



ulmer

Hartmut Balder

Die Wurzeln der Stadtbäume

Ein Handbuch zum vorbeugenden und
nachsorgenden Wurzelschutz

Hartmut Balder

Die Wurzeln der Stadtbäume

Die in diesem Buch enthaltenen Empfehlungen und Angaben sind von den Autoren mit größter Sorgfalt zusammengestellt und geprüft worden. Eine Garantie für die Richtigkeit der Angaben kann aber nicht gegeben werden. Autoren und Verlag übernehmen keine Haftung für Schäden und Unfälle. Bitte setzen Sie bei der Anwendung der in diesem Buch enthaltenen Empfehlungen Ihr persönliches Urteilsvermögen ein. Der Verlag Eugen Ulmer ist nicht verantwortlich für die Inhalte der im Buch genannten Websites.

Anmerkung des Verlags zur Schreibweise (Gendering): Gendergerechtigkeit und Inklusion sind bei uns gelebte Praxis – bei der Auswahl unserer Themen, bei der Recherchearbeit, in der Gestaltung. Unsere Texte meinen alle. Damit unsere Inhalte jedoch gut lesbar bleiben, verzichten wir in diesem Werk auf die jeweilige Mehrfachnennung oder Anpassung der Schreibweise bestimmter Bezeichnungen an die weibliche, männliche oder diverse Form.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Sonderausgabe der 1. Auflage 1998 Parey Buchverlag Eugen Ulmer KG 2025

Wollgrasweg 41, 70599 Stuttgart (Hohenheim)

E-Mail: info@ulmer.de

Internet: www.ulmer-verlag.de

Projektleitung: Mark Ellenberger

Umschlaggestaltung: Verlag Eugen Ulmer

Druck und Bindung: BOD – Books on Demand,
Norderstedt

Printed in Germany

ISBN 978-3-8186-2670-9 (Print)

ISBN 978-3-8186-2671-6 (PDF)

Hartmut Balder

Die Wurzeln der Stadtbäume

**Ein Handbuch zum vorbeugenden
und nachsorgenden Wurzelschutz**

Mit 204 Abbildungen, davon 130 farbig auf 25 Tafeln,
und 38 Tabellen

„Unverständigen und ungeübten Händen darf das Pflanzen von Bäumen in den Städten durchaus *nicht* überlassen werden, weil man hier mit zu widerwärtigen Boden-, Luft- und sonstigen Verhältnissen zu kämpfen hat

und von deren *strenger Beachtung* allein das sichere und freudige Gedeihen oft recht kostspieliger Anlagen abhängig ist.“

FINTELMANN, 1877

Vorwort

Bäume zeichnen sich in vielerlei Hinsicht durch träge und nachhaltig wirkende Reaktionen aus. Lange Zeit waren sie nur für die Forst- und Holzwissenschaften, erst später auch für die Biologie, die Gartenbauwissenschaften u. a. Disziplinen interessante Forschungsobjekte. Dieses änderte sich mit der Entwicklung der „Neuartigen Waldschäden“ zu Beginn der achtziger Jahre. Seitdem wurde die Forschung auf diesem Gebiet mit vielen neuen Erkenntnissen intensiviert, so daß Bäume im komplexen Zusammenhang eines natürlichen Ökosystems heute besser verstanden werden.

Nach wie vor wenig bekannt ist die Situation der Park- und Straßenbäume in Gemeinden und Städten. Vielfach handelt es sich hier um künstliche Systeme, so daß viele Pflanzen im urbanen Bereich – verglichen mit ihren natürlichen Standorten – völlig anderen Wachstumsbedingungen und Streßbelastungen ausgesetzt sind.

Die Erforschung urbaner Einflußfaktoren, die Entwicklung und Erprobung von Gegen- und Sanierungsmaßnahmen bei Beeinträchtigungen sowie die Optimierung des Pflanzenbaus bedürfen in der Regel langjähriger Untersuchungen. Sie sind daher zeit- und kostenintensiv und aufgrund der Komplexität, insbesondere bei Altbäumen, schwierig. Vielen Fragestellungen kann nur am natürlichen Standort nachgegangen werden, so daß Laborversuche meist Praxisexperimente nicht ersetzen können. Viele Untersuchungen sind daher nur vor Ort und in enger Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis möglich.

Die Wurzel ist in ihren vielfältigen Funktionen für das Baumwachstum erkannt. Sie lebt im Boden, dem menschlichen Blick entzogen, mehr im Verborgenen, so daß ihr aktuelles Wachstum und ihr tatsächlicher Gesundheitszustand nur schwer zu erfassen sind. Insbesondere der Straßenstandort hat seit den 60er Jahren durch die Industrialisierung und Motorisierung der Städte eine starke Wandlung erfahren, deren Folgen für die Wurzelentwicklung und damit für das Baumwachstum erst in den letzten Jahren sichtbar wurden. Die Erforschung der damit verbundenen Schadensabläufe war und ist Grundlage für die Entwicklung von wurzelfreundlichen Pflanztechniken, vorbeugenden Schutzmaßnahmen sowie Wurzelbehandlungen im Schadensfall.

Mit dem Erscheinen des Fachbuches „Die Wurzeln der Waldbäume“ von J. N. KÖSTLER u. a. (1968) wurde für die Forstwirtschaft die Grundlage für einen modernen Waldbau geschaffen. Ein derartiges Werk fehlte für innerstädtische Standorte, die sich in vielerlei Hinsicht grundlegend von Forstflächen unterscheiden. Das vorliegende Buch widmet sich den komplexen Zusammenhängen der Wurzelentwicklung von Stadtbäumen und gibt einen umfassenden Überblick zum Wurzelwachstum sowie den beeinflussenden Faktoren. 350 Jahre nach den ersten gezielten Straßenbaumpflanzungen werden die bisherigen Erfahrungen zu verbesserten Vorgehensweisen in Planung, Pflanzung und Pflege zusammengefaßt, um den Bäumen im städtischen Raum künftig einen bedarfsgerechteren Standort zu ermöglichen.

Mein Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen des Pflanzenschutzamtes Berlin für die vielen konstruktiven Anregungen bei der wissenschaftlichen Bearbeitung der Thematik, insbesondere Herrn B. Schaefer für die

technische Unterstützung bei der Fotodokumentation. Dem Verlag danke ich für die erfolgreiche Zusammenarbeit und die gute Ausstattung des Buches.

Berlin, im Juni 1998

Hartmut Balder

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Wurzelentwicklung von Bäumen	5
2.1	Wurzelanatomie und -morphologie	6
2.2	Wurzelwachstum	10
2.3	Beeinflussende Faktoren der Wurzelentwicklung	12
2.4	Bedeutung der Wurzel für das Pflanzenwachstum	15
2.4.1	Wasseraufnahme	15
2.4.2	Nährstoffaufnahme	16
2.4.3	Wurzelatmung	17
2.4.4	Produktion von Phytohormonen	18
2.4.5	Verankerung	20
2.4.6	Symbionten	20
3	Beeinträchtigungen der Wurzelentwicklung am städtischen Standort	25
3.1	Nährstoffsituation	27
3.2	Bodenluft	32
3.3	Wasserhaushalt	34
3.3.1	Störung der Infiltration	35
3.3.2	Grundwasserabsenkung	37
3.3.3	Stauäссе	40
3.4	Standortveränderungen	41
3.4.1	Bodenverdichtung	41
3.4.2	Bodenversiegelung	42
3.4.3	Bodenaufschüttungen	43
3.4.4	Bodenabgrabungen	43
3.4.5	Bodenerwärmung	44
3.5	Schadstoffe	44
3.5.1	Gas	44
3.5.2	Auftausalz	49
3.5.3	Hunde-Urin	51
3.5.4	Sonstige	53
3.6	Mechanische Verletzungen	56
3.7	Schaderreger	58
3.8	Witterung	60

4	Abwehr- und Folgeaktionen der Wurzel bei Schädigung	63
4.1	Wundreaktion und Abschottung	63
4.1.1	Rindenverletzung	63
4.1.2	Wurzelkappung	65
4.1.3	Wurzeln- und Wurzelabriß	69
4.1.4	Wurzeltod	69
4.2	Auswirkungen auf das Baumwachstum	70
5	Schäden durch Wurzeln an technischen Einrichtungen	73
5.1	Bauwerke	73
5.2	Straßen- und Wegebeläge	73
5.3	Ver- und Entsorgungsleitungen	75
6	Handlungsempfehlungen zum Wurzelschutz	79
6.1	Vorbeugende Maßnahmen zur Vermeidung von Wurzelschäden	79
6.1.1	Planung und Erstellung von Baumstandorten	79
6.1.1.1	Standortvorbereitung	79
6.1.1.2	Steuerung der Wurzelentwicklung	80
6.1.1.3	Baumpflanzkörbe	83
6.1.1.4	Substrat	84
6.1.1.5	Pflanzenqualität	89
6.1.1.6	Pflanztechnik	91
6.1.1.7	Baumschutzeinrichtungen	96
6.1.1.8	Wurzelschonende Versiegelung	97
6.1.1.9	Pflege von Baumpflanzungen	102
6.1.2	Schutzmaßnahmen vor Schädigung	103
6.1.2.1	Absperrung der Wurzelteller	103
6.1.2.2	Überfahren	104
6.1.2.3	Bodenauftrag	105
6.1.2.4	Unterfahren	107
6.1.2.5	Wassermanagement	107
6.1.2.6	Trassenführung	108
6.2	Gezielte Wurzeleingriffe	108
6.2.1	Freilegen	108
6.2.2	Wurzelvorhang	110
6.2.3	Großbaumverpflanzung	112
6.2.4	Schnitttechnik	116
6.2.5	Wundbehandlung	116
6.2.6	Pflegemaßnahmen	119
6.3	Maßnahmen im Schadensfall	120
7	Sanierung von belasteten Baumstandorten	123
7.1	Düngung	125
7.2	Kalkung	127
7.3	Bodenlockerung und Belüftung	128
7.4	Entsiegelung	131
7.5	Bodenaustausch	131

7.6	Maßnahmen zur Schadstoffreduktion	134
7.7	Beimpfung mit Symbionten	135
8	Wurzel und Recht	137
8.1	Wurzelschutz	137
8.2	Schäden durch Wurzeln	139
8.3	Verkehrssicherungspflicht	139
Anhang	141
I.	Wurzelformen von Straßen- und Parkbäumen	141
II.	Schaderreger an Wurzeln	146
III.	Checkliste zur Erfassung der Standortsituation bei Baumpflanzungen	153
IV.	Formblatt als Wegweiser und Checkliste zur Bauabnahme von Pflanzungen	154
V.	Baustoffe zur wurzelfreundlichen Versiegelung (Beispiele)	156
VI.	Baustoffe zum Wurzelschutz	157
VII.	Düngemittel für Baumpflanzungen	158
VIII.	Bodenhilfsstoffe für Baumpflanzungen	163
IX.	Mulchmaterialien und ihre Eigenschaften	165
X.	Gütebestimmung für Rindenmulch (RM)	168
Literatur	169
Sachwortverzeichnis	178

1 Einleitung

Das Stadtgrün hat im Lebensbereich des Menschen vielfältige positive Wirkungen. Zum einen handelt es sich um vielfältige Vegetationsgesellschaften, z. B. auf Friedhöfen, in Parkanlagen und im Wohn- und Siedlungsgrün, zum anderen um isolierte Baumstandorte auf Plätzen und entlang der innerstädtischen Verkehrswege. Straßenbäume sind für das Stadtgrün von besonderer Bedeutung. Je nach historischer Entwicklung, lokaler Struktur und Siedlungsgröße sind sie in Städten und Gemeinden in unterschiedlich hoher Anzahl vertreten (Tab. 1). Hier tragen sie zur Architektur bei, filtern Stäube und Schadstoffe aus der Luft, spenden Schatten, verbessern das Kleinklima und mindern den Lärm. Ihre ökologischen Funktionen sind darüber hinaus unbestritten. Bei zunehmendem Stellenwert der Bäume wird eine weitere Begrünung der Straßen angestrebt. Nach RUGE gelten 100 Bäume je Straßenkilometer als wünschenswert (MAHLER, 1993).

Zur Gesunderhaltung der Park- und Straßenbäume wenden Städte und Gemeinden erhebliche Finanzmittel auf. Sie betragen in der Bundesrepublik Deutschland allein für

das Straßenbegleitgrün 1 bis 2% der kommunalen Ausgaben, z. B. in Berlin 1993 2,35 Millionen DM für die Pflege der 390 000 Straßenbäume und 5,57 Millionen DM für Nach-, Ergänzungs- und Verjüngungspflanzungen. Die zwischenzeitliche Finanznot vieler Kommunen engt jedoch zunehmend die Möglichkeiten ein. Die Aufwendungen sind u. a. deswegen notwendig, weil Bäume im innerstädtischen Bereich, verglichen mit ihrem natürlichen Standort, zahlreichen Belastungen ausgesetzt sind. Diese ergeben sich zum einen aus der charakteristischen Standortsituation, die an der Straße besonders ausgeprägt ist, zum anderen aus dem unmittelbaren Umgang des Menschen mit den Bäumen. Die Folgen sind Wachstumsbeeinträchtigungen und Schäden, die zumeist im Kronenbild sichtbar werden. Bei einer Bewertung des Gesundheitszustandes der Straßenbäume wurden z. B. in Hannover im Zeitraum von 1986–1988 lediglich 30% als vital, 58% als leicht geschädigt, 12,6% als schwer geschädigt und 0,4% als tot eingestuft. In Berlin wies jeder dritte Straßenbaum im Jahr 1990 deutliche Schäden auf.

Tabelle 1: Straßenbaumzahlen in Städten der Bundesrepublik Deutschland (aus: BALDER, 1994a)

Stadt	Anzahl insgesamt	Anzahl/km Straße
Berlin	390 000 Bäume	79,0 Bäume
Düsseldorf	45 000 Bäume	35,7 Bäume
Hamburg	200 000 Bäume	33,3 Bäume
Hannover	35 000 Bäume	28,5 Bäume
München	93 500 Bäume	–
Stuttgart	40 000 Bäume	–

Vielfach sterben Straßenbäume vor Erreichen ihres natürlichen Alters ab, sie haben z. B. in Berlin derzeit nur eine durchschnittliche Lebenserwartung von ca. 60 Jahren (KLAFFKE, 1990; MAHLER, 1993; WAWRIK, 1993; BALDER u. a., 1997a).

Eine Stadt stellt in Abhängigkeit von Größe und Struktur einen Verdichtungsraum dar. Als eines der Hauptkriterien einer Großstadt gilt zur Abgrenzung gegen andere Siedlungsformen die Konzentration der Bevölkerung auf engem Raum, die physiognomisch in der Anhäufung von Baumassen ihren Ausdruck findet. Hiermit gehen tiefgreifende Veränderungen der Ökosphäre einher (Abb. 1). Luftverunreinigungen, Lufterwärmung, Eingriffe in den Grundwasserstand und Bodenaufschüttungen sind von großer Reichweite. Hinzu kommen eine Eutrophierung vieler

Standorte sowie eine Verdichtung und Versiegelung des Bodens innerhalb der Siedlungen. Für Flora und Fauna bleibt daher in der Regel wenig Raum.

Hieraus ergeben sich für das Stadtgrün vielfältige Belastungen, die auf Plätzen und am Straßenrand noch verstärkt werden. Am Naturstandort stehen Bäume in einer Vegetationsgesellschaft und damit in vielfältiger Wechselwirkung zur Umwelt. Auf Plätzen und an Straßen hingegen werden sie – vom Menschen geplant – isoliert als Einzelbaum, Baumgruppe oder Allee gepflanzt. Der Standortvergleich zeigt wesentliche Unterschiede auf, aus denen sich direkte Einflüsse auf das Wachstum der Bäume ergeben (Abb. 2). So werden Straßenbäume in der Praxis in ein Bodensubstrat gesetzt, welches keinen natürlichen Aufbau aufweist, sondern

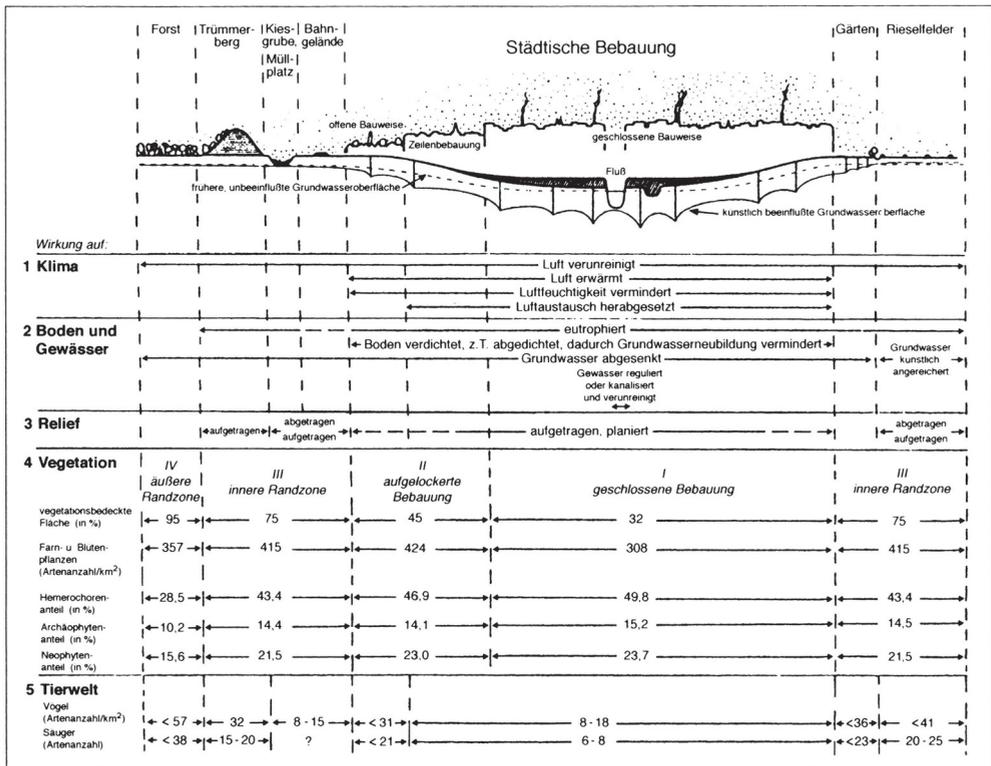
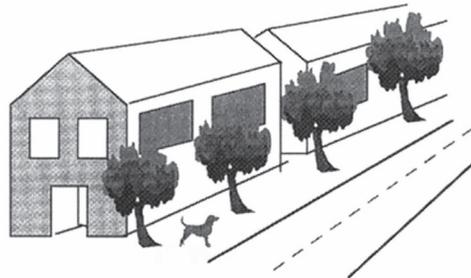


Abbildung 1: Veränderungen der Ökosphäre in einer Großstadt (aus: SUKOPP, 1990)

künstlich zusammengefügt wurde und häufig mit wachstumsbeeinträchtigenden Substanzen belastet ist. Das alljährlich abfallende Laub wird in der Regel aus dem Bereich der Bäume entfernt, so daß der natürliche Nährstoffkreislauf unterbrochen ist. Zusätzlich sind der Wasserhaushalt und der Gasaustausch des Bodens aufgrund einer großflächigen Bodenversiegelung durch Platz-, Straßen- und Gehwegbeläge erheblich beeinträchtigt. Eine Bodenverdichtung, bedingt durch die Bodenvibration des rollenden Verkehrs sowie den menschlichen Tritt und das Beparken des Wurzelraumes der Bäume, verstärkt noch die Situation. Letztlich bewirken die Rückstrahlung von Hauswänden und Straßenbelägen sowie die Staubbelastung der Luft, daß die Temperatur von Platz- und Straßenstandorten erhöht und die Luftfeuchtigkeit reduziert ist. Diese charakteristische

Standortsituation beeinflusst unmittelbar die Wurzelentwicklung, bringt für viele Bäume grundsätzliche Belastungen mit sich und erhöht vielerorts die Prädisposition für weitere abiotische und biotische Streßfaktoren. In der Regel wirken jedoch nicht Einzelfaktoren auf ein Gehölz ein, sondern es handelt sich meist um komplexe Streß- und Krankheitsverläufe mit unterschiedlichen Wechselbeziehungen (HOFFMANN, 1954; MEYER, 1982; MEYER-SPASCHKE, 1987; SUKOPP, 1990; LIESECKE, 1991; LEH, 1991; 1993; BALDER u. a., 1997a).

Dem Wurzelsystem eines Baumes fallen bei der Pflanzenentwicklung vielfältige Aufgaben zu. Hierzu zählen die Verankerung der Pflanze im Boden, die Aufnahme für Wasser und Nährstoffe, die Speicherung für Reservestoffe, die Synthese für Phytohormone und die Verbindung mit essentiellen



Wald

Straße

Ökosystem	←	Pflanzen	→	Einzelbaum / Allee
geschlossen	←	Nährstoffkreislauf	→	unterbrochen
natürlicher Aufbau	←	Boden	→	Kunstsubstrat
natürlicher Zyklus	←	Wasserhaushalt	→	Infiltration verhindert
ungestört	←	Gasaustausch	→	stark beeinträchtigt
ausgeglichen	←	Klima	→	Temperaturerhöhung Reduktion der Luftfeuchte

Abbildung 2: Standortvergleich Wald – Straße (aus: BALDER u. a., 1997a)

Symbionten. Aus diesen vielschichtigen Funktionen wird bereits deutlich, daß eine Störung im Wurzelsystem negative Folgen für das Baumwachstum, seine Standsicherheit oder seine Resistenz gegenüber parasitären und nichtparasitären Schadfaktoren haben muß. Die Wurzel kann daher als Achillesverse der Pflanze bezeichnet werden. Diese Erkenntnis hat im Waldbau sowie in der Gehölzanzucht zahlreiche Forschungsarbeiten initiiert und ihre Ergebnisse

zu praktischen Empfehlungen geführt. Im Stadtgrün wurde der Wurzel in der Vergangenheit hingegen wenig Beachtung beigemessen. Die standortgerechte Baumartenwahl, die weitsichtige Standortvorbereitung in Planung und Ausführung, die Vermeidung von Belastungen, eine kontinuierliche Pflege sowie effektive Maßnahmen im Schadensfall sind jedoch Voraussetzungen für eine gute Wurzelentwicklung und damit für ein vitales innerstädtisches Grün.

2 Grundlagen der Wurzelentwicklung von Bäumen

Die Wurzel ist nach Blatt und Sproß das dritte Grundorgan der Pflanze. Sie unterscheidet sich vom Sproß vor allem dadurch, daß sie niemals Blätter trägt und keine Gliederung in Knoten und Internodien aufweist. Zur Wahrnehmung ihrer vielfältigen Funktionen für Vitalität, Wachstum und Standsicherheit des Baumes ist sie mit anatomischen, morphologischen und physiologischen Eigenschaften ausgestattet. Auch ist sie in der Lage, sich auf die jeweiligen Standortbedingungen einzustellen und sich Veränderungen in einem gewissen Rahmen anzupassen. Endogene und exogene Faktoren beeinflussen das Wachstum, so daß sich unterschiedliche Wurzelsysteme entwickeln.

Ein ausgebildetes Wurzelsystem enthält Wurzeln aller Altersstufen. Sie können zunächst nach ihren Funktionen differenziert werden. Zu den **Skelettwurzeln** werden alle sekundär verdickten, meist langlebigen Wurzeln ohne Sorptionsfähigkeit gezählt,

Faserwurzeln sind die jüngsten Wurzelzweigungen, die als Aufnahmeorgan zur Ernährung des Baumes dienen und sich zu Skelettwurzeln entwickeln. Sie werden dabei von kurzlebigen **Wurzelhaaren** unterstützt (Abb. 3). Weiterhin ist analog zur Verzweigung in der Krone eine Einteilung nach ihrem Durchmesser in Stark-, Derb-, Grob-, Schwach-, Fein- und Feinstwurzeln möglich (Tab. 2). Ihnen liegt eine gleiche Entwick-

Tabelle 2: Einteilung der Wurzeln nach ihrem Durchmesser (aus: KÖSTLER u. a., 1968)

Wurzeltyp	Durchmesser
Starkwurzel	größer 5 cm
Derbwurzel	2 bis 5 cm
Grobwurzel	0,5 bis 2 cm
Schwachwurzel	0,2 bis 0,5 cm
Feinwurzel	0,1 bis 0,2 cm
Feinstwurzel	unter 0,1 cm

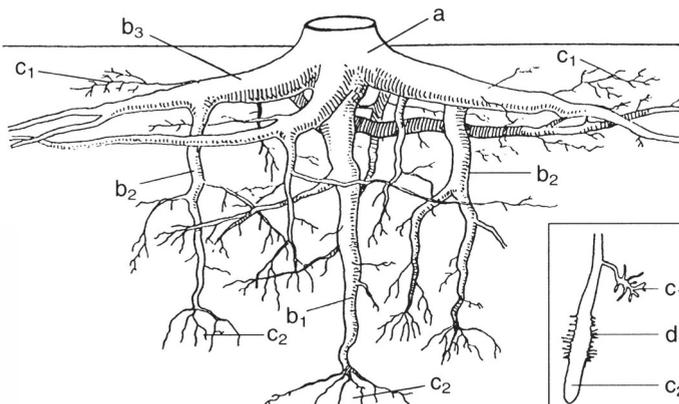


Abbildung 3:

Schematische Darstellung des Wurzelwerks von Waldbäumen (nach JENIK, 1957; aus: KÖSTLER u. a. 1968)

a) Wurzelanläufe, b₁) vertikale Skelettwurzel-Pfahlwurzel, b₂) vertikale Skelettwurzeln-Senkwurzeln, b₃) horizontale Skelettwurzeln, c₁) Endwürzelchen mit beschränktem Wachstum, c₂) verdickte Endwürzelchen, d) Wurzelhaare

lungsgeschichte zugrunde, die bei den Feinstwurzeln beginnt.

2.1 Wurzelanatomie und -morphologie

Gleich dem Sproß wächst die Wurzel durch ein charakteristisches Spitzenwachstum mit Hilfe eines stumpf-kegelförmigen Apikalmeristems. Als Besonderheit schützt eine Kappe aus parenchymatischen Dauerzellen, die sog. Wurzelhaube (**Kalyptra**), die empfindlichen embryonalen Zellen, so daß der Initialkomplex im Innern des Gewebes der Wurzelspitze liegt (Abb. 4). Die jeweils äußersten, ältesten Haubenzellen lösen sich unter Verschleimung ihrer Mittellamellen ab und erleichtern auf diese Weise das Vordringen der Wurzelspitze in das Erdreich. Die Wurzelhaube erneuert sich durch eigenes Bildungsgewebe (Kalytrogen) und gliedert rückwärtig Zellen ab, welche die Wurzel aufbauen. Die meristematische Zone geht ohne scharfe Grenze in die Zellstreckungszone über. Im Gegensatz zur Sproßachse ist das Streckungswachstum der Wurzel ausschließlich auf diesen, nur wenige Millimeter umfassenden Bereich beschränkt. Sie wiederum geht nahtlos in die Wurzelhaarzone über, in der die Differenzierungsprozesse ablaufen.

Die embryonalen teilungsfähigen Zellen an der Wurzelspitze gliedern sich in drei Zonen:

- Eine äußere Schicht (Dermatogen) bildet die Wurzelhaut (**Rhizodermis**). Diese stülpt die Wurzelhaare aus, die im Gegensatz zu den oberirdischen Epidermiszellen keine verdickten Zellwände und keine Kutikula aufweisen. Wurzelhaare leben nur wenige Tage und werden ständig neu gebildet. Sie lösen sich auf und verschleimen. Da mit ihnen auch die Rhi-

zodermiszellen selbst absterben, muß die Wurzel ein neues Abschlußgewebe, die **Exodermis**, bilden.

- Unter der Rhizodermis liegt eine stärkere Lage von Zellen (Periblem), aus dem sich die primäre Rinde entwickelt. Sie baut sich aus abgerundeten, kugeligen Parenchymzellen auf, die große Interzellulare zwischen sich aussparen. Nach innen schließt die sog. **Endodermis** ab, die aus kleineren, eng geschlossenen Parenchymzellen besteht, deren radial gestellte Wände mit fettartigen Stoffen imprägniert sind (Caspary-Streifen).
- Nach innen folgt der **Zentralzylinder**, das Zentrum einer jungen wasser aufnehmen- den Wurzel. Er enthält Gefäße und Siebröhren, die in Gestalt eines radialen Leitbündels angeordnet sind. Es besteht aus einem Holzteil, der in mehrere radial gerichtete Gruppen aus Tracheen und Tracheiden zerlegt ist (strahlenförmiges Xylem). Der Phloemteil des Leitbündels ist ebenfalls in einzelne Stränge aufgeteilt, die zwischen den Holzteilen liegen. Die äußerste, an die Endodermis grenzende Zellschicht wird als Perikambium oder Perizykel bezeichnet.

Mit dem fortlaufenden Wachstum setzt die Seitenwurzelbildung ein. Sie ist nicht am Wurzelvegetationspunkt, sondern ausschließlich an älteren Wurzelabschnitten möglich. Perikambiumzellen beginnen sich an fixierten Stellen vor den Holzteilen der Leitbündel zu teilen und sich zu kegelförmigen Höckern zu formieren (Abb. 4). Die Seitenwurzeln müssen zunächst die Rinde durchbrechen, bevor sie in den Boden vorstoßen können.

Wurzeln wachsen nicht nur in die Länge, sondern auch in die Dicke. Vor dem Dickenwachstum muß zunächst das Kambium angelegt werden. Da dies anfänglich nur außerhalb der gerichteten Holzteile und innerhalb der Siebteile möglich ist, ergibt sich im Querschnitt eine sternförmige Ausprägung (Abb. 4). Das Holz wird vom Kam-

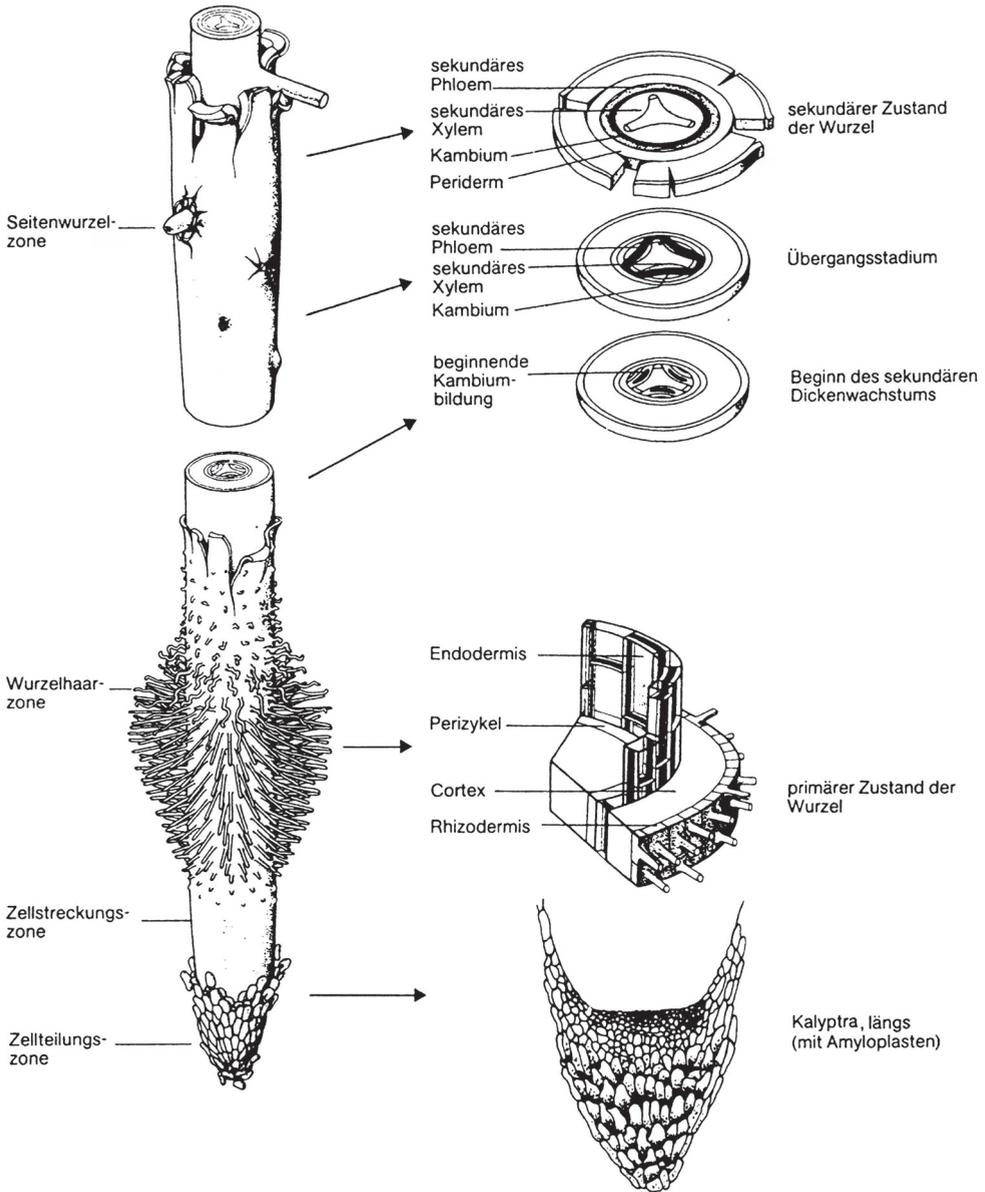


Abbildung 4: Organisation der Wurzel (nach: BRAUNE u. a., 1987; in: HOCK u. a., 1995)

bium nach innen, der Bast mit seinen Siebteilen (Phloem) nach außen gebildet. Durch diese Formierung des Kambiums wird der nahtlose Übergang zwischen den Holz- und Siebteilen des Leitbündels der jungen Saugwurzel zum Holz und Bast der älteren, in die

Dicke wachsenden Wurzel erreicht. Später wächst sich der Stern zum Ring aus und gleicht dem Stammaufbau.

Infolge des Dickenwachstums werden die Gewebe außerhalb des Kambiummantels (Epidermis und primäre Rinde) gedehnt und

zerrissen. Zum Schutz des Wurzelinneren entsteht aus dem Perikambium ein neues Abschlußgewebe, das **Periderm**. Diese Zellschicht entsteht durch Zellteilungen des Korkkambiums, das nach außen und innen Zellen abgibt wie das Kambium (primäres Meristem). Die meisten Zellen werden nach außen in radialen Reihen als Korkzellen (Phellem) abgegeben. Sie sind im Querschnitt rechteckig, relativ dünnwandig und im ausgewachsenen Zustand tot. Ihre Zellwand enthält Suberin (Korkstoff), bestehend aus hochpolymeren Estern langkettiger Fett- und Oxyfettsäuren. Diese Korksicht ist wasserabweisend und schwefelsäurefest, der Gasaustausch geschieht durch eingeschlossene Lentizellen.

Die Wurzeln der Nadelbäume haben ein höher strukturiertes Periderm als Laubbäume. Es besteht aus drei Korkarten: Stein-, Phlobaphen- und Schwammkork. Wichtig für die Wurzel sind Stein- und Phlobaphenkork. Ersterer ist dickwandig und verholzt (lignifiziert), schützt gut gegen mechanische Schäden und ist quellfähig, dadurch aber anfällig für Pilze. Phlobaphenkork enthält Suberin sowie Gerbstoffe und ist damit pilzfeindlich. Während beide Korkarten sich im Stammbereich die Waage halten, wird die Wurzel fast nur von Steinkork umgeben. Steinkork quillt im Winter auf und versorgt durch Osmose Nadelbäume in dieser Jahreszeit mit Wasser.

Jahrringe sind im Wurzelholz weniger deutlich ausgeprägt als im Stammholz, das Alter des Baumes ist deshalb aus den Wurzeln mitunter nur schwer bestimmbar. Eine Kernholzbildung findet bei den obligatorischen Kernholzbildnern sehr verzögert statt. Die Wurzeln von Laubbäumen, die in die Tiefe wachsen, zeigen eine Vermehrung des Holzfaser-Festigungssystems und eine starke Ausbreitung des Speicher-Parenchyms (STRASBURGER u. a., 1991; BRAUN, 1988; HOCK u. a., 1995).

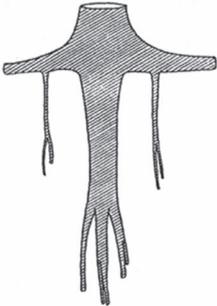
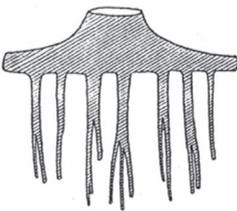
Aus der Keimwurzel entwickelt sich schrittweise das Wurzelsystem. Vom ersten Entwicklungsverlauf des Keimlings leitet sich

das Pfahlwurzelsystem ab, das bei fast allen einheimischen Baumarten (Ahorn, Buche, Fichte, Linde, Eiche, Walnuß, Roßkastanie) in den ersten Lebensjahren als Frühstadium vorhanden ist. Ansonsten besteht die Tendenz zu drei genetisch bedingten Grundwurzelsystemen, die vor allem in der Jugend deutlich hervortritt: **Pfahlwurzel-, Herzwurzel- und Senkerwurzelsystem**. Diese Grundformen unterscheiden sich vorrangig in der Tiefendurchwurzelung, der Dichte der Feinwurzeln und im Wurzel-Sproß-Verhältnis (Tab. 3). Im weiteren Verlauf wirken sich von den Umweltfaktoren der Wasservorrat und die Bodenbeschaffenheit am stärksten auf die Wurzelbildung aus (s. Kap. 2.3). Allgemein scheint aber zu gelten, daß auf günstigen Standorten (gute Wasser- und Nährstoffversorgung) unter sonst vergleichbaren Bedingungen die Gesamtwurzelmasse zwar absolut größer ist als auf armen Standorten. Vergleicht man jedoch die auf die Sproßmasse bezogenen relativen Werte der Wurzelmasse, so ist auf trockenen Böden ein höherer Wurzelanteil festzustellen.

Das zentrale Stockwurzelsystem aus Grobwurzeln ist in seinen Zwischenräumen von feinen und feinsten Wurzeln durchdrungen. Laubbäume bilden allgemein eine intensivere Stockbewurzelung aus als Nadelbäume. Die Baumgattungen, -arten und -sorten sind unterschiedlich in der Lage, sowohl weitreichende Wurzelsysteme zu entwickeln als auch große Bodentiefen zu erschließen. Die Wurzelsysteme der häufigsten Baumarten sind in der Anlage I aufgeführt.

Auf natürlichen Standorten kommt es bei vielen Baumarten zu starken Wurzelverwachungen, auf Plätzen und am Straßenrand sind sie weniger häufig (s. Tafel 10.5). Sie führen in Gehölzbeständen nach Auslichtungen und Durchforstungen durch Auxin- und Nährstoffzufuhr über weite Strecken teilweise zur besseren Versorgung des verbleibenden Bestandes. Vermutet werden auch korrelative Beziehungen, durch welche den schwächeren Bäumen Wasser- und

Tabelle 3: Grundtypen von Wurzelsystemen (aus: KÖSTLER u. a., 1968, verändert)

Pfahlwurzel	Herzwurzel	Senkerwurzel
		
<ul style="list-style-type: none"> • vertikale Hauptwurzel 	<ul style="list-style-type: none"> • kräftige schräg abwärts gehende Wurzeln • dichte Durchwurzelung des Stockbereiches 	<ul style="list-style-type: none"> • kräftige horizontale flache Hauptseitenwurzeln • hiervon abzweigend senkrechte Wurzeln
Tanne (<i>Abies alba</i>) Kiefer (<i>Pinus sylvestris</i>) Eiche (<i>Quercus robur</i>) Ulme (<i>Ulmus</i> spp.)	Lärche (<i>Larix europaea</i>) Douglasie (<i>Pseudotsuga men.</i>) Birke (<i>Betula</i> spp.) Linde (<i>Tilia</i> spp.) Hainbuche (<i>Carpinus betulus</i>) Ahorn (<i>Acer</i> spp.)	Fichte (<i>Picea abies</i>) Strobe (<i>Pinus strobus</i>) Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>) Aspe (<i>Populus tremula</i>) Schwarzerle (<i>Alnus glutinosa</i>) Eberesche (<i>Sorbus aucuparia</i>)

Nährstoffe entzogen werden können. Darüber hinaus ist es Schaderregern möglich, sich auf diesem Wege im Bestand zu verbreiten.

Zahlreiche innerstädtische Baumstandorte sind durch Bauwerke, Ver- und Entsorgungsleitungen räumlich begrenzt (s. Kap. 3). Eine ungehinderte Wurzel ausbreitung ist daher häufig nicht möglich. Bei seitlichen Einschränkungen entwickeln sich halbseitige und auf geringen Aufschüttungen wie Tiefgaragen, Tunneln und Dachterrassen flache Wurzelteller. Dies hat sowohl Auswirkungen für die Nährstoff- und Wasserversorgung als auch für die Standsicherheit der Bäume.

Bei Störungen und Schwächungen des Wurzelsystems, insbesondere nach Bodenaufträgen oder zu tiefer Pflanzung, bilden sich bei einigen Baumarten außerhalb des eigentlichen Wurzelsystems **Adventivwurzeln** (Abb. 5). Sie entstehen aus adventiven

Knospen am Stamm, meist stirbt gleichzeitig ein Teil des ursprünglichen Wurzelsystems ab. Bei Linde und Roßkastanie kann diese Wurzelform auch im Innern alter und vermorschter Stämme auftreten. In diesem Fall wachsen sie im Stamminnern nach unten



Abbildung 5: Adventivwurzelbildung bei zu tiefer Pflanzung



Abbildung 6: Wurzelanläufe bei geringer Tiefenwurzlung

und verankern sich im Boden. Adventiwurzeln übernehmen anteilmäßig die Wasser- und Nährstoffversorgung eines Baumes (HÖSTER, 1993).

Auf schwer durchwurzelbaren Böden (flach anstehendes Gestein, extreme Dichtlagerung, Luftmangel, hoher Grundwasserstand), in denen die Verankerung der Bäume durch Tiefenwurzeln erschwert ist, werden über dem Boden mitunter mächtige **Stützwurzeln** ausgebildet. Sie können am Stammfuß als Wurzelanläufe zu einer erhöhten Produktion an Schaftmasse führen (Abb. 6). Der Wurzelstock ist aus dem Boden hervorgehoben, von ihm abgehende oft mächtige Seitenwurzeln laufen mitunter viele Meter auf der Bodenoberfläche dahin und bilden zahlreiche Senkerwurzeln aus (KÖSTLER u. a., 1968).

2.2 Wurzelwachstum

Mit dem Ausschleichen der Keimwurzel aus dem Samen und der senkrechten Orientierung nach unten in den Boden beginnt das Baumwachstum. Der Samen wird im Boden verankert, die Wasseraufnahme über die Wurzel beginnt. Die Ausrichtung der Wurzel geschieht zielgerichtet, da Bäume im Sproß- und Wurzelwachstum einem geotropischen Reiz unterliegen. Dieser wird wahrscheinlich

über die sich im Zellplasma der Wurzelspitzen befindenden Stärkekörner aufgenommen (s. Abb. 4) und auf den Wuchsstoffstrom in Richtung der dem Erdmittelpunkt zugekehrten Unterseite übertragen. Da bei der Wurzel die Zunahme der Wuchsstoffe hemmend wirkt, wächst die Wurzelunterseite schwächer als die mit Wuchsstoffen normal versorgte Oberseite. Folglich biegt sich die Wurzel positiv geotrop nach unten (Abb. 7).

Positiv geotrop verhalten sich in der Regel die Hauptwurzeln und die Seitenwurzeln 1. Ordnung. Letztere streben von der Hauptwurzel horizontal bis schräg abwärts (Plagiotropismus) in die Bodentiefe. Die Seitenwurzeln 2. Ordnung und höherer Ordnung hingegen sind geotrop unempfindlich und können daher den Boden in allen Richtungen nach Wasser und Nährsalzen durchdringen. Die Wurzeln der Bäume reagieren in ihren Bewegungen nicht wie der Sproß auf Licht, sie sind phototrop unempfindlich.

In Regionen mit einer winterbedingten Vegetationsruhe unterliegt das Wurzelwachstum vieler Baumarten im Jahresverlauf einer deutlichen Rhythmik. In Abhängigkeit von ihren individuellen Wachstumsansprüchen beginnen die Wurzeln zu verschiedenen Frühjahrszeitpunkten mit ihrem Wachstum, das Sproßwachstum setzt meist verzögert ein (Abb. 8). Im Frühsommer und im Herbst zeigen sich vielfach deutliche Wachstumsspitzen. Zum Winter hin beenden viele Baumarten ihr Wurzelwachstum wesentlich nach dem Sproßwachstum, eine Weiterentwicklung findet nur bei milden

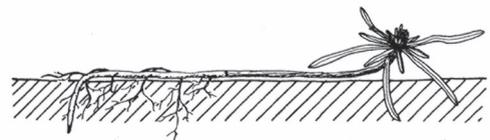


Abbildung 7: Wachstumsverhalten eines quergelegten Keimlings eines Nadelbaumes: positiver Geotropismus der Wurzel (Keimwurzel und Wurzeln 1. Ordnung), negativer Geotropismus der Sproßachse (aus: BRAUN, 1988)

Längen-
zuwachs in

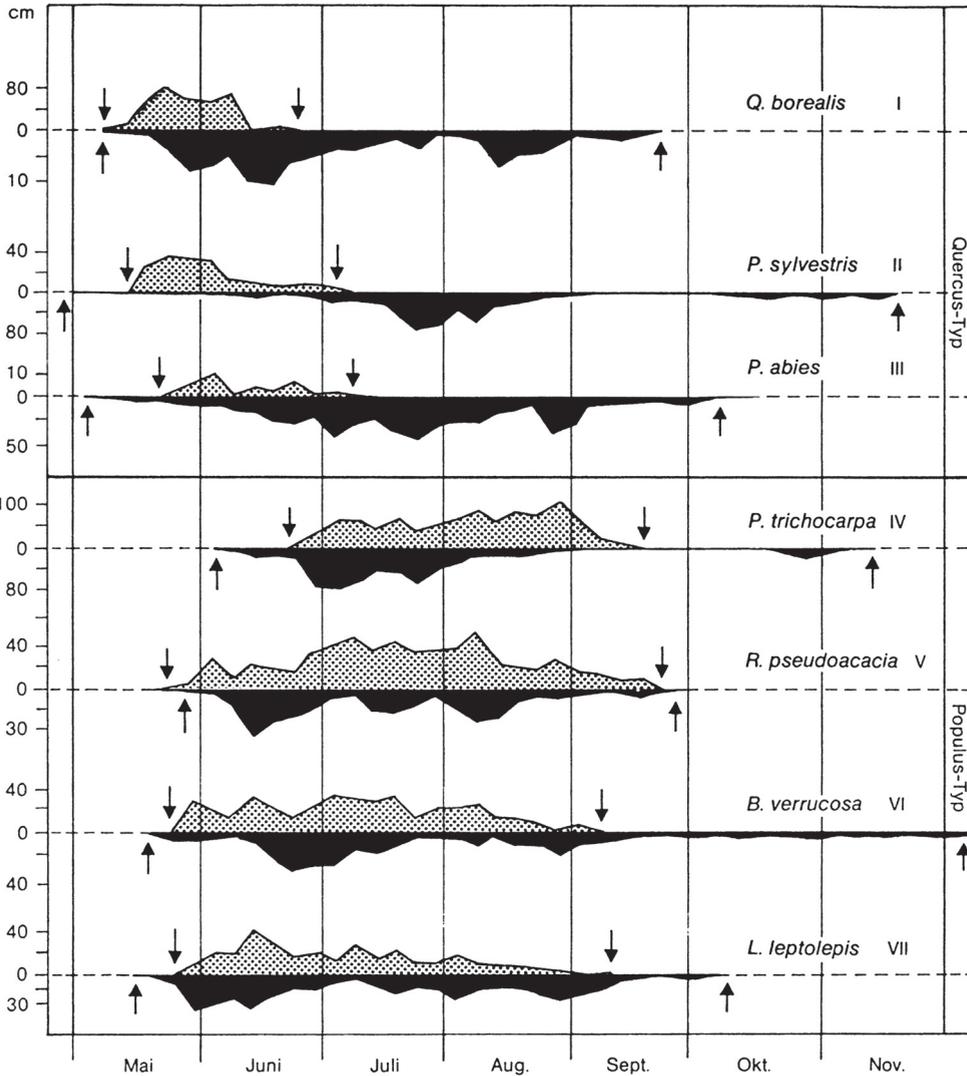


Abbildung 8: Schematisierte Darstellung des jahreszeitlichen Verlaufes von Wurzel- und Sproßwachstum (Pfeile geben Beginn und Abschluß des Wachstums an) (aus: LYR u. a., 1992)

Wetterbedingungen statt, vorrangig bei Nadelgehölzen und Immergrünen. Im jahreszeitlichen Verlauf des Höhenwachstums lassen sich zwei Typen unterscheiden: Vertreter des sog. *Quercus*-Typs (z. B. *Quercus*, *Fagus*, *Pinus*, *Picea*, *Abies*) stellen ihr Höhenwachstum trotz günstiger Wachstumsbedin-

gungen bereits sehr frühzeitig im Jahr ein, während bei Vertretern des sog. *Populus*-Typs (z. B. *Populus*, *Betula*, *Robinia*, *Ailanthus*, *Larix*) dies vorwiegend photo- und thermoperiodisch gesteuert wird.

Der tägliche Zuwachs der Wurzeln ist sehr unterschiedlich, er reicht von 1 mm bei