

# MONITORAGGIO DELLA STABILITÀ MECCANICA DEGLI INDIVIDUI ARBOREI TRAMITE UN SENSORE GNSS A BASSO COSTO

## MONITORING OF MECHANICAL STABILITY OF ARBOREAL INDIVIDUALS BY GNSS LOW-COST SENSORS

Virginia Coletta<sup>1,\*</sup>, Alessandra Mascitelli<sup>1,2</sup>, Pierluigi Bombi<sup>3</sup>, Bruno De Cinti<sup>3</sup>, Stefano Federico<sup>1</sup>, Giorgio Matteucci<sup>4</sup>, Augusto Mazzoni<sup>2</sup>, Valerio G. Muzzini<sup>3</sup>, Igor Petenko<sup>1</sup>, Stefano Dietrich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Atmospheric Sciences and Climate, National Research Council of Italy, Rome, Italy

<sup>2</sup> Geodesy and Geomatics Division, Sapienza University of Rome, Rome, Italy

<sup>3</sup> Institute of Research on Terrestrial Ecosystems, National Research Council of Italy, Montelibretti, Rome, Italy

<sup>4</sup> Institute for Agricultural and Forest Systems in the Mediterranean, National Research Council of Italy, Ercolano, Naples, Italy

\* [virginia.coletta@yahoo.it](mailto:virginia.coletta@yahoo.it)

### Abstract

The aim of this study is to test the applicability of GNSS receivers for monitoring the movement of trees associated with the wind. The analysis was carried out locating a single frequency GNSS receiver at the top of the trunk of an Italian stone pine (*Pinus pinea* L.) and evaluating the results obtained in terms of speed, positions and frequencies. Subsequently, the values obtained were correlated to the characteristics of the wind. Preliminary goal of the experimental activity was investigating the quality of the data obtainable. Then, once error statistics were analysed, it was possible to investigate the time series of position, speed and frequency of trunk oscillation during wind storms. The presence of an anemometer, placed at almost 20 m from the object of study, allowed us to analyze the correlation between wind speed and tree movements. This experiment is a first step towards designing an autonomous early warning and monitoring sensor system in the near future.

### Parole chiave

GPS, Albero, Vento

### Keywords

GPS, Tree, Wind

### Introduzione

Negli ultimi anni si sta assistendo ad impattanti modifiche dal punto di vista climatico, le quali sempre più si palesano attraverso l'insorgenza di fenomeni meteorologici molto intensi, caratterizzati da venti con velocità molto alte. Le sollecitazioni sempre maggiori, dovute al vento, compromettono la stabilità degli individui arborei, comportando un serio rischio per persone, oggetti, strutture e infrastrutture. Per poter far fronte a questi fenomeni, prevenendo la caduta degli alberi, è fondamentale conoscere la relazione che lega le grandezze del vento con l'oscillazione della pianta.

Lo scopo di questo studio è quello di testare l'applicabilità dei ricevitori Global Navigation Satellite System (GNSS), di cui il Global Positioning System (GPS), ora definito NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System (NAVSTAR GPS), è il più noto, per monitorare i movimenti degli alberi conseguenti all'azione del vento. Il caso studio qui riportato si riferisce ad un'analisi sperimentale effettuata su un Pino cembro italiano (*Pinus pinea* L.). La sperimentazione è stata effettuata attraverso l'utilizzo di un unico ricevitore GNSS a singola frequenza di basso costo (€ 200-300), collocato a una distanza inferiore a 10 km rispetto ad un ricevitore di classe geodetica facente parte della rete permanente NetGEO. Il ricevitore GNSS ha raccolto dati ogni secondo per circa due mesi, da metà novembre 2017 alla prima settimana di gennaio 2018. Questi dati comprendono eventi

ventosi di varia intensità e tipologia, che consentono uno studio sufficientemente completo dell'impatto del vento sul Pino.

L'obiettivo preliminare dello studio è stato quello di valutare la qualità dei dati ottenibili dal sensore, che per questo tipo di applicazione è necessario porre in una posizione non ottimale per la ricezione del segnale; la chioma dell'albero che circonda l'antenna GNSS potrebbe infatti risultare causa di errori quali multipath e cycle slip. Dopo aver stimato l'accuratezza dello strumento nelle condizioni descritte, è stato possibile monitorare, durante eventi ventosi, gli spostamenti del tronco in termini di posizione, velocità e frequenza di oscillazione. Un anemometro sonico è stato installato molto vicino al Pino (circa 20 metri), al fine di registrare in modo indipendente le componenti del vento (velocità, direzione) e la turbolenza. Questo ci ha permesso di studiare la correlazione tra il vento (causa) e i movimenti dell'albero (effetto). In prospettiva l'uso del GNSS per il monitoraggio degli alberi potrebbe avere vantaggi dovuti alla sempre maggiore diffusione di questa tecnologia.

### Materiali e Metodi

#### *Strumentazione utilizzata*

##### *Anemometro sonico*

Le misurazioni delle componenti del vento sono state effettuate attraverso un anemometro/termometro sonico,

uSonic-3 Metek Scientific (<https://metek.de/product/usonic-3-scientific>), installato ad un'altezza di circa 9 m sopra il tetto di un edificio che dista circa 20 m dal ricevitore GNSS. Utilizzando queste misurazioni, sono stati calcolati i valori medi della velocità e della direzione del vento, nonché le deviazioni standard di tutte le componenti del vento.

#### **Ricevitore GNSS**

In questo studio è stato utilizzato un sensore GNSS a singola frequenza (u-blox M8T Leica Geosystems) collocato nella parte superiore del tronco dell'albero e collegato ad un pc posto nell'edificio adiacente. Con i dati raccolti è stata effettuata un'analisi degli spostamenti dell'albero in termini di velocità e posizione. Per elaborare questi ultimi si è fatto ricorso ad un metodo di posizionamento relativo [Leick, 2004] utilizzando un ricevitore geodetico (FIAN fornito da Netgeo) situato a circa 8 chilometri dall'albero.

#### **Processamento dati**

##### **Vento**

Per ottenere informazioni precise sulla velocità e la direzione del vento con alta risoluzione temporale, è stato utilizzato l'anemometro sonico ad una frequenza di campionamento di 40 Hz. Mediando i dati ogni 4 valori, le serie temporali delle tre componenti del vento x, y e z sono state registrate in un data-logger CR3000 di Campbell con frequenza di 10 Hz. La risoluzione spaziale è determinata in base alla distanza tra le coppie trasduttore/ricevitori pari a 0,20 m. I picchi sono stati determinati ed eliminati durante l'elaborazione dei dati, la loro percentuale è stata poi utilizzata per un successivo controllo sulla qualità dei dati. Ogni blocco vettoriale [x, y, z] è stato indicizzato per trovare i punti con uno scostamento anomalo rispetto alla media; ovvero, quando sottraendo al valore reale il valore medio si otteneva uno scarto esterno all'intervallo prestabilito ( $\pm 10$  m/s). Il metodo di planar fit [Lee et al. 2004] è stato utilizzato per correggere i dati da possibili errori causati dall'inclinazione del supporto, applicando una rotazione 2D nelle coordinate del vento medio. Per l'analisi della correlazione tra velocità del vento e movimento dell'albero, le componenti direzionali, est e nord, sono state calcolate mediando i dati ogni secondo.

Un altro parametro, che è stato considerato in queste analisi, è l'energia cinetica turbolenta (TKE). In generale, la TKE può essere quantificata con la media delle sollecitazioni normali di turbolenza:

$$TKE = \frac{1}{2} (< u'^2 > + < v'^2 > + < w'^2 >) \quad (1)$$

dove  $u'$ ,  $v'$  e  $w'$  sono fluttuazioni delle componenti longitudinale, laterale e verticale del vento.

#### **Albero**

##### **Velocità**

L'analisi delle componenti della velocità dell'albero è stata condotta attraverso l'utilizzo del software VADASE (Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine). L'approccio è di tipo variometrico e applicabile ad un ricevitore stand-alone [Colosimo et al., 2011].

I dati registrati dal ricevitore a singola frequenza (LOW4) posto sull'albero sono stati processati con RTKCONV, applicativo di RTKLIB, per convertirli dal formato UBX (specifico formato u-blox) al formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format). Per quanto riguarda i dati navigazionali, abbiamo utilizzato quelli registrati dalla stazione MOSE, una stazione IGS (International GNSS Service) situata sul tetto della Facoltà di Ingegneria de "La Sapienza" Università di Roma, così da avere informazioni affidabili. I dati dei diversi giorni, caratterizzati da differenti condizioni di vento, sono stati poi processati con il VADASE ottenendo risultati in termini di velocità.

#### **Posizioni**

Per quanto riguarda la determinazione delle posizioni, è stato utilizzato il software RTKLIB, un toolkit GNSS open source per eseguire posizionamenti standard e precisi [Takasu et al., 2009]. I file RINEX sono stati ottenuti utilizzando lo stesso procedimento (RTKCONV) impiegato per i dati di velocità ed elaborati tramite RTKPOST, un eseguibile di RTKLIB. Si è utilizzato il metodo differenziale, impostando il posizionamento sia statico che cinematico [Leick, 2004]: il primo è servito ad ottenere una posizione di riferimento, mentre il secondo è stato finalizzato allo studio del movimento. Per condurre questa analisi, sono stati necessari anche dati di osservazione relativi ad una stazione di riferimento che, in questo caso, risulta essere un ricevitore situato a circa 8 chilometri dall'albero, a Fiano Romano (Roma). Il ricevitore è la stazione FIAN, appartenente alla rete Netgeo e i dati ancillari necessari per l'elaborazione sono stati forniti dal CODE (Center for Orbit Determination in Europe). I file sono stati elaborati per giornate con condizioni di vento differenti e tagliati con un test CE90 (Circular Error with 90% probability) [Eq. 2] in modo da valutare un intervallo per la rimozione degli outliers.

$$CE90 = \frac{2.146}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} \quad (2)$$

#### **Risultati e Discussione**

L'albero in esame, situato all'interno dell'area di ricerca di Montelibretti del CNR - RM1, si trova in prossimità di un edificio che copre parte del suo tronco, il che potrebbe interagire con la sua crescita e di conseguenza con il suo comportamento. Di fronte all'edificio e all'albero passa una strada, mentre gli altri lati della pianta sono sostanzialmente liberi e caratterizzati da una distesa di terreno incolto (Fig:1).

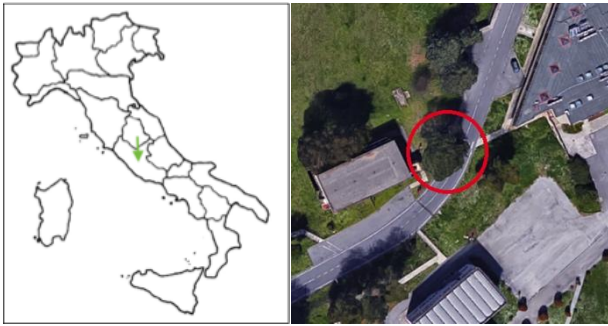


Fig. 1: Geolocalizzazione

Fig. 1: Geolocation

L'albero è alto circa 13 metri e ha un diametro (DBH) di circa 60 centimetri, il sensore è posto ad un'altezza di 11,30 metri.

Il periodo di monitoraggio (51 giorni) è stato, in generale, caratterizzato da venti con basse velocità. In particolare, per 42 giorni è stata registrata una velocità a media oraria inferiore a 4 m/s, mentre soltanto per 9 giornate si è verificata almeno per un'ora una velocità media superiore. Durante questi giorni sono state osservate due direzioni prevalenti del vento: proveniente da Sud-est (Scirocco) e proveniente da Nord-ovest (Maestrale). In queste giornate si è notato un aumento anche dell'energia cinetica turbolenta (TKE).

Come primo passo si è deciso di valutare il comportamento del sistema in condizioni di quiete, ovvero in giornate senza vento. I giorni presi in considerazione appartengono tutti alla stessa settimana di Novembre 2017. Le posizioni dell'albero, durante queste giornate, sono state ottenute attraverso il posizionamento statico e per ogni giorno sono state ricavate le mediane delle coordinate geocentriche.

Tab. 1: Mediane coordinate geocentriche

Tab. 1: Medians geocentric coordinates

Doy	X	Y	Z
	[m]	[m]	[m]
322	4624594.959	1036919.530	4254167.129
323	4624594.963	1036919.523	4254167.137
324	4624594.962	1036919.541	4254167.148
326	4624594.967	1036919.540	4254167.154
328	4624594.971	1036919.539	4254167.159

È presente una ripetibilità nel risultato, infatti la variazione tra le mediane nei diversi giorni è molto bassa, questo significa che la soluzione è stabile.

Relativamente alle stesse giornate di quiete sono state svolte ulteriori indagini statistiche con il fine di conoscere l'accuratezza del sensore. Per le due componenti direzionali, Est e Nord, delle grandezze velocità e posizione, sono state calcolate media, deviazione standard e RMSE (errore quadratico medio). Proprio quest'ultimo ci fornisce un'indicazione sulla bontà dei dati registrati.

Tab. 2: RMSE posizioni

Tab. 2: RMSE positions

Doy	RMSE <sub>E</sub>	RMSE <sub>N</sub>
	[m]	[m]
322	0.061	0.058
323	0.071	0.068
324	0.059	0.047
326	0.068	0.049
328	0.059	0.043

Tab. 3: RMSE velocità

Tab. 3: RMSE velocities

Doy	RMSE <sub>E</sub>	RMSE <sub>N</sub>
	[m/s]	[m/s]
322	0.0020	0.0030
323	0.0020	0.0030
324	0.0020	0.0020
326	0.0020	0.0020
328	0.0010	0.0020

Si può notare osservando i valori dell'RMSE che il sensore è in grado di registrare i movimenti dell'albero con una buona accuratezza: qualche cm per le posizioni e qualche mm/s per le velocità.

Successivamente si è proceduto con il monitoraggio in giornate ventose. In particolare, per un primo studio sono stati presi in considerazione due giorni, 26 Novembre e 17 Dicembre 2017, in cui la velocità del vento supera, almeno per un'ora, i 4 m/s. Il 26 Novembre 2017 (giorno 330 nel calendario GPS) si presenta una situazione molto particolare perché il vento cambia direzione a metà giornata; la mattina è diretto verso Nord-Ovest, mentre il pomeriggio tira verso Sud-Est. Il 17 Dicembre (giorno 351 nel calendario GPS) è invece caratterizzato da vento in direzione Sud-Est.

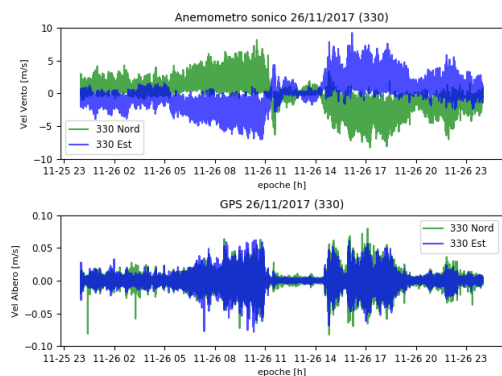


Fig. 2: Velocità vento e albero il 26 Novembre 2017

Fig. 2: Velocities wind and tree 26th November 2017

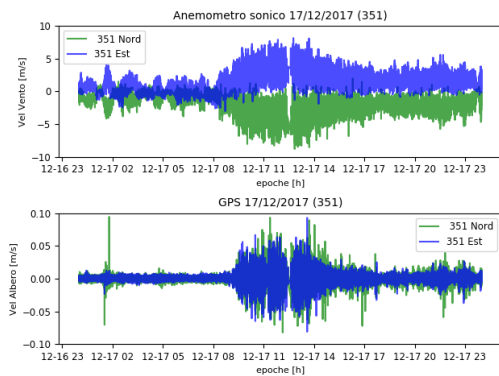


Fig. 3: Velocità vento e albero il 17 Dicembre 2017  
 Fig. 3: Velocities wind and tree 17th December 2017

Le figure 2 e 3 mostrano, dunque, che il sensore GNSS è effettivamente in grado di registrare l'aumento di velocità dell'albero all'aumentare della velocità del vento. È molto importante notare l'effetto di scala tra le due differenti registrazioni (vento-anemometro e albero-GPS) dovuto al fatto che l'albero è un corpo rigido con comportamento non ideale. Inoltre, mentre nel sonico le componenti direzionali risultano distinte, i dati provenienti dal sensore GNSS evidenziano un movimento oscillante dell'albero [Gardiner et al., 2016; De Langre, 2008].

I due fenomeni ventosi avvenuti durante la giornata del 26 novembre possono essere isolati, in modo da confrontare i dati osservati nella fascia pomeridiana con la giornata del 17 dicembre, in cui il vento è stato caratterizzato dalla stessa direzione.

Per analizzare la correlazione tra le due velocità (velocità del vento registrata dall'anemometro sonico e quella dell'albero registrata dal GNSS) sono stati considerati i moduli mediati ogni 60 secondi.

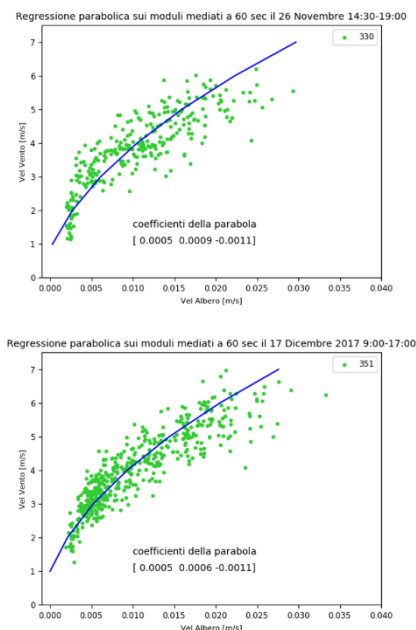


Fig. 4: Correlazione velocità nei giorni in esame  
 Fig. 4: Correlation of velocities on the days studied

Come è possibile notare in Fig.4 la correlazione tra le due grandezze è di tipo parabolico.

Si può inoltre osservare, attraverso i coefficienti della parabola, come l'albero abbia un comportamento univoco a sollecitazioni simili.

Questa univocità è osservabile graficamente nella Fig. 5 raffigurante le planimetrie delle velocità e delle posizioni per entrambi i giorni in esame. Le posizioni assunte dall'albero, registrate attraverso il sensore GNSS, sono coerenti con la direzione in cui soffia il vento ed i pattern dell'albero risultano essere affini a quelli osservati attraverso altre tecnologie [Hassinen et al 1998; Mayer, 1985, 1987, 1989; Amtmann, 1986].

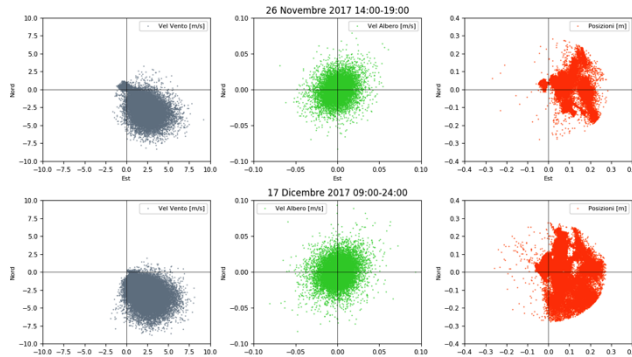


Fig. 5: Planimetria di tutte le grandezze  
 Fig. 5: Planimetry of all quantities

Un ultimo confronto è stato operato tra l'energia cinetica turbolenta (TKE) e la velocità di oscillazione dell'albero.

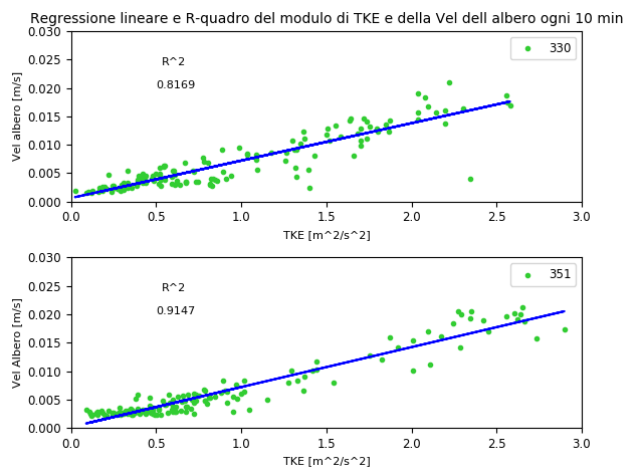


Fig. 6: Confronto TKE-velocità dell'albero  
 Fig. 6: TKE-tree speed comparison

La relazione tra queste due grandezze, coerentemente a tutti i risultati ottenuti fino ad ora, è lineare e ha un coefficiente di correlazione prossimo all'unità.

Infine, è stata svolta un'analisi in frequenza. Attraverso la Trasformata di Fourier, applicata a entrambe le componenti direzionali di velocità di oscillazione dell'albero per

entrambi i giorni in esame, è stato ottenuto lo spettro di frequenza (Fig. 7).

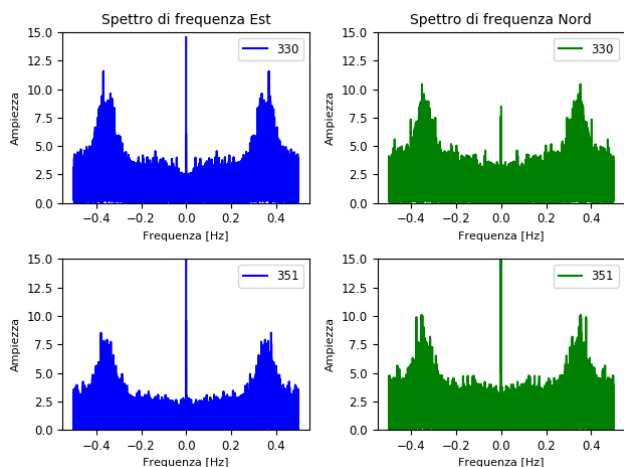


Fig. 7: Spettro di frequenza di entrambe le giornate  
Fig. 7: Frequency spectrum of both days

I picchi di frequenza, in tutti e 4 i casi, si collocano tra 0.3 e 0.4 Hz. Attraverso uno studio più approfondito si è ricavata la frequenza con picco massimo intorno a 0.34 Hz (Tab.4). Si è supposto che proprio questa possa essere la frequenza caratteristica di oscillazione dell'albero.

Tab 4: Picchi di frequenza  
Tab 4: Frequency peaks

Doy	Est [Hz]	Nord [Hz]
330	0.33	0.35
351	0.36	0.34

## Conclusioni

Negli ultimi anni si stanno verificando fenomeni ventosi molto intensi e sempre più frequenti che compromettono la stabilità delle specie arboree. Questo comporta un grave rischio sia fisico che economico in ambiente urbano e non. Lo studio della relazione tra spinta del vento e risposta dell'albero è molto importante al fine di poter prevenire l'eventuale caduta e poter dare un allarme preventivo. Per poter studiare queste relazioni è stato installato un sensore GNSS a singola frequenza sul tronco di un Pino cembro italiano, situato nell'area di ricerca di Monte Libretti CNR RM1, ottenendo risultati molto promettenti. Si è riscontrato, in giorni non ventosi, che l'accuratezza del sensore nel rilevare le velocità e le posizioni assunte dall'albero è rispettivamente di qualche mm/s e intorno a qualche cm; evidenziando robustezza della soluzione nella ripetibilità delle mediane delle coordinate geocentriche. Nei giorni ventosi invece si può osservare come effettivamente il sensore riesca a cogliere l'aumento della velocità di oscillazione dell'albero conseguente all'incremento della velocità del vento. E' stata altresì ricavata una correlazione parabolica tra i moduli delle velocità dell'albero e del vento, mediati ogni 60 sec e notata una risposta univoca ad

eventi di vento simile (stessa direzione). Le posizioni ottenute attraverso il ricevitore GNSS sono risultate essere coerenti con la direzione del vento. La bontà della misurazione è stata confermata ulteriormente con lo studio della relazione tra velocità dell'albero e TKE, che è risultata essere lineare.

Infine, attraverso la trasformata di Fourier sulle velocità dell'albero sono stati ottenuti gli spettri di frequenza, e si evince una frequenza caratteristica dell'albero intorno a 0.34 Hz. Nel futuro si cercherà di automatizzare il sistema e di testarlo su differenti specie (sia monocormiche che policormiche). Il fine ultimo sarà quello di ottenere delle mappature di rischio degli alberi e creare un sistema sensoristico di early warning.

## Bibliografia

- Amtmann R., 1986. Dynamische Windbelastung von Nadelbäumen. Forstliche Forschungsberichte München. No. 74, 218 pp.
- Colosimo G., Crespi M., Mazzoni A., 2011. Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116.B11.
- Amtmann R., 1986. Dynamische Windbelastung von Nadelbäumen. Forstliche Forschungsberichte München. No. 74, 218 pp
- De Langre E., 2008. Effects of wind on plants. Annu. Rev. Fluid Mech., 40: 141-168.
- Hassinen A., Lemettinen M., Peltola H., Kellomaki D., Gardiner B.A., 1998. A prism-based system for monitoring the swaying of trees under wind loading. Agric. For. Meteorol. 90: 187-194.
- Lee, X., Massman, W., Law, B. 2004. Handbook of Micrometeorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 250 p.
- Mayer H., 1985. Baumschwingungen und Sturmgefährdung des Waldes. Wissenschaftliche Mitteilung. Universität München. Meteorologisches Institut. No. 51, 247 pp.
- Mayer H., 1987. Wind-induced tree sways. Trees 1: 195-206.
- Mayer H., 1989. Windthrow. Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. B 324: 267-281.
- Takasu T., Yasuda A., 2009. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. In: International symposium on GPS/GNSS. International Convention Center Jeju Korea, 2009. p. 4-6.
- Gardiner B., Berry P., Moulia B., 2016. Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. Plant Science, 245: 94-118.