

Pritisk, ki dviguje svet: Ukročena moč tekočega vzvoda

Skrivnost londonskega podzemnega omrežja



London, konec 19. stoletja. Nad reko Temzo se dviguje mogočni Tower Bridge, pravkar dokončan inženirski čudež tistega časa. Nenadoma se iz jutranjih meglic prikaže visok parnik, ki želi zapluti proti mestnemu pristanišču. A most je prenizek, saj je namenjen prečkanju reke s kočijami, ki težko vozijo v strm klanec.

Inženirji so našli na prvi pogled silno preprosto rešitev. Most se lahko na sredini dvigne kot zapornica, tudi visoke ladje pa nemoteno zaplujejo pod njim. Vendar obstaja manjša težava. Smo v 19. stoletju, ko električnih motorjev v sodobni obliki še ni, parni stroji na samem mostu pa bi bili pretežki, nevarni in prepočasni. A na presenečenje opazovalcev se orjaški most vseeno z lahkoto, tekoče in skoraj brez hrupa dvigne visoko proti nebu.

Kje se je skrivala ta nevidna, velika moč? Odgovor se ni nahajal na samem mostu, temveč globoko pod tlakovanimi ulicami britanske prestolnice. Tam je potekala več kot 300 kilometrov dolga mreža masivnih železnih cevi, napolnjenih z vodo pod izjemno visokim tlakom. Ta hidravlični "krvni obtok" mesta ni dvigoval le mostu. Poganjal je luksuzna dvigala v prestižnih hotelih, težka premična prizorišča v londonskih gledališčih, orjaške žerjave v pristaniščih ter masivne stiskalnice v tovarnah po celotnem mestu.

Tisoče naprav po vsem Londonu je bilo povezanih v en sam centralni hidravlični sistem. Daleč stran od mestnega jedra, v masivnih črpališčih ob reki, so parni stroji neprestano črpali vodo in jo stiskali pod orjaške uteži – hidravlične stiskalnice. Ko je delavec na drugem koncu mesta odprl ventil, je voda pod divjim tlakom v trenutku opravila mehansko delo. London je tako postal prvo vlemesto na svetu, ki ga nista poganjala elektrika ali lokalni parni kotli, temveč čista hidravlična moč vode, razposlana po cevovodu.

Eksplozija v kapljici vode*

A zgodba o moči hidravličnega vzvoda se začne že mnogo prej, natančneje na mestnem trgu v francoskem mestu **Rouen** leta 1646. Tistega dne je zbrana množica radovednežev strmela v mladega, komaj 23-letnega genija **Blaisea Pascala**, ki je pripravljaval nenavaden poskus.

Sredi trga je stal masiven, močan hrastov sod, do vrha napolnjen z vodo. Bil je tako trdno zatesnjen, da ni spustil niti kapljice, železni obroči okoli njega pa so jamčili, da lahko zdrži ogromen pritisk. Pascal je na zgornji strani soda naredil le majhno odprtino in vanjo vstavil tanko, a nekaj metrov visoko stekleno cev. Spoj med cevjo in sodom je nepredušno zatesnil.

Ljudje so se muzali; kako bi lahko ta krhka steklena cevka vplivala na mogočni hrastov sod? Pascal je nato mirno stopil na balkon v tretjem nadstropju obrtniške hiše, ki se je dvigala nad trgom, tik do vrha cevi. V roki je držal navaden vrč z vodo.

Množica je obmolnila, ko je začel vodo iz vrča počasi zlivati v ozko cev. Voda je v cevi hitro naraščala. En vrč, dva... Cev se je polnila, v sod pa je pravzaprav priteklo zelo malo vode, saj je bila cev izjemno tanka.

Inženirji tistega časa bi zamahnili z roko: "Tako malo vode ne more imeti nobene moči!"

A ko je voda v tanki cevi dosegla sam vrh, se je zgodilo nekaj neverjetnega. Iz soda se je zaslišalo grozeče prasketanje lesa. Množica je zavzdihnila. V naslednjem trenutku je po trgu odjeknil silovit pok, podoben strelu iz topa. Debeli železni obroči so se z naporom raztegnili, močne hrastove doge pa so podivjano popustile. Iz soda je v curkih brizgnila voda, ko se je pod pritiskom na videz nedolžnih nekaj decilitrov vode v visoki cevki dobesedno razletel.



Pascal je dokazal nemogoče. Tlak, ki ga je ustvaril težki vodni steber v visoki cevki, se je neokrnjen prenesel na celotno notranjo površino soda. Majhna sila v cevki se je pretvorila v orjaško, uničujočo silo na stene soda. To je bil rojstni dan hidravličnega vzvoda – spoznanja, da lahko s tekočino in tlakom tisočkrat povečamo svojo moč, ne glede na to, ali želimo razstreliti sod ali dvigniti mogočni Tower Bridge.

** Zgodovinski viri sicer pravijo, da je zgodba o Pascalovem sodu po vsej verjetnosti legenda oziroma miselni poskus, ki se v resničnem življenju v takšni obliki ni nikoli zares zgodil. Blaise Pascal je svoja odkritja o hidravliki in tlaku namreč natančno popisal v delu *Traité de l'équilibre des liqueurs*, ki ga je napisal okoli leta 1648. V knjigi podrobno opisuje svoje dejanske poskuse, a o hrastovim sodom na trgu v Rouenu ni zapisane niti ene besede. O njem niso poročali niti njegovi sodobniki ali biografi. Še vedno pa držijo njegova odkritja in poskusi v manjšem merilu.*

Zdaj ste na vrsti vi! Postanite hidravlični inženirji in z lastnimi rokami razkrijte skrivnost te nevidne sile, ki jo je pred stoletji ukrotil Pascal.

V tej tekmovalni nalogi boste z uporabo preprostih medicinskih brizg in cevke, napolnjene z vodo, sestavili svoj lasten hidravlični sistem. Natančno boste izmerili, kako se premiki in sile pretvarjajo med bati različnih velikosti, ter raziskali, zakaj nam prenos tlaka skozi tekočino omogoča tako nepričakovano mehansko prednost. Na koncu boste svoje znanje uporabili za gradnjo delujočega hidravličnega dvigala. Ali lahko z ukročeno močjo vode v brizgi dvignete breme, ki bi bilo za vaše prste sicer pretežko?

Potrebni pripomočki

Za izvedbo naloge potrebujemo:

- Medicinske plastične brizge različnih prostornin (npr. 2x 1 ml ali 2,5 ml, 2x 20 ml, 1x 50 ml ali 100 ml – dostopne v lekarnah ali trgovinah z medicinskimi pripomočki)
- Prozorno PVC cevko (dolžine okoli 50–100 cm), ki se tesno prilega na nastavke brizg – notranji premer 4 mm (dobavljiva v tehničnih trgovinah)
- Posodo z vodo
- Ravnilo
- Lepilni trak
- Konstrukcijski material za izdelavo hidravličnega vzvoda: lesene sladoledne palčke, lepenka, vroče lepilo, plastične kableske vezice ali Lego kocke
- Različna bremena (vijaki, žebliji, kovinske kroglice, riž)
- Digitalno kuhinjsko tehtnico
- Vodoodporno podlogo ali večjo brisačo za zaščito delovne površine.
- (dodatno) Kapljico jedilne barve ali črnila

Opis poteka naloge

Če želimo izdelati hidravlično dvigalo, moramo najprej priskrbeti ustrezne bate. Lahko jih izdelamo sami, a hitro naletimo na težavo pri vodnem tesnjenju sistema ob močnem pritisku. Na srečo zelo enostavno dobimo že izdelane hidravlične bate različnih velikosti. To so pravzaprav vsakdanje medicinske injekcije. Te prodajajo v domala vseh lekarnah in specializiranih trgovinah z medicinskimi pripomočki (kot plastične brizgalki za enkratno uporabo).

Navadno so pakirane posamično, brez igel, lahko pa izrecno povemo, da igel ne potrebujemo. Izberimo več različnih brizgalk, odvisno od tega, kaj ima lekarna na voljo. Najbolje se obnesejo velikosti med 2,5 ml in 20 ml. Potrebujemo vsaj dva kosa vsake brizgalki.

Naslednji ključni gradnik je PVC cev. Na večino brizgalk se najbolje prilega cev z notranjim premerom 4 mm. Zunanji premer cevke pri tem ne igra večje vloge. Takšne cevke dobimo na vrtnem oddelku trgovin s tehničnim blagom, v precejšnjo pomoč pa nam bo prazna brizgalka, saj bomo lahko še pred nakupom preverili ustrezno prileganje na njeno ustje.

Za čisto prvi poskus potrebujemo še ravnilo, posodo z vodo (ali kar kuhinjsko korito), ter brisačo, če bodo naši spoji popustili.

Za začetek izberimo dve brizgalki z različno prostornino (na primer 5 in 20 ml), a ne v volumenskem razmerju več kot 1:10. Cevko odrežemo na razdaljo približno 50 cm in se lotimo polnjenja sistema z vodo.

Iz brizge, cevi, in šob moramo odstraniti vse zračne mehurčke, saj nam bodo ti precej pokvarili delovanje poskusa. To najlažje naredimo pod vodo. Brizge in cevi povsem potopimo, večkrat napolnimo in spraznimo, ter v cevko usmerimo vodni curek. Nato manjšo brizgo povsem izpraznimo, večjo pa napolnimo do polovice. Sistem pod vodo povežemo s cevko.

Sedaj izmerimo v kakšnem razmerju se premikata bata brizgalk, ko enega izmed njih počasi stiskamo. Pomagamo si z ravnilom in izmerimo kakšno spremembo povzroči premik prvega bata v primerjavi z drugim in obratno. Pri tem si zapisujemo, kakšna je sprememba količine vode v brizgalki. Te že imajo odtisnjeno mililitrsko skalo na plastičnem tulcu. Izpolnimo tabelo.

Brizgalka #1		Brizgalka #2	
Premik bata [mm]	Količina vode [ml]	Premik bata [mm]	Količina vode [ml]
0 mm			
10 mm			
20 mm			
30 mm			
dopolni			
dopolni			
dopolni			
dopolni			
dopolni			
dopolni			

Nato eno izmed brizgalk zamenjamo z večjo in poskus ponovimo. Zopet moramo iz zaprtega hidravličnega sistema odstraniti vse zračne mehurčke, kar storimo s sestavljanjem pod vodo. Izpolnimo novo tabelo, ter si označimo katero izmed brizgalk smo zamenjali. Če imamo na voljo še četrto velikost brizgalk poskus zopet ponovimo, vendar pazimo, da volumensko razmerje (največja količina vode, ki jo brizgalka lahko drži) ni večje od 1:10.

Razmislimo, kako je povezana velikost brizgalke in s tem volumen izpodrinjene vode s premikom bata. Ali se volumen vode ohranja? Kaj določa razmerje med premikom enega in drugega bata?

Vendar premik ni vse, ključna prednost hidravličnega sistema je v povečevanju sile, s katero opravimo delo, premikamo sodobne stroje, zapornice ali stiskalnice. Kako je mogoče, da s preprosto črpalko dvigujemo težka bremena, ki jih prelaga bager?

Skrivnost nevidnega tlaka

Odgovor se skriva v fizikalni lastnosti tekočin, ki jo imenujemo nestisljivost, ter v načinu, kako se v njih širi tlak.

Tlak je fizikalna količina, ki meri, kako močno in na kako veliko površino deluje pravokotna sila. Splošna enačba za tlak (p) je razmerje med delujočo pravokotno silo (F) in površino oziroma ploskvijo (A), na katero ta sila deluje:

$$p = \frac{F}{A}$$

Osnovna enota za merjenje tlaka je paskal (Pa), kar ustreza delovanju sile 1 N na površino 1 m^2 ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$).

Hidrostatski tlak

Kadar je tekočina v posodi pod vplivom težnosti, teža zgornjih plasti tekočine pritiska na spodnje plasti. Tlaku, ki nastane zaradi lastne teže tekočine, pravimo hidrostatski tlak. Izračunamo ga s formulo:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Pri tem je:

- ρ — gostota tekočine (kg/m^3),
- g — težnostni pospešek ($9,81 \text{ m/s}^2$),
- h — višina oziroma globina stebra tekočine (m).

Iz enačbe izhaja ključno spoznanje: hidrostatski tlak na dnu tekočinskega stebra je odvisen le od globine (višine h) in gostote tekočine (ρ), ne pa od širine posode. Zaradi tega zelo visok in ozek steber tekočine ustvari enak hidrostatski tlak na dnu kot enako visok, a izjemno širok rezervoar.

Nestisljivost tekočin in Pascalov zakon

Fizikalno obnašanje hidravličnih sistemov temelji na razliki med plini in kapljevinami:

- Plini so stisljivi — ob povečanju zunanega tlaka se molekule približajo, volumen plina pa se zmanjša.
- Kapljevine (npr. voda ali olje) so praktično nestisljive — ob delovanju zunanje sile se njihov volumen ne spremeni.

Ker se tekočina pod pritiskom ne more stisniti, velja Pascalov zakon:

Zunanji tlak, ustvarjen na ujetu nestisljivo tekočino, se neokrnjen prenaša po celotni tekočini v vse smeri ter deluje pravokotno na vse stene posode.

Hidravlično povečanje sile (Hidravlični vzvod)

Če s cevjo povežemo dva valja z bati različnih površin (A_1 in A_2) ter sistem napolnimo s tekočino, se zunanji tlak (p), ustvarjen na prvem batu, v celoti prenese do drugega bata.

Ker je tlak p na obeh mestih enak ($p_1 = p_2$), iz osnovne definicije tlaka sledi:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Če enačbo preuredimo za izhodno silo F_2 , dobimo:

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

To razmerje pomeni:

- Če je površina izhodnega bata (A_2) npr. 5-krat večja od površine vhodnega bata (A_1), bo izhodna sila (F_2) prav tako 5-krat večja od vhodne sile (F_1).
- Tekočina deluje kot mehanski pretvornik oziroma "tekoči vzvod", ki omogoča poljubno povečevanje izhodne sile z izbiro ustreznega razmerja površin batov.

Zakon o ohranitvi mehanskega dela

Povečanje sile ne pomeni ustvarjanja brezplačne energije, saj velja zakon o ohranitvi energije oziroma mehanskega dela. Delo, vloženo na prvem batu, mora biti enako delu, ki ga opravi drugi bat:

$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$$

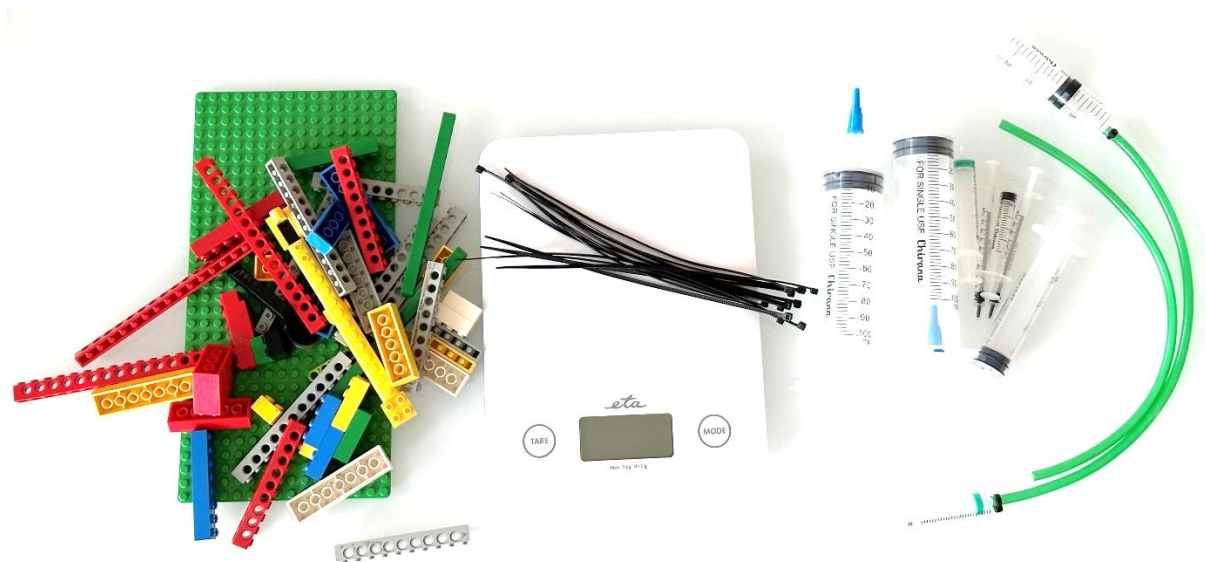
Ker je izhodna sila F_2 večja od vhodne sile F_1 , se mora premik drugega bata (s_2) sorazmerno zmanjšati:

$$s_2 = s_1 \cdot \frac{A_1}{A_2}$$

Dobitek pri sili se torej vedno izravna z izgubo pri razdalji: manjši bat se mora premakniti za znatno daljšo pot (s_1), da se večji bat premakne za majhen odmik (s_2).

Hidravlična stiskalnica

Sedaj, ko poznamo fizikalno ozadje, bomo teorijo preizkusili v praksi in izdelali svojo stiskalnico, s katero bomo izmerili hidravlični vzvod.

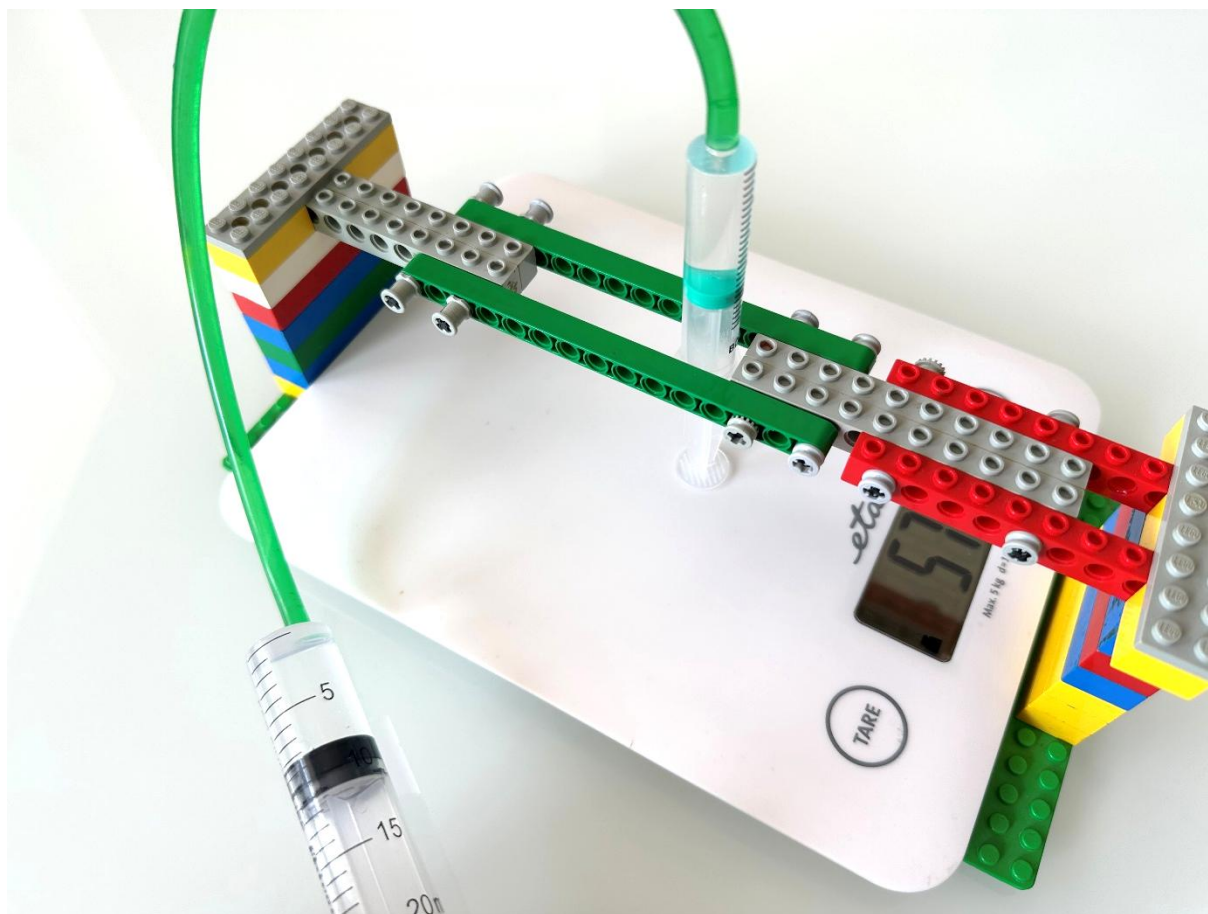


Slika 1: Pripomočki za meritev hidravličnega vzvoda

Potrebujemo dve različni velikosti brizgalk, ki smo ju povezali v hidravlični sistem, kot je to opisano v prvem delu naloge. Z digitalno kuhinjsko tehtnico bomo izmerili silo, ki jo lahko ustvari ena izmed brizgalk.

Za gradnjo hidravlične stiskalnice lahko uporabimo različne materiale, od lesenih sladolednih palčk, ki jih lepimo z lepilom za vroče lepljenje, do kovinskih profilov, ki jih sestavljamo s pomočjo vijakov in matic.

Najenostavneje bomo sicer konstrukcijo sestavili iz Lego kock. Primer, sestavljanja prikazuje spodnja slika:



Slika 2: Prikaz izgradnje hidravlične stiskalnice

Nad kuhinjsko tehtnico moramo vpeti tulec brizgalke, tako da se bat prosto giblje in gleda navzdol. Bat naj se nežno dotika merilne površine tehtnice. Tehtnico nato vklopimo in jo s pritiskom na tipko **TARE** ničimo na 0 g.

Vhodno (pogonsko) brizgalko moramo prav tako stabilno fiksirati, na primer ob rob mize ali v namensko nosilno ogrodje iz Lego kock. Pri tem pazimo, da spodnji nastavek s PVC cevko prosto izstopa in ni prepognjen ali stisnjen, saj morata voda in hidravlični tlak neovirano potovati.

Sedaj bomo natančno izmerili, kako se vhodna sila pritiska pretvori v izhodno silo na tehtnici:

1. Z enim prstom nežno pritismo na bat vhodne brizgalke. Opazujemo, kako se na digitalnem zaslonu tehtnice pod izhodno brizgalko v trenutku spremeni odčitana masa v gramih.
2. Namesto pritiska s prstom na bat vhodne brizgalke postavimo breme z znano maso (npr. utež ali posodico z maticami, ki smo jo predhodno stehali, $m_1 = 100$ g).

Vhodno silo F_1 izračunamo po formuli:

$$F_1 = m_1 \cdot g$$

pri čemer ustreza $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ (oziroma za poenostavljen izračun $g \approx 0,00981 \text{ N/g}$).

Na tehtnici pod izhodno brizgalko odčitamo izmerjeno maso m_2 v gramih ter izračunamo izhodno silo.

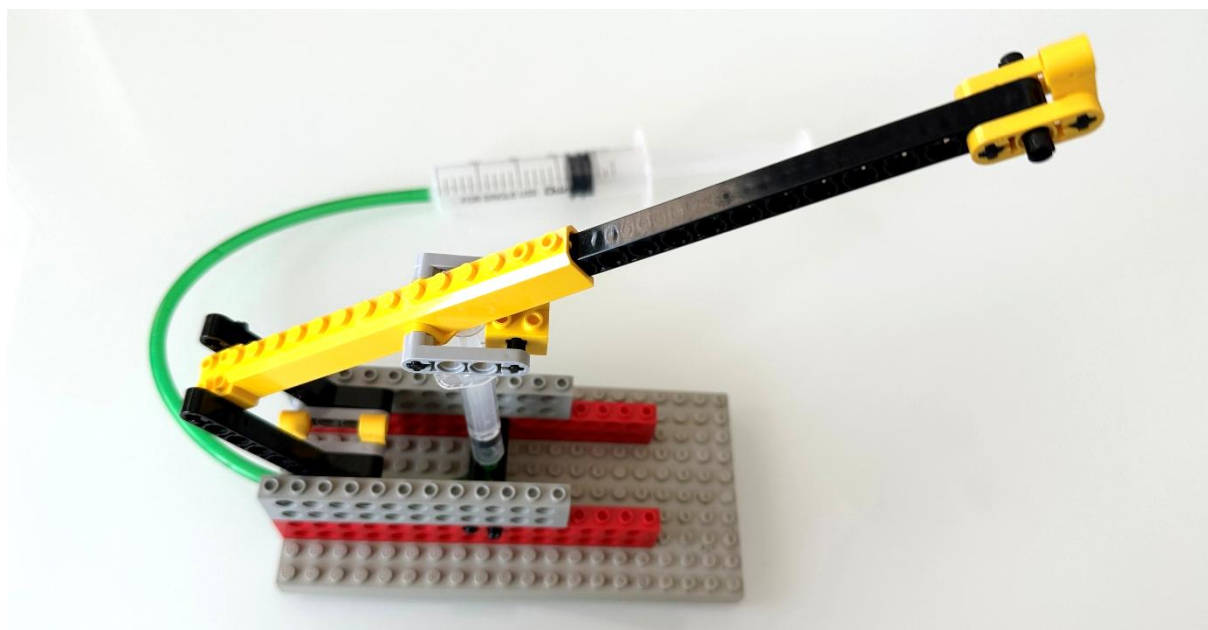
Sedaj obrnemo brizgalki med seboj in poskus ponovimo. Rezultate vpišemo v tabelo:

	Postavitev A (Mala → Velika)	Postavitev B (Velika → Mala)
Vhodna brizgalka [ml]		
Izhodna brizgalka na tehtnici [ml]		
Vhodna masa m_1 [g]	100 g	100 g
Vhodna sila F_1 [N]	0,98 N	0,98 N
Izmerjena masa na tehtnici m_2 [g]		
Izhodna sila F_2 [N]		
Razmerje sil (F_2/F_1)		

Primerjajte dobljena razmerja sil (F_2/F_1) z razmerjem površin batov obeh brizgalk (A_2/A_1). Kako velikost izhodnega bata vpliva na dobljeno silo na tehtnici?

Poskus lahko ponovite še z drugim parom velikosti brizgalk

Izdelava avtomobilskega dvigala



Slika 3: Primer izgradnje avtodvigala iz LEGO kock

Sedaj ko razumemo, kako tekočina povečuje ali zmanjšuje silo, uporabimo svoje znanje za gradnjo delujočega mehanskega avtomobilskega dvigala z dvigalno roko. Za gradnjo ogrodja

uporabimo Lego kocke (ali lesene sladoledne palčke z vročim lepilom). Brizgalka bo služila kot pogonski hidravlični cilinder, ki bo dvigoval ročico bagra ali platformo dvigala.

Hidravlična brizgalka lahko v vaši konstrukciji deluje **izključno s potisno silo**! Gumijasto tesnilo na batu ne more prenašati močnih vlečnih sil, saj ob potegu voda hitro spusti skozi rob. Dvigalo zasnujte tako, da stiskanje vode v brizgi potiska ročico dvigala navzgor, spuščanje pa poteka s pomočjo lastne teže bremena.

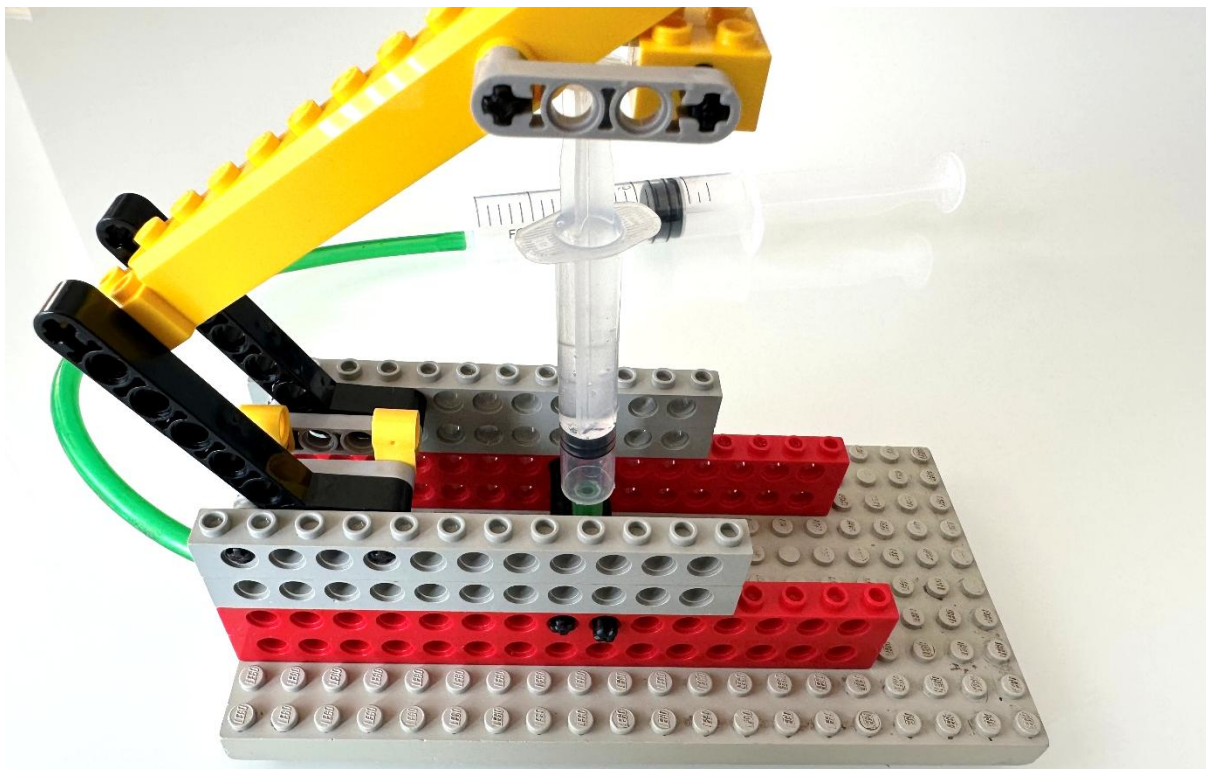
Poskus začnemo s pripravo bremena, za kar lahko uporabimo poljubne manjše predmete, kot sta kovinski avtomobilček ali posodica z maticami. Breme najprej natančno stehtamo na digitalni kuhinjski tehtnici in njegovo maso zapišemo kot m_{breme} v gramih. Ko maso zabeležimo, breme postavimo na dvižno platformo ali ročico bagra.

Nato poiščemo vhodno silo, ki je potrebna za sam dvig. Pogonsko oziroma vhodno brizgalko vertikalno vpnemo v stojalo ob mizi. Na njen bat nato postopoma dodajamo manjša bremena ali uteži — po želji lahko v posodico na batu dolivamo vodo ali dodajamo matice — vse dokler se dvigalo z bremenom ne začne zanesljivo in gladko dvigovati. Ko dvigalo deluje, stehtamo vse uteži na vhodni brizgalki ter skupno maso zapišemo kot m_{vhod} . Poskus lahko opravimo tudi z neposrednim pritiskanjem bata ob kuhinjsko tehtnico, a bo rezultat manj zanesljiv.

Sledi izračun sil. Enačbe sedaj že obvladamo!

Na koncu izmerjeno razmerje primerjamo s teoretičnim razmerjem površin batov obeh brizgalk in preverimo, ali se vrednosti povsem ujemata. Pri razmisleku o morebitnih odstopanjih upoštevamo predvsem vpliv trenja v batih ter dolžino ročice vzvoda na sami konstrukciji dvigala.

Ali za dvigovanje težkih bremen res potrebujemo velike mišice, ali si lahko z inženirskim pristopom olajšamo delo?



Slika 4: Vpetje hidravličnega bata v avtodvigalo

Nasveti

1. Poskus najbolje deluje z brizgalkami velikosti med 2,5 ml in 20 ml. Večje brizgalke imajo navadno drugačne nastavke, ki se cev ne bodo dobro prilegali.
2. Če ob večjih tlakih cevka drsi z nastavka brizge, stik dodatno zavarujte z drobno plastično kabelsko vezico ali tesno navitim izolirnim trakom.
3. Plastična tesnila novih brizg imajo včasih precej veliko trenje. Pred sestavo nanesite majhno kapljico tekočega mila ali rastlinskega olja na gumijasto tesnilo bata, da bo drsenje povsem gladko.
4. Pri gradnji hidravlične stiskalnice iz lego kock ali lesa, se lahko horizontalna nosilna struktura pod silo bata precej upogiba. Po potrebi je učvrstimo s kovinsko palico, ali pa nosilne stebre med poskusom učvrstimo z roko.
5. Namesto uteži za merjenje potiska lahko uporabite dodatno kuhinjsko tehtnico, ob katero pritiskate z batom. Tako lahko silo na bat merite neposredno, brez uporabe uteži.
6. Brizge imajo označen volumen v mililitrih, za točen izračun površine bata pa je najbolje premer gumijastega tesnila izmeriti s kljunastim merilom (pomičnim merilom).

Dodatno

- Hidravlično tekočino obarvajte z barvilom za hrano. Se ob hitrem stiskanju in sproščanju batov v tekočini pojavijo mehurčki?
- Eno izmed brizg zgolj do polovice napolnite z vodo, v preostali volumen pa zajemite zrak. Ponovite poskus s hidravlično stiskalnico. Kaj ugotovite?
- Hidravlično avtodvigalo preoblikujte tako, da dodate še en sistem brizg in poskušajte zasnovati roko bagra.

Vprašanja za razmislek

- Zakaj je nujno, da iz hidravličnega sistema pred merjenjem popolnoma odstranimo vse zračne mehurčke? Kaj se zgodi z ujetim mehurčkom, ko pritisnete na bat?
- Če s potiskom male brizge na veliki brizgi dobimo bistveno večjo silo, ali smo s tem "ustvarili brezplačno energijo"?
- Zakaj v pravih industrijskih strojih (npr. v bagerjih, dvigalih in avtomobilskih zavorah) namesto vode uporabljajo posebno hidravlično olje?
- Kakšno razmerje površin batov bi potrebovali v hidravlični stiskalnici, da bi s pritiskanjem z majhno silo 10 N (kar ustreza teži mase ~ 1 kg) na izhodu lahko dvignili maso 1000 kg?
- Kako deluje varnostni sistem ABS v sodobnih avtomobilih in kako je povezan s krmiljenjem tlaka v hidravličnem zavornem krogotoku?
- Zakaj izmerjena izhodna sila na tehtnici nikoli ni povsem enaka teoretskemu izračunu po Pascalovem zakonu? Kje v vašem sistemu nastajajo največje izgube mehanskega dela?
- Kaj se zgodi v cevovodu, če zelo hitro in naglo pritisnemo na bat? Zakaj je to v pravih industrijskih hidravličnih sistemih nevarno?