



# Wrijvingsexperimenten op de ijsbaan

**De natuurkundeboeken voor havo en vwo staan vol met bewegingsexperimenten. Blokjes worden met een veerunster voortgetrokken, karretjes rollen van een helling of glijden over een luchtkussenbaan waarna op verschillende manieren de beweging geanalyseerd kan worden. Maar dat kan ook allemaal minstens zo goed en veel leuker met leerlingen op de ijsbaan.** Paul Neuraj

**D**e winter van 1995/1996 kenmerkte zich door een lange vorstperiode. Er was net geen Elfstedentocht. Toen het practicum 'meten aan bewegingen' aan de orde kwam heb ik besloten om die metingen niet uit te voeren aan een karretje of met een knikkerbaan maar aan de beweging van de leerlingen zelf en wel op de schaats op het ijs van een vijfjarige vlak bij school. Het was een voorloper van onderwijs in context!

Ruim tien jaar geleden heb ik dit practicum weer opgepakt maar dit keer op de kunstijsbaan in Eindhoven, vanwege de afwezigheid van natuurijs. Omdat het examenprogramma Nieuwe Natuurkunde (NiNa) zich aandiende en omdat het inspirerend werkt voor leerlingen, zijn deze experimenten

verder ontwikkeld tot het pakket dat er nu ligt. Een belangrijk onderdeel van het huidige programma, buiten onderzoeksvaardigheden, technisch-instrumentele vaardigheden en vakspecifiek gebruik van de computer is namelijk de context waarin de concepten geleerd worden. De gebruikte context (schaatsen) is voor de leerling zeer herkenbaar en wordt bovendien als erg plezierig ervaren. De inzet van eigen lichaam bij bewegingsexperimenten sluit zeer goed aan bij de belevingswereld van leerlingen, waardoor bovendien hun fysische intuïtie aangesproken wordt.

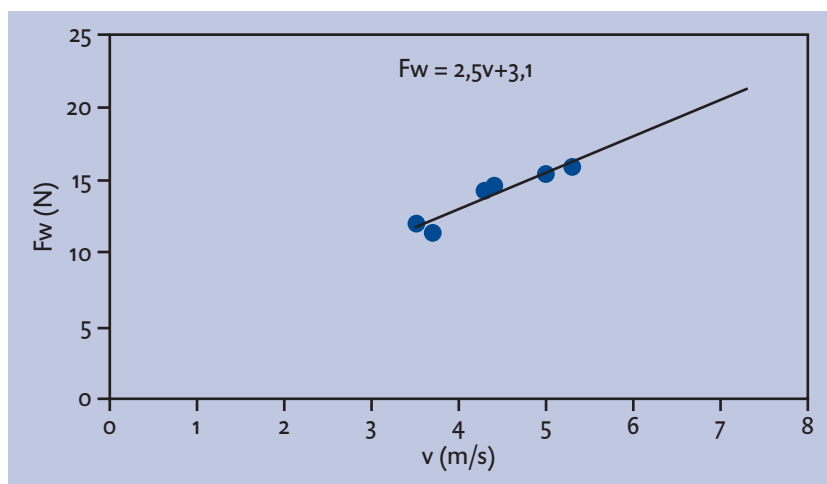
Met enkele relatief eenvoudige experimenten die op iedere ijsbaan uit te voeren zijn, is het mogelijk om een indruk te krijgen van enkele factoren die

van invloed zijn op zowel luchtweerstand (frontale oppervlak, snelheid) als glijweerstand (ijs- en schaatskwaliteit). Alleen de invloed van de luchtdichtheid en de ijstemperatuur is moeilijk aan te tonen op de ijsbaan.

Momenteel zijn vijf experimenten uitgewerkt en herhaaldelijk uitgevoerd door leerlingen; vooral van het Sint-Joriscollege Eindhoven maar ook van het Augustinianum Eindhoven en het Beatrixcollege Tilburg. Drie experimenten zijn gebaseerd op het produceren van een  $x,t$ -diagram, één experiment op de wet van arbeid en kinetische energie en één experiment richt zich op de bepaling van de glijweerstand.

Een belangrijk punt bij de opbouw van de experimenten is dat er verschillende meetmethodes gehanteerd worden. Drie van de vijf hieronder beschreven experimenten zijn in principe identiek alleen de instrumenten waarmee gemeten wordt verschillen (stopwatch/afstandssensor/videometing).

Voor het uitvoeren van de experimenten gaan we steeds een dag naar de ijsbaan waar de leerlingen schaatsend op het ijs metingen uitvoeren. In de vorm van een stationspracticum worden vier experimenten tussen 10:00 uur en 15:00 uur in groepjes van vier tot zes leerlingen uitgevoerd. Het laatste experiment, een videometing, wordt met de hele groep gelijktijdig gedaan.



**Figuur 1** Gemiddelde wrijvingskracht  $F_w$  als functie van de beginsnelheid  $v$  (experiment 1).



Figuur 2 Bepaling glijwrijving (experiment 2).

### Experiment 1 Arbeid en kinetische energie

Twee pionnen worden aan het begin van het rechte stuk op een onderlinge afstand van  $\Delta x = 10\text{ m}$  geplaatst. Een leerling maakt snelheid op de schaats met een stopwatch in zijn hand. Tussen de pionnen probeert hij zijn snelheid constant te houden en meet de tijd  $\Delta t$  over deze 10 m. Hij kan natuurlijk ook de tijd laten meten door een groepsgenoot.

Bij de tweede pion stopt hij met schaatsen en laat zich uitglijden tot stilstand. Met behulp van  $v = \Delta x / \Delta t$  kan de snelheid bepaald worden en daarmee ook de kinetische energie  $E_k = 1/2mv^2$  bij het begin van het uitglijden. Met  $\Sigma W = \Delta E_k$  is de gemiddelde wrijvingskracht tijdens het uitglijden te bepalen. De totale arbeid ( $\Sigma W$ ) is gelijk aan de gemiddelde wrijvingskracht maal de uitglijafstand en  $\Delta E_k$  is gelijk aan het verschil van de kinetische energie van het begin van het uitglijden tot stilstand.

Door met verschillende snelheden en in verschillende houdingen aan te komen schaatsen is het mogelijk om aan de hand van de metingen globale uitspraken te doen over de invloed van snelheid en frontale oppervlak. Voor veel leerlingen is het moeilijk om vijf metingen te verrichten bij snelhe-

den die duidelijk van elkaar verschillen. Hun schaatsvaardigheid laat zelden snelheden toe boven de 5,5 m/s maar ook langzamer dan 3 m/s schaatsen is niet eenvoudig. Hun uitglijafstand ligt grofweg tussen de 30 en 70 m, onder andere afhankelijk van schaatsvaardigheid en ijskwaliteit op dat moment. Hun metingen geven dus ook meteen een indruk van de nauwkeurigheid van deze meting. Goede schaatsers kunnen ook hogere snelheden halen maar dan komt een ander probleem om de hoek kijken: het rechte stuk is te kort om uit te glijden tot stilstand en in de bocht is het moeilijker meten omdat het meetlint waarmee de afstand wordt gemeten langs de baan achter de kussens ligt. Dat de glijwrijving in de bocht een iets andere waarde zal hebben is bij dit experiment niet van invloed gezien de geringe bijdrage in de gemiddelde wrijvingskracht en de foutenmarge in de andere meetgegevens zoals de tijd die men over de eerste 10 m doet en daarmee dus ook de snelheid.

### Experiment 2 Glijwrijving

Een schaatser wordt met een veerunster voortgetrokken met een lage constante snelheid, waardoor de luchtwrijving verwaarloosbaar

is. Op de veerunster wordt daarom door de leerlingen voornamelijk de glijwrijving afgelezen.

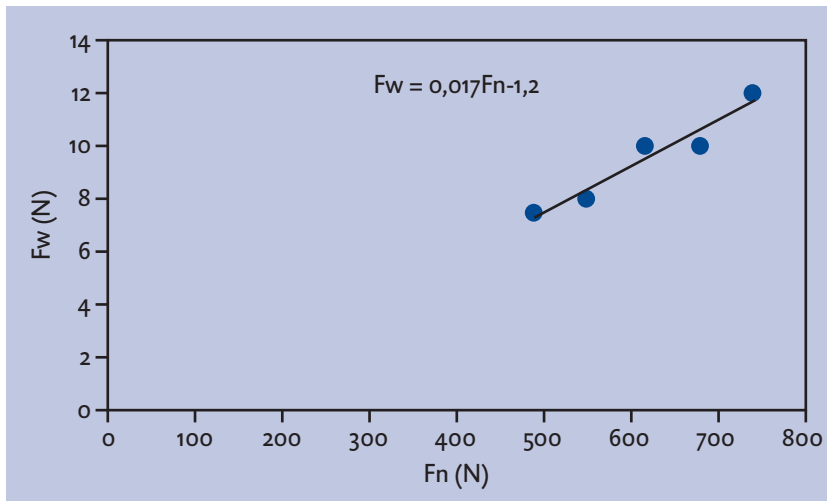
Door de gemeten wrijvingskrachten  $F_w$  van de hele groep in een diagram uit te zetten tegen de bijbehorende normaalkracht  $F_N$  kan gecontroleerd worden of de verhouding van deze twee krachten (dit is de glijwrijvingscoëfficiënt  $\mu$ ) inderdaad voor allemaal hetzelfde is. Bovendien kunnen ze hun eigen glijwrijvingscoëfficiënt  $\mu$  vergelijken met de literatuurwaarden.

Uiteraard is het niet per se zo dat het enige verschil tussen leerlingen de grootte van de normaalkracht is. Andere zaken, zoals het type schaats en de schaatsvaardigheid zouden een rol kunnen spelen. Echter in de praktijk is gebleken dat de effecten van schaats-

Paul Neuraj werkt als aansluitingsdocent op de TU Eindhoven en als docent natuurkunde op het Sint-Joriscollege in Eindhoven. Daarnaast werkt hij voor de KNSB, gewest Noord-Brabant/Limburg/Zeeeland als assistent-systeembeheerder op de ijsbaan in Eindhoven.



p.j.neuraj@tue.nl



**Figuur 3** Wrijvingskracht  $F_w$  als functie van normaalkracht  $F_n$  (experiment 2).



**Figuur 4** Meting van de tijdsintervallen met geheugenstopwatch (experiment 3).

vaardigheid en schaatstype op deze metingen een verwaarloosbaar effect hebben. Omdat het nationale jeugdteam ijshockey in Eindhoven traint en een aantal van deze kinderen op het Sint-Joriscollege zitten kan het verschil tussen de schaatsvaardigheid en schaatsen van leerlingen in een groepje groot zijn. Zelfs bij deze technisch betere schaatsers blijkt de glijwrijvingscoëfficiënt niet af te wijken. Als meerdere groepen met elkaar vergeleken worden, blijkt wel de ijskwaliteit (voor of na een baanverzorging) invloed te hebben op de meetresultaten. Binnen één groep valt dat niet op omdat ze als groep binnen korte tijd allemaal deze metingen hebben uitgevoerd.

Wel is een groot onderscheid gevonden bij langebaanschaatsers op noren met een goede techniek (dat wil zeggen dat ze niet staan te wiebelen). Over het algemeen wordt een glijwrijvingscoëfficiënt gevonden van 0,015 met

een marge van 0,002. De getrainde rijders op noren kwamen uit op 0,007. In de literatuur zijn waarden te vinden van 0,0015 bij getrainde schaatsers onder goede omstandigheden tot 0,6 voor staal op ijs. Bij deze categorie schaatsers werd een duidelijk lagere glijwrijvingscoëfficiënt gevonden.

### Experiment 3 Meting met tijdpoortjes/geheugenstopwatch

Op onderlinge afstand van bijvoorbeeld 5 m worden merktekens geplaatst. Een schaatser maakt snelheid, stopt bij het eerste teken met schaatsen en klikt bij ieder merkteken op een geheugenstopwatch. Dit experiment is ook met schakelaars uitgevoerd waar met een stokje tegen getikt wordt. Deze schakelaars zijn via een Coachlab-interface verbonden met de computer, zodat de tijdstippen waarop tegen een schakelaar getikt wordt meteen worden geregistreerd. Hieruit kan een  $x,t$ -diagram gemaakt wor-

den. Uitgaande van dit diagram kan dan een  $v,t$ -diagram en vervolgens een  $a,t$ - en  $F,t$ -diagram worden gemaakt om uitspraken te kunnen doen over de wrijvingskracht.

Beide varianten hebben hun voor- en nadelen. Het grootste nadeel van het gebruik van de stopwatch is altijd het uitlezen. Ook met instructie hebben leerlingen vaak moeite om snel uit te lezen.

Dat de meting met de stopwatch in de regel minder nauwkeurig is dan de meting met de schakelaars is niet per definitie een nadeel. Dit experiment lijkt op de knikker die met beginsnelheid door een horizontale knikkerbaan rolt. Als een leerling daar meet dat onderweg ergens de snelheid toeneemt krijg je regelmatig de reactie: “dat zal wel kloppen want dat heb ik zo gemeten, kijk maar naar mijn stopwatch”. Op de ijsbaan is de reactie meteen: “dat kan niet, ik kan niet plotseling sneller gaan dus moet ik iets fout gedaan hebben”. Oftewel doordat de leerling zelf de meting ondergaat en het experiment past in de eigen belevingswereld, wordt er kritischer naar de uitkomst van de meting gekeken.

Maar ook de metingen met de drukschakelaars kunnen voor verrassende uitkomsten zorgen. De poortjes worden door de technisch onderwijsassistent aan het begin van de dag klaar gezet. Iedere groep krijgt de opdracht om de onderlinge afstanden (5,0 m) te meten. Vergeten ze dat en heeft de voorgaande groep een poortje weg gemept of verschoven is dat in de uitkomst te zien. Ook het aantikken van de schakelaars gebeurt niet altijd op dezelfde wijze. Als ze dit experiment met een geheugenstopwatch uitvoeren kunnen ze dit al constateren tijdens de meting omdat ze de gemeten tijdsintervallen moeten noteren. Bij de computermeting zal door de docent een afweging gemaakt worden: moeten ze de meetwaarden uit de computer meteen overnemen (dan kunnen ze meteen fouten opsporen) of wordt de meting opgeslagen waardoor er meer tijd is om herhaalmetingen te doen.

### Experiment 4 Afstandsensor

Bij veel leerlingen leeft het misverstand dat metingen met een computer per definitie nauwkeurig zijn. Met dit experiment kan dat beeld verbeterd worden. Met een ultrasone afstands-



**Figuur 5** Creëren van een  $x,t$ -diagram (experiment 4).

sensor zijn in het laboratorium met een luchtkussenbaan en een vlakke metalen plaat mooie  $x,t$ -diagrammen te maken. Ook na tweemaal differentiëren zien de grafieken er vaak nog zeer netjes uit, ook zonder bewerking van de metingen.

Met behulp van eenzelfde afstands-sensor kan (tijdens het uitglijden van de schaatser) rechtstreeks een  $x,t$ -diagram gemaakt worden. Echter leerlingen (op de ijsbaan) zijn geen vlakke metalen platen. Uitgaande van een samplefrequentie van 10 Hz is een meetfout van 1,5 mm (opgave fabrikant) dan weliswaar weinig ten opzichte van de afstand die een leerling aflegt in 0,1 s (ordegrootte 0,3 m tot 0,5 m), maar je weet niet welk punt gemeten is en al helemaal niet of bij iedere meting hetzelfde punt van die leerling gemeten is. Er is dan al snel een fout van ordegrootte 10% in de afstand die in die 0,10 s wordt afgelegd. In het  $x,t$ -diagram zal dat niet altijd goed zichtbaar zijn maar het  $v,t$ -diagram is geen vloeiende lijn meer en het  $a,t$ -diagram al helemaal niet meer. Bij een lagere samplefrequentie wordt dit 'probleem' kleiner maar de vraag is of men dat uit didactisch oogpunt gezien wil. Er kan ook gekozen worden voor een hoge samplefrequentie. Bij de verwerking van de gegevens zal het  $x,t$ -

diagram 'gladgestreken' moeten worden, ofwel de meetwaardes moeten per interval worden gemiddeld waarbij de leerling de keuze moet maken hoe grof deze benadering moet zijn.

### Experiment 5 Videometing

Bij videometing moet de camera op enige afstand van de ijsbaan staan om het uitglijden van de schaatsers over een redelijke afstand te meten. Om over een afstand van 20 m te filmen moet men toch 25 m van de ijsbaan afstaan (bij een beeldhoek van 80°, dat wil zeggen als men filmt met een lens met brandpuntsafstand 18 mm). Op de ijsbaan in Eindhoven is dit eenvoudig op te lossen door de videocamera op de tribune te plaatsen en de leerlingen aan de overzijde te laten schaatsen. De afstand is dan ongeveer 100 m. Op veel ijsbanen is dit niet mogelijk omdat het middenterrein volgebouwd is.

De leerlingen starten in de bocht en vertrekken op een teken van de docent. Ze maken achter elkaar snelheid en laten zich vanaf een afgesproken beginpunt tot een afgesproken eindpunt uitglijden. Van één filmopname van 20 tot 30 seconden beschikt men dan meteen over meerdere meetseries, één per leerling. De gefilmde beweging wordt na afloop verwerkt naar

een  $x,t$ -diagram.

Met behulp van het op veel scholen voorhanden zijnde programma Coach kunnen de leerlingen op basis van de opgenomen filmbeelden een  $x,t$ -diagram produceren. Om een handige grafiek te krijgen (beginnen op  $t=0$ , bewegingsrichting positief) zullen de leerlingen veel instellingen moeten aanpassen. Vaak blijkt dat ze vergeten zijn de afstand die gefilmd wordt op de ijsbaan op te meten waardoor de schaal niet ingesteld kan worden.

Bij het videometen zelf moeten ze een keuze maken over het aantal beelden dat je wil meten, alles in een bepaald interval of een selectie (bijvoorbeeld ieder derde frame). In eerste instantie lijkt het meten van ieder frame het beste maar net als bij experiment 4 krijg je dan veel ruis in de grafieken, vooral bij  $v,t$  en  $a,t$ . Deze ruis is te voorkomen door de grafiek glad te strijken in Coach of door minder frames te kiezen.

### Uitbreiding

De experimenten zoals hierboven beschreven zijn ontwikkeld op het Sint-Joriscollege Eindhoven en worden daar gebruikt voor de praktische opdracht. De beschreven experimenten zijn op iedere ijsbaan uitvoerbaar, zelfs op een ijshockeybaan. Alleen



**Figuur 6** Opname voor videometing (experiment 5).

het eerste experiment (Arbeid en kinetische energie) wordt dan een iets moeilijker in verband met de uitglijafstand.

Op deze dag wordt niet getoetst of de leerlingen een experiment kunnen opzetten (hypothese en ontwerpen van een meetplan). Dit wordt vooraf gedaan. Het is echter ondoenlijk om de leerlingen hun zelf ontworpen experimenten te laten uitvoeren. Er zal erg veel apparatuur meegenomen moeten worden en er bestaat het risico dat na een hele dag meten de leerling terug komt met onbruikbare meetgegevens. Het uitwerken van de meetgegevens gebeurt nagenoeg geheel in de weken volgend op de dag op de ijsbaan met de programma's Excel en Coach6. Bij de experimenten 3 (geheugenstopwatch/poortjes), 4 (afstandssensor) en 5 (videometing) is de verwerking steeds hetzelfde: van een  $x,t$ -diagram door twee keer te differentiëren via een  $v,t$ -diagram naar een  $a,t$ -diagram. Alleen de invoer is steeds anders: een keer moeten de tabellen met meetgegevens handmatig worden aangemaakt, eenmaal staan ze automatisch in en bij de laatste moet de meting in feite nog aan de videobeelden verricht worden. Vooral de dag op de ijsbaan wordt door de leerlingen als zeer prettig ervaren. Ook leerlingen die niet kunnen schaatsen zijn volop bezig. De experimenten zijn met uitzondering van experiment 4 (geheugenstopwatch/poortjes) ook

uit te voeren met een rekje. Dit is namelijk het enige experiment waar een uitglijafstand van enkele tientallen meters noodzakelijk is. Het komt regelmatig voor dat leerlingen na afloop komen vertellen dat ze inmiddels een heel rondje konden schaatsen zonder rekje en zonder te vallen.

Tijdens het uitwerken zal een leerling bij deze experimenten eerder geneigd zijn vraagtekens te zetten dan bij een vergelijkbaar experiment. Als uit een meetserie blijkt dat ze versneld bewegen tijdens het uitglijden zal dat niet zomaar geaccepteerd worden maar zal gezocht worden naar een verklaring. Ook kan het voorkomen dat leerlingen bij de sensormeting een totale wrijving (glijwrijving + luchtwrijving) vinden die kleiner is dan de glijwrijving die ze gevonden hebben bij expe-

riment 2 waar ze met behulp van een veerunster bij heel lage snelheden de glijwrijving bepaald hebben en ook dat wordt niet zomaar geaccepteerd. Het project is uit te breiden, zelfs tot de omvang een profielwerkstuk. Binnen het huidige project wordt nog geen aandacht besteed aan moduleren of een foutenanalyse. Wel wordt op dit moment onderzocht of met een opstelling met twee schaatsen in een omgekeerd slijpblok een grotere nauwkeurigheid kan worden behaald.

Om docenten verder te informeren over deze experimenten is er een werkgroep op de Woudschotenconferentie 2013. Zodra de experimenten beschikbaar zijn zal dit bekend gemaakt worden op [www.tue.nl/schaatsproject](http://www.tue.nl/schaatsproject).



**Figuur 7** Schaatsen in slijpblok.