

# Srečko v vesolju

Uroš Borjančič

Šolski center Srečka Kosovela Sežana

## Povzetek

Na Šolskem centru Srečka Kosovela Sežana smo se odločili, da bomo v višje plasti stratosfere spustili vremenski balon. V okviru večletnega projekta Srečko v vesolju smo uspešno izvedli dva spusta stratosferskih balonov ter analizirali meritve, ki jih je na svoji poti izvedla merilna oprema.

**Gljučne besede:** Stratosferski balon, popularizacija naravoslovja, analiza meritev

## Srečko in Space

### Abstract

At the Srečko Kosovel School Centre Sežana we decided to launch a weather balloon into the higher layers of the stratosphere. Under the multiannual project called »Srečko in Space« we successfully carried out two launches of stratospheric balloons and analysed the measurements carried out by the measuring equipment during the flights.

**Keywords:** stratospheric balloon, popularisation of natural science, analysis of measurements

Foto: Samo Onič

## Uvod

Ljudje smo po naravi radovedni. Očarani smo nad pojavi, ki jih ne znamo povsem opisati, in nad področji, ki so na videz nedostopna. Ljudje smo iskalci resnice in prav vsi se sprašujemo o smislu in izvoru našega obstoja. Dijaki pri tem niso nič drugačni, ravno nasprotno, zato od nas učiteljev želijo, da jih usmerimo oziroma jim pokažemo in poskušamo razložiti nekaj, kar izstopa iz okvirov vsakodnevnega poučevanja. Zato se veliko učiteljev odloča za dodatne obšolske aktivnosti in projekte.

Na sežanskem šolskem centru smo izvedli večletni projekt *Srečko v vesolju*. Ideja se je porodila Črtu Gorupu, ki je bil tedaj zaposlen na Fakulteti za računalništvo in elektrotehniko v Ljubljani. Idejo je Gorup najprej predstavil meni, nato pa še dr. Damjanu Šoncu, ki je bil takrat prav tako zaposlen na Fakulteti za računalništvo in informatiko ter je tudi član radioamaterskega društva Radioklub Nika Šturma - Tarzana Sežana. V projekt smo bili vključeni trije mentorji in trinajst dijakov.

Zamislili smo si, da bi v višje plasti stratosfere spustili višinski balon, napolnjen s helijem, in pri tem zbirali podatke o nekaterih višinskih parametrih. Podoben projekt so s šolsko merilno opremo pred leti izvedli na Gimnaziji Vič. S kolegom Rokom Capudrom, ki je bil vodja viškega projekta, smo se takoj povezali. Hvaležni smo mu za predajo nekaterih ključnih uporabnih informacij o spustu.

## Glavni cilj projekta

Samega spusta višinskega balona, ki je balon brez človeške posadke, napolnjen s helijem ali z vodikom [1], ni težko izvesti. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) vremenske balone spušča dnevno. Prek spleta je mogoče naročiti osnovno opremo za spust. Mi smo seveda želeli izmeriti čim več parametrov in jih meriti na točno določen način. Nismo želeli kopirati srednješolskega projekta, ki je bil že izveden. Zato smo si mentorji zastavili vprašanje: *Kaj naj bo osnovni namen projekta in kakšne cilje želimo doseči?*



Dijaki želijo vedno znova presegati meje naučenega.

Na šoli nimamo težav s *popularizacijo* naravoslovja, saj izvajamo veliko projektov in dodatnih obšolskih aktivnosti. Smo sicer majhna šola in zato tudi omejeni s sredstvi, vendar nam kljub vsemu v dijakih uspeva spodbujati željo po naravoslovnem znanju. Opazovati to vedoželjno mladino je pravi privilegij, kar spodbuja tudi nas mentorje. Dijaki želijo vedno znova presecati meje naučenega. Projekt Srečko v vesolju je bil kot nalašč za preseganje mej.

V sklopu projekta so si dijaki pridobili veliko znanj, ki bistveno presegajo srednješolsko raven. Vendar je bil glavni cilj projekta vliti dijakom vero v to, da smo ljudje sposobni doseči marsikaj in presecati meje, ki si jih ustvarjamo v glavah, če si le reči zastavimo na pravi način, jih tehtno premislamo, znotraj ekipe sodelujemo in si zaupamo.

## Načrtovanje in senzorika

Ob načrtovanju projekta konec poletja leta 2012 smo se trije mentorji odločili, da je cilj tudi ta, da dijaki pod našim vodstvom sami izdelajo sondo in padalo, implementirajo merilno opremo ter si pridobijo dovolj programerskega znanja, potrebnega za programiranje mikrokontrolerov, ki smo jih uporabili za oba spusta. Želeli smo, da bi bili dijaki pri projektu čim bolj samostojni in da bi po tem, ko bi si pridobili dovolj znanja, prišli do čim boljših rešitev, ki bi na koncu privedle do uspešnega spusta stratosferskega balona. Za izvedbo je bila potrebna tudi dobra uskladitev med mentorji, saj je imel vsak izmed nas svoje naloge. Uspešno sodelovanje je po dobrih dveh letih in pol privedlo do dveh uspešnih spustov maja 2015.

Že na prvemu sestanku smo se odločili, katere atmosferske parametre želimo izmeriti ob samem spustu. Ti so:

- temperatura zraka,
- relativna vlažnost,
- zračni tlak,
- magnetno polje,
- energijska gostota UV-žarkov,
- energijska gostota vidne svetlobe,
- radioaktivno sevanje,
- stanje baterij,
- položaj sonde.

Poleg tega smo želeli zajeti tudi kakšen posnetek z višine, zato smo se na koncu odločili, da v sondo vgradimo tudi dve kameri, pri čemer bi ena zajemala posnetke širjenja balona s 15-sekundnim vzorčenjem (zgornja kamera – Logitech C270), druga bi pa zajemala posnetek Zemlje (spodnja kamera – GoPro HERO 2). Odločili smo se, da bomo podatke med spustom shranjevali na kartico micro SD.

Preden smo pričeli načrtovati sondo, merilno opremo in padalo, si je bilo treba pridobiti določena znanja. Sprva smo projekt izvajali v sklopu fizikalnega krožka, kjer so dijaki spoznali nekaj osnov meteorologije in termodinamike, vendar smo kaj kmalu uvedli povsem nov krožek z imenom Srečko v vesolju, po katerem smo poimenovali projekt. Ko so si dijaki pridobili dovolj znanja fizike in matematike, so zaplavali v vode programiranja mikroprocesorjev. Naučiti se je bilo treba programiranja v programskem jeziku C++. Najprej so se dijaki učili programirati na mikroprocesorju Arduino Uno, nato so svoje znanje uporabili za programiranje procesne enote sonde, ki jo je pripravil dr. Šonc. Za procesno enoto, ki je zbirala in shranjevala podatke iz tipal in kamere USB, smo izbrali mikrokontrolniški modul Aria-G25, ki je sposoben poganjati operacijski sistem Linux. Za modul smo izdelali nosilno ploščo z elektroniko za napajanje ter dodali še nekaj priključkov z veznimi elementi za priključitev kartice micro SD, konzole in modulov, vezanih na vodilo I<sup>2</sup>C ter na vmesnike SPI in UART [2].



**Slika 1:** Procesna enota sonde – nosilna plošča z modulom Aria-G25 in priključki.

Za podrobnejši opis elektronike in materialov preberite članek z naslovom Spust balona v stratosfero v reviji CQ ZRS, letnik XXV, 2–3/2015, katerega avtor je dr. Damjan Šonc.

Za določanje položaja sonde med spustom smo uporabili sprejemni modul GPS Ublox-6, kot izhodno stopnjo za 144,8 MHz pa Radiometrix HX1. Anteno smo naredili kar iz bakrene žice premera 0,5 mm in dolžine  $\lambda/2 \approx 1,0$  m. Položaj sonde smo spremljali preko radioamaterskega omrežja APRS. Radioamatersko društvo Radioklub Nika Šturma - Tarzana Sežana nam je za spust posodilo svoj klicni znak: S59ABL, s katerim je sonda na dve minuti oddajala pakete z nekaj ključnimi informacijami, kot so trenutni položaj, tlak in temperatura.

## Kratka fizikalna osnova

### 1. Spreminjanje tlaka, gostote in temperature z višino

Pričakovano je bilo, da bo sonda presegla 30 km višine. Z naraščanjem višine padata tako tlak kot gostota zraka, spreminja se pa tudi njegova temperatura. Tri osnovne termodinamične spremenljivke ( $T$  – temperatura,  $p$  – tlak in  $V$  – prostornina) so tesno povezane med sabo preko plinske enačbe, ki velja za idealni plin. Za zrak v zemeljski atmosferi lahko privzamemo, da se obnaša kot idealni plin:

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (1.1)$$

Molska masa zraka  $M = 29$  kg/kmol, splošna plinska konstanta  $R = 8314$  J/(kmol K). Vemo tudi, da je z maso in prostornino definirana gostota sredstva  $\rho = m/V$ , in tako prepišemo splošno plinsko enačbo v za nas primernejšo obliko:

$$p = \rho \frac{RT}{M}. \quad (1.2)$$

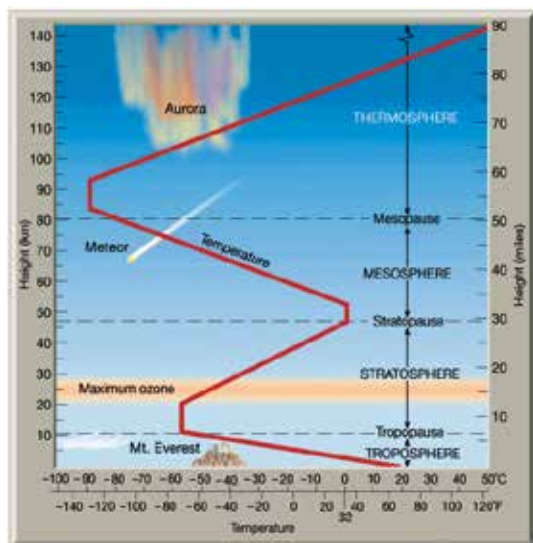
Z naraščanjem višine  $h$  tlak pada. Treba je upoštevati diferencialno obliko enačbe spreminjanja tlaka z višino:

$$\frac{dp}{dh} = -\rho g. \quad (1.3)$$

Privzamemo še, da je višina pri tleh enaka 0 m in narašča v navpični smeri. Iz Newtonovega gravitacijskega zakona je mogoče sklepati, da se gravitacijski pospešek v prvih nekaj deset višinskih kilometrih bistveno ne spreminja, zato lahko privzamemo, da je konstanten:  $g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>. Enačba (1.3) skupaj z enačbama (1.1) in (1.2) ponudi rešitvi za tlak in gostoto:

$$p(h, T) = p_0 \cdot e^{-\frac{Mg}{RT}h}, \quad \rho(h, T) = \frac{M}{RT} p_0 \cdot e^{-\frac{Mg}{RT}h}. \quad (1.4) \quad (1.5)$$

Z višino se spreminja tudi zastopanost plinov v atmosferi in s tem tudi molska masa zraka.



**Slika 2:** Slika prikazuje spreminjanje temperature v zemeljski atmosferi (temperaturni gradient). Višinski baloni lahko v najboljših primerih dosežejo rob stratosfere (približno 50 km). V troposferi, ki vsebuje približno 75 % mase ozračja ter 99 % njegove vodne pare, temperatura ozračja najprej pada, nato ostaja nad območjem tropopavze, ki je meja med troposfero in stratosfero, nekaj časa konstantna ter se nato na prehodu v ozonsko plast prične zviševati zaradi absorpcije UV-žarkov [3].

## 2. Vzgon in upor ob dvigovanju in padanju v ozračju

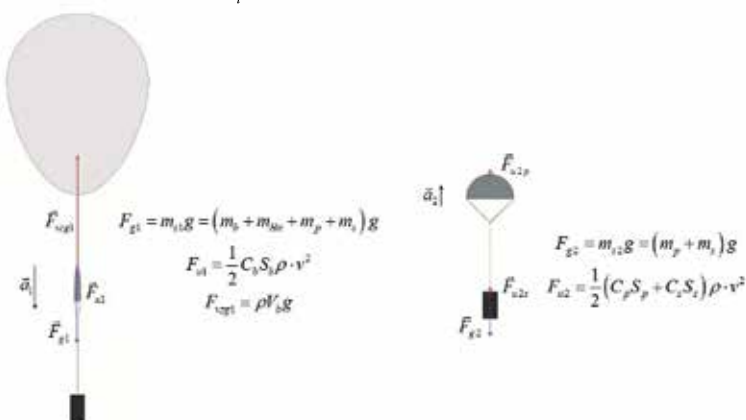
Pri spustu stratosferskega balona gre sonda skozi dve fazi. Najprej se dviguje pod vplivom sile vzgona, ki deluje na helijev balon. Vzgonu tedaj kljubujeta tako sila teže sistema (balon, helij, padalo z vrvicami in sonda) kot sila upora (upor na sondo je zanemarljiv v primerjavi z uporom na balon). Ko balon počni, prične prosto padati proti tlom, pri čemer sili teže sistema (padalo z vrvicami in sonda) nasprotuje le sila upora (na padalo in sondo):

$$F_g = mg, \quad F_{vzg} = \rho V g, \quad F_u = \frac{1}{2} C S \rho \cdot v^2.$$

Sila vzgona je odvisna od gostote okoliške tekočine (zraka), izpodrinjene tekočine (volumen balona) in gravitacijskega pospeška. Sila upora pa od prečnega preseka telesa, gostote okoliške tekočine in hitrosti dvigovanja oziroma padanja.

V splošnem za sistem velja II. Newtonov zakon:

$$\sum_i \vec{F}_i = m_s \vec{a} \Rightarrow \vec{F}_{vzg} + \vec{F}_u + \vec{F}_g = m_s \vec{a}. \quad (2.1)$$



**Slika 3:** Sile na sistem med dvigovanjem (levo) in padanjem (desno).

Dvig balona je posledica vzgona, ki je večji od teže. Po spustu, ko se balon dviguje, prične delovati še sila upora. Kmalu po spustu se vzpostavi ravnovesje sil. Z višino gostota pada eksponentno (enačba (1.5)), posledično se balon širi in s tem se večja njegov prečni presek. V atmosferi vlada atmosfersko ravnovesje. Če zamižimo na eno oko, lahko sklepamo, da se hitrost balona med dvigovanjem ne bo drastično spremenila. V tem primeru se enačba (2.1) skrči v naslednjo obliko:

$$\rho V_b g - \frac{1}{2} C_b S_b \rho \cdot v^2 - m_{s1} g = 0. \quad (2.2)$$

Po poku balona so parametri nekoliko drugačni. Balon raznese na koščke, zato se masa sistema na račun balona s helijem zmanjša. Med padanjem se odpre padalo, prečni presek padala in sonde se ne spreminjata, gostota okoliškega medija pa se po enačbi (1.5) večja. Hitrost po poku balona v nekaj sekundah naraste na najvišjo vrednost in se med padanjem zmanjšuje do pristanka na tleh. Na sondo s padalom med padanjem deluje pojemek po enačbi (2.1):

$$\frac{1}{2} (C_p S_p + C_s S_s) \rho \cdot v^2 - m_{s2} g = m_{s2} a. \quad (2.3)$$

### Ohišje sonde in padalo

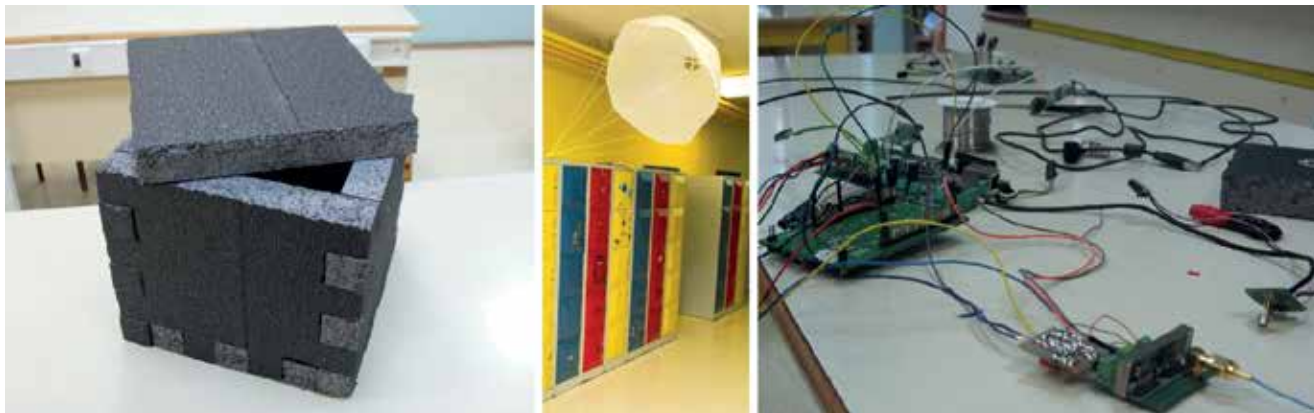
Pri izdelavi ohišja in padala je bil potreben tehten razmislek. Upoštevati je namreč treba več parametrov.

- Želeli smo izdelati sondo, ki bi bila čim lažja in čim manjša, a hkrati dovolj odporna proti padcu z višine.
- Pri vzpenjanju in padanju smo želeli zagotoviti optimalne razmere. Pri vzpenjanju čim manjši, pri padanju pa čim večji upor, hkrati pa čim stabilnejše stanje sonde med samim padanjem proti tlom.

- Ohišje je moralo biti iz materiala s čim boljšimi izolativnimi lastnostmi pri prenosu toplote, delovanje elektronike je namreč odvisno tudi od temperature okolice.
- Padalo smo želeli izdelati sami iz odpornega in lahkega materiala.

Pred izdelavo padala smo naredili kar nekaj prototipov, ki smo jih tudi preizkusili. Na koncu smo se odločili za sferično obliko s premerom 70 cm in z luknjo premera 5 cm na vrhu ter ga izdelali iz posebne tkanine UTT 38578 PA 6.6.

Glede samega materiala ohišja sonde smo se hitro uskladili. Odločili smo se za grafitni stiropor debeline 40 mm, ki ima glede na ceno zelo dobre toplotnoizolacijske lastnosti, hkrati pa zelo majhno gostoto in je dovolj trden ter odporen proti udarcem/padcem.



**Slika 4:** Prototip sonde, prototip padala in merilna oprema.

Po nekaj izračunih upora na sondo in padalo med padanjem smo se odločili, da je najbolj praktična oblika sonde kvader, katerega stranica osnovne ploskve meri 24 cm (zunanja dimenzija). Višino kvadra smo prilagodili svojim potrebam in je pri prvi sondi znašala 48 cm, pri drugi pa 30 cm. Težišče sonde je bilo relativno nizko med samim spustom. Največji masni delež sonde sta predstavljali Li-ionski bateriji, ki sta bili nameščeni tik nad spodnjo kamero na dnu sonde. S tem smo še dodatno stabilizirali sondo v želeni smeri tako med dvigovanjem kot tudi med prostim padom.

Zavedali smo se, da bo sonda med samim poletom izpostavljena nizkim temperaturam ozračja do  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  in hkrati močnemu soncu v višjih plasteh stratosfere, kjer je zrak zelo redek. Stranice sonde smo izdelali tako, da so se prepletle druga z drugo, nato pa smo jih zalepili s poliuretanskim lepilom, ki je odporno proti nizkim in visokim temperaturam. Tako smo vezje v sondi dobro toplotno in mehansko zaščitili.



**Slika 5:** Sonde po uspešnih spustih.

## Testi

Pred spustom je bilo treba vezje, sondo in padalo testirati.

Najprej smo testirali elektroniko v ohišju sonde pod vplivom nizkih in visokih temperatur ozračja. Želeli smo ugotoviti, kako se elektronika odziva na skrajne temperature ter kako hitro se pri njih ohlaja oziroma segreva notranjost ohišja sonde. Merilna oprema in ohišje sonde sta prestala toplogredni preizkus pri temperaturi nad  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  in 99 % relativni vlažnosti ter preizkus v zamrzovalniku pri temperaturi  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kamor smo sondo z merilno opremo zaprli za en teden. Predviden čas leta je bil dve uri. V tem času se med testiranjem temperatura v sondi ni bistveno spremenila ( $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), elektronika pa je uspešno prestala tudi skrajne temperaturne vrednosti obeh testov. V skrajnem primeru smo imeli na razpolago še aerogel, s katerim bi lahko sondo po potrebi prelepili in tako še dodatno toplotno in mehansko izolirali, vendar to ni bilo potrebno.

Pri testu padala smo želeli preveriti, kdaj se prične padalo na začetku prostega pada odpirati, in hkrati preizkusiti delovanje merilne opreme med padcem. Ugotovili smo, da se pri spustu z višine 5 m nad tlemi padalo lepo odpre in upočasni padanje sonde.

Želeli smo, da bi bila hitrost padanja sonde s padalom v nižjih plasteh ozračja med 6 m/s in 8 m/s, zato smo preizkusili padec z višine približno 300 m nad tlemi pri zunanjem zračnem tlaku 1,0 bar in temperaturi ozračja  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pri kateri sonda s padalom že doseže končno hitrost. Padalo se žal ni odprlo, ker je bilo preveč zapleteno v nosilne vrvice. Kljub temu so ohišje sonde, padalo, kameri, senzorji in preostala elektronika ostali nepoškodovani.



**Slika 6:** Testni spust.

Čeprav zadnji test ni potekal po načrtih, smo vedeli, da vse deluje brezhibno. Pripravljeni smo bili na spust.

## Zaključek priprav na spust

Ko so bile naše zamisli o samem spustu izoblikovane in smo ocenili dvižno maso balona – payload (masa padala, nosilnih vrvic in masa sonde z elektroniko), ki se je gibala malo nad 1000 g, smo se morali odločiti za višino, ki jo želimo doseči med spustom, in se skladno s tem odločiti za tip balona. Od tipa balona, dvižne mase in količine helija, s katerim je treba balon napolniti, je odvisna višina, ki jo balon lahko doseže, preden počí. Na spletu obstajajo računski modeli, ki izračunajo približno dvižno višino. Uporabili smo kalkulator na spletni strani <http://habhub.org/calc>, pri čemer smo se odločili za balon Kaymont 1200, s katerim smo želeli preseči mejo 30 km nadmorske višine.

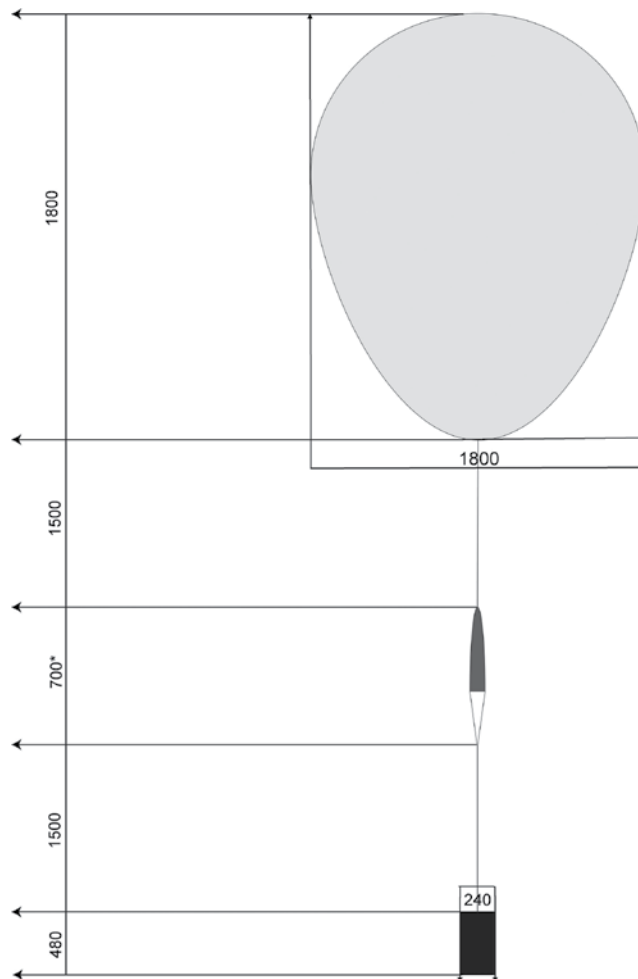
S posnetkov zgornje kamere smo z dijaki ocenili, da se je med samim dvigom polmer balona povečal na približno trikratno vrednost, kar v prostorninskem smislu pomeni na sedemindvajsetkratno vrednost v okviru 6 % napake!

Na spust smo bili pripravljeni po približno letu in pol od pričetka projekta. Treba je bilo še pridobiti ustrezno dovoljenje Agencije za civilno letalstvo Republike Slovenije. Pri izdelavi balona z opremo za spust je treba upoštevati smernice mednarodne organizacije ICAO (International Civil Aviation Organization). Preden smo pridobili dovoljenje za spust, smo zaradi varnostnih razlogov morali predložiti vlogo za spust z natančnim popisom celotne opreme ter si urediti zavarovanje v primeru morebitne škode, ki bi pri spustu lahko nastala. Postopek je trajal nekaj časa, vendar je bilo vredno čakati. Pridobili smo enomesečno dovoljenje za spust, ki smo ga po predhodni najavi lahko izvedli z nogometnega igrišča v Sežani blizu srednje in osnovne šole (nadmorska višina 365 m).

Maja 2015 smo tako uspešno izvedli dva spusta.

## Prvi spust

7. maja 2015 smo ob 8.45 s pomožnega nogometnega igrišča v Sežani spustili stratosferski balon, ki se ga je med projektom prijelo ime Srečko. Hitrost dvigovanja balona je odvisna od vzgona, teže in upora. Naše želje so bile preseči mejo 30 km, želeli smo pa tudi opraviti spust, ki ne bi trajal več kot dve uri in pol. Ključni so namreč zračni tokovi v višjih plasteh troposfere in stratosfere. Ob vetrovnih razmerah lahko tak balon odnese zelo daleč, v dveh urah tudi več sto kilometrov daleč, na primer ob jadranski obali do Zadra. Vetrovi v višjih plasteh atmosfere so ključni za določitev približnega kraja pristanka. V veliko pomoč nam je bil spletni model <https://predict.habhub.org>, ki predvidi, kam bo balon med letom letel in kje približno bo pristal. Želeli smo, da bi ga odneslo proti vzhodu.



**Slika 7:** Na skici so podane mere višinskega balona, padala, sonde in nosilnih vrvic tik pred spustom. Mere so podane v milimetrih, skica ni v merilu.

\* Na skici je padalo v skrčeni obliki, mere pa so podane za raztegnjeno obliko med padanjem. Mera na skici je premer padala.



**Slika 8:** Leva slika: balon tik pred spustom. Desna slika: balon pred pokom.



**Slika 9:** Predvidena pot balona (leva slika) in resnična pot balona (desna slika).

Atmosferske razmere se lahko hitro spremenijo. Zato smo si vnaprej zagotovili prilagodljive razmere za spust ter kar nekaj časa opazovali napovedi in njihove spremembe.

Zaradi trenutne vremenske slike na dan spusta smo želeli opraviti hitrejši polet, sicer bi lahko balon odneslo zelo daleč, zato smo ga napolnili tako, da je pri radiju 1,0 m zasedal prostornino  $4,2 \text{ m}^3$  v okviru 5 % napake, kar pomeni silo vzgona  $49,2 \text{ N}$  (sila teže sistema je znašala  $29,1 \text{ N}$ ) pri tedanji temperaturi zraka  $22,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Slika 10:** Spust.

Balon se je hitro pričel dvigati. Vse je potekalo po pričakovanjih, prejeli smo podatkovne paketke APRS, polet je bilo mogoče spremljati tudi na spletu.

Po 28 minutah in 30 sekundah je sonda na višini 12,2 km prenehala oddajati signal. Imeli smo sicer nekaj zamisli, kaj bi lahko šlo narobe, sklepali pa smo, da se Srečko še naprej dviguje, zato smo se z obilico vere, da ga najdemo, napotili na predvideno lokacijo pristanka. Na predvideni lokaciji smo si oddahnili, saj se je Srečko pri padanju spet oglasil. Od sonde smo prejeli nekaj paketkov, zadnjega na nadmorski višini 2697 m. Napotili smo se proti zadnji znani lokaciji. Prebijali smo se skozi hribovje zahodno od Snežnika, kjer smo po skoraj osmih urah od spusta Srečka prejeli točne podatke o lokaciji pristanka. Veselje ekipe v tistem trenutku je bilo nepopisno. Sondo smo našli na 15 m visokem drevesu. S primerno opremo smo se vrnili naslednji dan. Sonda s padalom se je spustila na nižjo vejo, od koder smo jo brez težav sneli.



Po analizi izmerjenih podatkov smo opazili, da so meritve potekale tako, kot smo predvideli, zatajila pa sta senzor za merjenje vlažnosti in spodnja kamera (HERO 2), ki je ugasnila nekaj sekund pred spustom.

Zgornja kamera je slike zajemala po načrtu na vsakih 15 sekund.



**Slika 11:** Leva slika: prehod balona skozi ozonsko plast. Desna slika: posnetek tik ob puku, ko se je kamera zasukala proti tlom, pri tem pa zajela severni Kvarner.

Po spustu smo ugotovili, zakaj smo sondo med letom izgubili. Modul GPS naj bi deloval do višine 50 km, v normalnem načinu delovanja pa deluje le do višine 12 km. Treba ga je nastaviti na način delovanja Airborne.

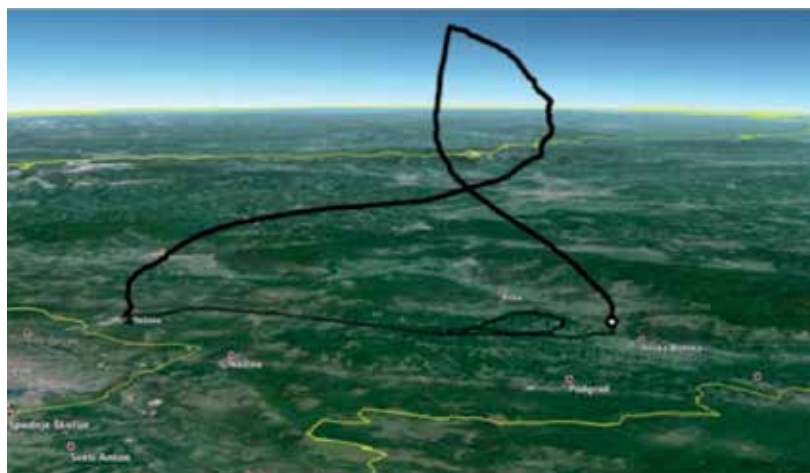
Po analizi podatkov smo bili sicer zadovoljni, ni pa bilo mogoče razbrati višine poka balona. Zamisel o tem, kako določiti višino poka, smo imeli, vendar je jo bilo treba za potrditev in natančnost mersko preveriti. Dovoljenje za spust smo imeli do konca maja, zato smo se podvzali in spust ponovili.

## Drugi spust

Izdelali smo novo, manjšo sondo in naročili manjši balon. Merilno opremo smo omejili, da je merila le temperaturo, pritisk, vlažnost in trenutni položaj. Usposobili smo spodnjo kamero, ki je pri prvem spustu odpovedala. Skupna masa opreme s sondo je tako znašala okrog 500 g.

Drugi spust je potekal podobno kot prvi, le da smo modul GPS primerno nastavili in potem ves čas spremljali trenutni položaj balona. Podobno kot pri prvem spustu ga je zaneslo proti vzhodu države. Izkušnje od prvega poleta so prišle prav, zato smo sondo našli 45 minut po pristanku, v gozdičku pri vasici Šembije, znova na zelo visokem drevesu. V nekaj dneh smo imeli tudi to sondo v svojih rokah.

Kamera je tokrat delovala brezhibno in zajela kar nekaj navdušujočih posnetkov z višine. Balon je počil na nadmorski višini 28,7 km pri tlaku 14 mbar in temperaturi ozračja 2 °C.



**Slika 12:** 3D-pot balona.



**Slika 13:** Posnetka z nadmorske višine 550 m (leva slika – Sežana) in 3300 m (desna slika – Sežana in Tržaški zaliv).



**Slika 14:** Posnetek Istre (levo) in poka (desno) z višine 28,7 km.

Navdušeni nad spusti in uspešno izvedenim projektom smo v zadnjih dneh iztekajočega se šolskega leta začeli analizo meritev.

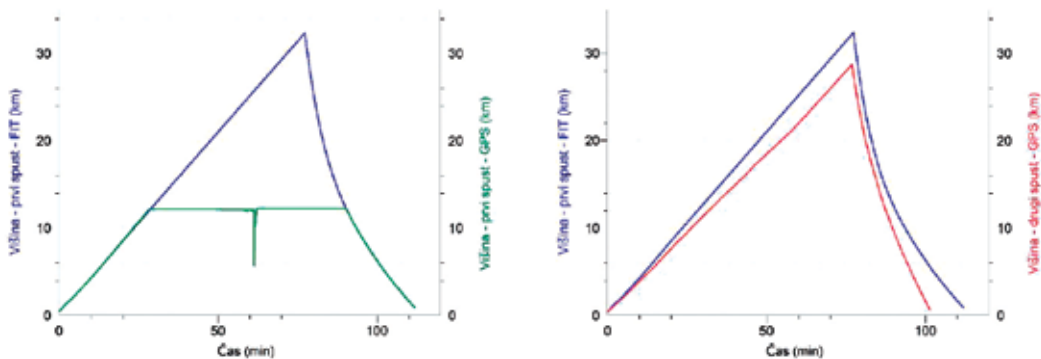
### Analiza meritev

Po drugem spustu smo lahko primerjali meritve spreminjanja višine s časom obeh spustov. Ugotovili smo, da sta se obe sondi enakomerno dvigali, prva s hitrostjo 6,9 m/s, druga pa s hitrostjo 6,1 m/s. Med samim prostim padom sta se sondi obnašali podobno, kot smo predvideli. Končna hitrost v višjih plasteh je zaradi manjšega zračnega upora bistveno večja kot v nižjih plasteh.

Meritve smo prečesali s pomočjo Matlaba in jih zapisali v primerni obliki txt, ki jo prepozna tudi program LoggerPro, ki je bil dijakom že domač. Sistema nam analitično ni uspelo rešiti, zato smo poskušali s pomočjo nabora analitičnih funkcij, ki jih LoggerPro še uspe prebaviti. Uspelo nam je pridelati primerno prilagoditveno krivuljo, ki se je popolnoma prilegala točkam na grafu  $h_1(t)$  (slika 15), ter nato enako funkcijo uporabili na grafu  $h_2(t)$ , ki se je popolnoma prilegala izmerjenim točkam.

Presečišče prilagoditvenih krivulj za dvig in padec prve sonde, glede na slike zgornje delujoče kamere sonde, časovno sovпада s pokom balona. Tako nam je uspelo določiti višino poka prvega balona, ki je znašala 32,3 km v okviru ocenjene 0,8 % napake. Na tej višini je tlak znašal 11 mbar, temperatura ozračja pa 4 °C.

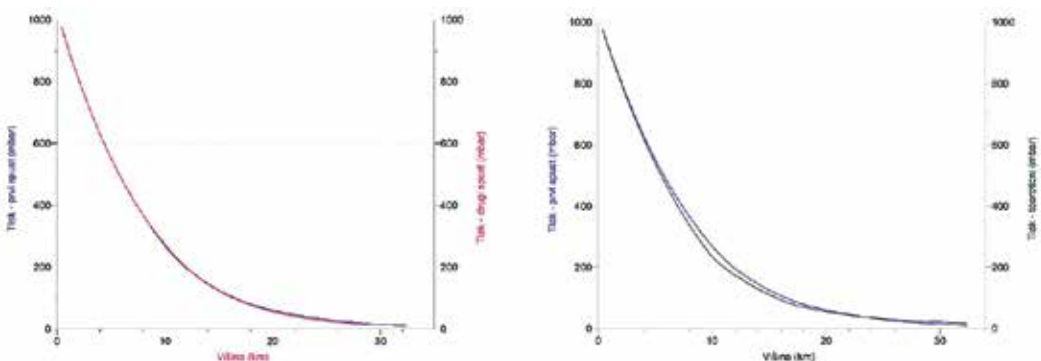
Navdušeni nad spusti in uspešno izvedenim projektom smo v zadnjih dneh iztekajočega se šolskega leta začeli analizo meritev.



Slika 15: Višina sonde prvega  $h_1(t)$  in drugega  $h_2(t)$  spusta.

je padala nekoliko hitreje, saj je med padcem bolj opletala in se vrtela ter zapletla nosilne vrvice med padalom in sondo. Posledično se padalo ni uspelo popolnoma razpreti.

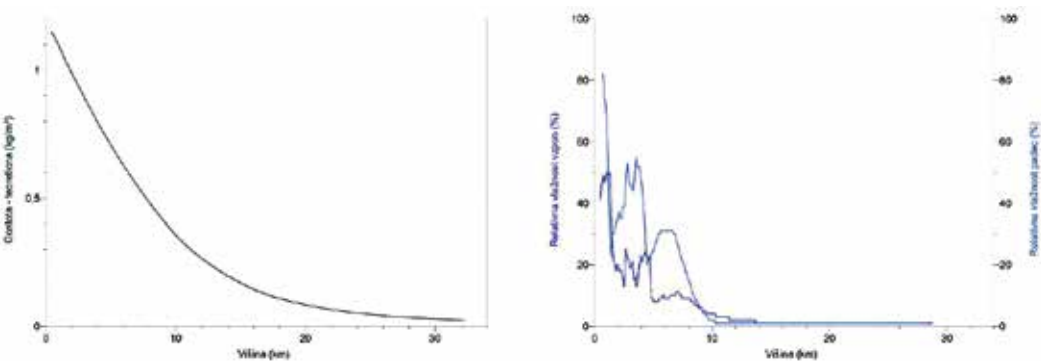
Analiza meritev tlaka je potrdila, da tlak pada z višino eksponentno, podobno kot napoveduje teoretična enačba (1.4).



Slika 16: Levi graf prikazuje izmerjeni funkciji  $p_1(h)$  in  $p_2(h)$ , desni pa  $p_1(h)$  in  $p(h)$ , izraženo po enačbi (1.4)

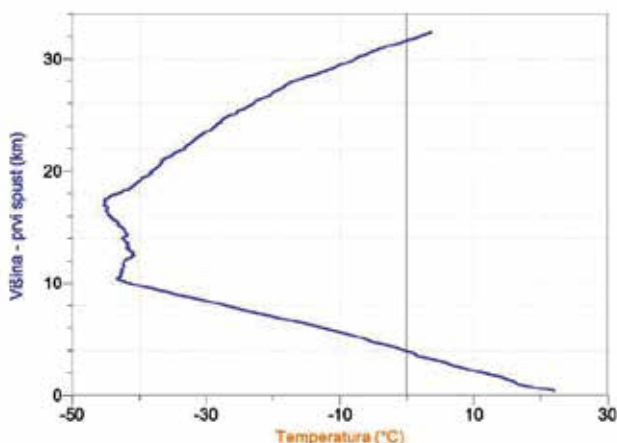
Z desnega grafa je razvidno, da se teoretični model ujema s praktičnim. Odstopanje je sprejemljivo, saj teoretični model ne vključuje spreminjanja molske mase ozračja in morebitnih spreminjajočih se parametrov v atmosferi.

Zanimivo si je ogledati tudi spreminjanje gostote z višino, pridobljeno s teoretičnim modelom po enačbi (1.5), in relativne vlažnosti med spustom druge sonde.



Slika 17: Levi graf: spreminjanje gostote z višino. Desni graf: spreminjanje relativne vlažnosti z višino.

Žal meritve relativne vlažnosti prvega spusta niso bile zanesljive. Vseeno je pa zanimivo pregledati meritve drugega spusta (slika 17 – desno), ki prav tako nakazujejo območje tropo-



**Slika 18:** Levi graf kaže medsebojno odvisnost temperature in nadmorske višine med preletom prvega balona skozi ozračje. Slika je kompatibilna z modelom na sliki 2. Območje tropopavze (ločnica med troposfero in stratosfero) se pojavi na višini 10,4 km.

pavze v okolici nadmorske višine 10 km, ko relativna vlažnost pade na 0 %. Nad območjem tropopavze oblakov tako rekoč ni, saj temperaturni gradient nad to mejo spremeni predznak (iz negativnega v pozitivni predznak), kar onemogoča konvekcijo. Nad mejo 17,5 km prične temperatura hitro naraščati. Tam je Srečko prešel v ozonsko plast, ki intenzivno absorbira UV-zarke. Pojavili so se tudi močnejši vetrovi, ki so Srečka nekoliko premetavali (slika 11 – levo).

## Zaključek

Projekt Srečko v vesolju je odlično uspel, čeprav ni dosegel pravega roba vesolja. Na razpolago imamo še množico podatkov. Veliko večino smo že obdelali, nekateri pa na obdelavo še čakajo ali smo jih obdelali le delno (kvalitativno). Uresničili smo vse cilje, ki smo si jih zastavili. Predvsem pa je pomembno to, da so dijaki okusili več kot le osnove raziskovalnega dela, presegli matematično-fizikalno raven srednje šole in dobili zagon za nove izzive. Za konec naj vas povabim še na ogled krajših dokumentarnih videov in posnetka celotnega spusta na Youtube kanalu **FizikaPKC**:

- Srečko in space - Documentary video
- Srečko in space - Whole flight
- Srečko in space - Balloon expansion

Projekt Srečko v vesolju je odlično uspel, čeprav ni dosegel pravega roba vesolja.

## Viri

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/High-altitude\\_balloon](http://en.wikipedia.org/wiki/High-altitude_balloon)
- [2] D. Šonc, Spust balona v stratosfero, CQ ZRS, letnik XXV, 2–3/2015.
- [3] [http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/atmos\\_origin.html](http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/atmos_origin.html)