

Bouw je eigen windmeter

Inleiding

In Nederland waait het bijna altijd: ieder weerbericht bevat dan ook een verwachting van windrichting en windkracht. Meestal waait het niet zo hard: als mens sta je er dan niet zo bij stil dat het waait. Alleen als het stormt, krijgt iedereen met de wind te maken. Dakpannen waaien van huizen, takken breken af en in de buurt van hoge gebouwen kun je je nauwelijks staande houden. Scheepvaart en wegverkeer kunnen veel hinder ondervinden, en ook de glastuinbouw kan veel schade oplopen. Om de schade te beperken, worden bij harde wind niet alleen weerberichten, maar ook stormwaarschuwingen uitgegeven.

Voor het maken van weersverwachtingen en stormwaarschuwingen worden berekeningen van de grote computerweersmodellen gecombineerd met meetgegevens van de weerstations. Op een weerstation wordt onder andere de windsnelheid continu gemeten met een windmeter (anemometer), die standaard op 10 meter hoogte is opgesteld. Voor betrouwbare, en goed onderling vergelijkbare metingen, mag het windveld op een weerstation niet door obstakels (bijvoorbeeld bomen of gebouwen) beïnvloed worden.

Windmetingen worden niet alleen gebruikt voor het opstellen van weerberichten, maar ook voor wetenschappelijk onderzoek naar weer en klimaat. Wind, de verplaatsing van lucht ten gevolge van luchtdrukverschillen, is een zeer belangrijk onderdeel van het globale weer- en klimaatsysteem. Wind bepaalt de verplaatsing van warmte en water(damp) in de atmosfeer en de verdeling van regenval over het aardoppervlak. Ook de verspreiding van plantenzaden hangt af van de wind. Op kleinere schaal heeft de wind invloed op het lokale klimaat en lokale weersystemen. Ook is de wind een bepalende factor voor uitwisseling van energie, water en gassen tussen atmosfeer, bodem en planten of gewassen.



Figuur 1. KNMI cup-anemometer met drie cups (niet exact halve bollen).

De windmeter die het meest gebruikt wordt op de weerstations, is de cup-anemometer (figuur 1). Een cup-anemometer bestaat uit drie halve bollen, die kunnen ronddraaien om een as. Hoe harder het waait, hoe meer wind de bollen vangen en hoe sneller de anemometer ronddraait. Door het aantal omwentelingen per tijdseenheid te registreren, kan op ieder moment de windsnelheid worden berekend.



Bouw je eigen windmeter

Een andere manier om de windsnelheid te meten, is een voorwerp aan een touwtje in de wind hangen en kijken hoe groot de uitwijking van het touwtje is ten opzichte van de verticaal. Hoe harder het waait, hoe groter de uitwijking. Zulke windmeters worden deflectie-anemometers genoemd. Het idee voor deflectie-anemometers stamt reeds uit de 15^e eeuw. Ook Leonardo Da Vinci heeft waarschijnlijk gebruik gemaakt van dit type windmeter.

Deflectie-anemometers worden niet veel gebruikt op weerstations: het is al lange tijd de gewoonte om cup-anemometers te gebruiken. Die hebben als voordeel dat ze onafhankelijk zijn van de windrichting (een deflectie-anemometer moet eerst met een windvaan in de juiste stand worden gezet). Ook zijn ze makkelijker te automatiseren. Deflectie-anemometers zijn echter veel eenvoudiger zelf te bouwen. In dit practicum gaan we een deflectie-anemometer bouwen met behulp van een geodriehoek, een touwtje en een pingpong- of stuitbal. We zullen het in het vervolg voornamelijk hebben over de pingpongbal. Bij de uitvoering komt aan de orde waarom je soms beter een zwaardere bal (bijvoorbeeld een stuitbal) kunt gebruiken.

Doel

Het bouwen van je eigen windmeter en het gebruik van die meter om de windsnelheid onder verschillende omstandigheden te bepalen.

Theorie

De pingpongbalwindmeter kan gebruikt worden om de snelheid van een luchtstroom te bepalen. Voorwaarde is dat de luchtstroom ongeveer horizontaal is. De pingpongbalanemometer is niets anders dan een pingpongballetje dat met een touwtje aan een schaalverdeling van bijvoorbeeld een geodriehoek vast zit. Als de pingpongbalwindmeter niet in de wind wordt gehouden, hangt het balletje recht naar beneden. Door de pingpongbalwindmeter in een luchtstroom (evenwijdig aan de windrichting) te houden, zal het balletje met de wind mee bewegen en vervolgens (ongeveer) stil blijven hangen. Op dit moment is er evenwicht ontstaan tussen de verschillende krachten die op de pingpongbal werken (figuur 2), namelijk tussen de spankracht in het touwtje en de resultante van de wrijvingskracht en de zwaartekracht. De hoek die het touwtje nu maakt ten opzichte van de situatie zonder wind is afhankelijk van de verhouding tussen de wrijvingskracht en de zwaartekracht. Uit deze hoek kan de kracht berekend worden die de luchtstroom op de pingpongbal uitoefent. Zoals later zal blijken kan uit deze wrijvingskracht de windsnelheid berekend worden.

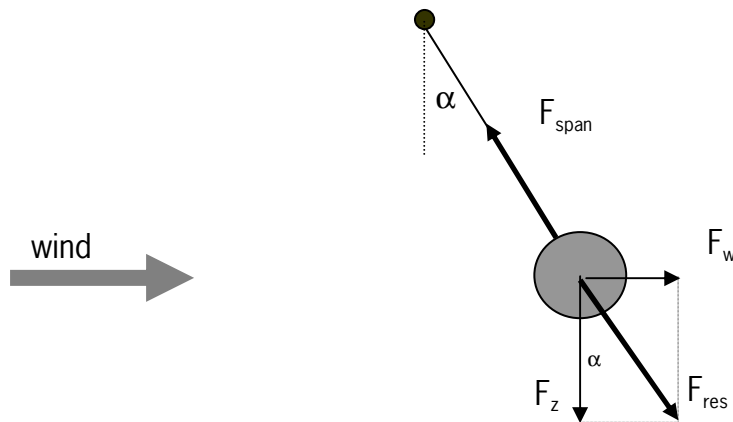
Krachtevenwicht

Voor de berekening van de windsnelheid, moet de grootte bepaald worden van de kracht die de wind op de pingpongbal uitoefent. Deze kracht is een wrijvingskracht en die wordt in figuur 2 weergegeven met F_w . In deze figuur zijn ook de twee andere krachten die op de pingpongbal aangrijpen ingetekend: de zwaartekracht F_z en de spankracht F_s . Doordat er evenwicht heerst, compenseert de spankracht precies de som van de zwaartekracht



Bouw je eigen windmeter

en de wrijvingskracht. Deze somkracht is in figuur 2 met F_{res} (resultante kracht) weergegeven. F_{res} kan met de parallelogrammethode bepaald worden uit F_z en F_w , zoals in figuur 2 gedaan is. Bedenk dat F_{res} altijd in het verlengde van het touwtje werkt: hij compenseert immers precies de spankracht in het touwtje.



Figuur 2. Krachtenbalans op pingpongbal

Wanneer we nu de hoek (α) tussen de verticaal en het touwtje meten en één kracht kennen, kunnen we de andere krachten berekenen met behulp van de sinus, cosinus en tangens. Meting van hoek α levert dus, wanneer de zwaartekracht op de pingpongbal bekend is, de grootte van de wrijvingskracht F_w op.

Vraag: Leid zelf met behulp van figuur 2 het verband af tussen F_w , F_z en α . Wat moet je meten om F_z te berekenen?

Wanneer F_w bekend is, kan de windsnelheid berekend worden.

Windsnelheid

Zoals je wel aan kunt voelen, zal de wrijvingskracht F_w groter worden bij toenemende windsnelheid, maar het verband blijkt niet rechtevenredig te zijn. Bij turbulente stroming kan de windsnelheid uit de wrijvingskracht berekend worden met de volgende formule:

$$F_w = k \cdot v_w^2 \quad (1)$$

waarin

k = evenredigheidsconstante (kg/m)

v_w = windsnelheid (m/s)

Uit deze formule blijkt dat de F_w niet alleen van de windsnelheid afhankelijk is, maar ook van een evenredigheidsconstante k . Deze k is een soort 'vuilnisbakterm', waarin de overige grootheden die F_w bepalen verwerkt zijn. De grootte van F_w hangt namelijk ook af van de eigenschappen van de lucht én van de bal. Voor de lucht gaat het om de dichtheid (ρ); voor de pingpongbal gaat het om de oppervlakte van de dwarsdoorsnede ($\pi \cdot r_{bal}^2$) en de vorm (in dit geval bolvormig). Het blijkt dat k berekend kan worden met



Bouw je eigen windmeter

$$k = a \cdot \rho_l \cdot \pi \cdot r_{bal}^2 \quad (2)$$

Hierin is a een constante afhankelijk van de vorm van het object.

De grootte van a blijkt (uit proeven) voor bolvormige voorwerpen ongeveer 0,27 te zijn. De dichtheid van lucht is afhankelijk van de luchtdruk en de temperatuur. Om te beginnen kan voor dit experiment echter met de gemiddelde dichtheid bij standaard omstandigheden gewerkt worden. Deze bedraagt $1,29 \text{ kg/m}^3$ (tabel 12, Binas).

We kunnen nu dus de windsnelheid berekenen door de formules 1 en 2 te combineren bij bekende F_w .

Windkracht Beaufort

Bij weersverwachtingen wordt de sterkte van de wind vrijwel nooit uitgedrukt in een windsnelheid, maar in een windkracht. Realiseer je dat het woord kracht hier niet de normale natuurkundige betekenis heeft. Deze vaak gebruikte windkrachtschaal is door Beaufort opgesteld. Hij schatte de windkracht aan de hand van windeffecten boven open water. Later zijn er ook kenmerken opgesteld voor het effect van de wind boven land, zoals het bewegen van takken in de wind. Pas toen het mogelijk werd de windsnelheid te meten, is de windkracht aan de windsnelheid gekoppeld. Tegenwoordig wordt de windkracht rechtstreeks bepaald uit de windsnelheid met gebruik van de tabel in figuur 3.

Beaufort	Benaming	Windsnelheid m/s	Kenmerken
0	Windstil	<0.2	Rook stijgt (recht) omhoog
1	Zwak	0.3 - 1.5	Rookpluimen geven richting aan
2	Zwak	1.6 - 3.3	Bladeren ritselen
3	Matig	3.4 - 5.4	Bladeren en twijgen voortduren in beweging
4	Matig	5.5 - 7.9	Stof en papier dwarrelen op
5	Vrij krachtig	8.0 - 10.7	Takken maken zwaaiende bewegingen
6	Krachtig	10.8 - 13.8	Grote takken bewegen
7	Hard	13.9 - 17.1	Bomen bewegen
8	Stormachtig	17.2 - 20.7	Twijgen breken af
9	Storm	20.8 - 24.4	Takken breken af. Dakpannen waaien weg
10	Zware storm	24.5 - 28.4	Bomen worden ontworteld
11	Zeer zware storm	28.5 - 32.6	Uitgebreide schade aan bossen en gebouwen
12	Orkaan	>32.6	Niets blijft meer overeind

Figuur 3: De Beaufortschaal (website KNMI).



Bouw je eigen windmeter

Uitvoering

Materialen

Voor het bouwen van een pingpongbalwindmeter is nodig:

- Pingpongbal (of stuiterbal: meer geschikt bij hogere windsnelheden)
- Stukje touw, liefst garen (circa 30 cm lang)
- Geodriehoek
- Schuifmaat
- Plakband (evt ook een nietmachientje)
- Stuk karton
- Scherp potlood (evt kleurtjes)
- Schaar
- Balans of weegschaal (voor het bepalen van de massa van de bal)
- Klein waterpasje.

Veiligheid

Wageningen University aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor schade die voortvloeit uit het verrichten van dit experiment buiten de campus van Wageningen University.

Bouwbeschrijving

Om straks uit de metingen met de windmeter de windsnelheid te kunnen berekenen, is de massa van de bal nodig. Weeg dus voordat je de windmeter bouwt, de bal met een balans. Noteer hier de massa in grammen:

massa bal: gram

Ook de grootte van de bal is nodig voor de berekeningen. Meet de diameter van de pingpongbal met de schuifmaat. Noteer deze hier in millimeters:

diameter bal: mm

Reken de diameter nu om naar de straal van de bal en noteer deze in millimeters:

straal bal: mm

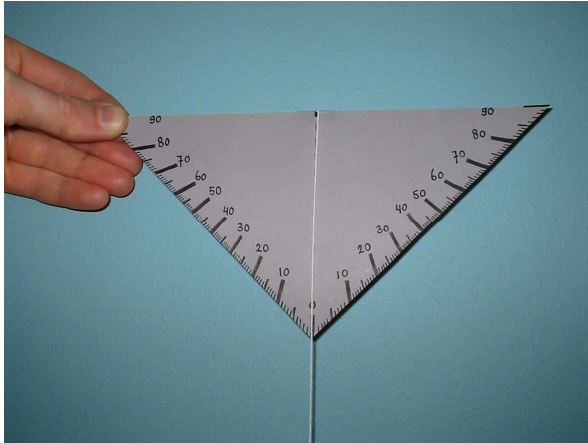
Nu kan de windmeter in elkaar worden gezet:

- Eerst moet een handige schaalverdeling (in graden nauwkeurig) op een stukje karton getekend worden. Teken hiervoor de omtrek van een geodriehoek over op een stukje karton en knip vervolgens deze omtrek uit. Geef op het kartonnetje ook aan waar de geodriehoek 0 cm aangeeft; dit punt zullen we later nodig hebben. Nu kun je de gradenstreepjes van de geodriehoek op het zojuist uitgeknipte stukje karton overnemen. Maar neem niet de schaalverdeling over, want deze gaan we aanpassen! In de situatie zonder wind, willen we namelijk graag 0 graden aflezen, terwijl een



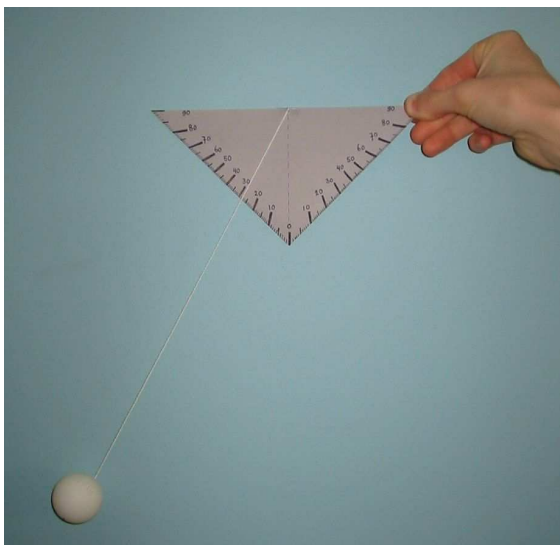
Bouw je eigen windmeter

geodriehoek 90 graden aan zal geven. Bovendien willen we een uitwijking ten opzichte van de windstille situatie direct af kunnen lezen. Zo zal een geodriehoek 80 graden aanwijzen bij een afwijking van 10 graden ten opzichte van de windstille situatie en 70 graden bij 20 graden uitwijking. Pas de schaalverdeling nu zo aan dat een afwijking van het balletje direct op de windmeter is af te lezen. Hierbij is het handig om met intervallen van 5 of 10 graden te nummeren (en elke graad een streepje, zie figuur 4).



Figuur 4. Schaalverdeling

- Maak de bal vast aan het ene uiteinde van het stukje touw (een pingpongbal met een klein stukje plakband; een stuiterbal met een nietje).
- Plak het andere uiteinde van het touwtje met een stukje plakband zó aan de net gemaakte schaalverdeling vast, dat het begin van het touwtje precies bij de ingetekende 0 cm van de geodriehoek zit. Het is handig het stukje plakband aan de achterkant van de kartonnen driehoek te plakken, precies tot aan de bovenrand, zodat het touwtje over die rand heen valt.
- Omdat de windmeter tijdens een meting horizontaal moet hangen, is het handig een klein waterpasje aan de achterkant van de kartonnen schaalverdeling te plakken. Natuurlijk moet het waterpasje evenwijdig aan de bovenkant van de schaalverdeling zitten.



Figuur 5. Pingpongballetje wijkt uit door wind

Bouw je eigen windmeter

- Check of je windmeter in orde is door de kartonnen schaalverdeling op te tillen en de bovenkant horizontaal te houden (let op het waterpasje). Als het windstil is in het lokaal, zou het touwtje met de pingpongbal nu precies 0 graden moeten aangeven. Controleer ook of de bal vrij kan bewegen door er even tegen te blazen. Misschien zijn door het uitknippen de randen van de kartonnen schaalverdeling wat ruw geworden. Dit kan opgelost worden door deze randen met stukjes plakband af te plakken.
- De windmeter is nu klaar voor gebruik.

Proefbeschrijving

Het verrichten van een meting met de windmeter kan het beste met twee personen worden gedaan.

Eerst bepaal je waar de wind vandaan komt (kijk welke kant de haren van je medeleerling op waaien). Dan tilt één leerling de windmeter op en houdt hem in de wind met de lange bovenrand van de kartonnen driehoek *horizontaal* en *precies evenwijdig* aan de windrichting. Zorg dat jouw lichaam geen invloed heeft op het windveld: houd dus de driehoek met gestrekte arm(en) voor je, waarbij je staat met je zijkant naar de kant waar de wind vandaan komt.

De andere leerling staat aan de andere kant van de windmeter (en zorgt ook dat zijn lichaam geen invloed heeft op het windveld) en leest de hoek af die het touwtje maakt (zie figuur 5).

Proef 1

Waarschijnlijk hangt de bal niet stil, maar beweegt hij een beetje heen-en-weer (dit is bij gebruik van een pingpongbal meestal erger dan bij een stuiterbal). Kijk er een tijdje naar en lees af: de kleinste hoek, de grootste hoek en de gemiddelde hoek die het touwtje aanwijst.

Overige proeven

Bepaal zelf onder welke verschillende omstandigheden je de windsnelheid wilt meten (kijk eventueel ook verderop in de paragraaf 'Suggesties voor verder onderzoek').

Lees de windsnelheidsmeter steeds af door een tijdje te kijken en dan de gemiddelde hoek te noteren.



Bouw je eigen windmeter

Resultaten

Reken de massa van de bal om naar kilogram, en de straal van de bal naar meters:

massa bal = kg

straal bal = m

Proef 1

Schrijf hieronder voor één meting op tussen welke hoekwaardes de pingpongbal heen en weer ging:

kleinste hoek: °

grootste hoek: °

gemiddelde hoek: °

Overige proeven

Gebruik voor de overige metingen een tabel zoals hieronder is weergegeven. Voer je metingen in voor de dubbele streep.

Tabel 1: proefresultaten

	Meting Omschrijving bemeten situatie	α_{gem} (°)	F_w (N)	v_w (m/s)
1				
2				
3				
4				



Bouw je eigen windmeter

Vragen (voorbereiding)

1. Met welke formule kun je de zwaartekracht op het pingpongballetje berekenen?
2. Leid zelf met behulp van figuur 2 het verband af tussen F_w , F_z en α .
3. Een pingpongbalwindmeter wordt horizontaal voor een föhn gehouden en wijst een hoek van 35° aan. Bereken de windsnelheid (massa pingpongbal = 1,0 g, straal pingpongbal = 1,5 cm).

Vragen (verwerking)

4. Schat aan de hand van een berekening met de resultaten van proef 1 de procentuele fout die je maakt doordat de pingpongbal niet netjes stil hangt tijdens de metingen.
5. Verwerk je overige metingen door de wrijvingskracht en de windsnelheid voor iedere meting te berekenen en weer te geven in tabel 1.
6. We hebben nu een pingpongbal gebruikt voor het maken van een windmeter. Door welke voorwerpen zou je de pingpongbal kunnen vervangen?



Bouw je eigen windmeter

7. In een weersverwachting wordt melding gemaakt van een zuidoosten wind, kracht 5.
 - a. Waarom hangt een zekere windkracht niet eenduidig samen met een hoek van een pingpongbalwindmeter?

 - b. Welke maximale en welke minimale hoek zou een pingpongbalwindmeter volgens deze weersverwachting aangeven? (massa pingpongbal = 1,0 g, straal = 1,5 cm).

8. De vormafhankelijke constante (a in formule (4)) van een pingpongbal ($m = 1,0$ g, $r = 1,5$ cm) wordt bepaald door een pingpongbalwindmeter horizontaal voor een ventilator te houden en de hoek van het touwtje in graden af te lezen. Vervolgens wordt de windsnelheid met een cupanemometer gemeten; de windsnelheid blijkt 5 m/s te zijn. Bereken de vormafhankelijke constante van de pingpongbal als de afgelezen hoek 30 graden bedraagt.

Suggesties voor verder onderzoek

1. Met je pingpongbalwindmeter kun je prima windsnelheden met elkaar vergelijken. Onderzoek bijvoorbeeld de windsnelheid op verschillende plaatsen rond en in het schoolgebouw. Zo kun je de invloed van het open doen van ramen of deuren op de windsnelheid in je klaslokaal onderzoeken. Of vergelijk de windsnelheid achter een struik of muur met de windsnelheid midden op het schoolplein. Als je wel eens over een dijk fietst kun je met je windmeter onderzoeken of je boven op de dijk met wind tegen inderdaad harder moet trappen in vergelijking met lager gelegen fietspaden. Meet hiervoor de windsnelheid boven op de dijk en onder aan beide zijden van de dijk. Verklaar de verschillen.

2. Meet de windsnelheid uit verschillende apparaten, zoals een föhn of een ventilator. Onderzoek eens of het overschakelen van stand 1 naar stand 2 een verdubbeling van de windsnelheid betekent. Of onderzoek het verloop van de windsnelheid in de tijd bij een ventilator met een bewegende kop (hiervoor meet je de windsnelheid met verschillende hoeken ten opzichte van een stilstaande ventilator). Of bepaal hoe snel de windsnelheid afneemt met de afstand van een ventilator.



Bouw je eigen windmeter

3. Misschien is het je al eens opgevallen dat de duinen langs de kust van Nederland met speciaal gras (helmgras) beplant zijn. Dit wordt o.a. gedaan om te voorkomen dat te veel zand tijdens perioden met krachtige wind wegwaait. Dit proces wordt ook wel winderosie genoemd. Met je windmeter kun je nu onderzoeken welke eigenschappen de gevoeligheid voor erosie bepalen. Hiervoor strooi je bijvoorbeeld wat koffie, peper, zout of meel op een gladde tafel. Daarna laat je een ventilator over het tafelblad blazen, zodat de korrels langzaam wegwaaien. Let op dat je het eerst zacht laat waaien, om daarna de windsnelheid langzaam op te schroeven. Hiervoor kun je de ventilator naar de korrels toe schuiven of de ventilator een standje hoger zetten. Meet met je pingpongbalwindmeter welke minimale windsnelheid er nodig is om de verschillende korrels weg te laten waaien.

Maak de korrels eens nat met een plantensproeier; wat voor invloed heeft dit op de erosiegevoeligheid?

Beschrijf de verschillen tussen de verschillende manieren waarmee verschillende korrels zich verplaatsen.

Bedenk welke eigenschappen van zandkorrels op een duin bepalend zijn voor de gevoeligheid voor erosie.

Kun je nog meer voorbeelden bedenken waar winderosie een belangrijke rol speelt?

Documentatie

Dane D. Bicanic, 2006, 'Dictaat basis natuurkunde (BIP 10306)', Leerstoelgroep Biofysica, Wageningen University. Het college dictaat is verkrijgbaar via de WUR- Shop verbonden aan het Grafisch Service Centrum van Wageningen University. Tel.: 0317-473711 / Email: wurshop.fb@wur.nl.

L.J.M.Kroon e.a., 'Inleiding Atmosfeer'. Dit collegedictaat hoort bij het vak 'Introduction Atmosphere' dat gegeven wordt door de Leerstoelgroep Meteorologie en Lucht Kwaliteit aan Wageningen University. Het vak is verplicht onderdeel van de bachelor 'Bodem, Water en Atmosfeer'. Het college dictaat is verkrijgbaar via de WUR- Shop verbonden aan het Grafisch Service Centrum van Wageningen University. Tel.: 0317-473711 / Email: wurshop.fb@wur.nl.

Oriëntatie op vervolgonderwijs

Het onderwerp van dit experiment kom je ook tegen in de opleiding Bodem, Water, Atmosfeer van Wageningen University.

Kijk voor meer informatie op www.wageningenuniversity.nl/bsc.



Voor de docent of toa

Uitvoering

Materialen

Zie handleiding voor leerlingen.

Vaardigheden

De leerlingen hoeven geen speciale vaardigheden te hebben om zelf een windmeter te bouwen of zelf een windmeting uit te voeren. Wel moeten de leerlingen bekend zijn met de theorie over krachtenbalans en het ontbinden van vectoren (grootte en richting!). Het schoolvoorbeeld van een blokje op een hellend vlak is een mooie illustratie van de theorie die aan dit experiment ten grondslag ligt.

Veiligheid

Dit experiment kan door de leerlingen zelfstandig uitgevoerd worden zonder enige risico's. Het gebruik van de windmeter zelf zal geen gevaarlijke situaties teweeg brengen.

Wageningen University aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor schade die voortvloeit uit het verrichten van dit experiment buiten de campus van Wageningen University.

Resultaten

Het geringe gewicht van de pingpongbal maakt deze windmeter erg gevoelig. Dit betekent dat een kleine toename in de windsnelheid een flinke toename in de hoek van het touwtje zal betekenen. Bovendien zal door de gevoeligheid het touwtje een beetje dansen op de wind, zodat de gemiddelde hoek geschat moet worden. Bij een windsnelheid van 4 m/s (windkracht 3) zal de pingpongbalwindmeter ongeveer 10° uitslaan met een mogelijke afwijking van enkele graden. Bij een windsnelheid van 6 m/s (windkracht 4) zal een hoek van ongeveer 30° waargenomen worden. De afleesfout neemt toe bij toenemende windsnelheid doordat het touwtje meer op en neer zal bewegen. Het gebruik van een zwaarder balletje (zoals een stuiterbal) maakt de anemometer minder gevoelig, maar wel stabiel en dus nauwkeuriger.

Uitwerking van de vragen

1. $F_z = m \cdot g$
2. $F_w = F_z \cdot \tan \alpha$
3. $F_z = m \cdot g = 0,0010 \cdot 9.81 = 0.00981 \text{ N}$



Bouw je eigen windmeter

$$4. F_w = F_z \cdot \tan \alpha = 0.00981 \cdot \tan(35) = 0.00687 \text{ N}$$

Om met vergelijking (1) de windsnelheid te kunnen berekenen, moet eerst de evenredigheidsconstante k met vergelijking (2) uitgerekend worden:

$$k = a \cdot \rho_l \cdot \pi \cdot r_{bal}^2 = 0,27 \cdot 1,29 \cdot \pi \cdot 0,015^2 = 0,000246 \text{ kg/m}$$

Uit vergelijking (4) volgt de windsnelheid:

$$F_w = k \cdot v_w^2 \rightarrow v_w = \sqrt{\frac{F_w}{k}} = \sqrt{\frac{0,00687}{0,000246}} = 5,3 \text{ m/s}$$

5. Dit hangt af van de gemeten hoeken. De procentuele afleesfout neemt af bij toenemende hoek. Maar bij hogere windsnelheden gaat het balletje steeds meer zwabberen en dansen. Als gevolg daarvan neemt de afleesfout echter weer toe.
6. nvt
7. Eigenlijk kun je deze windmeter maken met allerlei voorwerpen, zolang ze maar niet te zwaar of te licht zijn! Maar let op: alleen de vormafhankelijke constante voor bolvormige voorwerpen is bekend. Daarom moet het voorwerp dat je aan het touwtje hangt bolvormig zijn. Probeer bijvoorbeeld eens een stuiterbal of het balletje van een tafelfoetbalspel. Aangezien plakband niet op een stuiterbal blijft plakken, zul je bijvoorbeeld een nietje kunnen gebruiken.
8.
 - a. De schaal voor het uitdrukken van een windsnelheid in een windkracht is opgesteld door Beaufort aan de hand van effecten van de wind boven open water. In feite wordt met de windkracht dus niet een windsnelheid uitgedrukt, maar hoe wij de wind ervaren. Deze indirecte waarneming van de windsnelheid is dus een subjectieve methode, zodat een windkracht overeenkomt met een range aan windsnelheden (zie figuur 2).
 - b. Uit tabel 2 blijkt dat de minimale windsnelheid, waar nog een windkracht 5 aan wordt toegekend, 8 m/s bedraagt. Hieruit kan een wrijvingskracht berekend worden nadat de evenredigheidsconstante k berekend is (vergelijking 4):

$$k = a \cdot \pi r^2 \cdot \rho_l = 0,27 \cdot \pi \cdot 0,015^2 \cdot 1,29 = 2,462 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$$

De wrijvingskracht kan nu berekend worden met vergelijking 2:

$$F_w = k \cdot v_w^2 = 2,462 \cdot 10^{-4} \cdot 8^2 = 0,0158 \text{ N}$$



Bouw je eigen windmeter

Voor het berekenen van de hoek van het touwtje moet zowel de wrijvingskracht als de zwaartekracht bekend zijn.

$$F_z = m \cdot g = 0,0010 \cdot 9,81 = 0,00981 \text{ N}$$

Nu kan de hoek berekend worden met de tangensregel:

$$F_w = F_z \cdot \tan(\alpha) \rightarrow \tan(\alpha) = \frac{F_w}{F_z} = \frac{0,0158}{9,81 \cdot 10^{-3}} = 1,61 \rightarrow \alpha = \arctan(1,61) = 58^\circ$$

Uit figuur 2 blijkt dat de maximale windsnelheid waar nog een windkracht 5 aan wordt toegekend 10,7 m/s bedraagt. Op dezelfde wijze kan een hoek van 71° berekend worden.

9. Allereerst berekenen we de zwaartekracht op de pingpongbal:

$$F_z = m \cdot g = 0,0010 \cdot 9,81 = 0,00981 \text{ N}$$

Nu kan met behulp van de afgelezen hoek de wrijvingskracht op de pingpongbal berekend worden:

$$F_w = F_z \cdot \tan(\alpha) = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot \tan(30) = 5,664 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Vervolgens kan met behulp van de zojuist berekende wrijvingskracht en de met de cupanemometer gemeten windsnelheid de evenredigheidsfactor k (vergelijking 1) berekend worden:

$$F_w = k \cdot v_w^2 \rightarrow 5,664 \cdot 10^{-3} = k \cdot 5^2 \rightarrow k = 2,2655 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$$

De vormafhankelijke constante kan nu met vergelijking 2 berekend worden:

$$k = a \cdot \rho_l \cdot \pi \cdot r_{bal}^2 \rightarrow 2,2655 \cdot 10^{-4} = a \cdot 1,29 \cdot \pi \cdot (0,015)^2 \rightarrow a = 0,25$$

