

Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft



Pestal 2.0

Evaluierung eines Modells zur Schätzung des Verankerungswiderstands von Baum- und Stockankern und Test eines Frühwarnsystems für Ankerversagen



Impressum

Projektnehmer*in: Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wald- und Bodenwissenschaften

Adresse: Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien

Projektleiter: Karl Stampfer

E-Mail: karl.stampfer@boku.ac.at

Kooperationspartner*in: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald,

Naturgefahren und Landschaft (BFW) – Fachbereich Forsttechnik

Autoren:

Dipl.-Ing. Ferdinand Hönigsberger Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer Dipl.-Ing. Dr. Martin Kühmaier Dipl.-Ing. Dr. Gernot Erber Dipl.-Ing. Dr. Christoph Gollob Dipl.-Ing. Nikolaus Nemestothy Dipl.-Ing. Dr. Christoph Huber Moritz Reisenbichler, BSc

Finanzierungsstelle(n): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft

Projektnummer: 101588/2

1. Auflage



Gilt für Druckversion: Dieses Feld nicht löschen! Dieses Feld dient als Platzhalter für die Originalversionen on Umweltzeichen, Umweltzeichentext und PEFC-Siegel. Dieser Platzhalter zeigt deren Stand und wird von der Drucker durch die entsprechenden Originalelemente ersetzt. Gilt für Onlineversion: Dieses Feld bitte löschen!



Wien, 2023. Stand: 1. Dezember 2023

Inhalt

| | 0 |
|--|----|
| Grundlage der Baumankerdimensionierung nach Pestal (1961) | 7 |
| Stand des Wissens | 9 |
| Ankerstabilität | 9 |
| Standsicherheit und deren Einflussfaktoren | |
| Bestimmung der Standsicherheit | 14 |
| Abschätzung über oberirdische Baumparameter | 14 |
| Ankermodell nach Huber (2018) | 15 |
| Abschätzung über zerstörungsfreie Testung des Ankers | |
| Material und Methoden | 20 |
| Versuchsaufbau | 21 |
| Datenerhebungskonzept | 23 |
| Datenanalyse | 24 |
| Ergebnisse | 26 |
| Abschätzung der Standsicherheit über Baumparameter | 30 |
| Rodefestigkeit nach Pestal | 32 |
| Abschätzung der Ankerstabilität über das Modell nach Huber | |
| Ermittlung der Standsicherheit mittels zerstörungsfreien Zugversuchs | |
| Standsicherheit und Neigung des Stammes | |
| Vergleich verschiedener Methoden zur Ermittlung der Standsicherheit | |
| Diskussion und Einordnung der Ergebnisse | 35 |
| Tabellenverzeichnis | |
| Abbildungsverzeichnis | |
| Literaturverzeichnis | 40 |
| Abkürzungen | 46 |
| Anhang | 47 |

Einleitung

Die seilgestützte und -unterstützte Holzernte benötigt Anker. Bei der Seilrückung werden diese zum Abspannen des Mastes, zur Verankerung des Tragseils am Ende der Seillinie und zum Abspannen von Stützenbäumen entlang der Seillinie benötigt, während bei der traktionswindenunterstützten Holzernte Anker zur hangoberseitigen Befestigung des Windenseils eingesetzt werden.

Die Verwendung von Baum- und Stockankern ist eine zeit- und kostensparende Alternative zu künstlichen Ankern (Marchi et al. 2018; Holzfeind et al. 2018; Pestal 1961). Innerhalb der Verankerungsfällen bei Seilgeräten ist gleich, dass die Zugbelastung des Ankers eine Vertikalkomponente enthält, der Anker also zum Teil aus dem Boden gezogen wird (Dupire et al. 2016). Im Gegensatz dazu erfolgt der Zug bei traktionswindenunterstützten Maschinen üblicherweise hangparallel. Auf den Anker wirkt also vor allem eine laterale Zugbelastung. Beanspruchungsspitzen auf den Anker entstehen hier während des Ladens sowie bei der unbeladenen Fahrt (Marchi et al. 2018).

Mit Blick auf die Arbeitssicherheit kommt der Stabilität der Anker eine enorme Bedeutung zu. Tsioras et al. (2011) untersuchten für das Zeitfenster 1998 - 2008 Unfälle bei der seilgestützten Holzernte und fanden heraus, dass neben Seilrissen und herunterfallenden Objekten das Versagen von Ankern die größte Unfallgefahr darstellt. Umso wichtiger ist es, belastbare Informationen über die Sicherheit eines Ankers zu haben bzw. ermitteln zu können, was Wissenschaft und Praxis allerdings vor große Probleme stellt. Dies vor allem, weil es generell wenig Information über die Widerstandsfähigkeit von Bäumen als Anker gibt (schwierige Erhebung der Verankerung im Boden, mögliche Beschädigungen sind schwer zu detektieren, komplexes System an Einflussfaktoren und Wechselwirkungen usw.) (vgl. Marchi et al. 2018). Studien, die sich mit der Widerstandskraft von Bäumen beschäftigen, stehen großteils im Zusammenhang mit der Stabilität gegen abiotische Einflüsse, insbesondere Wind (Xu et al. 2021; Nirbito et al. 2019; Marchi et al. 2018; Detter et al. 2013). Dies ist auch ein Grund, warum die im nächsten Kapitel angeführten Literaturwerte von Pestal (1961), neben persönlichen Erfahrungswerten, immer noch der Stand der Praxis bei der Bewertung der Stabilität von Ankern ist. Ziel des Projektes ist im ersten Schritt eine Literaturanalyse. Der Fokus soll dabei auf die bisherigen Erkenntnissen zur Standsicherheit von Baum- und Stockankern, den Stand des Wissens, gelegt werden. Dieser ist Ausgangspunkt für die geplanten Versuche zur Beantwortung der Forschungsfragen.

Forschungsziele und Fragestellungen

Das Projekt hat zwei konkrete Gesichtspunkte, die mithilfe eines Versuchsaufbaus beleuchtet werden sollen:

- Untersuchung des Zusammenhangs von Lageveränderung (im Speziellen die Neigung der Wurzel-Boden-Platte) und des Versagens von Baum- und/oder Stockankern sowie die Prüfung, ob diese als Grundlage für ein Frühwarnsystem zur Verhinderung von Ankerversagen dienen könnte.
 - Sind die Ergebnisse der verallgemeinerten Kippkurve nach Wessolly und Erb (2014) und deren Aussage bezüglich Primärversagenspunkt auch auf die Ankerbäume der forstlichen Seilnutzung übertragbar?
 - Ermöglicht das Wissen über die kritische Neigung den Einsatz von Sensorik (Inclinometer) zur Vorhersage und Warnung beim Ankerversagen?
- Gleichzeitig soll es über die Feldversuche zur Evaluierung und Validierung des in einem Vorprojekt entwickelten statischen Ankermodells nach Huber (2018), hinsichtlich seiner Prognosegenauigkeit im Vergleich zur Beobachtung und der Schätzung nach Pestal, kommen. Zu diesem Zweck sollen Baum- und/oder Stockanker zum Versagen gebracht werden. Es sollen dabei verschiedene Belastungsfälle (Seilgerät, traktionswindenunterstützte Maschine) simuliert werden.

Grundlage der Baumankerdimensionierung nach Pestal (1961)

Pestal (1961) beschreibt die Tragfähigkeit (Rodefestigkeit) von Baumankern. Die darin aufgestellten Formeln bilden bis heute den Stand der Technik.

Nach Pestal (1961) ist die Tragfähigkeit des Baumankers abhängig vom Volumen des durch die Wurzeln festgehaltenen Bodens sowie der Wurzel- und Bodenfestigkeit. Weiters korreliert die Rodefestigkeit negativ mit der Bodengüte, da ein Baum bei guter Bodengüte ein kleineres Bodenvolumen zur "Ernährung" erschließen muss. Wichtig für die Tragfähigkeit des Baumankers ist auch, dass dieser vom Seil so tief wie möglich umschlungen wird.

In der Näherungsformeln zur Rodefestigkeit Smax (to) setzt er diese, über die Formel

$$S_{max} = \frac{D^2}{3}$$

mit dem Brusthöhendurchmesser D (dm ohne Rinde) eines gesunden Baumankers auf festem Untergrund in Verhältnis.

Bei günstigen Verhältnissen, also:

- lebenden Bäumen als Anker
- festen, trockenen Böden
- tief und torsionsfrei angebrachten Seilen
- entgegen der Zugrichtung verlaufenden Hauptwurzeln

kann eine um 50 % höhere Belastung zugelassen werden. Die Formel lautet dementsprechend:

$$S_{max} = \frac{D^2}{2}$$

Die Abschätzung der Verhältnisse erfolgt meistens subjektiv, kann also von Mensch zu Mensch verschieden sein. Pestal beschränkt seine Näherungsformeln auf Seilspannungen bis 18 t, da darüber hinaus zu wenige Daten vorlagen. Weiters führt er aus, dass Verankerungen am Gegenhang stärkere Ankerbäume erfordern. Die Schätzformeln nach Pestal sind äußerst einfach in ihrer Anwendung, können aber nur eine grobe Einschätzung des Ankerwiderstands liefern. Darüber hinaus bildet sie allerdings nicht den Verankerungsfall "traktionswindenunterstützte Maschine" ab.

Stand des Wissens

Die Verwendung von Baum- und Stockankern ist, auch aus Gründen von Zeit- und Kostenersparnis im Vergleich zu künstlichen Ankern (Marchi et al. 2018; Holzfeind et al. 2018; Pestal 1961), in der Forstwirtschaft gängige Praxis. Die folgenden Ausführungen sollen den Stand des Wissens mit Bezug auf die Standsicherheit von Baum und Stockankern darlegen. Dabei werden Einflussfaktoren identifiziert und Möglichkeiten der Erhebung bzw. Abschätzung erörtert.

Ankerstabilität

Die Ankerstabilität muss in die zwei Bereiche Bruch- und Standsicherheit unterteilt werden (Abbildung 1). Einerseits die Stabilität des Ankers bzw. Baumes gegen Stammbruch und andererseits die Standsicherheit (je nach Literaturquelle auch Verankerungswirkung, Tragfähigkeit oder Rodefestigkeit) im Boden (Novak 2014).

Während der Wind über die ganze Stirnfläche des Baumes wirkt, kommt es bei der Verankerung von Seilgeräten oder Bauteilen zu einer punktuellen Belastung am Stamm. Das Seil wird hierbei so tief wie möglich am Stamm befestigt, damit der Kraftarm klein ist. Dies bewirkt auch, dass ein Stammbruch (aufgrund des kurzen Kraftarms) praktisch nicht passieren kann und daher in Bezug auf die Ankersicherheit vernachlässigt werden kann (vgl. Virot et al. 2016; Wessolly und Erb 2014; Kane und Clouston 2008; Peltola et al. 2000). Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher rein auf die Standsicherheit des Ankers im Boden.



Abbildung 1: Einflussfaktoren auf die Ankersicherheit

Standsicherheit und deren Einflussfaktoren

Mathematisch betrachtet ergibt sich die Standsicherheit eines Baumes bzw. eines Stockes aus dem Moment, das sich durch die von außen wirkende Kraft ergibt (z. B. durch Wind oder Zugkräfte bei der seilgestützten oder -unterstützen Holzernte) und dem Rückhaltemoment der Verankerung im Boden (Urata et al. 2012).

Für die Verankerung im Boden sorgt der Wurzelkörper, der im Boden eine Wurzel-Boden-Platte bildet. Die Verankerungskraft im Boden bzw. Standsicherheit hängt dabei von einer Reihe von Faktoren ab (vgl. Tanikawa et al. 2021; Marchi et al. 2019; Wessolly und Erb 2014; Nicoll et al. 2006; Peltola et al. 2000 Coutts 1983):

- Gewicht der Wurzel-Boden -Platte
- Zugfestigkeit der Wurzeln an der Kraft zugewandten Seite
- Biegefestigkeit der Wurzeln an der Kraft abgewandten Seite
- Größe, Ausrichtung und Form der Wurzel

- Ausprägung des Wurzelanlaufs
- Bodenverhältnisse
- Temperatur
- Schäden

Die entscheidende Einflussgröße für die Standsicherheit ist das Gewicht der Wurzel-Boden-Platte, wobei die organische Masse der Wurzel selbst nur einen geringen Anteil (etwa 8 %) ausmacht (Coutts 1983). Der weit größere Anteil ergibt sich durch die festgehaltene Erde (Tanikawa et al. 2021). Auch das Verhältnis der oberirdischen Biomasse zur Masse der Wurzel-Boden-Platte spielt eine bedeutende Rolle für die Baumstatik. Tanikawa et al. (2021) erhoben, dass die Masse der Wurzel-Boden-Platte die Masse der oberirdischen Biomasse nahezu um das 4-fache übertrifft.

Auch die Wurzeln im Nahbereich des Stammes sind von Bedeutung (Wessolly und Erb 2014, 2016; Brudi und van Wassenaer 2002). Je tiefer die Durchwurzelung im Boden ist, umso stabiler ist der Anker (Wessolly und Erb 2014; Peltola et al. 2000).

Das Wurzelsystem eines Baumes passt sich mit fortschreitendem Alter an die herrschenden Umgebungsbedingungen (Windgeschwindigkeit, Geländeneigung Wuchsort etc.) an. So kann es zu einer Anpassung der Wurzeln durch den Einfluss von Wind kommen, um diesem besser standhalten zu können. Die entstehende Wurzelform, die einem I-Träger ähnelt, ist zur besseren Aufnahme der (Wind-)Last optimiert, besonders von Bedeutung sind dabei die Wurzeln auf der windzugewandten Seite (Tanikawa et al. 2021; Marchi et al. 2019; Nicoll et al. 2006). Bezogen auf dein Einsatz von Baum- und Stockankern kann dies, wenn die Belastung zB. durch das Abspannseil mit der Orientierung der Windbelastung übereinstimmt, durchaus zu einer Erhöhung der Ankerstabilität führen (vgl. Marchi et al. 2019). Ähnliche Effekte, in diesem Fall ein verstärktes Wurzelwachstum auf der Hangunterseite des Stammes, sind als Anpassung an die Geländeneigung zu beobachten (Nicoll et al. 2005).

Auch die Form und Ausprägung des Wurzelanlaufs hat einen Einfluss auf die Standsicherheit. Je stärker und kräftiger die Wurzelanläufe sind, desto besser ist der Stamm verankert und desto besser werden die auftretenden Kräfte verteilt (Wessolly und Erb 2014). Die Bodenart sowie die Bodeneigenschaften haben, abhängig von der Baumart, maßgeblichen Einfluss auf die Durchwurzelung. Nicoll et al. (2006) beschreiben die Wechselwirkung zwischen Baumart und Bodeneigenschaften. Vergleiche zwischen verschiedenen Baumarten sind daher schwierig und hängen von Bodeneigenschaften und Durchwurzelungstiefe ab. Generell kann allerdings gesagt werden, dass die Verankerung mit zunehmender (für den Baum erschließbarer) Bodentiefe und Bodendichte zunimmt. Besonders direkt unterhalb des Wurzelkörpers spielen die Bodeneigenschaften entscheidende Rolle (Blackwell et al. 1990). Eine Erhöhung der Bodenfeuchte bewirkt eine Verminderung der Standsicherheit. Bei einer Untersuchung von Rust (2013) ergab sich eine deutliche Verminderung der Standsicherheit (bis zu 16,4 %) nach Bewässerung der Fläche.

Auch die Temperatur hat Einfluss auf die Standsicherheit. Rust (2013) führten dies auf die Abnahme der Scherfestigkeit im Boden (und dadurch eine geringer werdende Standsicherheit) bei höherer Temperatur zurück (Rust 2013). Dieser Zusammenhang konnte in anderen Studien allerdings nicht belegt werden (Detter und Rust 2013). Eine höhere Sicherheit zeigt sich auch bei gefrorenem Boden (Peltola et al. 2000).

Die Wirkung der Baummasse auf die Standsicherheit muss differenziert bewertet werden (Abbildung 2). So wirkt sich die oberirdische Baummasse zu Beginn positiv aus, da die Gewichtskraft normal auf das Wurzelsystem wirkt (Abbildung 2, links). Mit zunehmender Belastung und dadurch auftretender Neigung und der daran anknüpfenden Verlagerung des Schwerpunktes (Abbildung 2, rechts), wirkt sich die Gewichtskraft negativ auf die Standsicherheit aus. Diese Annahme trifft sowohl auf die Gewichtskraft des Stammes als auch auf die Gewichtskraft der Kronen zu (vgl. Tippner et al. 2019; Urata et al. 2012; Nicoll et al. 2006; Brudi und van Wassenaer 2002; Peltola et al. 2000).



Abbildung 2: Einfluss der oberirdischen Baumbiomasse und Neigung auf die Ankerstabilität

In der Betrachtung der Standsicherheit dürfen Schäden an den Wurzeln oder am Stamm nicht außer Acht gelassen werden. So können etwa Wurzelhalsbrüche Spätfolgen eines Pilzeintritts sein (Wessolly und Erb 2014). Bazzigher und Schmid (1969) sprechen in Bezug auf Sturmschäden vom Anteil fäulekranker Bäume als bedeutendsten Faktor für das Umfallen oder Brechen von Bäumen. Deshalb kommen kranke Bäume auch nicht für die Verankerung bei Seilsystemen in Frage.

Phänomene, die vor allem bei der Windbelastung gezeigt werden konnten, sind einerseits die Verminderung der Standsicherheit durch die dynamische und wiederholte Belastung (Parodontoseeffekt) und andererseits das "Aufschaukeln" des Baumes durch die wiederholte Belastung, die zeitlich mit dem Eigenschwingverhalten bzw. der Eigenfrequenz des Baumes übereinstimmt (Tanikawa et al. 2021; Wessolly und Erb 2014). Auch in der seilgestützten und vor allem in der seilunterstützten Holzernte könnten solche Effekte die Belastung des Ankers erhöhen und haben somit Einfluss auf die Tragfähigkeit des Ankers. Dies ist allerdings noch wenig erforscht (vgl. Marchi et al. 2019; Achim und Nicoll 2009).

Das Verhalten der Verankerung auf Belastung kann in zwei Phasen unterteilt werden. Die Verankerung zeigt zuerst ein reversibles, elastisches Verhalten. Steigt die Belastung weiter an, und verlässt den linearen Bereich, beginnt eine bleibende Verformung. Dieser Punkt wird als Primärversagen bezeichnet und bildet den Grenzwert der Sicherheitsanalyse. Wessolly und Erb (2014) verorten diesen Punkt bei etwa 2,5° Neigung der Wurzel-Boden-Platte, Brudi und van Wassenaer (2002) zwischen 0,25 und 2°. Steigt die Belastung weiter an, so kommt es zum Sekundärversagen, also zum endgültigen Versagen des Ankers. Für die forstliche Nutzung ist immer der Punkt des Primärversagens interessant, nur unter diesem Punkt ist dauerhaft sicheres Arbeiten gewährleistet (Marchi et al. 2021; Wessolly und Erb 2014).

Detter et al. (2019) untersuchten die Erholungsfähigkeit des Baumes 8 Jahre nach einem primären Ankerversagen. Die Studie kam zum Schluss, dass sich die Standsicherheit eines Ankers nach einem Primärversagen wieder verbessert, weil das Wuchsverhalten der Wurzeln adaptiv auf die Belastung reagieren kann. Diese Erkenntnis hat interessante Implikationen für die forstliche Nutzung, vor allem wenn Anker für Folgeeinsätze wiederverwendet werden soll. Für Stockanker stellt Pestal (1961) fest, dass die Standsicherheit ab etwa einem Jahr nach der Fällung nachlässt.

Bestimmung der Standsicherheit

Die Ergebnisse der Literaturrecherche, also des aktuellen Stands der Forschung, zeigt, dass eine Vielzahl von Faktoren, und auch Wechselwirkungen zwischen diesen, die Standsicherheit beeinflussen. Gerade für die Forstwirtschaft ist es daher schwierig die Ankersicherheit bei der seilgestützten bzw. -unterstützten Holzernte direkt im Wald (z. B. verschiedene Baumarten, Bodeneigenschaften, Witterung, Waldbehandlungskonzepte) zu bestimmen und so eine höhere Sicherheit über die Eignung bzw. die maximale Beanspruchung des Ankers zu erhalten (vgl. Marchi et al. 2021; Peltola et al. 2000).

Abschätzung über oberirdische Baumparameter

Eine Möglichkeit, die Schwierigkeit der direkten Messbarkeit der Einflussfaktoren zu umgehen und trotzdem Aussagen über die Standsicherheit eines individuellen Ankers treffen zu können, ist die Schätzung über oberirdische Baumparameter, die statistisch mit der Stand-

sicherheit korrelieren. Die Tragfähigkeit nach (Pestal 1961) stellt auf einen solchen Zusammenhang ab. Auch Pyles et al. (1991) stellen die Tragfähigkeit als Funktion des Brusthöhendurchmessers (BHDs) dar. Peltola et al. (2000) bezogen BHD², multipliziert mit der Höhe (), in die Vorhersage der Standsicherheit ein, beschränkten diese Vorhersage allerdings auf nicht gefrorene Bodenverhältnisse. Robbins et al. (2014) fanden in ihrer Studie einen Zusammenhang zwischen dem BHD des Stammes und der Dimension der Wurzelplatte. Der große Vorteil bei der Vorhersage der Standsicherheit über den BHD sahen sie darin, dass dieser (neben der guten Korrelation mit der Standsicherheit) weniger von Bodentyp, Baumart und Klimadaten beeinflusst wird, als andere Baumparameter. Auch andere Studien wiesen einen Zusammenhang zwischen Stammdurchmesser und Widerstandskraft nach (Xu et al. 2021; Yovi et al. 2021; Marchi et al. 2018; Moore 2000; Smith 1995; Fredericksen et al. 1993).

Ankermodell nach Huber (2018)

Ankermodelle dienen als vereinfachte Darstellung des komplexen Zusammenwirkens verschiedener Stabilitätsfaktoren, um so Hilfestellung zu geben und die Stabilität (Stabilitätsänderung) von Baum- und Stockankern bei sich ändern Bedingungen vorherzusagen (Achim und Nicoll 2009; Blackwell et al. 1990).

Im Jahr 2018 modellierte Huber ein Ankermodell (unveröffentlicht), für die Einschätzung der Stabilität von (Fichten-) Baumankern. Das Ankermodell stützt sich dabei auf Submodelle für Schaft, lebende Krone, Totäste, Wurzelverankerung sowie Wurzelballen (Abbildung 3). Die Vorgangsweise ist für alle diese Submodelle gleich. In einem ersten Schritt wird die geometrische Form als mathematische Funktion dargestellt. Danach wird das Volumen ermittelt, um Rückschluss auf die Masse ziehen zu können. In einem dritten Schritt wird der Schwerpunkt bzw. der Kraftangriffspunkt ermittelt. Über diese Vorarbeiten können nun die Kräfte und Momente ermittelt und eine Stabilitätsermittlung durchgeführt werden. Das Modell erlaubt so eine genauere Schätzung der Standsicherheit und eine quantitative Berücksichtigung der bei Pestal (1961) qualitativ eingehenden Kriterien.



Abbildung 3: Konzeptuelle Darstellung des Ankermodells nach Huber (2018)

Speziell bei Ankern im höheren BHD-Bereich ergeben sich deutliche Differenzen zwischen den ermittelten Werten des Ankermodells von Huber (2018) zu jenen nach Pestal (1961), wobei die zulässige Belastung nach Pestal deutlich unter der maximalen Belastung nach dem Ankermodell liegt.

Abschätzung über zerstörungsfreie Testung des Ankers

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Standsicherheit von Bäumen bzw. Stöcken zu testen. Einige dieser Tree Stability Assessment Methods (TSA) sind zerstörungsfrei, andere nicht (Marchi et al. 2019). Zur Ermittlung der individuellen Einzelbaumstabilität, im Sinne eines Frühwarnsystems, können naturgemäß nur zerstörungsfreie Methoden zum Einsatz kommen. Eine Auswahl solcher zerstörungsfreier Methoden zur Abschätzung der Standsicherheit sind (Allison et al. 2020; Marchi et al. 2019):

- Die visuelle Begutachtung als einfachste zerstörungsfreie Testmethode, kann Hinweise (zB. Wunden am Stamm, Kronendeformationen oder Pilzfruchtkörper) auf mangelnde Standsicherheit geben, die Möglichkeiten sind allerdings sehr begrenzt.
- Akustische Methoden, wie die Auswertung von Mikrophonaufnahmen zur Detektion des Primärversagens von Wurzeln, wurden schon von Coutts (1983) eingesetzt.
- **Microdrill resistance** ermittelt über die benötigte Drehkraft eines Bohrers Änderungen in der Holzdichte, die etwa auf Fäulnis hindeuten können.
- **Bodenradare** können zur Schätzung der Wurzelbiomasse und des Auszugswiderstands eingesetzt werden.
- Elektrische Widerstandstomografie (ERT) und Infrarot-Thermografie (IRT) nutzen die unterschiedlichen Durchdringungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Rohdichte bzw. Elastizitätsmodulen, um Schäden in (stehenden) Bäumen feststellen zu können (Novak 2014).

• Zerstörungsfreie Zugversuche

Der zerstörungsfreie Zugversuch gehen auf Sinn und Wessoly (1989) zurück. Hier wird das Verhalten des Stammes unter der Anlage eines geringen Drucks getestet und auf die Grenze der Elastizität extrapoliert (Tippner et al. 2019; Nirbito et al. 2019; Detter und Rust 2013; Detter et al. 2013). Dafür beschrieben Wessolly und Erb (2014) in ihrem Werk zur Baumstatik und Baumkontrolle die verallgemeinerte Kippkurve. Quintessenz dieser Kippkurve ist die Feststellung, dass bei einer Neigung von 0,25° 40% der Kipplast erreicht werden (Tippner et al. 2019; James et al. 2013b; Brudi und van Wassenaer 2002). Der große Vorteil für eine forstliche Anwendung würde in der allgemeinen Gültigkeit der Aussagen liegen. So müsste nur die Neigung der Wurzel-Boden-Platte/ Stammbasis laufend erhoben werden und beim Überschreiten eines noch festzulegenden Schwellenwertes könnte eine Warnung ausgegeben werden. Eine laufende Überwachung der Neigungsveränderung könnte hier durch den Einsatz eines Inclinometer am Wurzelhals erfolgen. Diese direkte Aussage der verallgemeinen Kippkurve wird in der Literatur allerdings oft kritisch hinterfragt, vor allem, weil eine wissenschaftliche Überprüfung fehlt (Sterken 2018; James et al. 2013a).

Auch abseits der verallgemeinerten Kippkurve werden Sensoren zur Neigungsmessung der Wurzel-Boden-Platte immer öfter in der Wissenschaft, vor allem in Zusammenhang mit der

Standsicherheit bei Windbelastung, verwendet (Kolbe und Schindler 2021; Yang et al. 2021; Abbas et al. 2020). In der seilgestützten und -unterstützten Holzernte wird die Neigung der Wurzel-Boden-Platte auch immer öfter herangezogen (Mologni et al. 2021; Marchi et al. 2020, 2019, 2018; Lezier et al. 2019;). Die Standsicherheit und das sich daraus ergebende Moment des Wurzelballens ist eine Funktion der Neigung der Stammbasis, weshalb die Messung dieser Neigung ein guter Indikator für die Standsicherheit ist (Abbas et al. 2020; Detter et al. 2019; Tippner et al. 2019).



Abbildung 4: Überwachung der Lageveränderung der Stammbasis durch Inclinometer

Göcke et al. (2018) konnten etwa in ihrer Studie einen Zusammenhang zwischen Bäumen herstellen, die Anzeichen eines Versagens zeigten (z.B. Risse des Bodens rund um den Stamm) und Bäumen die einen steilen Anstieg der Neigung bei einwirkender Kraft bzw. größere Varianzen bei der Neigung zeigen. Marchi et al. (2019) stellen außerdem fest, dass die Messung der Rotation des Wurzelkörpers für eine Vorhersage besser geeignet und leichter zu erheben ist als eine Messung der horizontalen Positionsveränderung des Stammes/der Stammbasis. Positioniert werden die Neigungssensoren so tief am Baum wie möglich (Abbildung 4) um Messverfälschungen über die Biegung des Stammes zu vermeiden. Je nach Messanordnung kann ein zweiter Sensor höher am Stamm (etwa 2 m) angebracht werden, dieser dient als Kontrollsensor, um zwischen Neigung und "Hintergrundrauschen" unterscheiden zu können (Göcke et al. 2018; Detter et al. 2013; James et al. 2013a; Sinn 2003).

Die Neigungsmessung ermöglicht somit die Messung am konkreten Ankerbaum und kann Unsicherheiten (z. B. mögliche Schäden am Anker), die bei der Abschätzung über oberirdische Baumparameter bzw. Modelle auftreten besser entgegnen.

Material und Methoden

Um die Forschungsziele und Fragestellungen beantworten und eine möglichst breite Palette an Belastungsfällen abdecken zu können, wurde eine 2x2 Versuchsmatrix erstellt (Abbildung 5).



Abbildung 5: Versuchsmatrix

Auf der einen Seite erprobt diese damit eine günstige Verankerungssituation (tiefgründige Verwurzelung, Boden weder vergleyt noch pseudovergleyt) und eine ungünstige Verankerungssituation (seichtgründige Verwurzelung, hoher Skelettanteil).



Abbildung 6: Darstellung der beprobten Seilabgangswinkel

Auf der anderen Seite wurde auch eine Belastung in einem Winkel von 0° und eine Belastung in einem Winkel von 45° zur Stammachse getestet, um die Beanspruchungen beim praktischen Einsatz (traktionswindenunterstützte Maschinen, Seilgerät) nachstellen zu können (Abbildung 6). Insgesamt wurden 35 Fichten als Anker beprobt.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau bedient sich zur Erhöhung der Zugkraft eines doppelten Flaschenzuges (Abbildung 7). Das Seil einer Traktorwinde wird durch eine 16t-Umlenkrolle geführt und in sicherer Entfernung neben dem Traktor an einem Baum/Stock befestigt. Diese 16t-Umlenkrolle geführt und genauso an einem Baum/Stock befestigt wird. Die 24t-Umlenkrolle wird nun mit Hilfe einer Schlinge an einer Seite des Zugkraftabnehmers montiert. Der Stock, der ausgezogen werden soll, wird zunächst mit der Motorsäge etwas eingeschnitten, sodass das Seil beim Ausziehen in einer sicheren Position verbleibt. Weiters wird die dem Zuzug abgewandte Seite begradigt (Abbildung 4), damit daraufhin der Neigungsmesser samt Schutzvorrichtung montiert werden kann.



Abbildung 7: Versuchsaufbau

In weiterer Folge wird der Stock mit einem Stahlseil doppelt umschlungen und mit beiden Enden am anderen Ende des Zugkraftabnehmers montiert. Ziel dieses Aufbaus ist es, mit einer gewöhnlichen 7t-Forstseilwinde die Zugkraft zu vervierfachen. Die Anker werden so mit bis zu 28t aus dem Boden gezogen.

Datenerhebungskonzept

Zur Bewertung der Standsicherheit des Ankers wurde eine breite Palette an Messdaten vor, während und nach Durchführung des Auszugsversuchs erhoben (Tabelle 1).

| Messwert | Beschreibung | Messgerät | Einheit |
|---|--|-------------------------------------|---------|
| Erhoben vor dem Versuch | | | |
| Geländeneigung | im Einflussbereich des Wurzeltellers, ±5m in Falllinie | Suunto Gefällsmesser | Grad |
| Brusthöhendurchmesser des Ankerbaumes | Hangoberseits gemessen | Messkluppe | cm |
| Wurzelrichtungen der Hauptwurzeln | | Suunto Kompass | Grad |
| Bodenfeuchte | 1-4; 1: trocken, 2: feucht, 3: nass, 4: stark durchnässt | | |
| Stockhöhe | Hangoberseits gemessen | Gliedermaßstab | cm |
| Durchmesser am Anschlagspunkt | Kreuzweise gemessen | Messkluppe | cm |
| Befestigungshöhe Anker | Hangoberseits gemessen | Gliedermaßstab | cm |
| Eingangs- und Ausgangsrichtung des Stahlseils | Gemessen an der >200 kN-Umlenkrolle | Suunto Kompass | Grad |
| Eingangs- und Ausgangsneigung des Stahlseils | Gemessen an der >200 kN-Umlenkrolle | Suunto Gefällsmesser | Grad |
| Erhoben während des Versuchs | | | |
| Aufgebrachte Zugkraft | | 20t Zugmesslasche & Dewesoft CPU | kN |
| Neigung des Stockankers | Gemessen in Zugrichtung | mittels Gyro & Dewesoft CPU | Grad |
| Erhoben nach dem Versuch | | | |
| Wurzeltellerradius | Kreuzweise gemessen | Gliedermaßstab | cm |
| Wurzeltellertiefe | Kreuzweise gemessen | Gliedermaßstab | cm |

Tabelle 1: Datenerhebungskonzept

| Messwert | Beschreibung | Messgerät | Einheit |
|--------------------------------|--------------|----------------|---------|
| Knickhöhe des Wurzeltellers | | Gliedermaßstab | cm |

Datenanalyse

Die Datenanalyse wurde mit der Programmiersprache und Programmierumgebung R durchgeführt (R Core Team, 2021).

Die Rodefestigkeit (Standfestigkeit) nach Pestal wurde bereits im Kaptiel "Grundlage der Baumankerdimensionierung nach Pestal (1961)" eingehend betrachtet. Innerhalb unserer Versuchsreihe wurde nur bei den Ankern, die sowohl gute Verankerung als auch trockene Bodenfeuchteverhältnisse aufwiesen, die Formel für günstige Verhältnisse angewandt. Da Pestal für seine Formeln den BHD in Dezimeter ohne Rinde heranzieht, wurde der Durchmesser der Anker um den Rindenanzugswert nach Stängle (2016) korrigiert. Die sich ergebenden Tonnen-Werte wurden mit dem Faktor 9,81 auf Kilonewton (kN) umgerechnet.

Zur Bewertung der Genauigkeit der verschiedenen ermittelten Standfestigkeitswerte im Verhältnis zur im Auszugsversuch ermittelten maximalen Zugfestigkeit wurde der Root Mean Square Error (RSME) herangezogen, der nach der Formel

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\widehat{l_i} - l_i)^2}$$

ermittelt wurde.

Die Abweichung zwischen den vorhergesagten Werten und den tatsächlich beobachteten Zugfestigkeitswerten wurden mit dem Bias bestimmt. Ermittelt wurde dieser mit folgender Formel:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (l_i - l_i)$$

Ergebnisse

Die durch den Versuchsaufbau maximal erreichte Zugkraft lag innerhalb der gesamten Testreihen bei 252,77 kN. Diese Kraft reichte aus um 31 der 35 Anker zum Versagen zu bringen, nur für vier Anker reichte diese Kraft nicht aus. Aufgeschlüsselt nach der Versuchsmatrix, zeigen sich für alle Belastungsfälle eine ähnliche Durchmesserverteilung der Versuchsbäume (Abbildung 8). Die Anker, die mit dem Versuchsaufbau nicht zum Versagen gebracht werden konnten, sind in der Abbildung ebenfalls durch rote Punkte dargestellt und befinden sich im oberen BHD-Bereich bzw. auf Standorten mit günstigen Bodenverhältnissen.



Abbildung 8: BHD- Verteilung der Belastungsfälle

Aus den Daten des Auszugsversuchs konnten die Verläufe der Neigungsveränderung des Ankers über die Zeit sowie die aufgewendeten Zugkräfte dargestellt werden. Abbildung 9 zeigt den beispielhaften Ablauf eines Auszugsversuchs. Die Neigung des Stammes liegt zu Beginn nahe der 90°, was eine vertikale Position beschreibt. Die Zugkraft der Winde wird kontinuierlich erhöht, bis am maximalen Punkt die Ankerfestigkeit überwunden wird. Die in der Grafik dargestellte gelbe, vertikale Linie stellt, die durch die Formel von Pestal berechnete, Rodefestigkeit dar, während die grüne, vertikale Linie die maximal erreichte Zugkraft darstellt. Die grafische Darstellung aller Auszugsversuche befindet sich im Anhang.



Abbildung 9: Auszugsversuch Baum 11

Über alle Auszugsversuche schwankte die maximale Zugkraft zwischen 38,44 und 252,77 kN mit einem Mittelwert von 155,30 kN und einer Standardabweichung (sd) von 57,89 kN. Die Auswertung getrennt nach der angewandten Versuchsmatrix zeigt deutliche Unterschiede nach Verankerungssituation und Seilabgangswinkel (Abbildung 10). Der Mittelwert für die Anker mit günstiger Verankerungssituation (tiefgründig verwurzelt, Boden weder vergleyt noch pseudovergleyt) und horizontalem Seilabgangswinkel lag bei 175,03 kN (sd = 52,75 kN). Verändert sich der Seilabgangswinkel auf 45° erhöht sich die maximale Zugkraft um 5,43% auf 185,08 kN (sd = 34,34 kN).



Abbildung 10: Maximale Zugkraft für die Belastungsfälle

Bei den Versuchen mit ungünstiger Verankerungssituation liegt die maximale Zugkraft bei 117,69 kN (sd = 68,40 kN) bzw. 124,78 kN (sd= 49,50 kN), also deutlich niedriger als bei guter Verankerung. Auch hier zeigt sich allerdings eine höhere maximale Zugkraft, wenn sich der Seilabgangswinkel vergrößert.

Abschätzung der Standsicherheit über Baumparameter

Wie im Stand des Wissens dargelegt, erkennen verschiedene Quellen einen Zusammenhang zwischen oberirdischen Baumparametern, etwa dem BHD des Ankerbaumes und der Standsicherheit. Auch bei den vorliegenden Versuchen konnte ein solcher Zusammenhang gezeigt werden (Abbildung 11). Wird statt dem BHD der Durchmesser an der Anschlaghöhe betrachtet, kann die Modellgenauigkeit für das lineare Modell sogar noch gesteigert werden (adj. R² 0,43).



Abbildung 11: Lineare Regressionsmodelle für die maximale Zugkraft

Zusammen mit den anderen erhobenen Einflussfaktoren wurde eine multiple lineare Regression zur Vorhersage der maximalen Zugkraft angepasst (Abbildung 12). Als beste Prädiktoren erwiesen sich hier der Durchmesser an der Anschlaghöhe des Ankers sowie die erhobene Bodenfeuchteklasse, wobei hier trockene (Bodenfeuchteklasse 1) zu nicht trockenen Bodenverhältnissen (Bodenfeuchteklasse 2,3,4) ausgewertet wurden. Das Modell erreichte ein R² von 0,52, wobei sich signifikante Zusammenhänge zwischen trockenen und nicht trockenen Bodenverhältnissen (p < 0,01) sowie dem Durchmesser an der Anschlagshöhe (p < 0,001) zeigten.





Die Formel des Modells lautet dabei für trockene Bodenverhältnisse:

Zugkraft = -31,59 + 5,50 * Durchmesser am Anschlagpunkt

Sind die Bodenverhältnisse nicht trocken ergibt sich:

Es zeigte sich etwa, dass bei trocken Bodenverhältnissen für jeden Zentimeter an Durchmessergewinn am Anschlagspunkt die maximale Zugkraft um 5,50 kN (± 1,33 kN) zunimmt. Für nicht trockene Bodenverhältnisse müssen 50,59 kN (± 22,36 kN) abgezogen werden.

Rodefestigkeit nach Pestal

Über die Formel nach Pestal ergeben sich Ankerfestigkeitswerte zwischen 8,37 kN und 53,42 kN mit einem Mittelwert von 28,73 kN (sd= 10,43 kN). Im Vergleich zu den gemessenen maximalen Zugfestigkeiten je Anker zeigt sich, ein RMSE von 135,09 kN mit einem Bias von 125,67 kN.



Abbildung 13: Rodefestigkeit nach Pestal im Verhältnis zu der tatsächlichen maximalen Zugfestigkeit

Abbildung 13 stellt die Rodefestigkeit nach Pestal ins Verhältnis zu den tatsächlichen maximalen Zugfestigkeitswerten der einzelnen Versuchsbäumen. Keiner der gemessenen Zugfestigkeitswerte unterschreitet dabei die ermittelten Werte nach Pestal.

Abschätzung der Ankerstabilität über das Modell nach Huber

Auch über das Ankermodell nach Huber wurde die zu erwartende Ankerstabilität ermittelt. Die Werte schwankten hier zwischen 21,95 kN und 638,49 kN mit einem Mittelwert von 108,42 kN (sd = 119,07 kN).

Im Vergleich zu den gemessenen maximalen Zugfestigkeiten ergab sich ein RMSE von 116,70 kN und ein Bias von 39,76 kN.

Ermittlung der Standsicherheit mittels zerstörungsfreien Zugversuchs

Für die Ermittlung nach der Vorgangsweise des zerstörungsfreien Zugversuchs, wurde jene Kraft ermittelt, bei der die Veränderung der Stammneigung erstmalig 0,25° erreicht. Diese Kraft soll 40% der Kipplast ausweisen (James et al. 2013b; Brudi und van Wassenaer 2002; Tippner et al. 2019). Die sich so ergebenden Werte liegen zwischen 80,94 kN und 596,81 kN mit einem Mittelwert von 288,52 kN (sd = 152.64 kN).

Im Vergleich zu den gemessenen maximalen Zugfestigkeiten ergab sich ein RMSE von 175,06 kN und ein Bias von -135,62 kN.

Standsicherheit und Neigung des Stammes

Die Neigungsänderung bis zur maximalen Zugkraft - dieser Punkt wird mit dem Ankerversagen gleichgesetzt - für die im Versuch ausgerissenen Bäumen schwankte zwischen 0,94° und 5,86° mit einem Mittelwert von 2,90°.

Vergleich verschiedener Methoden zur Ermittlung der Standsicherheit

Zusammenführend werden die ermittelnden Ankerstabilitätswerte für die einzelnen Anker dargestellt. Dies sind einerseits die maximale Zugkraft aus dem Auszugsversuch, die Rodefestigkeit nach Pestal, die maximale Zugkraft nach dem Ankermodell von Huber sowie die Standsicherheit nach dem zerstörungsfreien Zugversuch.

| Baum ID | BHD | Max. Zugkraft | Werte Pestal | Modell Huber | zerstörungsfreier |
|------------------|-----|----------------------|--------------|--------------|-----------------------|
| | | | | | Zugversuch |
| 1 | 33 | 147,93 | 29,43 | 136,95 | 130,95 |
| 2 | 35 | <mark>2</mark> 52,77 | 50,23 | 373,76 | 238,73 |
| 3 | 23 | 122,66 | 14,42 | 165,37 | 83,39 |
| 4 | 36 | 168,11 | 35,61 | 183,37 | 68,14 |
| 6 | 33 | 166,54 | 29,43 | 638,49 | 155,58 |
| 7 | 31 | 188,52 | 38,46 | 101,44 | 126,30 |
| 8 | 27 | 182,75 | 28,25 | 85,81 | 86,45 |
| 9 | 26 | 188,44 | 28,25 | 68,08 | 114,84 |
| 11 | 30 | 233,92 | 35,76 | 107,76 | 213,07 |
| 12 | 18 | 38,44 | 8,37 | 48,93 | 34,38 |
| 14 | 30 | 128,21 | 23,84 | 49,46 | 121,43 |
| 15 | 29 | 132,81 | 22,11 | 21,95 | 122,07 |
| 17 | 34 | 115,02 | 31,42 | 36,1 | 104 <mark>,9</mark> 9 |
| 18 | 30 | 118,87 | 23,84 | 59,3 | 109,56 |
| 19 | 21 | 77,80 | 11,80 | 35,02 | 60,60 |
| 20 | 26 | 100,35 | 18,84 | 25,78 | 91,33 |
| 21 | 22 | 67,48 | 13,08 | 40,09 | 49,46 |
| 23 | 39 | 201,39 | 42,36 | 80,87 | 172,23 |
| 25 | 26 | 42,63 | 18,84 | 52,72 | 32 <mark>,3</mark> 7 |
| 26 | 36 | 159,28 | 35,61 | 78,15 | 145,70 |
| 27 | 31 | 108,95 | 25,64 | 27,42 | 93,81 |
| 28 | 29 | 68,59 | 22,11 | 27,89 | 34,08 |
| 30 | 33 | 251,28 | 29,43 | 97,74 | 209,46 |
| 3 <mark>1</mark> | 34 | 223,75 | 31,42 | 80,11 | 178,15 |
| 32 | 26 | 88,10 | 18,84 | 78,9 | 67,05 |
| 33 | 30 | 161,69 | 23,84 | 140,89 | 56,02 |
| 34 | 31 | 226,34 | 25,64 | 144,23 | 223,46 |
| 35 | 30 | 127,21 | 23,84 | | 111,54 |

Tabelle 2: Ermittelte Stabilitätswerte je Anker

Diskussion und Einordnung der Ergebnisse

Die Auszugsversuche zeigen die höchsten maximalen Zugkraftwerte für jene Belastungsfälle, in denen eine gute Verankerungssituation gegeben ist und der Seilabgangswinkel 45° beträgt. Bei horizontaler Belastung verringert sich die maximale Zugkraft um 5,74%. Bei den Versuchen mit ungünstiger Verankerungssituation liegt die maximale Zugkraft um 32,76% bzw. 32,58% niedriger als bei guter Verankerung. Auch hier zeigt sich allerdings eine höhere maximale Zugkraft, genauer gesagt eine Erhöhung um 5,68%, wenn sich der Seilabgangswinkel vergrößert. Unsere Versuche zeigen also, dass eine schlechte Verankerungssituation die maximale Zugkraft um knapp ein Drittel absenkt.

Die erstellten Modelle zeigen einen Zusammenhang zwischen dem BHD bzw. dem Durchmesser am Ankerpunkt und der Standsicherheit, was im Einklang mit der Literatur zu diesem Thema steht (vgl. Xu et al. 2021; Yovi et al. 2021; L. Marchi et al. 2018; Moore 2000; Fredericksen et al. 1993; Smith 1995). In unseren Versuchen zeigt sich aber auch, dass die Standsicherheit von vielen verschiedenen Faktoren abhängen kann (vgl. Robbins et al. 2014; Vojáčková et al. 2021; Bazzigher und Schmid 1969). Für unsere Versuchsreihe stellte sich etwa die Bodenfeuchteklasse als guter Prädiktor heraus.

Die Standsicherheit wurde mithilfe der Formeln nach Pestal, über das Modell nach Huber und den zerstörungsfreien Zugversuch ermittelt. Die Formeln nach Pestal stellen dabei immer noch den Stand der Praxis dar. In unserem Versuch zeigte sich, dass die Werte nach Pestal die Standsicherheit deutlich unterschätzen. Im Schnitt erreichten die so ermittelten Werte nur 19,73% (sd=6,33%) der tatsächlichen, maximalen Zugkraft. Mit einem so in der Formel inne liegenden Sicherheitsfaktor von durchschnittlich 5, ist die Verwendung der Werte nach Pestal aus Sicht des Ankerversagens und der Arbeitssicherheit unproblematisch, setzt aber teilweise Anker voraus die, vor allem in der Vornutzung und bei Kalamitätsereignissen, oft gar nicht vorhanden sind.

Die Angaben zum zerstörungsfreien Zugversuch bzw. zur verallgemeinerten Kippkurve konnten in unseren Versuchen nicht nachvollzogen werden. Die sich hier ergebenden Werte übersteigen die maximale Zugkraft deutlich und sind daher für die forstliche Praxis nicht geeignet.

Bessere Ergebnisse wurden mit dem Modell nach Huber erzielt, dass innerhalb dieses Projekts evaluiert und validiert wurde. Auch hier war eine große Streuung um die tatsächlichen Werte zu beobachten. Es ist davon auszugehen, dass das Model, das die Standsicherheit über Schwerpunkte, Gewichtskräfte und den sich daraus ergebenden Momenten berechnet, Faktoren nicht miteinbezieht, die die Ankerstabilität maßgeblich beeinflussen.

| Methode zur Ermittlung der Standsicherheit | RSME (kN) | Bias (kN) | |
|---|-----------|-----------|--|
| Pestal | 135,09 | 125,67 | |
| Zerstörungsfreier Zugversuch | 175,06 | -135,62 | |
| Ankermodell nach Huber | 116,70 | 39,76 | |

Tabelle 3: RMSE und Bias für verschiedene Standsicherheitswerte

Ansatzpunkt für die Entwicklung eines smarten Frühwarnsystems für das Ankerversagen wäre jedenfalls die Überwachung der Neigungsveränderung der Stammbasis. Der geringste Neigungsveränderungswert bis zum Ankerversagen innerhalb unserer Testreihen war 0,94°.
Folgende Grafik zeigt, welchen Anteil der maximale Zugkraftwert einzelner Stammneigungsveränderungen in unserer Versuchsreihe repräsentiert (Abbildung 14).



Abbildung 14: Relative Zugkraft bei verschiedenen Neigungsveränderungen des Ankers

So hätte ein Sensorsystem, das bei einer Neigung der Stammbasis von 0,5° auslöst, dies beim Erreichen von durchschnittlich 81,54% der maximalen Zugkraft getan. Im Vergleich dazu liegen die Werte nach Pestal nur bei durchschnittlich 19,73% der maximalen Zugkraft.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass der zerstörungsfreie Zugversuch bzw. die verallgemeinerte Kippkurve nach Wessolly und Erb (2014) nicht und das Ankermodell nach Huber nur beschränkt für die Vorhersage der Standfestigkeit von Ankern geeignet sind. Die Formeln nach Pestal unterschätzen, mit einem mittleren Sicherheitsfaktor von 5, die Standsicherheit deutlich. Ein mögliches Frühwarnsystem für das Ankerversagen sollte sich daher auf die Neigungsveränderung der Stammbasis stützen und könnte hier in Echtzeit vor einem bevorstehendem Ankerversagen warnen.

Tabellenverzeichnis

| Ta <mark>be</mark> lle 1: Datenerhebungskonzept | . 23 |
|---|------|
| Tabelle 2: Ermittelte Stabilitätswerte je Anker | . 34 |
| Tabelle 3: RMSE und Bias für verschiedene Standsicherheitswerte | . 36 |

Abbildungsverzeichnis

| Abbildung 1: Einflussfaktoren auf die Ankersicherheit10 |
|---|
| Abbildung 2: Einfluss der oberirdischen Baumbiomasse und Neigung auf die |
| Ankerstabilität |
| Abbildung 3: Konzeptuelle Darstellung des Ankermodells nach Huber (2018)16 |
| Abbildung 4: Überwachung der Lageveränderung der Stammbasis durch Inclinometer 18 |
| Abbildung 5: Versuchsmatrix |
| Abbildung 6: Darstellung der beprobten Seilabgangswinkel |
| Abbildung 7: Versuchsaufbau22 |
| Abbildung 8: BHD- Verteilung der Belastungsfälle 26 |
| Abbildung 9: Auszugsversuch Baum 11 28 |
| Abbildung 10: Maximale Zugkraft für die Belastungsfälle 29 |
| Abbildung 11: Lineare Regressionsmodelle für die maximale Zugkraft |
| Abbildung 12: Multifaktorielles Modell zur Abschätzung der maximalen Ankerstabilität 31 |
| Abbildung 13: Rodefestigkeit nach Pestal im Verhältnis zu der tatsächlichen maximalen |
| Zugfestigkeit |
| Abbildung 14: Relative Zugkraft bei verschiedenen Neigungsveränderungen des Ankers. 37 |

Literaturverzeichnis

Abbas, S., C. Kwok, K. Hui, H. Li, D. Chin, S. Ju, J. Heo, M. Wong. 2020. "Tree Tilt Monitoring in Rural and Urban Landscapes of Hong Kong Using Smart Sensing Technology." Trees, Forests and People 2 (December): 100030–40. <u>https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100030</u>.

Achim, A., und B. C. Nicoll. 2009. "Modelling the Anchorage of Shallow-Rooted Trees." Forestry 82 (3): 273–84. <u>https://doi.org/10.1093/forestry/cpp004</u>.

Allison, R., Wang, X., Senalik, C. 2020. "Methods for Nondestructive Testing of Urban Trees." Forests 11 (12): 1341. <u>https://doi.org/10.3390/f11121341</u>.

Bazzigher, G., und P. Schmid. 1969. "Sturmschaden und Fäule." Schweizerischen Zeitschrift Für Forstwesen Nr. 10. <u>https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A24797/datastream/PDF/Bazzighe</u> <u>r-1969-Sturmschaden_und_F%C3%A4ule-%28published_version%29.pdf</u>.

Blackwell, P. G., K. Rennolls, M. P. Coutts. 1990. "A Root Anchorage Model for Shallowly Rooted Sitka Spruce." Forestry 63 (1): 73–91. <u>https://doi.org/10.1093/forestry/63.1.73</u>.

Brudi, E., und P. van Wassenaer. 2002. "Trees und Statics: Nondestructive Failure Analysis." In: Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings: "How Trees Stand Up and Fall Down." International Society of Arboriculture, Champaign, IL.

Coutts, M. P. 1983. "Root Architecture and Tree Stability." In: Atkinson, K., S. Bhat, M. P. Coutts, P. A. Mason, and D. J. Read (Hrsg.), "Tree Root Systems and Their Mycorrhizas." Developments in Plant and Soil Sciences, 171–88. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-6833-2_18.

Detter, A., und S. Rust. 2013. "Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen." Jahrbuch der Baumpflege, 87–100.

Detter, A., S. Rust, C. Rust, G. Maybaum. 2013. "Determining Strength Limits for Standing Tree Stems from Bending Tests." In: Proceedings of the 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Madison, WI, USA, 24–27. Detter, A., P. van Wassenaer, S. Rust. 2019. "Stability Recovery in London Plane Trees Eight Years After Primary Anchorage Failure." Arboriculture & Urban Forestry 45 (6): 279– 88. <u>https://doi.org/10.48044/jauf.2019.024</u>.

Dupire, S., F. Bourrier, F. Berger. 2016. "Predicting Load Path and Tensile Forces During Cable Yarding Operations on Steep Terrain." Journal of Forest Research 21 (1): 1–14. <u>https://doi.org/10.1007/s10310-015-0503-4</u>.

Fredericksen, T. S., R. L. Hedden, S. A. Williams. 1993. "Testing Loblolly Pine Wind Firmness with Simulated Wind Stress." Canadian Journal of Forest Research 23 (9): 1760– 65. <u>https://doi.org/10.1139/x93-222</u>.

Göcke, L., S. Rust, and F. Ruhl. 2018. "Assessing the Anchorage and Critical Wind Speed of Urban Trees Using Root-Plate Inclination in High Winds." Arboriculture & Urban Forestry 44 (1): 1–11.

Holzfeind, T., K. Stampfer, F. Holzleitner. 2018. "Productivity, Setup Time and Costs of a Winch-Assisted Forwarder." Journal of Forest Research 23 (4): 196–203. <u>https://doi.org/10.1080/13416979.2018.1483131</u>.

Huang, X., B. Wang, C. Wu. 2022. "Realizing Smart Safety Management in the Era of Safety 4.0: A New Method Towards Sustainable Safety." Sustainability 14 (21): 13915. <u>https://doi.org/10.3390/su142113915</u>.

James, K., C. Hallam, C. Spencer. 2013a. "Measuring Tilt of Tree Structural Root Zones Under Static and Wind Loading." Agricultural and Forest Meteorology 168 (January): 160– 67. <u>https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.009</u>.

James, K., C. Hallam, C. Spencer. 2013b. "Tree Stability in Winds: Measurements of Root Plate Tilt." Biosystems Engineering 115 (3): 324–31. <u>https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.02.010</u>.

Kane, B., und P. Clouston. 2008. "Tree Pulling Tests of Large Shade Trees in the Genus Acer." Arboriculture & Urban Forestry 34 (2): 101-109.

Kolbe, S., und D. Schindler. 2021. "TreeMMoSys: A Low Cost Sensor Network to Measure Wind-Induced Tree Response." HardwareX 9 (April): e00180. <u>https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00180</u>.

Lezier, A., A. Cadei, O. Mologni, L. Marchi, S. Grigolato. 2019. "Development of Device Based on Open-Source Electronics Platform for Monitoring of Cable-Logging Operations." In: Engineering for Rural Development, 72–77. https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N079.

Marchi, L., S. Grigolato, O. Mologni, R. Scotta, R. Cavalli, L. Montecchio. 2018. "State of the Art on the Use of Trees as Supports and Anchors in Forest Operations." Forests 9 (8): 467–83. <u>https://doi.org/10.3390/f9080467</u>.

Marchi, L., O. Mologni, S. Grigolato, R. Cavalli. 2020. "Evaluation on the Stability of Tree Used as Anchors in Cable Yarding Operations: A Preliminary Test Based on Low-Cost MEMS Sensors." In: Coppola, A., G. Di Renzo, G. Altieri, P. D'Antonio (Hrsg.). 2020. "Innovative Biosystems Engineering for Sustainable Agriculture, Forestry and Food Production." 473–79. Springer International Publishing. <u>https://doi.org/10.1007/978-3-030-39299-4_53</u>.

Marchi, L., O. Mologni, D. Trutalli, R. Scotta, R. Cavalli, L. Montecchio, S. Grigolato. 2019. "Safety Assessment of Trees Used as Anchors in Cable-Supported Tree Harvesting Based on Experimental Observations." Biosystems Engineering 186 (October): 71–82. <u>https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.022</u>.

Marchi, L., D. Trutalli, O. Mologni, R. Gallo, D. Roeser, R. Cavalli, S. Grigolato. 2021. "Mechanical Response of Natural Anchors in Cable Logging." International Journal of Forest Engineering 32 (1): 29–42. <u>https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1826882</u>.

Mologni, O., E. Nance, C. Lyons, L. Marchi, S. Grigolato, R. Cavalli, D. Roeser. 2021. "Cable Tensile Forces Associated to Winch Design in Tethered Harvesting Operations: A Case Study from the Pacific North West." Forests 12 (7): 827–41. <u>https://doi.org/10.3390/f12070827</u>.

Moore, J. 2000. "Effects of Soil Type on the Root Anchorage Strength of Pinus Radiata." Forest Ecology and Management 135: 63–71. Nicoll, B., B. Gardiner, B. Rayner, A. Peace. 2006. "Anchorage of Coniferous Trees in Relation to Species, Soil Type, and Rooting Depth." Canadian Journal of Forest Research 36 (7): 1871–83. <u>https://doi.org/10.1139/x06-072</u>.

Nicoll, B. C., Achim, A., Mochan, S., Gardiner, B. A. (2005). "Does steep terrain influence tree stability? A field investigation." Canadian Journal of Forest Research, 35(10), 2360-2367.

Nirbito, W., A. Ardianto, M. Ramadhan, R. Dhelika. 2019. "Validation of Strength and Flexibility of Sengon (Paraserianthes Falcataria) by Experimental Tree-Pulling Test and Numerical Simulation." Journal of Applied Engineering Science 17 (4): 443–48. <u>https://doi.org/10.5937/jaes17-22021</u>.

Novak, R. 2014. "Überprüfung des Stammversagens hohler Baumstämme anhand von Versuchen und Messungen im Bereich der Stammbiegung und Faserstauchung." Masterarbeit. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien, 112.

Peltola, H., S. Kellomäki, A. Hassinen, M. Granander. 2000. "Mechanical Stability of Scots Pine, Norway Spruce and Birch: An Analysis of Tree-Pulling Experiments in Finland." Forest Ecology and Management 135 (1-3): 143–53. <u>https://doi.org/10.1016/S0378-</u> <u>1127(00)00306-6</u>.

Pestal, E. 1961. Seilbahnen und Seilkrane für Holz- und Materialtransport. Wien: Fromme.

Pyles, M. R., J. W. Anderson, S. G. Stafford. 1991. "Capacity of Second-Growth Douglas-fir and Western Hemlock Stump Anchors for Cable Logging." Journal of Forest Engineering 3 (1): 29–37. https://doi.org/10.1080/08435243.1991.10702631.

Robbins, B. A., J. L. Wibowo, K. S. Holden, M. K. Corcoran. 2014. "Development of Envelope Curves for Predicting Void Dimensions from Overturned Trees:" Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center. <u>https://doi.org/10.21236/ADA606867</u>.

R Core Team, 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Rust, S. 2013. "Einfluss der Witterung auf die Ergebnisse statischer Zugversuche." In: Jahrbuch der Baumpflege 2013: 6. Sinn, G. 2003. "Baumstatik: Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft; biologische Aspekte und eine Einführung in die Baumstatik unter besonderer Berücksichtigung der Neigungs- und Dehnungsmessverfahren. " Braunschweig: Thalacker Medien.

Sinn, G. und L. Wessolly. 1989. "Baumstatik - zwei neue zerstörungsfreie Messverfahren. Teil 1: Ermittlung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen durch Messung. " Das Gartenamt 38 (7): 422–428.

Smith, J. 1995. "The Anchorage Capacity of Pinus Radiata Guyline Stump Anchors Used in Cable Logging Operations." Master thesis. Faculty of Environment, Society and Design, Lincoln University.

Sterken, P. 2018. "Zweifelhafte Grundlagen der Zugversuche." Wald und Holz, 5 (18): 20–24.

Tanikawa, T., H. Ikeno, C. Todo, K. Yamase, M. Ohashi, T. Okamoto, T. Mizoguchi. 2021. "A Quantitative Evaluation of Soil Mass Held by Tree Roots." Trees 35 (2): 527–41. https://doi.org/10.1007/s00468-020-02054-y.

Tippner, J., L. Praus, M. Brabec, V. Sebera, B. Vojáčková, J. Milch. 2019. "Using 3d Digital Image Correlation in an Identification of Defects of Trees Subjected to Bending." Urban Forestry & Urban Greening 46 (December): 1–10. <u>https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126513</u>.

Tsioras, P., C. Rottensteiner, K. Stampfer. 2011. "Analysis of Accidents During Cable Yarding Operations in Austria 1998–2008." Croat. J. For. Eng. 32 (2): 549–60.

Urata, T., M. Shibuya, A. Koizumi, H. Torita, J.Y. Cha. 2012. "Both Stem and Crown Mass Affect Tree Resistance to Uprooting." Journal of Forest Research 17 (1): 65–71. <u>https://doi.org/10.1007/s10310-011-0249-6</u>.

Virot, E., A. Ponomarenko, É. Dehandschoewercker, D. Quéré, C. Clanet. 2016. "Critical Wind Speed at Which Trees Break." Physical Review E 93 (2): 023001. <u>https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.023001</u>. Vojáčková, B., J. Tippner, P. Horáček, V.Sebera, L. Praus, R. Mařík, M. Brabec. 2021. "The Effect of Stem and Root-Plate Defects on the Tree Response During Static Loading— Numerical Analysis." Urban Forestry & Urban Greening 59 (April): 127002. <u>https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127002</u>.

Wessolly, L., und M. Erb. 2014. "Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle." Neuausg. Berlin Hannover: Patzer.

Wessolly, L., und M. Erb. 2016. "Manual of Tree Statics and Tree Inspection." Berlin Hannover: Patzer.

Xu, P., C. Guan, H. Zhang, G. Li, D. Zhao, R. Ross, Y. Shen. 2021. "Application of Nondestructive Testing Technologies in Preserving Historic Trees and Ancient Timber Structures in China." Forests 12 (3): 318–31. <u>https://doi.org/10.3390/f12030318</u>.

Yang, Z., K. W. Hui, S. Abbas, R. Zhu, C. Y. T. Kwok, J. Heo, S. Ju, M. S. Wong. 2021. "A Review of Dynamic Tree Behaviors: Measurement Methods on Tree Sway, Tree Tilt, and Root–Plate Movement." Forests 12 (3): 379. <u>https://doi.org/10.3390/f12030379</u>.

Yovi, E. Y., D. Abbas, T. Takahashi. 2021. "Safety Climate and Risk Perception of Forestry Workers: A Case Study of Motor-Manual Tree Felling in Indonesia." International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 28 (4): 2193-2201. https://doi.org/10.1080/10803548.2021.1986306.

Abkürzungen

| etc. | Abkürzung |
|---------|--------------------|
| kN | Kilonewton |
| sd | Standardabweichung |
| t | Tonnen |
| u. dgl. | und dergleichen |
| zB. | zum Beispiel |

Anhang



Auszugsversuch Baum 10



Auszugsversuch Baum 11



Auszugsversuch Baum 12



Auszugsversuch Baum 13





Auszugsversuch Baum 15





Auszugsversuch Baum 17



Auszugsversuch Baum 18









Auszugsversuch Baum 20





Auszugsversuch Baum 23





Auszugsversuch Baum 25



Auszugsversuch Baum 26



Auszugsversuch Baum 27



Auszugsversuch Baum 28





Auszugsversuch Baum 30



Auszugsversuch Baum 31



Auszugsversuch Baum 32









Auszugsversuch Baum 34
Auszugsversuch Baum 35



Auszugsversuch Baum 4



Auszugsversuch Baum 5



Auszugsversuch Baum 6



Auszugsversuch Baum 7.1



Auszugsversuch Baum 7.2



Auszugsversuch Baum 7.3



Auszugsversuch Baum 8.1



Auszugsversuch Baum 8.2



Auszugsversuch Baum 8.3



Auszugsversuch Baum 9



Universität für Bodenkultur Wien Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien boku.ac.at