

Untersuchungsergebnisse zu Ballenverankerungssystemen (Unterflur-Verankerungen) für Jungbäume

Dr. Axel Schneidewind
Zentrum für Gartenbau und Technik Quedlinburg.
Feldmark rechts der Bode 6
06484 Quedlinburg
Tel.: 03946-970430, Fax: 03946-970499
Axel.Schneidewind@lflg.mlu.sachsen-anhalt.de

Einleitung

Die Regeneration des Wurzelsystems ist die entscheidende Voraussetzung für die Eigenstabilisierung frisch gepflanzter Bäume. Eine fachgerechte Baumverankerung trägt wesentlich zur Schaffung guter Wachstums- und Entwicklungsbedingungen am neuen Standort bei. Gemäß DIN 18916 (2002) (Vegetationstechnik im Landschaftsbau) und den FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 1 (2005) gilt grundsätzlich, dass durch die Art der Verankerung keine Verletzungen an Pflanzen oder -teilen entstehen dürfen. In einer fünfjährigen Versuchszeit wurden im Zentrum für Gartenbau und Technik Quedlinburg (ZGT) verschiedenartige Unterflur-Baumverankerungssysteme an unterschiedlichen Baumarten und Pflanzqualitäten geprüft.

1 Versuchsanlage

Auf dem Gelände des ZGT wurde eine ebene Versuchsfläche in ungeschützter, windexponierter Lage mit homogenen Bodenverhältnissen ausgewählt. Die durchgeführten Schachtungen bis 1,20 m Tiefe zeigten einen natürlich gewachsenen Boden mit einem ausgeprägten Lößlehm-Bodenprofil, der ab zirka 80 cm zunehmend skelettreicher wurde.

1.1 Testvarianten der Unterflur-Baumverankerungen

Insgesamt wurden zwölf Varianten von sechs Herstellern beziehungsweise Anbietern in folgender Reihenfolge in die Untersuchungen einbezogen.

Tab. 1: Testvarianten Unterflur-Baumverankerungssysteme

Nr.	Fabrikat / System	Hersteller / Anbieter
1	DUCKBILL 40-RBK	Fa. HINRICH MEYERDIERCKS, Bremen
2	DUCKBILL 68-RBK	Fa. HINRICH MEYERDIERCKS, Bremen
3	GEFA TREELOCK 25	Fa. GEFA Produkte Fabritz GmbH, Krefeld
4	GEFA TREELOCK 50	Fa. GEFA Produkte Fabritz GmbH, Krefeld
5	Pflanzsicherung arbofix af 35	Fa. arboa e.K. tree safety, Stuttgart
6	Pflanzsicherung arbofix af 40	Fa. arboa e.K. tree safety, Stuttgart
7	Pflanzsicherung arbofix af 50	Fa. arboa e.K. tree safety, Stuttgart
8	Pflanzsicherung arbofix af 60	Fa. arboa e.K. tree safety, Stuttgart
9	PLATIPUS RF1	Fa. PLATIPUS Deutschland, Reifferscheid
10	PLATIPUS RF2	Fa. PLATIPUS Deutschland, Reifferscheid
11	Schraubanker	Fa. Baumschulen LAPPEN, Nettetal-Kaldenkirchen
12	Wurzelballenstützung	Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien

Für eine ergänzende Studie des Feldversuches wurden acht frisch gepflanzte Bäume gleicher Arten und Lieferung mit traditionellem Drei-Bock gesichert.

1.2 Testbäume

Als Versuchsbäume dienten Hochstämme von fünf Baumarten in je zwei Sortierungen. Diese Größenunterschiede waren notwendig, um den Vorgaben der Hersteller nachzukommen. Gemäß den unterschiedlichen Sortierungsgrößen der Bäume erfolgte die Zuordnung zu der entsprechenden Ballenverankerung.

Tab. 2: Übersicht Versuchsbäume für die Testvarianten

Nr.	Baumart	Pflanzqualität
1	<i>Acer platanoides</i>	H 3xv mDb STU 16-18
2	<i>Acer platanoides</i>	H 4xv mDb STU 25-30
3	<i>Prunus avium</i>	H 3xv mDb STU 18-20
4	<i>Prunus avium</i>	H 5xv mDb STU 40-45
5	<i>Pyrus pyraster</i>	H 3xv mDb STU 18-20
6	<i>Pyrus pyraster</i>	H 4xv mDb STU 30-35
7	<i>Quercus robur</i>	H 3xv mDb STU 20-25
8	<i>Quercus robur</i>	H 4xv mDb STU 30-35
9	<i>Tilia cordata</i>	H 3xv mDb STU 16-18
10	<i>Tilia cordata</i>	H 4xv mDb STU 25-30

2 Versuchsdurchführung

2.1 Ballenverankerungen mittels Erdankersystemen

Für die Testvarianten 1 bis 4 sowie 9 bis 11 (s. Tab. 1) waren eine Reihe von Arbeitsschritten sehr ähnlich. Den direkten Einbauvorgang führten bei diesen Varianten zwei Fachkräfte aus. Zunächst wurde der Baum am Ballen mit Ballenhaken in die Pflanzgrube gebracht und in der Flucht zu den Nachbarbäumen ausgerichtet. Durch Unterfütterung der Ballen mit Erde bekamen die Bäume ihren senkrechten Stand in richtiger Höhe. Es folgte das Öffnen und Herunterdrücken des Jute-Ballengewebes und der Ballierkörbe, sowie das Einschlagen (bei System 11 das Eindrehen) der werkseitigen Erdanker gemäß Herstellervorgaben. Als Vergleich wurde ein Teil der Jungbäume mit geschlossenem Ballierkorb gepflanzt, so wie es in den Prospekten und Pflanzanleitungen zahlreicher Firmen zu sehen ist.

Bei den Versionen 40-RBK und 68-RBK musste nach dem Einsetzen des Baumes ein Holzlattenrahmen hergestellt werden, der direkt auf die Ballenoberseite kam und als Widerlager für die Spannseile diente. Dazu wurden drei Kanthölzer gleichmäßig auf die erforderliche Länge gesägt, an zwei Ecken vorher und nach Auflegen auf den Ballen an der dritten Ecke als stabiles Dreieck vernagelt.

Bei der Schraubankervariante kamen die Gurtbänder ohne weiteren Materialeinsatz direkt auf den Ballen. Dagegen wurden bei TREELOCK 25 und 50 vor dem Einbau der Gurtbänder je eine mitgelieferte flexible Kokosscheibe auf den Ballen gelegt. Bei den Ausführungen RF1 und RF2 kamen je drei Streifen eines Draht-Kunststoff-geflechtes (PLATI-MAT PM1 oder PM2) zum Einsatz, die ebenfalls als gleichseitiges Dreieck in der Linie der Spannseile mittels kleiner Bügel fixiert wurden. Zuletzt erfolgte das Anziehen mittels werkseitiger Spannvorrichtungen (Seil-, Zahnradspanner, Ratsche), die nach vier Wochen kontrolliert und bei Bedarf nachgespannt wurden.

2.2 Ballenverankerungen mit der Pflanzsicherung arbofix

Die wichtigen Arbeiten bei diesem System müssen vor dem Einsetzen des Baumes in die Pflanzgrube sehr sorgfältig ausgeführt werden, da eine spätere Korrektur des stehenden Baumes kaum noch möglich ist. Zunächst wurde der kreuzartig abgerundete kantige Doppelspieß aus Stahl in den Ring des Ballierkorbes am Ballenfuß bis zur vorher aufgesteckten Stoppscheibe eingeschlagen. Der längere Teil des Metallspießes ragt heraus und dient als künstliche Pfahlwurzel. Leider lagen die Ballierkörbe oft nicht mittig um den Ballen, sodass sich der Ring häufig seitlich versetzt befand. Deshalb musste der Spieß häufig im Drahtgeflecht in gerader Verlängerung zum Stamm fixiert werden. Es folgte die genaue Herstellung der Pflanzlochtiefe entsprechend der gemessenen Ballenhöhe sowie die Markierung des Baumstandortes. Nur zu diesem Zeitpunkt ist eine Ausrichtung in der Flucht zu benachbarten Bäumen möglich. Vor dem Einsetzen eines Baumes in die Pflanzgrube musste systembedingt entsprechend der Länge und Breite des herausragenden Stahlspießes ein schmaler Graben in die Pflanzlochsohle von der markierten Pflanzstelle aus hergestellt werden. Das Einsetzen der Bäume erfolgte mit Hilfe einer dritten Person, die den Baum am Stammkopf so lenkte, dass der schmale Graben in der Pflanzlochsohle exakt getroffen wurde. Eine Bodenberührung des Spießes muss bis zum Senkrechtstand des Baumes vermieden werden, um eine Lockerung im Ballen oder sogar ein Abknicken auszuschließen. Bei größeren Ballen ab Stammumfang (STU) 25-30 und den entsprechend längeren arbofix waren diese Arbeitsschritte manuell kaum noch leistbar. Zur Erleichterung wurden die Pflanzgruben an einer Seite abgeschrägt, um die Bäume vorsichtig rollen zu können. Die nachfolgenden Arbeiten waren dann wieder vergleichbar gegenüber den anderen Prüfgliedern.

2.3 Methode: Wurzelballenstützung

Der Einbauvorgang unterscheidet sich nach dem Aufstellen des Baumes in der Pflanzgrube deutlich von den anderen. Gemäß Vorgaben wurden Drahtkorb und Jute-Ballengewebe nicht nur heruntergedrückt, sondern vollständig entfernt. Dies geschah durch Drehen und Ankippen der Ballen in der Pflanzgrube. Als Erdanker dienten drei unbehandelte Holzpfähle mit 10 cm Zopfstärke, die im Abstand von 15 cm zum Wurzelballen 50 cm tief in die Pflanzgrubensohle eingeschlagen wurden. Danach folgte der Bau eines dreibockähnlichen Gerüsts in Ballenhöhe mit Hilfe von Rundhölzern. Diese Querriegel wurden untereinander so versetzt und verschraubt, dass diese den Ballen festklemmten. Eine Schutzmatte für die Ballenoberseite war nicht vorgesehen. Nach vier Wochen wurden die Holzpfähle nachgeschlagen und über dem Bodenniveau abgesägt.

3 Ergebnisse

3.1 Einbauzeiten der Versuchsvarianten

Die Einbauzeiten wurden pro Verankerungsvariante und Baum gemessen. Den höchsten durchschnittlichen Zeitaufwand von mehr als 15 Minuten pro Baum wurde bei der Wurzelballenstützung festgestellt, mehr als 10 Minuten beim System Schraubanker sowie den beiden DUCKBILL-Varianten. Der unmittelbare Einbau der Pflanzsicherung arbofix beanspruchte weniger Zeit, aber durch die Abschrägung der Pflanzgruben und den Einsatz einer dritten Arbeitskraft beim Einsetzen der Bäume ging die Zeitersparung wieder verloren. Zusammenfassend war festzustellen, dass die direkten Einbauzeiten der Testvarianten 3 bis 10 (s. Tab. 1) vergleichbar waren und zwischen 6 bis 8 Minuten lagen.

3.2 Funktionserfüllungen von Unterflur-Baumverankerungen

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die gegebenen Versuchsbedingungen im ZGT, vor allem auf die herrschenden Boden- und Windverhältnisse. In geschützteren Lagen sowie auf leichten oder skelettreichen Böden beziehungsweise bei Verwendung von Baumsubstraten in Pflanzgruben sind abweichende Resultate möglich (WEIß & CLAUSEN 2010).

Vor allem die permanent wechselnden Windverhältnisse vor Ort stellten für die Verankerungssysteme einen echten Härte-test dar. Durch die ungeschützte baumarme Lage des Versuchsfeldes konnten Starkwindereignisse aus allen Richtungen und zu jeder Jahreszeit ungehindert einwirken. Als Ergebnis muss festgestellt werden, dass es bei diesem Versuchsaufbau keinen Baum gab, der absolut gerade angewachsen war. Die oberirdische Stammneigung aller Jungbäume war sowohl system- als auch baumarten- und -größenabhängig. Die Abweichungen von den Stammvertikalen wurden fortlaufend mit dem digitalen Winkelmesser „Multi-Digit pro“ erfasst. Um diese Arbeiten exakt durchführen zu können, musste vor jeder Messung eine waagerechte Ausgangsbasis mit Hilfe eines Libellen-Richtscheits hergestellt werden.

Die Stammneigung der Versuchsbäume war im ersten Standjahr am stärksten und durch den einsetzenden Sichelwuchs nach drei Vegetationsperioden kaum noch feststellbar (ROLOFF 2004). Die größten Neigungswinkel lagen zwischen 2,1° und 11,7°, wobei die Höchstwerte bei Bäumen mit kleinem STU bis 20 cm auftraten. Bei Bäumen mit STU ab 25 cm gab es zwischen geschlossenen und geöffneten Ballengeflechten keine nachweisbaren Unterschiede. Das spricht für die gute Ballenqualität der Versuchspflanzen. Die geringsten Stammneigungen konnten über alle Systeme hinweg bei *Quercus robur* 4xv STU 30-35 nachgewiesen werden, die stärksten bei *Tilia cordata* und *Acer platanoides* 3xv STU 16-18 sowie bei *Prunus avium* 3xv STU 18-20. Der Vergleich der sechs Systemanbieter zeigte, dass die Wurzelballenstützung und die Pflanzsicherung arbofix, vor allem arbofix af 35 bei kleineren Jungbäumen, deutlich schlechter waren.

In diesem Zusammenhang sind die Ergebnisse der Vergleichsbäume, die mit dem üblichen Dreibock gesichert wurden, sehr interessant. Unabhängig von Baumart und -größe wuchsen alle Bäume während ihrer Verankerungszeit gerade. Alle gemessenen Neigungswinkel lagen unter 1,5°. Nach der zweiten Vegetationsperiode wurden die ersten Bockgerüste abgebaut. Einige Bäume mit geringer Pflanzqualität neigten sich im anschließenden dritten Standjahr um bis 7,4°. Bei Entfernung des Bockgerüsts nach drei Standjahren oder noch später trat dies bei allen verwendeten Baumarten nicht mehr auf.

3.3 Rodung und Aufbereitung der Versuchsbäume

Die Rodung der Testbäume begann nach zwei Jahren, wurde jährlich fortgesetzt und endete nach fünfjähriger Versuchszeit. Nach der großflächigen Freilegung der Wurzelsysteme wurde festgestellt, dass die Lage der Baumballen bei den Prüfgliedern mit Abspannvorrichtungen fast unverändert war, vor allem bei den Gurtsystemen. Die TREELOCK-Varianten waren das einzige System mit zusätzlichem Einbau einer flächig auf den Ballen gelegten Kokosscheibe. Diese Maßnahme schonte das Wurzelwerk besonders gut und verhinderte Ballenpressungen. Ein weiterer interessanter Aspekt zeigte sich bei der Rodung sogar noch nach fünf Jahren. Zu diesem Zeitpunkt waren die Kokosscheiben weitgehend verrottet, aber direkt unter den Gurtbändern immer noch gut erhalten geblieben, sodass sich diese Ballen während der gesamten Verankerungszeit nicht gelockert hatten.

PLATIPUS-Sicherungen konnten ebenfalls mit gut bewertet werden, aber es gab zwei Ausnahmen. An einem Spitz-Ahorn (STU 16-18) entstanden durch RF 1 ein leichter und an einer Winter-Linde (STU 16-18) ein stärkerer visuell erkennbarer Schaden an je einer Wurzeloberseite. In beiden Fällen waren Spanndrähte vermutlich durch Windlast von den PLATI-MAT-Streifen gerutscht und hatten direkten Wurzelkontakt.

Bei DUCKBILL 40-RBK waren oberseits an drei Wurzelanläufen von Wild-Birne (STU 18-20), Vogel-Kirsche (STU 18-20) und Winter-Linde (STU 16-18) durch direkten Druck der Kanthölzer auf das Wurzelwerk deutliche Schäden sichtbar. Bei einem weiteren Baum (Spitz-Ahorn, STU 16-18) hatte sich ein Kantholz besonders tief in eine Wurzeloberseite eingedrückt. Die festgestellten Mängel bei den untersuchten DUCKBILL-Varianten liegen aber nicht nur im Kantendruck der Holz-Dreiecke, sondern auch in der rasch fortschreitenden Verrottung der Hölzer. Bereits nach dem zweiten Standjahr hatten sich infolge von Windlasten die ersten Spanndrähte stark in die Holzplatten eingedrückt. Dadurch entstand im Verankerungssystem Spielraum, der durch wechselnde Windeinwirkungen zu leichten

Neigungen einiger Ballen führte. Deutliche Ballenneigungen wurden bei den Wurzelballenstützungen festgestellt, die auch stärkere Stammneigungen zur Folge hatten und etwas geringere bei arbofix, insbesondere bei af 35 und af 40.

Bei arbofix erfolgte ein zusätzlicher Nachweis. Dazu wurden die noch stehenden Bäume vor der Rodung seitlich so unterhöhlt, dass die aus den Ballen reichenden Stahlspieße sichtbar waren. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Spieße an drei Ballenunterseiten sehr schräg saßen und dass es keinen Baum mit genau in Richtung Stammachse stehende arbofix gab.

Die festgestellten Stammneigungen bei Bäumen mit Gurt- und Seil-Sicherungen (Prüfglieder 3, 4, 9, 10 und 11) entstanden ausschließlich durch partielles Lockern der Bäume im Ballen. Durch spezifische Zugversuche an Unterflur-Verankerungen durch BREHM wurden diese Aussagen untermauert (BREHM 2013).

3.4 Verankerungsteile im Boden und Auswurzelungsverhalten

Um die Versuchsbäume mit ihrem kompletten Wurzelwerk freizulegen und möglichst schonend zu entnehmen, mussten alle Gurte, Seile und Erdanker gekappt werden. Später wurden diese Teile maschinell gezogen und begutachtet. Alle arbofix-Spieße waren stark angerostet und werden sich je nach Bodenverhältnissen langfristig gesehen auflösen. Vor allem die verzinkten Schraubanker, aber auch die Gurt- und Seilelemente, einschließlich der PLATI-MAT-Streifen blieben auch nach fünf Jahren annähernd unversehrt. Es ist davon auszugehen, dass diese Materialien überwiegend nicht oder kaum verrottbar sind und somit dauerhaft im Boden verbleiben, aus Sicht des Umweltschutzes ein nicht unwesentlicher Nachteil.

Bei der Weiterentwicklung der Systeme sollte zukünftig geprüft werden, möglichst alle verzinkten Fabrikatelemente, wie Seile oder Verbindungsteile, durch unverzinkte zu ersetzen, um eine komplette Verrostung nach Erfüllung der Verankerungsfunktion zu ermöglichen.

Gleiches gilt für die Ersetzung der Gurte durch verrottbare Materialien. Aus diesem Grund hat die Fa. GEFA das neue System TREELOCK 35 BIO mit einem biologisch abbaubaren Gurtwerkstoff entwickelt, das seit Herbst des letzten Jahres im Handel erhältlich ist. Im ZGT wird dieses Produkt seit 8 Monaten unter Praxisbedingungen geprüft.

Die Auswurzelung aller Bäume hatte sich zwar artenabhängig unterschiedlich, aber insgesamt sehr intensiv vollzogen, am stärksten bei Spitz-Ahorn, Winter-Linde und Vogel-Kirsche. In Hauptwindrichtung konnten bei diesen Arten Grobwurzeln bis fast 4 m Länge, bei Stiel-Eiche bis zu 2,5 m und bei Wild-Birne bis 2,0 m freigelegt werden. An den anderen Seiten wurden Schwachwurzellängen von durchschnittlich 1,5 m bis 2,5 m gemessen. Es war sehr auffällig, dass die Wurzeln fast ausschließlich in den oberen 50 cm des Bodens gewachsen waren. Die Unterseiten der Ballierkörbe blieben auch nach fünf Jahren noch ohne sichtbare Stark- oder Grobwurzeln.

Für genauere Bilddokumentationen und zur Vorbereitung der holzbiologischen Untersuchungen wurden die Stämme sichtbar eingenordet und das Wurzelwerk intensiv gespült, bis das gesamte Erdreich entfernt war. Bei den nicht geöffneten Ballierkörben kam es durch das intensive Einwachsen aller stärkeren Wurzeln zu auffälligen Schädigungen und Drahteinwachsen. Teilweise waren die Drähte vollkommen eingewachsen beziehungsweise wulstartig überwallt. Die Bäume mit heruntergedrückten Drahtgeflechten blieben dagegen weitgehend unversehrt. Damit hat sich die bereits 1999 in den FLL-Empfehlungen für das Pflanzen von Bäumen (FLL 1999) geforderte Maßnahme des Herunterdrückens der Ballierkörbe in der Pflanzgrube als richtig und notwendig erwiesen.

Durch die Wasserspülungen wurde nachgewiesen, dass die Prüfglieder, mit Ausnahme der arbofix-Varianten, Wurzelwerk und -wachstum visuell nicht beeinträchtigt hatten. Bei arbofix verursachte das unkontrollierte Einschlagen der zwar abgerundeten und sich verjüngenden Stahlspieße in die Ballenunterseiten teilweise erhebliche Schäden. Die Einschlagtiefen in die Ballen bis zur aufgesteckten Stoppscheibe variieren entsprechend der Produktlängen zwischen 13 cm und 21 cm. Trotz dieser gering erscheinenden Eindringtiefen waren nicht nur zufällig getroffene Schwach- und Starkwurzeln beschädigt, sondern auch die Wurzelstöcke

von vier Versuchsbäumen (*Acer*, *Prunus* und *Pyrus* mit STU 16-20 cm) aber auch eine Stiel-Eiche mit STU 24 cm. Nach Entfernung der arbofix-Spieße waren in diesen Fällen kreuzartige, verfärbte Abdrücke an der Basis der Wurzelstöcke sichtbar. Die Fa. arboa e.K. tree safety hat auf diese Untersuchungsergebnisse reagiert und bietet seit 2013 für die Größen ab 35 und ab 40 verkürzte Ausführungen mit veränderten Spitzenausformungen an, die den Kontakt zwischen Wurzeln und dem Stahlspieß vermeiden sollen.

3.5 Holzbiologische Untersuchungen

Die holzbiologischen Untersuchungen erstreckten sich auf die oberen Wurzelanläufe, auf alle visuellen Wurzelschäden und auf die Jahrringverläufe in Baumstämmen. Die direkt unter den Gurtsystemen liegenden untersuchten Grobwurzeln zeigten im Querschnitt gleichmäßige Jahrringe, sehr ähnlich denen dreibockgesicherter Bäume. Infolge der Schädigungen durch Kanthölzer und Spannseile (s. Pkt. 4.3) waren betroffene Grobwurzeln bis zu 50 Prozent ihres Querschnittes und bis zu 6 cm in der horizontalen Ausdehnung dunkel verfärbt.

Die erkennbaren Schäden durch arbofix im Wurzelholz machten intensive Präparierungen erforderlich. Die geschädigten Schwach- und Grobwurzeln aller Bäume wurden entfernt, mehrfach geschnitten und geschliffen. Insgesamt waren an den 24 Bäumen mit dieser Verankerung 13 Schwach- und Grobwurzeln verletzt. Sie wiesen Verfärbungen zwischen 10 Prozent und 70 Prozent ihrer Querschnitte auf. Die vier Bäume mit den kreuzartigen Schäden an den Wurzelstöcken zeigten ebenfalls verschieden starke Verfärbungen im Holzkörper. Während bei *Quercus* eine engräumige Kompartimentierung mit nur 1,2 cm verfärbtem Holz messbar war, lag dieser Bereich bei *Acer* mit keilförmiger Ausdehnung bei 5,7 cm.

Zusammenfassung

Aus diesen Ergebnissen können zusammenfassend eine Reihe von Empfehlungen abgeleitet werden. Für Unterflur-Verankerungssysteme sind nicht nur gut durchwurzelte Ballen notwendig, sondern auch Mindestgrößen der zu pflanzenden Bäume (STU ab 20 cm, Ballendurchmesser ab 60 cm). Wenn diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, sollte an windbelasteten Endstandorten grundsätzlich auf Ballenverankerungen verzichtet werden. An diesen Pflanzorten erbringen fachgerechte Dreibockverankerungen bessere Ergebnisse. Allerdings reicht bei dieser Methode eine zweijährige Verankerungszeit in der Regel nicht aus. Es ist mindestens eine dreijährige Standzeit des Dreibockes auszuschreiben, um diesen Bäumen genügend Zeit zur notwendigen Etablierung am Endstandort zu geben.

Der Versuch erbrachte den Nachweis, dass die Ballierkörbe beim Pflanzvorgang unbedingt geöffnet und heruntergedrückt werden müssen. Die Funktionserfüllung der Systeme wurde dadurch nicht beeinträchtigt. Jedoch konnten mit dieser Maßnahme massive Drahteinwüchse und starke Wurzelverletzungen verhindert werden.

Im Vergleich der Unterflursysteme erwiesen sich breit aufliegende Gurtbänder gegenüber Ballenabspannungen mittels Drahtseilen als sicherer. Bei allen Abspannsystemen sollten zusätzlich flächenhafte verrottungsfähige Ballenauflagen, wie beispielsweise eine Kokosscheibe, eingebaut werden, da diese den Spanndruck besser verteilt und damit das Wurzelwerk schont. Aus diesem Grund haben die TREELOCK-Varianten am besten abgeschnitten. Nur bei diesem System gab es im Versuchszeitraum keine systembedingten Wurzelverletzungen. Dagegen sind ungeschützt auf dem Ballen aufliegende Holzteile nicht zu empfehlen, weil diese zu Schäden an einigen Wurzelanläufen führten. Die Methoden Wurzelballenstützung und die Pflanzsicherung arbofix erbrachten unter den Bedingungen des Quedlinburger Prüffeldes schlechtere Resultate. Letztere ist durch das unkontrollierbare Einschlagen von Stahlspießen in die Ballen nicht grundsätzlich verletzungsfrei und deshalb mit deutlichen Risiken verbunden.