

Inleiding

In dit artikel wordt getracht een kwalitatieve beschrijving te geven van het dynamische gedrag van bomen in turbulente luchtstromingen. Als zodanig is het een aanvulling op de theoretische beschouwing van Faber (1975) met betrekking tot stabiliteit. Centraal staat de vraag hoe de energie, die op een boom in een turbulente luchtstroom wordt overgedragen, door de boom vervolgens wordt verspreid naar zijn omgeving. Dempingsaspecten spelen hierbij een belangrijke rol.

Wind

Wind ontstaat wanneer onder invloed van luchtdrukverschillen, Corioliskracht, wrijvingskracht en centrifugaalkracht een luchtmassa in beweging komt. In het gedeelte van de atmosfeer waarin bomen voorkomen, zijn luchtstromingen volledig turbulent. Turbulentie wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van variaties in windsnelheid en windrichting op allerlei schaal. De statistische beschrijving van wind is tamelijk gecompliceerd. Belangrijk om te weten is dat in een turbulente luchtstroming nabij het aardoppervlak alle trillingen met een frequentie tussen 10^{-3} Hz en 10 Hz continu aanwezig zijn. Omdat de laagste eigen frequentie van bomen tussen 0,2 Hz en 1 Hz ligt (White et al., 1976), houdt dit in dat de eigen frequentie van een boom altijd aanwezig is in een windspectrum. Met "de" eigen frequentie wordt de laagste frequentie bedoeld waarbij resonantie optreedt. In een boom kunnen verschillende eigen frequenties tegelijk aanwezig zijn. Gebleken is echter (White et al., 1976), dat de laagste eigen frequentie dan altijd dominant aanwezig is.

Komt nu een bepaalde frequentie, gelijk aan de eigen frequentie van een boom, enige tijd dominant voor in de turbulente wind, dan wordt de boom in trilling gebracht. De boom kan door de wind in zodanige trilling worden gebracht, dat de uitwijking steeds groter wordt totdat de boom uiteindelijk afbreekt of ontworteld wordt. Ook kan het gebeuren dat de boom via een stootkracht (impuls) in één keer omwaait. In beide gevallen wordt door de wind een hoeveelheid energie op de boom overgedragen, die vervolgens door de boom

Summary

Some dynamical aspects of wind and trees are discussed with regard to windthrow. The keypoint in this process is, how the energy transmitted to a tree in a turbulent wind, will be dispersed by the tree to its environment. Damping aspects seem to be critical. The consequences of heavy thinning on the damping aspects of a tree are briefly discussed (tabel 1). To enhance stand stability in practical forest management an optimum has to be found: on the one hand to stimulate lateral root development, thereby increasing the anchorage of the tree, but on the other hand keeping the stand densely enough, to allow a maximum dispersal of energy from the tree to its environment.

moet worden verspreid. Dit kan in de richting van de bodem, naar in de buurt staande bomen, of terug naar de luchtlag gebeuren. Of een boom ten gevolge van de op hem overgedragen energie omwaait of blijft staan, hangt af van de fysische eigenschappen van het complex dat bestaat uit kroon, stam, wortelstelsel en bodem en van de mate waarin de energie op de buurbomen en de lucht kan worden overgedragen.

Boom

Allereerst enige opmerkingen over de fysische eigenschappen van bomen: het ligt voor de hand dat het onderzoek hiernaar zich allereerst heeft geconcentreerd op de vraag of bomen opgevat mogen worden als homogene, elastische lichamen, omdat ze in dat geval aan betrekkelijk eenvoudige fysische wetmatigheden zouden voldoen, bijvoorbeeld met betrekking tot trillingsfrequentie en -uitwijking (amplitude). In de literatuur zijn twee belangrijke publikaties te vinden die zich bezighouden met de fysische eigenschappen van bomen met betrekking tot de mechanische stabiliteit, namelijk Petty en Worrell (1981) en McMahon en Kronauer (1976).

Petty en Worrell hebben de doorbuiging van bomen onderzocht onder belasting door sneeuw en de invloed van langdurige belastingen op de elasticiteitsmodulus.

De elasticiteitsmodulus geeft de betrekking aan tussen de relatieve lengteverandering en de spanning in het lichaam beneden de elasticiteitsgrens, dus binnen het gebied waarin het lichaam zich elastisch gedraagt. Uitgaande van de veronderstelling dat de stam zich elastisch gedraagt en uit min of meer homogeen materiaal is opgebouwd, kwamen Petty en Worrell tot drie vergelijkingen die de doorbuiging van de stam beschrijven, afhankelijk van de stamvorm. Na toetsing in de praktijk bleek dat hun beschrijvingen van de doorbuiging goed overeenkwamen met de werkelijkheid. Bij langduriger belastingen bleek echter, dat de elasticiteitsmodulus van de stam tot 50% kon teruglopen. Dit geeft aan dat de veronderstelling dat bomen zich elastisch gedragen niet helemaal juist is. Deze geldt niet voor langdurige belastingen.

McMahon en Kronauer beschrijven een aantal modellen voor een boom. Van die modellen waren de fysische eigenschappen bekend. Door metingen van trillingseigenschappen van echte bomen werd nagegaan welk model het beste overeenkomt met de werkelijkheid.

Uit beide onderzoeken blijkt dat naaldbomen zich niet helemaal identiek aan staven van homogeen materiaal gedragen. Toch kunnen met elastische staven van homogeen materiaal de trillingseigenschappen van bomen in grote lijnen benaderd worden. Dit nu is een belangrijk gegeven. Hierdoor wordt het eenvoudiger te begrijpen aan welke krachten en reactiekrachten een boom in trilling komt bloot te staan. Trilling en demping hangen nauw met elkaar samen.

Demping

Brengt men een staaf, of een boom, in trilling, dan blijkt na verloop van tijd, dat de trillingsuitwijking minder is geworden, oftewel dat de trilling enigszins is gedempt. Verantwoordelijk hiervoor is de omzetting van bewegingsenergie in wrijvingsenergie (deels door de verticale arbeid van het verplaatsen van luchtdeeltjes, deels aan het verankeringspunt van de trillende staaf) en in warmte (via geleiding en straling). Een sterke demping wil dus zeggen een snelle verspreiding van de opgenomen energie. De mate van demping moet altijd beschouwd worden in relatie tot de hoeveelheid op de boom overgedragen energie en de wijze waarop en de snelheid waarmee de boom deze weer doorgeeft aan zijn omgeving. Is de demping in de boom zeer groot en moet er relatief veel energie ineens door de boom via zijn stam en wortelstelsel aan de bodem worden overgedragen, dan zullen er grote spanningen in de stam en het wortelstelsel ontstaan en de kans is groot dat de boom breekt of ontworteld wordt. Of een boom breekt of ontworteld wordt, hangt af van de plaats waar de maximale reactiekracht op de trilling

het eerst overschreden wordt. Indien de maximale reactiekracht in de stam lager is dan in het complex van bodem en wortelstelsel, dan breekt de stam, anders breekt het complex van bodem en wortelstelsel, oftewel ontworteling. Petty en Worrell (1981) vonden dat de verankering door de wortels een maximale reactiekracht kan leveren die qua grootte goed overeenkomt met de maximale reactiekracht die de stam kan leveren. Ofschoon het in de praktijk vaak blijkt, dat bij een gezonde boom de verankering zodanig is dat de boom eerder ontworteld wordt dan dat de stam breekt, is het verschil dus gering.

Mayhead et al. (1975) vatten een boom op als een samenstelling van verschillende lichamen, die onafhankelijk van elkaar kunnen trillen. In dit model kunnen de takken van een boom een deel van de opgenomen energie verspreiden, doordat ze als onafhankelijke trillende massa's de trilling in de stam uitdempen. Demping kan in een boom dus op verschillende manieren plaatsvinden:

- 1 Aerodynamische demping van de kroon. Hoe groter het kroonvolume en de ingesloten hoeveelheid lucht, hoe sterker de demping. Deze is afhankelijk van de afmetingen en de architectuur van de boom, van de standplaats en van beheersmaatregelen.
- 2 Mechanische demping van de kroon. De verschillende takken, twijgen en de topscheut hebben allemaal een andere eigen frequentie, en kunnen daardoor de trilling van de stam uitdempen.
- 3 Demping doordat de boom met zijn kroon tijdens het trillen tegen de kronen van zijn buurbomen aanslaat, en op deze manier energie overdraagt.
- 4 Demping door verplaatsingen van de stamvoet.
- 5 Demping in het complex dat bestaat uit wortelstelsel en bodem. Dit hangt samen met het rekken en strekken van de wortels, waarbij energie op de bodem wordt overgedragen.

Uit proeven van Mayhead et al. (1975) blijkt, dat de kroondemping een belangrijke factor vormt in de verspreiding van energie naar de omgeving toe. Ter vergelijking: de dempingverhouding van naaldbomen ligt in de orde van grootte van 0,11, d.w.z. dat de trillingsenergie bij een volledige trilling steeds met 11% afneemt, mits er geen nieuwe energie wordt toegevoerd. Voor volledig ontakte stammen van dezelfde bomen was de dempingsverhouding 0,03; bijna een factor 4 verschil.

Deze vorm van demping mag echter niet te groot zijn, want dan wordt de spanning in de stam en het wortelstelsel te groot. Demping in de kroon als gevolg van contacten met buurbomen moet daarentegen liefst zo groot mogelijk zijn. Hierdoor wordt de energie snel op de omgeving overgedragen zonder dat de stam en het wortelstelsel (over)belast worden.

Tabel 1 Invloed van sterke dunning op de dempingsaspecten van een boom.

dunning heeft tot gevolg	dempingsaspect	effect op demping
kroon wordt breder en langer	aerodynamische kroondemping	"zeil"-oppervlak neemt toe, daardoor grotere uitwijking boom, met als gevolg grotere dempingsverhouding (tot 35% groter)
zwaardere takken	mechanische kroondemping	takken met verschillende diameter en lengte en daardoor verschillende eigen frequentie; kroongewicht groter, veroorzaakt grotere demping
minder krooncontact	buurboom demping	minder verspreiding van energie naar buurbomen
	bewegingen van stamvoet	onbekend, maar in geen geval groot
betere ontwikkeling zijwortels	wortelstelsel/bodemcomplex demping	breed, vlak wortelstelsel geeft steviger verankering dan smal en diep wortelstelsel (Fraser & Gardiner, 1967; Nielsen, 1982)

Invloed beheersmaatregelen

Voor de praktijk van de bosbouw is het van belang om na te gaan op welke wijze men via dunningsingrepen invloed uit kan oefenen op de dempingskarakteristieken van een boom. In tabel 1 worden de gevolgen van een sterke dunning of een ruim plantverband op de demping weergegeven. Door sterke dunning wordt de ontwikkeling van het wortelstelsel en daardoor de verankering, gunstig beïnvloed (Kuiper en Van Schooten, 1985). Men zal dus een optimum moeten vinden tussen een maximale verankering en een maximale verspreidingsmogelijkheid van de energie naar de omgeving.

Op extreem blootgestelde groeiplaatsen, waar men nieuwe bossen wil aanleggen, is de boomsoortenkeuze met betrekking tot het windworprisco belangrijk, omdat men de voorkeur kan geven aan soorten met een lage wrijvingscoëfficiënt. Deze zullen onder belas-

Table 1 Consequences of heavy thinning for the damping aspects of a tree.

consequences of thinning	damping aspect	effect on damping
<i>crown width and length increases</i>	<i>aerodynamic crown damping</i>	<i>"sail"-area increases resulting in a greater deflexion of the tree and in an up to 35% increase in damping ratio</i>
<i>It appeared from pruning experiments (Mayhead et al., 1975) that the lower half of the crown could be removed without significantly influencing the damping ratio.</i>		
<i>heavier branches</i>	<i>mechanical crown damping</i>	<i>branches will vary in diameter and length, and thereby vary in frequency also; crown weight increases, resulting in a greater damping ratio</i>
<i>less crown contacts</i>	<i>neighbour tree damping</i>	<i>less dispersion of energy to neighbouring trees</i>
	<i>movements of tree base</i>	<i>unknown, likely to be neglectable</i>
<i>better lateral root development</i>	<i>root system/soil complex damping</i>	<i>a tree with a flat and wide root system is more firmly anchored than a tree with a narrow but deep root system</i>

ting door wind een betere stroomlijning vertonen en daardoor minder energie opnemen uit de luchtstroom. Het gevolg is dat de amplitude van de trilling relatief klein blijft. Op groeiplaatsen waar het bestaande bos extreem hoge risico's loopt met betrekking tot wind schade, zal men soms vervroegd moeten oogsten om een windbestendiger bos aan te leggen. Onder dergelijke omstandigheden kan men voorts overwegen om in het geheel niet te dunnen, zoals o.a. door de Forestry Commission in Groot-Brittannië wordt aanbevolen voor extreme situaties (Savill, 1983). Door niet te dunnen is de demping ten gevolge van het contact met de kronen van buurbomen maximaal en zijn er geen aangrijpingspunten voor de wind. Stabiliteit op opstandsniveau prevaleert in dit geval boven een maximale stabiliteit van de individuele boom. Het risico van een dergelijke "maatregel" is, dat als er een boom omwaait en er zodoende een aangrijpingspunt ontstaat, de gevolgen dan zeer ernstig kunnen zijn. Voor windworpgen-

voelige naaldboomopstanden kan men voorts overwegen om in de buitenste rand een, van buiten naar binnen toe afnemend aandeel loofhout aan te planten. Dit heeft twee voordelen:

1 het winterkale loofhout geeft een opener structuur aan de opstandsrand waardoor deze niet als "muur" gaat fungeren waarachter riskante wervelingen kunnen ontstaan;

2 het winterkale loofhout heeft eigen frequenties die sterk van naaldhout afwijken en kan daardoor de naaldbomen sterker dempen via krooncontact.

Het gevolg hiervan is dat er een "ruggegraat" gecreëerd wordt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat de dempingsmogelijkheden over het potentiële dempingsinterval van twee soorten samen, groter zijn dan binnen het interval van een enkele soort. Waarschijnlijk is dit een factor geweest in de evolutie van boomsoorten of herkomsten die van nature in gemengde opstanden voorkomen (Oldeman, pers. meded.). In zuivere naaldhoutopstanden kan men het eerstgenoemde voordeel ook verkrijgen door de rand sterker te dunnen dan het midden van de opstand (Savill, 1983).

Voor minder extreme situaties moet zoals gezegd gezocht worden naar een optimum tussen een sterke verankering en een snelle verspreiding van energie. Het eerste impliceert voldoende groeiruimte, terwijl het tweede juist bevordert wordt door een relatief dichte stand.

Beïnvloeding van de groeiruimte door dunningsingrepen moet er bij voorkeur op gericht zijn, om bomen van allerlei afmetingen en met zoveel mogelijk verschillende eigen frequenties naast elkaar in de opstand te behouden, hetgeen bij een goed uitgevoerde hoogdunning het geval is. Overigens betekent elke ingreep in het kronendak een verhoogd risico, omdat in de gemaakte gaten een verhoogde winddruk en bovendien extra turbulentie kan ontstaan, terwijl de bomen zich nog niet hebben aangepast aan de nieuwe groeiplaatsomstandigheden. Wanneer deze aanpassing is voltooid, blijft de belasting toch nog hoger zolang er gaten in het kronendak voorkomen. Dit is dus een nadeel van een te krachtige dunning. Vanuit een fysisch-dynamisch oogpunt moet de zwaarte van een dunning dan ook zorgvuldig gedoseerd worden.

De resultaten van deze literatuurstudie en van de trekproeven met douglas (Kuiper en Van Schooten, 1985) suggereren dat windworp in twee fasen verloopt:

1 De boom wordt in trilling gebracht, waardoor het wortelstelsel losgewerkt wordt bij grote uitwijkingen.

2 Op het moment dat de boom voldoende losgetrild is, wordt deze vervolgens door de wind omvergeduwd.

Of fase 1 in fase 2 overgaat en wanneer dit gebeurt, hangt af van de windsnelheid, van de groeiplaatsfactoren en van de eigenschappen van de boom zelf. Uit ooggetuigenverslagen blijkt dat zelfs bij extreme rukwinden, waarbij het lijkt alsof de bomen in één klap omver worden geblazen, fase 1 aanwezig is, zij het zeer kort: de bomen lijken zich vlak voor de val nog even te strekken, wat duidt op een in de boom aanwezige trilling. Wat er echter precies gebeurt bij windworp is vooralsnog onbekend. Een goede film van het omwaaien van bomen en van de momenten die daaraan voorafgaan zou al heel verhelderend kunnen zijn.

Literatuur

- Bosman, J. A. 1979. Hoogte, stamdiameter en kroonafmetingen van bomen. Ingenieursscriptie LH-Bosteelt, Wageningen.
- Faber, P. J. 1979. Stabiliteit van bos ten opzichte van wind: een theoretisch gezichtspunt. Ned. Bosb. Tijdschrift, 47 (7/8): 179-187.
- Fraser, A. I. & J. B. H. Gardiner, 1967. Rooting and stability in Sitka spruce. Forestry Commission Bulletin no 40.
- Kuiper, L. C. & J. P. van Schooten, 1985. Onderzoek naar de verankering van de douglas door middel van trekproeven. Nederlands Bosbouw tijdschrift 57 (4).
- Mayhead, G. J. 1973. Sway period of forest trees. Scottish Forestry, 1973.
- Mayhead, G. J., J. B. H. Gardiner & D. W. Durant, 1975. A report on the physical properties of conifers in relation to plantation stability. Forestry Commission research and development division. Unpublished report, Silviculture Section Northern Research Station, Edinburgh. (Kopie aanwezig op Hinkeloord.)
- McMahon, T. A. & R. E. Kronauer, 1976. Tree structures: deducing the principle of mechanical design. Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.
- Nielsen, C. N., 1982. En stabilitetsundersøgelse i Pinus contorta ved hjælp af en traekmalingsmethode. Tidsskrift Dansk Skovforening 67 (1): 1-41.
- Petty, J. A. & R. Worrell, 1981. Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. Forestry 54 (2).
- Savill, P. S. 1983. Silviculture in windy climates. Forestry Abstracts, review article 44 (8): 473-488.
- Schooten, J. P. van, 1985. Fysische aspecten van windworp bij de douglasspar. Doctoraalscriptie LH-Bosteelt, Wageningen.
- White, R. G., M. F. White & G. J. Mayhead, 1976. Measurement of the motion of trees in two directions. Institute of sound and vibration research, University of Southampton, Technical report no. 86.
- Wieringa, J. & P. J. Rijkoort, 1983. Windklimaat van Nederland. Staatsuitgeverij, Den Haag, pp. 263.