



Einfluss der Waldbewirtschaftung auf bodenökologische Prozesse

Im BiCO₂-Projekt untersuchte ein Teilvorhaben den Einfluss der Waldbewirtschaftung auf bodenökologische Prozesse. Dazu wurden auf insgesamt 200 Flächen in vier Untersuchungsgebieten umfangreiche bodenphysikalische, -chemische und mikrobiologische Analysen sowie Humusformenbeschreibungen durchgeführt. Neben dem Einfluss der Waldnutzungsintensität auf den Boden im Bestand stand die Untersuchung von Rückegassen im Fokus.

TEXT: THERESA KLEIN-RAUFHAKE, JENS SCHAPER, NORBERT HÖLZEL, UTE HAMER

Wälder und ihre Böden spielen eine entscheidende Rolle für die Erhaltung der biologischen Vielfalt und somit für die Anpassungsfähigkeit und Stabilität von Waldökosystemen. Böden bestehen aus Mineralien, organischem Material, Wasser, Luft und lebenden Organismen und werden wegen Letzteren auch als der belebte Teil der oberen Erdkruste definiert. Insekten, Würmer, Pilze und Bakterien übernehmen auf verschiedenen Ebenen ganz vielfältige Funktionen im (Wald-)Boden. Regenwürmer sind regelrechte Ökosystemingenieure, die durch ihr Graben ganz wesentlich zum Erhalt der Bodenstruktur und des Porensystems beitragen. Springschwänze, bis zu 17 mm große Gliederfüßer, zersetzen Pflanzenmaterial und durchlüften den Boden. Mikroorganismen, also Pilze, Bakterien und andere Einzeller mit einer Größe kleiner als 0,1 mm, spielen eine Schlüsselrolle im Nährstoffkreislauf des Waldes. Als Hauptakteure bei der Zersetzung von organischem Material sind sie verantwortlich für die Freisetzung von pflanzenverfügbaren Nährstoffen. Darüber hinaus tragen sie zur Stabilisierung des Kohlenstoffs im Boden bei und dienen anderen Bodenlebewesen wie Springschwänzen und Regenwürmern als wichtige Nahrungsquelle.

Veränderung bodenökologischer Parameter entlang des ForMIs

Detailliertere Untersuchungen, inwieweit Nährstoffkreislauf und Mikrobiologie im Oberboden durch die forstliche Bewirtschaftung beeinflusst werden, sind bis dato rar. Das BiCO₂-Projekt wid-

met sich daher nicht nur bodenphysikalischen und bodenchemischen Analysen, sondern untersucht auch mikrobiologische Parameter. Hierfür wurden auf insgesamt 200 Flächen in vier Untersuchungsgebieten [1] Humusformen beschrieben und für Laboranalysen Bodenproben aus dem mineralischen Oberboden (0 bis 5 cm Tiefe) entnommen. Um den Einfluss der Waldnutzungsintensität (gemessen als ForMI = Intensität der

Waldbewirtschaftung, vgl. Wöllecke [1] in dieser Ausgabe) unabhängig von standortspezifischen Effekten herauszuarbeiten, wurden statistische Modelle erstellt, die neben dem ForMI auch Bodenfeuchte, Bodenart und Untersuchungsgebiet als erklärende Variablen berücksichtigen.

Unsere Forschungsergebnisse zeigen, dass die Zersetzung von Streu, gemessen anhand der Humusform, mit zunehmender Waldnutzungsintensität signifikant abnimmt (Abb. 1). Dieser Zusammenhang wird vor allem von der vorherrschenden Baumart beeinflusst. In Nadelbaumbeständen verringert sich das Streuabbauvermögen merklich. Dies führt in der Folge zu einer mächtigeren organischen Auflage – bei hoher Nutzungsintensität kann sogar Rohhumus entstehen. Im Gegensatz dazu zeigen nicht bis stark genutzte Laubbaumstandorte keine Unterschiede in den Humusformen. Diese Differenzen sind eng mit der chemischen Struktur der Streu verbunden, da Nadeln im Gegensatz zu Laubstreu mehr Kohlenstoff als Stickstoff enthalten, härter und schwerer abbaubar sind und zudem auch Hemmstoffe enthalten können, die den mikrobiellen Abbau zusätzlich bremsen.

Unterschiede in der Streuchemie spiegeln sich auch im Verhältnis von Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) im Boden wider, dem sogenannten C/N-Verhältnis: Mit steigendem ForMI erhöht sich das C/N-Verhältnis im Boden, was ursächlich an der Zunahme (standortfremder) Nadelbaumarten und den Eigenschaften ihrer Streu liegt – so verschwindet der Zusammenhang zwischen ForMI und C/N-Verhältnis, wenn lediglich Pro-

Schneller ÜBERBLICK

- » **Die Humusform ist ein geeigneter Indikator für nutzungsbedingte Veränderungen**
- » **Höhere Anteile an Laubbäumen führen zu schnelleren Nährstoffumsätzen, einer langsameren Bodenversauerung und mehr Bodenmikroorganismen durch höhere Streuqualität**
- » **Die bodenökologischen Prozesse unter Laubbaumbeständen werden von einer intensiveren forstlichen Nutzung weniger stark beeinflusst als diejenigen unter nadelbaumdominierten Beständen**
- » **In Böden von Rückegassen ändern sich aufgrund der Bodenverdichtung die Lebensbedingungen für (Mikro-)Organismen, was in Mittelgebirgsstandorten zu einer gesteigerten CO₂-Freisetzung führt**



bekreise mit Laubbaumarten als Hauptbaumart betrachtet werden.

Mit zunehmender Waldnutzungsintensität sinkt der Boden-pH-Wert (Abb. 1), sprich, mit steigendem ForMI kommt es zu einer Versauerung des Oberbodens und somit zu einer Veränderung der Lebensbedingungen für (Mikro-)Organismen.

Eine Antwort auf Versauerung und die Veränderungen in der Nährstoffverfügbarkeit (C/N) entlang des ForMIs zeigt sich im Kontext der Untersuchungen auch in einem Absinken des mikrobiellen Wachstums: Das Verhältnis von C_{mik} , also in der mikrobiellen Biomasse gespeichertem Kohlenstoff, zu C_{org} , dem gesamten organischen Kohlenstoff im Boden, nimmt ab. Es sind somit weniger Mikroorganismen vorhanden, die zur Freisetzung pflanzenverfügbarer Nährstoffe beitragen. Mit steigendem $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Gehalt steigen Energie- und Nährstoffflüsse im Boden an, d. h., Nährstoffe aus z. B. der Blattstreu werden schneller umgesetzt und wieder bioverfügbar. Ein hoher $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Gehalt, wie wir ihn in wenig intensiv bewirtschafteten Wäldern finden (Abb. 1), deutet also darauf hin, dass die Mikroorganismen hier ver-

„Vorteilhaft sind in diesem Kontext Mischbestände mit einem hohen Anteil an Laubbaumarten mit leicht zersetzbarer, nährstoffreicher Streu.“

Theresa Klein-Raufhake

hältnismäßig viel Kohlenstoff nutzen, um zu wachsen, und diesen somit in ihrer Körpersubstanz vorübergehend festlegen. Dies wiederum begünstigt nach neuesten Studien auch den langfristigen Aufbau von Humus im Mineralboden [2, 3].

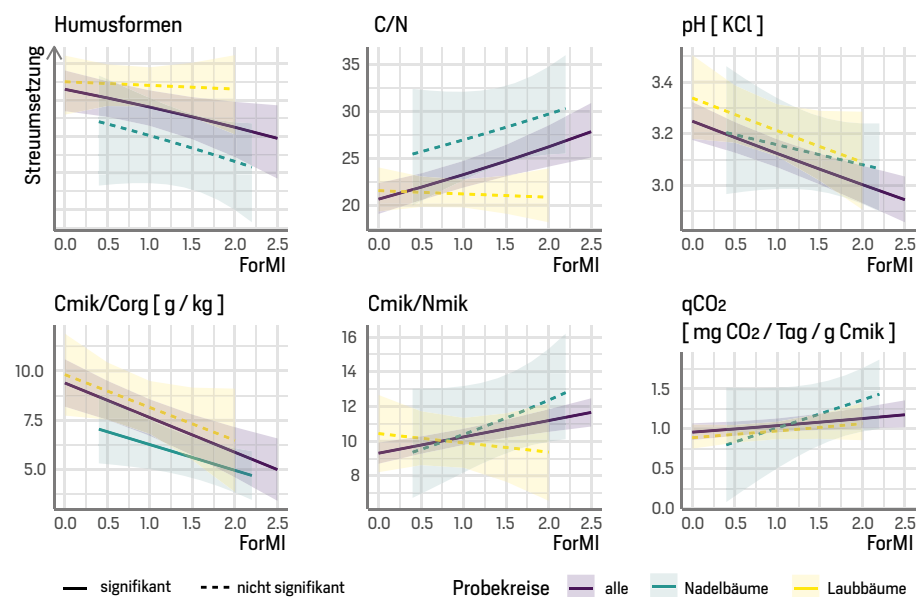
Die Verschiebungen im C/N-Verhältnis im Boden spiegeln sich auch im C/N-Verhältnis der mikrobiellen Biomasse $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$ wider: Wenn der ForMI steigt, wird ein größerer Teil des Kohlenstoffs in den Mikroorganismen ge-

speichert, während der Anteil des Stickstoffs sinkt (Abb. 1). Eine mögliche Erklärung liegt in dem zunehmenden Anteil von Pilzen an der mikrobiellen Biomasse. Pilze benötigen anteilig mehr Kohlenstoff als Stickstoff für ihren Stoffwechsel, vermögen kohlenstoffreiche und schwerer abbaubare Streu besser aufzuschließen [4] und sind aufgrund dieser Eigenschaften überproportional auf sauren Waldböden unter Nadelbäumen anzutreffen.

Ganz gleich ob Pilz oder Bakterie – wenn Mikroorganismen im Boden organische Substanz abbauen, entsteht dabei als Nebenprodukt Kohlendioxid (CO_2). Der metabolische Quotient ($q\text{CO}_2$) misst die Menge an CO_2 , die von derselben Menge Mikroorganismen unter standardisierten Bedingungen freigesetzt wird. Eine Zunahme von $q\text{CO}_2$ mit steigendem ForMI deutet auf eine gesteigerte Freisetzung von CO_2 aus dem Boden in die Atmosphäre hin, insbesondere in stark bewirtschafteten Waldbereichen. In Anbetracht des reduzierten mikrobiellen Wachstums ($C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$) könnte dies auf Stress bei den Mikroorganismen hindeuten. Diese müssen mehr Kohlenstoff für ihren Energieverbrauch aufwenden und vermehrt CO_2 ausatmen, anstatt ihn in Biomasseaufbau zu investieren.

Unsere Forschung zeigt, dass in Nadelbaumdominierten Probekreisen mit steigendem ForMI das mikrobielle Wachstum abnimmt. Dies führt zu einer Verlangsamung der Umwandlung von Humus in stabilere Formen, gleichzeitig steigt die Freisetzung von CO_2 durch die Bodenatmung. Offenbar kommt es zu Veränderungen in der mikrobiellen Gemeinschaft, die wahrscheinlich mit einer verstärkten Bodenversauerung in Nadelbaumbeständen in Verbindung stehen. Schon geringe Beimischungen von Laubbäumen wirken sich positiv aus [5, 6]. Betrachten wir lediglich Probekreise mit Buche oder Eiche als Hauptbaumart, erkennen wir nur eine geringfügige Reduzierung des Boden-pH-Werts sowie des mikrobiellen Wachstums ($C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$) mit zunehmendem ForMI, während die anderen untersuchten Faktoren gänzlich unverändert bleiben. Das bedeutet, dass die bodenökologischen Prozesse in Laubbaumbeständen weniger sensibel auf eine Veränderung der Bewirtschaftungsintensität reagieren.

Einfluss der Nutzungsintensität (ForMI) auf unterschiedliche Bodenparameter



Grafiken: T. Klein-Raufhake

Abb. 1: Die Streuumsatzungsachse bildet die Abfolge von Rohhumus (nahe des Nullpunkts) zu Mull ab, C/N = Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff, $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ = Verhältnis von Kohlenstoff in der mikrobiellen Biomasse zu organischem Kohlenstoff im Boden, $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$ = Verhältnis von Kohlenstoff in der mikrobiellen Biomasse zu Stickstoff in der mikrobiellen Biomasse, $q\text{CO}_2$ = metabolischer Quotient (Verhältnis vom freigesetztem CO_2 zum Kohlenstoff in der mikrobiellen Biomasse). Abgebildete Kurven basieren auf linearen Modellen, die neben dem ForMI auch Bodenfeuchte, Bodenart und Untersuchungsgebiet als erklärende Variablen berücksichtigen.

Einfluss von Rückegassen auf Bodenparameter

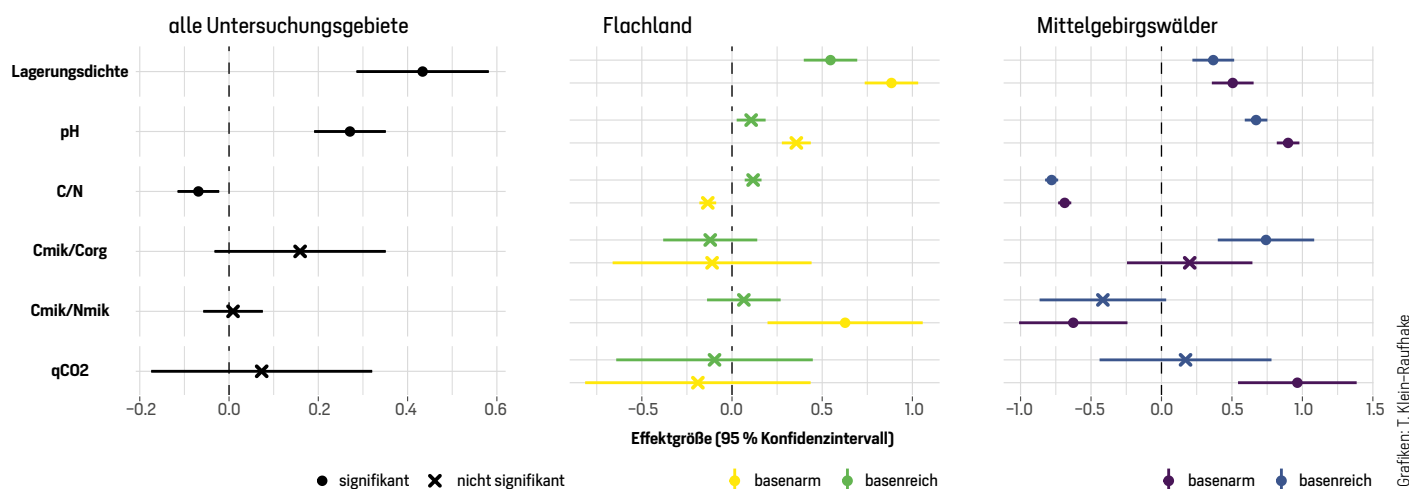


Abb. 2: Die Grafiken zeigen den Effekt der Befahrung auf untersuchte Bodenparameter. Eine Effektstärke von 0 bedeutet keinen Effekt, ein negativer Wert zeigt eine Verringerung auf der Rückegasse im Vergleich zum ungestörten Bestand, während ein positiver Wert höhere Werte auf der Rückegasse im Vergleich zur Kontrollfläche darstellt.

Fazit –

Bodenökologie entlang des ForMIs

Die Art der Bestockung hat Einfluss auf den Boden-pH-Wert und bestimmt die Qualität der Streu. Laub- und Nadelstreu variieren in ihrer chemischen Zusammensetzung und somit ihrem Zersetzungsverhalten. Beides steuert maßgeblich die mikrobiologische Gemeinschaft und ihre Aktivität. Um die langfristige Speicherung von Kohlenstoff im Waldboden zu fördern, ist es entscheidend, Maßnahmen zu ergreifen, die die Bodenfruchtbarkeit fördern und den Abbau der Streu sowie das Wachstum der mikrobiellen Biomasse und die Humusakkumulation begünstigen. Vorteilhaft sind in diesem Kontext Mischbestände mit einem hohen Anteil an Laubbaumarten mit leicht zersetzbarer, nährstoffreicher Streu.

Einfluss von Rückegassen auf die Bodenökologie

Die EU-Bodenschutzstrategie, die 2002 verabschiedet wurde, hat den Schutz des Bodens auf die gleiche Stufe wie den Schutz von Luft und Wasser gestellt. Auch das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) verankert den Schutz des Bodens als Ziel (§ 1), um die Funktionen des Bodens nachhaltig zu sichern und schädliche Bodenveränderungen abzuwehren. Eine der Hauptgefahren für den Boden ist die Bodenverdichtung durch mechanische

Belastung, weshalb im praktischen Forstbetrieb ein Befahrungsverbot für Flächen besteht. Die Nutzung von schweren Holzerntefahrzeugen ist nur auf ausgewiesenen Rückegassen erlaubt, die etwa 10 bis 20 % der deutschen Waldfläche ausmachen. Bodenverdichtung verursacht signifikante Veränderungen in der Bodenstruktur und Bodenchemie, doch gibt es hierzu bisher nur wenige systematische Studien. So fehlen beispielsweise Informationen, wie Rückegassen die Lebensraumfunktion des Bodens für Bodenorganismen verändern und welche Auswirkungen dies auf die Nährstoffumsatzprozesse hat [7].

Um entsprechenden Fragestellungen gezielt nachzugehen, wurden in jedem der vier BiCO₂-Untersuchungsgebiete 21 Rückegassen in unmittelbarer räumlicher Nähe zu einem Probekreis entlang eines 25 m langen Abschnitts untersucht. Die Bodendaten des korrespondierenden ungestörten Probekreises dienen als Kontrolle für die der Rückegasse, wobei jeweils die oberen 5 cm des Mineralbodens untersucht wurden. Neben allgemeinen Trends, die über alle Untersuchungsgebiete hinweg auftreten, wie höhere Lagerungsdichten und pH-Werte sowie beschleunigte Abbauprozesse auf den Rückegassen, gibt es auch gebietsabhängige Effekte (Abb. 2). Während die Rückegassen im Flachland kaum Veränderungen in den mikrobiologischen Parametern auf-

weisen, zeigen die Mittelgebirgswälder zahlreiche signifikante Reaktionen auf das Befahren.

Erwartungsgemäß ist die Lagerungsdichte der Feinerde auf Rückegassen höher (rund 17 %) als auf der korrespondierenden, ungestörten Kontrollfläche (Abb. 2). Diese Bodenverdichtung führt zu einer Änderung der Bodenstruktur – das Gesamtporenvolumen nimmt ab [8–10] und die Porenverteilung verändert sich: Der Boden wird durch die Belastung derart komprimiert, dass das Volumen der großen Grobporen um bis zu 90 % abnehmen kann [11], zugunsten kleinerer Mittel- und Feinporen, deren Volumen um bis zu 40 % zunehmen kann [12, 13]. Das Wasser in den Feinporen ist nicht pflanzenverfügbar, das in den Mittelporen hingegen schon. Grobporen sind bei Regen wichtige Wasserleitbahnen und ihr Anteil ist ausschlaggebend für das Ausmaß der Bodenbelüftung. Mit den Grobporen verschwindet auch Lebensraum für die Bodenfauna, was sich in unserer Studie in einem deutlichen Rückgang der Individuendichte der Springschwänze auf Rückegassen zeigt. Weiterhin ist die Porenverteilung wichtig für das Wurzelwachstum und die mikrobielle Aktivität: Wurzeln dringen nur in Grobporen ein, während Mikroorganismen (Pilze und Bakterien) auch in Mittelporen leben können. Feinporen sind für Mikroorganismen unzugänglich [14].



Auf sämtlichen untersuchten Rückegassen konnte eine Zunahme des Boden-pH-Werts nachgewiesen werden (Abb. 2). Eine mögliche Ursache hierfür ist wohl, dass durch die Ausbildung tiefer Fahrspuren basenreicheres Unterbodenmaterial an die Oberfläche kommt. Eine weitere Erklärung für die Unterschiede im pH-Wert ist die mangelnde Sauerstoffzufuhr und Vernässung in Böden der Rückegassen, wodurch anaerobe (sauerstofffreie) Milieus entstehen, in denen Bodenorganismen im Zuge anaerober Atmung Protonen verbrauchen und so den pH-Wert ansteigen lassen [14].

Sowohl Bodenverdichtung als auch Veränderungen im pH-Wert führen zu Veränderungen in der mikrobiellen Gemeinschaft in Böden von Rückegassen: Strukturelle Verschiebungen in der mikrobiellen Gemeinschaft, wie sie sich in unseren Untersuchungen insbesondere im basenarmen Bergland auch im veränderten $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$ widerspiegeln (Abb. 2), können zu Veränderungen in Bodenprozessen und Nährstoffumsetzungsverhältnissen führen. So ist das C/N-Verhältnis im Boden über alle Untersuchungsgebiete hinweg auf den

Rückegassen enger als auf der Kontrollfläche (Abb. 2), d. h., es finden sich hier im Verhältnis weniger Kohlenstoff und mehr Stickstoff als im ungestörten Bestand. Dass die Kohlenstoffgehalte hier abnehmen, deutet darauf hin, dass organisches Material in den Böden der Rückegassen schneller veratmet wird. Dafür verantwortlich sind nicht nur Veränderungen in der mikrobiellen Gemeinschaft, sondern vermutlich auch die Faktoren Licht und Wärme. Auf Rückegassen haben wir einen deutlich geringeren Überschirmungsgrad durch Bäume bei gleichzeitig höheren Anteilen an Offenboden messen können, d. h., mehr Sonnenlicht erreicht den Boden und erwärmt diesen, was letztlich zu schnelleren Reaktionsraten führt: Die Mikroorganismen vermehren sich (s. auch Abb. 2, $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$), sind aktiver und bauen organische Substanz schneller ab. Insbesondere im basenarmen Bergland spiegelt sich das auch im metabolischen Quotienten (qCO_2) wider: Hier veratmen die Mikroorganismen in den Rückegassen deutlich mehr CO_2 als in den Kontrollflächen.

Fazit –

Untersuchungen von Rückegassen

Über alle Untersuchungsgebiete hinweg fanden wir sowohl höhere Lagerungsdichten als auch höhere pH-Werte auf Rückegassen. Gleichzeitig zeigen unsere Untersuchungen, dass Abbauprozesse auf Rückegassen offenbar

schneller ablaufen. Besonders in Mittelgebirgsregionen mit steilen Hängen, wo die Bodenstruktur durch die Befahrung stärker beschädigt wird, zeigen sich erhöhte Mineralisationsprozesse und gesteigerte Bodenatmung. Dies kann zu bedeutenden Verlusten von organischem Kohlenstoff im Boden führen. Generell ist bei Rückegassen in steileren Hanglagen mit besonders starken Effekten auf Bodenprozesse zu rechnen, weshalb sich gerade hier die Notwendigkeit besonderer Sorgfalt und Rücksicht bei der Waldbewirtschaftung ergibt.



Theresa Klein-Raufhake

t.klein-raufhake@uni-muenster.de

ist Doktorandin im Waldklimafonds-Projekt BiCO₂ am Institut für Landschaftsökologie der Universität Münster. **Jens Schaper** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der NABU-Naturschutzstation Münsterland.

Prof. Dr. Dr. h. c. Norbert Hölzel und **Prof. Dr. Ute Hamer** sind Projektleiter seitens der Universität Münster.

Literaturhinweise:

Download des Literaturverzeichnisses in der digitalen Ausgabe von AFZ-DerWald (<https://www.digitalmagazin.de/marken/afz-derwald>) sowie unter: www.forstpraxis.de/downloads

DIGITALE AUSGABE  deutscher-waldbesitzer.de/digital

Die Forst Macher  Folgen Sie uns in den Wald: die-forstmacher.de

Wertholzklammer
Stammholzsicherung bei Rissgefährdung



www.fluegel-gmbh.de

- keine Holzverfärbung - keine Holzentwertung
- kein Entfernen vor dem Einschnitt
- trennbar mit allen Sägeblättern
- leicht, handlich und effektiv

FLÜGEL
...Werte sichern und erhalten

Flügel GmbH · Eisdorfer Str. 21 · D-37520 Osterode am Harz
Tel. +49(0)55 22 / 31 242-0 · Fax +49(0)55 22 / 31 242-40 · E-Mail info@fluegel-gmbh.de

 **Erwin Vogt**
FORSTBAUMSCHULEN GMBH

Höchste Qualität
und sichere Herkunft –
Forstpflanzen von
Erwin Vogt
Forstbaumschulen.

Wir bieten Ihnen:

- Forstpflanzen
- Lohnanzucht
- Aufforstung
- Saatgutgewinnung
- Einheimische Wildgehölze

www.vogt-forstbaumschulen.de

 **August Luedemann**
Forst- und Landschaftsservice GmbH
Forstbaumschulen • Forstdienstleistungen

termingerechte Lieferung
bodenfrische Forstpflanzen
heimische Wildgehölze
Saatgutgewinnung u. Lohnanzuchten
Übernahme kompletter Aufforstungen

60528 Frankfurt/M.
Am Poloplast 10
Tel. 069-66 80 65 10
Fax 069-66 68 80 1
AL@august-luedemann.de
www.august-luedemann.de

