

PIJL EN BOOG

Newton, Deformatie-energie, Kinetische energie

De boog is een van de meest efficiënte werktuigen om de energie van menselijke spieren op te slaan en die vervolgens te gebruiken voor het wegschieten van een projectiel. De Engelse handboog, die tijdens de Honderdjarige Oorlog zulke slachtingen aanrichtte bij Crecy (1346) en Agincourt (1415), was vrijwel altijd gemaakt van taxushout. Aangezien deze houtsoort verder vrij weinig werd gebruikt, is er ook weinig onderzoek naar verricht. Uit recent onderzoek is echter gebleken dat dit hout een structuur heeft die nogal afwijkt van die van andere houtsoorten en dat het bijzonder geschikt lijkt te zijn voor het opslaan van deformatie-energie. Taxushout is dus waarschijnlijk echt beter geschikt voor het maken van bogen dan andere houtsoorten.

De meeste Engelse bogen werden gemaakt van Spaans taxushout en het was zelfs wettelijk verplicht met iedere scheepslading Spaanse wijn ook een hoeveelheid taxushout te importeren. In feite groeit de *Taxus baccata* (een naaldboomachtige) niet alleen in Spanje, maar in het gehele gebied van de Middellandse Zee. Zo groeit hij tegenwoordig in het wild tussen de ruïnes van Pompeji. Toch hoort men zelden over het gebruik van de taxusboog in Spanje of in de andere landen rond de Middellandse Zee, niet tijdens de Middeleeuwen en ook niet in de Oudheid. Het gebruik ervan was beperkt tot de meer noordelijk gelegen landen Engeland en Frankrijk, terwijl ze op geringere schaal ook in Duitsland en de Nederlanden werden gebruikt.

Deze feiten lijken op het eerste gezicht verrassend, maar sinds kort weten we nu dat de mechanische eigenschappen van het taxushout bij toenemende temperatuur sneller achteruit gaan dan die van andere houtsoorten. Een taxusboog is boven een temperatuur van 35 graden niet meer betrouwbaar. Als wapen is de boog daardoor alleen te gebruiken in koele klimaten en is hij ongeschikt voor het gebruik tijdens de mediterrane zomers. In het gebied van de Middellandse Zee werden van het taxushout alleen pijlen gemaakt.

Dit was dan ook de reden dat in deze warmere landen de composietboog werd ontwikkeld. Zo'n boog had een kern van hout, waaroverheen gedroogde pezen en hoorn waren gelijmd. Beide materialen zijn beter geschikt voor het opslaan van energie dan taxushout. Bovendien behouden ze hun mechanische eigenschap-

pen bij hogere temperaturen beter dan dit hout. De lichaamstemperatuur van een dier ligt immers gewoonlijk rond de 37°C. In de praktijk blijkt de kwaliteit van pezen tot een temperatuur van 55 graden niet merkbaar te veranderen. Daar staat echter tegenover dat gedroogde pezen tijdens vochtig weer slap worden en dus minder bruikbaar zijn.

Zulke composietbogen werden al in de 14e eeuw in Turkije gebruikt en vonden daarna ook elders op grote schaal toepassing, tot op de dag van vandaag toe (niet zozeer als wapen, maar als wedstrijdboog). De prestaties van deze bogen waren beter dan die van de handbogen die in de meer noordelijke landen werden gebruikt. Terwijl de gewone handboog echter een vrij goedkoop en gemakkelijk te maken wapen was, vereiste de composietboog meer vakmanschap en was hij waarschijnlijk nogal kostbaar.

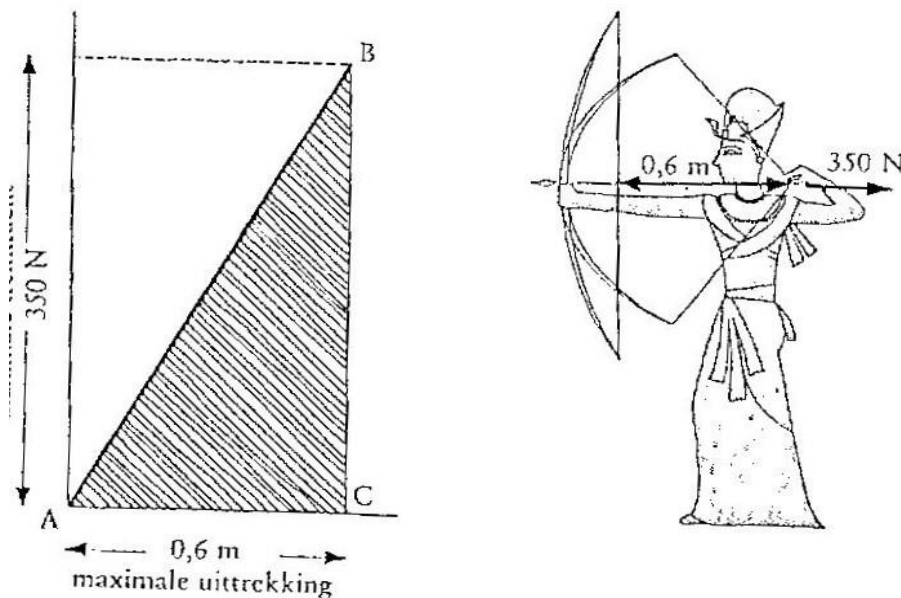
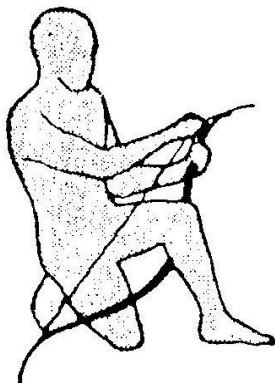


Fig. 14. De hoeveelheid energie in de gespannen boog is gelijk aan het oppervlak van de driehoek ABC, dus $\frac{1}{2} \times 0,6 \times 350 = 105$ joule.

Ook de Griekse bogen waren composietbogen en dat brengt ons op het verhaal van de boog van de mythologische held Odysseus. Als Odysseus op pad is, kan zijn vrouw Penelope met moeite de vrijers de baas die haar het leven zuur maken. Wanneer ze de hoop op de terugkeer van haar echtgenoot heeft opgegeven, verklaart ze te zullen trouwen met degene die Odysseus' achtergelaten boog kan spannen. Geen van de vrijers speelt dit echter klaar, ook niet de technisch ingestelde Eurymachus: 'En nu pakte Eurymachus de boog en verwarmde hem aan verschillende kanten in de warmte van het vuur. Toch kon hij hem ook op deze manier niet spannen en gramschap vervulde zijn hart.' Maar waarom maakten ze het zich echter zo moeilijk? Waarom gebruikten ze niet gewoon een langere boogpees?

Fig. 15. Een Griek die bezig is met het spannen van een boog (volgens een afbeelding op een vaas).



Het antwoord hierop luidt: om een zeer goede wetenschappelijke reden. De energie die een man in een boog kan stoppen wordt beperkt door de eigenschappen van het menselijk lichaam. In de praktijk kan men een pijl ongeveer 0,6 meter naar achteren trekken en zelfs een sterke man kan geen grotere kracht dan ongeveer 350 Newton op de boog uitoefenen. Hieruit volgt dat de beschikbare spierkrachtenergie ongeveer 0,6 maal 350, ofwel ongeveer 210 Joule bedraagt. Dit is het maximum dat beschikbaar is en we willen natuurlijk een zo groot mogelijk deel daarvan als deformatie-energie in de boog stoppen.

Wanneer we veronderstellen dat de boog aanvankelijk vrijwel spanningsloos is en dat de boogpees slap hangt, dan begint de schutter zijn pijl met een kracht nul naar achteren te trekken. Deze kracht neemt toe tot het punt dat de pees niet verder meer kan worden uitgetrokken. Dit is schematisch weergegeven in figuur 14, waarin ook te zien is dat de energie die nu in de boog zit, gelijk is aan het oppervlak van de driehoek ABC, dus $\frac{1}{2} \times 0,6 \times 350 = 105$ Joule. Doordat de trekkracht bij nul begint, kan slechts de helft van de beschikbare energie in de boog worden gestopt.

In de praktijk was de hoeveelheid energie die in de klassieke handboog kon worden gestopt nog wat kleiner. Homerus zegt echter duidelijk dat de boog van Odysseus 'palintonos' was, dat wil zeggen achterwaarts gebogen. De boog was dus aanvankelijk in de tegenovergestelde richting gebogen, zodat er een aanzienlijke kracht moest worden uitgeoefend om hem te kunnen spannen. De uitgangssituatie was er nu niet meer een van spanning nul en uitrekking nul, zodat het kracht-rekdiagram er nu ongeveer zoals figuur 16 gaat uitzien.

Het oppervlak ABCD in dit diagram is veel groter dan het oppervlak in figuur 14, zodat de hoeveelheid energie die nu in de boog is gestopt ongeveer 80 procent bedraagt van de totaal beschikbare spierkrachtenergie. Het is nu mogelijk om ongeveer 170 Joule energie in de boog op te slaan, tegen ongeveer 105 Joule bij een

boog die niet 'palintonos' is. Dit is duidelijk een groot voordeel voor de schutter, nog afgezien van het feit dat het ook voor Penelope goed bleek uit te komen (Odysseus kwam namelijk toch weer veilig thuis).

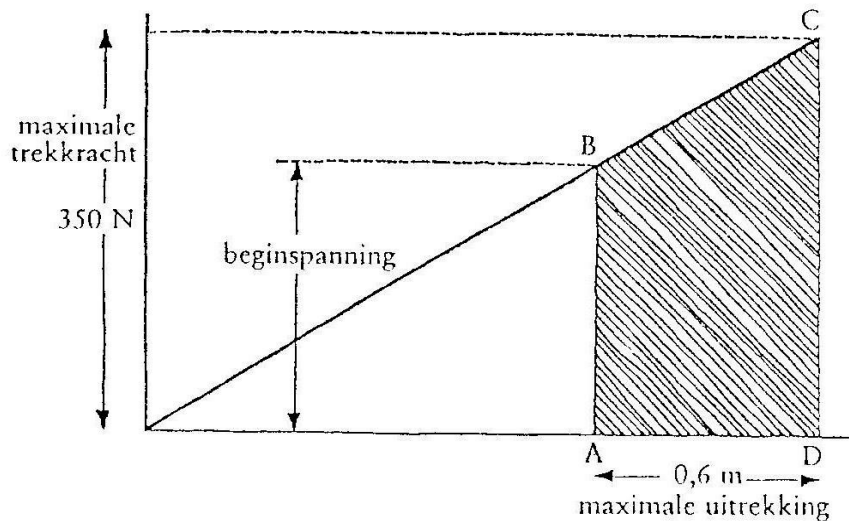


Fig. 16. De hoeveelheid energie die in de voorgespannen boog kan worden opgeslagen, is gelijk aan het oppervlak van de vierhoek ABCD.

In feite zijn alle bogen min of meer voorgespannen, in die zin dat er altijd enige kracht moet worden gebruikt om hem tijdens het gebruiksklaar maken te spannen. Aangezien de vroegere taxusboog gemaakt was van hout dat van zichzelf al vrijwel recht was, was dit effect echter hier maar klein. Bij de composietboog kan de gewenste vorm veel gemakkelijker worden bereikt en zo is de karakteristieke vorm van de 'Cupido-boog' ontstaan (figuur 17).

Aangezien hoorn en pezen meer deformatie-energie kunnen opnemen dan taxushout, kan een composietboog kleiner en lichter worden gemaakt dan een volledig houten boog. Hij was klein genoeg om tijdens het paardrijden te worden gebruikt, zoals de Tataren en de Parthen ook deden. Deze laatsten konden zelfs wanneer ze op de vlucht moesten slaan hun achtervolgers nog met pijlen bestoken.

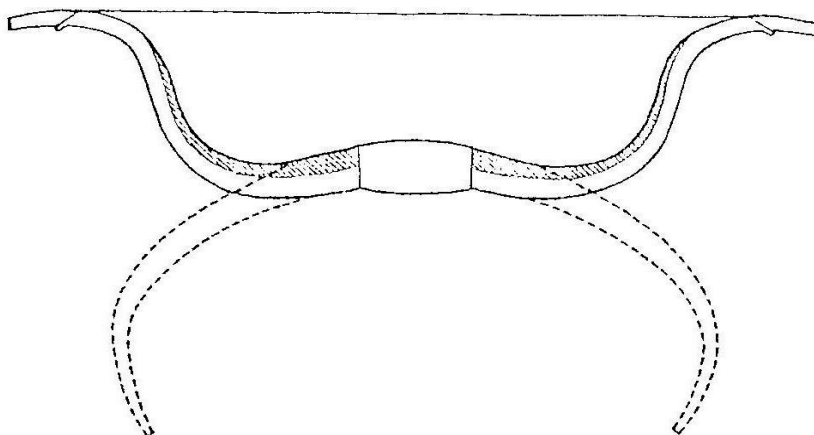


Fig. 17. Composietboog in ontspannen en gespannen toestand.

Wiskundig gezien zijn bogen en katapulten moeilijke objecten en zelfs wanneer men erin slaagt hun bewegingsvergelijkingen af te leiden, dan nog kunnen deze niet via analytische methoden worden opgelost. Legenwoordig kan echter ook met de computer uitkomst bieden. Het blijkt dan dat in theorie verrassend genoeg bijna honderd procent van de aanvankelijk beschikbare energie wordt gebruikt. Vrijwel alle deformatie-energie kan worden omgezet in de kinetische energie van het betreffende projectiel. Weinig energie gaat verloren of blijft achter in de vorm van een 'terugstoot' die het wapen kan beschadigen. Wat dit betreft zijn bogen en katapulten veel efficiëntere wapens dan geweren en kanonnen.

Een van de gevolgen van deze feiten is bij de meeste boogschutters wel bekend. Ze weten dat men nooit en te nimmer een boog of katapult moet afschieten zonder een pijl of ander projectiel. Wanneer men dat doet, kan de vrijkomende energie niet op een veilige manier worden afgevoerd. Niet alleen kan het wapen dan stukgaan, maar ook heeft de schutter een grote kans zich te verwonden.

Deformatie-energie als oorzaak van breuk

we hebben gezien kan men een boog gemakkelijk kapot maken door hem zonder een pijl 'af te schieten'. De deformatie-energie die in de boog lag opgeslagen, kan dan niet op een veilige manier in de vorm van de kinetische energie van de pijl afvloeien, zodat een deel ervan gebruikt wordt voor het produceren van scheuren in de boog zelf. De boog heeft dan zijn deformatie-energie gebruikt om zichzelf kapot te maken. Zo'n gebroken boog is echter slechts één speciaal geval van breukvorming.

