

De wind,



Het antwoord van Hans en Grietje op de vraag van de heks wie aan haar huisje knabbelt, was het thema van een workshop 'The aerodynamics of Trees' van prof. dr. Bodo Ruck van de Universiteit van Karlsruhe op 13 februari 2012. Deze workshop was georganiseerd door de SAG Baumstatik. SAG staat voor Sachverständigen-Arbeitsgemeinschaft. De werkgroep bestaat uit specialisten op het gebied van de stabiliteit van bomen, onder wie bekende namen als Lothar Wessolly, Erk Brudi en Michael Schlag. In totaal zijn leden uit 11 landen bij de SAG aangesloten. De workshops van één dag hebben als doel om op een bepaald aspect rond de stabiliteit van bomen in te zoomen. Vaak wordt hiervoor iemand van buitenaf gevraagd, die binnen het vakgebied de nodige kennis en diepgang heeft.

de wind, dat hemelse kind

TEKST: JAN HILBERT, COPIJN BOOMSPECIALISTEN

AFBEELDINGEN: BODO RUCK, KIT, TENZIJ ANDERS AANGEGEVEN

Demping

In 2010 was de Australische wetenschapper Ken James te gast bij de SAG. James – in Nederland onder andere bekend door zijn workshops in 2010 en in mei jl. aanwezig op een KPB-themadag op Larenstein – is voorstander van een dynamische benadering van de belasting van bomen door wind. De term ‘demping’ staat centraal in zijn theorie. Deze wordt vooral veroorzaakt door de beweeglijke delen van de boom: de takken. Zij ontwikkelen bij wind hun eigen bewegingspatronen. Takken hebben verschillende afmetingen en bewegen hierdoor met een eigen frequentie. Daarnaast slaan ze bij wind in uiteenlopende richtingen, waardoor de op de stam en wortelkluit overgedragen krachten niet makkelijk gebundeld kunnen worden, maar zich gedeeltelijk onderling opheffen. De boom reageert dus vooral door het opnemen en weer afgeven van spanningen in vele niet samenhangende ‘porties’.

James heeft enige kritiek op de trekproef, die hij als een (te) statische benadering beschouwt. Zijn kritiek is niet zozeer gericht op de manier van meten, als wel op het feit dat de dynamische aspecten niet (voldoende) worden meegenomen. De discussie met de leden van de SAG in 2010 leidde uiteindelijk echter mede tot de conclusie dat men qua uitgangspunten en benadering toch niet zo ver uit elkaar ligt en dat wind en windbelasting in de hele opzet en onderbouwing van de trekproef lastige factoren zijn.

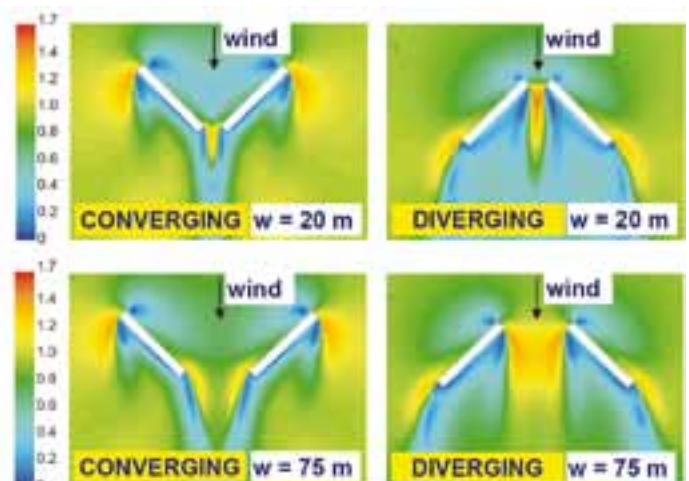
Trechter en punt

Wie toevallig op 6 maart naar het programma Labyrint op Nederland 2 keek, zag een interessante presentatie van professor Bert Blocken van de TU Eindhoven. Deze stedenbouwfysicus benadert windverschijnselen door een combinatie van wetenschappelijke theorievorming, rekenmodellen en metingen in een groot windkanaal. Zijn boodschap: wind gedraagt zich vaak tegen ons intuïtief denken in. We

moeten onze denkpatronen gedeeltelijk loslaten en naar nieuwe benaderingen zoeken.

Neem bijvoorbeeld een opstelling met twee hoge flatgebouwen waar de wind tussendoor stroomt. Blocken heeft twee opstellingen experimenteel getest. Bij de ene opstelling vormden de gebouwen een open trechter, in de andere vormden zij een ‘punt’ naar de wind toe. Verrassend resultaat: de windsnelheden zijn in deze vernauwing amper verhoogd en in de trechter lager dan in de punt. Bijna iedereen had het andersom verwacht. De redenering hierachter is complex. De effecten worden onder andere veroorzaakt door opwaarts gerichte gradiënten van snelheid en druk die in een dergelijke opstelling ontstaan. (Afbeelding 1)

Afbeelding 1 Twee opstellingen waarin de opening tussen de gebouwen 20 m (boven) of 75 m breed is (onder). Hoewel bijna iedereen het anders zou verwachten, leidt een trechtersvormige opstelling vrijwel niet tot verhoogde windsnelheden tussen de gebouwen.
Bron: Blocken et al. 2008 (TU Eindhoven)



Dit is een ietwat verstorend bericht voor mensen die de wind in een rekenmodel willen vatten om tot gefundeerde uitspraken over de belasting en daarmee de stabiliteit van bomen te komen. De workshop van professor Ruck in Karlsruhe was niet minder verstorend. Het heeft bij menige doorgewinterde bomenexpert tot de conclusie geleid dat het hoofdstuk wind misschien nog eens grondig herzien moet worden.

Korte blik op de trekproef

Bij een trekproef wordt een mechanische kracht op de boom uitgeoefend. Deze kracht grijpt aan op het punt dat op basis van de geometrie van de kroon als zwaartepunt of centraal punt van de windbelasting wordt beschouwd. Tijdens het trekken aan de boom wordt de beweging of kanteling van de kluit gemeten (inclinometrie). Vaak wordt met een tweede meetapparaat ook de buiging van de stam gemeten (elastometrie). De apparatuur voor deze metingen is in de afgelopen jaren steeds verder ontwikkeld en verfijnd. Hier is sprake van een zeer hoge nauwkeurigheid. De kanteling van de kluit wordt in een curve geregistreerd. Om de boom niet te beschadigen, wordt er slechts met een beperkte kracht gemeten. Het verloop van de curve laat zich verder extrapoleren, zodat men vrij snel kan zien hoe de boom zich bij toenemende belasting zal gedragen. Deze rekenkundige operatie is onderbouwd door heel veel in de praktijk gemeten curven. Hier is dus sprake van een statistisch onderbouwde rekenmethode. De te verwachten afwijkingen tussen de theoretische (berekende) curve en de curve die men zou krijgen wanneer men de boom doortrekt tot hij kantelt, is gering.

Hoe stabiel is een boom nu werkelijk? De meting levert een curve op basis van harde gegevens op. Men weet nu welke kracht de boom kan 'hebben' voordat hij bezwijkt. De grote onbekende is: welke kracht wordt door de wind op de boom uitgeoefend? Want aan deze kracht moeten we de veiligheidsbeoordeling relateren.

Voor de windbelasting van bomen wordt in Nederland de NEN 1991-1-4+A1+C2, Eurocode 1, Deel 1-4 als uitgangspunt gehanteerd. Deze voor constructies ontwikkelde norm geeft aan, met welke windsnelheden men in een bepaald deel van het land rekening moet houden en hoe de windbelasting berekend wordt. Hierbij wordt door de vele onweegbare factoren een veiligheidsmarge van 50% opgeslagen.

Voor bomen levert dit een goed uitgangspunt op. Uit de wetenschap zijn voor verschillende boomsoorten

c_w -waarden bekend. Deze c_w -waarde is nodig om de luchtweerstand van een object te berekenen wanneer deze niet direct gemeten kan worden.

Maar hoe moet men omgaan met omgevingsfactoren? Welke rol speelt de omgeving van de boom voor de daadwerkelijke windbelasting? Wat zijn de versterkende of juist verzwakkende effecten van gebouwen dichtbij en verder weg? In hoeverre bieden buurtbomen bescherming? En wat doet de wind eigenlijk precies?

Verrassende resultaten uit Karlsruhe

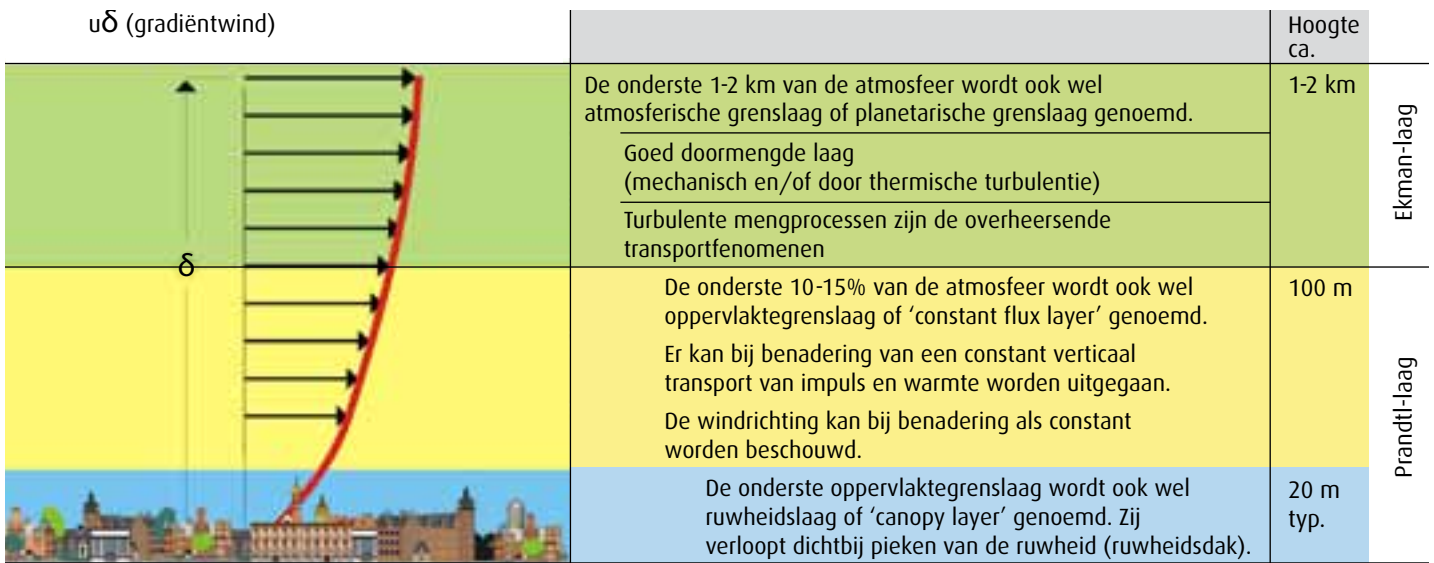
Het is eigenlijk niet mogelijk om de omvangrijke workshop van Ruck in een enkel artikel weer te geven. De inhoudelijke range reikte van basiskennis in de dynamica van stromende media over het ontstaan van wind en zijn verschijningsvormen, tot praktische windkanaalmetingen bij schaalmodellen van gebouwen, bossen en straatprofielen met bomen.

Enkele kernachtige uitspraken:

- Vooral in stedelijk gebied moet niet alleen naar de snelheid, maar ook naar de vorm van een windstroming gekeken worden. Dit levert onder andere een snelheidsprofiel en een drukprofiel op.
- Een boom heeft geen vaste c_w -waarde. Deze is mede afhankelijk van de omgeving waarin de boom staat en kan behoorlijk variëren.
- De stromingseffecten in het 'Ablösegebiet' – de zone direct achter het omstroomde object – vertonen veel variatie en laten zich slechts in beperkte mate rekenkundig benaderen. Voor de windbelasting van een object zijn ze wel relevant.

Ruck had van tevoren gevraagd hoe goed de deelnemers technisch-wetenschappelijk onderbouwd waren. Vol zelfvertrouwen werd beaamd dat men er wel degelijk wat van wist.

Hoewel Ruck veel goed beeldmateriaal gebruikte en uitgebreide toelichtingen gaf, kwam menig boomexpert toch aan de grenzen van zijn opnamevermogen. Waar de formule voor het berekenen van de windkracht op een object nog relatief bekend is en triviaal lijkt, zijn de vergelijkingen van Navier-Stokes en van Reynolds – basis voor ingenieurs in de stromingsleer (Engels: fluid dynamics) – al kost voor gevorderden. En zelfs deze complexe vergelijkingen beschrijven een stroming vaak onder bepaalde en beperkende randvoorwaarden. (Afbeelding 2)



Afbeelding 3 Windprofiel in de atmosferische grenslaag. De onderste 100 m worden ook de Prandtl-laag genoemd. Hierboven zit de Ekman-laag met een hoogte tot ca. 2000 m.

Voor iemand die hier niet met enige regelmaat mee werkt, zijn dergelijke vergelijkingen geen zinvolle weg om wind en stromingsvormen beter te begrijpen. Wetenschappers voeren echter ook veel tests en simulaties uit om hun inzicht in de vele stromingsfenomenen te vergroten. Met behulp van deze simulaties kunnen beelden gegenereerd worden. Laten we daarom kijken naar de beeldentaal en naar een aantal denkstappen.

- 1. De vorm van een luchtstroming kan een groot effect hebben**
De workshop begon met een inleiding wat wind is en hoe hij tot stand komt. Welke vormen van stormen zijn er, waar komen ze voor, hoe ontstaan ze en wat is hun karakteristiek schadebeeld? Ook in Europa komen tornado's voor, maar in Nederland zijn orkanen de meest relevante stormen. Daarnaast moet er ook gekeken worden naar vaak zeer lokale (en soms desastreuze) verschijnselen als een downburst.

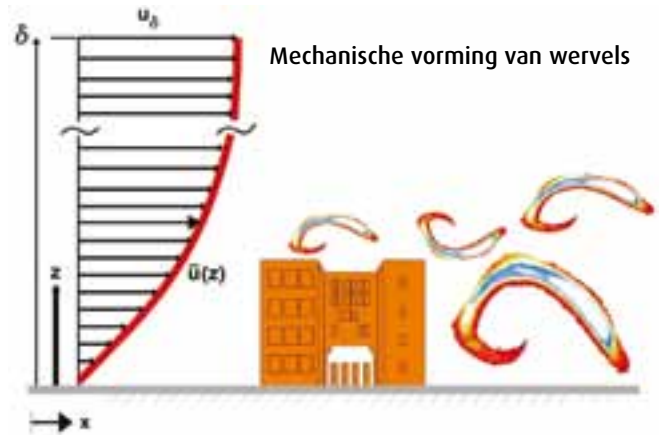
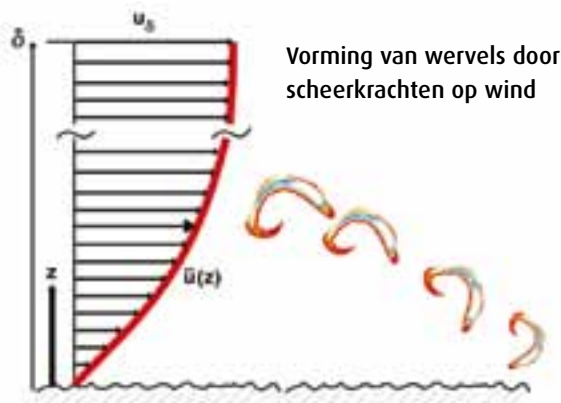
teristiek schadebeeld? Ook in Europa komen tornado's voor, maar in Nederland zijn orkanen de meest relevante stormen. Daarnaast moet er ook gekeken worden naar vaak zeer lokale (en soms desastreuze) verschijnselen als een downburst.

Ruck gaf aan dat in veel expertises de termen windkracht (op de schaal van Beaufort) en windsnelheid niet correct gebruikt worden. Beaufort was marinecommandant in de *Royal Navy*. Zijn schaal was in beginsel gebaseerd op de kracht van de wind in relatie tot de zeilvoering van een schip. Pas in 1946 is deze schaal door het *International Meteorological Committee* vertaald naar windsnelheden. Sinds deze tijd geeft een 'windkracht' een traject van de gemiddelde windsnelheid gedurende 10 minuten weer, gemeten op 10 m hoogte boven de grond in open terrein. Bij elke windkracht horen maximale snelheden in windvlagen. Deze liggen vaak met een factor van ca. 1,5 hoger dan de gemiddelde snelheid.

Bij alle stromende media kan een principieel onderscheid gemaakt worden tussen een laminaire en een turbulente stroming. Laminair betekent dat het medium (in dit geval de lucht) zich als geheel in een richting beweegt. Het is een lineaire stroming zonder beweging naar links of rechts, naar boven of beneden of zelfs naar achteren. Ook een turbulente stroming heeft een hoofdrichting. Hierbij beweegt het medium echter tegelijk alle kanten op in draaiende en cirkelende bewegingen. Vaak is dit vrij chaotisch, maar onder bepaalde omstandigheden kunnen op een grotere schaal weer samenhangende patronen ontstaan. Turbulentie versterkt processen, overgangen en de snelheid van transport (warmte, vocht, impuls, stof, etc.). Zij neemt toe naarmate men dichter bij de bodem komt. (Afbeelding 3)

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z}\right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + k_x + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \\ \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z}\right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + k_y + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \\ \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z}\right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + k_z + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned}$$

Afbeelding 2 De vergelijkingen van Navier-Stokes. Ze beschrijven de stroming van een vloeibaar medium in alle richtingen (xyz). De diverse hierin verwerkte parameters zoals druk, dichtheid en viscositeit zijn afgeleid uit de mechanica van Newton en de wetten tot behoud van impuls, massa en energie. Hoewel de vergelijkingen complex zijn, kunnen ze een complexe stromingsvorm slechts bij benadering beschrijven.



Afbeelding 4

Door schuivende krachten en turbulente bewegingen worden windvlagen uit de (snellere) hogere luchtlagen naar de grond toe geleid.

Ook rond hoge gebouwen ontstaan turbulente wervelingen en vlagen.

Bij windlastanalyses wordt uitgegaan van zogenaamde windprofielen. Boven een stad zijn op enkele honderden meters hoogte geen obstakels die de luchtstroming afremmen of beïnvloeden. Hier zijn de snelheden het hoogst. Naarmate men lager komt, neemt de *gemiddelde* windsnelheid geleidelijk af. De turbulentie neemt echter toe. De zone met afnemende windsnelheid wordt de atmosferische grenslaag genoemd. In de onderste 10% van deze laag (de Prandtl-grenslaag die reikt tot ca. 100 m boven de grond) heersen sterk turbulente omstandigheden. De algemene windrichting is constant. Het gemiddelde profiel van windsnelheden heeft bij benadering een logaritmische opbouw.

Wat de wind en zijn effecten moeilijk voorspelbaar maakt zijn vooral de windvlagen. Ze komen tot stand doordat 'luchtballen' (cirkelvormige turbulente stromingen) met hoge windsnelheden naar zones met lagere windsnelheden getransporteerd worden. Ook bij de omstroming van objecten en door thermische effecten ontstaat turbulentie met windvlagen. De snelste windvlagen in de hogere luchtlagen hebben een lengte van 35 tot 100 m en een breedte van 15 tot 50 m. Naarmate de vlagen dicht bij de grond en hierdoor in contact met andere objecten komen, worden ze 'in stukken gehakt'. De snelheden kunnen nog steeds aanzienlijk zijn, maar de ruimtelijke omvang neemt af. (Afbeelding 4)

Het oppervlak van de boom (projectie in windrichting) kan weer vrij nauwkeurig worden vastgesteld. Van de c_w -waarde van verschillende boomsoorten zijn meetwaarden beschikbaar. Dat deze waarde bij sterke wind kan afnemen is bekend. De boom buigt dan met de belasting mee en vermindert hierdoor het werkzame oppervlak.

Professor Ruck liet zien dat de c_w -waarde echter veel variabelere is dan in de meeste rekenmodellen wordt aangenomen. Deze uitspraak leidde bij de experts van de SAG in eerste instantie tot enig onbegrip en tot discussie. Het is een cruciaal punt om even bij stil te staan en verdient een nadere uitleg.

De c_w -waarde (luchtweerstandcoëfficiënt) is geen constante factor van een object, maar wordt afgeleid uit een praktische meting. Standaard wordt gemeten in een proefopstelling in een windkanaal. Alle relevante grootheden kunnen worden vastgesteld: de windsnelheid, de dichtheid van de lucht en het aangestroomde oppervlak (verticale projectie). Ook de kracht op het aangestroomde object wordt in het windkanaal gemeten. Uit alle parameters kan de c_w -waarde worden berekend.

Deze c_w -waarde geldt echter alleen voor de omstandigheden in het windkanaal: een laminaire luchtstroming die gelijkmatig en aan alle kanten om het object heen kan stromen. De stroming is stationair en verandert dus niet met de tijd.

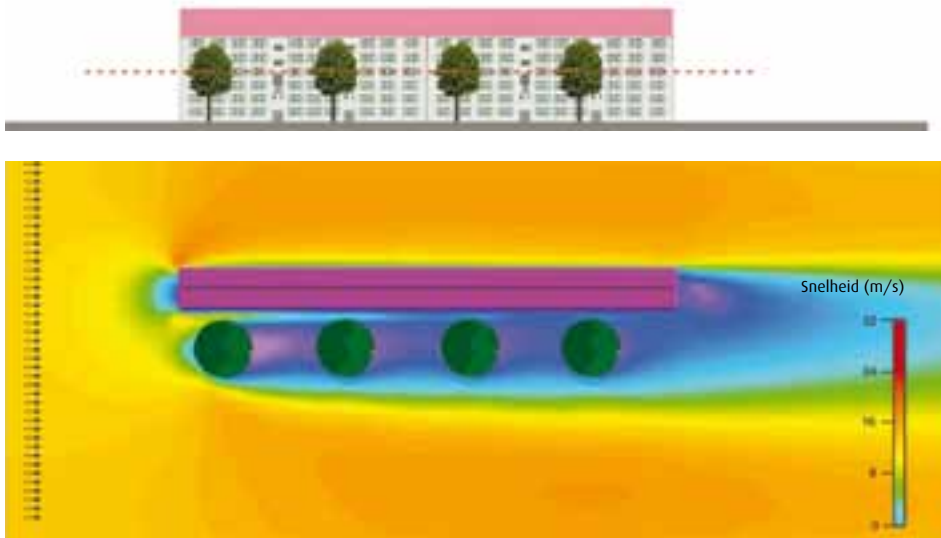
Velen kennen de c_w -waarde bij de auto. Hoe lager, hoe beter omdat je dan minder brandstof gebruikt. Als de auto in het windkanaal omgedraaid wordt, heb je precies dezelfde uitgangspunten in de berekening. Je meet echter een veel hogere c_w -waarde. Het gaat dus in ieder geval ook om de richting van de luchtstroming ten opzichte van het object. Als je enkele meters voor de auto nog een ander object in het windkanaal plaatst, wordt de stroming turbulenter en hierdoor onrustiger. De kracht die deze luchtstroming op de auto uitoefent, is wederom een andere, terwijl de auto niet verandert. Hieruit wordt opnieuw een andere c_w -waarde berekend. Conclusie: ook de vorm van de luchtstroming is relevant.

2. De c_w -waarde van een boom is niet constant

Om de windlast van een boom te berekenen moet zijn c_w -waarde bekend zijn. De kracht wordt dan berekend volgens:

$$F_w = \rho/2 \times u^2 \times A \times c_w$$

De dichtheid van de lucht (ρ) is vrijwel constant. De windsnelheid u is als factor al onzekerder. Welke snelheid is hier werkelijk relevant? Met welke vorm, afmeting, richting en snelheid komt een windvlaag bij een boom aan?



Numerieke berekening (Flovent)
 Boomhoogte: 20 m
 Weerstand $f = 2.4$ (homogeen)
 $U_{ref} = 20$ m/s (sterke wind)
 $h_{ref} = 15$ m (hoogte doorsnede)
 $\alpha = 0,26$ (exponent van het windprofiel)

Afbeelding 5 Windsnelheden in een opstelling van een langgerekt gebouw en vier bomen van vergelijkbare hoogte. Ondanks de vrij ‘losse’ opstelling hebben de vier objecten als ensemble een groot effect op het stromingsbeeld. Opvallend is vooral de zeer lage windsnelheid tussen de bomen en het gebouw. Dit effect wordt actief benut om het warmteverlies van gebouwen door convectie te reduceren.

Wielzuiger bevoordeelt kopman

Het tweede aspect is dus het samenspel tussen objecten en de gevolgen voor de luchtstroming. En hier treden waarschijnlijk de meest verrassende effecten op. Bij twee bomen naast elkaar (gezien in windrichting) neemt de luchtweerstand per boom af. Dit effect ontstaat vooral door het feit dat de bomen de zone van de stroming tussen hen in met elkaar delen. Zij vormen een gezamenlijk stuwpunt (druk maximaal, windsnelheid = 0). Zelfs wanneer tussen de kronen van twee grote bomen enkele meters afstand zitten, blijft dit effect nog gedeeltelijk overeind. Pas wanneer de afstand te groot wordt, ontstaat er een stromingsbeeld van twee individueel omstroomde objecten. Als de bomen achter elkaar staan hebben ze daar allebei profijt van. Dus ook de boom die pal op de wind staat! De boom erachter zorgt voor een gunstigere stromingsvorm, die resulteert in een lagere onderdruk aan de ‘zuigzijde’. Beide bomen profiteren dus. De boom in de wind wordt vooral op druk belast, de boom erachter vooral op onderdruk. Bij een langere rij bomen neemt de onderlinge bescherming nog toe.

Bert Blocken uit Eindhoven demonstreert dit fenomeen in zijn film aan de hand van wielrenners. Als iemand in de polder achter in je wiel gaat fietsen, is dat in eerste instantie vervelend. Wat tot nu toe niet bekend was: de luchtweerstand van de koploper neemt door de achtervolger ook af.

Omstroming

Hoe meer objecten van verschillende grootte en geometrie, hoe minder voorspelbaar de luchtstroming wordt. Een rij bomen langs een langgerekt gebouw zorgt voor een luwe zone binnenin. Dit werkt zelfs nog wanneer de bomen op enkele meters afstand van het gebouw staan en de wind er eigenlijk op tempo doorheen zou kunnen. Maar dat is niet

wat er gebeurt. Dit laten de windkanaaltests uit Karlsruhe en Eindhoven zien. Waar de wind het eerste object bereikt, ontstaat een profiel van omstroming. De snelheden langs de randen kunnen hoger zijn dan de snelheid van de aanstromende wind. In het stuwpunt (snelheid = 0) en in de zones tussen objecten zijn de windsnelheden aanzienlijk lager. (Afbeelding 5)

De invloed van de opstelling of formatie van objecten komt ook voor bij de wielrenners van professor Blocken. Bij een wat grotere groep achter elkaar fietsende wielrenners (zes of meer) heeft de voorlaatste renner de laagste luchtweerstand. Bij de achterste renner heeft het ‘Ablösegebiet’ weer meer invloed, waardoor hier een zone met onderdruk met een zuigende of remmende werking ontstaat.

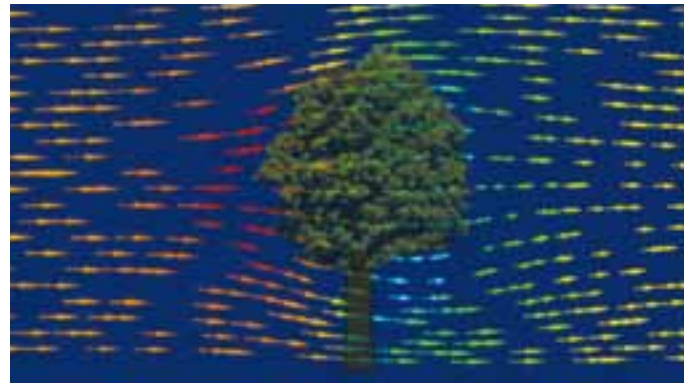
3. Een boom is gedeeltelijk doorlatend en beweegt

Wind kan op een object krachten uitoefenen door druk en wrijving. Bij ondoorlatende objecten (bijvoorbeeld gebouwen) gaat het vooral om druk en speelt de wrijving amper een rol. Wat er aan de drukzijde (windzijde) gebeurt is goed bekend en meetbaar. Lastiger is de zone achter het object (het ‘Ablösegebiet’). Hier heerst een onderdruk en ontstaan turbulenties en bewegingspatronen die moeilijk te voorspellen zijn, maar die wel degelijk een rol spelen bij het spel van druk en krachten. Basisregel: hoe gelijkmatiger een object omstroomd wordt en hoe kleiner het ‘Ablösegebiet’ achter het object, hoe kleiner de luchtweerstand. (Afbeelding 6)

Een boeiend voorbeeld is de golfbal. Door de kleine deukjes in het oppervlak heeft deze een lagere luchtweerstand dan een vergelijkbare bal met een glad gepolijst oppervlak. In de deukjes ontstaan kleine wervelingen. Deze trekken de luchtstroming ook weer naar de bal terug. Achter de



Afbeelding 6 Schematische weergave van de luchtstroming achter een boom. Hier ontstaat een zone met wervelingen en terugstroming. Dit 'Ablösegebiet' is rekenkundig moeilijk te benaderen omdat diverse ruimtelijke effecten kunnen optreden die elkaar beïnvloeden.



Afbeelding 7 Simulatie van de doorstroming van een boomkroon. Door de doorstroming met verlaagde snelheden reageert een boom anders dan een ondoorlatend object van vergelijkbare afmetingen.

bal is het stromingsprofiel nagenoeg hetzelfde als voor de bal. Bij de gladde bal wordt de luchtstroming eerst breed gedrukt, maar na het passeren van het middelpunt van de bal laat de stroming opeens 'los'. Hierdoor ontstaat een onderdruk. Lucht uit het gebied achter de bal wordt hier naartoe getrokken. Het 'Ablösegebiet' wordt groter en onregelmatiger. Het resultaat is een hogere luchtweerstand. Bij auto's heeft dit inzicht vooral vanaf de jaren '80 geleid tot een verandering in de vormtaal. Een zuinigere omgang met brandstof werd een groot item en leidde ertoe dat de vormen minder vrij (en fraai?) maar wel efficiënter werden wat betreft de luchtweerstand. Naast echte designauto's in de vorm van lange druppels (met een klein 'Ablösegebiet') kwamen er vooral nieuwe modellen met een kortere en omhooggetrokken achterkant op de markt. Deze scoorden beter in de windkanaal.

Bomen onttrekken zich – zoals vaker – aan een directe ingenieurtechnische benadering. Zij zijn niet ondoorlatend, maar ook niet geheel doorlatend. Ze zijn vaak allesbehalve symmetrisch. En ze kunnen statisch én dynamisch reageren op door wind uitgeoefende krachten. Om het nog even breder te trekken: hun reactie hangt mede af van de soort (dichte naaldboom of open loofboom?) en hun leeftijd (oud en stevig met veel statische reserves of jong en nog lekker elastisch?).

Bomen zijn gedeeltelijk 'open'. Hun kroon wordt door wind doorstroomd, maar dan in vrij lage snelheden. Voor de drukkrachten heeft dit een licht dempend effect omdat de stuwdruk aan de windzijde lager wordt. (Afbeelding 7)

Tegelijkertijd wordt bij een boom de wrijving als factor belangrijker. Deze wordt vooral veroorzaakt door bladeren of naalden en in mindere mate door twijgen, takken en de stam. De *Leaf Area Index* (LAI) is bij de wrijving dus een

relevante factor. De wrijving speelt vooral aan de randen van de kroon een rol, waar de snelheden hoger zijn. Nog steeds gedraagt de boom zich in de luchtstroming als samenhangend object dat door de wind omstroomd wordt. Pas als een kroon helemaal open is vervalt dit effect en ontstaat een andere stromingsvorm. Elke tak of ieder kroondeel heeft dan zijn eigen stromingsprofiel, de onderlinge samenhang is verbroken. Tot het zo ver komt is van een kroon echter niet meer veel over dan enkele hoofdtakken. Dit klinkt misschien triviaal, maar leidt tot twee belangrijke conclusies. Ten eerste heeft het uitlichten van een kroon geen effect op de luchtweerstand tot de boom tot op een torso gereduceerd is. En ten tweede zorgt ook een boom met een open en doorlatende kroon nog voor bescherming voor bomen die erachter, ernaast of zelfs ervoor staan.

Nog meer interessante inzichten

De workshop van Ruck beperkte zich niet tot windprofielen en stromingsvormen rond bomen en andere (samenhangende) objecten, maar gaf ook inzichten in diverse andere verschijnselen die met ons vak te maken hebben. Bijzonder boeiend was een proefopstelling waarmee twee bosbouwkundige fenomenen nader bestudeerd worden. Waarom zijn bij zware stormen bomen op hellingen aan de windzijde ('Prallhang') zo kwetsbaar. Dit verschijnsel is in Nederland minder relevant omdat lange beboste hellingen amper voorkomen, maar in de bosrijke Duitse 'Mittelgebirgen' is het van groot belang.

Het tweede fenomeen kan zich ook in Nederland voordoen: wanneer een storm over een open vlakte komt en op een bosgebied stuit, sneuvelen de eerste bomen vaak in een zone in het bos die ongeveer op een afstand van 5 keer de gemiddelde boomhoogte vanaf de bosrand staan. Als de bomen 20 m hoog zijn, ontstaan de eerste gaten dus vaak

na ca. 100 m (uitgaande van een stabiele en samenhangende bosrand die aan windbelasting 'gewend' is).

Dit effect was 100 jaar geleden al bekend. In oude Duitse bosbouwboeken zijn tekeningen weergegeven waarin bijvoorbeeld een geleidelijke hoogteopbouw door vanaf de bosrand op hoogte te toppen wordt voorgesteld om het effect te dempen. Pas nu hebben de wetenschappers echter inzicht gekregen wat er daadwerkelijk gebeurt. Zij kwamen erachter dat de zogenaamde Kelvin-Helmholtz-instabiliteit hier een prominente rol heeft. Dit stromingsfenomeen ontstaat wanneer er luchtlagen met verschillende snelheden langs elkaar heen stromen. Door de scheerkrachten ontstaat op de grenslaag een roterend wervelveld. De wervelingen kunnen behoorlijke dimensies aannemen. In het bos veroorzaken ze vooral verticaal gerichte drukgradiënten. Bomen kunnen deze drukverschillen niet opvangen en breken af.

Het stromingsfenomeen komt op alle schaalniveaus voor en veroorzaakt bijvoorbeeld fantastische wolkenbeelden. Soms wordt de instabiliteit echter ook duikers fataal die in meren met een scherpe grenslaag tussen het koude en warme water in grote turbulenties terechtkomen en zich niet meer kunnen oriënteren.

Een taak voor de nabije toekomst

De workshop van Ruck leidde bij menig deelnemer tot nadenken. Waarschijnlijk had iedereen van tevoren onderschat hoeveel variatie bij de benadering van de windbelasting van bomen en andere objecten in de stedelijke omgeving kan optreden en met welke verschijnselen rekening gehouden moet worden. Vakmensen op bomengebied bereiken hier op een gegeven moment hun grenzen. De samenwerking met specialisten is noodzakelijk om hier verder te komen.

De trekproef is een statische meetmethode. Ook de benadering van de windbelasting via de NEN-EN 1991 neemt de dynamische aspecten van de boom (eigenfrequentie van takken en de hele boom, demping, resonantie etc.) niet of onvoldoende mee. Anderzijds vormt de trekproef een aanvaard uitgangspunt om tot een inschatting van de stabiliteit te komen. De meting geeft immers meer informatie dan alleen het krachtenspel. Hoe reageert de kluit in alle richtingen, komt hij weer terug in zijn oorspronkelijke positie, vertoont een boom duidelijke verschillen ten opzichte van referentiebomen in vergelijkbare omstandigheden, etc.?



Foto Andreas Dettler

Ken James heeft een punt met zijn kritiek op de trekproef. Dat neemt niet weg dat boomtechnici toch op een of andere manier tot een oordeel over de stabiliteit en hiermee de veiligheid van een boom moeten komen. Net als bij andere onderzoekstechnieken moet de techniek ondersteunend, en niet leidend zijn. Of in de woorden van James: je kunt het ene probleem tot in de puntjes onderzoeken en hierbij het daadwerkelijke probleem over het hoofd zien.

De onderzoekers binnen de SAG willen nog eens kritisch kijken naar de parameters die ze in hun rekenmodellen gebruiken. Hoe ga je om met variabele c_w -waarden? Welke impact heeft het samenspel van bomen en gebouwen onderling en hoe kan dit vertaald worden in een windlast-analyse?

Het laatste is ook aan professor Ruck gevraagd. Hij gaf aan dat het mogelijk is om vaak voorkomende situaties (bomen in stedelijke profielen) op modelschaal in het windkanaal te meten en hierdoor tot enkele standaarden te komen. Elke opstelling kost inclusief wetenschappelijke evaluatie echter tussen de € 10.000 en € 15.000. Eerst maar eens zien of er sponsoren voor te vinden zijn...

Door fundamenteel wetenschappelijk onderzoek zal het in de komende tijd mogelijk worden om de trekproef als meetinstrument verder te verbeteren. Het grijze kennisgebied wordt hierdoor kleiner. Nederlandse specialisten kunnen binnen de SAG meedenken en de discussie ook in eigen land voeren. Een toename van gedeelde kennis kan nooit kwaad.