

6 Die Wurzel

Die Wurzel erfüllt zwei wichtige Aufgaben. Sie dient der Verankerung der Pflanze im Boden und ist das Organ, mit dem die Pflanze Wasser und darin gelöste Nährsalze aufnimmt. Da die Wurzel mechanisch auf Zug beansprucht wird, sind die Festigungselemente vorwiegend in der Mitte zu finden (Kabelwirkung) und nicht wie beim Spross in der Peripherie. Die Aufnahme des Wassers und der Nährsalze erfolgt nur in den unteren, jungen Wurzelbereichen durch das dort befindliche Abschlussgewebe, die Rhizodermis. Häufig dient die Wurzel der Reser-

vestoffspeicherung, nicht selten ist sie auch ein Syntheseort von wichtigen Pflanzenstoffen.

Echte Wurzeln findet man bei den Kormophyten, also bei den Farngewächsen (Pteridophyten) und den Samenpflanzen (Spermatophyten). Moose (Bryophyten), die zu den einfach gebauten Lagerpflanzen (Thallophyten) gehören, haben anstelle von Wurzeln zur Bodenhaftung nur haarähnliche Zellschläuche (Rhizoide).

6.1 Morphologie der Wurzel

Die Wurzel, die aus der Wurzelanlage des Embryos hervorgeht, wird als **Haupt- oder Primärwurzel** bezeichnet. Sie bildet Seitenwurzeln **1. Ordnung** aus, die sich ihrerseits verzweigen und Seitenwurzeln **2. Ordnung** bilden können. Primärwurzeln wachsen dabei als Gegenpol zur Sprossachse senkrecht nach unten (**positiv geotrop** oder **gravitrop**), während sich die Seitenwurzeln 1. Ordnung vor allem horizontal oder seitlich nach unten (**plagiotrop**) orientieren. Seitenwurzeln höherer Ordnung verzweigen sich in alle Richtungen. So entsteht ein ausgedehntes Wurzelsystem. Es dringt nicht nur in die Tiefe, sondern breitet sich auch seitlich im Boden aus. Hinsichtlich der Ausdehnung der Wurzeln unterscheidet man Flachwurzler und Tiefwurzler.

Bei den meisten dikotylen Pflanzen und den Nadelgehölzen bleibt die Hauptwurzel erhalten und verzweigt sich mehr oder weniger. Man

spricht dann von allorrhizer Bewurzelung (Abb. 6.1 A) bzw. von **Allorrhizie** (griech. allos = anders, rhiza = Wurzel). Bei den monokotylen Pflanzen sterben die Hauptwurzeln frühzeitig ab und werden durch mehrere gleichwertige, sprossbürtige Wurzeln ersetzt, die sich ihrerseits verzweigen können. Diese Bewurzelungsform nennt man eine homorrhize Bewurzelung (Abb. 6.1 B) oder **Homorrhizie** (griech. homos = gleich, rhiza = Wurzel). Bei monokotylen Pflanzen spricht man korrekterweise von sekundärer Homorrhizie, da zu Beginn eine Hauptwurzel vorhanden war, die dann absterbt. Bei Farnpflanzen (Pteridophyten) unterbleibt von Anfang an die Ausbildung einer Hauptwurzel. Schon die erste Wurzel am Embryo ist eine sprossbürtige Wurzel (**primäre Homorrhizie**). Wenige Farnpflanzen weisen eine gabelige (dichotome) Wurzelverzweigung auf (Dichotomie, Abb. 6.1 C).

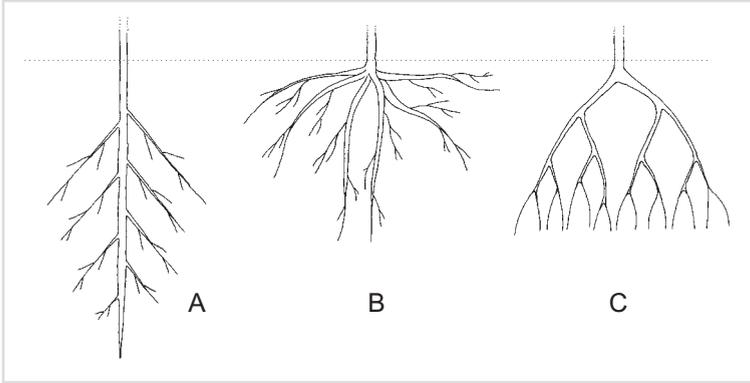


Abb. 6.1 Wurzelmorphologie: A allorhizes Wurzelsystem, B homorrhizes Wurzelsystem, C dichotomes Wurzelsystem (NH)

6.2 Anatomie der Wurzel

6.2.1 Wurzelspitze

Der **Wurzelvegetationspunkt (Wurzelscheitel)** wird von einem **Apikalmeristem (Scheitelmeristem, Abb. 6.2)** gebildet. Von ihm geht das Längenwachstum der Wurzel aus, indem ständig neue Zellen durch Teilung gebildet werden (**Zellvermehrungszone**). Die empfindlichen Embryonalzellen des Meristems werden von einer **Wurzelhaube (Kalyptra)** schützend umgeben. Im Zentrum des Apikalmeristems liegen mehrere **Initialzellen**, die sich inäqual teilen. Die eine Tochterzelle ist wieder eine Initialzelle, die andere differenziert zu einer Dauerzelle. Die Zahl der Initialzellen bleibt dadurch konstant. Bei den Farnpflanzen besteht der Wurzelscheitel nicht aus einem Initialkomplex, sondern aus einer vierschneidigen **Scheitelzelle**. Von ihren Segmenten werden sowohl die Zellen des Wurzelkörpers gebildet als auch nach außen die Zellen der Kalyptra.

Die **Kalyptra** entsteht bei den Samenpflanzen entweder aus den spitzenwärts gelegenen Zellen des Apikalmeristems oder aus einem besonderen Bildungsgewebe, dem **Kalyptrogen**. Die inneren Zellen der Kalyptra enthalten Stärkekörner, die als **Statolithen** gedeutet werden und vermutlich bei der Wahrnehmung der Schwerkraftrichtung eine Rolle spielen (Statolithentheorie). Die Mittellamellen der äußeren

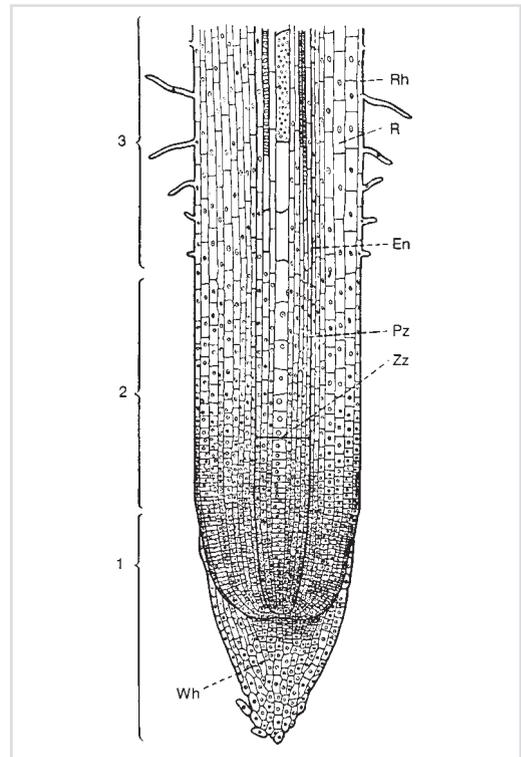


Abb. 6.2 Längsschnitt durch die Wurzelspitze: 1 Apikalmeristem mit Wurzelhaube (Wh), 2 Streckungszone, 3 Differenzierungszone mit Wurzelhaaren, En Endodermis, Pz Perizykel, R Wurzelrinde, Rh Rhizodermis mit Wurzelhaaren, Zz Zentralzylinder (nach Holman und Robbins, aus Deutschmann et al.)

Schichten der Kalyptra verschleimen und wirken beim Eindringen der Wurzel in den Boden wie ein Gleitmittel. Die abgeschilferten Zellen der Wurzelhaube werden vom Apikalmeristem bzw. vom Kalyptragen laufend nachgebildet.

Unmittelbar an das Apikalmeristem schließt sich die wenige Millimeter lange **Zellstreckungszone** an, deren Zellen eine Längsstreckung aufweisen. Nach oben folgt im Anschluss dann die **Wurzelhaarzone**, die mit einer deutlichen Zelldifferenzierung einhergeht (**Differenzierungszone**). Durch Ausstülpung der Rhizodermiszellen entwickeln sich dort die einzelligen **Wurzelhaare**. Im Innern der Wurzel kann bereits in Zentralzylinder und Wurzelrinde unterschieden werden. Auch differenzieren sich dort die Leitelemente.

6.2.2 Die primäre Wurzel

Entsprechend der mechanischen Beanspruchung auf Zug ist die Wurzel nach dem **Kabelprinzip** mit den Festigungselementen im Zentrum aufgebaut. Sie gliedert sich im Querschnitt (Abb. 6.3) deutlicher als der Spross in **Rinde** und **Zentralzylinder**. Dies wird durch die **Endodermis** bewirkt, die im Mikroskop als deutlich erkennbare, meist einzellige Schicht die Rinde gegen den Zentralzylinder abschließt. Die Rinde ist in der Regel deutlich dicker als im Spross und besteht aus parenchymatischen Zellen mit mehr oder weniger großen Interzellularen. Sie dient vor allem der Reservestoffspeicherung. Im Zentralzylinder befindet sich das Leitgewebe mit meist zusätzlichem Festigungsgewebe im Mark. Zur Rinde hin wird der Zentralzylinder durch den **Perizykel** abgeschlossen. Als Abschlussgewebe findet man im Bereich der Wurzelspitze die **Rhizodermis**, in höher liegenden Bereichen wird diese durch eine darunter sich entwickelnde **Exodermis** ersetzt.

Rhizodermis, Exodermis

Die Rhizodermis (griech. rhiza = Wurzel, derma = Haut), das primäre Abschlussgewebe der Wurzel, besteht aus lückenlos aneinander

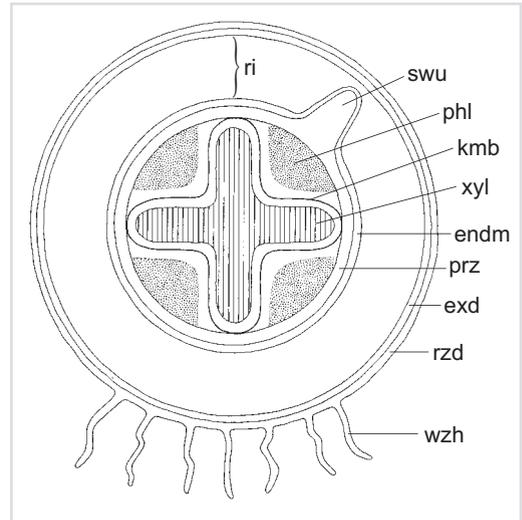


Abb. 6.3 Querschnitt durch eine primäre Wurzel einer dikotylen Pflanze: endm Endodermis, exd Exodermis, kmb Kambium, phl Phloem, prz Perizykel, ri Rinde, rzd Rhizodermis, swu Seitenwurzelsanlage, wzh Wurzelhaare, xyl Xylem (NH)

schließenden, zumeist längs gestreckten, zartwandigen Zellen. Entsprechend ihrer Aufgabe, Wasser und Nährsalze aus dem Boden aufzunehmen (**Absorptionsgewebe**), ist sie im Gegensatz zur Epidermis der oberirdischen Organe nicht von einer Cuticula überzogen. Im Bereich der Differenzierungszone, wenige Millimeter über der Wurzelspitze, wachsen die Rhizodermiszellen zu **Wurzelhaaren** aus (Wurzelhaarzone). Durch diese vergrößert sich die resorptive Oberfläche der Rhizodermis um ein Vielfaches. So wurde ausgerechnet, dass z. B. eine Roggenpflanze, die bis zu 13,8 Millionen Wurzeln besitzen kann, 14 Milliarden Wurzelhaare mit einer Gesamtoberfläche von 400 m² trägt. Die Wurzelhaarzone kann mit bloßem Auge an der Wurzelspitze als zarter Flaum erkannt werden. Nur in diesem Bereich kann die Landpflanze Wasser aufnehmen.

Die **Wurzelhaare** sind dünnwandige und durch Verschleimung ihrer äußeren Wandschichten klebrige Ausstülpungen. Sie sind kurzlebig und sterben schon nach wenigen Tagen ab. Von der Wurzelspitze her werden aber immer wieder neue Wurzelhaare nachgebildet, so dass die Wurzelhaarzone spitzenwärts vorrückt und

sie sich stets in gleich bleibendem Abstand von der Wurzelspitze befindet. Mit den absterbenden Wurzelhaaren geht auch die Rhizodermis zugrunde. An ihre Stelle tritt ein neues Abschlussgewebe, die Exodermis.

Die **Exodermis** entsteht direkt unter der Rhizodermis aus einer oder mehreren Zellschichten der äußeren Rinde, indem deren Zellwände durch eine **Suberinlamelle** (Korklamelle) abgedichtet werden. Häufig werden dünne Sekundärwände aufgelagert, die zusätzlich verholzen können. Trotzdem handelt es sich um lebende Zellen. Mitunter bleiben einige Zellen unverkorkt und bilden sog. **Durchlasszellen**, so dass die Aufnahme von Wasser und Nährsalzen in gewissem Umfang noch möglich ist.

Endodermis

Die Endodermis (griech. endon = innen, derma = Haut) stellt das **innere Abschlussgewebe** der primären Rinde dar und trennt diese deutlich vom Zentralzylinder. Sie ist meist einschichtig und dient als physiologische Scheide, indem sie den **apoplastischen** Wasser- und Mineral-salztransport kontrolliert. Der Wasserweg geht ab der Endodermis membrankontrolliert über den Protoplasten (Osmose). Man kennt drei verschiedene Formen. In jungen Wurzelteilen findet man die sog. **primäre Endodermis** mit Zellen, in deren Radialwänden suberin-

artige Substanzen (Endodermin) bandförmig eingelagert sind (Abb. 6.4 A). Dieses Band bezeichnet man nach seinem Entdecker als den **Caspary'schen Streifen**. Er blockiert den Wasserweg in der Zellwand und zwingt den Wasser- und Nährsalzstrom durch das Plasmalemma in den Symplasten, von wo aus er „kontrolliert“ weitertransportiert wird. Dieser Mechanismus bietet die Grundlage für das Selektionsvermögen der Pflanze gegenüber der Bodenlösung. Bei Angiospermen mit sekundärem Dickenwachstum stellt die primäre Form den Endzustand der Endodermis dar.

Die Zellen der sog. **sekundären Endodermis** sind zusätzlich mit einer Korklamelle (Suberinlamelle) ausgekleidet (Abb. 6.4 B). Eine **sekundäre Endodermis** findet man als Endzustand bei Gymnospermen und bei dikotylen Pflanzen ausnahmsweise, wenn bei geringem sekundärem Dickenwachstum die Wurzelrinde funktionsfähig bleibt. Einzelne Zellen, sog. **Durchlasszellen**, bleiben unverkorkt. Die Form der **tertiären Endodermis** wird meist nur bei Monokotyledonen erreicht, weil diese kein sekundäres Dickenwachstum haben und deshalb die Endodermis erhalten bleibt. Auf die Korklamelle werden dort dicke Cellulose-schichten aufgelagert, die häufig auch verholzen. Liegt eine allseitige Verdickung vor, spricht man von einer **O-Endodermis**, bleibt dagegen die Cellulose-Auflagerung auf die Radialwände

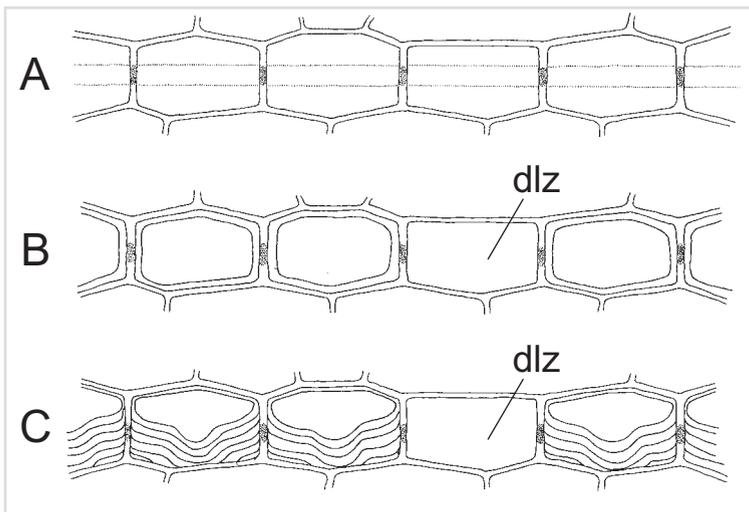


Abb. 6.4 Endodermis der Wurzel, verschiedene Stadien: A primäre Endodermis, Radialwände mit Caspary'schem Streifen, B sekundäre Endodermis mit allseitig aufgelegter Korklamelle, einzelne Durchlasszellen (dlz), C tertiäre Endodermis mit u-förmig verdickten Zellwänden, einzelne Durchlasszellen (dlz) unverdickt (nach Nultsch, NH)

und die innere Tangentialwand beschränkt, spricht man von einer **U-Endodermis** (Abb. 6.4 C). Auch bei der tertiären Endodermis verbleiben einige Zellen als Durchlasszellen im primären Zustand.

Perizykel

Der Perizykel (griech. peri = um, herum, kyklos = Kreis), die äußerste Zellschicht des Zentralzylinders, besteht aus zartwandigen, plasmareichen Zellen, die lückenlos aneinander schließen. Die Zellen des Perizykels bleiben als **Restmeristem** teilungsfähig. Sie beteiligen sich am sekundären Dickenwachstum und am **Seitenwurzelwachstum** (endogene Verzweigung, Abb. 6.3). Der Perizykel wird wegen seiner Teilungsfähigkeit auch als **Perikambium** bezeichnet. Die wachsende Seitenwurzel muss zunächst die Endodermis durchbrechen, die der Seitenwurzel noch eine Zeitlang durch Dilatationswachstum folgen kann. Dann durchstößt sie das Rindengewebe und die außen gelegene Exodermis. Anschluss an das Leitgewebe der Hauptwurzel erhält sie durch Umdifferenzierung von Perikambium- und Parenchymzellen. Bei Monokotyledonen, die kein sekundäres Dickenwachstum aufweisen, ist der Perizykel häufig mehrschichtig, und seine Zellen können verholzen.

Leitbündel

Die Leitungselemente der Wurzel sind im Zentralzylinder lokalisiert und bilden selbstständige Phloem- und Xylemstränge, das man als **radiäres** (oder **radiales**) **Leitbündel** bezeichnet (Abb. 6.5). Die Xylemstränge sind **sternförmig** angeordnet, in den Buchten liegen die Phloemstränge. Dikotyle Pflanzen haben nur wenige Xylemstrahlen (**oligarch**) und werden je nach Anzahl der Strahlen als diarch, triarch, tetraarch usw. bezeichnet (Abb. 6.5 A). Monokotyle Pflanzen haben ein vielstrahliges (**polyarches**) Leitsystem mit mehr als sieben Strahlen (Abb. 6.5 B). Palmenwurzeln bringen es auf über 100 Xylemstrahlen. Die Zahl der Strahlen ist nicht fest und kann sich sogar innerhalb einer Wurzel ändern.

Die Phloem- und Xylemstränge sind durch Parenchymstreifen voneinander getrennt. Nur bei den Gymnospermen und dikotylen Pflanzen, deren Wurzeln zu sekundärem Dickenwachstum befähigt sind, ist dort an der Innenseite der Phloemstränge bereits das **Kambium** vorgebildet. Im Zentrum stoßen die Strahlen entweder unmittelbar zusammen, oder es liegt ein sklerenchymatisches oder parenchymatisches Mark vor, letzteres immer bei den Monokotyledonen.

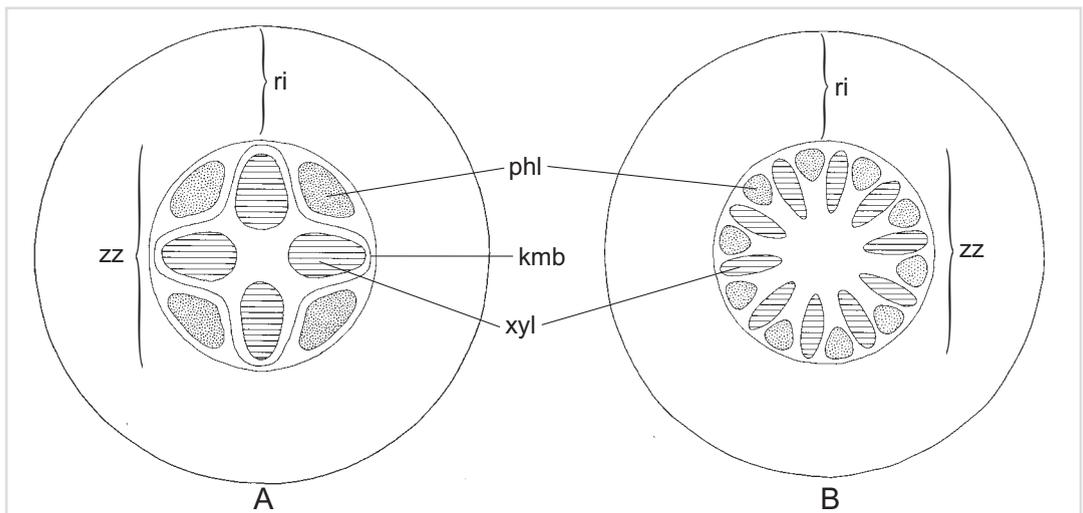


Abb. 6.5 Leitbündel der Wurzel: A radiär oligarches Leitbündel der dikotylen Pflanzen, B radiär polyarches Leitbündel der monokotylen Pflanzen, kmb Kambium, phl Phloem, ri Rinde, xyl Xylem, zz Zentralzylinder (NH)

6.2.3 Das sekundäre Dickenwachstum

Gymnospermen und dikotyle Pflanzen zeigen auch bei der Wurzel ein sekundäres Dickenwachstum, das mit dem Dickenwachstum des Sprosses zeitlich synchron ist. Die Bildung des Kambiums geht von den parenchymatischen Geweben zwischen den Xylemstrahlen und den Phloembereichen aus. Die neu gebildeten Kambiumstreifen treffen über den Xylemstrahlen auf das teilungsfähige Perikambium, so dass damit ein **sternförmiges Kambium** entsteht (Abb. 6.6 A). Es bildet genauso wie das Kambium des Sprosses nach innen Holz und nach außen Bast (sekundäre Rinde) mit jeweils den gleichen Elementen. Oberhalb der Xylemstrahlen werden **primäre Markstrahlen** im Holz und Bast angelegt. Zusätzlich können später im Holz und Bast **Holz-** bzw. **Baststrahlen** entstehen.

Durch eine rege Holzproduktion in den Buchten erweitert sich mit der Zeit das zunächst sternförmige Kambium zu einem **geschlossenen Kambiumring**. Im Ergebnis lässt sich eine sekundär in die Dicke gewachsene Wurzel nur schwer von einem sekundären Spross unterscheiden, allenfalls an den primären Markstrahlen, die bei der Wurzel innen an den primären Xylemstrahlen enden (Abb. 6.6 B) und nicht wie beim Spross im Mark.

Durch die Umfangserweiterung während des sekundären Dickenwachstums kommt es zwangsläufig auch bei der Wurzel zu einer Veränderung des **Abschlussgewebes**. Die primäre Rinde und die Endodermis können noch kurzzeitig durch **Dilatationswachstum** der Umfangserweiterung nachgeben, werden dann aber gesprengt und abgeworfen. Die **Peridermbildung** geht vom **Perikambium** aus,

wobei der gebildete Kork dem der Sprossachse gleicht. Auch kann eine **Borkenbildung** beobachtet werden.

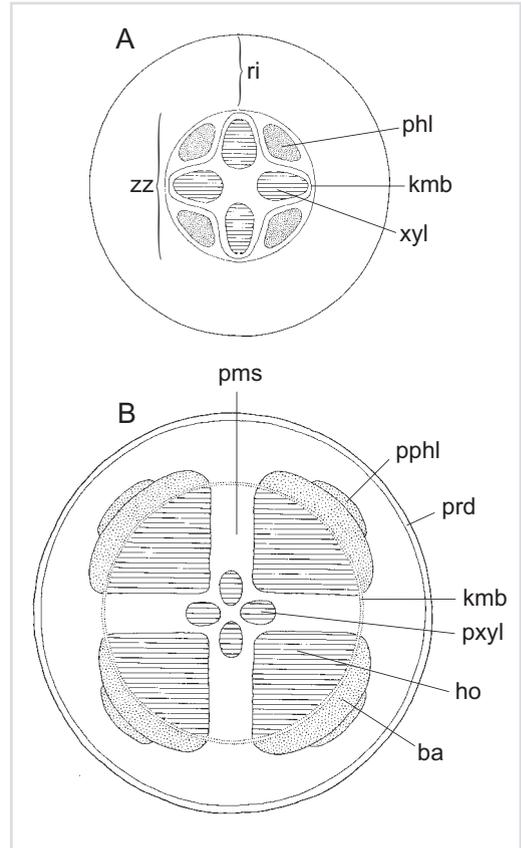


Abb. 6.6 Sekundäres Dickenwachstum der dikotylen Wurzel: A primäres Stadium, B sekundäres Stadium, ba Bast, ho Holz, kmb Kambium, phl Phloem, pms Markstrahl, ppl primäres Phloem, prd Periderm, ri Rinde, pxyl primäres Xylem, xyl Xylem, zz Zentralzylinder (nach Lüttge et al., NH)

6.3 Wurzelmetamorphosen

Die Wurzeln von Pflanzen, die unter extremen Bedingungen leben, können spezielle Aufgaben haben. Dies ist mit einem Gestaltwandel der Wurzel verbunden. Von Wurzelmetamorphosen spricht man dann, wenn Gestalt und Funktion der Wurzel stark verändert sind.

Rüben: Als Rüben bezeichnet man dicke, fleischige Primärwurzeln, die der Stoffspeicherung (vorwiegend Kohlenhydrate) dienen. In die Rübenbildung kann auch das Hypokotyl einbezogen sein. Die Rübe der Karotte und der Zuckerrübe wird fast ausschließlich von der Wurzel gebildet, an der Futterrübe hat das Hypokotyl starken Anteil. Die „Rote Rübe“ ist streng genommen keine „Rübe“, sondern eine Hypokotylknolle.

Wurzelknolle: Auch Wurzelknollen dienen bevorzugt der Speicherung von Kohlenhydraten (Jamswurzel, Tobinambur, Dahlie). Die sprossbürtigen Wurzeln schwellen dabei knollenförmig an und tragen keine Seitenwurzeln.

Stützwurzeln: Viele Pflanzen der Tropen bilden Wurzeln aus, die der zusätzlichen Befestigung dienen. Die Maispflanze und manche Mangrovenbäume, die in Sümpfen leben, bilden zu diesem Zweck Stützwurzeln aus. Auch einige Pflanzen, die die Gezeitenzonen tropischer Meere besiedeln, werden durch Stützwurzeln über das mittlere Hochwasserniveau erhoben. Andere tropische Bäume, wie z. B. der Indische Gummibaum, treibt von den Zweigen aus mächtige Stützwurzeln bis zum Boden, die dem oberirdischen Sprosssystem dann den nötigen Halt verleihen. Die gleiche Funktion erfüllen die mächtigen Brettwurzeln mancher Bäume des tropischen Regenwaldes, die an-

sonsten nur ungenügend im Boden verankert wären.

Ranken- und Haftwurzeln: Sie dienen Kletterpflanzen zum Anheften an die Unterlage. Die Vanille befestigt ihren schwach entwickelten Stängel mittels Rankenwurzeln an einer Stütze. Der Efeu klammert sich mit sprossbürtigen Haftwurzeln an seine Unterlage, häufig an Mauern, fest. Bei der jungen Efeuranke besitzen diese Wurzeln noch Wurzelhaare und dienen der Wasseraufnahme. Erst später verkleben sie mit der Unterlage.

Luftwurzeln: Bei Epiphyten (Aufsitzerpflanzen) dienen Luftwurzeln der Wasseraufnahme und der Assimilation. Sie dringen nie oder erst spät in den Boden ein. Die Exodermis ist als spezielles, mit Luft gefülltes Absorptionsgewebe ausgebildet, das Velamen, mit dem sie Regenwasser aufnehmen können. Durch die Chloroplasten in den Rindenzellen sind die Luftwurzeln grün und zur Photosynthese befähigt.

Wurzelhaustorien: Halbschmarotzer (z. B. Augentrost, Klappertopf, Wachtelweizen, Mistel) und Vollscharotzer (z. B. Würger-Arten) zapfen mit Wurzelhaustorien die Xylemstränge ihrer Wirtspflanze an und versorgen sich dadurch mit Wasser und Nährsalzen.

Atemwurzeln: Manche Sumpfpflanzen, wie z. B. verschiedene Mangroven-Arten und die Sumpfyzypresse, bilden Atemwurzeln aus. Es sind Seitenwurzeln des unterirdischen Wurzelsystems, die senkrecht nach oben wachsen (negativ geotrop). Sie erheben sich wie kleine Kegel über den schlammigen Untergrund und versorgen den Wurzelkörper mit Luft.

6.4 Praktische Aufgaben

6.4.1 Mikroskopie von Gewebeschnitten der Wurzel

1. Die Wurzelspitze

Schlafmohn – *Papaver somniferum* –
Papaveraceae

Spitze der Keimwurzel, Gesamtansicht

Objekt: Keimwurzeln von etwa 2 cm großen Keimpflanzen.

Präparation: In einer geschlossenen Petrischale lässt man Mohnsamen auf feuchtem Filtrierpapier bei Zimmertemperatur auskeimen. Nach etwa fünf Tagen haben sich die Keimpflanzen so weit entwickelt, dass die Wurzelspitzen mikroskopiert werden können. Mit einer Pinzette werden die Keimpflanzen entnommen und mit den Wurzeln in einen auf dem Objektträger vorbereiteten Tropfen Chloralhydrat (MR 05) getaucht. Mit einer Rasierklinge wird von der Wurzelspitze ein 1 bis 2 mm langes Stück abgeschnitten, das dann im Chloralhydrattropfen verbleibt und wie gewohnt aufgehellt wird.

Optionen: Kernfärbung mit Carmin-Essigsäure (MR 03). Färbung der Stärke mit Iod-Lösung (MR 17).

Beobachtung

Bei schwächster Vergrößerung (50-fach) wird die Spitze der Wurzel in das Blickfeld gebracht (Abb. 6.7 A). Am unteren Ende liegt die **Wurzelhaube** (Kalyptra), darüber die glatte **Streckungszone** und dann folgt die **Wurzelhaarzone**, die mit zahlreichen **Wurzelhaaren** besonders auffallend ist. Bei stärkerer Vergrößerung (100-fach) erkennt man, dass sich unten an der Wurzelhaube die ältesten Zellen ablösen (Abb. 6.7 B). Oft liegt dort ein kompakter Zellhaufen. Im Präparat mit Kernfärbung hebt sich die durchsichtige Wurzelhaube besser vom kompakteren, eigentlichen Wurzelkörper ab. Wenn das Präparat durchsichtig genug ist, kann man kurz hinter der Wurzelhaube das **Kalyptragen** erkennen. Es besteht wie für ein Kambium typisch aus radial in Reihe stehenden Zellen. Nahe der Wurzelspitze enthalten die Zellen viele kleine Stärkekörner (**Statolithenstärke**), die allerdings nur im gefärbten Präparat sichtbar sind. Wurzelhaare sind Ausstülpungen der **Rhizodermis** und sind von

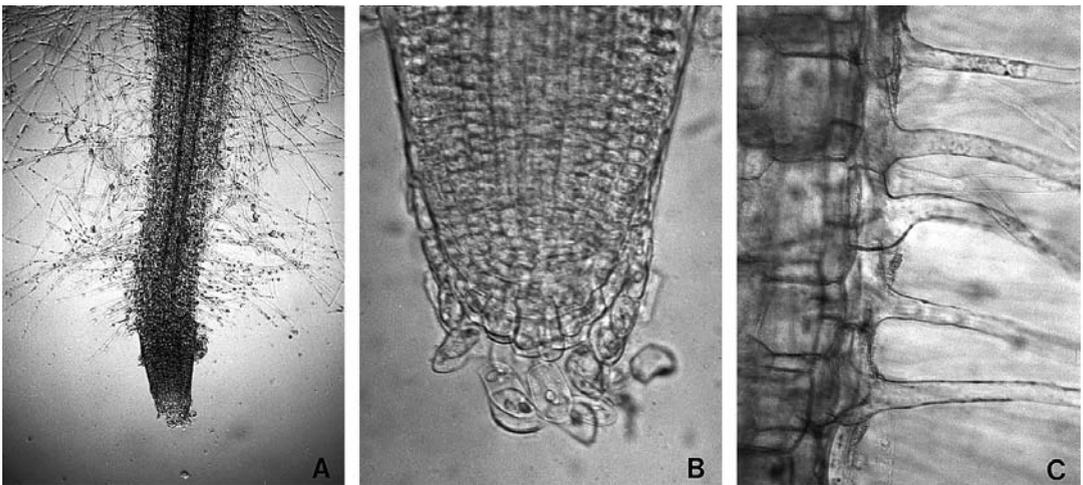


Abb. 6.7 Wurzelspitze des Mohns (*Papaver somniferum*): A Wurzelspitze mit Wurzelhaarzone, B Wurzelhaube mit abschliffenden Zellen, C Rhizodermiszellen zu Wurzelhaaren ausgebildet (StB)

dieser nicht durch eine Zellwand abgetrennt (im Unterschied zu Haaren am Spross!). Dies kann bei 400-facher Vergrößerung beobachtet werden (Abb. 6.7 C). Die **Zellkerne** liegen meist nahe der Wurzelhaarspitze.

Aufgabe

- ▷ Übersicht: Zeichnen der Wurzelspitze mit Kalyptra, Streckungszone und Wurzelhaarzone (nicht zellulär).
- ▷ Ausschnitt: ein Stück der Wurzelhaarzone mit Wurzelhaaren in verschiedenen Entwicklungsstadien mit ihren Zellkernen (Einstrich-Zeichentechnik).

2. Die Wurzel der monokotylen Pflanzen

Schwertlilie – *Iris germanica* – Iridaceae

Querschnitt der Wurzel

Objekt: Wurzeln, etwa 5 mm dick; geeignet ist frisches oder besser in Ethanol (MR 01) eingelegetes Material.

Präparation: Die Wurzel wird exakt quer angeschnitten, und in dieser Schnittrichtung werden mehrere dünne Schnitte hergestellt. Das Präparat wird mit Chloralhydrat aufgehellt (MR 05).

Optionen: Färbung verholzter Zellwände mit Phloroglucin-HCl (MR 12).

Beobachtung

In der Übersicht (50-fach) erkennt man einen relativ dicken **Rindenbereich** (ri) und in der Mitte den **Zentralzylinder** (zz, Abb. 6.8). Eine **Exodermis** (exd) bildet das äußere Abschlussgewebe. Daran haften manchmal noch **Rhizodermisreste** (rzd). Die Rinde endet innen mit der **Endodermis** (endm). Im Zentralzylinder erkennt man das strahlig angeordnete **Xylem** (xyl, 10–12 Strahlen, radiär polyarch) mit einem weitlumigen Gefäß und mehreren Tracheiden pro Strahl. Zwischen den Strahlen

liegt das hellwandige **Phloem** (phl). Phloroglucin-HCl-Färbung erleichtert die Zuordnung (Abb. 6.9 und 6.11).

Bei Vergrößerung (100-fach bzw. 400-fach, Abb. 6.9 bis 6.11) sieht man, dass die **Exodermis** (exd) mehrschichtig ist. Ihre Zellen sind verkornt und zusätzlich verholzt (Rotfärbung mit Phloroglucin-HCl). Die Zellen des Rindenparenchyms (Abb. 6.11) sind rundlich, relativ dickwandig, getüpfelt und bilden dreieckige **Interzellularen**. Die Endodermis (endm) ist

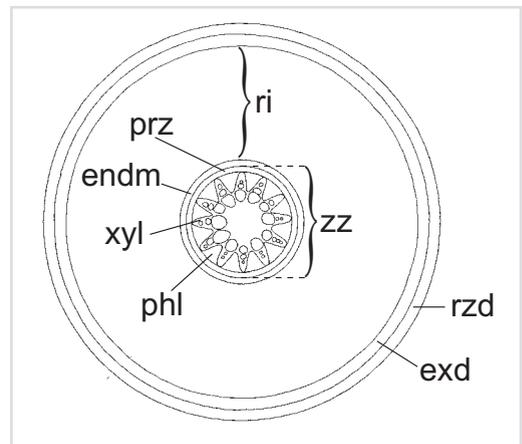


Abb. 6.8 Querschnitt der Iriswurzel (*Iris germanica*), Übersicht: endm Endodermis, exd Exodermis, prz Perizykel, phl Phloem, ri Rinde, rzd Rhizodermis, xyl Xylem, zz Zentralzylinder (NH)

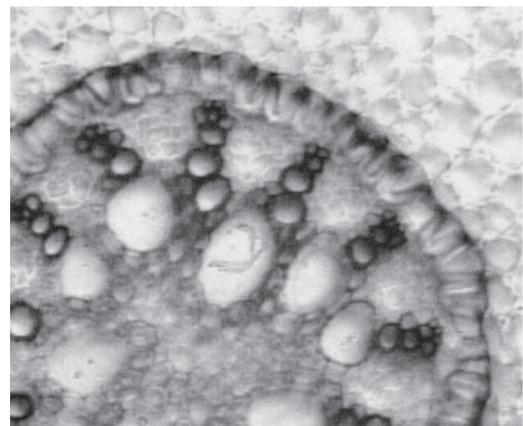


Abb. 6.9 Iriswurzel im Querschnitt (*Iris germanica*): Ausschnitt des Leitbündels im Bereich der U-Endodermis mit Rindenparenchym, Beschriftung siehe Schemazeichnung Abb. 6.10 A (StB)



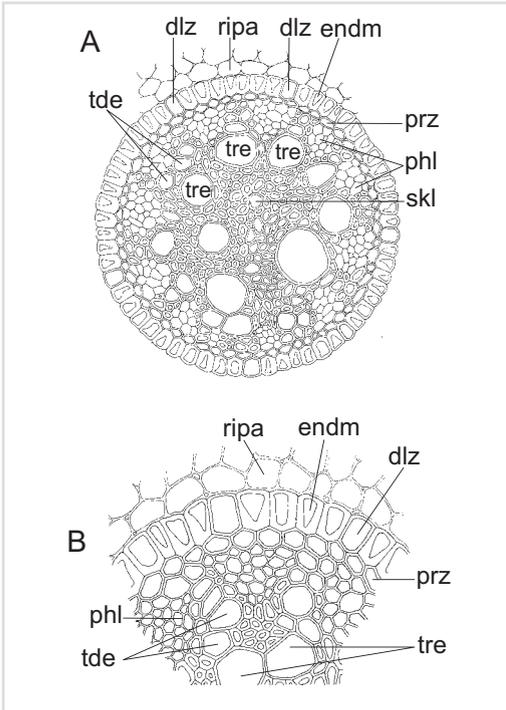


Abb. 6.10 Querschnitt der Iriswurzel (*Iris germanica*), Ausschnitte: A Leitbündel mit Endodermis, B Xylemstrahlen und Endodermis im Detail, dlz Durchlasszelle, endm U-Endodermis, phl Phloem, prz Perizykel, ripa Rindenparenchym, skl Sklerenchym, tre Trachee, tde Tracheide (NH)

eine tertiäre Endodermis und besteht aus Zellen mit u-förmig verdickten, fein geschichteten Zellwänden (Abb. 6.12). Sie färben sich mit Phloroglucin-HCl schwach rot (Lignin-Einlagerung). Einzelne unverdickte **Durchlasszellen** (dlz) unterbrechen die Reihe. Sie liegen meist über den Xylemstrahlen. Der **Perizykel** (prz) schließt als äußere Schicht des Zentralzylinders mit seinen ovalen, dünnwandigen Zellen lückenlos an die Endodermis an. Manchmal kann man im Perizykel die Anlage einer Seitenwurzel erkennen.

Aufgabe

- ▷ Übersicht: Zeichnen des Wurzelquerschnitts mit Exodermis, Rinde, Endodermis, Perizykel und dem radiären Leitbündel (Schemazeichnung, nicht zellulär!).

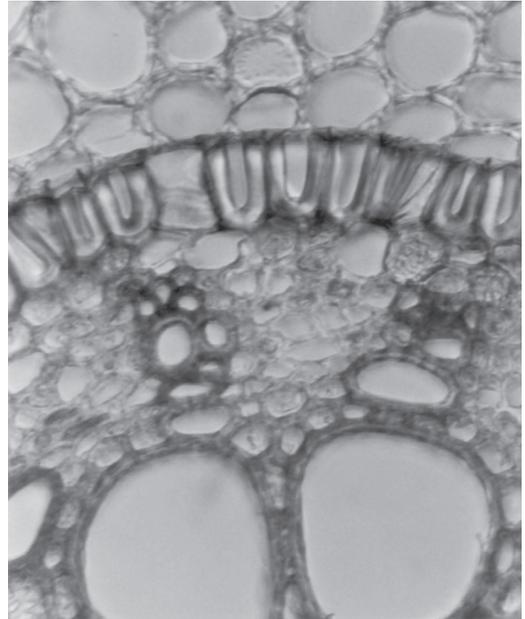


Abb. 6.11 Iriswurzel im Querschnitt (*Iris germanica*): Ausschnitt des Leitbündels im Bereich der U-Endodermis mit Durchlasszelle (dlz), Beschriftung siehe Schemazeichnung Abb. 6.10 B (StB)

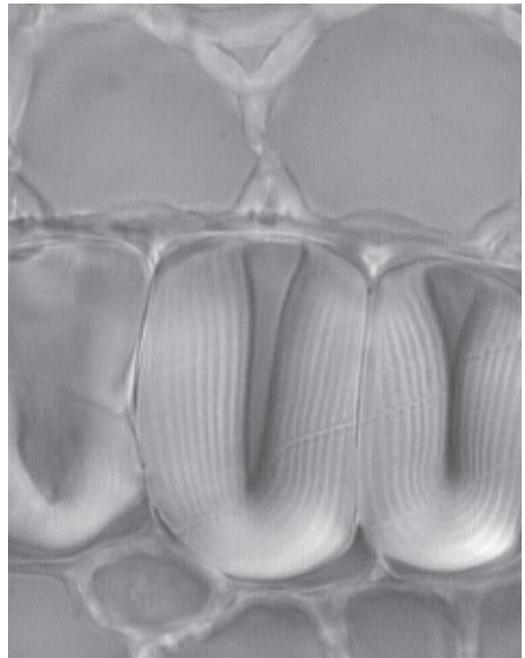


Abb. 6.12 Endodermiszellen in 1000-facher Vergrößerung mit deutlich sichtbarer Schichtung der u-förmigen Wandauflagerungen (*Iris germanica*), (StB)

- ▷ Ausschnitt: Ein Bereich aus dem Übergang von der Rinde zum Zentralzylinder wird zellulär gezeichnet. Zu beachten sind dabei die unterschiedlichen Wandstärken der Zellen verschiedener Gewebe.

3. Die sekundäre Wurzel der dikotylen Pflanzen

Eibisch – *Althaea officinalis* – Malvaceae

Querschnitt der Wurzel

Objekt: ca. 5 mm dicke Wurzel; in Ethanol eingelegtes Material (MR 01) lässt sich besser schneiden als Frischmaterial. Geeignet sind auch in Alkohol eingelegte Stücke der Ganzdroge oder der Schnittdroge.

Präparation: Die Wurzel wird quer angeschnitten, und in dieser Schnittrichtung werden mehrere dünne Schnitte hergestellt. Das Präparat wird mit Chloralhydrat aufgehellt (MR 05). Wird Schnittdroge verwendet, muss besonders auf die Schnittrichtung geachtet werden. Der Schnitt muss im Bereich des Kambiums erfolgen, das mit bloßem Auge als dunklere Linie auf dem Querschnitt zu erkennen ist.

Optionen: Färbung verholzter Zellwände mit Phloroglucin-HCl (MR 12). Färbung der Stärke mit Iod-Lösung (MR 17); Färbung des Schleims mit Thionin-Lösung (MR 16).

Beobachtung

Das Präparat besteht im Wesentlichen aus hellem parenchymatischem Gewebe. Es wird durch einen dunkleren, konzentrischen Ring in einen peripheren und einen zentralen Bereich gegliedert (Abb. 6.13 A). Ganz außen liegt als Abschlussgewebe ein **Periderm** (prd). Wird Droge verwendet, fehlt dieses, da die Droge geschält in den Handel kommt. Nach innen schließen die helle **primäre Rinde** (pri) und der **Bast** (ba) an. Die Grenze zum **Holz** (ho) bildet das hellbraune **Kambium** (kmb). Das Holz reicht bis ins Zentrum, wo sich sklerenchyma-

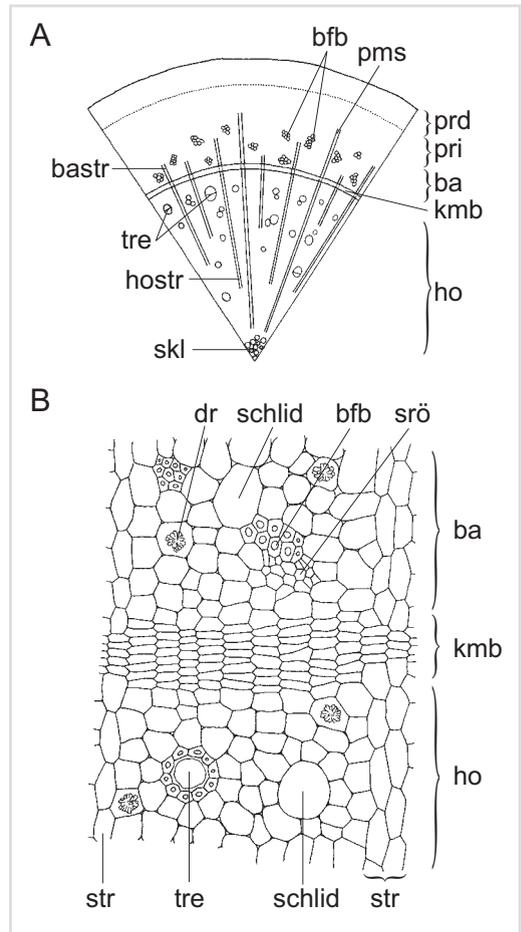


Abb. 6.13 Querschnitt der Eibischwurzel (*Althaea officinalis*): A Übersicht, Schemazeichnung, B Ausschnitt im Bereich des Kambiums, ba Bast, bastr Baststrahl, bfb Bastfaserbündel, dr Druse, ho Holz, hostr Holzstrahl, kmb Kambium, pms primärer Markstrahl, prd Periderm, pri primäre Rinde, schlid Schleimidioblasten, skl Sklerenchym, srö Siebröhren, str Strahl, tre Trachee mit anliegenden Sklerenchymfasern (NH)

tische Elemente befinden. In radialer Richtung verlaufen im Bast **Baststrahlen** (bastr) und im Holz **Holzstrahlen** (hostr). Die Strahlen sind schmal. Mit Phloroglucin-HCl färben sich die wenigen **Tracheen** (tre) im Holz und das im Zentrum liegende Sklerenchym rot. Die in der sekundären Rinde zwischen den Baststrahlen regelmäßig angeordneten **Bastfaserbündel** (bfb) sind schwach verholzt und färben sich nur sehr zögerlich an.



Bei Vergrößerung (100-fach) ist zu erkennen, dass der **Kork** 5- bis 8-schichtig ist und aus dünnwandigen, braunen, radial in Reihe stehenden Zellen besteht; die äußere Schicht ist leicht ausgefranst. Die **primäre Rinde** wird von lockerem, hellem Parenchym gebildet, ebenso der **Bast** (Abb. 6.13 B). Die **Baststrahlen** (bastr) sind nicht dilatiert und nur 1 bis 2 Zellen breit. Einzelne Zellen des Rindenparenchyms und des Markstrahls enthalten **Calciomoxalat-Drusen** (dr). Außerdem sind einige hellere, größere **Schleimidioblasten** (schlid) zu erkennen (Schleimfärbung). Die zwischen den Markstrahlen liegenden **Bastfaserbündel** (bfb) bestehen aus 3–8 Bastfasern. Die **kambiale Zone** (kmb) ist hellbraun und bis zu 10 Zellen breit. Das Holz besteht aus parenchymatischem Gewebe mit wenigen verholzten Gefäßen, die einzeln verstreut oder in kleinen Gruppen liegen. Wie in der Rinde sind im Parenchym des Holzes auch Drusen und Schleimidioblasten zu erkennen. Die Stärke, im Wasserpräparat beobachtet, ist einfach gebaut, rundlich oval, bisweilen mit Längsspalt. Im Zentrum befinden sich das primäre Xylem und Sklerenchym.

Aufgabe

- ▷ Übersicht: Zeichnen des Wurzelquerschnitts (Schemazeichnung, nicht zellulär). Eingezeichnet werden Periderm, primäre Rinde, Bast, Kambium, Holz und die Strahlen.
- ▷ Ausschnitt: Ein Segment aus dem Übergang vom Bast zum Holz mit Kambium und Strahl wird zellulär gezeichnet. Um die unterschiedlichen Wandstärken der verschiedenen Zelltypen hervorzuheben, werden Parenchym-, Kambium- und Markstrahlzellen mit der Einstrich-Zeichentechnik, Bastfasern und Tracheen mit der Dreistrich-Zeichentechnik gezeichnet.

6.4.2 Mikroskopie von pulverisierten Wurzel-Drogen (Radix, Radices)

Wurzeldrogen sind meist helle Pulver, können aber durch Gerbstoffe auch rotbraun gefärbt

sein. Sie zeichnen sich im mikroskopischen Bild meist durch einen hohen Anteil an parenchymatischem Gewebe aus, da die Rindenzone bei Wurzeln relativ dick ist und auch das Holz einen hohen Anteil parenchymatischer Zellen (Holzparenchym) aufweist. Häufig ist jedoch das Holzparenchym fusiform, d. h. die Zellen sind in der Längsaufsicht prosenchymatisch und spitz zulaufend. Sie können im Pulverpräparat deshalb u. U. mit Holz- bzw. Bastfasern verwechselt werden.

Im Pulver von Wurzeldrogen, die mit der Korkschicht („ungeschält“) in den Handel kommen, fallen große, oft schlecht durchstrahlte Korkfragmente in Aufsicht auf. Sind die Fragmente dünn, kann man in Schrägaufsicht die Schichtung des Korks erkennen. Eher selten finden sich Korkfragmente im Querschnitt. Man kann sie an den typisch radial in Reihe stehenden Korkzellen erkennen. Bei Wurzel-Drogen, die „geschält“ in den Handel kommen, ist der wertlose Kork entfernt. Solche Drogen weisen allenfalls noch wenige Korkreste auf, die auf ungenügende Entfernung des Korks hinweisen (fremde Bestandteile!).

Tracheenbruchstücke sind immer vorhanden. Im Drogenpulver sind sie in der Längsaufsicht an ihren typischen Wandverstärkungen zu erkennen. Da es sich bei den Drogen um ältere Wurzeln handelt, sind es meist Fragmente von Netz-, Treppen- oder Tüpfeltracheen. Ihre Zellwände sind in der Regel verholzt und färben sich deshalb mit Phloroglucin-HCl rot.

Sklerenchymatische Elemente zur Festigung befinden sich sowohl in der Rinde (Bast und primäre Rinde) als auch im Holz. Im Falle von prosenchymatischem Festigungsgewebe (Sklerenchymfasern) sind in der Pulverdroge Bast- bzw. Holzfasern in Aufsicht zu finden, da die Schnittrichtung beim Mahlen vorwiegend radial längs ist. Isodiametrisches Festigungsgewebe erkennt man als isodiametrische Steinzellen oder als Sklereiden (eher selten). Das Sklerenchym hat meist verholzte Zellwände. Bastfasern und Holzfasern können einzeln oder als Bündel vorkommen. Den Bündeln liegen manchmal Kristallzellreihen auf, die in der Aufsicht sehr charakteristisch sind.

Hin und wieder sind in der Pulverdroge auch Tangentialschnitte mit „Strahlspindeln“ zu fin-

den. Elemente der Endodermis können nur bei Drogen aus Monokotyledonen gefunden wer-

Tab. 6.1 Wurzel-Drogen der Arzneibücher: Europäisches Arzneibuch (Ph. Eur., 6. Ausgabe 2008 inkl. Nachträge bis 6.6), Deutsches Arzneibuch (DAB 2009)

| Deutscher Name | Lateinischer Name | Stammpflanze | Familie |
|-----------------------------------|--------------------------------|--|---------------|
| Angelikawurzel | Angelicae radix | <i>Angelica archangelica</i> | Apiaceae |
| Baldrianwurzel | Valerianae radix | <i>Valeriana officinalis</i> | Valerianaceae |
| Blasser-Sonnenhut-Wurzel | Echinaceae pallidae radix | <i>Echinacea pallida</i> | Asteraceae |
| Brennnesselwurzel DAB | Urticae radix | <i>Urtica dioica</i> u. a. | Urticaceae |
| Eibischwurzel | Althaeae radix | <i>Althaea officinalis</i> | Malvaceae |
| Enzianwurzel | Gentianae radix | <i>Gentiana lutea</i> | Gentianaceae |
| Ginsengwurzel | Ginseng radix | <i>Panax ginseng</i> | Araliaceae |
| Hauhechelwurzel | Ononidis radix | <i>Ononis spinosa</i> | Fabaceae |
| Ipecacuanhawurzel | Ipecacuanhae radix | <i>Cephaelis ipecacuanha</i> u. a. | Rubiaceae |
| Liebstockelwurzel | Levistici radix | <i>Levisticum officinale</i> | Apiaceae |
| Löwenzahnwurzel | Taraxaci officinalis radix | <i>Taraxacum officinale</i> | Asteraceae |
| Notoginsengwurzel | Notoginseng radix | <i>Panax pseudoginseng</i> var. <i>notoginseng</i> | Araliaceae |
| Pelargoniumwurzel | Pelargonii radix | <i>Pelargonium sidoides</i> , <i>P. reniforme</i> | Pelargonaceae |
| Primelwurzel | Primulae radix | <i>Primula veris</i> | Primulaceae |
| Purpur-Sonnenhut-Wurzel | Echinaceae purpureae radix | <i>Echinacea purpurea</i> | Asteraceae |
| Ratanhiawurzel | Ratanhiae radix | <i>Krameria triandra</i> | Krameriaceae |
| Rauwolfiawurzel DAB | Rauwolfiae radix | <i>Rauwolfia serpentina</i> | Apocynaceae |
| Rhabarberwurzel | Rhei radix | <i>Rheum palmatum</i> u. a. | Polygonaceae |
| Schmalblättriger-Sonnenhut-Wurzel | Echinaceae angustifoliae radix | <i>Echinacea angustifolia</i> | Asteraceae |
| Senegawurzel | Senegae radix | <i>Polygala senega</i> u. a. | Polygalaceae |
| Süßholzwurzel | Liquiritiae radix | <i>Glycyrrhiza glabra</i> | Fabaceae |
| Taigawurzel | Eleutherococci radix | <i>Eleutherococcus senticosus</i> | Araliaceae |
| Teufelskrallenwurzel | Harpagophyti radix | <i>Harpagophytum procumbens</i> | Pedaliaceae |



den und sind im Pulver nur auffällig, wenn es sich um eine tertiäre Endodermis handelt (z. B. U-Endodermis in *Sarsaparillae radix* plv.).

Wurzel-Drogen enthalten meist Stärke und häufig Kristalle, seltener Lipidtröpfchen oder Inulin (Wurzeln der Asteraceae). Form und Größe der Stärkekörner sowie der Kristalle sind für die Identifizierung einer Wurzel-Droge sehr wichtig. Haare fehlen in Wurzel-Drogen.

Die Wurzel-Drogen der Arzneibücher sind in Tab. 6.1 zusammengestellt. Hier folgen drei Drogenbeispiele

Eibischwurzel – *Althaeae radix* – *Althaea officinalis* – Malvaceae

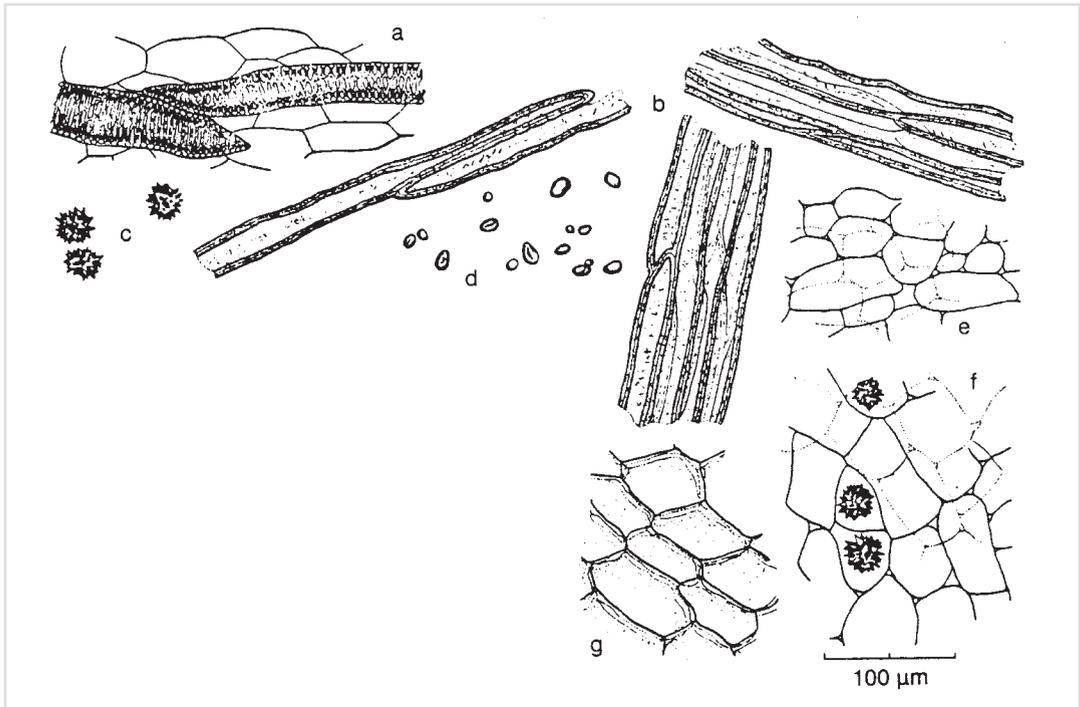
Periderm: Kork ist nicht vorhanden, da die Droge geschält in den Handel kommt; allenfalls als fremder Bestandteil enthalten.

Rinde: helles, interzellularenreiches Parenchym aus rundlichen Zellen; einige wenige Zellen enthalten Calciumoxalat-Drusen, Drusen auch frei im Präparat; lange, schmale Bastfasern, z. T. in Gruppen zusammen und „ausgefranst“, mit Phloroglucin-HCl nur schwach anfärbbar.

Holz: helles, interzellularenreiches Parenchym (Holz- und Holzstrahlparenchym), nicht von dem der Rinde zu unterscheiden, einige Zellen mit Drusen; Bruchstücke von verholzten Netz- und Tüpfeltracheen.

Stärke: ovale Einzelkörner (3,5–25 µm) mit kleinem Trocknungsspalt, sowohl in Zellen des Parenchyms als auch frei im Präparat.

Schleim: Nach Quellen des Pulvers im Wasserpräparat lassen sich mit Thionin-Lösung (MR 16) die Schleimzellen im Parenchym der Rinde und des Holzes nachweisen (Abb. 6.14).



Ab. 6.14 Eibischwurzel (*Althaeae radix*), Pulver: a Tracheen mit anliegenden Parenchymzellen, b Fasern, c Calciumoxalat-Drusen frei, d Stärke, e Parenchym, f Parenchym mit Calciumoxalat-Drusen, g Kork, fehlt bei geschälter Droge (nach Deutschmann et al., NH)

**Süßholzwurzel – *Liquiritiae radix* –
Glycyrrhiza glabra – Fabaceae**

Periderm: Kork fehlt, da die Droge geschält in den Handel kommt.

Rinde: zahlreiche Stücke von Rindenparenchym mit rundlichen bis rechteckigen Zellen

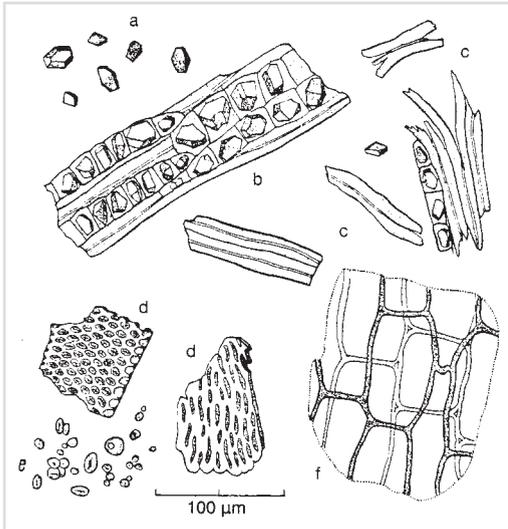


Abb. 6.15 Süßholzwurzel (*Liquiritiae radix*), Pulver: a Calciumoxalat-Einzelkristalle frei, b Kristallzellreihen auf Sklerenchymfasern, c Bruchstücke von Sklerenchymfasern, d Bruchstücke von Tüpfelgefäßen, e Stärke, f Rindenparenchym (nach Deutschmann et al.)

(wenig charakteristisch); einige Zellen der Rinde und des Markstrahls enthalten große Calciumoxalat-Einzelkristalle (selten!); Bastfaserbündel in Längsaufsicht, die meist von Kristallzellreihen aus Calciumoxalat-Einzelkristallen überlagert sind (typisch); Bastfasern verholzt.

Holz: Gefäßbruchstücke von Netz- und Tüpfeltracheen, oft mit Belegzellen (flache, regelmäßig angeordnete, verholzte Parenchymzellen); Holzfaserbündel, die wie die Bastfasern häufig von Kristallzellreihen überlagert sind; Tracheenbruchstücke und Holzfasern verholzt.

Stärke: im Rindenparenchym, Holzparenchym und frei zahlreiche kleine, einzelne Stärkekörner verschiedener Formen (2–20 µm) (Abb. 6.15).

**Rhabarberwurzel – *Rhei radix* –
Rheum palmatum – Polygonaceae**

Periderm: dünner, rötlicher Kork, vorwiegend in Aufsicht.

Rinde: interzellularenreiches, gelbliches Parenchym aus rundlichen bis rechteckigen Zellen; in einigen Zellen liegen charakteristische, sehr große Calciumoxalat-Drusen, die auch zahlreich frei im Präparat vorkommen.

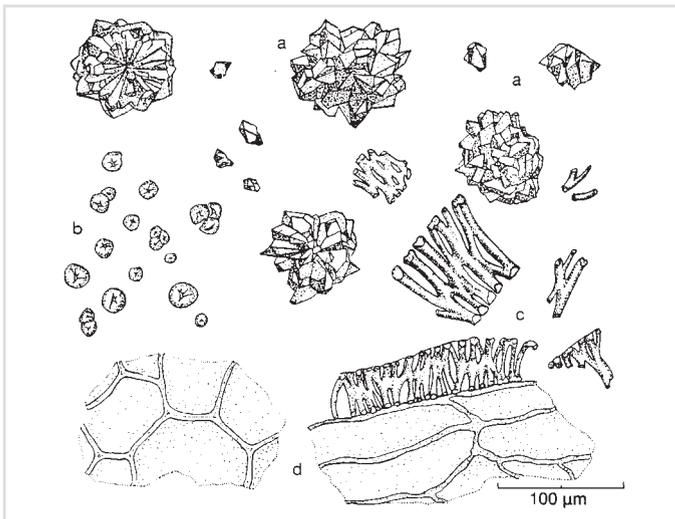


Abb. 6.16 Rhabarberwurzel (*Rhei radix*), Pulver: a Calciumoxalat-Drusen, b Stärke, c Bruchstücke von Netzgefäßen, d Parenchym (nach Deutschmann et al.)



Holz: zahlreiche Bruchstücke von Netztracheen, häufig anastomosierend, nicht verholzt; Anteile des Holzparenchyms von denen des Rindenparenchyms nicht zu unterscheiden.

Stärke: im Rindenparenchym, Holzparenchym und frei zahlreiche einzelne, kleine, runde Stärkeköerner (10–17 µm) mit Trocknungsspalt (Abb. 6.16).

Ipecacuanhawurzel (Brechwurzel) – *Ipecacuanhae radix* – *Cephaelis ipecacuanha* – Rubiaceae

Periderm: heller bis brauner Kork, der charakteristischerweise relativ häufig im Querschnitt zu finden ist und an den radial in Reihe stehenden, dünnwandigen Zellen erkannt werden kann; auch sind Stücke in Aufsicht vorhanden;

Rinde: helles, dünnwandiges Parenchym aus rundlichen Zellen; wenn die Droge nicht zu stark gemahlen ist, sind einzelne Zellen mit Calciumoxalat-Raphiden in Bündeln darin zu finden; zahlreiche feine Raphiden vor allem frei im Präparat (etwas abdunkeln, da sie leicht überstrahlt werden!).

Holz: Bruchstücke schmaler Tüpfeltracheen, meist in Gruppen, mit anliegendem fusiformem,

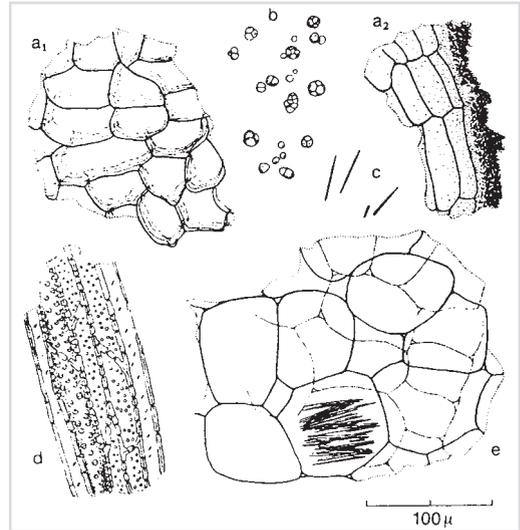


Abb. 6.17 Ipecacuanhawurzel (*Ipecacuanhae radix*), Pulver, a₁ Kork in Aufsicht, a₂ Kork im Querschnitt, b Stärke, c Calciumoxalat-Raphiden, d fusiformes Holzparenchym, e Rindenparenchym mit Raphidenbündeln (nach Deutschmann et al.)

mem, getüpfeltem Holzparenchym, beide Gewebetypen verholzt.

Stärke: Stärkeköerner vorwiegend 3- bis 4-fach zusammengesetzt (bis 35 µm), einzelne Stärkeköerner selten (Abb. 6.17).