



OSNOVNA ŠOLA POLHOV GRADEC

RAZISKOVALNA NALOGA

Interdisciplinarno (fizika, tehnika in zgodovina)

TRIBOK KOT ZGODOVINSKI, TEHNIŠKI IN FIZIKALNI UČNI PRIPOMOČEK

Avtorja: Sara Jankovec, Vid Matija Klančar

Mentorja: Mirjam Kogovšek, Simon Purger

Šolsko leto izdelave: 2023/2024

Vsebina

Vsebina	1
Kazalo slik	3
Kazalo tabel	4
Povzetek.....	5
Abstract.....	7
Zahvala	9
1 Uvod	11
1.1 Namen, predmet in hipoteze raziskovalne naloge.....	12
1.2 Metode dela.....	12
2 Zgodovina.....	13
2.1 Izvor, etimologija	13
2.1.1 Razvoj	13
2.1.2 Pomen	13
2.1.3 Tribok na Slovenskem	14
2.1.4 Sodobna uporaba.....	14
2.2 Obleganje gradu Stirling	14
2.2.1 Ozadje	14
2.2.2 Bitka.....	14
3 Vrste tribokov	17
3.1 Vlečni tribok.....	17
3.2 Tribok s protiutežjo	17
3.3 Hibridni tribok.....	18
4 Konstrukcija triboka	19
5 Fizikalni mehanizmi	21
5.1 Premo enakomerno gibanje.....	21
5.2 Enakomerno pospešeno gibanje.....	22
5.2.1 Enakomerno pospešeno gibanje z začetno hitrostjo nič.....	22
5.2.2 Enakomerno pospešeno gibanje z začetno hitrostjo različno od nič.....	23
5.3 Enakomerno kroženje.....	24
5.4 Delo	24
5.5 Kinetična energija	25
5.6 Potencialna energija	25
5.7 Prosti pad in navpični met.....	25

5.8	Vodoravni met	28
5.9	Poševni met	29
5.10	Navor	31
5.11	Vzvod	31
5.12	Vztrajnostni moment	32
6	Fizikalno delovanje triboka.....	33
6.1	Osnovno delovanje	33
6.2	Podrobni opis delovanja	33
7	Simulacije meta.....	35
7.1	Spreminjanje mase protiuteži	37
7.2	Spreminjanje mase izstrelka	37
7.3	Spreminjanje dolžine kratke ročice	39
7.4	Spreminjanje dolžine dolge ročice	39
7.5	Spreminjanje dolžine vrvice	40
7.6	Spreminjanje mase vzvoda	40
7.7	Spreminjanje kota izstrelitve	41
7.8	Spreminjanje hitrosti vetra.....	42
8	Izgradnja in preizkus modela triboka.....	43
9	Zaključek.....	49
	Literatura.....	51

Kazalo slik

Slika 1: Warwolf tribok	15
Slika 2: Shema vlečnega triboka.....	17
Slika 3: Shema triboka s protiutežjo	18
Slika 4: Hibridni tribok	18
Slika 5: Osnovna konstrukcija triboka s protiutežjo	19
Slika 6: Pot v odvisnosti od časa pri enakomernem premem gibanju	21
Slika 7: Hitrost v odvisnosti od časa pri enakomernem premem gibanju.....	22
Slika 8: Graf hitrosti v odvisnosti s časom pri enakomerno pospešenem gibanju z začetno hitrostjo 0.	23
Slika 9: Graf hitrosti v odvisnosti s časom pri enakomerno pospešenem gibanju z začetno hitrostjo različno od nič.	23
Slika 10: Graf končne hitrosti v odvisnosti z višino pri prostem padu.....	26
Slika 11: Graf hitrosti v odvisnosti od časa pri navpičnem metu.	27
Slika 12: Tirnica leta izstrelka pri vodoravnem metu.....	29
Slika 13: Tirnica leta izstrelka pri poševnem metu.....	29
Slika 14: Dolžina, višina in čas leta predmeta glede na začetno hitrost	30
Slika 15: Skica fizikalnega principa vzvoda.....	31
Slika 16: Slika vztrajnostnega momenta telesa s porazdeljeno maso	32
Slika 17: Skica vzvoda triboka, ki prikazuje razmerja hitrosti njegovih ključnih delov, ki odločilno prispevajo k letu izstrelka	34
Slika 18: Slika spletne strani za simulacije meta triboka.....	35
Slika 19: Razdelitev vzvoda na koške za izračun mase, vztrajnostnega momenta in točke masnega središča	35
Slika 20: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od mase protiuteži.....	37
Slika 21: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od mase izstrelka.....	37
Slika 22: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od dolžine krajše ročice vzvoda.....	39
Slika 23: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od dolžine daljše ročice vzvoda.....	39
Slika 24: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od dolžine vrvice.....	40
Slika 25: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od mase vzvoda.....	40
Slika 26: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od kota izstrelitve.....	41
Slika 27: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka pri majhnem kotu izstrelitve.....	41
Slika 28: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka pri velikem kotu izstrelitve.....	41
Slika 29: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od vetra	42
Slika 30: Skica modela triboka z osnovnimi merami	43
Slika 31: Modela triboka iz Narodnega muzeja Slovenije (levo) in knežjega dvorca v Celju (desno).	44
Slika 32: Lesen zaboj z utežjo (levo) in podnožje triboka (desno) med izdelavo.	44
Slika 33: Lesni spoj z zamaskiranimi vijaki (levo) in kanal za namestitev izstrelka (desno)....	45
Slika 34: Mošnja z vstavljenim izstrelkom (levo) in vpetje mošnje z dvema vrvicama na koncu roke (desno)	45
Slika 35: Model triboka med testiranjem.....	45

Slika 36: Mošnja s pripeto vrvico, ki zaustavi mošnjo v želenem kotu izmeta (levo) in vpetje mošnje, ki pod določenim kotom samodejno sprosti eno vrvico, s katero je vpeta mošnja (desno).	46
Slika 37: Izvajanje poskusov metov žogice za golf	47
Slika 38: Ponovljena simulacija leta s prilagojenimi parametri glede na izdelan model triboka	47
Slika 39: Simulacija leta z zoženo roko	48
Slika 40: Simulacija leta z ožjo roko, ss upoštevanjem mase kovinskega oklopa na koncu roke	48

Kazalo tabel

Tabela 1: Parametri tirnice leta glede na začetno hitrost	30
Tabela 2: Izhodiščni vhodni parametri simulatorja delovanja triboka.....	36

Povzetek

V okolici naše šole v Polhovem Gradcu nastaja učilnica na prostem, v sklopu katere sva si s podporo mentorjev zamislila postavitev srednjeveškega orožja tribok, ki se v virih pojavlja kot trebuchet. Tribok združuje področja zgodovine, tehnike in fizike, zato se nama je zdel odlično izhodišče za raziskovanje. Skušala sva ugotoviti, kdaj in kje so v preteklosti uporabljali to napredno orožje ter kako tribok sploh deluje. Presenetilo naju je, da delovanje triboka lahko razložimo s tem, kar smo se naučili pri fiziki o Newtonovi mehaniki. Najprej sva analizirala delovanje triboka in ga opisala z osnovnimi fizikalnimi enačbami. Realnejše delovanje in načrtovalske parametre pa sva pridobila s pomočjo spletnega simulatorja. Na podlagi začetnih zahtev in simulacij sva načrtala dimenzije in mizarju dala izdelati leseni tribok, ki bo služil kot učni pripomoček za popestritev učnih ur fizike, tehnike in zgodovine.

Abstract

Near our school in Polhov Gradec, an outdoor classroom is under construction, within which we, along with our mentors, envisioned the installation of medieval weaponry – a trebuchet. The trebuchet combines the fields of history, technology, and physics, making it an excellent starting point for exploration. We endeavoured to determine when and where this advanced weapon was historically used and how the trebuchet operates. We were surprised to find that the operation of the trebuchet encompasses a significant portion of elementary school physics, particularly in the field of Newtonian mechanics. Initially, we analysed the functioning of the trebuchet and described it using basic physics equations. More realistic operation and design parameters were obtained through an online simulator. Based on initial requirements and simulations, we planned the dimensions and had a carpenter craft a wooden trebuchet, which will serve as an educational tool to enhance physics, technology, and history lessons.

Zahvala

Najlepša hvala mentorjema Mirjam Kogovšek in Simonu Purgerju, ki sta naju vodila skozi projektno nalogo, pomagala iskati vire, dajala nove ideje, opozarjala na napake in naju vzpodbujala tekom najinega raziskovanja.

Hvala tudi Romanu Vučajniku za pomoč pri iskanju zgodovinskih virov o triboku in povezav s kolegi muzealci. Hvala dr. Tomažu Lazarju, kustosu v Narodnem muzeju Slovenije in Damjanu Jesenovcu, restavradorju za les iz Narodnega muzeja Slovenije za fotografije in načrte njihovega modela triboka.

Globoko se zahvaljujema mojstru za les in kovino ter navdušencu nad tehniko Janezu Jankovcu za pomoč pri načrtovanju in celotno izdelavo konstrukcije triboka. Hvala tudi Janezu Buhu za načrt in podjetju Brinox d.o.o. iz Sore pri Medvodah za pripravljenost za izdelavo varnostnega mehanizma.

Zahvala gre tudi občini Dobrova-Polhov Gradec, še posebej županu Juretu Dolinarju in podžupanjama izr. prof. dr. Ireni Bačlija Brajnik in Ani Oblak, ki so preko participativnega proračuna financirali izdelavo triboka.

Na koncu izražava tudi hvaležnost staršem za vso podporo pri nastajanju te raziskovalne naloge.

1 Uvod

Pri spoznavanju novih učnih vsebin je za učence pomembno preizkusiti te vsebine tudi v praksi. George Brown je napisal: »Kitajska je bila očitno prva civilizacija, ki je razvila izpitni sistem. Pred približno 1500 leti so bili izpiti največkrat praktični. Moral si jahati, zapeti pesem, se boriti ipd. Postopno, ko se je razvila birokratska struktura, so se izpiti spremenili: iz jahanja, petja pesmi in bojevanja v pisanje o jahanju, petju in bojevanju in končno v pisanje o tem, kaj so drugi napisali o jahanju, petju in bojevanju.«¹

Ljudje so se torej skozi zgodovino zavedali, kako pomembna je osebna izkušnja pri spoznavanju novih stvari na vseh področjih. Eno takih področji je zagotovo fizika, kjer so velikokrat osebne izkušnje na podlagi poskusov ključne za razumevanje zahtevnih in abstraktnih fizikalnih pojmov. Za izvajanje fizikalnih poskusov je velikokrat treba izdelati fizikalne pripomočke, ki morajo biti zanimivi in privlačni za otroke z različnimi zanimanji, tako iz naravoslovnega, kot tudi družboslovnega področja.

Na Osnovni šoli Polhov Gradec so se učitelji lansko leto, glede na izkušnje poučevanja v koronskem času, odločili, da bodo zgradili učilnico na prostem, ki omogoča otrokom zabavne in poučne ure tudi zunaj šolskih prostorov. Učilnico sestavljajo različne mize in stoli, ki so postavljeni na travniku ob šoli.

Z izgradnjo učilnice na prostem se je pojavilo veliko dodatnega prostora, ki bi ga lahko uporabili za zanimive eksperimente, ki v notranjih prostorih ne bi bili mogoči. Tako je Marko Jankovec dal pobudo za nadgradnjo učilnice na prostem v obliki Blagajeve učne poti v Polhovem Gradcu, ki jo bodo sestavljali razni fizikalni in tehnični eksperimenti. Za izdelavo in postavitev eksperimentov so bila pridobljena občinska sredstva iz mehanizma participativnega proračuna. Ker je Polhov Gradec tudi zgodovinsko izredno bogat kraj, smo za enega ključnih eksperimentov, ki je zanimiv za učence in tudi obiskovalce, izbrali tribok.²

Tribok je srednjeveško oblegovalno orožje, ki so ga takratni mojstri, predvsem na podlagi dolgoletnih izkušenj, izpopolnili, kljub temu, da takratno teoretično znanje fizike ni bilo še splošno razširjeno. V triboku se namreč zagotovo skriva široka paleta fizikalnih mehanizmov, ki ob pravilni konstrukciji omogočajo zelo učinkovito delovanje. Poleg tega je izdelava naprave zahtevna, saj je bil v času njegove razširjene uporabe glavni gradbeni material les, kar danes v osnovnošolskem programu pokriva predmet tehnika. Nenazadnje pa je tribok izrednega pomena tudi iz zgodovinskega stališča, saj so se tudi z njegovo pomočjo izbojevale pomembne bitke v prid tehnološko boljše opremljeni strani.

¹ George Brown, kanadski politik, (1818-1880), povzeto po: B. M. Požarnik, M. Šarić, B. Šteh, Izkuštevno učenje, Znanstvena založba Filozofske fakultete, 2021.

² Participativni proračun v letu 2023 omogočil tri pomembne projekte, <https://dobrova-polhovgradec.si/objava/884511>, dostopano 15.3.2024

1.1 Namen, predmet in hipoteze raziskovalne naloge

Namen raziskovalne naloge je:

- raziskati srednjeveško oblegovalno orožje tribok s stališča njegovega fizikalnega delovanja in ga umestiti v program osnovnošolske fizike,
- raziskati njegovo konstrukcijo, ga načrtati in izdelati v primernem merilu, ki bo omogočalo njegovo varno uporabo za demonstracijske namene,
- raziskati njegovo zgodovinsko vrednost, uporabo v pomembnih bitkah in njegovo prisotnost na Slovenskem.

Predmet proučevanja raziskovalne naloge je tribok s fizikalnega, tehniškega in zgodovinskega vidika ter njegovo umestitev v osnovnošolski učni program pri predmetih, ki pokrivajo omenjena področja. Pri tem sva si zadala naslednja raziskovalna vprašanja ali hipoteze:

- a) Delovanje triboka je možno opisati na podlagi znanja osnovnošolske fizike in zato lahko tribok služi kot nazoren prikaz obravnavanih fizikalnih mehanizmov.
- b) Z uporabo osnovnih fizikalnih enačb s področij osnovnošolske fizike je mogoče natančno izračunati dolžino, višino in čas leta izstrelka.
- c) Tribok je bilo pomembno strateško orožje v srednjem veku, ki se ga je uporabljalo tudi na Slovenskem.
- d) Na podlagi skic in zgodovinskih gradiv je danes mogoče načrtati in izdelati lesen, delujoči tribok za namen varne demonstracije njegovega delovanja.

1.2 Metode dela

Pravilnost zgoraj postavljenih hipotez sva poskušala dokazati z naslednjimi metodami dela:

- zbiranje, študija in obdelava literature in spletnih virov;
- računanje in risanje grafov v orodju Microsoft Excel;
- uporaba spletnih simulatorjev za natančne fizikalne izračune in simulacije;
- risanje načrtov v okoljih Corel Draw in Microsoft Powerpoint;
- sestankovanje in pogovori s strokovnjaki in obrtniki glede tehniških podrobnosti izdelave naprave

2 Zgodovina

2.1 Izvor, etimologija

Tribok izvira iz Kitajske, kjer so ga prvič uporabili v 4. stoletju pred našim štetjem. Prvi so ga uporabljali mohisti³, ki so uporabljali triboke na človeški pogon (vlečni tribok). Uporabljali so jih za obleganje in tudi kot obrambno orožje, nameščeno na zidovih, da bi z izstrelki uničili sovražnikove oblegovalne naprave.

Sama beseda tribok (angleško "trebuchet") izvira iz stare Francoske besede "trebucher", ki pomeni nagniti, prevrniti in je zloženka iz besede "tre", ki pomeni premik in besede "buc", ki pomeni deblo telesa. Izraz "trebuchet" se je prvič pojavil konec 12. st. s številnimi kasnejšimi različicami kot so "trabocco", "tribok", "tribucietta", ... V arabščini se je tribok imenoval "manjanīq maghribī", v kitajščini "huihui pao", v nemščini pa "Die Blide".⁴

2.1.1 Razvoj

Vlečni tribok so v 6. in 7. st. od Kitajcev prevzela ljudstva zahodno od njih, kot so Bizantinci, Perzijci in Avari. Ta ljudstva pa so tribok prenesla v Evropo, kjer je začel izpodrivati druga orožja, kot npr. katapult in balisto⁵. Ta orožja so se hitro umikala, saj je vlečni tribok imel enostavnejšo konstrukcijo, večjo hitrost streljanja, bil je natančen in verjetno tudi varnejši kot ostala torzijska orožja. Z vse večjo uporabo po svetu so vlečni triboki postajali tudi večji in zmogljivejši. V 11. st. je bil opisan vlečni tribok, ki je zahteval kar 400 mož, ki so vlekli za vrvi in metali težko kamenje. Ta stroj naj bi tehtal 3400 kg in je usmrtil številne sovražnike. Vlečni tribok je v 12. st. zamenjal tribok s protiutežjo, ki je za pogon uporabljal silo teže protiuteži. Ni točno znano, kje so ga razvili, a ga je prvi opisal in ilustriral "Mardi ibn Ali al-Tarsusi" pri opisovanju osvajanja Saladina leta 1187. Najprej so uporabljali triboke s fiksno protiutežjo, kasneje pa z gibljivo, ki je še povečala domet izstrelka. Zadnjič je bil za vojaške namene tribok uporabljen leta 1521, ko je španski osvajalec Hernan Cortes napadel azteško prestolnico Tenochtitlan. Kasneje pa je zaradi pojava smodnika in topništva tribok začel izgubljati pomen.⁶

2.1.2 Pomen

Tribok je večkrat opisan kot najmočnejše orožje srednjega veka. Niso ga uporabljali kot protipehotno orožje, temveč predvsem za bombardiranje in slabljenje napadenega obzidja, gradu. V tem primeru so bili izstrelki veliki kamni, lahko pa so bila tudi trupla konjev ali celo glave mrtvih sovražnikov, da so z njim strašili nasprotnike in med njih zasejali nemir. Prav tako so izstreljevali goreče izstrelke in trupla okuženih živali, da bi oblegani prebivalci zboleli in pomrli. Po drugi strani pa so triboke lahko uporabljali tudi trdnjave za obrambo pred napadalci. Kljub temu, da je tribok slovel kot zelo močno orožje, pravzaprav ni veliko dokazov, da bi triboki

³ Starodavni kitajski učenjaki, ki so študirali pri filozofu Mozi. Povzeto po: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mohism>, dostopano dne 26.12.2023

⁴ Izvor, etimologija, <https://en.wikipedia.org/wiki/Trebuchet>, dostopano dne 27.12.2023

⁵ "velikemu samostrelu podobna vojaška priprava za metanje izstrelkov, zlasti velikih puščic, kopij", <https://fran.si/iskanje?View=1&Query=balista>, dostopano dne 29.12.2023

⁶ Razvoj, <https://www.britannica.com/technology/trebuchet>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Trebuchet>, dostopano dne 27.12.2023

povzročili predor obzidja ali padec trdnjave. Poleg vojaškega pomena je tribok verjetno pomagal tudi pri razvoju teoretične mehanike v srednjem veku.⁷

2.1.3 Tribok na Slovenskem

Ena izmed redkih omemb triboka na Slovenskem se nahaja v Škofjeloškem inventarju iz 14. st., ki popisuje oborožitev in drugo opremo Škofjeloškega gradu. V njem je omenjena železna os in »kembelj« oblegovalne naprave (triboka), 6 prač, ki pa bi lahko bile tudi vrvice pritrjene na konec roke triboka, saj prače takrat niso bile v uporabi. Omenjeni so tudi tramovi oz. ročice raznih oblegovalnih naprav, med njimi tudi tribokov.⁸

2.1.4 Sodobna uporaba

Danes se triboke uporablja predvsem kot učno orodje v srednjih šolah in fakultetah za poučevanje o obremenitvi materialov, o silah, hitrosti, o gravitaciji... in za privabljanje študentov v inženirske programe, saj je za izdelavo triboka potrebnih veliko tehniških in inženirskih sposobnosti. Uporablja se tudi za rekreacijo in zabavo.

V ZDA vsako leto priredijo tekmovanje "Punkin chunkin", kjer tekmujejo v metanju buč s katapulti, triboki, topi,... Rekorder v kategoriji tribokov je Corey Winesburg, ki je leta 2013 s svojo ekipo bučo izstrelil kar 1137m daleč.⁹

2.2 Obleganje gradu Stirling

2.2.1 Ozadje

Po Škotskem upor proti nadvladi angleškega kralja Edwarda I. leta 1297 je Edward organiziral več daljših napadov na Škotsko, s katerimi je želel utrditi svoj nadzor. Do leta 1304 je z vojsko zasedel že vse ozemlje, z izjemo gradu Stirling, ki ga je vodil William Oliphant.¹⁰

2.2.2 Bitka

Za obleganje gradu Stirling je kralj Edward rekrutiral 9500 vojakov, a jih je do prihoda na grad Stirling zaradi smrti in pobegov ostalo le še 1000. Med temi so bili tudi mizarji, zidarji, delavci... Bili so izdatno preskrbljeni z orožjem, orodjem in živili. Izdelali so tudi večje število tribokov, ki so bili za obleganje ključnega pomena. Številni triboki so dobili lastne vzdevke poimenovane po znanih vojaki v angleški vojski, kot so »Gloucester«, »Lincoln«, »Segrave«, ali pa tudi bolj neobičajne vzdevke, kot npr.: »Vicar« (vikar) in »Parson« (duhovnik).

⁷ Pomen, Contamine P. "War in the Middle Ages," Blackwell Publishers, UK, 1984, <https://en.wikipedia.org/wiki/Trebuchet>, dostopano dne 28.12.2023

⁸ Tribok na Slovenskem, Lazar T. 2012, Poznosrednjeveška orožarna na Loškem gradu. Lazar T. Zgodovinski časopis, letnik 66, številka 1/2, str. 8-45.

⁹ Sodobna uporaba, <https://www.aaas.org/trebuchets-and-their-modern-use> in <https://www.punkinchunkin.com/the-competition/results/current-records/>, dostopano dne 30.12.2023

¹⁰ Ozadje, <https://hiddenscotland.co/the-siege-of-stirling-castle/>, dostopano 8.1.2024

Aprila 1304 je Edwardova vojska taborila pred gradom Stirling. Po tem, ko je Oliphant zavrnil predajo, ki so jo zahtevali, je začela z bombardiranjem gradu. Kljub temu, da so kamniti in drugi izstrelki močno poškodovali grad, se branilci tega napada niso ustrašili in so se močno uprli. Spretno so skrivali živila in napadali tabor oblegovalcev. A kmalu je kralj Edward postal nestrpen, saj ni bilo opaznega napredka. Zato je svojim obrtnikom naročil, naj zgradijo velikanski tribok, imenovan »Warwolf«. Med izdelavo tega triboka pa so se Škoti zaradi izčrpanih zalog hrane in strahu predali. A na njihovo presenečenje je Edward predajo zavrnil, saj je hotel pokazati svojo novi tribok in s tem svojo premoč.

Julija 1304 je bil gromozanski tribok Warwolf izdelan. Bil je največji znani tribok v tistih časih in je lahko izstrelil 140 kg težke izstrelke več kot 180 metrov daleč. Šele ko je Warwolf porušil vse obzidje gradu, je Edward sprejel predajo in dokončno zavzel Škotsko.¹¹



Slika 1: Warwolf tribok¹²

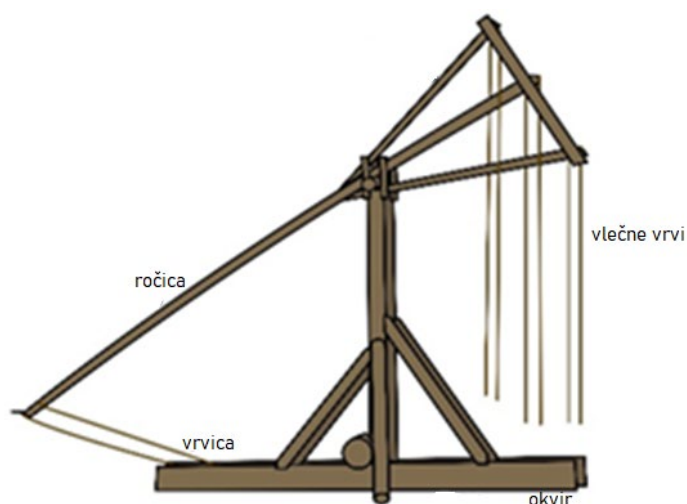
¹¹ Bitka, <https://hiddenscotland.co/the-siege-of-stirling-castle/> in <https://danspencer.info/2018/11/10/the-siege-of-stirling-castle-in-1304/>, dostopano dne 8.1.2024

¹² Warwolf tribok, <https://bobmarshall.co.uk/stirlingcastle>, dostopano dne 13.2.2024

3 Vrste tribokov

3.1 Vlečni tribok

Vlečni tribok ali mangonel je dokaj enostaven stroj, ki ga poganjajo ljudje tako, da vlečejo za vrvi. Sestavljen je iz lesa, vrvi in kovinskih delov. Vlečni tribok za eno samo osebo se imenuje ročni tribok.¹³



Slika 2: Shema vlečnega triboka¹⁴

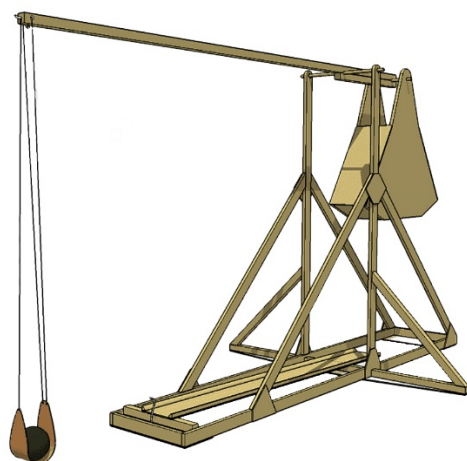
3.2 Tribok s protiutežjo

Ta vrsta triboka je bila najmočnejša vrsta v srednjem veku. Še izboljšala ga je nadomestitev fiksne protiuteži z gibljivo protiutežjo. Sestavljen je iz podstavka in roke. Na daljšem koncu roke je pritrjena zanka, v katero je naložen izstrelek, na drugem koncu pa je pritrjena protiutež.¹⁵

¹³ Vlečni tribok, <https://exarc.net/issue-2018-3/at/traction-trebuchet> in <https://medievalbritain.com/type/medieval-life/weapons/medieval-trebuchet/>, dostopano dne 30.12.2023

¹⁴ Shema vlečnega triboka, <https://exarc.net/issue-2018-3/at/traction-trebuchet>, dostopano dne 12.2.2024

¹⁵ Tribok s protiutežjo, <https://www.instructables.com/The-Insensible-a-counterweight-trebuchet/>, dostopano dne 30.12.2023



Slika 3: Shema triboka s protiutežjo¹⁶

3.3 Hibridni tribok

Hibridni tribok uporablja protiutež in človeški pogon. O njem ni veliko ilustracij ali opisov, a so o njegovem obstoju sklepali iz vse bolj učinkovitih oblegovalnih orožjih. Njegova prva upodobitev izvira šele iz leta 1462.¹⁷



Slika 4: Hibridni tribok¹⁸

¹⁶ Shema triboka s protiutežjo, <https://www.pngwing.com/en/free-png-iqlwo>, dostopano dne 13.2.2024

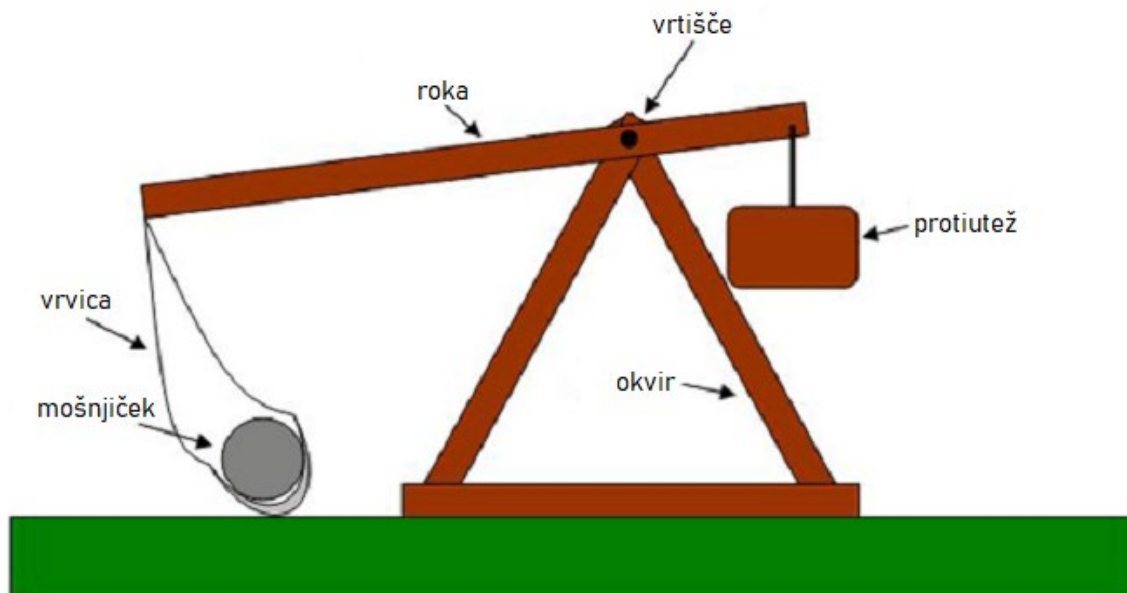
¹⁷ Hibridni tribok, <https://medievalbritain.com/type/medieval-life/weapons/medieval-trebuchet/>, dostopano dne 30.12.2023

¹⁸ Hibridni tribok, https://www.jaanmarss.planet.ee/juhendid/Mehaanilised_kaugrelvad_keskajal_andmebaas/trebuchetstore.com/hybridtrebuchet.html, dostopano dne 14.2.2024

4 Konstrukcija triboka

Tribok je stroj, sestavljen pretežno iz lesa, ojačenega s kovino, usnjem in vrvmi. Za silo uporablja silo gravitacije uteži (tribok s protiutežjo) ali pa človeško silo (vlečni tribok), ki jo proizvajajo moški, ki na ukaz vlečejo za vrvi. Tribok sestavlja trden, po navadi leseni okvir, lesena roka, zanka z izstrelkom in protiutež oz. vrvi za vlečenje.

Roka je z osjo pritrjena na okvir, os je nekaj metrov nad tlemi, da krajši konec roke ne zadane ob tla. Na krajšem koncu roke je pritrjena protiutež ali vrvi, na daljšem koncu pa zanka. Za čim daljši domet triboka mora biti razmerje med krajšim in daljšim delom roke približno 1:4. Hitrost poleg vzvodnega mehanizma poveča še vrstica z mošnjičkom, ki se sprosti pod želenim kotom. S spreminjanjem kota sprostitve izstrelka iz mošnjička spreminja tudi domet izstrelka, kar je zelo pomembno, saj je po izdelavi delovanje triboka težko prilagoditi. Poleg tega domet izstrelka določajo še masa roke, razmerje med krajšim in daljšim koncem roke, masa protiuteži oz. človeška sila, teža izstrelka in dolžina vrvice.¹⁹



Slika 5: Osnovna konstrukcija triboka s protiutežjo²⁰

¹⁹ Konstrukcija triboka, <https://sl.wikipedia.org/wiki/Tribok>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Trebuchet>, dostopano dne 12.1.2024

²⁰ Osnovna konstrukcija triboka s protiutežjo, https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/ApMech_p013/mechanical-engineering/effect-of-trebuchet-arm-length-or-counterweight-mass-on-projectile-distance, dostopano dne 14.2.2024

5 Fizikalni mehanizmi

Delovanje triboka od sprožitve vzvoda do izmeta izstrelka lahko opišemo z vrsto različnih fizikalnih mehanizmov, ki zajemajo področja

- Newtonove mehanike, kot so različne vrste premih in krivih gibanj,
- potencialne in kinetične energije ter
- fizikalnih orodij, kot je vzvod, kjer srečamo pojme navora, kroženja, vztrajnostnega momenta in kotne ter obodne hitrosti.

Let izstrelka od trenutka izmeta pa najbolje opišemo z mehanizmom poševnega meta. V nadaljevanju bova podrobneje predstavila posamezne fizikalne pojme.

5.1 Premo enakomerno gibanje

Premo enakomerno gibanje je vrsta gibanja, pri katerem je vsota vseh zunanjih sil, ki delujejo na telo, enaka nič.²¹ Pri njem pa je poudarjeno gibanje telesa, ki v ponavljajočih se časovnih intervalih opravi enako pot. Hitrost je konstanta, se ne spreminja s časom, tir gibanja pa je premica.

Za izračun hitrosti pri premem enakomernem gibanju uporabimo enačbo:

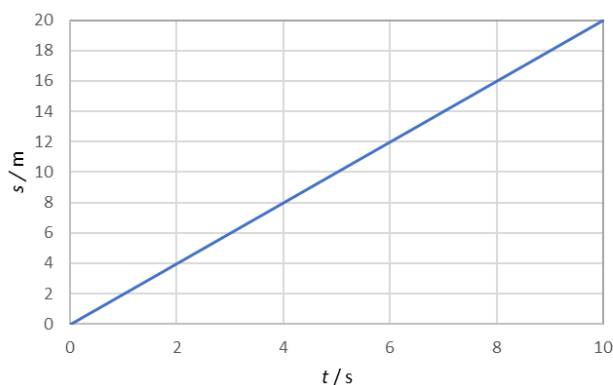
$$v = \frac{s}{t}. \quad (1)$$

Premo enakomerno gibanje lahko prikažemo s primeri iz vsakdanjega življenja:

- Avtomobil se po ravni cesti ves čas pelje s hitrostjo 50 km/h.
- Vlak se pelje po ravnem delu tira s konstantno hitrostjo.

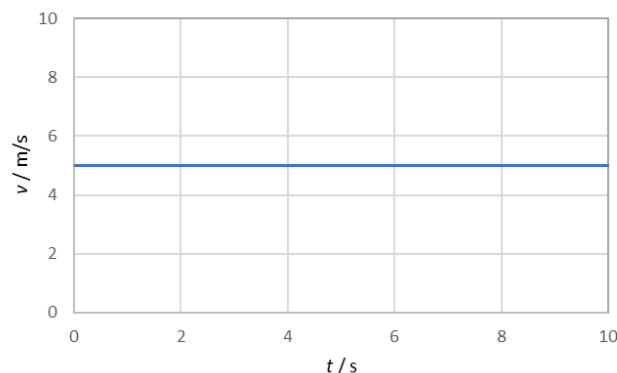
Gibanje opišemo tudi z grafi:

- graf poti v odvisnosti od časa,
- graf hitrosti v odvisnosti od časa.



Slika 6: Pot v odvisnosti od časa pri enakomernem premem gibanju

²¹ Teoretično ga opisuje prvi Newtonov zakon.



Slika 7: Hitrost v odvisnosti od časa pri enakomernem premem gibanju

5.2 Enakomerno pospešeno gibanje

Enakomerno pospešeno gibanje je vrsta neenakomernega gibanja pri katerem je pospešek konstanten, hitrost pa se enakomerno povečuje²². Pospešek merimo v m/s^2 . Izračunamo ga kot količnik med spremembo hitrosti in časom, v katerem sprememba nastane:

$$a = \frac{\Delta v}{t}. \quad (2)$$

S pomočjo 2. Newtonovega zakona pospešek izračunamo kot količnik med silo in maso telesa:

$$a = \frac{F}{m}. \quad (3)$$

Pospešek nam pove, za koliko se telesu spremeni hitrost v določeni časovni enoti. Lahko je pozitiven ali pa negativen. V slednjem primeru ga imenujemo pojemek.

Pot pri enakomerno pospešenem gibanju izračunamo s pomočjo enačbe, v kateri upoštevamo povprečna hitrost telesa, ki jo pomnožimo s časom gibanja:

$$s = \frac{v_z + v_k}{2} \cdot t, \quad (4)$$

ali pa enačbi, v kateri upoštevamo pospešek:

$$s = \frac{a \cdot t^2}{2}. \quad (5)$$

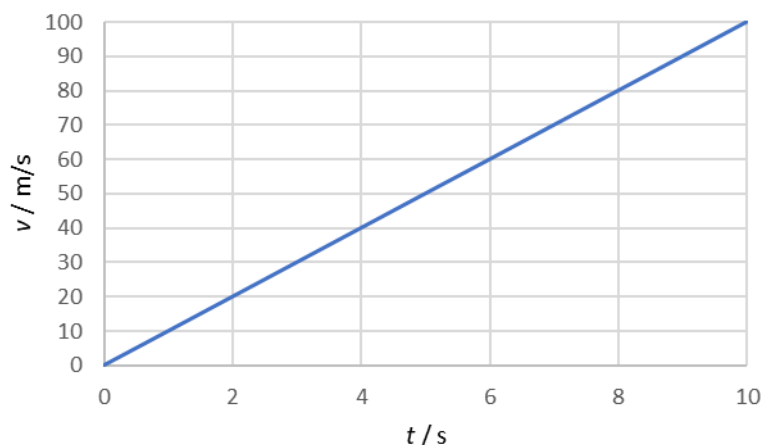
5.2.1 Enakomerno pospešeno gibanje z začetno hitrostjo nič

Če je začetna hitrost pri enakomerno pospešenem gibanju enaka nič, potem v enačbi za pospešek namesto spremembe hitrosti uporabimo kar končno hitrost. V tem primeru je pospešek enak količniku končne hitrosti in časa:

$$a = \frac{v_k}{t}. \quad (6)$$

Pospešek je pri enakomerno pospešenem gibanju stalen, hitrost pa se med gibanjem enakomerno povečuje ali zmanjšuje, kar opišemo z grafom odvisnosti hitrosti od časa:

²² Enakomerno pospešeno gibanje, https://si.openprof.com/wb/enakomerno_pospešeno_gibanje, dostopano dne 5. 12. 2023



Slika 8: Graf hitrosti v odvisnosti s časom pri enakomerno pospešenem gibanju z začetno hitrostjo 0.

5.2.2 Enakomerno pospešeno gibanje z začetno hitrostjo različno od nič

Če je začetna hitrost pri enakomerno pospešenem gibanju različna od nič, pri enačbi za pot upoštevamo še pot, že opravljeno z začetno hitrostjo. Izračunamo jo kot produkt med začetno hitrostjo in časom:

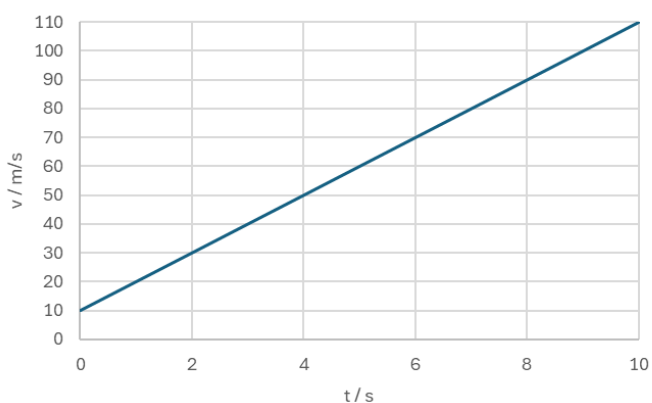
$$s_1 = v_z \cdot t, \quad (7)$$

pot opravljeno med pospeševanjem pa izračunamo kot količnik med produktom pospeška in kvadrata časa ter števila dve:

$$s_2 = \frac{a \cdot t^2}{2}, \quad (8)$$

Da dobimo celotno pot, obe poti seštejemo:

$$s = \frac{a \cdot t^2}{2} + v_z \cdot t. \quad (9)$$



Slika 9: Graf hitrosti v odvisnosti s časom pri enakomerno pospešenem gibanju z začetno hitrostjo različno od nič.

5.3 Enakomerno kroženje

Kroženje je vrsta krivega gibanja, pri katerem je tir gibanja krožnica. Pot, ki jo telo naredi pri enem obhodu je enaka obsegu kroga:

$$o = 2 \cdot \pi \cdot r . \quad (10)$$

Obhodni čas je čas, v katerem telo naredi celoten obhod po krožnici in znova pride na začetno mesto. Označimo ga kot t_o . Če želimo povedati koliko obhodov naredi telo v izmerjenem času, opišemo s frekvenco kroženja, ki jo merimo v Hertzih. Izračunamo jo kot količnik med številom obhodov in izmerjenim časom kroženja:²³

$$\nu = \frac{\text{število obhodov}}{\text{čas}}, \quad (11)$$

ali pa količnikom med enim obhodom in obhodnim časom:

$$\nu = \frac{1}{t_o} . \quad (12)$$

Pri enakomernem kroženju poznamo dve vrsti hitrosti. Med gibanjem telesa po krožnici se spreminja tudi kot. Kako hitro kot s časom narašča ali pada, nam pove kotna hitrost. Ta je podobna obodni hitrosti, le da pri tej ne opazujemo opravljene poti v danem času, pač pa opravljen kot v danem času. Kot lahko merimo v stopinjah ali pa v radianih. Če ga merimo v stopinjah, znaša celoten krog 360 stopinj, če ga pa merimo v radianih, ta znaša 2π radianov.²⁴

Kotna hitrost nam pove, koliko radianov naredi kot v eni sekundi. Je pravokotna na polmer krožnice in je usmerjena v smer gibanja. Izračunamo jo kot količnik spremembe kota in spremembe časa:

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} . \quad (13)$$

Obodna hitrost je hitrost, s katero se giba telo po krožnici. Izračunamo jo lahko kot količnik med potjo, ki je enaka obsegu kroga, in časom, ki je enak obhodnemu času:

$$v_o = \frac{2\pi r}{t_o} , \quad (14)$$

ali pa kot produkt kotne hitrosti in polmera krožnice:

$$v_o = \omega \cdot r . \quad (15)$$

5.4 Delo

Sila opravlja delo, kadar premika telo, na katerega deluje, za neko pot. Kadar s silo delujemo na telo in telo pri tem opravi pot je sila opravila delo. Ugotovimo lahko tudi, da z večjo silo in večjo potjo, opravimo več dela. Delo merimo v Joulih oz. Newton metrih. Izračunamo ga kot produkt sile, ki deluje na telo v smeri gibanja in poti, ki jo telo med tem opravi:²⁵

$$A = F \cdot s . \quad (16)$$

²³ Obodni čas in obodna hitrost, <https://eucbeniki.sio.si/fizika9/173/index1.html>, dostopano dne 8.12.2023

²⁴ Enakomerno kroženje, https://si.openprof.com/wb/enakomerno_krozenje, dostopano dne 8.12.2023

²⁵ Delo, <https://si.openprof.com/wb/delo>, dostopano dne 15.12.2023

Po predznaku je delo lahko:

- pozitivno: če sila predmet premakne v smeri gibanja,
- enako nič: če je sila nič, če sila telesa ne premakne ali če je smer sile pravokotna na smer gibanja telesa,
- negativno: če se telo giblje v nasprotni smeri delovanja sile.

5.5 Kinetična energija

Kinetična energija je vrsta energije, ki jo ima vsako gibajoče se telo. S spreminjanjem hitrosti gibanja, se spreminja tudi kinetična energija. Hitreje kot se telo premika, večjo kinetično energijo ima. Kinetična energija je enaka opravljenemu delu. Ko tekač teče, je njegova hitrost odvisna od opravljenega dela. Med tem, ko mišice opravljajo delo in s tem delujemo na podlago, sila podlage kot zunanja sila deluje na tekača in mu daje kinetično energijo. Izračunamo jo kot polovico produkta mase in kvadrata hitrosti:²⁶

$$W_k = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (17)$$

ali pa upoštevamo, da je delo enako spremembi kinetične energije, in je enako produktu sile in poti:

$$A = \Delta W_k = F \cdot s. \quad (18)$$

5.6 Potencialna energija

Potencialna energija je vrsta energije, ki jo ima telo zaradi višine. Višje od tal kot je telo, večja je njegova potencialna energija. Odvisna je od spremembe višine med začetno in končno lega, mase in gravitacijskega pospeška oz. sile teže. Izraz potencialna energija uporabljamo namesto dela sile teže. V izračunih zato ne upoštevamo več dela sile teže, pač pa ga nadomestimo s potencialno energijo. Izračunamo jo kot produkt mase, gravitacijskega pospeška in višine.²⁷

$$W_p = m \cdot g \cdot h. \quad (19)$$

5.7 Prosti pad in navpični met

Če telo pustimo, da prosto pada, pridemo do enakomerno pospešenega gibanja. Pospešku pravimo težni pospešek in ga označimo s črko g . Ni konstanten, saj nanj vplivajo dejavniki kot na primer geografska širina ali pa nadmorska višina, vendar v izračunih upoštevamo približek $9,81 \text{ m/s}^2$ ali pa 10 m/s^2 .²⁸

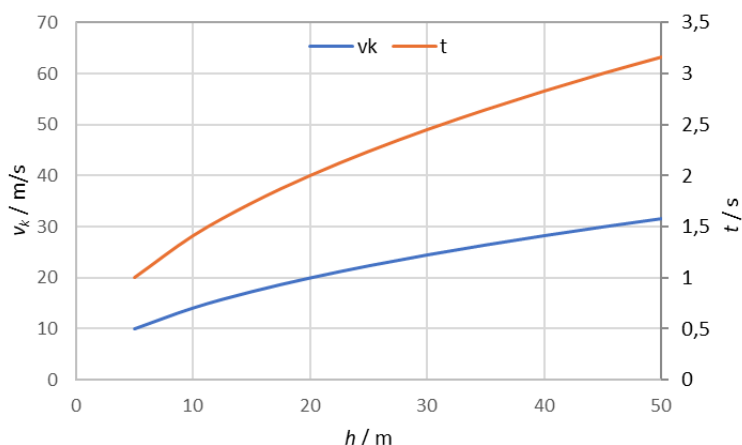
Predmet se pri padanju premika navpično navzdol, zato za pot, ki jo opravi telo, upoštevamo višina h , s katere je telo padlo. Pri prostem padu ima telo na začetku hitrost 0 in mu narašča z

²⁶ Kinetična energija, <https://eucbeniki.sio.si/fizika9/176/index.html>, dostopano dne 17.12.2023

²⁷ Potencialna energija, https://si.openprof.com/wb/potencialna_energija, dostopano dne 17.12.2023

²⁸ Prosti pad in navpični met. https://www2.arnes.si/~osngso3s/virtualna/fizika/virt_fiprospad.htm, dostopano dne 17.12.2023

gravitacijskim pospeškom g . Graf odvisnosti končne hitrosti od višine je enak grafu enakomerno pospešenega gibanja z začetno hitrostjo nič, in tako je tudi z enačbami.²⁹



Slika 10: Graf končne hitrosti v odvisnosti z višino pri prostem padu

Primer: Kolikšna je končna hitrost in čas od spusta do padca telesa na tla, če imamo telo z maso 1 kilogram, če ga spustimo iz višine 5 metrov in je njegova začetna hitrost nič. Gravitacijski pospešek je 10 metrov na kvadratno sekundo.

Najprej izračunamo čas v katerem telo opravi pot 5 metrov, tako da iz enačbe za izračun poti (5) izrazimo kvadrat časa.

$$h = \frac{g \cdot t^2}{2}, \quad (20)$$

$$t^2 = \frac{2 \cdot h}{g} = \frac{10 \text{ m}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1 \text{ s}^2, \quad (21)$$

$$t = \sqrt{1 \text{ s}^2} = 1 \text{ s}. \quad (22)$$

Čas padanja je tako sorazmeren korenu začetne višine. V našem primeru je pot, dolgo 5 metrov, telo opravilo v 1 sekundi. Z danim časom lahko izračunamo končno hitrost telesa:

$$v = g \cdot t = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ s} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (23)$$

Končna hitrost telesa je tako sorazmerna času padanja t in sorazmerna korenu začetne višine h . V našem primeru smo dobili 10 metrov na sekundo.

Prosti pad lahko opišemo tudi z energijami. Pri prostem padu bo telo opravilo delo, ki je enako vsoti spremembe kinetične energije in spremembe potencialne energije

$$A = \Delta w_k + \Delta w_p. \quad (24)$$

Primer: Telo z maso 1 kilogram spustimo iz višine 5 metrov na tla pade s končno hitrostjo 10 metrov na sekundo. Gravitacijski pospešek je 10 metrov na kvadratno sekundo.

Najprej izračunamo delo po enačbi (16), kjer pot v našem primeru predstavlja kar višina:

²⁹ Prosti pad in navpični met, https://si.openprof.com/wb/prosti_pad_in_navpični_met, dostopano dne 17.12.2023

$$A = F \cdot s = 10 \text{ N} \cdot 5 \text{ m} = 50 \text{ J.} \quad (25)$$

Opravljen delo je v našem primeru 50 Joulov, kar pomeni, da mora biti vsota spremembe kinetične energije in spremembe potencialne energije prav tako 50 Joulov. Preden telo spustimo, ima največjo potencialno energijo, ki je enaka:

$$W_p = m \cdot g \cdot h = 1 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ m} = 50 \text{ J} \quad (26)$$

in je 50 Joulov. Takrat je kinetična energija enaka nič, saj se telo ne premika. Ko telo spustimo, se mu potencialna energija zmanjšuje in pretvarja v kinetično, ki se povečuje. Tik nad tlemi ima telo najmanjšo potencialno energijo, ki je enaka nič, in največjo kinetično energijo, saj je hitrost telesa takrat najvišja. Kinetična energija je enaka:

$$W_k = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{1 \text{ kg} \cdot 100 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2} = 50 \text{ J.} \quad (27)$$

Kinetična energija tik nad tlemi je 50 Joulov. To pomeni, da je potencialna energija na začetku enaka kinetični energiji na koncu. Med padanjem se je potencialna energija pretvarjala v kinetično. Kinetična energija se je povečala za toliko, za kolikor se je potencialna energija zmanjšala.

Navpični met je, tako kot prosti pad, primer enakomerno pospešenega gibanja, kjer pa telo vržemo navpično navzgor z začetno hitrostjo. Hitrost telesu nato pada, saj nanj deluje težni pospešek, ki ima nasprotno smer, kot je smer gibanja telesa. Ko se telo ustavi, hkrati doseže največjo višino. Doseženo višino izračunamo z izenačitvijo začetne kinetične energije na začetku in potencialne energije v točki, ko se telo ustavi:

$$W_{kz} = W_{pk} \quad (28)$$

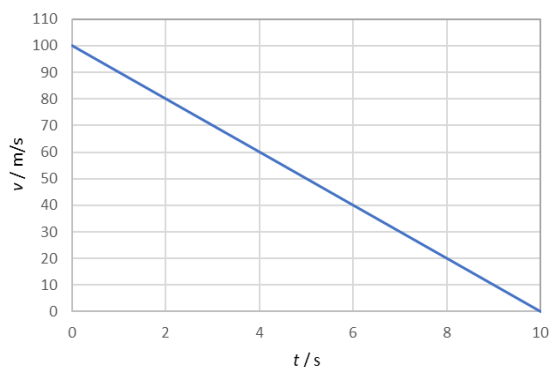
Enačbi izenačimo:

$$\frac{m \cdot v_z^2}{2} = m \cdot g \cdot h \quad (29)$$

in izrazimo doseženo višino telesa, ki je enaka količniku kvadrata začetne hitrosti in dvakratnika gravitacijskega pospeška:

$$h = \frac{v_z^2}{2 \cdot g}. \quad (30)$$

Spodnji graf prikazuje spreminjanje hitrosti (padanje hitrosti) pri navpičnem metu.



Slika 11: Graf hitrosti v odvisnosti od časa pri navpičnem metu.

Izračuni za navpični met so enaki izračunom prostega pada. Pri prostem padu smo računali končno hitrost, pri navpičnem metu pa računamo začetno hitrost, saj telo v najvišji točki nima hitrosti.

Tako je tudi z energijami. Ob začetku meta je potencialna energija najmanjša oz. enaka nič, kinetična energija pa največja. Med metom se kinetična energija zmanjšuje, saj telo izgublja hitrost, potencialna pa se povečuje, saj je telo vedno višje. V najvišji točki ima telo najmanjšo kinetično energijo enako nič, saj telo nima hitrosti in največjo potencialno energijo, saj je na največji višini.

5.8 Vodoravni met

Vodoravni met je vrsta krivega gibanja, ki je sestavljen iz dveh gibanj: premo enakomernega v vodoravni smeri in enakomerno pospešenega v navpični smeri. Obe gibanji sta pravokotni druga na drugo in ju lahko opazujemo ločeno. Če ne bi bilo zemeljske privlačnosti bi se telo ves čas gibalo v vodoravni smeri z enako hitrostjo, če zanemarimo zračni upor. Tako pa se vodoravnemu gibanju pridruži še navpično gibanje s težnim pospeškom. Ker v vodoravni smeri ni pospeška, se komponenta vodoravne hitrosti med gibanjem ne spreminja. Poti med točkama, kjer je bilo telo vrženo in kjer je pristalo na tla, pravimo domet.³⁰

Za izračun dometa uporabimo pot iz premo enakomernega gibanja, ki jo izračunamo po enačbi (1) s komponento vodoravne hitrosti in časom iz enakomerno pospešenega gibanja glede na enačbo (21):

$$s = v_x t = v_x \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}}. \quad (31)$$

Dolžina meta je premo sorazmerna začetni hitrosti v_{zx} in času letenja t , čas ta pa je enak korenu količnika med dvakratnikom višine in gravitacijskim pospeškom.

Končna hitrost v vodoravni smeri je enaka začetni hitrosti:

$$v_{kx} = v_{zx}, \quad (32)$$

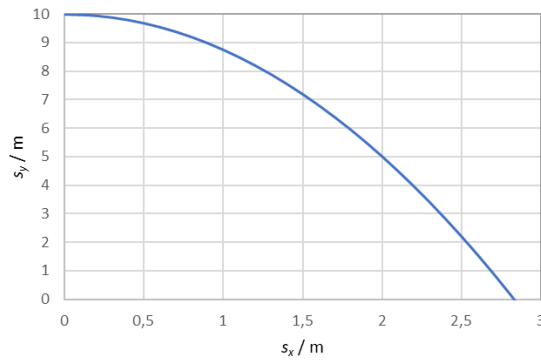
končna navpična hitrost pa je glede na enačbi (20) in (23) enaka korenu dvakratnika produkta višine in gravitacijskega pospeška:

$$v_{ky} = g \cdot t = \sqrt{2gh}. \quad (33)$$

Ker ima telo različni končni hitrosti pri razdeljenih gibanjih, ki sta med sabo pravokotni, bo končna hitrost po Pitagorovem izreku enaka korenu vsote kvadratov obeh komponent hitrosti:

$$v_k = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (34)$$

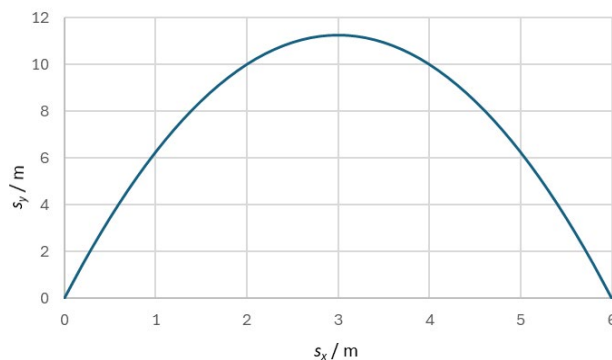
³⁰ Vodoravni met, https://si.openprof.com/wb/vodoravni_met, dostopano dne 20.12.2023



Slika 12: Tirnica leta izstrelka pri vodoravnem metu

5.9 Poševni met

Poševni met je met pod kotom, ki je manjši od 90 stopinj. Sestavljen je iz dveh gibanj: premo enakomerno gibanje v vodoravni smeri in enakomerno pojemajoče ter pospešeno gibanje v navpični smeri. Optimalen kot za met meri 45 stopinj, saj je takrat domet največji, saj sta komponenti hitrosti enako veliki. Ko je telo na največji višini, se gibanje v smeri y spremeni iz enakomerno pojemajočega v enakomerno pospešeno gibanje. V drugem delu poševnega meta dobimo vodoravni met.³¹



Slika 13: Tirnica leta izstrelka pri poševnem metu

Višina meta ustreza navpičnemu metu glede na enačbo (30), čas leta in dolžina leta pa bosta ustrezala dvakratniku časa in dolžine vodoravnega meta glede na enačbi (23) in (31). Zanima nas, kako se vse tri veličine spreminjajo glede na začetno hitrost. Privzemimo kot izstrelitve 45° , zato sta obe komponenti hitrosti enaki. Glede na enačbe zgoraj dobimo naslednjo tabelo:

³¹ Poševni met, <http://allthematters.com/physics/oblique-throw/>, dostopano dne 6.1.2024

Tabela 1: Parametri tirnice leta glede na začetno hitrost

začetna hitrost v_x in v_y / m/s	dolžina / m	višina / m	čas / s
2	0,400	0,2	0,4
4	1,600	0,8	0,8
6	3,600	1,8	1,2
8	6,400	3,2	1,6
10	10,000	5	2
12	14,400	7,2	2,4
14	19,600	9,8	2,8
16	25,600	12,8	3,2
18	32,400	16,2	3,6
20	40,000	20	4

Izkaže se, da je čas leta sorazmeren z začetno hitrostjo glede na enačbo (23)

$$t = 2 \frac{v_y}{g} \sim v_y, \quad (35)$$

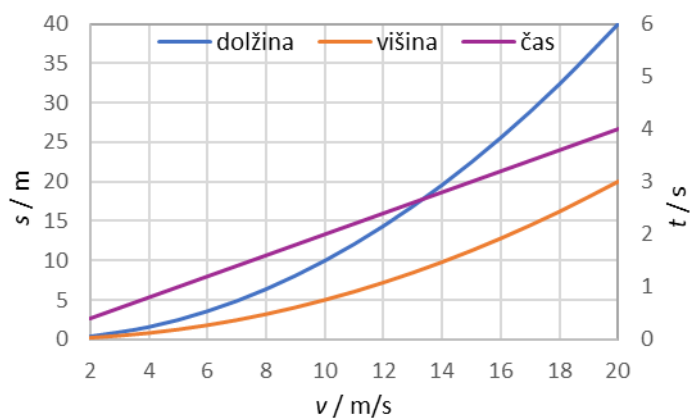
Dosežena višina leta je glede na enačbo (30) odvisna od kvadrata začetne hitrosti v_y

$$h = \frac{v_y^2}{2 \cdot g} \sim v_y^2, \quad (36)$$

medtem, ko je dolžina leta po enačbi (31) sorazmerna začetni hitrosti in času leta

$$s = v_x t \sim v_x^2, \quad (37)$$

kar tudi ustreza kvadratnem sorazmerju.



Slika 14: Dolžina, višina in čas leta predmeta glede na začetno hitrost

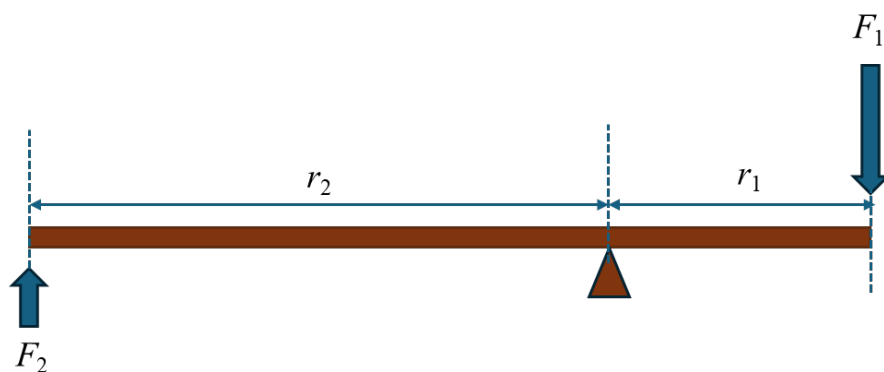
5.10 Navor

Navor ali vrtilni moment je sila, ki prek ročice deluje na vrtilišče in povzroča vrtenje teles. Je produkt sile in dolžine ročice. Merimo ga v newtonmetrih. Ročica je razdalja med vrtiliščem oz. osjo vrtenja in prijemališčem sile. Če je kot med vrtiliščem in ročico enak 0° ali 180° , sila ne bo povzročila vrtenja na osi. Vrednost navora je nič. Najboljša kota med vrtiliščem in ročico pa sta 90° ali -90° , saj sta pravokotna na vrtilišče. Kadar je ročica pravokotna na vrtilišče je navor enak produktu sile in ročice:³²

$$M = F \cdot r . \quad (38)$$

5.11 Vzvod

Vzvod je sestavljen iz trdnega droga, ki ga v neki točki podpremo, kot je prikazano na sliki spodaj. Tej točki rečemo vrtilišče, del vzvoda levo ali desno od vrtilišča imenujemo ročica.



Slika 15: Skica fizikalnega principa vzvoda

Vzvod je orodje s katerim lahko povečamo silo, s katero delujemo na neko telo. Z njim delo opravimo lažje: to pomeni, da delaš z manjšo silo, ki pa deluje na večji poti. Delo se pri tem ne spremeni. Daljša kot je ročica na strani roke, manjša sila je potrebna, da vzvod premaknemo. Matematično delovanje vzvoda zapišemo tako, da izenačimo navora obeh strani:³³

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2 . \quad (39)$$

Na osnovi vzvoda delujejo različna orodja in stroji kot so lopata, škarje, klešče, gugalnica, bager...

³² Navor, <https://si.openprof.com/wb/navor>, dostopano dne 6.1.2024

³³ Vzvod, <https://eucbeniki.sio.si/fizika9/179/index2.html>, dostopano dne 6.1.2024

5.12 Vztrajnostni moment

Spoznavali smo že premo enakomerno pospešeno gibanje, kjer je sila produkt mase telesa in pospeška glede na enačbo (3).

$$F = m \cdot a. \quad (40)$$

Podobno lahko definiramo pospešeno kroženje, kjer je navor enak produktu vztrajnostnega momenta in kotnega pospeška telesa:

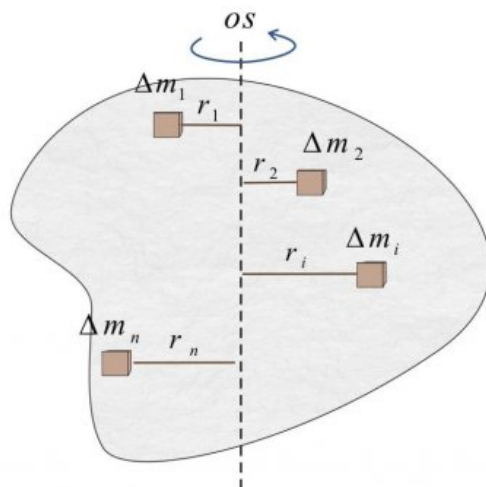
$$M = J \cdot \alpha. \quad (41)$$

Navor, kotna hitrost, vztrajnostni moment in kotni pospešek pri kroženju tako ustrezajo sili, hitrosti, masi in pospešku pri premem gibanju. Vztrajnostni moment telesa je odvisen od njegove oblike in porazdelitve mase telesa znotraj te oblike glede na os vrtenja. Več mase kot leži stran od osi vrtenja, večji je vztrajnostni moment.³⁴

Za enostavno telo, kjer je vsa masa združena v eni točki, ga izračunamo ga kot produkt mase telesa in kvadrata polmera krožnice glede na os vrtenja.

$$J = m \cdot r^2. \quad (42)$$

Za izračuna vztrajnostnega momenta teles s porazdeljeno maso, moramo telo razdeliti na majhne koščke, za katere moramo izračunati posamezne vztrajnostne momente in jih med sabo sešteti, da dobimo celotni vztrajnostni moment, kot je to prikazano na spodnji sliki.



Slika 16: Slika vztrajnostnega momenta telesa s porazdeljeno maso³⁵

³⁴ Vztrajnostni moment, https://sl.wikipedia.org/wiki/Vztrajnostni_moment, dostopano dne 15.1.2024

³⁵ Vrtilna količina, https://si.openprof.com/wb/vrtilna_kolicina, dostopano dne 15.1.2024

6 Fizikalno delovanje triboka

6.1 Osnovno delovanje

Tribokovo delovanje lahko opišemo z enostavnimi fizikalnimi principi. Predstavljamo si ga z vsemi komponentami, ki smo jih že poprej spoznali. Tribok miruje, zato ga moramo najprej napeti če želimo, da se bo kaj zgodilo. S pomočjo sile ljudi na vrvi ga napnemo, tako da se protiutež dvigne. Posledično se v njej shrani potencialna energija. Pri delovanju upoštevamo princip ohranjanja in pretvarjanja energij.³⁶

Ko tribok sprožimo, na krajšo roko deluje sila teže protiuteži. Njena potencialna energija se zmanjšuje in se pretvarja v kinetično energijo. Vzvod se začne vrteti, kar lahko opišemo s pospešenim kroženjem. Ko se protiutež giblje navzdol, sledi poti krožnega loka, ki ustreza vrtenju krajše ročice vzvoda. Kroglica se v mošnjičku giblje premo pospešeno po vodilnem žlebu. Ko kroglica zapusti vodilni žleb, se gibanje kroglice spremeni v pospešeno kroženje, saj jo vrteči vzvod povleče za seboj s pomočjo pritrjene vrvice. Pri kotu 45° se prosto gibljiva vrvica sname in gibanje kroglice z začetno kinetično energijo preide v poševni met.

Delovanje triboka se nam na zunaj zdi lahko razumljivo in enostavno. Če pa ga pogledamo od blizu, odkrijemo še veliko pomembnih dejavnikov, ki vplivajo na končni rezultat.

6.2 Podrobni opis delovanja

Vemo, da je roka triboka vzvod, sestavljen iz dveh ročic, ki sta vpeti v vrtilišču nosilca. Privzemimo, da sta dolžini ročic v razmerju 1:4 kar je tudi sicer blizu optimumu dolžine meta.

Vzvod lahko izkoristimo za lažje dvigovanje protiuteži. Sila s katero napenjaš tribok je približno četrtnina sile teže protiuteži. Zato, da se vzvod začne vrteti, je odgovorna rezultanta navorov. Sila teže protiuteži deluje na krajši ročici in skupaj s težo krajše ročice predstavlja navor, ki premaguje navor teže daljše ročice. Če bi bilo vrtilišče na mestu težišča vzvoda, bi se vpliv sile teže obeh ročic izenačil. Običajno pa je zaradi velikega razmerja dolžin obeh ročic težišče pomaknjeno nekoliko proti daljši ročici, zato mora sila premagovati tudi del sile daljše ročice.

Potencialna energija se ob začetku delovanja pretvarja v kinetično energijo in v vrtenje vzvoda. Ko se vzvod vrti, se mu povečuje kotna hitrost, ki je na obeh delih vzvoda enaka. Povečuje se glede na vztrajnostni moment in rezultanto navorov na vzvod.

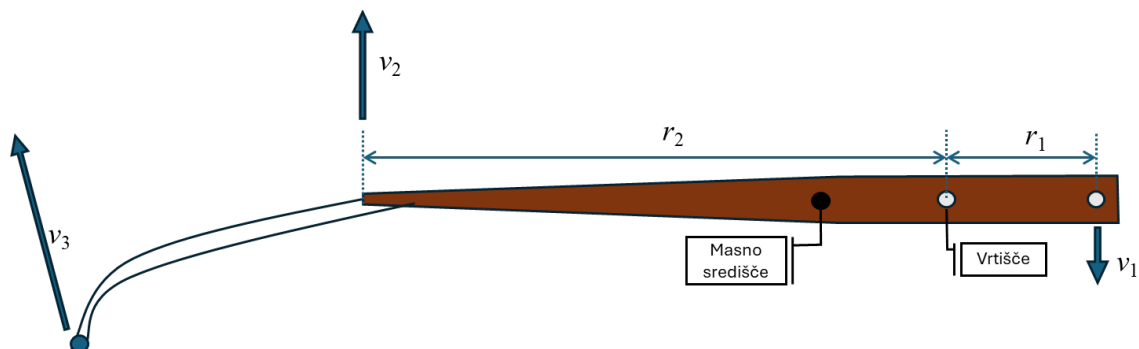
Pomembni pa sta še obodni hitrosti. Odvisni sta od dolžin ročic in končne kotne hitrosti, ki je na obeh straneh vzvoda enaka. Ugotovimo lahko, da je razmerje obodnih hitrosti enako razmerju dolžin ročic. Pri dolžini daljše ročice ne smemo pozabiti na vrvico, ki je zelo pomemben element pri zviševanju obodne hitrosti. Poleg vrvice bi se jo dalo zvišati tudi z daljšim vzvodom, kar pa se izkaže kot slabo rešitev.

S tem, ko podaljšamo vzvod, povečamo maso ročic in vztrajnostni moment. Posledično je hitrost manjša. Vztrajnostni moment je tem manjši, čim lažji je vzvod, predvsem na delu stran od vrtilišča, zato imamo del daljše ročice stanjšane. Daljšo ročico vzvoda še podaljšamo s pomočjo vrvice,

³⁶ Art of engineering, Medieval Engineering | How Trebuchets Work, <https://www.youtube.com/watch?v=jTBDc19eW2o>, dostopano dne 20.1.2024

katere masa pa je zanemarljiva v primerjavi z vzvodom. Vrvica se zavrti okoli točke, kjer je vpeta na ročico, zato se njena obodna hitrost še poveča.

Če bi bila razlika navorov enaka nič, bil vzvod uravnotežen, ker pa je masno središče nekoliko izmaknjeno od vrtilišča v smer daljše ročice, daljša ročica povzroča navor, ki ga premagamo z delom sile teže protiuteži. Posledično se zmanjša tisti del navora, ki zavrti vzvod. Za začetek rotacije vzvoda poskrbi preostali del protiuteži, ki masno središče premakne levo od vrtilišča.

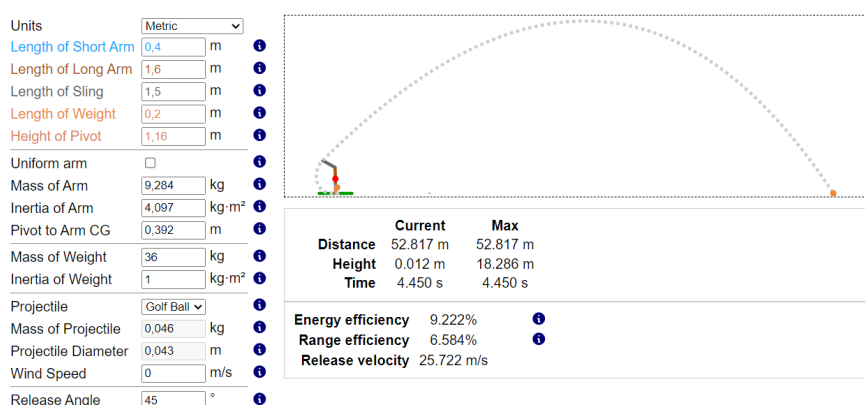


Slika 17: Skica vzvoda triboka, ki prikazuje razmerja hitrosti njegovih ključnih delov, ki odločilno prispevajo k letu izstrelka

Krajši del ročice je po navadi debelejši ali pa bolj ojačan kot daljši del, da prenese obremenitev protiuteži. To povzroči zmanjšanje vztrajnostnega momenta s premikanjem središča mase proti vrtilišču in pomaga protiuteži pri navoru, potrebnem za vrtenje vzvoda. Določen kot izmeta dosežemo z obliko mošnjička in zatiča na koncu roke, kamor je ena od obeh vrvic vpeta tako, da se ob določenem kotu izmakne in sprostí izstrelek.

7 Simulacije meta

Met sva simulirala s pomočjo programa s spletne strani »Virtual Trebuchet: A Web Based Trebuchet Simulator«³⁷. Simulator je narejen tako, da v svojih izračunih upošteva vse dodatne, v naravi prisotne učinke, ki pa jih v fizikalnem opisu nisva zajela, kot na primer trenje vpetja vzvoda v vrtilišču, krožna pot in nihanje protiuteži, izmik težišča vzvoda glede na vrtilišče, masa in zračni upor vrvice, zračni upor pri letu izstrelka, veter itd.... Upravljanje s simulatorjem je enostavno, vsi parametri so nastavljivi. Ponujenih je več rezultatov, kot so dolžina, hitrost, višina in čas leta. Med simulacijo se sproti zarisuje tirnica izstrelka, ki jo spremljajo trenutni podatki leta.

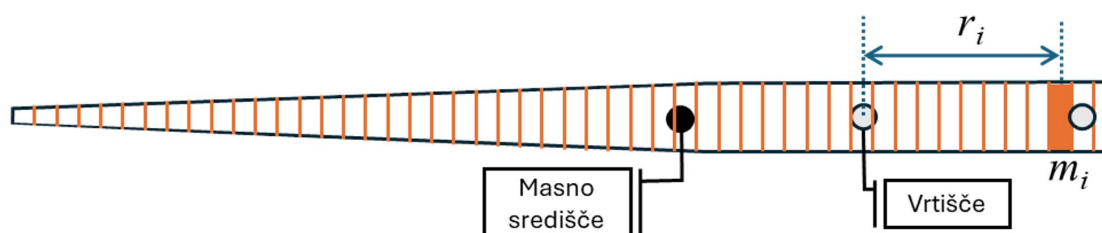


Slika 18: Slika spletne strani za simulacije meta triboka

S pomočjo simulatorja sva izračunala vpliv posameznih parametrov triboka na let izstrelka. Pri tem sva posamezne količine zaradi jasnosti zapisala z besedami, razen osi grafa, ki pa so označeni s standardnimi simboli in sicer s za pot, ki označuje tako dolžino kot višino, t za čas in m za maso.

Osnovne mere triboka sva povzela po modelih iz Knežjega dvorca v Celju in makete iz Narodnega muzeja Slovenije v Ljubljani³⁸. Po mnogih poizkusih v spletnem simulatorju in glede na pogovor s strokovnjaki glede možnosti materialov in konstrukcije sva določila izhodiščne mere in mase triboka.

Maso, vztrajnostni moment in točko masnega središča vzvoda sva določila tako, da sva vzvod po zgledu slike 16 razdelila na koščke po 5 cm in za vsakega izračunala maso, kot to prikazuje slika spodaj.



Slika 19: Razdelitev vzvoda na koške za izračun mase, vztrajnostnega momenta in točke masnega središča

³⁷ <https://virtualtrebuchet.com/>, dostopano dne 26.2.2024

³⁸ Glej poglavje 8

Pri tem sva uporabila gostoto hrastovega lesa³⁹ (700 kg/m^3) in prostornino koščka, ki sva jo dobila iz višine in širine vzvoda ter dolžine posameznega koščka. Za ravni del računanje ni bilo problematično, saj koščki predstavljajo kvadre s konstantnimi merami. V delu vzvoda, ki se postopoma oži do konca daljše ročice, in iz strani izgleda kot trapez pa sva privzela, kot da je sestavljen iz kvadrov s povprečno širino oz. višino, ki sva jo izračunala iz polovice vsote začetne in končne vrednosti.

Mase koščkov sva seštelila in dobila celotno maso vzvoda. Točko masnega središča sva izračunala tako, da sva seštelila produkte mase in razdalje posameznih koščkov od vrtilišča in jih delila s celotno maso vzvoda.⁴⁰ Pri tem sva vzela razdalje levo od vrtilišča kot pozitivne, razdalje desno pa kot negativne. Vztrajnostni moment vzvoda triboka sva izračunala s pomočjo enačbe (42), kjer sva seštelila vse vztrajnostne momente koščkov in tako dobila kočni rezultat vztrajnostnega momenta celega vzvoda. Pri tem sva morala vzeti vse razdalje od vrtilišča kot absolutne vrednosti.

Vztrajnostnega momenta protiuteži zaradi komplicirane oblike nisva izračunala, in tudi po poskusih v simulatorju se je izkazalo, da spreminjanje njegove vrednosti zelo malo vpliva na rezultat.

Iz teh podatkov sva izhajala pri spreminjanju posameznih parametrov in študiji njihovega vpliva na dolžino, višino in čas leta izstrelka. Vsi osnovni podatki so zbrani v spodnji tabeli:

Tabela 2: Izhodiščni vhodni parametri simulatorja delovanja triboka

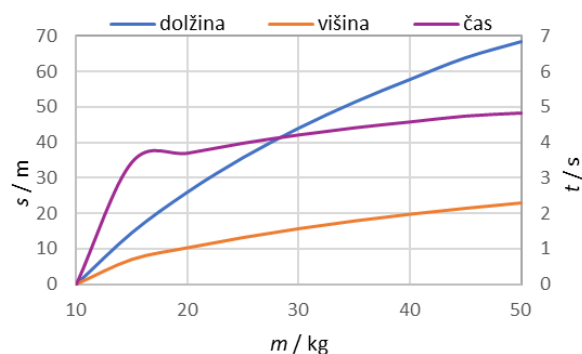
Parameter	Angleško	Vrednost
Dolžina kratke ročice	Length of short arm	0,4 m
Dolžina dolge ročice	Length of long arm	1,6 m
Dolžina vrvice	Length of sling	1,5 m
Dolžina vpetja protiuteži	Length of weight	0,2 m
Višina vrtilišča	Height of pivot	1,16 m
Masa vzvoda	Mass of arm	9,284 kg
Vztrajnostni moment vzvoda	Inertia of arm	$4,097 \text{ kgm}^2$
Izmik masnega središča glede na vrtilišče	Pivot to arm CG	0,392 m
Masa protiuteži	Mass of weight	36 kg
Vztrajnostni moment protiuteži	Inertia of weight	1 kgm^2
Masa izstrelka	Mass of projectile	46 g
Premer izstrelka	Projectile diameter	43 mm
Hitrost vetra	Wind speed	0 m/s
Kot izstrelitve	Release angle	45°

³⁹ <https://material-properties.org/oak-wood-density-strength-melting-point-thermal-conductivity/>, dostopano dne 18.1.2024

⁴⁰ Povzeto iz <https://www.youtube.com/watch?v=2uszSnvzBEU>, dostopano dne 2.2.2023

7.1 Spreminjanje mase protiuteži

masa protiuteži / kg	dolžina / m	višina / m	čas / s
10	0	0	0
15	14,585	7,006	3,45
20	26,061	10,297	3,7
25	35,816	13,198	3,983
30	44,152	15,709	4,217
35	51,457	17,884	4,417
40	57,913	19,789	4,583
45	64,056	21,472	4,75
50	68,599	22,968	4,833

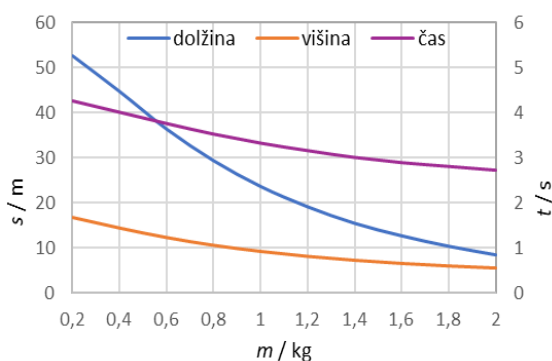


Slika 20: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od mase protiuteži

Masa protiuteži neposredno vpliva na njeno potencialno energijo glede na enačbo (19). Potencialna energija preko mehanizma triboka sorazmerno vpliva na kinetično energijo izstrelka. Kinetična energija izstrelka pa je odvisna od kvadrata njegove hitrosti glede na enačbo (17). Pri poševnem metu sta tako dolžina, višina in čas meta premo sorazmerni začetni hitrosti izstrelka, zato bi v grafu pričakovali premice z različnimi nakloni. Vendar smo pri poenostavljenih izračunih zanemarili dodatno izgubo energije zaradi vztrajnostnega momenta vzvoda in upora zraka, ki pri višjih hitrostih vzvoda in izstrelka vpliva močnejše, kar se vidi v ukrivljanju potekov pri višjih masah protiuteži. Nenavaden potek časa v grafu je posledica tega, da je to skupni čas rotacije vzvoda in leta izstrelka. Pri nizkih masah uteži je rotacija vzvoda počasna in predstavlja večji delež glede na celotni čas.

7.2 Spreminjanje mase izstrelka

masa izstrelka / kg	dolžina / m	Višina / m	čas / s
0,2	52,628	16,921	4,267
0,4	44,729	14,534	4,017
0,6	36,406	12,387	3,767
0,8	29,404	10,629	3,533
1	23,697	9,253	3,333
1,2	19,191	8,129	3,167
1,4	15,538	7,243	3,017
1,6	12,76	6,536	2,901
1,8	10,45	5,959	2,817



Slika 21: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od mase izstrelka

Če povečujemo maso izstrelka in ohranimo začetno potencialno energijo protiuteži, se začetna kinetična energija ne spremeni. Hitrost izstrelka ob izmetu se zmanjša sorazmerno s koren timer mase izstrelka v skladu z enačbo (17)

$$v_z \sim \frac{1}{\sqrt{m}}. \quad (43)$$

Višina leta je sorazmerna kvadratu začetne hitrosti po enačbi (30), kar pomeni, da je obratno sorazmerna z maso izstrelka:

$$h \sim v_z^2 \sim \left(\frac{1}{\sqrt{m}}\right)^2 \sim \frac{1}{m}. \quad (44)$$

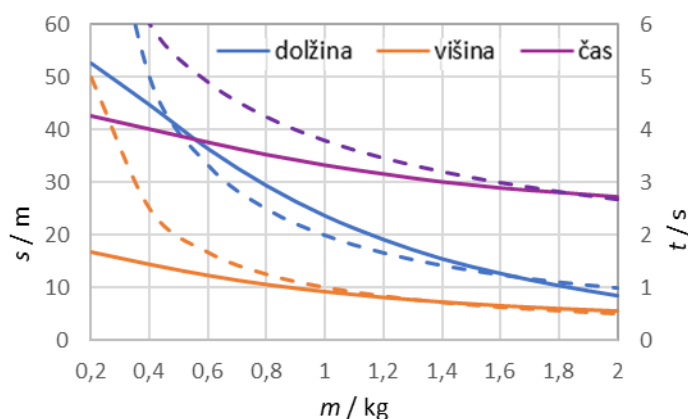
Čas leta je glede na enačbo (20) sorazmeren s korenem višine, kar pomeni da je obratno sorazmeren s korenem mase izstrelka:

$$t \sim \sqrt{h} \sim \frac{1}{\sqrt{m}}. \quad (45)$$

Dolžina leta se po enačbi (31) zmanjša sorazmerno z začetno hitrostjo in časom, saj gre za premo enakomerno gibanje. To pomeni, da dolžina leta tudi upada sorazmerno z maso izstrelka:

$$s \sim v_z t \sim \frac{1}{\sqrt{m}} \frac{1}{\sqrt{m}} \sim \frac{1}{m}. \quad (46)$$

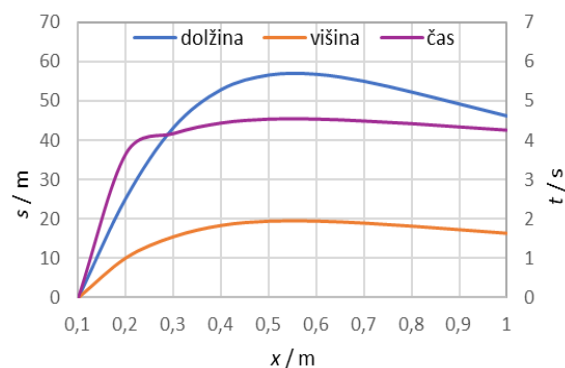
V rezultatih simulacije pa vidimo podobne poteke le pri večjih masah izstrelkov, saj smo v predstavljenih preprostih izračunih zanemarili vpliv zračnega upora, ki pri majhnih masah izstrelka močno vpliva na let. Predstavljajmo si vpliv zračnega upora na peresno lahko žogico. Po naših predpostavkah bi se morali višina, dolžina in čas z manjšanjem mase izstrelka povečevati vedno hitreje, kar pa simulacije ne kažejo, saj se poteki približujejo premicam. To razhajanje je lepo razvidno iz spodnje slike, kjer dodani črtkani poteki predstavljajo rezultate poenostavljenih izračunov.



Slika 22: Primerjava idealnih potekov leta izstrelka s poenostavljenimi izračuni in simulacijami

7.3 Spreminjanje dolžine kratke ročice

dolžina ročice / m	kratke	dolžina / m	višina / m	čas / s
	0,1	0	0	0
	0,2	25,33	10,082	3,672
	0,3	43,21	15,436	4,183
	0,4	52,817	18,286	4,45
	0,5	56,518	19,376	4,55
	0,6	56,713	19,394	4,55
	0,7	54,931	18,883	4,5
	0,8	52,203	18,113	4,433
	0,9	49,183	17,218	4,35

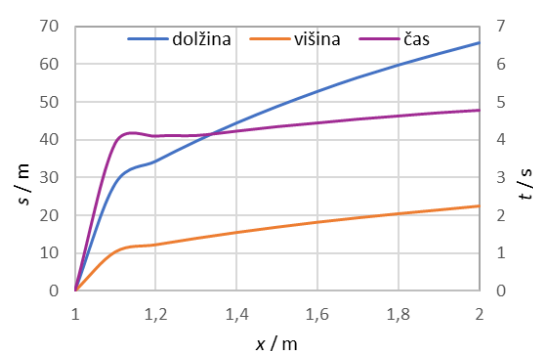


Slika 23: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od dolžine krajše ročice vzvoda

Če kratko ročico skrajšujemo se masno središče bolj izmakne glede na vrtilišče, kar pomeni, da večji del protiuteži porabimo za premagovanje navora daljše ročice vzvoda. Pot protiuteži je krajša, kar pomeni manjši izkoristek potencialne energije. S krajšanjem kratke ročice se povečuje razmerje med ročicama vzvoda, saj je večje razmerje med ročicama vzvoda ugodnejše za doseganje visokih obodnih hitrosti, vendar za začetek rotacije vzvoda potrebujemo zelo visoko maso protiuteži, da dosežemo željeno kotno hitrost. Če pa krajšo ročico daljšamo, dobimo nižjo obodno hitrost na drugi strani ročice. Ugotovimo, da obstaja optimum dolžine krajše ročice, kar je razvidno tudi iz zgornjega grafa.

7.4 Spreminjanje dolžine dolge ročice

dolžina ročice / m	dolge	dolžina / m	višina / m	čas / s
	1	0	0	0
	1,1	28,473	10,42	3,917
	1,2	34,35	12,304	4,1
	1,3	39,653	14,006	4,117
	1,4	44,465	15,567	4,233
	1,5	48,827	16,987	4,35
	1,6	52,817	18,286	4,45
	1,7	56,485	19,463	4,55

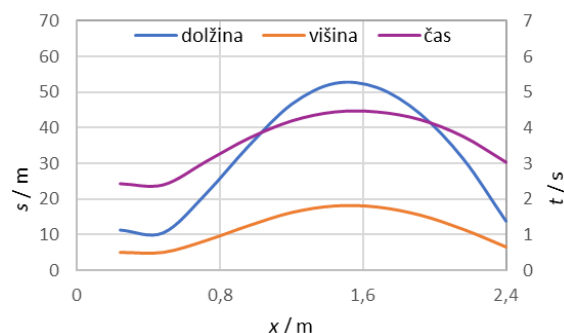


Slika 24: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od dolžine daljše ročice vzvoda

Če daljši del ročice skrajšamo, premaknemo masno središče bližje vrtilišču, kar pomeni manjši vztrajnostni moment. Navor zaradi teže izmaknjenega masnega središča daljše ročice se zmanjša, zato protiutež porabi manjši del sile teže za izravnavo navora. Zato ostane večji delež navora na voljo za vrtenje vzvoda. Kotna hitrost se zato sicer poveča, obodna pa se zaradi manjšega polmera zmanjša po enačbi (47). Vrvica, ki ostaja enako dolga se v primeru zelo kratke ročice ne more zavrteti, s tem se končna obodna hitrost izstrelka še dodatno zmanjša, kar vidimo v hitrem padcu vseh rezultatov proti izhodišču grafa na sliki zgoraj.

7.5 Spreminjanje dolžine vrvice

dolžina / m	vrvice	dolžina / m	višina / m	čas / s
	0,24	11,238	5,123	2,433
	0,48	10,429	5,132	2,4
	0,72	21,448	8,448	3,05
	0,96	34,94	12,637	3,7
	1,2	46,623	16,322	4,183
	1,44	52,478	18,166	4,433
	1,68	51,274	17,845	4,433
	1,92	43,895	15,573	4,217

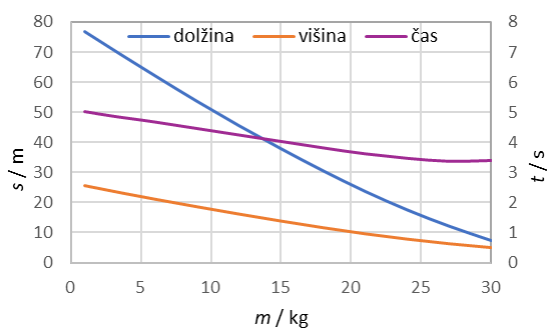


Slika 25: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od dolžine vrvice

Izkaže se, da pri daljših dolžinah vrvice, ki so primerljive z dolžino daljšega dela ročice, dosežemo maksimalne obodne hitrosti izstrelka in s tem maksimalne dolžine leta. Pri kratkih vrvicah je končna obodna hitrost nižja, pri zelo dolgih vrvicah pa vlogo že igra vztrajnostni moment izstrelka, ki pa kljub daljši ročici spet zmanjšuje končno obodno hitrost. Treba se je tudi zavedati, da je vrstica gibljiva in pri dolgi vrvici ročica ne more vrvico zavrteti in s tem se končna obodna hitrost še dodatno zmanjša. Treba je upoštevati tudi dejstvo, da se pri predolgi vrvici izstrelak niti ne more dvigniti s tal, ko je vzvod že v najvišji legi.

7.6 Spreminjanje mase vzvoda

masa / kg	vzvoda	dolžina / m	višina / m	čas / s
	1	76,802	25,478	5,033
	3	70,872	23,644	4,883
	6	62,162	21,023	4,686
	9	53,617	18,516	4,467
	12	45,49	16,116	4,25
	15	37,808	13,808	4,033
	18	30,464	11,624	3,817
	21	23,595	9,601	3,617

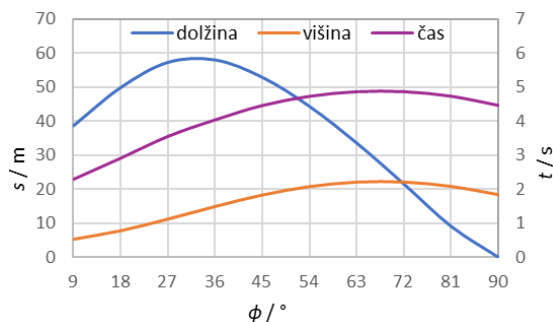


Slika 26: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od mase vzvoda

Z večanjem mase vzvoda se glede na enačbo (42) povečuje vztrajnostni moment in posledično se po enačbi (41) zmanjša kotni pospešek. Zato se zmanjšajo končna obodna hitrost, dolžina, višina in čas meta. Masno središče se zaradi tega sicer ne premakne, vendar ker je že izmaknjeno iz vrtilišča, sama masa vzvoda pa je večja, mora protiutež premagati večji navor daljše ročice, da se vzvod poravna. S tem je na voljo manj navora za vrtenje vzvoda.

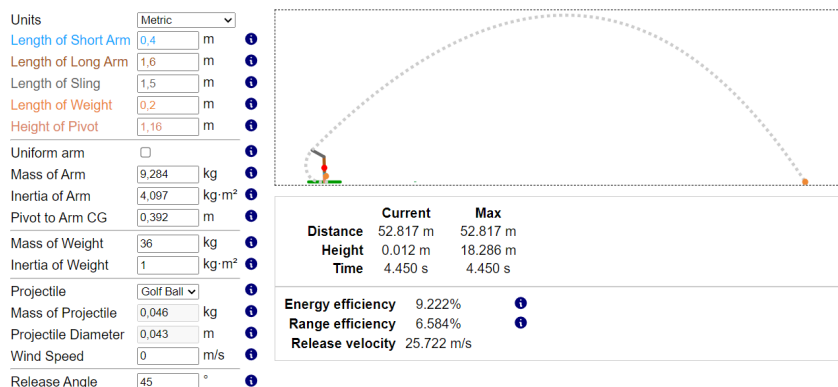
7.7 Spreminjanje kota izstrelitve

Kot / °	dolžina / m	višina / m	čas / s
9	38,645	5,154	2,3
18	49,848	7,679	2,917
27	57,223	11,139	3,55
36	57,933	14,877	4,033
45	52,817	18,286	4,45
54	44,251	20,783	4,717
63	33,518	22,098	4,85
72	21,454	22,102	4,85

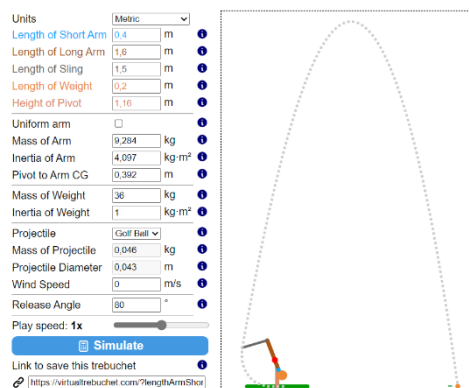


Slika 27: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od kota izstrelitve

Teoretično je brez upoštevanja zračnega upora optimalen kot izstrelitve izstrelka 45° . Če se kot izstrelitve poveča, se poveča dosežena višina leta in zmanjša dolžina leta, saj izstrelki leti bolj navpično in opiše krajšo krivuljo leta. Če se kot izstrelitve zmanjša pa izstrelki leti bolj položno in opiše nižjo tirnico leta. Pričakovali bi, da bi izstrelki zaradi večje začetne hitrosti v vodoravni smeri glede na enačbo (37) leteli dlje, vendar pa ima nižjo navpično začetno hitrost in zato po enačbi (35) prej pade na tla, zato je dolžina leta dejansko krajša. Optimum leta je v realnosti ob upoštevanju zračnega upora pri nekoliko nižjih kotih od 45° . V našem primeru je to kot 36° . Pri izmetu izstrelka pod kotom 90° pa dobimo navpični met.



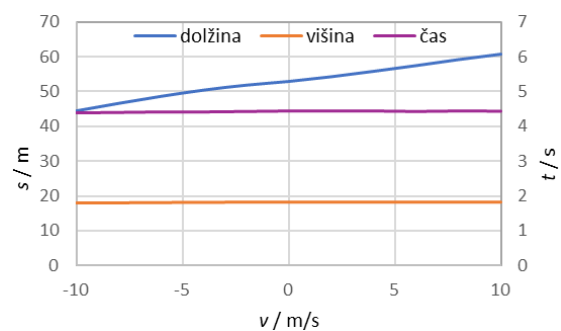
Slika 28: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka pri majhnem kotu izstrelitve



Slika 29: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka pri velikem kotu izstrelitve

7.8 Spreminjanje hitrosti vetra

veter / m/s	dolžina / m	višina / m	čas / s
-10	44,341	17,871	4,383
-8	46,516	17,976	4,4
-6	48,54	18,076	4,417
-4	50,323	18,164	4,417
-2	51,741	18,238	4,433
0	52,817	18,286	4,45
2	54,155	18,297	4,45
4	55,727	18,282	4,45



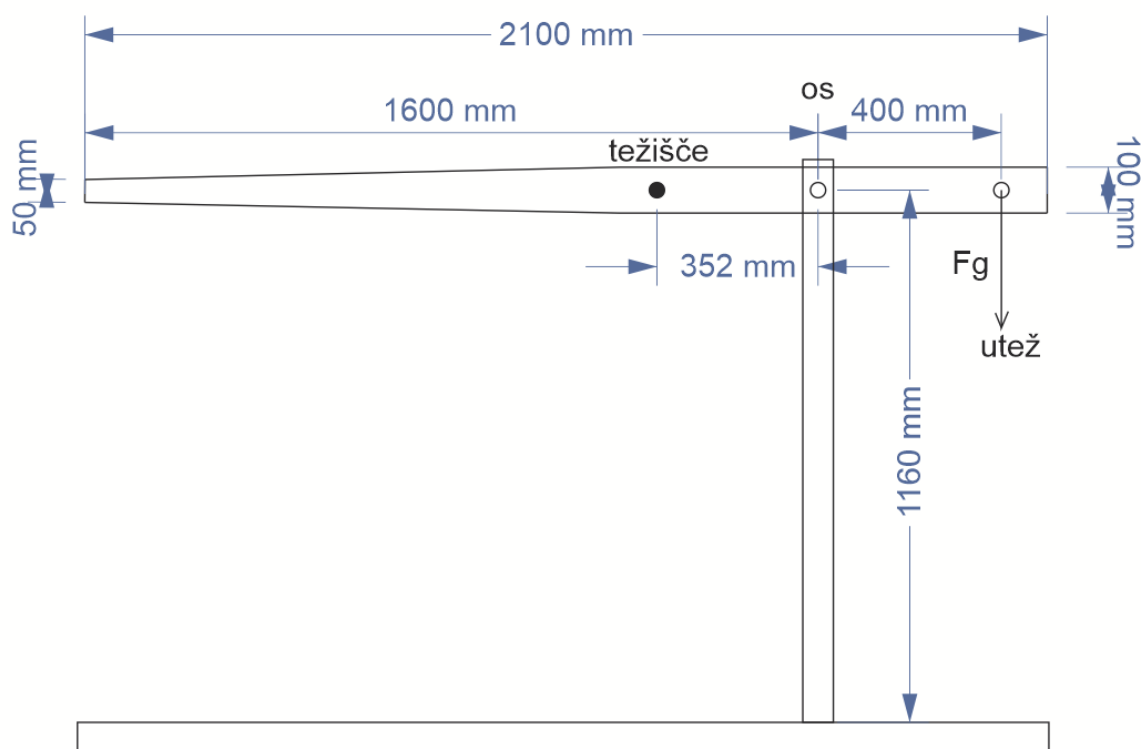
Slika 30: Dosežena dolžina, višina in čas leta izstrelka v odvisnosti od vetra

Spreminjanje vetra vpliva le na vodoravno komponento hitrosti, zato se višina leta in čas leta ne spreminjata, saj ju opisuje le navpična komponenta hitrosti leta. Dolžina leta se daljša z zviševanjem hitrosti vetra v smeri meta izstrelka in znižuje z zviševanjem hitrosti v smer proti metu izstrelka.

8 Izgradnja in preizkus modela triboka

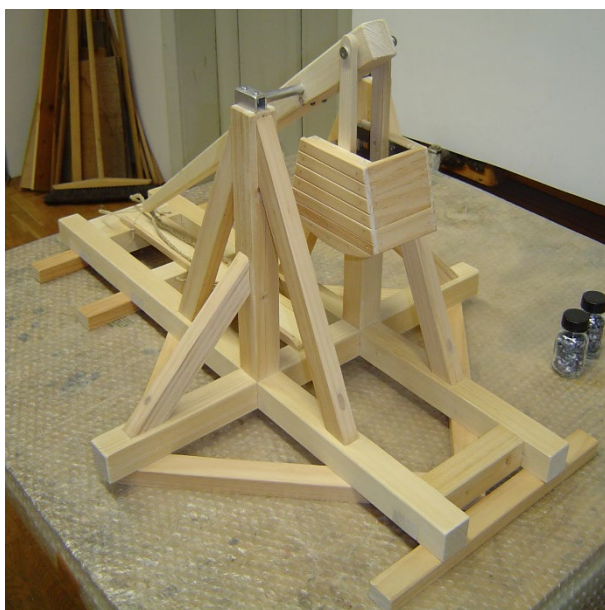
Vzporedno z izdelavo raziskovalne naloge je potekala tudi izdelava modela triboka. Z njegovo pomočjo sva preverila ujemanje dejanskega dosega katapultiranega izstrelka z rezultati, ki jih da računski model⁴¹.

Z računskim modelom sva izvedla simulacije v prejšnjem poglavju. S simulacijami sva predvidela, da tribok žogico za golf izstreli približno 50 m daleč. Z računskim modelom so bile določene tudi dimenzije sestavnih delov modela triboka - višina podstavka, dolžina in vpetje roke, dolžina vrvice, teža protiuteži in izstrelka. Model triboka je bil narejen po zgledu dveh tribokov, ki so ju naredili v Narodnem muzeju Slovenije in knežjem dvorcu v Celju. Načrt za tribok je bil narejen po osnutku, ki sta ga pripravila dr. Tomaž Lazar (kustos) in Damjan Jesenovec (restavrator) iz Narodnega muzeja Slovenije.



Slika 31: Skica modela triboka z osnovnimi merami

⁴¹ Spletni simulator, <https://virtualtrebuchet.com>, dostopano dne 26.2.2024



Slika 32: Modela triboka iz Narodnega muzeja Slovenije (levo) in knežjega dvorca v Celju (desno).

Konstrukcija modela triboka je narejena iz lepljenega hrastovega lesa, ki je na najbolj izpostavljenih in obremenjenih delih okovan. Lesne zveze so izvedene z vijachenjem. Okvir ima široko razpeto podnožje, ki poskrbi za njegovo stabilnost triboka. Stebriča, v katera je na višini 117 cm vpeto vrtilišče vzvoda, sta podprta z ročicami. Roka dolžine 210 cm ima vrtilišče na četrtini dolžine. Na krajšem delu je obešena lesena škatla s protiutežjo s skupno maso 36 kg, na daljšem delu pa vrv dolžine 1,5 m, na koncu katere je mošnja z izstrelkom - žogico za golf teže 46 g. Vrv z mošnjo je pred izstrelitvijo položen v lesen kanal, pritrjen na podnožje. Kanal je namenjen kontroliranemu drsenju vrvi z mošnjo do trenutka, ko se mošnja dvigne od tal.



Slika 33: Lesen zaboj s protiutežjo (levo) in podnožje triboka (desno) med izdelavo.



Slika 34: Lesni spoj z zamaskiranimi vijaki (levo) in kanal za namestitev izstrelka (desno).



Slika 35: Mošnja z vstavljenim izstrelkom (levo) in vpetje mošnje z dvema vrvicama na koncu roke (desno)



Slika 36: Model triboka med testiranjem.

Pomemben del triboka je mošnja, v katero se položi izstrelek. Narejena je na način, da izstrelek izvrže pod optimalnim kotom (45°). Med poizkusi se je sprostitvev mošnje izvajala na dva načina:

Prvi način je bil z vrvico, ki je mošnjo v pravem trenutku zaustavila, da je izvrgla izstrelek (slika spodaj levo). Drugi način je bil z vpetjem vrvic mošnje. Ta je na konec ročice vpeta z dvema vrvicama. Vpetje ene od vrvic je izvedeno na način, da se vrvica pod določenim kotom sname (slika spodaj desno). Mošnja se takrat sprosti in izvrže izstrelek.



Slika 37: Mošnja s pripeto vrvico, ki zaustavi mošnjo v zelenem kotu izmeta (levo) in vpetje mošnje, ki pod določenim kotom samodejno sprosti eno vrvico, s katero je vpeta mošnja (desno).

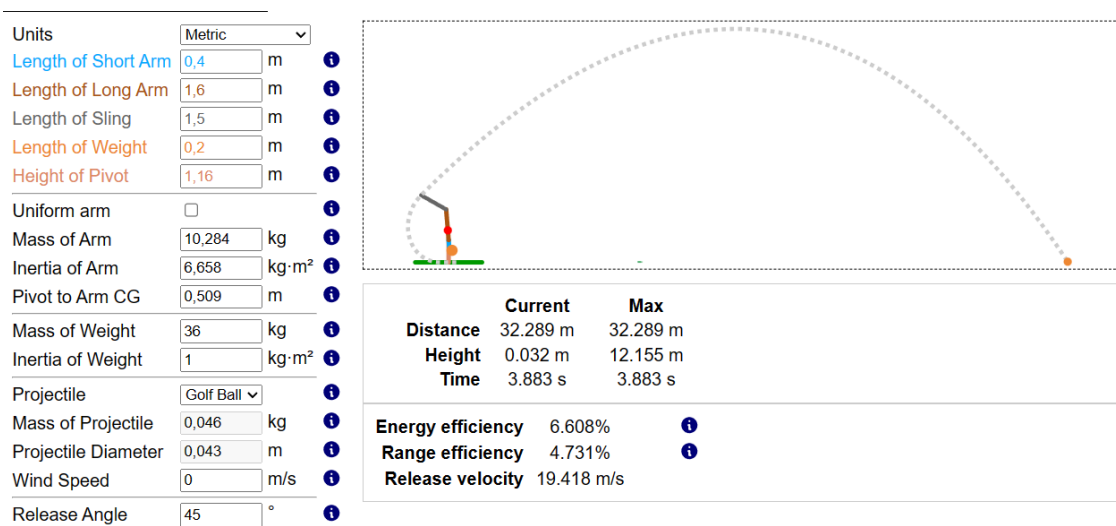
Poizkus delovanja triboka je bil izveden 17. marca 2023 pri delavnici izdelovalca. Ker v bližnji okolici ni ravnega terena, je bilo potrebno tribok podložiti, da je stal v vodoravnem položaju. Izvedenih je bilo veliko poizkusov, med katerimi smo poizkusili oba načina sprostitve mošnje in pri obeh načinih spreminjali točko njene sprostitve. Za natančno določitev točke sprostitve mošnje smo si pomagali s počasnimi posnetki predhodnih poizkusov. Najdaljši domet žogice je meril 25 m. Ker je teren izletišča ni bil vodoraven ampak nekoliko privzdignjen, je bila razdalja nekoliko krajša, kot bi bila pri vodoravnem izletišču. Ocenjujemo, da bi žogica v primeru vodoravnega izletišča poletela še nekaj metrov dlje.



Slika 38: Izvajanje poskusov metov žogice za golf

Glede na simulacije bi morala žogica leteti približno 50 m, zato smo iskali vzroke za razhajanje. Izkazalo se je, da je bil na koncu roke (vzvoda) na modelu triboka dodan masiven kovinski okov. Skozenj je bila vtaknjena navojna palica z vijaki, maticami in zankami za vpetje vrvice. Sama vrstica pa je bila vpeta s kovinskimi karabini na obeh koncih – na strani vpetja na roko in na strani mošnje.

Glede na dejanske mere roke sva izračunala nov izmik masnega središča od vrlišča (0,509 m), novo maso (10,284 kg) in vztrajnostni moment roke (6,658 kgm²), pri čemer sva ocenila dodatno maso kovinskih delov na koncu daljše ročice na 1 kg. S temi novimi vhodnimi parametri sva ponovila simulacijo leta in dobila rezultat 32,29 m, kar se bolj približa rezultatom našega poizkusa.



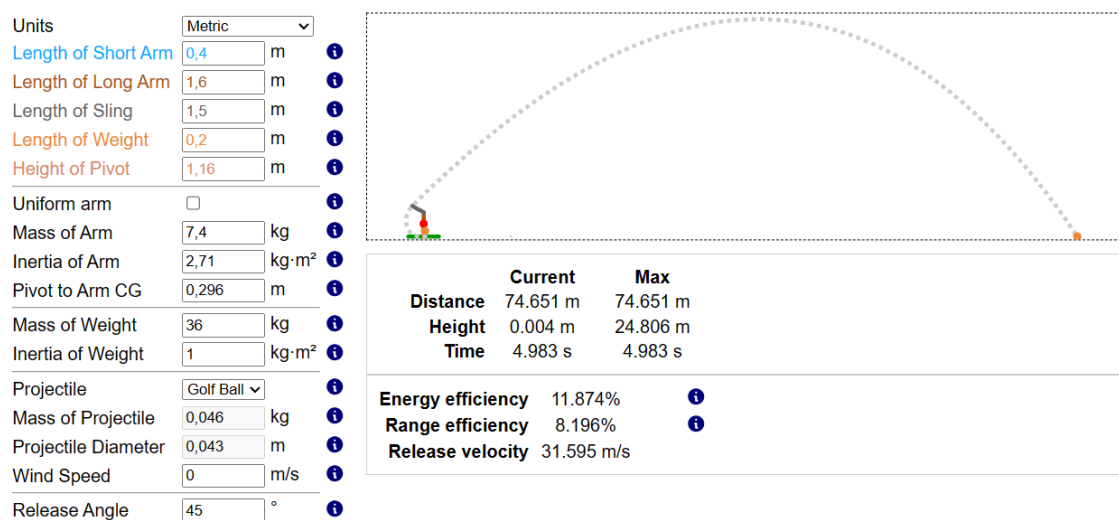
Slika 39: Ponovljena simulacija leta s prilagojenimi parametri glede na izdelan model triboka

Izkaže se, da masa delov roke, ki so najbolj oddaljeni od vrlišča zelo vpliva na vztrajnostni moment, saj je ta odvisen od kvadrata razdalje. Zato je pri načrtovanju roke zelo pomembno, da je ta predvsem na daljšem koncu čim lažja.

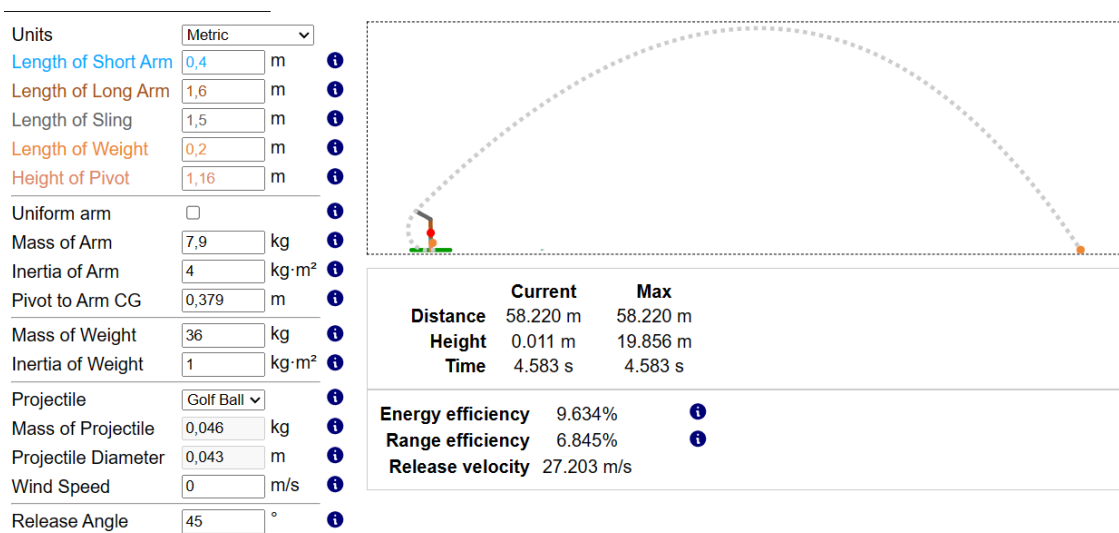
Od tod sva določila smernice za izboljšanje modela triboka in sicer, da bi se roka začela ožati takoj pri vrlišču enakomerno do konca, kjer bi bila široka in visoka le 4 cm. Na ta način bi se masa roke zmanjšala na 7,4 kg, izmik masnega središča od vrlišča na 0,296 m in vztrajnostni

moment roke na $2,71 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. S temi podatki predvidevava, da bi se glede na simulacije, dolžina meta ob enakih pogojih podaljšala na 74,6 m.

Ker mora biti roka na koncu vsaj nekoliko zaščitena s kovinskim okovom, sva dodala še minimalno maso 0,5 kg, kar je povečalo maso roke na 7,9 kg, izmik masnega središča od vrtilišča na 0,379 m in vztrajnostni moment roke na $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Dodatek pol-kilogramskega okova na koncu roke zelo vpliva na doseženo dolžino meta, saj se zmanjša na 58,22 m. Pri popravkih bova vsekakor težila k tem, da bo ta dodatna masa čim manjša. Obe simulaciji sta prikazani na slikah spodaj.



Slika 40: Simulacija leta z zoženo roko



Slika 41: Simulacija leta z ožjo roko, z upoštevanjem mase kovinskega oklopa na koncu roke

9 Zaključek

Pri proučevanju delovanja in konstrukcije triboka, sva prišla do zelo globokih spoznanj s področja fizike, tehnike in zgodovine. Celotna izpeljava projekta je bila neprecenljiva izkušnja. Dosegla sva namreč vse zastavljene cilje naloge, saj sva s pomočjo mentorjev in mojstrov raziskala tribok in pri tem spoznala, na kako zanimiv način so lahko povezane tehnika, fizika in zgodovina.

Glede na zastavljena raziskovalna vprašanja sva potrdila, da je delovanje triboka možno delno opisati na podlagi znanja osnovnošolske fizike in zato lahko tribok lahko služi kot nazoren prikaz obravnavanih fizikalnih mehanizmov. Za bolj detajlne opise delovanja pa potrebujemo globlje znanje fizike, ki sega že na gimnazijsko raven, kot so pojmi vodoravnega in poševnega meta, in še posebej masnega središča in vztrajnostnega momenta. A vse te pojme se da zelo nazorno povezati z znanji, ki jih pridobimo v dveh letih osnovnošolske fizike. Vodoravni in poševni met se lepo izpeljeta iz enakomernega in enakomerno pospešenega premega gibanja, medtem ko se vztrajnostni moment neposredno naveže na drugi Newtonov zakon pri premem gibanju, le da tokrat gre za kroženje. Tudi določitev masnega središča je logična in se lahko lepo poveže z izkustvi, recimo pri iskanju ravnovesne lege raznih predmetov. Zato meniva, da sva hipotezo (a) večji meri potrdila, sploh, če vključimo še nekaj izbranih poglavij srednješolske fizike.

A kljub temu z uporabo izpeljanih fizikalnih enačb z omenjenih področij fizike ni mogoče natančno izračunati dolžino, višino in čas leta izstrelka, zato sva se zatekla k simulatorju, ki upošteva tudi druge učinke, kot so upor zraka, vrtenje protiuteži, težo izstrelka in vrvice, itd.... Iz tega sklepava, da je hipoteza (b) ovržena.

Pri raziskavi zgodovinskih dejstev sva potrdila, da je bil tribok pomembno strateško orožje v srednjem veku, saj je skoraj tisoč let zaznamoval zgodovino vojskovanja, večkrat pa je odigral tudi ključno vlogo na bojišču. Uporabljalo se ga je tudi na Slovenskem, saj sva v literaturi zasledila omembo triboka kot del popisa inventarja na Škofjeloškem gradu. Hipoteza (c) je torej potrjena.

Z izdatno pomočjo mojstrov smo načrtali in izdelali lesen, delujoči tribok in varno demonstrirali njegovo delovanje. Do postavitve triboka v učilnico na prostem bo na njem izvedeno še nekaj izboljšav. S prilagoditvami debeline in okova roke bo izboljšano njeno težišče in zmanjšan vztrajnostni moment. Spremenjeno bo tudi vrtilišče, da bo med vrtenjem povzročalo manj trenja (teflonski ležaj). Na vrtilišče roke bo montiran varnostni mehanizem, ki bo preprečil neželeno sprožitev triboka. Dodan bo tudi mehanizem za oddaljeno sprostitve roke pred sprožitvijo. Tako je tudi hipoteza (d) potrjena.

Naučila sva se izpeljati projekt od njegove zasnove do praktične izvedbe in pri tem spoznala delovanje fizikalnih mehanizmov v praksi, hkrati pa tudi njihove omejitve, saj so se zaradi poenostavljenih izračunov rezultati razlikovali od simulacij z realističnimi modeli. S tem sva spoznala, kako široko je področje fizike in kako majhen del uspemo odšteti v teh dveh letih osnovnošolskega programa. Kljub temu lahko z osnovnošolskim znanjem fizike razumemo delovanje sveta v dovoljšni meri, da lahko sklepamo, kako spremembe posameznih parametrov vplivajo na končni rezultat. To sva v primeru triboka tudi pokazala.

Želiva si, da bi eksperiment služil popestritvi pouka in vzpodbudil zanimanje še nadaljnjim generacijam otrok, ter da bi ga učitelji redno in na različne načine vključevali v učni program.

Literatura

- <https://en.wikipedia.org/wiki/Trebuchet>, dne 27. 12. 2023
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Mohism>, dne 26.12.2023
- <https://www.britannica.com/technology/trebuchet>, dne 27. 12. 2023
- <https://fran.si/iskanje?View=1&Query=balista> dne 29.12.2023
- <https://www.aaas.org/trebuchets-and-their-modern-use>, dne 12.1. 2024
- <https://www.punkinchunkin.com/the-competition/results/current-records/>, dne 27. 12. 2023
- <https://hiddenscotland.co/the-siege-of-stirling-castle/>, dne 27. 12. 2023
- <https://danspencer.info/2018/11/10/the-siege-of-stirling-castle-in-1304/>, dne 13.1. 2024
- <https://exarc.net/issue-2018-3/at/traction-trebuchet>, dne 30.12. 2023
- <https://medievalbritain.com/type/medieval-life/weapons/medieval-trebuchet/>, dne 27. 12. 2023
- <https://www.instructables.com/The-Insensible-a-counterweight-trebuchet/>, dne 27. 12. 2023
- <https://sl.wikipedia.org/wiki/Tribok>, dne 27. 12. 2023
- Andrea Hopkins, "Knights," Chancellor Press, 1999
- Phillippe Contamine, "War in the Middle Ages," Blackwell Publishers, UK, 1984
- Tomaž Lazar, Poznosrednjevska orožarna na Loškem gradu. Zgodovinski časopis, letnik 66, številka 1/2, 2012, str. 8-45.
- B. M. Požarnik, M. Šarić, B. Šteh, Izkušveno učenje, Znanstvena založba Filozofske fakultete, 2021.
- <https://eucbeniki.sio.si/>, dne 6. 1. 2024
- <https://si.openprof.com>, dne 15. 1. 2024
- [https://www2.arnes.si/~oskrat11s/fizika/vsebine/8 razred/Krozenje.pdf](https://www2.arnes.si/~oskrat11s/fizika/vsebine/8%20razred/Krozenje.pdf), dne 29. 12. 2023
- Professor Dave, Conservation of Energy: Free Fall, Springs, and Pendulums, <https://youtu.be/OTK9JrKC6EY?si=5OqwovUDXt330i>, dne 12. 1. 2024
- http://projlab.fmf.uni-lj.si/arhiv/2004_05/naloge/izdelki/optikrogla/linki/Teorija.html, dne 12. 1. 2024
- Natalija Podjavoršek, Poševni met, <https://youtu.be/3s9UYyIcbso>, dne 12. 1. 2024
- <http://www.geogebra.si/>, dne 14. 1. 2024
- <http://allthematters.com/physics/oblique-throw/>, dne 6. 1. 2024
- <https://www.volkswagen.si/tehnici-leksikon/navor>, dne 24. 1. 2024
- <https://www.avtofil.si/sila-navor-delo-moc/>, dne 27. 1. 2024
- https://sl.wikipedia.org/wiki/Vztrajnostni_moment, dne 15. 1. 2024
- <https://virtualtrebuchet.com/>, dne 26. 2. 2024
- The organic chemistry tutor, Center of Mass Physics Problems - Basic Introduction, <https://www.youtube.com/watch?v=2uszSnvzBEU>, dne 2. 2. 2024