

Luchtdrukraketten op de HAVO

Werkgroep 16

N. van Veen & E. van den Berg

Fons Vitae Lyceum en CMA, Amsterdam

Norbert van Veen volgde een bijscholing (december 2013) over het Cansat-project in Andoya, Noorwegen. Op de Rocket Range aldaar werden workshops gegeven over raketfysica, Arduino en het maken van de Cansat-satellieten. Dat zijn satellieten die door leerlingen kunnen worden gebouwd in een colablikje (“can”) en kunnen worden gelanceerd in een raket. Er zijn internationale competities voor leerlingen. Het was de bedoeling dat de uitgenodigde docenten geschoold zouden worden in het maken en programmeren van de Cansat-satellieten. De bijscholing was ook bedoeld om de Europese competitie van Cansat een stimulans te geven. Vanwege slechte weersomstandigheden is de lancering van de Cansat-satellieten daar toen niet doorgedaan. In plaats daarvan heeft de aanwezige lerarengroep toen papieren luchtdrukraketten gemaakt. Tot aller verbazing bleek dat de raketten zeer simpel te maken waren, maar toch een onverwacht grote afstand konden afleggen. Dit kwam met name door de hoge luchtdruk die met de lanceerinstallatie te halen was, en door de geringe massa van de raketjes.

Teruggekomen in Nederland, besloot Norbert om het bouwen van luchtdrukraketten in te zetten in het natuurkundeonderwijs aan havo-leerlingen. Havo-leerlingen moeten namelijk in *Systematische Natuurkunde* deel 1, hoofdstuk 7, een eigen onderzoek opzetten. De luchtdrukraketten bieden de mogelijkheid om dit te doen en ook om een verbeteringsslag te maken op grond van ervaringen in het experiment. De lessen over dit onderzoek hadden de volgende opzet. De leerlingen kregen eerst een les raketfysica, waarin een aantal belangrijke aspecten van de bouw van raketten werd behandeld. Daarna hebben de leerlingen zelf een papieren raket gemaakt. Deze werd afgeschoten met de lanceerinstallatie. Deze installatie is zeer eenvoudig te maken (zie tabel 1). Na deze eerste ronde moesten de leerlingen een verbeterde versie maken van de raket en hun verbeteringen ook uitleggen. De leerlingen kregen onder andere punten voor de maximale afstand afgelegd door hun raket.

Na het bouwen, schieten en verbeteren analyseerden de leerlingen hun highspeed-filmpje in Coach 6 om de beginsnelheid te bepalen. Die bleek rond de 40 m/s te zijn.

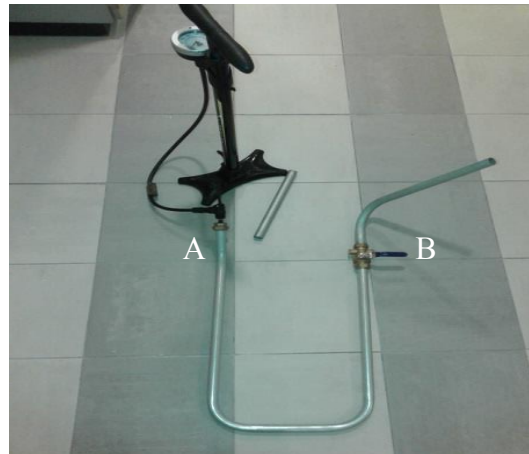
De verslagen van de 4-havo-leerlingen vielen tegen. Zij hadden te weinig aandacht voor de fysica van de raketten en de analyse van de beweging, terwijl er een duidelijke handleiding was voor het verslag met aandachtspunten. Voor een eerste keer is Norbert toch wel tevreden, omdat er een groepje verder gegaan is met de luchtdrukraket als PWS-onderwerp. Deze PWS-

leerlingen hebben er wel veel werk van gemaakt en hun vorderingen geven mogelijkheden om het onderwerp in een vierde klas wat meer diepgang te geven.

In dit artikel wil ik aandacht besteden aan mijn lessenserie en de lezer wat informatie geven over hoe het in de les aan te pakken. In dit artikel wordt een aantal voorbeelden voor de analyse van de beweging van de raket gegeven. Ook zal ik ingaan op de bouw instructie voor de installatie waarmee de papieren raketten kunnen worden afgeschoten.

Maken van de luchtdrukinstallatie

In figuur 1 is een voorbeeld van een luchtdrukinstallatie te zien. Tabel 1 geeft een overzicht van de benodigdheden. Buig de twee meter lange verwarmingsbuis in twee haakse bochten. Plaats op het ene uiteinde (A) een einddop (zie figuur 1). Boor de einddop door en plaats het ventiel in het gat. Op het andere uiteinde (B) wordt de kogelkraan geplaatst. Een los stuk (ca. 50 cm) van de verwarmingsbuis wordt ook gebogen in een haakse bocht. Dit losse stuk plaatsen we enigszins losjes in de kogelkraan, opdat we de hoek van afschieten kunnen variëren. In figuur 1 moet de raket bevestigd worden op deze draaibare afschietbuis.



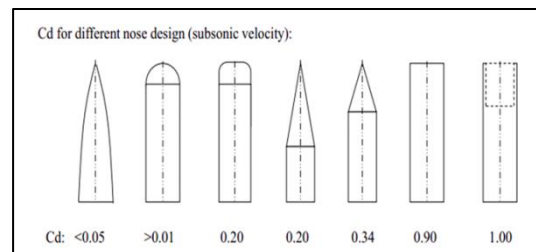
Figuur 1. Een luchtdrukinstallatie van verwarmingsbuizen

Tabel 1

Benodigdheden	
Kogelkraan Ø 22 mm	(auto- of fiets)ventiel
Einddop Ø 22 mm	Fietspomp met drukmeter
2 m verwarmingsbuis Ø 22 mm	Knelkoppelingen
50 cm verwarmingsbuis Ø 22 mm	

Natuurkunde van de luchtdrukraketten

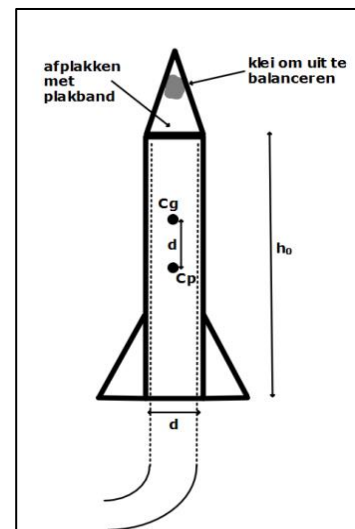
In de lessen besteed ik aandacht aan een aantal belangrijke zaken, die de vlucht van de raket sterk beïnvloeden. Ik start met een korte behandeling van impuls en impulsbehoud. Daarna besteed ik flink wat tijd aan de formule van de luchtweerstand, waarbij frontaal oppervlak, lucht-wrijvingscoëfficiënt en vorm van de neuskegel/stroomlijn uitgediept worden. In figuur 2 zien we een overzicht van de verschillende vormen voor de neuskegel en hun lucht-wrijvingscoëfficiënt. Het is zeer lastig om een perfecte neuskegel te maken waarvan de straal naar het uiteinde sterk afneemt, deze heeft namelijk een lucht-wrijvingscoëfficiënt $< 0,05$ (bij hoge snelheden). Een optie is om deze neuskegels met een 3D-printer te maken of ze na 'oud en nieuw' van afgeschoten vuurpijlen te halen. Vinnen voor stabiliteit van de raket heb je in alle maten en vormen. In mijn les vertel ik dat het frontaal oppervlak zo klein mogelijk moet zijn en dat moeten leerlingen ook toepassen met hun vinnen. Een goede raket heeft hele kleine vinnen en twee vinnen zijn in principe al voldoende. Omdat ik wil dat



Figuur 2. Lucht-wrijvingscoëfficiënten voor neuskegels bij hoge snelheden

de leerlingen daar proefondervindelijk achter komen, vertel ik er bij hun prototype niets over. Een groepje leerlingen was zo slim om nog voor het afschieten hun vinnen dubbel te vouwen, en hun raket kwam gelijk veel verder dan de rest. Deze interventie van de leerlingen zelf heeft meer impact dan dat de docent het van tevoren zegt.

De raket heeft een massamiddelpunt en een centrum van druk (resp. C_g en C_p). Het massamiddelpunt (C_g) spreekt voor zich. De niet uitgebalanceerde raket zal om dit punt gaan roteren. Het centrum van druk (C_p) is iets minder voor de hand liggend. Dit is het aangrijppunt van de liftkracht en luchtweerstand. In referentie 1 vindt u verdere fysica van het *center of pressure*. In de les ga ik hier kort op in en vertel ik aan de leerlingen dat ze de raket zo goed mogelijk moeten uitbalanceren. C_p en C_g liggen ruw geschat op één raketdiameter d (22 mm in ons geval) uit elkaar (zie figuur 3). Voor C_p nemen we het midden van de drukkamer van de raket. Een meer exacte bepaling van C_p is eigenlijk veel lastiger dan hier omschreven.



Figuur 3. Een schematische voorstelling van de luchtdrukraket

Bouw van de luchtdrukraket

De spelregels zijn dat leerlingen een schaar, plakband en twee A4-tjes gebruiken.

Als we de raket gaan maken is het handig om een aantal losse stukken buis te hebben die een lengte van ongeveer 40 cm hebben en precies dezelfde diameter als de buizen van de lanceerinrichting. Om deze buizen kunnen de leerlingen hun A4-papier in de lengterichting oprollen. Let er hierbij op dat de leerlingen dit strak, maar ook weer niet te strak doen: de raket moet redelijk soepel kunnen glijden over de buis. Te strak betekent dat de wrijving te groot kan zijn, waardoor de beginsnelheid negatief beïnvloed wordt. Het opgerolde papier wordt aan de bovenkant afgeplakt, zodat er een drukkamer ontstaat. Zonder afplakken zal de neuskegel eraf blazen bij het lanceren. Aan de onderkant van de opgerolde buis bevestigen de leerlingen de vinnen. Aan de bovenkant plaatsen ze een neuskegel, waarin klei wordt gedaan om de raket uit te balanceren. Ik denk zelf dat het bij de bouw van de raket het leukste is om de leerlingen zelf hun creativiteit te laten uiten, zeker als u net als ik toch eerst een prototype 'tryout' doet met daarna een verbeteringsslag. Het zal de leerlingen duidelijk worden dat de natuurkunde uitmaakt hoe ver de raket komt. Dit is zoals ik zelf heb gemerkt een sterke stimulans om nog eens in de theorie te duiken. Zeker als er in tweede ronde een competitie-element wordt ingebracht.

Afschieten

Kies voor het afschieten een gebied waar flink wat ruimte is. Ik heb zelf een park in de buurt van de school gekozen. Een mooie dag zonder al te veel wind is uitstekend. Van school heb ik de lanceerinstallatie en de fietspomp meegenomen. Van de gymsectie heb ik een meetlint van 50 m geleend.

Als veiligheidsnorm zou ik niet verder dan 7/8 bar in de installatie laten pompen. Het afschieten wordt gefilmd met een hogesnelheidscamera op een statief om de beginsnelheid te bepalen.

Analyse 1

De raket wordt versneld over de lengte van de drukkamer. Zodra de raket van de buis af is, valt deze kracht logischerwijs weg. De zwaartekracht verwaarlozen we in de onderstaande be-

rekening, aangezien deze in de orde van 0,30 N is ten opzichte van een F_{lucht} van rond de 100 N.

$F_{\text{res}} = m \cdot a$ en $F_{\text{lucht}} = p_{\text{gem}} \cdot A = p_{\text{gem}} \cdot \frac{1}{4}\pi \cdot d^2$ geven voor de versnelling:

$$a = \frac{p_{\text{gem}} \cdot \frac{1}{4}\pi \cdot d^2}{m}$$

Voor de tijd van versnellen geldt (met h_0 de hoogte van de raket; A4-papier = 30 cm):

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h_0}{a}}$$

Voor de vertreksnelheid van de raket geldt dan (met invullen van de formules voor a en t en vereenvoudigen):

$$v_{\text{eind}} = a \cdot t = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0}{a}} = \sqrt{2 \cdot h_0 \cdot a} = \sqrt{\frac{h_0 \cdot p_{\text{gem}} \cdot \pi \cdot d^2}{2 \cdot m}}$$

Zowel een grotere lengte (bijvoorbeeld 2 x A4) als een grotere diameter leveren een grotere beginsnelheid op. Dit is aardig om als onderzoek bij leerlingen neer te leggen. Maak daartoe bijvoorbeeld ook een lanceerinstallatie met buizen met \varnothing 28 mm.

Analyse 2

De raket krijgt kinetische energie door een adiabatische expansie van de lucht.

Punt A is de situatie net voordat de drukkamer van de raket gaat schuiven. Punt B is wanneer de raket de buis net verlaten heeft (en dus een afstand h_0 heeft afgelegd). Doordat de lanceerinstallatie altijd dezelfde diameter heeft, kunnen volumes bepaald worden door de juiste afstanden op te meten. Voor adiabatische expansie van een tweeatomig gas geldt (met $\gamma = 1,4$):

$$p_A \cdot V_A^\gamma = p_B \cdot V_B^\gamma$$

Voor de arbeid die het gas levert geldt dan:

$$W_{A \rightarrow B} = p_A \cdot V_A^\gamma \cdot \frac{V_B^{1-\gamma} - V_A^{1-\gamma}}{-\gamma + 1}$$

Deze arbeid wordt omgezet naar kinetische energie.

Analyse 3

Het afschieten van de luchtdrukraket wordt gefilmd met een highspeedcamera en ingelezen in Coach6. Wij hebben voor het filmen een frame rate van 240 Hz gebruikt. In Coach6 kan dan met behulp van videometen de beginsnelheid bepaald worden. Denk hierbij aan het feit dat de juiste frame rate ingesteld wordt en dat we geïnteresseerd zijn in de beginsnelheid langs de as van beweging. Hiertoe kan in Coach6 het assenstelsel gekanteld worden en de snelheid van de raket in de bewegingsrichting bepaald worden. Uit het filmpje kan ook de hoek van afschieten bepaald worden.

Het is lastig om de hele vlucht van de raket door te meten, omdat deze zo ver komt en met een hoge frame rate op de camera slechts een beperkt segment van de baan gefilmd kan worden. Als je de hele vlucht wilt videometen, gebruik dan een gewone videocamera.

Als de beginsnelheid bekend is, kunnen we ook de vlucht van de raket modelleren en Coach6 laten uitrekenen hoe hoog de raket komt. Het makkelijkst is dan om de raket in een vlucht loodrecht omhoog te modelleren en leerlingen hun eigen metingen van de raket in te laten vullen, zoals A , c_w en v_0 . Leerlingen kunnen kijken wat de invloed is van grotere vinnen op de afstand. We kunnen natuurlijk ook analyse 1 en 2 combineren in het model en zo invloeden van grotere druk en doorsnede snel doorrekenen.

Samenvatting

Een ogenschijnlijk simpele luchtdrukraket biedt leerlingen en docenten legio mogelijkheden om op een relatief eenvoudige manier veel natuurkunde te bedrijven. Ik heb in de reguliere 4-havo lessen dit onderwerp gebruikt om een ontwerp/onderzoek-onderdeel in te bouwen, maar leerlingen kunnen er veel dieper op ingaan dan alleen een ontwerp maken en dit met fysisch inzicht verbeteren – zoals mijn PWS-leerlingen van dit jaar gedaan hebben, die een gedegen natuurkundig onderzoek hebben uitgevoerd. Als u kijkt op de vele sites die NASA aan papier-raketten wijdt, zien we veel mogelijkheden om deze vorm van raketbouw een prominente plaats in het natuurkundeprogramma van zowel de havo als het vwo te geven. Maar allereerst komt het plezier dat leerlingen en docenten aan dit onderwerp beleven. De fysica volgt dan vanzelf, omdat de leerlingen toch wel graag meer willen weten over waarom de raket verder komt na aanpassingen.

Literatuur

- 1 <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktcp.html>
- 2 NAROM (2013), *The CANSAT Book, 2013 Edition*. CANSAT project.
- 3 <http://www.scienceinschool.org/2012/issue22/rockets>