

# At bringe en bemanded rumkapsel til sikker landing

Af Mads Stenfatt, Copenhagen Suborbitals

Om få måneder skal Copenhagen Suborbitals sende to raketter, Nexø I & II, til himmels. De to raketter er vores næste skridt imod målet om at sende en bemanded raket ud i rummet, og bringe astronauten sikkert tilbage igen. I processen om at sikre en sikker og behagelig landing for astronauten, arbejder vi på at udvikle et faldskærmssystem der kan gøre at landingshastigheden ikke bliver for høj, og at åbningsforløbet bliver blidest muligt. For at gøre det, skal vi kende de præcise parametre der beskriver det faldskærmssystem vi udvikler, deriblandt en parameter kaldet  $C_d$ , dragkoefficienten, for hver type faldskærm vi benytter.

## Hvem er Copenhagen Suborbitals?

Copenhagen Suborbitals (CS) [1, 2] er en dansk forening af 50 frivillige personer, som er verdens eneste amatørprojekt af sin art, og som er crowdfunded af knap 1000 faste støttemedlemmer over hele verden. CS' ultimative mål er at udvikle en raket med rumkapsel, som kan bringe en person 100 km op over Jordens overflade og sikkert ned igen.

Der arbejdes frem mod dette mål gradvist ved at bygge ubemandede raketter for at opbygge viden og færdigheder til at kunne konstruere den endelige raket.



**Figur 1.** Andreas Mogensen sidder i "Cupola", ombord på Den Internationale Rumstation, med en hilsen til CS. Foto: Kjell Lindgren.

Siden CS startede i 2008 har vi opsendt en række raketter fra en selvsejlede affyringsplatform i farvandet øst for Bornholm, se [3, 4].

Projektet har potentiale til, baseret på private donationer, at markere Danmark som den 4. nation, der bringer en person i rummet (efter Rusland, USA og Kina).

## Faldskærmssystemet

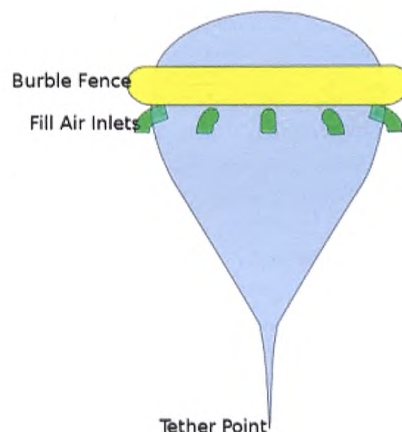
Denne artikel vil fokusere på det, der sker på vej ned, altså faldskærmssystemet.

Når vi i sidste ende skal sende en astronaut op med vores bemandede raket, Spica, ønsker vi at lave et faldskærmssystem, der både kan klare en tur igennem atmosfæren, som ikke udsætter rumkapslen for voldsomme belastninger og som i sidste ende sikrer en blid landing for astronauten. Vi skal derfor lave et system, der kan stabilisere rumkapslen og reducere faldhastigheden tidligt, tåle høje hastigheder og temperaturer i

den øverste del af atmosfæren, og som i sidste ende giver en hastighed på cirka 25 km/t ved landing.

For at opnå disse egenskaber har vi tænkt os at dele systemet op i to: Første del er en bremsende og stabiliserende del til den øvre del af atmosfæren, en såkaldt ballute. Til den nederste del af turen og landing benytter vi en (eller flere) mere almindelige faldskærm(e).

Balluten har sit navn efter kombinationen af de to former, den er designet efter: Balloon og parachute. På dansk kunne den passende hedde en "balskærm".



**Figur 2.** Principtegning af en ballute: Der er grundformen, som er ballonformet og helt lufttæt, så er der en række luftindtag rundt om, hvor luften puster formen op, og til sidst er der et "burble fence", som er en design-feature, der gør balluten mere stabil. Grafik: Wikipedia.

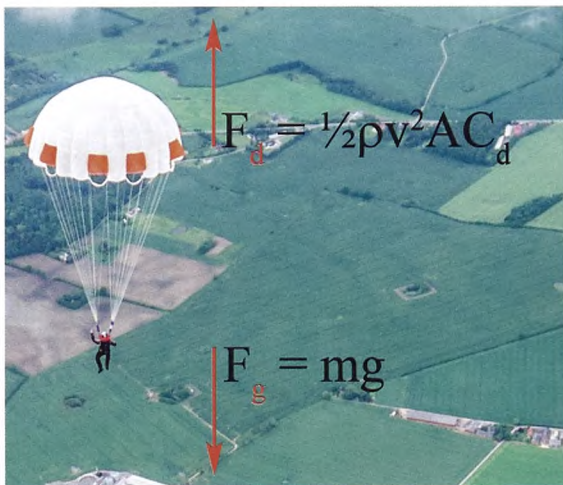
Balluten blev designet i 1960'erne med det specifikke formål at være et bremsende aggregat, der var stabilt i tynd luft og ved meget høje hastigheder (formen er testet brugbar ved hastigheder op til mach 10).

## De primære kræfter

Ethvert legeme der falder lodret igennem atmosfæren på Jorden vil være påvirket af to modsatrettede kræfter: Den første er tyngdekraften,  $F_g = mg$  hvor  $m$  er massen af legemet og  $g$  er tyngdeaccelerationen. Den anden kraft er vindmodstanden,  $F_d = \frac{1}{2}\rho v^2 AC_d$ , hvor  $\rho$  er tætheden af atmosfæren,  $v$  er faldhastigheden,  $A$  er frontarealet, dvs. det areal der møder luften. Til sidst har vi  $C_d$  som er dragkoefficienten; en parameter der beskriver hvor aerodynamisk en given form er i luften og dermed hvor meget modstand selve formen giver [5].

Sættes de to kræfter sammen får man den resulterende kraft,

$$F_{\text{net}} = F_g - F_d = mg - \frac{1}{2}\rho v^2 AC_d. \quad (1)$$



Figur 3. CS tester de to modsatrettede kræfter ved Odense Lufthavn. Foto: Sanjin Vujanovic.

Dragkoefficienten er størrelsesuafhængig, og beskriver, sammen med arealet, den samlede faktor for vindmodstanden, som et objekt giver i en given højde.

Når vi skal designe vores system, er de fleste af parametrene for faldskærmene kendte, eller en del af de ting man direkte kan designe. Massen af rumkapslen bliver givet til os ud fra, hvad vi kan formå at bygge. Vi kender lufttætheden i de forskellige højder i atmosfæren, og har en standardatmosfære vi kan arbejde med i vores modeller. En standardatmosfære er en model, der definerer de forskellige værdier for tryk, lufttæthed, temperatur og meget mere, som funktion af højden (se mere i [6]). Hastighederne definerer vi selv, ud fra de ønsker vi har til, hvordan systemet skal fungere. Tilbage er så kun at finde dragkoefficienten og den nødvendige størrelse på faldskærm og ballute, der skal til for at opnå de ønskede hastigheder.

Hvis man er interesseret i, hvordan man kan arbejde med faldskærme i undervisningsregi kan man eksempelvis kigge i Syddansk Universitets materiale, "Faldskærm i fart" [7].

### Design af balluten

Vi har som udgangspunkt til vores ballutedesign brugt det fotomateriale, der har været til rådighed af de oprindelige balluter. Det medførte en lille model som vi testede tidligt i 2014, med henblik på en opsendelse af HEAT 2X (en raket der desværre brændte under en motortest på Refshaleøen i København). Testen i 2014, foretaget hos Copenhagen Air Experience, viste, at vores design havde en  $C_d$  på 0,6, hvilket matcher lærebøgerne for det design vi kopierede.

Faldskærmen, der skal åbnes efter balluten, er designet til at åbne ved en hastighed på cirka 200 km/t, hvilket altså er grænsen vi ønsker at holde os indenfor i 3 km's højde med en raket på 135 kg. Vi skal nu finde størrelsen af balluten, der vil opfylde denne betingelse, så derfor omskriver vi den resulterende kraft:

$$F_{\text{net}} = mg - \frac{1}{2}\rho v^2 AC_d \Leftrightarrow A = \frac{2mg}{\rho v^2 C_d}. \quad (2)$$

Ved at indsætte de relevante værdier får vi

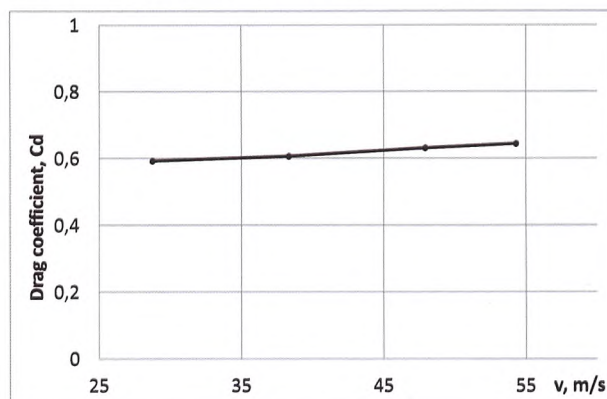
$$A = \frac{2 \cdot 135 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2}{0,909 \text{ kg/m}^3 \cdot (56 \text{ m/s})^2 \cdot 0,6} = 1,59 \text{ m}^2. \quad (3)$$

Her skal vi stoppe op og huske en vigtig detalje: Raketten/rumkapslen har også i sig selv et bremsende areal, men for nuværende er det endelige design på den front ikke kendt, hvorfor vi i denne omgang ser bort fra det bidrag. Den resulterende størrelse for balluten bliver dermed et konservativt estimat. Produktionstekniske årsager gjorde, at vi endte med en ballute med et areal på 1,65 m<sup>2</sup>, og en højde på knap 2 meter i oppustet udgave.



Figur 4. Balluten til Nexø I som den endte med at tage sig ud. Foto: Jev Olsen.

Efter produktionen af den første ballute i fuld størrelse blev det tid til at teste den i vindtunnelen, og se hvordan den opførte sig i forhold til forudsigelserne. Hos "Copenhagen Air Experience" monterede vi en trækmåler i et gitter i bunden af deres vindtunnel. Denne måler brugte vi til at registrere hvor stort træk balluten udførte ved de forskellige vindhastigheder. Se figur 5. Det var ikke muligt at få brugbare resultater for vindhastigheder under 28 m/s og over 54 m/s.



Figur 5. De målte værdier for  $C_d$  som funktion af hastighed.

Dragkoefficienten for Nexø I-balluten blev, for det hastighedsområde vi forventer at operere i, målt til  $C_d = 0,64$ . Som nævnt tidligere, var  $C_d$  for den lille ballute fra 2014 målt til 0,6.

Terminalhastigheden, altså den hastighed raketten får på vej ned, når de to modsatrettede kræfter er lig hinanden, findes ved at isolere  $v$ :

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{\rho AC_d}} \quad (4)$$

Indsætter vi de kendte værdier for Nexø I-raketten, og forudsætter at hastigheden er opnået i 3000 meters højde, får vi følgende resultat:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 135 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2}{0,909122 \cdot \text{kg/m}^3 \cdot 1,65 \text{ m}^2 \cdot 0,64}} = 53 \text{ m/s}, \quad (5)$$

hvor vi kan lægge en endnu ukendt hastighedsreduktion fra vindmodstanden på raketten oveni. Vi kan dermed



**Figur 6.** T.v.: Vores testspringer, Ahmad Rahman, fra "CenterJump", forlader flyet med vores faldskærm ved en af de mange tests. T.h.: Mads Stenfatt holder øje med faldskærmens udfoldelse under et af testspringene. Fotos: Sanjin Vujanovic.

Vi designede derfor et såkaldt reefingsystem, der skal sikre at hovedfaldskærmen ikke folder sig helt ud med det samme. Reefingsystemet består i al sin enkelthed af en line, der er bundet sammen i bunden af faldskærmen, og som sikrer at den ikke kan folde sig helt ud lige efter at faldskærmen er kommet ud (se figur 7).



**Figur 7.** Vores hovedskærm i reefed tilstand. En line holder den delvist tillukket i bunden, så den ikke er foldet helt ud. Foto: Ahmad Rahman.

Denne line klipper vi så over efter et forudbestemt tidsinterval. Typisk vil faldskærmen have stabiliseret sin fart i løbet af 10-12 sekunder efter åbning, og vi

se frem til en faldhastighed, forinden hovedskærmen åbnes, som er under vores ønskede grænse på 56 m/s.

## Hovedfaldskærmene

Til Nexø-raketterne har vi købt to C9-faldskærme. Det er faldskærme, der reelt er designet som nødfaldskærme til personbrug. Men da vi havde mulighed for at købe dem billigt, valgte vi på dette tidspunkt i vores udviklingsproces at benytte disse, for at kunne teste det samlede system. På et senere tidspunkt bliver vi nødt til at sy eller købe nogle, der er mere korrekt designet til vores langsigtede mål.

En af de vigtigste ting ved designet af faldskærmssystemet er, at man kan kontrollere selve åbningsforløbet af faldskærmene. Det vil sige, at vi ønsker at have kontrol over, hvor hurtigt faldskærmene folder sig ud, så de ikke bremses for hårdt op for hurtigt. Sker det, er der nemlig risiko for skader på faldskærmen, og dermed i sidste ende også på rumkapslen og astronauten!

har derfor valgt at linen bliver klippet over efter 15 sekunder, for at sikre at vi ikke folder faldskærmen helt ud inden den er kommet ordentligt ned i fart.

Vi har ved flere lejligheder haft mulighed for at teste hovedfaldskærmen ved faldskærmsklubben "CenterJump", hvor vi lod en springer hoppe ud over Odense Lufthavn i Beldringe. Det primære vi ville teste var selve reefingsystemet, men vi udnyttede også muligheden for at måle springerens faldhastighed hele vejen ned, så vi kan danne os et overblik over den forventede faldhastighed for Nexø-raketterne. Vi kunne konstatere, at han i 2300 meters højde faldt med 14,9 m/s med sine 100 kg, mens faldhastigheden ved fuldt bærende skærm var 7,6 m/s i 1850 meters højde.

Som det ses af figur 7 og 8, er faldskærmen ikke perfekt rund i bunden, hverken i reefed eller helt åben tilstand. Der er folder der går ud mellem hvert linesæt. Det har derfor ikke været muligt for os at få en eksakt beregning på arealet af faldskærmen, og dermed dragkoefficienten. Det forhindrer os ikke i at slå de to parametre sammen, når nu vi ikke skal skalere faldskærmens størrelse til andre formål, og vi kan derfor regne videre på faldskærmens opførsel, så længe vi ikke ændrer på længden af reefinglinen.



**Figur 8.** Vores hovedskærm fuldt udfoldet efter at linen er blevet klippet over. I bunden af skærmen kan man lige ane den ene af de to bokse, der indeholder timer og klippemekanismen. Foto: Ahmad Rahman.

Ved at omskrive formlen  $F_g = F_d$  kan vi beregne den samlede effekt af areal og dragkoefficient:

$$AC_d = \frac{2mg}{\rho v^2}. \quad (6)$$

Vi kan nu indsætte værdier målt i de to højder: I 2300 m, reefed faldskærm:

$$AC_d = \frac{2 \cdot 100 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2}{0,976481 \text{ kg/m}^3 \cdot (14,9 \text{ m/s})^2} = 9,1 \text{ m}^2. \quad (7)$$

For 1850 m, fuldt åben faldskærm:

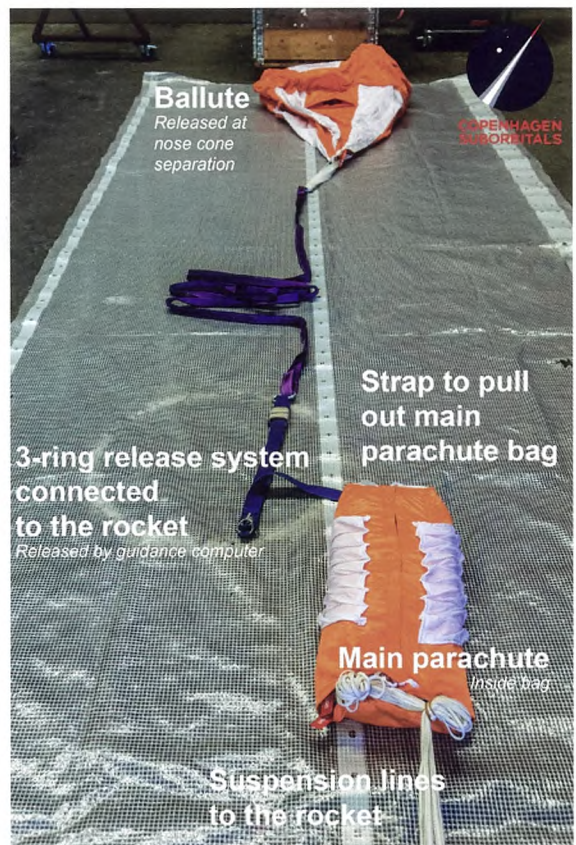
$$AC_d = \frac{2 \cdot 100 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2}{1,02176 \text{ kg/m}^3 \cdot (7,6 \text{ m/s})^2} = 33,3 \text{ m}^2. \quad (8)$$

### Det samlede faldskærmssystem

Vi har således data på plads for både ballute og faldskærm, og kan estimere deres faldhastigheder ned igennem atmosfæren.

For lige at opsummere: Målet er, at den bemandede rumkapsel skal falde fra sit toppunkt over 100 km oppe. I toppunktet udløses balluten, som vil stabilisere og bremse kapslen indtil den er i 4 km's højde, hvor vi så vil udløse hovedfaldskærmen, som åbner i to trin, for at gøre overgangen så blid som mulig.

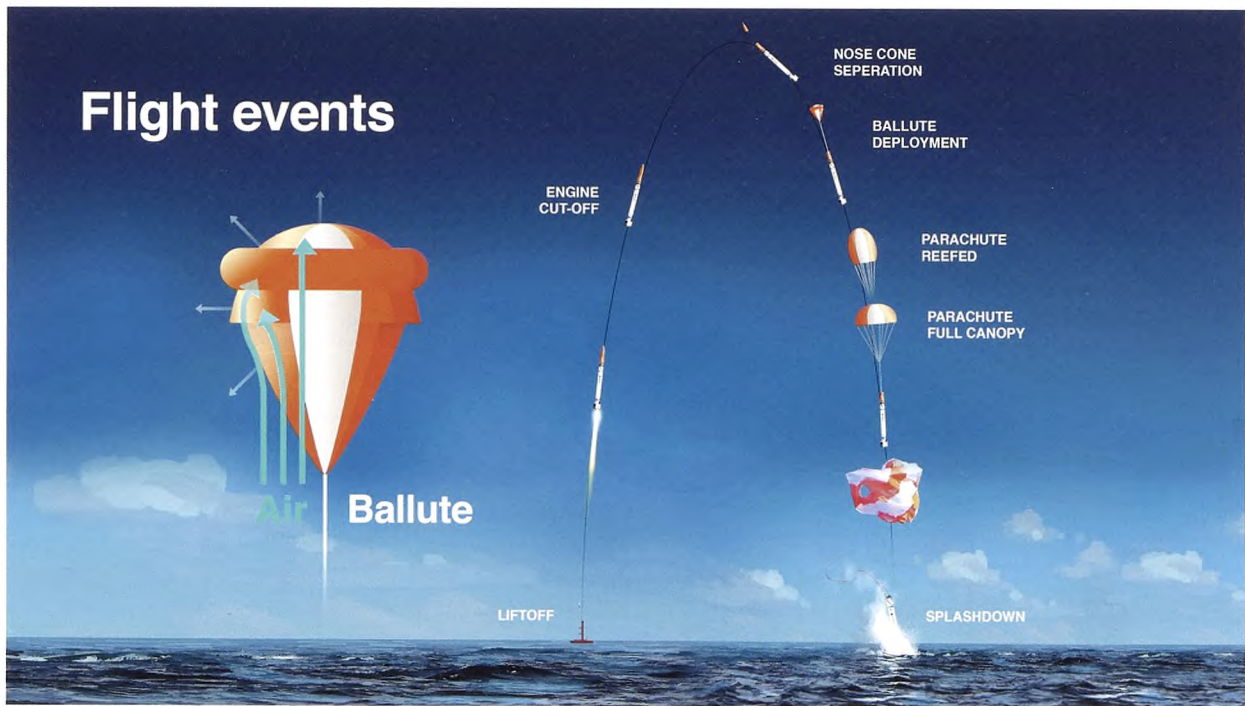
På Nexø-raketterne øver vi os for første gang på hele denne proces. Det forventes at Nexø I kommer op i ca. 6,5 km's højde, mens Nexø II ikke kommer over 20 km.



**Figur 9.** Det samlede faldskærmssystem, som det skal monteres i Nexø I. Foto: Mads Stenfatt.

### Numeriske beregninger

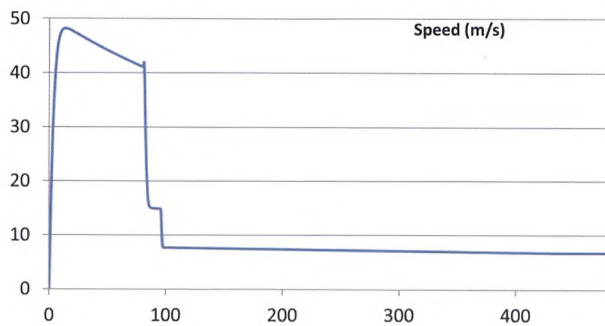
Med tallene på plads for både ballute og faldskærm, er det nu på tide at kigge på, hvordan det samlede system vil opføre sig, når vi om kort tid sætter det fri i den virkelige verden.



Figur 10. De forskellige hændelser som Nexø-raketterne gennemgår. Grafik: Jonas Linell.

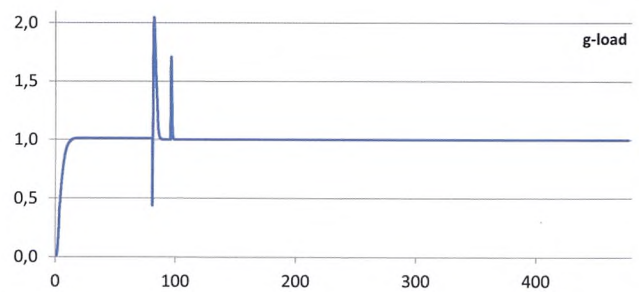
Vi har lavet en model, der numerisk beregner raketens tur ned igen, efter at motoren har bragt den op til sit toppunkt. Dette gøres i princippet blot ved at køre beregningen for  $F_{net}$  gentagne gange med de relevante parametre som udgangspunkt. Det er vores forventning, at raketten når 6,5 km op og at den i toppunktet, tømt for brændstof, vil veje 135 kg.

Undervejs i modellen laver vi nogle finter, hvor vi ændrer på areal og dragkoefficient, når vi skifter fra ballute til faldskærmen i reefed tilstand og igen når faldskærmen folder sig helt ud. Vi har også nu tilføjet en antagelse om raketens areal, svarende til at den hænger lodret, og præsenterer sit bundareal for vinden.

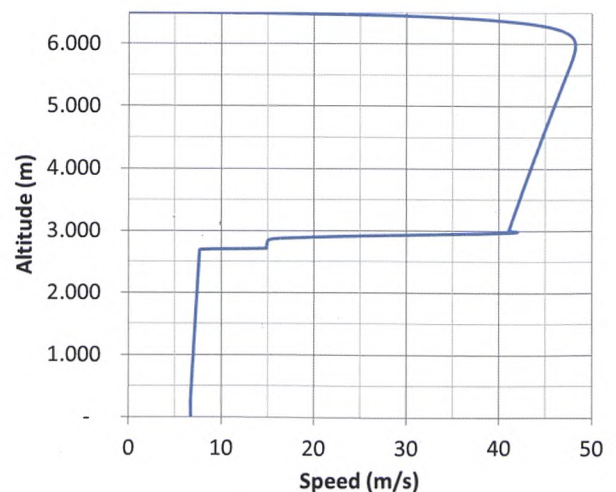


Figur 11. Fart som funktion af tiden i sekunder. Bemærk at farten aftager som funktion af højden, idet atmosfærens tæthed stiger på vej ned.

Ved et pænt frit fald fra sit toppunkt 6,5 km oppe, vil Nexø I komme op på godt 50 m/s inden farten aftager på grund den tættere atmosfære. Efter cirka 80 sekunders fald med balluten er raketten nået til 3 km, hvor farten vil være nået ned til omkring 41 m/s eller omkring 150 km/t. På det tidspunkt giver raketten slip på balluten, som samtidig trækker hovedfaldskærmen ud. I det øjeblik er der kortvarigt ikke noget, der trækker i raketten, og den går derfor i frit fald igen.



Figur 12. G-load som en virtuel astronaut ville opleve, hvis han var ombord i Nexø I. Bemærk det kortvarige dyk, mens raketten har givet slip på Balluten og venter på at faldskærmen folder sig ud.



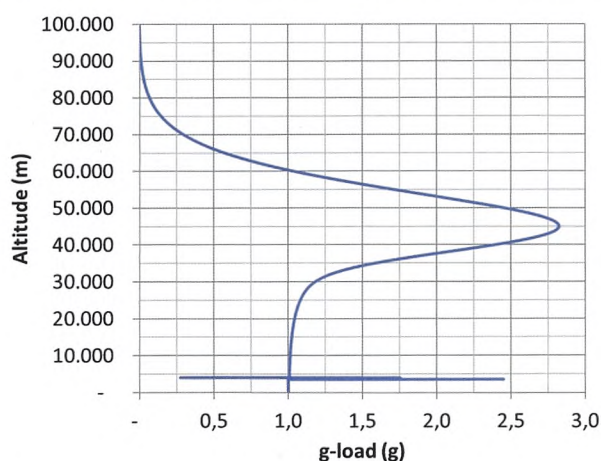
Figur 13. Illustration af farten ned igennem atmosfæren. For Nexø I har vi besluttet, at hovedskærmen udløses i 3 km højde for at give både ballute og faldskærm tid til at stabilisere sig, så vi får målt mest muligt på begge emner.

Det holder dog kun indtil faldskærmen begynder at folde sig ud og bremser raketten yderligere op til ca. 14 m/s. Denne opbremsning vil give en belastning på godt 2G, for en virtuel astronaut der måtte befinde sig i raketten. 15 sekunder senere bliver reefingsnoren klippet over, og raketten vil blive bremset ned til sin landingshastighed, som vil være på omkring 7 m/s (se figur 13).

### Den videre udvikling

Mange udfordringer udestår stadig, i forhold til når vi skal skalere op til de bemandede Spicarakterter. På materialesiden skal vi have fundet en stoftype, som er lufttæt nok, og som er varmebestandig, idet vi forventer, at balluten kortvarigt vil blive udsat for temperaturer på omkring 400 grader. Derudover skal den numeriske model fintunes til at tage højde for en dragkoefficient, der ændrer sig som funktion af farten. Vi arbejder også på at kunne beregne nedslagsstedet for rumkapslen, med basis i de tilgængelige vejrudsigter der findes. Ved vores opsendelse med Sapphire, og under de foreløbige faldskærmstests har vi set gode tendenser i forhold til at kunne forudsige nedslagspunktet, men det kan der skrives en helt anden artikel om.

Vi kan dog allerede nu – for sjov skyld – forestille os turen ned fra 100 km for den bemandede rumkapsel, hvis vi modificerer vores antagelser lidt: Med konstant  $C_d$ , dobbelt størrelse ballute og tre hovedfaldskærme, der skal bære en rumkapsel på 350 kg, kunne turen se således ud, hvis man måler på g-load for astronauten:



**Figur 14.** Illustration af de g-kræfter som en astronaut kunne opleve dem i vores Spica-raket.

En tur igennem atmosfæren i vores bemandede rumkapsel vil medføre en hård opbremsning i omkring 40 km's højde, hvor kapslen møder atmosfæren med en fart på omkring 3.200 km/t. Ovenstående graf illustrerer også, hvorfor det er, at man venter til en relativt lav højde med at åbne faldskærmene – rumkapslen er simpelthen stadig ved at bremse op! Det er så derfor, at vi venter til 4 km's højde med at åbne de tre hovedskærme, som vil bremse astronauten yderligere ned til en behagelig landingshastighed på 6 m/s. Tilbage er blot for astronauten at læne sig tilbage i sit sæde og vente på at lande i vandet igen, 15 minutter efter at have været nået over de magiske 100 km, og dermed gjort Danmark til den 4. nation, der har sendt en (amatør)astronaut ud i rummet.

Læs mere om Copenhagen Suborbitals på [www.CopSub.com](http://www.CopSub.com) [1]. Vores daglige fremskridt kan endvidere følges på vores blog [8], hvor vi jævnligt skriver om store og små fremskridt og tests eller spørger vores læsere til råds, omkring de problemstillinger vi står overfor.

### Litteratur

- [1] Copenhagen Suborbitals: [www.CopSub.com](http://www.CopSub.com)
- [2] CS fotoarkiv: <http://picasaweb.google.com/copsub>
- [3] Nexø faldskærmsvideoer: <http://bit.ly/1RLIOey>
- [4] Blog med video: <http://bit.ly/1KjcVSv>
- [5] Dragkoefficient: [https://en.wikipedia.org/wiki/Drag\\_coefficient](https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient)
- [6] Standard atmosfære: [http://www.engineeringtoolbox.com/standard-atmosphere-d\\_604.html](http://www.engineeringtoolbox.com/standard-atmosphere-d_604.html)
- [7] Faldskærm i fart, undervisningshæfte fra Syddansk Universitet: <http://bit.ly/1KjcTdi>
- [8] Blog på Ingeniørens hjemmeside, <http://ing.dk/blogs/rumfart-pa-den-anden-made>



Mads Stenfatt har siden 2011 været medlem af Copenhagen Suborbitals, og er i dag ansvarlig for udviklingen af faldskærmssystemerne til den bemandede rumkapsel. Han springer derudover også faldskærm i sin fritid.

**PFEIFFER VACUUM**

## ACP Dry Pump

**Olje- og partikelfri  
Flertrins Roots teknologi**

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850  
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk  
[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)