HET SCHOT

Nr. 04-2016
Oplage: in principe 20. Verschijning: 1 x per twee maanden
Verspreiding: op de oefenbijeenkomst en op verzoek per e-mail
Redactieadres: kees.methorst@hetnet.nl

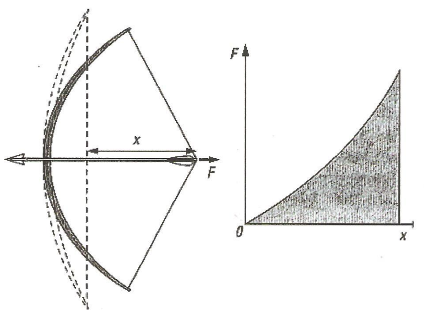
Een ieder wordt uitgenodigd om bij te dragen, immers niet geschoten is altijd misgeschoten en zo kunnen we stellen dat
er in HET SCHOT geen schot zit, of wel?

In dit nummer aandacht voor;
De natuurkundige wetten en het handboogschieten in de middeleeuwen. Bron: www.strortford/archery.org.uk
Het verhaal is geschreven door Gareth (hoofd van de satelliet controle groep bij het Scott Polar Instituut in Cambridge). Hij werd geïnteresseerd in de aerodynamica van het boogschieten toen hij de moleculaire aerodynamica bestudeerde voor zijn doctoraal filosofie.
Ik ga er van uit dat Gareth er geen bezwaar tegen heeft, dat ik dit verhaal van hem heb vertaald en het in clubmagazine Agilaz publiceer om de leden inzicht te geven hoe het er vroeger aan toeging en het hoe en wat van de legendarische longbow.

In 1415 nam koning Henry V van Engeland een klein leger mee naar Frankrijk om te proberen de Engelse aanspraak op de Franse troon af te dwingen. Door de late herfst gingen de zaken voor de Engelsen niet al te best. Het weer was slecht, het leger van Henry V had een tekort aan proviand, was uitgeput en zwaar getroffen door darmontsteking. Henry besloot om voor de winter naar zijn burcht bij Calais te gaan, maar de Fransen zagen een kans om de Engelse legers te vernietigen en voordeel te behalen om met een reusachtig leger ten strijde te gaan.
De twee legers ontmoetten elkaar in het kleine dorp Agincourt op de avond van 24 oktober, nadat de Engelse legers in 17 dagen 260 mijlen gemarcheerd hadden. Het aanbod van koning Henry V om de vrede af te kopen werd afgewezen en de volgende namiddag vond één van de beslissendste veldslagen van de honderd jarige oorlog plaats.
De slag bij Agincourt ging de Engelse geschiedenis in en, inderdaad, werd een populair verhaal door de verfilming van Shakespeare 's Henry V door Laurence Olivier en Kenneth Branah. Niet meer dan 6.000 soldaten, in dienst van de Engelse koning, stonden tegenover 50.000 Franse soldaten. Los van het grote verschil in aantallen, was het andere wezenlijke verschil tussen de twee legers hun gebruik van de longbow. Het Engelse leger was voor een groot deel samengesteld uit boogschutters (ongeveer 80%), terwijl de Fransen zo goed als geen boogschutters ingezet hadden. De aanval van de indrukwekkende Franse cavalerie werd getroffen door een regen van Engelse pijlen, waardoor de cavalerie op de vlucht sloeg terug door het front van de colonnes van de Franse infanterie. De Engelse soldaten, uitgerust met strijdbijlen en kapmessen, mengden zich in de chaos en geruggesteund door hun eigen kleine cavalerie en de bedreiging van hun longbows verspreidden ze met succes het gehele Franse leger.

Een vereenvoudigde voorstelling van pijl en boog.
De boog – elke boog – is in principe een veer. De boogschutter oefent kracht uit op deze veer als hij de boog uittrekt, waardoor in de veerkrachtig vervormbare booglatten potentiele energie[1] wordt opgeslagen. Wanneer hij de pees loslaat, wordt een deel van deze potentiele energie omgezet in kinetische energie[2] van de pijl. Door de werking van de spanning in de boogpees krijgt de pijl snelheid. De pijl verlaat dan de boog met een hoge snelheid en vliegt weg richting het doel. Het richtinggevoel van de pijl wordt gestabiliseerd door de drie veren aan de achterkant van de pijl.

De energie opslag in de boog.
Als we een grafiek tekenen van de kracht ***F*** die nodig om de pijl over een afstand ***x*** naar achteren te trekken, dan vertegenwoordigt het grijze gebied onder de grafieklijn de arbeid die geleverd is op het systeem en waardoor potentiele energie in de boog wordt opgeslagen. Als de grafiek een rechte lijn is door de oorsprong (dat wil zeggen als de boog zich als een veer gedraagt die beantwoord de wet van Hooke), zal deze energie gelijk zijn aan ***F.x*/2** (zie grafiek).



Veerkrachtige potentiele energie.
In de werkelijkheid is de grafiek van ***F*** als de functie van **x** een kromme, omdat de ingewikkelde vorm van de booglatten (ze zijn dikker in het midden en dunner bij de uiteinden van de boog) en het feit dat de spanning in de boogpees, met betrekking tot de uiteinden, niet altijd in dezelfde richting trekt. We vullen dit aan door een term voor de effectiviteit ***e*** (het rendement) in te voeren, en schrijven dan voor het totaal aan opgeslagen energie **½.*e.F.x***.
Tegenwoordig wordt een boog gemaakt van een combinatie van materialen en kan deze een rendement hebben die groter is dan 1, terwijl een boog uit de middeleeuwen slechts een rendement heeft van ongeveer 0,9.

---

[1] Potentiele energie = het arbeidsvermogen van plaats in opgeslagen toestand van iets (het mogelijk kunnen = potentie)
[2] Kinetische energie = het arbeidsvermogen van beweging in bewegende toestand van iets (het uitvoeren)

De snelheid van de pijl.
De meest simpele aanname die we kunnen maken is, dat de potentiele energie ***e.F.x*/*2*** wordt omgezet in de kinetische energie van de pijl. Als we voor de massa van de pijl ***m*** noteren en **v** voor de beginsnelheid, dan krijgen we **½ *m.v*^{2} = ½ *e.F.x*** oftewel ***v* = (*e.F.x*/*m*)$^{-2}$**.
In feite is dit een overschatting van de beginsnelheid van de pijl. De belangrijkste reden hiervoor is dat, aan het begin, als de pijl de pees verlaat, delen van de boog zelf ook bewegen. Deze delen moeten dus ook enige kinetische energie hebben die, net als de kinetische energie van de pijl, wordt geleverd door de potentiele energie die in de boog opgeslagen was. Nauwkeurige berekeningen van dit effect zijn bijzonder ingewikkeld, en kunnen eigenlijk alleen uitgevoerd worden met behulp van computermodellen.
Alhoewel, we ons er een ruw idee van kunnen vormen als we ons realiseren dat de snelheid van een bepaald deel van de boog in verhouding moet staan met de snelheid van de pijl, als: ***k*.1/2.*M*.*v*^{2}** waarin ***M*** de massa is van de boog, en ***k*** een factor is die staat voor de som van de kinetische energie van alle delen van de boog. Experimenten en computermodellen tonen aan dat, voor een longbow uit de middeleeuwen, ***k*** aangeduid kan worden tussen 0,03 en 0,07, afhankelijk van het precieze ontwerp van de boog. Dus moeten we eigenlijk noteren: ½ ***m***.***v***^{2} **+ *k*.½ *M*.*v*^{2} =** ½ ***e.F.x***, wat we opnieuw kunnen ordenen tot een formule voor ***v*** ➔
***v* = (*e.F.x* / (*m* + *kM*))$^{-2}$**.

Waarvan moet de boog gemaakt worden?.
De formules die we hierboven uitgewerkt hebben, kunnen ons daadwerkelijk iets vertellen over het ideale materiaal voor een handboog. Duidelijk mag zijn dat als we, de beginsnelheid ***v*** van de pijl moet zo groot mogelijk willen hebben, dit gerealiseerd kan worden door de uitkomst van de formule ***e.F.x*** zo groot mogelijk te maken en de massa van de boog ***M*** zo klein mogelijk te houden (we kunnen niet veel doen met de constante ***k***, en zoals we hieronder zullen zien, zijn er goede redenen waarom we ***m***, de massa van de pijl, niet te klein kunnen maken). Aangezien ***e.F.x***, de veerkrachtige potentiele energie, twee keer in de handboog wordt opgeslagen, hebben we voor het opslaan van de veerkrachtige energie een systeem nodig dat per eenheid massa van de handboog zo groot mogelijk is. Dit wordt gerealiseerd door materialen te kiezen met een groot veerkrachtig vermogen, een lage dichtheid en een hoge waarde voor de maximaal toelaatbare spanning voor dat blijvende vervorming optreedt. We kunnen, in feite, stellen dat het ideale materiaal licht moet zijn, taai en veerkrachtig.
Boogschutters uit de middeleeuwen hadden geen keus in materialen dan alleen maar hout. Echter, de verschillende boomsoorten leveren het hout veel verschillende eigenschappen, en het beste hout is dat van de taxusboom, dat per eenheid massa een maximale energie opslag van veerkracht bezit, ongeveer 700 j.kg^{-1}, en dat is bijna even goed als een stalen veer. De beste handbogen uit de middeleeuwen werden gemaakt van taxushout. In 1571, schreef Roger Ascham in zijn boek **Toxophilis**: 'Zoals bij brazielhout, hout van de olm/iep, de hazelaar en de es leert de ervaring dat bij blootstelling aan wind (storm) de Taxus van alle andere dingen perfect gebruikt kan worden voor het maken van handbogen.'

Hoe sterk (krachtig) waren de handbogen uit de middeleeuwen?.
Ongelukkig genoeg, heeft nagenoeg geen enkele handboog uit de middeleeuwen het overleefd. Dus hoe moeten we nu te weten komen hoe sterk (krachtig) de bogen geweest zijn? Enig bewijs kan verkregen worden door de pijlen, die wel overgebleven zijn. Omdat de "boogschuttersparadox" verlangt dat een bepaalde boog een pijl behoeft met een geschikte spine (stijfheid) dan kunnen we door metingen van de eigenschappen van de pijlen uit de middeleeuwen de sterkte/werpkracht van de handboog, waarvoor die pijlen ontworpen zijn, inschatten. Als deze berekeningen uitgevoerd zijn, zijn de uitkomsten meestal ongelofelijk. Ze suggereren dat de kracht, nodig om de longbow uit de middeleeuwen uit te trekken, zou hebben gelegen tussen de 110 tot 180 pond (500 tot 800 Newton). Hoewel deze getallen verbazingwekkend zijn, wordt dit bevestigd door de berekeningen gebaseerd op de handbogen die gevonden zijn in het scheepswrak van Henry VII, de Mary Rose, die in 1554 zonk.
Het is aannemelijk dat in 1415 toen het handboogschieten in Engeland op een hoogtepunt was als een techniek voor oorlogsvoering, het handboogschieten reeds terrein begon te verliezen ten opzichte van de vuurwapens.

Het maximale bereik van de pijlen.
Bij het moderne wedstrijd-handboogschieten, worden de pijlen gewoonlijk gericht onder een hoek die niet al te ver boven het horizontale vlak, om aan de pijlen een korte, lage en redelijk nauwkeurige vliegbaan te geven. In de middeleeuwser oorlog, werd een totaal andere strategie aangenomen. Massale rijen handboogschutters richtten hun pijlen hoog, om een grote afstand te overbruggen, zonder in het bijzonder zorgvuldig te richten. De maximum afstand is dan een factor die van groot belang is in de besluitvorming voor het aanvalsplan bij een oorlog en dit hangt duidelijk af van de beginsnelheid ***v*** van de pijl.
Als wij de luchtweerstand buiten beschouwing laten, dan is het maximale bereik van een projectiel ***V*^{2}/*g*** (waarin ***g*** de versnelling is als gevolg van de zwaartekracht) en gerealiseerd wordt door te richten onder een hoek van 45° ten opzichte van het horizontake vlak. We kunnen dit "ideale" bereik berekenen, door gebruik te maken van de informatie die we reeds hebben. We zullen daarvoor de volgende formule gebruiken: ***v* = *e.F.x* / (*m* + *kM*))**$^{-2}$ en nemen voor:
- ***e*** (effectiviteit/rendement) = 0,9;
- ***F*** (de kracht om de boog naar de volle treklengte uit te trekken) = 700 N (154 lbs);
- ***x*** (de afstand waarover de pijl naar achteren getrokken wordt t.o.v. de pijlsteun) = 0,58 m;
- ***m*** (de massa van de pijl) = 0,060 kg;
- ***k*** (de factor voor de kinetische energie van alle delen van de boog) = 0,05 en voor
- ***M*** (de massa van de boog) = 1 kg.
Dit geeft een beginsnelheid ***v*** = 57,6 m/s^{-1} en een "ideaal" bereik van ongeveer 340 m.

Echter, we kunnen de luchtweerstand van een pijl niet negeren. Experimenten in windtunnels tonen aan dat de luchtweerstandkracht afhankelijk is van de snelheid van de pijl, zodat we kunnen stellen dat $\boldsymbol{F_{lw} = cu^2}$ waarin $\boldsymbol{c}$ een constante voorstelt van een bepaalde pijl en $\boldsymbol{u}$ de snelheid van de pijl. De vergelijking voor de beweging van een lichaam onder invloed van de zwaartekracht en dit type kwadratenwet[3] bij luchtweerstandkracht is moeilijk om precies op te lossen, maar er is een betrouwbare benadering daarvan. Het maximale bereik wordt gegeven tot een nauwkeurigheid van een paar procent door de formule: $v^2/g\ (1 + cv^2/mg)^{-0,74}$ waarin $\boldsymbol{v}$ staat voor de beginsnelheid en $\boldsymbol{m}$ voor de massa, voor zolang de waarde van ($\boldsymbol{cv^2/mg}$) minder is dan ongeveer 10. (Nu kunnen we zien, waarom pijlen met een lage massa niet wenselijk zijn. Het maximale bereik wordt gereduceerd als $\boldsymbol{m}$ wordt verminderd.) Een typisch middeleeuwse oorlogspijl had een massa van ongeveer 0,60 kg en een waarde voor $\boldsymbol{c}$ van ongeveer 10^{-4} N S^2 m^{-2}, wat dan voor ($\boldsymbol{cv^2/mg}$) een waarde oplevert van 0,56 bij een beginsnelheid van 57,6 ms^{-1}. De aangenomen formule daarvoor is betrouwbaar en kunnen we een maximum bereik berekenen van ongeveer 240 m.
Interessant genoeg, kunnen we vaststellen dat dit de juiste waarde is. In 1590 schreef Sir Roger Williams "Van de 5000 boogschutters zullen er nog geen 500 bedreven hebben geschoten …….. weinig of geen zullen gewond geraakt zijn als de afstand minder was dan 12 of 14 score." Een "score" is 20 yard (18,3 m), dus Sir Roger beklaagde zich dat de boogschutters in zijn tijd (bijna 200 jaar na de slag bij Agincourt) zo zwak waren dat ze nauwelijks in straat waren een afstand van 220 tot 260 meter te overbruggen.

De effectiviteit van de middeleeuwse pijlen.
We hebben nu een goed basisbegrip van de vlucht van een oorlogspijl uit de middeleeuwen. Afgeschoten met een uitzonderlijk krachtige handboog, zou de pijl van 60 gram een beginsnelheid gegeven moeten worden van nagenoeg 60 $m.s^{-1}$. Hoog gericht in de lucht, zou deze pijl een maximum bereik hebben van 240 m en zou de pijl met een snelheid van tussen de 40 en 45 m s^{-1} aankomen (we hebben deze getallen niet berekend, omdat er geen simpele benadering voor is, maar het komt van dezelfde gedetailleerde berekeningen die zijn gebruikt om het maximum bereik te vinden). De voor de hand liggende vraag is nu, wat zou een dergelijke pijl in staat zijn te doen? De meeste soldaten op wie deze zware oorlogspijlen gericht waren, zullen uitgerust zijn met een harnas. Ten tijde van Agincourt, had een typische wapenuitrusting een massa van tussen de 30 en 45 kg en was gemaakt van smeedijzer dat relatief zacht was. Duidelijk mag zijn dat het dragen van deze extra massa voor de soldaat in oorlog erg ongemakkelijk was, en dus probeerden ze de massa zo licht mogelijk te houden. De dikte van de bescherming varieerde in overeenstemming met het lichaamsdeel dat beschermd moest worden. De dikste bescherming was tot 4 mm dik en de dunste ongeveer 1 mm.
Experimenten (waarbij geen levende doelen werden gebruikt) gaven de indruk dat, terwijl de pijlen gemakkelijk de bescherming van 1 mm bescherming doorboorden, het onwaarschijnlijk was dat de vitale delen van het lichaam geraakt zouden worden. Wellicht zou het effect van een massale hagelbui van snel bewegende zware pijlen, waarmee de Fransen bij Agincourt geconfronteerd werden, de oorzaak zijn van erg veel invalide-makende verwondingen, waarbij slechts één van de honderd iemand dodelijk getroffen zou hebben. Natuurlijk, de kans dat een onbeschermd iemand een vlaag van zoveel pijlen zou overleven is veel kleiner.
Het is ontnuchterend om deze feiten te combineren met enkele de historische gegevens. Henry had in Agincourt bij benadering 5.000 boogschutters en een voorraad van ongeveer 400.000 pijlen.
Elke boogschutter kon ongeveer tien pijlen per minuut afschieten, dus het leger alleen al had genoeg ammunitie voor ongeveer acht minuten schieten op volle "vuurkracht". Niettemin zou deze "vuurkracht" verwoestend zijn geweest. Vijftigduizend pijlen per minuut – meer dan 800 per seconde – hebben de Franse cavalerie om de oren gefloten, honderden mensen per minuut dodend en een meervoud aan gewonden.
Het werk van een compagnie van middeleeuwse boogschutters kun je dan vergelijken met dat van een machinegeweerschutter, dus in moderne termen kunnen we Agincourt voorstellen als een oorlog tussen een ouderwetse cavalerie, geruggesteund door een paar sluipschutters (kruisboogschutters) aan de Franse zijde, tegen een veel kleiner leger uitgerust met machinegeweren. Misschien, gezien vanuit dit oogpunt is het meest opmerkelijke feit over de slag, dat de Fransen de veel grotere militaire voordelen van de longbow negeerden. Gareth Reese.

Fotografie: Nationale bibliotheek Parijs The Bridgeman kunst bibliotheek - de slag om Najera, 1367, tussen de legers van Edward de Zwarte prins van Engeland en Henry II van Castille.

[3] Bron: Wikipedia. Een **kwadratenwet** is in de natuurkunde een wet die aangeeft dat een grootheid omgekeerd evenredig verloopt met het kwadraat van de afstand tot de bron van die grootheid. Dit meetkundige verband komt voor in verschillende gebieden van de natuurkunde, zoals zwaartekracht, elektrostatica, optica, akoestiek en ioniserende straling.