

# Beter fierljeppen

## Natuurkunde bepaalt: een nat pak of een medaille

Wanneer je bij polsstokhoogspringen onder de indruk bent van de prestatie van een topatleet die met een flexibele stok over een 6 m hoge dwarslat springt; hoe spectaculair is het dan wel niet om een springer met een 13 m lange polsstok een hoogte te zien bereiken van meer dan 11 m boven het water om daarna in een zandbed te landen en een afstand van 21 m of meer te bereiken.

**P**olsstokhoogspringen wordt beschouwd als een van de moeilijkste onderdelen van atletiek. Maar polsstokverspringen, in Friesland fierljeppen genoemd, waarbij een atleet met een stok zo ver mogelijk over een waterpartij springt, doet daar niet voor onder. Om niet nat te gaan en een grote afstand te bereiken, moet de atleet een hoge sprintsnelheid, sterk ontwikkelde krachten, een perfecte coördinatie, en moed aanwenden. Klassieke mechanica, die grotendeels op school behandeld wordt, helpt om vragen te beantwoorden zoals “Wat is de optimale aanloopsnelheid?”

**ANDRÉ HECK** is hoofddocent wiskunde aan de Universiteit van Amsterdam en doet discipline-gebonden onderwijs-research bij wiskunde en natuurwetenschappen.

**PETER UYLINGS** is gepensioneerd vakdidacticus en docent natuurkunde.

**HANS VAN LEEUWEN** is enthousiast volger en deskundige van polsstokverspringen.

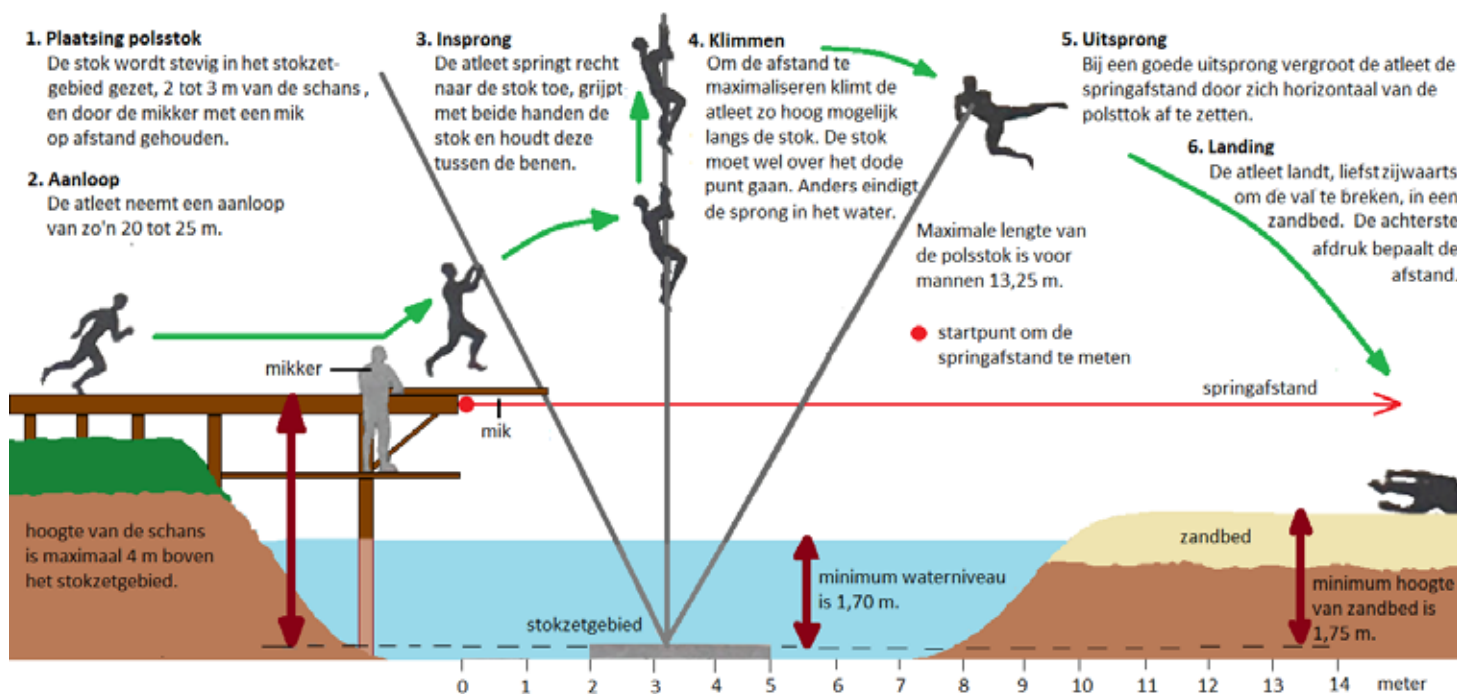


en “Wat is het beste moment om de polsstok weer los te laten?” Dit nodigt u en uw leerlingen uit om onderzoek naar polsstokverspringen te doen.

Het begint al met een felle sprint over een horizontale schans waarvan de atleet met een vaart van omstreeks 30 km/u aan het uiteinde afspringt om vervolgens een stok beet te grijpen met twee handen en dan ook nog het volle lichaamsgewicht omhoog te trekken. Vervolgens is grote spierkracht nodig om snel genoeg langs de stok omhoog te klimmen. De insprong en het klimmen moeten bovendien nog heel accuraat gebeuren opdat de stok zo min mogelijk naar links of rechts uitwijkt en ook nog over het dode punt heen komt, dat wil zeggen dat de polsstok een verticale stand bereikt en passeert. Daarna moet de springer nog het juiste moment kiezen om zich met een afzet los te maken van de stok om daarmee de verste afstand te bereiken. De springer doet veel op ervaring en intuïtie, maar ook met klassieke mechanica kan men de optimale sprintsnelheid of het optimale moment om uit de stok te springen bepalen.

### De fasen van de sprong

In figuur 1 zijn de fasen van een sprong schematisch weergegeven. Ook zijn afmetingen van een wedstrijdaccommodatie aangeduid die volgens het wedstrijdreglement van de Nederlandse Fierljep Bond ([www.nederlandsefierljepbond.nl](http://www.nederlandsefierljepbond.nl)) toegestaan zijn en het gunstigst voor een verre sprong. Een seniorenstok heeft maximale lengte van 13,25 m, weegt 40 kg, met het meeste gewicht geconcentreerd in een voetverzwaring aan het uiteinde van de stok dat in het water geplaatst wordt. Door de stok als een homogene staaf met voetverzwaring te beschouwen en de bewering dat dit systeem horizontaal in balans is bij een steunpunt op 1 m afstand van de voet kun je met de momentenwet en schoolwiskunde schatten dat de polsstok, bij een lengte van 13,25 m en een totaalgewicht van 44 kg, ongeveer 6 kg weegt. Op zichzelf is dit voor leerlingen al een uitdagende puzzel in schattend rekenen. Het vooraf plaatsnemen van de polsstok bestaat uit drie stappen: stokzetten, afzetten van de stok van de hand, en fixeren van de stok. Bij het zetten van de polsstok in het water strekt de springer zich recht omhoog en raakt de stok op



Figuur 1. Schematische weergave van de zes fasen in polsstokverspringen.

een van tevoren bepaalde hoogte aan. In het voorbeeld getoond in figuur 2 is dat 11,25 m en is de strekhoogte van de springer 2,24 m. Met op school behandelde meetkunde (stelling van Pythagoras en gelijkvormige driehoeken) en goniometrie kan een leerling uitrekenen hoe ver de voet van de polsstok af staat van de voorkant van de schans (hier 6 m) en wat de hoek is die de polsstok met de horizontaal maakt (hier  $34^\circ$ ). Het stokzetten op een schans bepaalt voor een deel de afstand van de sprong: hoe schuiner de stok gezet wordt, hoe verder de voet van de schans af staat en hoe verder er in theorie gesprongen kan worden. Maar fysica leert dat hoe schuiner de stok staat, hoe krachtiger de afzet en hoe hoger de sprintsnelheid van de springer moet zijn om met stok en al het dode punt te passeren. Na het stokzetten gaat de springer aan het uiteinde van de schans staan en met een meetstok in de hand de polsstok naar voren duwen zodat deze minder schuin komt te staan, maar naar ervaring van de springer nog wel met een sprong te bereiken is. In figuur 2 duwt de springer op 1,5 m hoogte de polsstok 1,7 m ver weg. Een meetkundige berekening geeft dan een nieuwe stokhoek van  $53^\circ$ . Tot slot zorgt een persoon (de mikker) met behulp van een mik (de stok met een tweantidige vork aan het uiteinde) dat de polsstok in deze ingestelde positie blijft staan.

### Minimaal benodigde sprintsnelheid

Met natuurkundige basisprincipes, wat wiskunde en een sterke versimpeling van de situatie

kan de fierljepbeweging al onderzocht worden en bijvoorbeeld ingeschat worden wat de minimale sprintsnelheid  $v$  is die een sprinter met massa  $M$  nodig heeft zonder langs de stok te klimmen voor het passeren van het dode punt bij een gegeven stokhoek  $\theta_0$ , inspronghoogte  $r_0$  en bij gebruik van een polsstok met lengte  $L$  en massa  $m$ . De wet van behoud van energie en de formules voor kinetische en potentiële energie leiden tot de formule

$$v = \sqrt{\left(2r_0 + \frac{m}{M}L\right)g(1 - \sin \theta_0)}$$

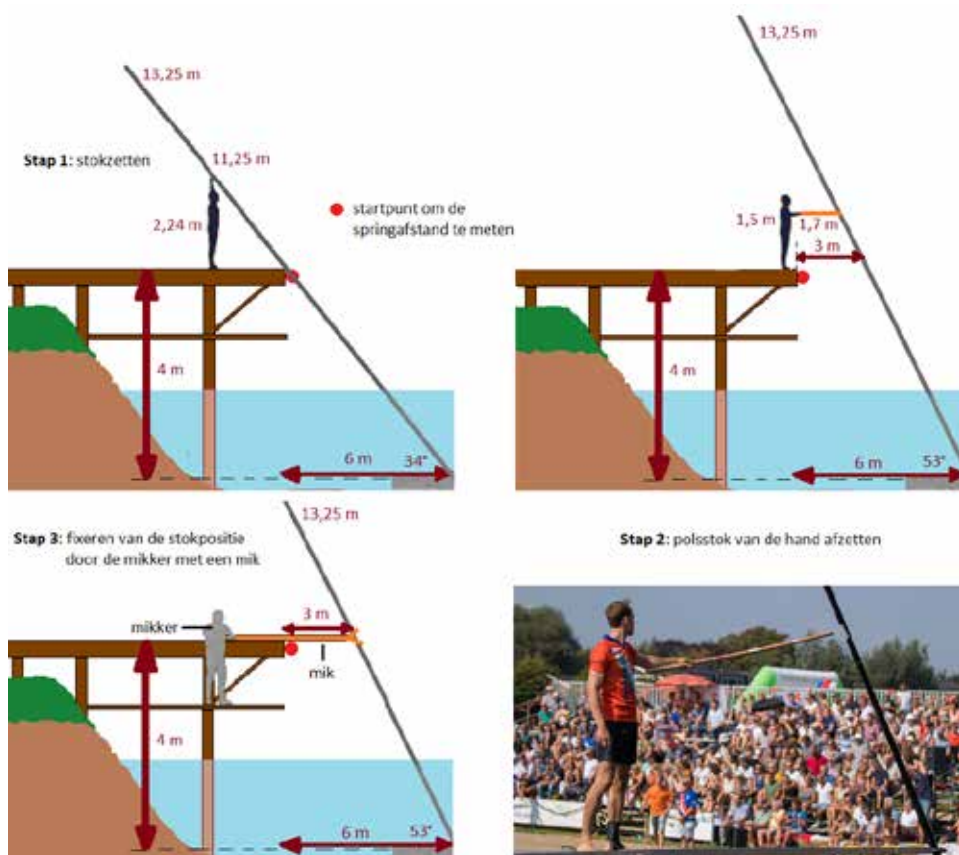
Als rekenvoorbeeld nemen wij  $r_0 = 8$  m,  $\theta_0 = 53^\circ$ ,  $L = 13,25$  m,  $M = 70$  kg,  $m = 6$  kg,  $g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>.

Dan wordt de minimale snelheid ongeveer 5,8 m/s  $\approx 20,9$  km/u. In werkelijkheid zal de minimale sprintsnelheid hoger moeten zijn omdat in deze afleiding bijvoorbeeld uitgegaan is van een 100% efficiëntie van energietransport, een snelheid van de sprinter loodrecht gericht op de polsstok bij de insprong, en geen weerstand van water en lucht tijdens de rotatiebeweging. Uit de formule volgt wel dat een zwaardere springer bij een gegeven stokhoek een kleinere sprintsnelheid nodig heeft om de stok over het dode punt te krijgen dan een springer met een lager lichaamsgewicht. Bij gelijke sprintsnelheid kan de zwaardere springer de polsstok schuiner zetten.

### Klimmen naar de top van de stok

De sprintsnelheid van de springer zal eerder tegen de 30 km/u moeten zijn wil hij of zij

ook nog naar de top van de polsstok kunnen klimmen. Bij de meest gebruikte techniek van klimmen schuift de springer de handen tegelijkertijd omhoog, strekt zich op de benen steunend uit, pakt hoog beet, trekt zich daarna op aan de armen en plaatst de benen zo hoog mogelijk weer tegen de polsstok. Heck en Uylings (2020) stelden een model op voor het systeem bestaande uit de polsstok, opgevat als een starre dunne staaf, en de springer, gemodelleerd als een cilinder, die met constante snelheid langs de stok naar boven gaat. Met behulp van rotatiemechanica hebben zij bewegingsvergelijkingen afgeleid. Rotatiemechanica valt buiten het natuurkundecurriculum op school, maar ligt niet buiten bereik voor vwo-leerlingen en kan in praktische opdrachten en profielwerkstukken aan bod komen. Heck en Uylings hebben hun bewegingsvergelijkingen in een grafisch computermodel in Coach 7 geïmplementeerd en dit computermodel gebruikt voor het modelleren en simuleren van de beweging van het polsstok-springer systeem onder verschillende condities. Ze hebben bijvoorbeeld gekeken naar resultaten van computersimulaties waarin verschillende beginhoeksnelheden bij de insprong gekozen zijn onder verder gelijkblijvende omstandigheden. Als de beginhoeksnelheid groot is, dan passeert de stok met de springer het dode punt. Bij een te kleine waarde niet, dan kantelt de stok terug naar de schans en mislukt de sprong. De minimaal benodigde beginhoeksnelheid kan via computersimulaties bepaald



Figuur 2. Schematische weergave (met de klok mee) van de drie stappen in het positioneren van de polsstok samen met een foto van een springer die de polsstok van zich afduwt met een meetstok.

op de springafstand onderzocht worden onder verder gelijkblijvende omstandigheden. In een voorbeeldberekening via computersimulaties bereikt de springer bij een klimsnelheid van 1,01 m/s de top van de polsstok op 2 cm na. Wanneer de springer klimsnelheden tussen 1,15 en 1,25 m/s haalt en de stok toch nog het dode punt passeert dan is de springafstand dicht bij de maximaal te bereiken afstand. Bij een grotere klimsnelheid passeert de stok met de springer het dode punt niet en mislukt de sprong. Een springer kan dus in theorie ook te snel omhoog klimmen. Omdat springers niet ervaren dat ze überhaupt te snel kunnen klimmen mogen we aannemen dat ze laatstgenoemde klimsnelheid niet halen. Videometingen van hogesnelheidsopnamen van topspringers wijzen op een klimsnelheid van 1,1 m/s. Deze resultaten verzin je niet op voorhand maar volgen uit videometingen en experimenten met computermodellen.

### Een clinic met de klas

Hoe interessant en leerzaam het modelleren en simuleren van polsstokverspringen ook is, het wordt nog leuker bij praktijkervaring. Doe de klas een plezier wanneer je dit onderwerp met hen wilt bespreken en kijk naar een aardige video-opname of, nog mooier, maak met hen een uitstapje naar een wedstrijdaccommodatie voor een originele natuurkunde- en gymles in de vorm van een clinic. Kijk maar eens op de website [www.zelffierljeppen.nl](http://www.zelffierljeppen.nl) of op websites van polsstokverenigingen voor hun aanbod. ●

worden. Deze beginhoeksnelheid hangt op zijn beurt af van de sprintsnelheid van de springer en de efficiëntie van de omzetting van kinetische energie in rotatie-energie.

### Optimalisatie van de uitsprong

Bij de optimale sprong zit de springer dichtbij (of in) de top als de polsstok rechtop staat en het kantelpunt passeert. De springer moet dan op het goede moment tijdens de neergang van de stok besluiten zich af te zetten en na de uitsprong zo ver mogelijk te landen. De vraag is bij welke uitspringhoek de verste afstand behaald wordt. Van Leeuwen en van Leeuwen (2019) hebben de situatie bekeken waarin de springer zich niet afzet maar op een gegeven moment de stok gewoon loslaat. Zij merken in hun rekvoorbeeld van een realistische sprong, waarin ze het verband tussen springafstand en uitspringhoek in grafiekvorm weergeven, zodat er een brede marge voor de uitspringhoek is om verder dan 21 m te springen: uitspringhoeken tussen 52° en 38° graden leiden tot zo'n afstand. Zij hebben in hun spronganalyse naar enkele factoren gekeken die de bereikte afstand beïnvloeden. Belangrijkste conclusies zijn: minder zware fierljepers springen bij gelijke afzetkracht verder (maar, uitzonderingen daar gelaten, heeft een getrainde springer met meer gewicht vaak

ook meer spieren en een hogere afzetkracht); een zwakke of sterke afzet scheelt 1,2 m op de springafstand; tegenwind heeft een duidelijk negatief effect op de springafstand door vermindering van de snelheid van overgaan; en bij wind in de rug gaat de springer sneller over en bereikt een grotere springafstand mits hij of zij de top van de stok haalt tijdens de sprong.

### Volledige spronganalyse

Heck en Uyling (2020) hebben een dergelijke spronganalyse ook uitgevoerd door hun Coachmodel voor de klim uit te breiden met de uitsprong en de vluchtfase voor de landing. Dit klinkt ingewikkelder dan het in feite is. Het stok-springer model voor de fase tussen de insprong en uitsprong hoeft alleen gecombineerd te worden met een grafisch model voor een paraboolbaan na de uitsprong voor de vrije val onder invloed van zwaartekracht. Deze twee onderdelen uit het grafisch model zijn onderling verbonden via een icoon dat de gebeurtenis representeert dat de stokhoek de uitspronghoek bereikt. Op dat moment worden de horizontale en verticale posities en de snelheden ingesteld als beginwaarden voor de vrije val. Met het Coachmodel kan de fierljepsprong vanaf de insprong gesimuleerd worden onder verschillende condities. Bijvoorbeeld kan de invloed van de klimsnelheid

### BRONNEN

- Heck, A., & Uylings, P. (2020). Fierljeppen: pole vaulting for distance. *Physics Education*, 55 (2), 045007. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab7fc7> (Open Access)
- Van Leeuwen, H., & van Leeuwen, B. (2019). Mysterie van de uitsprong. *Polshoogte*, 29, 28-32. [www.nederlandsefierljepbond.nl/documenten/nieuws/2020/rqoatta4les4cwwc8.pdf](http://www.nederlandsefierljepbond.nl/documenten/nieuws/2020/rqoatta4les4cwwc8.pdf)
- [www.nederlandsefierljepbond.nl](http://www.nederlandsefierljepbond.nl)
- [www.zelffierljeppen.nl](http://www.zelffierljeppen.nl)