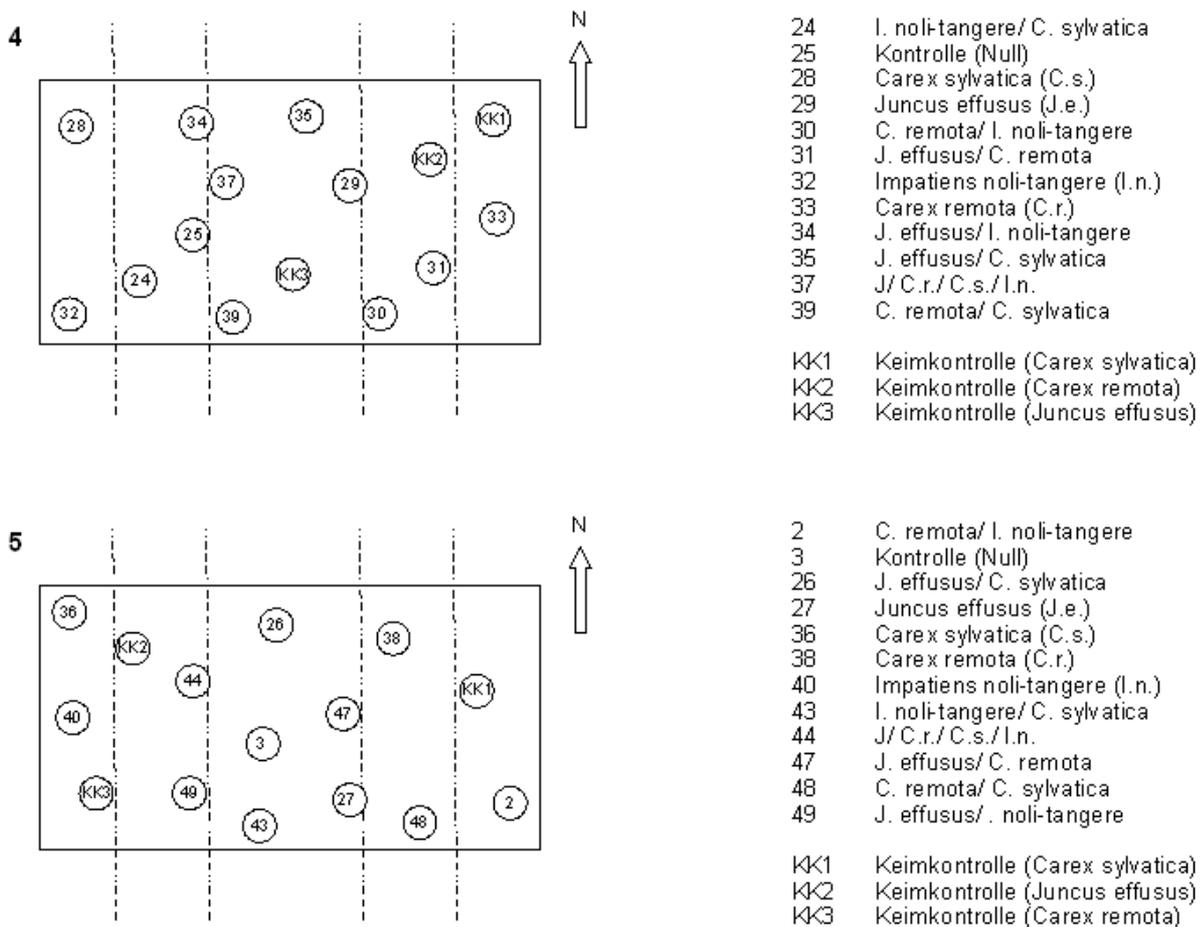


**Abbildung 20:** zufällige Verteilung der insitu-Versuchszylinder am Standort 'Merklingen' (Plots 4+5)

Bei der Anlage der Versuchsplots wurden die Führungszylinder weitestgehend gleichmäßig über die Fläche verteilt eingegraben, wobei die bestehende Vegetation (insbesondere die wieder aufgeforsteten Fichten) wie auch die in den Oberboden eingedrückten Reste der bei der Befahrung wohl verwendeten Reisigmatte dies erheblich beeinflussten. Die Versuchszylinder wurden wiederum innerhalb jedes Versuchsplots zufällig auf die vorbereiteten Versuchszylindern verteilt (Standort 'Merklingen': Abbildung 19 und 20, Standort 'Mooswald': Abbildung 21 und 22).



**Abbildung 21:** zufällige Verteilung der insitu-Versuchszylinder am Standort 'Mooswald' (Plots 1-3)



**Abbildung 22:** zufällige Verteilung der insitu-Versuchszylinder am Standort 'Mooswald' (Plots 4+5)

Zusätzlich zu den Versuchszylindern mit künstlich verdichtetem Bodenmaterial wurden zur Kontrolle der Keimfähigkeit des Saatgutes für die Seggen- und Binsenarten eine Keimkontrolle installiert. Hierfür wurde nur leicht angedrücktes Oberbodenmaterial in die Zylinder verfüllt und die jeweiligen Samen aufgebracht. Aufgrund der nur begrenzten Menge an zur Verfügung stehendem Saatgut konnte keine Keimkontrolle mehr für *Impatiens noli-tangere* auf den Flächen installiert werden.

### 2.2.3 Bestimmung bodenchemischer und -physikalischer Kenngrößen

Wie im Projektantrag beschrieben, waren wiederholte Probenentnahmen von Stechzylinderproben sowie insitu-Messungen im Gelände vorgesehen, u.a.

- Luftleitfähigkeit und Gasdiffusionsmessungen (insitu und im Labor,  $D_s/D_0$ )
- Luftporenvolumen, Makroporosität, Trockenraumdichte, Wassergehalt
- pH-Wert
- C/N- Verhältnis (Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt)

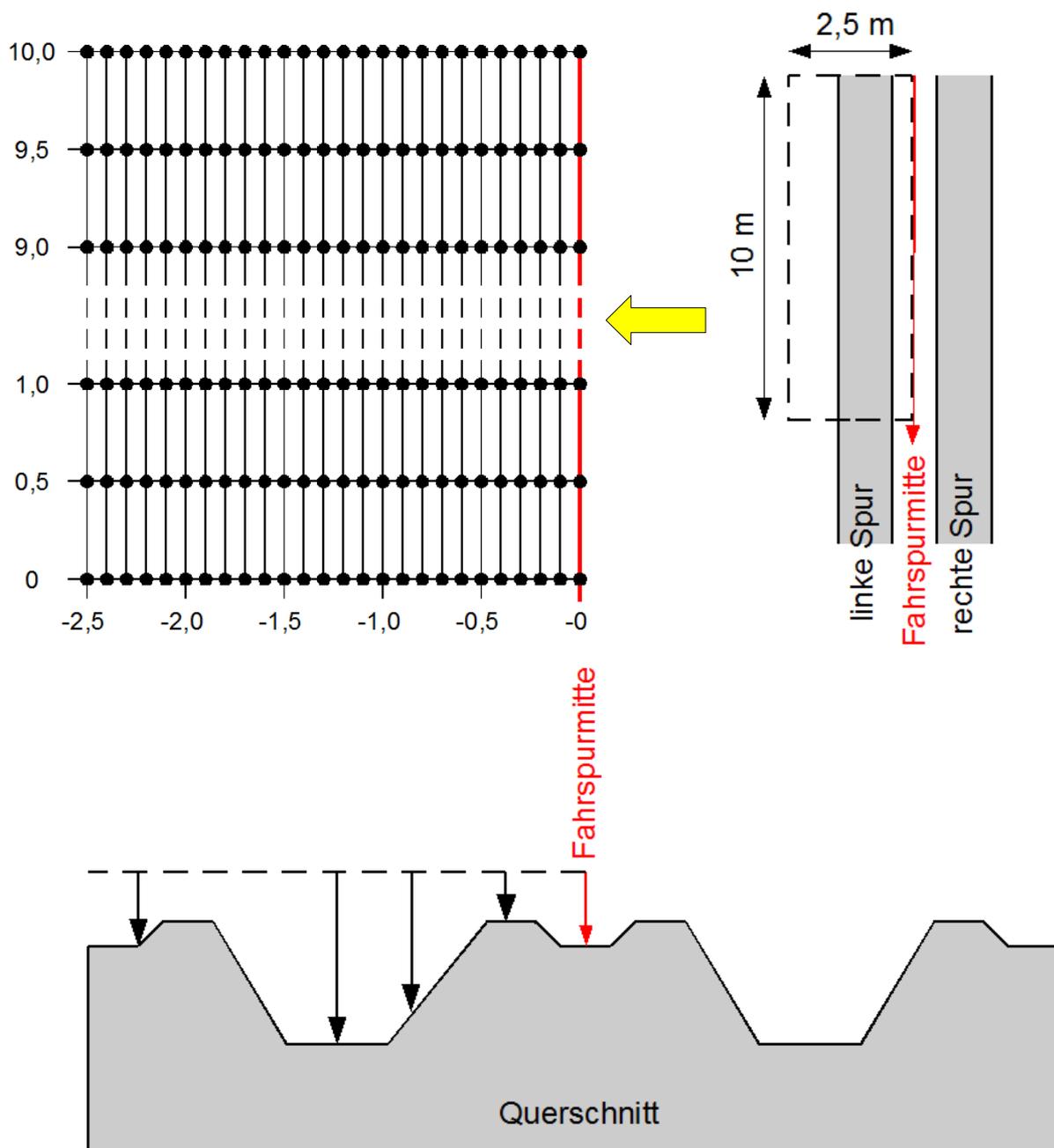
Leider musste während der Projektlaufzeit ein grundlegender Bestandteil der Messanlage ausgetauscht werden, so dass die Geräte für die Analysen gerade kurz nach Projektbeginn nicht in ausreichender Kapazität zur Verfügung standen. Es wurde sich auf eine reduzierte Bodenentnahmemenge beschränkt (wie z.B. Proben zur Charakterisierung der Standorte).

Trotzdem wurden Stechzylinderproben für Teilversuche entnommen, wenn diese in einem direkten Bezug zu einer anderen Messgröße relevant waren. Auf die sehr zeit- und arbeitsintensiven insitu-Messungen von Gasdiffusionskoeffizienten ( $D_s/D_0$ ) und  $\text{CO}_2$ -Gehalten im Oberboden wurde zugunsten der ausführlichen Vegetationsaufnahmen und Untersuchungen verzichtet.

### 2.2.4 Bestimmung des Mikroreliefs

Im Rahmen zweier Bachelorarbeiten wurden auf einem Teilabschnitt der ausgewählten Praxisfahrspuren der Standorte 'Merklingen' (Abbildung 3) und 'Mooswald' (Abbildung 6) über eine Länge von 10 m und einer Breite von 5 m die Vegetation der Krautschicht sowie die jeweilige Flächendeckung in unterteilten Bereichen von (0,5 x 0,5 m =) 0,25 m<sup>2</sup> bestimmt. Das Mikrorelief wurde mittels einer Laserwasserwaage bzw. einer Schnurwasserwaage entlang eines höher aufgelösten Rasters (gemäß Abbildung 23) jeweils für die rechte und linke Fahrspurhälfte erhoben.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Vegetation (dominierende Spezies vorhanden, ja/nein) und der identifizierten Fahrspurbereiche (Mittelwulst, Fahrspur, Seitenwurst, Randbereich) wurden mittels 200cm<sup>2</sup>-Stechzylindern ungestörte Bodenproben in einer Tiefe von 5-10 cm aus vorher definierten Bereichen (= Straten) der einzelnen Fahrspuren entnommen. An den ca. 55 Bodenproben je Standort wurden die Lagerungsdichte, die Porosität und die Gasdurchlässigkeit (als Maße für die Bodenstruktur) sowie die Wurzelmasse (als Maß für die Durchwurzelung) bestimmt.



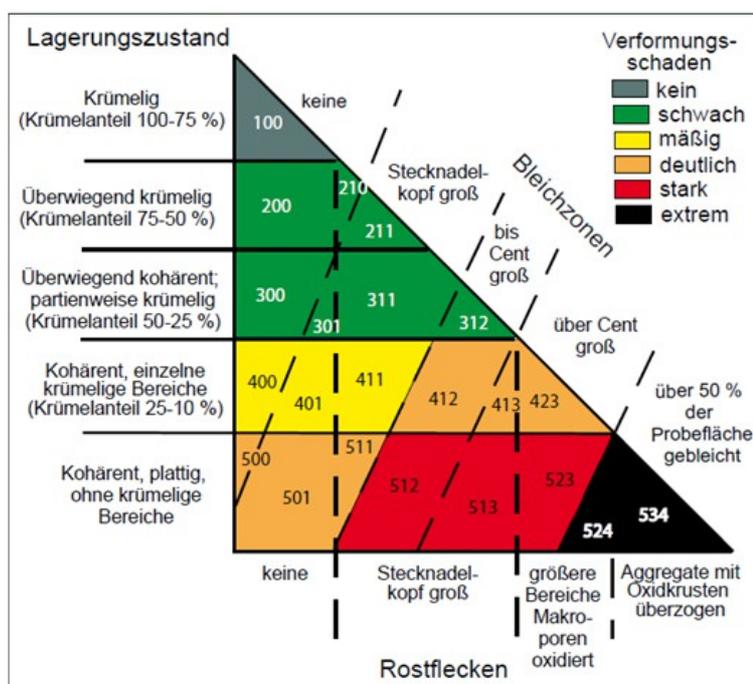
**Abbildung 23:** Bestimmung des Mikroreliefs (am Beispiel der linken Fahrspurhälfte, rechte Hälfte analog). Die Bestimmung der Oberflächenvertiefung erfolgt anhand der Festlegung einer Referenzhöhe in der Fahrspurmitte, welche durch ein waagrecht gespanntes Seil über die Fahrspur oder eine in der Fahrspurmitte positionierte Laserwasserwaage erfolgt. An jedem Messpunkt (schwarze Punkte in der Aufsicht, links oben) wird mittels eines Masstabes die relative Höhe zwischen Bodenoberfläche und der Referenzhöhe ermitteln.

## 2.2.5 Vegetationsbestimmungen

Sowohl die Bestimmung der Ausgangsvegetation als auch die jährlich mindestens einmal durchgeführte Kontrolle der Aussaat erfolgte mit gezielten Vegetationsaufnahmen jeden Plots mit der Methode nach BRAUN-BLANQUET (1928). Nach der Erfassung aller auftretenden Arten wurde jeweils deren prozentualer Deckungsgrad geschätzt, eingeteilt in verschiedene Klassen (siehe Tabelle 1), beginnend mit den größten Deckungen. Aufgezeichnet wurden die Häufigkeiten dann in einer Rangskala von 1 bis 7 nach Transformation 2 (TREMPE 2005).

**Tabelle 1:** Abundanz-Dominanz-Schätzskala nach Braun-Blanquet. Die Größen Individuenzahl (Abundanz) und Deckung (Dominanz) werden in sieben Klassen, bezeichnet als Artmächtigkeit, zusammengeführt. Für verschiedene Verwendungszwecke gibt es Transformationen in mittlere Deckungsprozente (Transformation 1) sowie in eine Rangskala (Transformation 2, aus TREMP 2005).

Artmächtigkeit	Deckung (%)	Abundanz(n)	Transformation (1)	Transformation (2)
r	-	selten	0,1	1
+	< 1	spärlich	0,2	2
1	1 – 5	reichlich	2,5	3
2	> 5-25	zahlreich	15	4
3	> 25-50	-	37,5	5
4	> 50-75	-	62,5	6
5	> 75-100	-	87,5	7



**Abbildung 24:** Dreiecksschlüssel zur Bestimmung der Intensität des Verformungsschadens (GAERTIG et al. 2000).

## 2.2.6 Verformungsschaden

Bei den unterschiedlichsten Untersuchungen wurde bei der Probenentnahme (Regenwürmer und/oder Bodenproben) ebenfalls der Verformungsschaden des Bodens aufgenommen (Abbildung 24).

## 2.2.7 Regenwurmabundanz

Auf den untersuchten Praxisfahrspuren wurde die jeweilige Regenwurmabundanz innerhalb der Fahrspur im Vergleich zum umgebenden Bestand untersucht.

Hierfür wurden Plots von einer Größe von 25 x 25 cm bis zu einer Tiefe von 25 cm ausgehoben und das so entnommene Bodenmaterial über einem groben Sieb per Hand nach Regenwürmer durchsucht (Abbildung 25). In die ausgehobenen Löcher wurde zur Austreibung möglicher Regenwürmer im darunter liegenden Bodenraum eine Senfmehlsuspension gegeben (100 g/5 L Löwensenf „scharf“ oder 6 g/L Fuchs Spices, Art.-Nr. 4014066005479). Alle Regenwürmer wurde nach dem Fang ins Labor verbracht und bei ca. 4°C im Kühlraum auf feuchtem Filterpapier gehalten. Die Regenwurmart, sowie die Anzahl und die Gesamtbiomasse für jeden Plot wurden nach ca. 2 - 10 Tagen im Labor nach der Methode von FLADE (2010) bestimmt.



**Abbildung 25:** Regenwurmfang per Handsortierung

### 2.2.8 Bestimmung der Keimfähigkeit des Saatguts

Es sind nur wenige und teilweise widersprüchliche Informationen zur Keimungsfähigkeit der verwendeten Pflanzenartensamen verfügbar (z.B. ERVIN & WETZEL 2001; SCHUETZ & RAVEL, 1999), weshalb innerhalb des Projektes die Keimfähigkeit des zu Verfügung gestandenen Saatgutes überprüft wurde.

Hierbei wurden um die 50 Samen jeweils auf befeuchtetes Filterpapier in eine Petrischale gelegt und dann auf einer Lichtbank (~ 3200 – 3900 Lux) mit einem 12h/12h- Tagesrhythmus (hell/dunkel) bei ca. 22 - 24 °C zur Keimung gebracht wurden. Einige Ansätze wurden zuvor einer (kalt/nass/dunkel-) Stratifikation bei + 4°C über ca. 80 Tage ausgesetzt. Auch Ansätze bei der anschließenden Keimungszeit auf der Lichtbank wurde jeweils die Hälfte der Ansätze in unregelmäßigen Abständen nachts in eine Kühlkammer bei ~ 2 - 4 °C verbracht.

Folgende Varianten (mit jeweils 5 Wiederholungen) ergaben sich für *Carex remota* (jeweils 4 Wiederholungen) und *Carex sylvatica* (jeweils 5 Wiederholungen):

- stratifiziert + konstante Temperatur
- stratifiziert + variable Temperatur
- nicht stratifiziert + konstante Temperatur
- nicht stratifiziert + variable Temperatur

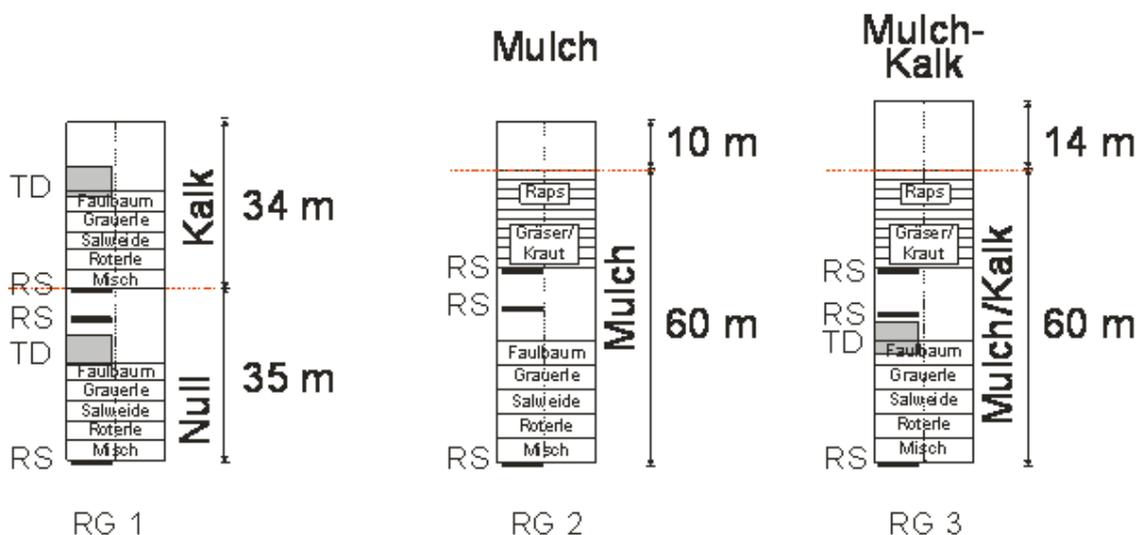
In regelmäßigen Abständen wurden die Petrischalen kontrolliert, befeuchtet und die Keimzahl ermittelt. Ein sichtbar ausgebildeter Spross wurde hierbei als „gekeimt“ klassifiziert.

*Juncus effusus* zeigte sich bei allen Keimungsvorversuchen gleich gut keimungsfähig, so dass hier (auch aufgrund der mikroskopisch kleinen Samen) auf weitere und detailliertere Keimungsversuche verzichtet wurde. Aufgrund der geringen Saatgutmenge von *Impatiens noli-tangere* wurde auch bei dieser Art auf die Keimungsversuche verzichtet.

## 2.3. Versuche mit holzigen Pflanzen (FVA)

### 2.3.1 Vorbereitung und Vorbehandlung der Fläche

Das ursprüngliche Versuchsdesign sah die Kombination von biologischen Aktivierungsmaßnahmen wie der Pflanzung von Gehölzen und krautigen Pflanzen mit einer vorbereitenden Kalkung, mit mechanischer Bodenvorbereitung, der Kombination aus Kalkung und mechanischer Bodenvorbereitung auf jeweils getrennten Fahrtrassen vor. Auf einer Nullvariante sollte weder eine Kalkung bzw. noch eine mechanische Bearbeitung erfolgen. Aufgrund des Flächenzuschnitts auf der Versuchsfläche Merklingen konnten nur drei statt vier Fahrtrassen angelegt werden (siehe Abbildung 26). Aus diesem Grunde wurde die Hälfte der Trassenlänge von Fahrtrasse 1 (RG 1) mit einem Dolomitgesteinsmehl behandelt. Fahrtrasse 2 (RG 2 - Mulch) wurde nur mechanisch mit einem Anbaumulchgerät bearbeitet. Auf Fahrtrasse 3 (RG 3 Mulch/Kalk) erfolgte vor Durchführung der Oberbodenbearbeitung eine Ausbringung von Dolomitgesteinsmehl. Für die Untersuchung von Regenerationsvorgängen, die nicht durch aktive Gehölzeinbringung unterstützt werden, wurden auf den Fahrtrassen zusätzlich unbepflanzte Plots abgegrenzt. Auf diesen kann die natürliche Regeneration ohne mechanische Bearbeitung und bodenchemische Verbesserung (RG 1 - Null) sowie die Wirkung der Kalkung (RG1 – Kalk), der mechanischen Bodenbearbeitung (RG 2 Mulch) und der Kalkung in Kombination mit Bodenbearbeitung (RG 2 Mulch-Kalk) abgeschätzt werden



**Abbildung 26:** Lage der Behandlungsstraten auf den Rückegassen (RG: Rückegasse, RS: Rhizotronscheibe, TD: Trockendach)

Für die **Durchführung der kontrollierten Befahrung** wurde ein Forwarder des Typs HSM 208 F eingesetzt (Abbildung 27). Das Leergewicht der Maschine betrug 14,9 t. Das Rückefahrzeug war mit 9,2 fm Buchenschwellen beladen; dies entsprach einer Zuladung von 9,8 t; das Gesamtgewicht lag damit nahezu bei 25 t. Das Fahrzeug war mit 710/45-26.5 Trelleborg-Breitreifen ausgestattet, die mit einem Druck von 2,5 bis 3 bar befüllt waren. Vom Forwarder wurden die drei Gassen jeweils dreimal in voll beladenem Zustand befahren. Es handelte sich um jeweils um eine Hin- und eine Rückfahrt auf den als Stichgassen angelegten Fahrtrassen.

Die Befahrung erfolgte am 29.03.2012. Der mittlere Wassergehalt zum Zeitpunkt der Befahrung lag in der Tiefenstufe 0 bis 5 cm bei 39.2% und in 10 bis 20 cm bei 33 Vol% (jeweils 14 Feldmessungen mit FDR-Sonde). Für jeweils fünf in diesen Tiefenstufen gewonnenen Stechzylinder lagen die Werte bei 42% bzw. 36% tendenziell etwas höher.



**Abbildung 27:** Beladener HSM-Forwarder



**Abbildung 28:** Mulchaggregat AHWI M 700

Das **Mulchen** der Fahrtrassen wurde am 30.04.2012 durchgeführt. In der vorausgehenden Woche gab es ergiebige Niederschläge, so dass in den Fahrspuren Wasser stand. Beim Mulchaggregat handelte es sich um ein Produkt der Firma AHWI Pri-noth mit 56 Werkzeugen auf einem 2300 mm breiten Rotor. Das Gewicht des Aggregates Einheit beträgt 4,6 t. Als Trägerfahrzeug war ein Fendt 936 vario mit einer Nennleistung von 253 KW bei einem Gesamtgewicht von 10.7 t eingesetzt (Abbildung 28).

Die **Einbringung des Kalkes** erfolgte händisch vor dem Mulchen der Gassen am 25. bzw. am 26.04.2012. Die zu kalkenden Abschnitte der Rückegasse wurden mit einer Solldosierung von 6 t/ha beaufschlagt. Es handelte sich um ein handelsübliches dolomitisches Gesteinsmehl mit einem Gesamtkarbonatanteil von 87%. Der Feinanteil <0,1mm lag bei rund 64%. Die Ware wurde in angefeuchteter Form mit einem Wassergehalt von rund 5% ausgebracht.

Unmittelbar nach der Befahrung und noch vor dem Mulchen der Fahrtrassen wurde die **Fahrspureintiefung an Quertransekten** über die Fahrspuren hinweg be-

stimmt. Auf den gemulchten Trassen erfolgte dies in einem Abstand von 10 m, auf der ungemulchten Trasse in Abständen von 5 m. Die Bestimmung der Eintiefung erfolgte in einer Auflösung von 10 cm jeweils 2.5 m rechts und links der Fahrspurmitte durch Abloten von einer Referenzhöhe, die in dort festgelegt wurde. Diese wurde so bestimmt, dass über das gesamte Transekt ein Abloten möglich war. Durch eine Laserwaage wurde die Einhaltung der Referenzhöhe an den 50 Transektmesspunkten jedes Quertransektes überwacht. Die aufgenommenen Transekte wurden eingemessen, um im Verlauf des Versuches Veränderungen des Mikroreliefs durch z.B. Nivellierung der Fahrspur durch Eintrag organischer Substanz detektieren zu können.

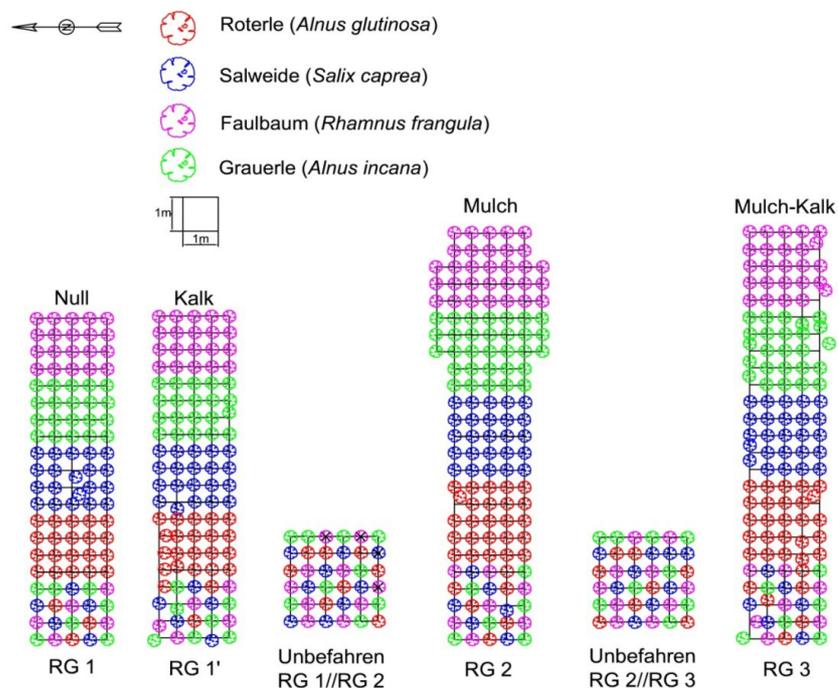
### 2.3.2 Bepflanzung der Fläche

Die Bepflanzung erfolgte am 10.05.2012. Hierfür wurden Pflanzen der Größe 80 cm bis 120 cm (*Alnus glutinosa* und *Alnus incana*) und 70 bis 90 cm (*Salix caprea* und *Rhamnus frangula*) verwendet. Die Rot- und Grauerlen waren 2-jährig verschulte Pflanzen und stammten aus den Herkunftsgebieten des Alpen- und Alpenvorlandes (80208 bzw. 80302). Faulbaum und Salweide waren als zweitriebige Sträucher der Größe 70 bis 90 cm spezifiziert. Das Pflanzmaterial wurde unmittelbar vor der Pflanzung mit einem Wurzelschutzgel (GEFA der Fabritz GmbH) behandelt. Die Pflanzlöcher wurden mit dem Pflanzlochbohrer „Bohrfuchs“ angelegt (Abbildung 29). Der Durchmesser der Bohrlöcher betrug 35 cm.

Die Pflanzung erfolgte in einem Pflanzverband von 1m \* 1m (Abbildung 30). Durch diesen Abstand konnte sichergestellt werden, dass in einem Quertransekt über die Fahrtrasse hinweg jeweils eine Pflanze im rechten bzw. linken Randbereich außerhalb der Fahrspur, in der rechten bzw. linken Fahrspur und im Mittelstreifen zwischen den Fahrspuren gepflanzt wurde. Damit können unterschiedliche Wirkungsintensitäten der Befahrung erfasst werden. Je Gehölzart wurden fünf Quertransekte angelegt, sodass pro Gehölzplot 25 Pflanzen ausgebracht wurden. Zusätzlich wurden die vier Gehölzarten in einem Plot in Mischung gepflanzt. Aufgrund der Tatsache, dass für die Versuchsanlage nur 3 Fahrtrassen zur Verfügung standen, musste auf der nicht gemulchten Fahrtrasse sowohl die gekalkte Variante wie auch die nicht gekalkte Variante angelegt werden. Um dies zu gewährleisten wurden auf dieser Fahrtrasse je Plot nur vier Quertransekte angelegt. Zusätzlich zu den Varianten auf den befahrenen Fahrtrassen wurden die Gehölze in zwei Pflanzplots in gemischter Form auf einer unbefahrenen Teilfläche zwischen den Fahrtrassen eingebracht. Eine erste Vitalitätsaufnahme des Pflanzguts wurde im September 2012 durchgeführt. Hierbei wurde die Überlebensrate sowie die Parameter Wurzelhalsdurchmesser, Höhe und Kronenbreite aufgenommen. Im Frühjahr 2013 wurde eine Ergänzungspflanzung durchgeführt und die Gehölze mit Fegeschutzspiralen versehen. Auf den drei Fahrtrassen (RG1 – RG 3) wurde zudem jeweils ein Trockendach installiert.



**Abbildung 29:** Pflanzung mit Pflanzfuchs; rechts: Bepflanzte Fahrspur



**Abbildung 30:** Bepflanzungsschema (auf Fahrtrasse 1 wurden zwei Gehölzplots auf der unbehandelten Variante und der gekalkten Variante angelegt)

### 2.3.3 Rhizotronkammern (in situ-Beobachtung des Wurzelwachstums)

Ergänzend zur Installation der Gasmessplots war in 2013 der Einbau von Rhizotronkammern zur in situ-Beobachtung des Wurzelwachstums vorgesehen. Dieser Zeitplan konnte nicht eingehalten werden. Die Prototypenentwicklung und ein Pilot-test konnte jedoch im Jahr 2013 abgeschlossen werden, sodass eine Installation im Frühjahr 2014 durchgeführt werden konnte. Insgesamt sind auf der Versuchsfläche

'Merklingen' 16 Rhizotronkammern eingebaut worden. Diese werden in Bezug zu den Gaslysimeterplots (siehe „2.3.4 Gashaushaltsuntersuchungen“) installiert und erfassen einen kreisförmigen Beobachtungsausschnitt mit einem Radius von 10 cm. Der Einbau erfolgte in einer Bodentiefe zwischen 20 cm bis 30 cm.

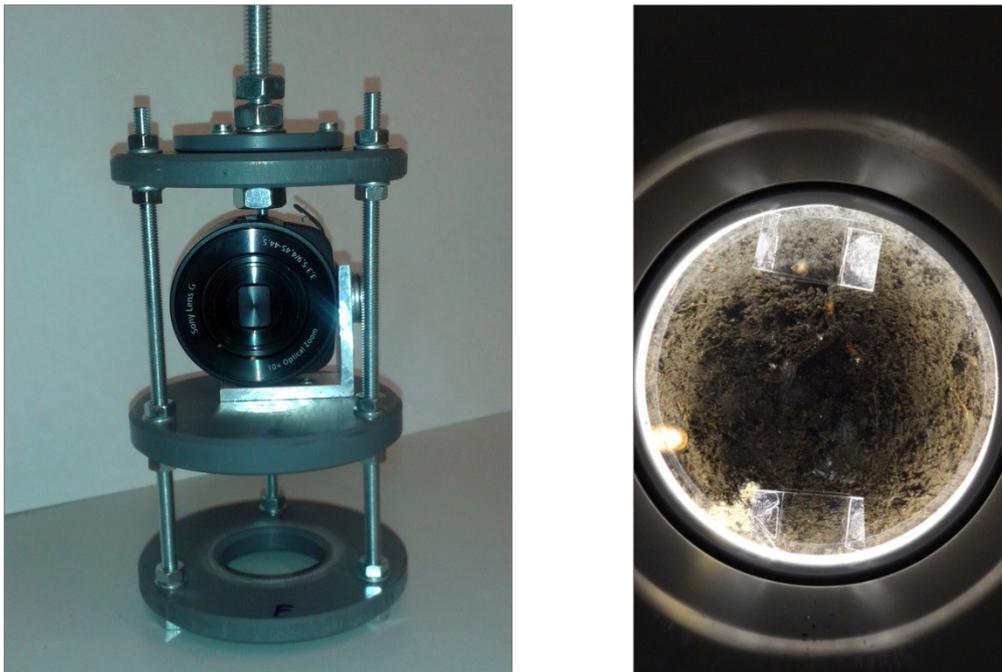


**Abbildung 31:** Links: Rhizotronkammer vor Einbau  
Mitte: Plexiglasscheibe mit Verbindungsstück zum Beobachtungsschacht und Gaslysimeter  
Rechts: Rhizotronkammer in der Profilgrube

Für den Bau der Rhizotronkammer wurden soweit möglich Fertigbauteile aus dem Installationsbereich verwendet (siehe Abbildung 31). Der vertikale Führungsschacht für die Kamera hat einen Innendurchmesser von 10 cm. Über ein mit diesem verbundenes T-Stück wird die Verbindung zur Plexiglasscheibe hergestellt. Auf diese aufgeschraubt befindet sich ein angefaster Edelstahlring, der in den Boden eingedrückt wird, bis die Plexiglasscheibe plan an der präparierten Profilwand aufliegt. Für die Ausleuchtung des Beobachtungsfensters wird ein LED-Band auf den vier umlaufenden Seiten der Plexiglasscheibe in eine Nut eingelegt und mit Silikon abgedichtet. Die Stromzufuhr für das Band wird an die Bodenoberfläche verlegt. Durch eine Heizfolie, die über eine flexible Gummischlauchführung in den Beobachtungsschacht eingeführt und auf die Plexiglasscheibe aufgedrückt werden kann, kann Kondenswasser entfernt werden.

Beim Einbau erfolgt die vertikale und horizontale Positionierung der Rhizotronkammer über Gewindestangen, an denen endseitig PVC-Platten befestigt sind. Die Gewindestangen werden mit Aluverbindungs winkeln und Schellen an der Rhizotronkammer befestigt. Für den Einbau der Rhizotronkammer ist die Anlage einer Profilgrube mit den Mindestmaßen 50x50 x50 cm (Länge x Breite x Tiefe) erforderlich.

Um die Bodenluftzusammensetzung hinter der Rhizotronscheibe überwachen zu können, wird ein Gaslysimeter gasdicht durch die Plexiglasscheibe geführt (Abbildung 31, Mitte). Für eine ungestörte Beobachtung des Wurzelzuwachses müssen die hinter der Scheibe gemessenen Gaskonzentrationen den in den räumlich benachbart installierten Gaslysimetern gemessenen Konzentrationen entsprechen.



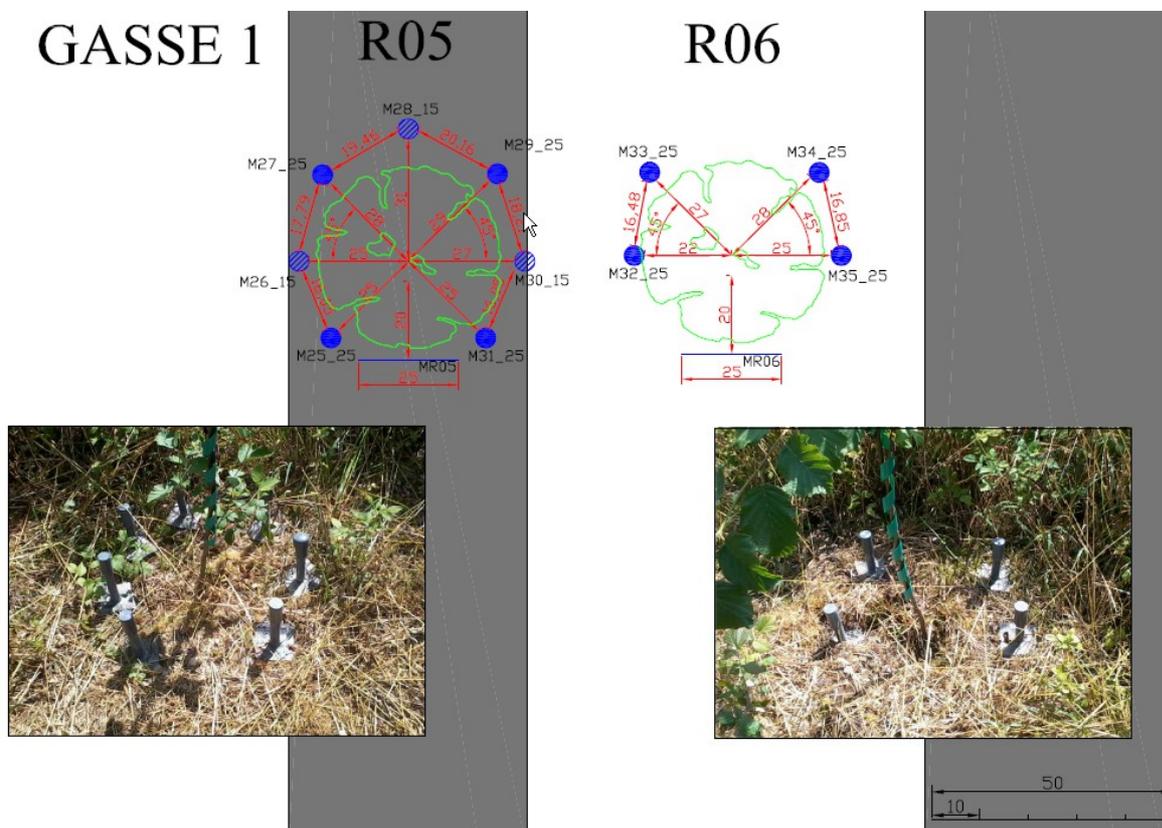
**Abbildung 32:** Links: Container für die Objektivkamera  
Rechts: Bildausschnitt aufgenommen mit der Sony Q10 Objektivkamera

Für die Aufnahme des Wurzelwachstums wird eine Sony DSC-QX10 Smartshot Digitalkamera mit einem 18,2 Megapixel CMOS Sensor verwendet. Das Weitwinkel-Objektiv ist mit einem 10fach optischen Zoom und Bildstabilisator ausgestattet. Aufgrund seiner kompakten Bauweise (6,2 x 6,2 x 3,3 cm) lässt es sich problemlos in den Beobachtungsschacht einführen. Über WIFI- oder NFC-Verbindung kann die Objektivkamera für die Kontrolle des Beobachtungsausschnitts sowie die Aufnahme mit einem Smartphone oder Laptop/Tablet-PC verbunden werden.

Abbildung 32 (links) zeigt den Container für die Objektivkamera. Durch die kabellose Verbindung mit einem Smartphone bzw. Laptop kann der Bildausschnitt unter Verbleiben der Kamera im Beobachtungsschacht überprüft und die Aufnahme durchgeführt werden. Die Abbildungsqualität der in der Pilotstudie aufgenommenen Bilder war überzeugend (Abbildung 32, rechts).

### 2.3.4 Gashaushaltsuntersuchungen

Zur Erfassung der Belüftungssituation wurden im Juli 2013 diffusiv sammelnde Gaslysimeter auf den Versuchsparzellen der angelegten Rückgassen am Standort 'Merklingen' installiert. In den Versuchsvarianten mit den Gehölzen wurden die Gaslysimeter jeweils konzentrisch um die Grauerlen angeordnet (siehe Abbildung 33). Der Sollabstand zur Stammbasis betrug 25 cm. In den Fahrspuren wurden je Plot jeweils drei Gaslysimeter in der Tiefenstufe 15 cm und vier Gaslysimeter in der Tiefe von 25 cm installiert. In den Bereichen zwischen den Fahrspuren (Zwischenspur) wurden nur die vier Gaslysimeter der Tiefenstufe 25 cm eingebaut. Auf den Varianten ohne Gehölzpflanzung wurde ebenfalls eine konzentrische Anordnung der Messinstrumente gewählt.



**Abbildung 33:** Anlage der Gasmessplots in der Fahrspur (links, R05) und im Zwischenspurbereich (rechts, R06). Die Installation der Gaslysimeter in den Gehölzvarianten erfolgte in radiärsymmetrischer Anordnung um eine gepflanzte Erle

Auf Fahrtrasse 1 wurden insgesamt sechs Gaslysimeterplots angelegt. Hierbei wurden auf dem unbehandelten Fahrtrassenabschnitt und auf der gekalkten Parzelle dieser Fahrtrasse jeweils ein Plot in der Fahrspur und ein weiterer in der Zwischenspur angelegt. Auf dem nicht bepflanzten Fahrtrassenabschnitt ohne Kalkung wurde

ebenfalls ein Plot in der Fahr- und Zwischenspur eingerichtet. In analoger Weise wurden die beiden Fahrspursituationen in den Gehölzvarianten auf der gemulchten Fahrtrasse 2 und der gemulchten/gekalkten Fahrtrasse 3 instrumentiert. Auf diesen beiden Trassen wurden ebenfalls abseits der Gehölzvarianten Gaslysimeterplots in Fahrspur und Zwischenspur angelegt. Jeweils ein weiterer Plot mit vier Gaslysimetern in der Tiefe 25 cm wurde in Bezug zu Grauerlen in den beiden Kontrollvarianten installiert. Insgesamt sind an 16 Messstellen insgesamt 85 Mineralboden-Gaslysimeter installiert. Zusätzlich wurden zwei Messstellen für die Erfassung der Atmosphärenkonzentrationen angelegt.

Die im Jahr 2014 ist an diesen 16 Messstellen eingebauten Rhizotronkammern zur in situ-Beobachtung des Wurzelwachstums (siehe „2.3.3 Rhizotronkammern (in situ-Beobachtung des Wurzelwachstums)“) sind ebenfalls mit diffusiven Gassammeleinrichtungen ausgestattet. Hierbei wird der Gasraum hinter der Rhizotronscheibe erfasst.

Die Beprobung der Bodenluft wurde im September 2013 aufgenommen und ab dann monatlich wiederholt. Neben den Spurengasen CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> werden auch die Massengase N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> bestimmt.

### **2.3.5 Feld pF-Messplots**

Im Jahr 2014 wurden, um den Feuchteverlauf auf den Messflächen detailliert beobachten und in die Modellierung von Gashaushalt und Dynamik des Wurzelwachstums einbeziehen zu können, in ausgewählten Fahrspursituationen und auf einer Kontrollparzelle Feld-pF Messplots eingerichtet in denen in zu den Rhizotronscheiben korrespondierenden Bodentiefen je 4 HS-Sonden zur Bodenfeuchtemessung und in räumlicher Nähe (innerhalb einer Grube mit 50x50cm Grundfläche) je eine MPS6-Sonde (beide von DECAGON) zur Messung des Matrixpotentials eingebaut wurden. Die Daten der Sonden werden mittels kostengünstiger Datalogger im Feld gespeichert und bei den Außendienstkampagnen auf einen Laptop ausgelesen. Das entsprechend dieser Erweiterung aktualisierte Installationsschema wird in Abbildung 34 dargestellt. Diese Ergänzung der Geräteinstallation wurde auf folgenden Parzellen durchgeführt: Gasse 1/ unbehandelt/ *Alnus incana* (Spur und Zwischenspur); Gasse 2/ gemulcht/ *Alnus incana* (Spur); Gasse 3/ gemulcht+gekalkt/ *Alnus incana* (Spur); Kontrollplot/ Mischbepflanzung.

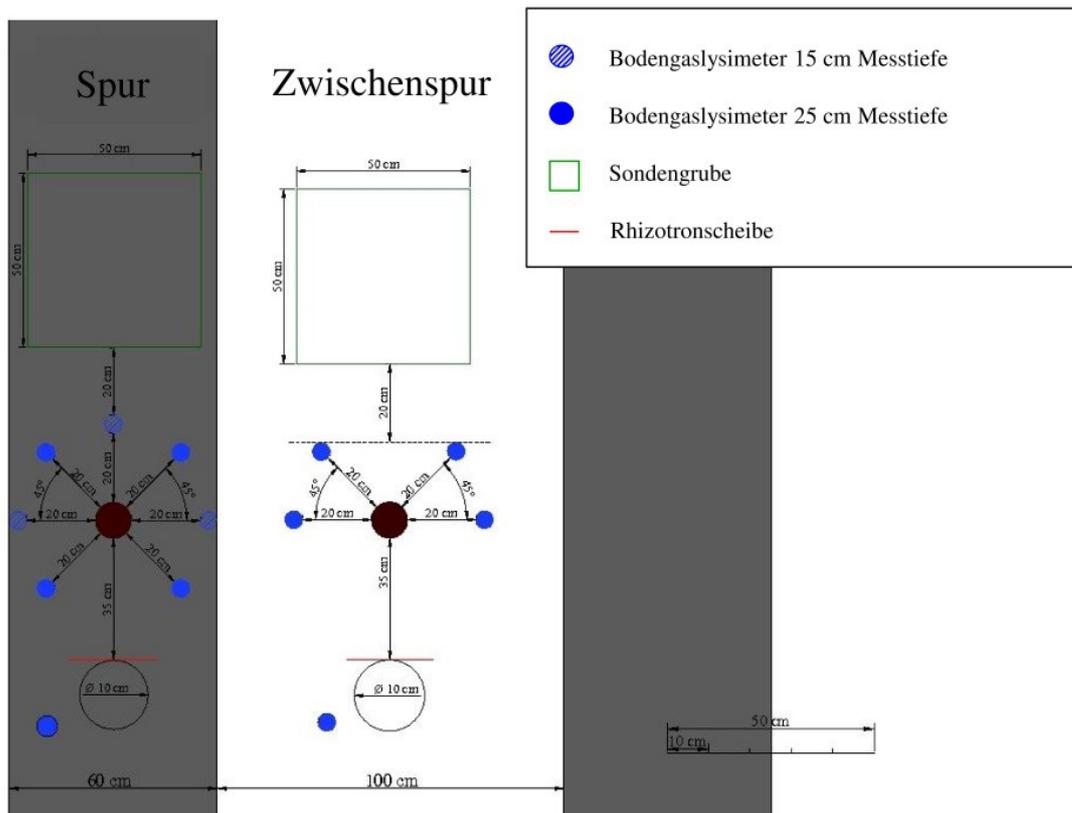


Abbildung 34: Entsprechend der Nachinstallation von pF-Messplots aktualisiertes Installationsschema

### 2.3.6 Bestimmung der Diffusionskoeffizienten

Für die Charakterisierung der Diffusionsleistung wurden 2012 291 ungestörte 100 cm<sup>3</sup>-Stechzylinderproben in räumlichem Bezug zu den Behandlungsvarianten auf den Fahrtrassen gewonnen. Die Lage der Probenahmeorte entspricht der geplanten Einbauposition von Rhizontronscheiben in Abb. 3. Die Probenahme erfolgte in der Fahrspureintiefung in den Tiefenstufen 5 bis 9 cm, 18 bis 22 cm und 30 bis 34 cm und im Zwischenspurbereich in den Tiefenstufen 5 bis 9 cm, 20 bis 24 cm und 35 bis 39 cm in dreifacher Wiederholung. Mit Ausnahme der obersten Entnahmetiefe wurden die Stechzylinderproben in vertikaler sowie in horizontaler Orientierung entnommen. Auf den Fahrtrassen RG 2 und RG 3 wurden die Stechzylinderproben der Tiefenstufe von 5 bis 9 cm an fünf der sechs geplanten Rhizontronstandorte unmittelbar vor und auch nach Durchführung des Mulchens gewonnen. Die weiteren Proben wurden nach der Bodenbearbeitung gewonnen.

Eine zweite Beprobungskampagne fand im Sommer 2014 mit zwei Jahren Abstand statt, um die Entwicklung der Bodenstruktur und der diffusiven Gasdurchlässigkeit zu erfassen. Insbesondere auf den gemulchten Flächen sind erhebliche Entwicklungen dieser Parameter durch Sackungsprozesse zu erwarten.

### 2.3.7 Wurzelauftnahmen und Vegetationsaufnahmen von *Juncus effusus*

Begleitend zu den Untersuchungen auf der kontrolliert angelegten Fahrtrassen beschäftigte sich eine Masterstudentin im Rahmen ihrer Arbeit mit der Wirkung der Flatterbinse (*Juncus effusus* L.) auf Belüftung und Bodenstruktur. Da sich in den alten Fahrspuren die Flatterbinse in einer hohen Abundanz angesiedelt hatte, sollte in einem kleinräumigen Versuchsdesign geprüft werden, ob durch diese Besiedelung positive Effekte auf Bodenstruktur und Bodenbelüftung nachzuweisen sind. Hierfür wurden an einem 4m breiten **Querprofil**, das orthogonal zur Rückegasse orientiert war, die Feinwurzeln in einem 4 x 4 cm Raster gezählt. Zusätzlich wurden zwei **Beobachtungsfenster** (300 x 400 cm bzw. 280 x 460 cm) über die Fahrtrasse hinweg angelegt. Über diese Fenster wurde ein systematisches Gitternetz mit einer Maschenweite von 20 x 20 cm gelegt. An den Schnittpunkten der Rasterzellen wurde die Mikrotopographie durch Abloten von einer Referenzebene bestimmt. An diesen Schnittpunkten war auch die Aufnahme der Bodenbelüftung durch eine CO<sub>2</sub>-Sondenmessung sowie Bodenstrukturaufnahmen geplant. Zusätzlich wurde in den Rasterzellen die Deckung für die vorkommenden krautigen Pflanzen bestimmt.

### 2.3.8 Bodenstruktur und Feinwurzeluntersuchungen an Bohrkernen

Im Rahmen der Masterarbeit von Frau Lelde Jansone wurden auf den Behandlungspartellen an je 10 randomisiert verteilten Kleinplots (50x50cm) die Bodenvegetation aufgenommen und im Zentrum jedes Kleinplots je ein 17cm langer Bodenbohrkern mit knapp 8cm Durchmesser aus dem Oberboden entnommen. Auf den Behandlungsvarianten auf Fahrtrassen wurden die 10 Probenahmepunkte je Plot hälftig (also je 5 Aufnahmepunkte) auf Fahrspur- und Mittelwulst aufgeteilt. Dabei wurden die in Tabelle 2 dargestellten Situationen beprobt.

**Tabelle 2:** Zahl der Aufnahmeplots und Bohrkernentnahmen je Behandlungseinheit (RG=Rückegasse, MW=Mittelwulst)

	Kontrolle		RG ohne Bearbeitung		RG mit Mulchung		RG mit Kalkung		RG mit Kalkung / Mulchung
	keine	Spur	MW	Spur	MW	Spur	MW	Spur	
Erle	10	5	5	5	5	5	5	5	5
unbepflanzt	10	5	5	5	5	5	5	5	5

Insgesamt wurden also 100 Bohrkern entnommen, die längs halbiert wurden und an der einen Hälfte Untersuchungen zur Bodenstruktur und an der anderen Feinwurzelzählungen (Feinwurzeln < 2 mm) durchgeführt wurden.

## 3. Ergebnisse

Aufgrund der erheblichen Datenmenge, die während der aufwändigen Arbeiten erhoben worden ist, werden im Nachfolgenden nur die wichtigsten Ergebnisse beider Projektpartnern dargestellt. Ergebnisse, die keine direkten Schlussfolgerungen zulassen werden dementsprechend ebensowenig dargestellt, wie alle zugrundeliegenden Rohdaten in tabellarischer Form. Besonders Letzteres würde den Rahmen eines schriftlichen Abschlussberichts überschreiten. Für detailliertere Darstellungen einzelner Aspekte und Daten sei an dieser Stelle auf die Zwischenberichte dieses Projekts der Jahre 2012 und 2013 sowie auf die Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen (siehe „3.3 Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen“) verwiesen, die im Rahmen dieses Projektes angefertigt worden sind.

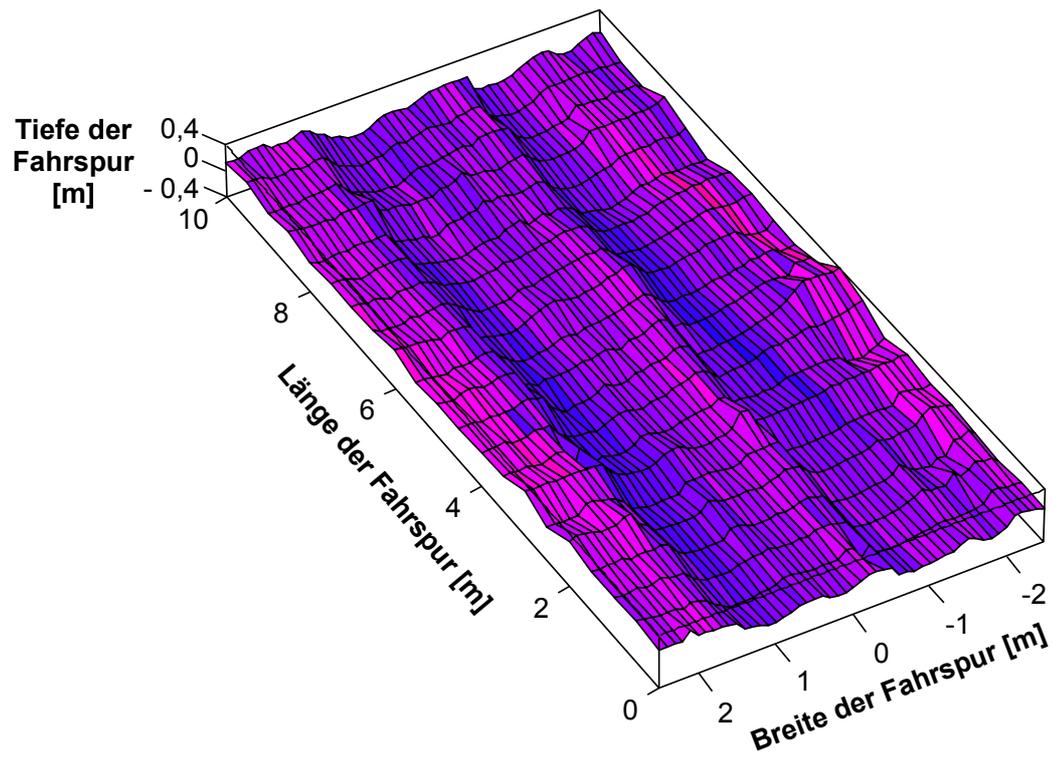
### 3.1. Teilprojekt zum Einfluss krautiger Pflanzen (ALU)

#### 3.1.1 Mikrorelief und kleinräumige Vegetationsverteilung

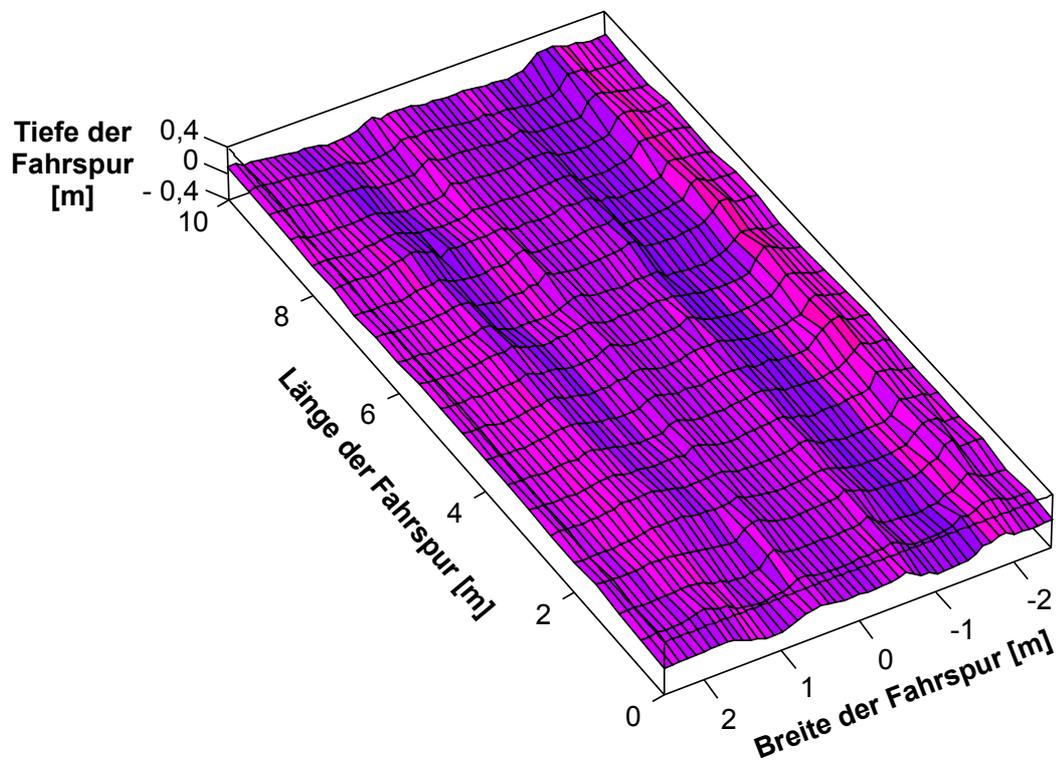
Die räumlichen Profile des Mikrorelief der Teilabschnitt von jeweils zwei untersuchten Praxisfahrspuren sind in Abbildung 35 (Merklingen) bzw. Abbildung 36 (Mooswald) dargestellt. Beide Fahrspuren zeigen eine deutliche Differenzierung in die typischen Bereiche (von innen nach außen): Seitenwulst, Fahrspurbereich und Mittelwulst. In den Bereichen der Wulste ist die Oberfläche erhöht, wobei der eigentliche Fahrspurbereich, wo die Hauptlast der Reifen auf den Boden eingewirkt hat, deutlich tiefer liegt. Im Vergleich der beiden Praxisfahrspuren zeigt sich deutlich, dass die Spurtiefe auf der Praxisfahrspur am Standort 'Mooswald' deutlich geringer ausgeprägt ist als auf dem untersuchten Abschnitt am Standort 'Merklingen'.

Am Standort 'Merklingen' konnten auf dem für die Mikroreliefaufnahme untersuchten Abschnitt der Praxisfahrspur 28 verschiedene Gefäßpflanzenarten identifiziert werden. Einige weitere Arten konnten nicht eindeutig auf die Art bestimmt werden, da den Pflanzen aufgrund des Entwicklungszustandes für die Identifikation notwendige Merkmale, wie z.B. Blüten und/oder Früchte, fehlten.

Am Standort 'Mooswald' konnten auf dem untersuchten Abschnitt der Praxisfahrspur 10 verschiedene Gefäßpflanzenarten identifiziert werden. Auch hier konnten einige weitere Arten aufgrund der zuvor schon genannten Gründe nicht eindeutig auf die Art bestimmt werden.



**Abbildung 35:** Mikrorelief des untersuchten Fahrspurabschnitts am Standort 'Merklingen' (je dunkler/blauer der Farbton, desto geringer die relative Höhe der Oberfläche)



**Abbildung 36:** Mikrorelief des untersuchten Fahrspurabschnitts am Standort 'Mooswald' (je dunkler/blauer der Farbton, desto geringer die relative Höhe der Oberfläche)

Die erheblich größere Artenvielfalt auf der Fahrspur in 'Merklingen', die zudem auch von vielen Arten geprägt ist, welche eher typischer Wiesen- oder Ruderalflächenvegetation zugeordnet werden, ist damit zu erklären, dass die Lichtverhältnisse hier vergleichsweise günstig sind. Der umgebende Bestand ist durch die durchweg jüngeren Nadelbäume sehr niedrig (siehe auch Abbildung 3), während die Fahrspur am Standort 'Mooswald' durch die umgebenden alten Laubbäume stark beschattet wird (siehe auch Abbildung 6).

Die Deckung einzelner Pflanzenarten auf den untersuchten Teilabschnitten der Praxisfahrspuren ist beispielhaft für *Juncus effusus* und *Carex sylvatica* ('Merklingen') bzw. *Carex brizoides* ('Mooswald') entsprechend dem Mikrorelief dargestellt (Abbildungen 37 bis 40). Diese Pflanzenarten sind aufgrund ihrer Standortansprüche (feuchte/sauerstoffarme Böden, geringe Lichtverhältnisse) in der Praxis häufig zu beobachtende typische Besiedler von Fahrspuren in Wäldern.

Sowohl auf dem Fahrspurabschnitt am Standort 'Merklingen' (Abbildung 37 und 38) als auch am Standort 'Mooswald' (Abbildung 39 und 40) zeigt sich deutlich, dass die Flatterbinse als auch die jeweilige Seggen-Art auf die am stärksten verdichteten und verformten Fahrspurbereiche konzentriert sind.

Die Seggenart auf dem Fahrspurbereich am Standort 'Mooswald' zeigt im Vergleich zu der Flatterbinse eine größere Deckung über die gesamte Fläche, während am Standort 'Merklingen' dies umgekehrt ist, was u.a. erneut mit den sehr unterschiedlichen Lichtverhältnissen auf den Fahrspurabschnitten erklärt werden kann.

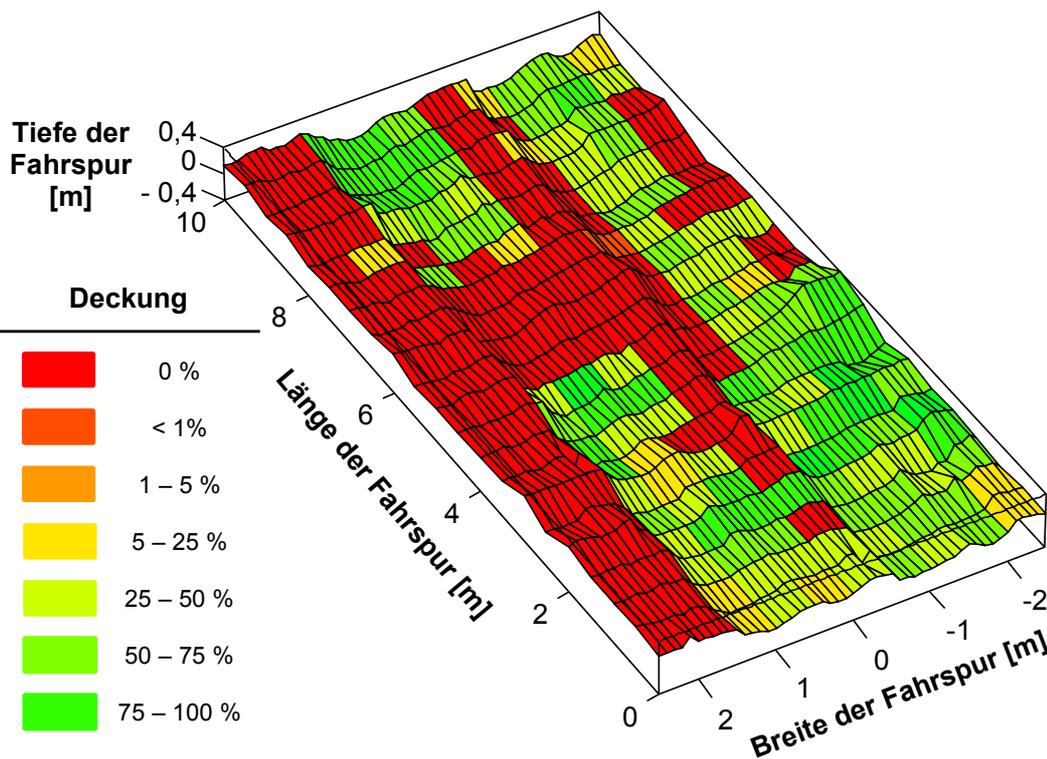


Abbildung 37: Abundanz von *Juncus effusus* L. auf einem Teilabschnitt einer Praxis-Fahrspur am Standort 'Merklingen'

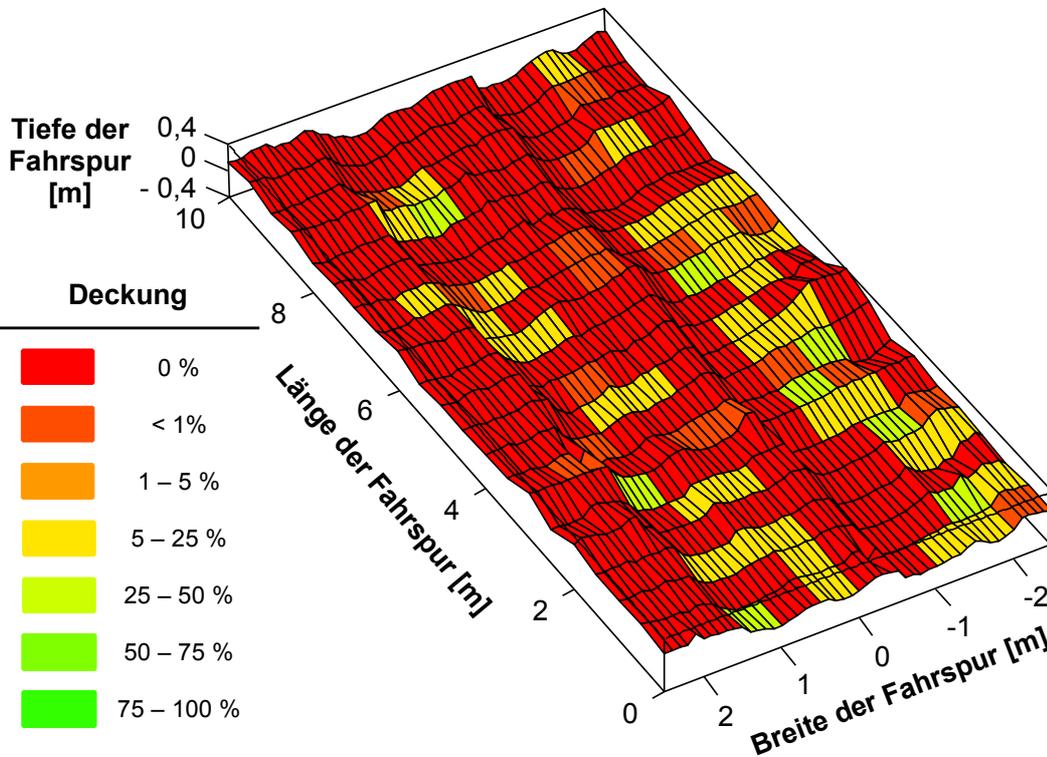


Abbildung 38: Abundanz von *Carex sylvatica* Huds. auf einem Teilabschnitt einer Praxis-Fahrspur am Standort 'Merklingen'

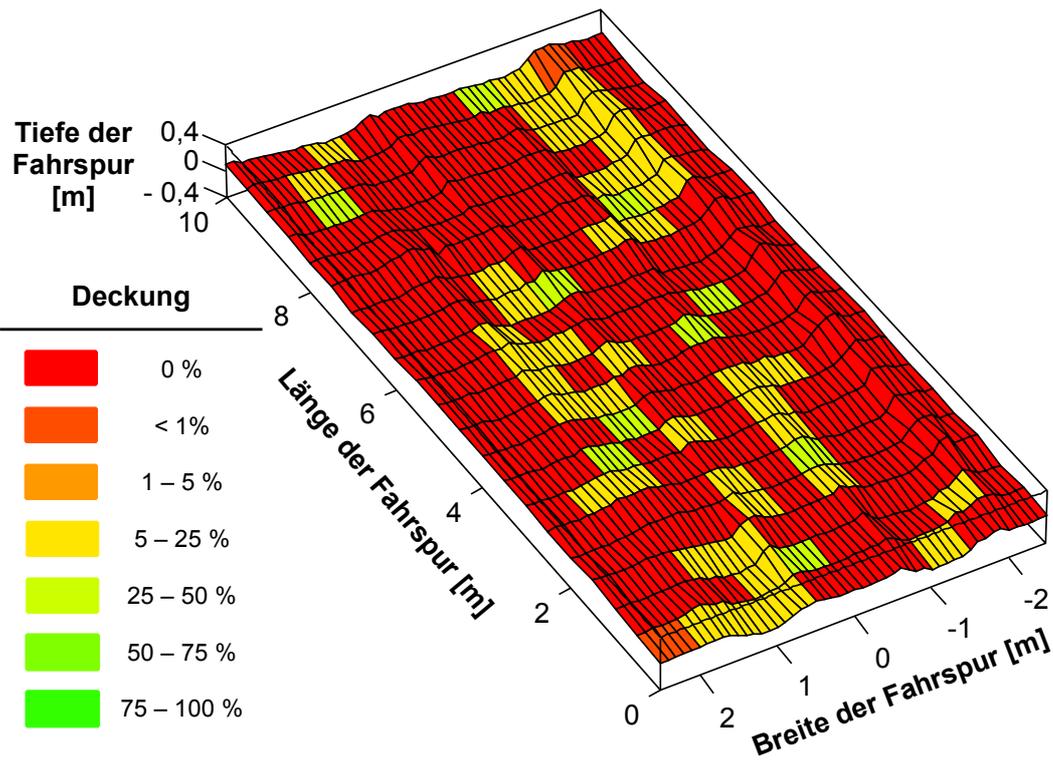


Abbildung 39: Abundanz von *Juncus effusus* L. auf einem Teilabschnitt einer Praxis-Fahrspur am Standort 'Mooswald'

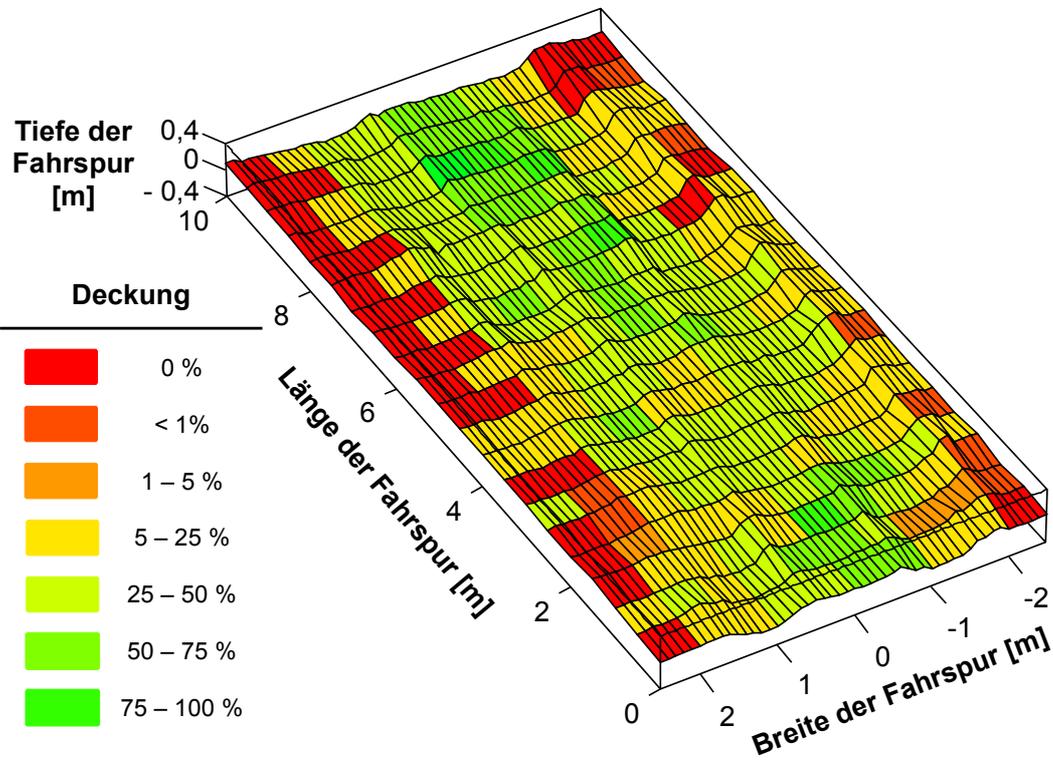


Abbildung 40: Abundanz von *Carex brizoides* JUSDL. EX L. auf einem Teilabschnitt einer Praxis-Fahrspur am Standort 'Mooswald'

### 3.1.2 Vegetation und Vegetationsentwicklung auf den Aussaatflächen

Im Jahr 2013 und 2014 wurden auf allen Flächenabschnitten (Plots) der Standorte die Vegetation mit jeweiligem Deckungsgrad bestimmt. Die Standorte weisen dabei sehr unterschiedliche Artenzahlen auf, wobei der Standort 'Schönberg' mit Abstand die höchste Artenzahl für das Jahr 2013 zeigt und zwischen den beiden Jahren mit einer Halbierung der Artenzahl den größten Einbruch in der Diversität (Tabelle 3). Die generell hohe Artenzahl auf den Standorten 'Merklingen' und 'Schönberg' ist auf die jeweils generell bessere Lichtexposition zurückzuführen. Im Nachfolgenden wird auf die Vegetation und ihre Entwicklung für jeden Standort einzeln eingegangen.

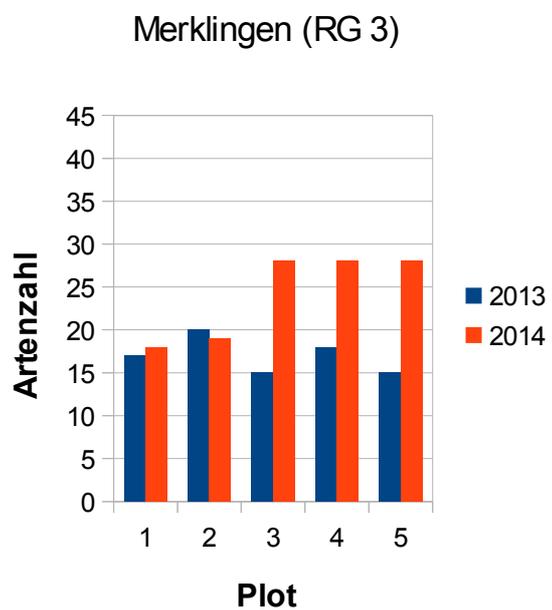
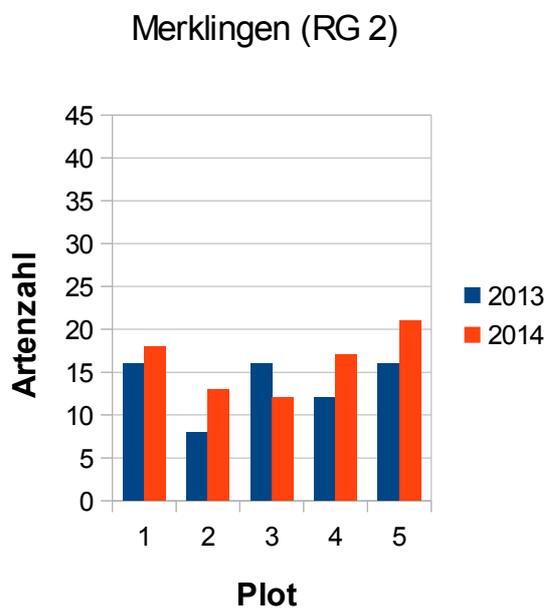
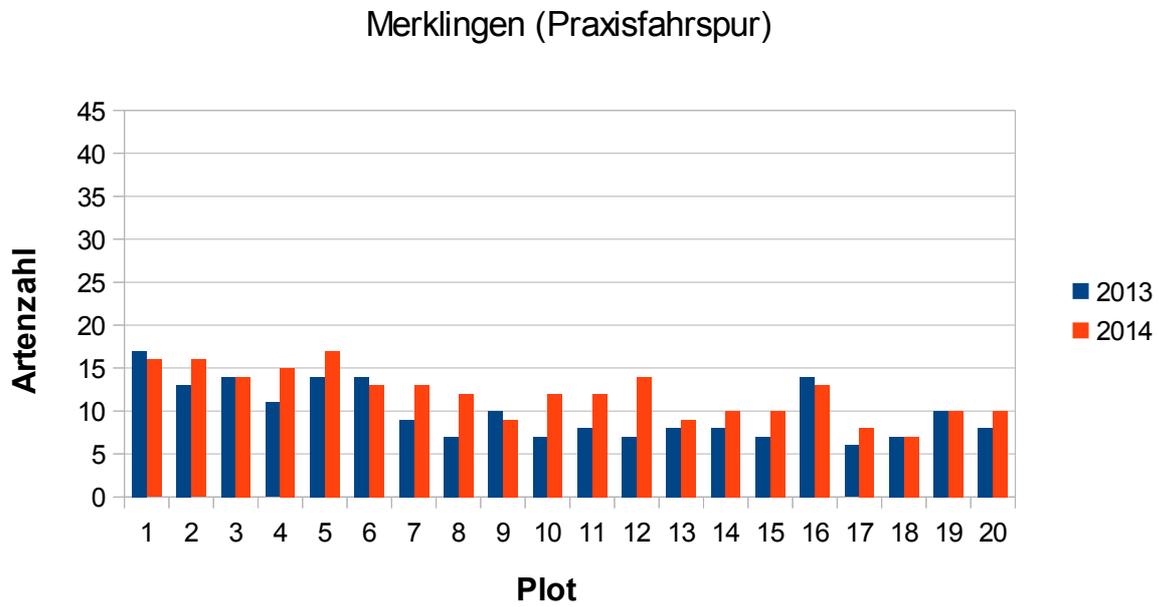
**Tabelle 3: Liste der Artenzahlen für die Jahre 2013 und 2014**

	Merklingen	Mooswald	Schönberg	Ettenheim
Artenanzahl (2013)	59	19	107	14
davon				
nur Gattung bestimmbar	3	1	2	0
unbestimmt	8	2	0	1
Artenanzahl (2014)	71	32	50	27
davon				
nur Gattung bestimmbar	1	1	1	0
unbestimmt	0	0	0	0

#### Merklingen

Ein Vergleich der Pflanzenartenzahlen auf den Plots der Aussaatfläche am Standort 'Merklingen' (Abbildung 41, oben) zeigt deutlich, dass diese vom Jahr 2013 auf das Jahr 2014 generell zugenommen hat (Ausnahmen: Plot 1,3, 6, 9, 16, 19). Die Diversität nimmt zudem im Längsverlauf der Fahrspur mit der Plotnummer tendenziell ab.

Auf den Versuchsflächen der Rückegassen des Projektpartners (RG 2 und RG 3, Abbildung 41) zeigt sich ebenfalls eine Zunahme der Diversität im Jahr 2014 (Ausnahmen: Plot 3 bzw. Plot 2).



**Abbildung 41:** Phytodiversität (Artenzahl) in den Jahren 2013 (schwarz) und 2014 (grau) auf den Versuchsflächen am Standort 'Merklingsen' (Praxisfahrspur, RG2: Mulch, RG3: Mulch + Kalk)

Am Standort 'Merklingen' sind die Versuchsarten sehr unterschiedlich stark vertreten (Tabelle 4). Während im Jahr 2013 *Juncus effusus* auf allen Plots, und damit auch auf denen, auf denen keine Aussaat stattgefunden hat (Kontrollplots), vorkommt, konnte *Carex remota* auf keinem der Plots gefunden werden. *Carex sylvatica* ist nur auf einer der Aussaatflächen (mit reiner *C. sylvatica*- Aussaat) erfasst worden sowie auf insgesamt 4 anderen Flächen (1x Kontroll-Plot, 2 x *Juncus effusus*-Plot und 1 x *Carex remota*-Plot). Ein Jahr später (2014) zeigt sich auf den Flächen ein ähnliches Bild. Allerdings ist auffällig, dass auf einer Fläche mit Aussaat-Mischung nun *Carex sylvatica* sich massiv etabliert hat (Deckung: 6).

**Tabelle 4:** Deckungsgrad der drei Versuchsarten auf den einzelnen Aussaat-Plots der Altfahrspur am Standort 'Merklingen' (1: Einzelpflanze bzw. < 1 %, 2: 1-5 %, 3: 5-10 %, 4: 10-25 %, 5: 25-50 %, 6: 50-75 %, 75-100 %) für die Jahre 2013 und 2014

Jahr	Aussaatfläche	Mischung	J. effusus	C. remota	C. sylvatica	Kontrolle	C. sylvatica	C. remota	J. effusus	C. sylvatica	Kontrolle	J. effusus	Mischung	J. effusus	Mischung	Kontrolle	C. sylvatica	C. remota	C. remota	Kontrolle	Mischung
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2013	Carex remota L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Carex sylvatica Huds.	-	2	-	-	4	3	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2	-	-	-
	Juncus effusus L.	6	5	5	5	4	3	3	5	6	5	4	4	3	6	5	5	6	4	3	4
2014	Carex remota L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Carex sylvatica Huds.	-	1	-	-	2	2	-	-	-	-	2	2	-	-	-	2	-	-	-	6
	Juncus effusus L.	6	4	5	3	3	3	4	5	4	3	2	3	3	3	5	4	4	5	4	3

Auf den Versuchsplots, die auf den Rückegassen (RG) der FVA angelegt wurden, ergibt sich eine vergleichbare Situation (Tabelle 5). Während im Jahr 2013 *Juncus effusus* auf allen Plots gewachsen ist, konnte *Carex remota* auf keiner Fläche gefunden werden. *Carex sylvatica* ist nur auf dem Versuchsplot der RG 2 (Mulch) mit der Aussaat der Samen-Mischung zu finden. *Brassica nappus* L. konnte auf der Aussaatfläche überhaupt nicht identifiziert werden. Es besteht der Verdacht, dass entweder diese sehr ölhaltigen Samen schon vor der Keimung durch Insekten verschleppt oder die etablierten Pflanzen vor der Vegetationsaufnahme von Wild abgefressen worden sind. Auch die Anbringung eines 1 m hohen Zauns aus Metalldraht um die Versuchsfläche brachte kein anderes Ergebnis, nachdem *Brassica nappus* nachgesät wurde. Die Auswirkungen einer Aussaat mit Raps-Samen auf so lichtexponierten Flächen wie die am Standort 'Merklingen', wäre zur genaueren Untersuchung von Inter-

esse gewesen, da Brassica schnell wächst und stark wurzelt, doch die Ergebnisse lassen schlussfolgern, dass Raps hierfür nicht geeignet ist.

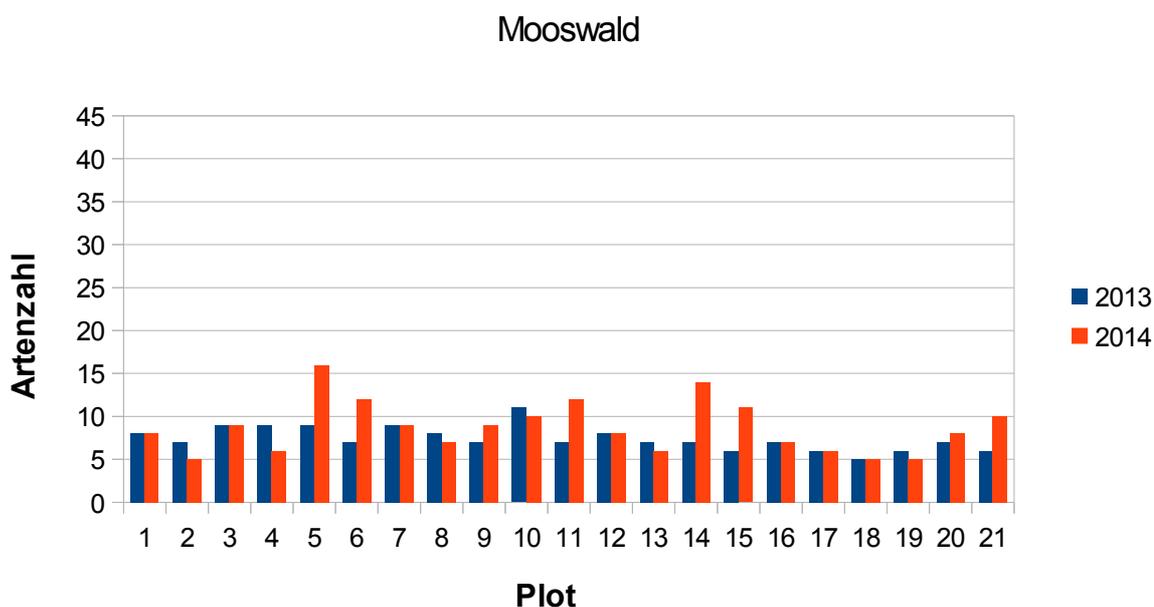
Die anderen ausgesäten Versuchspflanzen scheinen sich jedoch auf den Flächen jeweils zu etablieren. *Juncus effusus* ist auf allen Flächen wie schon im Jahr zuvor präsent und nimmt in der Deckung zu. *Carex sylvatica* sowie *Carex remota* sind im Jahr 2014 auf den jeweiligen Aussaatflächen auf der gemulchten und gekalten Rückegasse (RG 3) nachweisbar. Auf der gemulchten Gasse (RG 2) sind sie ebenfalls auf zwei Flächen zu finden, aber nur auf einer davon sind sie jeweils auch ausgesät worden.

**Tabelle 5:** Deckungsgrad der drei Versuchsarten sowie von *Brassica napus* L. auf den einzelnen Aussaat-Pots der Rückegassen (RG2 und RG3) am Standort 'Merklingen' (1: Einzelpflanze bzw. < 1 %, 2: 1-5 %, 3: 5-10 %, 4: 10-25 %, 5: 25-50 %, 6: 50-75 %, 75-100 %, k.a.: keine Angaben) für die Jahre 2013 und 2014

Jahr	Aussaatfläche	RG2						RG3					
		J. effusus	C. remota	Mischung	C. sylvatica	Kontrolle	B. napus	C. sylvatica	J. effusus	Kontrolle	Mischung	C. remota	B. napus
	Aussaatflächen-Nr.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
2013	Brassica nappus L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Carex remota L.	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Carex sylvatica Huds.	-	-	1	-	-	1	-	2	-	-	-	-
	Juncus effusus L.	2	1	2	2	2	2	4	4	2	2	2	2
2014	Brassica nappus L.	-	-	-	-	-	k.a.	-	-	-	-	-	k.a.
	Carex remota L.	-	-	1	2	2	k.a.	-	-	2	3	3	k.a.
	Carex sylvatica Huds.	-	-	-	2	1	k.a.	1	-	-	2	-	k.a.
	Juncus effusus L.	3	2	3	3	2	k.a.	5	4	2	2	4	k.a.

## Mooswald

Ein Vergleich der Pflanzenartenzahlen auf den Plots der Aussaatfläche am Standort 'Mooswald' (Abbildung 42) ist keine so eindeutige Zunahme der Diversität vom Jahr 2013 auf das Jahr 2014 wie am Standort 'Merklingen' zu kennen. Von 20 Plots zeigen 8 eine Zunahme, 5 eine Abnahme und 7 eine unveränderte Artenzahl. Die Veränderung der Diversität ist dabei unabhängig von dem auf der Fläche ausgesäten Pflanzenart oder Mischung (vgl. Tabelle 6).



**Abbildung 42:** Artenzahl (Phytodiversität) in den Jahren 2013 (blau) und 2014 (rot) auf den Versuchsfeldern am Standort 'Mooswald'

Am Standort 'Mooswald' wuchsen im Jahr 2013 beide Carex-Arten nur auf jeweils einem (nicht identischen) Plot mit der Aussaat-Mischung. *Juncus effusus* ist auf der Hälfte der Einzel- oder Mischungs- Plots zu finden. Daneben ist sie auch auf einigen anderen Flächen vorhanden, d.h. auf 3 von 4 Kontroll-Plots und auf 3 von 4 *Carex remota*-Plots (Tabelle 6).

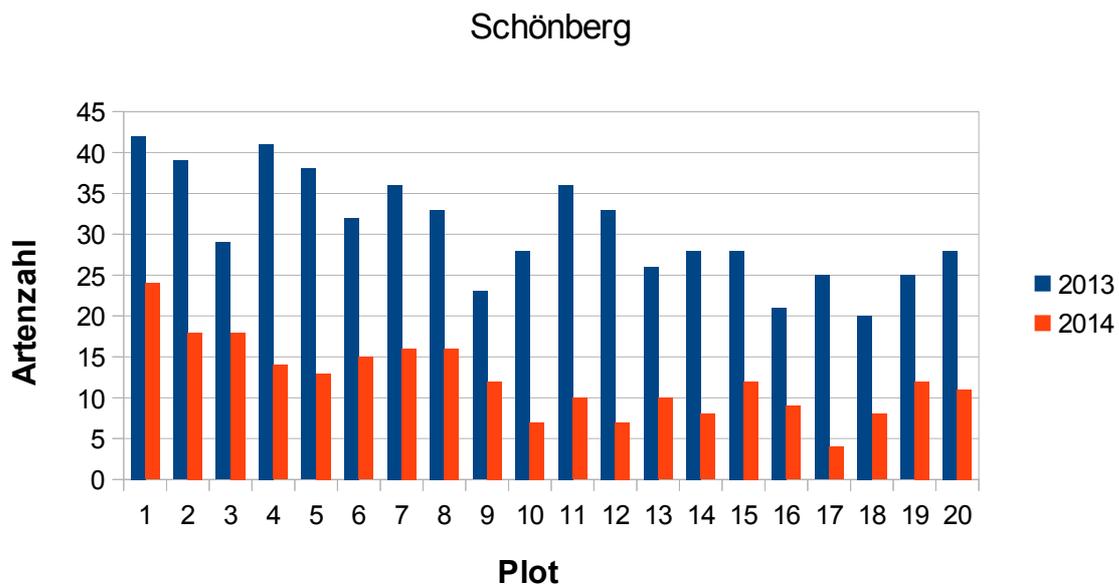
Im Jahr 2014 sind beide ausgesäten Carex-Arten nahezu nicht mehr nachweisbar (Ausnahme: Plot 14). Allein *Juncus effusus* ist noch vorhanden, allerdings nimmt auch hier die Anzahl der Plots, auf denen sie vorkommt ab, sowie die Deckung der Art pro Plot. Von allen Standorten zeigt sich hier der schlechteste Erfolg bei der Etablierung.

**Tabelle 6:** Deckungsgrad der drei Versuchsarten auf den einzelnen Aussaat-Plots am Standort 'Mooswald (1: Einzelpflanze bzw. < 1 %, 2: 1-5 %, 3: 5-10 %, 4: 10-25 %, 5: 25-50 %, 6: 50-75 %, 75-100 %) für die Jahre 2013 und 2014

Jahr	Aussaatfläche	C. sylvatica	C. sylvatica	Kontrolle	C. remota	C. remota	J. effusus	Kontrolle	C. remota	C. sylvatica	Mischung	Kontrolle	Mischung	Mischung	J. effusus	J. effusus	Kontrolle	J. effusus	C. sylvatica	Kontrolle	Mischung
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2013	Carex remota L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
	Carex sylvatica Huds.	-	-	-	-	-	2	3	3	-	3	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
	Juncus effusus L.	-	-	2	1	2	1	3	3	-	2	2	-	-	-	-	-	2	-	1	1
2014	Carex remota L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Carex sylvatica Huds.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
	Juncus effusus L.	-	-	1	-	1	1	2	-	-	-	1	-	-	2	-	-	-	-	-	-

Schönberg

Die Versuchsfläche Schönberg ist eine frisch befahrene Fahrspur, die zum Zeitpunkt der Aussaat keine bestehende Vegetation aufwies. Auf allen Plots nimmt die Artenzahl im Jahr 2014 im Vergleich zum Vorjahr jeweils um die Hälfte ab (Abbildung 43). Zudem zeigt sich in beiden Untersuchungsjahren, dass, wie am Standort 'Merklingen', eine Abnahme der Diversität in Längsrichtung des Fahrspurverlaufs zu beobachten ist.



**Abbildung 43:** Artenzahl (Phytodiversität) in den Jahren 2013 (blau) und 2014 (rot) auf den Versuchsflächen am Standort 'Schönberg'

Am Standort 'Schönberg' wachsen Im Jahr 2013 beide Carex-Arten sowohl auf den jeweiligen Aussaat-Plots (Einzelart-Plots) als auch in 3 von 4 Fällen auf den Mischungsplots (Tabelle 7). Daneben wachsen diese Arten z.T. auch auf den anderen Flächen (andere Aussaat- und Kontroll-Plots). *Juncus effusus* ist auf 16 der insgesamt 20 Versuchsplots vorhanden. Es fällt auf, dass diese Art zwar auf fast allen Varianten vorkommt, aber meist eine hohe Deckung (d.h. 50-75%) auf den Plots hat, auf denen *Juncus* als Einzelart oder in der Mischung ausgesät worden ist. Im Jahr 2014 zeigt sich deutlich, dass die Flächen sich entwickelt haben: entweder der Deckungsgrad liegt erheblich höher als im Vorjahr oder die Pflanze ist überhaupt nicht mehr nachzuweisen gewesen. Dieser Beobachtung kann ausnahmslos für alle drei Versuchsarten gemacht werden.

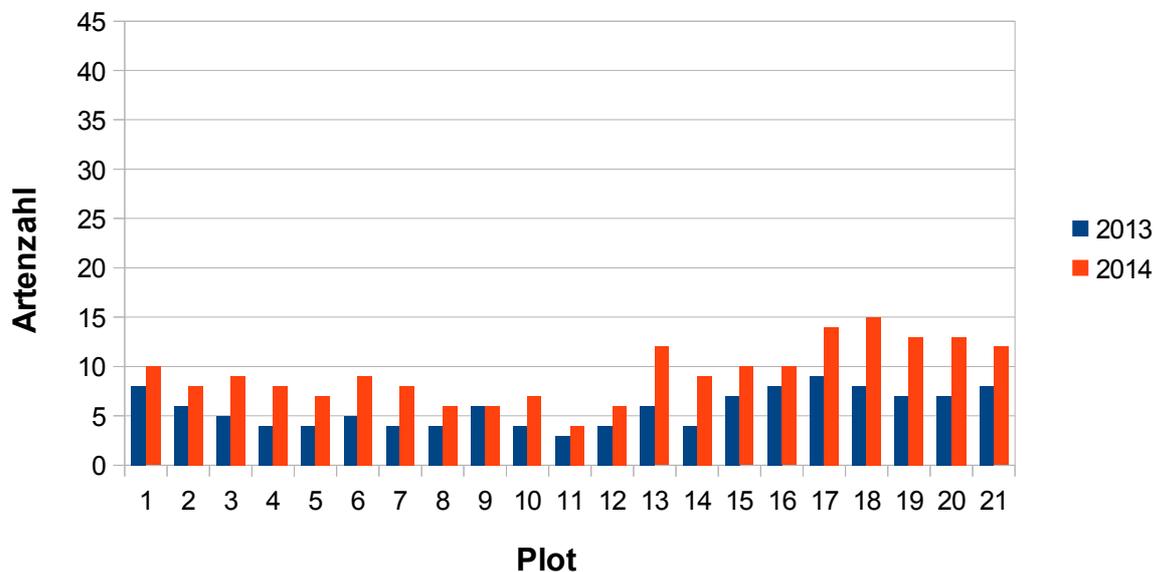
**Tabelle 7:** Deckungsgrad der drei Versuchsarten auf den einzelnen Aussaat-Plots am Standort 'Schönberg' (1: Einzelpflanze bzw. < 1 %, 2: 1-5 %, 3: 5-10 %, 4: 10-25 %, 5: 25-50 %, 6: 50-75 %, 75-100 %) für die Jahre 2013 und 2014

Jahr	Aussaatfläche	Mischung	J. effusus	C. remota	C. sylvatica	Kontrolle	C. remota	C. sylvatica	C. sylvatica	C. remota	J. effusus	Kontrolle	Mischung	Mischung	J. effusus	C. sylvatica	Mischung	J. effusus	Kontrolle	C. remota	Kontrolle
		Aussaatflächen-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2013	Carex remota L.	2	2	4	2	1	1	-	1	1	1	3	4	-	1	1	1	-	-	1	-
	Carex sylvatica Huds.	-	1	-	3	3	4	4	4	2	2	2	2	2	1	2	2	1	-	2	1
	Juncus effusus L.	4	6	1	2	2	1	2	-	1	6	4	6	6	6	2	1	-	-	-	1
2014	Carex remota L.	3	-	4	-	-	4	-	-	6	-	-	-	-	-	3	-	-	-	4	-
	Carex sylvatica Huds.	-	-	-	4	-	4	4	5	-	-	-	-	-	-	5	4	3	3	4	3
	Juncus effusus L.	4	6	6	4	-	4	4	3	5	7	6	7	7	7	5	-	-	-	-	3

### Ettenheim

Die Versuchsflächen am Standort 'Ettenheim' zeigen (mit einer Ausnahme: Plot 9) eine generelle Zunahme der Artenzahl vom Jahr 2013 auf das Jahr 2014 (Abbildung 44). Die Artenzahl liegt wie am Standort 'Mooswald' vergleichbar niedrig. Eine Tendenz der veränderten Artenzahl mit dem Fahrspurverlauf wie an den Standorten 'Merklingen' und 'Schönberg' ist dabei ebensowenig zu beobachten wie eine Abhängigkeit der Diversität zu der jeweils ausgesäten Versuchsart.

## Ettenheim



**Abbildung 44:** Artenzahl (Phytodiversität) in den Jahren 2013 (blau) und 2014 (rot) auf den Versuchsfeldern am Standort 'Ettenheim'

Es finden sich im Jahr 2013 *Juncus effusus* und *Carex remota* auf allen Plots (Ausnahme bei *Juncus*: 1 Plot mit *C. remota*- Aussaat, Tabelle 7). Die Deckungsgrade liegen dabei auf den Plots der zugehörigen Einzelaussaat oder Mischungsvariante nicht deutlich höher als bei den Plots, wo die Art nicht als Saatgut aufgebracht wurde. *Carex sylvatica* ist nur auf insgesamt 4 von 20 Versuchsfeldern zu finden, wobei auf 2 dieser Flächen eine Aussaat mit den Samen dieser Art erfolgt ist (jeweils einmal Einzel- und Mischungsaussaat).

Im Jahr 2014 zeigt sich ein wenig verändertes Bild. *Carex remota* und *Juncus effusus* sind mit leicht veränderten Deckungsgraden auf allen Flächen vorhanden, es gibt hierbei keine Unterschiede zwischen den Aussaatflächen, den Kontrollflächen und den Flächen, wo die Arten nicht explizit aufgebracht wurden. *Carex sylvatica* verschwindet auf drei Flächen und zeigt sich dafür mit Einzelpflanzen auf zwei bisher nicht bewachsenen Flächen (die zudem auch keine Aussaatflächen waren).

**Tabelle 8:** Deckungsgrad der drei Versuchsarten auf den einzelnen Aussaat-Plots am Standort 'Ettenheim' (1: Einzelpflanze bzw. < 1 %, 2: 1-5 %, 3: 5-10 %, 4: 10-25 %, 5: 25-50 %, 6: 50-75 %, 75-100 %) für die Jahre 2013 und 2014

Jahr	Aussaاتfläche	C. sylvatica	Mischung	C. sylvatica	C. remota	C. remota	Kontrolle	Mischung	Mischung	Kontrolle	C. sylvatica	J. effusus	Kontrolle	J. effusus	C. remota	J. effusus	C. sylvatica	C. remota	Mischung	Kontrolle	J. effusus
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2013	Carex remota L.	6	6	6	5	5	5	5	5	4	5	6	6	6	5	3	3	5	4	5	4
	Carex sylvatica Huds.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	3	-	3	-	1
	Juncus effusus L.	4	4	3	3	3	3	3	3	1	1	3	2	3	3	2	3	-	2	4	4
2014	Carex remota L.	5	4	3	4	4	6	6	6	5	5	7	6	6	5	5	3	3	4	4	4
	Carex sylvatica Huds.	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2
	Juncus effusus L.	5	4	3	4	3	2	2	3	2	2	2	4	4	3	3	2	2	4	2	4

### 3.1.3 Bodenparameter in Abhängigkeit von den Versuchspflanzen

Aufgrund der schlechten Etablierung der Versuchspflanzen auf den Versuchsflächen an allen vier Standorten (vgl. „3.1.2 Vegetation und Vegetationsentwicklung auf den Aussaatflächen“) ist kein eindeutiger Bezug zu den Bodenparameter zulässig. Allein am Standort 'Schönberg' sind die Pflanzen ausreichend deutlich etabliert, um einen Zusammenhang detailliert zu beschreiben. Statistische Test und Boxplots haben jedoch weder signifikante Zusammenhänge geschweige denn Trends aufzeigen können, die einen Effekt der ausgebrachten Arten auf die erhobenen Bodenparameter (und damit auf eine Regeneration der Bodenstruktur) nachweisen würden. Auf eine Darstellung dieser Ergebnisse wurde deshalb an dieser Stelle verzichtet. Auf die möglichen Ursachen wird jedoch am Ende dieses Berichtes bei den Schlussfolgerungen noch eingegangen.



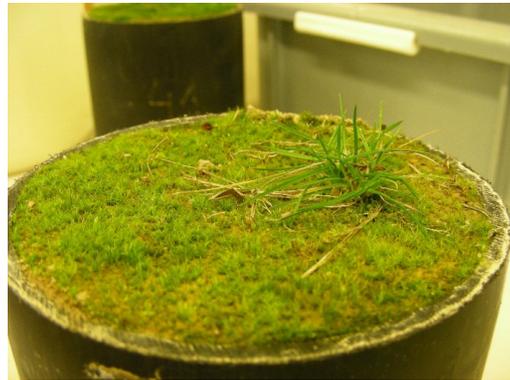
**Abbildung 45:**  
Versuchszylinder mit Bewuchs von *Juncus effusus*



**Abbildung 46:**  
Detailansicht von *Juncus effusus*- Bewuchs



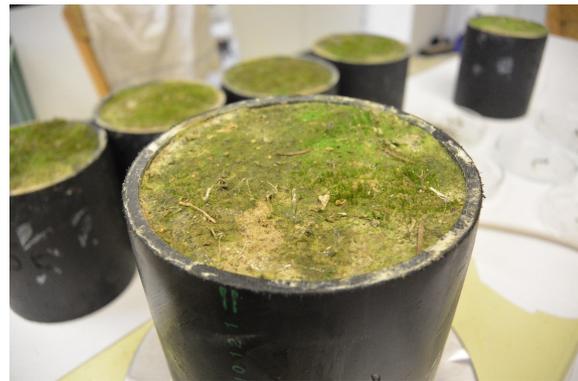
**Abbildung 47:**  
Versuchszylinder mit Bewuchs von *Carex remota*



**Abbildung 48:**  
Versuchszylinder mit Bewuchs von *Carex sylvatica*



**Abbildung 49:**  
Bewuchs von u.a. *Poa annua* und *Ranunculus acris*  
auf Versuchszylinder mit Aussaat von *Carex remota*- Saatgut



**Abbildung 50:**  
Versuchszylindern ohne Bewuchs  
(Aussaat erfolgte mit *Carex sylvatica*)

### 3.1.4 Zylinder (- insitu) -Versuche

Ein Jahr nach der Installation der Versuchszylinder auf den ersten zwei Standorten 'Merklingen' und 'Mooswald' hat sich gezeigt, dass im praktischen Freilandversuch die Zylinder zu stark den lokalen Einflüssen unterliegen. Die Zylinder standen am Standort 'Mooswald' größtenteils und die meiste Zeit unter Wasser (starke Regenfälle, hoher Grundwasserstand) und waren am Standort 'Merklingen' starker Sonneneinstrahlung ausgesetzt (Austrocknung der Zylinderoberfläche). Während der Projektlaufzeit hat sich gezeigt, dass der Einsatz der Stechzylindern (hierauf wird in Abschnitt „4.1.1 Diskussion der Durchführung und Ergebnisse des Projektvorhabens“ ?, noch näher eingegangen) nicht die gewünschten Ergebnisse erzielt. Die Versuche wurden dementsprechend auch nur auf den ersten beiden Standorte installiert. Von einem Einsatz auf den beiden anderen Standorten wurde dann abgesehen. Auch nach der Projektlaufzeit werden diese Versuche weitergeführt, jedoch unter veränderten Bedingungen, wie z.B. einer geringeren Bodenmaterial-Verdichtung, und unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus.

#### Oberirdische Biomasse

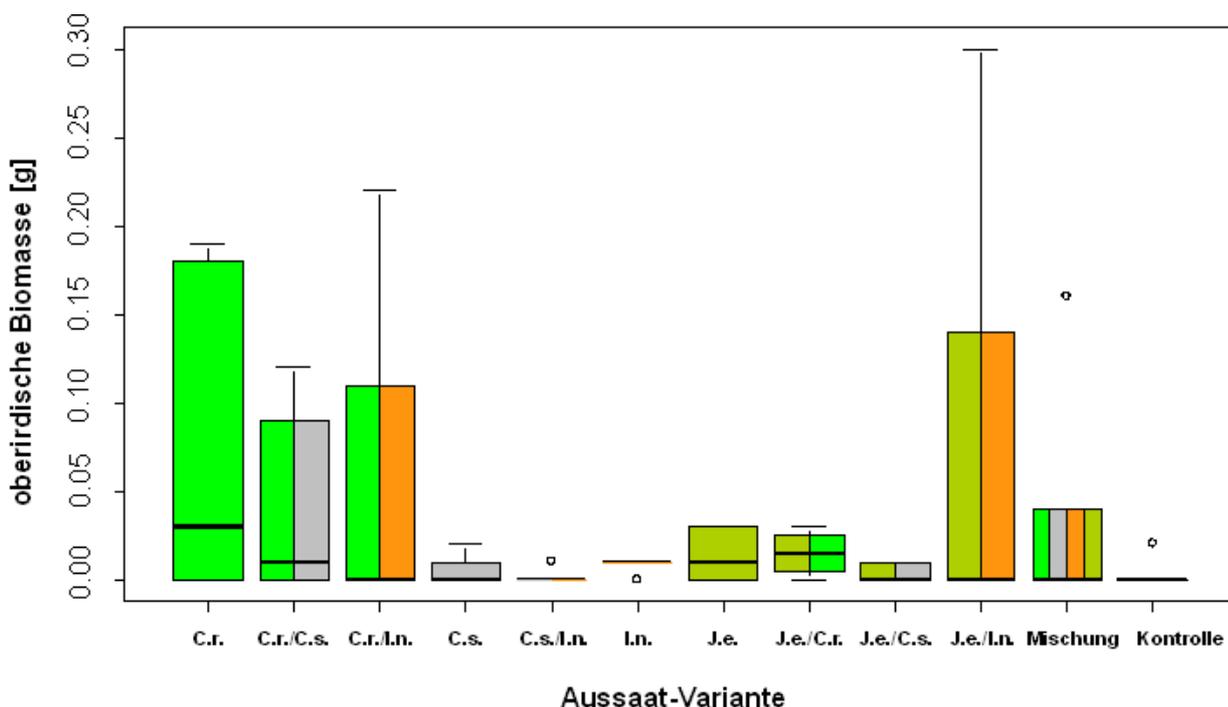
Zum Ende der Vegetationsperiode 2013 wurden die insitu-Versuchszylinder aus den fest installierten Führungszylindern von den Versuchsplots entnommen und ins Labor verbracht. Zum Ende des zweiten Projektjahres waren nur die Zylinder vom Standort 'Merklingen' vollständig ausgewertet. Die Messungen an den Zylindern von Standort 'Mooswald' erfolgt in den ersten beiden Monaten des Jahres 2014.

Der Bewuchs auf den einzelnen Zylindern variiert auf allen Plot und für alle aufgebrachten Pflanzenarten stark: sowohl in der Art des Bewuchses als auch in der Wuchsdichte und -höhe (Abbildungen 45 - 50). Ein eindeutiges Bild für die artenspezifische Entwicklung liefert allein *Impatiens noli-tangere*: auf keinem der Versuchszylindern, auf denen Samen aufgebracht wurden, konnten Individuen dieser Art festgestellt werden. Dafür haben sich auf einigen Zylindern auch Arten etabliert, die nicht als Samen aufgebracht worden sind, sondern offensichtlich seitlich von der Versuchsfläche „eingewachsen“ sind (Bsp.: *Ranunculus acris* L., Abbildung 49). Auf insgesamt 30 % der Zylinder ist keine Gefäßpflanzenart gewachsen, sondern nur ein jeweils millimeterhoher Moosbewuchs in unterschiedlichen Deckungsgraden. Auf nur 18 % der Zylinder ist eine Art nachweisbar gewesen, die dort auch ursprünglich aufgebracht worden ist.

Da der Bewuchs auf den Versuchszylindern die Messungen der Gasdiffusivität beeinflussen könnten, weil das für die Messungen verwendete Prüfgas ( $\text{SF}_6$ ) dazu neigt, sich auf den Pflanzenoberflächen abzulagern, wurden die oberirdischen Pflan-

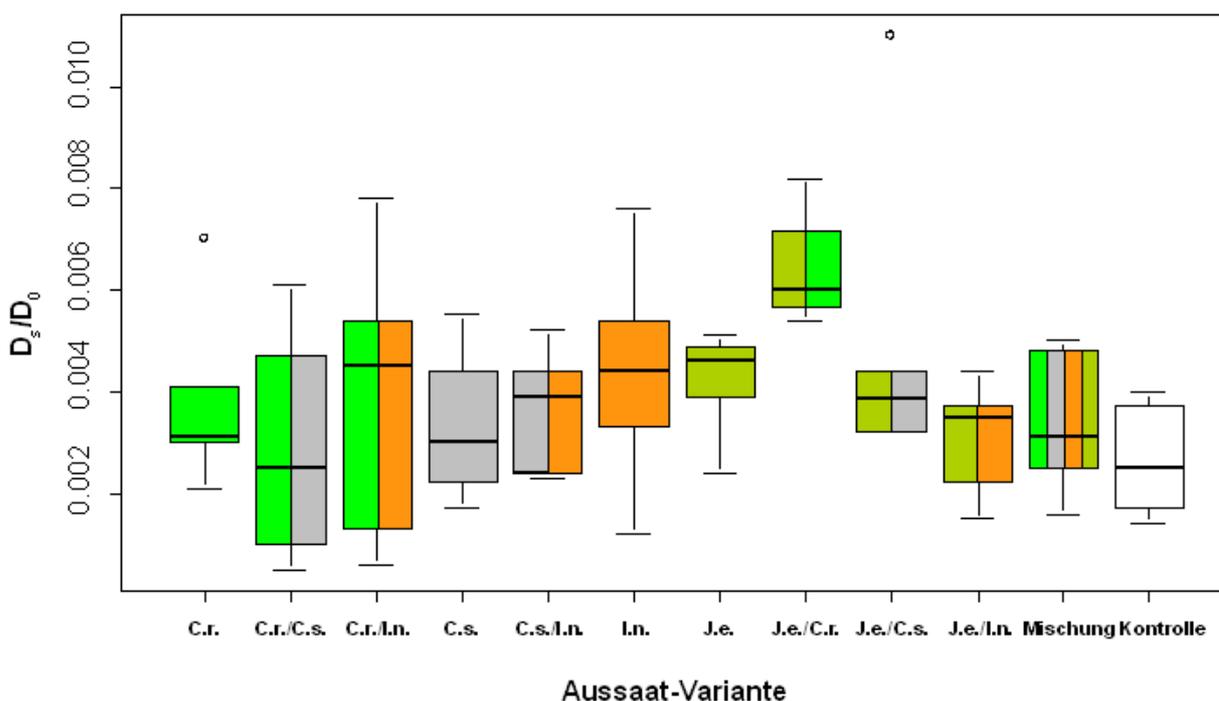
zenteile von den Zylindern knapp über der Bodenoberfläche abgeschnitten. In Abbildung 51 ist das Gewicht [g] der oberirdischen Pflanzenteile in Abhängigkeit von der Aussaat-Variante dargestellt. Die einzelnen Varianten unterscheiden sich nicht signifikant.

Nach der erneuten Ausbringung der Stechzylinder auf die Versuchsplots ist eine Nachsaat mit den entsprechenden Samen bzw. Mischungen geplant. Zwar kann davon ausgegangen werden, dass sowohl die Carex-Arten als auch *J. effusus* nach dem Beschnitt erneut austreiben können, so soll doch für die kommende Vegetationsperiode wieder eine vergleichbare Ausgangssituation auf allen Versuchszylinder geschaffen werden. Es besteht zudem die Vermutung, dass die Samen trotz des etwas abgesenkten Einbaus der Versuchszylinder im Verhältnis zu den Führungszylindern (ca. 0,5 – 1 cm, Abbildung 46), durch stärkere Niederschläge von den verdichteten Bodenoberflächen der Zylindern herunter geschwemmt wurden und so nicht zu einer Keimung auf dem Bodenmaterial der Zylinder kamen. Um diesen Effekt zu verhindern, sollen bei der Nachsaat die Samen zusätzlich mit einer dünnen Schicht Bodenmaterial abgedeckt werden.



**Abbildung 51:** oberirdisch gebildete Biomasse (innerhalb einer Vegetationsperiode) in Abhängigkeit von der Aussaatvariante (Einzel- oder Kombinationsaussaat bzw. Kontrolle ohne Samen, n = 5) mit den Versuchspflanzen *Carex remota* (C.r.), *Carex sylvatica* (C.s.), *Impatiens noli-tangere* (I.n.) und *Juncus effusus* (J.e.)

Die Ergebnisse der Messungen der Diffusivität ( $D_s/D_0$ ) der einzelnen Stechzylinder zeigen keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Aussaat-Variante (Abbildung 52). Allerdings zeigt ein Vergleich aller Varianten mit der Kontrollgruppe, dass tendenziell jede Art von Bewuchs die Durchlässigkeit im Mittel verbessert. Dies lässt sich vielleicht damit begründen, dass während der Vegetationsperiode auch auf Zylindern, die bei der Auswertung keinen Bewuchs gezeigt haben, ein Bewuchs vorgelegen haben kann. Der Standort 'Merklingen' ist aufgrund seiner erheblichen Sonnen-Exposition während der Sommermonate an der Bodenoberfläche zum Teil stark ausgetrocknet und einige Pflanzen können dadurch möglicherweise vor Messbeginn im Labor vertrocknet sein. Der so aber trotzdem geschaffene Porenraum würde höhere mittlere Gasdurchlässigkeiten im Vergleich zu der Kontrolle damit erklären. Für die kommende Vegetationsperiode sollte deshalb der Bewuchs (in der Artenzusammensetzung und in %) auch zwischen den Messkampagnen am Ende der Vegetationszeit auf den einzelnen Versuchszylindern dokumentiert werden.



**Abbildung 52:** Gasdurchlässigkeit ( $D_s/D_0$ ) der insitu-Versuchszylinder in Abhängigkeit von der Aussaatvariante (Einzel- oder Kombinationsaussaat bzw. Kontrolle ohne Samen) mit den Versuchspflanzen *Carex remota* (C.r.), *Carex sylvatica* (C.s.), *Impatiens noli-tangere* (I.n.) und *Juncus effusus* (J.e.)

### Keimungsraten auf den Zylindern

Die Zylinder vom Standort 'Mooswald' sowie die schon für den Standort 'Ettenheim' vorbereiteten Zylindern wurden aufgrund der Erfahrungen im ersten Versuchsjahr (schlechte Keimungserfolge und Etablierung) nicht ins Gelände (zurück) gebracht, sondern wurden neu besät und dann unter Laborbedingungen (gute Lichtverhältnisse, ausreichende Wasserversorgung) zur Keimung gehalten. Von 25 möglichen Zylindern (d.h. alle Varianten - auch Mischungen - die mit einer Art besät worden sind) haben sehr unterschiedlich gekeimt bzw. Jungpflanzen gebildet (Tabelle 9). Die Unterscheidung von *Carex remote* bzw. *-sylvatica* war bei den Jungpflanzen nicht möglich, weshalb sie zu *Carex spec.* zusammengefasst worden sind.

**Tabelle 9:** Stechzylinderanzahl (gekeimt/gesamt), auf welcher Saatgut der entsprechenden Versuchspflanzen aufgebracht wurde (Einzelaussaat oder Mischung)

Art	Merklingen		Mooswald		Ettenheim
	<i>Freiland</i>	<i>Freiland</i>	<i>Lichtbank</i>	<i>Labor</i>	
<i>Carex spec.</i>	5/25	5/25	13/25	5/25	
<i>Juncus effusus</i>	10/25	5/25	22/25	20/25	
<i>Impatiens noli-tangere</i>	0/25	0/25	0/25	0/25	
<i>Poa annua</i>	11/25	3/25	18/25	-	

Die Nachsaat des Standortes Mooswald (Lichtbank) und die Aussaat Ettenheim (Labor) wiesen zwar höhere Keimungsraten auf, allerdings konnten sich die Pflanzen auch hier nicht dauerhaft etablieren und starben nach kurzer Zeit ab. Eine Durchwurzelung des verdichteten Bodenmaterial scheint nicht möglich.

### **3.1.5 Saatgutuntersuchungen**

Da der Standort 'Schönberg' von allen Standorten generell für alle Arten die besten Wuchsbedingungen aufwies, was u.a. die Ergebnisse der Vegetationsaufnahmen zeigen (sowohl im Deckungsgrad der ausgesäten Arten als auch in der Gesamtartenzahl), hat sich hier am deutlichsten gezeigt, dass das vom Fach-Händler bezogene Saatgut eine Verunreinigung mit einer schnellwüchsigen Süßgras-Art (*Poa annua* L.) aufweist.

Auf allen Plots mit Einzel- oder Mischungsaussaat, konnte *Poa annua* nachgewiesen werden (Beispiel: Abbildung 53 + 54). Die Deckungsgrade spiegeln hierbei eindrucksvoll die Aussaatdichte wieder. Auf den Einzelaussaat-Plot hat *Poa annua* eine Deckung von 10-75 %, auf den Mischsaatflächen liegt die Deckung dagegen bei 1-10 %. Daneben zeigen auch vier an diese angrenzende Flächen mit anderen Aussaaten bzw. Kontrollplots Einzelpflanzen oder kleine Horste (< 1% Deckung). Erste Keimversuche im Labor haben gezeigt, dass die Pflanzen von *Poa annua* nach 1-2 Tagen mit der Keimung beginnen, während die Samen von *Carex remota* L. erst nach 3-4 Wochen mit der Keimung beginnen.



**Abbildung 53:** Versuchsfeld mit Aussaat von *Carex remota*-Saatgut mit dominierendem Bewuchs durch *Poa*-Pflanzen



**Abbildung 54:** *Poa-annua* L. von einer Aussaatfläche mit *Carex remota*-Saatgut

Ebenfalls wurde eine Verunreinigung des Saatgutes von *Juncus effusus* mit *Juncus inflexus* L. festgestellt (vergl. Abbildung 55). Dies fiel jedoch erst im letzten Projektjahr (2014) und nur auf der Versuchsfeldfläche am Schönberg auf, als sich die Arten auf den Untersuchungsflächen etabliert hatten. Im Gegensatz zu *Juncus effusus*, das im Stengelinneren ein durchgängiges, schaum- oder schwammartiges Durchlüftungsgebe (= Aerenchym) hat, weist *J. inflexus* nur ein partielles Aerenchym auf, das leiterartig innerhalb des Stengels vorhanden ist (Abbildung 56). Äußerlich sind die beiden Arten ebenfalls schon rein optisch voneinander zu unterscheiden: die Stängel von *Juncus inflexus* sind generell dünner, langgeföhelt und von deutlich blaugrüner Farbe, während *Juncus effusus* glatte Stängel von sattgrüner Farbe besitzt.

## Keimkontroll-Versuche

*Carex sylvatica* zeigt eine generelle bessere Keimfähigkeit nach einer vorangegangenen Stratifikation, wobei variable Temperaturen die Keimung zusätzlich begünstigen (64,5 % bzw. 77,5 %, Tabelle 10). Ohne eine Stratifikation werden annähernd vergleichbare Keimungsraten erst nach 48 Tagen erreicht (43,6 %). Eine variable Temperatur scheint ohne vorangegangene Stratifikation die Keimungsrate erheblich zu verringern (2,8 % nach 27 Tagen bzw. 26,8 % nach 48 Tagen).



**Abbildung 55:** Versuchsfläche mit Aussaat von *Juncus effusus*- Saatgut (*J. effusus*: sattgrüne Halme, *J. Inflexus*: blaugrüne Halme)



**Abbildung 56:** längsgeteilte Halme von *J. inflexus* (A, leiterförmiges Aerenchym) und *J. effusus* (B, schwammartiges Aerenchym)

*Carex remota* dagegen zeigt weder eine Abhängigkeit der Keimungsfähigkeit von einer vorangegangenen Stratifikation noch von einer Temperaturvariabilität während der Keimung. Die Keimungsrate liegt bei allen Varianten bei 3- 4,5 %. Generell setzt die Keimung der Samen erheblich später ein als bei *Carex sylvatica*. Leider konnte die Keimungsdauer nicht länger als 36 Tage beobachtet werden, da die Samen nach ca. 40 Tagen anfangen in den Petrischalen zu schimmeln. Der Versuch musste abgebrochen werden.

Eine zusätzliche Keimkontrolle des verunreinigten Saatgutes von *Carex remota* (unstratifiziert + konstante Temperatur) zeigte, dass die im Saatgut enthaltenen Poa-Samen einige Tage nach dem Beginn des Versuchs anfangen zu keimen, Wurzeln sowie Sprosse ausbildeten, bevor die *Carex remota*-Samen überhaupt mit der Keimung begannen.

**Tabelle 10:** Keimungsraten von *Carex sylvatica* und *Carex remota* in Abhängigkeit einer Stratifikation und/oder der Temperatur bei der Keimung (konstant/variabel)

	<b>Carex sylvatica</b>		<b>Carex remota</b>
	<i>25 Tage</i>	<i>32 Tage</i>	<i>36 Tage</i>
stratifiziert + konstante Temp.	58,2 % ± 14,8	64,5 % ± 14,3	4 % ± 3,7
stratifiziert + variable Temp.	72,4 % ± 7,4	77,5 % ± 7,2	3 % ± 3,5
	<i>27 Tage</i>	<i>48 Tage</i>	<i>36 Tage</i>
unstratifiziert + konstante Temp.	26,8 % ± 3,9	43,6 % ± 7	4,5 % ± 4,1
unstratifiziert + variable Temp.	2,8 % ± 2,3	26,8 % ± 11,7	3 % ± 2,6

### 3.1.6 Regenwurmaktivität

Am Standort 'Merklingen' konnten jeweils 5 Plots innerhalb der Fahrspur bzw. im ungestörten Bereich im Bestand ausgewertet werden. In 9 von diesen 10 Plots konnten Regenwürmer gefunden werden. Am Standort 'Mooswald' wurden jeweils 10 Plots untersucht, aber nur in einem von diesen insgesamt 20 Plots konnten Regenwürmer gefunden werden. In keinem der untersuchten Plots konnten durch die Aufbringung der Senfsuspension zusätzliche Regenwürmer aus den tieferen Bodenbereichen ausgetrieben werden. Die nachfolgenden Angaben beziehen sich dementsprechend nur auf die Regenwürmer, die aus den obersten 25 cm Bodentiefe per Handauslese gefangen werden konnten.

Sowohl die Gesamt-Biomasse als auch die Anzahl der Regenwürmer ist auf beiden Standorten in den Fahrspurbereichen größer als im ungestörten Bereich innerhalb des Bestandes (Tabelle 11). Aufgrund bisher unbekannter Umstände sind leider bei der Lagerung der Regenwürmer bis zur Bestimmung ein Großteil der Individuen verendet, so dass die Ergebnisse zur Bestimmung der vorkommenden Regenwurm-Arten nur eingeschränkt aussagekräftig sind. Am Standort 'Merklingen' konnten folgende Arten identifiziert werden: *Lumbricus terrestris* L., *Apporectodea rosea* (SAV.) und *Eiseniella tetraedra* (SAV.). Am Standort 'Mooswald' konnte nur die Art *Lumbricus castaneus* (SAV.) identifiziert werden.

Für weitere Untersuchungen zu der Diversität und Abundanz von Regenwürmer auf den Versuchsflächen muss eine zeitnahe Bestimmung der Individuen nach der Beprobung gewährleistet werden. Der Einsatz der Senfsuspension wird auf den anderen Versuchsflächen bei der Beprobung beibehalten.

**Tabelle 11:** Biomasse, Individuenanzahl und Artverteilung der Regenwürmer an den Standorten 'Merklingen' und 'Mooswald' innerhalb der Fahrspur und im ungestörten Bestand

Standort		Biomasse [g]	Individuen (Gesamt)	juvenil	<i>Lumbricus terrestris</i>	<i>Apporectodea rosea</i>	<i>Lumbricus castaneus</i>	<i>Eiseniella tetraedra</i>	tot
Merklingen	Fahrspur	11,27	94	7	11	4	0	1	71
	Bestand	7,8	28	3	7	0	0	0	18
Mooswald	Fahrspur	1,14	3	1	0	0	2	0	0
	Bestand	0	0	0	0	0	0	0	0

Am Standort 'Ettenheim' wurden die Untersuchungen nach mehreren Versuchen der Probenentnahme (Probeentnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr) abgebrochen. Es konnte nicht ein Regenwurm gefunden werden.

Am Standort „Schönberg“ wurden insgesamt jeweils 12 Plots innerhalb und außerhalb der Fahrspur untersucht. Hier wurde zusätzlich bei der Auswertung noch zwischen drei unterschiedlichen Tiefenstufen, in denen die Regenwürmer gefangen wurden, differenziert: die Streuauflage, der Oberboden (0 – 20 cm) und der Unterboden (tiefer als 20 cm).

Die Gesamt-Anzahl der Regenwürmer ist in den Fahrspurbereichen erheblich geringer als im ungestörten Bereich innerhalb des Bestandes, während die Gesamtbio-masse ungefähr gleich ist (Tabelle 12). Eine ganz erhebliche Anzahl der gefangenen Regenwürmer befand sich in der Entwicklung im juvenilen Stadium, was eine Bestimmung unmöglich macht. Bei den adulten Tieren konnten hier neben *Lumbricus terrestris*, *L. Castaneus*, *Apporectodea rosea* und *Eiseniella tetraedra* auch *Lumbricus rubellus*, *L. polyphemus*, *Apporectodea caliginosa* sowie *A. longa* identifiziert werden.

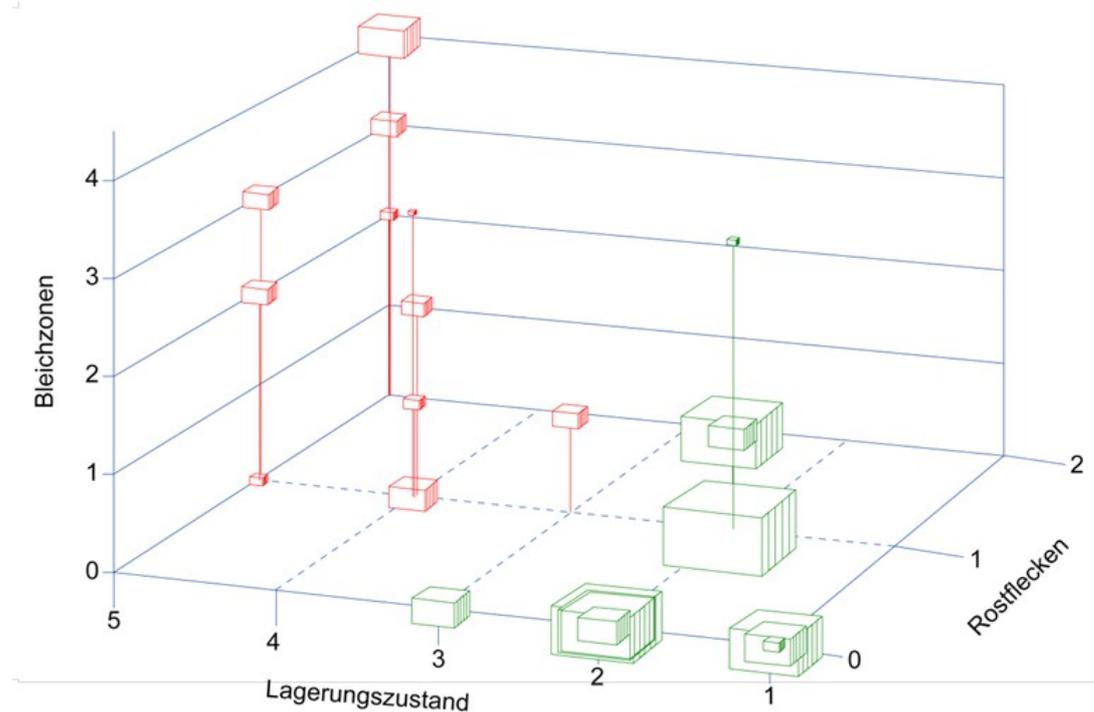
Weder zu den bodenphysikalischen noch bodenchemischen Parametern konnten Zusammenhänge zur Biomasse oder Abundanz der Regenwürmer nachgewiesen werden. Auf diese Messung wird deswegen an dieser Stelle nicht weiter eingegangen (für weitere Darstellungen: siehe MEMMERT, 2014).

**Tabelle 12:** Biomasse, Individuenanzahl und Artverteilung der Regenwürmer am Standort 'Schönberg' innerhalb der Fahrspur und im ungestörten Bestand

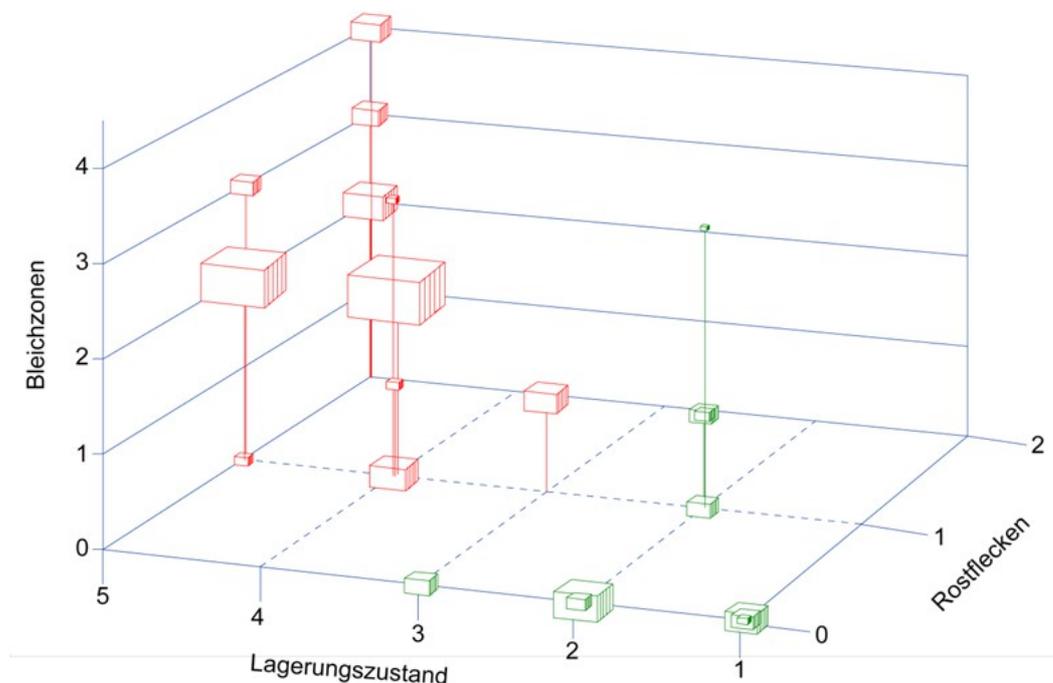
	Tiefenstufe	Biomasse [g]	Individuen (Gesamt)	<i>Lumbricus terrestris</i>	<i>Lumbricus rubellus</i>	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	<i>Aporrectodea longa</i>	<i>Aporrectodea rosea</i>	<i>Eiseniella tetraedra</i>	<i>Lumbricus polyphemus</i>	juvenil / tot
Fahrspur	Auflage	1,37	3	-	-	-	-	-	1	-	2
	0-20 cm	33,82	40	1	1	2	1	2	-	2	31
	> 20 cm	8,36	1	-	-	-	-	-	-	1	-
Bestand	Auflage	1,39	10	-	-	-	-	2	-	-	8
	0-20 cm	28,18	123	-	-	4	-	25	-	-	94
	> 20 cm	1,02	2	1	-	1	-	-	-	-	-

Eine genaue Betrachtung des erhobenen Verformungsschadens an den Probenentnahmestellen am Standort 'Schönberg' zeigt jedoch, dass die Intensität des Verformungsschadens mit der Abundanz signifikant negativ korreliert (Abbildung 57,  $\rho = -0,43$ ,  $p < 0,05$ ).

Zwischen dem Verformungsschaden und der Biomasse (Abbildung 58) hingegen bestand nur eine leicht positive Korrelation ( $\rho = 0,15$ ) ohne statistische Signifikanz vor ( $p > 0,05$ ).



**Abbildung 57:** Regenwurmabundanz in Abhängigkeit von den drei Verformungsschadenskategorien (Bleichzonen, Lagerungszustand, Bleichzonen). Größe der Quader: Anzahl der Regenwürmer, rote Quader: Plots im Fahrspurbereich, grüne Quader: Plots der Kontrollfläche (aus MEMMERT, 2014)

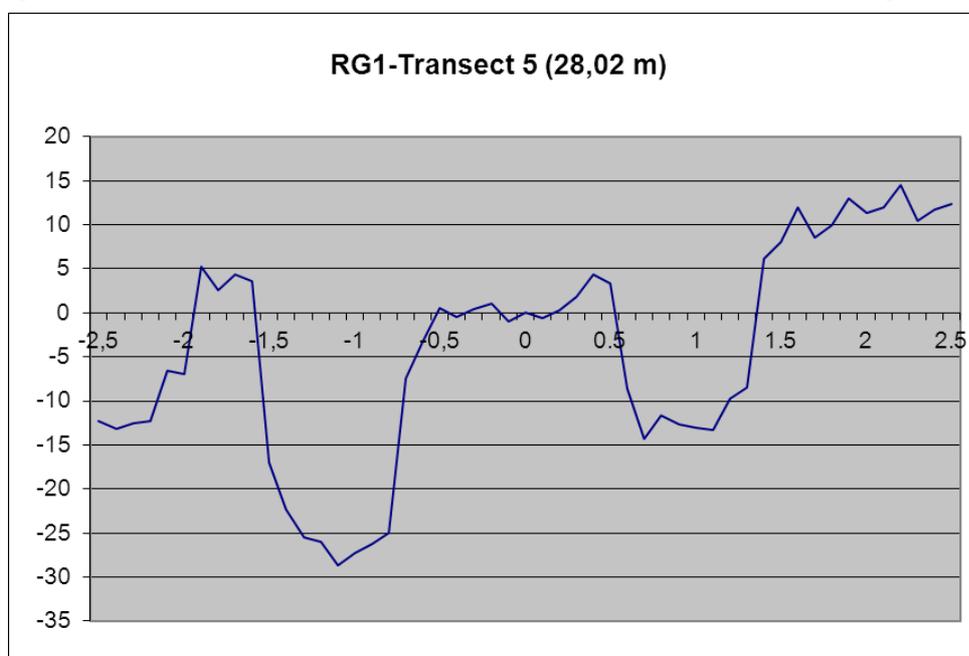


**Abbildung 58:** Biomasse der Regenwürmer in Abhängigkeit von den drei Verformungsschadenskategorien (Bleichzonen, Lagerungszustand, Bleichzonen). Größe der Quader: Anzahl der Regenwürmer, rote Quader: Plots im Fahrspurbereich, grüne Quader: Plots der Kontrollfläche (aus MEMMERT, 2014)

## 3.2. Teilprojekt zum Einfluss holziger Pflanzen (FVA)

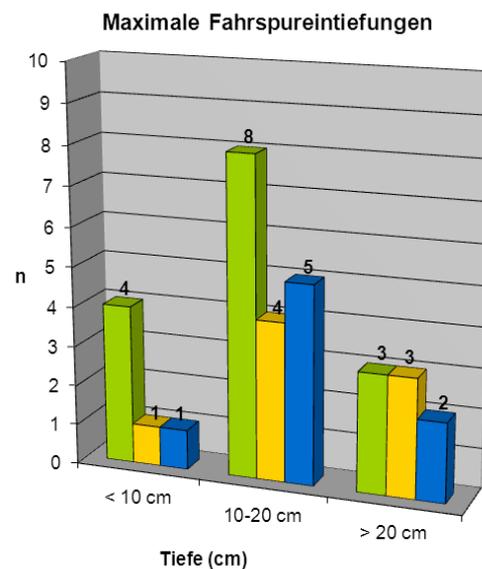
### 3.2.1 Fahrspureintiefung neu angelegter Rückegassen

Die Fahrspureintiefungen wurden nach den Überfahrten durch den Forwarder an 5 m langen Quertransekten über die Fahrtrasse hinweg bestimmt. Die Aufnahme erfolgte vor dem Mulchen der Fahrtrassen RG 2 und RG 3. Beispielhaft ist in Abbildung 59 ein Querprofil aus Rückegasse 1 (RG 1) dargestellt. Die Eintiefung erreichte in der rechten Fahrspur eine Tiefe von 28 cm; sie ist links nur ca. 15 cm tief. Unsymmetrische Eintiefungen in den korrespondierenden Fahrspuren sind bei den Quertransekterhebungen häufig aufgetreten. Zurückzuführen ist dies in erster Linie auf Stöcke und Hiebsresthölzer, die nach der Räumung auf der Fläche verblieben sind. Bei Überfahrt dieser Hindernisse kommt es zu einer Verlagerung des Fahrzeuggewichts auf die dem Hindernis abgewandte Seite. Dort nimmt die statische und dynamische Belastung bei der Überfahrt zu und verstärkt die plastische Verformungsrate.



**Abbildung 59:** Klassifizierte maximale Fahrspureintiefungen auf der Fahrtrasse RG 1 des Befahrungsversuchs am Standort 'Merklingen'

In Abbildung 60 sind die maximalen Eintiefungen in den drei Tiefenstufen < 10 cm, 10 bis 20 cm und >20 cm klassifiziert für die 31 Quertransekte (15 auf RG 1 und jeweils 8 auf RG 2 und RG 3) dargestellt. Die maximale Fahrspureintiefung lag bei 30.5 cm. Rund 20% der maximalen Eintiefungen lagen unter 10 cm; 55% zwischen 10 cm und 20 cm sowie 25% über 20 cm. Das Verteilungsmuster variiert sowohl zwischen den Fahrspurensseiten auf den jeweiligen Fahrtrassen wie auch zwischen den Fahrtrassen.



**Abbildung 60:** Maximale Fahrspureintiefungen auf den drei Fahrtrassen des Befahrungsversuchs Merklingen (grün: Rückegasse 1, gelb: Rückegasse 2, blau: Rückegasse 3)

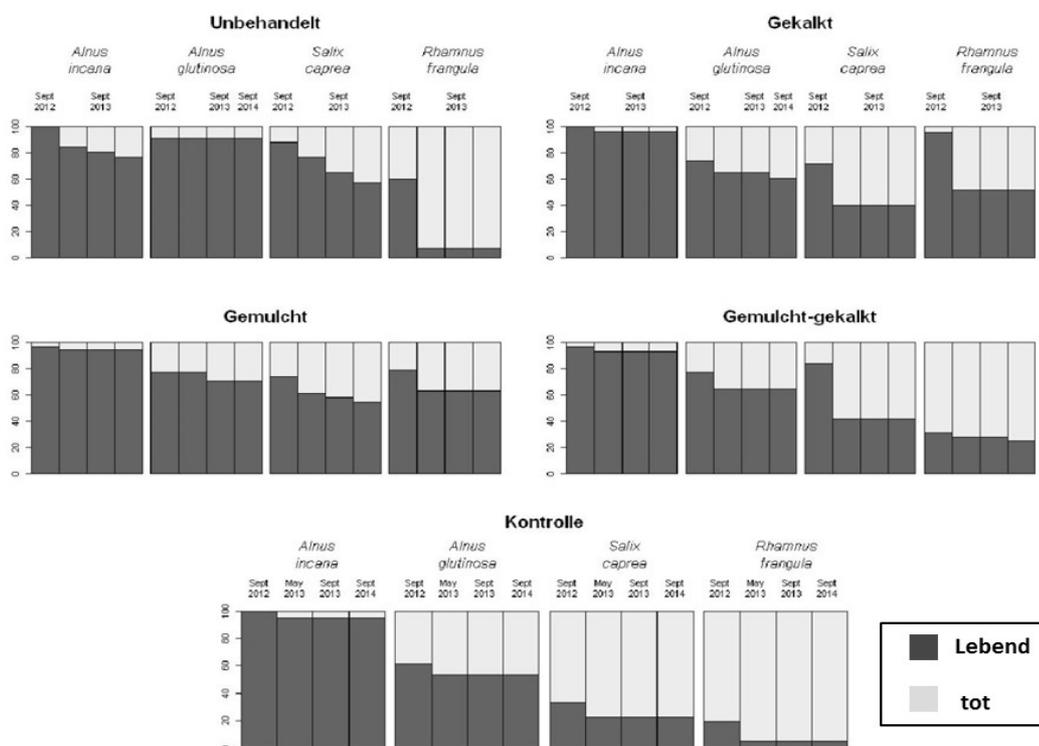
### 3.2.2 Überlebensraten der Gehölze

Die in den Jahren 2012 und 13 durchgeführten Aufnahmen zu Erhebung der Entwicklung der Überlebensrate der gepflanzten Bäume wurde im September 2014 fortgeführt um den mittelfristigen Trend der Überlebensraten baumartenspezifisch ableiten zu können. Die nach der Pflanzung in den Jahren 2012 und 13 zum Teil sehr massiven Absterberaten bei den beiden Straucharten *Rhamnus frangula* und *Salix caprea* haben sich deutlich abgeschwächt (Abbildung 61). Die Überlebensraten lagen bei diesen beiden Straucharten mit Werten zwischen 5 und 63% sehr niedrig. Die beiden Erlenarten (*Alnus incana* und *A. glutinosa*) zeigen nach wie vor die höchsten Überlebensraten. Bei diesen beiden Baumarten lag die Überlebensrate bei den meisten Varianten mit Werten zwischen 96 und 71% hoch, nur auf den unbefahrenen Kontrollparzellen war sie mit 95-54% aufgrund der höheren Konkurrenz durch andere Pflanzen niedriger. Vom Jahr 2013 auf 2014 hat diese bei den beiden Erlenarten kaum zugenommen.

**Tabelle 13:** Überlebensraten der einzelnen Baumarten auf den Fahrtrassen mit unterschiedlicher Bodenbehandlung und den unbefahrenen Kontrollflächen

Baumarten	Behandlung	Überlebensrate (%)	MW, StD Behandlung
<i>Alnus incana</i>	Unbehandelt	76,9	
<i>Alnus glutinosa</i>	Unbehandelt	91,3	
<i>Salix caprea</i>	Unbehandelt	57,7	58,5
<i>Rhamnus frangula</i>	Unbehandelt	8,0	36,4
<i>Alnus incana</i>	Gekalkt	96,3	
<i>Alnus glutinosa</i>	Gekalkt	60,9	
<i>Salix caprea</i>	Gekalkt	40,0	62,3
<i>Rhamnus frangula</i>	Gekalkt	52,0	24,2
<i>Alnus incana</i>	Gemulcht	94,6	
<i>Alnus glutinosa</i>	Gemulcht	71,0	
<i>Salix caprea</i>	Gemulcht	54,8	70,9
<i>Rhamnus frangula</i>	Gemulcht	63,2	17,1
<i>Alnus incana</i>	Gemulcht/Gekalkt	93,6	
<i>Alnus glutinosa</i>	Gemulcht/Gekalkt	64,5	
<i>Salix caprea</i>	Gemulcht/Gekalkt	41,9	56,3
<i>Rhamnus frangula</i>	Gemulcht/Gekalkt	25,0	29,7
<i>Alnus incana</i>	Kontrolle	95,0	
<i>Alnus glutinosa</i>	Kontrolle	53,9	
<i>Salix caprea</i>	Kontrolle	22,2	44,0
<i>Rhamnus frangula</i>	Kontrolle	4,8	39,6

**Überlebensrate 2012-2014**



**Abbildung 61:** Überlebensraten (in %) für die Baumarten differenziert nach den Behandlungsvarianten und den beiden Aufnahmezeitpunkten (September 2012, Mai 2013, September 2013 und September 2014)

Die nach den Bodenbehandlungs-Varianten gegliederten Überlebensraten sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Über alle Baumarten wurden auf den unbefahrenen Kontrollparzellen bis zum Jahr 2014 mit 44% die niedrigsten durchschnittlichen Überlebensraten gefunden, was dort mit dem Konkurrenzdruck durch die schon vor der Pflanzung bestehende Vegetationsdecke erklärt werden kann. Auf den befahrenen Parzellen waren die Überlebensraten mit Werten von durchschnittlich 56 – 71% deutlich höher, wobei kein systematischer Unterschied zwischen Parzellen mit und ohne nach der Befahrung durchgeführter Bodenbehandlung zu erkennen ist. Insgesamt ist die Standardabweichung der Mittelwerte mit 17 – 39% sehr hoch.

### 3.2.3 Größe und Wachstumsraten der Gehölze

In Tabelle 14 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für die biometrischen Kenngrößen Baumhöhe, Kronendurchmesser, Wurzelhalsdurchmesser und Triebhöhen 2012 bzw. 2013 zusammengefasst.

Die beiden Erlenarten zeigen für alle biometrischen Merkmale im Mittel vergleichbare Größenordnungen. Auffällig ist, dass die Roterle hierbei eine größere Variationsbreite sowohl innerhalb wie auch zwischen den Behandlungsvarianten aufweist.

Für die Grauerle zeigen vier der fünf untersuchten Parameter die höchsten Merkmalsausprägungen in der gemulchten und gekalkten Fahrspurvariante (Ausnahme: Kronendurchmesserzuwachs). Die geringsten Zuwachswerte – ebenfalls für vier der fünf untersuchten Merkmale - finden sich für diese Baumart bei der Kontrollvariante.

Für die Roterle lässt sich dieser behandlungsspezifische Trend der Zuwachswerte nicht feststellen. Während die mittleren Zuwachswerte für Kronendurchmesser und Wurzelhalsdurchmesser auf der gemulchten Variante maximale Werte annehmen, sind Höhenzuwachs und Sprosslänge auf der unbehandelten Fahrspur maximal.

Bei Faulbaum und Salweide war an den überlebenden Gehölzen in den Untersuchungsvarianten häufig ein Absterben und Abbrechen der Leittriebe festzustellen, was eine Interpretation der Höhenzuwachswerte erschwert bzw. unmöglich macht. Für den Faulbaum reagierten die weiteren Zuwachswerte uneinheitlich auf die Behandlung: Weder bei den Maximal- noch bei den Minimalwerten konnten einheitliche Trends erkannt werden. Bei Salweide waren auf der unbehandelten Fahrspur Wurzelhalsdurchmesserzuwachs und die Sprosslänge des Jahres 2012, auf der gemulcht/gekalkten Variante der Kronendurchmesser und die Sprosslänge des Jahres 2013 maximal ausgeprägt.

**Tabelle 14:** Mittelwert und Standardabweichung für Baumhöhe, Kronendurchmesser, Wurzelhalsdurchmesser und Triebblängen differenziert nach Gehölzart und Behandlungsvariante. Maximalwerte sind kursiv und fett dargestellt, Minimalwerte kursiv.

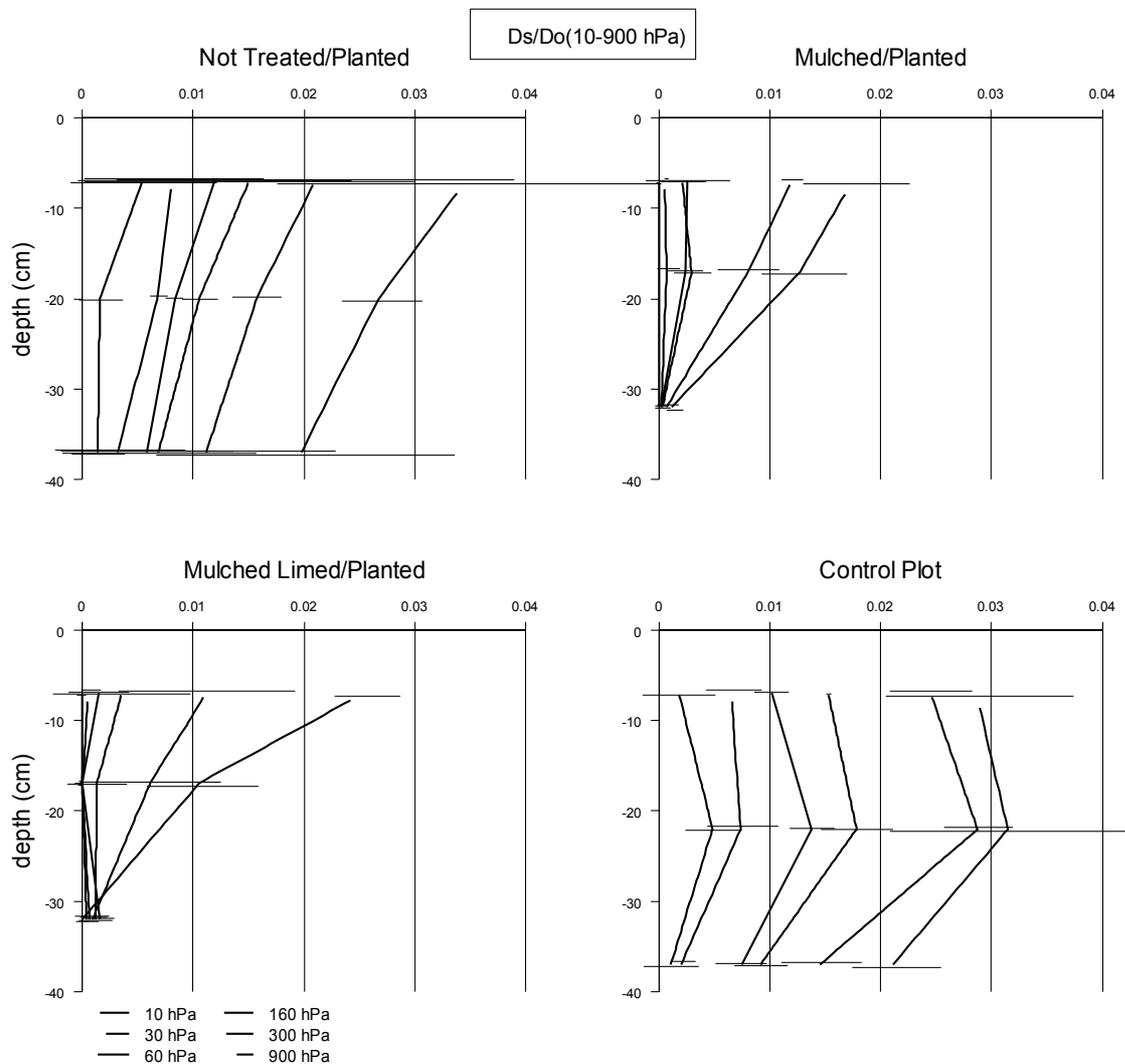
Baumart	Behandlung	Δ Höhe (m)		Δ Kronendurchmesser (cm)		Δ Wurzelhalsdurchmesser (cm)		Sprosslänge 2012 (cm)		Sprosslänge 2013 (cm)
		Mittel (n)	std.	Mittel (n)	std.	Mittel (n)	std.	Mittel (n)	std.	Mittel (n)
<i>Alnus incana</i>	Fahrspur unbehandelt	0.55 (19)	0.24	29.67 (15)	24.26	0.54 (20)	0.38	31.52 (26)	17.92	42.35 (21)
	Gekalkt	0.49 (21)	0.20	26.43 (23)	17.09	0.50 (23)	0.31	<u>29.15</u> (27)	12.47	33.27 (26)
	Gemulcht	0.52 (30)	0.33	<b>33.55</b> (31)	22.57	0.52 (32)	0.35	37.36 (36)	17.52	32.26 (35)
	Gemulcht-Gekalkt	<u>0.69</u> (24)	0.30	32.21 (25)	17.38	<u>0.68</u> (27)	0.48	<b>54.83</b> (30)	25.12	<b>44.89</b> (28)
	Kontrolle	<u>0.42</u> (17)	0.21	<u>23.77</u> (15)	13.9	<u>0.44</u> (17)	0.34	50.5 (20)	13.47	<u>25.32</u> (19)
<i>Alnus incana</i>		<b>0.53</b>	<b>0.53 (111)</b>	<b>0.10</b>	<b>29.13(109)</b>	<b>4.04</b>	<b>0.54 (119)</b>	<b>0.09</b>	<b>40.67 (139)</b>	<b>11.45</b>
<i>Alnus glutinosa</i>	Fahrspur unbehandelt	<u>0.76</u> (21)	0.28	26.31 (18)	17.21	0.64 (21)	0.34	42.57 (21)	17.74	<u>60.52</u> (21)
	Gekalkt	0.41 (12)	0.39	23.15 (13)	15.27	0.66 (11)	0.44	<u>21.12</u> (17)	10.53	<u>24.80</u> (15)
	Gemulcht	0.6 (19)	0.33	<b>36.16</b> (19)	21.36	<u>0.93</u> (18)	0.45	45.79 (24)	20.76	39.14 (22)
	Gemulcht-Gekalkt	<u>0.39</u> (18)	0.28	28.08 (19)	18.22	0.50 (13)	0.34	35.74 (24)	10.86	33.65 (20)
	Kontrolle	0.46 (5)	0.37	<u>19.5</u> (6)	16.78	<u>0.45</u> (6)	0.27	<u>57.14</u> (8)	15.24	33.17 (6)
<i>Alnus glutinosa</i>		<b>0.52</b>	<b>0.52 (75)</b>	<b>0.16</b>	<b>26.64 (75)</b>	<b>6.24</b>	<b>0.64 (69)</b>	<b>0.19</b>	<b>40.47 (94)</b>	<b>13.30</b>
<i>Rhamnus frangula</i>	Fahrspur unbehandelt	0.19 (2)	0.13	<u>6.50</u> (2)	-	0.15 (2)	0.07	<b>30.80</b> (15)	13.95	<u>18.00</u> (2)
	Gekalkt	0.07 (2)	0.07	9.14 (7)	5.52	0.15 (8)	0.23	28.39 (24)	10.66	22.08 (13)
	Gemulcht	<u>0.27</u> (15)	0.25	<b>22.40</b> (20)	13.89	<u>0.13</u> (16)	0.11	21.48 (30)	12.27	21.65 (23)
	Gemulcht-Gekalkt	<u>0.02</u> (1)	-	13.50 (6)	15.06	<b>0.28</b> (4)	0.22	<u>16.00</u> (10)	7.07	19.56 (9)
	Kontrolle	- (1)	-	- (0)	-	- (0)	-	29.00 (4)	1.73	<u>41.00</u> (1)
<i>Rhamnus frangula</i>		<b>0.14</b>	<b>0.14 (21)</b>	<b>0.11</b>	<b>12.89 (35)</b>	<b>6.97</b>	<b>0.18 (30)</b>	<b>0.07</b>	<b>25.13 (83)</b>	<b>6.21</b>
<i>Salix caprea</i>	Fahrspur unbehandelt	<u>0.33</u> (1)	-	21.10 (14)	7.62	<u>0.50</u> (11)	0.40	<b>29.86</b> (23)	18.30	31.06 (17)
	Gekalkt	- (0)	-	<u>7.90</u> (5)	2.86	<u>0.12</u> (5)	0.16	<u>17.76</u> (18)	7.89	<u>13.40</u> (10)
	Gemulcht	0.39 (8)	0.26	21.53 (16)	11.29	0.43 (6)	0.32	18.65 (23)	16.42	17.89 (18)
	Gemulcht-Gekalkt	<u>0.66</u> (1)	-	<b>25.50</b> (10)	18.50	0.25 (2)	0.21	28.88 (26)	24.53	<b>34.77</b> (13)
	Kontrolle	0.37 (3)	0.20	11.15 (4)	9.36	0.47 (3)	0.25	26.17 (6)	19.34	28.50 (4)
<i>Salix caprea</i>		<b>0.44</b>	<b>0.44 (13)</b>	<b>0.15</b>	<b>17.44 (49)</b>	<b>7.51</b>	<b>0.35 (27)</b>	<b>0.16</b>	<b>24.26 (96)</b>	<b>5.70</b>

### 3.2.4 Gashaushaltsuntersuchungen

#### Diffusionsmessungen ( $D_s/D_0$ )

In 2014 wurden die Stechzylinderentnahmen, die zuletzt 2012 durchgeführt worden waren wiederholt und Diffusionsmessungen in den Matrixpotentialstufen 10, 30, 60, 160, 300 und 900 hPa durchgeführt, während 2012 die  $D_s/D_0$ -Werte nur bei

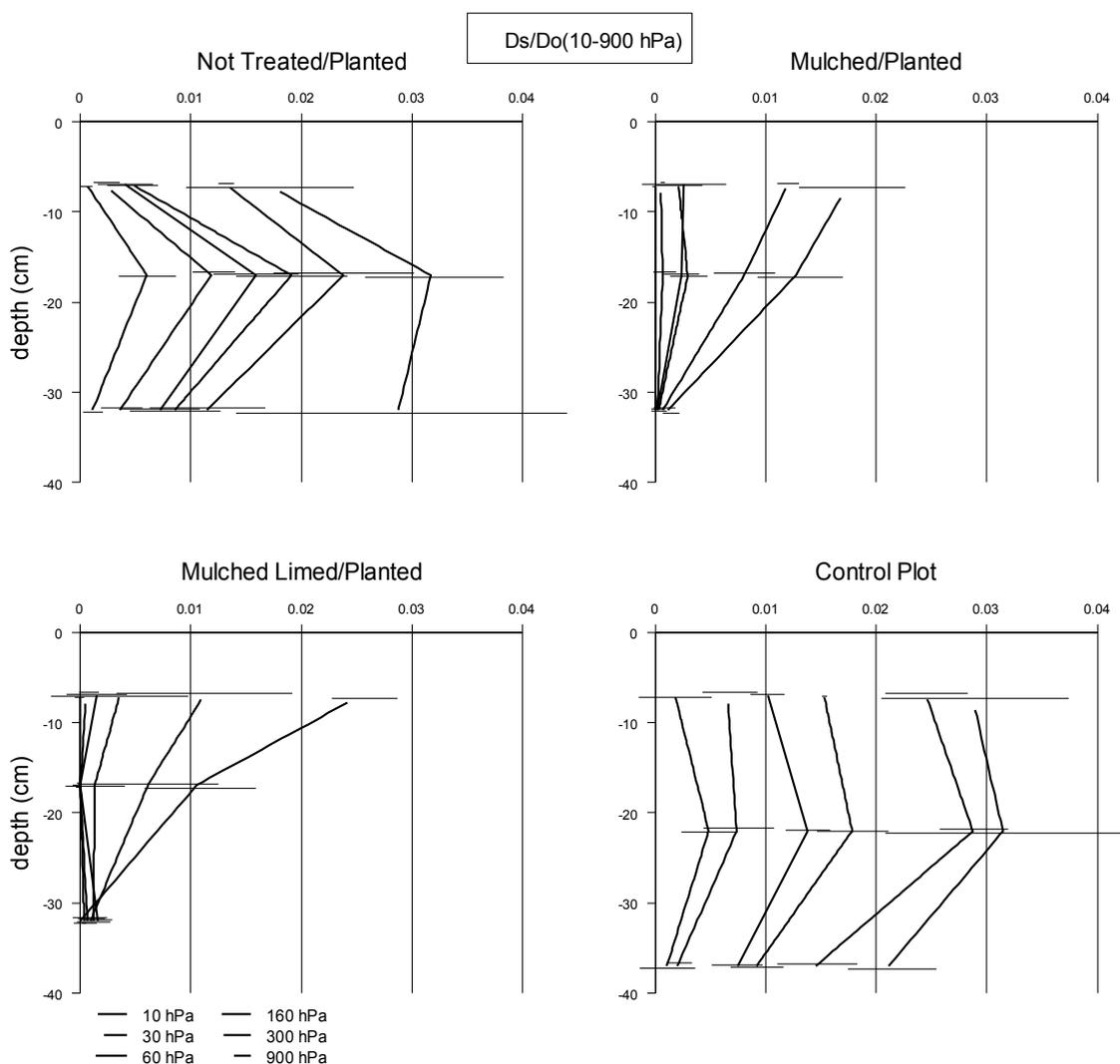
160 hPa bestimmt worden waren. Die Stechzylinderentnahme auf den Fahrspuren erfolgte getrennt in den Reifenspuren und im Zwischenspurbereich im Zentrum der Fahrtrasse. Entsprechend wurden für die verschiedenen Behandlungsvarianten die Ergebnisse der  $D_s/D_0$ -Werte dargestellt (Abbildung 62 und 63).



**Abbildung 62:** Tiefengradienten der scheinbaren relativen Diffusionskoeffizienten ( $D_s/D_0$ ) für die Saugspannungsstufen 10, 30, 60, 160, 300 und 900 hPa für die Fahrtrassen ohne nachfolgende Bodenbehandlung (o.l.), mit Mulchen (o.r.), Mulchen und Kalkung (u.l.) und die unbefahrene Kontrolle (u.r.). Dargestellt sind hier Proben aus dem Zwischenspurbereich.

In Jahr 2012, direkt nach dem Mulchen, lagen die  $D_s/D_0$ -Werte in der obersten Mineralbodentiefe von 7 cm unterschiedslos auf Reifenspuren und Zwischen-spurbereichen mit hoher Variation bei Werten zwischen 0,1 und 0,01. Zwei Jahre später wurden in der gleichen Bodentiefe sowohl im Zwischenspurbereich als auch in Reifenspuren um etwa eine Größenordnung niedrigere Werte (im Mittel 0,001 und 0,002)

gemessen. Dies ist ein klarer Beleg für die Sackung und Wiederverdichtung der durch das Mulchen in den obersten 10-15 cm „überlockerten“ Bodenmatrix. Unerwartet hoch ist die Intensität dieser Wiederverdichtung, da in die Mulchschicht ein hoher Anteil zerfaserte Holzbestandteile eingearbeitet worden sind (Abbildung 5), von dem man eine Stabilisierung der mechanisch gelockerten Bodenstruktur hätte erwarten können. Außerdem zeigt der Vergleich zur Fahrtrasse ohne Bodenbearbeitung, dass offensichtlich die Wiederverdichtung zu deutlich niedrigeren  $D_s/D_0$ -Werten, also zu einer Verschärfung des Belüftungsengpasses, geführt hat. Auf der unbearbeiteten Fahrtrasse liegen die  $D_s/D_0$ -Werte im Zwischenspurbereich bei 0,015 (Abbildung 62) und im Reifenspurbereich bei 0,005 (Abbildung 63).



**Abbildung 63:** Tiefengradienten der scheinbaren relativen Diffusionskoeffizienten ( $D_s/D_0$ ) für die Saugspannungsstufen 10, 30, 60, 160, 300 und 900 hPa für die Fahrtrassen ohne nachfolgende Bodenbearbeitung (o.l.), mit Mulchen (o.r.), Mulchen und Kalkung (u.l.) und die unbefahrene Kontrolle (u.r.). Dargestellt sind hier Proben aus dem Spurbereich

Dieser Befund ist nur durch eine gegenüber der Befahrung noch weitergehende Verdichtung durch das Mulchgerät zu erklären, wobei eine besonders ausgeprägte Tiefenwirkung der Verdichtung durch das Mulchgerät zu beobachten ist. Dieser Effekt ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die durch die Vibration des Mulchgeräts besonders hohe dynamische Belastung zu erklären.

Auf den gemulchten Parzellen sind erheblich hohe Anteile an zerspantem Holz aus Schlagabraum und Wurzelstöcken in die Mulchschicht eingearbeitet (Abbildung 64). Davon hatten wir eine Stabilisierung der durch das Mulchen überlockerten Bodenstruktur erwartet. Die zwischen 2012 und 2014 anhand der  $D_s/D_0$ -Werte beobachtete, sehr stark ausgeprägte Wiederverdichtung durch Sackung widerlegt diese Erwartung (s.o.). Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass in den kommenden Jahren durch biologische Metabolisierung und Umbau der Holzbestandteile ein lockeres und stabiles Bodengefüge entsteht. Dies ist insbesondere auf den Parzellen zu er-



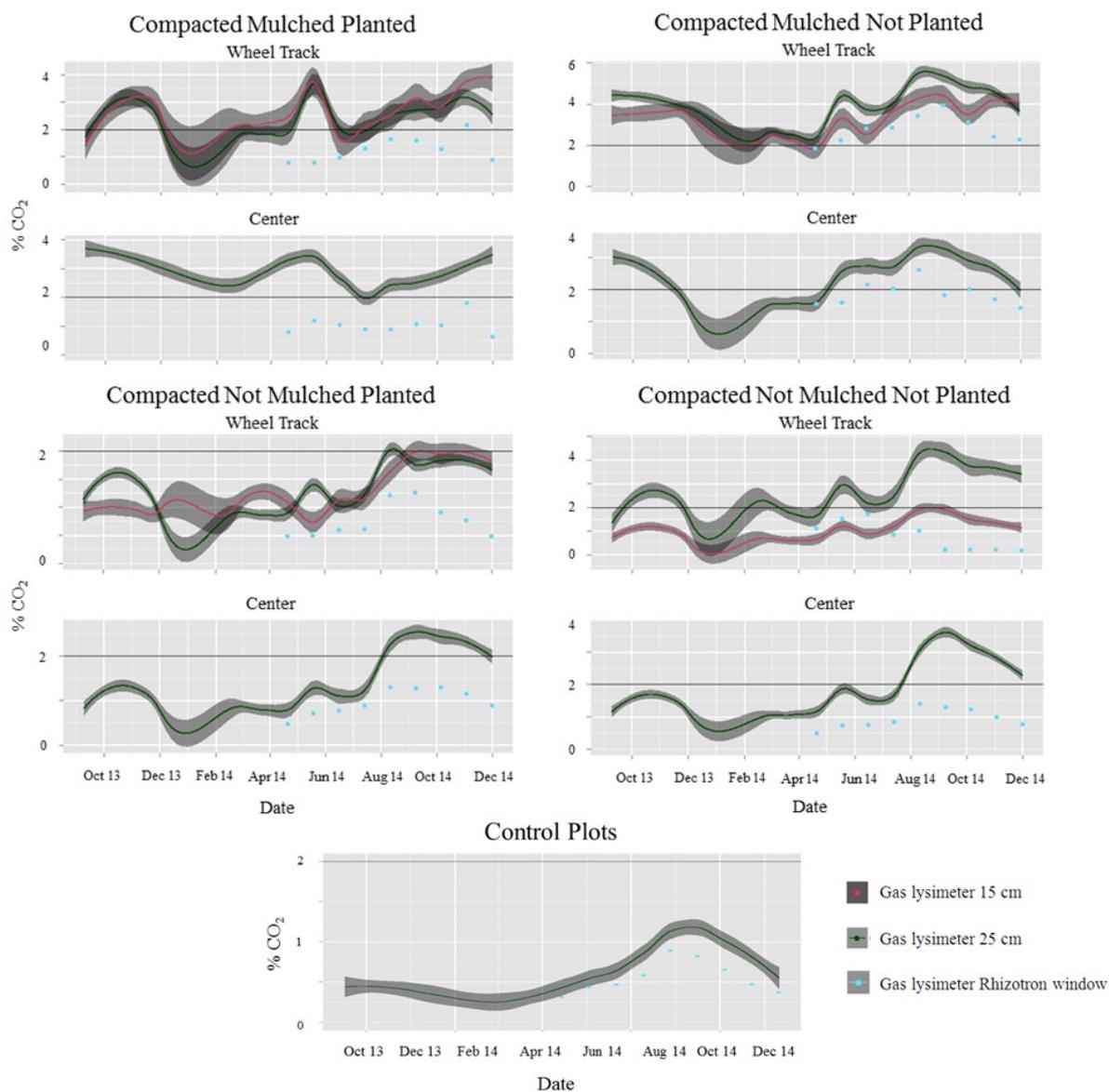
**Abbildung 64:** Oberbodenaufbau bis 40cm auf den gemulchten Parzellen. Deutlich erkennbar ist der hohe Anteil an zerspantem Holz in den obersten 15cm.

warten, die gemulcht und gekalkt sind.

Im Fahrspurbereich (Abbildung 63) sind die Relationen zwischen den Behandlungsvarianten mit Ausnahme der unbehandelten Fahrtrasse denjenigen im Zwischenspurbereich (Abbildung 62) sehr ähnlich. Im Oberboden der unbehandelten Fahrspuren wurde eine ausgeprägte Abnahme des  $D_s/D_0$  zwischen 7 und 17 cm Bodentiefe beobachtet, die für alle Feuchtestufen um den Faktor 2-4 niedrigere Diffusionskoeffizienten ergab. Die Form des Tiefenprofils der  $D_s/D_0$ -Werte auf den Kontrollplots mit den Maximalwerten im mittleren Tiefenbereich lässt darauf schließen, dass auf den Kontrollplots ebenfalls ein Befahrungseinfluss besteht, der jedoch schwächer ausgeprägt ist als auf der unbehandelten Fahrtrasse. Visuell war diese Vorbelastung anhand von Fahrspureintiefungen jedoch nicht erkennbar.

Zeitreihen der Gaskonzentrationsmessungen

In Abbildung 65 werden die mittleren zeitlichen Verläufe der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen hinter den Rhizotronscheiben und den in korrespondierenden Bodentiefen in nächster Nachbarschaft installierten diffusiven Gassammlern (Gaslysimetern) vergleichend dargestellt. Die Darstellung ist nach Behandlungsvarianten gegliedert.



**Abbildung 65:** Zeitreihen von CO<sub>2</sub>-Konzentrationen hinter Rhizotronscheiben (blaue Punkte) und korrespondierenden Gaslysimetern in 15 und 25 cm Tiefe um in Fahrspuren den dort sehr steile Tiefengradient der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen adäquat abzubilden (schwarze Linien mit 95%-Vertrauensintervallen). Die Darstellung ist nach Behandlungsvarianten gegliedert. Horizontale Referenzlinie 2% CO<sub>2</sub>: Dies gilt als Grenzbereich für das Wurzelwachstum.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft wurde als Indikator für die in den jeweiligen Behandlungsvarianten typischen Belüftungsverhältnisse erhoben. Dieses erfolgte in Gaslysimetern mit einer belüftungswirksamen Interfacefläche zum Boden von ca. 3 cm<sup>2</sup>, während die Rhizotronscheiben über ca. 80 cm<sup>2</sup> integrieren. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Sammeloberfläche über eine Makropore Anschluss an Bodenpartien mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentration oder die freie Atmosphäre hat, bei den Rhizotronscheiben sehr viel größer als bei den Gaslysimetern. So können die Werte aus Gaslysimetern als weitgehend ungestörte Referenz für die Beurteilung der Belüftungsverhältnisse hinter den Rhizotronscheiben verwendet werden. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration hinter den Rhizotronscheiben verlaufen systematisch auf einem niedrigeren Niveau als diejenigen aus Gaslysimetern. Dies ist auch aus dem oben dargestellten Unterschied der Integrationsebenen plausibel. In allen Fällen zeichnen die Konzentrationsverläufe der Rhizotronscheiben diejenigen der Gaslysimeter gut nach. Allerdings bestehen Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten. Am engsten ist der Zusammenhang auf den unbefahrenen Kontrollflächen und auf der gemulchten, nicht bepflanzten Fläche. Hinsichtlich der Fahrtrassensituationen ist zu erkennen, dass der Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Konzentration der Rhizotronscheiben und Gaslysimeter im Bereich des Mittelwulstes zwischen den Reifenspuren am schwächsten ausgeprägt ist. Das hängt mit hoher Wahrscheinlichkeit mit den dort durch Bodenverlagerung während der Befahrung entstandenen Gefügerissen (s.o.) zusammen. Die Tatsache, dass in einigen Varianten die kritische CO<sub>2</sub>-Konzentration von 2% auch hinter den Rhizotronscheiben überschritten wurde zeigt, dass mit dieser Technik auch in verdichteten Böden realitätsnahe Belüftungsverhältnisse und damit Wurzelwachstumsraten erreicht werden können.

Im zeitlichen Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration fällt auf, dass die Parallelität zwischen Gaslysimetern und Rhizotronen bis in den August hinein überall hoch ist, danach aber bei vielen Varianten schwellenartig „zusammenbricht“. Dies war auf den gemulchten und nicht gemulchten bepflanzten und nicht bepflanzten Parzellen in Fahrspuren der Fall, sowie auf den nicht gemulchten Flächen im Bereich des Mittelwulstes. Wir erklären uns das so, dass im Zuge der Austrocknung des Bodens engere Makroporen entwässert werden und dadurch mit zunehmender Austrocknung zunehmende Diffusionsbrücken zu Außenluft eröffnen.

### 3.2.5 Bodenvegetation, Bodenchemischer Zustand, Bodenstruktur und Feinwurzeldichten

#### Vegetationsaufnahmen

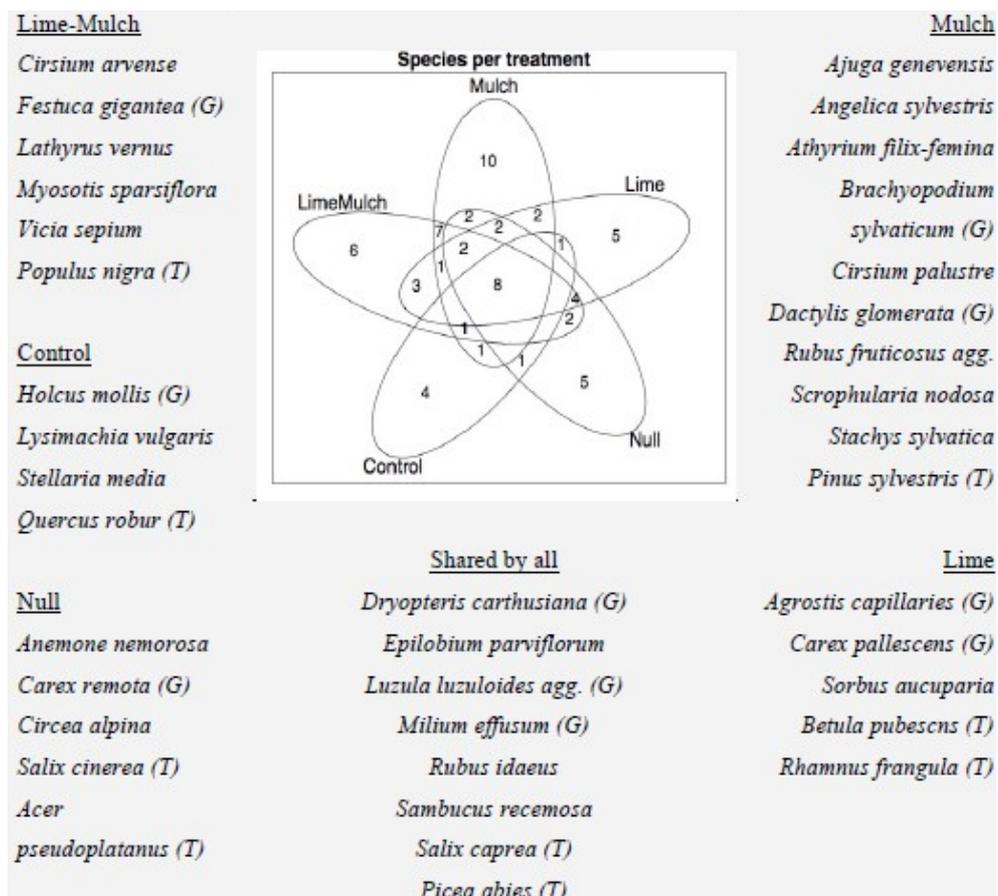
Die Vegetationsaufnahmen wurden mittels Aufnahmerahmen mit den Maßen 50x50 cm aufgenommen (Abbildung 66).



**Abbildung 66:** Beispiele für die Bodenvegetation in den Aufnahmerahmen der Vegetationsaufnahme. *Milium e.*, *Drypteris c.*, und *Rubus i.* im Kontrollplot, *Deschampsia c.*, *Luzula l.*, *Salix c.* and *Juncus e.* im gekalkten und gemulchten mit Erle bepflanzten Plot, *Rubus i.* mit einem Deckungsgrad von >75% auf der unbehandelten Fahrtrasse, Mittelwulst, Vegetationsloser Flächenanteil >75% im gekalkten und gemulchten, unbepflanzten Plot. (L. Jansone, 2015)

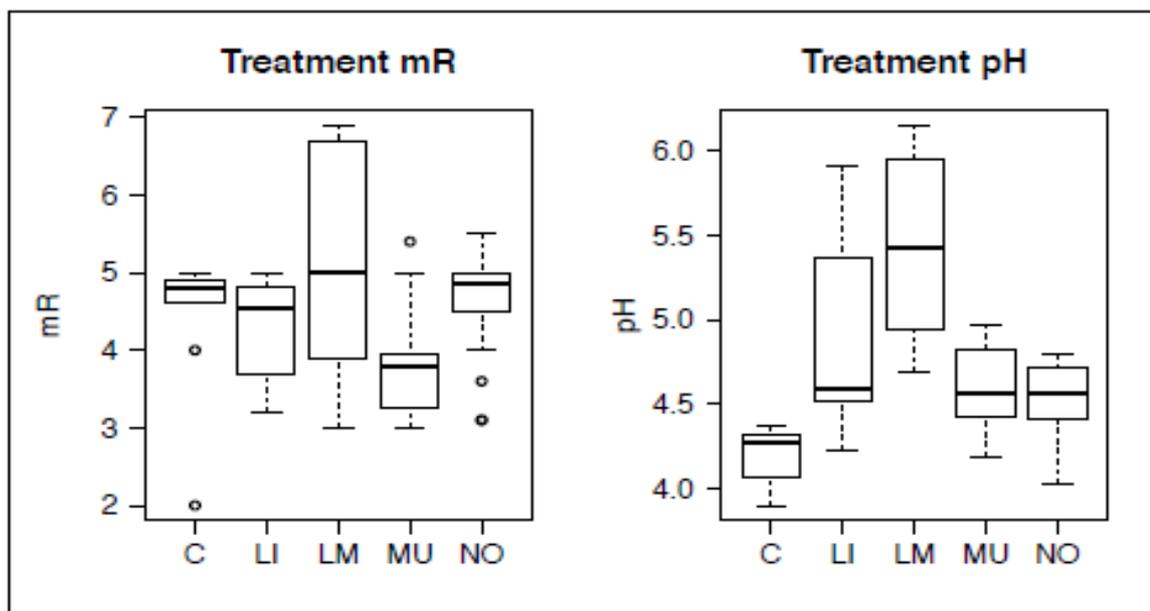
Die Vegetationsaufnahmen wurden hinsichtlich Artenzahl ( $\alpha$ - und  $\beta$ -Diversität), Verteilung auf die Behandlungsvarianten und der Ellenberg-Zeigerwerte, welche die ökologische Indikation der Bodenvegetation ausdrücken, ausgewertet. Die Verteilung der Arten in der Bodenvegetation auf die Behandlungsvarianten wird in Abbildung 67 gezeigt. Dabei fällt auf, dass 30 der 67 in der Bodenvegetation aufgenommenen Arten nur in einer der Behandlungsvarianten vorkam, also von diesen eine spezifische Indikation für die durch die Behandlung entstandenen ökologischen Bedingungen zu erwarten ist. Der höchste Behandlungs-bezogene Artenreichtum mit jeweils 34 Arten wurde auf den Varianten Mulchung und Mulchung+Kalkung gefunden und nur 8 Arten kamen als Ubiquisten auf allen Behandlungsvarianten vor.

Der Befund, dass zwei Jahre nach Anlage des Versuches schon ein so hoher Anteil der Arten in der Bodenvegetation exklusiv in nur einer der Behandlungsvarianten vorkommt zeigt, dass offensichtlich die Bodenvegetation sich außerordentlich schnell an die durch die Behandlungsvarianten entstandenen, neuen ökologischen Bedingungen anpasst.



**Abbildung 67:** Artenvorkommen nach Behandlungsvarianten. G = Grasarten, T = Baumarten (JANSONE, 2015)

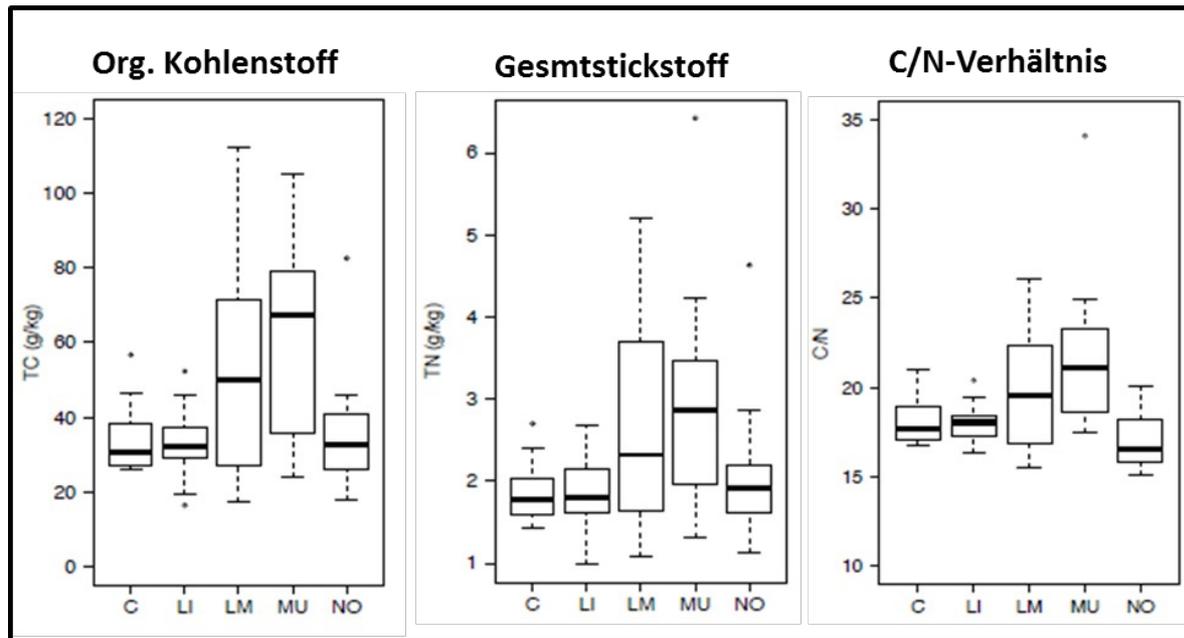
Die Auswertung der Zeigerwerte nach ELLENBERG & LEUSCHNER (2010) zeigen jedoch, auch im Vergleich mit den entsprechenden gemessenen bodenchemischen Werten, dass die ökologischen Randbedingungen auf den Behandlungsvarianten noch nicht im Gleichgewicht mit der Vegetationszusammensetzung sind. Dies lässt sich besonders deutlich am Vergleich zwischen Reaktionszahl (R) und pH-Werten (Abbildung 68) zeigen.



**Abbildung 68:** Mittlere Reaktionszahlen nach Ellenberg und Leuschner (2010) der Aufnahmeplots nach Behandlungsvarianten(links) und pH-Werte einer Mischprobe der obersten 17cm (rechts). C= Kontrolle, Li=gekalkt, LM=gekalkt und gemulcht, NO=Fahrspur ohne Bodenbehandlung (JANSONE, 2015)

Hier erkennt man, dass auf den beiden gekalkten Behandlungseinheiten der pH-Wert (Mischprobe der obersten 17cm) durchschnittlich um 0,4 bis 1 pH-Stufe gegenüber den anderen Behandlungsvarianten angestiegen ist – am stärksten und signifikant – während die Reaktionszahl diesem Muster kaum folgt. Allenfalls der etwas höher Median und die wesentlich erhöhte Streuung auf der gekalkten und gemulchten Variante deuten eine dem pH-Wert analoge Entwicklung der Bodenvegetation an.

Die Stickstoffzeigerwerte der Bodenvegetation lagen überwiegend zwischen 5,0 und 6,0 ohne systematische Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten. Die Gesamtstickstoff- und Kohlenstoffkonzentrationen der Mineralboden-Mischproben der obersten 17 cm (Abbildung 69) zeigten für beide Parameter gleichlaufend eine deutliche Abhängigkeit von den Behandlungsvarianten.



**Abbildung 69:** Gesamt Kohlenstoff- (links), Stickstoffgehalte (Mitte) und C/N-Verhältnisse (rechts) nach Behandlungsvarianten (C=Kontrolle, Li=gekalkt, LM=gekalkt+gemulcht, Mu=gemulcht, No=keine Bodenbehandlung) von Mischproben aus den obersten 17 cm Mineralböden (L. Jansone, 2015)

Die beiden gemulchten Varianten zeigen mit deutlich erhöhter Variation die höchsten Werte, wobei diese auf den nur gemulchten Varianten am höchsten sind. Die übrigen Behandlungsvarianten zeigten mit geringer Variation deutlich niedrigere Werte. Die auf den gemulchten Flächen erhöhten Gesamt-C und N-Gehalte zeigen, dass hohe Holzanteile aus Schlagabraum und Bodenvegetation in den obersten Oberböden eingearbeitet wurden, die teilweise so stark zerkleinert waren, dass sie durch das 2mm Sieb hindurchgingen und mit der Bodenmatrix analysiert wurden. Dass analog die C/N-Verhältnisse auf den beiden gemulchten Varianten erhöht waren ist ein Hinweis darauf, dass eine Aktivierung der bodenbiologischen Aktivität durch dieses hohe „Futterangebot“ für Destruenten aufgrund der Kürze der Zeit noch nicht eingetreten ist. Die gemulchten Flächen befinden sich also noch in der Übergangsphase, in der durch ein übermäßiges Kohlenstoffangebot im Boden eine Stickstoffsperrung ausgelöst wird. Diese kann, ggf. unter Mitwirkung der Kalkung verstärkt, sich in den kommenden Jahren auflösen. Erst dann kann die mittel- bis langfristige Wirkung der Mulchung auf Bodenstruktur und Belüftung abschließend beurteilt werden.

### Bodenstruktur und Feinwurzeldichten nach Behandlungsvarianten

Die Ergebnisse der Struktur- und Feinwurzeldichte Erhebungen an den Bohrkernen sind die eigentlichen Zielgrößen der Untersuchung, da diese eine Beurteilung der Wirkung der Bodenbehandlung auf die belüftungsrelevante Bodenstruktur und die Bodenbelüftung beurteilen lassen. Eine Vielzahl unterschiedlicher Indikatoren für belüftungsrelevante Bodenmerkmale, die als Prädiktoren der Durchwurzelungsdichte dienen können, wurden an den Bohrkernen erhoben: Gefügeform, Aggregatgröße, mechanische Mischung von Mineralboden und organischem Material (durch Befahrung und/oder Mulchen), Rostfleckigkeit (zur Beurteilung der Hydromorphie). Hier werden ausgewählte Beispiele gezeigt, die einen intuitiven Eindruck der Vorgehensweise vermitteln. In Abbildung 70 werden die Bohrkernen mit natürlich gelagerter Struktur und die Aggregatform – Ansprache an gestörtem Probenmaterial gezeigt. Auf den natürlich gelagerten Probenoberflächen wurde die Ansprache der Hydromorphiemerkmale und Wurzelzählungen durchgeführt, an den durch vorsichtigen Druck zerkleinerten Anteilen des Bohrkerns die Aggregatgrößenansprache.

Bohrkern mit natürlicher Lagerung

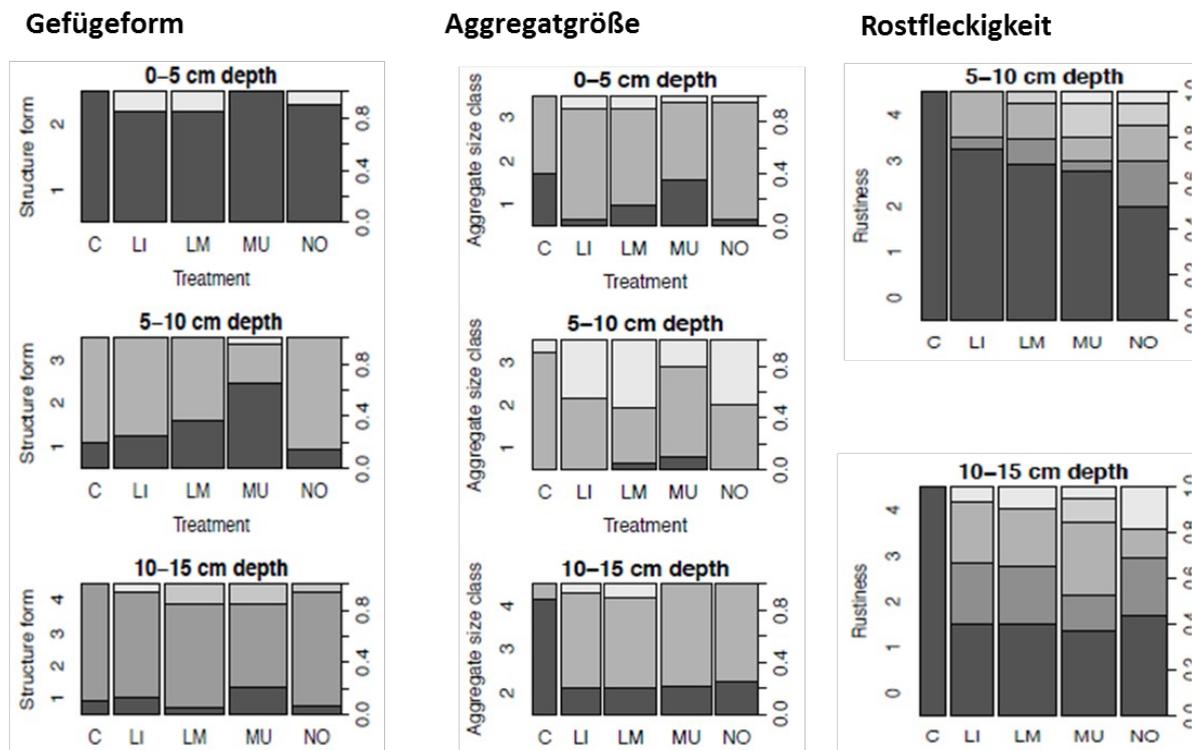
Ansprache der Gefügeform an Bohrkernmaterial mit gestörter Lagerung



**Abbildung 70:** Bohrkern-Hälfte der Kontrollparzelle mit natürlich gelagerter Struktur für Ansprache von Hydromorphiemerkmale und Feinwurzeldichten (links), die andere Hälfte des Bohrkerns (hier Bohrkern von einer gekalkten und gemulchten Fläche) wurde vorsichtig destrukturiert und die Gefügeform, bzw. die Aggregatgrößen in 0-5, 5-10 und 10-15cm Bohrkerntiefe angesprochen (rechts) aus L. Jansone (2015)

An der natürlich gelagerten Bodenoberfläche der Bohrkern lassen sich gut die Tiefenstufenabfolge der Gefügeformen erkennen, wie an dem Beispiel aus den Kontrollflächen in Abbildung 70, die einen allmählichen Übergang zwischen Krümelgefüge im Oberboden zu bröckeligen bis subpolyedrischen Strukturen im unteren Teil des Bohrkerns zeigen. Das Beispiel aus einer gemulchten und gekalkten Parzelle lässt schon deutliche Ansätze von Humifizierung des Mulchmaterials in den Tiefenstufen

0-5 und 5-10 cm erkennen und der hohe Anteil an Krümeln < 2 mm lässt auf den Beginn erhöhter bodenbiologischer Aktivität schließen.

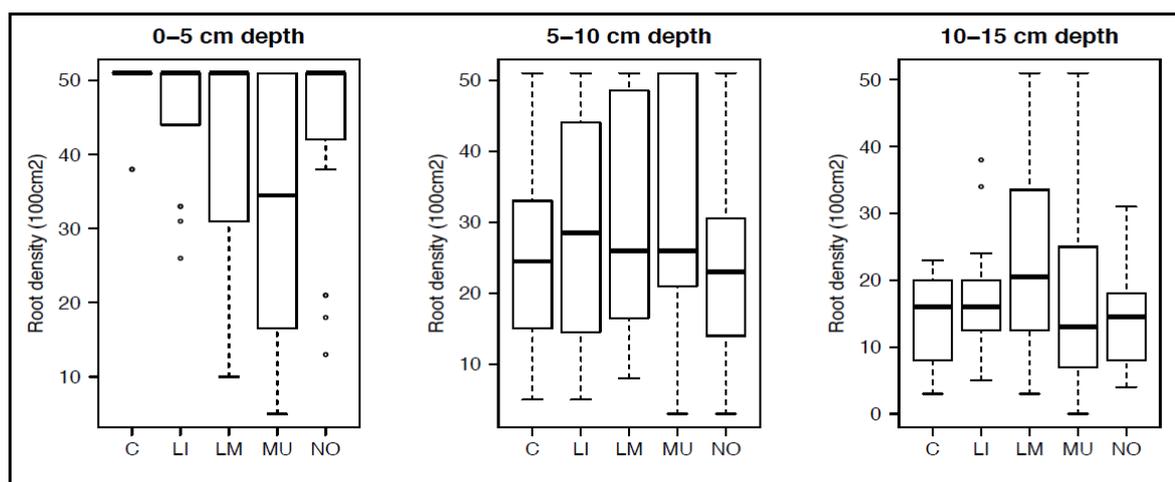


**Abbildung 71:** Relative Anteile (rechte Ordinate) von Gefügeform (links), Aggregatgröße (Mitte) und Rostfleckigkeit (rechts) aus den Bohrkernaufnahmen an den einzelnen Behandlungsvarianten (C=Kontrolle, Li=gekalkt, LM=gekalkt+gemulcht, Mu=gemulcht, No=keine Bodenbehandlung) nach den Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-15cm. Klassifizierung der **Gefügeform**: d'grau=Krümel, m'grau=bröckelig, h'grau=kohärent, weißgrau=plattig; der **Aggregatgröße**: d'grau=100%, m'grau=90%, h'grau=75%, weißgrau=50% < 5mm; **Rostflecken**: d'grau=keine, m'grau=Stecknadelkopf groß, h'grau=größere Rostflecken, weißgrau=Makroporen mit Rostkrusten ausgekleidet, weiß=ganze Aggregate von Rostkrusten überzogen (L. Jansone, 2015)

Die wichtigsten quantitativen und semiquantitativen Ergebnisse zu Bodenstruktur und Hydromorphie sind in Abbildung 71 zusammengefasst. Die Abbildung zeigt, dass die obersten 5 cm der Bohrkern mit geringfügigen Ausnahmen durch eine Krümelstruktur und zu ca. 90 % von Aggregatgrößen < 5 mm gekennzeichnet ist. In dieser Tiefenstufe bestehen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten. In der untersten Tiefenstufe (10-15 cm) sind deutlichere Unterschiede im Gefüge zwischen den Behandlungsvarianten zu erkennen. Während auf den Kontrollflächen 85 %, 15 % Krümel und ca. 90 % der Aggregatgrößen < 5 mm sind, wurde auf den befahrenen Flächen bis zu 20 % kohärente und ein geringer Anteil plattige Gefügeformen mit Aggregatgrößen, die zu 80 % in den Klassen 75 und 50 % < 5 mm lagen. Das bedeutet, dass der tiefere Mineralboden auf der Kontrolle natürlich strukturiert ist und alle befahrenen Flächen unabhängig von der Bodenbearbeitung einen deutlichen Strukturverlust durch die Befahrung aufweisen. Die ökologische

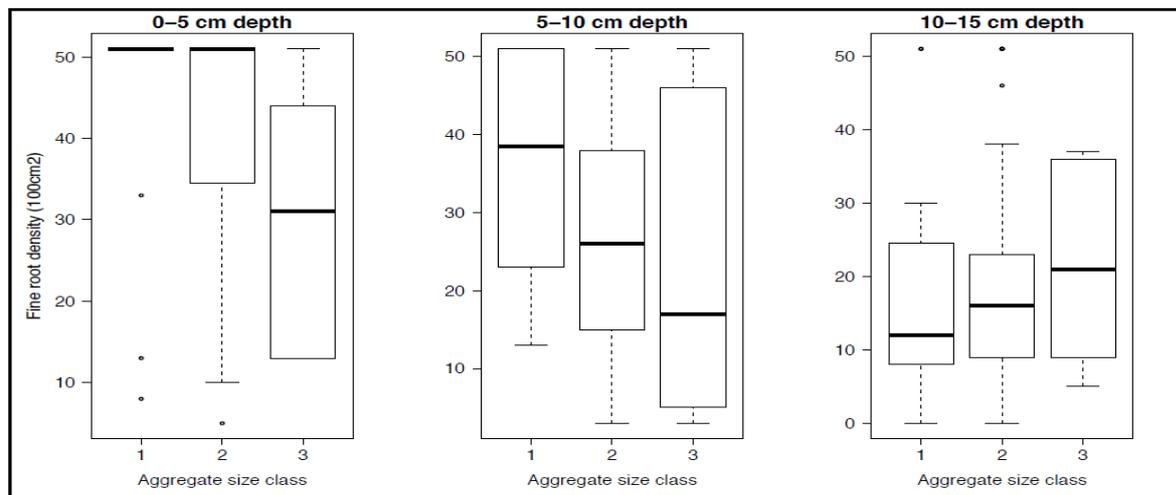
Steuergröße für die Durchwurzelbarkeit ist mit den Merkmalen Hydromorphie und Bodenbelüftung zu umschreiben. Größe und Flächenanteil von Rostflecken beinhalten eine Information über die Intensität der Hydromorphie. Sowohl in der Tiefenstufe 5-10cm als auch 10-15 cm ist ein ausgeprägter Unterschied zwischen der unbefahrenen Kontrolle und den befahrenen Varianten zu beobachten. In 0-5 cm sind alle Hydromorphie-Intensitäten auf der gemulchten und der Fahrspur ohne Bodenbearbeitung vertreten. An der Bodenoberfläche nimmt die Intensität der Hydromorphie von der Kontrolle über die gekalkte, die gemulchten zur Variante ohne Bodenbearbeitung kontinuierlich zu. In 10-15 cm Tiefe ist in allen befahrenen Varianten die gesamte Spreitung der Hydromorphie-Intensitäten vertreten, wobei keine deutlichen Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten erkennbar sind.

Die Feinwurzeldichten ( $< 2 \text{ mm}$ ) sind in Abbildung 72 nach Behandlungsvarianten gegliedert dargestellt, in Abbildung 73 nach Aggregatgrößenklassen und in Abbildung 74 nach Intensität der Rostflecken, bzw. Rostüberzüge.

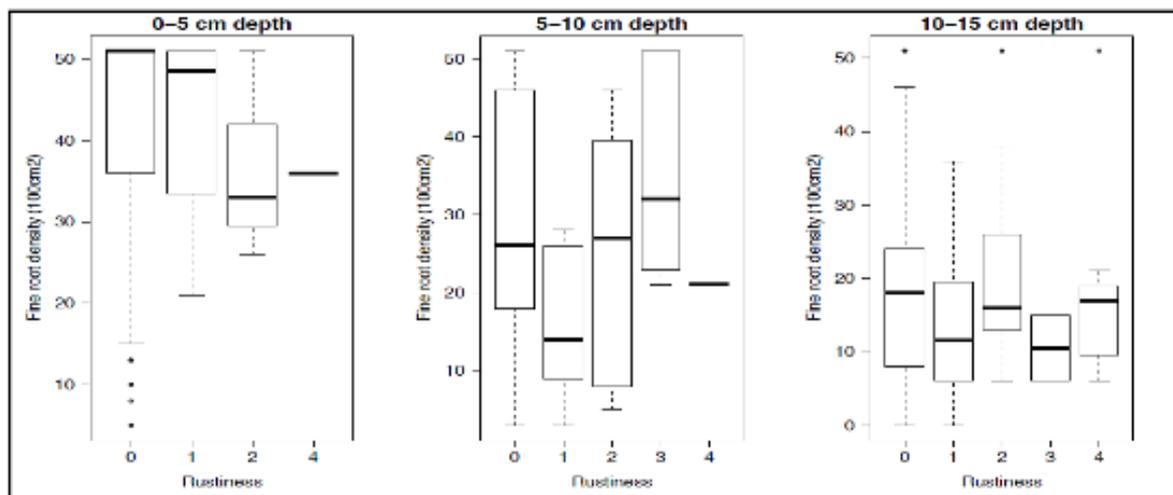


**Abbildung 72:** Feinwurzeldichten (Feinwurzel / 100cm<sup>2</sup>) nach Behandlungsvarianten (C=Kontrolle, LI=gekalkt, LM=gekalkt+gemulcht, MU=gemulcht, NO=keine Bodenbehandlung) aus JANSONE (2015)

Eine Abhängigkeit von der Behandlungsform deutet sich nur im 0-5 cm Bodentiefe in Form der sehr viel höheren Variationsbreite bei den beiden gemulchten Varianten und dort einer Tendenz zu niedrigeren Feinwurzeldichten an. Bei den beiden unteren Tiefenstufen ist in der jetzigen Initialphase des Versuchs, 2 Jahre nach Durchführung der Behandlungen und der Pflanzungen, bei sehr hohen Variationbreiten keine Tendenz zwischen den Behandlungsvarianten erkennbar. Eine Abhängigkeit der Feinwurzeldichte von der Aggregatgrößenklasse ist in den beiden oberen Tiefenstufen erkennbar. Ähnlich ist der Zusammenhang zur Gefügestärke, der hier nicht dargestellt wurde, da er weitgehend redundant zur Aggregatgrößenklasse ist.



**Abbildung 73:** Feinwurzelndichten (Feinwurzel / 100cm<sup>2</sup>) nach Aggregatgrößenklassen (1=<2mm, 2=2-5mm, 3=5-20mm) aus JANSONE (2015)



**Abbildung 74:** Feinwurzelndichten (Feinwurzel / 100cm<sup>2</sup>) nach Intensität der Rostfleckung (0=keine, 1=Stecknadelkopf groß, 3=größere Rostflecken, 4=Rostüberzüge von Makroporen und Aggregaten) aus JANSONE (2015)

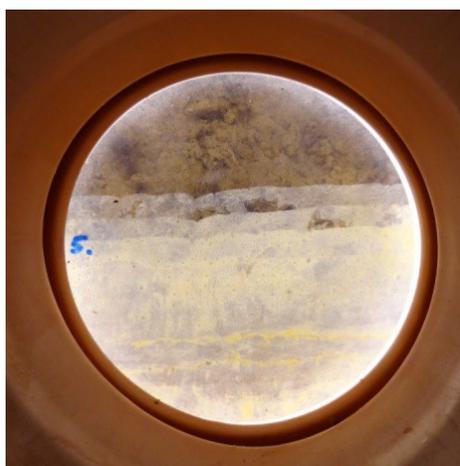
Analog zu den Abhängigkeiten vom Bodengefüge, zeigt die Feinwurzelndichte in 0–5 cm eine Abhängigkeit von der Intensität der Hydromorphie – mit zunehmender Intensität der Hydromorphie nimmt die Feinwurzelndichte ab. In 5–10 und 10–15 cm ist bei zum Teil sehr hohen Steuungen keine eindeutigen Zusammenhänge mit der Intensität der Hydromorphie mehr zu erkennen.

### 3.2.6 Dynamik des Wurzelwachstums (April – August 2014)

Die Erhebung der Wurzelwachstumsraten wurde in monatlichen Aufnahmekampagnen durchgeführt. Dabei wurde an allen Rhizotronscheiben, an denen keine zu starken Störungen der Einsehbarkeit durch Feuchtebeschlag und/oder Sedimentablagerungen während Wassersättigung die Aufnahme behinderten, Digitalphotos aufgenommen. Auf diesen Aufnahmen wurde mittels AutoCAD die auf der auswertbaren Rhizotronscheibenfläche alle erkennbaren Wurzellängen bestimmt. Diese wurden auf die jeweilige Auswertungsfläche bezogen. So dass Wurzellängen und monatliche Wurzelwachstumsraten als Differenzen der monatlichen Wurzellängen in  $\text{cm}/\text{cm}^2$  zur Verfügung standen. Für die monatlichen Wurze Wachstumsraten wurden Mittelwerte und Standardfehler berechnet, wenn genügend auswertbare Rhizotronbeobachtungen verfügbar waren (Abbildung 76). Die oben erwähnten Behinderungen der Auswertbarkeit durch Wasserbeschlag und/oder Sedimentablagerungen (Abbildung 75) machten es notwendig, zwei Rhizotronanlagen umzusetzen um ungestörtere Beobachtungsbedingungen zu ermöglichen.

Das Wurzelwachstum war während der Beobachtungsperiode April bis August 2014 auf den Kontrollplots und den gemulchten und mit Erlen (*Alnus incana* und *Alnus glutinosa*) bepflanzt Parzellen deutlich intensiver (monatlich zwischen  $0,345 \text{ cm}/\text{cm}^2$  und  $0,263 \text{ cm}/\text{cm}^2$ ) als auf den unbehandelten, nicht bepflanzten Plots, die kein Wurzelwachstum zeigten.

Zwischen April und Mai wurde für die meisten Rhizotrone kein Wurzelwachstum beobachtet, lediglich auf nicht gemulchten, bepflanzten Parzellen war ein sehr schwacher Anstieg des Wurzelwachstums mit monatlich  $0,008 \text{ cm}/\text{cm}^2$  zu beobachten.



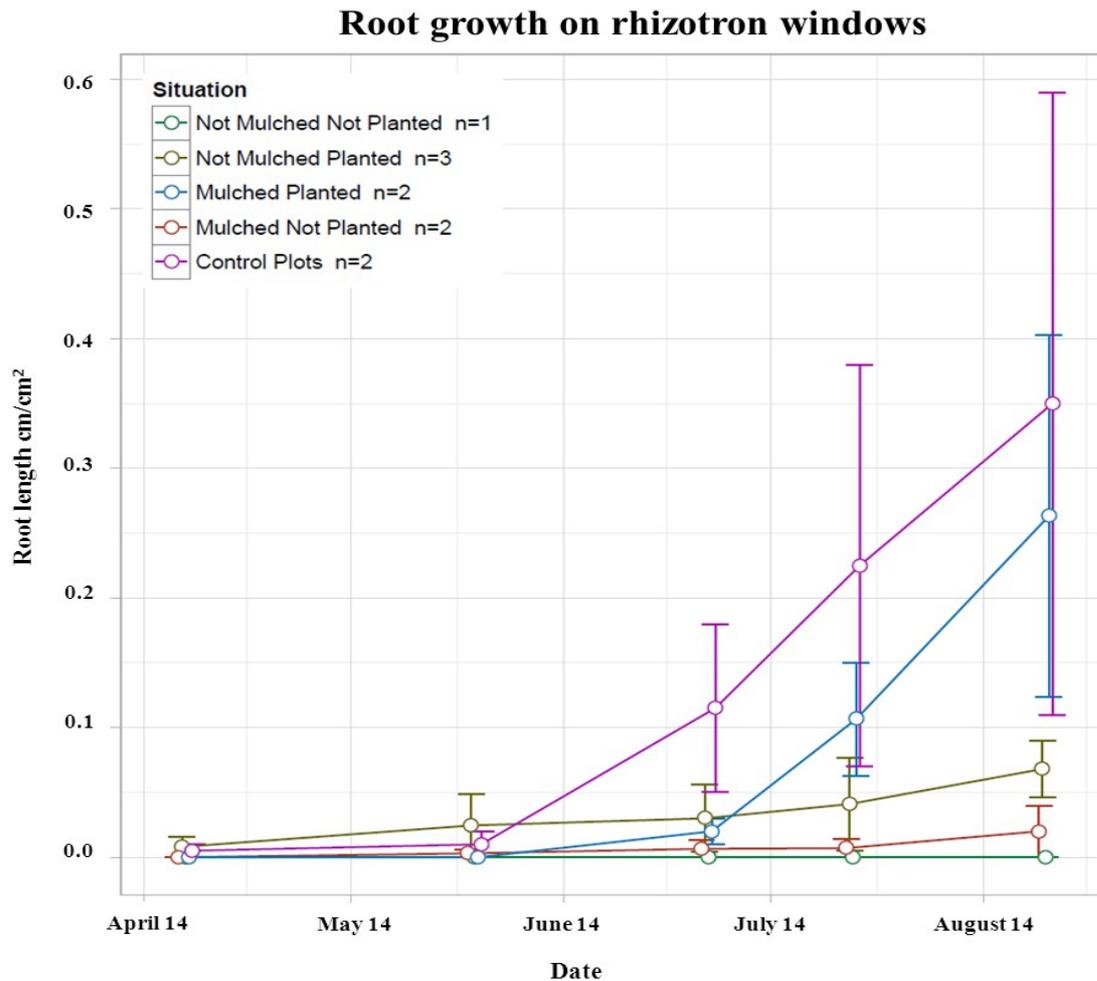
**Abbildung 75:** Beispiel für Sedimentablagerung auf einer Rhizotronscheibe, welche die auswertbare Beobachtungsfläche massiv einschränkt.

Dies traf auch für die Kontrollplots zu, die eine monatliche Wurzelzuwachsrate von  $0,005 \text{ cm}/\text{cm}^2$  zeigten.

Ab Juni 2014 war bei den meisten Varianten ein deutlicher Anstieg der Wurzelwachstumsrate zu beobachten, insbesondere für die Kontrollplots ( $0,115 \text{ cm}/\text{cm}^2$ ). Zwischen Juni und August wurde hauptsächlich auf den Kontrollplots und auf den gemulchten und mit Erlen bepflanzten Parzellen ein hoher Wurzelzuwachs beobachtet, der zwischen  $0,235$  und  $0,243 \text{ cm}/\text{cm}^2$  betrug. Im Gegensatz dazu wurde auch die dieser Phase auf den nicht mit Erlen bepflanzten Plots praktisch kein Wurzelzuwachs beobachtet (zwischen  $0,02 \text{ cm}/\text{cm}^2$  und  $0 \text{ cm}/\text{cm}^2$ ) und auf den nicht gemulch-

ten, mit Erlen bepflanzten Plots wurde in dieser Periode nur ein schwacher Wurzelzuwachs von 0,068 cm/cm<sup>2</sup> gefunden.

Der Vergleich der Wurzellängen bzw. Wurzelzuwachsrate zwischen den Behandlungsvarianten war aufgrund des hohen Standardfehler und der technisch bedingt niedrigen Zahl an Beobachtungen in keinem Fall signifikant.



**Abbildung 76:** Zeitliche Entwicklung der flächenbezogenen Wurzellängen (cm/cm<sup>2</sup>) in den verschiedenen Behandlungsvarianten für den Zeitraum April – August 2014. Datengrundlage sind monatliche Wurzellängen Messungen in den auswertbaren Rhizotronscheiben (n= Zahl auswertbarer Rhizotrone)

### 3.3. Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektes wurde folgende Bachelor- und Masterarbeiten unter Betreuung der Projektpartner abgeschlossen:

FISCHER, K. (2012): Artverteilung und Häufigkeit von Regenwurmartens innerhalb und außerhalb von Fahrspuren, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 40 S.

HERZ, T. (2012): Zusammenhang zwischen Bodenvegetation und -belüftung auf einem verformten Waldboden bei Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 40 S.

HUGO, F. (2012): Zusammenhang zwischen Bodenvegetation und -belüftung auf einem verformten Waldboden bei Merklingen (Schwäbische Alb), Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 43 S.

JANSONE, L. (2014): Composition of vegetation on skid trails with different soil treatments and stand regeneration strategies in the experimental forest area in Merklingen, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 83 S.

KESSLER, A. (2013): Vergleichende bodenkundliche Charakterisierung von zwei Versuchsflächen im Raum Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 61 S.

LEIBFRIED, M. (2014): Flatterbinse (*Juncus effusus*) in verdichteten Fahrspuren: Einfluss des luftleitenden Wurzelgewebes auf Porenbildung und Bodenbelüftung, Bachelorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 60 S.

MEMMERT, J. (2014): Regenwürmer in Fahrspuren – Einflussgrößen auf Abundanz und Diversität, Bachelorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 51 S.

SCHMIDT, K. (2014): Regeneration der Bodenstruktur von Fahrspuren durch den Einsatz von verdichtungstoleranten Pflanzenarten, Bachelorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 49 S.

SHIN, S. (2013): Ecological effects of *Juncus effusus* on compacted skid trail, Masterarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 68 S.

Die Ergebnisse des Projektes wurden u.a. bei fachlichen Tagungen sowie in Fachzeitschriften präsentiert bzw. veröffentlicht. Einige Manuskripte befinden sich derzeit noch in Vorbereitung oder wurden eingereicht und liegen nun zur Begutachtung vor:

FLORES FERNANDEZ, J.L., v.WILPERT, K., SCHÄFFER, J., HARTMANN, P. (2015A): Growth and establishment of woody subsidiary plants for regeneration of compacted soils. 24pp. Manuskript bei Allgem. Forst u. Jagt Z. (eingereicht).

FLORES FERNANDEZ, J.L., v.WILPERT, K., SCHÄFFER, J., HARTMANN, P., SCHENGEL, A., BURGET, B. (2015b): In situ measurements by Rhizotron windows in compacted soils. A new design. 18pp. Manuskript für Europ. J. Forest Research (in Vorbereitung).

FRITZ, J., KÜHNE, A., SCHACK-KIRCHNER, H., LANG, F. (2013): Sonderstandort Fahrspur - Perspektiven für eine Regeneration der Bodenstruktur. *In*: Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 07.-12.09.2013, Rostock (Verfügbar über DBG-Prints-Archiv: <http://eprints.dbges.de/>)

## 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Betreuung der Versuchsflächen am Standort 'Merklingen' beider Projektpartner wird für weitere Jahre gewährleistet, so dass die langfristigen Effekte der eingeleiteten Massnahmen, Aussaaten und Pflanzungen aufgezeigt werden können. Auch für den 'Standort' Schönberg wird sich um einen Erhalt der Flächen für weitere Jahre bemüht werden. Dies ist deshalb besonders notwendig, da bei den meisten Versuchsansätzen zwar Regenerationsprozesse zu beobachten sind, deren Ausprägung und Entwicklung jedoch meist noch eher in einem initialen Stand sind, so dass eine abschließende Bewertung des Regenerationspotentials der einzelnen Bodenbearbeitungsmaßnahmen und Hilfspflanzenanbauten noch nicht getroffen werden kann. Damit ist es zum jetzigen Stand der Projektentwicklung auch noch nicht möglich, die Projektergebnisse in endgültigen Strategievorschlägen zusammenzufassen und der Praxis zu kommunizieren. Dieses wäre insofern problematisch, als die jetzt ableitbaren Praxisimplikationen einen außerordentlich vorläufigen Charakter hätten und mit hoher Wahrscheinlichkeit in einigen Jahren in vielen Aspekten angepasst und revidiert werden müssten.



**Abbildung 77:** Probe für Versuche mit *Juncus effusus* (aus LEIBFRIED, 2014)



**Abbildung 78:** Etablierungserfolg von Grauerle im Frühjahr 2014

Die besondere Leistung des jetzt abgeschlossenen Projekts ist es, die dargestellten multifaktoriellen Regenerationsversflächen geschaffen und die initialen Prozessabläufe der beschleunigten Regeneration der Bodenstruktur, aber auch ungewollte Nebenwirkungen wie z.B. Strukturverluste auf den gemulchten Flächen durch Vibration des Mulchgeräts, identifiziert zu haben.

Die wichtigsten Ergebnisse der Projektarbeiten aus beiden beteiligten Arbeitsgruppen sollen nach Projektende, in 2015 in mehreren praxisorientierten Artikeln in einem Schwerpunktheft in „AFZ - der Wald“ veröffentlicht und der Forstpraxis zugänglich gemacht werden. Diese Beiträge werden außerdem in dem online Portal „waldwissen.net“ eingestellt.

#### **4.1. Bodenregeneration durch krautige Pflanzen (ALU)**

Neben den hier dargestellten durchgeführten Arbeiten und Ergebnissen haben die vielen Bachelor- und Masterarbeiten, die im Rahmen dieses Projektes betreut wurden, vertiefte Einblicke in Teilaspekte der behandelten Thematik ermöglicht. Besonders *Juncus effusus* L. als konkurrenzstarke Pionierpflanze auf verformten und verdichteten Waldbodenbereichen stand hierbei mehrmals im Fokus. Erste Ergebnisse aus der Bachelorarbeit von Marina Leibfried (2014). zeigen, dass *Juncus effusus* einen belüftungsfördernden Effekt auf den Boden hat. Hier sollten weiter Untersuchungen anknüpfen.

##### **4.1.1 Diskussion der Durchführung und Ergebnisse des Projektvorhabens**

Aufgrund des Arbeitsbeginns von Frau Dr. Anke Kühne im April 2012 und der bis dahin auch noch nicht erfolgten Auswahl der Standorte konnte die Anlage der Versuchsflächen und die dortigen Untersuchungen erst zum Ende des ersten Projektjahres erfolgen. Eine ganze Vegetationsperiode ist dadurch für die Versuche ungenutzt gewesen. Doch wie auch in den folgenden zwei Projektjahren wurden immer wieder studentische Abschlussarbeiten innerhalb des Projektvorhabens angeleitet, betreut und abgeschlossen. Die Ergebnisse aus den anderen beiden Jahren zeigen jedoch auch, dass eine weitere Vegetationsperiode nicht unbedingt eindeutigeren Ergebnisse erbracht hätte.

---

Die **Versuche mit den insitu-Zylindern** ergänzten das Projekt nachträglich sinnvoll, auch wenn die daraus im Projektzeitraum abgeleiteten Erkenntnisse eher andere als erwartet waren, denn ein richtiger Bewuchs mit den Versuchspflanzen stellte sich nicht zuverlässig ein. Grund dafür ist offenbar, dass der verdichtete Boden in den „Mikrokosmos-Zylindern“ über keinerlei Relief als Ansatzpunkte für die Keimung verfügt. Auf natürlichen Böden, die durch eine Befahrung nicht nur verdichtet sondern eben auch verformt wurden, bleiben oberflächliche Strukturen zurück, die unter natürlichen abiotischen Prozessen (Quellen und Schrumpfen) eine baldige Rissbildung und damit für Samen bzw. die daraus sich entwickelten Keime einen ersten Eindringpunkt in die Bodenoberfläche darstellen. Die absolut glatten Oberflächen der Versuchszylinder bieten diese Möglichkeit nicht. Die wenigen Pflanzen, die auf den ausgebrachten Zylindern gewachsen sind zeigen zwar, dass eine Etablierung doch möglich ist, allerdings müssen diese Mineralbodenoberflächen im Freiland ebenfalls einer abiotisch induzierten Rissbildung ausgesetzt gewesen sein. Für weitere Versuche mit den Versuchszylindern, an denen aufgrund ihrer Größe unkompliziert mehrfach ohne Störung des enthaltenen Bodens die Gasdurchlässigkeit ( $D_s/D_0$ ) bzw. Gasinfiltrationsfähigkeit gemessen werden kann, werden später weniger verdichtete Proben mit Saatgut bestückt werden. Erste Ergebnisse der bisherigen Messungen an den bestehenden Versuchszylindern werden im Rahmen der laufenden Dissertation von Herrn Johannes Haas (geb. Fritz) veröffentlicht werden.

Eine weitere Problematik, die während der Durchführung aufgetreten ist und so vorher nicht abschätzbar war, besteht aufgrund des gelieferten und **verunreinigten Saatguts**. Sowohl *Carex remota* als auch *Juncus effusus* sind mit Samen anderer Arten verunreinigt gewesen (*Poa annua* bzw. *Juncus inflexus*). Es konnte allerdings beobachtet werden, dass die im Saatgut enthaltenen Samen von *Poa annua* möglicherweise einen positiven Effekt auf die Etablierung von den *Carex remota*-Samen haben. Das *P. annua* sehr schnell keimt (wie die Keimungsversuche gezeigt haben) und schnell etabliert ist, benötigt *Carex remota* eine viel längere Zeit bis zur Keimung. Unter dem Konkurrenzdruck anderer Arten wäre *Carex remota* sich ggf. hierdurch nicht richtig durchsetzen können. Eine schnelle „Vorbesiedelung durch *Poa annua* könnte jedoch als Schutz für diese langsame Etablierung funktionieren. Die Ergebnisse am Standort 'Schönberg' (Tabelle 7), wo auch der Bewuchs von *Poa annua* gut zu beobachten war, zeigt jedenfalls dass *Carex remota* erst in der zweiten Vegetationsperiode etabliert war. Die Ergebnisse der Aussaat in der Altfahrspur vom Standort 'Merklingen' (Tabelle 4) zeigt dagegen auch, dass *Carex remota* nicht durchsetzungsfähig gegenüber einem dichten Bewuchs anderer Arten ist.

Wie bei jedem Vorhaben, welches als **Forschungsschwerpunkt mit Praxisfahrspuren** arbeitet, ist man mit einer hoch komplexen Heterogenität konfrontiert. Das Holz von bei der Befahrung aufgebrachte Reisigmatten wird teilweise bis zu 30 cm tief in den Oberboden eingearbeitet wird. Dies erschwert gleichzeitig auch die Entnahme von Stechzylindern oder Bodenbohrkernen wie ein hoher Steingehalt. Und wenn die Fahrspur über ein ausgeprägt eingetieftes Relief mit hoch aufgeworfenen Seiten und Mittelwulstbereichen verfügt, wird auch die Stratifizierung zu einer Herausforderung.

All durch die Befahrung entstandenen, kleinräumliche Veränderungen entlang der Fahrspur machen, zusammen mit den Umgebungsparametern wie Lichtverhältnisse oder der Bodenfeuchte, aus diesen Bodenbereichen damit auch eigene und unglaublich heterogene Lebensräume. Die Fahrspur mit den größten Anwuchserfolgen (Standort 'Schönberg') zeigte sogar die größten Unterschiede sowohl in den erhobenen Bodenparametern wie Luftleitfähigkeit, Gasdiffusionskoeffizient, Porenvolumen und Wassergehalt (siehe hierzu SCHMIDT, 2014) als auch in ihrer Diversität (Abbildung 43) entlang ihrer Ausdehnung. Auch in der Entwicklung der Vegetation über mehrere Vegetationsperioden zeigen sich die Unterschiede der Fahrspuren. Während die Altfahrspuren an den Standorten 'Mooswald', 'Ettenheim' und 'Merklingen' nur noch geringe Veränderungen in der Diversität zeigen, ist deutlich, dass sich am Standort 'Schönberg' die Versuchsfläche am Beginn der Sukzession befindet. Es liegt in der ersten Vegetationsperiode nach der Befahrung eine sehrvielfältige Vegetation durch die günstige Lage in Waldrandnähe vor, was sowohl die Ausbildung einer diversen Samenbank begünstigt als auch die Lichtverhältnisse verbessert. Viele unterschiedliche Arten keimen aus und treten in Konkurrenz zueinander bei der Etablierung, was um die Hälfte reduzierte Artenzahl in der zweiten Vegetationsperiode zeigt.

#### 4.1.2 Abschließendes Fazit

Folgende Empfehlung im Bezug auf die Aussaat von krautigen Pflanzen auf verformten Waldböden (wie z.B. Fahrspuren) kann nun abschließend gegeben werden.

Die Versuche auf den vier untersuchten Standrten haben gezeigt, dass eine Ausbringung von Saatgut auf Flächen mit bereits bestehender Vegetation (auch bei vorheriger Entfernung der bestehenden oberirdischen Biomasse) keinen sichtbaren Effekt bringt. Der Grund für einen nicht flächig bewachsenen Altfahrspurbereich liegt weniger an einem Mangel an Samen von verdichtungstoleranten Pflanzen in der örtlichen Bodensamenbank, als vielmehr an den nicht ausreichenden Lichtverhältnissen. Hieraus folgt:

Die Aufbringung von Saatgut auf eine verdichtete Waldbodenfläche ist als sinnvoll einzuschätzen, wenn

1. die Aussaat zeitnah nach der Störung bzw. dem Verdichtungsereignis (z.B. Befahrung) stattfindet und
2. die örtlichen Lichtverhältnisse für die Pflanzen ausreichend sind
3. die ausgebrachten Samen stratifiziert wurden oder vor dem Winter ausgebracht wurden (Brechen der Keimruhe gewährleisten)

Es besteht immer die Möglichkeit gezielt einzelne Arten passend zu den lokalen Gegebenheiten (Boden, Lichtverhältnisse) auszubringen. Ansonsten empfehlen wir:

Eine universelle Saatgutmischung zur Unterstützung der Bodenregeneration sollte

1. Samen konkurrenzstarker, schnellwachsende Arten enthalten und
2. Samen tiefwurzender und/oder mit luftleitendem Gewebe aufgestatteter Arten enthalten.

Desweiteren kann durch die Ergebnisse festgestellt werden:

*Impatiens noli-tangere*, welches als Blütenpflanze die Mischung bereichern sollte, eignet sich nicht für die Verwendung in einer Saatgutmischung, weil

1. die Samen noch nicht von einheimischen Betrieben gezüchtet werden und
2. die Samen zu schlecht keimen (= konkurrenzschwache Art).

## **4.2. Bodenbearbeitung und Einsatz holzige Pflanzen (FVA)**

### **4.2.1 Durchführung der geplanten Projektarbeiten**

Trotz des geringen Umfangs an Projektmitteln, die für unsere Arbeitsgruppe zur Verfügung standen, ist es durch Zufinanzierung aus festen Haushaltsmitteln gelungen, die außerordentlich komplexe Versuchsanlage am Standort Merklingen erfolgreich zu installieren und die geplanten Außendiensteinsätze so durchzuführen, dass die erwarteten und im Projektantrag dargestellten Daten in den wesentlichen Teilen erhoben werden konnten. Problematisch war, dass im ersten Projektjahr 2012 das Frühjahr so trocken war, dass die Pflanzung der Sträucher und Bäume davon stark belastet war und unerwartet hohe Pflanzenausfälle auftraten, so dass im zweiten Projektjahr umfängliche Nachpflanzungen notwendig wurden. Außerdem konnte die unerwartet technisch komplexe und aufwendige Entwicklung und Installation von Rhizotronscheiben erst im zweiten und im ersten Quartal des dritten Projektjahrs abgeschlossen werden.

Im Zuge der Installationskampagne der Rhizotronmesskammer wurden auf den Versuchspartzellen 100 Murachbohrkerne aus dem Oberboden entnommen. Diese werden an der FVA photographisch dokumentiert und im Hinblick auf die Gefüge- und Wurzelentwicklung charakterisiert. Außerdem wurde an diesen 100 Probestellen die Bodenvegetation als Indikator der Aktivierung bodenbiologischer Prozesse aufgenommen. Die umfänglichen Ergebnisse der Untersuchungskampagne 2014 wurden von Frau Lelde Jansone in ihrer Masterarbeit integrierend ausgewertet und interpretiert.

Über eine zweite Stechzylinderbeprobung wurde die in den zurückliegenden zwei Jahren erfolgte Strukturentwicklung analog zur Erstbeprobung unmittelbar vor bzw. nach der Befahrung aufgenommen. Zielgröße war hierbei insbesondere die Diffusivität, die die Transportkapazität des Bodens für die Bodenluft charakterisiert.

Im September 2014 wurde innerhalb der Projektlaufzeit eine abschließende Aufnahme der Überlebensrate der gepflanzten Gehölzpflanzen durchgeführt. Da die Versuchsfläche Merklingen als längerfristige Beobachtungsfläche gesichert werden soll, wird die Vitalitätsentwicklung aber auch über die Projektlaufzeit hinaus weiter beobachtet. Die Installationen (Gaslysimeter und Rhizotronkammern) verbleiben auf der Fläche und werden ebenfalls in extensiver Form weiter beprobt.

#### 4.2.2 Zusammenfassende Bewertung der Projektergebnisse

Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit und der durch das extrem trockene Frühjahr 2012 und technische Schwierigkeiten am Anfang der Versuchsanstellung repräsentieren die erarbeiteten Ergebnisse ein initiales Stadium der mittels aktiven Lenkungsmaßnahmen möglichen Regeneration von Bodenstruktur und Bodenbelüftung. Dies liegt neben der genannten zeitlichen Problematik des Projektablaufs vor allem in der Tatsache begründet, dass auch durch aktive Maßnahmen beschleunigte Regenerationsprozesse mehrere Jahre benötigen um eine stabile ökologische Umstimmung der Bodenbelüftung und Regeneration der Wurzelraumfunktion des Bodens zu erreichen.

Trotzdem sind schon jetzt positive und negative Prozesse, die durch die durchgeführten Bodenbehandlungsvarianten und die Pflanzung von holzigen Hilfspflanzen angestoßen wurden, zu beobachten. Bei der Beurteilung dieser Prozesse ist jedoch immer die Tatsache zu beachten, dass die jetzt am Projektende erkennbaren Prozesse und Zustände ein Übergangsstadium repräsentieren, das sich in wenigen Jahren deutlich weiterentwickeln kann und ggf. zum Jetztzeitpunkt negativ zu bewertende Faktorenkombinationen in günstige Konstellationen „umschlagen“

Zum Projektende haben die einzelnen Behandlungsvarianten folgende Prozessabläufe erkennbar angestoßen und die zukünftige Entwicklung lässt sich orientierend abschätzen:

##### Mulchen

Das Mulchen hat eine günstige Pflanzsituation im Oberboden geschaffen, Schlagabraum und Wurzelstöcke zerspannt und so Hindernisse für die Pflanzung beseitigt und das holzige Mulchmaterial in die obersten 15 cm des Mineralbodens eingearbeitet (s. Abb. 64 und Abb. 79). Dies kann die nach dem Mulchen überlockerte Bodenstruktur stabilisieren. Die Ergebnisse der Diffusionskoeffizienten (Abb. 62 und 63) haben jedoch gezeigt, dass bereits zwei Jahre nach dem Mulchen durch Sackung auch in der Mulchschicht selbst die Diffusionskoeffizienten niedriger als auf der unbehandelten Fahrspur sind. Unter der Mulchschicht in 15-20 cm ist während dem Mulchvorgang zumindest teilweise ein „Frässohle“ und eine Porendiskontinuität entstanden, welche die Belüftung außerdem behindern. Außerdem wurde bei den Gasdiffusionsmessungen gefunden, dass im tieferen Mineralboden >30cm die Diffusionskoeffizienten gegenüber den anderen Varianten (auch gegenüber der Fahrspur ohne Bodenbehandlung) stark abgesenkt sind. Wir erklären uns das durch die starke Beanspruchung der Bodenstruktur durch Vibration beim Mulchen und Zerspannen von Wurzelstöcken. Dies ist ein ernstzunehmendes Problem, das zum Ausschluss des Mulchens aus einer Regenerationsstrategie führen muss, wenn nicht die weitere biologische Entwicklung der Flächen in den kommenden Jahren diesen negativen Effekt kompensiert.

Die Bodenstrukturuntersuchungen auf den gemulchten und insbesondere auf den gemulchten und gekalkten Flächen zeigen deutliche Ansätze einer beginnenden biologischen Aktivierung in der Mulchschicht. Derzeit besteht durch einseitig hohe C-Gehalte noch eine Stickstoffsperre. Wenn diese überwunden ist, kann erwartet werden, dass die Aktivierung fortschreitet. Die Ergebnisse zu Durchwurzelung auf den gemulchten Flächen sind noch widersprüchlich. Die niedrigeren Feinwurzeldichten in den Boden Bohrkernen (Abb. 72) sind wahrscheinlich durch die derzeit scharfe sommerliche Austrocknung der Mulchschicht zu erklären. Wir erwarten, dass sich dieses Problem mit zunehmender Zersetzung der Holzbestandteile in der Mulchschicht lösen wird. Die Wurzelwachstumsraten, die im letzten Projektjahr in Rhizotonen auf den gemulchten und mit Erlen bepflanzt gemessenen wurden zeigen jedoch jetzt schon Wurzelwachstumsraten im Bereich der unbefahrenen Kontrollfläche, die weit über allen anderen befahrenen Varianten liegen (Abb. 76). Dieser Befund deutet an, dass sich die im jetzigen Übergangsstadium eher ungünstige Wirkung der Mulchung in Zukunft günstig weiterentwickeln kann.



**Abbildung 79:** Ergebnis der Mulchung



**Abbildung 80:** Entstehung einer Frässohle beim Mulchen

### Kalkung

Die Kalkung ohne mechanische Bodenbearbeitung hat bis zum Projektende keine eindeutig positiven Regenerationsansätze erkennen lassen. In Kombination mit der Mulchung sind erste Anzeichen einer Aktivierung bodenbiologischer Aktivität und der Durchwurzelungsdynamik zu erkennen.

### Pflanzung von holzigen Hilfspflanzen

Sowohl der Etablierungserfolg als auch das Wachstum beider gepflanzter Erlenarten (*Alnus incana* und *Alnus glutinosa*) sind sehr gut. Im letzten Projektjahr sind keine nennenswerten Ausfälle mehr aufgetreten. Die beiden anderen Arten (*Salix caerea* und *Rhamnus frangula*) sind durch massive initiale und während der Projektlaufzeit fortschreitende Ausfälle gekennzeichnet, obwohl bei diesen beiden Arten im zweiten Projektjahr in erheblichem Umfang nachgepflanzt wurde. Gründe der ausfälle waren die Trockenheit im ersten Projektjahr, Befall des Faulbaums mit einem Rostpilz und Fegeschäden bei Salweide. Diese könnten durch entsprechende Forstschutzmaßnahmen gemindert werden, was aber den Aufwand der Regenerationsmaßnahmen erhöht.

Da die meisten Pflanzungen noch nicht geschlossen sind, ergeben auch die Wurzel-aufnahmen nur auf den am besten geschlossenen und wüchsigsten Flächen klare Ergebnisse. Die Beobachtung der Wurzel-Wachstumsdynamik im letzten Projektjahr zeigt auf den Erlenflächen eine nennenswerte Erhöhung des Wurzelwachstum gegenüber den nicht bepflanzten Plots auf denen das Wurzelwachstum nur von der standortstypischen Spontanvegetation stammt.

### Zusammenfassendes Fazit - Ausblick

Eine abschließende Bewertung der unterschiedlichen Bodenbehandlungs-varianten und Bepflanzungsalternativen zur Regeneration von Fahrtrassen ist zum Zeitpunkt des Projektendes noch nicht abschließen möglich. Die Regenerations-prozesse befinden sich auf der Versuchsfläche noch in einem frühen Initialstadium. Aus diesem Grund muss die Versuchsfläche mittel- und langfristig weiterbeobachtet werden. Sowohl die Maßnahmenkombination und Variantenvielfalt des Versuchs begründen seinen besonderen Wert. Schon in den ersten drei Projektjahren sind auf der Basis dieser Versuchsanlage in der Arbeitsgruppe der FVA zwei Masterarbeiten (SHIN, 2013 und JANSONE, 2015) und zwei Manuskripte einer Dissertation (FLORES FERNANDEZ et al. 2015 a, b) entstanden. Auf dieser Basis wird die Bearbeitung der Versuchsanlage weiter betrieben. Die bis jetzt vorliegenden Ergebnisse bilden überwiegend Übergangszustände der Regeneration von Bodenstruktur und Wurzelraumfunktion befahrener Waldböden ab. Dies ist deshalb besonders wichtig, wie durch die zeitnahe Durchführung der Untersuchung auch vorübergehende negative Entwicklungen wie z.B. die Phase des Strukturverlusts durch Sackung auf den gemulchten Flächen oder die tiefer greifende Verformung durch Vibration beim Mulchen erkannt und dargestellt werden. Dieses wäre nicht möglich, wenn nur das mittel- oder langfristige Endergebnis der Regenerationsmaßnahmen betrachtet würde.

Für eine Erstellung umsetzbarer Strategieansätze ist es aufgrund der o.g. Aspekte zu früh. Eine abschließende Bewertung der untersuchten Maßnahmenkombinationen wäre die Voraussetzung für eine solche Strategiebildung. Diese wird nach unseren jetzigen Erfahrungen aus der abgelaufenen Projektarbeit jedoch frühestens in fünf bis vielleicht erst zehn Jahren befriedigend möglich sein.

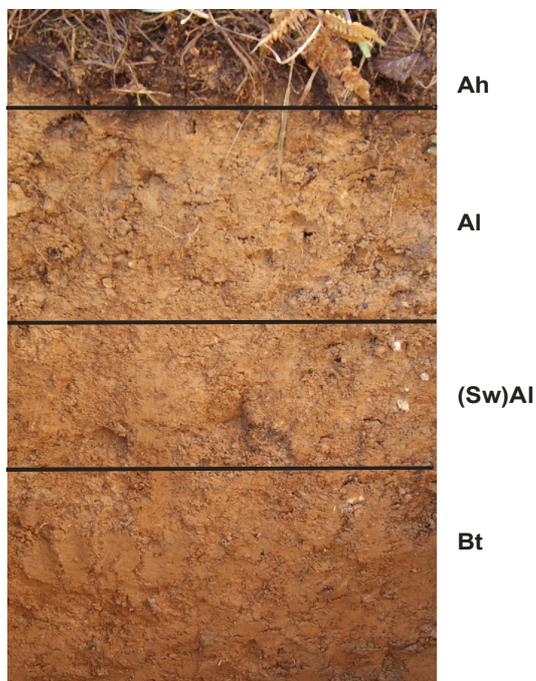
---

## 5. Literatur

- ELLENBERG, H., LEUSCHNER, C. (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Ulmer, Stuttgart, 1357 S.
- ERVIN, G. N., WETZEL, R. G. (2001): Seed fall and field germination of needlerush *Juncus effusus* L., *Aquatic Botany*, 71, 233–237
- FLORES FERNANDEZ, J.L., v.WILPERT, K., SCHÄFFER, J., HARTMANN, P. (2015A): Growth and establishment of woody subsidiary plants for regeneration of compacted soils. 24pp. Manuskript bei Allgem. Forst u. Jagt Z. (eingereicht).
- FLORES FERNANDEZ, J.L., v.WILPERT, K., SCHÄFFER, J., HARTMANN, P., SCHENGEL, A., BURGET, B. (2015b): In situ measurements by Rhizotron windows in compacted soils. A new design. 18pp. Manuskript für Europ. J. Forest Research (in Vorbereitung).
- FROELICH, H.A., MILES, D.W.R., ROBINS, R.W. (1985): Soil bulk density recovery on compacted skid trails in Central Idaho. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49,1015-1017
- GAERTIG, T. (2007): Identifikation alter Befahrungslinien anhand der Bodenvegetation. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 110/2 769-770
- GAERTIG, T., PULS, C., SCHACK-KIRCHNER H., HILDEBRAND E:E. (2000): Die Beurteilung der Bodenstruktur in Waldböden: Feldebodenkundliche Merkmale und ihre Relevanz für die aktuelle Bodenbelüftung auf Lösslehm-Standorten. *Allg. Forst u. J.-Zeitg.*; 171 (12) : 227-234
- GODEFROID, S., KOEDAM, N. (2004): Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. *Biological Conservation* 119, 207-217
- HILDEBRAND, E.E. (1983): Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. *Forstwiss. Cbl.* 102/2, 111-125
- JANSONE, L. (2014): Composition of vegetation on skid trails with different soil treatments and stand regeneration strategies in the experimental forest area in Merklingen, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 83 S.

- KREMER, J. (2008): Regenerationsvermögen befahrungsbedingt strukturveränderter Böden. LWF aktuell 67, 13-15
- LEIBFRIED, M. (2014): Flatterbinse (*Juncus effusus*) in verdichteten Fahrspuren: Einfluss des luftleitenden Wurzelgewebes auf Porenbildung und Bodenbelüftung, Bachelorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 60 S.
- LÜSCHER, P., SCIACCA, S., UND HALTER, M. (2008): Regeneration von Wurzelraumfunktionen nach mechanischer Belastung. LWF aktuell 67, 11-12
- MEMMERT, J. (2014): Regenwürmer in Fahrspuren – Einflussgrößen auf Abundanz und Diversität, Bachelorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 51 S.
- MLR (Ministerium für Ländlichen Raum Baden-Württemberg) (2003): Richtlinie der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zur Feinerschließung von Waldbeständen
- SCHMIDT, K. (2014): Regeneration der Bodenstruktur von Fahrspuren durch den Einsatz von verdichtungstoleranten Pflanzenarten, Bachelorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 49 S.
- Schütz, W., Rave, G. (1999): The effect of cold stratification and light on the seed germination of temperate sedges (*Carex*) from various habitats and implications for regenerative strategies, *Plant Ecology* 144: 215–230
- SHIN, S. (2013): Ecological effects of *Juncus effusus* on compacted skid trail, Masterarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (i.Br.), 68 S.
- V. WILPERT, K. SCHÄFFER, J. (2006): Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research*. 125/2 129-138.

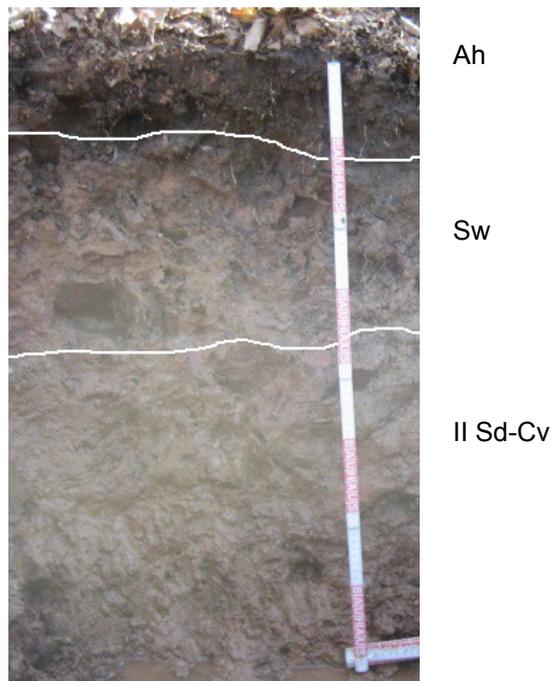
## 6. Anhang



**Abbildung A1:** Bodenprofi Versuchsfläche 'Merklingen'

**Tabelle A1:** Bodenchemische und -physikalische Eigenschaften 'Merklingen', TRD: Trockenraumdichte

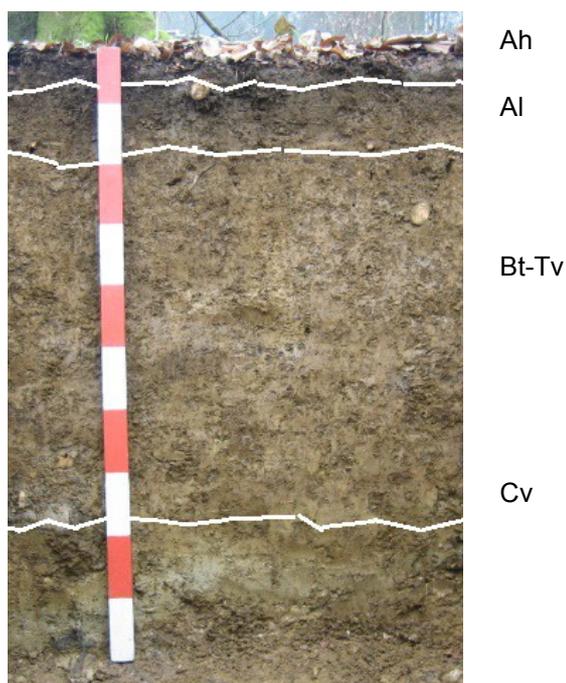
Tiefe [cm]	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	Basen [%]	C-Gehalt [mg g <sup>-1</sup> ]	Grobboden [Vol %]	TRD- Feinboden [g cm <sup>-3</sup> ]
0 – 5	4,01	3,25	20,7	65,8	6,3	0,66
5 – 10	4,12	3,49	9,7	32,4	13,3	0,92
10 – 13	4,41	3,78	6,6	10,8	13,9	1,14
30 – 60	4,57	3,63	22,5	3,7	13,8	1,4
60 – 90	4,88	3,51	63,5	2,9	2,4	1,47



**Abbildung A2:** Bodenprofil in einem ungestörten Bereich am Standort 'Ettenheim'

**Tabelle A2:** bodenchemische und -physikalische Eigenschaften ('Ettenheim'), TRD: Trockenraumdichte, KAK: Kationenaustauschkapazität

Tiefe [cm]	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	KAK [μmolc/g]	C (org.) [%]	Bodenart	TRD [g/cm <sup>3</sup> ]
1 – 5	4,48	3,8	46,61	2,98	schluffig-lehmiger Sand (Slu)	1,05
5 – 10	4,60	4	39,26	1,95	schluffig-lehmiger Sand (Slu)	1,20
10 – 15	4,49	3,94	33,92	1,24	mittel sandiger Lehm (Ls3)	1,46
15 – 20	4,36	3,94	34,67	0,92	schwach sandiger Lehm (Ls2)	1,53
20 – 25	4,57	3,95	26,37	0,28	schluffig-lehmiger Sand (Slu)	-
25 – 30	4,61	3,95	30,82	0,18	stark lehmiger Sand (Sl4)	-
40 – 50	4,90	3,97	36,97	0,14	mittel sandiger Lehm (Ls3)	-
60 – 80	4,93	3,93	46,87	0,14	mittel sandiger Lehm (Ls3)	-



**Abbildung A3:** Bodenprofil in einem ungestörten Bereich am Standort 'Schönberg'

**Tabelle A3:** bodenchemische und -physikalische Eigenschaften ('Schönberg')

Tiefe [cm]	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	KAK [μmolc/g]	C (org.) [%]	Bodenart	Tiefe [cm] (nur für TRD)	TRD [g/cm <sup>3</sup> ]
1 – 6	5,68	5,21	169,25	5,03	mittel schluffiger Ton (Tu3)	1 – 6	0,94
6 – 18	5,50	4,50	125,13	1,68	mittel schluffiger Ton (Tu3)	10 – 15	1,24
18 – 30	5,71	4,52	163,97	0,87	schwach schluffiger Ton (Tu2)	20 – 25	1,33
30 – 50	5,91	4,78	198,64	0,58	schwach schluffiger Ton (Tu2)	30 – 35	1,53
50 – 60	6,40	5,49	223,00	0,60	mittel schluffiger Ton (Tu3)	50 – 55	1,47
60 – 75	7,34	6,84	287,40	0,59	schwach schluffiger Ton (Tu2)	60 – 65	1,36
75 – 80	8,02	7,39	425,92	0,48	mittel schluffiger Ton (Tu3)	75 – 80	1

