Schiefe Fasern

–

gerade Bäume:

Holzanatomische Untersuchung an drehwüchsigen Rosskastanien (*Aesculus hippocastanum* L.)

K. Weber, C. Mattheck

Karlsruher Institut für Technologie

KIT- Campus Nord

Institut für Materialforschung II

Postfach 3640

D- 76021 Karlsruhe

Einleitung, Grundlagen

Der schiefe Baum

In Schiefstellung geratene Bäume (z. B. durch Bodenverschiebung, Schneelast oder ständig einseitigen Windeinfluss) versuchen sich durch Reaktionsholzbildung wieder aufzurichten. Reaktionsholz stellt ein aktives Richtgewebe dar, welches durch das „gravitrop“ gereizte Kambium gebildet wird und versucht die Bäume wieder in Normalstellung zu bringen (vgl. hierzu [1, 2, 3] *Statolithentheorie* und *negativer Geotropismus*).

Schiefgestellte Laubbäume bilden auf der Oberseite des schief gestellten Stamms (bzw. auf der Oberseite der Biegung) Zugholz aus, während Nadelbäume auf der Unterseite des schief gestellten Stamms (bzw. der Biegung) Druckholz ausbilden.

Bereiche, in denen Reaktionsholz gebildet wird, sei es Zug- oder Druckholz, zeigen vermehrte Zuwächse mit verbreiterten Jahresringen. Es findet dort ein exzentrisches Dickenwachstum statt.

Neben dem Geotropismus werden in der Literatur als weitere Ursachen für eine Reaktionsholzbildung die genetische Veranlagung, den Phototropismus, sowie äußere Einflüsse am Standort (z. B. verschiedene Umwelteinflüsse) genannt.

Zugholz, Druckholz

Das Zugholz der Laubbäume besitzt charakteristische anatomische Merkmale. Es unterscheidet sich von normalem Holz hauptsächlich durch den Aufbau seiner Holzfasern [11]. Bei einer Zugholzfaser enthält die Sekundärwand eine dicke, quellbare, unverholzte, aus fast reiner Zellulose bestehende gelatinöse Schicht, die sogenannte G-Schicht. Der submikroskopische Aufbau der G-Schicht zeigt eine lamellenartige Feinstruktur aus Zellulose - Mikrofibrillen, die nahezu parallel zur Zellachse orientiert sind. Die Lamellen sind dabei nur an einzelnen Haftpunkten miteinander verbunden, so dass eine Wabenstruktur entsteht [11, 12, 13]. *Sachsse* [13] vermutet, dass in den

Kammern dieses Wabensystems quellbare Substanzen eingelagert sind, die durch Quellung / Entquellung die Längszugspannung des Zugholzes bewirken.

Auch das Druckholz der Nadelbäume besitzt charakteristische anatomische Merkmale. Druckholz stellt ein hartes, stark lignifiziertes Gewebe dar [14, 15]. Druckholzzellen besitzen eine verdickte Zellwand und sind im Querschnitt stark gerundet, so dass Interzellularräume entstehen. Gegenüber einer normalen Nadelholztracheide besitzt eine Druckholztracheide, besonders in der S-2-Schicht ihrer Sekundärwand, einen sehr hohen Ligninanteil. Die S-2-Schicht besitzt des Weiteren eine helicale Riffelung (spiralig angeordnete Rillen in der Sekundärwand, die parallel zu deren Fibrillen verlaufen). *Wagenführ* [15] spricht von einem fibrillenparallelen „Spaltensystem“ in der S-2-Schicht (Mikrofibrillenverlauf ca. 45° zur Zellachse). Die Druckholztracheiden sind kürzer, als Normaltracheiden und ihre Enden sind L-, Y- oder T- förmig gegabelt [14, 15].

Drehwuchs

Unter Drehwuchs versteht man eine Abweichung vom normalerweise parallel zur Stammlängsachse orientierten Holzfaserverlauf hin zu einem spiralförmigen oder „schraubig“ um die Stammachse drehenden Holzfaserverlauf.
Drehen sich die Fasern im Stamm von rechts unten nach links oben, spricht man von „linksdrehend“ und laufen sie von links unten nach rechts oben, spricht man von „rechtsdrehend“.
Auch ein Umsetzen der Drehrichtung, zum Beispiel mit dem Lebensalter des Baumes, kann beobachtet werden. Man nennt dieses dann „Wechseldrehwuchs“ und kann laut Literatur häufig bei verschiedenen Tropenhölzern, aber auch öfters bei heimischen Nadelbaumarten angetroffen werden [4].
Als eine besonders zu Drehwuchs neigende Baumart ist die Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum* L.) hervorzuheben [4]. Aber auch bei Ahorn, Buche, Eiche, Ulme,

sowie verschiedenen Obstbaumarten (Apfel, Birne) findet sich häufig eine mehr oder weniger starke Drehwüchsigkeit.
Unter den Nadelbäumen neigen Lärche und Kiefer stärker zu Drehwuchs als Tanne und Fichte [4].

Grundsätzlich kann Drehwuchs jedoch bei allen Laub- und Nadelbaumarten vorkommen. Als mögliche Ursachen für Drehwuchs sind zum einen genetisch bedingte Gründe (erbliche Veranlagung) und zum andern biomechanische Ursachen, wie z. B. einseitige Stammbelastung durch asymmetrische Kronenform und Windeinwirkung, zu nennen.

Schiefe Fasern - gerade Bäume

Die Zellen im Stamm drehwüchsiger Bäume stehen alle „schief“ (bei rechtsdrehenden Stämmen: Zellen nach rechts geneigt, bei linksdrehenden Stämmen: Zellen nach links geneigt, vgl. oben Abschnitt: „*Drehwuchs*“), auch wenn der Stamm selbst aufrecht steht und „geradschaftig“ ist.
„Schiefstellung“ ist aber gleichzeitig auch ein Signal zur Reaktionsholzbildung (siehe oben Abschnitt: „*Der schiefe Baum*“), um sich „aktiv“ wieder aufzurichten, woraufhin Laubbäume Zugholz ausbilden und Nadelbäume Druckholz erzeugen (vgl. oben Abschnitt: „*Zugholz, Druckholz*“).
Diese Betrachtungsweise wirft nun folgende Fragestellungen auf:
1. Zeigen Laubbäume, die gerade (bzw. aufrecht) stehen, aber stark drehwüchsig sind, eine ausgeprägte Zugholzbildung (z. B. ähnlich der schief gestellter Bäume)?
2. Welche biomechanische Konsequenzen hätte, bzw. hat dieses für den drehwüchsigen Laubbaum?

Die nachfolgende Arbeit soll am Beispiel der besonders zu Drehwuchs neigenden Rosskastanie versuchen, diese Fragen zu beantworten.
(Weitere Untersuchungen an verschiedenen anderen drehwüchsigen Laub-, sowie Nadelbaumarten sollen zu einem späteren Zeitpunkt folgen.)

Material und Methode

Aus den Stämmen drehwüchsiger Rosskastanien (*Aesculus hippocastanum* L.) wurden mittels Zuwachsbohrers radiale Bohrkerne (Durchmesser 5 mm) vom Splintholzbereich entnommen, um diese lichtmikroskopisch zu untersuchen. Die untersuchten Splintholzproben umfassten hierbei jeweils die äußeren ca. 15 Jahresringe.
Des Weiteren wurden aus nicht drehwüchsigen Bäumen der gleichen Art, ebenfalls radiale Bohrkerne entnommen („Referenz“ - Proben), um diese mit den Proben drehwüchsiger Bäume zu vergleichen.
Insgesamt wurden 9 Bäume, 6 drehwüchsige und 3 nicht drehwüchsige, untersucht. Beprobt wurde jeweils die dem Wind (Hauptwindrichtung) zugewandte Seite des Stammes und die dem Wind abgewandte Seite des Stammes.

Mikroskopische Untersuchung

Die Bohrkerne wurden z. T. in Methacrylat (Nobecutan) eingebettet [5] und z. T. in heißes Wasser eingelegt, um von ihnen mittels eines Schlittenmikrotoms (Microm HM 440 E) 16 - 20 µm dicke Schnitte anzufertigen. Es wurden vornehmlich Holzquerschnitte hergestellt. Die Holzschnitte wurden mit Safranin-Astrablau gefärbt. Anschließend wurden sie mit entmineralisiertem Wasser gewaschen, über eine Alkoholreihe entwässert und in Entellan eingeschlossen [6, 7, 8, 9].

Färbereaktionen:

- Safranin reagiert mit den phenolischen Hydroxylgruppen des **Lignins** und färbt es **rot** an (auch andere phenolische Substanzen können angefärbt werden z. B. Kerninhaltstoffe).
- Astrablau hat eine hohe Affinität zu **Zellulose** und füllt die intermicellaren Hohlräume auf, wenn diese nicht mit Lignin inkrustiert sind. Unverholzte Zellwände bzw. Wandbereiche (z. B. G-Schicht der Zugholzzellen) erscheinen dann **blau**.

Die gefärbten Holzpräparate wurden mittels Lichtmikroskop mit Aufsatzkamera (Axioplan 2 / AxioCam MRc5 – Zeiss) untersucht und fotographisch dokumentiert.

Ergebnisse

Weil die Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum* L.) eine besonders zu Drehwuchs neigende Baumart ist (vgl. Einleitung), wurden drehwüchsige Rosskastanien favorisiert, um das signifikante Auftreten von Reaktionsholz (hier Zugholz) im aufrechten und „geradschaftigen“ Stamm näher zu untersuchen (vgl. Abb. 1 – Abb. 22, Baum Nr. 1 – Baum Nr. 6).
Zu Vergleichszwecken wurden des Weiteren nicht drehwüchsige, aufrechte, geradschaftige Bäume der gleichen Art herangezogen (vgl. „Referenz“ I, II, III, bzw. Baum Nr. 7, 8, 9 in Abb. 23 – Abb. 28).

Bei unseren Untersuchungen konnten drehwüchsige Rosskastanien in zwei unterschiedliche „Erscheinungsbilder“ (Phänotypen) bezüglich ihres Drehwuchses eingeordnet werden:

1. Phänotyp I: Drehwuchs ohne ausgeprägter Rippenbildung (vgl. Baum Nr. 1 in Abb. 1, Baum Nr. 3 in Abb. 13 und Baum Nr. 6 in Abb. 21).

2. Phänotyp II: Drehwuchs mit ausgeprägter Rippenbildung (deutliche Drehrippen erkennbar), vgl. Baum Nr. 2 in Abb. 9, Baum Nr. 4 in Abb. 16 und Baum Nr. 5 in Abb. 19.

Phänotyp I:

Trotz eines geradschaftigen Stammabschnitts, besaß der drehwüchsige Stämmling (Baum - Nr. 1, Probe - Nr. 1 und Nr. 3) in Abb. 1, Baum Nr. 3 in Abb. 13 und Baum Nr. 6 in Abb. 21 sehr viel Zugholz radial über den beprobten Splintbereich verteilt.
Eine signifikante Schiefstellung der Holzfasern (Libriformfasern bei Rosskastanie [10]), verursacht durch Drehwuchs, schien hier in der Tat eine signifikante Reaktionsholzbildung (Zugholz) ausgelöst zu haben, bzw. auslösen zu können.

Baum - Nr. 1, Probe - Nr. 2 (Probe aus der zur Probe – Nr. 1 gegenüber liegenden Seite), sowie Probe – Nr. 4, besaßen indes kein Zugholz, während Probe – Nr. 5 (vgl. Abb. 4 und Abb. 8) etwas Zugholz enthielt.
Dieses Ergebnis deutete für Baum Nr. 1 eine „bandartige“ Reaktionsholz-Verteilung an, bei der sich ein „Zugholzband“, dem sich drehenden Faserverlauf folgend, „wendeltreppenartig“ um die aufrechte Stammachse windet. Das Vorhandensein von Zugholz in Probe - Nr. 5 deutete zudem an, dass dieses Zugholzband gut den halben Stammquerschnitt einnehmen kann, bzw. in etwa eingenommen hat.
Die holzanatomischen Untersuchungen der Stämme von Baum Nr. 3 und Baum Nr. 6 deuteten indes sogar auf ein vollständig „stammumfassendes“ Zugholzband hin.

Phänotyp II:

Im stark drehwüchsigen Stamm von Baum Nr. 2 (Abb. 9), Baum Nr. 4 (Abb. 16) und Baum Nr. 5 (Abb. 19) mit signifikanten lokalen Zuwächsen, jeweils rippenartig von den Wurzelanläufen bis zu den Stark-Ast-Anbindungen an der Kronenbasis (d. h. „Drehrippen“ oder „Drehwuchs-Zuwachswülsten“), besaßen immer nur die Drehrippen viel Zugholz im Splint, während zwischen zwei Drehrippen (im „Tal“ zweier Zuwachswülste) keine signifikante Zugholzbildung nachgewiesen werden konnte (vgl. Abb. 10, 11 und Abb. 17, 18, sowie Abb. 20).
Hier schien die Schiefstellung der Libriformfasern, verursacht durch Drehwuchs, bevorzugt eine Reaktionsholzbildung (Zugholz) im Bereich des lokal stärkeren Kraftflusses ausgelöst zu haben (Zuwachsstreifen lokal über den Wurzelanläufen im Stamm weiterlaufend, vgl. z. B. Abb. 9 oder Abb. 16). Das heißt, mehrere „Zugholzbänder“ scheinen hier spiralförmig den Stamm „hochzulaufen“, von den Wurzelanläufen an der Stammbasis bis beispielsweise zu den Astanbindungen am Kronenansatz.

Die Untersuchung der Zugholzverteilung in den drehwüchsigen Stämmen zeigte auch, dass neben der Schiefstellung der Fasern noch weitere regulierende Faktoren für die Ausbildung von Zugholzgewebe eine Rolle spielen müssen (z. B. Phytohormone, Auxin - Verteilung im Gewebe [3, 17]), da eben auch Bereiche schief gestellter Fasern

ohne einem Vorhandensein von Zugholz, nachgewiesen werden konnten (z. B. die „Täler“ zwischen zwei Drehrippen beim Phänotyp II, oder Probe - Nr. 2 und Nr. 4 von Baum - Nr. 1 beim Phänotyp I).

Geradschaftige, nicht drehwüchsige Rosskastanien: Referenz (I), Baum Nr. 7, vgl. Abb. 23, Referenz (II), Baum Nr. 8, vgl. Abb. 25 und Referenz (III), Baum Nr. 9, vgl. Abb. 27, besaßen indes kein Zugholz im Splint ihrer Stämme in 50, 60, bzw. 70 cm Stammhöhe, axial über den Wurzelanläufen (beprobt wurde jeweils über den Wurzelanläufen auf der Seite der Hauptwindrichtung – Luv Seite des Stammes, sowie über den Wurzelanläufen auf der Wind abgewandten Seite – Lee Seite des Stammes).
Da bei den Referenzbäumen keine Schiefstellung der Libriformfasern vorlag, konnte auch keine signifikante Reaktionsholzbildung (Zugholz) im beprobten Splintholzbereich nachgewiesen werden. Dieser Befund entsprach nicht nur den Erwartungen, er zeigte im Vergleich mit den drehwüchsigen Bäumen auch, wie stark „zugholzinduzierend“ der Drehwuchs bei *Aesculus hippocastanum* L. wirken kann.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass
(1.) in den Stämmen drehwüchsiger Rosskastanien relativ viel Zugholz vorhanden war, während dies in nicht drehwüchsigen „Referenz-Stämmen“ nicht der Fall war,

(2.) das Ausmaß der Zugholzbildung hierbei häufig sogar fast der Zugholzbildung entsprach, die auf der Oberseite schief gestellter Laubbäume, z. B. Rot-Buche [18], beobachtet werden kann,

(3.) das Zugholz hierbei entweder (a) in einem einzelnen Zugholzstrang (vgl. Baum Nr. 1, Phänotyp I) spiralförmig, dem drehenden Faserverlauf folgend, die Stammachse entlang laufen kann, oder (b) dies in mehreren, nebeneinander liegenden Zugholzsträngen tun kann (vgl. Phänotyp II).
Das Zugholz scheint schließlich auch (c) über den gesamten Stammumfang verteilt (vgl. Phänotyp I: Baum Nr. 3 und Baum Nr. 6), sozusagen als „stammumfassendes“, breites Zugholzband, spiralförmig die Stammachse umlaufen zu können.

Abb. 1: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 1), Phänotyp I: Drehwuchs ohne ausgeprägte Rippenbildung. Ein drehwüchsiger Stämmling (*) versagte bei Sturm (Drehbruch infolge Torsion gegen Drehsinn). Sein Splintholzanteil wurde auf das Vorhandensein von Zugholz hin untersucht. Bilder unten: Entnahmeort von Probe - Nr. 1.

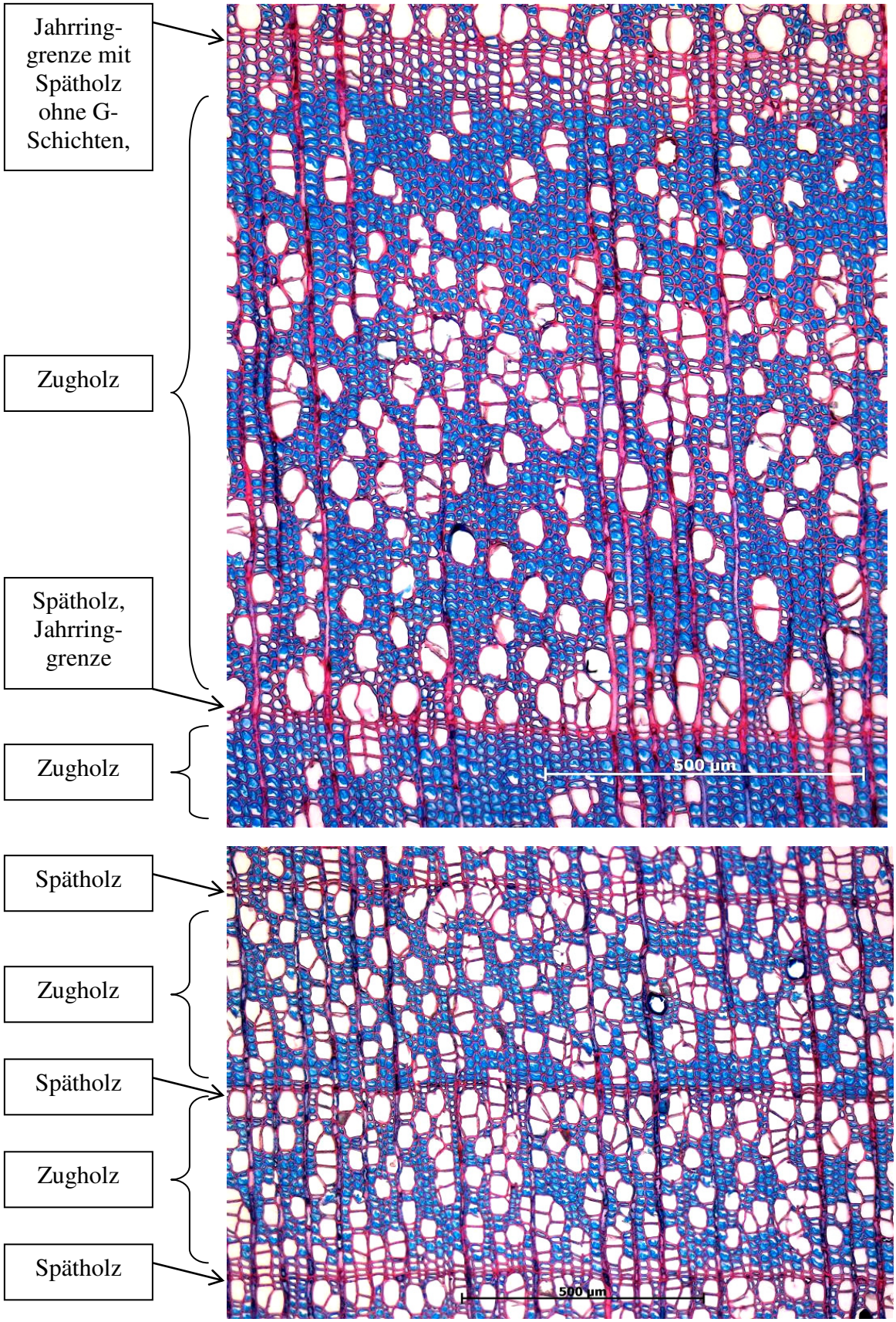
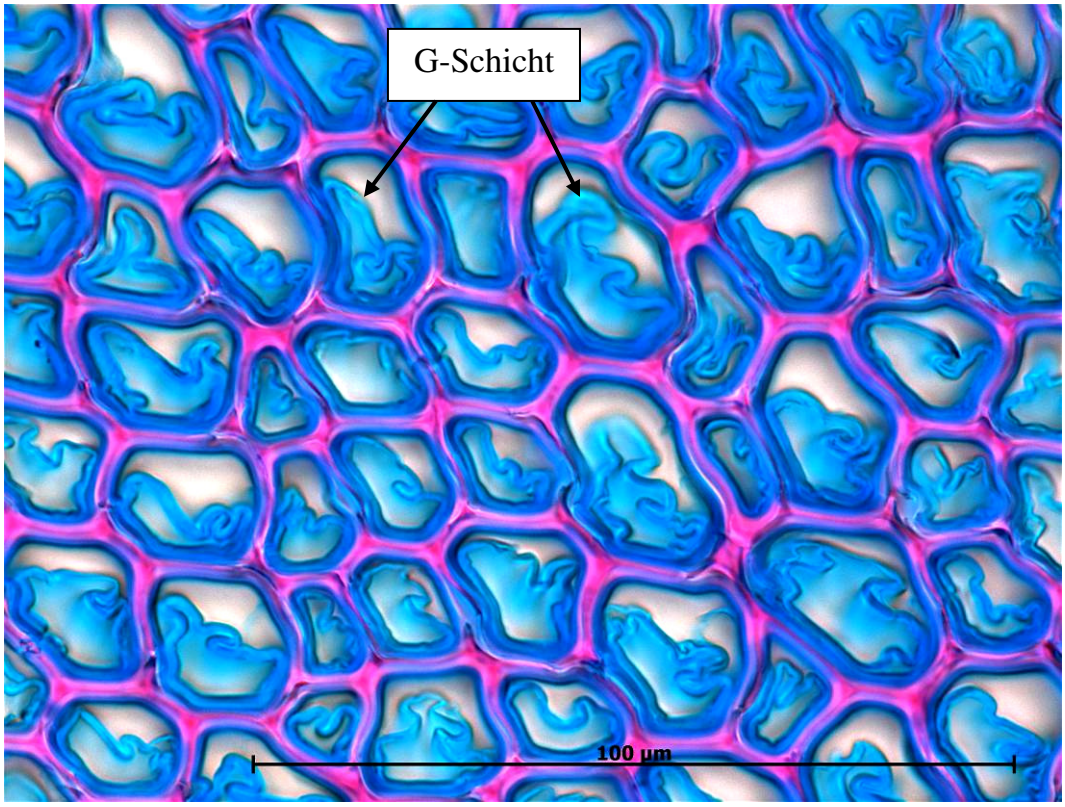


Abb. 2: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 1, **Probe - Nr. 1**), Holzquerschnitte: Das Splintholz des drehwüchsigen Stämmlings (vgl. Abb. 1) besaß sehr viel Zugholz. Dicke Jahresringe (Bild oben), wie auch dünne Jahresringe (Bild unten) fast vollständig aus Zugholz aufgebaut (Zugholzzellen: Zellwände mit G-Schicht, vgl. Abb. 3).



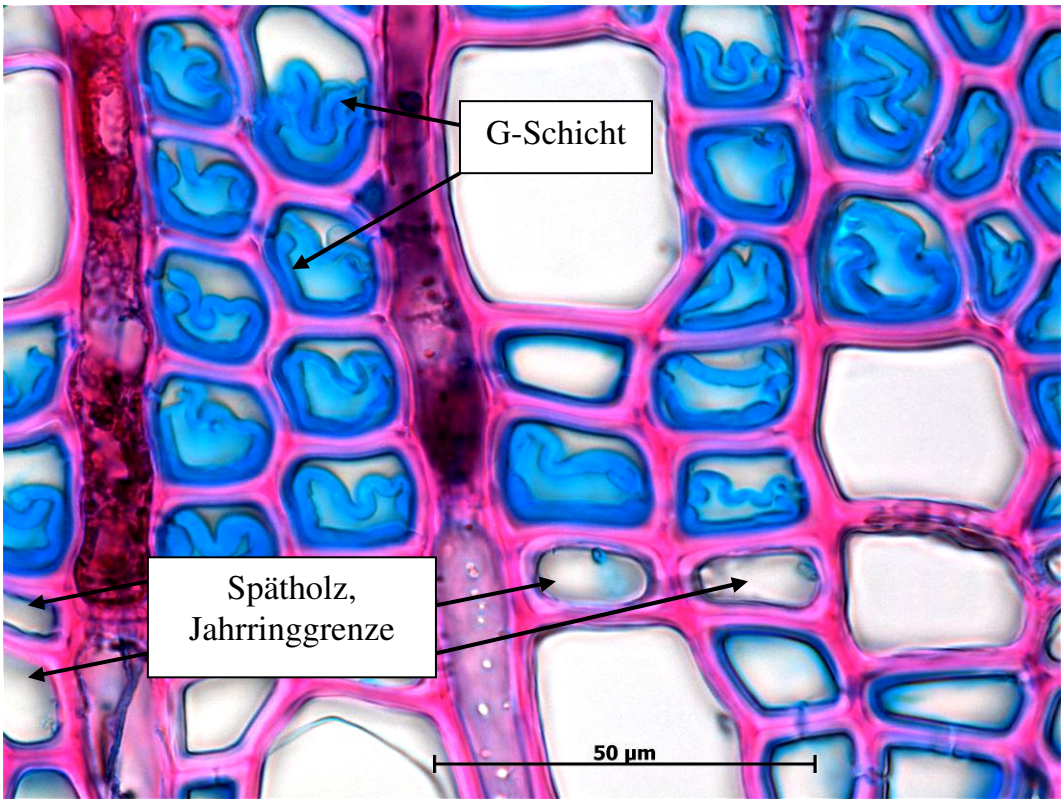


Abb. 3: Detailansicht Holzquerschnitte: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 1, **Probe - Nr. 1**). Das Splintholz des drehwüchsigen Stämmlings (vgl. Abb. 1) besaß sehr viel Zugholz. Die Zugholzzellen haben eine blau (dunkel) eingefärbte G-Schicht (gelatinöse, innere Zellwandschicht). Die G-Schicht besteht aus quellbarer, unverholzter, fast reiner Zellulose. Durch die Präparation war die G-Schicht gequollen und hatte sich teilweise von der Zellwand abgelöst.

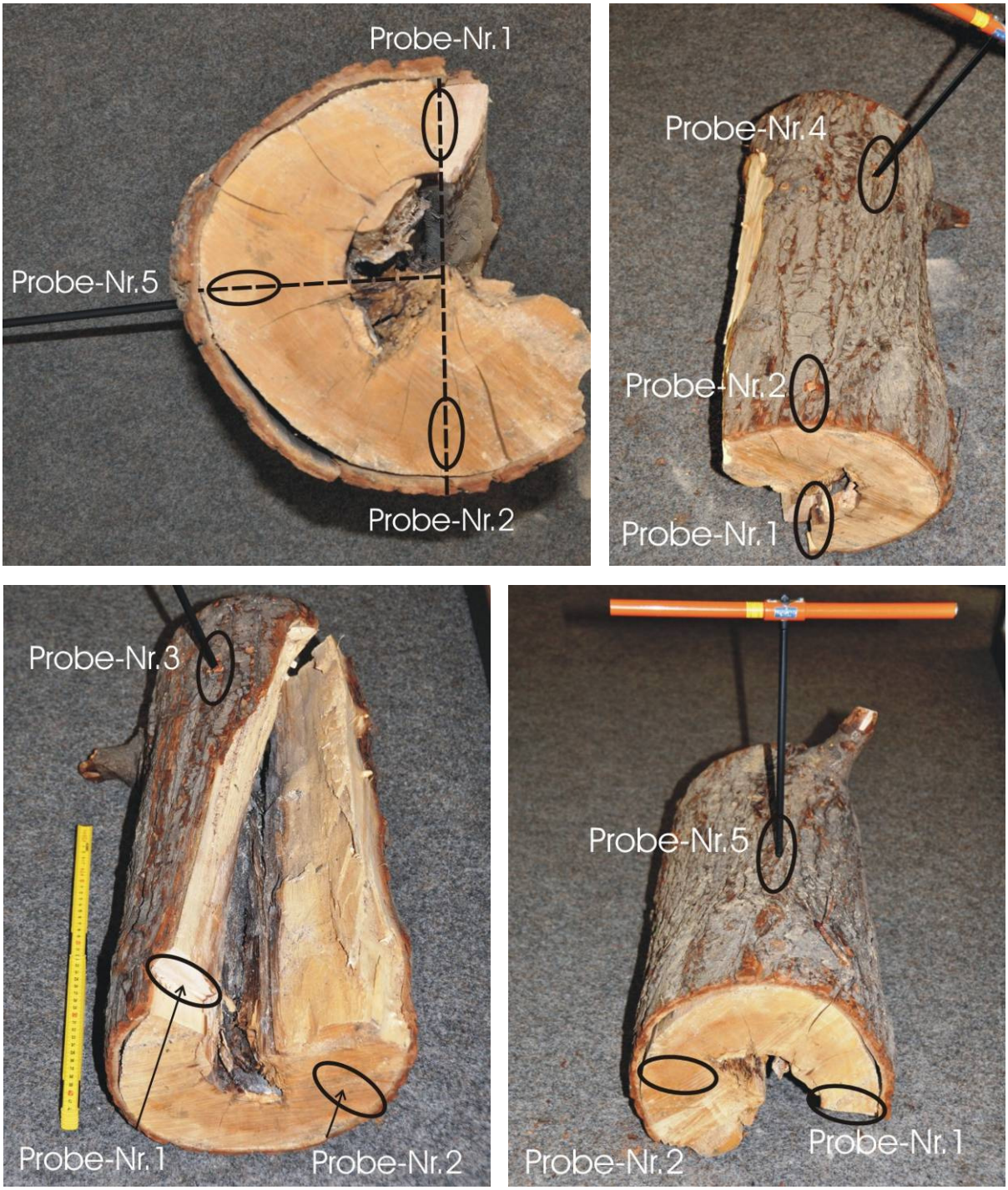


Abb. 4: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 1, vgl. Abb. 1), Phänotyp I: Drehwuchs ohne ausgeprägte Rippenbildung. Der Splintholzanteil wurde auf das Vorhandensein von Zugholz hin untersucht. Probenentnahmeorte: Probe – Nr. 2 wurde auf der gegenüberliegenden Stammseite von Probe – Nr. 1 entnommen. Probe – Nr. 3 wurde axial in ca. 40 cm Abstand und parallel dem drehenden Faserverlauf folgend, zu Probe – Nr. 1 entnommen. Probe – Nr. 4 wurde axial in ca. 40 cm Abstand und parallel dem drehenden Faserverlauf folgend, zu Probe – Nr. 2 entnommen. Probe – Nr. 5 wurde zum einen radial zwischen Probe – Nr.1 und Probe – Nr. 2 um jeweils 90° versetzt und zum andern axial zwischen Probe – Nr. 1 / Nr. 3, bzw. Nr. 2 / Nr. 4 (axial um je ca. 20 cm versetzt) entnommen (vgl. Bild rechts unten).

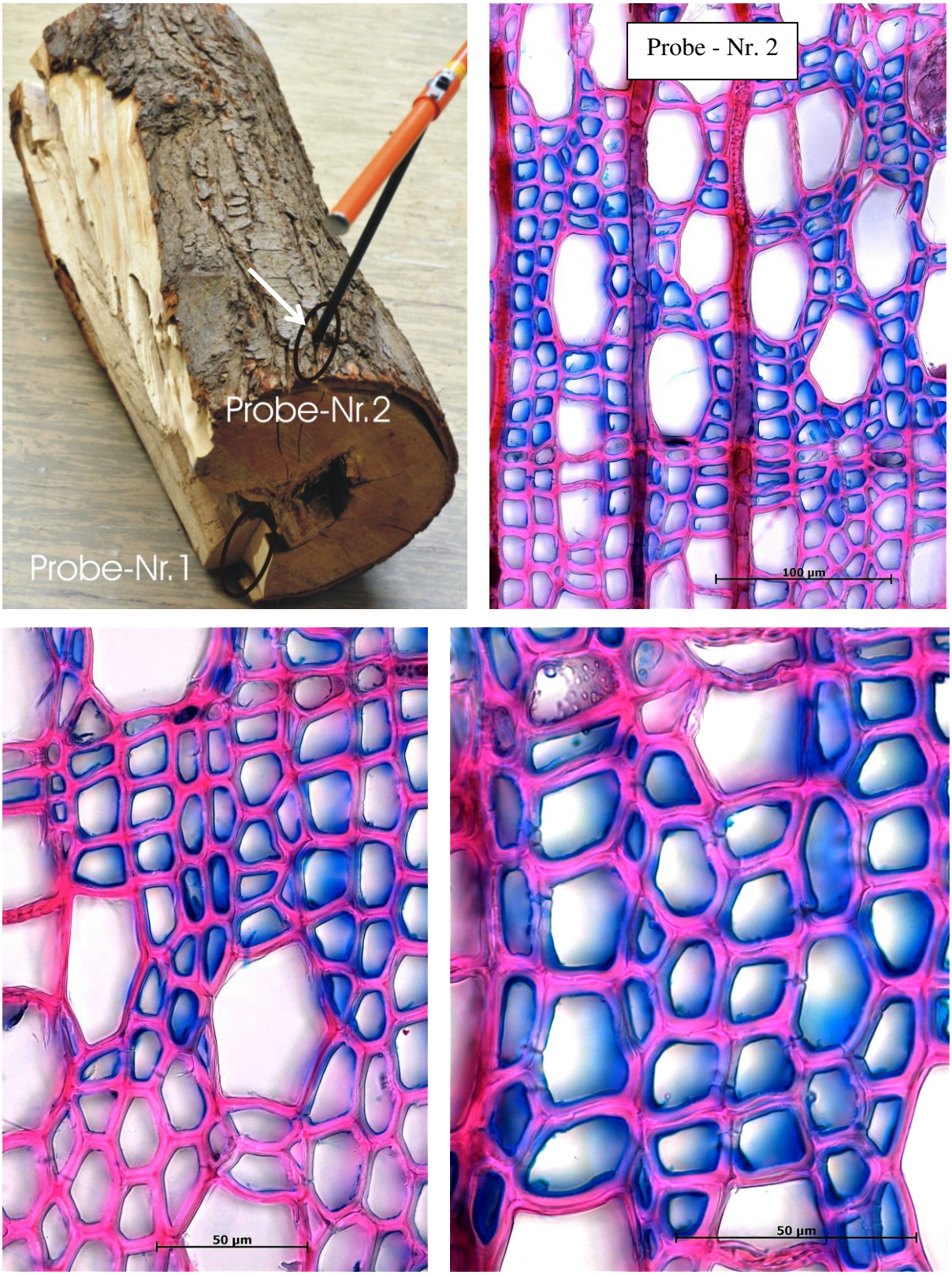


Abb. 5: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 1, vgl. Abb. 1), Phänotyp I: Drehwuchs ohne ausgeprägte Rippenbildung. **Probe – Nr. 2** wurde auf der gegenüberliegenden Stammseite von Probe – Nr. 1 entnommen. Splintholzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung. Es konnte keine gequollene G-Schicht im Inneren der Libriformfasern nachgewiesen werden. D. h. Probe – Nr. 2 war frei von Zugholz.

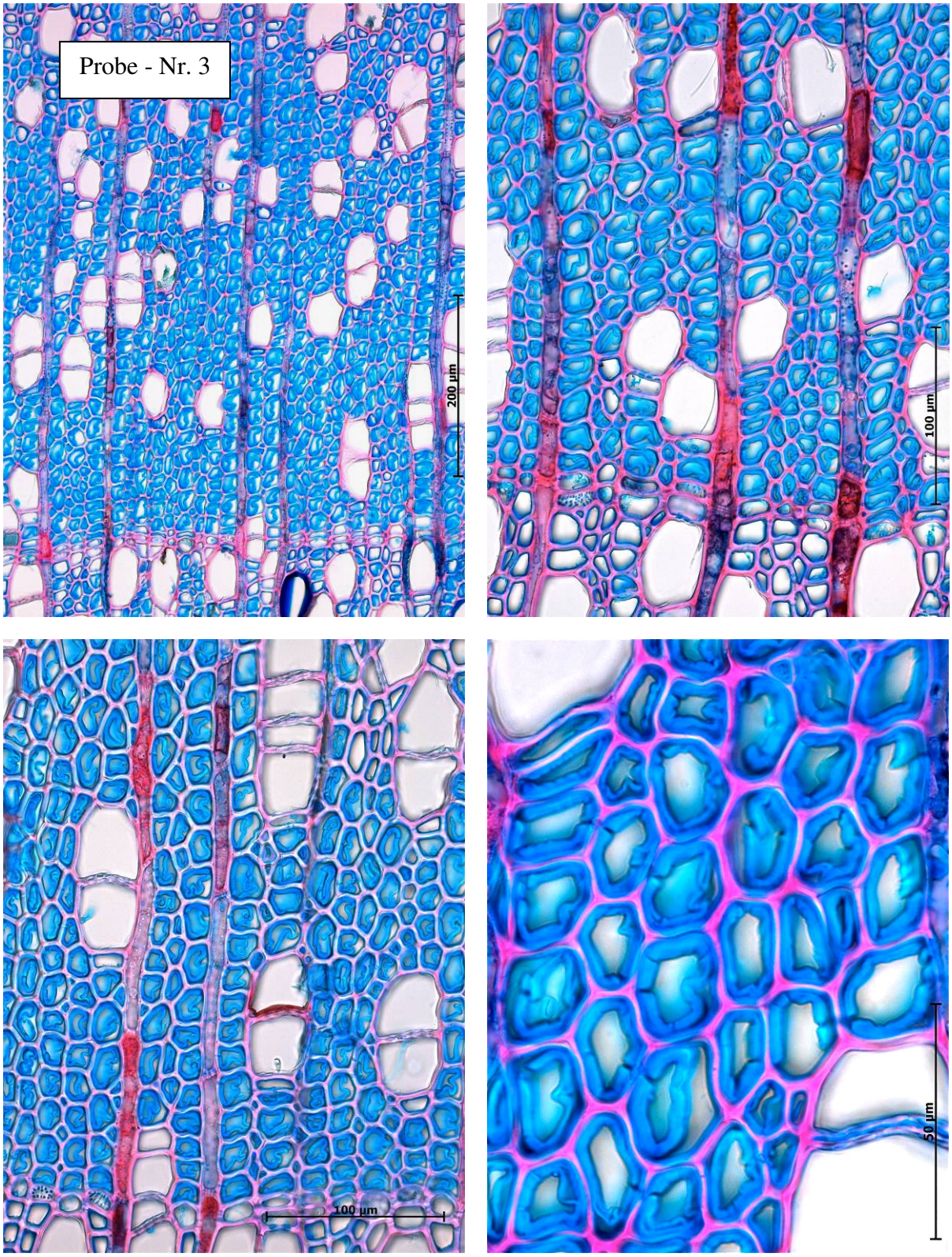


Abb. 6: Holzquerschnitte (unterschiedlicher Vergrößerung) der drehwüchsigen Rosskastanie, Baum Nr. 1, **Probe - Nr. 3** (vgl. Abb. 4). Das Splintholz besaß sehr viel Zugholz. Zugholzzellen haben eine blau (dunkel) eingefärbte G-Schicht (gelatinöse, innere Zellwandschicht). Durch die Präparation war die G-Schicht gequollen und hatte sich teilweise von der Zellwand abgelöst. Probe – Nr. 3 war (wie Probe – Nr. 1) sehr reich an Zugholz. Probe – Nr. 3 repräsentierte gewissermaßen die Verlängerung des „Zugholzfaserstrangs“, welcher in Probe – Nr. 1 (Abb. 3 und Abb. 4) dargestellt wurde.

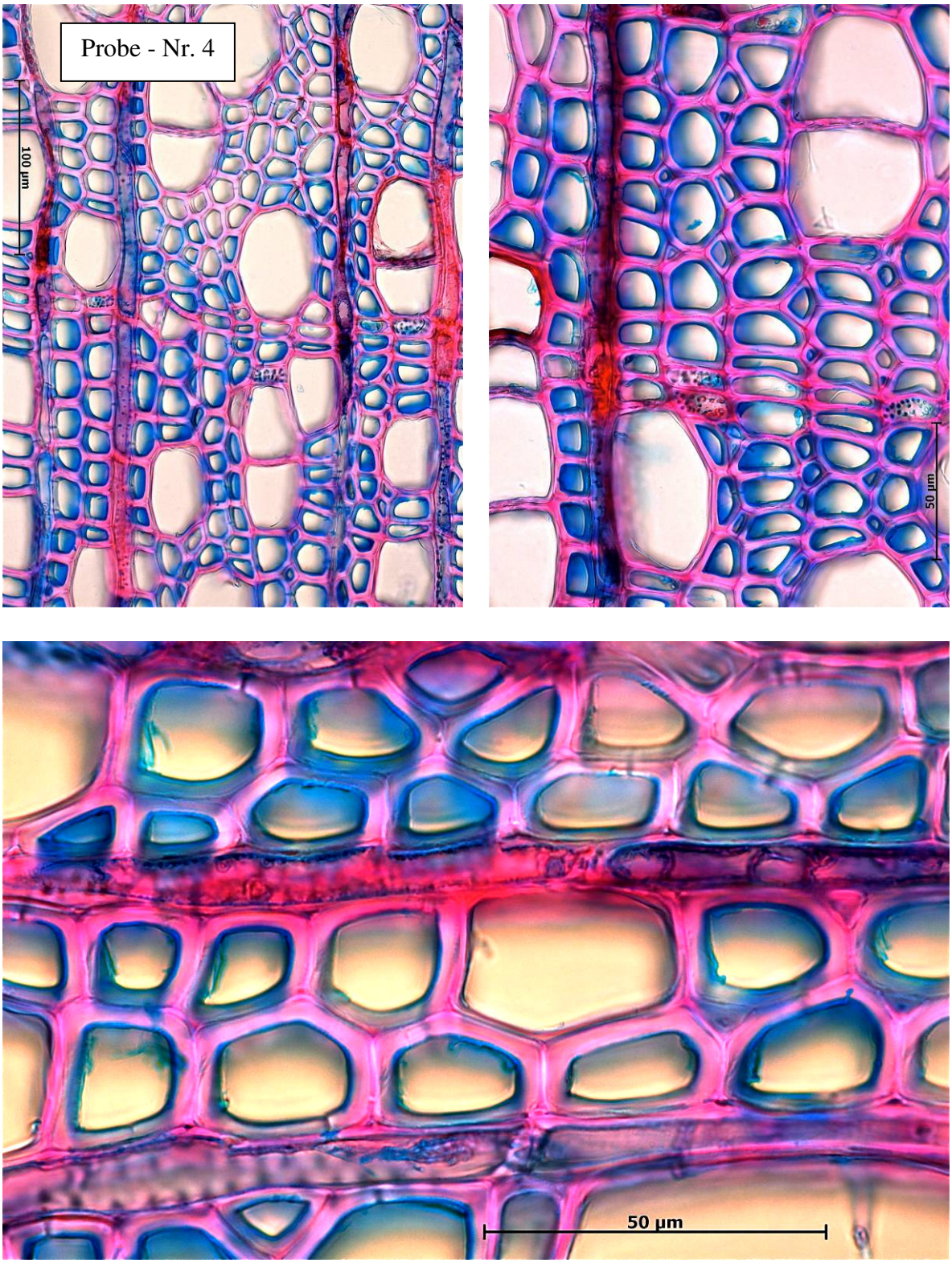


Abb. 7: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 1): **Probe – Nr. 4** wurde auf der gegenüberliegenden Stammseite von Probe – Nr. 3 entnommen. Splintholzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung. Es konnten keine gequollenen G-Schichten im Inneren der Libriformfasern nachgewiesen werden. Probe – Nr. 4 war (wie Proben – Nr. 2) frei von Zugholz. Analog zu den Proben Nr. 1 und Nr. 3 kann auch hier konstatiert werden, dass Probe – Nr. 4 gewissermaßen die Verlängerung des „Normalholzstranges“, welcher in Probe – Nr. 2 dargestellt wurde, repräsentierte.

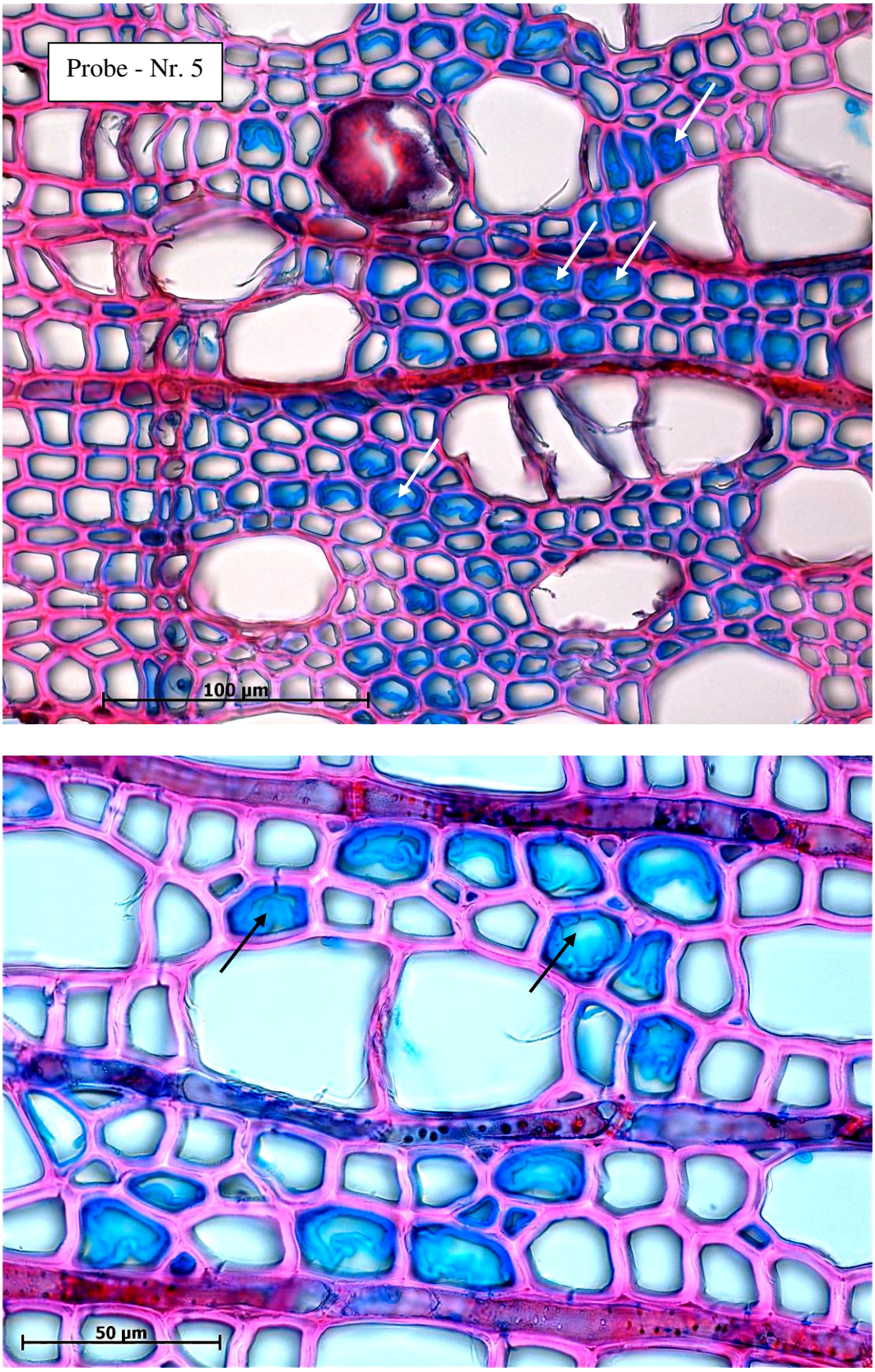


Abb. 8: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 1): **Probe – Nr. 5** wurde zum einen radial zwischen Probe – Nr. 1 und Probe – Nr. 2 (radial um 90° versetzt) und zum andern axial zwischen Probe – Nr. 1 und Nr. 3, bzw. Nr. 2 und Nr. 4 (axial um je ca. 20 cm versetzt) entnommen (vgl. Abb. 4). Probe - Nr. 5 enthielt Zugholz (Pfeile: G-Schichten). Der Zugholzanteil war geringer, als der der Proben Nr. 1 und Nr. 3.

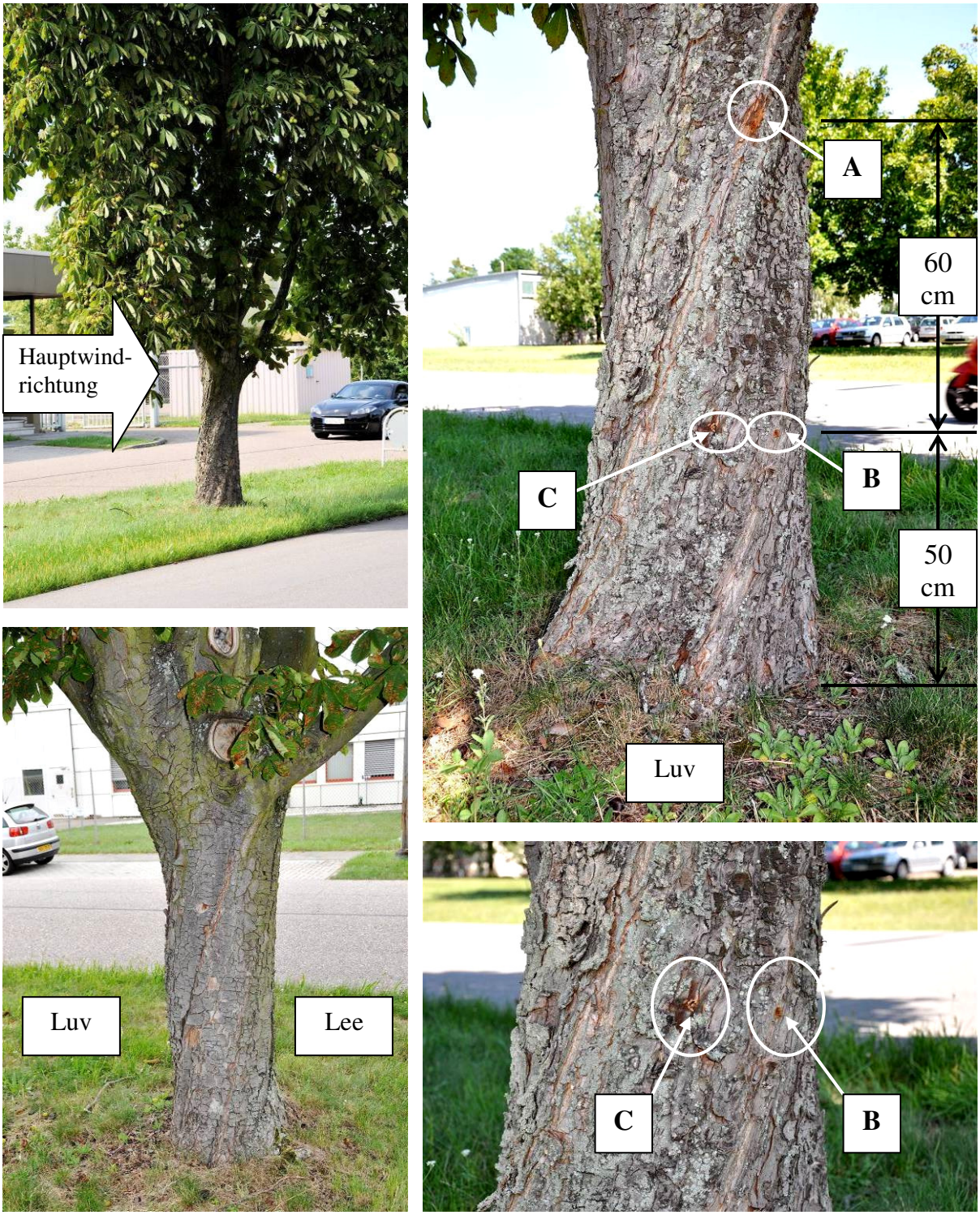


Abb. 9: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 2), Phänotyp II: Drehwuchs mit ausgeprägter Rippenbildung (Drehrippen). Bilder rechts: Orte der Probenentnahme (mittels Zuwachsbohrung) auf der dem Wind zugekehrten Stammseite (Luv). Geradschaftiger, stark drehwüchsiger Stamm mit starken, lokalen Zuwächsen (siehe Zuwachsstreifen) von den Wurzelanläufen bis zu den Stark-Ast-Anbindungen an der Kronenbasis. **A:** Holzprobe von einer „Drehrippe“ in 1,10 m Höhe. **B:** Holzprobe von einer „Drehrippe“ über einem Wurzelanlauf, vertikal unter (A) in 0,5 m Höhe. **C:** Holzprobe zwischen zwei Drehrippen in gleicher Höhe wie (B) über den Wurzelanläufen (0,5 m Höhe).

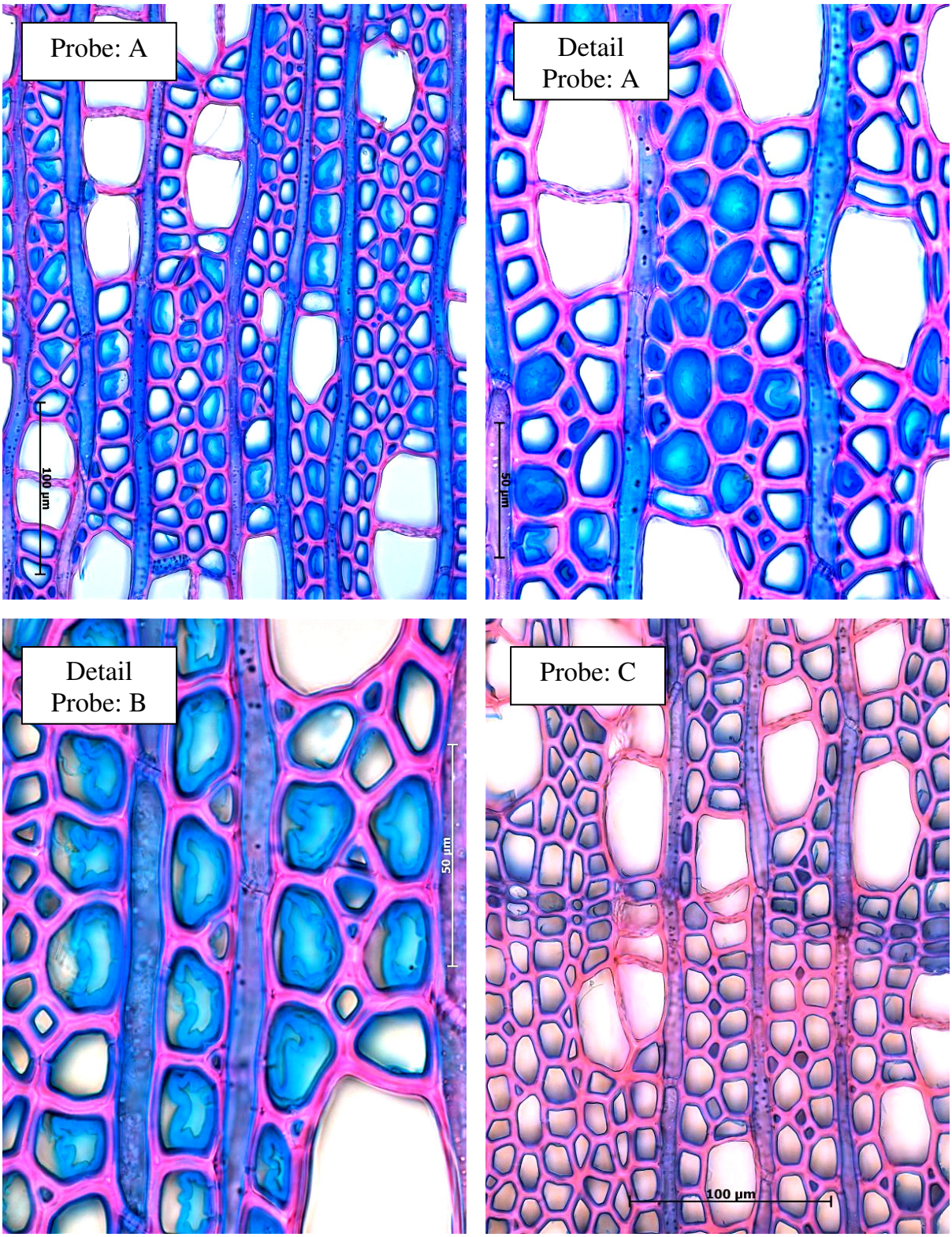


Abb. 10: Holzquerschnitte: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 2, Phänotyp II). Das Splintholz des geradschaftigen aber drehwüchsigen Stamms (vgl. Abb. 9) besaß sehr viel Zugholz in den „Drehrippen“, in Probe (A) und Probe (B). Die Zugholzzellen waren an der blau (dunkel) eingefärbten G-Schicht erkennbar (gelatinöse, innere Zellwandschicht). Durch die Präparation war die G-Schicht gequollen und hatte sich teilweise von der Zellwand abgelöst. Die Splintholzprobe (C) zwischen zwei Drehrippen besaß hingegen kein Zugholz.

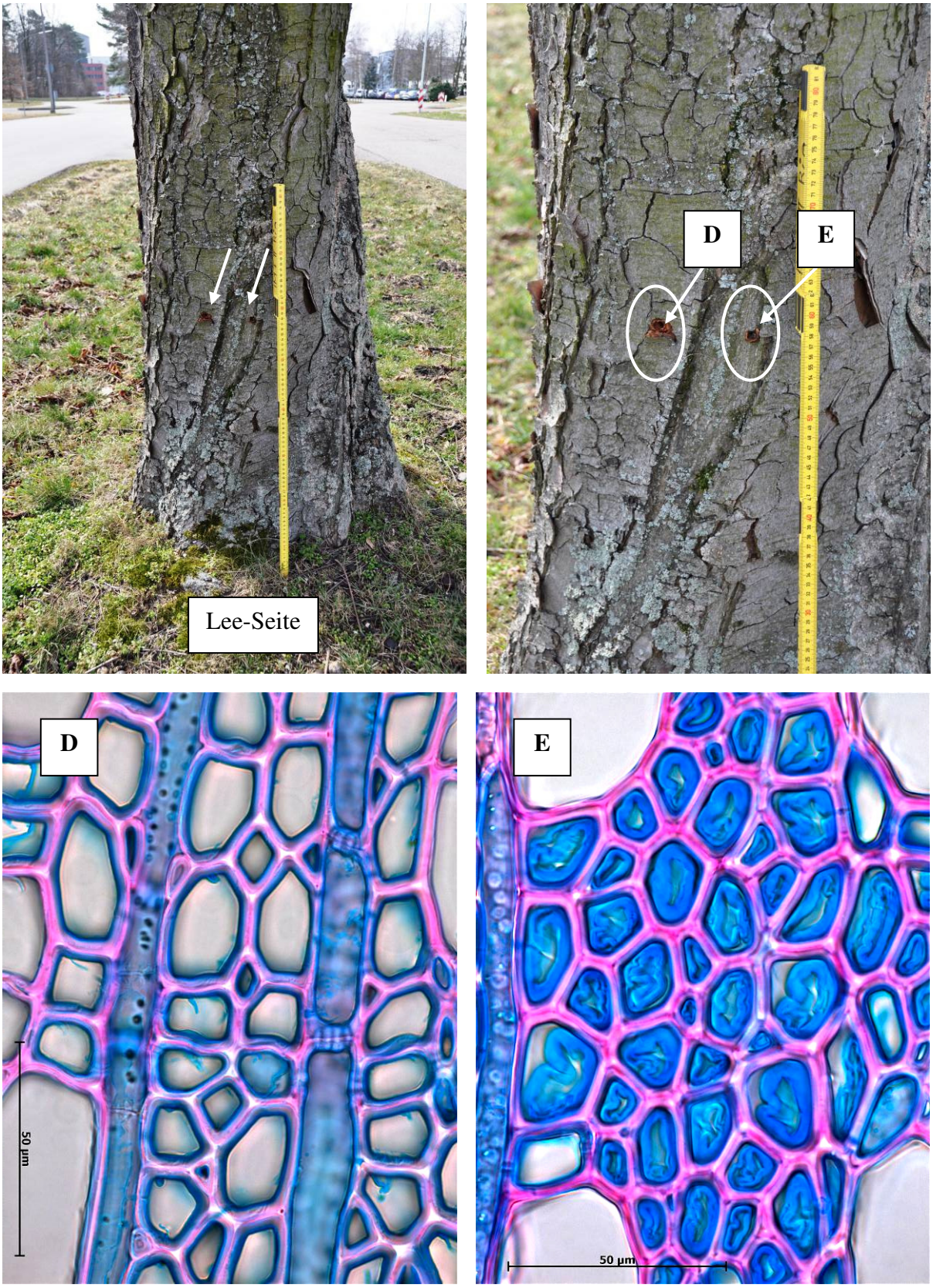


Abb. 11: Holzquerschnitte: Drehwüchsige Rosskastanie, Baum - Nr. 2, „Rückseite“, d. h., die dem Wind abgewandten Stammseite (Lee-Seite). Das Splintholz des geradschaftigen, drehwüchsigen Stamms besaß sehr viel Zugholz in der „Drehrippe“ (Probe E), aber kein Zugholz im „Tal“ zwischen zwei Drehrippen (Probe D). D. h. Luv- und Lee-Seite des drehwüchsigen Stamms verhielten sich holzanatomisch gleich.

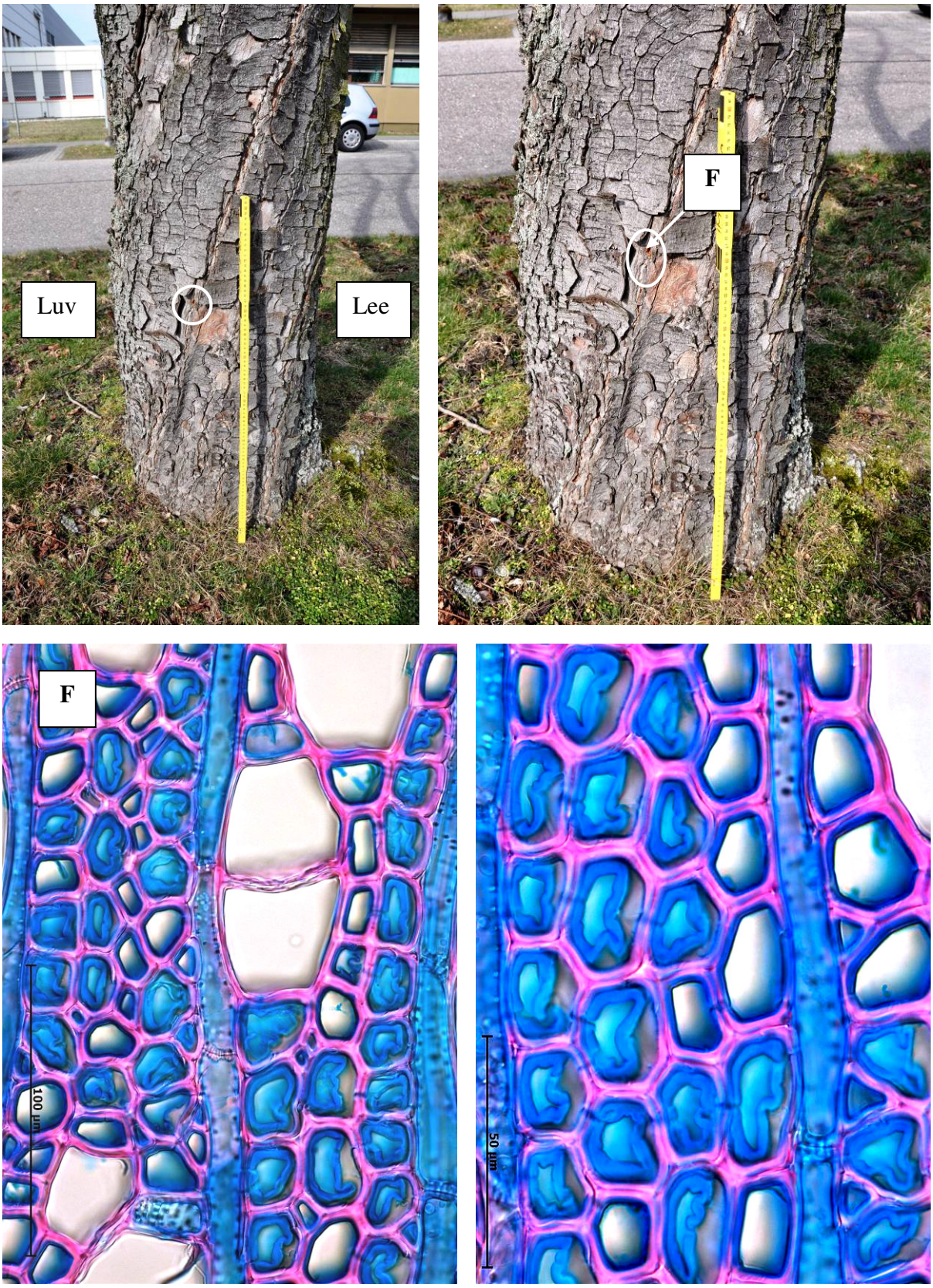


Abb. 12: Holzquerschnitte: Drehwüchsige Rosskastanie, Baum Nr. 2, Phänotyp II, seitliche Drehrippe (Stammbereich zwischen Luv- und Lee-Seite). Das Splintholz in der „Drehrippe“ des Stammes (Probe F) besaß ebenfalls sehr viel Zugholz. Dies bestätigte die holzanatomischen Erwartungen für Drehrippenholz. Bilder oben: Probenentnahmeort. Bilder unten: Splintholzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung.

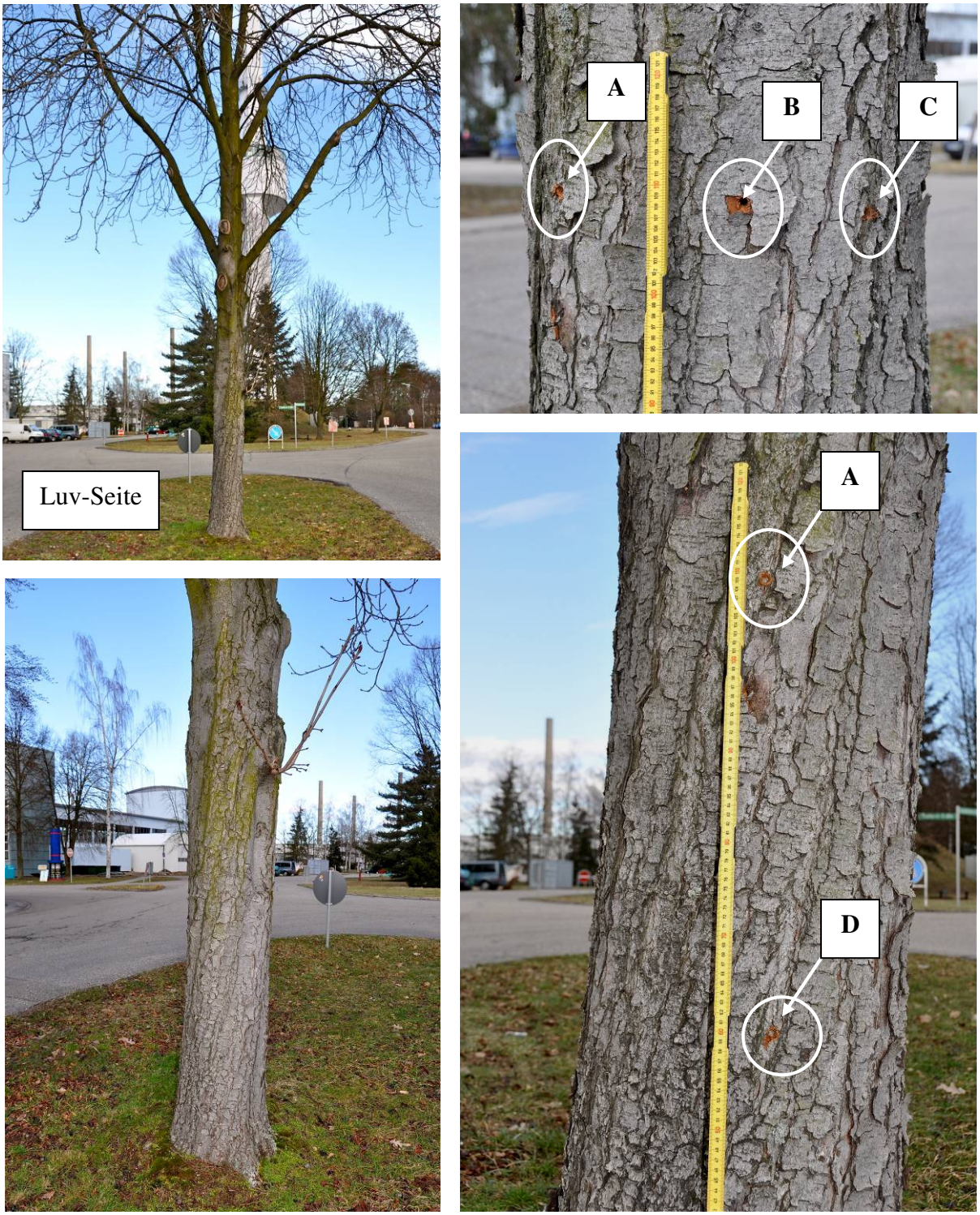


Abb. 13: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 3), Phänotyp I: Drehwuchs ohne ausgeprägte Rippenbildung (vergleichbar mit dem Stämmling in Abb. 1). Bilder rechts: Orte der Probenentnahme, Proben A und D wurden auf der Windseite (Luv-Seite) entnommen. Splintholzproben A, B, C in 1,10 m Höhe und Probe D in 0,6 m Höhe. Probenentnahmeort (B) befand sich im Versorgungsschatten eines abgesägten Astes und könnte phänomenologisch auch ein „Tal“ zwischen zwei Drehrippen (zwischen A und C) darstellen (was die mikroskopische Untersuchung, vgl. Abb. 14, nicht bestätigte, denn auch in B war viel Zugholz nachweisbar).

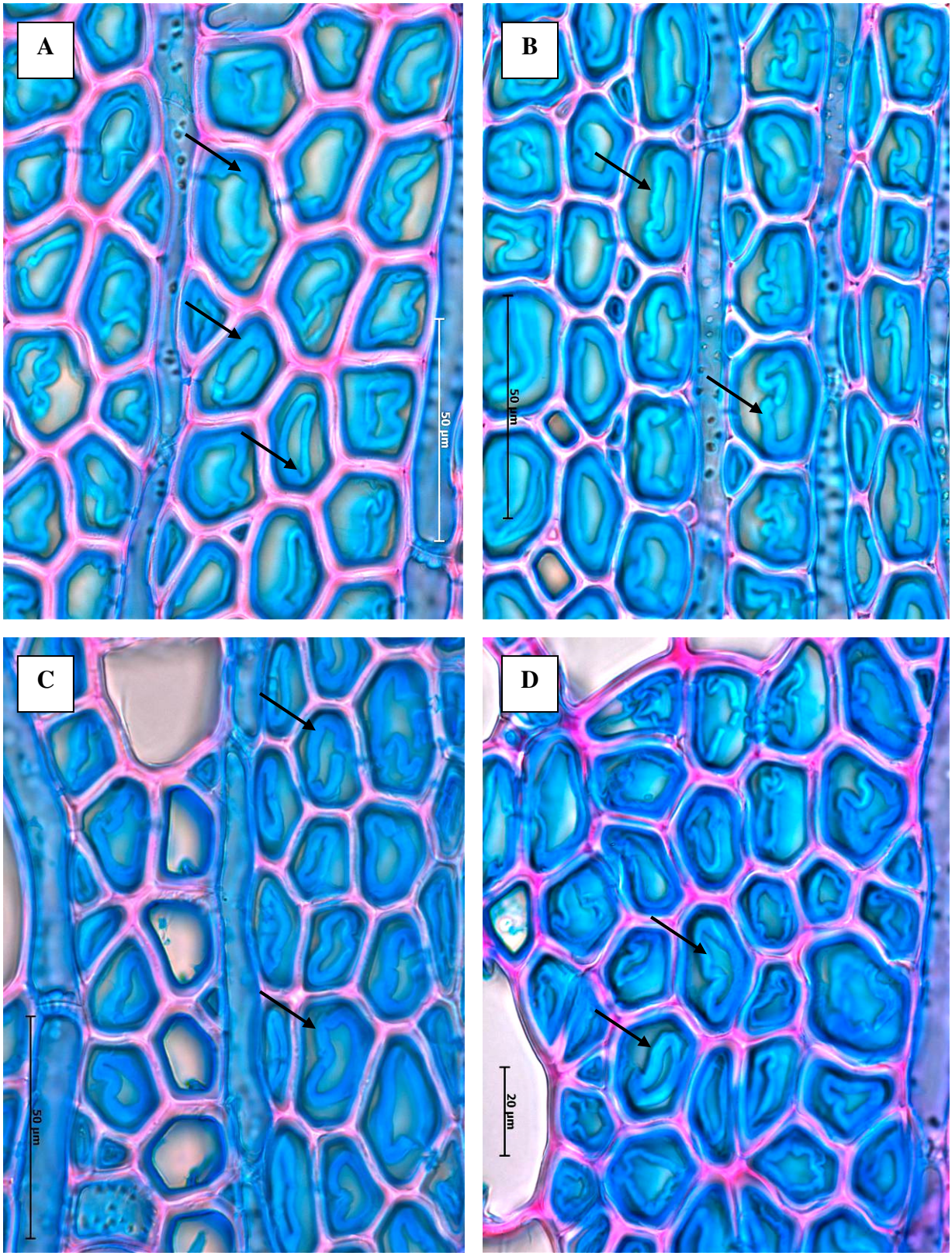


Abb. 14: Detailansicht Holzquerschnitte: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 3). Das Splintholz aller Proben (A – D) des drehwüchsigen Stamms (vgl. Abb. 13) besaß viel Zugholz. Die Zugholzzellen besaßen ihrerseits eine blau (dunkel) eingefärbte G-Schicht (Pfeile, gelatinöse, innere Zellwandschicht). Die G-Schicht besteht aus quellbarer, unverholzter, fast reiner Zellulose, die durch die Präparation aufquoll und sich teilweise von der Zellwand abgelöst hatte (vgl. Pfeile).

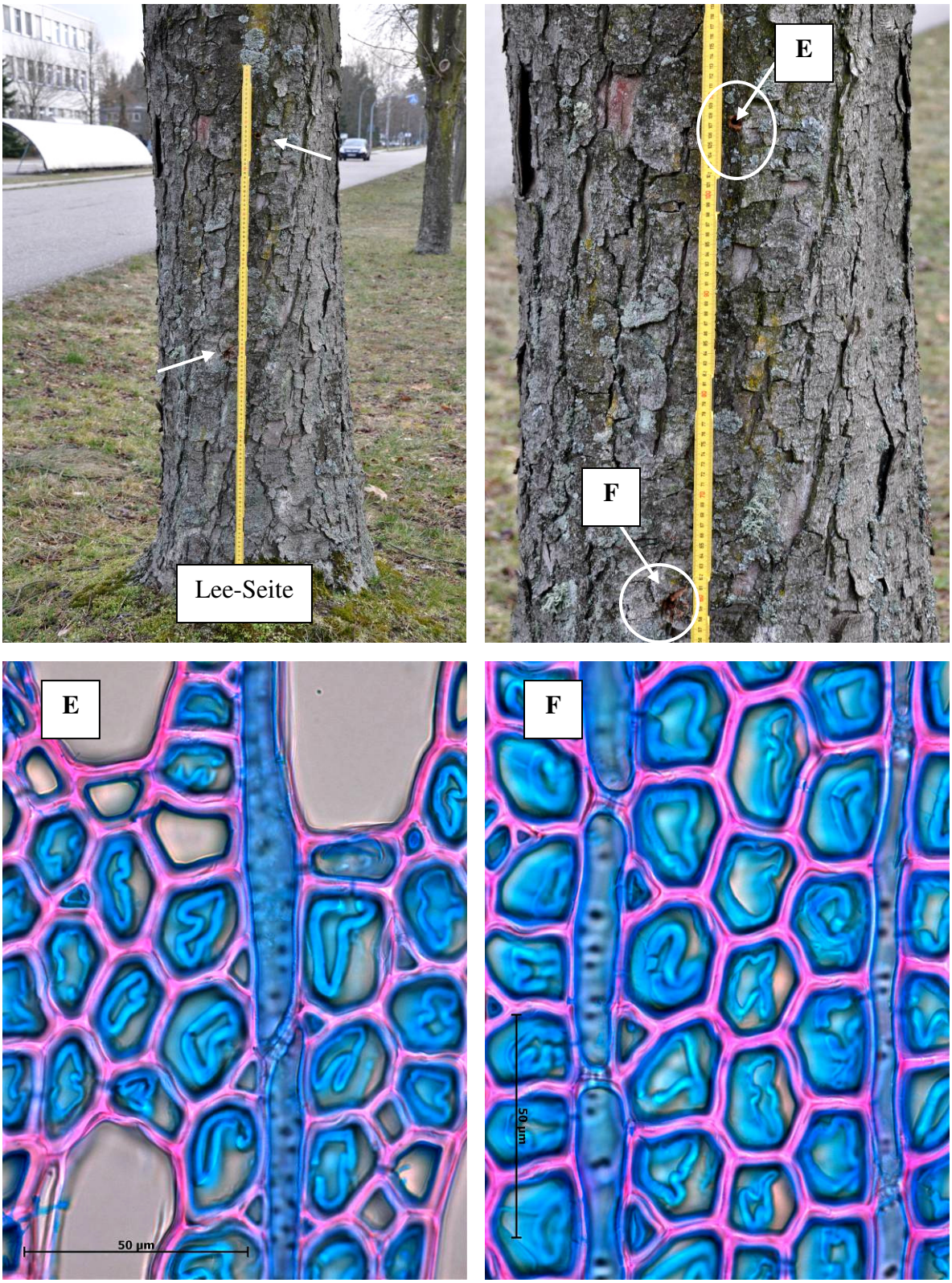


Abb. 15: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 3), Phänotyp I: Drehwuchs ohne ausgeprägte Rippenbildung. Bilder oben: Orte der Probenentnahme auf der Wind abgewandten Seite (Lee-Seite). Splintholzprobe E in 1,10 m Höhe und Probe F in 0,6 m Höhe. Das Splintholz aller Proben (E und F, bzw. auch A – F) des drehwüchsigen Stamms besaß viel Zugholz. Die Zugholzzellen waren erkennbar an einer blau (dunkel) eingefärbten G-Schicht (innere Zellwandschicht). D. h. auch bei Baum Nr. 3 (Phänotyp I) verhielten sich Luv- und Lee-Seite des drehwüchsigen Stamms holzanatomisch (bezüglich Zugholzbildung) gleich.

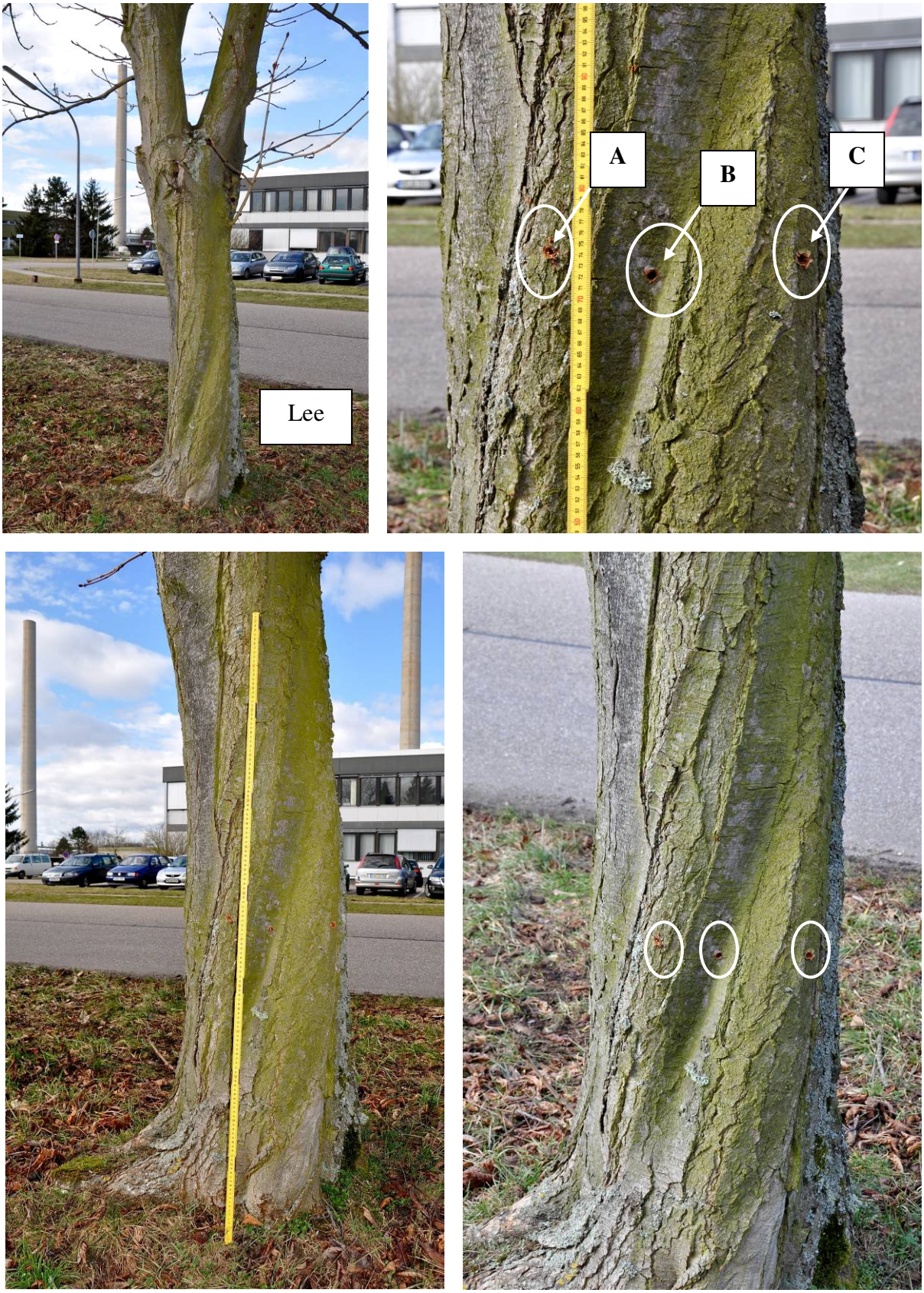


Abb. 16: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 4), Phänotyp II: Drehwuchs mit ausgeprägter Rippenbildung (Drehrippen). Probenentnahmeorte auf der Wind abgewandten Seite (Lee-Seite) in ca. 73 cm Stammhöhe: (A) Drehrippe, (B) zwischen zwei Drehrippen, (C) Drehrippe.

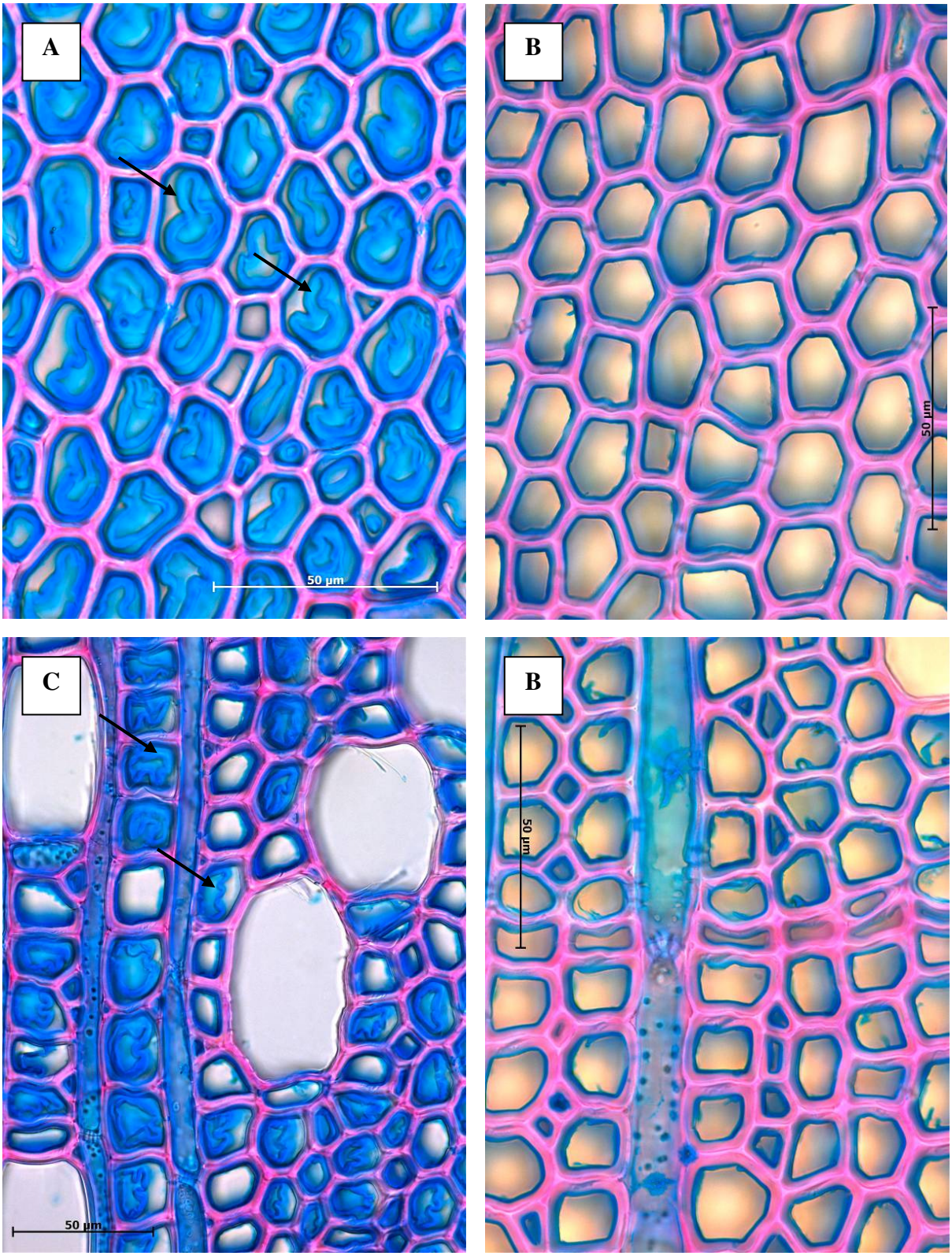


Abb. 17: Holzquerschnitte (Baum Nr. 4). Phänotyp II: Drehwuchs mit ausgeprägten Drehrippen. Das Splintholz des geradschaftigen aber drehwüchsigen Stammes (vgl. Abb. 16) besaß reichlich Zugholz in den „Drehrippen“, d. h. in Probe (A) und Probe (C). Die Zugholzzellen waren an der blau (dunkel) eingefärbten G-Schicht erkennbar (Pfeile). Durch die Präparation war die G-Schicht gequollen und hatte sich teilweise von der Zellwand abgelöst. Bilder rechts: Die Splintholzprobe (B) zwischen zwei Drehrippen (im „Drehwuchs-Tal“) besaß hingegen kein Zugholz.

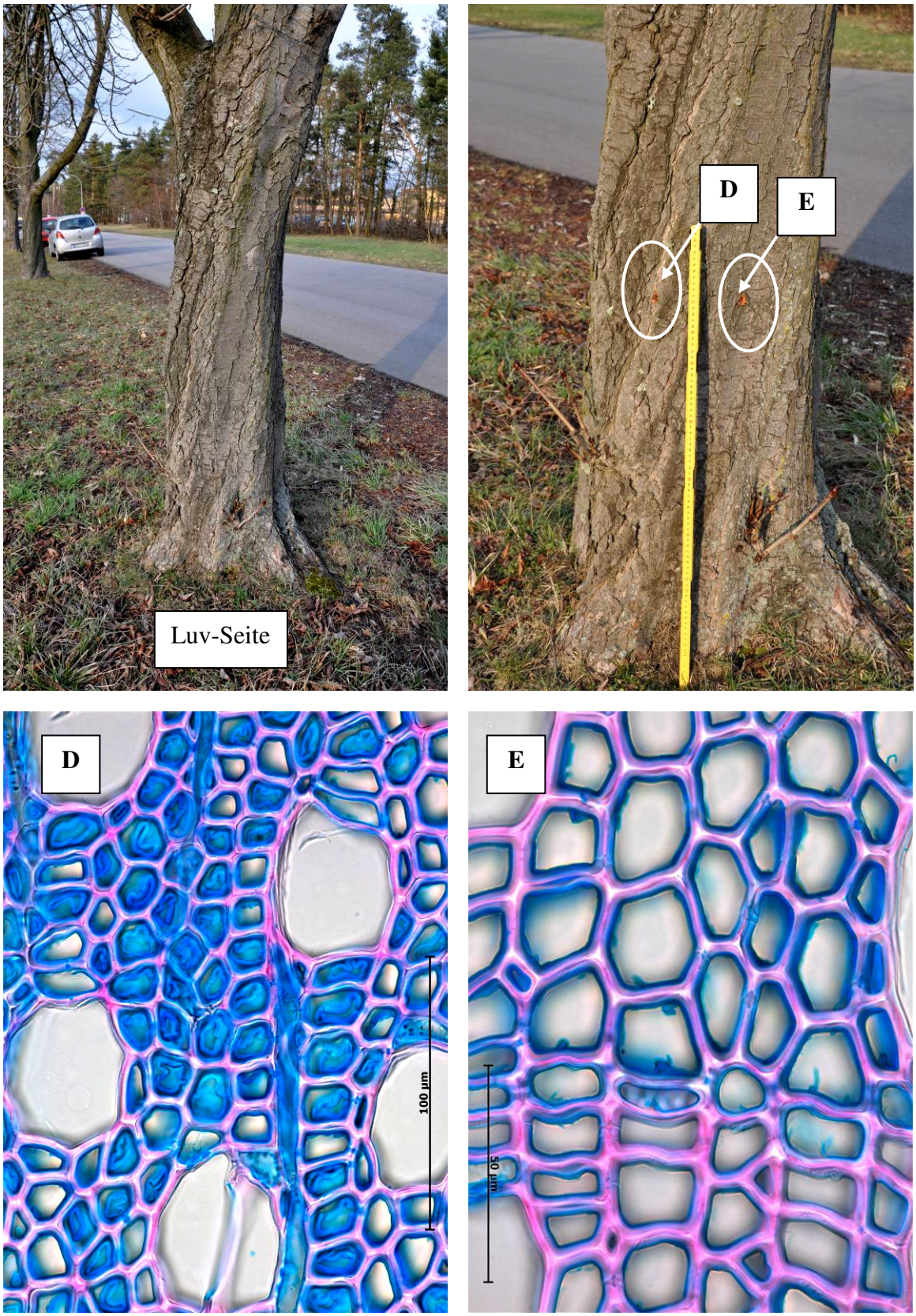


Abb. 18: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 4), Phänotyp II: Drehwuchs mit ausgeprägter Rippenbildung (Drehrippen). Probenentnahmeorte auf der Windseite (Luv-Seite) des Stammes, in ca. 73 cm Stammhöhe: (D) Drehrippe, (E) zwischen zwei Drehrippen. Während die Splintholzprobe (D) von einer Drehrippe, Zugholz enthielt, besaß die Probe (E) zwischen zwei Drehrippen (in einem „Drehwuchs-Tal“) kein Zugholz.

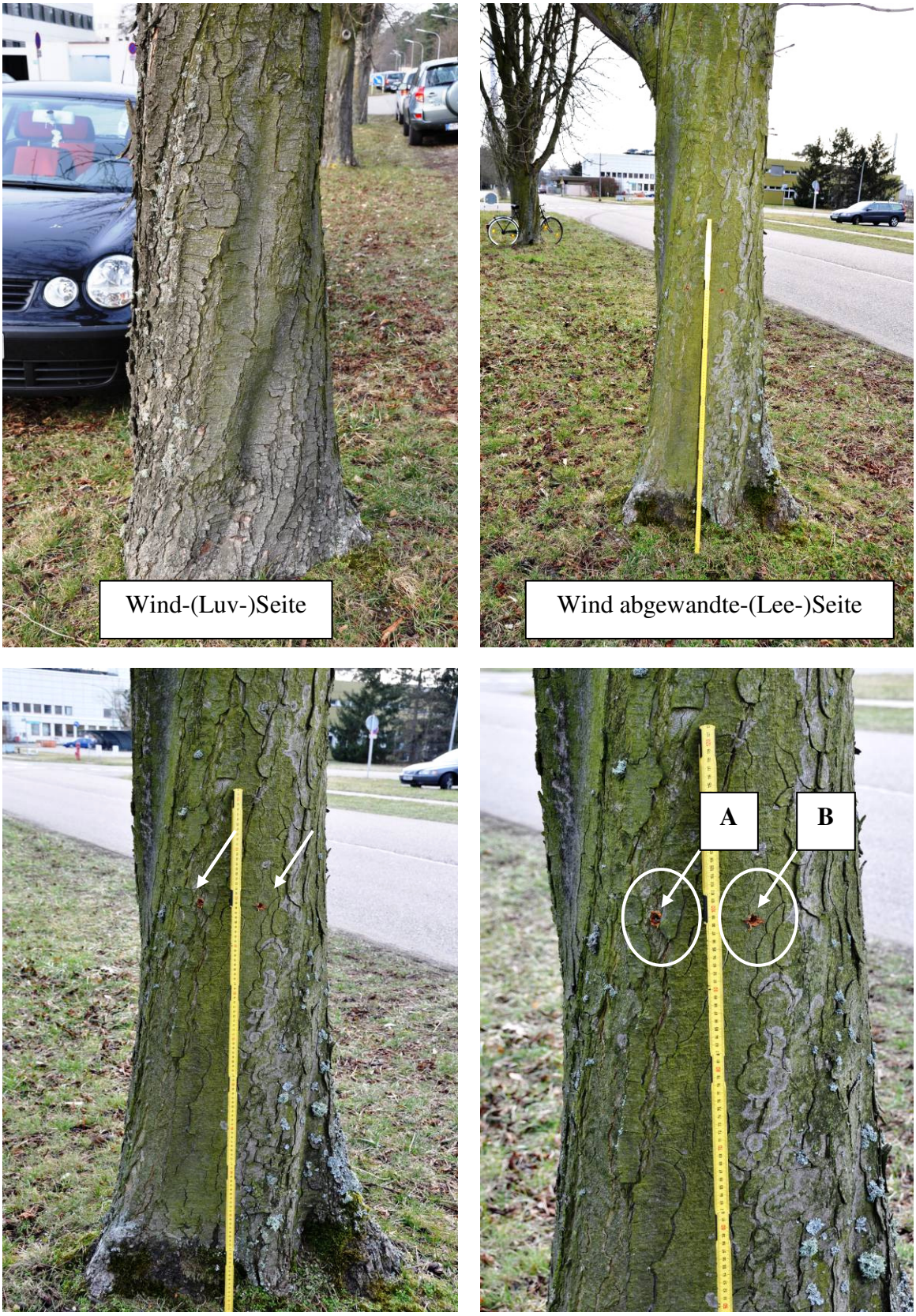


Abb. 19: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 5), Phänotyp II: Drehwuchs mit ausgeprägter Rippenbildung. Probenentnahmeorte auf der Wind abgewandten Stammseite (Lee-Seite), in ca. 1,0 m Stammhöhe: (A) Drehrippe, (B) zwischen zwei Drehrippen.

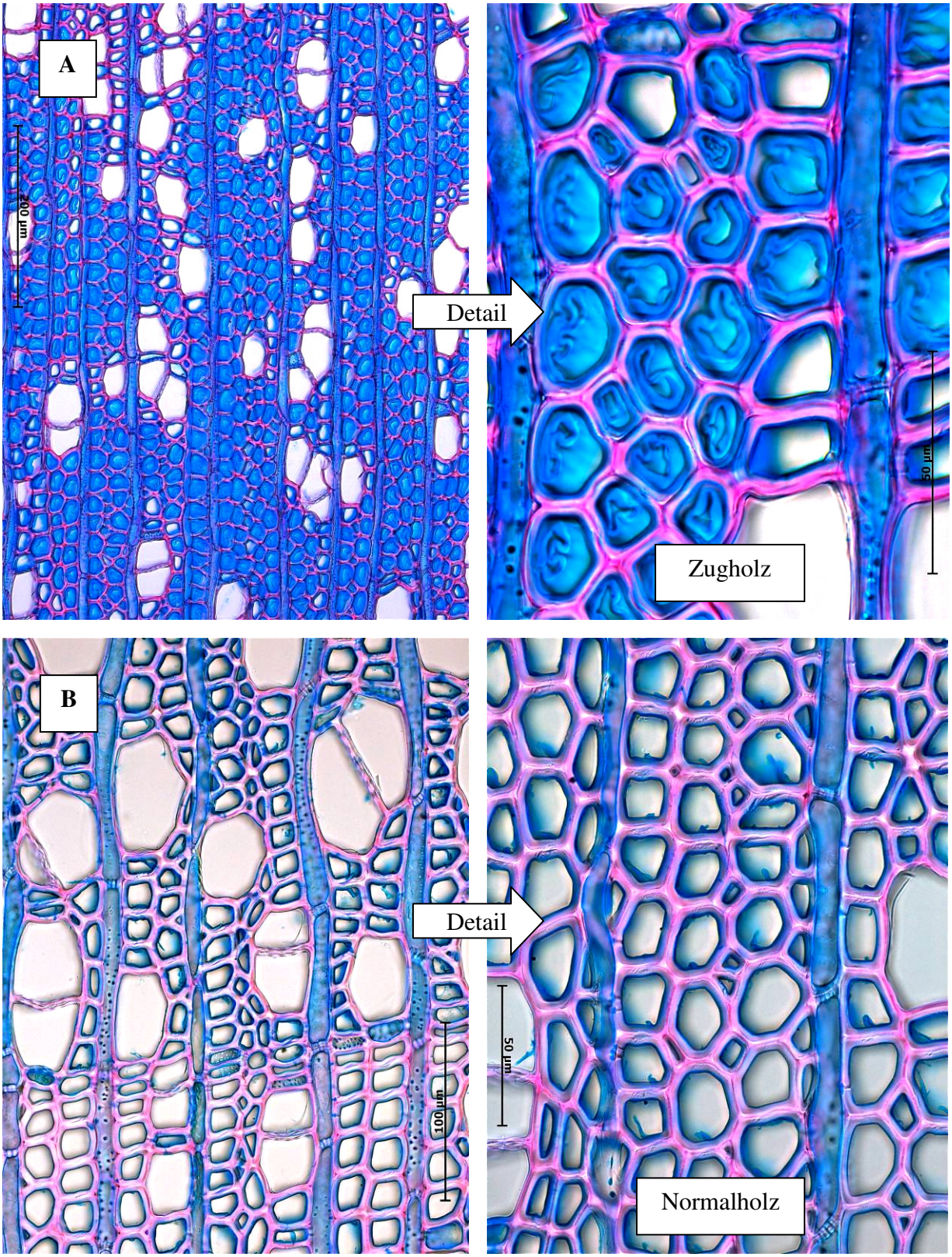


Abb. 20: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 5), Phänotyp II. Bilder oben: Probe (A) Drehrippe mit viel Zugholz im Splint. Zugholzzellen erkennbar an der blau (dunkel) eingefärbten G-Schicht (innere Wandschicht). Bilder unten: Probe (B) Holzgewebe zwischen zwei Drehrippen ohne Zugholz (ausschließlich Normalholz im Splint).

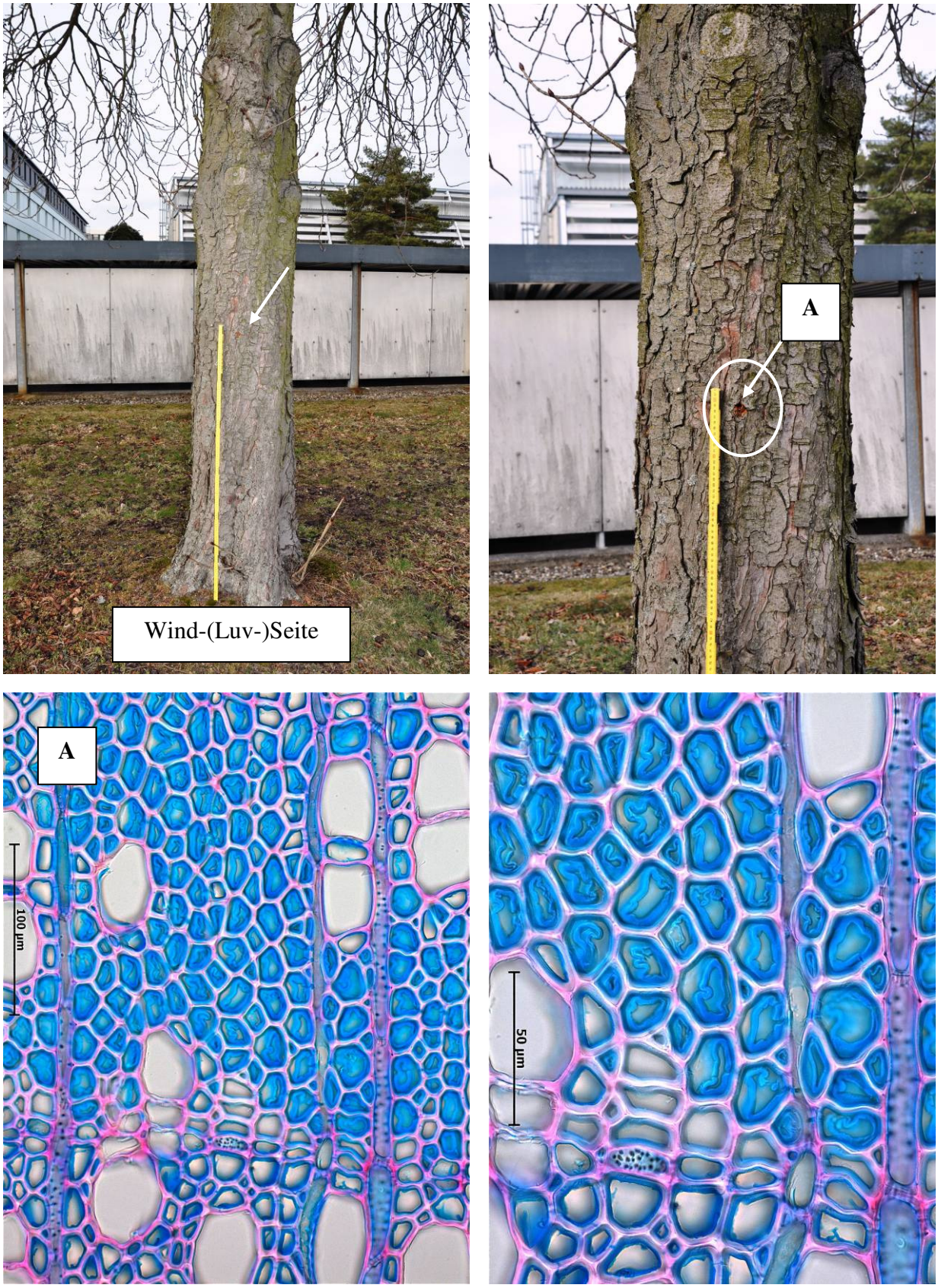


Abb. 21: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 6), Phänotyp I: Drehwuchs ohne ausgeprägte Rippenbildung. Probenentnahmeorte auf der Windseite (Luv-Seite) des Stammes, in 1,2 m Höhe: Probe (A). Die Splintholzprobe besaß viel Zugholz. Die Zugholzzellen waren an einer gelatinösen, inneren Zellwandschicht erkennbar.

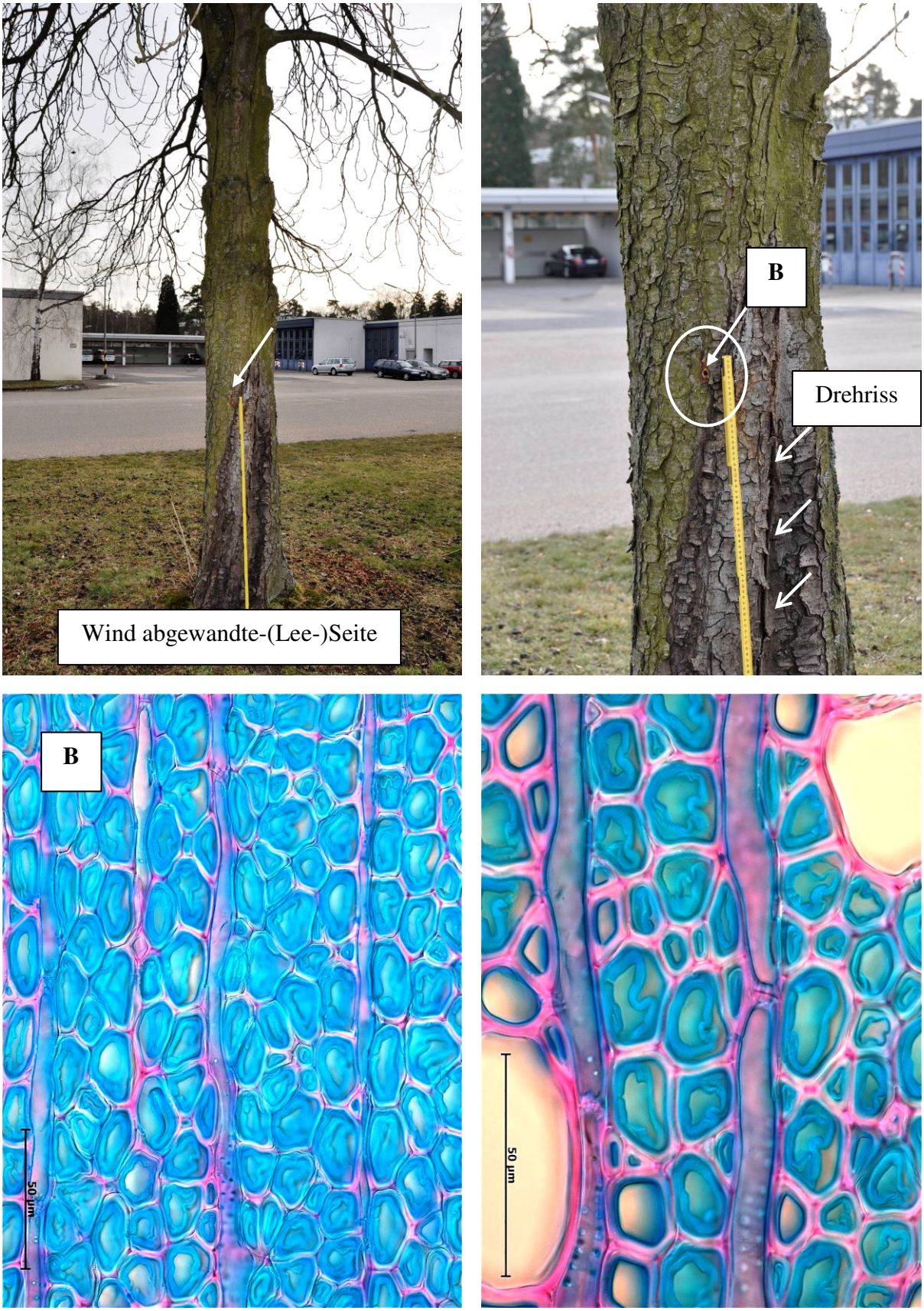


Abb. 22: Drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 6): Probenentnahmeort auf der Wind abgewandten Seite (Lee-Seite) in 1,2 m Stammhöhe: Probe (B). Stamm mit Drehriss. Die Splintholzprobe besaß ebenfalls sehr viel Zugholz. Die Zugholzzellen waren an einer gelatinösen, inneren Zellwandschicht erkennbar (vgl. Bilder unten).

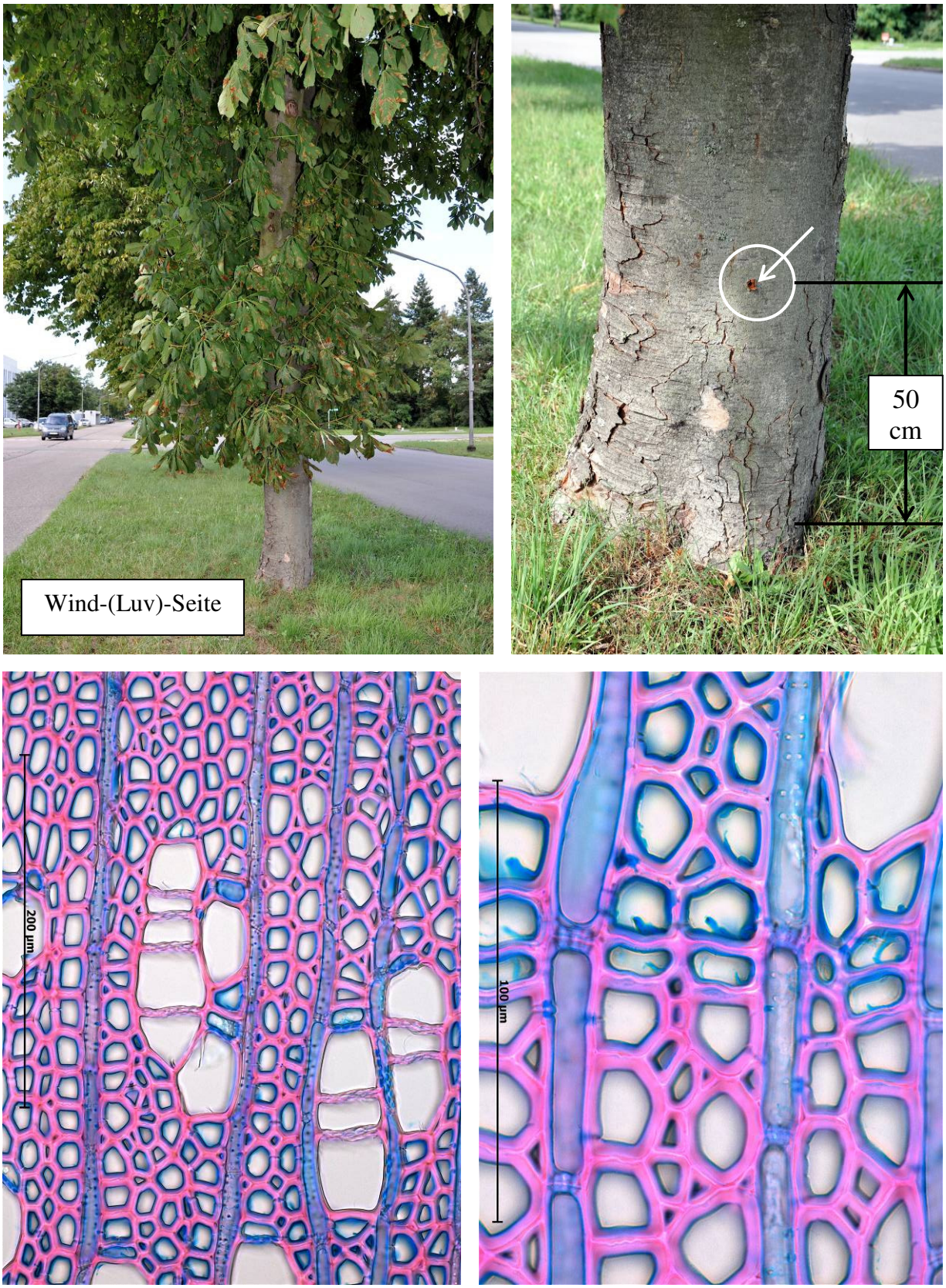


Abb. 23: Referenz (I), geradschaftige, nicht drehwüchsige Rosskastanie (Baum Nr. 7). Bilder oben: Ort der Probenentnahme (Zuwachsbohrung) auf der Wind zugewandten Stammseite. Bilder unten: Holzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung. Im Splintholz der Stammprobe konnte kein Zugholz nachgewiesen werden. Die Zellwände (Sekundärwände der Libriformfasern) besaßen keine „gelatinöse“ G-Schicht.

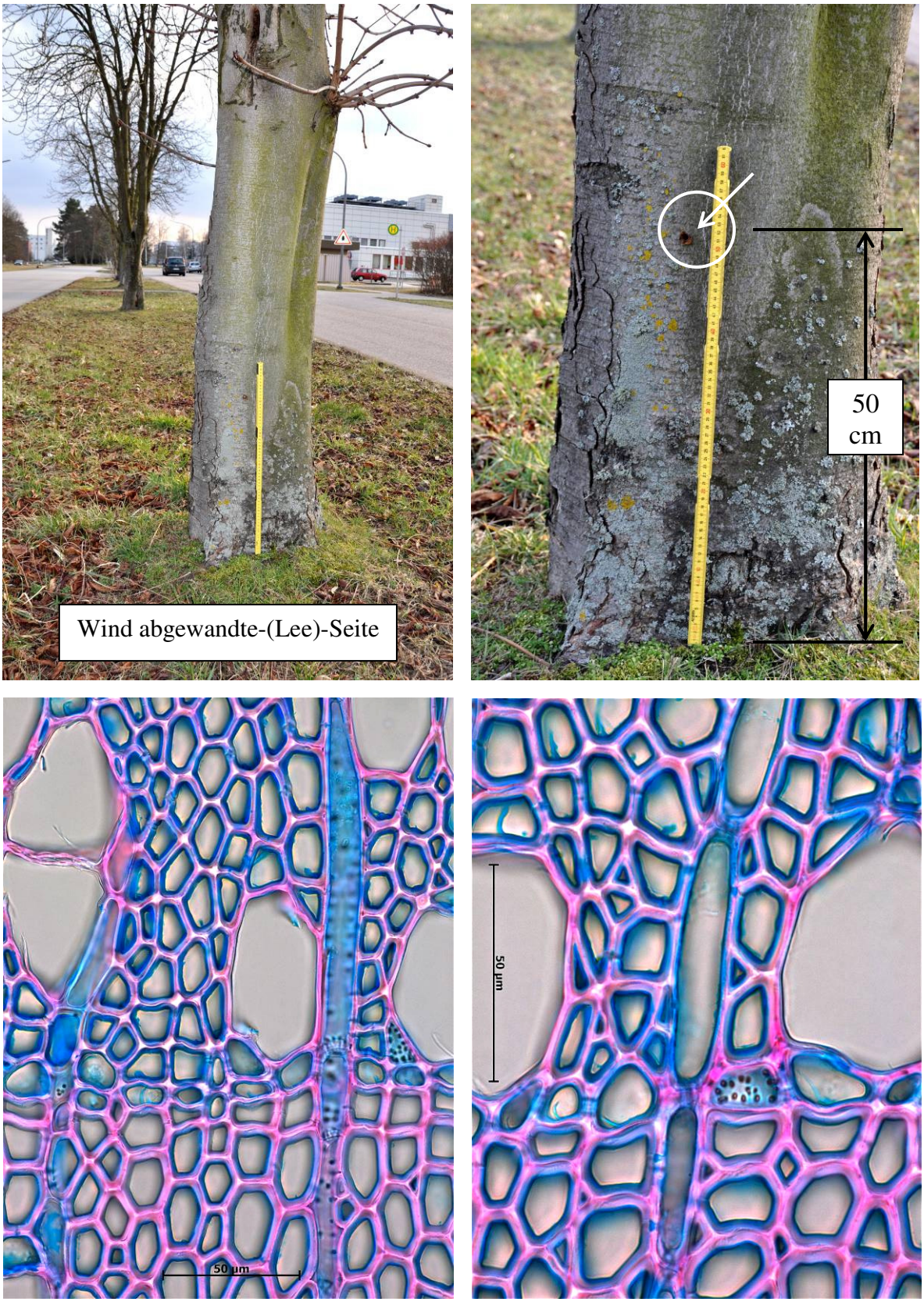


Abb. 24: Referenz (I), geradschaftige, nicht drehwüchsige Rosskastanie (Wind abgewandte Seite, Lee-Seite, Baum Nr. 7). Bilder oben: Ort der Probenentnahme (Zuwachsbohrung). Bilder unten: Holzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung. Im Splintholz der Stammprobe konnte kein Zugholz nachgewiesen werden. Die Zellwände (Sekundärwände der Libriformfasern) besaßen keine „gelatinöse“ G-Schicht.

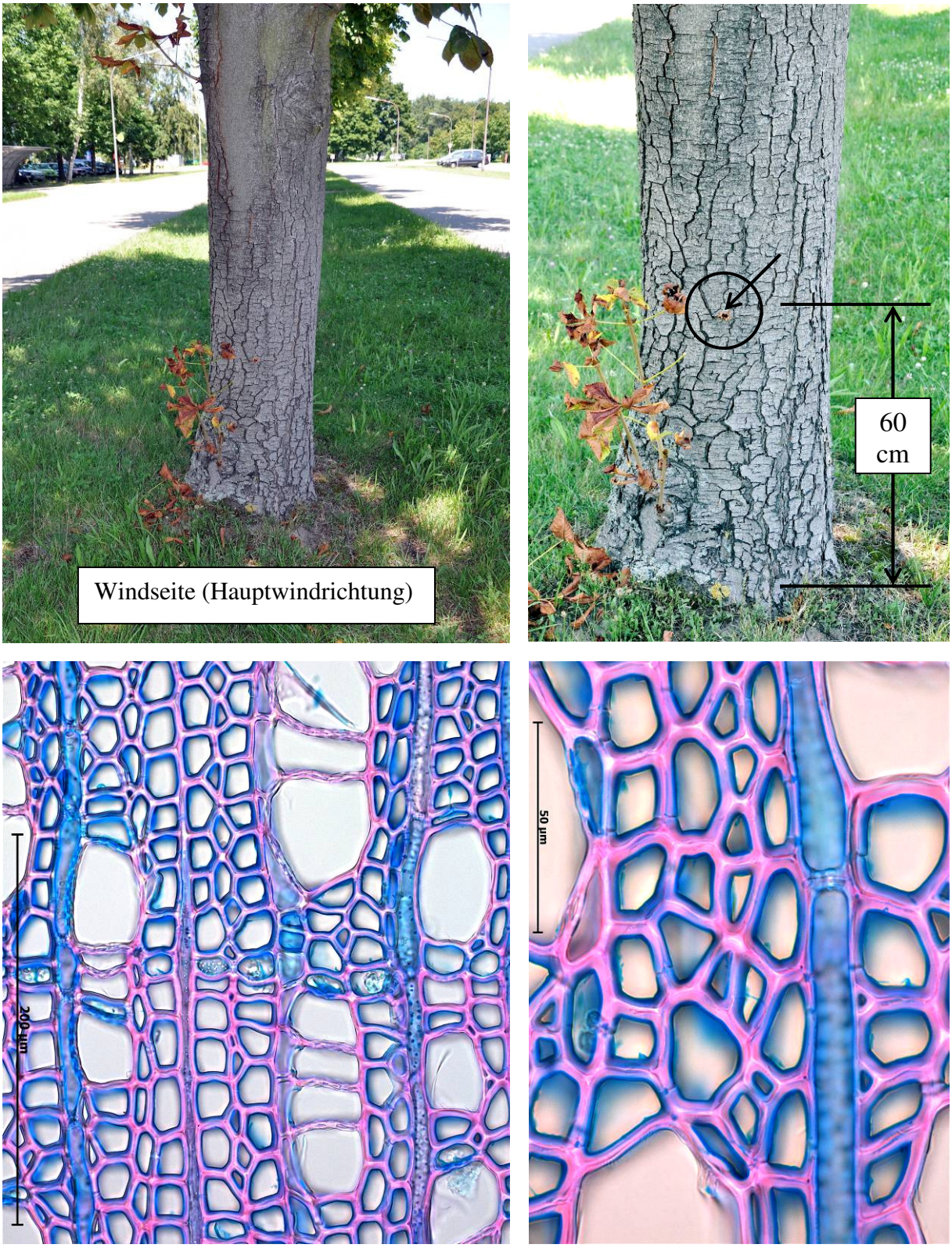


Abb. 25: Referenz (II), geradschaftige, nicht drehwüchsige Rosskastanie (Windseite, Luv-Seite, Baum Nr. 8). Bilder oben: Ort der Probenentnahme (Zuwachsbohrung). Bilder unten: Holzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung. Auch bei diesem Referenzbaum konnte im Splintholz der Stammprobe kein Zugholz nachgewiesen werden. Die Zellwände (Sekundärwände der Libriformfasern) besaßen auch hier keine G-Schicht.

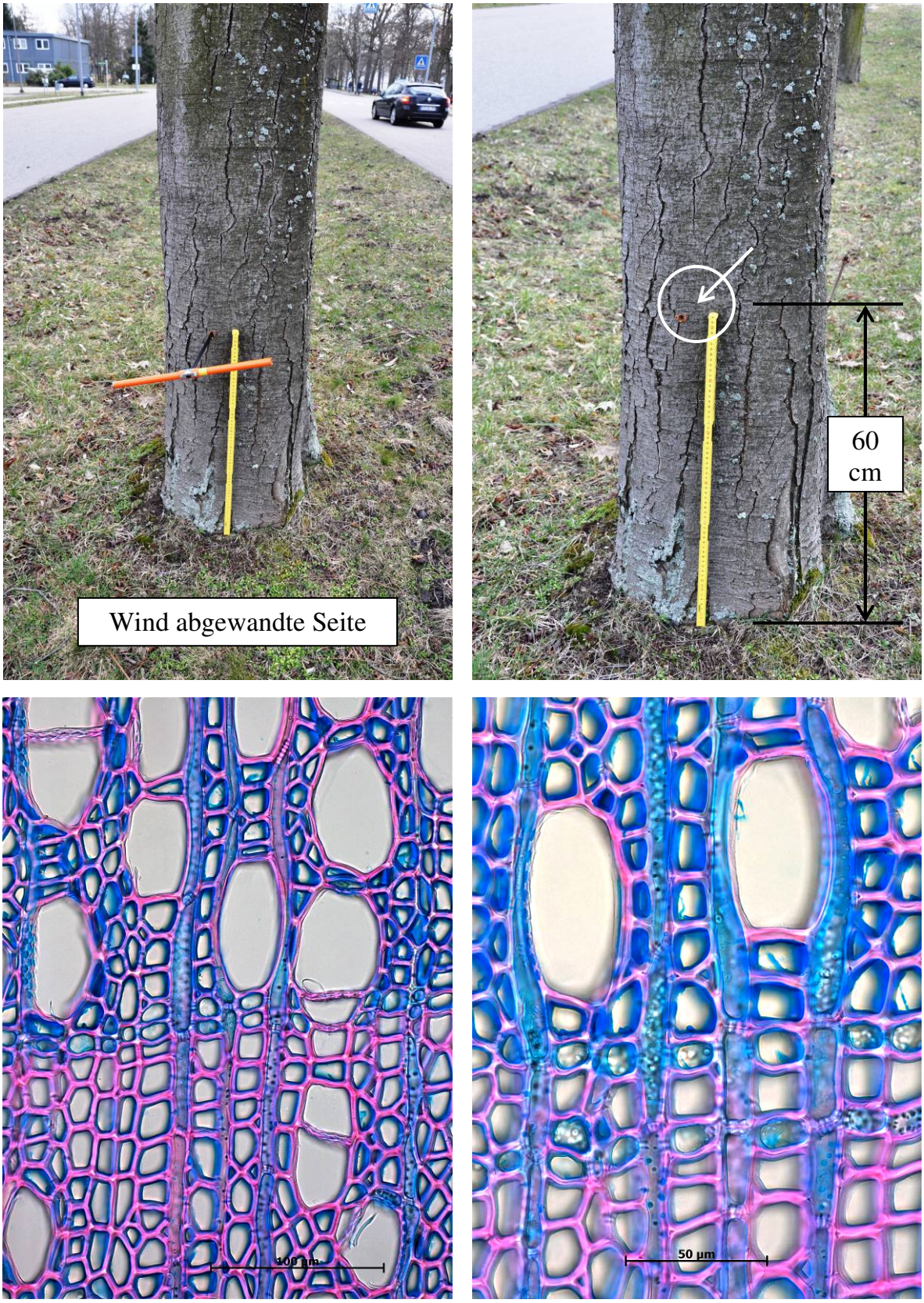


Abb. 26: Referenz (II), geradschaftige, nicht drehwüchsige Rosskastanie (Wind abgewandte Seite, Lee-Seite, Baum Nr. 8). Bilder oben: Ort der Probenentnahme (Zuwachsbohrung). Bilder unten: Holzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung. Im Splintholz der Stammprobe konnte kein Zugholz nachgewiesen werden. Die Zellwände (Sekundärwände der Libriformfasern) besaßen keine G-Schicht.

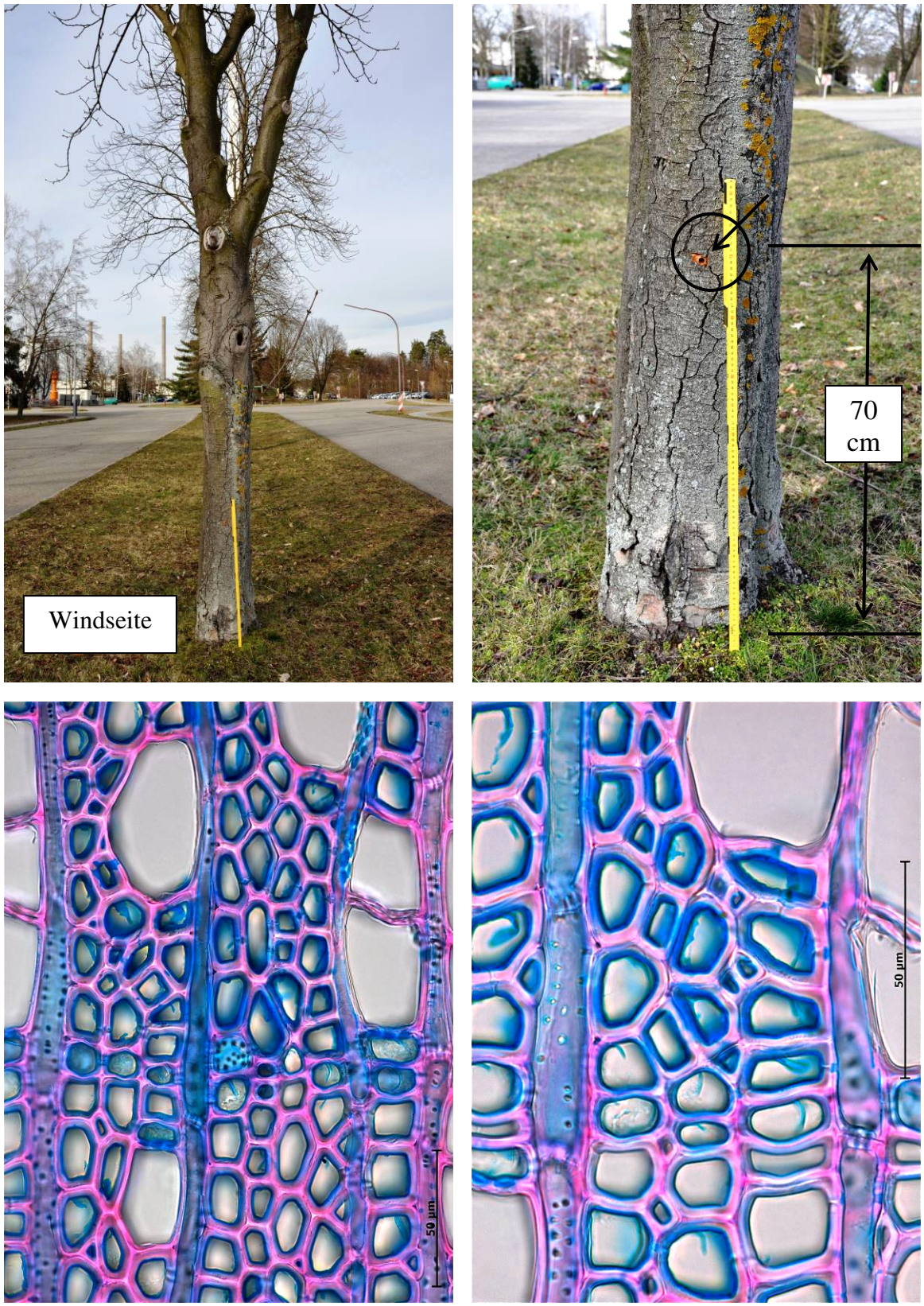


Abb. 27: Referenz (III), geradschaftige, nicht drehwüchsige Rosskastanie (Windseite, Luv-Seite, Baum Nr. 9). Bilder oben: Ort der Probenentnahme (Zuwachsbohrung). Bilder unten: Holzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung. Auch bei diesem Referenzbaum konnte im Splintholz der Stammprobe kein Zugholz nachgewiesen werden. Die Zellwände (Sekundärwände der Libriformfasern) besaßen auch hier keine G-Schicht.

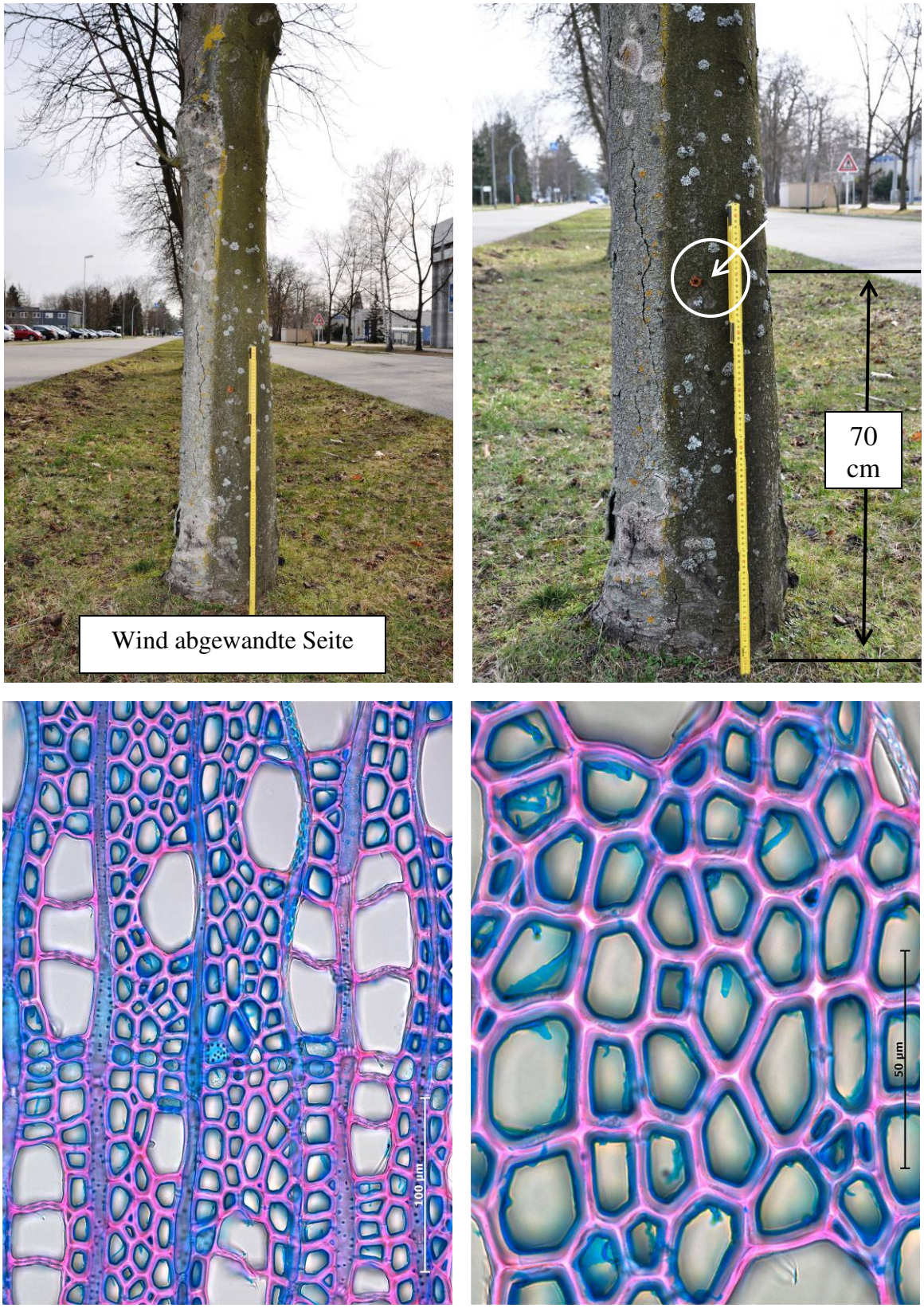


Abb. 28: Referenz (III), geradschaftige, nicht drehwüchsige Rosskastanie (Wind abgewandte Seite, Lee-Seite, Baum Nr. 9). Bilder oben: Ort der Probenentnahme (Zuwachsbohrung) wurde eingekreist. Bilder unten: Holzquerschnitte unterschiedlicher Vergrößerung. Auch bei diesem Referenzbaum konnte im Splintholz der Stammprobe kein Zugholz nachgewiesen werden. Die Zellwände (Sekundärwände der Libriformfasern) besaßen auch hier keine G-Schicht.

Versagen durch Torsion gegen die Drehrichtung und wie die Bäume dem entgegenwirken („Rissbekämpfung“)

Wenn ein drehwüchsiger Baum gegen seinen Drehsinn gedreht wird, z. B. durch seitliche Windverdrehung (bei asymmetrischer Krone), dann kann der Stamm reißen, vgl. Stämmling in Abb. 1 und Stamm in Abb. 22, sowie Abb. 29.

Die Holzfasern, die gegen ihre eigene Drehrichtung tordiert werden, bekommen als Folge dessen Druck in Faserrichtung und Zug quer zur Faserrichtung, siehe Zeichnung Abb. 29, wodurch der Faserverbund (Stammholz) leicht aufreißt.

Der Drehbruch am Baum entspricht demnach einem „Querzugversagen“ (vergleichbar mit dem Unglücksbalkenriss [16]).

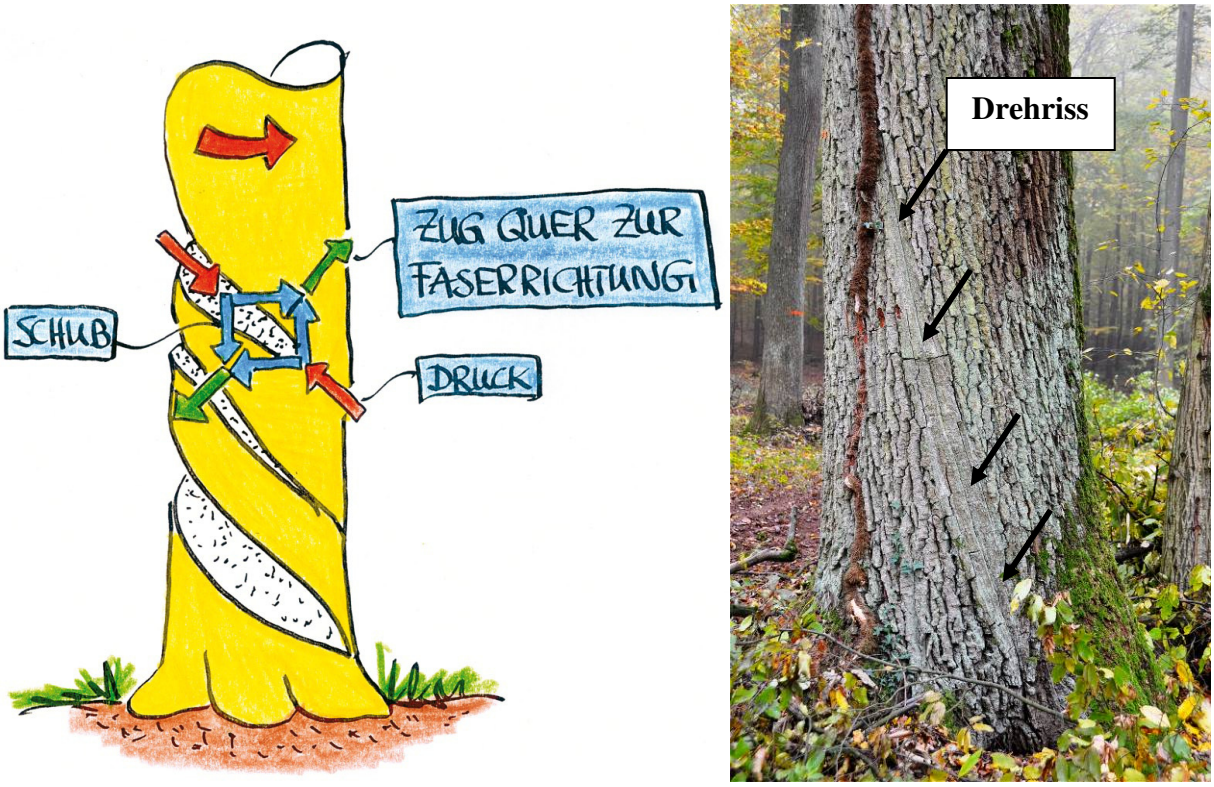


Abb. 29: Drehrisse infolge Torsion gegen den Drehsinn des Stammes. Wenn ein drehwüchsiger Baum gegen die Drehrichtung verdreht wird, dann kann er reißen, vergleichbar mit einem Seil, das man gegen seine Windung verdreht, bzw. „aufdreht“ und dessen Fasern sich als Folge dessen voneinander lösen. Zeichnung aus [16].

Wie unsere Untersuchung an Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum* L.) zeigte, kann der drehwüchsige Baum zur „Rissbekämpfung“, d. h. zur Begegnung einer möglichen Spaltung durch Querzug, so genannte „Zugholzstränge“ in Verlängerung an die Wurzelanläufe ausbilden, welche dann durch Zug (bzw. durch „drehenden“ Zug) eine Querdruckvorspannung aufbauen können.
Die Querdruckvorspannung verfestigt den Stamm. Sie wirkt dem gefährlichen Querzug bei Torsion gegen den Drehsinn entgegen und bekämpft so eine mögliche Rissbildung.

Diese Querdruckvorspannung kann nicht nur den Stamm zusätzlich verfestigen und so einer potentiellen Spaltung entgegenwirken, sie kann des Weiteren auch bereits entstandene Drehrisse wieder „zusammenpressen“, wodurch diese vom Kambium schneller, bzw. besser repariert werden können (vgl. Abb. 29 rechtes Bild).

Das Zugholz im Stamm drehwüchsiger Rosskastanien (bzw. aller Laubbaumarten, die sich diesbezüglich wie die Rosskastanie verhalten) dient neben der „präventiven“ Riss-Bekämpfung auch der „posttraumatischen“ Riss-Reparatur!

Literatur

[1] W. Troll (1959): Allgemeine Botanik, Enke Verlag, Stuttgart.

[2] F. Wilson (1988): The Growing Tree, Univ. of Massachusetts Press, Amherst.

[3] M. Zimmermann, C. Brown (1980): Trees – Structure and Function, Springer-Verlag, Berlin.

[4] W. Steuer (1990): Vom Baum zum Holz. 2. Auflage, DRW-Verlag Stuttgart.

[5] F. Walter (1980): Das Mikrotom, 2. Auflage, neubearbeitet von W. Schmitt, Leitz, Wetzlar.

[6] H. v. Pechmann (1972): Das mikroskopische Bild einiger Holzfehler, Holz als Roh- und Werkstoff, Jg. 30, Heft 2, S. 62-66.

[7] H. v. Aufseß (1973): Mikroskopische Darstellung des Verholzungsgrades durch Färbemethoden, Holz als Roh- und Werkstoff 31, S. 24-33.

[8] H. Freund (1970): Handbuch der Mikroskopie in der Technik, Band V, Teil 2, Umschau Verlag Frankfurt a. M..

[9] D. Gerlach (1977): Botanische Mikrotechnik, 2. Auflage, G.-Thieme Verlag, Stuttgart.

[10] F. H. Schweingruber (1990): Anatomie europäischer Hölzer. Hrsg.: Eidgenöss. Forschungsanst. Für Wald Schnee u. Landschaft, Birmensdorf. Bern, Stuttgart, Haupt-Verlag.

[11] H. Sachsse (1965): Untersuchungen über Eigenschaften und Funktionsweise des Zugholzes der Laubbäume, Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, Band 35, Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M..

[12] H. Sachsse (1962): Elektronenmikroskopische Untersuchungen über die Zellwandstruktur von Zugholzfasern, Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrg. 20, Heft 11, S. 429-433.

[13] H. Sachsse (1964): Der submikroskopische Bau der Faserzellwand beim Zugholz der Pappel, Holz als Roh- und Werkstoff, Jahrg. 22, Heft 5, S. 169-174.

[14] A. H. Westing (1968): Formation and function of Compression wood in gymnosperms. II. The botanical review, Vol. 34, pp. 51-78.

[15] R. Wagenführ (1989): Anatomie des Holzes, 4. Aufl. VEB-Verlag, Leipzig.

[16] C. Mattheck (2007): Aktualisierte Feldanleitung für Baumkontrollen mit Visual Tree Assessment. Verlag Forschungszentrum Karlsruhe.

[17] N. Torelli (1993): Relationship between tree growth characteristics, wood structure and utilization of beech (*Fagus syberatica* L.). Holzforschung und Holzverwertung 6, S. 112-116.

[18] K. Weber, K. Götz, C. Mattheck (1999): Die schiefe Buche: Holzanatomie und Festigkeiten. Tagungsband des 5. VTA-Spezialseminar, Messen und Beurteilen am Baum, 20. – 21. April 1999, Forschungszentrum Karlsruhe.