

Experimentelle Überprüfung der Windlastanalyse für statische Zugversuche

Experimental Validation of the Wind Load Analysis in Static Load Tests

von Daniel Esche, Pit Schumacher, Andreas Detter, Steffen Rust

Zusammenfassung

Für die Auswertung eines Zugversuchs wird durch eine Windlastanalyse die während eines Bemessungswindereignisses auf den Baum wirkende Last geschätzt. Das Ergebnis einer Windlastanalyse ist eine statische Last, die die gleiche maximale Baumreaktion hervorruft wie dynamische Belastungen durch Windböen. In dieser Arbeit werden erstmals die tatsächlich auf Bäume während eines natürlichen Starkwindereignisses einwirkenden Lasten mit den Ergebnissen von Windlastanalysen verglichen. Die Abweichung der geschätzten Windbelastung von den im Sturm ermittelten Biegemomenten ist mit 4% bis 31% recht gering. Die Ergebnisse zeigen, dass die dynamische Belastung durch Windböen in einer Windlastanalyse angemessen geschätzt werden kann. Sie verursacht eine maximale Reaktion, die durch statische Zugversuche reproduziert werden kann.

Die Versuche haben zudem gezeigt, dass dem Sachverständigen durch den kombinierten Einsatz von TMS und statischem Zugversuch eine unterstützende Methode zur Verfügung steht, mit der er seine Annahmen, z. B. den Expositionsfaktor bei der Windlastanalyse, nachvollziehbar verifizieren und somit belastbar belegen kann.

Summary

The evaluation of a static load test involves a wind load analysis to estimate the static load causing the same maximum reaction of the tree as dynamic forces at the design wind speed do. The validity of this analysis has been disputed frequently. For the first time, this study compares loads measured on trees in storms to the results of wind load analyses.

The differences between measured and estimated wind loads were rather modest between 4 % and 31 %. Thus, our results show that dynamic loads in gusts are comparable to the results of a wind load analysis. They cause a maximum reaction that can be reproduced in static load tests.

Another important practical implication is that consultants can use the combination of static load tests and TMS (Tree Motion Sensors) to verify and support critical assumptions in their wind load analyses.

1 Einleitung

Zur eingehenden Untersuchung der Stand- bzw. Bruchssicherheit im Rahmen der Überprüfung der Verkehrssicherheit ist u. a. der Einsatz statischer Zugversuche möglich (FLL 2013). Für die Auswertung der Zugversuche ist es unerlässlich, eine Windlastanalyse

durchzuführen. Dies erfolgt mithilfe von Spezialsoftware wie z. B. Arbostat. Eine Windlastanalyse zielt darauf ab, die während eines definierten Bemessungswindereignisses am Standort auf eine Struktur einwirkende Windbelastung abzuschätzen (DIN EN 1991-1-4:2010). Das Ergebnis einer Windlastanalyse für Bäume ist eine äquivalente statische Last, die die

gleiche maximale Reaktion in Form von Wurzeltellerneigung oder Stammbiegung hervorruft wie eine dynamische Belastung durch Windböen (DETTNER & RUST 2013).

Da viele der Parameter, die in die Windlastanalyse eingehen, geschätzt werden müssen, und die Unsicherheit der Schätzwerte in der Regel unbekannt ist, wurde diese Methode mitunter in Frage gestellt. RINN (2005) gibt die mittlere prozentuale Mindest-Schwankungsbreite der Windlastschätzung mit 150 % an. Da es bisher nicht möglich war, die mit der Windlastanalyse berechneten äquivalenten statischen Lasten und die tatsächlich auf den Baum einwirkende dynamische Belastung zu vergleichen, haben wir Neigungsmessungen im natürlichen Wind, baumstatische Zugversuche und computergestützte Windlastanalysen durchgeführt.

2 Material und Methoden

2.1 Bäume und Standorte

Zwei etwa 65 Jahre alte Bastard-Schwarzpappeln (*Populus x canadensis*) stocken am Ortsrand auf dem Grundstück einer Baumpflegefirma in 21493 Elmenhorst/Sahms. Zwei weitere, etwa 55 Jahre alte Pappeln und eine etwa 90-jährige Eiche (*Quercus robur*) auf dem Gelände des Golf-Clubs am Sachsenwald e. V. in 21521 Dassendorf. Beide Standorte befinden sich ca. 20 km östlich bis südöstlich von Hamburg. Die Pappeln sind 25-35 m hoch mit Stammumfängen zwischen 295 und 470 cm. Die Eiche ist 20,5 m hoch mit einem Umfang von 215 cm.

Die zwei Pappeln auf dem Gelände der Baumpflegefirma sind Teil einer Reihe von fünf Bäumen mit jeweils 4 m Abstand, die von Nord nach Süd verläuft. Das Areal ist von landwirtschaftlich genutzten Flächen umgeben. Die Hauptwindrichtung ist West-Nordwest bis West-Südwest. Die beiden anderen Pappeln sind Teil einer Pappelreihe am Rande eines acht Meter breiten Gehölzstreifens aus 3-5 m hohen Schwarz-Erlen (*Alnus glutinosa*) auf der freien Fläche der 75 ha großen Golfanlage. Die Ausrichtung dieser Baumreihe ist Nordost nach Südwest, der Baumabstand 4 m. Die Hauptwindrichtung ist West-Nordwest bis West-Südwest. Der Boden ist sandig.

Die Stiel-Eiche (*Quercus robur*) stockt auf einer Schotterfläche zwischen zwei Parkplätzen an der östlichen Seite des Parkplatzes des Golf-Clubs. Eine versiegelte Fläche verläuft in einem Abstand von 1 m am Stammfuß entlang.

2.2 Tree Motion Sensor

TMS (argus electronic GmbH, Rostock) sind Beschleunigungsmesser, die das dynamische Schwingungsverhalten von Bäumen im Wind aufzeichnen. Sie verwenden synchron drei orthogonal angeordnete Achsen und eine Abtastrate mit einer Frequenz von 20 Hz. Die Auflösung und Messgenauigkeit betragen 0,01°. Für zuverlässige Messergebnisse werden i.d.R. mindestens 50-60 km/h Böengeschwindigkeit benötigt (GÖCKE et al. 2018). Die Dauer eines Messintervalls sollte mindestens drei Stunden betragen. Vor Beginn eines Sturmes wurde je ein Sensor an den Bäumen angebracht und bis zum Abflauen des Windes dort belassen. Die Installation erfolgte in ähnlicher Weise wie bei Inclinomern im Zugversuch. Der TMS wurde am Stammfußbereich erdbodennah in der Borke des Baumes fixiert. Mittels Wasserwaage wurde der Sensor horizontal ausgerichtet.

Die TMS-Messungen erfolgten während mehrerer Sturmereignisse (22.-24.02.2017, 02.-15.03.2017 und 03.-17.04.2017). Ausgewertet wurden die Messdaten mit einer speziellen Analysesoftware. Diese Software ermittelt während des Beobachtungszeitraums die maximale Neigung des Wurzeltellers innerhalb eines vorab festgelegten Messintervalls. Anschließend lassen sich diese Werte mit regionalen Winddaten korrelieren, indem auch hier die Spitzenwerte innerhalb des Messintervalls ermittelt werden. Daraus ergibt sich eine Windneigungskurve, der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Böenspitzen und der maximalen Wurzeltellerneigung, die innerhalb des Messintervalls aufgezeichnet wurden. Im vorliegenden Fall wurde hierfür analog zu GÖCKE et al. (2018) ein Intervall von 60 Minuten gewählt.

2.3 Zugversuch

Zugversuche sind eine nicht invasive Methode der eingehenden Untersuchung und dienen der Überprüfung der Bruch- und Standsicherheit von Bäumen (SINN 2003;

DETTNER & RUST 2013; WESSOLLY & ERB 2014). Grundlage dieses Verfahrens sind die Beziehungen zwischen Reaktionen des Baumes in Form von Dehnung, Stauchung und Neigung am Stammfuß und einer eingeleiteten Windersatzlast. Die Messdaten werden mit den am Standort zu erwartenden Windlasten verglichen (DETTNER & RUST 2013; WESSOLLY & ERB 2014). Die Zugversuche (TreeQinetic, argus electronic GmbH, Rostock) wurden am 19. und 20.03.2017 sowie am 03.04.2017 durchgeführt. Bei jedem Zugversuch wurde die Kraft im Zugseil mit einem Forcemeter (Messgenauigkeit 20 N) und die Neigung der Wurzelplatte mit Inclinometern (Messgenauigkeit $0,002^\circ$) mit Hilfe der Software TreeQineticMeasure aufgezeichnet. Die Verarbeitung der Daten erfolgte mit MS Excel.

2.4 Arbostat

Für die Windlastabschätzung wurde die Analysesoftware für Baumstatik Arbostat, Version 2.2 (arbosafe GmbH, Gauting) eingesetzt. Arbostat folgt bei der Windlastabschätzung den Modellen aus DIN 1055–4:2005, DIN EN 1991–1–4:2010 und ISO 4354:2009, wobei zusätzlich Parameter ergänzt wurden, um die baumspezifischen Besonderheiten abzubilden (www.arbosafe.com/de/arbostat/software/windlasten). Diese wurden jeweils einheitlich für einen Baumstandort gewählt.

2.5 Windmessstation

Die Windmessstation wird privat von TORBEN SCHWARZ, Ochsenwerder Norderdeich 303 in 21037 Hamburg, betrieben. Sie befindet sich im Südosten Hamburgs und ist 16 km von den Bäumen auf dem Gelände des Golf-Clubs und 27 km von den Bäumen in Elmenhorst/Sahms entfernt. Sie ist auf freier Fläche in 10 m Höhe auf einer landwirtschaftlichen Halle installiert und entspricht der WMO Norm (mündl. Mitteilung SCHWARZ 2017).

2.6 Skalierungsfaktor zur grafischen Vergleichbarkeit von Windgeschwindigkeit und Biegemoment

Aus den Ergebnissen des Zugversuchs wurde für die Datenpaare Biegemoment und Neigung die Steigung

einer linearen Regressionsgerade, die im Ursprung beginnt, ermittelt. Ebenso wurde mit den Maxima der regionalen Windgeschwindigkeit und den Daten der TMS-Messung verfahren. Die Anwendung einer linearen Regressionsgerade ist in diesem Falle möglich, da der Verlauf von Kraft und Neigung bis etwa $0,25^\circ$ Neigung annähernd linear verläuft (DETTNER & RUST 2013). Sowohl die Winddaten als auch die statischen Ersatzlasten aus dem Zugversuch wurden in einem Diagramm auf einer primären und einer sekundären X-Achse abgebildet. Auf der Y-Achse wurden die Neigungsdaten angeordnet. Aus dem Quotienten der beiden Steigungen wurde ein Skalierungsfaktor errechnet, um den Verlauf der Regressionen im gemeinsamen Diagramm zur Deckung zu bringen. Diese Darstellungsweise erlaubt direkte Rückschlüsse auf äquivalente statische Windlasten, die den Einwirkungen des böigen Windes entsprechen.

3 Ergebnisse

3.1 Äquivalente statische Lasten aus TMS-Messung und Zugversuch

Abbildung 1 zeigt den äquivalenten Lastvergleich von Zugversuchen und Windbelastungen an einem Baum. Gemessen wurde die Neigung der Wurzelplatte an allen fünf Bäumen unter einer dynamischen Belastung durch die Abfolge von Windböen (TMS-Messung) sowie unter einer statischen Belastung im Zugversuch.

Die Y-Achse zeigt die Neigung der Wurzelplatte. Die primäre X-Achse gibt die Windgeschwindigkeit der TMS-Messung an. Auf der sekundären X-Achse ist das Biegemoment des quasi-statischen Zugversuches angegeben. Technisch bedingte Ausreißer der Neigungsmessung im Wind wurden entfernt. Die einzelnen Ergebnisse für alle fünf Bäume können Tabelle 1 entnommen werden.

3.2 Vergleich Bemessungswindmoment aus Arbostat mit äquivalenter statischer Windlast aus TMS-Messung

Mit der Software Arbostat wurde für die vier Pappeln eine Windlastanalyse durchgeführt. Diese geht als Referenzwindgeschwindigkeit von einer mittleren Wind-

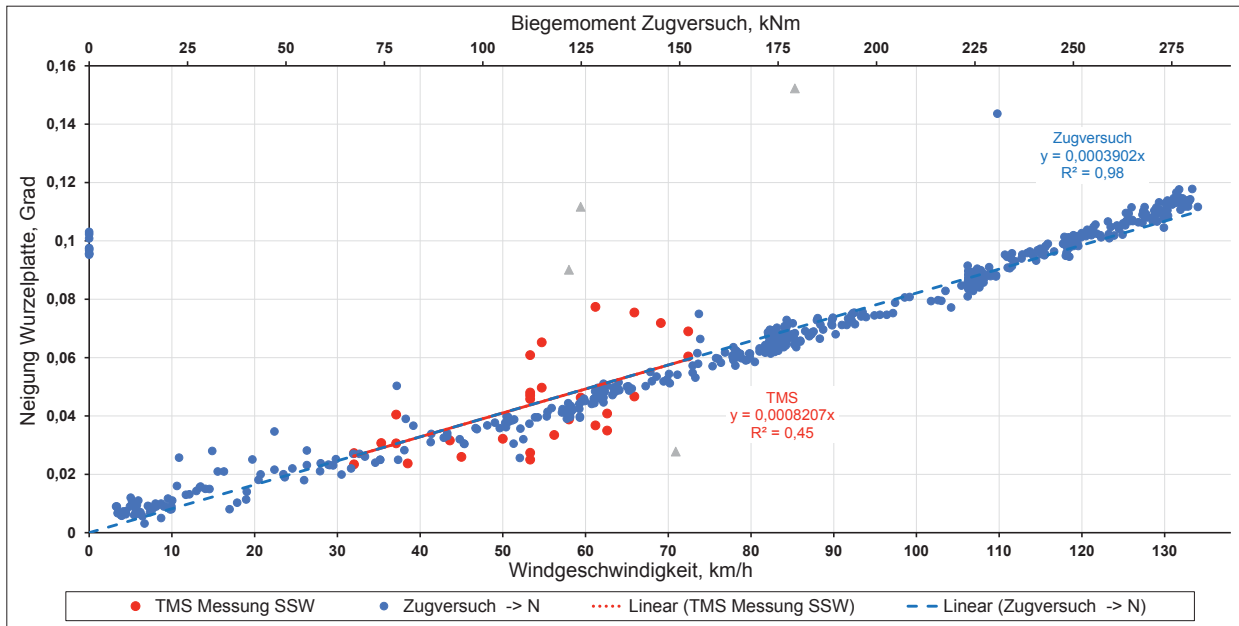


Abbildung 1: Äquivalenter Lastvergleich aus der Windgeschwindigkeit und der statischen Belastung aus dem Zugversuch an Baum Nr. 2, *Populus x canadensis*; Ausreißer der TMS-Messung sind mit einem grauen Dreieck gekennzeichnet.

Tabelle 1: Ergebnisse der Messungen mit TMS und Zugversuch

Baum	max. Böengeschwindigkeit km h ⁻¹	max. Neigung im Wind °	max. Biegemoment im Zugversuch kNm	max. Neigung im Zugversuch °
2	72	0,069	280	0,117
4	77	0,063	209	0,101
5	82	0,065	279	0,060
6	68	0,073	126	0,117
9	82	0,036	40	0,050

geschwindigkeit in einem 10-Minuten-Intervall aus. Damit die Winddaten, die für die Korrelation mit der TMS-Messung verwendet wurden, mit der Windlastanalyse in Arbostat vergleichbar werden, wurde die aufgezeichnete Böengeschwindigkeit nach den Vorgaben von DIN EN 1991-1-4:2010 in die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit umgerechnet.

Die untersuchten Bäume stocken in der Geländekategorie 2 (freie Landschaft), so dass ein Böenfaktor von 1,45 zu verwenden war. Die Diagramme wurden mit

dem Ergebnis dieser Umrechnung verändert dargestellt (Abbildung 2).

Aus den Winddaten wurde ein einzelner Datensatz ausgewählt, der in der Nähe der mittleren Windgeschwindigkeit im Beobachtungszeitraum und nahe der linearen Regression liegt. Dieser wurde als Referenzgeschwindigkeit für die Windlastanalyse in Arbostat eingesetzt. Dadurch war es möglich, das im natürlichen Wind bei jedem Baum gemessene Biegemoment mit der in Arbostat geschätzten Windlast zu vergleichen (Tabelle 2).

4 Diskussion

Die Verteilung der Messpunkte entlang der Regressionsgeraden bei den Zugversuchen zeigt, dass ein enger Zusammenhang zwischen eingeleiteter Kraft und Neigung der Wurzelplatte besteht (Bestimmtheitsmaße $> 0,88$). Dagegen sind die TMS-Messpunkte entlang der Regressionsgeraden weiter gestreut mit Bestimmtheitsmaßen von 0,31-0,62. Dies liegt wahrscheinlich

auch daran, dass die Winddaten bis zu 26 km entfernt gemessen wurden (s. u.).

Mit dem für jedes einzelne Diagramm ermittelten Skalierungsfaktor ist es möglich, einen äquivalenten Lastvergleich aus statischer Last (Zugversuch) und dynamischer Belastung (TMS) durch die Abfolge von Windböen herzustellen. Bei der Skalierung der zwei linearen Regressionen zeigte sich, dass ein Steigungswert

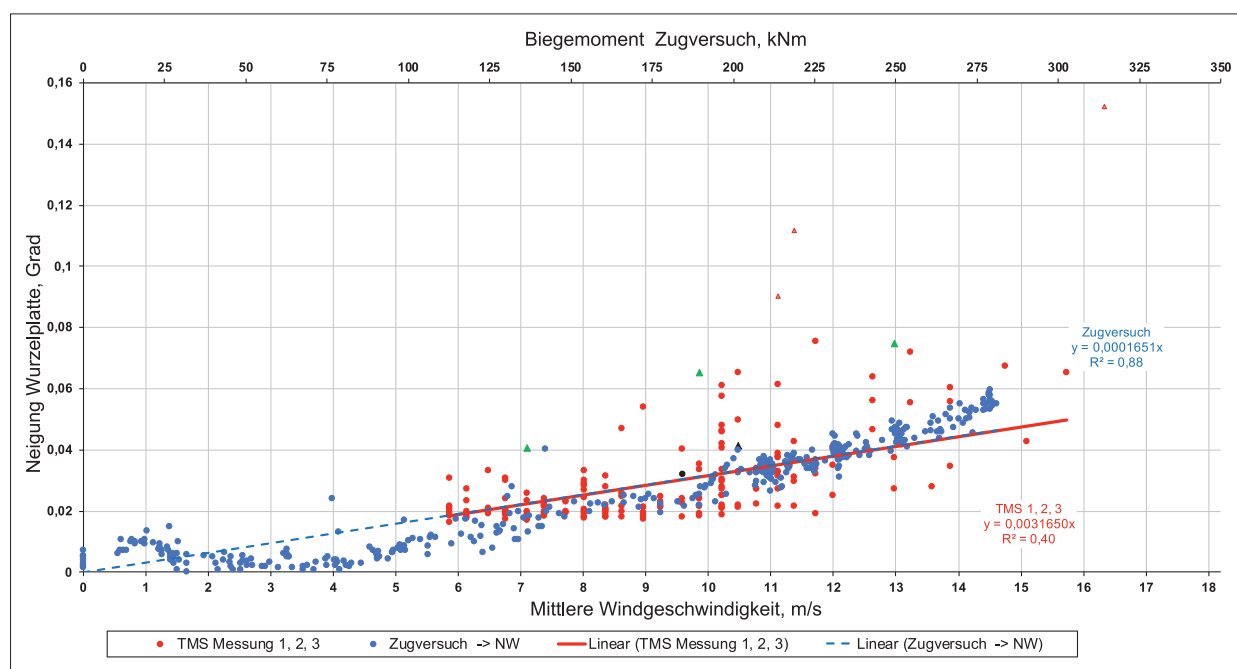


Abbildung 2: Äquivalenter Lastvergleich aus der Windgeschwindigkeit und der statischen Belastung aus dem Zugversuch an Baum Nr. 5, *Populus x canadensis*. Zur besseren Illustration wurde ein Messpunkt, welcher nahe an der durchschnittlichen mittleren Windgeschwindigkeit und der linearen Regressionsgerade liegt, schwarz markiert.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der berechneten Bemessungswindmomente aus Arbostat und der gemessenen äquivalenten statischen Windlasten aus TMS-Messung und Zugversuch

	Baum 2	Baum 4	Baum 5	Baum 6
Bemessungswindmoment in kNm (Berechnung mit Arbostat)	121	91	186	65
Biegemoment in kNm (ermittelt mit TMS und Zugversuch)	115	82	193	45
Abweichung in %	5	10	4	31
Durchschnittliche Abweichung in %	12,5			

der linearen Regression mit sieben Nachkommastellen erforderlich war, um eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen.

Die beiden Pappeln Nr. 2 und 4 sind Bestandteil einer aus fünf Bäumen bestehenden Baumreihe. Die Ausrichtung verläuft von Nord nach Süd. Bei Windgeschwindigkeiten von 30-50 km/h (Baum Nr. 2) und 30-40 km/h (Baum Nr. 4) trat keine nennenswerte Neigung der Wurzelplatte auf. Dieses könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Bäume zu dieser Windrichtung dem Wind nicht exponiert waren oder dass die Bäume die eingeleitete Windkraft stark dämpfen.

Je drei Messpunkte der TMS-Messung wurden bei diesen Bäumen als Ausreißer bewertet. Die Baumreihe verläuft 40 cm neben einer gepflasterten Zufahrt, welche von Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t genutzt wird. Im Bereich der Bäume sind die Pflastersteine durch Wurzelhebungen über die gesamte Breite der Zufahrt bis zu mehreren Zentimetern angehoben. Vibrationen, die durch ein vorüberfahrendes Fahrzeug ausgelöst werden, könnten daher zum Stammfuß übertragen und vom TMS-Sensor abgebildet worden sein. Auch Berührungen durch Mensch oder Tier könnten solche Ausreißer verursachen. In beiden Fällen wäre nicht eine maßgebliche Neigungsänderung, sondern Fremdeinwirkung die Ursache für die Messwerte. Nicht auszuschließen wäre auch, dass die an der Windmessstation gemessene Windgeschwindigkeit erheblich von derjenigen abweicht, die vor Ort an den Bäumen aufgetreten ist.

An Pappel Nr. 6 war ein Anstieg der Wurzelplattenneigung erst ab etwa 40 km/h erkennbar. Dies bestätigt die Aussage von GÖCKE et al. (2018), dass TMS-Messungen bei Bäumen erst bei Windgeschwindigkeiten ab 50 km/h durchgeführt werden können. Da es sich um einen exponiert stehenden Baum handelt, könnten die von JAMES et al. (2006) und SPATZ & THECKES (2013) beschriebenen Dämpfungseigenschaften zur Minimierung des Lasteintrages führen.

Bei diesem Baum Nr. 6 wurden drei zeitlich separate TMS-Messungen durchgeführt, bei denen jeweils Wind aus unterschiedlicher Richtung vorherrschte. Der Anstieg der linearen Regressionsgerade aus den zeitlich versetzten TMS-Messungen unterscheidet sich nur ge-

ringfügig. Daraus lässt sich schließen, dass TMS-Messungen reproduzierbar sind. Die vergleichsweise hohe Abweichung vom Ergebnis der Windlastanalyse könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Abschätzung lediglich für eine Windrichtung durchgeführt wurde.

Baum Nr. 9 (*Quercus robur*) zeigte trotz der Windwirkung während der TMS-Messung bis Windgeschwindigkeiten von 82 km/h keine nennenswerte Neigung der Wurzelplatte (Abbildung 3). Hier konnte kein Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und der Neigung der Wurzelplatte hergestellt werden. Ursache könnte sein, dass der Baum von anderen, gleichgroßen Bäumen umgeben und somit sehr windgeschützt ist.

Eine Beurteilung der Standsicherheit mittels TMS ist an diesem Baum unter der gegebenen Standortssituation nicht möglich. Andererseits könnten in diesem Fall aber durchaus mittels einer TMS-Messung die baumstandortspezifischen Annahmen abgesichert werden, die bei Windlastanalysen für baumstatische Zugversuche eingesetzt werden (z. B. der Expositionsfaktor). Durch die TMS-Messung würde der Sachverständige, der mit Zugversuchen arbeitet, ergänzende Messdaten erhalten, durch die er seine Annahmen verifizieren kann. Dies ist von erheblicher Bedeutung, wenn im Zugversuch untersuchte Bäume beispielsweise durch andere Großstrukturen oder vorgelagerte Bäume abgeschirmt werden und dies bei der Windlastanalyse angemessen berücksichtigt werden muss.

4.1 Güte der geschätzten Windlasten

Die Abweichungen der Bemessungswindmomente, die mit der Windlastanalysesoftware Arbostat geschätzt wurden, von den aus TMS-Messungen und Zugversuchen ermittelten Biegemomenten waren erstaunlich gering. Ungeachtet der Komplexität einer Windlastanalyse zeigen unsere Messergebnisse, dass es möglich ist, die örtlich auftretenden Windkräfte annähernd zu berechnen. Sie zeigen auch, dass das Ergebnis einer Windlastanalyse eine äquivalente statische Last ist, die die gleiche Baumreaktion hervorruft, wie die dynamische Belastung durch die Abfolge von Windböen (DETTNER & RUST 2013). Dadurch ist es mit Hilfe der Windlastanalyse und durch die Anwendung von Zugversu-

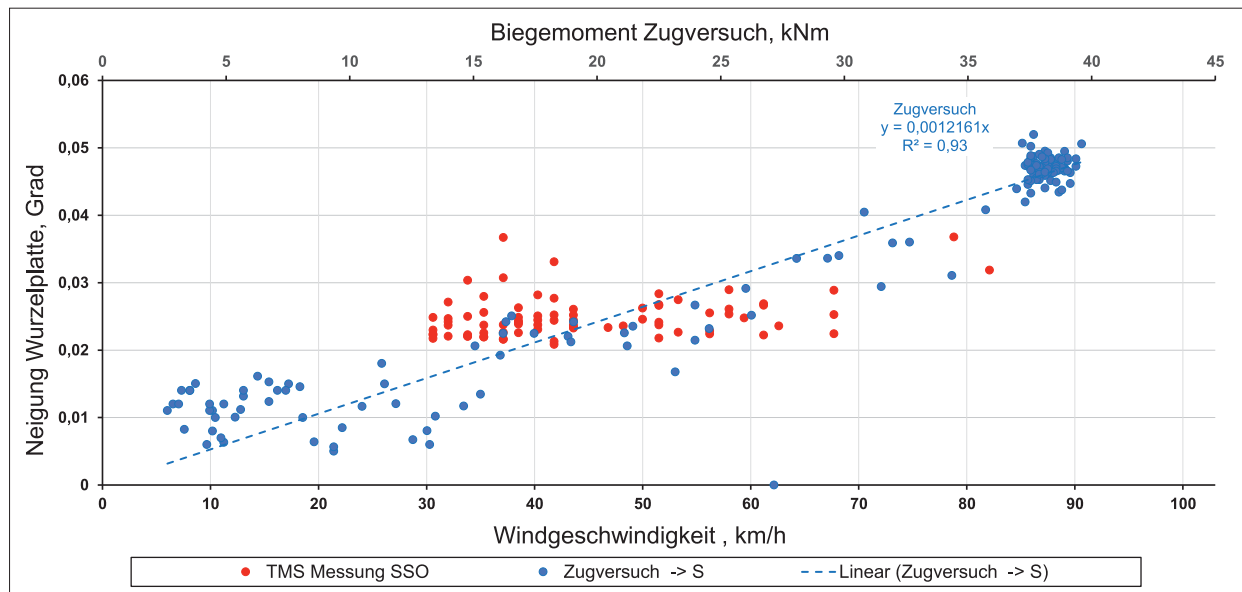


Abbildung 3: Lastvergleich aus der Windgeschwindigkeit und der statischen Belastung aus dem Zugversuch an Baum Nr. 9, *Quercus robur*

chen möglich, rechnerische Aussagen über die Sicherheit von Bäumen zu treffen.

Die von RINN (2005) beschriebene mittlere prozentuale Mindest-Schwankungsbreite bei Windlastermittlungen von 150 % hat sich bei unseren Versuchen nicht bestätigt. Die durchschnittliche Schwankungsbreite lag hier bei nur 12,5 %. Bei unseren Messungen ist zu berücksichtigen, dass der c_w -Wert in der Berechnung nicht verändert wurde. Da es sich bei dem c_w -Wert, hier im Falle eines Baumes, nicht um eine konstante Größe handelt, müsste eine Anpassung des c_w -Wertes zur Windgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Dies könnte in Anlehnung an SINN (2003, 2017) durchgeführt werden. Es wäre denkbar, dass die Güte des Ergebnisses durch eine Anpassung des c_w -Wertes noch höher ist.

4.2 Eignung der verwendeten Methoden

Laut Windfinder.com betrug die Entfernung der Windmessstation zu den Versuchsbäumen 9 km. Es stellte sich jedoch heraus, dass die tatsächlichen Entfernungen zwischen 16 und 27 km lagen. Windböen sind kleinräumige Phänomene und bereits nach wenigen Hundert Metern nicht mehr als lokale Windinformationen zu verwenden (mündl. Mitteilung AMENT 2017).

Jedoch werden in Schadensfällen bei Wetterereignissen die nächstliegende offizielle Windmessstation, wie auch in dieser Arbeit verwendet, von Versicherungsgesellschaften und Gerichten herangezogen. Daher wurden die vorliegend verwendeten Daten als ausreichend belastbar eingestuft.

4.3 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht möglich, die Messdaten der TMS genauer zu analysieren, um äußere Einflüsse, wie z. B. Vibrationen durch das Überfahren des durchwurzelten Raumes mit Fahrzeugen oder Berührungen durch Tiere oder herabfallende Äste, ausschließen zu können. Da die Sensoren Beschleunigungsmesser sind, deren Daten in Neigungen umgerechnet werden, könnten solche Eingriffe zu Artefakten führen. In Zukunft sollten solche vermeintlichen Ausreißer intensiver untersucht werden, um Fehlerquellen ausschließen und Phänomene, die auf echte Neigungsreaktionen zurückgehen, weiter verfolgen zu können.

Da in dieser Arbeit die Güte der Windlastanalyse an vier Bäumen nachgewiesen wurde, sollten weitere Untersuchungen der gleichen Komplexität an verschiedenen Bäumen unterschiedlicher Standortsbedingungen

durchgeführt werden, um die Ergebnisse gegebenenfalls auf einer breiteren Datenbasis zu verifizieren. Wir sind zuversichtlich, dass sich TMS-Messungen in Zukunft als wertvolles, eigenständiges oder ergänzendes Verfahren zur Überprüfung der Standsicherheit von Bäumen in der Baumdiagnose etablieren werden können.

Literatur

- DETTER, A.; RUST, S., 2013: Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013. Haymarket Media, Braunschweig, 87–100
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Hrsg.), 2013: Baumuntersuchungsrichtlinien – Richtlinien für eingehende Untersuchungen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen. Bonn, 42 S.
- GÖCKE, L.; JACHNING, F.; RUST, S., 2018: Assessing the Anchorage and Critical Wind Speed of Urban Trees using Root Plate Inclination in high Winds. In: Arboriculture and Urban Forestry, In print.
- JAMES, K.; HARITOS, N.; ADES, P. K., 2006: Mechanical stability of trees under dynamic loads. American Journal of Botany 93, 1522–1530
- RINN, F., 2005: Fehlerrechnung in der Baumkontrolle. In: AFZ-Der Wald, 1325–1328.
- SINN, G., 2003: Baumstatik. Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft. Thalacker Medien, Braunschweig, 184 S.
- SINN, T., 2017: Sachstand zum c_w -Wert von Bäumen, in: Pro Baum, 20–21.
- SPATZ, H.-C.; THECKES, B., 2013: Oscillation damping in trees, in: Plant Science 207, 66–71.
- WESSOLLY, L.; ERB, M., 2014: Baumstatik und Baumkontrolle, Patzer Verlag. Berlin-Hannover, 287 S.

Autoren

Daniel Esche ist B. Sc. Arboristik und Fachagrarwirt für Baumpflege und Baumsanierung. Er verfügt über langjährige Erfahrung in der Baumpflege im In- und Ausland und ist Mitarbeiter im Sachverständigenbüro Brudi & Partner TreeConsult in Gauting.

Daniel Esche
Landsberger Straße 54a
82205 Gilching
d.esche@tree-consult.org



Pit Schumacher ist B. Sc. Arboristik sowie Fachagrarwirt für Baumpflege und Baumsanierung und studiert nun „Urbanes Baum- und Waldmanagement“ an der HAWK in Göttingen. Daneben arbeitet er in einem Sachverständigenbüro und Baumpflegeunternehmen als Gutachter und Bauleiter.

Pit Schumacher
Geiststraße 3 b
37073 Göttingen
pitschumacher@web.de



Andreas Detter ist Dipl.-Ing. der Landespflege und öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger. Er ist Mitglied des Vorstands der Sachverständigen-Arbeitsgemeinschaft SAG Baumstatik e. V. und im Büro Brudi & Partner TreeConsult in Gauting als Sachverständiger und Referent tätig.

Dipl.-Ing. Andreas Detter
ö.b.v. Sachverständiger
Brudi & Partner
TreeConsult
Berengariastraße 7
82131 Gauting
Tel. (089) 75 21 50
a.detter@tree-consult.org



Prof. Dr. Steffen Rust ist Professor für Baumpflege und Baumbiologie an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) in Göttingen.

Prof. Dr. Steffen Rust
Fakultät
Ressourcenmanagement
HAWK
Büsgenweg 1a
37077 Göttingen
Tel. (0551) 50 32–1 73
rust@hawk-hhg.de

