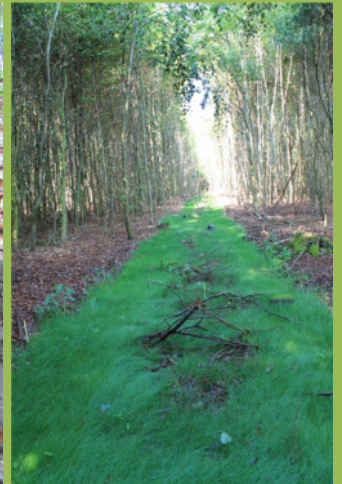




Maßnahmen zur Sicherung und zur Regeneration von Bodenfunktionen in Rückegassen



aus dem Projekt: RÜWOLA „Rückegassen als Feinerschließungssysteme im Wald – Optimierung durch natürliche Regeneration und technische Maßnahmen unter Berücksichtigung der Belange von Naturschutz und Landschaftsplanung“

Interdisziplinäres Verbundprojekt der Hochschule Osnabrück und der HAWK Hildesheim/ Holzminden/ Göttingen

Laufzeit: 01.01.2012 – 31.05.2017

Kontakt:
hc.fruend@hs-osnabrueck.de
gaertig@hawk-hhg.de

Mai 2017

Mit freundlicher Unterstützung der
Niedersächsischen Landesforsten

Impressum

Der Maßnahmenkatalog ist entstanden im Rahmen des Interdisziplinären Verbundprojekts der Hochschule Osnabrück und der HAWK Hildesheim/ Holzminden/ Göttingen.

Projekttitel

Rückegassen als Feinerschließungssysteme im Wald – Optimierung durch natürliche Regeneration und technische Maßnahmen unter Berücksichtigung der Belange von Naturschutz und Landschaftsplanung

Projektlaufzeit

Januar 2012 bis Mai 2017

Herausgeber

Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ i.R. (Sprecher), Hochschule Osnabrück,
Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur, Am Krümpel 31, 49090 Osnabrück,
hc.fruend@hs-osnabrueck.de

Prof. Dr. Thorsten Gaertig (stellvertretender Sprecher), HAWK - Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Ressourcenmanagement, Büsgenweg 1a, 37077 Göttingen,
Tel. 0551 5032-171, Telefax 0551 5032-299, gaertig@hawk-hhg.de

Text und Layout

Dipl.-Ing. (FH) Audrey Averdiek M.Sc. Bodennutzung und Bodenschutz
Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ

Mit freundlicher Unterstützung der
Niedersächsischen Landesforsten
Husarenstraße 75
38102 Braunschweig
www.landesforsten.de



Für Anmerkungen und kritische Kommentare danken wir:

Dr. Herbert Borchert, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
Rainer Epple, Landratsamt Waldshut, Forstlicher Hauptstützpunkt Bonndorf
Axel Pampe, Niedersächsisches Forstamt Reinhaus
Peter Winkelmann, Dr. Volker Stüber, Thomas Jensen, Niedersächsische Landesforsten und
Niedersächsisches Forstplanungsamt
Dr. Ulrike Talkner, Dr. Michael Mindrup, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Diese Schrift ist zum download verfügbar ([www. hs-osnabrueck.de/Ruewola/](http://www.hs-osnabrueck.de/Ruewola/))

Inhalt

1	Übersicht	1
2	Einleitung.....	2
3	Maßnahmen zur Sicherung und zur Regeneration von Bodenfunktionen.....	4
3.1	Begriffsklärung: Vorsorge-, Sicherungs- und Regenerationsmaßnahmen	4
3.2	Einleitende Erklärungen zu den Maßnahmen	5
3.3	Bodenbearbeitende Maßnahmen	6
3.3.1	Entwässern	6
3.3.2	Punktuelle Befestigung von Problemstellen.....	7
3.3.3	Egalisieren und Verdichten der Rückegasse	7
3.3.4	Mulchen (oberflächennahes Fräsen).....	9
3.3.5	Bodenperforation	11
3.4	Bedeckung mit Biomasse.....	14
3.4.1	Reisigauflage.....	14
3.4.2	Auslegen von Ast- oder Stammholz (Derbholz).....	16
3.5	Einbringen von Zusatzstoffen	17
3.5.1	Kalkung (dolomitisch)	17
3.5.2	Kalkung (Branntkalk).....	19
3.5.3	Aufbringen von Holzasche	22
3.6	Bepflanzung von Rückegassen	24
3.6.1	Ansaat (krautige Pflanzen).....	24
3.6.2	Anpflanzung von Gehölzen.....	26
3.7	Einbringen von Regenwürmern.....	28
4	Zusammenfassung der Maßnahmen (Tabellarisch)	30
5	Quellenangaben	31

Maßnahmen zur Sicherung und zur Regeneration von Bodenfunktionen in Rückegassen

1 Übersicht

Das Ergreifen von Maßnahmen zur Sicherung oder zur Regeneration von Bodenfunktionen in Rückegassen ist abhängig von dem gewünschten Ziel (Befahrbarkeit oder Bodenregeneration), welches entweder zeitnah oder langfristig angestrebt wird, sowie von den gegebenen Boden- und Klimabedingungen. Die Kosten einer Maßnahme hängen stark von den örtlichen Gegebenheiten wie z.B. der Erreichbarkeit der Fläche oder von in Anspruch genommenen Dienstleistungen ab. Sie unterliegen damit großen Schwankungen auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Im weiteren Textverlauf wird aber auf Literatur zur Kostenkalkulation verwiesen. Eine Übersicht der in diesem Katalog vorgestellten Maßnahmen hinsichtlich unterschiedlicher Ausgangsbedingungen und Zielsetzungen gibt die Tabelle 1 wieder. Die aufgeführten Maßnahmen greifen zum Teil stark in den Naturhaushalt ein. Genehmigungsrelevante Tatbestände sind jeweils zu prüfen, und es ist für jeden Einzelfall eine Abwägung durchzuführen.

Tabelle 1 Verzeichnis der beschriebenen Sicherungs- und Regenerationsmaßnahmen

Nr.	Art der Maßnahme	Ziel	Beginn der Wirkung
Bodenbearbeitung			
1.	Entwässerung von Nassstellen	Vorsorge, Sicherung	sofort - Wochen
2.	Punktueller Befestigung von Problemstellen	Vorsorge, Sicherung	sofort
3.	Egalisieren und Verdichten der Rückegasse	Sicherung, Sanierung ¹	sofort
4.	Mulchen (oberflächennahes Fräsen)	Sicherung	sofort
5.	Bodenperforation	Sicherung, Regeneration	Wochen - Jahre
Bedeckung mit Biomasse			
6.	Reisigauflage	Vorsorge	sofort
7.	Auslegen von Ast- o. Stammholz (Derbholz)	Vorsorge	sofort
Einbringen von „Zusatzstoffen“			
8.	Carbonatkalk (dolomitisch)	Vorsorge, Regeneration	Wochen
9.	Branntkalk (CaO, CaMgO)	Sicherung	Stunden -Tage
10.	Aufbringen von Holzasche	Regeneration	Wochen - Monate
Bepflanzung			
11.	Ansaat (krautige Pflanzen)	Sicherung, Regeneration	Wochen
12.	Anpflanzung von Gehölzen	Sicherung, Regeneration	Wochen - Jahre
13.	Einbringen von Regenwürmern	Regeneration	Wochen

¹ Grundsätzlich gilt, dass das Sanieren von Rückegassen die Ausnahme darstellen muss. Bei abzusehenden Schäden ist das Befahren abzubrechen und bei besseren Verhältnissen wieder aufzunehmen. Durch mehrjährigen Befahrungsverzicht kann die Tragfähigkeit der Gasse wieder verbessert werden (NLF 2015).

2 Einleitung

Im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) werden den Böden natürliche Funktionen und Nutzungsfunktionen zugesprochen. So lange Rückegassen der forstlichen Erschließung dienen, kommt ihnen eine Nutzungsfunktion als „Standort für (...) Verkehr (...)“ gemäß §2, Absatz 2, Punkt 3.d des BBodSchG zu. In der Inanspruchnahme und Ausgestaltung dieser Verkehrsfunktion sind aber die Funktionen als Standort für forstwirtschaftliche Nutzung (Punkt 3.c BBodSchG) wie auch die natürlichen Bodenfunktionen (Punkt 1. BBodSchG) so weit wie möglich zu erhalten. Dies begründet sich dadurch, dass Rückegassen der produktiven Holzbodenfläche und nicht dem Wegesystem des Waldes zugerechnet werden. Darüber hinaus ist es nicht unwahrscheinlich, dass in der forstlichen Bewirtschaftung Rückegassen dauerhaft oder für lange Zeiträume von der Befahrung ausgenommen werden. In dem Fall ist eine möglichst schnelle Wiederherstellung des ursprünglichen Bodenzustands mit allen natürlichen Bodenfunktionen erwünscht. Das Bundeswaldgesetz und die Waldgesetze der Länder fordern ebenfalls die Erhaltung des Bodens und der Bodenfruchtbarkeit, um einer erheblichen Schädigung des Waldes vorzubeugen.

Die funktionellen Anforderungen an Rückegassen können wie folgt charakterisiert werden (s.a. NLF Bodenschutz bei der Holzernte, 2015):

- Der Vegetationsbestand lässt eine Passage zu
- Der Boden ist tragfähig, so dass eine Holzernte möglich ist (i.d.R. mit modernen Spezialmaschinen)
- Die Gasse ist nach einigen Jahren erneut befahrbar
- Keine Beeinträchtigung des Waldwachstums
- Keine fernwirkende Schädigung von Bodenfunktionen (Erosion, Schadstoffe, Wasserhaushalt, Klimawirkung)
- Beschränkung der Flächenausdehnung auf ein Minimum
- Reversibilität der Bodenbeeinträchtigung
- Keine Beeinträchtigung der Erholungsfunktion (& Naturschutz ...)

Die Strukturregeneration von Waldböden wird von folgenden Prozessen bewirkt (vgl. Troedsson und Lyford 1973, Hildebrand 1987, Horn und Smucker 2005, Hoffman et al. 2014):

1. Frostsprengung
2. Nass-Trocken-Wechsel (Quellen und Schrumpfen; wird durch Wasserentzug der Wurzeln begünstigt)
3. Dickenwachstum von Baumwurzeln
4. Explorationswachstum von Wurzelspitzen
5. Wurzelrotte (Entstehung von Wurzelkanälen)
6. Grabaktivität bodenlebender Insekten (z.B. Ameisen, Schnellkäferlarven, Dipterenlarven)
7. Grabaktivität von Regenwürmern (und Enchyträen)
8. Grabaktivität von Kleinsäugern (Mäuse, Maulwurf)
9. Wühlaktivität von Wildschweinen
10. Sturmwurf von Bäumen mit Ausreißen des Wurzelsystems (Arboturbation, uprooting)
11. Aggregatstabilisierung durch mehrwertige Ionen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+})

Frostsprennung, Nass-Trocken-Wechsel, Sturmwurf und Aggregatstabilisierung durch mehrwertige Ionen werden als abiotische Prozesse vorwiegend durch das Witterungsgeschehen gesteuert. Die übrigen Prozesse der Aufzählung sind biotisch. Ihre Intensität hängt vor allem davon ab, ob die Organismen für ihre Aktivität geeignete Lebensbedingungen vorfinden. Die Lebensbedingungen werden entscheidend bestimmt durch das Nahrungsangebot (Menge, Qualität, Lokalisierung) und durch die chemische Verträglichkeit des Lebensraums (Sauerstoffversorgung, Bodenacidität). Nach dem gegenwärtigen wissenschaftlichen Kenntnisstand sind Nass-Trocken-Wechsel und Wurzelwachstum die bedeutsamsten Prozesse der Bodenstrukturegeneration im Wald.

In einem langfristig angelegten Bodenverdichtungsversuch auf strukturlabilen Schluff-Lehmböden in Wäldern Lothringens wurde die initiale Bodenregeneration in den ersten drei Versuchsjahren vor allem auf Nass-Trocken-Wechsel und Frostwirkung zurückgeführt (Goutal et al. 2012, Goutal et al. 2013, Bottinelli et al. 2014). Die initiale Strukturregeneration ist allerdings auf die von Frost und Austrocknung beeinflussten obersten Bodenschichten beschränkt. Die Rückbildung der Befahrungsschäden in größerer Bodentiefe ist auf biologische Prozesse wie Wurzelwachstum und Grabaktivität von Bodentieren angewiesen. Nach den vorliegenden Erkenntnissen scheint das länger zu dauern und stärker von den jeweiligen Standortverhältnissen bestimmt zu sein (Goutal et al. 2013). Die Tiefenwirkung der Frostwirkung und des Nass-Trocken-Wechsels hängt vom Klimaregime ab. Je geringer die Witterungsextreme sind, desto geringer ist die Tiefe, in die sich hydraulische Effekte in den Boden fortpflanzen. Die bodenbiologische Aktivität ist ebenfalls an bzw. nahe der Bodenoberfläche am größten. Dies gilt besonders für Waldböden mit Moderhumusformen. Die Tiefenverteilung der organischen Bodensubstanz ist ein guter Indikator dafür, wie tief biotische strukturbildende Prozesse im Boden vordringen.

3 Maßnahmen zur Sicherung und zur Regeneration von Bodenfunktionen

3.1 Begriffsklärung: Vorsorge-, Sicherungs- und Regenerationsmaßnahmen

Bei der Behandlung von Rückegassen lassen sich Vorsorgemaßnahmen, Sicherungsmaßnahmen und Regenerationsmaßnahmen unterscheiden.

Vorsorgemaßnahmen werden in einer bereits bestehenden Rückegasse vor der Befahrung ergriffen. Sie haben zum Ziel, dass sich der Zustand der Rückegasse durch die Befahrung möglichst nicht verändert. Hierdurch sollen Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen vermieden bzw. minimiert werden. Dies gilt nur für bereits bestehende Rückegassen. Wird ein vorher unbefahrener Waldboden befahren, ist eine Veränderung des Bodenzustands unvermeidlich.

Sicherungsmaßnahmen werden nach einer Befahrung ergriffen und sollen gewährleisten, dass die Gasse beim nächsten Bewirtschaftungszyklus wieder befahren werden kann. Da die Rückegasse ein Sonderstandort ist, wird hier toleriert, dass sich ihr Bodenzustand vom Zustand des Waldbodens im Bestand unterscheidet. Als Sanierungsmaßnahmen werden Maßnahmen zur Wiederherstellung einer Rückegasse verstanden, die über die in der Bodenschutzrichtlinie definierten Toleranzgrenzen hinaus geschädigt wurde. So etwas ist in Niedersachsen für Rückegassen grundsätzlich nicht vorgesehen. Eine exakte Abgrenzung zwischen Sicherung und Sanierung wird im Einzelfall nicht immer möglich sein.

Regenerationsmaßnahmen werden im Zusammenhang mit einer langfristigen oder dauerhaften Entlassung der Rückegasse aus der Befahrung (z.B. nach Schutzgebietsausweisung oder irregulärer Befahrung) ergriffen und haben die Wiederherstellung eines Bodenzustands zum Ziel, der dem unbefahrenen Waldboden entspricht. Regenerationsmaßnahmen müssen keinen Bezug zu einer aktuellen Befahrung des Waldbodens haben.

Tabelle 2 stellt die Maßnahmentypen im Überblick dar.

Tabelle 2 Einsatzbereiche und Charakteristika von Vorsorge-, Sicherungs- und Regenerationsmaßnahmen in Rückegassen

	Maßnahmenziel		
	Vorsorge	Sicherung	Regeneration
wann	Vor der Befahrung	Nach der Befahrung	Nach Aufgabe der Befahrung
Fahrspurtiefe	Für Vorsorgeentscheidung unbedeutend	Innerhalb der Toleranzgrenzen.	Für Wahl der Maßnahme bedeutend.
Ziel	Der Zustand der Rückegasse wird durch die Befahrung kaum verändert.	Dauerhafte Sicherung der forsttechnischen Befahrbarkeit bei Erhaltung von Boden-Grundfunktionen.	Wiederherstellung des unbefahrenen Bodenzustands.
Erfolgskriterien	Gleichbleibende Fahrspurtiefe und -breite.	Bodenwassergehalt, Vorverdichtung, aktive Baumwurzeln.	Durchwurzelung, Bodenschluffhaushalt, Poren schaffende Fauna, Vegetation.

3.2 Einleitende Erklärungen zu den Maßnahmen

Nach einem Vorschlag des Thünen-Instituts werden von den Niedersächsischen Landesforsten organisatorische, technische und waldbauliche Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenschäden bei der Holzernte aufgelistet (NLF Merkblatt): Bodenschutz bei der Holzernte in den Niedersächsischen Landesforsten, Abbildung 1). Im Folgenden werden einige dieser Maßnahmen aufgegriffen und erläutert. Die Maßnahmen „Mulchung“, „Aufbringen von Holzasche“, „Einbringen von Regenwürmern“ und „Bodenperforation“ werden ergänzend hinzugenommen. Alle Maßnahmenbeschreibungen beinhalten eine Bewertungstabelle der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden. Dieser Tabelle liegen folgende Legendenkürzel zu Grunde:

- + positiver Effekt
- Negativer Effekt
- 0 kein Effekt
- () ohne wissenschaftlichen Nachweis
- ? Wirkung unbekannt

Bodenschonende Holzernte			
Organisatorische Maßnahmen	Technische Maßnahmen	Waldbauliche Maßnahmen	
<ul style="list-style-type: none"> • Planungs- u. Produktionssystem (NLF WEB GIF) • Ausweisung Flächenpool für Holzernemaßnahmen • Logistische Maßnahmen • Auslastungsgrad der Maschinen • Vertragsgestaltung (→ Bodenschonung) • Einsatz zertifizierter Unternehmen (RAL/DFSZ) • Erschließungssystem • Permanente Rückegassen • Dauerhafte Kennzeichnung der Rückegassen • Etablierung von Qualitätsstandards für Arbeitssysteme • Arbeitsauftrag 	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl Holzernteverfahren <ul style="list-style-type: none"> - Seilkran/Seilanlagen - Harvester/Forwarder - Seilschlepper - Raupenschlepper/ Raupenharvester • Auswahl der Maschinen <ul style="list-style-type: none"> - Räder/Reifeninnendruck - Anzahl der Achsen - Gesamtgewicht/Radlast - Traktionswinde • Anpassung der Maschinen <ul style="list-style-type: none"> - Bänder - Elektr. Antischlupfregelung • Befahrungsmanagement <ul style="list-style-type: none"> - Anzahl der Überfahrten - Gewicht bei Überfahrten - Spurtiefenmessung • Querableitungen in den Gassen • Punktuelle Befestigung der Gassen • Einebnen der Spurrillen 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingriffsstärke/-häufigkeiten • Reisigmatten • Standortgerechte Baumartenwahl • Förderung von Mischbaumarten • Nachhaltige Humusbewirtschaftung • Waldkalkung • Rechtzeitige Bestandesvorbereitung • Standortangepasste H/D Verhältnisse und Kronenprozente • Ausnutzung von Frost und Trockenheit • Hilfspflanzenanbau 	Konzept Strategien Lösungsansätze

Abbildung 1: Strategien zur Vermeidung von Bodenschäden (NLF 2015)

Grundsätzlich muss die Vermeidung von Spurbildung oberste Priorität bei der Waldbodenbefahrung haben. Daher sind als erstes alle organisatorischen Maßnahmen und als zweites alle befahrungstechnischen Maßnahmen zur Schadensvermeidung auszuschöpfen einschließlich alternativer Holzernte- und Holzbringungsverfahren. Die im Maßnahmenkatalog aufgeführten Möglichkeiten sind also nur für die dann noch auftretenden Ausnahmefälle vorgesehen.

3.3 Bodenbearbeitende Maßnahmen

3.3.1 Entwässern

Ziele

- Der Bodenwassergehalt soll durch das Ableiten von freiem Bodenwasser reduziert werden.
- Niederschlagswasser soll schnell abgeleitet werden, bevor es sich im Boden staut.

Beschreibung

Für das Entwässern von Rückegassen sind verschiedene Maßnahmen bekannt. In der Regel werden Entwässerungsgräben quer zur Rückegasse angelegt, die zu Versickerungsflächen im Bestand führen oder an bestehende Entwässerungssysteme des Wegenetzes angebunden werden (Die Herstellung der Gräben kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Neben dem Ausbaggern von Gräben ist u.a. das Schlitzeln mit dem Rückeschild bekannt. Maßnahmen, bei denen Fremdstoffe eingebracht werden (z.B. Drainagerohre, Drainageschotter), können bei extrem nassen und/oder stark befahrenen Bereichen der einzige Weg zur dauerhaften Sicherung der forsttechnischen Befahrbarkeit sein. Allerdings sind derartige wegebauliche Maßnahmen Sanierungsmaßnahmen. Eine Möglichkeit zum Schutz der Entwässerungseinrichtungen während der Befahrung sind in den Gräben eingelegte Stammstücke, die nach der Befahrung wieder entfernt werden. Letztlich sollten alle Maßnahmen zur Entwässerung auf nasse Teilstücke einer Rückegasse beschränkt bleiben (ForstBW 2012).

Erwartete Wirkung

Durch eine Entwässerung wird Niederschlagswasser schnell oberflächlich abgeleitet und gelangt zu großen Anteilen nicht mehr in den Boden der Rückegasse. Abgesehen von diesem Abfluss wird freies Wasser aus dem Boden über die Gräben abgeführt. Da eine Pore nur wasser- oder luftgefüllt sein kann, sind infolge der Reduzierung des Bodenwassergehalts mehr Poren luftgefüllt. Außerdem erfolgt eine Erosionsminderung, da die Fließstrecke des Wassers auf der Rückegasse abgekürzt wird.

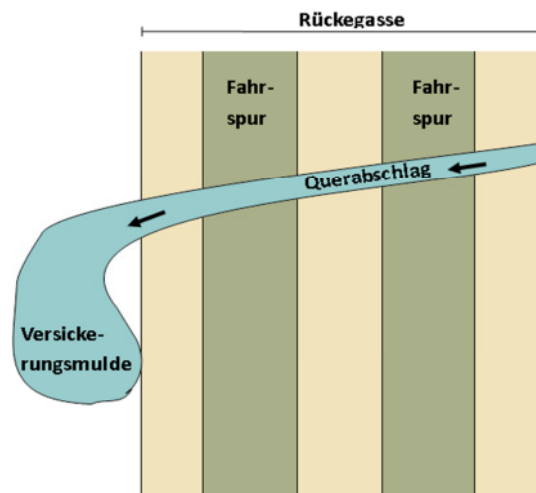


Abbildung 2: Querabschlag auf der Rückegasse und Versickerungsmulde neben der Rückegasse zur Ableitung des Niederschlagswassers.

Tabelle 3: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Entwässern	(+)	(+)	(+)	(+)	?	?

Bewertung

Nasstellen können durch eine Entwässerung wieder befahrbar gemacht werden. Allerdings ist der Erfolg der Maßnahme stark von der Textur und Geländeform abhängig. Hinzu kommt ein recht großer Pflegeaufwand der Gräben. Eine dauerhafte punktuelle Befestigung und/oder Drainage dürfte langfristig die preiswertere Lösung sein. Außerdem muss bei jeder Entwässerungsmaßnahme ein erneuter Eingriff erfolgen, wodurch z.B. bei der Anlage von Entwässerungsgräben neue Bodenbereiche beeinträchtigt werden.

Literatur

ForstBW (2012a) Merkblatt – Bauliche Maßnahmen zur Erhaltung der technischen Befahrbarkeit der Rückegassen.

3.3.2 Punktuelle Befestigung von Problemstellen

ForstBW empfiehlt die punktuelle Befestigung von Nassgallen in Rückegassen. „Es wird in solchen Fällen in den Befahrungsrichtlinien der Länder die Einbringung groben Schotters vorgeschlagen, der dem standortstypischen Ausgangsgestein der Bodenbildung entspricht“ (von Wilpert 2015). Außerhalb von Rückegasseneinmündungen ist dabei das Problem zu lösen, wie der Antransport des Schotters ohne zusätzliche Befahrungsschäden erfolgen kann.

3.3.3 Egalisieren und Verdichten der Rückegasse

Ziele

- Eine stark zerfahrene Rückegasse mit Gleisbildung und dadurch eingeschränkter Befahrbarkeit soll wieder forsttechnisch befahrbar gemacht werden.
- Pfützenbildung soll unterbunden werden
- Das Erscheinungsbild einer Rückegasse soll verbessert werden (für Waldbesucher).



Abbildung 3: Egalisierung mittels Bagger

Quelle: ForstBW (2012a)

Beschreibung

Das Bodenmaterial der Seitenwülste und des Mittelstreifens wird in die ausgefahrenen Fahrspuren eingebracht (s. **Abbildung 3** bis **Abbildung 5**). Dazu werden in der Praxis verschiedene Maschinentypen verwendet, die das Material schieben (Schlepper mit Polterschild, Planierraupe) oder ziehen bzw. einfüllen (Bagger). Nach dem Verteilen des Bodenmaterials erfolgt das Verdichten durch Befahrung. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis die Maschine beim Befahren keine tiefen Fahrspuren hinterlässt und die Rückegasse möglichst eben ist. Der Bodenwassergehalt darf nicht zu hoch sein, damit der Boden gleichmäßig verteilt und verdichtet werden kann. Optimal ist eine leichte Wölbung in der Mitte der Rückegasse, damit Niederschlagswasser schnell seitlich abfließen kann. Das in Baden-Württemberg als notwendig angesehene Verdichten (ForstBW 2012a, S. 9) ist in den Niedersächsischen Landesforsten nicht zulässig. Dort wird die natürliche Setzung des "Füllmaterials" innerhalb der 5 bis 10 Jahre bis zu nächsten Befahrung als ausreichende Rückverfestigung angesehen.

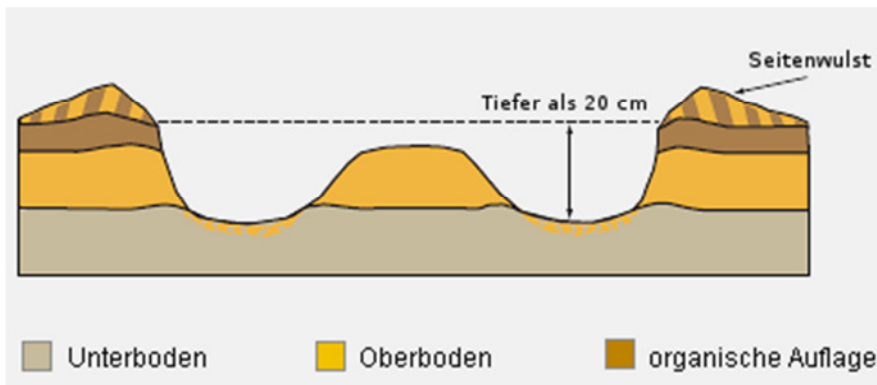


Abbildung 4: Ausgangszustand der Rückegasse vor dem Egalisieren (nach Lüscher et al. 2009)

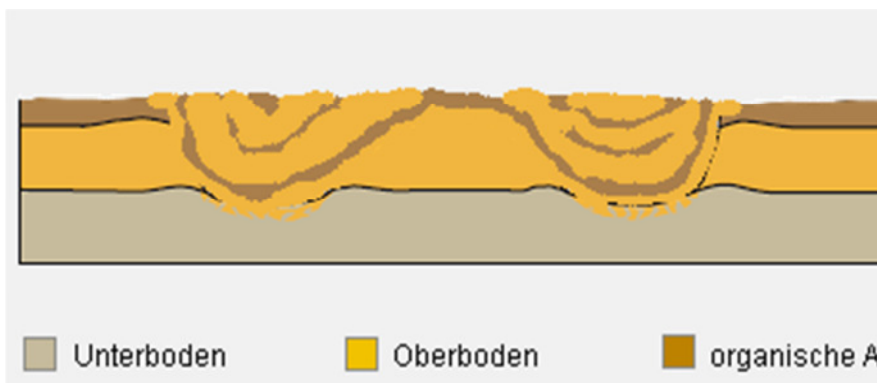


Abbildung 5: Zielzustand der Rückegasse nach dem Egalisieren

Erwartete Wirkung

Das Egalisieren bewirkt eine Bodenverformung auf der gesamten Breite der Rückegasse und es erfolgt oftmals eine Durchmischung von Oberboden und organischer Auflage. Durch die Unterbrechung der Porenkontinuität wird der Gasaustausch mit der Atmosphäre vermutlich stark gestört und die Belüftungssituation für Wurzeln verschlechtert. Allerdings kann in der Regel die forsttechnische Befahrbarkeit erhöht werden, da u.a. anfallendes Niederschlagswasser, oberflächennah in den Bestand abgeleitet wird und sich nicht mehr in den Spuren sammelt. Voraussetzung hierfür ist ein leichtes Gefälle der Rückegasse in den Bestand bzw. eine konvexe Wölbung. Somit werden durch Niederschlagswasser gespeiste Nassstellen beseitigt. Infolge der geglätteten und zunächst vegetationslosen Bodenoberfläche kann es, insbesondere in Hanglagen, zu einer erhöhten Erosion kommen. Weil Niederschlagswasser seitlich abfließt, kann der Boden abtrocknen, wodurch oberflächennahe Schrumpfrisse gefördert werden – sofern der Boden über den nötigen Tongehalt verfügt. Durch die Risse wird die Belüftungssituation zumindest oberflächennah verbessert.

Tabelle 4: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Egalisieren	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)

Verbreitung der Anwendung

Das Egalisieren wird in der Praxis in zahlreichen Revierförstereien regelmäßig angewendet. Im Merkblatt des ForstBW werden das Abschieben des Mittelstegs und das Einebnen der Fahrspuren einzeln beschrieben, beide Maßnahmen werden hier als Egalisieren zusammengefasst.

Kosten

Im Merkblatt ForstBW (2012a) werden für das Abschieben des Mittelstegs mittels Rückeschlepper 0,2 €/lfm und für das Einebnen der Fahrspuren mittels Kettenladeraupe oder Bagger 1-2 €/lfm angesetzt.

Abschließende Bewertung

Durch das Egalisieren kann in der Regel die forsttechnische Befahrbarkeit einer Rückegasse relativ kostengünstig wiederhergestellt werden. Allerdings ist eine dauerhafte Stabilisierung nur möglich, wenn auf den Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt des Befahrens geachtet wird. In der Vergangenheit führte eine Befahrung bei hohen Bodenwassergehalten zur Ausprägung der tiefen Fahrspuren, wodurch das Egalisieren nötig wurde. Ganzjährig nasse Bereiche, wie es beispielsweise in Senken regelmäßig vorkommt, sollten nicht egalisiert werden. Bei Ihnen wird durch das Egalisieren keine Verringerung des Bodenwassergehalts erreicht. Außerdem scheiden Rückegassen mit Reisigmatten oder Wurzelstöcken aus, da dadurch das Arbeitsgerät blockiert werden kann. Zusätzlich erfolgt eine optische Aufbesserung der Rückegasse, wodurch der Laie keinen Schaden erkennen kann. Das positive Erscheinungsbild der Gasse wird in der Regel durch flachwurzeln Vegetation verstärkt. Es geschieht jedoch eine starke Bodenverformung auf größerer Fläche, weshalb diese Maßnahme zur Bodenregeneration fragwürdig ist. Eine systematische Untersuchung zur Wirkung des Egalisierens auf Bodenfunktionen und –prozesse ist uns nicht bekannt.

3.3.4 Mulchen (oberflächennahes Fräsen)

Ziele

- Fräsen von Stubben und Reisig zur Verbesserung der forsttechnischen Befahrbarkeit.
- Das Erscheinungsbild einer Rückegasse soll verbessert werden (für Waldbesucher).
- Oberflächennahe Erhöhung des Grobporenanteils zur Verbesserung der Belüftung (Entsiegeln) und dadurch günstigere Wuchsbedingungen für Wurzeln.
- Evtl. zur Vorbereitung für die Pflanzung von Gehölzen oder die Aussaat krautiger Pflanzen.
- Einebnen von Fahrspuren und Seitenwülsten
- Festlegung der Rückegasse, wenn keine Randbäume markiert werden können

Beschreibung

Forstmulcher zerkleinern die organische Auflage (inkl. Reisig, Stubben) und vermischen diese mit evtl. vorhandenen Seitenwülsten (s. Abbildung 6). Dabei wird der Oberboden nur in sehr geringem Umfang mit eingearbeitet. In der Regel wird mit einer Arbeitsbreite von 2 m gefräst, wodurch eine 4 m breite Rückegasse mindestens zweimal befahren wird. Durch die Maßnahme entsteht eine Gasse ohne Fahrspuren und Bewuchs mit einem locker aufliegenden Gemisch aus überwiegend organischen Bestandteilen und geringen Anteilen von Mineralboden.



Abbildung 6: Oberflächennahes Fräsen mit einer Mulchfräse von Prinoth

Quelle: Prinoth

Erwartete Wirkung

Das Fräsen der organischen Substanz führt zu einer oberflächennahen Lockerung und Homogenisierung. Je nach Ausgangszustand wird mehr oder weniger Biomasse mit Anteilen von Mineralboden vermischt. Die Lagerungsdichte wird hier erheblich reduziert, zahlreiche Grobporen entstehen und eine zuvor verformte Oberfläche wird je nach Anzahl der Überfahrten egalisiert. Zu berücksichtigen ist, dass die organische Substanz Zersetzungsprozessen unterliegt und, den Umfeldeinflüssen entsprechend, mit der Zeit abgebaut wird. Darüber hinaus wird die Befahrbarkeit verbessert, da zuvor hindernde Stubben und Reisigauflage beseitigt wurden ohne den oftmals vorverdichteten Mineralboden zu lockern. Allerdings werden oberflächennah gewachsene Wurzeln zerstört und es entstehen Wurzelverletzungen die Eintrittspforten für holzerstörende Pilze sind. Tiefer liegende Bodenverdichtung wird höchstens sekundär gelockert, wenn Wurzeln und Bodentiere sie erschließen.

Tabelle 5: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Oberflächennahes Fräsen	(+)/-	(0)	(0)	(+)	(+)	(+)

Verbreitung der Anwendung

Das forstliche Mulchen (=oberflächennahes Fräsen) wird zur Neuanlage einer Rückegasse im Jungbestand regelmäßig verwendet. Außerdem wird es vom Thüringen Forst zur dauerhaften Markierung und zur Erhaltung der Befahrbarkeit in Verjüngungsbeständen und Jungbeständen aufgeführt (MLNU Thüringen 2010). Darüber hinaus ist das Mulchen zur Pflanzvorbereitung bekannt, um Unkrautwuchs zu verhindern und die Nährstoffversorgung zu verbessern sowie die Pflanzarbeiten zu vereinfachen. Positive Erfahrungen wurden in einem Feldversuch der Baden-Württembergischen Forstlichen Versuchsanstalt zur Restrukturierung verdichteten Bodens (K. von Wilpert und J. Fernandez-Flores mdl.

Mitt. 2016) und bei der „Nachbehandlung“ von Rückegassen im Stadtwald Iphofen (K. Fell mdl. Mitt. 2012) gemacht.

Kosten

Im Merkblatt ForstBW (2012a) werden für das Mulchen einer Rückegasse mit dem Forstmulcher Kosten von 0,20-0,66 €/lfm angesetzt. Im Leitfaden MLNU Thüringen (2010) werden für das Mulchen mit einem Schlepper mit Anbaumulcher ca. 3000 €/ha angesetzt. Umgerechnet bedeutet das 1,2 €/lfm. Rückegasse.

Abschließende Bewertung

Durch das Fräsen wird eine lockere Bodenschicht mit z.T. sehr hohem organischen Anteil hergestellt, welche bei einer erneuten Befahrung zum Teil elastisch reagiert. Je nach Menge der eingefrästen Organik kann die elastische Wirkung, bei erneuter Befahrung, zunächst zu einer Verringerung der Bodenverdichtung des Unterbodens durch Befahrung kommen. Das in den Mineralboden eingemischte zerkleinerte organische Material lenkt potenziell die biologische Aktivität in tiefere Bodenschichten. Auf sauren Standorten kann die Maßnahme in Kombination mit Kalkung günstig wirken, da der Kalk die bodenchemischen Bedingungen für die Poren schaffende Fauna sowie die Flora verbessert.

3.3.5 Bodenperforation

Das Hauptziel des im Rahmen des RÜWOLA-Projektes erstmals erprobten Konzepts der Bodenperforation ist es, die Strukturregeneration des Bodens in die Tiefe zu lenken (s. Abbildung 7 und Abbildung 8). Damit soll dem Problem begegnet werden, dass die natürliche Strukturregeneration sich auf die obersten Bodenzentimeter beschränkt (Bottinelli et al. 2014).

Unter Bodenperforation wird das Herstellen von vertikalen Löchern im Boden der Fahrspur verstanden. Hierdurch wird der Boden bei maximaler Schonung des vorhandenen Wurzelwerks aufgeschlossen. Von den künstlich geschaffenen Grobporen könnte in Wechselwirkung mit biologischen Prozessen eine Restrukturierung des Waldbodens ausgehen.



Abbildung 7: Sedimentierte organische Substanz im Stanzloch einer Fahrspur.

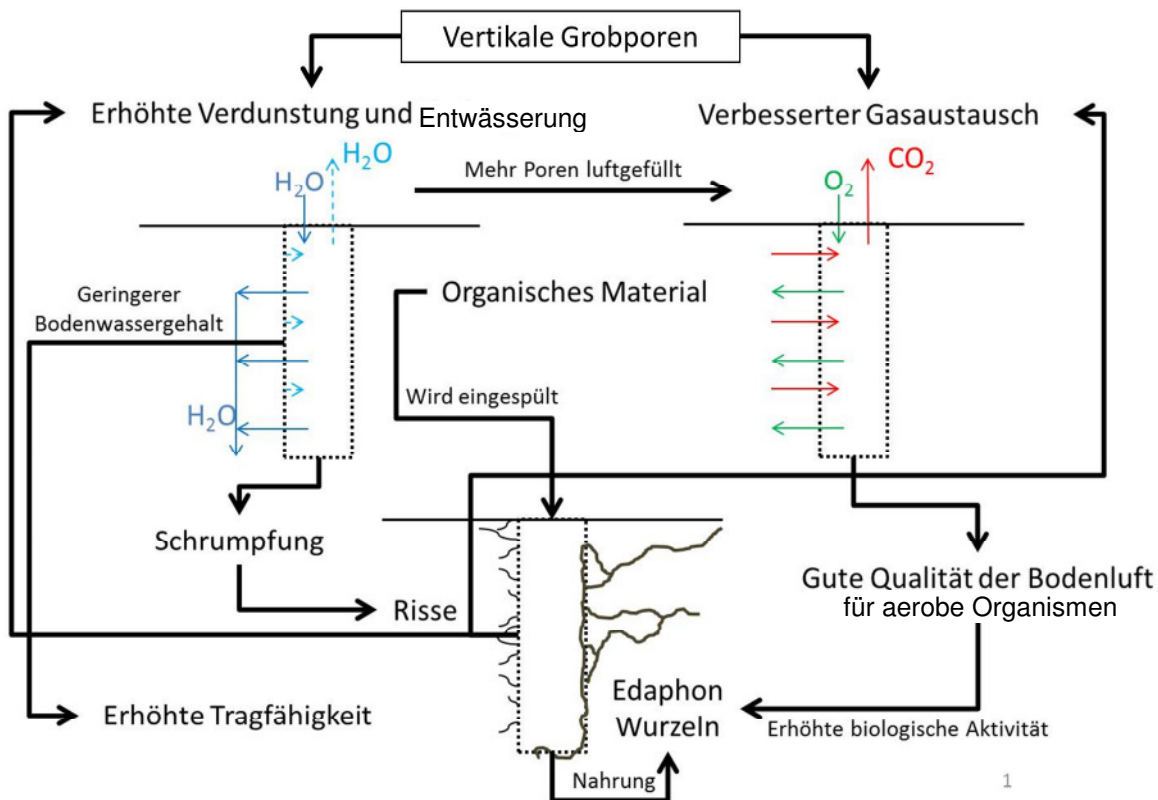


Abbildung 8 Hypothetisches Schema der Wirkung gestanzter Löcher im Boden einer Fahrspur

Als Effekt der Bodenperforation wird angenommen:

1. Organische Substanz gelangt in die Stanzlöcher → Das schafft ein Nahrungsangebot für Bodenorganismen, die sonst den humusarmen B-Horizont nicht aufsuchen würden → Aus der organischen Substanz mineralisierte Nährstoffe locken Pflanzenwurzeln an.
2. Die vertikale Makropore vergrößert die Austauschfläche für die Verdunstung und die Wasserinfiltration. Dadurch wird die Strukturbildung durch nass-trocken Wechsel von der Bodenoberfläche in das Bodeninnere verlagert. Im Idealfall durchbricht die Pore eine Stauzone und verbessert den Wasserabfluss. Auch die Luftdurchlässigkeit des Bodens am Rand der Makropore wird durch die Wasserabfuhr bei Verdunstung und Wasserabfluss gesteigert.
3. Durch die Makropore wird die Gasaustauschfläche im Boden vergrößert. Das verbessert die Bedingungen für aerobe Bodenorganismen und fördert die Aktivität von Bodenwühlern sowie das Wachstum von Wurzeln.

Im Forschungsvorhaben RÜWOLA wurden in Versuchsflächen im Solling und im Teutoburger Wald 20 cm tiefe Löcher mit einem Durchmesser von 26 mm in die Fahrspur gestochen. Der ausgestochene Bodenpfropfen wurde abgesammelt. Die Anzahl der Löcher war 15 Löcher / m^2 und 30 Löcher / m^2 im Solling und 37 Löcher / m^2 im Teutoburger Wald. In den Versuchen wurde die Bodenperforation als einzige Maßnahme sowie in Verbindung mit Kalkung, Ansaat und Regenwurmansiedlung geprüft.

Neben flächiger Kalkung wurde auch untersucht, welche Auswirkung das Verfüllen der Stanzlöcher mit Branntkalk hat.

Obwohl die Bodenperforation im Forschungsvorhaben RÜWOLA mit einem Handgerät erfolgte, ist die technische Ausrüstung einer Forstmaschine für die Bodenperforation gut vorstellbar. Als Ausgangspunkt bieten sich maschinelle Erdbohrer oder Bodenprobenahmegeräte an, die mit mehreren Anbietern am Markt vertreten sind (z.B. Bodenprobetechnik Nietfeld GmbH, Quakenbrück, www.bodenprobetechnik.de oder Wintex Agro, Dänemark <http://wintexagro.com/>).

Die Im Forschungsvorhaben RÜWOLA gewonnenen Erfahrungen bestätigen die Anreicherung von organischer Substanz, Pflanzenwurzeln und biologischer Aktivität in den Stanzlöchern. Die Tiefenwirkung der flächigen Kalkung wurde durch die Bodenperforation gesteigert (Sparrer 2017). In der vorgenommenen Dimensionierung (20 cm tief, 26 mm Durchmesser) wurden die Vorstellungen zur Regulierung des Wasser- und Gashaushalts in den ersten drei Beobachtungsjahren nicht bestätigt. Die Stanzlöcher wirkten eher als Sammler und Speicher des Niederschlagswassers, was stellenweise zu einer hohen CO₂-Konzentration in der Bodenluft führte. Andere Dimensionierungen der Bodenperforation können zu anderen Ergebnissen führen. So berichtete Noémie Pousse (ONF Frankreich) von Versuchen mit ca. 100 cm tiefen Löchern und ca. 6 cm Durchmesser, bei denen eine gute Drainage von vernässten Rückegassenpartien an einem Problemstandort erreicht wurde (pers. Mitteilung Sept. 2014, Workshop „Forest Soil Trafficability“ FCBA Frankreich 28.03.2017).

Bei mit Branntkalk verfüllten Perforationslöchern wurde im RÜWOLA Vorhaben eine große Dauerhaftigkeit der Kalksäule und eine nur minimale Ausbreitung des pH-Effekts beobachtet. Es deutete sich jedoch eine verstärkte Abtrocknung des Bodens unter dem Branntkalkeinfluss an.

Ein als „Aerifizieren“ bezeichnetes Verfahren wird zur Belüftung von Golf- und Sportrasenflächen eingesetzt (Marktführer „Vertidrain“). Dabei werden die Rasentragschicht und der Unterboden durch Einstechen von Meißeln („Spoons“) perforiert, z.T. auch gelockert. Vollmeißel gibt es mit einem Durchmesser von 5 mm – 32 mm und Werkzeuglängen bis 45 mm. Hohlmeißel haben Außendurchmesser bis 30 mm, Innendurchmesser bis 18 mm und Werkzeuglängen bis 36 mm. Die Hohlmeißel entnehmen einen Bodenkern. Für Sportrasen werden 200-800 Löcher /m² angestrebt. Die Löcher werden mit Sand aufgefüllt, evtl. mit Düngerzusatz. Die Wirksamkeit des Verfahrens zur Behebung von Bodenverdichtungen auf Rasenflächen wurde nachgewiesen (z.B. Guertal & Han, 2002). Nach unserer Kenntnis wurde eine Adaption des Aerifizierungsverfahrens auf verdichtete Waldböden bisher nicht unternommen. Die für die Rasenpflege konstruierten Maschinen sind auch den mechanischen Belastungen durch Grobwurzeln und Steine in Waldböden nicht gewachsen.

Tabelle 6: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Perforation	(+)	(+)	(- bis +)*	(- bis +)*	(+)	(+)

* Da viele Prozesse im Boden eher langsam ablaufen, können hier noch keine endgültigen Aussagen getroffen werden.

3.4 Bedeckung mit Biomasse

3.4.1 Reisigauflage

Ziele

- Vorsorge gegen Spurbildung
- Stabilisierung bestehender Fahrspuren
- Aufrechterhaltung der Durchwurzelbarkeit und damit der Standsicherheit des angrenzenden Baumbestandes sowie des Wasserentzugs durch Pflanzenwurzeln.

Beschreibung

Sowohl beim erstmaligen Anlegen der Rückegassen, als auch bei den folgenden Durchforstungen wird das Kronenmaterial der entnommenen Bäume auf den Rückegassen vor dem Harvester abgelegt.

Ab der dritten Durchforstung bzw. hochmechanisierter Zielstärkennutzung steigt die Stückmasse des ausscheidenden Bestandes, gleichzeitig sinkt aber die Anzahl der Bäume und somit die anfallende Reismenge. Hier kann es sinnvoll sein, nur jede zweite Rückegasse zu nutzen und die Zwischenräume mit dem Kran manuell vorzufällen (NLF 2015).

Erwartete Wirkung

Reisigaufgaben auf der Rückegasse reduzieren den Bodendruck (s. Abbildung 10) degressiv zur Zunahme der Reismasse (Jacke et al. 2008). Sie leisten dadurch einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung der Befahrbarkeit der Rückegassen und reduzieren durch Schlupf bedingte Bodenverschmierungen (Nemestothy 2009). Eliasson und Wästerlund (2007) berichten, dass erst eine fünfmalige Überfahrt über eine Reismatte die gleiche Bodenverdichtung mit sich bringt, wie eine einmalige Überfahrt ohne Reismatte.

Labelle und Jaeger (2012) schreiben dass bei 5 kg Reisig/m² im Laborversuch noch keine signifikante Druckminderung gegeben war. Jacke et al. (2008) berichten, dass für eine gute Reduktion des Bodendrucks eine Reismasse von 15 kg/m² erforderlich ist. Ab einer Masse von rund 15 - 20 kg Reisig pro m² nehme dabei die druckmindernde Wirkung nur noch wenig zu (Jacke et al. 2008).

Eine Reismasse von 15 kg/m² entspricht dabei rund 25 cm locker gelagerte Reishöhe. Da das Auslegen einer Reismatte auch zu einer verzögerten Abtrocknung des Bodens und bei einer sehr hohen Anreicherung von organischer Substanz wiederum zu erhöhter Rutschgefahr und verringerter Standsicherheit der eingesetzten Maschinen kommen kann, empfiehlt es sich nach aktuellem Stand des Wissens, die Höhe der Reismatte nicht höher als nötig anzulegen (BAFU 2016). Borchert (2015) und Dietrich (2011) heben hingegen die Wurzelschonung innerhalb der Rückegassen durch die Anlage von Reismatten hervor, welche besonders während der Vegetationszeit die Abtrocknung der Gassen begünstigt.



Abbildung 9: In der Rückegasse abgelegtes Kronenmaterial.

Quelle: ForstBW 2012a

In Bezug auf Nährstoffanreicherung innerhalb der Rückegassen und eventuelle Nährstoffverluste für den Bestand durch das Aufbringen von Reisigmatte, wurde in verschiedenen Untersuchungen festgestellt, dass die Nährstoffe, solange keine Bodenerosion gegeben ist, durch die in die Rückegasse einwachsenden Baumwurzeln, wieder in den Nährstoffkreislauf zurückgeführt werden (Stutz et al. 2015, Borchert et al. 2015). Im Sickerwasser wurden nur vereinzelt HotSpots mit erhöhten Nitratwerten nachgewiesen (Huber et al. 2011).

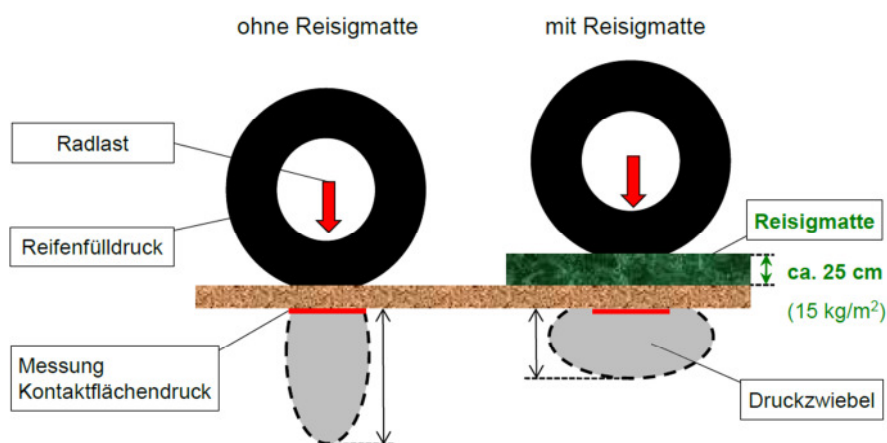


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Druckmindernden Wirkung einer Reisigmatte.

Quelle: Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern 2016

Tabelle 7: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Reisigauflage	(+)	(+)	(+)/(0)	(+)/(0)	(?)	(?)

Kosten/ Aufwand

Der Aufwand/ die Kosten werden als *niedrig* bis *mittel* eingeschätzt (Forbrig et al. 2010). Im Merkblatt ForstBW (2012a) werden sie mit 0,50 – 1,00 €/lfm. beziffert.

Bewertung

Das Anlegen einer Reisigauflage auf der Rückegasse ist ein akzeptiertes Verfahren, um eine gute Befahrbarkeit zu gewährleisten. Sie reduziert die Druckbelastung und kann einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung der Befahrbarkeit der Rückegassen leisten und Wurzelverletzungen sowie Bodenverschmierungen verringern (Dietrich 2011). Hinzu kommt ihre Wirkung zur Minderung von Erosionsschäden in Hanglagen sowie den hierdurch verringerten Schlammeintrag auf z.B. Waldwege. Letzters verbessert besonders das Erscheinungsbild des Waldes.

Die Wirksamkeit einer Reisigmatte ist dabei stark abhängig von ihrer Mächtigkeit und wird daher häufig unterschiedlich bewertet. Bei einer überschlägig geschätzten Restholzmenge (Nicht-Derbholz) von 5000 kg/ha (0,5 kg/m²) müsste das gesamte Restholz bis in 20 m Entfernung beidseitig zur

Rückegasse auf den Fahrstreifen (ohne Bedeckung der Mittelspur) konzentriert werden, um eine Auflage von 10 kg/m² zu erzielen. Reisigauflagen von 15 oder mehr kg/m² sind also nur punktuell erreichbar und nicht auf der ganzen Gassenlänge realisierbar. Weitere Kennzahlen zur Biomasse in Wäldern finden sich in Pretzsch et al. (2014). Selbst in Fichtenerstdurchforstungen bei vollständiger Konzentration der Reisigmasse auf der Gasse seien nur 6 bis 7 kg/ m² möglich (Nemestothy 2009). Epple (2017) berichtet, dass die Reisigauflagen bei Jungdurchforstungen ausreichend seien, in anderen Fällen eine Reisigaufgabe aber nur punktuell und mit Längstransport möglich sei.

Da der vorrangige Nutzen einer Reisigmatte jedoch der Erhalt der technischen Befahrbarkeit und nicht vorrangig der Bodenschutz ist, werden schon geringe Auflagenmächtigkeiten als hilfreich angesehen (ForstBW 2012b).

3.4.2 Auslegen von Ast- oder Stammholz (Derbholz)

Ziele

- Vorsorge gegen Spurbildung
- Stabilisierung bestehender Fahrspuren
- Aufrechterhaltung der Durchwurzelbarkeit und damit der Standsicherheit des angrenzenden Baumbestandes sowie des Wasserentzugs durch Pflanzenwurzeln.

Beschreibung

Stammteile und Astholz werden als sogenannte „Knüppeldämme“ oder „Stammholzmatten“ quer zur Rückegasse auf dieser ausgelegt (Abbildung 11).

Erwartete Wirkung

Die Wirkung soll derjenigen der Reisigaufgabe entsprechen (s. Punkt 3.3.5). Der durch Forstmaschinen ausgeübte Bodendruck soll durch die Überfahung der Stammholzmatten auf eine größere Fläche verteilt und dadurch in seiner Tiefenwirkung reduziert werden. Die Starrheit des Derbholzes kann das Überbrücken einer Fahrspurrinne ermöglichen, wenn die Auflage mächtig genug angelegt wurde.



Abbildung 11: In der Rückegasse abgelegtes Ast- und Stammholz zum Schutz des Bodens vor weiterer Spurbildung. Quelle: NLF 2015

Tabelle 8: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Auslegen von Ast- oder Stammholz	(+)	(+)	(+)/(0)	(+)/(0)	(?)	(?)

Kosten/ Aufwand

Der Aufwand/ die Kosten werden durch den logistischen Aufwand und die eventuell geringere Holz- ausbeute als hoch eingeschätzt (Forbrig et al. 2010).

Bewertung

Knüppel- und Derbholz unterscheidet sich von Reisig in seinen mechanischen Eigenschaften. Es ist weniger elastisch und liegt dem Boden mit geringerer Kontaktfläche auf. Für eine ausreichend deckende Stammholzmatte ist vermutlich eine größere Holzmenge (in kg) nötig, als für eine Reisigmatte. Zu sparsam ausgelegtes Derbholz auf der Rückegasse begünstigt bei Feuchtigkeit wahrscheinlich nur das Verkneten des Bodens. Es gibt aber unseres Wissens keine systematischen Untersuchungen über den Nutzen und die Wirkung von Derbholzaufgaben. Auf Grund des großen Holzbedarfs und Zeitaufwands lohnen sich Knüppeldämme nur, um kurze problematische Gassenabschnitte zu überwinden (Borchert et al. 2013). Ausgelegtes Stammholz wird der Vermarktung entzogen, sofern es am Ende der Holzernte nicht wieder geborgen wird (z.B. „Brückenstämme“).

3.5 Einbringen von Zusatzstoffen

3.5.1 Kalkung (dolomitisch)

Ziele

- Melioration des Bodengefüges
- Steigerung der biologischen Aktivität

Beschreibung der Maßnahme

Dolomitische Kalk wird mit einem Anbau-Kalkstreuer nur auf der Rückegasse ausgebracht (Abbildung 12). Die Kalkmenge sollte an einem für Regenwürmer günstigen Ziel-pH von pH 5 bis pH 5,3 ausgerichtet sein (Silkat-Pufferbereich). Es kann günstig sein, den Kalk vor der Befahrung



Abbildung 12: Ausbringung von kohlensaurem Kalk (12t/ha) auf einer Rückegasse im Solling (hier händische Ausbringung).

durch die Erntemaschinen auszustreuen, da dann durch die mit den Erntemaßnahmen verbundene Bodenstörung eine gewisse Einarbeitung erfolgt. Sonst empfiehlt es sich, die Kalkgabe mit einer Bodenperforation zu verbinden oder den Kalk durch Fräsen oder Schlitzen oberflächlich einzuarbeiten. Zur Meliorationskalkung eignen sich gemahlene, magnesiumreiche Düngelkalle (kohlensaure Kalke) mit einer hohen Depotwirkung, wie sie in der Kompensationskalkung von immissionsgeschädigten Wäldern eingesetzt werden.

Erwartete Wirkung

Durch die Einstellung des optimalen pH-Wertes in der Rückegasse in Bezug auf die chemischen, biologischen und physikalischen Parameter der Bodenentwicklung wird die natürliche Regeneration der Gasse erhöht (NW-FVA, 2010). Wirkungsmechanismen sind hier die Gefügestabilisierung durch zweiwertige Kationen, einhergehend mit einer Verbesserung der Porenverteilung und Porenkontinuität zur Regulierung des Bodenwasser- und Bodengashaushalts. Die Kalkapplikation eliminiert die Protonen- und Aluminiumtoxizität im Bearbeitungshorizont und gewährleistet eine ausgewogene Versorgung an basischen Makronährstoffen, insbesondere Calcium und Magnesium. Dies dürfte sich gerade

in der Anwuchsphase positiv auf das Wurzelwachstum und die bodenmikrobiologischen Umsatzprozesse auswirken. Im RÜWOLA Feldversuch wurde keine verstärkte Abtrocknung der gekalkten Versuchsvarianten beobachtet. Die CO₂-Gehalte in der Bodenluft in 6 cm Tiefe waren bei den ausschließlich gekalkten Varianten tendenziell eher höher, als in den ungekalkten Varianten, was mit gesteigerter Atmung und abiotischer CO₂-Produktion unter Kalkeinfluss zusammenhängen kann.

Tabelle 9: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Kalkung	(+)	(+)	?	?	+	+

Verbreitung der Anwendung

In Niedersachsen werden seit Anfang der 1980-er Jahre auf den sauren kalkungsbedürftigen Standorten Kompensationskalkungen innerhalb der Bestände durchgeführt. Eine zielgerichtete Ausbringung von Kalk auf Rückegassen zur Erhöhung ihres Regenerationspotentials findet bislang nicht statt.

Kosten

Eine Kostenschätzung für die Ausbringung von Kalk kann dem Merkblatt der NW-FVA (2010) entnommen werden. Je nach Verfahren der Kalkausbringung liegen die Kosten bei ca. 150 €/ha.

Abschließende Bewertung

Die Ausbringung von Kalk sollte in Verbindung mit einer bodenbearbeitenden Maßnahme geschehen, damit die chemischen, biologischen und physikalischen Wirkungen des Kalks auch in tiefere Bodenbereiche vordringen können. Der Kalk bleibt sonst nur an der Bodenoberfläche und fördert dort die Mineralisation der Streuauflage. Ein Voranschreiten der biologischen Aktivität in den verdichteten Mineralboden konnte im Feldversuch des RÜWOLA-Projekts in den nur oberflächlich gekalkten Varianten nicht beobachtet werden.

In allen bodensauren Wäldern ist seitens des Naturschutzes die Einbringung basischer Materialien untersagt – in Niedersachsen sogar beim Bau der A-Wege (Winkelmann et al. 2017). Es muss im Einzelfall geprüft und abgewogen werden, ob eine eventuelle Veränderung des Rückegassenbodens in einen standortuntypischen Säure-Pufferbereich hingenommen werden kann und von der Aufsichtsbehörde akzeptiert wird. Die Möglichkeit von Nährstoffverlusten durch übermäßige Mineralisierung ist ebenfalls in Betracht zu ziehen, wenn die Kalkung der Rückegasse von den Vorgaben der Forstlichen Versuchsanstalten zur allgemeinen Bodenschutzkalkung abweicht..

3.5.2 Kalkung (Branntkalk)

Ziele

- Erhöhung der Tragfähigkeit des Bodens in der Rückegasse
- kurzfristige Abtrocknung des Bodens durch Wasserbindung im Kalk (s. Abbildung 14).

Beschreibung der Maßnahme

In Verbindung mit der Sicherungsmaßnahme Egalisieren wird Branntkalk (Calciumoxid) in den Boden der Rückegasse zur Erhöhung der Tragfähigkeit eingearbeitet. Branntkalk wird hier als Bindemittel eingesetzt, welches langfristig den Boden verfestigt und ihn so vor klimatischen Einflüssen und vor weiterer Verformung durch Befahrung schützt.

Der Ablauf der Arbeiten für die Bodenverfestigung mit Branntkalk gliedert sich in:

- Vorbereitende Arbeiten (z.B. Egalisieren)
- Verteilen des Kalkes
- Einmischen des Kalkes in den Boden (z.B. mit Fräse, s. Abbildung 13)
- Nachverdichten des Boden-Kalk-Gemisches

Die Einbringung von Branntkalk kann auch mit einer Bodenperforation kombiniert werden. Dann werden statt der flächigen Einarbeitung nur die bei der Bodenperforation gestanzten Löcher mit Branntkalk ausgefüllt.

Bei der Bodenbehandlung werden folgende Kalke eingesetzt:

- Feinkalk (FK) – feingemahlener ungelöschter Baukalk nach DIN EN 459-1
 - Normbezeichnung: CL 90-Q, CL 80-Q (umgangssprachlich Weißfeinkalk - WFK)
Bezeichnung: Calciumoxid
 - Normbezeichnung: DL 85–30-Q, DL 80–5-Q (umgangssprachlich Dolomitfeinkalk)
Chemische Bezeichnung: Calciummagnesiumoxid
- Kalkhydrat (KH) – gelöschter Baukalk nach DIN EN 459-1
 - Normbezeichnung: CL 90-S, CL 80-S (umgangssprachlich Weißkalkhydrat)
Chemische Bezeichnung: Calciumdihydroxid

Als Anhaltswert der benötigten Kalkmenge kann von 2 – 8% Kalk, bezogen auf die Trockenmasse des Bodens, ausgegangen werden. Näheres hierzu ist dem Merkblatt des BVK (2004) zu entnehmen. Die Hinweise zum sicheren Umgang mit Kalk sind zu beachten.



Abbildung 13: Einarbeiten des Kalks auch auf kleinen Flächen. Quelle: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2004).

Erwartete Wirkung

Die Behandlung des Bodens mit Kalk führt zu einer Verfestigung, die sich über einen längeren Zeitraum erstreckt. Die entstehende Festigkeitszunahme ist nicht mit der von Beton vergleichbar, vielmehr äußert sich die Zugabe von Kalk in einer Frost- und Wasserbeständigkeit welche zu einer dauerhaften Tragfähigkeit führt (BVK 2004). Freies Wasser im Boden reagiert mit Calciumoxid und wird damit dem Boden entzogen („Kalk löschen“). Bei flächiger Einarbeitung des Branntkalks ist eine extreme Alkalisierung des Bodens auf Werte bis zu pH 10 mit negativen Effekten auf Pflanzenwurzeln, Nährstoffhaushalt und Bodenorganismen zu erwarten. Wurde der Branntkalk nur in die Löcher der Bodenperforation eingefüllt, beschränkt sich die Alkalisierung des Bodens auf die unmittelbare Nachbarschaft (2-5 mm) des Stanzlochs.

Tabelle 10: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden.

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Kalkung (Branntkalk)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)
Lochfüllung (Branntkalk)	(+)?	(+)?	(+)	(0)*	(0)*	(0)*

* Kurzfristig kann es zu erhöhten CO₂-Konzentration im Boden durch Kalkverwitterung kommen. Langfristig gesehen werden die regenerationsfördernden Maßnahmen durch einen fortschreitenden Verwitterungsprozess der Branntkalksäulen angeregt werden.

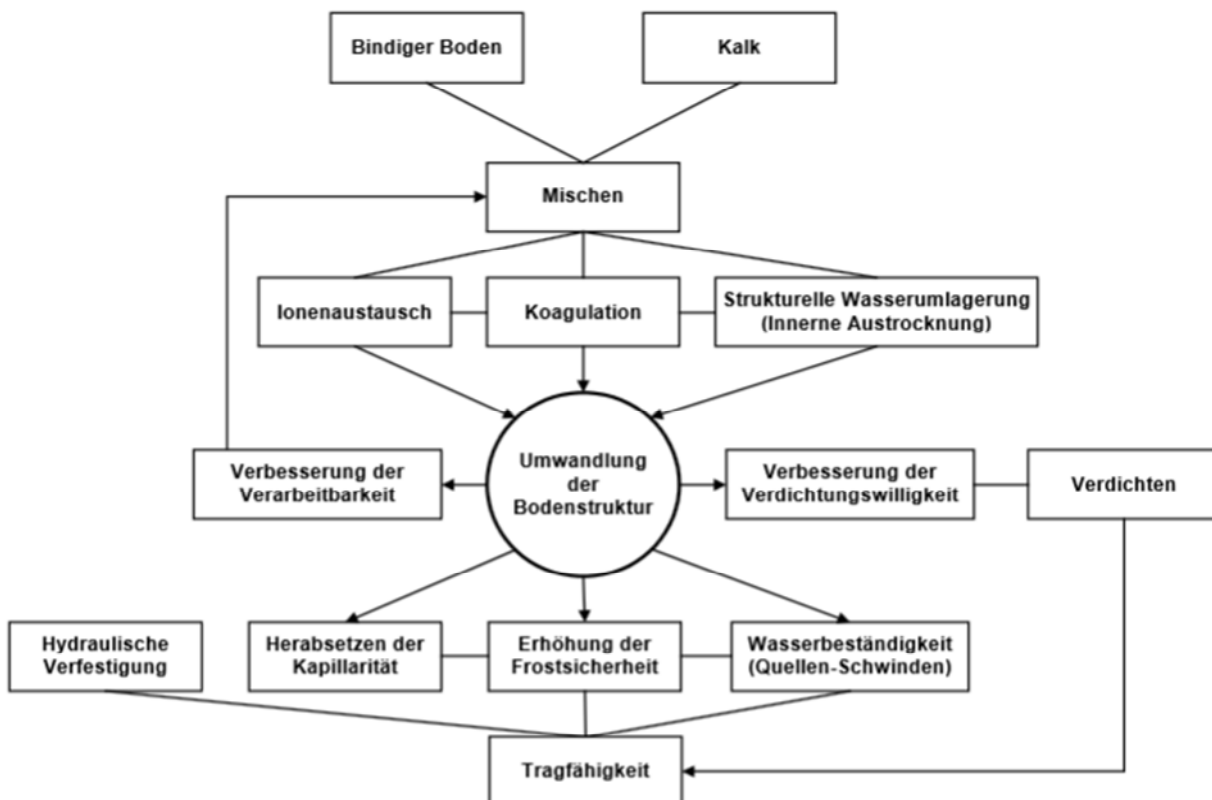


Abbildung 14: Wirkungsweise der Kalkstabilisation (nach Brand)

Quelle: BVK 2004

Verbreitung der Anwendung

Die Tradition der Bodenbehandlung mit Kalk reicht bis ins Altertum zurück. Heute wird die Verbesserung und Verfestigung mit Kalk unter anderem erfolgreich zur Stabilisierung von Böschungen und bei der Baugrundstabilisierung eingesetzt. Eine gezielte Ausbringung von Kalk auf Rückegassen zur Erhöhung ihrer Tragfähigkeit findet bislang nicht statt.

Der technische Ablauf ist nach sorgfältiger Eignungsprüfung des anstehenden Bodens, bei sachgerechter Durchführung unter Einsatz eines geeigneten Maschinenparks im Waldstraßenbau als problemlos zu bewerten (Dietz 1984).

Kosten

Kostenschätzungen für die Bodenverfestigung mit 2,5 M-% Kalk werden von dem BVK (b) mit folgenden Zahlen angegeben:

Kauf von Kalk frei Baustelle	3,60 €/m ³
Einmischen des Kalks	2,20 €/m ³
Einbau und Verdichten	2,00 €/m ³

Abschließende Bewertung

Die Kalkstabilisierung von Böden mit flächigem Einarbeiten ist im Tiefbau etablierte Praxis. Für die Anwendung im Forst dürfte sie dagegen zu aufwändig und wegen der pH-Wirkung bodenökologisch inakzeptabel sein. Die übergangsweise Verfestigung der Bodenoberfläche (gebundene Decke) dürfte die natürliche Begrünung zusätzlich behindern. Anders ist die Branntkalkfüllung von Löchern der Bodenperforation zu bewerten. Die Kalkmengen pro Fläche liegen dabei in der Größenordnung einer dolomitischen Waldkalkung. Auf der Solling-Versuchsfläche des RÜWOLA-Projekts deutete sich eine geringere Vernässung des Bodens in der Versuchsvariante Bodenperforation + Branntkalkfüllung an. Es besteht aber noch weiterer Forschungs- und Erprobungsbedarf. Eine bodenökologisch bedenkliche Alkalisierungswirkung tritt bei der Kombination Bodenperforation + Branntkalkfüllung nicht auf .

3.5.3 Aufbringen von Holzasche

Ziele

- Ausgleich für Nährstoffentzüge (bes. Calcium, Magnesium und Kalium)
- pH-Wertanhebung
- Steigerung der Nährstoffverfügbarkeit
- Steigerung der biologischen Aktivität
- Melioration des Bodengefüges
- Steigerung von Bodenteilfunktionen (BBodSchG): Lebensraum für Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen; Bestandteil des Naturhaushalts

Beschreibung der Maßnahme

Ausbringung von Waldholzasche in der Rückegasse.

Erwartete Wirkung

Die Wirkung von Aschen aus Waldbiomasse lässt sich durch den hohen Ca- und Mg-Gehalt gut mit einer Kalkung vergleichen: die Basenversorgung wird verbessert und der pH-Wert steigt deutlich an. Damit ist eine Gefügestabilisierung durch mehrwertige Kationen und eine Steigerung der Regenwurmaktivität zu erwarten. Gleichzeitig wird die Mineralisation und Nitrifikation gesteigert, wodurch es unter Umständen aber zu Verlusten von organischem Kohlenstoff und Stickstoff kommen kann. Dies ist insbesondere der Fall, wenn im Zuge von Durchforstungen zusätzliche Mineralisierungsschübe ausgelöst werden (Leitgeb und Mutsch, 2012).

Verbreitung der Anwendung

Die aktuelle Düngemittelverordnung (DüMV Stand 27.05.2015) lässt eine Ausbringung von Holzasche unter definierten Bedingungen und unter Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte zu. Hierbei ist es als kritisch anzusehen, dass in der DüMV mit Kennzeichnungsschwellen gearbeitet werden darf. Diese unterbinden eine exakte Berechnung der ausgebrachten Frachten an Nebenbestandteilen der Asche.

„Die Rückführung von Holzasche auf forstliche Flächen kommt in Frage, wenn mit der Maßnahme ein Nährstoffmangel behoben, oder die Bodenfruchtbarkeit erhalten oder wiederhergestellt werden soll. So ist z.B. die Zugabe von bis zu 30 % Asche aus Waldrestholz im Rahmen einer Bodenschutzkalkung gestattet. Eine Ertragsdüngung ist nach den Bestimmungen, denen die meisten Forstflächen unterliegen, dagegen nicht gestattet (PEFC, DFZR, 2005). ... Die Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) und die Bundesgütegemeinschaft Holzasche (BGH) haben eine Qualitätssicherung für Holzasche er-

Hintergrund

„Bei der Rückführung von Holzaschen auf forstliche Flächen dürfen die Grenzwerte nach Anlage 2 Tabelle 1.4 DüMV um bis zu maximal 50 % überschritten werden, wenn für die betreffenden Düngemittel im Rahmen der Hinweise für die sachgerechte Anwendung auf deren ausschließliche Verwendbarkeit auf forstlichen Standorten hingewiesen wird (§ 3 Absatz 2 Nr. 2 DüMV). ... Die Zuweisung des Abfallschlüssels 10 01 01 für nicht gefährliche Rost- und Kesselaschen ist für die Beurteilung der Einsatzmöglichkeit solcher Aschen in keinem Fall ausreichend. Zur Beurteilung der Verwertbarkeit in Düngemitteln ist eine Bewertungsanalyse der jeweiligen Asche erforderlich, in der die o.g. Schadstoffparameter der Anlage 2 Tabelle 1.4 DüMV abgeprüft werden. Eine Analyse ist nur anzuerkennen, wenn die zugehörige Probenahme repräsentativ und ordnungsgemäß durchgeführt und dokumentiert wurde. Die ordnungsgemäße Probenahme von Asche zur Bewertung ihrer Verwertbarkeit oder des sonstigen Entsorgungsweges erfolgt nach LAGA PN 98 [LAGA PN 98]. Da es für die Entsorgung von Aschen aus bestimmten Holzbrennstoffen Sonderregelungen gibt, sind neben dem Ort des Anfalls auch Informationen über die Zuordnung von Aschen zu eingesetzten Holzbrennstoffen erforderlich“ (BGK 2013).

richtet. Betreiber von Feuerungsanlagen, die Mitglied der BGH sind, können ihre Holzaschen der RAL-Gütesicherung Dünger unterstellen und mit dem RAL-Gütezeichen ausweisen (RAL-GZ 252). In der RAL-Gütesicherung Dünger können Holzaschen sowohl als Ausgangsstoff für Dünger als auch als Düngemittel qualifiziert werden“ (BGK 2013).

In den zurückliegenden Jahren hat sich bereits in Baden-Württemberg die Beimischung von Holzaschen als Ersatz für Rohphosphate und für beigemischtes Kaliumsulfat bei der Bodenschutzkalkung etabliert. Hierdurch werden im Zuge der Versauerungsgeschichte verloren gegangene bzw. in ihrer Verfügbarkeit eingeschränkte Nährstoffe zurückgeführt. Die Holzasche-Beimischungen werden nur dort eingesetzt wo in akuter oder latenter Form P- oder K-Mangel indiziert ist (v. Wilpert et al., 2011).

Kosten

Die Ausbringung von Asche kann angelehnt werden, an die Kostenschätzung für die Ausbringung von Kalk und ist dem Merkblatt der NW-FVA (2010) zu entnehmen. Hinzukommen Kosten für die Anschaffung und die Einmischung der Asche in den auszubringenden Kalk. Kostenreduzierend wirkt sich die Ascheanwendung aus, wenn sie als Ersatz für das kostenintensive Kaliumsulfat ausgebracht wird (ForstBW 2013).

Abschließende Bewertung

Die bisherigen Untersuchungen zum Einfluss von Holzasche auf Bodeneigenschaften konzentrieren sich auf chemische und mikrobiologische Aspekte. Eine Studie zur Auswirkung von Holzasche auf Bodenstruktur und Bodengefüge konnte bei der Literaturrecherche nicht gefunden werden. „Eine kontrollierte, ökologisch sinnvolle Rückführung von Holzasche setzt eine sachgerechte Ausbringung dieser Aschen voraus. Pflanzen- und Holzaschen gelten bis zum sachgerechten Einsatz in land- und forstwirtschaftlichen Kulturen als Abfall“ (Leitgeb und Mutsch 2012). Eine sachgerechte Verwendung von RAL-gütesicherten Produkten ist daher anzuraten.

Generell sind die Schadstoffgehalte in der Asche, der Nutzen für den Boden, die Bodenbeschaffenheit und die Grundwassergefährdung bei dem Einsatz von Aschen zu berücksichtigen (Schäfer, 2002).

Tabelle 11: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Kalkung	(+)	(+)	+	+	+	+

Maßnahmenkombination: Aussaat von krautigen Pflanzen, Anpflanzung von verholzenden Pflanzen, Lochstanzen, Oberflächennahes oder tiefreichendes Fräsen, Egalisieren.

3.6 Bepflanzung von Rückegassen

3.6.1 Ansaat (krautige Pflanzen)

Ziele

- Regeneration der Wurzelraumfunktion
- Erosionsschutz
- Steigerung von Bodenfunktionen laut BBodSchG (Natürliche Funktionen, Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung)
- Steigerung der Biodiversität
- Stabilisierung des Bodengefüges

Beschreibung der Maßnahme

Krautige Pflanzen werden in der Rückegasse ausgesät (s. Abbildung 15). Aus Gründen des zunehmenden Lichtmangels in der Gasse durch den aufwachsenden Bestand, empfiehlt es sich, die Aussaat in Jungbeständen oder Beständen mit geringem Baumholz mit einem räumigen bis lockeren Bestandschlussgrad vorzunehmen. Die Pflanzenauswahl ist entsprechend dem Verdichtungsgrad des Bodens sowie den Licht- und Wasserverhältnissen vorzunehmen.



Abbildung 15: Begrünung der Rückegasse mit einer Schattenrasenmischung („Schattenrasen Classic Green“ von Hega GmbH; ca. 25 g/m²).

Tabelle 12: Mögliche Auswahl krautiger Pflanzen zur Aussaat auf Rückegassen²

Botanischer Name	Deutscher Name	L	F	S
<i>Cardamine flexuosa</i>	Wald-Schaumkraut	6	8	5
<i>Carex remota</i>	Winkel-Segge	3	8	3
<i>Deschampsia cespitosa</i>	Rasenschmiele	6	7	3
<i>Geranium robertianum</i>	Stinkender Storchschnabel	4	x	7
<i>Impatiens noli-tangere</i>	Großblütiges Springkraut	4	7	6
<i>Isolepis setacea</i>	Borstige-Moorbinse	6	8	3
<i>Juncus effusus</i>	Flatterbinse	8	7	4
<i>Ranunculus repens</i>	Kriechender Hahnenfuß	6	7	x
<i>Rumex sanguineus</i>	Krauser-Ampfer	4	8	7
<i>Stachys sylvatica</i>	Waldziest	4	7	7

Zeigerwerte nach Ellenberg auf einer Skala von 1 (geringer Anspruch) – 9 (hoher Anspruch), Mit L = Lichtangebot, F = Feuchtezahl, S = Stickstoffzahl, x = indifferentes Verhalten

² Zusammengestellt nach EBRECHT 2005; GAERTIG & GREEN 2008; GLEISSNER et. al. 2012 in Marderwald 2012.

Erwartete Wirkung

Die Aussaat von krautigen Pflanzen in der Rückegasse bewirkt u.a. eine Zufuhr an ober- und unterirdischer organischer Substanz zur Verbesserung der Bodenstruktur und Nährstoffversorgung der Bodenflora und Bodenfauna (Feeney et al. 2006). Die Boden-/Vegetationsoberfläche selbst nimmt in Bezug auf die Abflussbildung eine Schlüsselstellung ein. Sie entscheidet häufig, ob das Wasser infiltrieren kann oder ob Oberflächenabfluss entsteht (BFW 2017). Durch einen hohen Bedeckungsgrad der Gasse wird besonders in Hanglagen die Gefahr der Bodenerosion gesenkt (LBEG 2015). Schon Wilhelm (1861) und Schumachers (1872) entdeckten, dass ein hoher Pflanzenbedeckungsgrad die Austrocknung der Bodenoberfläche durch Beschattung und Windschutz verlangsamt. Hierdurch wird die Infiltration und Verdunstung von Niederschlagswasser über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Als Folge bleibt die Oberfläche des Bodens länger feucht und die tieferen Bodenbereiche trocken stärker aus (Wilhelm 1861).

Verbreitung der Anwendung

Eine Ansaat von Rückegassen wird allgemein nur zur Erstellung von Wildäsungsflächen, nicht aber zielgerichtet zur Regeneration der Gassen durchgeführt. In den Freilandversuchen der Hochschule Osnabrück im Rahmen des Riwola-Projekts wurde, als Alternative zu den oft kostenintensiven Saatgutmischungen, eine Standardsaatmischung für Schattenrasen zur Gassenbegrünung verwendet (s. Abbildung 15). Eine Liste der geeignetsten krautigen (Tabelle 12) und verholzenden Pflanzen für die Restrukturierung verdichteter Böden in der Forstwirtschaft findet sich bei Marderwald (2012).

Kosten

In Abhängigkeit zur Auswahl der Pflanzen liegen die Kosten für Saatgut bei ca. 0,5 bis 1,5 € pro Laufmeter (Hornstein 2013).

Maßnahmenkombination:

Oberflächennahes oder tiefreichendes Fräsen, Egalisieren, Lochstanzen, Kalkung

Abschließende Bewertung

Jede Art der Bepflanzung fördert die biologische Regeneration von Rückegassen, da der Wasser- und Nährstoffhaushalt aus biologischer Sicht optimiert wird. Die Auswirkung auf die technische Befahrbarkeit ist differenziert zu betrachten, da sowohl die Infiltration von Niederschlagswasser aber auch die Evapotranspiration erhöht sind. Generell ist der Wasserhaushalt der Gasse mit einer Krautschicht als ausgewogener zu betrachten.

Tabelle 13: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Anpflanzung krautiger Pflanzen	(+) (ohne Saattbettvorbereitung)	(0)	+ gleichmäßig Feucht	+	+	+

3.6.2 Anpflanzung von Gehölzen

Ziele

- Regeneration der Wurzelraumfunktion
- Erosionsschutz
- Senkung der Verdichtungsempfindlichkeit bei Wiederbefahrung (Vorsorge + Sicherung)
- Zusätzliche Wertschöpfung durch energetische Nutzung
- Steigerung von Bodenfunktionen laut BBodSchG (Natürliche Funktionen, Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung)
- Steigerung der Biodiversität

Beschreibung der Maßnahme

Verholzende Pflanzen werden in die Mittelspur und/- oder in die Fahrspur der Rückgasse eingepflanzt. Aus Gründen des zunehmenden Lichtmangels in der Gasse durch den aufwachsenden Bestand, empfiehlt es sich, die Rückegassen in Jungbeständen oder Beständen mit geringem Baumholz mit einem räumigen bis lockeren Bestandschlussgrad zu pflanzen.

Die Pflanzenauswahl ist entsprechend dem Verdichtungsgrad des Bodens, den Lichtverhältnissen sowie einer eventuellen Nutzung als Energiepflanze vorzunehmen. Entsprechend der weiteren Nutzung der Gasse kann die Anpflanzung wie folgt genutzt werden:

- Ernte und Verwendung als Reisigmatte
- Ernte und energetische Weiterverwendung (Kurzumtrieb (plantage) KUP)

Tabelle 14: Mögliche Auswahl holziger Pflanzen zur Anpflanzung auf Rückegassen³

Botanischer Name	Deutscher Name	L	F	S
<i>Abies alba</i>	Weißtanne	3	X	3
<i>Alnus glutinosa</i>	Schwarzerle	5	9	3
<i>Betula pubescens</i>	Moor-Birke	6	8	3
<i>Frangula alnus</i>	Faulbaum	6	8	3
<i>Lonicera caerulea</i>	Blaue Heckenkirsche	5	8	2
<i>Prunus padus</i>	Traubenkirsche	5	8	6
<i>Prunus serotina</i>	Spätblühende Traubenkirsche	6	5	?
<i>Quercus robur</i>	Stiel-Eiche	7	x	X
<i>Salix fragilis</i>	Bruch-Weide	5	8	6
<i>Viburnum opulus</i>	Gewöhnlicher Schneeball	6	X	6

Zeigerwerte nach Ellenberg auf einer Skala von 1 (geringer Anspruch) – 9 (hoher Anspruch), Mit L = Lichtangebot, F = Feuchtezahl, S = Stickstoffzahl, x = indifferentes Verhalten

Die Spätblühende Traubenkirsche (*Prunus serotina*) stellt als stark invasive Art ein Problem in vielen Waldbeständen dar und ist deshalb zur Anpflanzung in Rückegassen nicht zu empfehlen.

³ Zusammengestellt nach EBRECHT 2005; GAERTIG & GREEN 2008; GLEISSNER et. al. 2012 in Marderwald 2012

Erwartete Wirkung

Die Anpflanzung von Gehölzen in der Rückegasse wirkt einer bestehenden Bodenverdichtung durch vielfältige Wirkungsmechanismen entgegen. Hierzu gehören u.a. die Zufuhr an ober- und unterirdischer organischer Substanz zur Verbesserung der Bodenstruktur und als Nahrungsquelle der Bodenflora und Bodenfauna. Ebenso wird die Erosions- und Verdichtungsanfälligkeit verringert. Laut Helal (1991) werden mit der Bildung von Wurzelgängen und der Schaffung kontinuierlicher Poren die Regenerationsvorgänge im Boden eingeleitet.

Tabelle 15: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Holzige Pflanzen	+	(+)	+	+	+	+

Verbreitung der Anwendung

Bei der Bepflanzung von Rückegassen handelt es sich bislang um kein in der Praxis etabliertes Verfahren. Ergebnisse liegen daher vorwiegend aus Untersuchungen zu wissenschaftlichen Zwecken vor. So wiesen Meyer et al. (2011) eine Förderung der Bodenregeneration durch die gezielte Anpflanzung von Schwarzerlen in verdichteten Fahrspuren nach. Freilandversuche der Hochschule Osnabrück im Rahmen des Rüdowla-Projekts zeigten, dass Jungpflanzen von Schwarz-Erle und Bergahorn besser in verdichteten Boden anwachsen können als die Rotbuche. Zu ähnlichen Ergebnis kommt Goronzi (2014). Hier zeigten die Schwarz-Erle und der Bergahorn in einem über vier Monate angelegten Versuch, dass sie ein größeres Vermögen besitzen, verdichtete Böden zu durchdringen, als dies bei Rotbuche und Weißtanne der Fall ist. Die Schwarz-Erle erreichte hier ihr gutes Durchdringungsvermögen jedoch nur bei ausreichend guten Lichtverhältnissen. Eine Liste der geeignetsten verholzenden Pflanzen für die Restrukturierung verdichteter Böden in der Forstwirtschaft (Tabelle 14) findet sich bei Marderwald (2012). Auch bei Flores Fernández et al. (2015) zeigten sich Grau-Erle und Rot-Erle bei einem Aufwuchsversuch auf Rückegassen, als vitaler gegenüber Faulbaum und Saalweide. Bei der Nutzung der Aufpflanzungen als Kurzumtriebsholz hat das Internationale Institut für Wald und Holz NRW (Münster) ein Zertifikat für den nachhaltigen Anbau von Agrarholz entwickelt. Das Zertifikat "Agrarholz nachhaltig angebaut" regelt ein umwelt- und klimafreundliches Anlegen, Bewirtschaften und Ernten dieser Flächen.

Kosten

Der „DLG-Standard zur Kalkulation einer Kurzumtriebsplantage“ (2012) erläutert in praxisgerechter Form alle erforderlichen Schritte zur sachgerechten Berechnung des Gewinnbeitrages einer KUP. Er enthält zudem Richtsätze für alle Bewirtschaftungsmaßnahmen einer Plantage. Die FVA Baden-Württemberg bietet außerdem einen KUP-Ernteplaner an (FVA-BW 2012). Jeder Interessierte hat hier die Möglichkeit, unter Berücksichtigung der eigenen betrieblichen Verhältnisse, Kalkulationen anzustellen und die erzielbaren Gewinnbeiträge abzuschätzen. Die standardmäßig im „KUP-Kalkulator“ hinterlegten Richtwerte des DLG-Standards können hierzu den eigenen betrieblichen Verhältnissen angepasst werden.

Maßnahmenkombination

Oberflächennahes oder tiefreichendes Fräsen, Egalisieren, Lochstanzen, Kalkung

Abschließende Bewertung

Untersuchungen zeigen, dass die Bepflanzung verdichteter Fahrspuren mit Schwarz-Erlen die Regeneration der Bodenstruktur stark fördern kann. Bei Meyer et al. (2011) war nach sieben Jahren Baumwachstum die physikalischen Bodeneigenschaften bis in 30 cm Tiefe weitestgehend regeneriert. Im Boden darunter braucht die Regeneration hingegen mehr Zeit.

Die Option Rückegassen zur Gewinnung von Energieholz zu nutzen, stellt eine interessante, bis lang aber nicht erprobte zusätzliche Nutzung dar.

Schwarzerlen und andere den Boden regenerierende Gehölze lassen sich nur an ausreichend besonnten Standorten wie Sturmwurf- oder Kahlschlagflächen einsetzen. Bei Rückegassen im geschlossenen Bestand reicht das Lichtangebot nicht aus. Ein weiteres Problem in artenarmen Altersklassenwäldern (bes. Buche und Fichte) kann eine Schädigung durch Schalenwild sein (Verbiss, Fegen)), was eventuell zusätzliche Schutzmaßnahmen nötig macht.

3.7 Einbringen von Regenwürmern

Ziele

Den Mineralboden besiedelnde Regenwürmer sollen in der Rückegasse etabliert werden und durch ihre Grabaktivität biogene Grobporen schaffen, die

- die Belüftung verbessern
- als Wurzelkanäle dienen
- eine günstigere Bodenstruktur schaffen durch Kotausscheidung und Einarbeitung von Streu
- Infiltration erhöhen

Beschreibung der Maßnahme

Das gezielte Ausbringen von Regenwürmern im Forst wurde bisher ausschließlich versuchsweise durchgeführt (z.B. Makeschin 1991). Dabei wurde auf verschiedene Weise vorgegangen. Als wenig effektiv zeigte es sich, Regenwürmer auf der Bodenoberfläche in großer Anzahl auszusetzen, die sich anschließend eigenständig in den Boden eingraben sollen. Das Eingraben kann durch vorgestochene Löcher beschleunigt werden (Judas et al. 1997). Eine zusätzliche Gabe von Kompost erhöht die Ansiedlungswahrscheinlichkeit. In England wurde eine „Inoculation-Unit“-Methode entwickelt, bei der die anzusiedelnden Regenwürmer zuerst in Säcken mit Kultursubstrat vermehrt werden und anschließend die mit Regenwürmern angereicherten Säcke in den Boden des zu beimpfenden Standorts eingebracht werden (Butt et al. 1997). Eine weitere Methode stellt das Übertragen von Boden von Standorten mit hoher Besiedlungsdichte dar. Von einem regenwurmreichen Grünlandstandort können Grassoden übertragen werden. Graefe und Beylich vermehrten endogäische Würmer in einem ehemaligen Acker durch Mulchen. Der Ah-Horizont des Ackers wurde anschließend mit dem Radlader auf Miststreuer gebracht und in Verbindung mit einer Kalkung im Wald ausgestreut. Die Ansiedlung von *Aporrectodea caliginosa* konnte nachgewiesen werden (Beylich 1993). Die Übertragung von Bodensubstrat ist wenig erfolgversprechend für die Ansiedlung tiefgrabender (anecischer) Regen-

würmer wie *Lumbricus terrestris* (Tauwurm), da diese sich in tiefere Bereiche ihres Baus zurückziehen können und bei der Bodenentnahme nur unvollständig erfasst werden.

Grundsätzlich kann das Einbringen von Regenwürmern nur dann auf Dauer erfolgreich sein, wenn die Ansprüche der Tiere an das chemische Milieu (pH-Wert) und die Nahrungsqualität (Zersetzbarkeit der Laubstreu) erfüllt sind.

Erwartete Wirkung

In Ackerböden können Regenwürmer Bodenverdichtungen innerhalb von ein bis zwei Jahren wieder auflockern (Capowiez et al. 2009, Dörmann pers. Mitteilung 2016). Regenwürmer verbessern zudem die Humusform und fördern die Durchwurzelung des Mineralbodens. Sie verbessern die Lebensbedingungen für die übrige Bodenmakrofauna. Von Regenwürmern besiedelte Böden sind deshalb auch für bodenwühlende Säugetiere (Wildschweine, Maulwürfe) besonders attraktiv. Eine starke synergetische Wechselwirkung zwischen Regenwurm- und Wurzelaktivität in verdichteten Bodenzonen ist wahrscheinlich.

Tabelle 16: Bewertung der erwarteten Wirkung auf wesentliche Eigenschaften und Prozesse im Waldboden

Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung
Regenwurmausbringung	+	(-/+)	(+)	(+)	(+)	(+)

Verbreitung der Anwendung

Das gezielte Ausbringen von Regenwürmern im Forst wurde bisher in der Regel zur Stabilisierung von Kalkungsmaßnahmen untersucht. Ein Versuch zur Regeneration der Bodenstruktur in Rückegassen, mit Hilfe von Regenwürmern wurde bisher lediglich von Ampoorter et al. (2011) vorgenommen. Im Rahmen des RÜWOLA-Projekts (TP5) wurde Regenwurmansiedlung in Kombination mit Bodenperforation untersucht (Müller-Inkman, Dissertationsvorhaben).

Kosten

Die Kosten einer Regenwurmausbringung sind grundsätzlich als hoch anzusetzen. Sie setzen sich aus folgenden Arbeitsschritten zusammen: Eignungsbegutachtung des Standorts, Gewinnung / Beschaffung der anzusiedelnden Regenwürmer, Ausbringungskosten, (wünschenswert: Erfolgskontrolle). Eine jeweils situationsspezifische Auswahl der Verfahrensweise und Kostenkalkulation ist erforderlich.

Abschließende Bewertung

Waldböden mit Moderhumusformen und pH-Werten unterhalb pH 4 sind für die im Mineralboden lebenden Regenwürmer suboptimale Standorte. Höhere Siedlungsdichten erreicht diese Gruppe der Regenwürmer an kraut- und basenreicheren Sonderstandorten im Wald, z.B. an Wegrändern oder in Zonen, wo leicht zersetzbare Laubstreu anfällt (Esche, Erle, Bergahorn und andere Edellaubhölzer). Es ist sehr wahrscheinlich, dass Regenwürmer von diesen Stellen in relativ kurzer Zeit (1-2 Jahre) in Rückegassen einwandern können, wenn sie dort ein Nahrungsangebot und akzeptable pH-Werte vorfinden. Die Verdichtung des Bodens spielt als Besiedlungshindernis wahrscheinlich eine untergeordnete Rolle. Vor diesem Hintergrund ist das kostenträchtige gezielte Einbringen von Regenwürmern in Rückegassen in der Regel nicht zu rechtfertigen.

4 Zusammenfassung der Maßnahmen (Tabellarisch)

Tabelle 17: Zusammenfassung der Maßnahmen.

	Maßnahme	Baumwurzeln	Tragfähigkeit	Bodenwasser	Bodenluft	Fauna	Gefügebildung	Verbreitung	Kosten	Einsatzbereich
1.	Entwässern	(+)	(+)	(+)	(+)	?	?	+	- bis +	V, S
2.	punktueller Befestigung	?	+	?	?	?	?	+	- bis +	V, S
3.	Egalisieren	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	+	1-2 €/lfm	S
4.	Mulchen	(+)/-	(0)	(0)	(+)	(+)	(+)	+	0,2 – 1,2 €/lfm	S
5.	Bodenperforation	(+)	(+)	(- bis +) ⁴	(- bis +) ⁴	(+)	(+)	0		S, R
6.	Reisigaufträge	(+)	(+)	(+)/(0)	(+)/(0)	(?)	(?)	+	0,5 – 1,0 €/lfm	V
7.	Ast- o. Stammholz	(+)	(+)	(+)/(0)	(+)/(0)	(?)	(?)	-	+	V
8.	Kalkung dolomitisch	(+)	(+)	?	?	+	+	+	0,1 €/lfm	V, R
9.	Kalkung Branntkalk ⁵	- bis +	+	+	+ bis 0	- bis 0	+ bis 0	0		S
10.	Holzasche	(+)	(+)	+	+	+	+	-	s. Maßnahme 8 ⁶	R
11.	Ansaat krautige Pfl.	(+) ⁷	(0)	+ gleichmäßig Feucht	+	+	+	-	0,5 bis 1,5 €/lfm	S, R
12.	Anpflanzung Gehölze	+	(+)	+	+	+	+	-	Kalkulationsstool	S, R
13.	Regenwürmer	+	(-/+)	(+)	(+)	(+)	(+)	-	+	R

Einsatzbereich: V = Vorsorge; S = Sicherung; R = Regeneration. Die Menge der Klammern macht deutlich, dass eine Vielzahl von Wirkungen in **Verbreitung/ Kosten**

+ verbreitet/ hohe Kosten

- wenig verbreitet oder in Erprobungsphase/ geringe Kosten

0 nicht erprobt/ nicht bekannt

Maßnahmenbewertung

+ positiver Effekt

- Negativer Effekt

0 kein Effekt

? Wirkung unbekannt

() ohne wissenschaftlichen Nachweis

⁴ Da viele Prozesse im Boden sehr langsam ablaufen, können hier noch keine endgültigen Aussagen getroffen werden.

⁵ je nach Methode flächig oder Stanzlöcher, s. Text

⁶ Zusätzlich: Kosten für Beschaffung und Einmischung; Abzüglich der Kosten für eine Kaliumdüngung

⁷ ohne Saatbettvorbereitung

5 Quellenangaben

Ampoorter, E., Schrijver, A. de, Frenne, P. de, Hermy, M., Verheyen, K. (2011): Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecol Eng* 37:1734–1746.

BAFU, Bundesamt für Umwelt (2016): Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bern.
<http://www.wsl.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/PhysikalischerBodenschutzImWald.pdf> (Zugriff 20.03.2017).

BVK (a), Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V.(2004): Bodenverbesserung, Bodenverfestigung mit Kalk. Köln. <http://www.kalk.de/news/news-seiten/bodenverbesserung-bodenverfestigung-mit-kalk/> (Zugriff 03.04.2017).

BVK (b), Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V: Bodenverfestigung mit Kalk – Einfach und effektiv. Internetseite. <http://www.kalk.de/rohstoff/einsatzgebiete/bauwirtschaft/einfach-und-effektiv/> (Zugriff 07.04.2017).

Beylich, A. (1993): Untersuchungen zu Annelidenfauna meliorierter Waldbodenparzellen bei Geesthacht (Kreis Herzogtum Lauenburg) - Ein Beitrag zur Bewertung von Pflegemaßnahmen mit Hilfe der Bodenfauna. Diplomarbeit am Fachbereich Biologie der Universität Hamburg.

BFW, Bundesforschungszentrum für Wald: Zusammenspiel von Vegetation & Abfluss.
<https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=5753> (Zugriff 03.04.2017).

BGK, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.(2013): Verwertung von Holzaschen auf Flächen. Themenpapier der BGK.
https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Themen_Positionen/5.3.2_Thema_Verwertung_von_Holzaschen_2013-final_titel.pdf (Abruf 30.03.2017).

Borchert, H., Huber, C., Goettlein, A., Kremer, J. (2015): Nutrient Concentration on Skid Trails under Brush-Mats - Is a Redistribution of Nutrients Possible? *Croatian Journal of Forest Engineering* 36(2):243-252. <http://hrcak.srce.hr/151786> (Zugriff 17.02.2017).

Borchert, H., Kremer, J., Huber, C. L. (2013): Schutz des Waldbodens beim Einsatz von Forstmaschinen. Erschienen in *Wald und Nachhaltigkeit, Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Wissen 72*, Freising.
https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/w72_wald_und_nachhaltigkeit_gesamthef_bf_gesch.pdf (Zugriff 29.03.2017).

Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P., Ranger, J. (2014): Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short - term recovery. *Geoderma* 217 – 218, 10 - 17.

Butt, K.R., Frederickson J., Morris, R. M. (1995): An earthworm cultivation and soil inoculation technique for land restoration. *Ecol Eng* 4:1–9.

DFZR - Deutscher Forst-Zertifizierungsrat, PEF C-Standards für Deutschland vom 19.01.2005, geändert am 11.01.2006. PEFC Deutschland e.V., Danneckerstr. 37, D - 70182 Stuttgart. Website: www.pefc.de.

Dietz, P., Knigge, W., Löffler, H. (1984): Walderschließung. Parey. Hamburg, Berlin. 426 S.

Dietrich, K. (2011): Auswirkungen einer Reisigauflage auf die Bodenfeuchte einer Rückegasse. Masterarbeit an der Technischen Universität Dresden.

<https://forschungsinfo.tu-dresden.de//detail/abschlussarbeit/21085> (Zugriff 17.02.2017).

DLG, Deutsche Landwirtschaft Gesellschaft (2012): DLG-Standard zur Kalkulation einer Kurzumtriebsplantage. DLG-Merkblatt 372.

http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/merkblaetter/dlg-merkblatt_372.pdf (Zugriff 06.07.2014).

DüMV, Düngemittelverordnung (2012, Version vom 27.05.2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2015 Teil I Nr. 21, ausgegeben zu Bonn am 5. Juni 2015.

Ebrecht, L. (2005): Vegetation, Standortverhältnisse und Ausbreitungsbiologie von Pflanzen auf Rückegassen und Waldwegen im Göttinger Wald und im Solling. 1. Aufl., Göttingen/ Cuvillier.

Eliasson, L., Wasterlund, I. (2007): Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *Forest Ecology and Management*, 252(1):118-123.

Feeney, D., Crawford, J. W., Daniell, T. J., Hallett, P. D., Nunan, N., Ritz, K., Rivers, M., Young, I. M. (2006): Three-dimensional microorganization of the soil-root-microbe system. *Microbial Ecology* 52, 151-158.

Flores Fernández, J. L., von Wilpert, K., Schäffer, J., Hartmann, P. (2015): Growth and establishment of woody subsidiary plants for regeneration of compacted soils. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 186. Jg., 7/8.

Forbrig, A., Hofman, R., Seeling, U. (2010): Bodenschonende Holzernte. Abschlussbericht zum Auftrag der FCK (Forstchefkonferenz) an das KWF. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.v., Groß-Ulmstadt.

ForstBW, Forst Baden-Württemberg (2012a) Merkblatt – Bauliche Maßnahmen zur Erhaltung der technischen Befahrbarkeit der Rückegassen.

http://www.forstbw.de/fileadmin/forstbw_infothek/forstbw_praxis/ForstBW_PRAXIS_Bauliche_Maßnahmen.pdf (Zugriff 04.04.2017)

ForstBW, Forst Baden-Württemberg (2012b): Konzept zur Sicherstellung der dauerhaften Funktionsfähigkeit von Rückegassen für den Landesbetrieb ForstBW – Bodenschutz und forsttechnische Befahrbarkeit. Eigenverlag.

http://www.faz-mattenhof.de/fileadmin/faz/pdf/Rueckegassenkonzept_ForstBW.pdf (Zugriff 17.02.2017).

ForstBW, Forst Baden-Württemberg (2013): Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung. Merkblatt 54/2013, Freiburg. http://www.fva-bw.de/publikationen/merkblatt/mb_54.pdf (Zugriff 07.04.2017)

FVA-BW, Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg (2012): KUP-Ernteplaner. www.fva-bw.de/forschung/wn/kup_ernteplaner_fva_1_1.xlsx (Zugriff 03.04.2012).

Gaertig, T., Green, K., (2008): Waldbodenvegetation als Weiser für Bodenstrukturstörungen. AFZ- Der Wald 6: S. 300-301 und in Abschlussbericht - Entwicklung und Praxiserprobung eines Testkits zur Lokalisierung bodenmechanisch vorbelasteter Bodenareale von Forststandorten und die Einbeziehung dieser Fahrlinien in zukünftige Konzepte der Waldpflege und Holzernte.

Gleissner, F., Otten, T., Uehre, P., (2012): Expertenbefragung.

Goutal, N., Boivin, P., Ranger, J. (2012): Assessment of the Natural Recovery Rate of Soil Specific Volume following Forest Soil Compaction. *Soil Science Society of America Journal*. doi:10.2136/sssaj2011.0402.

Goutal, N., Renault, P., Ranger, J. (2013): Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France. *Geoderma* 193–194, February 2013, Pages 29–40. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.012>

Goronzi, K. (2014): Prüfung des Potentials von vier Baumarten zum Erschließen von Bodenverdichtungen unter Schattenbedingungen – Validierung eines Versuchsdesigns. Masterarbeit an der Hochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur.

Guertal, B., Han, D. (2002): Does aerification help solve compaction problems? *TurfGrass Trends*, February 2002, T4-T10.

Hildebrand, E.E. (1987): Die Struktur von Waldböden - ein gefährdetes Fließgleichgewicht. In: *AFZ /Der Wald* 16/17, S. 424–426.

Helal, H. M. (1991): Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. *Zeitschrift zur Pflanzenernährung Bodenkunde* 154, 403–407.

Hoffman, Benjamin S. S.; Anderson, Robert S. (2014): Tree root mounds and their role in transporting soil on forested landscapes. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 39 (6), S. 711–722. DOI: 10.1002/esp.3470.

Horn, R., Smucker, A. (2005): Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. In: *Soil and Tillage Research* 82 (1), S. 5–14. DOI: 10.1016/j.still.2005.01.002.

Hornstein, S. (2013): Konzept zur praktischen Umsetzung einer Bepflanzung/ Einsatz von Rückegassen mit dem Ziel, die technische Befahrbarkeit zukünftig zu erhalten. Bachelorarbeit an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.

http://institut-waldarbeit.de/uploads/media/R%C3%BCckegassenbepflanzung_-_Hornstein.pdf (Zugriff 03.04.2017).

Huber, C., Weis, W., Göttlein, A., Borchert, H., Kremer, J., Matthies, D. (2011): Die Rückegasse - ein Holzweg für eine nachhaltige Nährstoffversorgung der Wälder? 15. Statusseminar des Kuratoriums für forstliche Forschung; Freising. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/forschungsprojekte/dateien/kurzfassung_vortraege_statusseminar_2011.pdf (Zugriff 17.02.2017).

Huhta, V. (1979): Effects of liming and deciduous litter on earthworm (Lumbricidae) populations of a spruce forest, with an inoculation experiment on *Allolobophora caliginosa*. *Pedobiologia* 19:340-345.

Lüscher, P., Frutig, F., Sciacca, S., Spjevak, S., Thees, O. (2009): Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Merkblatt Praxis 45: 12 S. ISSN 1424–2876.

Jacke, H., Brokmeier, H., Sengpiel, A. (2008): PrAllCon-Slash: Druckverteilung von Forstreifen unter Reisigarmierung. ifa-Mitteilungen Reihe A, Heft 5.

Judas, M., Schaueremann, J., Meiwes, K. (1997): The inoculation of *Lumbricus terrestris* L. in an acidic spruce forest after liming and its influence on soil properties. *Soil Biol Biochem* 29:677–679.

Labelle, E. R., Jaeger, D., Poltorak, B. J. (2015): Assessing the Ability of Hardwood and Softwood Brush Mats to Distribute Applied Loads, *Croatian Journal of Forest Engineering* 36: 227–242. <http://hrcak.srce.hr/file/223303> (Abruf 03.04.2017).

LAGA PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen LAGA PN 98 - Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien, Stand 2001. (Eingeführt in BW (GABl. 2004 S. 39), He (StAnz. 2003 S. 2288 gültig bis 31.12.2013 gem. Stanz 51/2008 S. 3422).

LBEG, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2015): Bodenerosion. http://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/landwirtschaft/bodenerosion/bodenerosion-605.html (Zugriff 03.04.2017).

Leitgeb, E., Mutsch, F. (2012): Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Holzasche in Wäldern. *BFW-Praxisinformation* 28:13 – 14. http://www.waldwissen.net/wald/boden/bfw_grenze_holzasche/index_DE?dossierurl=http://www.waldwissen.net/dossiers/bfw_holzasche/index_DE (Zugriff 29.03.2017).

Makeschin, F. (1991): Experimentelle Untersuchungen zur Besiedelung anthropogen devastierter, saurer Waldböden mit leistungsfähigen Lumbriciden. Habilitationsschrift. Ludwigs-Maximilians-Universität, München. Akad. Verlag, München. 197 p.

Marderwald, K. (2012): Eignung krautiger und verholzender Pflanzen für die Resstrukturierung verdichteter Böden in der Forstwirtschaft. Bachelorarbeit Produktionsgartenbau, Hochschule Osnabrück
Meyer, C., Lüscher, P., Schulin, R. (2011): Verdichteten Boden mit Schwarzerle regenerieren? In Wald und Holz 10/11, S. 40-43

Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt Thüringen (2010): Bodenschutz und Walderschließung – Leitfaden für den Praktiker.
<http://apps.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1050.pdf> (Zugriff 04.04.2017)

Nemestothy, N. (2009): Boden unter Druck – sind Bodenschutz und Holzernte vereinbar? BFW-Praxisinformation 19, 9 – 13.
http://www.waldwissen.net/technik/holzernte/boden/bfw_bodenschutz/index_DE/printerfriendly?
(Abruf 17.07.2017).

Winkelmann, P., Stüber, V., Jensen, T. (2017): Maßnahmen zur Sicherung und zur Regeneration von Bodenfunktionen in Rückegassen - Ergebnisse aus dem Projekt „RÜWOLA“; Mai 2017, Vermerk vom 15.05.2017..

NLF; AG Bodenschutz der Niedersächsische Landesforsten (2015): Bodenschutz bei der Holzernte in den Niedersächsischen Landesforsten. Merkblatt.
https://www.landesforsten.de/fileadmin/doku/Ausschreibungen/2015_Ausschreibungen/Merkblatt_Bodenschutz_28042015.pdf (Zugriff 17.02.2017).

Nordfjell, T., Östlund, A. (2015): Forwarding on soft soils, comparison of rutting with and without wooden bridge sections. Proceedings of the 48th FORMEC Symposium 2015
Oct 4 - 8, 2015, Linz, Austria. Siehe auch:
https://www.formec.org/images/proceedings/2015/A2_4_Nordfjell_2015_101.pdf
(Zugriff 08.05.2017)

NW-FVA, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (2010): Merkblatt-Bodenschutzkalkung.
https://mule.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/MLU/Master-Bibliothek/Landwirtschaft_und_Umwelt/F/Merkblatt_Bodenschutzkalkungen_fuer_Niedersachsen_und_Sachsen-Anhalt.pdf (Zugriff 17.02.2017).

Pampe, A. (2017): Schriftliche Mitteilung vom 28.04.2017. Niedersächsisches Forstamt Reinhausen.

Stutz, K. P., Schack-Kirchner, H., Kändler, G., Lang, F. (2015): Phosphorus in accumulated harvest residues on skid trails. Forest Ecology and Management, Volume 356, 15 November 2015, Pages 136–143, Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.025>

Pretzsch, H., Block, J., Dieler, J., Gauer, J., Göttlein, A., Moshhammer, R., Schuck, J., Weis, W., Wunn, U. (2014): Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen.). Allg. Forst- u. J.-Ztg., 185. Jg., 11/12.

http://waldwachstum.wzw.tum.de/fileadmin/publications/2014_Pretzsch_et_al_Naehrstoffentzuege_durch_die_Holz-und_Biomassenutzung.pdf (Abruf 08.05.2017).

Prinoth: Vegetation Management.

<http://www.prinoth.com/Vegetation-Management/Anwendungen/R%C3%BCckegassen-und-Erschlie%C3%9Fung> (Zugriff 10.02.2017)

PEFC - Pan-European Forest Certification, PEFC Deutschland e.V., Danneckerstr. 37, D - 70182 Stuttgart. Website: www.pefc.de.

Schäfer, C. (2002): Abfallrechtliche Aspekte der Holzascheverwertung und -beseitigung. In: Holzasche-Ausbringung im Wald, ein Kreislaufkonzept. FVA-Kolloquium, in Freiburg vom 5. bis 6. März 2002, Berichte, Freiburger Forstliche Forschung Heft, 43, S. 31-38. Online-Version 13.03.2012. http://www.waldwissen.net/wald/boden/fva_holzasche_abfallrecht/index_DE (Abruf 30.03.2017)

Schumacher, W. (1872): Der Einfluss der Bodenbedeckung auf die Feuchtigkeit des Bodens. Frühlings Landw. Z. 1872, 604.

Sparrer, J. (2017): Auswirkungen von Bodenperforation und Kalkung auf Bodeneigenschaften von Rückegassen in einem Buchenbestand des Sollings. Masterarbeit im Studienfach Boden, Gewässer, Altlasten, Hochschule Osnabrück und Universität Osnabrück.

Troedsson, T., Lyford, W. H. (1973): Biological disturbance and small-scale spatial variations in a forested soil near Garpenberg, Sweden. Biologiska oregelbundenheter inom små ytor som orsak till variabiliteten i några av skogsmarkens egenskaper i Garpenberg. Studia Forestalia Suecica Nr. 109, Stockholm: Royal College of Forestry.

Wilhelm, G. (1861): Boden und das Wasser. Wien.

v. Wilpert, K. (2015): Restriktionen zum Einbringen von Materialien in Waldböden. Tagungsband Forum Boden-gewässer-Altlasten der Hochschule Osnabrück und Universität Osnabrück. <https://www.mabga.de/de/forschung-internationales/forschungsprojekte-forum/#c1276112> (Zugriff 26.06.2017).

v. Wilpert, K., Bösch, B., Bastian, P., Zirlewagen, D., Hepperle, F., Holzmann, S., Puhmann, H., Schäfer, J., Kändler G., Sauter U.H. (2011): Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 87.155 S.