

FIZIKA ALPSKEGA SMUČANJA

Peter Fakin

Seminarska naloga obravnava fizikalni vidik tehnike alpskega smučanja. Poudarek seminarske naloge je na razumevanju sil, ki delujejo na smučarja, in na najosnovnejši obliki zavijanja ter smučanju na vzporedno postavljenih smučeh. V zadnjem delu naloge pa opisujem, zakaj se koeficient trenja med smučmi in snežno podlago zmanjšuje, torej zakaj lahko smučamo.

Mentor: višji pred. mag. Zlatko Bradač

Maribor, april 2004

KAZALO

1. UVOD	3
2. SILE NA KLANCU IN OSNOVNO DINAMIČNO RAVNOVESJE	3
3. NAJOSNOVNEJŠA OBLIKA ZAVIJANJA	5
4. SMUČANJE NA VZPOREDNO POSTAVLJENIH SMUČEH	6
5. ZAKAJ SE LAHKO DRSAMO IN SMUČAMO?	9
6. ZAKLJUČEK.....	10

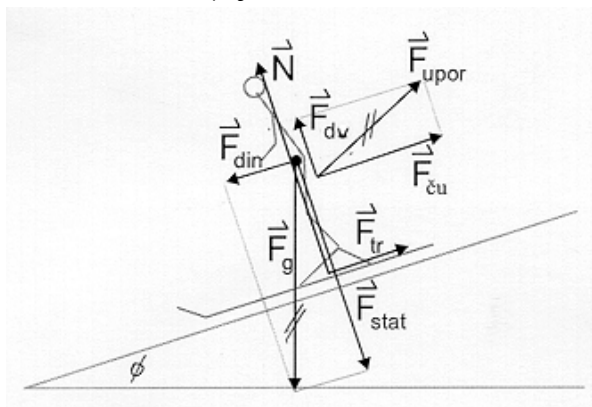
1. Uvod

Alpsko smučanje je množična oblika zimske rekreacije, je šport, pri katerem smučar drsi po zasneženi strmini. Smučar krmari tako, da spreminja lego svojega težišča in tudi silo trenja ter upora na drsno ploskev smuči. Smučar je v tem primeru sistem: človek + smuči + čevlji + palice.

Gibanje smučarja temelji na poznavanju fizikalnih zakonitosti, zato v seminarju obravnavam fizikalni vidik tehnike alpskega smučanja. Na začetku opredelim sile na smučarja in osnovno dinamično ravnotežje ter najenostavnejšo obliko zavijanja. V nadaljevanju me zanimajo smučarji, ki so sposobni smučanja na vzporedno postavljenih smučeh. Na koncu seminarja iščem odgovor na vprašanje: "Zakaj lahko smučamo?"

2. Sile na klancu in osnovno dinamično ravnoesje

Na smučarja, ki se pri smuku spušča po klancu navzdol, delujejo naslednje sile (slika 1): teža smučarja F_g navpično navzdol, normalna sila podlage N pravokotno na klanec, sila trenja F_{tr} in sila upora F_{upor} v nasprotni smeri gibanja. Težo smučarja $F_g = mg$, kjer je m masa sistema smučar in g gravitacijski pospešek, razstavimo na dinamično F_{din} in statično F_{stat} komponento teže. Dinamična komponenta teže $F_{din} = mg \sin \phi$ je vzporedna s klancem in povzroča pospeševanje smučarja, statična komponenta teže $F_{stat} = mg \cos \phi$ je pravokotna na klanec in smučarja pritiska k tlom. Kot ϕ je naklon strmine klanca^{1,2,4}.



Slika 1: Sile na smučarja na klancu¹

Smučarjevemu gibanju nasprotujeta sila upora F_{upor} in sila trenja F_{tr} . Sila čelnega upora F_{cu} je vzporedna s smerjo gibanja. Zaradi vrtnčenja zraka za smučarjem deluje nanj še dinamični vzgon F_{dv} , ki je pravokoten na smer gibanja. Velikosti obeh sil sta odvisni od prečnega preseka (S) smučarja v smeri gibanja, gostote zraka (ρ) in hitrosti smučarja (v):

$$F_{cu} = \frac{1}{2} c_{cu} S \rho v^2, \quad (1)$$

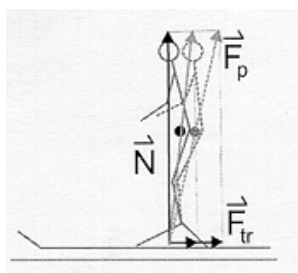
$$F_{dv} = \frac{1}{2} c_{dv} S \rho v^2, \quad (2)$$

kjer je c_{cu} srednji čelni in c_{dv} srednji dinamični koeficient zračnega upora na smučarja.

Ker smuči drsijo po snežni podlagi, deluje na smučarja še trenje F_{tr} . Trenje kaže v nasprotni smeri gibanja in je vzporedno s klancem. V linearnem približku velikost sile trenja F_{tr} izračunamo kot produkt koeficienta trenja k_{tr} in pravokotne sile podlage N :

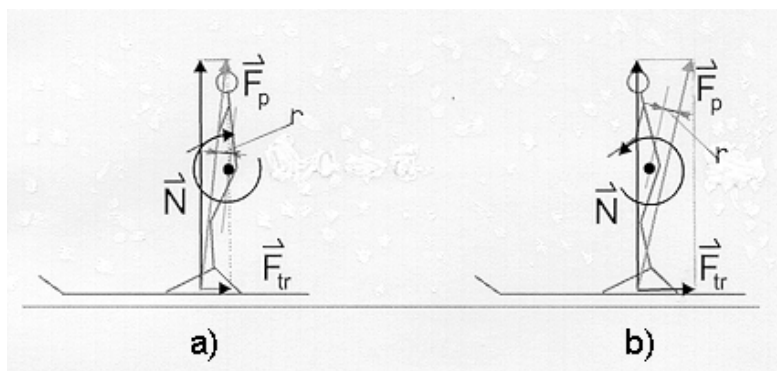
$$F_{tr} = k_{tr} \cdot N. \quad (3)$$

Ob poznavanju sil, ki delujejo na smučarja, lahko definiramo vzdolžni ravnotežni položaj. Smučar je v ravnotežju, če je sila podlage centrična na težišče. To pomeni, da mora biti sila podlage vzporedna z osjo, ki gre skozi težišče in prijemališče sile podlage (glej sliko 2). Tedaj je vsota navorov vseh sil okoli težišča enaka nič, saj sta ročici teže in sile podlage enaki nič.



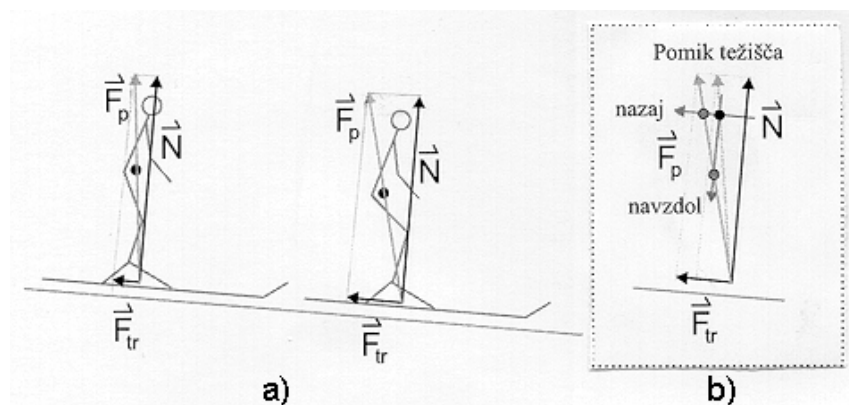
Slika 2: Smučar je v vzdolžnem ravnotežnem položaju, kadar je navor sile podlage \vec{F}_p glede na težišče smučarja enaka nič¹.

Iz slike 2 lahko razberemo, da se zaradi različnih velikosti sile trenja spremeni vzdolžni ravnotežni položaj. Ta sprememba je močno opazna, če primerjamo položaj težišča smučarja na trdi ali mehki podlagi, kjer sta velikosti trenja zelo različni. Če se sila trenja poveča, se smer sile podlage spremeni (F_p je za težiščem). Na smučarja deluje navor rF_p , kjer je r oddaljenost nosilke sile podlage F_p od težišča. Ta navor zavrti smučarja v smeri naprej (glej sliko 3b).



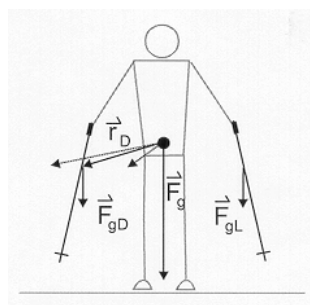
Slika 3: Ekscentrično delovanje sile podlage na težišče lahko smučarja vrti v smeri nazaj (a) ali v smeri naprej (b)¹

Strmina klanca se v splošnem spreminja. Zaradi tega se spremenita smer in velikost sile podlage na smučarja, zato se s strmino spreminja njegov vzdolžni ravnovesni položaj. Ustrezno uravnovešenje lahko smučar doseže z gibanjem naprej - nazaj ali navzdol - navzgor. Na primer: kadar se trenje na smučarja poveča, mora smučar prenesti težišče nazaj ali pa se mora postaviti v nižji položaj, da lahko ostane sila podlage centrična na težišče telesa (slika 4).



Slika 4: a) Pri povečanju sile trenja se spremeni vzdolžni ravnotežni položaj. b) Smučar z gibanjem navzdol in nazaj ohranja ustrezno uravnoteženje¹.

Za smučarja ni pomembno le vzdolžno uravnoteženje, ampak tudi uravnoteženje v prečni smeri. Slednje zagotovi s prenosom teže z noge na nogo. Tako prečno premakne težišče in zagotovi, da je vsota vseh navorov okoli težišča enaka nič. Prečni ravnotežni položaj pomagajo smučarju ohranjati tudi palice skupaj z rokami. Kljub temu, da je teža palic in rok precej manjša od teže smučarja, lahko prispevajo velik ravnotežni navor, saj se lahko velikost ročice glede na težišče bistveno spreminja (slika 5). Iz slike 5 razberemo, da se navor desne palice $r_D F_{gD}$ spreminja z velikostjo razdalje r_D od težišča smučarja do prijemališča sile teže desne palice F_{gD} .



Slika 5: Navor teže palic pomaga smučarju ohranjati prečni ravnotežni položaj¹

3. Najosnovnejša oblika zavijanja

Smučarju začetniku je osnova za spremembo smeri prenos teže z ene noge na drugo in odprt položaj smuči. Obremenjena smučka, ki je postavljena na robnikih v tem položaju, zavije sama. Sunek sile, ki deluje na smučko, povzroči spremembo gibalne količine ΔG (slika 6a). Gibalno količino razstavimo na dve komponenti: na spremembo gibalne količine ΔG_v , ki je vzporedna s smučmi, in na spremembo gibalne količine ΔG_p , ki je pravokotna na smuč. Gibalna količina ΔG_p se povečuje, gibalna količina ΔG_v pa se zmanjšuje.

Zaradi različnih navorov na zadnji in prednji del smuči, se smučar zavrti okoli težiščne osi. Vpeljemo silo podlage na dolžinsko enoto f_p (slika 6b):

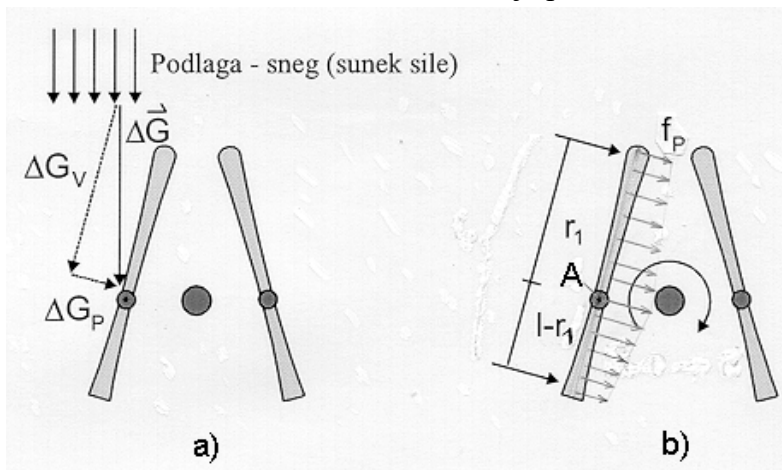
$$f_p = \frac{F_p}{l}, \quad (4)$$

kjer je l dolžina smuči in F_p sila podlage v smeri pravokotno na levo smučko. Definiramo različna navora glede na točko A (slika 6b):

$$M_1 = -\int_0^{r_1} f_p r dr = -f_p \frac{r_1^2}{2}, \quad (5)$$

$$M_2 = +f_p \frac{(l-r_1)^2}{2}, \quad (6)$$

kjer je r_1 razdalja od začetka smučke do točke, okoli katere se vrti smučka. Ker velja $M_1 > M_2$, se smučar zavrti okoli lastne osi v smeri, kot je prikazano na sliki 6b.



Slika 6: a) Zaradi sunka sile snega na smučko se spremeni gibalna količina G smučke v smeri pravokotno na smuči G_p in vzporedno na smuči G_v . b) Navor sile podlage na dolžinsko enoto v pravokotni smeri na smuči f_p povzroči navor M in vrtenje smučarja okoli lastne osi¹.

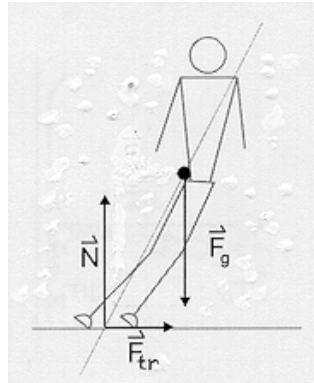
Odrprt položaj smuči in prenos teže na bodočo zunanjo nogo ter novejša geometrija smuči z bolj poudarjenim stranskim lokom pomaga smučarju pri začetku v nov zavoj oziroma pri zavijanju. Odrprt položaj smuči smučarju začetniku pomaga nadzorovati hitrost. Sila trenja je pri odrpitem položaju večja kot pri ploskem drsenju. Sunek sile snega zavira smučarja, saj so smuči v tem položaju na robnikih. Smučar ima v odrpitem položaju zaradi večje podporne ploskve stabilnejši ravnotežni položaj in s tem skupaj z rahlimi nagibi v zavoj lažje premaguje radialne sile.

4. Smučanje na vzporedno postavljenih smučeh

Ker se pri smučanju na vzporedno postavljenih smučeh močno zmanjša podporna ploskev, mora smučar že bolje obvladati prečni ravnotežni položaj. To dejstvo je še posebej pomembno pri zavijanju. Da lahko smučar zavije, mora delovati na smučarja rezultanta sil - radialna sila F_{rad} , ki kaže v smeri proti središču krožnice, po kateri se bo pri zavijanju gibal. Za enakomerno kroženje velja:

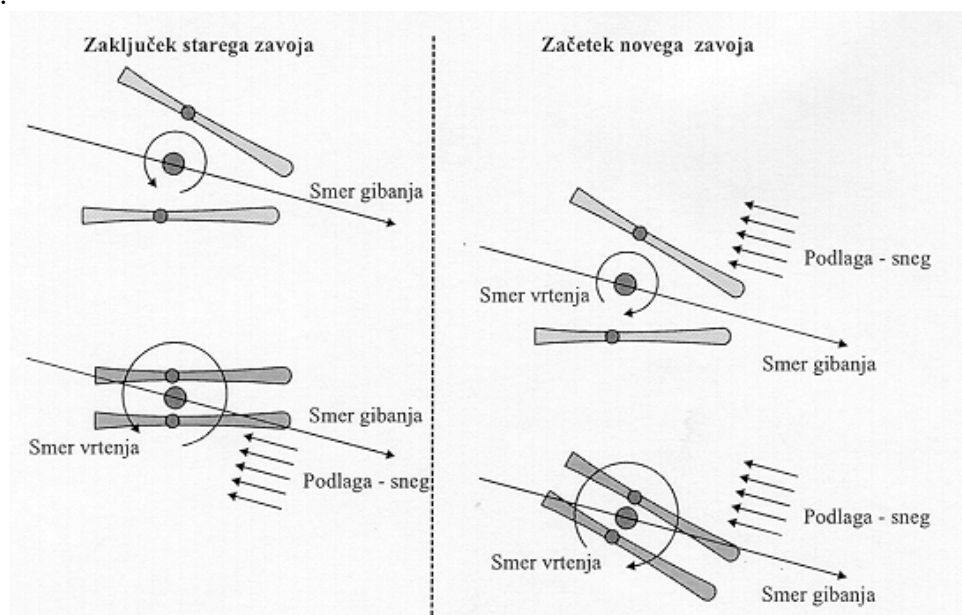
$$F_{rad} = \frac{mv^2}{r}, \quad (7)$$

kjer je r polmer krožnice, v tangentna hitrost, smer sile pa kaže proti središču kroženja. Radialno silo pri smučarju povzroči sila trenja. Radialna sila je sorazmerna s kvadratom hitrosti (glej enačbo (7)), zato se mora smučar v zavoju ustrezno nagibati, da bi obdržal prečni ravnotežni položaj. Pogoji za to je, da je vsota vseh sil in navorov okoli težišča enaka nič, kar pomeni, da je navor radialne sile enako velik in ima nasprotni predznak kot navor normalne sile podlage.



Slika 7: Prečni ravnotežni položaj smučarja v zavoju. Vsota vseh navorov glede na težišče je enaka nič¹.

Smučar vodi smuči z oddrsavanjem, pri čemer lahko z večjim ali manjšim nastavkom robnikov nadzira trenje v prečni smeri in zato radialno silo. Pri odprtem položaju smuči konča in začne smučar nov zavoj samo s prenosom teže z ene noge na drugo (slika 8, zgoraj). Pri vzporednem smučanju pa ni tako. Smuči so postavljene prečno v eno smer glede na smer gibanja ob zaključku zavoja, na začetku novega zavoja pa jih je treba postaviti v drugo smer (slika 8, spodaj), da bi smučar zavijal po enakih fizikalnih načelih, kot so opisana v 3. poglavju.



Slika 8: Zaključek starega in začetek novega zavoja pri odprtem položaju smuči (zgoraj) in na vzporedno postavljenih smučeh (spodaj)¹

Smučar obremenjenih smuči ne more enostavno zavrteti. Pomagati si mora z razbremenitvijo, ki jo doseže z vertikalnim gibanjem gor - dol. Ob koncu gibanja navzgor in ob začetku gibanja navzdol se normalna sila podlage zmanjša, kar razbremeni smuči. Ta čas smučar

izkoristi za zaključek starega in začetek novega zavoja. Smuči je potrebno zavrteti na drugo stran (slika 8, spodaj). Prvi način, ki ga smučar izkorišča za začetno vrtenje smuči, je ta, da zgornji del telesa zavrti v nasprotno smer kot smuči. S tem povzroči sunek navora $\int \vec{M} dt$ na spodnji del telesa. Ker se skupna vrtilna količina smučarja ohranja, se smuči zavrtijo v nasprotni smeri kot zgornji del telesa. Drugi način je vbod palice. Smučarja obravnavamo kot togo telo z vztrajnostnim momentom J . Ob koncu zavoja se smučar vrti z določeno kotno hitrostjo $\vec{\omega}_1$, zato ima vrtilno količino $\vec{\Gamma}_1$ okoli lastne osi:

$$\vec{\Gamma}_1 = J\vec{\omega}_1. \quad (8)$$

Da bi začel nov zavoj, mora z ustreznim sunkom navora vrtilni količini $\vec{\Gamma}_1$ spremeniti smer (slika 9). Tega dobi delno preko sunka navora zaradi sile trenja na smuči $\vec{\Gamma}_s$, delno z vbodom palice $\vec{\Gamma}_p$:

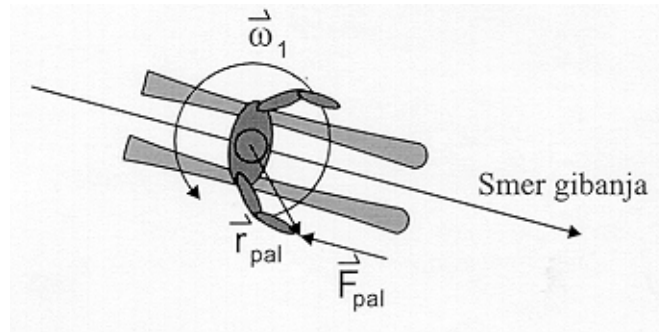
$$\vec{\Gamma}_p = \int (\vec{r}_{pal} \times \vec{F}_{pal}) dt, \quad (9)$$

kjer je \vec{F}_{pal} sila, ki deluje na palico, \vec{r}_{pal} pa vektor od osi vrtenja telesa do prijemališča palice. Da bi se smučar začel vrteti v smeri novega zavoja, mora biti vsota obeh sunkov navorov večja od začetne vrtilne količine:

$$|\vec{\Gamma}_p + \vec{\Gamma}_s| > |\vec{\Gamma}_1|. \quad (10)$$

V vhodu v novi zavoj sta vrtilna količina $\vec{\Gamma}_2$ in kotna hitrost vrtenja $\vec{\omega}_2$ enaki:

$$\vec{\Gamma}_2 = J\vec{\omega}_2 = \vec{\Gamma}_p + \vec{\Gamma}_s + \vec{\Gamma}_1. \quad (11)$$



Slika 9: Vbod palice povzroči sunek navora v nasprotni smeri kot je kotna hitrost $\vec{\omega}_1$ vrtenja ob zaključku starega zavoja¹

Pri paralelnem smučanju smučar nadzira hitrost z bočnim drsenjem, kar pomeni, da postavi smuči prečno glede na smer gibanja in s tem poveča trenje. Smučar nadzira hitrost tudi s smučanjem proti hribu, kar v resnici pomeni zmanjševanje dinamične komponente teže v smeri gibanja. Ohranjanje hitrosti zaradi zavijanja proti hribu lahko predstavimo z energijami^{1,2}. Potencialna energija W_p smučarja se pretvarja v kinetično energijo W_k , pri tem pa moramo zaradi trenja in upora upoštevati še delo A_i . Zapišemo energijsko bilanco za smučarja :

$$W_{p1} + W_{k1} + A_i = W_{p2} + W_{k2} , \quad (12)$$

kjer sta W_{p1} začetna in W_{p2} končna potencialna energija, W_{k1} začetna in W_{k2} končna kinetična energija na opazovanem odseku. Da se hitrost smučarja ohranja, mora biti delo A_i enako spremembi potencialne energije ΔW_p :

$$\Delta W_p = A_i . \quad (13)$$

Kadar je $A_i > \Delta W_p$, smučar izgublja hitrost. Kadar je $A_i < \Delta W_p$, smučar povečuje hitrost. Delo A_i lahko zapišemo kot integral po poti:

$$A_i = \int (\vec{F}_{upor} + \vec{F}_{tr}) d\vec{s} . \quad (14)$$

Iz enačbe (14) je razvidno, da daljša pot s pomeni večje delo A_i . Če smučar zavija proti hribu, dela daljše zavoje, opravi daljšo pot pri enaki višinski razliki, kar pomeni, da na strmem terenu lažje ohranja hitrost.

5. Zakaj se lahko drsamo in smučamo?

Kot smo videli v zgornjih poglavjih, ima sila trenja pomembno vlogo pri smučanju. Koeficient trenja je odvisen od vrste snovi telesa in podlage, od hrapavosti stičnih ploskev in čistoče. Koeficient trenja z naraščajočo hitrostjo telesa glede na podlago nekoliko pojema. Če pride med telo in podlago tanka plast kapljevine, se koeficient trenja močno zmanjša.

Vprašamo se lahko, kaj se dogaja s tanko plastjo snega pod smučmi pri smučanju. Ali se sneg pod smučmi stali in nastane tanka plast vode? V fizikalnih knjigah je razširjena trditev, da se lahko smučamo zato, ker se zaradi povečanega tlaka pod smučko zniža ledišče in se sneg stali v zelo tanko plast vode⁸. Če to velja pri smučanju, bi moralo to še bolj veljati pri drsanju, kjer so stične ploskve veliko manjše in posledično večji tlaki.

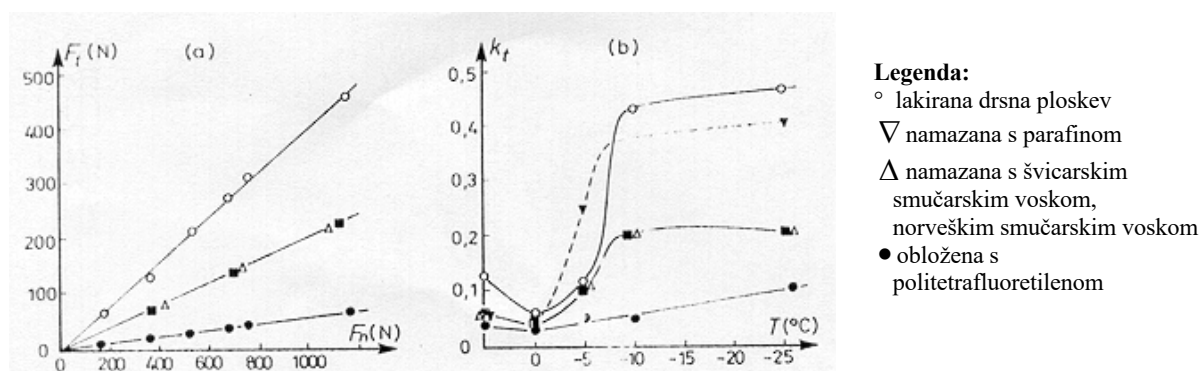
Pri snoveh, ki imajo v trdnem stanju manjšo gostoto kot v tekočem agregatnem stanju, se z naraščajočim tlakom tališče niža in obratno, pri snoveh, ki imajo kot trdnine večjo gostoto kot kapljevine, se z naraščajočim tlakom tališče zviša. Pri normalnem zračnem tlaku $p_o = 1$ bar se led tali pri temperaturi 0°C , pri tlaku 2 barov pa pri temperaturi $-0,007^\circ\text{C}$. Če bi želeli znižati tališče ledu na temperaturo -1°C , bi morali tlak povečati na 134 barov. Meritve kažejo, da ima led običajno temperaturo zraka nad njim. Pri zmernih temperaturah pod ničlo znižanje ledišča zaradi povišanega tlaka ne more imeti pomembne vloge.

O. Reynolds je leta 1901 postavil trditev, da je koeficient trenja na ledu zaradi znižanega ledišča pri povečanem tlaku manjši kot na drugih sorodnih snoveh. Leta 1939 sta raziskovalca F. P. Bowden in T. P. Hughes objavila članek o mehanizmu drsanja po ledu in snegu. S poskusi in z meritvami sta potrdila, da koeficient trenja ni odvisen od velikosti stičnih ploskev. Raziskovala sta tudi temperaturno odvisnost koeficienta trenja ledu na led. Z nižanjem temperature se je koeficient trenja povečeval. Pri zelo nizki temperaturi je bil koeficient trenja 0,11, kar je le dvakrat manj od koeficienta sorodnih snovi; na primer

koeficient trenja kalcita na kalcit je 0,2. Pri temperaturi -40°C se je koeficient trenja ledu na led spremenil za 30%, če se je temperatura spremenila za deset stopinj. Pri drugih snoveh se koeficient trenja pri tolikšni temperaturni spremembi le malo spremeni.

Merila sta koeficiente drugih snovi na ledu, ker ju je zanimal vpliv toplotne prevodnosti in učinek voska. Namazani leseni smučki se je pri temperaturi -3°C koeficient trenja zmanjšal od 0,08 na 0,03, namazani kovinski pa samo od 0,03 na 0,025.

Po drugi svetovni vojni je F. P. Bowden nadaljeval z raziskavami. Dršno ploskev smučki je prevlekel s smučarskim lakom, z norveškim voskom, s švicarskim voskom in jo obložil s plastično snovjo politetrafluoretilenom. Na sliki 10a je prikazana sila trenja v odvisnosti od obremenitve teh smučki v pravokotni smeri na podlago. Pri temperaturi -11°C je nameril za te smučki po vrsti koeficiente trenja 0,42, 0,2, 0,2 in 0,05 (slika 10b).



Slika 10: a) Sila trenja v odvisnosti od obremenitve pri konstantnem koeficientu trenja. b) Temperaturna odvisnost koeficienta trenja za smučki na snegu: meritve F. P. Bowdena (1953)⁸.

Iz slike 10b lahko razberemo, da se koeficient trenja med smučmi in snegom na intervalu od -5°C do -10°C zelo poveča. F. P. Bowden je raziskal tudi vpliv površinske napetosti in ugotovil, da so za oblogo smučki primerne snovi, ki jih voda ne omoči.

Zgoraj omenjene raziskave in meritve pričajo, da je pri temperaturah nekaj stopinj Celzija pod ničlo koeficient trenja med drsečim telesom in ledom ali snegom majhen, ker nastane med stičnima ploskvama tanka plast vode. Ta plast nastane zaradi dela sile trenja. Pri gibanju telesa po površju drugega se majhna območja stičnih ploskev segrejejo do precej visokih temperatur. Sprošča se toplota, zaradi katere se zviša temperatura do ledišča in se tanka plast ledu stali. Vodna plast je pri nizki temperaturi zelo tanka in pri nekoliko višji temperaturi debelejša.

6. Zaključek

V seminarju sem opisal osnovne fizikalne zakonitosti alpskega smučanja. Pokazal sem, da se, tako kot vsak fizikalni sistem, tudi sistem smučar - smučki ravna izključno po fizikalnih zakonih in ga je zato, četudi s poenostavitvami, možno analizirati. V seminarju nisem pisal o smučarjih, ki s pridom izkoriščajo smučki s poudarjenim stranskim lokom, ki jim omogočajo vodenje brez oddrsavanja in kontroliranje hitrosti na zahtevnejših terenih. Tovrstno smučanje je primerno za najboljše smučarje. Pri takem smučanju so hitrosti višje, radialne sile večje in posledično večji nagibi v zavoj^{1,2}.

LITERATURA

1. O. Kugovnik, M. Supej, B. Nemec, *Biomehanika alpskega smučanja*, (Fakulteta za šport, Inštitut za šport, Ljubljana, 2003).
2. D. Lind, S. P. Sanders, *The Physic of Skiing*, (Springer-Verlag, New York, 1996).
3. D. Rajtmajer, F. Gartner, *Teorija in metodika alpskega smučanja*, (Pedagoška akademija Maribor, Maribor, 1986).
4. H. Schultes, *Mehanika alpskega smučanja*, Trener - smučanje **1**, 3-15 (1979).
5. J. Strnad, *Fizika*, prvi del, (DMFA, Ljubljana, 1992).
6. J. Strnad, *Fizika na smučeh*, Presek **2**, 70-77 (1974-75).
7. J. Strnad, *Fizika na smučeh*, Presek **3**, 102-106 (1974-75).
8. J. Strnad, *Zakaj se lahko drsamo in smučamo?*, Presek **4**, 194-201 (1990-91).