

Osnovna šola Poljane Ljubljana

Vpliv globine in razpetine krila na vzgon pri talnem učinku

Raziskovalna naloga

PODROČJE: Fizika z astronomijo

Avtor: Jani Čekada

Mentor: Boštjan Regulj

Ljubljana, 2025

Kazalo

Kazalo	i
Kazalo slik	ii
Kazalo tabel	ii
Povzetek	iv
Ključne besede	iv
1 Uvod	1
2 Hipoteze	2
3 Teoretično ozadje	3
4 Eksperimentalni del	6
4.1 Izdelava vetrovnika	6
4.2 Izdelava kril	10
4.3 Izvedba poskusa	12
5 Rezultati raziskave	14
5.1 Neuspeli poskusi	14
5.2 Uporabni poskusi	14
6 Razprava	24
7 Zaključki	25
8 Viri in literatura	26

Kazalo slik

Slika 1: Ekranoplan KM.....	1
Slika 2: Domači ekranoplan preproste izdelave dolžine 42 cm.....	2
Slika 3: Vpadni kot na krilo.....	3
Slika 4: Inducirani upor pri različnih višinah.....	4
Slika 5: Kritični vpadni kot v talnem učinku in izven njega.....	5
Slika 6: Vitkost krila.....	5
Slika 7: Vetrovnik s strani in njegova dolžina.....	6
Slika 8: Vetrovnik od spredaj in njegove mere.....	6
Slika 9: Lesena deska z napravo za meritve.....	7
Slika 10: Spremenjena lesena deska, na kateri sem izvajal meritve.....	7
Slika 11: Puhalnik za listje Skil.....	8
Slika 12: Bencinski puhalnik za listje Stihl BG 86.....	8
Slika 13: Tehtnica EB-1200C.....	8
Slika 14: Podpora za meritve v programu FreeCAD.....	9
Slika 15: Celoten izris naprave za meritve v programu xTool Creative Space.....	9
Slika 16: Krilo v programu FreeCAD.....	10
Slika 17: Vseh devet kril in njihove oznake v programu FreeCAD.....	11
Slika 18: Vseh devet kril in njihove oznake.....	11
Slika 19: Naprava za meritve in sile ki delujejo nanjo.....	12
Slika 20: Postavitve, na kateri sem delal poskuse.....	13
Slika 21: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove ploščine. To je graf za prvi poskus.....	15
Slika 22: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove globine. To je graf za prvi poskus.....	16
Slika 23: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove razpetine. To je graf za prvi poskus.....	16
Slika 24: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove ploščine. To je graf za drugi poskus.....	17
Slika 25: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove globine za drugi poskus.....	18
Slika 26: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove razpetine za drugi poskus.....	18
Slika 27: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove ploščine. To je graf za tretji poskus.....	19
Slika 28: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove globine. To je graf za tretji poskus.....	20
Slika 29: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove razpetine. To je graf za tretji poskus.....	20
Slika 30: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove ploščine. To je graf za četrti poskus.....	21
Slika 31: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove globine. To je graf za četrti poskus.....	22
Slika 32: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove razpetine. To je graf za četrti poskus.....	22

Kazalo tabel

Tabela 1: Vseh devet kril in njihove mere ter vitkosti.....	10
Tabela 2: Prvi poskus z električnim puhalnikom in tunelom 16° in 3,4 cm.	14
Tabela 3: Drugi poskus z električnim puhalnikom in tunelom 16° in 6 cm.	14

Tabela 4: Prvi poskus z bencinskim puhalnikom in brez tunela	15
Tabela 5: Drugi poskus z bencinskim puhalnikom in brez tunela	17
Tabela 6: Tretji poskus z bencinskim puhalnikom in brez tunela	19
Tabela 7: četrti poskus z bencinskim puhalnikom in brez tunela	21

Povzetek

V raziskovalni nalogi nas je zanimalo, kakšne so spremembe pri vzgonu kril na letalu, ko leti zelo nizko. Raziskovali smo vzgon različnih kril pri različnih višinah in vpadnih kotih. Za pihanje smo uporabil bencinski puhalnik Stihl BG 86. Na leseno desko smo pritrčili napravo za meritve, na katero smo lahko namestili krila. Njihov vzgon meri tehtnica. Ugotovili smo, da na vzgon krila večinoma vpliva samo njegova ploščina in v talnem učinku vitkost ne vpliva, globina pa. Če izdelujemo ekranoplan, to je vrsta letala, ki leti zelo nizko, ni pomembna vitkost njegovih kril, temveč je pomembnejša njihova ploščina.

Ključne besede

Razpetina krila, globina krila, talni učinek, vzgon, ploščina krila

1 Uvod

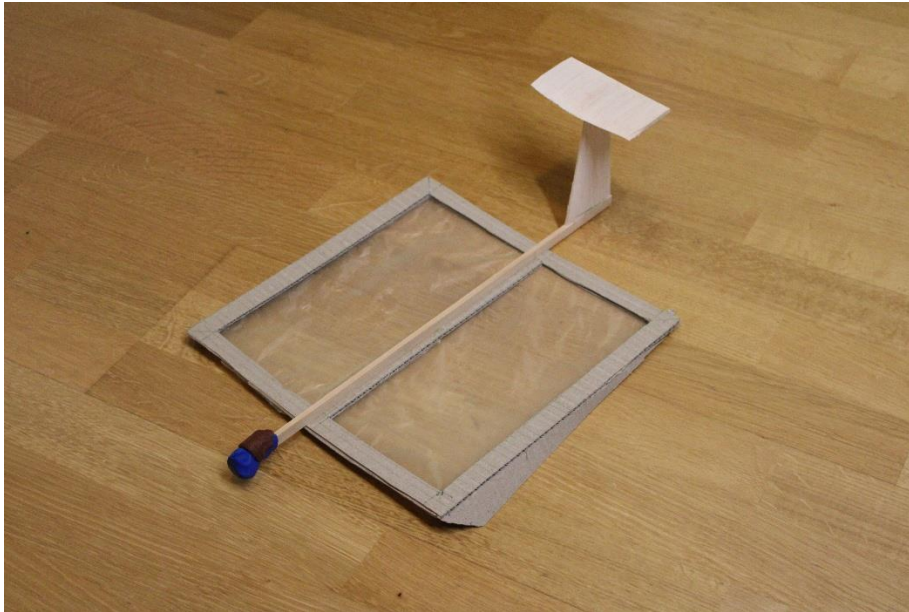
Vedno so me zanimala letala, še posebej tista, ki letijo zelo nizko. Takšna letala se imenujejo ekranoplani. Ekranoplan je vrsta letala, ki leti tik nad vodno gladino ali tik nad tlemi. Na sliki 1 je Ekranoplan Korabl Maket (KM), ki je bil izdelan v Sovjetski zvezi in je prvič letel leta 1966. Ustvarili so ga, ko so hoteli narediti hitrejše hidrogliserje (Pearce, 2019).

Ekranoplan sem želel izdelati tudi sam (slika 2) ter njegov vzgon preizkusiti v doma narejenem vetrovniku, zato je namen moje naloge naslednji:

- izdelati krila, ki ponazarjajo ekranoplan;
- izdelati domači vetrovnik;
- testirati vzgon kril pri različnih višinah in naklonih.



Slika 1: Ekranoplan KM (vir: Pearce 2019)



Slika 2: Domači ekranoplan preproste izdelave dolžine 42 cm

2 Hipoteze

Postavili smo naslednji hipotezi:

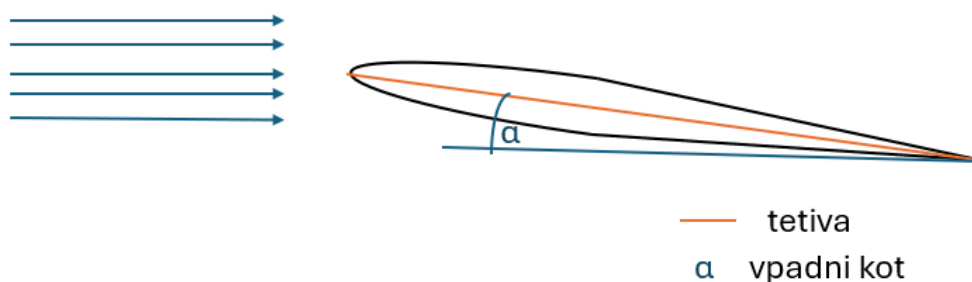
Hipoteza 1: Globina krila vpliva na vzgon v talnem učinku.

Hipoteza 2: Vitkost krila vpliva na vzgon v talnem učinku.

3 Teoretično ozadje

Krila so površine, ki ustvarjajo vzgon na letalu, da lahko leti. Vzgon ustvarijo s tem, da se premikajo skozi zrak in naredijo razliko v tlaku. Pri različnem vpadnem kotu proizvedejo različno količino vzgona. Običajno je krilo sestavljeno iz različnih delov, kot so zakrilca, krilca in zavihki krila. Ti deli sodelujejo, da lahko letalo leti (Tandem SEO Team, 2024).

Obstajajo različne vrste kril, kot so: ravna krila, eliptična krila, zamahnjena krila, delta krila, canard krila, krila s spremenljivim zamahom, tandemska krila, poševna krila in še veliko več.



Slika 3: Vpadni kot na krilo

Vetrovnik je naprava za preučevanje aerodinamike in načina, kako se zrak giblje okoli različnih predmetov. Uporabljal sem ga za meritve vzgona pri različnih krilih. Poznamo dve vrsti vetrovnikov; prvi je odprt, drugi pa zaprt. Pri odprtem vetrovniku pride zrak iz okolice in se tudi vrne nazaj ven, pri zaprtem pa zrak kroži v zaprtem sistemu (Švarc, 2016).

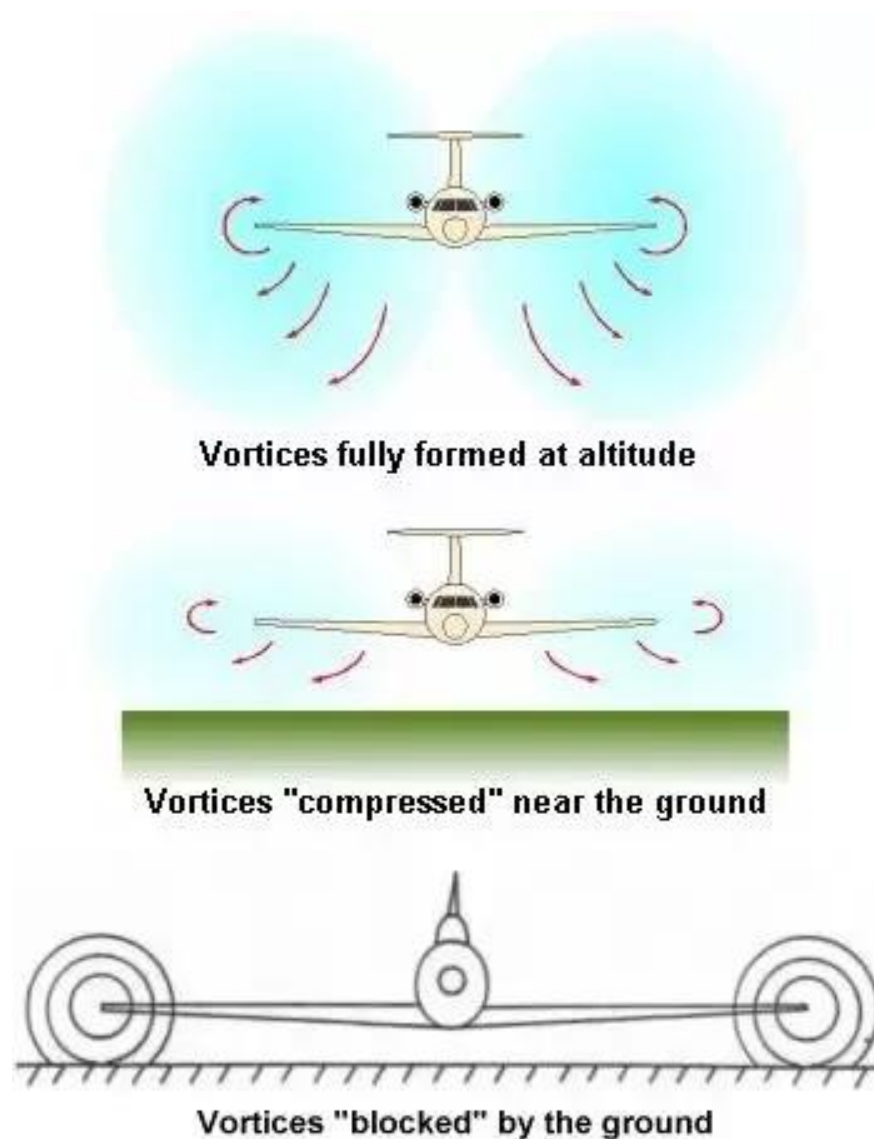
Izdelali smo vetrovnik odprtega tipa. Kasneje se je med poskusom izkazalo, da ne potrebujemo tunela, ker povzroča težave. Za pogon smo uporabili hišni puhalnik za listje.

Na letalo delujejo štiri sile: vzgon, težnost, potisk in upor. Za vzgon poskrbijo krila. Vzgon na krilu nastane, ker je oblikovano tako, da se na zgornji površini zrak hitreje premika kot na spodnji, zato nastane na zgornji površini podtlak, na spodnji pa nadtlak (Grah in drugi, 2010; Gregl, 2012, 22). Obliki krila rečemo profil. Obstajata nesimetrični ali zakrivljeni profil in simetrični profil (Gregl, 2012, 22). Uporabili smo simetrični profil.

Pri vzgonu je zelo pomemben vpadni kot krila (slika 3), saj se pri večjem vpadnem kotu ustvari večji nadtlak spodaj in podtlak zgoraj. Največji vzgon je pri kritičnem vpadnem kotu, ki je odvisen od oblike posameznega krila. Ko pa je vpadni kot večji od kritičnega vpadnega kota, se na zgornji površini krila začne trgati mejna plast zraka, zato vzgona ni več in ostane samo še upor. Pri manjšem vpadnem kotu se tudi lahko zgodi, da ni več vzgona (Gregl, 2012, 23).

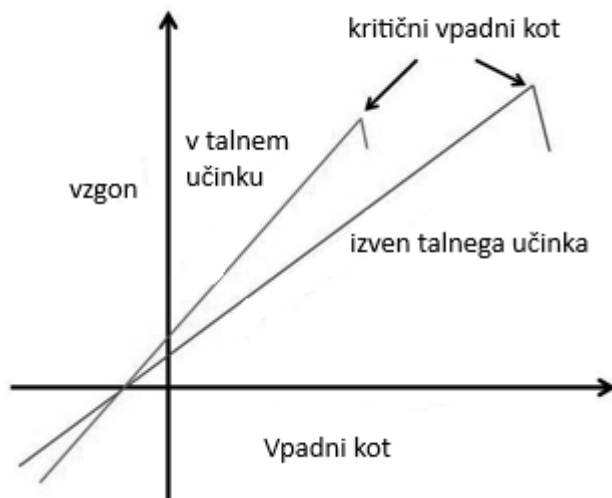
Vzgon smo merili na različnih krilih pri različnem vpadnem kotu in v talnem učinku ter pri različni višini od tal.

Talni učinek je zmanjšanje inducirane upor na krilu, ko je blizu tal. Inducirani upor se zgodi na koncih krila, ker se tam delajo vrtinci, kar upočasni letalo. Ko se inducirani upor zmanjša, se vzgon tudi poveča (Skybrary; Gregl, 2012, 79).



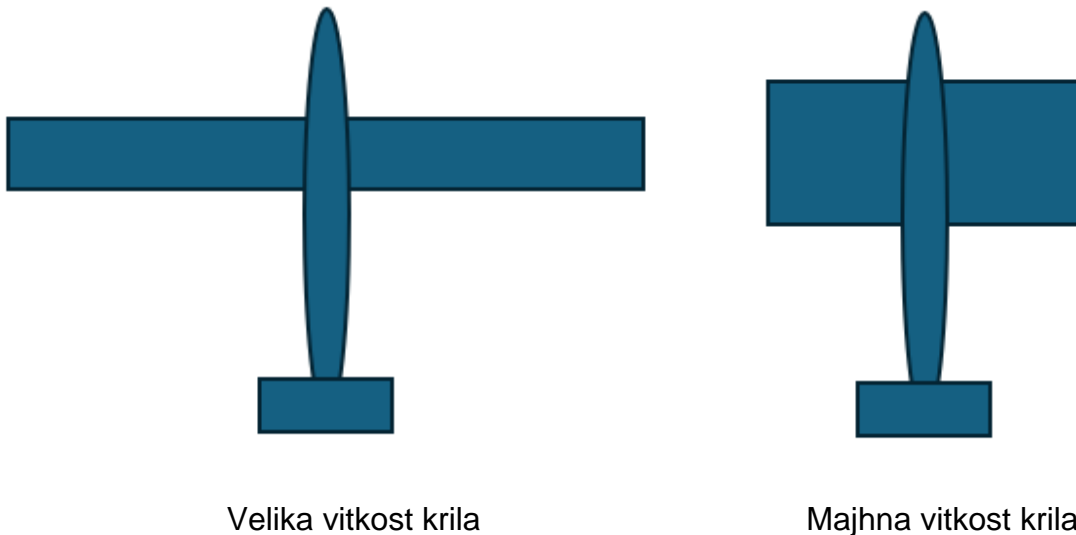
Slika 4: Inducirani upor pri različnih višinah (vir: <https://aph.cf2.quoracdn.net/main-gimg-21fbe695f401102d9bb339ce6ba9c050.webp>)

Ko letalo leti v talnem učinku, je kritični vpadni kot manjši kot izven talnega učinka (slika 5) (Skybrary).



Slika 5: Kritični vpadni kot v talnem učinku in izven njega (vir: Skybrary https://skybrary.aero/sites/default/files/Ground_effect_stall.png)

Vitkost krila je razmerje med razpetino krila in srednjo globino krila oz. razmerje med kvadratom razpetine in površine krila.



Slika 6: Vitkost krila

Letala s krili, ki imajo večjo vitkost, imajo manjši inducirani upor.

4 Eksperimentalni del

4.1 Izdelava vetrovnika

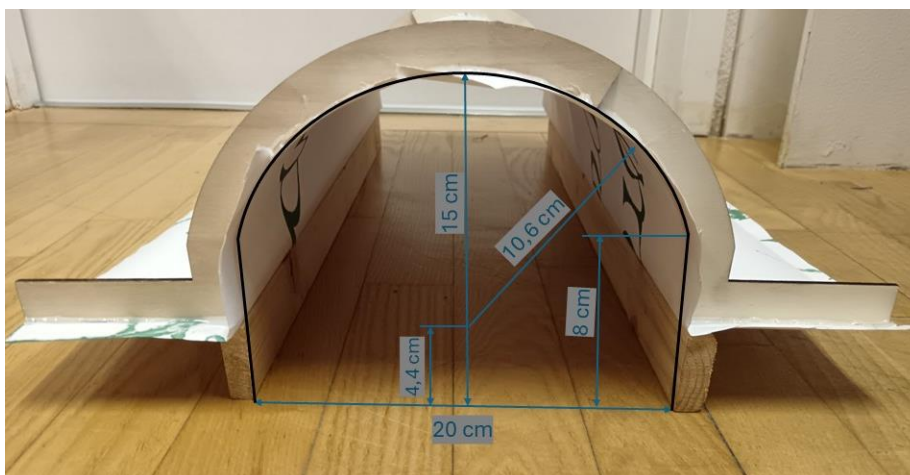
Vetrovnik smo izdelali iz trdega papirja in lesa za podporo. Vetrovnik je dolg 60 cm, visok 15 cm in širok 20 cm (sliki 7, 8).

Na dnu je lesena deska, na katero smo prilepili napravo za meritve, kamor smo dali krila in tehtnico za merjenje sile vzgona. Deska je dolga 60 cm, kakor vetrovnik. Široka mora biti vsaj 20 cm, da postavimo vetrovnik nanjo. Naprava za meritve je približno na zadnji četrtini, da lahko postavimo zadaj tehtnico. Puhalnik piha z desne na sliki 9. Tunnel in lesena deska sta ločena, da lahko zamenjamo krila.

Pri prvih poskusih smo ugotovili, da imajo krila več vzgona, ko so višje, kar ni imelo smisla, saj bi moralo biti ravno obratno. Po premisleku smo prišli do spoznanja, da imajo krila večji vzgon višje, ker je tunnel majhen in se krilom pri velikih višinah zmanjša inducirani upor zaradi sten tunela. Kasneje smo delali poskuse brez tunela.



Slika 7: Vetrovnik s strani in njegova dolžina

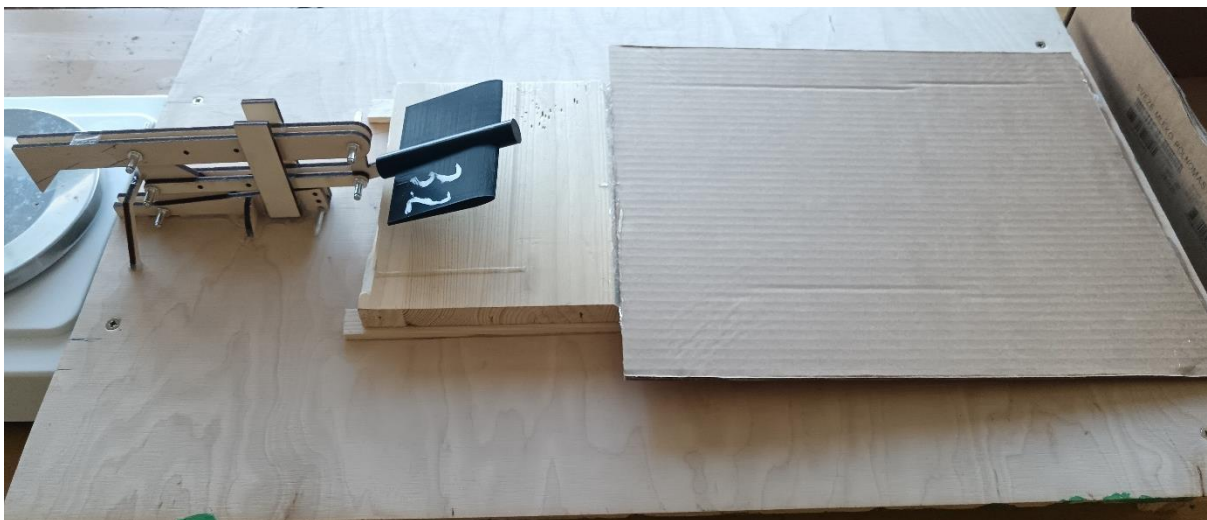


Slika 8: Vetrovnik od spredaj in njegove mere



Slika 9: Lesena deska z napravo za meritve (levo) in desko za simuliranje talnega učinka

Kasneje smo nekoliko spremenil desko, na kateri smo izvajali poskuse, tako da smo dodali karton na desni (slika 10), da je bil tok zraka bolj naravnost in da je zadel krilo.



Slika 10: Spremenjena lesena deska, na kateri sem izvajal meritve

Za pihanje smo najprej uporabili električni puhalnik Skil (slika 11), kasneje pa bencinski puhalnik Stihl BG 86 (slika 12), saj se električni prehitro izprazni in ne moremo narediti vseh poskusov z isto močjo, kar naredi podatke neuporabne.



Slika 11: Puhalnik za listje Skil



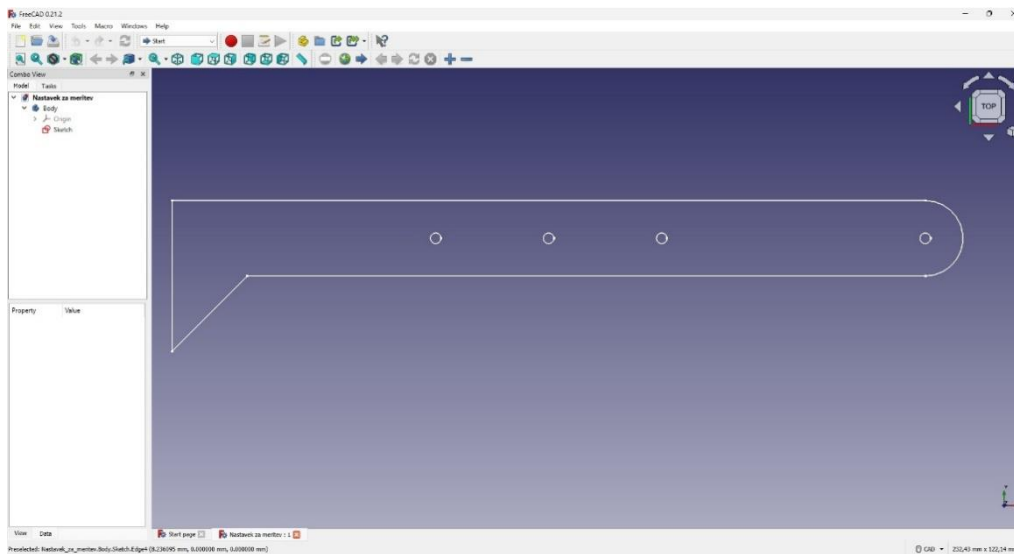
Slika 12: Bencinski puhalnik za listje Stihl BG 86.

Uporabili smo laboratorijsko tehtnico EB-1200C (slika 13).

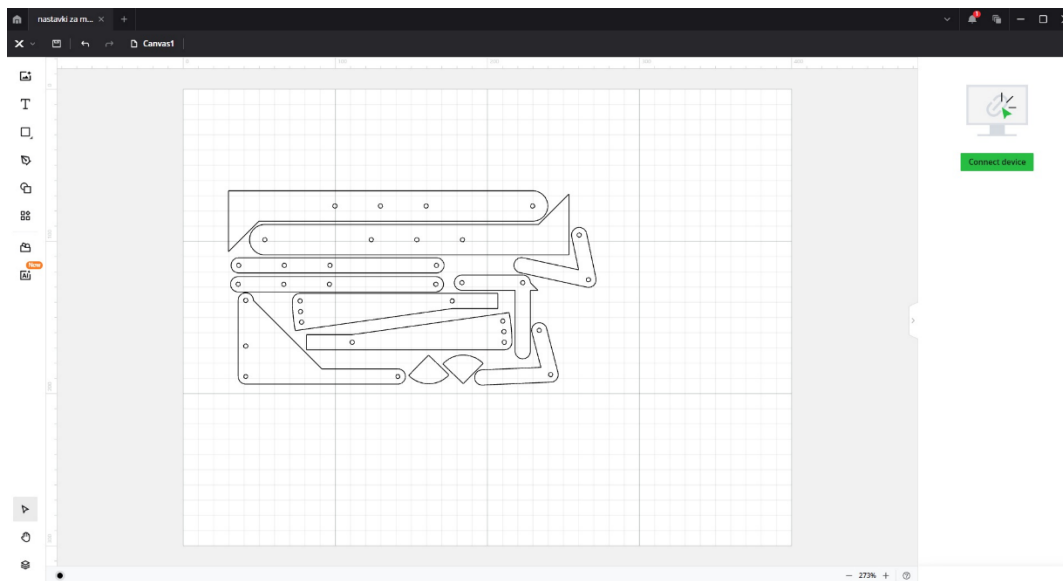


Slika 13: Tehnica EB-1200C

Za izdelavo podpor za vetrovnik in meritve smo uporabili računalniški program FreeCAD (slika 14), za prenašanje na laserski rezalnik pa program xTool Creative Space (slika 15), s pomočjo katerega smo jih izrezali.



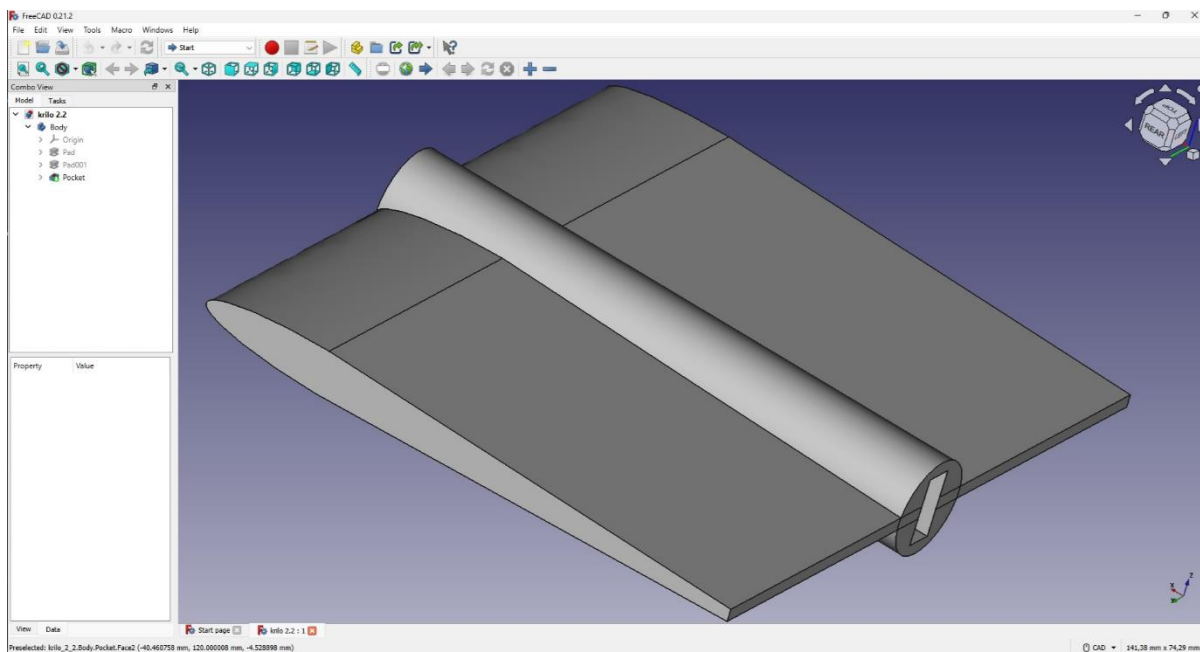
Slika 14: Podpora za meritve v programu FreeCAD



Slika 15: Celoten izris naprave za meritve v programu xTool Creative Space, pripravljeno za lasersko rezanje iz lesa

4.2 Izdelava kril

Krila smo natisnili z 3D-tiskalnikom in uporabili simetrični profil ter na sredini dodali del, s katerim se lahko natakne na napravo za merjenje. Vsa krila so pravokotne oblike. Edine razlike na krilih so njihove razpetine in njihove globine.

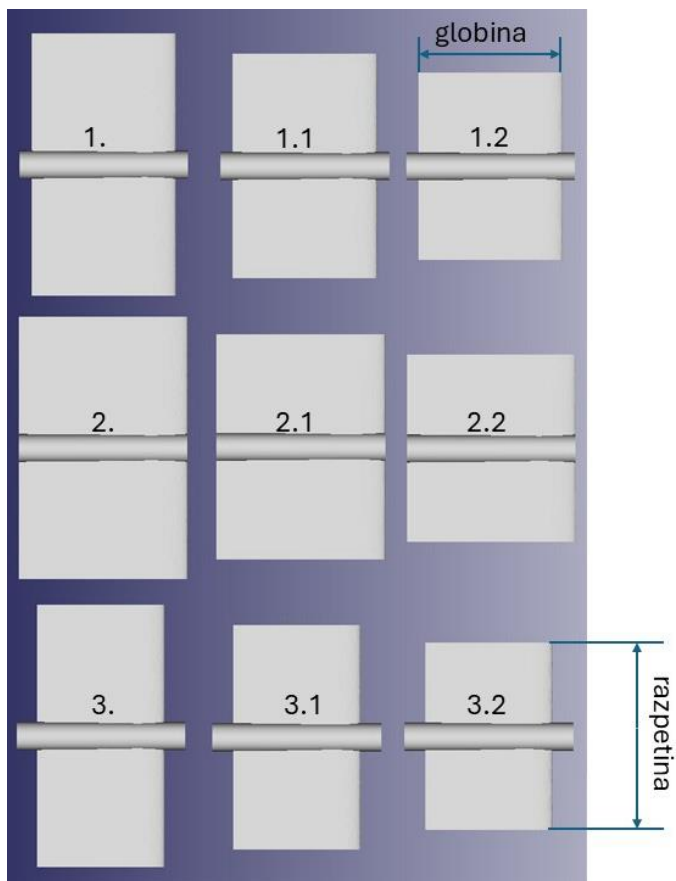


Slika 16: Krilo v programu FreeCAD

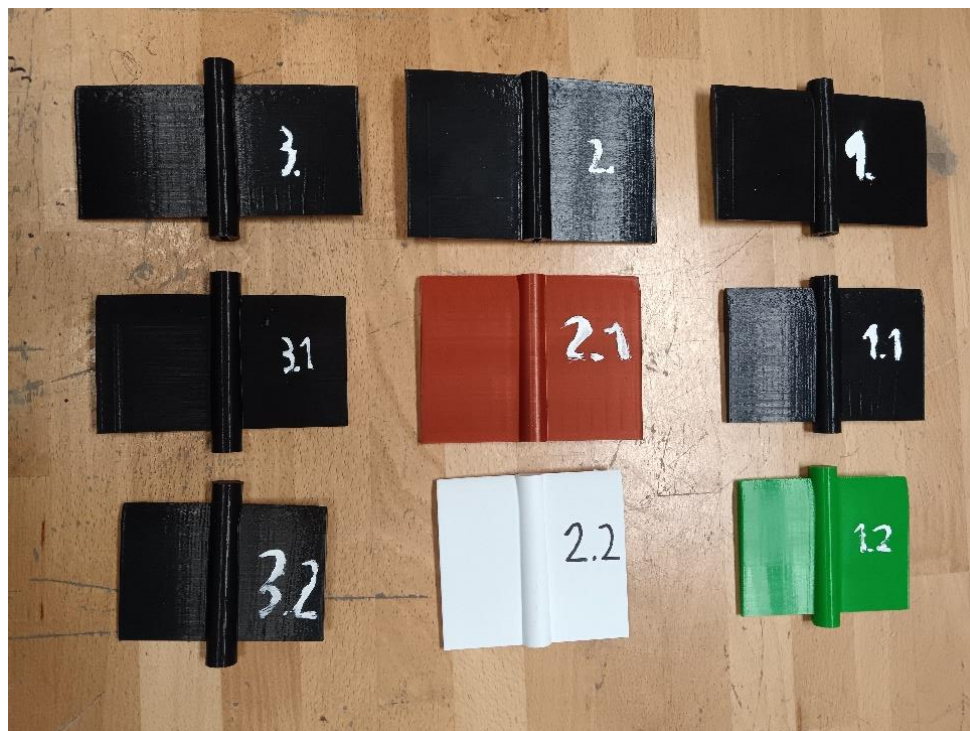
Na sliki 17 in 18 so vsa krila ena poleg druge za primerjavo in njihove mere v tabeli 1.

Tabela 1: Vseh devet kril in njihove mere ter vitkosti

	Razpetina 140 mm	Razpetina 120 mm	Razpetina 100 mm
Globina 77 mm	Krilo 1. vitkost 1,818 ploščina 10780 mm ²	Krilo 1.1 vitkost 1,558 ploščina 9240 mm ²	Krilo 1.2 vitkost 1,299 ploščina 7700 mm ²
Globina 90 mm	Krilo 2. vitkost 1,556 ploščina 12600 mm ²	Krilo 2.1 vitkost 1,333 ploščina 10800 mm ²	Krilo 2.2 vitkost 1,111 ploščina 9000 mm ²
Globina 68 mm	Krilo 3. vitkost 2,059 ploščina 9520 mm ²	Krilo 3.1 vitkost 1,765 ploščina 8160 mm ²	Krilo 3.2 vitkost 1,470 ploščina 6800 mm ²



Slika 17: Vseh devet kril in njihove oznake v programu FreeCAD



Slika 18: Vseh devet kril in njihove oznake

4.3 Izvedba poskusa

V poskusih smo primerjali različna krila pri različnih višinah od tal in pod različnim vpadnim kotom:

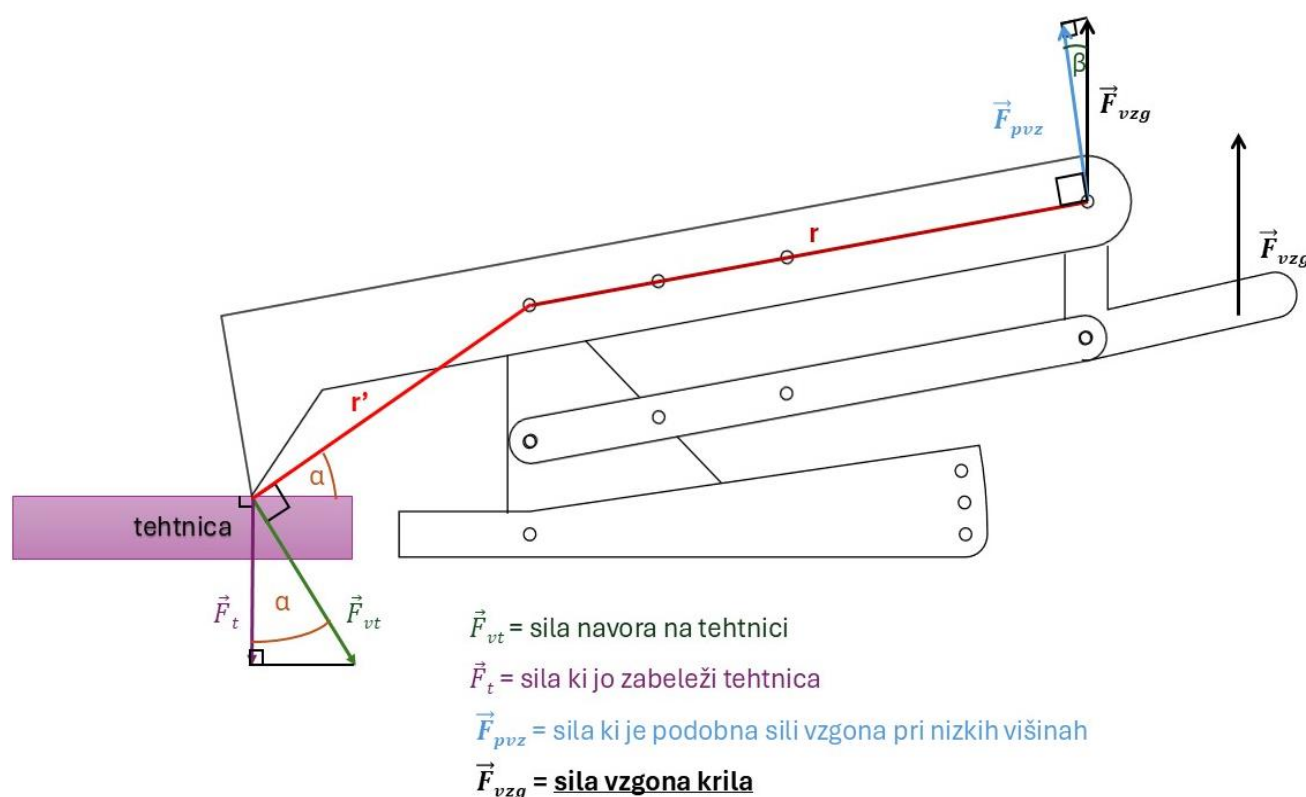
- Prvi poskus je bila sredina krila 3,4 cm od tal in pod vpadnim kotom 16°.
- Drugi poskus je bila sredina krila 6 cm od tal in pod vpadnim kotom 16°.
- Tretji poskus je bila sredina krila 3,4 cm od tal in pod vpadnim kotom 28°.
- Četrti poskus je bila sredina krila 6 cm od tal in pod vpadnim kotom 28°.

Vzgon smo izmerili z napravo za meritve. Kot kaže slika 19, sila vzgona ni enaka sili, ki jo pokaže tehtnica, zato bi lahko uporabil formulo:

$$\vec{F}_{vzg} = \frac{\vec{F}_t \cdot r'}{\cos(\alpha) \cdot r} \cdot \cos(\beta)$$

vendar sem zanemaril $\cos(\beta)$, saj je po navadi kot β zelo majhen. Namesto tega sem uporabil formulo:

$$\vec{F}_{vzg} = \frac{\vec{F}_t \cdot r'}{\cos(\alpha) \cdot r}$$



Slika 19: Naprava za meritve in sile ki delujejo nanjo

S slike 20 je razvidna postavitve tehtnice, puhalnika in deske, ki smo jih uporabili pri poskusih.



Slika 20: Postavitve, na kateri sem delal poskuse

Zaradi uporabe bencinskega puhalnika smo imeli vsa okna v učilnici na široko odprta.

5 Rezultati raziskave

5.1 Neuspeli poskusi

Rezultati prvega poskusa z električnim puhalnikom in tunelom pri vpadnem kotu 16° in 3,4 cm oddaljenosti od tal so naslednji:

Tabela 2: Prvi poskus z električnim puhalnikom in tunelom 16° in 3,4 cm.

	Sila na tehtnico v gramih	Sila na tehtnico v Newtonih	Prava vrednost v Newtonih
1.	230	2,30	1,55
1.1	185	1,85	1,25
1.2	150	1,50	1,01
2.	320	3,20	2,16
2.1	240	2,40	1,62
2.2	190	1,90	1,28
3.	195	1,95	1,32
3.1	160	1,60	1,08
3.2	130	1,30	0,88

Ko smo naredili poskus pri višini 6 cm, je bil vzgon večji, kar se ne bi smelo zgoditi, zato smo zaključili že pri prvem krilu (tabela 3).

Tabela 3: Drugi poskus z električnim puhalnikom in tunelom 16° in 6 cm.

	Sila na tehtnico v gramih	Sila na tehtnico v Newton	Prava sila vzgona v Newtonih
1.	250	2,50	1,91

Ti rezultati niso bili uporabni zaradi tunela in električnega puhalnika.

5.2 Uporabni poskusi

Te poskuse smo naredili brez tunela in z bencinskim puhalnikom.

Ko smo izvedli poskuse, je vrednost na tehtnici nihala za približno 20 gramov, zato smo se trudili, da bi vzeli povprečje tega nihanja. Pri vseh poskusih smo v tabelo dodali različne račune, da bi ugotovili, kaj se ujema. Narisali smo tudi različne grafe.

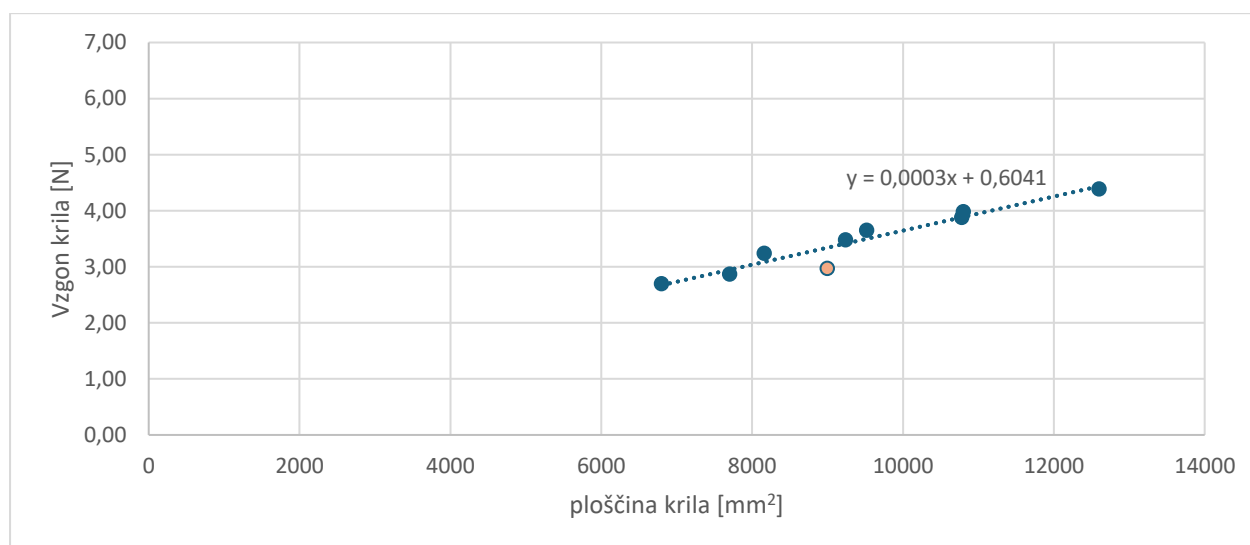
Spodaj so rezultati prvega poskusa z 16° vpadnega kota in 3,4 cm oddaljenosti od tal. Pri tem poskusu smo uporabil še verzijo vetrovnika, ki je na sliki 9. Ta verzija še ni imela kartona za bolj direkten tok zraka, kar ni tako pomembno, saj je to imelo največji vpliv pri poskusih, kjer je

bilo krilo 6 cm od tal. Pri ostalih poskusih pa smo uporabili spremenjeno verzijo vetrovnika, ki je že imela karton (slika 10).

Tabela 4: Prvi poskus z bencinskim puhalnikom in brez tunela ter s 16° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi.

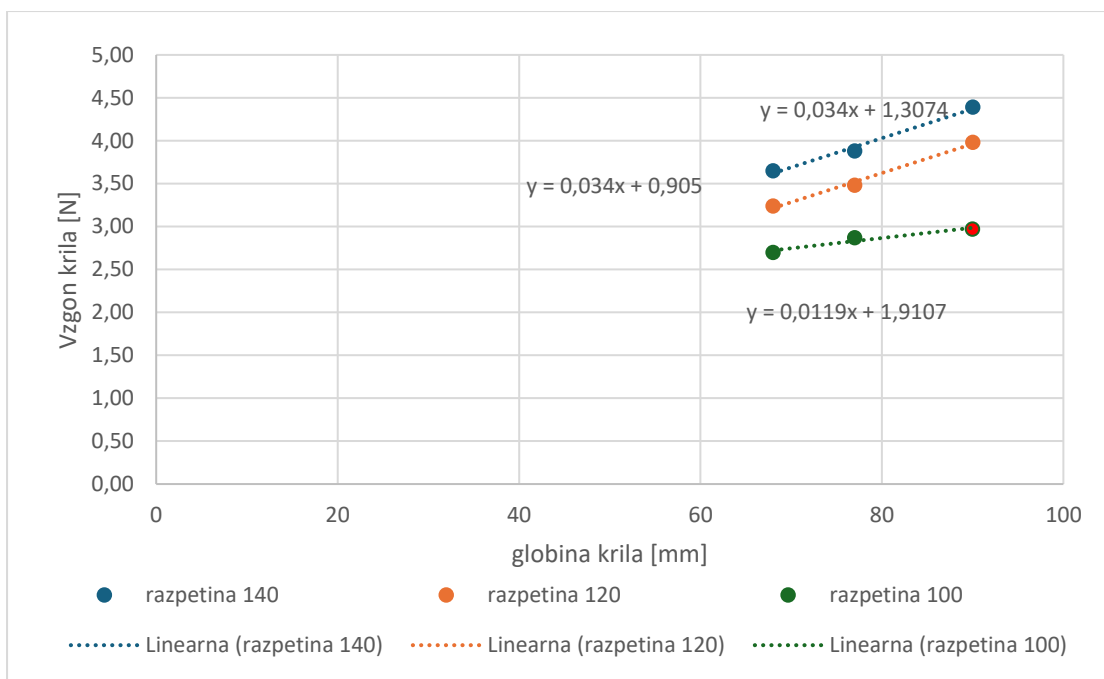
Sila vzgona [Newton]	Razmerje med površino in vzgonom	Razmerje med vrtkostjo in vzgonom	Razmerje med globino in vzgonom	Razmerje med razpetino in vzgonom	Ploščina [mm ²]	Vitkost	Globina [mm]	Razpetina [mm]
3,88	2777	0,47	19,84	36,07	10780	1,818	77	140
3,48	2658	0,45	22,15	34,52	9240	1,558	77	120
2,87	2684	0,45	26,84	34,86	7700	1,299	77	100
4,39	2872	0,35	20,51	31,91	12600	1,556	90	140
3,98	2712	0,33	22,60	30,13	10800	1,333	90	120
2,97	3030	0,37	30,30	33,67	9000	1,111	90	100
3,65	2612	0,56	18,65	38,41	9520	2,059	68	140
3,24	2518	0,54	20,99	37,03	8160	1,765	68	120
2,70	2518	0,54	25,18	37,03	6800	1,47	68	100

Krilo 2.2 smo označili posebej, saj je zelo sumljivo, ker je bilo na ostalih treh poskusih zelo podobno krilu 3. To odstopanje se vidi tudi na grafu.



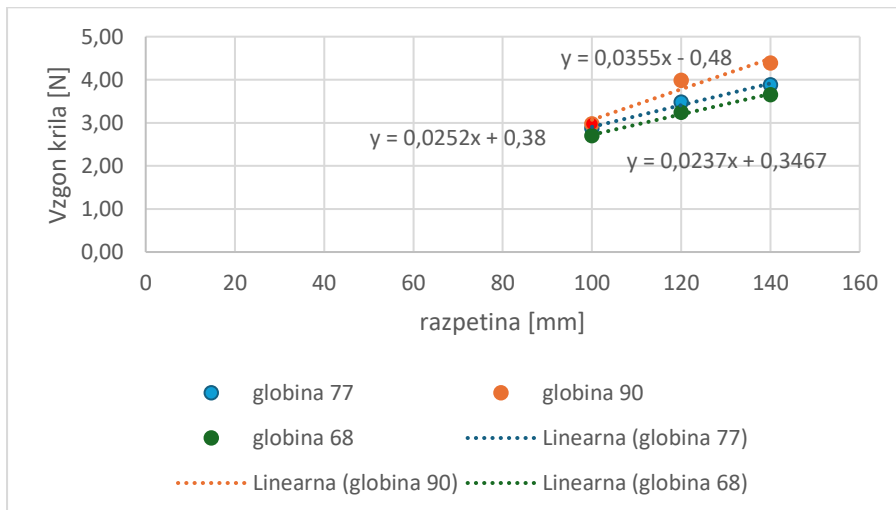
Slika 21: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove ploščine. To je graf za prvi poskus 16° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi.

Z grafa, ki je na sliki 21, je razvidno, da točke lahko prilagodimo v linearno funkcijo. Ta krila so imela tudi zelo različno vitkost. Ker to ni vplivalo na graf, lahko že tukaj ovržemo hipotezo 2, da vitkost ne vpliva na vzgon v talnem učinku. Vidi se, da se krilo 2.2, ki je označeno z oranžno, ne ujema z ostalimi.



Slika 22: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove globine. To je graf za prvi poskus 16° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi.

Na sliki 22 se vidi, če ne upoštevamo krila 2.2, da je globina krila vedno premo sorazmerna z vzgonom krila, kar potrjuje hipotezo 1, da globina vpliva na vzgon v talnem učinku.



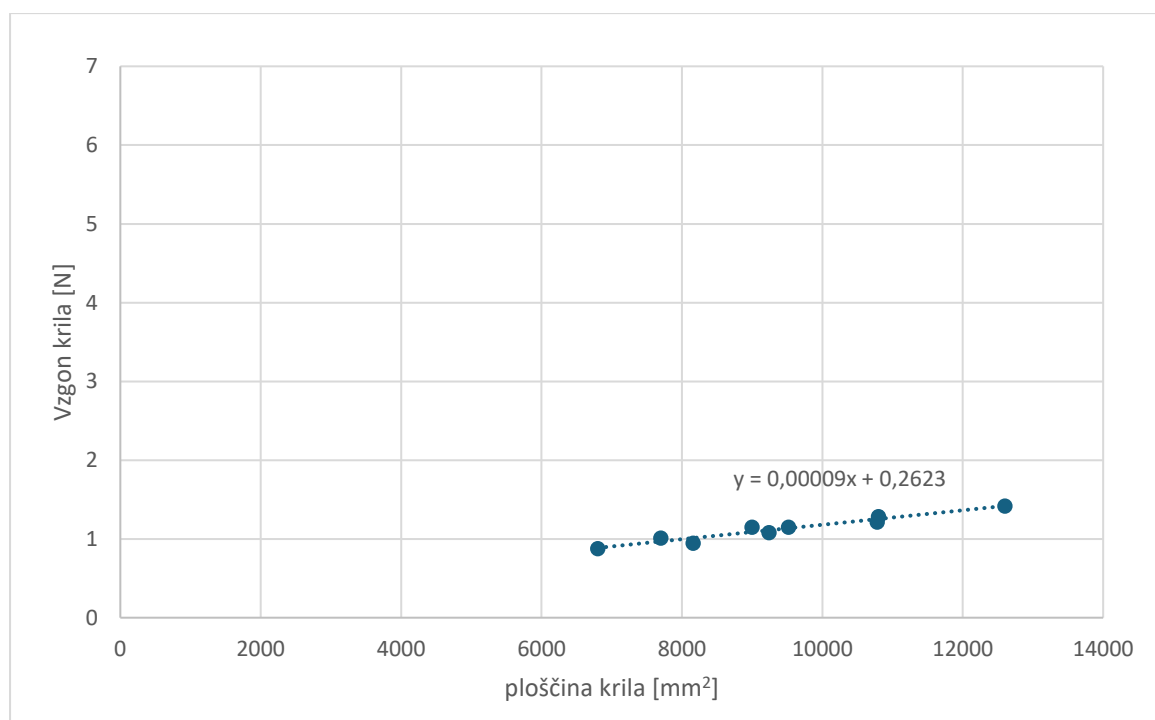
Slika 23: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove razpetine. To je graf za prvi poskus 16° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi.

Na sliki 23 se vidi, da je razpetina premo sorazmerna z vzgonom krila vsaj pri globini 77 in 68 mm. Vidi se, da se krilo 2.2, ki je prikazano z rdečo, ne ujema z ostalimi.

V tabeli 5 so rezultati drugega poskusa s krilom 6 cm nad tlemi in vpadnim kotom 16°. V tem poskusu je bil vzgon krila manjši, saj so krila višje od tal. Tukaj se vidi, da je imelo krilo 2.2 enak vzgon kot krilo 3., saj ima podobno ploščino. V prvem poskusu ni bilo tako in zato se tudi krilo 2.2 ni ujemalo z ostalimi na grafu.

Tabela 5: Drugi poskus z bencinskim puhalnikom in brez tunela s 16° vpadnega kota in 6 cm nad tlemi.

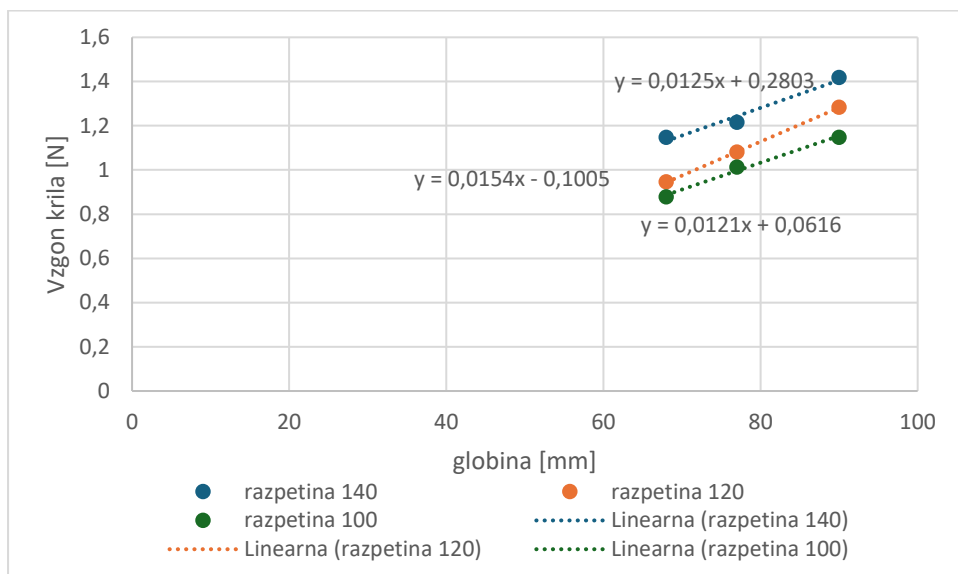
Sila vzgona [Newton]	Razmerje med površino in vzgonom	Razmerje med vitkostjo in vzgonom	Razmerje med globino in vzgonom	Razmerje med razpetino in vzgonom	Ploščina [mm ²]	Vitkost	Globina [mm]	Razpetina [mm]
1,22	8871,93	1,50	63,37	115,22	10780	1,818	77	140
1,08	8555,07	1,44	71,29	111,10	9240	1,558	77	120
1,01	7604,51	1,28	76,05	98,76	7700	1,299	77	100
1,42	8888,39	1,10	63,49	98,76	12600	1,556	90	140
1,28	8420,58	1,04	70,17	93,56	10800	1,333	90	120
1,15	7842,70	0,97	78,43	87,14	9000	1,111	90	100
1,15	8295,83	1,79	59,26	122,00	9520	2,059	68	140
0,95	8634,44	1,87	71,95	126,98	8160	1,765	68	120
0,88	7748,85	1,68	77,49	113,95	6800	1,47	68	100



Slika 24: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove ploščine. To je graf za drugi poskus 16° vpadnega kota in 6 cm nad tlemi.

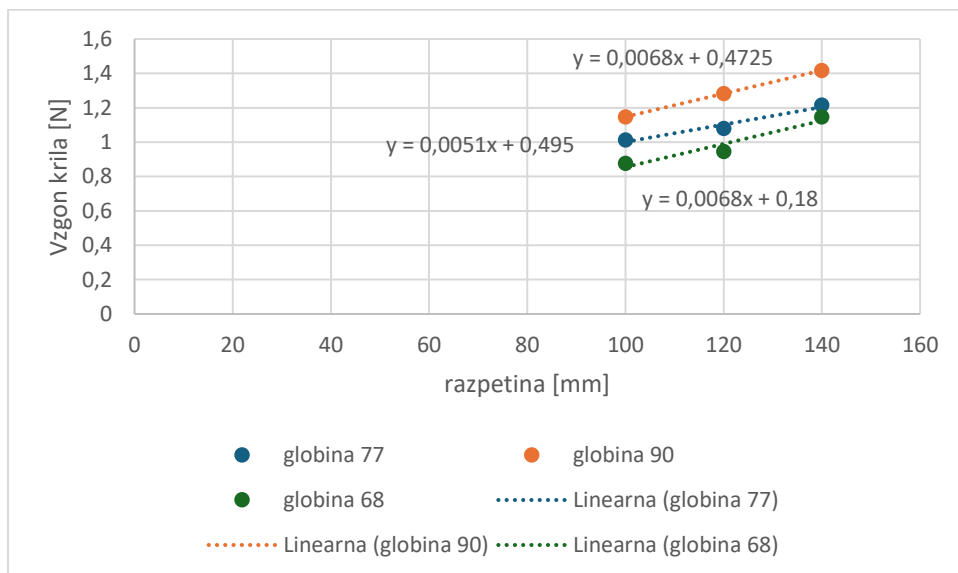
Na sliki 24 se spet vidi podobno kot pri sliki 21, da vitkost ne vpliva, saj se graf dobro ujema z linearno funkcijo. Tukaj mogoče nismo pričakovali takšnih rezultatov, saj so bila krila 6 cm nad tlemi. Vendar to še vedno lahko pomeni, da so bila v talnem učinku, ampak bi potem morala

imeti večji vzgon. Krila pa so imela manjši vzgon mogoče tudi zato, ker so bila višje in zrak ni naravnost pihal v njih. Tako je bilo tudi v četrtem poskusu.



Slika 25: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove globine za drugi poskus s 16° vpadnega kota in 6 cm nad tlemi.

Na tem grafu (slika 25) se vidi podobno kot na sliki 22. Tu je najverjetneje prišlo do nepravilnosti, saj sta pri razpetini 140 konstanti precej drugačni kot pri razpetinah 100 in 120, še posebej konstanta, ki določa strmino grafa. Manjša je kot pri razpetini 120, morala pa bi biti večja.



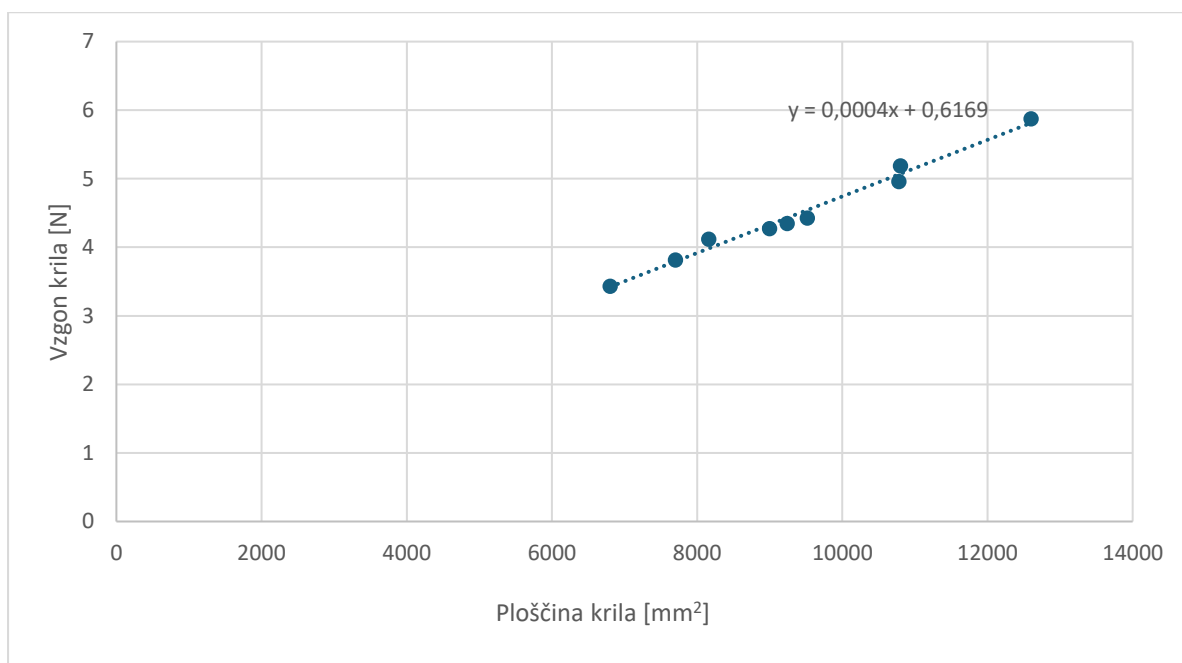
Slika 26: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove razpetine za drugi poskus s 16° vpadnega kota in 6 cm nad tlemi.

Tukaj na sliki 26 se spet vidi podobno kot na sliki 23; da je razpetina krila premo sorazmerna z vzgonom.

V tabeli 6 so navedeni rezultati tretjega poskusa z 28° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi.

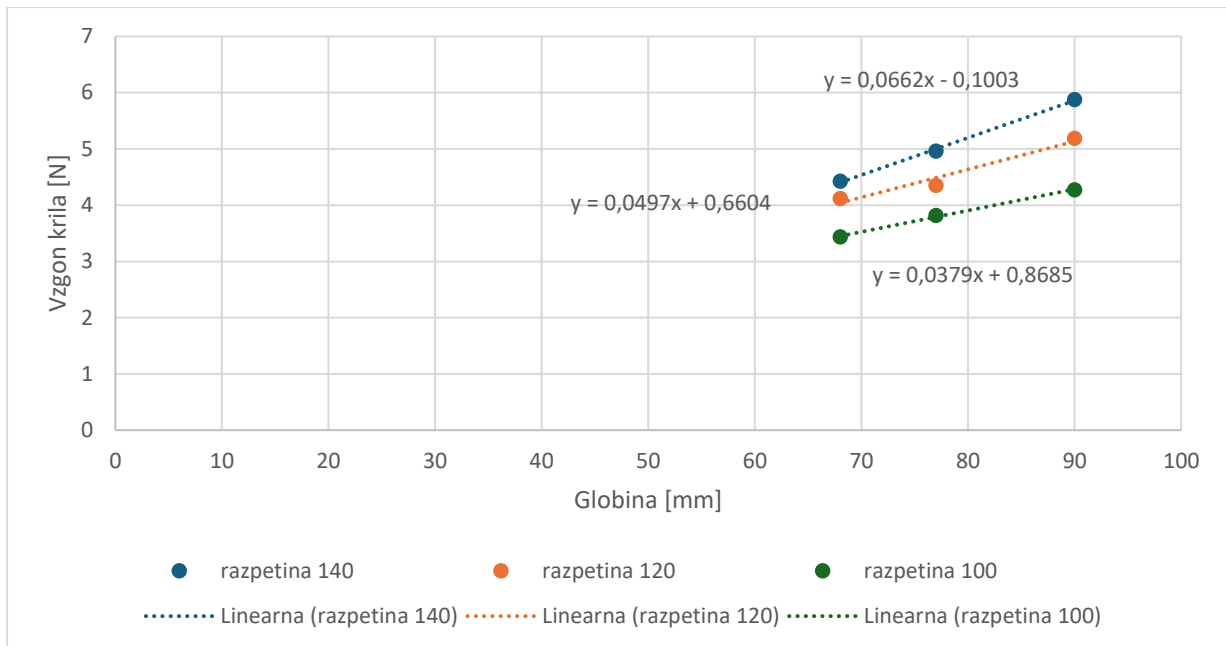
Tabela 6: Tretji poskus z bencinskim puhalnikom in brez tunela ter z 28° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi

Sila vzgona [Newton]	Razmerje med površino in vzgonom	Razmerje med vitkostjo in vzgonom	Razmerje med globino in vzgonom	Razmerje med razpetino in vzgonom	Ploščina [mm ²]	Vitkost	Globina [mm]	Razpetina [mm]
4,96	2173,20	0,37	15,52	28,22	10780	2	77	140
4,35	2124,18	0,36	17,70	27,59	9240	2	77	120
3,82	2017,98	0,34	20,18	26,21	7700	1	77	100
5,88	2144,25	0,26	15,32	23,82	12600	2	90	140
5,19	2081,18	0,26	17,34	23,12	10800	1	90	120
4,27	2105,96	0,26	21,06	23,40	9000	1	90	100
4,43	2150,82	0,47	15,36	31,63	9520	2	68	140
4,12	1980,12	0,43	16,50	29,12	8160	2	68	120
3,43	1980,12	0,43	19,80	29,12	6800	1	68	100



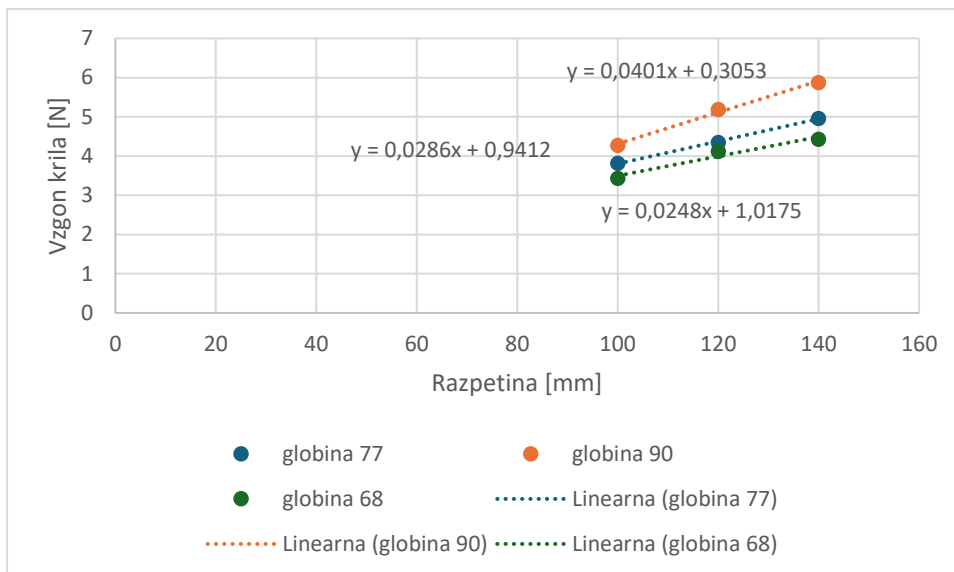
Slika 27: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove ploščine. To je graf za tretji poskus z 28° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi.

Na sliki 27 je spet podobno kot pri slikah 21 in 24, kar pomeni, da vitkost ne vpliva na vzgon pri talnem učinku.



Slika 28: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove globine. To je graf za tretji poskus z 28° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi.

Na grafu na sliki 28 so spet podobni rezultati kot na slikah 22 in 25, kar še vedno potrjuje hipotezo 1.



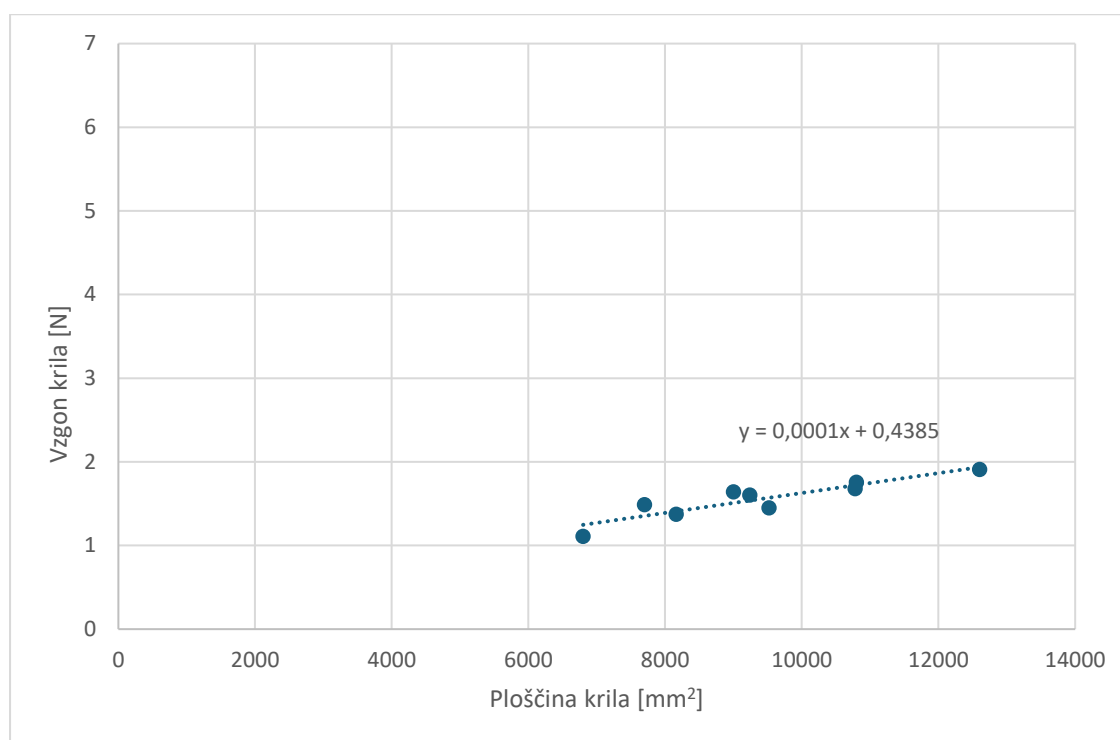
Slika 29: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove razpetine. To je graf za tretji poskus z 28° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi.

Z grafa zgoraj (slika 29) je zopet razvidno, da je razpetina krila premo sorazmerna z vzgonom, vendar se tukaj še vidi, da se pri večji razpetini vzgon bolj spremeni za določeno spremembo globine kot pri manjši razpetini.

V tabeli 7 pa so še rezultati četrtega poskusa z 28° vpadnega kota in 6 cm od tal.

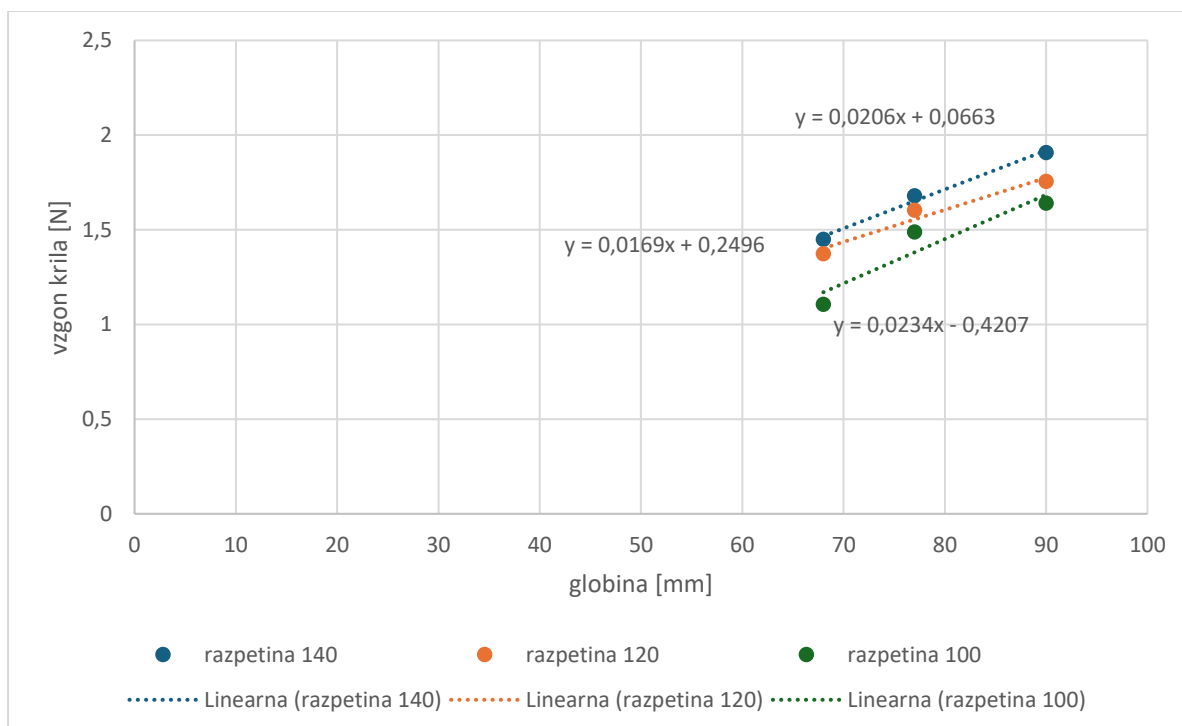
Tabela 7: četrti poskus z bencinskim puhalnikom in brez tunela ter z 28° vpadnega kota in 6 cm nad tlemi.

sila vzgona [Newton]	Razmerje med površino in vzgonom	Razmerje med vltkostjo in vzgonom	Razmerje med globino in vzgonom	Razmerje med razpetino in vzgonom	Ploščina [mm ²]	Vitkost	Globina [mm]	Razpetina [mm]
1,68	6420,83	1,08	45,86	83,39	10780	1,818	77	140
1,60	5765,64	0,97	48,05	74,88	9240	1,558	77	120
1,49	5174,30	0,87	51,74	67,20	7700	1,299	77	100
1,91	6604,28	0,82	47,17	73,38	12600	1,556	90	140
1,76	6153,06	0,76	51,28	68,37	10800	1,333	90	120
1,64	5485,29	0,68	54,85	60,95	9000	1,111	90	100
1,45	6565,66	1,42	46,90	96,55	9520	2,059	68	140
1,37	5940,36	1,28	49,50	87,36	8160	1,765	68	120
1,11	6145,20	1,33	61,45	90,37	6800	1,47	68	100



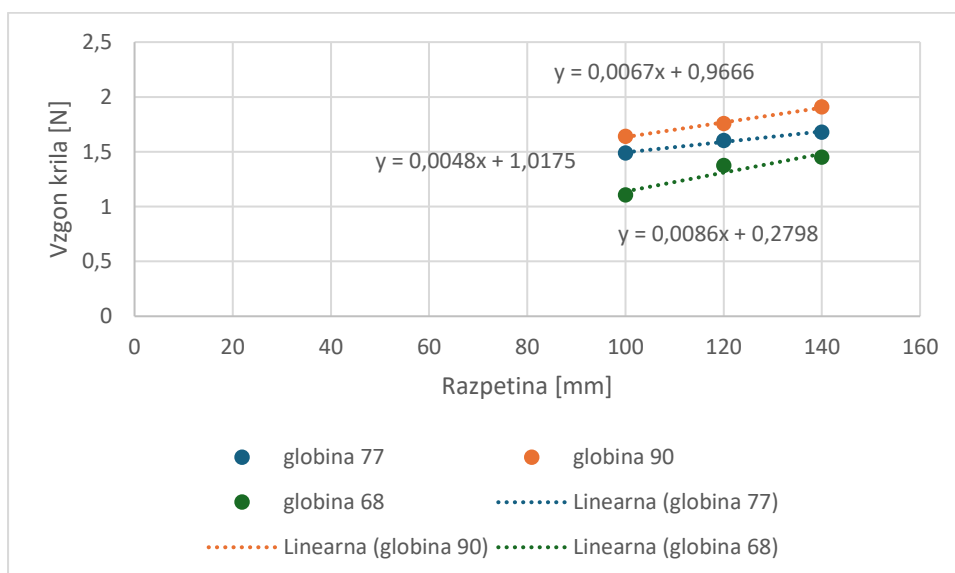
Slika 30: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove ploščine. To je graf za četrti poskus z 28° vpadnega kota in 6 cm nad tlemi.

Na sliki 30 je spet podobno kot pri slikah 21, 24 in 27, kar pomeni da vitkost ne vpliva na vzgon pri talnem učinku.



Slika 31: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove globine. To je graf za četrti poskus z 28° vpadnega kota in 6 cm nad tlemi.

Zgoraj na sliki 31 so spet podobni rezultati kot na slikah 22, 25 in 28, vendar tukaj konstante niso po vrsti, da bi bila pri razpetini 100 manjša konstanta za strmino kot pri razpetini 140, kar pomeni, da so bile tukaj manjše napake. Še vedno graf potrjuje hipotezo 1.



Slika 32: Graf vzgona krila v odvisnosti od njegove razpetine. To je graf za četrti poskus z 28° vpadnega kota in 6 cm nad tlemi.

Na sliki 32 se zopet vidi podobno kot pri slikah 23, 26 in 29, in sicer da je vzgon premo sorazmeren z razpetino. Tukaj se ne vidi tako kot pri sliki 29, da se vzgon pri večji razpetini bolj spremeni kot pri manjši razpetini, če imamo enako spremembo globine krila. To pomeni, da so bile tukaj napake.

6 Razprava

Vsi grafi vzgona krila v odvisnosti od ploščine so bili v obliki linearne funkcije. To pomeni, da vitkost ni vplivala na rezultate, ker so bila krila zelo nizko. Mogoče bi mislili, da se pri višini 6 cm od tal to ne bi zgodilo, ker mogoče krila niso več v talnem učinku, ampak so očitno bila, saj vitkost ni vplivala na njihov vzgon. Pričakovali bi, da bi bila sila vzgona pri večji vitkosti zaradi zmanjšanega induciranelega upora večja kot pri krilih z manjšo vitkostjo.

Pri rezultatih, ko so bila krila 6 cm nad tlemi, smo dosegli zelo zmanjšano silo vzgona, kar morda ni bilo najbolj pravilno, saj bi pričakovali samo malo razlike. Možnost za to je, ker smo imeli puhalnik za listje usmerjen malo navzdol in je mogoče zato, ker zrak ni pihal direktno v krilo, ko je bilo 6 cm nad tlemi, temveč je pihal direktno, ko je bilo krilo 3,4 cm nad tlemi, zato je bil takrat veliko večji vzgon.

Pri grafih vzgona krila v odvisnosti od njihove globine so bila krila z enakimi razpetinami in različnimi globinami tudi poravnana v linearno funkcijo. Zraven smo napisali tudi njihove formule. Ko sem formule primerjal eno z drugo, sem ugotovil, da so se pri najbolj uspešnem poskusu, 28° vpadnega kota in 3,4 cm nad tlemi, funkcije tako razlikovale, da se je pri večji globini vzgon spremenil bolj kot pri manjši globini, če je bila sprememba razpetine enaka. Ta ugotovitev je logična, saj se pri večji globini za isto spremembo razpetine ploščina bolj spremeni kot pri majhni globini. Enako velja tudi za enako spremembo globine, kjer se vzgon bolj spremeni na večji razpetini kot na manjši.

Sprva smo predvidevali, da se vzgon enako spremeni pri vseh razpetinah za neko spremembo globine in tudi za različne globine, kjer se vzgon enako spremeni pri enaki spremembi razpetine. Na nekaterih grafih je namreč izgledalo, kot da imajo konstanto za strmino enako. Temu seveda ni tako, saj se ploščina ne spremeni za enako vrednost, mi pa vemo, da se potem ne bi ujemali grafi vzgona v odvisnosti od ploščine.

7 Zaključki

Pri poskusih smo potrdili hipotezo 1, da globina krila vpliva na vzgon pri nizkih višinah. Ovrgli pa smo hipotezo 2, ki pravi da na vzgon pri nizkih višinah vpliva vitkost krila. Na vzgon vpliva zgolj ploščina krila.

Če bi še enkrat delali to raziskovalno nalogo, bi morali izboljšati postavitev. Morali bi narediti večji tunel in uporabiti kakšen močnejši ventilator ali puhalnik, ki bi imel stalni tok zraka in bi bil močno pritrjen na vetrovnik. Za meritve bi izdelali novo napravo, ki bi bila trdnejša. Namesto tehtnice pa bi morali uporabiti kakšen elektronski silomer, ki bi v živo meril in odčitaval podatke.

8 Viri in literatura

Pearce, W. (2019) Alexeyev KM Ekranoplan (Caspian Sea Monster). Old Machine Press.
<https://oldmachinepress.com/2019/11/05/alexeyev-km-ekranoplan-caspian-sea-monster/>
(2. 1. 2025)

Tandem SEO Team. (2024) How do Aircraft wings work? Sheffield school of aeronautics.
<https://www.sheffield.com/2024/how-do-aircraft-wings-work.html> (2. 1. 2025)

Florida Flyers Flight Academy. (2025). Airplane wings: the top 8 types and how they differ.
<https://www.flightschoolusa.com/sl/letalska-krila-zadnjih-8-vrst-in-ho/> (2. 1. 2025)

Švarc, A. (2016) Moč vetra, Avtomanija. <https://www.avtomanija.com/2016/01/80092/moc-vetra/> (3. 1. 2025)

Grah, R., Turk, N., Čegovnik, T., Intihar, G., Gabrovšek, P. (2010) Papirna aerodinamika.
https://projlab.fmf.uni-lj.si/arhiv/2010_11/naloge/izdelki/papirna_aerodinamika/teorija.html (3. 1. 2025)

Skybrary. Ground effect <https://skybrary.aero/articles/ground-effect> (4. 1. 2025)

Gregl, D. (2012) Priročnik športnega pilota. Samozaložba. Ljubljana.

Kukovec, A. (1994) Angleško-slovenski letalski slovar. Republiška uprava za zračno plovbo. Ljubljana.

FreeCAD 0.21.2 <https://www.freecad.org/downloads.php>

xTool Creative Space <https://www.xtool.com/pages/software>