



Foto: Jan Willem de Groot

1

Tree Motion Sensor.

Onderzoek naar de relatie en de inclinatie van de wortelplaat

JAN HERMAN WILDSCHUT, BOOMADVIESBUREAU DUIFHUIZEN, EN JAN WILLEM DE GROOT, PIUS FLORIS BOOMVERZORGING NEDERLAND

Samenvatting

Er heeft een onderzoek plaatsgevonden naar de relatie tussen windsnelheid en de inclinatie van de wortelplaat bij stadsbomen. Bij het onderzoek is gebruikgemaakt van Tree Motion Sensoren en een windmeetstation. Uit de onderzoeksresultaten kan geconcludeerd worden dat er een relatie bestaat tussen de windsnelheid en de inclinatie van de wortelplaat. Deze relatie kan worden omschreven als een exponentieel verband tussen de maximale windsnelheid en de maximale inclinatie per tijdsinterval gedurende een meetperiode van minimaal 16 uur. Het sterkste verband werd aangetoond bij een tijdsinterval van 60 minuten.

Inleiding

De stabiliteit van bomen is een regelmatig terugkerend onderwerp van onderzoek binnen de boomveiligheidsanalyse. Doel van het stabiliteitsonderzoek is het beoordelen van de windworpvastheid van een boom, ofwel het bepalen van de kans dat de verankering van een boom zal bezwijken en de boom zal omvallen. In de afgelopen decennia is op dit gebied uiteenlopend onderzoek verricht. De onderzoeken hebben zich enerzijds gericht op het mechanisme van de stabiliteit, zoals dat gevormd wordt door beworteling en bodem. Anderzijds zijn de factoren onderzocht die van invloed zijn op de stabiliteit. Hiervan is de wind de belangrijkste. Op grond van deze onderzoeken zijn bepaalde methodieken ontwikkeld ter beoordeling van de boomstabiliteit. Deze methodieken worden inmiddels algemeen gebruikt binnen het boomveiligheidsonderzoek. De oudste en bekendste is de zogeheten statische boomtrekproef. Bij deze methode wordt een mechanische kracht op de boom uitgeoefend waarbij de optredende kanteling van de wortelplaat wordt gemeten. Een minder toegepaste en meer recente is de Tree Motion Sensor-methode (TMS). Hierbij wordt tijdens een natuurlijke (dynamische) windbelasting de kanteling (inclinatie) van de wortelplaat gemeten. De TMS-methode is nog volop in ontwikkeling. Een belangrijke verbetering van deze methode is de combinatie met windmeting op locatie.

Met de verbeterde TMS-methode kan de stabiliteit bij hogere windsnelheden nauwkeuriger worden ingeschat. Hiertoe dient het verband tussen de windsnelheid en de inclinatie van de wortelplaat bekend te zijn. In dit onderzoek wordt deze relatie geanalyseerd op grond van metingen met behulp van Tree Motion Sensoren in combinatie met windmetingen.



2 Windmeetstation.

Foto: Jan Herman Wildschut

tussen de windsnelheid ortelplaat bij stadsbomen

Achtergrond

De wind oefent een kracht uit op de bovengrondse delen van een boom. Deze krachten veroorzaken een belasting (hoek-, draai- of krachtmoment) op het gedeelte van de boom op maaiveldniveau, de stamvoet. Deze belasting wordt tegengestaan door de in de bodem verankerde wortels en voornamelijk door het gedeelte met de stabiliteitswortels, in het vervolg aangeduid als 'de wortelplaat'. De sterkte van deze wortelverankering is afhankelijk van een complex geheel van interacties tussen wortels en bodem (Coder, 2010). Het krachtmoment zorgt ervoor dat de wortelplaat bij een bepaalde windbelasting enigszins een kantelende beweging maakt. De draaihoek of inclinatie van de wortelplaat is daarom een functie van het op de wortelverankering uitgeoefende krachtmoment.

Het meten van de inclinatie van de wortelplaat kan gebruikt worden als een methode om de sterkte van de wortelverankering te bepalen. Het verband tussen belasting (krachtmoment) en inclinatie is experimenteel onderzocht door Wessolly (SAG Baumstatik) bij meer dan 400 bomen (Wessolly, 1996). Er kon een verband aangetoond worden dat onafhankelijk is van boomtype of afmeting en dat bekend staat als de 'Generalized Tipping Curve', ofwel kiepcurve. De kiepcurve kan wiskundig beschreven worden als een exponentiële functie. Volgens de kiepcurve kunnen bomen belast worden tot een maximale inclinatie van de wortelplaat van $2,5^\circ$. Dit is de drempelwaarde waarboven geen extra kracht nodig is om de boom omver te trekken (Wessolly, 1996). Bij statische boomtrekproeven

werden de eerste tekenen van het bezwijken van wortels waargenomen bij een inclinatie van de wortelplaat tussen $0,50^\circ$ en 2° (Coutts, 1983, Blackwell et al, 1990).

Relatie windsnelheid en inclinatie
De kwantitatieve relatie tussen de windsnelheid en de op de boom uitgeoefende kracht is op verschillende wijzen onderzocht met uiteenlopende bevindingen. De meeste auteurs geven de voorkeur aan een lineair verband boven het, uit de bouwkunde bekende, kwadratische verband (Mayhead, 1973, Smiley et al., 2000). Cullen concludeert dat het conventionele, kwadratische verband geldt is voor bomen (Cullen, 2015). Ook Hale vond bij bomen in bosopstanden een sterk (lineair) verband tussen het maximale krachtmoment per

uur en het kwadraat van de gemiddelde windsnelheid per uur (Hale, 2010). Göcke en Rust constateerden een correlatie tussen regionale windsnelheid en de inclinatie van de wortelplaat, die het best kan worden omschreven door een exponentiële of een machtsfunctie (Göcke & Rust, 2015). Ken James (James, 2010) heeft het gedrag van bomen onderzocht onder invloed van natuurlijke, dynamische windbelasting. James wijst op het zeer complexe bewegingspatroon van bomen tijdens een windbelasting. Centraal in zijn onderzoek staat het begrip massademping. In de boom vindt een interactie plaats tussen meerdere dynamische massa's (takken), waardoor op boomniveau demping van de beweging veroorzaakt wordt. Bomen zijn flexibele objecten waarvan de eigen frequentie uiteraard niet 'in fase' is met de in kracht veranderlijke wind. Hierdoor behoeft de maximale windstoot in een bepaald tijdsinterval niet te corresponderen met een maximale belasting (en inclinatie) van de wortelplaat. Door andere auteurs wordt gesteld dat de grootste invloed op de stabiliteit van een boom wordt uitgeoefend door een plotselinge maximale windbelasting veroorzaakt door windstoten (Brudi & Van Wasenaer, 2002).

Onderzoek

Het doel van ons onderzoek was het bepalen van een kwantitatieve relatie tussen de lokaal gemeten windsnelheid en de inclinatie van de wortelplaat. Eerder experimenteel (kwantitatief) onderzoek richtte zich ofwel op de relatie tussen windsnelheid en belasting (krachtmoment) dan wel op die tussen belasting en inclinatie. Het enige bekende kwantitatieve onderzoek naar de relatie tussen windsnelheid en inclinatie maakte gebruik van regionale (uur) winddata (Göcke & Rust, 2015). Het overige onderzoek naar de relatie tussen windsnelheid en inclinatie was voornamelijk modelmatig van aard (Ken James, 2010). De beperkingen van ons onderzoek bevonden zich voornamelijk op het gebied van

de windmeting. Wat er gemeten werd, was de windsnelheid op een bepaalde afstand van de boom, op een bepaalde hoogte (10 meter) en aan een bepaalde zijde van de boom. Verder kon met de gebruikte windmeter slechts de horizontale component van de wind gemeten worden. Gezien het zeer complexe karakter van de wind is het mogelijk dat bepaalde optredende windstoten wél de boom beïnvloeden maar niet als zodanig geregistreerd worden terwijl wel-geregistreerde windgebeurtenissen niet of nauwelijks van invloed zijn op de beweging van de boom.

Methode Tree Motion Sensoren

Om de inclinatie te meten is gebruik gemaakt van Tree Motion Sensoren die zijn geproduceerd door Argus Electronic GmbH uit Duitsland. De sensoren (afbeelding 1), uitgerust met gps en UTC-tijdregistratie, registreren de kanteling van de wortelplaat met een frequentie van 20 Hz en een nauwkeurigheid van $0,01^\circ$. Per boom is op een hoogte van circa 10 meter boven maaiveld één sensor op de stamvoet geplaatst.

Windmeter

De winddata zijn verzameld met behulp van een mobiel windmeetstation. Dit windmeetstation (afbeelding 2) bestaat uit een pneumatische mast waarop een 3 cup-anemometer en een windvaan zijn bevestigd. De data zijn met behulp van een datalogger en router vastgelegd met UTC-tijdsaanduiding. De windsnelheid is gemeten op een hoogte van 10 meter. De meetfrequentie van windsnelheid en windrichting bedroeg 1 Hz.

Analyse van data

De analyse van de winddata en de inclinatiedata is uitgevoerd met behulp van het programma TMS Expert, ontwikkeld door Argus Electronic GmbH. Met dit programma is het mogelijk de relatie te analyseren tussen de gemeten maximale windsnelheid en de gemeten maximale inclinatie van de wortelplaat gedurende verschillende tijdsintervallen.



3

De twee onderzochte *Picea abies* met op de voorgrond het windmeetstation.

Onderzoeklocatie 1 Veenendaal Werkwijze

De bomen in Veenendaal betreffen twee volwassen fijnsparren (*Picea abies*). De bomen zijn qua afmetingen vrijwel identiek. De boomhoogte is ongeveer 18 meter, de kroon diameter 9 meter en de stamdiameters, gemeten op 130 cm boven maaiveld, zijn 53 cm (boom 1) en 56 cm (boom 2). De bomen staan deels in de verharding. De metingen bij de *Picea abies* zijn verricht op 31 maart 2015 en 1 april 2015, gedurende een periode van 17 uur. Het windmeetstation bevond zich op een afstand van ongeveer 10 meter vanaf de bomen (afbeelding 3).

Figuur 1 Meetdata van boom 2 gedurende een meetperiode van 90 minuten. De best passende kromme (exponentiële functie) bij een maximale inclinatie per 1 seconde (links) en 10 seconden (rechts).

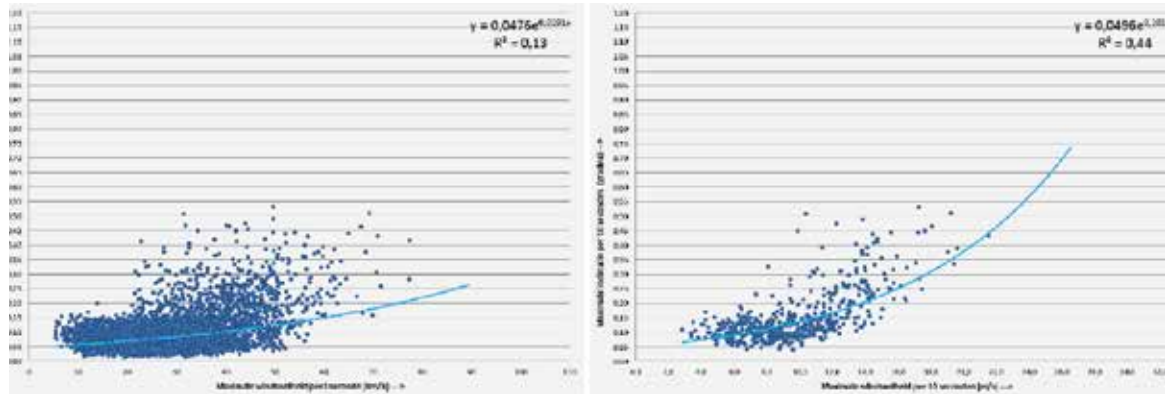
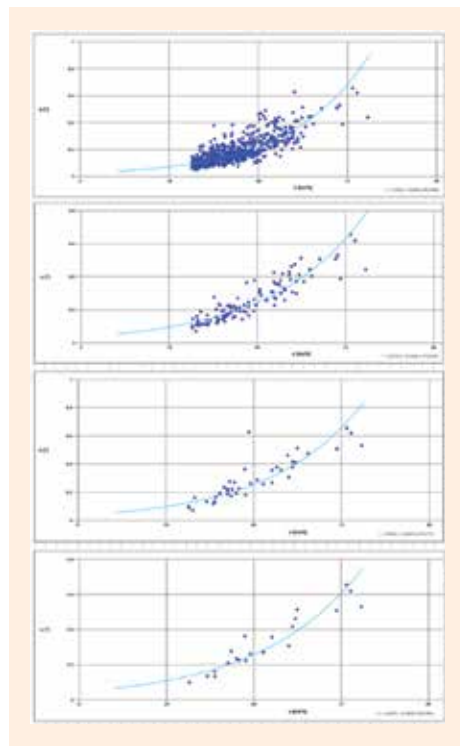


Foto: Jan Herman Wildschut



Tabel 1 De correlatiecoëfficiënt (R^2) bij verschillende tijdsintervallen.

Tijdsinterval	R^2 bij boom 1	R^2 bij boom 2	Verband
1 seconde	0,22	0,13	Zwak
10 seconden	0,47	0,44	Matig
1 minuut	0,56	0,66	Sterk
10 minuten	0,77	0,81	Sterk/Zeer sterk
30 minuten	0,74	0,76	Sterk/Zeer sterk
60 minuten	0,88	0,84	Zeer sterk

Tabel 2 Toelichting op sterkte van het verband bij de correlatiecoëfficiënt.

R^2	Verband
< 0.10	Zeer zwak
0.10 – 0.25	Zwak
0.25 – 0.50	Matig
0.50 – 0.75	Sterk
0.75 – 0.90	Zeer sterk

< Figuur 2 Best passende krommen (exponentiële curve) bij *Picea abies* (boom 2) voor de tijdsintervallen van 1, 10, 30 en 60 minuten.

Resultaten en analyse

Tijdens de meting is een maximale windsnelheid gemeten van 77 km/h. De heersende windrichting was noordwest. De gemeten maximale inclinaties van de wortelplaat bedroegen $0,50^\circ$ (boom 1) en $0,65^\circ$ (boom 2). De experimentele data zijn weergegeven door een verzameling datapunten, die het verband aangeven tussen de gemeten windsnelheid (onafhankelijke variabele) en de gemeten inclinatie (afhankelijke variabele). Als minimale windsnelheid is 30 km/h aangehouden omdat lagere windsnelheden nauwelijks inclinatie van de wortelplaat veroorzaken. Omdat de inclinatie en de windsnelheid met verschillende frequenties gemeten worden, is bij de analyse gekozen

voor de maximale waarden per tijdsinterval. Door middel van regressie is de best passende kromme ('trendlijn') bepaald bij de verzameling datapunten. Omdat de literatuurgegevens wijzen in de richting van een niet-lineair verband tussen beide variabelen is gekozen voor niet-lineaire regressie, waarbij de best passende, exponentiële curve is bepaald. Voor dit laatste is gekozen op grond van het in de algemene kiepcurve aanwezige exponentiële verband tussen krachtmoment en inclinatie. Bij de regressie is de correlatiecoëfficiënt (R^2) bepaald. Deze geeft de sterkte weer van het veronderstelde verband. In figuur 1 zijn de experimentele meetdata weergegeven van boom 2.

Een meetinterval van 90 minuten is geselecteerd, waarbinnen hoge windsnelheden zijn opgetreden. In de grafiek geeft elk meetpunt de maximale inclinatie per seconde van de wortelplaat weer bij de tijdens die seconde gemeten windsnelheid. De vorm van de verzameling meetpunten maakt duidelijk dat het verband tussen de windsnelheid en de inclinatie zwak is. De best passende kromme heeft voor een exponentieel verband een lage R^2 (0,13), hetgeen betekent dat er per seconde een zwak verband aanwezig is. Wanneer het tijdsinterval vergroot wordt tot 10 seconden wordt het verband sterker (figuur 1), maar nog steeds is er sprake van een zwak verband (R^2 0,44).

Vervolgens zijn voor beide bomen (1 en 2), voor de gehele meetperiode van 17 uur, voor verschillende tijdsintervallen (1,10,30,60 minuten) de best passende krommen bepaald voor de maximale windsnelheid en de maximale inclinatie per tijdsinterval. In figuur 2 zijn deze krommen weergegeven van boom 2.

De correlatiecoëfficiënt (R^2) voor beide bomen is voor de verschillende tijdsintervallen weergegeven in tabel 1. In tabel 2 wordt de sterkte van het verband behorend bij de getalswaarde de R^2 omschreven. Duidelijk is dat de R^2 toeneemt bij verlenging van het tijdsinterval. Bij een tijdsinterval van 60 minuten blijkt het verband zeer sterk te zijn (R^2 bomen 0,88

respectievelijk 0,84).

Het zwakke verband bij de lage tijdsintervallen moet worden toegeschreven aan het dynamische karakter van de relatie tussen de wind (kracht en richting) en de beweging van de boom. Hierdoor heeft in een bepaald tijdsinterval de gemeten maximale windsnelheid niet altijd samen te vallen met de gemeten maximale inclinatie van de wortelplaat. Dit kan in de eerste plaats verklaard worden door de dynamische interactie tussen de wind(belasting) en de boom(beweging).

Ken James beschrijft de dynamische factoren binnen dit mechanisme als volgt: '1. time variations of both load and response, 2. 'inertial forces oppo-

sing accelerations produced by dynamic loads' (James, 2010, pagina 6).

Ten tweede kan de zwakte van het verband verklaard worden door de reeds eerder genoemde beperkingen van het onderzoek: de afstand tussen de windmeter en de boom en de variabele windrichting. Wat dit laatste betreft: tijdens de meting varieerde de gemeten windrichting per seconde tussen 236° tot 329° (zuid- tot noordwest). Identieke windsnelheden met verschillende windrichting kunnen een verschillende inclinatie tot gevolg hebben, omdat de boom rondom niet overal even sterk verankerd is.

Een verklaring voor de stijgende



Onderzoekslocatie 2 Loosdrecht Werkwijze

De boom in Loosdrecht is een vrij uitgroeiende Canadese populier (*Populus x canadensis*), die staat in een tuin. De boom heeft een stamdiameter van 178 cm gemeten op 130 cm boven maaiveld. De kroondiameter van de boom is 21 meter en de hoogte is 25 meter. De metingen bij de *Populus canadensis* zijn uitgevoerd op 27 en 28 maart 2016, gedurende een periode van 31 uur. De windmeter stond op een afstand van 13 meter vanaf boom (afbeeldingen 4, 5).

Resultaten en analyse

Tijdens de meting is een maximale windsnelheid gemeten van 64 km/h. De heersende windrichting was zuidzuidwest. De gemeten maximale inclinatie van de wortelplaat bedroeg $0,15^\circ$. Figuur 4 geeft de voor de meetperiode gemeten maximale inclinaties weer, samen met de maximale windsnelheden gedurende een bepaald tijdsinterval. Bij grotere tijdsintervallen komt het verloop van beide lijnen steeds meer overeen. Figuur 5 geeft de best passende krommen (exponentieel

verband) weer voor de verschillende tijdsintervallen. In tabel 2 zijn de bijbehorende correlatiecoëfficiënten weergegeven.

Conclusie

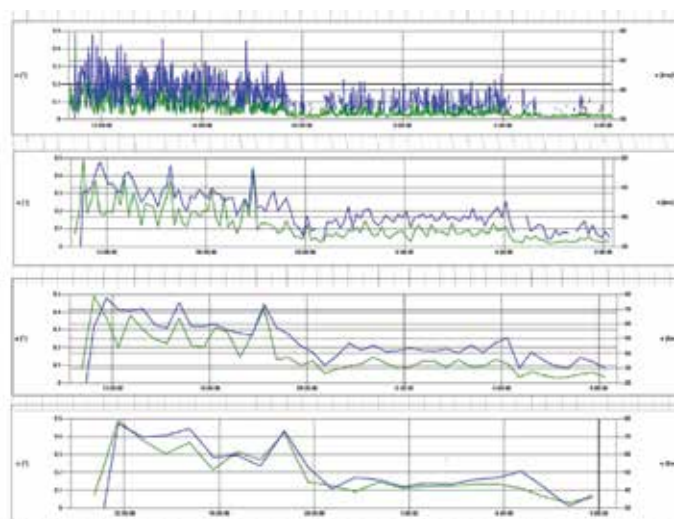
Er is een relatie aangetoond tussen de maximale windsnelheid per tijdsinterval en de maximale inclinatie van de wortelplaat per tijdsinterval. Deze relatie kan beschreven worden als een exponentieel verband dat het sterkste is bij een tijdsinterval van 60 minuten..

Figuur 4 Maximale windsnelheid (blauw) en maximale inclinatie wortelplaat (groen) op basis van 1, 10, 30 en 60 minuten. >

Figuur 3 Maximale windsnelheid (blauw) en maximale inclinatie wortelplaat (groen) op basis van 1, 10, 30 en 60 minuten. >

waarde van R^2 bij verlenging van het tijdsinterval is de veronderstelling dat bij een groter tijdsinterval de kans groter wordt dat de maximale inclinatie binnen dat tijdsinterval op hetzelfde moment optreedt als de maximale windsnelheid binnen dat tijdsinterval. In figuur 3 komt dit duidelijk naar voren. Hierin zijn voor de meetperiode de gemeten maximale inclinaties weergegeven samen met de maximale windsnelheden gedurende een bepaald tijdsinterval. Bij grotere tijdsintervallen komt het verloop van beide lijnen steeds meer overeen.

Zie ook de tabellen op bladzijde 7.



Conclusie

Er is een relatie aangetoond tussen de maximale windsnelheid per tijdsinterval en de maximale inclinatie van de wortelplaat per tijdsinterval. Deze relatie kan beschreven worden als een exponentieel verband dat het sterkste is bij een tijdsinterval van 60 minuten.

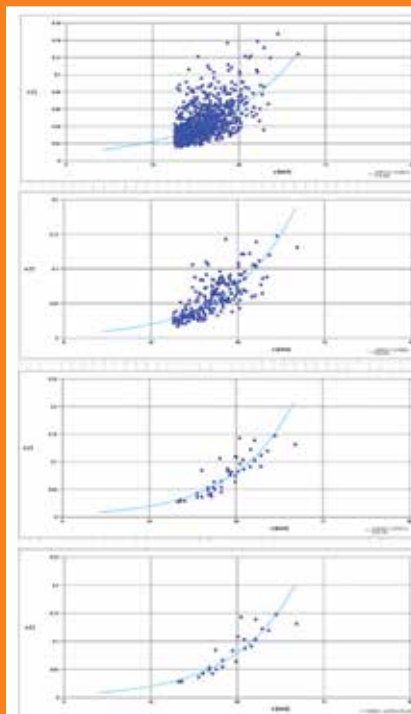
Conclusie

Uit de onderzoeksresultaten kan geconcludeerd worden dat er een relatie bestaat tussen de windsnelheid en de inclinatie van de wortelplaat. Deze relatie kan worden omschreven als een exponentieel verband tussen de maximale windsnelheid en de maximale inclinatie per tijdsinterval gedurende een meetperiode van minimaal 16 uur. Het sterkste verband werd aangetoond bij een tijdsinterval van 60 minuten.

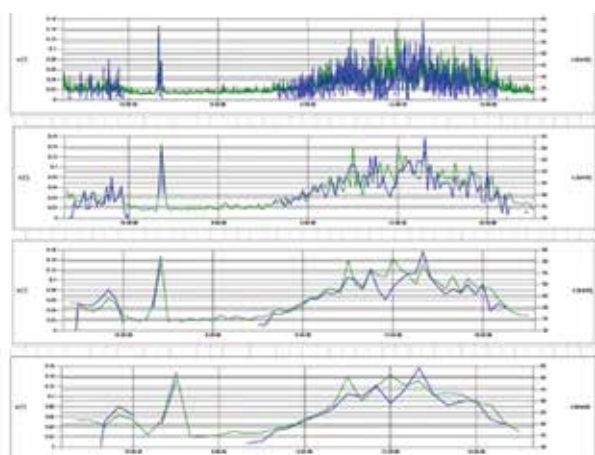
Het bestaan van een (kwantitatieve) relatie tussen de windsnelheid en de inclinatie van de wortelplaat biedt perspectieven met betrekking tot het voorspellen van inclinaties bij hogere windsnelheden. Bij lagere windsnelheden gemeten inclinaties van de wortelplaat kunnen, in geval van een aangetoond sterk verband, worden geëxtrapoleerd naar de verwachte maximale inclinatie van de betreffende boom bij een verwachte maximale windsnelheid.

Een stabiliteitsonderzoek met behulp van Tree Motion Sensoren in combinatie met windmeting geeft een realistisch beeld van de dynamische belasting van de wortelplaat. Bij de bestaande onderzoeksmethoden, zoals de statische boomtrekproef, wordt de maximale windbelasting van de boom berekend aan de hand van een aantal factoren. Deze factoren hebben, juist in een stedelijke omgeving, een hoge mate van onzekerheid. Het op deze wijze simuleren van de windbelasting van een boom neemt de dynamische aspecten niet of onvoldoende mee.

De beperkingen van de in dit onderzoek gebruikte dynamische onderzoeksmethodiek bevinden zich op het gebied van de windmeting en de interpretatie van de winddata. Met name de invloed van de windrichting dient nader onderzocht te worden.



Figuur 5 Best passende krommen (exponentiële curve) bij *Populus canadensis* voor tijdsintervallen van 1, 10, 30 en 60 minuten.



Literatuur Blackwell, P.G., Rennolls, K., Coutts, M., 1990. A root anchorage model for shallowly rooted Sitka spruce. *Forestry* 63, 73-91. | Brudi, E., Van Wassenae, P., 2002. *Trees and statics: non-destructive failure analysis*. | Coder, K.D., 2010. *Root strength and tree anchorage*, 5,17. | Coutts, M.P., 1983. *Root architecture and tree stability*. *Plant Soil* 71, 171-188. | Cullen, S., 2015. *Trees and wind: a practical consideration of the drag equation velocity exponent for urban tree risk management*. *Journal of Arboriculture* 31(3). | Göcke, L., Rust, S., 2015. *Correlation of windspeed and root plate tilt of trees*. | James, K. R., 2010. *A dynamical structural analysis of trees subject to wind loading*. | Wessolly, L., 1996. *Explanation of the Tipping Process*, *Stadt und Grün*, no.4, 268-272.