

# Stabilität hat tiefe Wurzeln

Die ideale Forstpflanze: Aspekte einer funktionalen Beziehung zwischen Wurzel und Spross

Bernd Stimm, Helmut Blaschke, Wolfram Rothkegel und Ottmar Ruppert

**Wie muss die ideale Forstpflanze aussehen? Gibt es sie überhaupt? Der folgende Beitrag stellt die Bedeutung eines harmonischen Verhältnisses von Wurzel und Spross in den Mittelpunkt. Dieses Verhältnis ist nicht starr, sondern flexibel und reagiert dynamisch auf Veränderungen im Lebensraum und seinen Umweltbedingungen. Ein gut ausbalanciertes Verhältnis zwischen Wurzel und Spross ist – zusammen mit einer guten physiologischen Qualität – der beste Garant für das Anwachsen und Überleben von Forstpflanzen.**

In Zeiten eines notwendigen Waldumbaus, der Restaurierung und Rehabilitation degraderter Landflächen und der damit verbundenen Ausweitung der Waldflächen kommt der künstlichen Bestandesbegründung wieder zunehmende Bedeutung zu. Die Umstände und Rahmenbedingungen bei der künstlichen Bestandesbegründung können allerdings sehr vielfältig sein. Das erfolgreiche Anwachsen, Überleben und weitere Wachstum der Forstpflanzen hängen von der Wahl des Pflanzgutes, dessen äußerer und innerer Beschaffenheit und von dessen Fähigkeit ab, neue Wurzeln auszubilden und sich den gegebenen Standortbedingungen rasch anzupassen. Mit der Ausbildung neuer Wurzeln wird der Pflanzchock minimiert, dessen Hauptursache häufig durch Wasserstress begründet ist.

Im Vergleich zu morphologischen Kriterien des Sprosses und physiologischen Kenngrößen der Vitalität wurde die Ausformung des Wurzelwerks von Forstpflanzen bisher vergleichsweise wenig beachtet. Erst die seit etwa zwei Jahrzehnten beobachteten Deformationen des Wurzelsystems gepflanzter Bäume haben zu einer Renaissance dieses Forschungszweiges geführt (Nörr 2003).

## Die Wurzel – das unbekanntes Wesen

Ausführliche Beschreibungen zu den Wurzeln heimischer Waldbäume sind vorhanden (Köstler et al. 1968; Kutschera und Lichtenegger 2003) und geben Auskunft insbesondere über den morphologischen Bau von strukturellen Wurzelsystemen. In jüngerer Zeit wurden die rein morphologischen Beschreibungen ergänzt durch Befunde zur räumlich-dynamischen Verteilung und Entwicklung der Feinwurzeln und ihren funktionalen Beziehungen (Pregitzer et al. 2002), zum Beispiel im Hinblick auf Wachstum und Mortalität sowie Wurzelneubildungen von Teilen des Wurzelsystems. Für eine Umsetzung in die Praxis muss das hinzugekommene Wissen jedoch erst gesichtet und aufbereitet werden.

Die physiologischen Aufgaben der Wurzel sind die Aufnahme, Leitung und Speicherung von Wasser und Nährstoffen sowie die Synthese, Bereitstellung und Leitung von Pflanzenhormonen und sekundären Pflanzenstoffen. Wurzeln können sehr vielgestaltig sein und bilden sogenannte Wurzelsysteme aus verschiedenen Typen von Wurzeln aus. Für die Wasser-

und Nährstoffaufnahme zuständig sind in erster Linie Feinst- und Feinwurzeln, die in dieser Funktion durch Symbionten wie Mykorrhizen oder Bakterien unterstützt werden. Solche Wurzeln sind relativ kurzlebig (wenige Monate bis maximal etwa zwei Jahre) und werden ständig erneuert. Sie sind meist nicht zu einem sekundären Dickenwachstum befähigt und tragen somit nicht zum strukturellen Wurzelsystem bei. Das strukturelle Wurzelsystem wird durch Schwach-, Grob-, Derb- und Starkwurzeln gebildet und stellt das Stützgerüst für den späteren Baum.

Der erbliche Bauplan bestimmt die Art der Bewurzelung, die Ausformung der Polwurzel (Keimwurzel), die Wurzelverzweigungen sowie die Art der Wurzelverteilung im Boden (Kutschera und Lichtenegger 2003). Im Jugendstadium besitzen unsere Nadel- und Laubhölzer eine Polwurzel, die sich je nach Baumart in ihrer Befähigung zum Tieferstreben unterscheidet. Besonders trockenheitsangepasste Baumarten wie Eiche oder Kastanie besitzen eine tiefreichende, gut ausgeprägte und meist verdickte Polwurzel. Umgekehrt kann man ableiten, dass Baumarten, die über eine derartige Polwurzel verfügen (z.B. Weißtanne) rasch der Wurzelkonkurrenz mit anderen Baumarten entkommen und tiefere Schichten für sich erschließen können. In der Jugendphase kommt der tiefgehenden Polwurzel auch die wichtige Aufgabe der Verankerung zu.

Die Polwurzel vieler Baumarten besitzt im Sämlingsstadium einen positiven Geotropismus; sie wächst also senkrecht (orthogeotrop) nach unten, während die Seitenwurzeln horizontal (diageotrop oder plagiogeotrop) wachsen (Coutts 1989).

Im Falle einer Verletzung der Polwurzel, zum Beispiel durch Unterschneidung im Saatbeet der Baumschule oder durch ungünstige Umgebungsbedingungen, wie beim sogenannten Luftwurzelschnitt (Kleinballenproduktion), bilden sich in der Folge oberhalb der Schnittfläche oft mehrere Adventivwurzeln, die ebenfalls positiv geotrop wachsen können und somit die Funktion der Polwurzel übernehmen. Gelegentlich bleibt aber die Bildung der Adventivwurzeln und die Regeneration eines positiv geotrop wachsenden Wurzelwerks aus, was bei jungen Bäumen zu einer erhöhten Anfälligkeit gegen Windwürfe führen kann (South et al. 2001).

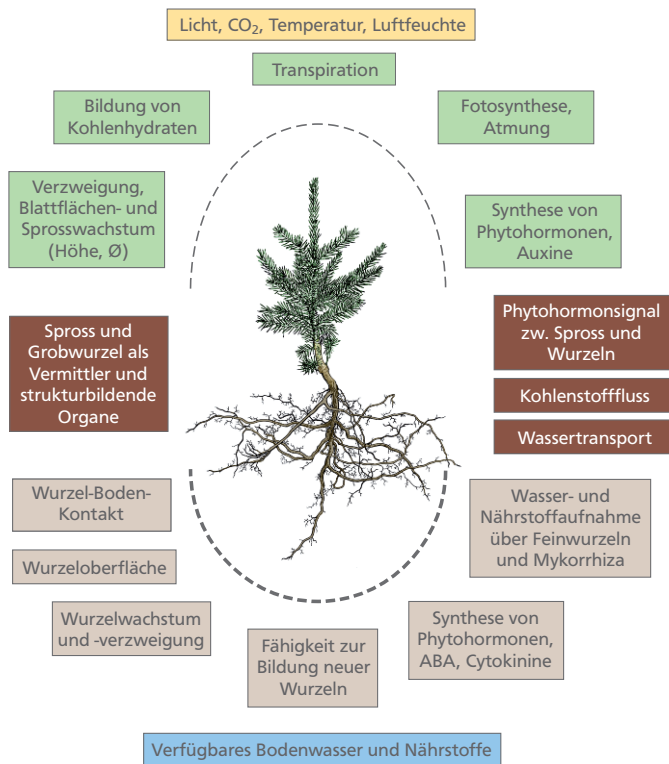


Abbildung 1: Die optimale Forstpflanze – die ausbalancierte, wechselseitige, funktionale Beziehung zwischen Spross und Wurzel ist wichtige Voraussetzung für hohe morphologische und physiologische Plastizität, erfolgreiche Etablierung und gutes Wachstum. Die Abbildung gibt einen Überblick über grundlegende Faktoren und Prozesse. Sämlingszeichnung von U. Wasem WSL.

Mit dem Verlust der Wurzelspitze der Polwurzel geht auch der Sensor für den Schwerkraftreiz verloren. Ab diesem Moment erkennt die Wurzel nicht mehr, wo oben und unten ist. Das Reizempfinden muss erst wieder hergestellt werden, damit die Wurzel ihrer ursprünglichen Orientierung zufolge weiterwachsen und die Aufgabe einer späteren Stabilisierung nach unten wahrnehmen kann. Dieser Vorgang der Wiederherstellung bindet physiologische Prozesse und pflanzliche Ressourcen. In dieser Zeit des Erneuerns und Wachstums kann die Pflanze vergleichsweise wenige Ressourcen in das oberirdische Wachstum investieren, das folglich zurückgestellt wird.

## Das Verhältnis von Wurzel und Spross

Vielfach wurde versucht, das Verhältnis zwischen den unter- und oberirdischen Organen quantitativ zu charakterisieren. Häufig wird dazu die Trockenmasse der Wurzel der Trockenmasse des Sprosses gegenübergestellt; das resultierende Verhältnis gilt als ein Maß für die Allokation von Biomasse. Als Kritik einer solchen Betrachtung wird angeführt, dass nicht unterschieden wird zwischen den verschiedenen funktionalen Kompartimenten der Wurzeln (Feinwurzeln – Nährstoff- und Wasseraufnahme; Grobwurzeln – Standfestigkeit) und denen des Sprosses (Blätter – Fotosynthese und Transpiration;

Stamm – Erschließung des Luftraums und Speicherfunktion) (Körner 1994). Wenn wir also die Trockenmasse der Wurzel der Trockenmasse des Sprosses gegenüberstellen, beziehen wir einen Anteil an Biomasse ein, der physiologisch weniger aktiv ist und in Form von Holz das Resultat von Wachstumsprozessen darstellt. Obwohl bei jungen Forstpflanzen die strukturbildenden Teile (Grobwurzeln, Stämmchen) noch wenig ausgeprägt sind, beeinflussen sie bis zu einem gewissen Grad eine funktionale Interpretation der Messergebnisse.

Hilfreicher in dieser Hinsicht, wenngleich auch weniger üblich, ist die Verwendung des Wurzelvolumens in Relation zum Sprossvolumen (i.e.S. des Kronenvolumens) der jungen Pflanze. Allerdings kann die oben genannte Problematik der bedingten Vergleichbarkeit im Hinblick auf die Funktionalität auch mit diesem Ansatz schlussendlich nicht gelöst werden: Der überwiegende Anteil des Feinst- und Feinwurzelsystems hat mit der direkten Nährstoff- und Wasseraufnahme wenig zu tun, da er eigentlich die Struktur zur Verfügung stellt, die es den Wurzelspitzen ermöglicht, an die Orte der Aufnahme zu gelangen; ähnliches gilt für die blatttragenden Strukturen der Krone, namentlich die Triebe und dünnen Zweige, die die Strukturen zur Erschließung des Luftraums bereitstellen (Körner 1994). Im Gegensatz zur Bestimmung der Trockenmasse kann die Bestimmung des Wurzelvolumens junger Forstpflanzen mit Hilfe der Wasserverdrängung jedoch zerstörungsfrei durchgeführt werden. Die durch beide Verfahren ermittelten Werteverhältnisse bieten eine gute Möglichkeit, den potenziellen Anwuchsenerfolg der Forstpflanzen zu beurteilen, da sie die Harmonie zwischen den beiden Hauptkompartimenten Spross und Wurzel zum Ausdruck bringen (Abbildung 1).

In der forstlichen Praxis wird unter dem Wurzel-Spross-Verhältnis oft das Verhältnis der Wurzeltiefe zur Sprosshöhe verstanden; tatsächlich basieren aber die quantitativen Angaben in der Fachliteratur meist auf Biomassen- bzw. Volumenverhältnissen. Typische Werte für Wurzel-Spross-Verhältnisse junger Forstpflanzen schwanken zwischen 1:1 und 1:3 (in besonderen Fällen bis 1:4). In der Literatur finden sich häufig Angaben zu Spross-Wurzel-Verhältnissen (Bohne et al. 2005); dabei handelt es sich um den Kehrwert, am oben angeführten Beispiel festgemacht lägen also typische Spross-Wurzel-Verhältnisse bei 1:1 bis 3:1.

Viele Studien zeigen, dass Sämlinge mit größerer Wurzelmasse oder größerem Wurzelvolumen beim Auspflanzen im Freiland (Wald) – insbesondere bei Trockenheit – besseres Wachstum und Überleben aufweisen als solche mit geringerer Wurzelmasse oder -volumen (Grossnickle 2012). »Kopflastige« Sämlinge bekommen unter trockeneren Umweltbedingungen Probleme, weil das unzulängliche Wurzelsystem den Wasserbedarf des Sprosses nicht in ausreichendem Maße decken kann.

Sämlinge mit einem ausgeprägten Feinst- und Feinwurzelsystem sind leistungsfähiger, sie besitzen eine relativ große Wurzeloberfläche mit vielen Wurzelspitzen. Eine wichtige Rolle spielen dabei die Seitenwurzeln erster Ordnung als Ausgangsorte für die Verzweigung (Haase 2011); besonders Koniferen erschließen sich mit ihrer Hilfe die oberen Schichten des Waldbodens im Übergangsbereich zwischen Auflagehorizont und Mineralboden.

### **Auswirkungen von Beschädigungen der Wurzel, insbesondere durch Wurzelschnitte**

Während kein Zweifel bei den Waldbesitzern herrscht, dass eine Beschädigung des Leittriebs einer Forstpflanze, zum Beispiel durch Verbiss, negative Auswirkungen auf das Wachstum der Pflanze hat, werden bei der Beschädigung der Wurzel kaum Bedenken laut. Die Auswirkungen des Leittriebverbisses sehen und kennen wir, die Auswirkungen des Wurzelschnittes sehen wir nicht. Kennen wir sie?

Wie reagiert die Forstpflanze auf Wurzelbeschädigungen, insbesondere auf Wurzelschnitt? Was tut sie, um wieder ins Gleichgewicht zu kommen? Matyssek (o.J.) beschreibt die Auswirkungen von Wurzelschnitten auf die pflanzliche Physiologie und die induzierten Regenerationsprozesse: Unmittelbar führt der Wurzelschnitt zu einer abrupten Einschränkung der Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie zu einer Störung des pflanzlichen Hormonhaushaltes, welcher für die aufeinander abgestimmte Entwicklung von Spross und Wurzel entscheidend ist (Abbildung 1). Da das Wachstum von der Wasseraufnahme in die Zellen bestimmt ist, wird das Streckungswachstum des Sprosses sofort reduziert, während das Wachstum der unversehrt gebliebenen Wurzelteile nur geringfügig beeinflusst ist. Das Wasserpotenzial im Spross sinkt rasch ab, d.h. das Wasser beginnt die physiologischen Prozesse zu limitieren und die Pflanze gerät unter Trockenstress. Die Transpiration der Blätter überwiegt deutlich die Wasseraufnahme aus dem Boden; in der Folge verengen sich die Spaltöffnungen der Blätter, der Wasserverlust wird gesenkt. Dadurch werden jedoch auch die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme und damit die Fotosynthese eingeschränkt.

Auf der Basis der genetischen Veranlagung und der standörtlichen Gegebenheiten streben die Pflanzen in ihrem Stoffwechsel ein dynamisches Gleichgewicht an zwischen dem internen Kohlenstofffluss einerseits und dem Nährstoff- und Wasserfluss andererseits. Dieses Gleichgewicht wird eingestellt durch ein unterschiedliches, aber aufeinander abgestimmtes Zuwachsverhalten zwischen Spross (bestimmend für Kohlenstofffluss in Folge fotosynthetischer  $\text{CO}_2$ -Fixierung) und Wurzel (bestimmend für Wasser- und Nährstofffluss). Phytohormone vermitteln das Gleichgewicht im Zuwachsverhalten, sie fungieren als Signalstoffe in der Wurzel-Spross-Interaktion (Abbildung 1). Der Wurzelschnitt lenkt dieses Gleichgewicht aus und stört die Wurzel-Spross-Interaktion durch Eingriff in den Hormonhaushalt. Die Mechanismen dieser Interaktion bestimmen die Regenerationsphase nach dem Wurzelschnitt, in der die Pflanze ihr früheres Gleichgewicht zwischen den Stoffflüssen durch Wiederherstellung der Bio-

masseverteilung zwischen Spross und Wurzel erneut einreguliert; diese Vorgänge nehmen einige Tage bis Wochen in Anspruch (Matyssek o.J.). Die Entfernung eines Großteils der Wurzelspitzen reduziert die Bildung von Phytohormonen aus der Gruppe der Cytokinine drastisch, ihr »Export« mit dem Wasserstrom des Xylems in den Spross nimmt ab. Damit verliert der Spross vorübergehend die Fähigkeit, Assimilate für den eigenen Zuwachs zu nutzen; sie fließen in die verbliebenen Wurzelteile ab. Letzterer Vorgang wird verstärkt, indem der Spross seinerseits Auxine, eine andere Gruppe von Phytohormonen, bildet und in die Wurzel verlagert. Die Auxine induzieren ein gesteigertes Längenwachstum der Wurzeln und sodann eine intensive Bildung neuer Seitenwurzeln (Matyssek o.J.). In der Regenerationsphase durchläuft die Pflanze eine Zeitspanne gehemmten Sprosswachstums bei gleichzeitig gesteigertem Wurzelwachstum, um die Beschädigung zu reparieren und den engen Kontakt der Wurzel zum Boden wieder herzustellen.

In der Praxis haben wir es mit zwei Arten von Wurzelschnitten zu tun, die wir bei den folgenden Betrachtungen auseinanderhalten müssen, zum einen mit dem sogenannten Unterschneiden in der Baumschule, zum anderen mit dem Wurzelschnitt unmittelbar vor der Pflanzung.

#### **Das Unterschneiden in der Baumschule**

Im Allgemeinen führt das Unterschneiden in der Baumschule zu einem kleinräumig kompakten Feinwurzelsystem, das sich bei der Verpflanzung ohne Risiken gravierender Wurzelverletzungen handhaben lässt und Trocknissschäden durch die kurzfristig beim Pflanzvorgang erschwerte Wasserversorgung entgegenwirkt. Bei fachkundiger Ausführung kann die Wurzel nach dem Schnitt innerhalb kurzer Zeit regenerieren, mit langfristigen Wachstumseinbußen der Pflanze ist nicht zu rechnen. Das Sprosswachstum kann nach dem Wurzelschnitt sogar im Vergleich zu vorher stimuliert sein, da jetzt ein Feinwurzelsystem mit einer hohen Aufnahmekapazität für Wasser und Nährstoffe vorliegt. Ein solch kompaktes Wurzelsystem, das durch den erfolgten Schnitt an Wassermangel »gewöhnt« wurde und sich leicht aus dem Boden lösen lässt, kann Verpflanzungen besser überstehen als ein extensives Wurzelsystem, das nicht zurückgeschnitten wurde. Durch vorbereitende vorausgehende Trockenphasen und mehrere, in zeitlichen Abständen erfolgende Wurzelschnitte kann der Verpflanzungserfolg noch erhöht werden (Matyssek o.J.).

#### **Wurzelschnitt vor der Pflanzung**

Während die Auswirkungen des Unterschneidens in den Baumschulbeeten als wenig negativ eingestuft werden, sind die Auswirkungen des Aushebens aus dem Saat- oder Verschulbeet unvermeidlich, aber durch den z.T. hohen Verlust von Feinwurzelmasse schon gravierender zu beurteilen. Die Zweckmäßigkeit eines Wurzelschnitts unmittelbar vor der Pflanzung wird dagegen häufig als wenig sinnvoll erachtet, da i.d.R. zusätzliche Wurzelmasseverluste durch Transport oder Einschlag hinzukommen. Dadurch wird das Verhältnis zwischen Wasser liefernder und Wasser verdunstender Oberfläche massiv verändert, was tiefgreifende Folgen bei der Ausbringung der Forst-

## Morphologische Merkmale eines gut ausgebildeten Wurzelsystems mit Relevanz für den Anwuchserfolg

### Hohe Anteile an Fein- und Feinstwurzeln

Wurzelsysteme mit einem hohen Anteil an Feinst-/Feinwurzeln haben aufgrund einer großen Oberfläche eine hohe Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie eine hohe Zahl aktiver Wurzelspitzen. Pflanzen, die mit solchen Wurzeln gut ausgestattet sind, besitzen einen höheren Anwuchserfolg. Die quantitative Erfassung des Feinst-/Feinwurzelanteils ist allerdings sehr zeitaufwendig und daher als Routineverfahren kaum durchführbar (Davis und Jacobs 2005).

### Wurzelvolumen

Studien belegen positive Beziehungen zwischen Wurzelvolumen und Überleben sowie Wuchsleistung. Die quantitative Erfassung des Wurzelvolumens kann zerstörungsfrei über die Verdrängungsmethode geschehen; ein Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass nicht zwischen Feinst-/Feinwurzeln und Grobwurzeln unterschieden werden kann.

### Anzahl der Seitenwurzeln erster Ordnung

Eine Reihe von Studien zeigt, dass es zwischen der Anzahl von Seitenwurzeln erster Ordnung und der Wuchsleistung einen direkten Zusammenhang gibt. Einschränkend sei vermerkt, dass mit diesem Verfahren nicht die Wurzeln höherer Ordnung und deren Beitrag zum Anwachsen erfasst werden.

### Fläche des Wurzelsystems und Wurzellänge

In verschiedenen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass diese beiden Kenngrößen brauchbare Parameter sein können, um die Leistungsfähigkeit der Pflanzen im Feld abzuschätzen. Die entsprechenden Messungen können prinzipiell auch zerstörungsfrei erfolgen.

Es ist anzufügen, dass die genannten morphologischen Kenngrößen abhängig von Baumart, Substrat und Ernährungszustand sehr stark variieren können und somit Vergleiche zwischen verschiedenen Arten und Sortimenten nur mit Vorsicht gemacht werden können. Von den genannten morphologischen Kenngrößen kann dem Wurzelvolumen der beste Vorhersagewert des Anwuchserfolges zugewiesen werden (Davis und Jacobs 2005).

pflanzen nach sich zieht. Die Wasseraufnahme hängt vom Vorhandensein des Wurzelsystems ab, das bei der Pflanzung in den Boden gesetzt wird. Um überleben und wachsen zu können, muss die Pflanze die Reste des ursprünglichen Wurzelsystems durch die Bildung neuer Wurzeln ergänzen und das Wurzelwerk wieder zu alter Größe ausbauen.

Bereits vor 20 Jahren hat der Lehrstuhl für Waldbau zur Zweckmäßigkeit des Wurzelschnitts unmittelbar vor der Pflanzung Stellung bezogen (Burschel und Stimm 1993). Insbesondere wurde auf die Frage eingegangen, ob ein Wurzelschnitt nötig oder gar unzweckmäßig ist. Wenn man nun aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen einen Wurzelschnitt machen muss, wie sollte er durchgeführt werden, um das Risiko von Schäden an der beschnittenen Pflanze möglichst gering zu halten?

Ursprünglicher Zweck des Wurzelschnitts in der Praxis war, das Wurzelwerk routinemäßig so zu verkleinern und zu formen, dass es leicht und schnell in die Pflanzöffnung eingebracht werden kann. Es bedarf keinerlei Wissenschaft, um die Gefährlichkeit einer solchen Maßnahme zu erkennen. Heute wird der Wurzelschnitt in der Regel nicht mehr routinemäßig durchgeführt, sondern nur empfohlen, um Verletzungen zu beseitigen und die Gefahr von Wurzeldeformationen bei der Pflanzung zu reduzieren. Der Wurzelschnitt sollte dann nur mäßig durchgeführt werden und nicht mehr als 20 % der Feinst- und Feinwurzelmasse betreffen; das Entstehen von Schnittflächen mit Durchmessern von 4 mm und mehr muss vermieden werden (Rothkegel und Ruppert 2011).

Untersuchungen an Stieleichen-Sämlingen belegen die negativen Auswirkungen der Wurzelschnitte auf das Sprosswachstum (Andersen et al. 2000). Im Versuch wurden die Wurzeln zweijähriger, unterschrittener Eichensämlinge gegenüber nichtbeschnittenen Kontrollpflanzen (Wurzeltiefe 25 cm) auf eine Wurzeltiefe von 19 cm, 13 cm bzw. 7 cm gekürzt und somit 25 %, 41 % und 61 % der Wurzelrockenmasse entfernt. Nach der Entfernung von 41 % und 61 % der Wurzelrockenmasse ergaben sich bereits nach einer Vegetationsperiode signifikant geringere Trockenmassen der beschnittenen Pflanzen. Wurden die Feinst- und Feinwurzeln entfernt, wirkte sich das insbesondere in einer Abnahme der Sprossrockenmasse aus. Aus diesen Ergebnissen wird die unterschiedliche Bedeutung von Fein- und Grobwurzeln für das Wachstum von Spross und Wurzel, aber auch die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Sämlinge nach Wurzelschnitten, insbesondere in der abnehmenden Konkurrenzkraft gegenüber anderen Pflanzen, erkennbar.

## Folgerungen für die Praxis

In der Vergangenheit hatten sich leider Pflanzverfahren etabliert, bei denen nicht einmal der Versuch unternommen wurde, die reduzierten Wurzeln – nach dem Roden in der Baumschule – in ein angemessen großes dreidimensionales Pflanzloch zu bringen. Der routinemäßige Wurzelschnitt begrenzte das Wurzelwerk auf eine winzige Fläche, nämlich den Pflanzspalt. Der Wurzelraum wurde so ersetzt durch eine Wurzelfläche. Es muss gerechterweise festgestellt werden, dass die heutige Praxis den routinemäßigen Wurzelschnitt kritisch betrachtet und von ihm abrät.

## Möglichkeiten zur Beurteilung von Wurzelsystemen anhand ihres physiologischen Zustands

Die Erfassung des physiologischen Zustands von Forstpflanzen wäre ein wichtiger Schritt im Rahmen der Qualitätssicherung. Wurzelsysteme sind gegenüber widrigen Umwelteinflüssen, wie beispielsweise Trockenstress, häufig anfälliger als Sprosse. Zuverlässige Schnelltests zur Beurteilung des physiologischen Zustands werden dringend gebraucht. Einige Ansätze dazu werden im Folgenden aufgezeigt (Grossnickle und Folk 1993; Davis und Jacobs 2005; Haase 2007).

### Wurzelwachstumspotenzial (Root growth potential)

In vielen großen amerikanischen Forstbaumschulen ist dieses Testverfahren seit mehr als 15 Jahren eingeführt. Das Verfahren misst nicht den aktuellen physiologischen Zustand, sondern beschreibt die Leistungsfähigkeit der Forstpflanzen an Hand des Potenzials von Wurzelneubildung und Wurzelwachstum während einer definierten Zeitspanne unter standardisierten Umweltbedingungen. In der Qualitätssicherung der Baumschulen hat sich das Testverfahren weitgehend bewährt, da es hinreichend Auskunft über die innere Qualität der getesteten Pflanzen gibt. Als Vorhersageinstrument für den Anwuchserfolg im Feld ist es bedingt geeignet, da die Testbedingungen von den Umgebungsbedingungen im Feld abweichen können (Abbildung 2).

### Elektrolytverluste (Root electrolyte leakage)

Die Methode zur Messung der Elektrolytverluste aus Pflanzengewebe findet für die quantitative Beurteilung von Frosthärte und -schäden Verwendung. Darüber hinaus wird sie zur Beschreibung des Ruhezustands (Dormanz) und der Stresstoleranz eingesetzt. Bei Forstpflanzen wird die Elektrolytverlustbestimmung häufig an der Wurzel eingesetzt, weil dieses Organ sehr kalteempfindlich ist. Bei bestimmten Baumarten hat die Methode eine sehr gute Aussagekraft im Hinblick auf den Anwuchserfolg gezeigt (Radoglou et al. 2007).

### Kohlenhydratgehalte der Wurzel und Nährstoffspeicherung

Studien zeigen, dass der Kohlenhydratgehalt der Wurzel ein guter Indikator für das Wachstumspotenzial der Forstpflanze sein kann (Tinus et al. 2000). Zu geringe Kohlenhydratreserven während der Zeit zwischen der Beetrodung und der Wiederaufnahme der Fotosynthese kann zu Vitalitätsverlusten und Absterben führen. Pflanzen mit unzureichenden Nährstoffreserven zeigen ähnliche Erscheinungen. Die Kenngrößen können mit pflanzenanalytischen Verfahren bestimmt werden.

### Wurzelfeuchte

Wurzeln sind sehr empfindlich gegen Austrocknung. Setzt Wurzeltrocknis vor der Pflanzung ein, hat dies in der Regel immer negative Auswirkungen auf den Anwuchserfolg. In solchen Fällen hat die Bestimmung des Feuchtegehalts der Wurzel eine gute Beweiskraft.

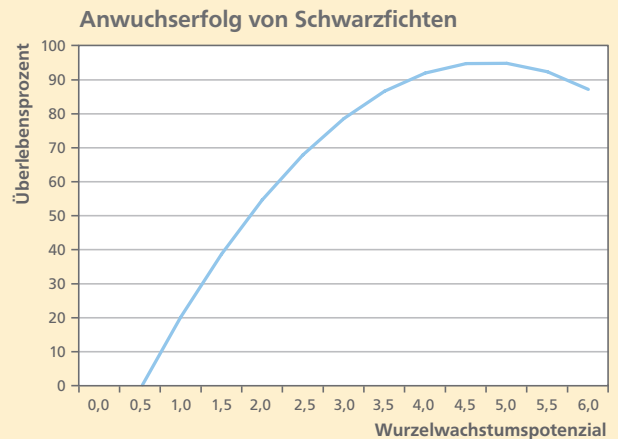


Abbildung 2: Überlebensprozent wurzelackter Schwarzfichten, die zum Pflanzzeitpunkt unterschiedliches Wurzelwachstumspotenzial besaßen (verändert nach Colombo 2004).

### Pflanzverfahren

Die Wahl des geeigneten Pflanzverfahrens, um die Wurzel möglichst unbeschadet in den Boden zu bringen, ist die wesentlichste Voraussetzung für das erfolgreiche Gelingen einer Pflanzung. Der Grundsatz »Die Pflanztechnik muss an die Pflanze angepasst werden« hat sich bewährt und verbietet Manipulationen an der Pflanze – insbesondere ihres Wurzelwerks – zum Zweck der Anpassung an ein ungeeignetes Verfahren. Insofern muss die Empfehlung eines generellen Wurzelschnittes vor der Pflanzung mit einem großen Fragezeichen versehen werden, da der Schnitt zur Verstümmelung eines lebenswichtigen Organs führen kann, dessen Funktionen dadurch beeinträchtigt werden bzw. möglicherweise unwiederbringlich verloren gehen. Generell sollte Pflanzverfahren der Vorzug gegeben werden, die ein großzügiges Pflanzlochvolumen schaffen und somit die Aufrechterhaltung der naturgegebenen Dreidimensionalität des Wurzelsystems zum Zeitpunkt der Pflanzung gewährleisten (Lochpflanzverfahren).

### Wurzelvolumen und Wurzel-Spross-Verhältnis

Unverzüglich nach der Pflanzung einsetzendes Wurzelwachstum ist notwendig, um den Anwuchserfolg zu sichern (Grossnickle 2005). Der Erfolg hängt in dieser Phase stark vom Wurzelsystem ab, das im Wesentlichen noch durch die Kulturbedingungen in der Baumschule geprägt ist. Frische Pflanzen mit größeren Wurzelvolumen können Wasser besser aufnehmen, sind in der Lage den Pflanzschock leichter zu überstehen und haben bessere Anwuchschancen. Die optimale Forstpflanze sollte also eine harmonisch ausbalancierte, funktionale Beziehung zwischen Spross und Wurzel aufweisen. Dies ist Vorbedingung für eine hohe morphologische und physiologische Plastizität, für erfolgreiche Etablierung und gutes Wachstum.

## Wasserversorgung

Der Pflanzchock ist gering, wenn die neu gepflanzten Sämlinge über genügend Bodenkontakt und Bodenwasser verfügen und eine geringe atmosphärische Verdunstung vorliegt. Bisweilen unterliegen Sämlinge bei trocken-warmer Witterung zur Pflanzzeit einem ausgeprägten Wasserdefizit, welches wichtige physiologische Einschränkungen nach sich zieht, die sich zum Beispiel in Form von Verengungen der Spaltöffnungen und Verringerung der Fotosyntheserate äußern. Letztere kann wiederum eine Reduktion der Wurzelneubildung induzieren. Für solche Situationen muss in geeigneter Weise Vorsorge getroffen werden, beispielsweise durch die Wahl des besten Pflanzzeitpunktes (Herbstpflanzung) bzw. durch künstliche Bewässerung.

## Forschungsbedarf

Aufgrund des derzeitigen limitierten Kenntnisstandes ergibt sich für forstliche Forschungseinrichtungen die Notwendigkeit zu gezielten Untersuchungen. Es müsste möglich sein, die Auswirkung verschiedener Pflanzverfahren, wie einzelner vorgelagerter Verfahrensschritte (konkret z. B. den Wurzelschnitt vor der Pflanzung mit der Empfehlung, dass die Pflanze auf der Hauptwurzel in der Hand stehen muss), auf die verschiedenen Baumarten und Pflanzensortimente sowie für die wichtigsten Standorte herzuleiten. Damit einhergehen sollten gut dokumentierte Praxisstudien, deren Ergebnisse dann an die Waldbesitzer als abgesicherte Empfehlung weitergegeben werden können.

## Literatur

Andersen, L.; Rasmussen, H.N.; Brander, P.L. (2000): *Regrowth and dry matter allocation in Quercus robur (L.) seedlings root pruned prior to transplanting*. New Forests 19, S. 205–213

Bohne, H.; Bremer, A.; Baldin, B.; Schlüter, D. (2005): *Wie werden Wachstumsparameter von Gehölzen auf unterschiedlichen Standorten durch das Verschulen beeinflusst*. Erwerbs-Obstbau 47, S. 87–91

Burschel, P.; Stimm, B. (1993): *Der Wurzelschnitt*. Forst und Holz 48, 18, S. 520–524

Colombo, S.J. (2004): *How to Improve the Quality of Broadleaved Seedlings Produced in Tree Nurseries*. In: Ciccarese, L., Lucci, S., Mattsson, A.: Nursery production and stand establishment of broadleaves to promote sustainable forest management. Proceedings of the conference, Rome, Italy, May 7–10, 2001, S. 41–53

Coutts, M.P. (1989): *Factors affecting the direction of growth of tree roots*. Ann. Sci. For. 46 suppl., S. 277s–287s

Davis, A.S.; Jacobs, D.F. (2005): *Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance*. New Forests 30, S. 295–311

Grossnickle, S.C. (2005): *Importance of root growth in overcoming planting stress*. New Forests 30, S. 273–294

Grossnickle, S.C. (2012): *Why seedlings survive: influence of plant attributes*. New Forests 43, S. 711–738

Grossnickle, S.C.; Folk, R.S. (1993): *Stock Quality Assessment: Forecasting Survival or Performance on a Reforestation Site*. Tree Planters' Notes 44, 3, S. 113–121

Haase, D.L. (2007): *Morphological and Physiological Evaluations of Seedling Quality*. USDA For.Serv.Proc. RMRS-P-50, S. 3–8

Haase, D.L. (2011): *Seedling Root Targets*. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-65, S. 80–82

Körner, Ch. (1994): *Biomass fractionation in plants: a reconsideration of definitions based on plant functions*. In Roy, J. & Garnier, E.: A Whole Plant Perspective on Carbon-Nitrogen Interactions. SPB Academic Publ. The Hague, The Netherlands, S. 173–185

Köstler, J.N.; Brückner, E.; Bibeliether, H. (1968): *Die Wurzeln der Waldbäume*. Paul Parey, Hamburg, 284 S.

Kutschera, L.; Lichtenegger, E. (2002): *Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*. Leopold Stocker-Verlag, Graz

Matyssek, R. (o.J.): *Baumphysiologische Auswirkungen von Wurzelschnitten und Verpflanzungen in jungen Holzpflanzen*. Manuskript, Lehrstuhl für Forstbotanik, Forstwiss. Fak. LMU München, Am Hochanger 13, 85354 Freising-Weißenstephan

Nörr, R. (2003): *Wurzeldeformationen - ein Risiko für die Bestandesstabilität. Entstehung, Entwicklung und Auswirkungen von Wurzeldeformationen*. Forstlicher Forschungsbericht 195, 199 S.

Pregitzer, K.S.; DeForest, J.L.; Burton, A.J.; Allen, M.F.; Ruess, R.W.; Hendrick, R.L. (2002): *Fine Root Architecture of nine North American Trees*. Ecological Monographs 72, S. 293–309

Radoglou, K.; Cabral, R.; Repo, T.; Hasanagas, N.; Sutinen, M.-L.; Waisel, Y. (2007): *Appraisal of root leakage as a method for estimation of root viability*. Plant Biosystems 141, S. 443–459

Rothkegel, W.; Ruppert, O. (2011): *Waldbautraining 2011 - Qualitätssicherung bei der Kulturbegründung*. Bayerische Forstverwaltung, Birkenfeld, 13.10.2011

South, D.B.; Shelton, J.; Enebak, S.A. (2001): *Geotropic lateral roots of Container-grown Longleaf Pine Seedlings*. Native Plants Journal 2, 2, S. 126–130

Tinus, R.W.; Burr, K.E.; Atzmon, N.; Riov, J. (2000): *Relationship between carbohydrate concentration and root growth potential in coniferous seedlings from three climates during cold hardening and dehardening*. Tree Physiology 20, S. 1097–1104

---

Dr. Bernd Stimm ist Mitarbeiter am Lehrstuhl für Waldbau der TU München. [stimm@wzw.tum.de](mailto:stimm@wzw.tum.de)

Dr. Helmut Blaschke war Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen der TU München.

Wolfram Rothkegel und Ottmar Ruppert sind Waldbautrainer der Bayerischen Forstverwaltung. [Wolfram.Rothkegel@lwf.bayern.de](mailto:Wolfram.Rothkegel@lwf.bayern.de), [Ottmar.Ruppert@lwf.bayern.de](mailto:Ottmar.Ruppert@lwf.bayern.de)