

2 Sport en beweging

Energieomzettingen



Inhoud

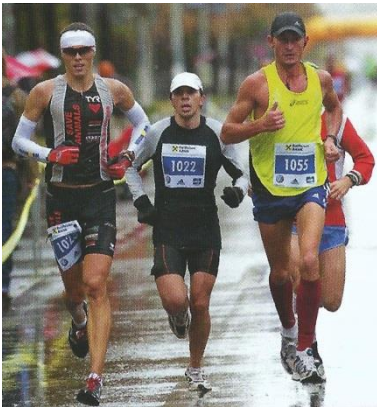
- 2.1 Inleiding
- 2.2 Energie voor bewegen
- 2.3 Energieomzettingen bij bewegen
- 2.4 Vermogen en snelheid
- 2.5 Afsluiting

SLO_KoKo

Lesmateriaalvoorbeeld | Kwadrant B | Verbindende context

2015 | Koos Kortland

2.1 Inleiding



Figuur 1 Bij sporten is kracht en energie nodig, de ene keer gedurende korte tijd (zoals bij de sprint, de andere keer gedurende langere tijd (zoals bij de marathon).

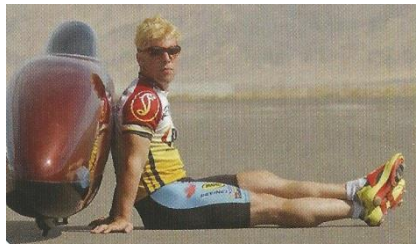


Figuur 3 Bij hoogspringen bepalen de kracht bij het afzetten en de lichaams-houding bij het passeren van de lat hoe hoog je springt.

Bij sporten zoals hardlopen, wielrennen en schaatsen is het belangrijk dat je een bepaalde afstand in een zo kort mogelijke tijd aflegt. Daarvoor is kracht en energie nodig. Die energie haalt je lichaam uit de verbranding van voedsel. Maar alleen veel kracht is niet voldoende: een sporter moet per seconde voldoende energie kunnen omzetten, anders zouden zijn spieren snel vermoeid zijn.

1 Wielrennen

Een wielrenner kan gedurende een lange tijd een vermogen van 400 W leveren, en haalt daarbij een snelheid van zo'n 50 km/h. Maar het wereld-snelheidsrecord op de fiets uit 2007 is van Sam Whittingham, met een snelheid van 130 km/h op zijn ligfiets (zie figuur 2). Daarbij leverde zijn lichaam gedurende korte tijd een vermogen van 960 W.



Figuur 2 Sam Whittingham met zijn ligfiets (links) en tijdens zijn recordpoging (rechts).

- Waardoor kan Sam Whittingham, vergeleken met een wielrenner op een normale racefiets, zo'n grote snelheid halen?
Het menselijk lichaam kan gedurende lange tijd een vermogen van 200 W leveren.
- Probeer een schatting te maken van de snelheid die je dan zelf op zo'n gestroomlijnde ligfiets zou halen.

2 Hoogspringen

Een getrainde hoogspringer gaat met gemak ruggelings over de lat op een hoogte van 2 m (zie figuur 3).

- Leg uit waarom de hoogspringer op deze manier (dus: ruggelings) over de lat springt.
- Probeer een schatting te maken van de hoogte waar je zelf overheen komt bij normaal omhoog springen.

Dit hoofdstuk gaat over kracht, energie en vermogen bij bewegingen in de sport. Dat kunnen bewegingen op topsnelheid zijn, maar ook bewegingen waarbij zo zuinig mogelijk met de energie wordt omgegaan.

Hoofdstukvraag

Wat is bij bewegingen in de sport het verband tussen kracht, energie, vermogen en snelheid?

Voorkennis

- Bij bewegingen is sprake van *energieomzettingen*: energie van de ene soort wordt omgezet in energie van een andere soort.
 - Welke soorten energie ken je? Met welke formule kun je elk van die soorten energie uitrekenen? Wat stellen de symbolen in elk van die formules voor?
 - Welke energieomzettingen ken je? Geef minstens twee voorbeelden.
 - Hoe is het rendement van een apparaat gedefinieerd?
 - Hoe is het vermogen van een apparaat gedefinieerd?
- Bij bewegingen is niet alleen sprake van energieomzettingen. Ook *kracht* en *snelheid* spelen een rol.
 - Welke soorten kracht ken je? Met welke formule kun je elk van die krachten uitrekenen? Wat stellen de symbolen in elk van die formules voor?
 - Hoe is de snelheid bij een beweging gedefinieerd?

- c Hoe is de resulterende kracht (of netto-kracht) op een voorwerp gedefinieerd?
- d Welk verband is er tussen de resulterende kracht (of netto-kracht) op een voorwerp en de beweging van dat voorwerp?

2.2 Energie voor bewegen

Bij sporten verbruikt je lichaam energie. Sporters trainen om zoveel mogelijk energie te kunnen omzetten in beweging. Maar daarbij komt ook energie vrij in de vorm van warmte: tijdens het sporten ga je flink zweten.

Paragraafvraag

Hoeveel energie gebruik je bij bewegen?

Energie en wrijving bij bewegen

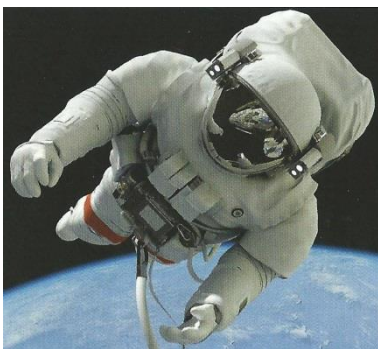
Bij hardlopen, fietsen en zwemmen moet je lichaam voortdurend energie leveren om in beweging te blijven. Die energie haalt het lichaam uit het verbranden van voedsel. De in voedsel opgeslagen energie noemen we **chemische energie**. Die energie wordt door het lichaam omgezet in beweging, ofwel een andere soort energie: **kinetische energie** of **bewegingsenergie**. Er is een kracht nodig om de beweging in stand te houden, tegen de tegenwerkende wrijvingskrachten in. De geleverde energie wordt omgezet in een andere energiesoort: **warmte**.

Als je in je handen wrijft, voel je dat je handen warm worden. Er wordt chemische energie via beweging omgezet in warmte. Deze omzetting noemen we **wrijvingsarbeid**.

Rol- en luchtweerstand

Bij bewegen is de luchtweerstand vaak een belangrijke 'tegenstander'. Want door die luchtweerstand wordt er voortdurend energie van de beweging omgezet in warmte. Deze warmte wordt afgegeven aan de lucht en het oppervlak waar die lucht langs stroomt. Daar merk je normaal gesproken niets van, want de temperatuurstijging is heel klein en de langsstromende lucht zorgt ook voor afkoeling. Als je met de fiets op een horizontale weg rijdt, zijn de rol- en luchtweerstandskracht $F_{w,r}$ en $F_{w,l}$ de enige tegenwerkende krachten. Bij een constante snelheid is er sprake van krachtenevenwicht: in de horizontale richting is de voorwaartse kracht F_{vw} op de fiets precies even groot als de totale tegenwerkende wrijvingskracht. Dus: $F_{vw} = F_{w,r} + F_{w,l}$.

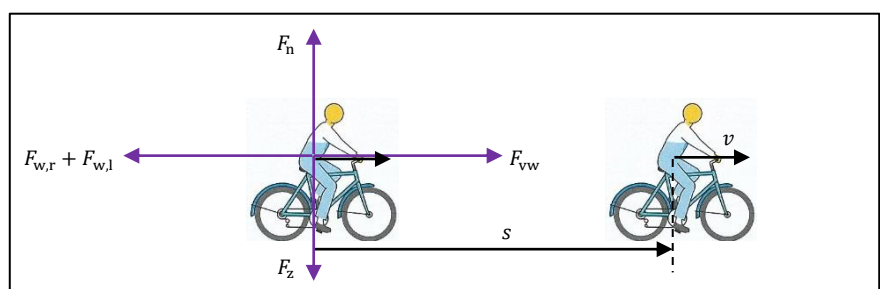
De rolweerstandskracht $F_{w,r}$ is evenredig met de massa m , en hangt verder af van de bandenspanning. De luchtweerstandskracht $F_{w,l}$ is evenredig met het kwadraat van de snelheid v , en hangt verder af van de stroomlijn, het frontaal oppervlak en de luchtdichtheid.



Figuur 4 In de ruimte is er geen lucht en dus ook geen luchtweerstand. Er is daar dan ook geen kracht nodig om een beweging in stand te houden: satellieten draaien rondjes om de aarde zonder energie te gebruiken.



Figuur 5 De invloed van luchtweerstand is goed merkbaar als een ruimtecapsule terugkeert in de dampkring van de aarde. Er is dan zelfs een hitteschild nodig om te voorkomen dat de capsule smelt.



Figuur 6 De voorwaartse kracht F_{vw} verricht arbeid en zorgt daarmee voor de omzetting van chemische energie in kinetische energie. De tegenwerkende krachten $F_{w,r}$ en $F_{w,l}$ verrichten wrijvingsarbeid, en zorgen daarmee voor een omzetting van kinetische energie in warmte.

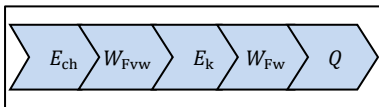
De snelheid, en dus ook de kinetische energie van de fiets blijft gelijk. De chemische energie die het lichaam omzet in kinetische energie is dan even groot als de kinetische energie die door wrijving wordt omgezet in warmte.

Kracht en arbeid

De voorwaartse kracht op de fiets levert energie voor de beweging: die kracht verricht arbeid. Deze arbeid heeft in de natuurkunde een andere betekenis dan in het dagelijks leven. Bij arbeid denk je misschien aan werken in de fabriek, of



Figuur 7 Bij de start van een sprinter zorgt de spierkracht voor een voorwaartse kracht op het lichaam. Die voorwaartse kracht verricht arbeid, en de kinetische energie van de sprinter neemt toe.



Figuur 8 Bij bewegen met constante snelheid wordt chemische energie E_{ch} via arbeid W_{Fvw} van de voorwaartse kracht omgezet in kinetische energie E_k , en uiteindelijk via wrijvingsarbeid W_{Fw} van de tegenwerkende krachten omgezet in warmte Q .

Lichaamsrendement

Het menselijk lichaam zet chemische energie (uit voedsel) om in arbeid en warmte. De spieren verrichten arbeid bij lopen, fietsen, tillen enzovoort. Het rendement van het menselijk lichaam hangt af van de soort activiteit. Fietsen is de meest efficiënte manier van voortbewegen, met een rendement van zo'n 0,25 (of 25%). Bij hardlopen en schaatsen is het rendement van het lichaam lager. Dat komt doordat bij deze manieren van voortbewegen een groter deel van de chemische energie nodig is voor de slingerbeweging van de benen, bij hardlopen nog meer dan bij schaatsen. De training van sporters is er dan ook niet alleen op gericht om tijdens wedstrijden zoveel mogelijk arbeid te kunnen verrichten, maar ook om hun techniek en daarmee hun lichaamsrendement te verbeteren.

Chemische energie

Tijdens het sporten verricht je veel arbeid. Daarvoor gebruikt je lichaam energievoorraden die zijn opgeslagen in de vorm van vetten en koolhydraten. Vooral bij duursporten spreek je de vetreserves van je lichaam aan – en daardoor val je af.

achter je computer een verslag schrijven. Natuurkundig gezien lever je arbeid als je de trap op klimt, een eind fietst of een plank doorzaagt.

De **arbeid** (symbool: W) die een kracht verricht, is de hoeveelheid energie die door de kracht wordt omgezet voor een beweging, zoals lopen of fietsen. Voor het verrichten van arbeid is niet alleen een kracht nodig, maar ook een verplaatsing. De arbeid hangt af van de kracht en de verplaatsing:

$$W = F \cdot s$$

In deze formule is W de arbeid (in J), F de kracht (in N) en s de verplaatsing (in m). Uit de formule volgt de eenheid van arbeid: *newton·meter* (afgekort: Nm).

Voor deze eenheid geldt: 1 Nm = 1 J.

De formule om de arbeid van een kracht te berekenen geldt alleen als de kracht F en de verplaatsing s dezelfde of tegengestelde richting hebben.

Chemische energie

In voedsel is energie opgeslagen: **chemische energie** (symbool: E_{ch}). Die chemische energie komt vrij bij het verbranden van voedsel in het lichaam. De hoeveelheid energie die per kilogram of per liter voedsel vrijkomt, noemen we de **verbrandingswarmte**. De in voedsel opgeslagen chemische energie hangt af van de massa of het volume en de verbrandingswarmte van het voedsel:

$$E_{ch} = r_m \cdot m$$

$$E_{ch} = r_v \cdot V$$

In deze formules is E_{ch} de chemische energie (in J), r_m de verbrandingswarmte (in J/kg), m de massa, r_v de verbrandingswarmte (in J/m³) en V het volume (in m³) van het voedsel.

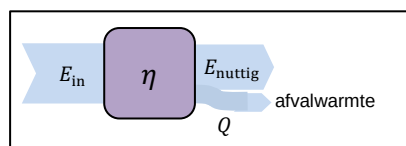
Energiebehoud en rendement

Het lichaam zet chemische energie om in arbeid. Het lichaam noemen we daarom een **energieomzetter**. Bij elke energieomzetting is de totale hoeveelheid energie die de energieomzetter *in* gaat even groot als de totale hoeveelheid energie die de energieomzetter *uit* komt. Met andere woorden: bij elke energieomzetting blijft de totale hoeveelheid energie **behouden**. Dit noemen we de **wet van behoud van energie**. In de vorm van een formule is deze wet te schrijven als:

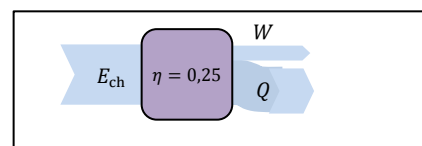
$$E_{tot,in} = E_{tot,uit}$$

In deze formule zijn $E_{tot,in}$ en $E_{tot,uit}$ de totale hoeveelheid energie (in J) die de energieomzetter in gaat en uit komt.

Bij de omzetting van chemische energie in arbeid wordt ook altijd veel chemische energie rechtstreeks omgezet in warmte: tijdens het sporten ga je flink zweten. Die warmte – waar we niets mee doen – zouden we **afvalwarmte** kunnen noemen (zie figuur 9). Bij de energieomzetting wordt dus slechts **een deel** van de chemische energie omgezet in een nuttige (of gewenste) energiesoort: in dit geval arbeid.



Figuur 9 Energie-stroomdiagram van een energieomzetting: van de omgezette energie E_{in} komt slechts een deel vrij als nuttige, gewenste energie E_{nuttig} .



Figuur 10 Energie-stroomdiagram van het lichaam: van de omgezette chemische energie E_{ch} komt 25% vrij als nuttige arbeid W voor de voortbeweging.

Bij bewegingen als lopen en fietsen is de nuttige energie die door de voorwaartse kracht op het lichaam geleverde arbeid W . De verhouding van die nuttige energie en de omgezette chemische energie E_{ch} is het **rendement** (symbool: η) van het lichaam (zie figuur 10):

$$\eta = \frac{E_{nuttig}}{E_{in}} = \frac{W}{E_{ch}}$$

In deze formule is η het rendement (zonder eenheid), E_{nuttig} de geleverde nuttige energie (in J) en E_{in} de omgezette energie (in J).

Het rendement kan worden opgegeven als getal of in de vorm van een persen-

tage. Met de twee formules hierboven bereken je het rendement in de vorm van een getal. Met als resultaat bijvoorbeeld een rendement van 0,21. Dit is dan ook op te geven in de vorm van een percentage: een rendement van $0,21 \cdot 100\% = 21\%$.

Het rendement is altijd kleiner dan 1 (of 100%), omdat de geleverde nuttige energie altijd slechts een deel is van de omgezette energie.

- 5 Bij het sporten krijg je het al snel warm.
- Waar komt die warmte vandaan?
 - Leg uit dat de energie die voor bewegen gebruikt wordt, uiteindelijk ook wordt omgezet in warmte.
 - Waardoor heb je bij fietsen en skeeleren minder snel last van die warmte dan bij hardlopen?
- 6 Hieronder staat een aantal situaties waarin krachten werken op het lichaam van een sporter (al dan niet met racefiets). Geef voor elk van deze situaties antwoord op de volgende drie vragen:
- Welke krachten werken in de richting van de (mogelijke) beweging?
 - Welke krachten werken de (mogelijke) beweging tegen?
 - Welke van deze krachten verrichten arbeid?

- A Een wielrenner staat stil op een horizontale weg.
 B Een wielrenner rijdt met een constante snelheid op een horizontale weg.
 C Bij een touwtrekwedstrijd trekken de beide teams even hard en komen niet van hun plaats.
 D Een atleet loopt met constante snelheid (een deel van) de marathon.
 E Een atleet versnelt tijdens de start van de 100 m sprint.

- 7 Als een wielrenner een bepaalde afstand rijdt, verricht de voorwaartse kracht op de racefiets arbeid.
- Hoeveel keer zo groot is deze arbeid als de wielrenner met dezelfde snelheid een $3 \times$ zo grote afstand aflegt?
 - Hoeveel keer zo groot is deze arbeid als de wielrenner een $3 \times$ zo grote afstand aflegt met een $2 \times$ zo grote voorwaartse kracht, waardoor de snelheid groter is?
 - Welke andere krachten verrichten ook nog arbeid op de wielrenner?
 - Noem een kracht die op de wielrenner werkt zonder arbeid te verrichten.



Figuur 11 Verspringen

- 8 Voor normaal fietsen met een snelheid van 25 km/h moet het menselijk lichaam per seconde zo'n 125 J arbeid leveren. De door het lichaam per seconde omgezette chemische energie is daarbij zo'n 625 J. Bereken het rendement van het menselijk lichaam bij deze manier van voortbewegen.
- 9 Bij het verspringen in figuur 11 neemt de atlete een flinke aanloop, voordat zij springt. Die aanloop is nodig om een hoge snelheid te halen.
- Leg met het begrip arbeid uit waarom een lange aanloop nodig is om een hoge snelheid te halen.
 - Welke grootte bepaalt (behalve de horizontale snelheid) de afstand die bij de sprong wordt afgelegd?



Figuur 12 Speerwerpen

- 10 De speerwerper in figuur 12 probeert de speer een zo groot mogelijke snelheid mee te geven. Leg met de begrippen arbeid en energie uit welke techniek de sporter daarvoor toepast.
- 11 Een gemiddelde sporter verricht in een uur 500 tot 1000 kJ arbeid. Het rendement van het lichaam is ongeveer 25%. De verbrandingswarmte van lichaamsvet is 30 kJ/g.
- Bereken de chemische energie die de sporter in een uur verbruikt.
 - Bereken hoeveel lichaamsvet (in g) de sporter dan in een uur verbrandt.
- 12 Het energieverbruik van een sporter bij bewegen met een constante snelheid over een bepaalde afstand wordt gegeven door de volgende formule:

$$E_{\text{ch}} = \frac{F_{\text{vw}} \cdot s}{\eta}$$

- Welke betekenis heeft elk van de symbolen in deze formule?
- Laat zien hoe deze formule voor het energieverbruik is af te leiden uit de in deze paragraaf 2.2 gegeven formules voor arbeid en rendement.
- Deze formule lijkt erop te wijzen dat het energieverbruik niet afhangt van de snelheid van de sporter. Is dit inderdaad zo? Leg uit waarom wel of niet.
- Leg met behulp van de formule uit dat het energieverbruik van een sporter afneemt bij het door training verbeteren van de techniek van voortbewegen.

2.3 Energieomzettingen bij bewegen

Het lichaam van een sporter verbruikt energie. Daarmee zet het lichaam zichzelf of een ander voorwerp (zoals de kogel bij het kogelstoten) in beweging. Of het lichaam tilt een voorwerp (zoals de halter met gewichten bij het gewichtheffen) op. Die voorwerpen krijgen daardoor energie.

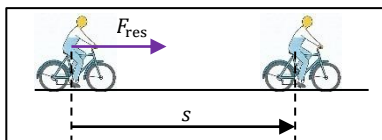
De energie die bij bewegingen wordt verbruikt en de energie die voorwerpen daardoor krijgen is per situatie verschillend. Of, met andere woorden: er is sprake van verschillende **energiesoorten** en **energieomzettingen**.

Paragraafvraag

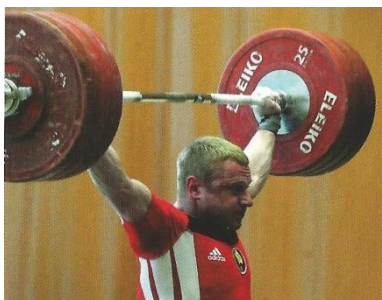
Welke rol spelen energiesoorten en energieomzettingen bij bewegingen in de sport?



Figuur 13 Een kogelstootster geeft door het verrichten van arbeid kinetische energie aan de kogel.



Figuur 14 De verandering van de kinetische energie van een wielrenner is gelijk aan de arbeid van de resulterende kracht F_{res} (of netto-kracht) op de wielrenner. Bij een resulterende kracht in de bewegingsrichting, neemt de kinetische energie van de wielrenner toe (optrekken). Bij een resulterende kracht tegen de bewegingsrichting in, neemt de kinetische energie van de wielrenner af (remmen).



Figuur 15 Een gewichtheffer geeft door het verrichten van arbeid zwaarte-energie aan de halter met gewichten.

Kinetische energie

Een voorwerp versnelt of vertraagt door een resulterende kracht (of netto-kracht) op het voorwerp. Bij het kogelstoten verricht de spierkracht arbeid, en de energie van de kogel neemt toe. Een ander voorbeeld is de start van een sprinter of een wielrenner. Hier zorgt de spierkracht voor een voorwaartse kracht op de sporter. Bij de start verricht de voorwaartse kracht arbeid, en de energie van de sporter neemt toe.

Een voorwerp dat beweegt heeft energie: **kinetische energie** of **bewegings-energie** (symbool: E_k). De kinetische energie van een voorwerp hangt af van de massa en de snelheid van het voorwerp:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

In deze formule is E_k de kinetische energie (in J), m de massa (in kg) en v de snelheid (in m/s) van het voorwerp.

Kinetische energie en arbeid

De kogel van de kogelstootster en het lichaam van de sprinter en de wielrenner hebben kinetische energie. Die energie heeft het voorwerp gekregen doordat een kracht op het voorwerp arbeid heeft verricht. De verandering van de kinetische energie van het voorwerp is gelijk aan de arbeid van de kracht die op het voorwerp werkt. En als er meer dan één kracht op het voorwerp werkt, dan gaat het om de totale arbeid van alle krachten. Dit noemen we de **wet van arbeid en kinetische energie**. In de vorm van een formule is deze wet te schrijven als:

$$W_{\text{tot}} = \Delta E_k$$

In deze formule is W_{tot} de totale arbeid (in J) van alle krachten die op het voorwerp werken, en ΔE_k de verandering van de kinetische energie (in J) van het voorwerp. De totale arbeid is ook op te vatten als de netto-arbeid: de arbeid van de resulterende kracht (of netto-kracht) op het voorwerp (zie figuur 14).

Zwaarte-energie

Als een gewichtheffer een halter met gewichten optilt, verrichten zijn spieren arbeid. Opgetild zit er dus meer energie in de halter dan op de grond. Die energie kan weer vrijkomen als kinetische energie als hij de halter laat vallen.

Een voorwerp dat is opgetild heeft energie: **zwaarte-energie** (symbool: E_z).

Zwaarte-energie heeft te maken met zwaartekracht. De zwaartekracht zorgt er bij het vallen voor dat het voorwerp versnelt: een snelheid, en dus kinetische energie krijgt. De zwaarte-energie van een voorwerp hangt af van de massa en de hoogte van het voorwerp:

$$E_z = m \cdot g \cdot h$$

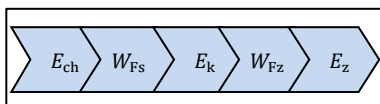
In deze formule is E_z de zwaarte-energie (in J), m de massa (in kg) en h de hoogte (in m) van het voorwerp boven de grond. De valversnelling g is $9,8 \text{ m/s}^2$ (op aarde).

Zwaarte-energie en kinetische energie

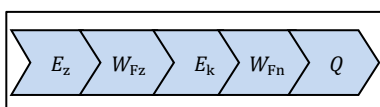
De wet van arbeid en kinetische energie is ook toe te passen op een vallend

Energiesoorten

Naast kinetische energie, zwaarte-energie en chemische energie zijn er nog andere energiesoorten, zoals elektrische energie, veerenergie, stralingsenergie en warmte.



Figuur 16 Energieomzettingen bij het omhoog bewegen van de kogel.



Figuur 17 Energieomzettingen bij het omlaag bewegen van de kogel.



Figuur 18 Bij het raken van de grond wordt kinetische energie omgezet in warmte.

13 W Practicum: arbeid en kinetische energie

In deze opdracht controleer je de wet van arbeid en kinetische energie door metingen aan een bewegend voorwerp op een luchtkussenbaan en aan een remmende fiets.



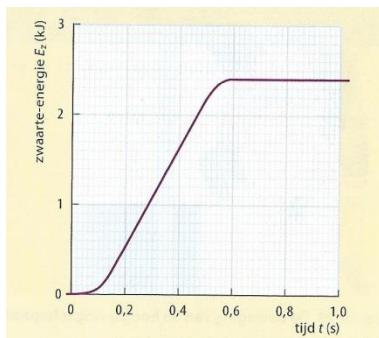
Figuur 19 Skydiven

voorwerp. Op een hoogte h boven de grond heeft het voorwerp zwaarte-energie. Tijdens het vallen neemt deze zwaarte-energie af. De zwaartekracht zorgt ervoor dat het voorwerp tijdens het vallen versnelt: de snelheid, en dus de kinetische energie van het voorwerp neemt tijdens het vallen toe. De arbeid die de zwaartekracht verricht, is gelijk aan de verandering van de kinetische energie van het voorwerp: $W_{Fz} = F_z \cdot h = m \cdot g \cdot h = \Delta E_k$. Hierin herkennen we $m \cdot g \cdot h$ als de zwaarte-energie E_z van het voorwerp bij de start van de valbeweging, of als de verandering ΔE_z van de zwaarte-energie van het voorwerp tijdens de val. De wet van arbeid en kinetische energie is dan in dit geval te schrijven als: $\Delta E_z = \Delta E_k$. Maar dat mag alleen als de valbeweging plaatsvindt onder invloed van *alleen* de zwaartekracht. Als er sprake is van een tegenwerkende luchtweerstandskracht, dan wordt een deel van de zwaarte-energie van het voorwerp tijdens de val omgezet in warmte. De kinetische energie van het voorwerp neemt dan minder toe dan de zwaarte-energie van het voorwerp afneemt.

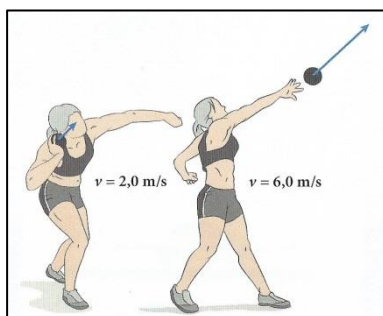
Arbeid en energieomzetting

Steeds wanneer een kracht arbeid verricht, wordt er energie omgezet. Dat is schematisch weergegeven in figuur 16 en 17 voor het voorbeeld van het omhoog stoten van een kogel. Chemische energie wordt via arbeid van de spierkracht omgezet in kinetische energie van een voorwerp (bij het omhoog stoten van de kogel, vóór het loslaten). Die kinetische energie wordt via arbeid van de zwaartekracht omgezet in zwaarte-energie (bij het omhoog bewegen van de kogel, na het loslaten). Die zwaarte-energie wordt via arbeid van de zwaartekracht omgezet in kinetische energie (bij het vallen van de kogel). En die kinetische energie wordt via arbeid van de normaalkracht omgezet in warmte (als de vallende kogel de grond raakt).

- 14 Hoeveel keer zo groot wordt de kinetische energie van een wielrenner als deze met een $2 \times$ zo grote snelheid gaat fietsen?
- 15 Hoeveel keer zo groot wordt de zwaarte-energie van een halter met gewichten als deze tot een $1,5 \times$ zo grote hoogte wordt opgetild?
- 16 Beschrijf de opeenvolgende energieomzettingen bij het hoogspringen. Neem daarbij aan dat de luchtweerstand verwaarloosbaar klein is.
- 17 Beschrijf de opeenvolgende energieomzettingen bij het skydiven. Bedenk daarbij dat de luchtweerstandskracht vanaf een bepaald moment zorgt voor een constante valsnelheid.
- 18 Leg uit waardoor de remmen van een racefiets tijdens het remmen warm worden.
- 19 Hoe groter de snelheid v is waarmee je een kogel omhoog stoot, des te hoger hij komt.
 - a Laat zien dat de kogel een hoogte $h = v^2 / (2 \cdot g)$ bereikt. Hierin is g de valversnelling. Neem daarbij aan dat de luchtweerstand verwaarloosbaar klein is.
 - b Hoeveel keer zo hoog komt de kogel, als je de snelheid bij het omhoog stoten $2 \times$ zo groot maakt?
Als de kogel naar beneden valt, vang je hem op dezelfde hoogte weer op.
 - c Laat zien dat de kogel bij het opvangen een snelheid $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ heeft. Hierin is g de valversnelling. Neem daarbij weer aan dat de luchtweerstand verwaarloosbaar klein is.
 - d Leg uit dat de snelheid van de kogel bij het opvangen even groot is als de snelheid waarmee je hem omhoog hebt gestoten.
 - e Leg uit dat de snelheid van de kogel bij het opvangen kleiner is dan de snelheid waarmee je hem omhoog hebt gestoten als de luchtweerstand niet verwaarloosbaar klein is.
- 20 Bepaal in elk van de volgende twee situaties van welke energiesoort er sprake is, en bereken de hoeveelheid energie.
 - a Een wielrenner met een massa van 80 kg (inclusief racefiets) rijdt met een



Figuur 20



Figuur 21 Het wegstoten van de kogel bij het kogelstoten.

Paragraafvraag

Welk verband is er tussen voorwaartse kracht, snelheid en vermogen?

23 W Practicum: vermogen meten

In deze opdracht meet je het mechanisch vermogen van je eigen lichaam.

Lichaamsvermogen

De per seconde door het lichaam van een sporter geleverde arbeid (dus: het mechanisch vermogen) kan groot of klein zijn. Hoe groter het mechanisch vermogen is, des te korter kan het lichaam arbeid verrichten. Met andere woorden: des te sneller raakt het lichaam te vermoeid. Topsporters met een goed getraind lichaam kunnen zo'n 10 minuten een mechanisch vermogen van 500 W leveren, en 400 W gedurende een langere periode van enkele uren. Het maximale mechanisch vermogen is zo'n 1500 W, maar dit houdt het lichaam maar korte tijd vol.

constante snelheid van 45 km/h over een horizontale weg.

- b** Een gewichtheffer houdt een halter met een massa van 90 kg op een hoogte van 2,3 m boven de grond.

- 21** Een gewichtheffer traint met een halter van 140 kg. In figuur 20 is de zwaarte-energie E_z van de halter als functie van de tijd t tijdens het optillen weergegeven. Bepaal de hoogte van de halter na het optillen.

- 22** Een kogelstootster stoot een kogel weg onder een hoek van 45° met het horizontale vlak (zie figuur 21). De massa van de kogel is 5,0 kg. De kogel verplaatst zich tijdens de stoot over een afstand van 1,1 m (schuin omhoog). De snelheid van de kogel neemt hierbij toe van 2,0 m/s tot 6,0 m/s.

- a** Bereken de toename van de kinetische energie van de kogel tijdens het wegstoten.
b Laat met een berekening zien dat tijdens het stoten de hoogte van de kogel toeneemt met 0,78 m.
c Bereken de toename van de zwaarte-energie van de kogel tijdens het wegstoten.
d Bereken hoeveel arbeid de spierkracht tijdens het wegstoten van de kogel heeft verricht.

2.4 Vermogen en snelheid

Om te bewegen moet je zowel kracht zetten als energie leveren door arbeid te verrichten. De voorwaartse kracht op het lichaam van een sprinter, marathonloper of wielrenner verricht arbeid. Daarbij is niet alleen de hoeveelheid arbeid van belang, maar ook de tijd waarin die arbeid moet worden verricht. Bij een grote snelheid op de sprint is een grote voorwaartse kracht nodig en wordt per seconde een grote afstand afgelegd. Het lichaam levert dan in korte tijd veel arbeid. Of, met andere woorden: het vermogen van het lichaam moet groot zijn. Voor het lopen van de marathon kan het vermogen van het lichaam kleiner zijn, maar dat moet de sporter dan wel langere tijd kunnen volhouden.

Arbeid en vermogen

Bij het lopen of fietsen levert het lichaam arbeid. Die arbeid wordt geleverd in een bepaalde tijd. De arbeid die het lichaam per seconde levert, noemen we het **mechanisch vermogen** (symbool: P_m) van het lichaam:

$$P_m = \frac{W}{t}$$

In deze formule is P_m het mechanisch vermogen (in J/s of W), W de geleverde arbeid (in Nm of J) en t de tijdsduur (in s) waarin de arbeid wordt geleverd.

Uit de formule volgt de eenheid van mechanisch vermogen: *joule per seconde* (afgekort: J/s). Dit is – net als bij het eerder behandelde elektrisch vermogen – hetzelfde als de eenheid *watt* (afgekort: W): $1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$.

Snelheid en vermogen

Een sporter die met een constante snelheid v loopt of fietst, legt in een bepaalde tijd t een afstand s af. Voor de constante snelheid van die sporter geldt: $v = s/t$.

Om de sporter met een bepaalde (constante) snelheid te laten bewegen, moet het lichaam een bepaald mechanisch vermogen leveren. Het verband tussen dit mechanisch vermogen en de snelheid is af te leiden uit de arbeidsformule:

$$W = F_{vw} \cdot s. \text{ Voor het mechanisch vermogen geldt dan: } P_m = W/t = F_{vw} \cdot s/t.$$

Hierin is s de afstand die wordt afgelegd, en t de tijd waarin dat gebeurt. De breuk s/t in de formule is niets anders dan de snelheid. Het vervangen van de breuk s/t door de snelheid v levert de volgende formule voor het mechanisch vermogen:

$$P_m = F_{vw} \cdot v$$

In deze formule is P_m het mechanisch vermogen (in J/s of W), F_{vw} de voorwaartse kracht (in N) en v de snelheid (in m/s).

Rendement en vermogen

In de eerder gegeven formule voor het rendement van het menselijk lichaam als

energieomzetter mag je de energie E ook vervangen door het vermogen P . Want: het gaat om de nuttige en omgezette energie in dezelfde tijdsduur. Bij een tijdsduur van 1 s is deze energie gelijk aan het vermogen.

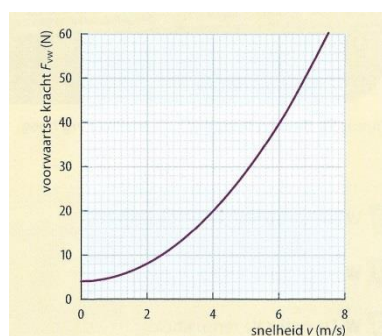
Bij bewegingen als lopen en fietsen is het nuttige vermogen het door het lichaam geleverde mechanisch vermogen P_m . Het rendement van het lichaam is dan de verhouding van dat mechanisch vermogen en het omgezette chemische vermogen P_{ch} :

$$\eta = \frac{P_{nuttig}}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_{ch}}$$

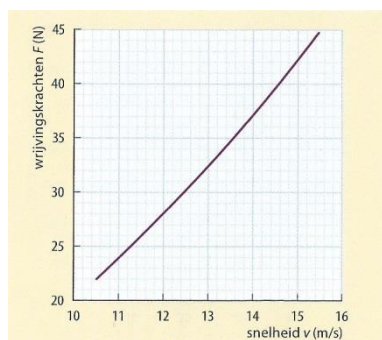
In deze formule is η het rendement (zonder eenheid), P_{nuttig} het geleverde nuttige vermogen (in W) en P_{in} het omgezette vermogen (in W).



Figuur 22 Roeitrainingsapparaat



Figuur 23



Figuur 24

- 24 Een roeitrainingsapparaat geeft het vermogen aan dat tijdens de inspanning geleverd wordt door de spieren van de sporter. Welke grootheden moeten worden gemeten om het geleverde vermogen te berekenen?
- 25 De kracht die een wielrenner tijdens het fietsen moet uitoefenen op de pedalen verandert door over te schakelen naar een andere versnelling. Dan verandert ook zijn beentempo. Op een bepaald moment schakelt hij over van de derde naar de vierde versnelling, terwijl zijn rijsnelheid constant blijft.
 - a Wanneer is de kracht op de pedalen het grootst: in de derde of in de vierde versnelling?
 - b Wanneer is het beentempo het grootst: in de derde of in de vierde versnelling?
 - c Leg uit of, en zo ja hoe het mechanisch vermogen afhangt van de door deze wielrenner gekozen versnelling.
- 26 Het verband tussen de voorwaartse kracht F_{vw} op een wielrenner en de snelheid v is weergegeven in het diagram van figuur 23.
 - a Laat zien dat uit figuur 23 blijkt dat de voorwaartse kracht ongeveer evenredig is met het kwadraat van de snelheid.
 - b Bepaal het mechanisch vermogen van de wielrenner bij de volgende drie waarden van de snelheid: 2,0 m/s, 4,0 m/s en 6,0 m/s.
 - c Is het mechanisch vermogen van de wielrenner ook ongeveer evenredig met het kwadraat van de snelheid, of neemt het vermogen sneller toe? Geef een verklaring voor dit verband.
- 27 Bij de 100 m sprint en bij een marathon levert het lichaam van de atleet een mechanisch vermogen. Tijdens de wedstrijd is de voorwaartse kracht op de sprinter ruwweg $4 \times$ zo groot als die op de marathonloper.
 - a Maak een schatting van de (gemiddelde) snelheid van een atleet op de sprint en op de marathon. Bedenk daarbij om welke afstanden en tijden het bij dit soort atletiekwedstrijden ruwweg gaat.
 - b Hoeveel keer zo groot (ongeveer) is dan het mechanisch vermogen van de sprinter, vergeleken met dat van de marathonloper?

In deze paragraaf 2.4 staan gegevens over het mechanisch vermogen dat een goed getraind menselijk lichaam kan leveren, afhankelijk van de tijdsduur van de inspanning.

 - c Maak op grond van die gegevens een schatting van het mechanisch vermogen van de marathonloper.
 - d Hoe groot zal het mechanisch vermogen van de sprinter dan (ongeveer) zijn?
- 28 Een zwemmer legt de 400 m vrije slag af in een tijd van 4,00 minuten en levert daarbij 144 kJ arbeid.
 - a Bereken de voorwaartse kracht op de zwemmer tijdens de race.
 - b Bereken het mechanisch vermogen van de zwemmer.
- 29 Bij het schaatsen werken twee tegenwerkende krachten op de schaatser: de glij- en de luchtweerstand. De glijweerstandskracht is bij schaatsen niet groot, gemiddeld ongeveer 2 tot 3 N. De luchtweerstandskracht is aanzienlijk groter, en hangt af van de snelheid. Het diagram van figuur 24 geeft het verband tussen de totale wrijvingskracht F_w en de snelheid v . Topschaatsers halen op een afstand van 10 km een gemiddelde snelheid van ongeveer 12,5



Figuur 25 Bij een mechanisch vermogen van 400 W bereikt een wielrenner een snelheid van zo'n 50 km/h.

m/s (ofwel zo'n 45 km/h). Daarmee rijden ze de 10 km in een tijd van 13 minuten en 20 seconden.

- a** Lees in het diagram van figuur 24 de totale wrijvingskracht af bij die snelheid.
 - b** Bereken daarmee het gemiddelde vermogen dat de schaatser moet leveren tijdens de race.
Voor een tijd van 13 minuten over de 10 km is een groter vermogen nodig. Een tijdswinst van 20 s betekent dat de gemiddelde snelheid 2,5% hoger moet zijn.
 - c** Bepaal met hoeveel procent het vermogen moet toenemen om een tijd van 13 minuten te rijden.
 - d** Sprinters kunnen een ronde van 400 m rijden in 26 s. Bepaal het vermogen dat daarvoor nodig is.
- 30** Een wielrenner kan gedurende een lange tijd een mechanisch vermogen van 400 W leveren. De voorwaartse kracht op de wielrenner hangt onder andere af van zijn snelheid v . Bij een voorovergebogen houding van de wielrenner wordt deze voorwaartse kracht gegeven door: $F_{vw} = 0,16 \cdot v^2$. Deze voorwaartse kracht is gelijk aan de tegenwerkende luchtweerstandskracht. De tegenwerkende rolweerstandskracht wordt dus verwaarloosd.
- a** Bereken de snelheid van deze wielrenner.
 - b** Leg uit waardoor in de praktijk de snelheid van deze wielrenner wat kleiner zal zijn.

2.5 Afsluiting

Samenvatting

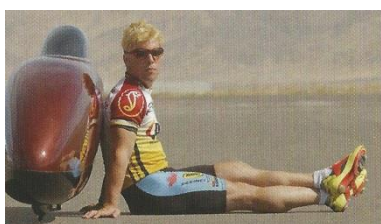
De inhoud van dit hoofdstuk over bewegingen in de sport is als volgt samen te vatten.

- Voor het lopen of fietsen met een constante snelheid is een voorwaartse kracht op het lichaam nodig. Die voorwaartse kracht verricht arbeid. Hoe groter de voorwaartse kracht en de verplaatsing zijn, des te groter is de verrichte arbeid.
 - Bij het lopen of fietsen met een constante snelheid is de voorwaartse kracht even groot als de totale tegenwerkende wrijvingskracht (de luchtweerstandskracht bij lopen en fietsen, en daarnaast de rol- of glijweerstandskracht bij fietsen of schaatsen).
 - Het lichaam van de sporter is een energieomzetter die chemische energie omzet in arbeid en warmte.
 - Bij elke energieomzetting geldt de wet van behoud van energie: de totale energie die een energieomzetter in gaat is gelijk aan de totale energie die de energieomzetter uit komt.
 - Bij elke energieomzetting ontstaat afvalwarmte, waardoor het rendement van een energieomzetter zoals het lichaam van een sporter altijd kleiner is dan 1 (of 100%): de geleverde nuttige energie (in dit geval arbeid) is kleiner dan de verbruikte energie (in dit geval chemische energie).
 - Energie is te onderscheiden in verschillende energiesoorten: kinetische energie, zwaarte-energie, chemische energie en warmte (maar ook elektrische energie, veerenergie en stralingsenergie).
 - Bij een energieomzetting wordt de ene energiesoort omgezet in één of meer andere energiesoorten.
 - Een energieomzetting wordt veroorzaakt door de arbeid van één of meer krachten.
 - Bij een energieomzetting zonder tegenwerkende wrijvingskrachten geldt de wet van arbeid en kinetische energie.
 - Bij een energieomzetting met tegenwerkende wrijvingskrachten wordt de wrijvingsarbeid van deze krachten omgezet in warmte.
 - Het mechanisch vermogen van het lichaam is de door de voorwaartse kracht per seconde verrichte arbeid. Hoe groter de voorwaartse kracht en de snelheid zijn, des te groter is het mechanisch vermogen.
- 31** Maak een overzicht van de formules die bij bewegingen in de sport een rol spelen. Geef bij elk symbool in die formules aan welke grootheid dat symbool

voorstelt, en wat de bijbehorende eenheid is.

- 32** Maak een begrippenweb over bewegingen in de sport waarin je laat zien welke verbanden er zijn tussen de verschillende grootheden uit de samenvatting hierboven. Vul het begrippenweb waar mogelijk aan met de formules voor het verband tussen de verschillende grootheden uit opdracht 31.
- 33** Kijk terug naar je antwoorden bij opdracht 1 en 2 van dit hoofdstuk. Bij welke vragen in die opdrachten zou je nu een ander antwoord geven? En welk ander antwoord is dat dan? (Zie zo nodig ook de eindopgaven 34 en 35.)

Eindopgaven



Figuur 26 Sam Whittingham met zijn racefiets Varna.

- 34** In figuur 25 zie je één van de snelste fietsen ter wereld en Sam Whittingham, de wereldrecordhouder uit 2007. Zijn snelheidsrecord is 130,1 km/h, zijn uurrecord is 86,5 km. De snelheden die ligfietsen halen, zijn vooral het resultaat van het verlagen van de luchtweerstand. Voor de luchtweerstandskracht geldt de volgende formule:

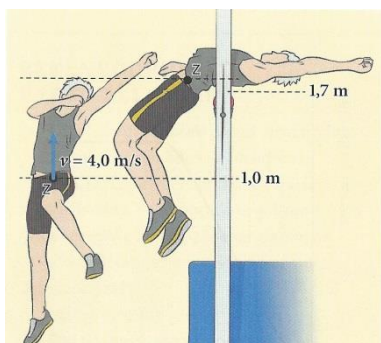
$$F_{w,l} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

Deze formule wordt vaak vereenvoudigd tot:

$$F_{w,l} = k \cdot v^2$$

De racefiets van Sam heet de Varna. Voor de Varna geldt: luchtweerstandscoefficiënt $c_w = 0,11$ en frontale oppervlakte $A = 0,30 \text{ m}^2$. De luchtdichtheid ρ bij het vestigen van het record was $1,09 \text{ kg/m}^3$.

- a** Laat met een berekening zien dat voor de Varna geldt: $k = 0,018 \text{ kg/m}$. Voor beide records is niet alleen een snelle fiets maar ook een goede coureur nodig. Sam leverde bij beide prestaties een behoorlijk groot vermogen. De rolweerstandskracht op de Varna is 3,1 N.
- b** Bereken voor beide records welk vermogen Sam moest leveren.
- c** Welke topsnelheid (in km/h) zou jij ongeveer kunnen halen in de Varna? Verwaarloos bij je berekening de rolweerstand en neem aan dat je een maximaal vermogen van 400 W kunt leveren.



Figuur 27 Het lichaam van de hoogspringer bij de afzet en in het hoogste punt van de sprong.

- 35** Een hoogspringer met een massa m van 60 kg komt met een verticale snelheid v van 4,0 m/s los van de grond. Tijdens de hele beweging is de luchtweerstand verwaarloosbaar klein. Om erachter te komen of de hoogspringer in de situatie van figuur 27 over de lat heen komt, moet je bepalen welke hoogte zijn zwaartepunt maximaal bereikt. Daarbij hoeft geen rekening te houden met de beweging van de hoogspringer in de horizontale richting.
- a** Bereken de kinetische energie van de hoogspringer vlak ná de afzet.
- b** Hoe groot is dan zijn zwaarte-energie in het hoogste punt van de beweging?
- c** Laat met een berekening zien of het zwaartepunt van de hoogspringer wel of niet over de lat op 1,7 m hoogte komt.
- d** Leg uit dat met een goede springtechniek bij een geslaagde sprong het zwaartepunt van de hoogspringer zelfs onder de lat door kan bewegen.
- 36** Tijdens het schaatsen worden op een schaatser twee wrijvingskrachten uitgeoefend: de glijweerstandskracht (door het glijden over het ijs) en de luchtweerstandskracht. Deze luchtweerstandskracht is onder andere afhankelijk van de dichtheid ρ van de lucht. Op een laag gelegen ijsbaan (zoals in Nederland) is die dichtheid meestal groter dan op een hoog gelegen baan (zoals bijvoorbeeld in het Canadese Calgary). Op een hoog gelegen baan zou een schaatser dus een betere tijd kunnen neerzetten. Maar hoeveel beter zou die tijd dan zijn?
- De totale wrijvingskracht F_w (in N) op een schaatser in het laag gelegen Thialf IJstadion in Heerenveen wordt gegeven door: $F_w = 2,50 + 0,164 \cdot v^2$. Hierin is v de snelheid (in m/s). De schaatser rijdt daar de 10 km in 14 minuten en 11 seconden.
- a** Bereken het mechanisch vermogen van de schaatser tijdens zijn rit op de 10 km in het Thialf IJstadion.
- b** De waarde van de constante 0,164 in de formule voor de totale wrijvings-

kracht is evenredig met de luchtdichtheid. Bij de rit in Heerenveen was die luchtdichtheid $1,19 \text{ kg/m}^3$. De luchtdichtheid in het op 1100 m boven zee-niveau gelegen Calgary is $1,02 \text{ kg/m}^3$. Ga ervan uit dat de omstandigheden verder gelijk zijn aan die in Heerenveen. Ga er bovendien van uit dat het mechanisch vermogen van de schaatser tijdens de rit ook hetzelfde is.

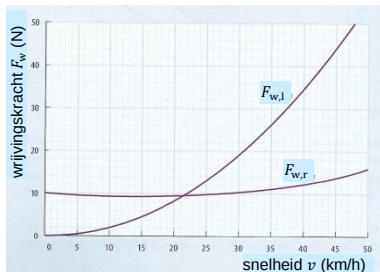
- c Leg uit dat de schaatser in Calgary een betere tijd op de 10 km zal maken.
- d Bepaal de snelheid van de schaatser tijdens de rit op de 10 km in Calgary uit een P_m, v -diagram. Kies bij het maken van dit diagram voor de snelheid een paar waarden in de buurt van de snelheid van de schaatser op de baan in Heerenveen.
- e Welke eindtijd komt er in Calgary op het scorebord te staan? Hoeveel procent sneller rijdt de schaatser op de ijsbaan van Calgary, vergeleken met zijn eindtijd in Heerenveen?
- f Zal de schaatser in Calgary altijd sneller zijn dan in Heerenveen? Leg uit waarom wel of niet.



Figuur 28 Luchtfiets

37 De luchtfiets is een vliegtuig dat uitsluitend met menselijke inspanning als energiebron vliegt. De piloot zit in een gestroomlijnd 'bakje' onder de grote vleugel (zie figuur 28). De luchtfiets heeft een spanbreedte van 13 m, een massa van 115 kg (inclusief piloot) en een kruissnelheid van 35 km/h. Bij die snelheid moet de piloot een mechanisch vermogen van 184 W leveren.

- a Bereken de luchtweerstandskracht op de luchtfiets bij deze snelheid. De luchtstroom langs de vleugel zorgt voor een kracht schuin omhoog. De horizontale component van deze kracht is de luchtweerstandskracht $F_{w,l}$, de verticale component is de liftkracht F_d die het vliegtuig 'draagt'.
- b Leg uit dat het voor de luchtfiets heel belangrijk is dat de luchtweerstandskracht veel kleiner is dan de liftkracht.
- c Leg uit waarom het belangrijk is dat de piloot in een gestroomlijnd 'bakje' zit.
- d Bereken de verhouding tussen de liftkracht en de luchtweerstandskracht. Voor een grotere snelheid is een groter mechanisch vermogen nodig. Voor geïfende sporters is het duurvermogen ongeveer 300 W.
- e Bereken de snelheid die met de luchtfiets te halen is bij een mechanisch vermogen van 300 W. Stel eerst een vergelijking voor $F_{w,l}$ op.



Figuur 29

38 Een elektrische fiets met een massa van 81,5 kg (inclusief fietser) heeft een actieradius van 50 km bij een constante snelheid van 20 km/h. De actieradius is de maximale afstand die door de fiets met een volle accu kan worden afgelegd zonder te trappen. Aangenomen mag worden dat de totale hoeveelheid energie die een volle accu kan leveren bij elke snelheid hetzelfde is. Het diagram van figuur 29 geeft de rol- en luchtweerstandskracht $F_{w,r}$ en $F_{w,l}$ op de fiets als functie van de snelheid v . Voor de luchtweerstandskracht geldt: $F_{w,l} = k \cdot v^2$. Hierin is k een constante (in kg/m).

- a Bepaal de waarde van de constante k uit het diagram van figuur 29.
- b Bepaal de actieradius van de elektrische fiets bij een $2 \times$ zo grote constante snelheid (40 in plaats van 20 km/h).