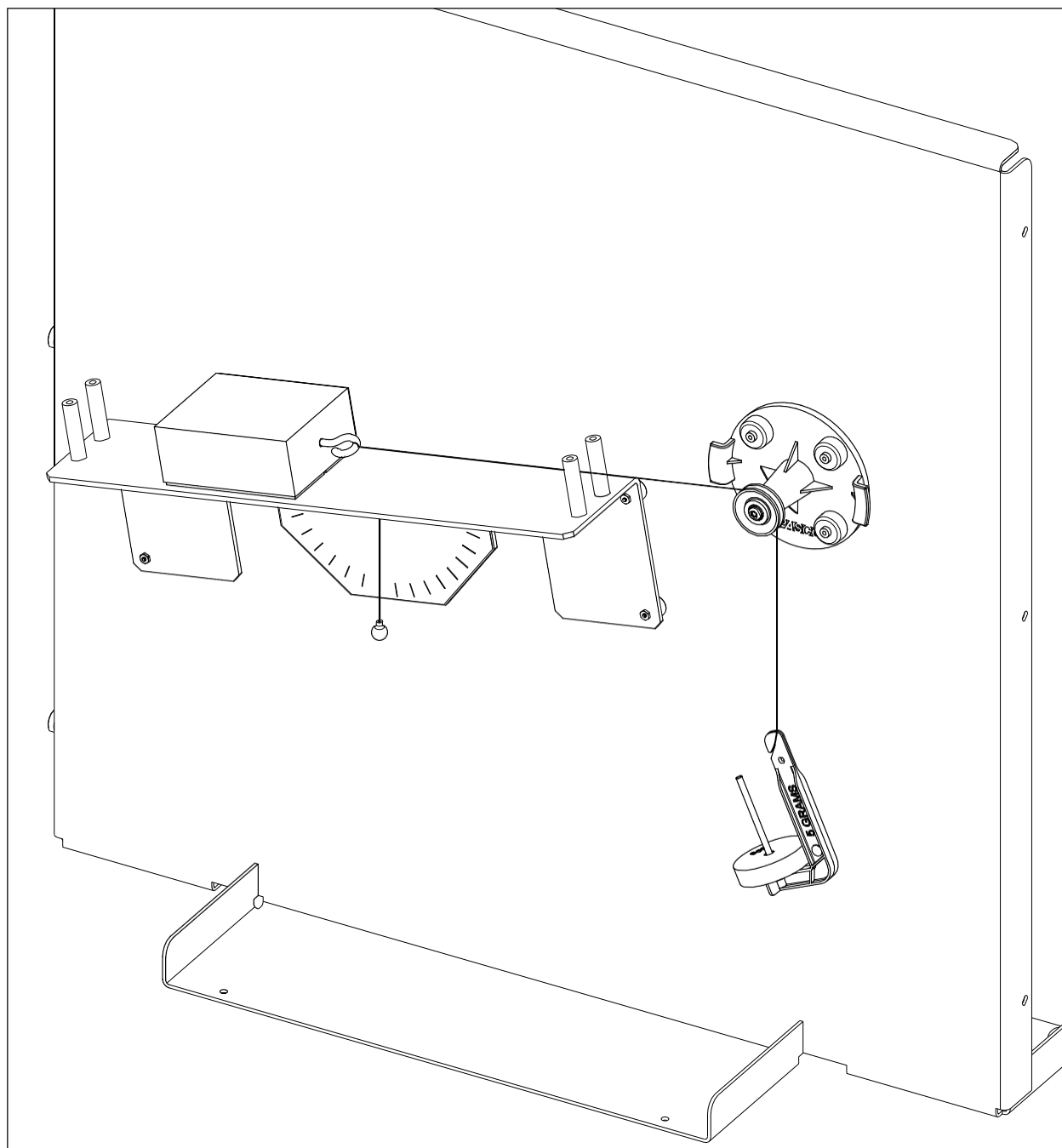




PASCO mehaanika
Staatikasüsteem
ME-9502



Kaanelehel on kujutatud hõõrdeplokki staatikasüsteemi kaldpinnal ning PASCO massiriputit komplektist ME-8979 Mass and Hanger Set, mis on niidiga riputatud üle väikese ploki. Enamik staatikasüsteemi komponente kinnitub magnetiliselt kaasasolevale tööplaadile. See juhend sisaldab viitteist kopeerimisvalmis katset staatika põhialuste kohta.

Sisukord

Sissejuhatus	1
Seadmed	1
Soovitavad seadmed	3
Varuosade komplekt	4
Komponentide komplekt	5
Juhendist	10
KATSED	
1. Hooke'i seadus - jõudude mõõtmine	11
2. Jõudude liitmine - resultant- ja tasakaalustavad jõud	13
3. Jõudude lahutamine - komponendid	17
4. Jõumoment - paralleelsed jõud	21
5A. Massikese	25
5B. Füüsikaliste kehade tasakaal	29
6. Jõumoment - mitteparalleelsed jõud	33
7. Kaldpind	37
8. Liugehõõre ja seisuhõõre	41
9. Lihtne harmooniline liikumine - mass vedru otsas	47
10. Lihtne harmooniline liikumine - lihtpendel	53
11A: Lihtne harmooniline liikumine - füüsikaline pendel	57
11B: Füüsikalise pendli minimaalne periood	63
11C: Lihtne harmooniline liikumine - tala vedru otsas	67
12. Lihtmasinad - kang	73
13. Lihtmasinad - kaldpind	77
14. Lihtmasinad - plokk	81
15. Jõud poomile	83
Tehniline tugi, garantii ja autoriõigus	85

Staatikasüsteem

ME-9502

Sissejuhatus

Mehaanika uurimine algab sageli Newtoni liikumisseadustest. Esimene seadus kirjeldab tingimusi, mille korral keha säilitab oma liikumisoleku. Kui kehale mõjuv resultantjõud on null, on keha kiirendus null.

Kui $\sum F = 0$, siis $a = 0$

Teine seadus kirjeldab, mis juhtub siis, kui kehale mõjuv *resultantjõud* ei ole null. Kiirendus on resultantjõuga võrdelises seoses, suunatud resultantjõuga samas suunas ja pöördvõrdeline massiga ehk

$$a = \frac{F_{net}}{m}$$

Suur osa sissejuhatavas kursuses õpitavast käsitleb viise, kuidas jõud füüsikaliste kehadega vastastikku toimivad. PASCO staatikasüsteem on loodud selleks, et uurida jõudude olemust erijuhul, kus kiirendus puudub. Teisisõnu on kõigi kehale mõjuvate jõudude vektorsumma null.

Üks põhjus kiirenduseta juhu uurimiseks on see, et kiirenduseta süsteeme on lihtsam mõõta kui kiirenevaid süsteeme. Jõudude vektoriaalse olemuse kohta saab palju teada, uurides paljusid viise, kuidas jõude saab kehale rakendada ilma kiirendust tekitamata. Teine põhjus on see, et meie igapäevases kogemuses on kiirenduseta süsteemid pigem reegel kui erand.

Seadmed

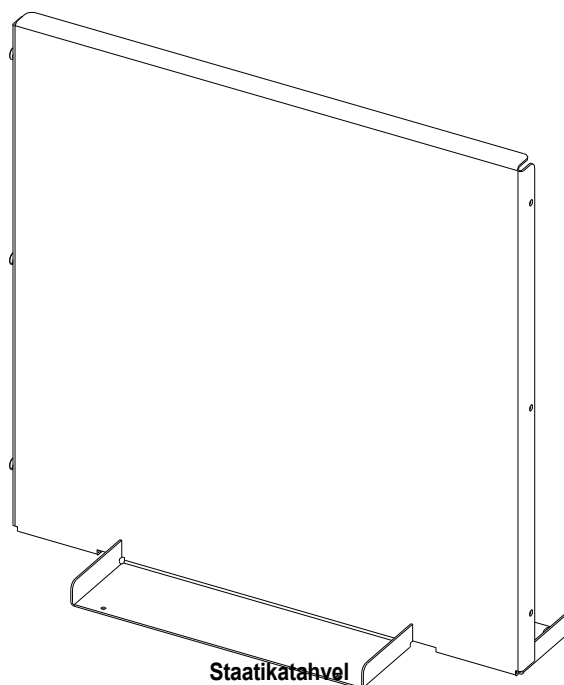
ME-9502 staatikasüsteem koosneb staatikatahvlst, varuosade komplektist, komponentide komplektist ning masside ja riputite komplektist.

ME-9503 staatikatahvel

Staatikatahvel on ligikaudu 45 korda 45 sentimeetri (18 korda 18 tolli) suurune ferrometallist plaat, mille mõlemal küljel on kirjutatav valge tahvli pind.

Tahvli alusel on kummipuhvrid. Valge tahvli markereid (ehk „kuivkustutatavaid“ markereid) saab kasutada otse tahvlile kirjutamiseks ja joonistamiseks. Markereid saab osta kirjatarvete kauplustest ning tinti saab eemaldada lapi või valge tahvli kustutiga.

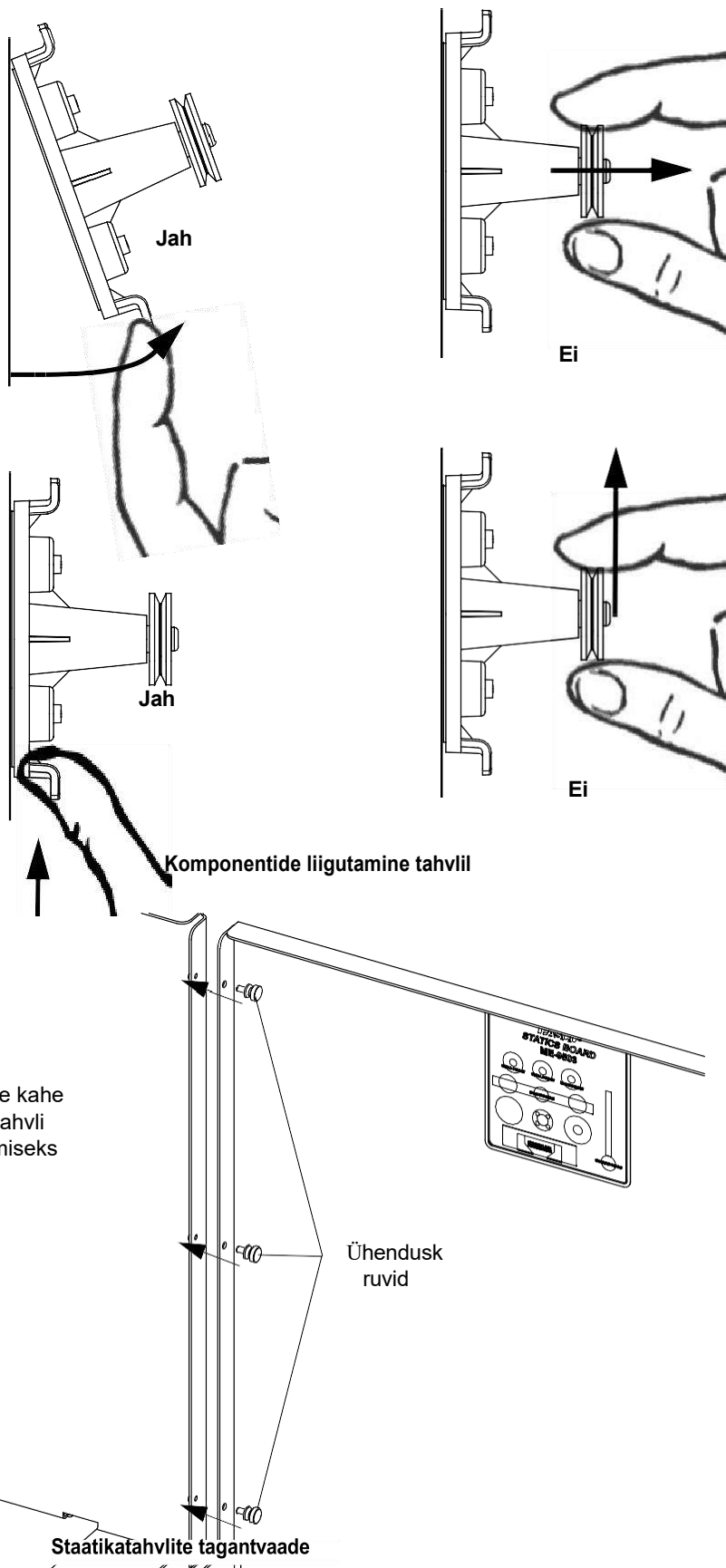
Kinnitav kaalusõlm, suure ja väikese ploki sõlmed, tasakaaluhoova sõlm, jõuratta sõlm, momendiratta sõlm, kaldpinna sõlm ja universaalkinnituse sõlm kinnituvad kõik tahvlile magnetiliselt. Kui komponente ei kasutata, saab neid hoida tahvli tagaküljel. Välja arvatud kaldpinna sõlm, on kõigi tahvlile kinnitatavate komponentide alusel kummirõngas, mis kaitseb tahvlit ja komponenti. Ümmarguse magnetiluse läbimõõt on 6.5 sentimeetrit (cm).



Oluline

Tahvlile magnetiliselt kinnitatud komponentide liigutamisel või eemaldamisel hoidke komponenti magnetaluselt, mitte komponendist endast. See vähendab komponendile mõjuvat koormust.

Esimese tahvli külge saab kolme kaasasoleva ühenduskruviga kinnitada teise tahvli (müüakse eraldi). Tahvlite ühendamiseks eemaldage esimese tahvli küljel olevatest keermestatud avadest ühenduskruvid. Asetage teise tahvli serv esimese tahvli kõrvale. Joondage avad ja ühendage kaks tahvli ühenduskruvidega.



ME-9504 varuosade komplekt

Nimetus	Kogus	Nimetus	Kogus
Nöörikinnituse sõlm	3	Pöidlakruvi 6-32 × 5/8" (nööriklambrile)	2
Momendiindikaatori sõlm	6	Pöidlakruvi 4-40 × 1/2" (tasakaaluhoova nurgamõõturile)	2
Nailonniit, pool	1	Pöidlakruvi 6-32 × 1/4" (tasakaaluhoova pöördteljele)	1
Nööri pingutusklamber	2	Seib 0.285" välisläbimõõduga (tasakaaluhoova nurgamõõturile)	2
Nurgaindikaatori hoob	2	Lood, messingist (kaldpinna)	1

ME-9505 komponentide komplekt

Nimetus	Kogus	Nimetus	Kogus
Suure ploki sõlm	1	Universaalkinnituse sõlm	1
Väikese ploki sõlm	2	Massikäru sõlm	1
Kinnitatava kaalu sõlm	1	Momendiratta sõlm	1
Tasakaaluhoova sõlm	1	Kaldpinna sõlm	1
Jõuratta sõlm	1	Hõõrdeploki sõlm	1
Topeltploki sõlm	1	Asümmeetriline plaat	1

ME-8979 masside ja riputite komplekt

ME-8979 PASCO masside ja riputite komplekti komponente kasutatakse enamikus staatikakatsetes. Komplekt sisaldab nelja massiriputit, hoiukarpi ja kahtkümmend seitset messingist, alumiiniumist või polükarbonaatplastist massi vahemikus 0.5 g kuni 100 g.



ME-8979 masside ja riputite komplekt

Soovitatavad seadmed***Jõuandur ja jõuanduri võimendi**

Jõu mõõtmiseks saab kasutada PS-2201 5 N jõuandurit. Kui see on võimendi kaudu ühendatud PASCO liidese või PASCO käsiloggeriga, saab jõuanduri jõuandmeid salvestada, kuvada ja analüüsida.



PS-2201 5 N jõuandur

Võimendi	Mudel
Jõuanduri võimendi (PASPORT)	PS-2198
Kahe jõuanduri võimendi	PS-2205
Jõuanduri võimendi (ScienceWorkshop)	CI-6464

*Teavet PASCO jõuandurite, jõuandurivõimendite, liideste, käsiloggerite ja andmehõivetarkvara kohta vaadake PASCO kataloogist või veebilehelt www.pasco.com.

Stopper (ME-1234)

PASCO stopperil on vedelkristallekraan (LCD) kahe kuvarežiimiga. Selle täpsus on 0.01 sekundit kuni 3599.99 sekundini ja 1 sekund kuni 359999 sekundini. Mälu mahutab kuni üheksa sündmuse aega.



Stopper

Massikaal

Kasutage massikaalu, näiteks OHAUS Scout Pro Balance 2000 g (SE-8757A) või OHAUS Cent-O-Gram Balance (SE-8725).



Massikaalud

Kinnitatava kaalu sõlm (ME-9824A)

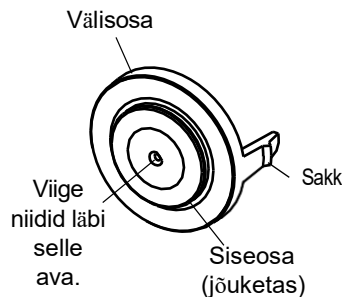
Kinnitatava kaalu sõlm (sisaldub ME-9505 komponentide komplektis) on saadaval ka eraldi varuosana või lisavedrukaaluna katseteks, kus on vaja mõõta rohkem kui ühte jõudu.

Varuosade komplekt (ME-9504)

Varuosade komplekt sisaldab osi, mida kasutatakse koos komponentide komplekti sõlmedega. Näiteks klõpsab nõõrikinnituse sõlm jõuratta sõlme keskele ja momendiindikaatori sõlm momendiratta sõlme. Nõõri pingutusklaamrit kasutatakse universaalkinnituse sõlmel. Muud osad, nagu nurgaindikaatori hoovad, pöidlakruvid, seibid ja messingraskus, on varuosad.

Nõõrikinnituse sõlm.

Kui nõõrikinnituse sõlm on klõpsatud jõuratta sõlme keskele, saab seadmega uurida jõuvektoreid. Nõõrikinnituse sõlm koosneb kahest osast: läbipaistvast plastist siseosast („jõuketras”), mis saab välisosa keskel vabalt liikuda, ja välisosast, millel on keskava ning kaks sakk, mis klõpsavad jõuratta sõlme. (Neid kahte osa ei ole ette nähtud eraldada.)



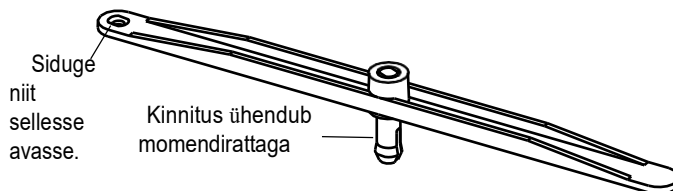
Nõõrikinnituse sõlm

Esialgne seadistamine

Võtke kolm 38 cm (15") pikkust niiti. Viige niidid läbi nõõrikinnituse sõlme siseosa ava. Siduge niitide otsad kokku (näiteks lihtsõlmega), et neid ei saaks siseosast tagasi läbi tõmmata.

Momendiindikaatori sõlm

Pange tähele, et momendiindikaatori sõlmel on kinnituspupp, mille saab ühendada momendiratta sõlmega. Ülejäänud kolm sõlme on varuosad.



Momendiindikaatori sõlm

Esialgne seadistamine

Siduge iga kolme momendiindikaatori sõlme külge 30 cm (12") pikkune niit.

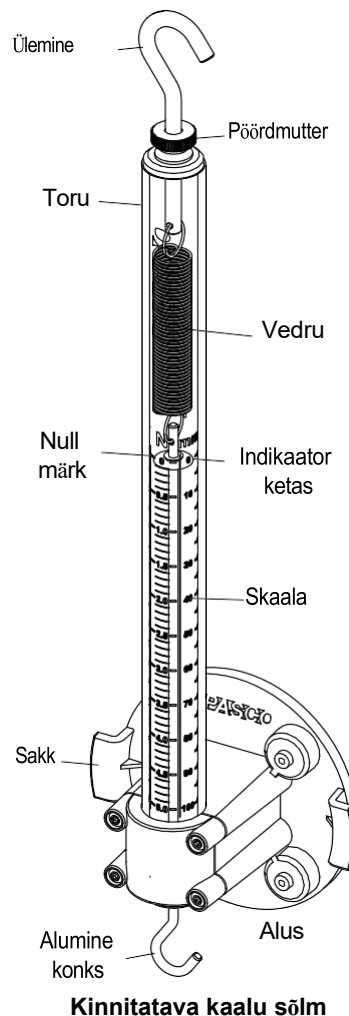
Komponentide komplekt (ME-9505)

Kinnitatava kaalu sõlm

Kinnitatava kaalu aluses on neli tugevat magnetit. Torule on märgitud njuutonid (N), untsid (oz.) ja millimeetrid (mm). Pöördmutter võimaldab ülemist konksu tõsta või langetada, et joondada punane indikaatorketas toru nullmärgiga.

Kaalu nullimiseks kinnitage kaal staatikatahvile. Jätke alumine konks tühjaks. Keerake pöördmutrit mõni pööre lahti. Pöörake ülemist konksu päripäeva (vasakult paremale), et indikaatorketast langetada, ja vastupäeva (paremalt vasakule), et indikaatorketast tõsta. Kui ketas on toru sildil oleva nullmärgiga joondatud, pingutage pöördmutter, et ülemine konks paigale kinnitada.

Kaalu liigutamiseks staatikatahvilt hoidke kaalu aluse sakkidest ja lükake või tõmmake kaal soovitud asukohta. Kaalu eemaldamiseks staatikatahvilt tõstke üks või mõlemad aluse külgedel olevad sakid tahvlist eemale.

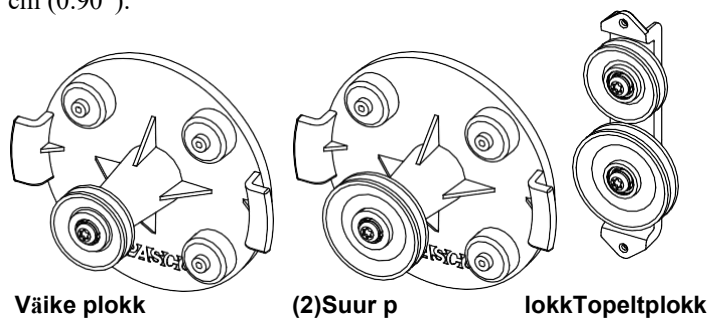


Kinnitatava kaalu sõlm

Suured ja väikesed plokid ning topeltplokk

Staatikasüsteem sisaldab kahte magnetilusele kinnitatud väikest plokki ja ühte suurt plokki. Komplektis on ka topeltplokk (ilma magnetilusest). Topeltplokk on mõeldud liitploki katseteks. Tuginiidi saab siduda topeltploki kummagi otsa külge.

Kõigil plokkidel on väikese hõõrdumisega kuullaagrid. Väiksemate plokkide välisläbimõõt (OD) on 2.41 cm (0.850") ja siseläbimõõt (ID) 1.65 cm (0.650"). Suuremate plokkide välisläbimõõt on 2.79 cm (1.10") ja siseläbimõõt 2.28 cm (0.90").



Väike plokk

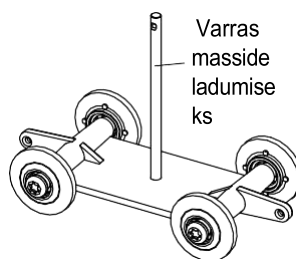
(2) Suur p

lokaal Topeltplokk

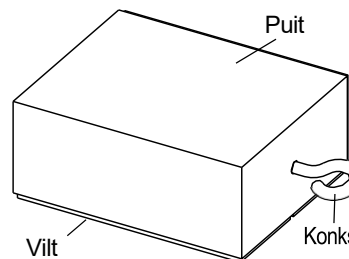
Komponentide liigutamisel või staatikatahvilt eemaldamisel kasutage palun komponentide alusel olevaid sakke.

Massikäru ja hõõrdeplokk

Massikäru ja hõõrdeplokk on mõeldud kasutamiseks koos kaldpinna sõlmega. Massikäru iga ratta sees on väikese hõõrdumisega kuullaagrid ning keskel metallvarras lisamasside ladumiseks. Niidi saab kinnitada kummassegi otsa.



Massikäru



hõõrdeplokk

Hõõrdeplokk on valmistatud pöögipuidust. Selle ühes otsas on aasaga konks ja see on kaetud

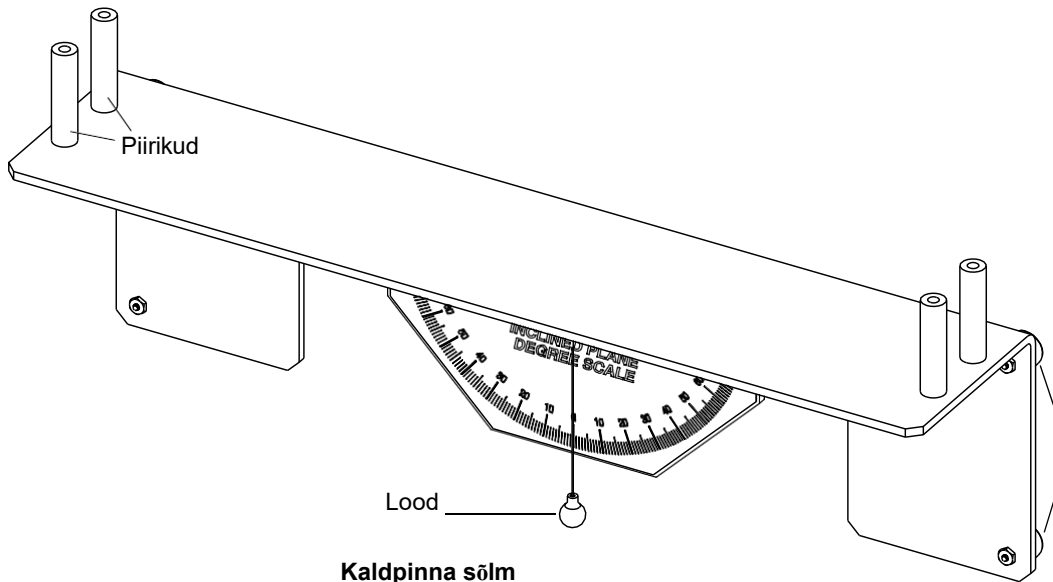
alt ja ühelt küljelt vildiga. Selle mõõtmed on 2.54 cm × 5.08 cm × 6.35 cm (1.0" × 2.0" × 2.5").

Kalpinna sõlm

Kalpinna sõlme tagaküljel on neli tugevat magnetit, mis hoiavad seda staatikatahvli paigal.

ETTEVAATUST: Kalpinna sõlme magnetid ei ole kaetud kaitsematerjaliga. Hoidke kalpinda tahvlile asetamisel kindlalt, et magnetid ei saaks tahvli vastu „plöksatades” kahjustada.

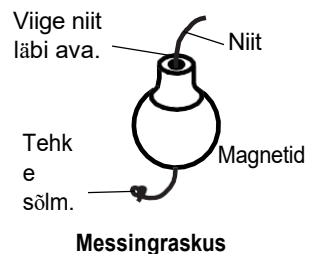
Kalpinna mõlemas otsas on piirikud ning kaldenurga määramiseks kraadiskaala koos messingist loodiga.



Loodi asendamine

ME-9504 varuosade komplekt sisaldab varuloodi (messingraskust). Loodi asendamiseks kasutage kraadiskaala tagaküljel oleva kruvi lõdvendamiseks Phillipsi („ristpeaga”) kruvikeerajat. Eemaldage niidijupp ja võtke uus, ligikaudu 10 cm (4”) pikkune niit. Viige niidi üks ots läbi messingraskuse ava ja tehke niidi sellesse otsa topeltsõlm, et niit ei saaks avast tagasi välja libiseda. Viige niidi teine ots läbi kraadiskaala ülaosa lähedal oleva väikese ava. Reguleerige niidi pikkus nii, et lood saaks vabalt liikuda, ja kerige seejärel niidi ots ümber tagaküljel oleva kruvi.

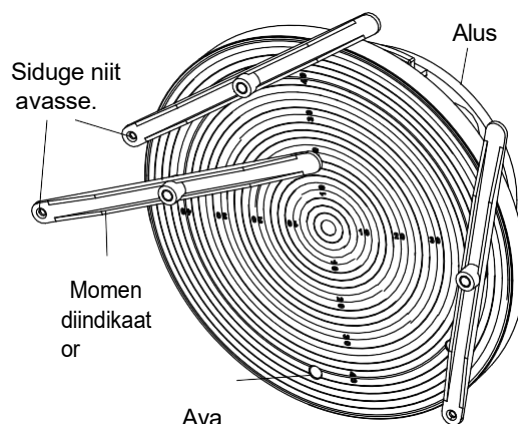
Pingutage kruvi, et niit paigale kinnitada.



Momendiratta sõlm ja momendiindikaatori sõlm

Momendiratta sõlmel on 5 cm raadiusega ketas, millel on 2 mm vahedega kontsentriliste ringidega silt. Ketas pöörleb kuullaagril vabalt ja sellel on viis ava momendiindikaatori sõlme kinnitamiseks. Momendiindikaator klõpsab avasse ja pöörleb vabalt. Siduge iga indikaatori otsas olevasse avasse 30 cm (12") pikkune niit.

Momendiindikaatori eemaldamiseks haarake indikaatorist kindlalt keskel oleva pöördtelje juurest ja tõmmake väljapoole, surudes samal ajal ketta teiselt küljelt kinnitusnupu otsale.



**Momendiratta sõlm
Momendiindikaatori sõlm**

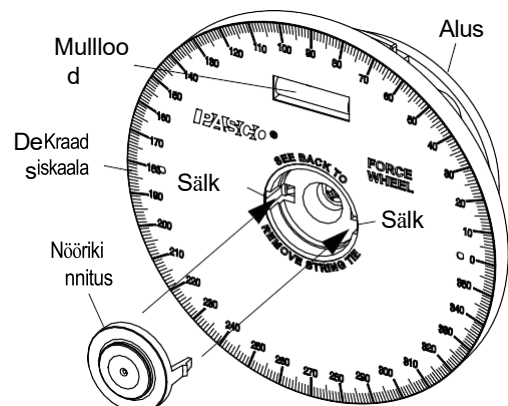
Jõuratta sõlm ja nõõrikinnituse sõlm

Jõuratta sõlmel on 5 cm raadiusega ketas 360° skaalaga ning mullood jõuratta loodimiseks. Erinevalt momendirattast ei pöörle jõuratas vabalt, kuid ketast saab ratta loodimiseks pöörata. Pärast loodimist jääb ratas paigale, kuni seda uuesti liigutatakse.

MEELDETULETUS: Enne nõõrikinnituse jõurattasse asetamist viige kindlasti kolm niiti läbi nõõrikinnituse keskava.

Nõõrikinnituse sõlm klõpsab jõuratta sõlme keskel olevasse avasse. Joondage nõõrikinnituse sakid jõuratta keskava sees olevate sälkudega.

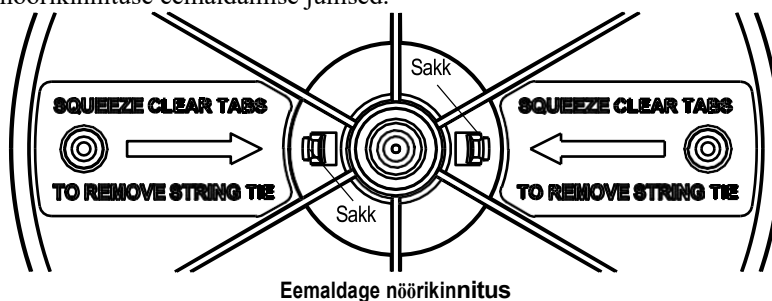
Suruge nõõrikinnitus kindlalt jõurattasse, kuni mõlemad sakid „klõpsavad” paigale. Pange tähele, et nõõrikinnituse välisosa pind jääb jõuratta pinnast väga veidi allapoole, kuid nõõrikinnituse siseosa on jõuratta pinnaga tasa.



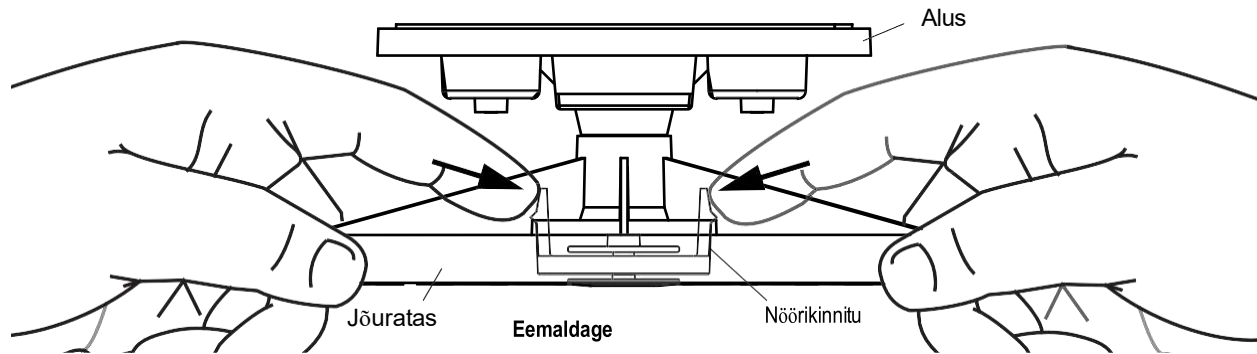
**Jõuratta sõlm
Nõõrikinnituse sõlm**

Nõõrikinnituse sõlme eemaldamine

Kui peate nõõrikinnituse eemaldama (näiteks niitude asendamiseks), eemaldage jõuratas staatikatahvli. Ketta alumisel küljel on nõõrikinnituse eemaldamise juhised.

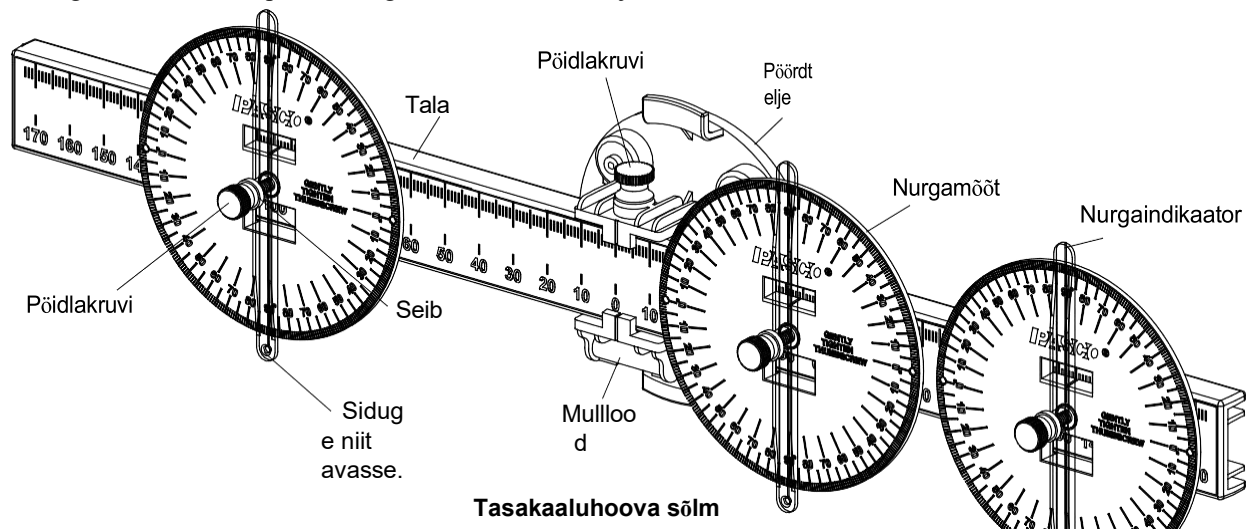


(Kujutlege, et jõuratta ketas on *läbipaistev* ja näete nõõrikinnitust.) Hoidke jõuratast näidatud viisil ja suruge läbipaistvad plastist sakid nimetissõrmedega sissepoole, kuni nõõrikinnitus jõurattast välja hüppab.



Tasakaaluhoova sõlm

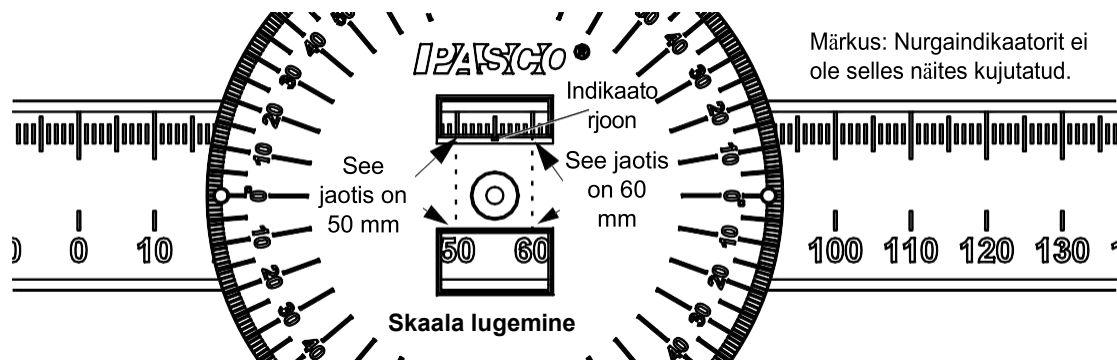
Tasakaaluhoova sõlm koosneb talast, pöördteljest ja kolmest talale paigaldatavast nurgamõõturist. Igal nurgamõõturil on läbipaistev nurgaindikaator. Pöördteljel on tala loodimiseks mulllood.



Reguleerige tala, lõdvendades pöördtelje ülaosas olevat pöidlakruvi ja nihutades tala ühele või teisele poole. Nurgamõõturite liigutamiseks lõdvendage nurgamõõтури keskel olevat pöidlakruvi ja nihutage nurgamõõturit mööda tala. Pange tähele, et kõigis katsetes ei ole kolme nurgamõõturit vaja.

Skaala lugemine

Lugege nurgamõõтури asukohta keskpunkti suhtes läbi nurgamõõтури kahe ristkülikukujulise akna. Alumine aken näitab asukohta lähima sentimeetrini ja ülemine aken millimeetrini. Ülemise akna alumises servas on väike indikaatorjoon. Näites näitab alumine aken asukohta 50 mm ja 60 mm vahel ning ülemine aken asukohta 55 mm.



Märkus: Nurgaindikaatorit ei ole selles näites kujutatud.

Universaalkinnituse sõlm

Universaalkinnitusel on mitu funktsiooni. See saab kanda PS-2201 5 N jõuandurit, sellel on varras asümmeetrilise plaadi riputamiseks ning kaasasolev nõõri pingutusklamber võimaldab niidi kinnituse külge ühendada. Jõuanduri pöidlakruvi on kummist O-rõngaga „vangistatud”, nii et see ei saa kinnitusest välja kukkuda.

Jõuanduri kinnitamine

Staatikasüsteemiga saab jõu mõõtmiseks kasutada 5 N jõuandurit (müüakse eraldi) peaaegu samal viisil nagu kinnitavat kaalu. (Pärast jõuanduri kalibreerimist saab seda tegelikult kasutada kinnitatava kaalu kalibreerimiseks.) Esmalt tehke niidist aas läbi nõõriklambri (vt allpool) ja kinnitage klamber seejärel jõuanduri küljel tähistatud asendisse „LOAD”. Järgmisena kinnitage jõuanduri „FIXED” ots universaalkinnituse pöidlakruvi ja posti külge.

Nõõriklambri kasutamine

Nõõriklamber ühendub universaalkinnitusega nii, et niidi saab kinnitada kinnituse enda külge. Kasutage klambrit jõuandurile (vt eespool) kinnitatud niidi ühendamiseks, kui jõuandur on paigaldatud universaalkinnitusele.

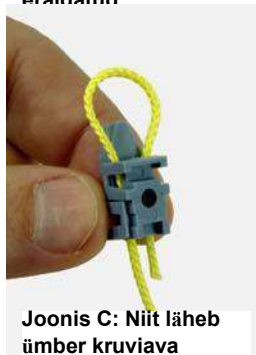
Niit on kõige parem läbi klambri kinnitada enne klambri paigaldamist kinnitusele või jõuandurile. Nõõriklamber koosneb kahest osast, kuid ei käi lahti. Alustuseks hoidke klambri ülemist osa nii, et kaks osa oleksid eraldatud nagu joonisel A, jättes ava, millest niit läbi viia. Sisestage niit klambri lamedasse otsa (mitte teravasse otsa). Viige niit tagasi läbi klambri nagu joonistel B ja C. Kinnitage nõõriklamber jõuandurile või universaalkinnitusele ning pingutage klamber pöidlakruviga kinni.



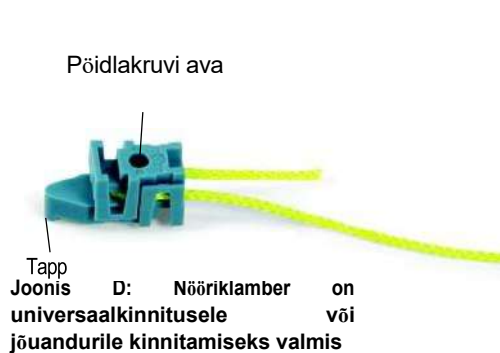
Joonis A: Hoidke nõõriklamber nii, et kaks osa oleksid eraldatud



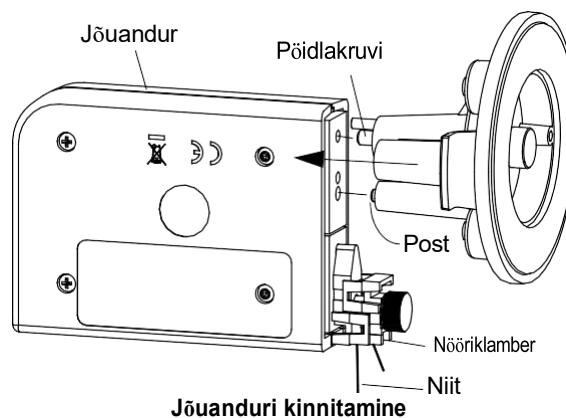
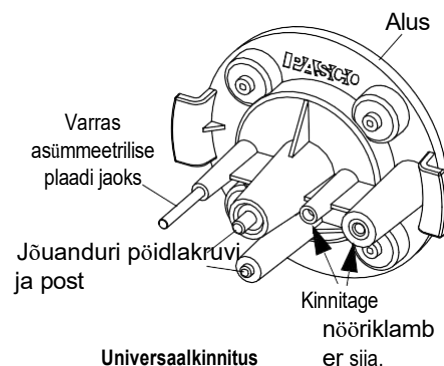
Joonis B: Viige niit tagasi läbi nõõriklambri



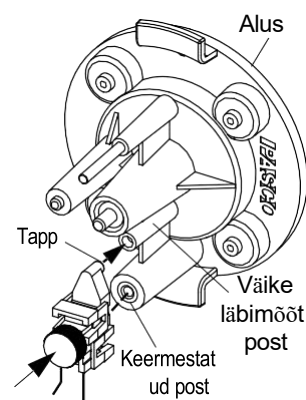
Joonis C: Niit läheb ümber kruviava



Joonis D: Nõõriklamber on universaalkinnitusele või jõuandurile kinnitamiseks valmis



Nõõriklambri kinnitamine



Joondage nõõriklambri tapp väikese läbimõõduga posti avaga. Kinnitage nõõriklamber keermestatud posti külge 5/8" pöidlakruviga.

Asümmeetriline plaat

Asümmeetriline plaat on viiekülgeline hulknurk, mille igas nurgas on väike ava. Universaalkinnitusel on peenike metallvarras, mis on mõeldud asümmeetrilise plaadi toetamiseks nii, et plaat saaks vardal vabalt kõikuda kuni tasakaalu saavutamiseni.

Juhendist

ME-9502 staatikasüsteem annab sissejuhatuse staatikamehaanikasse. Katsed tutvustavad esmalt jõudu vektorsuurusena ja arendavad seejärel seda mõistet edasi, et õpilased mõistaksid füüsilise keha tasakaalu erinevate jõudude ja jõumomentide rakendamisel. Samuti on lisatud katsed lihtsa harmoonilise liikumise demonstreerimiseks pendli ning vedru-massisüsteemiga.

Katsed on esitatud kolmes rühmas: põhikatsed, edasijõudnute katsed ja lihtmasinad. Iga katse on kopeerimisvalmis.

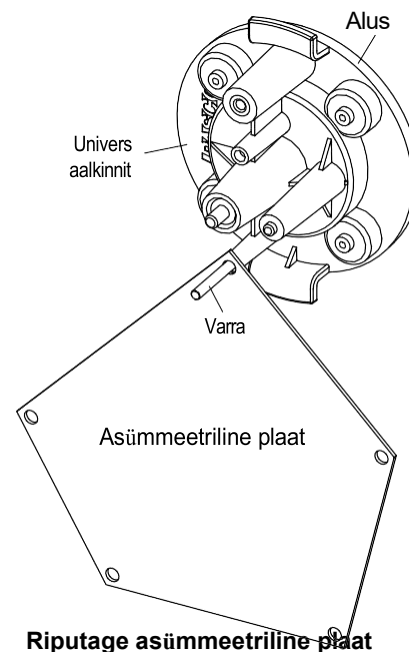
Põhikatsed annavad kindla sissejuhatuse staatikamehaanikasse. Uuritakse jõuvektoreid, jõumomente ja massikeset.

Edasijõudnute katsed võimaldavad õpilasel ühendada varem õpitud põhimõtted, et mõista selliseid nähtusi nagu staatiline tasakaal. Samuti uuritakse hõõrdumist ja lihtsat harmoonilist liikumist.

Lihtmasinad annavad õpilasele võimaluse uurida varem õpitud põhimõtete rakendusi ning tutvuda uute oluliste mõistetega. Kange, kaldpindu ja plokisüsteeme uuritakse staatilise tasakaalu, töö ja energia jäävuse põhimõtete abil.

Lisaks staatikasüsteemi seadmetele on mõne katse jaoks vaja tavalisi vahendeid, näiteks pliiatseid, joonlaudu, nurgamõõtureid, paberit, stopperit ja massikaalu. Vaadake iga katse alguses jaotist „Vajalikud seadmed”.

MÄRKUS: Vektorsuurused on tähistatud poolpaksu **kirjaga**, näiteks **F**, **W** või **F₁**. Kui samu tähti kasutatakse tavalises kirjas, tähistavad need vektorsuuruse suurust (moodulit). Kuna nendes katsetes jõumomentide vektoriaalset olemust ei käsitleta, ei kasutata jõumomentide tähistamiseks poolpaksu kirja.



Katse 1: Hooke'i seadus — jõu mõõtmine

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelKinnitav	vedrukaal
Masside ja riputite kom	plektNiit

Sissejuhatu

S

Praktilisel tasandil on jõud lihtsalt tõuge või tõmme. Jõud on ka vektorsuurus, millel on suurus (moodul) ja suund. Jõudu saab rakendada ja mõõta erineval viisil. Üks viis jõu rakendamiseks on riputada teadaolev mass ja määrata jõud eeldusel, et gravitatsioon tõmbab massi alla. Maa keskme suunas jõuga $F = mg$, kus m on teadaolev mass ja g on raskuskiirendus (9.8 m/s^2). Pange tähele, et g väärtust võib väljendada ka kujul 9.8 N/kg . Teine viis jõu rakendamiseks on tõmmata

vedruga. Vedru pikeneb tõmbamisel ning kui pikenemine on rakendatud jõuga võrdelises seoses, saab vedru kalibreerida tundmatute jõudude mõõtmiseks. Selles katses kasutate kalibreeritud massidele mõjuva raskusjõuga seotud teadaolevat jõudu, et uurida kinnitatava vedrukaalu omadusi.

Hooke'i seadus

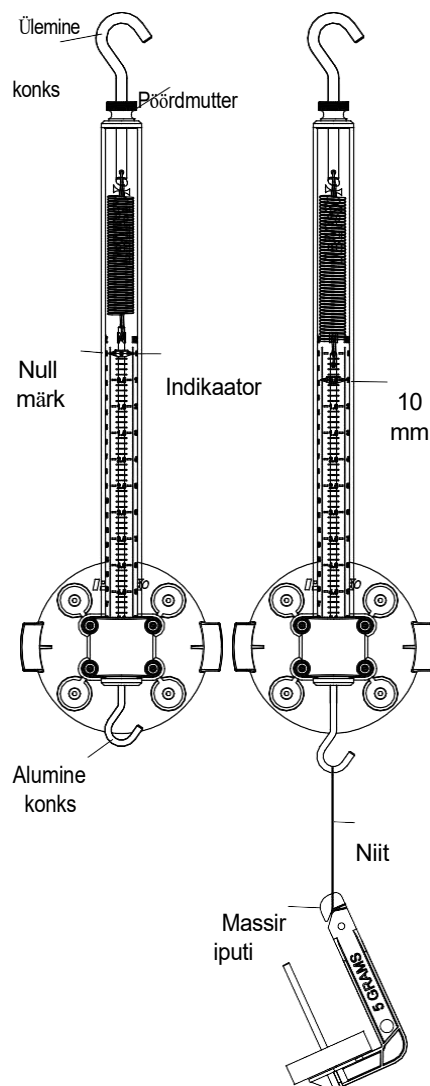
Hooke'i seadus kirjeldab jõu ja „ideaalse” vedru pikenemise vahelist seost. Seaduse kohaselt on jõud ja pikenemine võrdelised. Teisisõnu on jõu ning pikenemise jagatis konstant k . Seda konstanti nimetatakse „vedruteguriks”.

Seadistamine

Asetage vedrukaal staatikatahvile nii, et vedru ripuks torus vertikaalselt. Ärge riputage alumise konksu külge midagi. Indikaator peab olema joondatud sildil oleva nullmärgiga. Vedrukaalu nullimiseks lõdvendage kaalu ülaosas olevat pöördmutrit. Indikaatori langetamiseks pöörake ülemist konksu päripäeva ja indikaatori tõstmiseks vastupäeva. Kui indikaator on sildil oleva nullmärgiga joondatud, pingutage pöördmutter.

Protseduur

1. Kinnitage niit alumise konksu külge ja riputage niidi otsa massiriputi.
2. Lisage massiriputile massi, kuni indikaator on joondatud sildil oleva 10 mm märgiga. Reguleerige massi nii, et indikaator oleks märgile võimalikult lähedal. Hinnake mõõtemääramatust. (Kui lisate või eemaldate 0.5 g, kas näete muutust? Mis juhtub, kui lisate või eemaldate 1 g või 2 g?)
3. Kirjutage kogumass (koos massiriputiga) andmetabelisse. Kirjutage üles mõõtemääramatus.
4. Lisage massiriputile massi, kuni indikaator on joondatud sildil oleva 20 mm märgiga, ning kirjutage üles kogumass ja mõõtemääramatus.
5. Korra toimingut, nihutades indikaatorit iga kord 10 mm võrra allapoole, kuni indikaator on joondatud 80 mm märgiga. Kirjutage iga kord üles kogumass ja mõõtemääramatus.



Joonis 1.1: Seadistus ja protseduur

Andmetabel

Vedru nihe (m)	Mass (kg)	Mõõtemääramatus	Kaal (N)
0.010 m (10 mm)			
0.020 m (20 mm)			
0.030 m (30 mm)			
0.040 m (40 mm)			
0.050 m (50 mm)			
0.060 m (60 mm)			
0.070 m (70 mm)			
0.080 m (80 mm)			

Arvutused

- Kasutades valemit $F = mg$, kus m on mass ja g raskuskiirendus, arvutage iga katse jaoks kaal njuutonites. Kirjutage kaal andmetabelisse. (Õige jõu saamiseks njuutonites tuleb massi väärtus teisendada kilogrammideks.)
- Koostage millimeetripaberile graafik Kaal (N) sõltuvuses vedru nihkest (m), kus vedru nihe on x-teljel.
- Tõmmake graafikule sirge, mis sobib teie andmepunktidega kõige paremini. Selle sirge tõus graafikul on vedru venitanud jõu ja venivuse suhe. Teisisõnu on tõus *vedrukaalu* vedru vedrutegur k .
- Määrake graafikult vedrutegur k ja kirjutage tulemus üles. Lisage kindlasti ühikud (njuutonit meetri kohta).

Vedrutegur = _____

Vedrukaalu kasutamine jõu mõõtmiseks

- Riputage vedrukaalule 160 g (0.160 kg). Arvutage kaal valemi $F = mg$ põhjal. Lugege vedrukaalult jõud njuutonites.

Kaal = _____

Vedrukaalu näit = _____

- Kuidas võrdub vedrukaalu mõõtetulemus tegeliku kaaluga?

- Arvutage protsentuaalne erinevus: $\left| \frac{\text{Weight Spring Scale} - \text{Kaal}}{\text{Kaal}} \right| \times 100$

Protsentuaalne erinevus = _____

Küsimused

- Hooke'i seaduse kohaselt on vedrudes jõu ja nihke vaheline seos lineaarne. Kui Hooke'i seadus ei kehtiks, kas vedru saaks siiski edukalt jõudude mõõtmiseks kasutada? Kui jah, siis kuidas?
- Mil viisil on Hooke'i seadus kasulik vedru kalibreerimisel jõu mõõtmiseks?
- Kas teie kaalu ja vedru nihke graafiku parima sobivusega sirge läbis alguspunkti (nulli)? Kui ei, mida see tähendab?

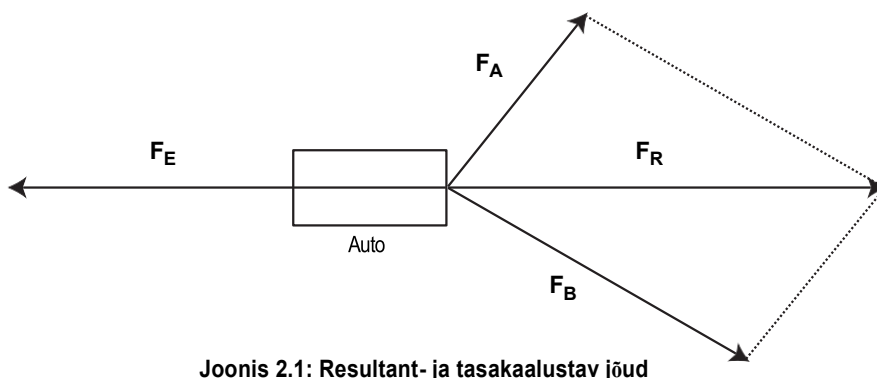
Katse 2: Jõudude liitmine — resultant- ja tasakaalustavad jõud

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelKinnitav	vedrukaal
JõuratasSuured	ja väikesed plokid
Masside ja riputite kom	plektNiit

Teooria

Joonisel 2.1 tõmbavad inimesed A ja inimene B mudasse kinni jäänud autot jõududega, mida tähistavad F_A ja F_B . Kuna need jõud mõjuvad **auto samale** punktile, nimetatakse neid koonduvateks jõududeks. Iga jõu määratlevad nii suund (vektornoole suund) kui ka suurus, mis on võrdeline vektornoole pikkusega. (Jõu suurus ei sõltu pukseerimiskõie pikkusest.)



Joonis 2.1: Resultant- ja tasakaalustav jõud

Kahe inimese rakendatud kogujõu saab määrata vektorite F_A ja F_B **liitmisega**. Näites kasutatakse rõõpküliku meetodit. Rõõpküliku diagonaali nimetatakse **resultantjõuks** F_R . See näitab F_A ja F_B kombinatsiooni suurust ja **suunda**.

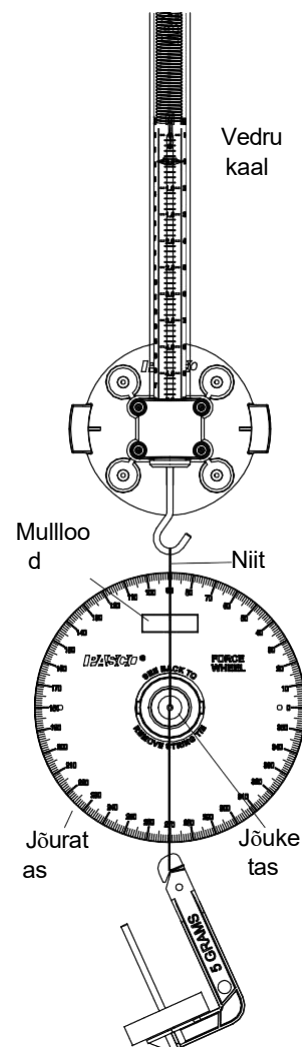
Kuna auto ei liigu, peab autole mõjuv resultantjõud olema null. Auto ja muda vaheline hõõrdejõud on võrdne resultantjõuga F_R . **Seda** samaväärset

vastassuunalist jõudu nimetatakse **tasakaalustavaks** jõuks F_E . Selle jõu suurus on sama **mis** resultantjõul F_R ja suund resultantjõule vastupidine.

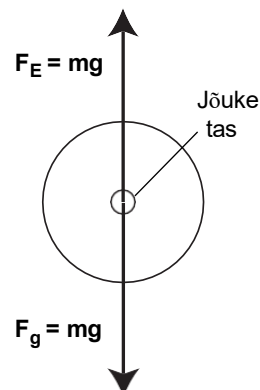
Seadistamine

Paigaldage vedrukaal ja jõuratas staatikatahvlile nagu näidatud. Pöörake jõuratast, kuni mulllood näitab, et jõuratas on loodis. Kinnitage üks jõuratta keskmises oleva jõuketta (nöörikinnituse siseosa) niit vedrukaalu alumise konksu külge. Ühendage teine niit massiriputiga (laske kolmandal niidil vabalt rippuda). Lisage massiriputile 80 g (0.080 kg).

Reguleerige vedrukaalu üles või alla nii, et jõuketras oleks jõuratta keskel. Massiriputi rakendab allapoole **jõudu** $F_g = mg$ (raskusjõud, kus m on massiriputi kogumass). Kui jõuketras on keskel, on süsteem tasakaalus, mistõttu allapoole suunatud jõudu F_g peab tasakaalustama võrdne ja vastassuunaline **tasakaalustav** jõud F_E . Sel juhul rakendab **tasakaalustava** jõu F_E vedrukaal.



Joonis 2.2: Seadistus

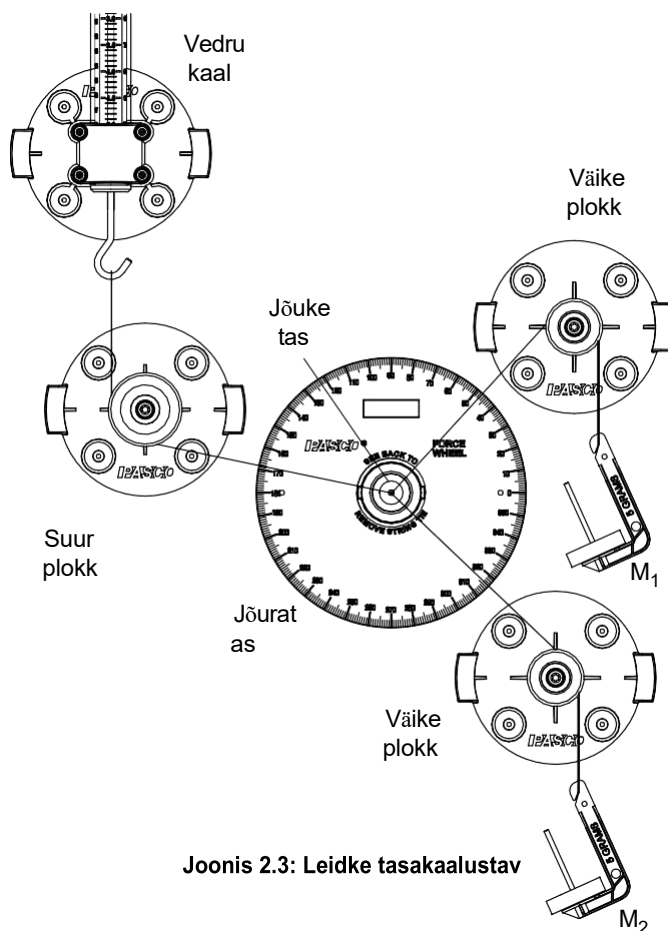


Protseduur: kaks jõudu

1. Lisage massiriputile 0.5 g või eemaldage 0.5 g. Kas jõuketask nihkus keskpärisest eemale? Kui palju saate massiriputi massi muuta, ilma et jõuketask nihkumiseks muutuks?
2. Millised on riputi rakendatava raskusjõu F_g suurus ja suund, kui $F_g = mg$?
 - F_g : Suurus _____ Suund _____
3. Kasutage vedrukaalu ja jõuratast, et määrata tasakaalustava jõu F_E suurus ja suund.
 - F_E : Suurus _____ Suund _____

Protseduur: kolm jõudu

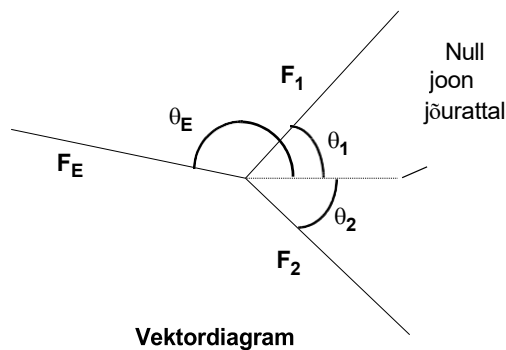
1. Kinnitage suur plokki ja kaks väikest plokki staatikatahvile ning liigutage vedrukaalu joonisel näidatud asendisse.
2. Kinnitage niidid vedrukaalu alumise konksu külge ja massiriputite külge üle väikeste plokide. Väikesed plokid.
3. Lisage ülemisele massiriputile 30 g (0.030 kg) ja alumisele massiriputile 50 g (0.050 kg) massiriputi.
4. Reguleerige suurt plokki ja vedrukaalu nii, et jõuketask oleks jõuratta keskel.
5. Kui palju saate riputite massi muuta nii, et jõuketask jääks siiski jõuratta keskele?



Andmed

Kirjutage üles rippuvate masside M_1 ja M_2 väärtused (koos massiriputite massiga), jõudude F_1 , F_2 ja F_E suurused njuutonites ning nurgad θ_1 , θ_2 ja θ_E jõuratta nullkraadi joone suhtes.

Mass (kg)	Jõud (N)	Nurk (°)
M_1	F_1	θ_1
M_2	F_2	θ_2
	F_E	θ_E



Analüüs

1. Kasutage eraldi millimeetripaberilehel tabelisse kirjutatud väärtusi, et koostada vektordiagramm jõudude F_1 , F_2 ja F_E jaoks. Valige sobiv mõõtkava, näiteks 2.0 sentimeetrit njuutoni kohta, ning tehke iga vektori pikkus võrdeliseks jõu suurusega. Tähistage iga vektor ja märkige selle esindatava jõu suurus.
2. Kasutage oma vektordiagrammil rõõpküliku meetodit, et joonistada F_1 ja F_2 resultant. Tähistage resultant F_R . Mõõtke F_R pikkus, et määrata resultantjõu suurus, ja märkige see suurus oma vektordiagrammile.
3. Mõõtke diagrammil F_R suund diagrammi horisontaaltelje suhtes ja tähistage nurk θ_R .

Küsimused

1. Kas tasakaalustava jõuvektori F_E suurus tasakaalustab täpselt resultantjõuvektori F_R suuruse? **Kui** ei, millised võivad olla erinevuse võimalikud põhjused?
2. Kuidas võrreldub tasakaalustava jõuvektori F_E suund resultantjõuvektori F_R suunaga?

Laiendus

Muutke F_1 ja F_2 suurusi ja suundi ning korrake katseid.

Katse 3: Jõudude lahutamine — komponendid

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelKinnitav	vedrukaal
JõuratasPlokid	(2)
Masside ja riputite kom	plektNiit

Teooria

Katses 2 liitsite koonduvaid jõude vektoriaalselt, et määrata ühendatud jõudude suurus ja suund. Selles katses toimite vastupidiselt: leiate kaks jõudu, mille liitmisel saadakse algse jõuga sama suurus ja suund. Nagu näete, saab iga X-Y tasandi jõuvektorit esitada x-suunalise ja y-suunalise vektorina.

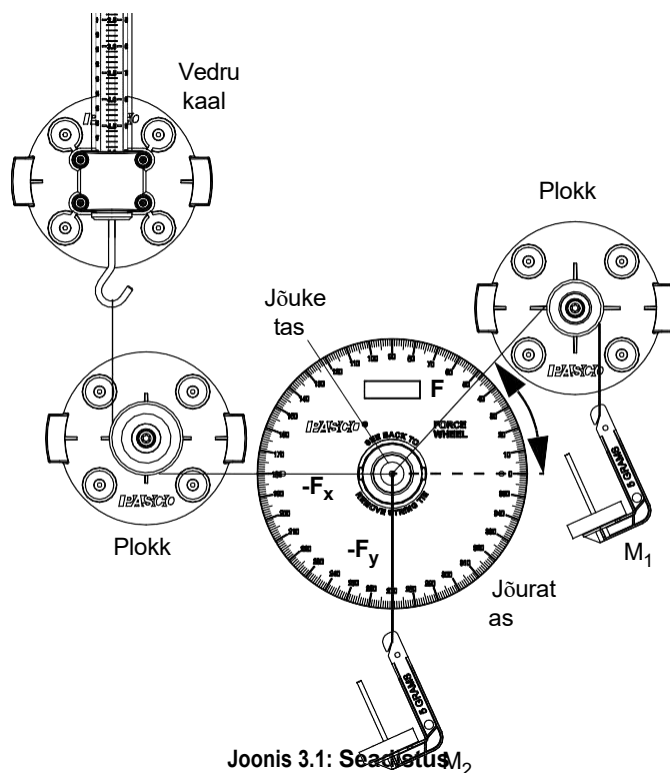
Seadistamine

Paigaldage seadmed joonisel näidatud viisil. Looge näidatud viisil jõuvektor F , riputades massi M_1 jõuratta keskel oleva jõuketta niidi külge üle ploki.

Paigaldage vedrukaal ja plokk nii, et vedrukaalu niit kulgeks ploki alumisest osast jõukettani horisontaalselt. Riputage teine massiriputi otse jõuratta keskel oleva jõuketta külge.

Nüüd tõmmake vedrukaalu ploki poole või sellest eemale, et reguleerida jõu horisontaalset ehk x-komponenti F_x . Reguleerige vertikaalset massiriputi M_2 massi, et muuta jõu vertikaalset ehk y-komponenti F_y . Reguleerige x- ja y-komponente sel viisil, kuni jõu ketas on jõuratta keskel.

Märkus: Need x- ja y-komponendid on tegelikult jõu F tasakaalustava jõu F x- ja y-komponendid, mitte jõu F enda **komponendid**.



Protseduur 1

- Arvutage ja kirjutage üles F suurus (valemi $F = mg$ põhjal). Mõõtke jõurattaga F nurk ja **kirjutage** seejärel nurk üles.
 - Suurus, $F =$ Nurk, _____ $\square =$ _____
- Kirjutage üles jõu F tasakaalustava jõu x-komponendi suurus ning arvutage ja kirjutage üles tasakaalustava jõu **y-komponent**.
 - X-komponent = _____ Y-komponent = _____

3. Millised on F_x ja F_y , jõu F x - ja y -komponentide suurused?

• $F_x =$ _____ $F_y =$ _____

4. Muutke jõuvektori F suurst ja suunda ning korrake katset.

5. Kirjutage üles uue jõuvektori F suurus ja **nurk** ning F_x ja F_y **suurused**.

• Suurus, $F =$ Nurk, _____ $\square =$ _____

• $F_x =$ _____ $F_y =$ _____

Taust

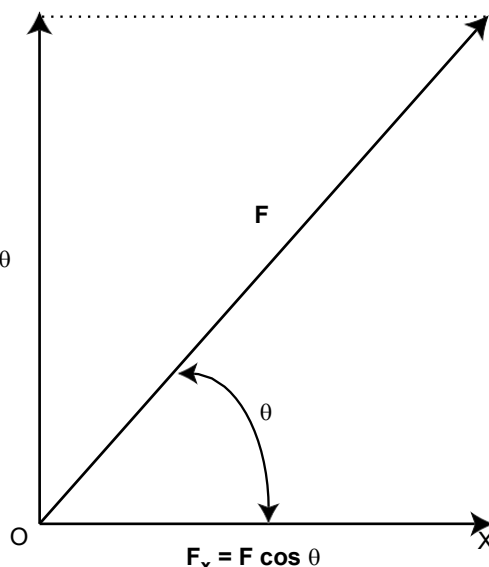
Miks kasutada vektorite määramiseks komponente? Üks põhjus on see, et komponendid muudavad vektorite matemaatilise liitmise lihtsamaks. Joonisel on näidatud pikkusega F vektori x - ja y -komponendid ning nurk θ x -telje suhtes. Kuna komponendid on teineteisega täisnurga all, on nende resultandi määramiseks kasutatav rõõpkülik ristkülik. Täisnurkse kolmnurga AOX abil saab F komponendid arvutada:

• F_x , jõu F x -komponent, on $F \cos \theta$

• F_y , jõu F y -komponent, on $F \sin \theta$

Kui soovite liita mitu vektorit, leidke iga vektori x - ja y -komponendid. Liitke kõik x -komponendid kokku ja kõik y -komponendid kokku. Saadud väärtused on resultandi x - ja y -komponendid. Resultandi **FR suurus** on resultantvektori x -komponendi (R_x) ja y -komponendi (R_y) ruutude summa ruutjuur.

resultandi x -komponent (R_x) ja y -komponent (R_y). $FR =$



Joonis 3.2: Vektori komponendid

$$\sqrt{(R_x)^2 + (R_y)^2}$$

Resultandi nurk on y -komponendi ja x -komponendi jagatise arkustangens. $\square R =$

$$\text{atan}\left(\frac{R_y}{R_x}\right)$$

Protseduur 2

Veenduge, et jõuratas oleks loodis. Seadistage uus jõud F . Viige üks jõuketta niit üle ploki ja siduge niidi otsa massiriputi. Lisage massiriputile massi.

1. Arvutage ja kirjutage üles ploki ning massiriputiga seadistatud jõu F suurus. Määrake nurk jõuratta abil.

• Suurus, $F =$ Nurk, _____ $\square =$ _____

2. Arvutage uue jõu F x - ja y -komponentide F_x ja F_y suurused. (Pidage **meeles**, $F_x = F \cos \theta$ ja $F_y = F \sin \theta$.)

• $F_x =$ _____ $F_y =$ _____

3. Seejärel paigaldage vedrukaal koos ploki ja jõuketta niidiga nii, et see rakendaks uue jõu F **x -komponenti** F_x . Reguleerige vedrukaalu nii, et see tõmbaks jõuketast horisontaalselt jõuga F_x .

4. Järgmisena kinnitage massiriputi jõuketta kolmanda niidi külge nii, et niit ripuks vertikaalselt.

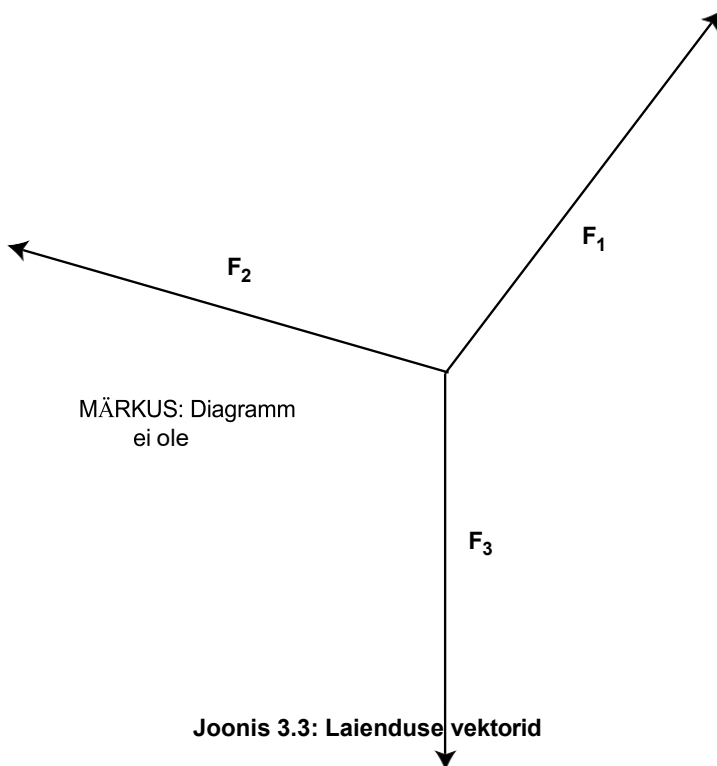
Lisage riputile massi, et see tõmbaks jõuketast vertikaalselt jõuga F_y .

Küsimus

1. Kas jõuketas on jõuratta keskel tasakaalus?
2. Miks või miks mitte?

Laiendused

1. Üldiselt on kõige kasulikum leida vektori komponendid piki ristuvaid telgi, nagu tegite eespool. Siiski ei pea teljed olema tingimata risti. Kui aega jätkub, proovige seadistada seade nii, et leiaksite vektori komponendid piki mitteristuvaid telgi. Kasutage plokki komponentjõudude suunamiseks mitteristuvatesse suundadesse.
2. Joonisel on kujutatud klassikaline vektorikombinatsioon. Jõuketta tasakaaluks peavad jõudude F_1 ja F_2 **x-komponendid** olema võrdsed ja vastassuunalised ning F_1 ja F_2 y-komponentide summa peab võrduma vertikaalse jõu F_3 suurusega. Seadistage seade nii, et vedrukaal rakendaks **jõudu** F_1 . Kui süsteem on tasakaalus, määrake vektorite x- ja y-komponendid ning võrrelge neid.
3. Joonisel kujutatud seadistuse korral muutke F_1 ja F_2 nurki nii, et vektorid oleksid x-teljele lähemal. Arvutage x-komponendid ja jälgige muutust. Mis juhtub x-komponentidega, kui kaks jõudu muutuvad üha paralleelsemaks? Kui suurt jõudu oleks vaja, kui F_1 ja F_2 **oleksid** mõlemad horisontaalsed?



Katse 4: Jõumoment — paralleelsed jõud

Vajalikud seadmed

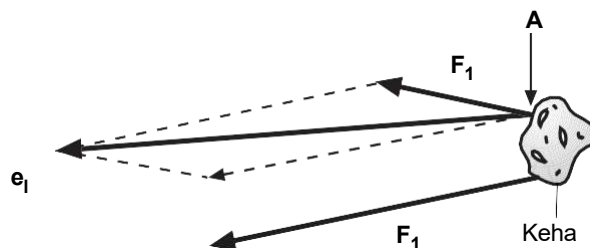
Nimetus	Nimetus
Staatikatahvel/Tasakaaluhoob	ja nurgamõõturid
Masside ja riputite kom	plekt/Niit

Teooria

Katses 2 leidsite koonduvate jõudude — samale punktile mõjuvate jõudude — resultandid ja tasakaalustavad jõud. Tegelikult maailmas ei ole jõud sageli koonduvad.

Need mõjuvad keha erinevatele punktidele. Joonis näiteks tõmbavad kaks jõudu keha eri punktidest. Võib esitada kaks küsimust:

1. Millises suunas keha kiireneb?
2. Kas keha hakkab pöörlema?

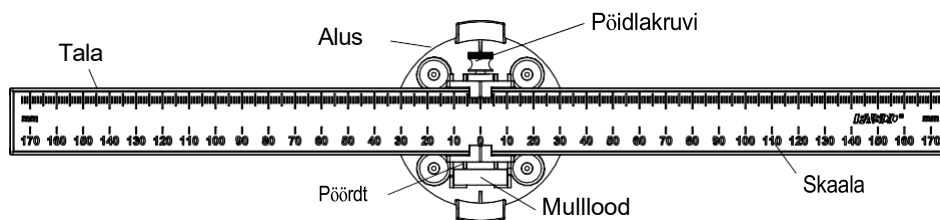


Joonis 4.1: Mittekoonduvad jõud

Kui mõlemad jõud rakendatakse punktis A, oleks resultant joonisel näidatud jõuvektor FR. Tegelikult näitab FR suunda, milles keha kiireneb. (Seda ideed uuritakse edaspidistes katsetes.) Aga teine küsimus? Kas keha pöörleb? Selles katses hakkate uurima jõutüüpe, mis põhjustavad füüsikaliste kehade pöörlemist. Seejuures tutvute uue mõistega — jõumoment.

Seadistamine

Paigaldage tasakaaluhoob staatikatahvi keskosa lähedale.



Joonis 4.2: Tasakaaluhoob

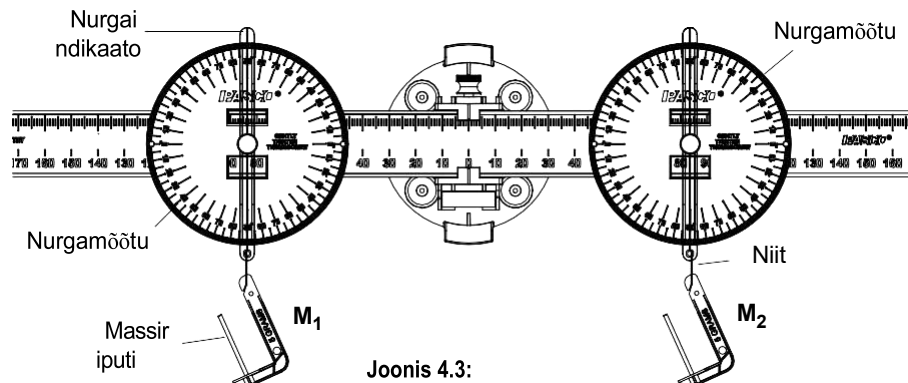
Loodige tala

Lõdvendage pöidlakruvi ja reguleerige tala nii, et tala nullmärk oleks joondatud pöördtelje indikaatormärkidega. Kui tala on loodis, asub mullloodi mull kahe joone vahel keskel.

Lisage nurgamõõturid

Kõigepealt määrake kahe nurgamõõtu mass ja kirjutage massid üles. (Pange tähele, et massi mõõtmiseks saab kasutada vedrukaalu.)

- Nurgamõõtur 1 = _____
- Nurgamõõtur 2 = _____



Joonis 4.3:

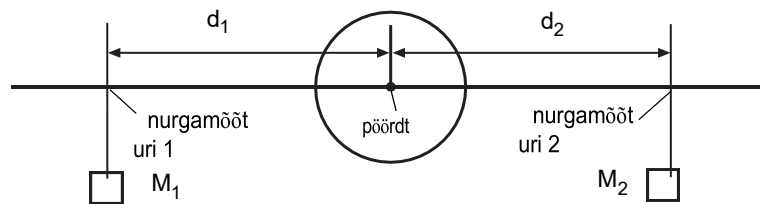
Lõdvendage kahe nurgamõõtu pöidlakruvid ja libistage üks nurgamõõtur tala kummassegi otsa. Siduge massiriputi iga nurgamõõtu nurgaindikaatori niidi külge.

Protseduur: võrdne kaugus, võrdne mass

Asetage üks nurgamõõtur tala ühe otsa lähedale ja pingutage selle pöidlakruvi, et see paigale kinnitada. Reguleerige teise nurgamõõtuuri asendit, kuni tala on täpselt tasakaalus, ja pingutage seejärel selle pöidlakruvi.

1. Mõõtke d_1 ja d_2 kaugused pöördteljest kummagi nurgamõõtuuri keskpunktini.

- $d_1 =$ _____
- $d_2 =$ _____



Joonis 4.4: Jõumomentide mõõtmine

2. Lisage kummalegi massiriputile 50-grammine mass.

- Kas tala on endiselt tasakaalus?

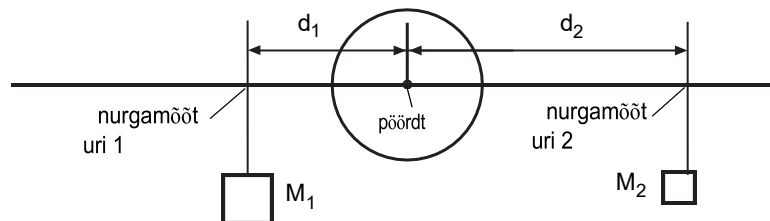
3. Lisage ühele massiriputile veel 20-grammine mass.

- Kas saate tala tasakaalu taastada, muutes teise nurgamõõtuuri ja massiriputi asendit?

Protseduur: erinev kaugus, erinev mass

Asetage üks nurgamõõtur ligikaudu poolele tee pöördtelje ja tala otsa vahel ning pingutage selle pöidlakruvi, et see paigale kinnitada. Lisage massiriputile M_1 75 grammi massi.

Asetage teisele massiriputile (M_2) erinevaid masse ja nihutage seda mööda tala vastavalt vajadusele, et tala uuesti tasakaalustada.



Joonis 4.5: Rohkem jõumomente

1. Esimeses tasakaaluasendis mõõtke pöördtelje kummagi küljel olev kogumass M_1 ja M_2 (nurgamõõtur, massiriputi, lisatud massid) ning kirjutage massid andmetabelisse.
 2. Mõõtke nurgamõõtuuride keskpunktide ja pöördtelje vahelised kaugused d_1 ja d_2 ning kirjutage väärtused andmetabelisse.
 3. Tehke mõõtmised veel viie erineva M_2 väärtusega ja kirjutage tulemused andmetabelisse. Lisage mõõõtühikud kindlasti.
 4. Kui aega jätkub, muutke M_1 ja korrake protseduuri.
- Meeldetuletus: Täpsete tulemuste saamiseks arvestage M_1 ja M_2 mõõtmisel nurgamõõtuuri, massiriputi ja lisatud masside massiga.

Arvutused

Arvutage kummagi talapoolse kogumassi tekitatud raskusjõud (kaal = mg) iga juhtumi jaoks. Arvutage jõumomendid $\square_1$ ja $\square_2$ kummagi talapoolel iga juhtumi jaoks. Pidage meeles, et jõumoment $\square$ on resultantjõu ja jõuõla vektorkorrutis. Kuna selles katses on kaugus ja jõu suund täisnurga all, on jõumoment $\square = F d$ (kus $F_g = mg$). Kirjutage iga tala tasakaaluasendi arvutatud kaalu F_g ja jõumomendi $\square$ väärtused üles.

Andmetabel

Juhtum	Kogumass M1 (kg)	Kaal F1 (N)	Kaugus d1 (m)	Jõumoment $\tau_1 = F_1 d_1$	Kogumass M2 (kg)	Kaal F2 (N)	Kaugus d2 (m)	Jõumoment $\tau_2 = F_2 d_2$
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Küsimused

1. Milline matemaatiline seos peab teie tulemuste põhjal olema $\square 1$ või $\square 2$ vahel, et tala oleks tasakaalus?
2. Millise jõumomendi avaldab tasakaalutalale pöördtelje ülespoole suunatud jõud?

Laiendus

Kui aega jätkub, proovige lisada talale kolmas nurgamõõtur ja massiriputi tala samale küljele, kus asub teine nurgamõõtur.

Küsimus

Milline seos peab olema $\square 1$, $\square 2$ ja $\square 3$ vahel, et tala oleks kolme nurgamõõturi ja massiriputiga tasakaalus?

Katse 5A: Massikese

Vajalikud seadmed

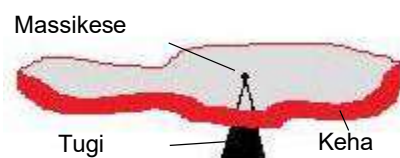
Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelTasakaaluhoob	ja nurgamõõturid
Asümmeetriline plaatNiit	Masside
ja riputite komplekt	

Teooria

Gravitatsioon on universaalne jõud: universumi iga aineosa tõmbub iga teise aineosa poole. Seetõttu tõmbub tasakaaluhoova iga aineosa pöördteljele toetatud tasakaaluhoovas iga Maa aineosa poole.

Õnneks annavad kõik need üksikud raskusjõud kokku ühe resultandi. See resultant mõjub nii, nagu tõmbaks see Maa keskme ja tasakaaluhoova massikeskme vahel. Jõu suurus on sama, nagu oleks kogu Maa aine koondunud Maa keskmesse ja kogu tasakaaluhoova aine tasakaaluhoova massikeskmesse.

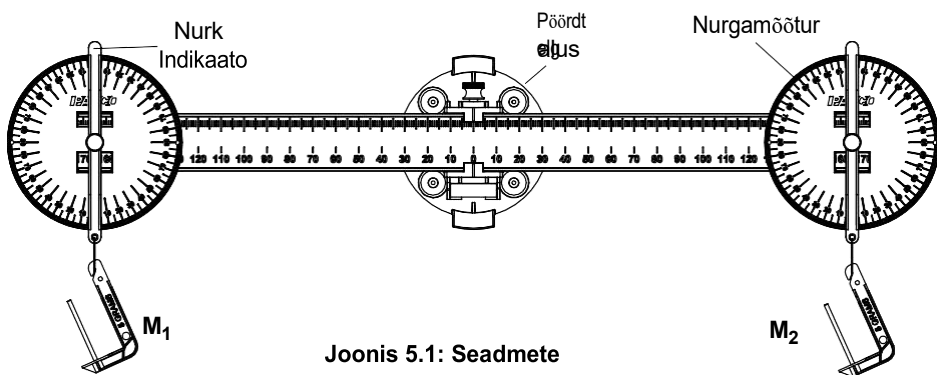
Pöörlema visatud keha kaldub pöörlema ümber oma massikeskme ning massikese liigub mööda parabolset trajektoori. Keha, mille massikese asub toe kohal, kaldub säilitama pöördtasakaalu (püsima toel tasakaalus). Selles katses kasutate teadmisi jõumomendist, et mõista ja leida keha massikese.



Seadistamine

Mõõtke tala mass ja kirjutage see üles.

Seejärel määrake kahe nurgamõõduri mass ja kirjutage massid üles. (Pange tähele, et massi mõõtmiseks saab kasutada vedrukaalu.)



Joonis 5.1: Seadmete

- Tala = _____
- Nurgamõõdur 1 = _____
- Nurgamõõdur 2 = _____

Lõdvendage kahe nurgamõõduri pöidlakruvid ja libistage üks kummalegi tala otsale nii, et kumbki nurgamõõdur oleks 165 mm märgi juures. Siduge massiriputi iga nurgamõõduri nurgaindikaatori niidi külge.

Paigaldage tasakaaluhoob staatikatahvi keskosa lähedale.

Kirjutage üles tala, nurgamõõdurite ja massiriputite kogumass (iga riputi 5 grammi).

- Süsteemi mass = _____

Loodige tala ja märkige massikese

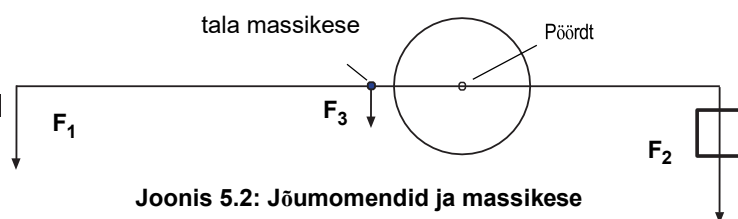
Lõdvendage pöidlakruvi ja reguleerige tala nii, et pöördtelje indikaatormärgid oleksid joondatud tala nullmärgiga. Vajaduse korral reguleerige kahe nurgamõõduri asendit, kuni nullloodi null asub kahe joone vahel keskel. Kui tala on tasakaalus ja loodis, pingutage pöidlakruvid, et nurgamõõturid ja tala paigale kinnitada.

Tehke talale pliiatsimärk süsteemi massikeskme tähistamiseks. Kogu süsteemi mass (tala, nurgamõõturid, massiriputid) mõjub nii, nagu oleks see koondunud massikeskmesse.

Kui tala on tasakaalus, peab pöördtelje jõud olema talale mõjuva kogu raskusjõu tasakaalustav jõud. Kuna tala ei pöörle, peavad raskusjõud ja selle tasakaalustav jõud olema koonduvad jõud.

Katse

1. Miks pöörleks tasakaaluhoob tingimata, kui raskusjõudude resultant ja pöördtelje avaldatav jõud ei oleks koonduvad jõud?
 - Mõelge tasakaaluhoovast kui paljude väikeste rippuvate masside kogumist. Iga rippuvat massi tõmbab gravitatsioon allapoole ja seetõttu tekitab see tasakaaluhoova pöördtelje ümber jõumomendi.
2. Milline on päripäeva mõjuvate jõumomentide summa ja vastupäeva mõjuvate jõumomentide summa seos massikeskme suhtes? Selgitage.
 - Lisage ühele massiriputile 50 grammi ja teisele massiriputile 100 grammi. Lõdvendage tala pöidlakruvi ja libistage tala läbi pöördtelje, kuni tala ja massid on tasakaalus. Pingutage pöidlakruvi.
 - Pöördtelg toetab endiselt kõike (tala, nurgamõõtureid, massiriputeid ja rippuvaid masse), kuid nüüd süsteemi uues massikeskmes — pöördtelje punktis.
3. Arvutage kolm jõumomenti τ_1 , τ_2 ja τ_3 , mille tekitavad kolm jõudu F_1 , F_2 ja F_3 uue pöördtelje asendi suhtes. Märkige kindlasti, kas iga jõumoment on päripäeva (cw) või vastupäeva (ccw).



Joonis 5.2: Jõumomendid ja massikese

Asend	Mass (kg)	Jõud ($F = mg$)	Kaugus (m)	Jõumoment ($\tau = F d$)
1	0.050			
2	0.100			
3				

4. Kas päripäeva ja vastupäeva jõumomendid on tasakaalus?
 - Eemaldage vasakpoolsele massiriputile 50-grammine mass, kuid jätke riputi ja nurgamõõtur paigale. (Massi eemaldamine kõrvaldab sisuliselt F_1 .) Nihutage tala pöördteljes, kuni F_3 tekitatud jõumoment tasakaalustab F_2 tekitatud jõumomendi ja tala on taas loodis.

- Arvutage jõumomendid pöördtelje suhtes uuesti.

Asend	Jõud ($F = mg$)	Jõumoment ($M = F d$)
2		
3		

5. Kas jõumomendid on tasakaalus?

Asümmeetriline plaat

Asendage tasakaaluhoob jõuanduri kinnitusega. Riputage asümmeetriline plaat jõuanduri kinnituse varda külge.

Kuna varda plaadile mõjuv jõud on plaadile mõjuvate raskusjõudude summa tasakaalustav jõud, peab varda rakendatava jõu mõjusirge läbima plaadi massikeset. Asetage niidijupp üle varda ja kinnitage niidi otsa massiriputi.

Joonistage pliiatsi või „kuivkustutatava” markeriga asümmeetrilisele plaadile joon, mis tähistab niidi asukohta plaadil.

Eemaldage niit ja massiriputi. Riputage plaat teisest avast. Asetage niit ja massiriputi tagasi vardale. Joonistage plaadile uus joon, mis tähistab niidi asukohta.

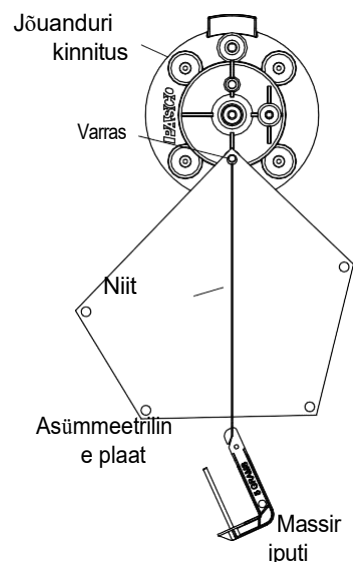
Korrake protsessi kolmanda erineva avaga. Joonistage kolmas joon.

6. Kas niidi rippumiskohta näitav joon läbib plaadi massikeset?

7. Kas see meetod töötab kolmemõõtmelise keha puhul? Miks või miks mitte?

Laiendus

Eemaldage niit ja plaat vardalt. Proovige asümmeetrilist plaati sõrmel tasakaalustada, asetades sõrmeotsa kolme joonistatud joone lõikepunkti alla. Mis juhtub?



Joonis 5.3: Massikesme leidmine

Katse 5B: Füüsikaliste kehade tasakaal

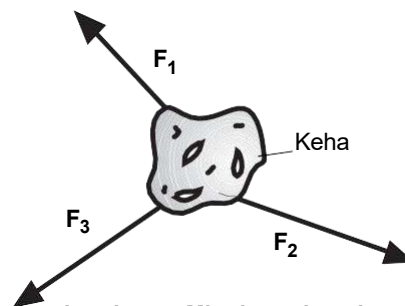
Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikahvelTasakaaluhoob	ja nurgamõõturid
Plokk (1)Kinnitatav	vedrukaal
Masside ja riputite kom	plektNiit

Teooria

Iga kehale mõjuv jõud võib tekitada nii kulgliikumist (keha massikeskme liikumist jõu suunas) kui ka pöörlemist (pöörlemist ümber pöördtelje).

Selles katseosas uurite jõudude ja jõumomentide vastasmõju, analüüsides kõiki füüsikalises tasakaalus kehale mõjuvaid jõude.



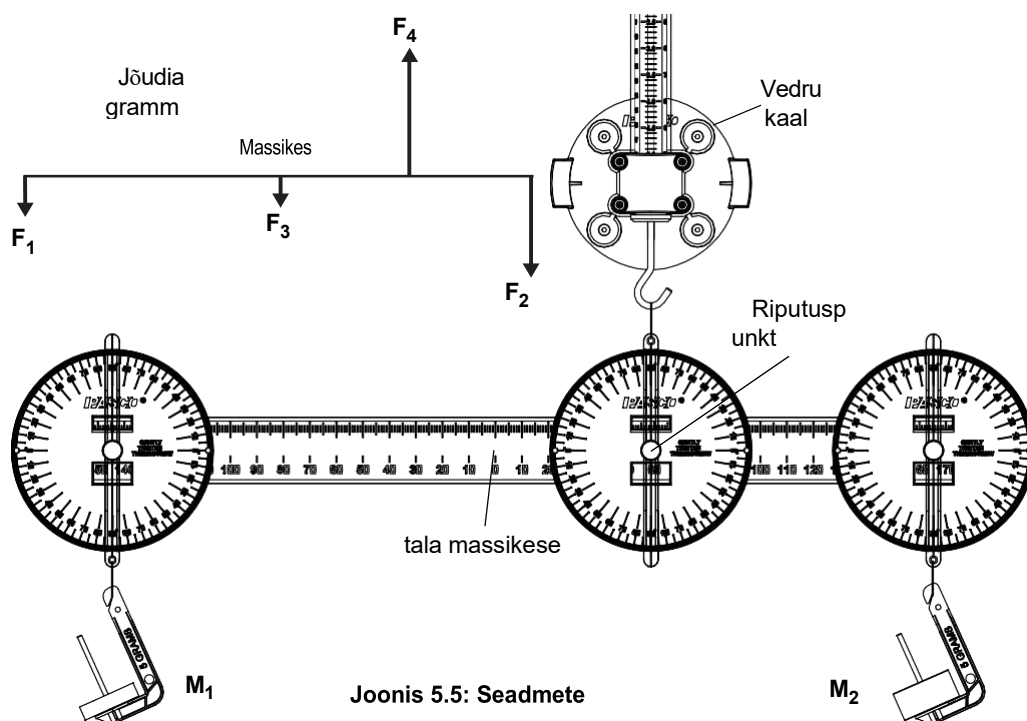
Joonis 5.4: Mittekoonduvad, mitteparalleelsed jõud

Seadistamine

Leidke tasakaalutala massikeske ja märkige see pliiatsiga. Paigaldage seadmed näidatud viisil, kasutades tasakaaluhooval vedrukaalu, massiriputeid ja kolme nurgamõõturit.

Toetades tasakaaluhooba vedrukaaluga, saate nüüd määrata kõik tasakaaluhoovale mõjuvad jõud.

Nagu diagrammil näidatud, hõlmavad need jõud F_1 , massi M_1 kaalu, F_2 , massi M_2 kaalu, F_3 , tasakaalutala kaalu, mis mõjub läbi selle massikeskme, ning F_4 , vedrukaalu ülespoole suunatud tõmbejõudu.



Joonis 5.5: Seadmete

Katse

Täitke andmetabel, märkides M (kilogrammides), F (njuutonites), d (rakendatud jõu kaugus riputuspunktist meetrites) ja τ (riputuspunkti suhtes mõjuv jõumoment njuutonmeetrites). Märkige, kas iga jõumoment mõjub päripäeva (cw) või vastupäeva (ccw).

Andmetabel.

Asend	mass (M)	jõud (F)	kaugus (d)	jõumoment (τ)
1				
2				
3				
4	—			

Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage üles päripäeva ning vastupäeva mõjuvate jõumomentide summad.

$$\Sigma \tau_{cw} = \underline{\hspace{5cm}} \quad \Sigma \tau_{ccw} = \underline{\hspace{5cm}}$$

- Kas jõumomendid on tasakaalus?

2. Arvutage ja kirjutage üles üles- ja allapoole suunatud jõudude summad.

$$\Sigma F_{up} = \underline{\hspace{5cm}} \quad \Sigma F_{down} = \underline{\hspace{5cm}}$$

- Kas kulgliikumist põhjustavad jõud on tasakaalus?

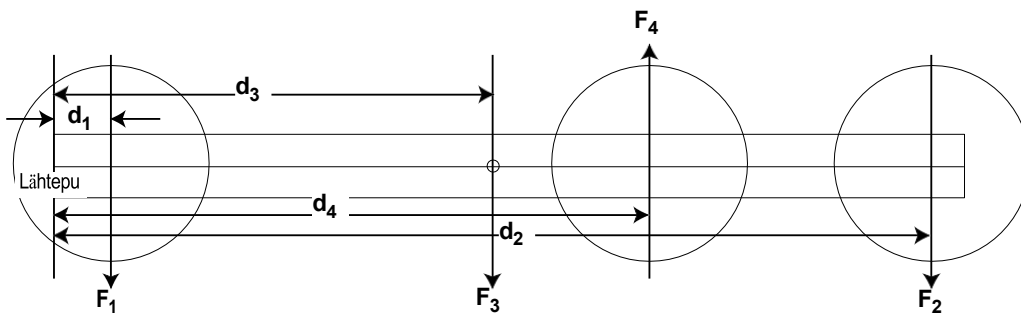
3. Millised tingimused peavad teie vastuste põhjal olema täidetud, et füüsikaline keha oleks tasakaalus (kiirendus puudub)?

Muutke lähtepunkti

Jõumomentide esmakordsel mõõtmisel mõõdeti kõik kaugused tasakaaluhoova riputuspunktist. See mõõdab tala kalduvust pöörduda selle riputuspunkti ümber. Jõumomente võib mõõta ka mis tahes muu punkti suhtes, kas talal või sellest väljaspool. Kasutades samu jõude nagu enne, mõõtke kaugused uuesti, seekord tasakaalutala vasakust otsast nagu diagrammil näidatud.

Arvutage jõumomendid uuesti, et määrata tala kalduvus pöörduda vasaku otsa ümber.

Kirjutage oma andmed teise tabelisse. Nagu varem, märkige, kas iga jõumoment on päripäeva (cw) või vastupäeva (ccw).



Joonis 5.6: Lähtepunkti muutmise

Andmetabel: lähtepunkti muutmine.

Asend	jõud (F)	kaugus (d)	jõumoment (τ)
1			
2			
3			
4			

Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage üles päripäeva ning vastupäeva mõjuvate jõumomentide summad.

$$\Sigma\tau_{cw} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \Sigma\tau_{ccw} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- Kas jõumomendid on tasakaalus?

Laiendus

Kasutage plokki, rippuvat massi ja niiti, et tekitada tala ühes otsas täiendav ülespoole suunatud jõud. Niidi kinnitamiseks tala külge võib vaja minna teipi. Reguleerige ülejäänud rippuvate masside ja vedrukaalu asendeid, et tala oleks jälle tasakaalus ja horisontaalselt loodis.

- Kas kõik jõud on tasakaalus nii kulg- kui ka pöördliikumise suhtes?
- Joonistage oma seadistus ja esitage arvutused eraldi paberilehel.

Katse 6: Jõumoment — mitteparalleelsed jõud

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelTasakaaluhoob	ja nurgamõõturid
PlokkKinnitav	vedrukaal
Masside ja riputite kom	plektNiit

Teooria

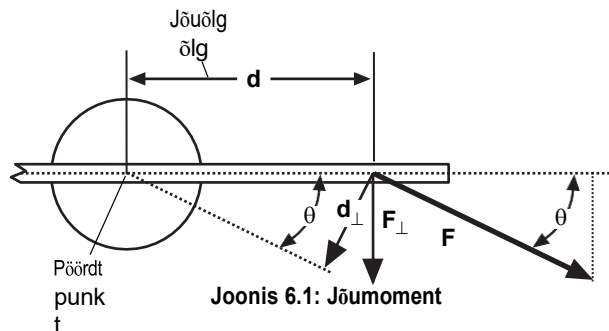
Eelmises katses uurisite tasakaaluhoovale rakendatud jõumomente ja leidsite, et kui pöördtelje suhtes mõjuvad jõumomendid on tasakaalus, jääb tala tasakaalu. Kõik selle katse jõud olid talaga risti ja omavahel paralleelsed. Mis juhtub siis, kui üks või mitu jõudu ei ole talaga risti?

Selgub, et jõumomendi valemit saab üldistada

ka selle juhu jaoks. Jõumoment on jõuvektori ja jõuõla vektorkorrutis, kus jõuõlg on kaugus pöördteljest jõu rakenduspunkti. Üldistatud valem on:

$$\tau = Fd \sin \theta$$

kus F on jõuvektori suurus, d on kaugus pöördteljest jõu rakenduspunkti (s.o „jõuõlg”) ja θ on nurk jõuvektori F ning jõuõla d vahel. Pange tähele, et $F \sin \theta$ on $F_{\perp}$, jõuvektori F komponent, mis on jõuõlaga d risti. Samuti on $d \sin \theta$ jõuõla d komponent, mis on jõuvektoriga F risti. **Teisisõnu** on $d \sin \theta$ ristkaugus d pöördteljest jõu mõjusirgeni.

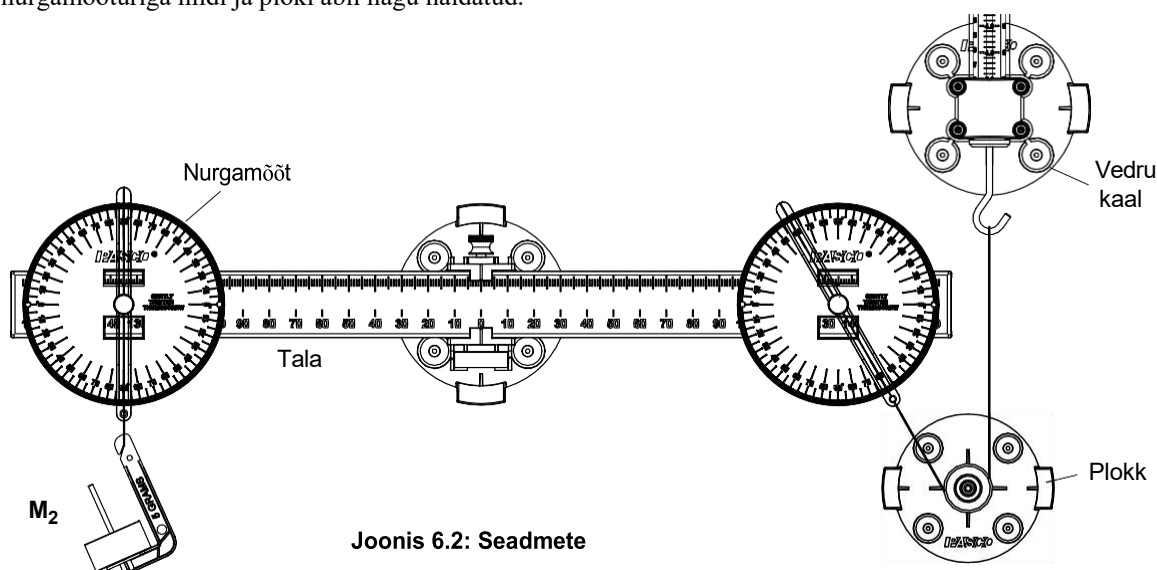


Seadistamine

Paigaldage tasakaaluhoob staatikatahvi vasakule poolele. Reguleerige tala nii, et tala nullmärgid oleksid joondatud pöördtelje indikaatormärkidega.

Paigaldage tala kummassegi otsa nurgamõõtur (näiteks pöördteljest 130 kuni 140 mm kaugusele). Vajaduse korral reguleerige nurgamõõturite asendit nii, et tala oleks tasakaalus ja loodis.

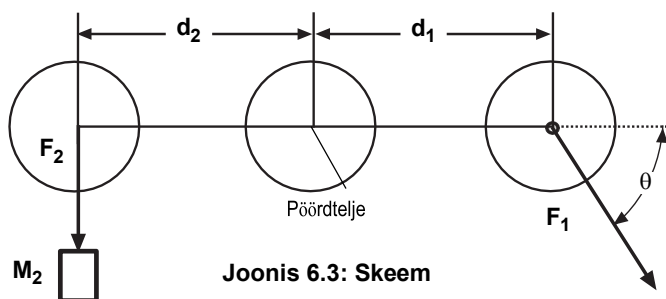
Riputage mass M_2 ühe nurgamõõduri külge. Paigaldage vedrukaal staatikatahvile ja ühendage see teise nurgamõõduri ja ploki abil nagu näidatud.



Joonis 6.2: Seadmete

Protseduur

1. Mõõtke d_1 ja d_2 ning kirjutage väärtused üles.
2. Kirjutage üles kogumass M_2 ja jõu F_2 suurus (rippuva massi kaal). Kasutage mõõdetud väärtusi jõu F_2 tekitatud jõumomendi $\square 2$ arvutamiseks. Lisage iga väärtuse juurde kindlasti ühikud.



Joonis 6.3: Skeem

d_1 (m)	d_2 (m)	M_2 (kg)	F_2 (N)	θ (N·m)

- Ploki liigutamisega saate reguleerida jõu F_1 **nurka**. Pange tähele, et ploki liigutamisel tuleb liigutada ka vedrukaalu, et niit jääks vedrukaalu ja ploki vahel täiesti vertikaalseks.
3. Seadke F_1 nurk kõigile allolevas tabelis toodud väärtustele. Iga nurga korral liigutage vedrukaalu ploki poole või sellest eemale nii palju, et F_1 **suurus** oleks tala tasakaalustamiseks piisav. Kirjutage vedrukaalu jõunäit njuutonites üles.

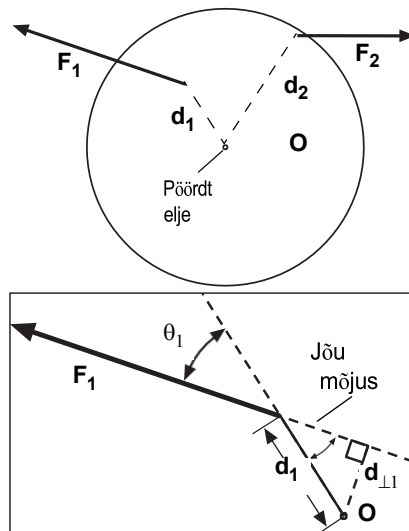
Nurk	F_1 (N)	$\tau_1 = F_1 d_1 \sin \theta$	$(\tau_1 - \tau_2) \div (\tau_1 + \tau_2) / 2$
30°			
40°			
50°			
60°			
70°			
80°			

4. Tehke arvutused vedrukaalu tekitatud jõumomendi $\square 1$ ning $\square 1$ ja $\square 2$ protsentuaalse erinevuse $\mu^{\text{TM}} \rho \alpha \mu \iota \sigma \epsilon \kappa \sigma$. [Protsentuaalne erinevus on kahe jõumomendi erinevus jagatuna kahe jõumomendi keskmisega.]
 - Jõumomendi üheselt mõistetava matemaatilise määratluse $\tau \alpha \gamma \alpha \mu \iota \sigma \epsilon \kappa \sigma$ tuleb $\square 1$ ja $\square 2$ määrata sama valemi järgi.
5. Rakendage jõumomendi üldistatud määratlust ($\square = \Phi d \sin \square$) varem sammus 2 tehtud $\square 2$ arvutusele. [Vihje: Milline on nurk jõu F_2 ja jõuõla d_2 vahel?] Kas üldistatud määratluse järgi arvutatud väärtus muudab tulemusi?

Mitteparalleelsete jõudude analüüs

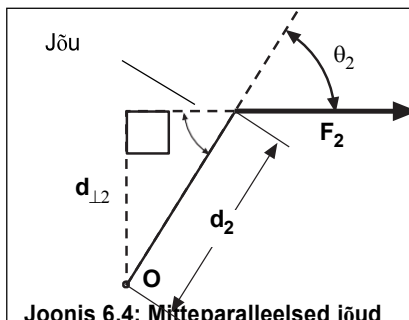
Kujutlege kahte mitteparalleelset jõudu, mis mõjuvad kehale pöördteljest erinevatel kaugustel. Joonisel on näidatud diagramm kahe mitteparalleelse jõu tekitatud jõumomendi arvutamiseks. Jõud F_1 tekitab punkti O suhtes jõumomendi $\square 1$ suurusel $F_1 d_1 \sin \square 1$. Jõud F_2 tekitab punkti O suhtes jõumomendi $\square 2$ suurusel $F_2 d_2 \sin \square 2$. Neid kahte jõumomenti oleks siiski eksitav lihtsalt kokku liita kogujõumomendi määramiseks, sest $\square 1$ ja $\square 2$ põhjustavad punkti O ümber pöörlmist vastassuundades. Kahe või enama jõumomendi liitmisel liitke kokku kõigi päripäeva pöörlmist põhjustavate jõumomentide suurused ja seejärel kõigi vastupäeva pöörlmist põhjustavate jõumomentide suurused. Süsteemi tasakaaluks peab päripäeva jõumomentide summa võrduma vastupäeva jõumomentide summaga.

Pidage meeles, et ristkaugus $d \square \pi \backslash \rho \delta \tau \epsilon \lambda \phi \epsilon \sigma \tau$ jõu mõjusirgeni võrdub $d \sin \square$ ning nurka mõõdetakse jõuõla d ja jõu mõjusirge vahel.



Momendirasas

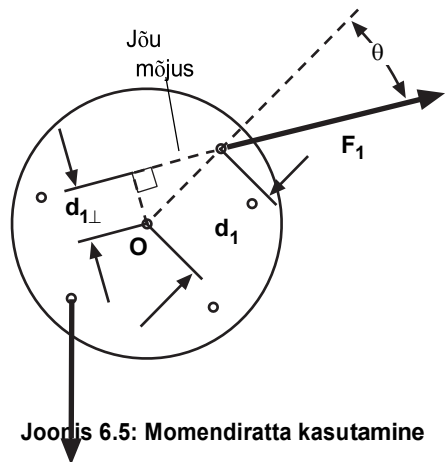
Momendirasas võimaldab hõlpsalt tekitada tasakaalu mitme mitteparalleelse jõu vahel. Joonisel 6.5 on näidatud jõud F , mis rakendub nurga $\square$ alla momendiratta keskpunktist jõu rakenduspunkti kulgeva joone suhtes. Jõumomendi saab arvutada valemiga $\square = F d \sin \theta$. Nagu näidatud, on $d \sin \square$ lihtsalt ristkaugus $d \square \mu \omicron \mu \epsilon \nu \delta \iota \rho \alpha \tau \tau \alpha$ keskpunkti ja jõu mõjusirge vahel, kui seda sirget piisavalt pikendada.



Joonis 6.4: Mitteparalleelsed jõud

Kujutlege momendirattale mõjuvat kahte mitteparalleelset jõudu. Jõu F_1 ja jõuõla d_1 vaheline nurk on $\square$. Ristkaugus $d_1 \square$ pöördtelje punktist O jõu mõjusirgeni on $d_1 \sin \square$. See-tõttu on F_1 tekitatud jõumoment $\square 1$ võrdne $F_1 d_{1\perp}$.

Momendiratta sildi radiaalskaala võimaldab mõõta ristkaugust pöördteljest jõu mõjusirgeni. Iga sildi kontsentrilise ringi raadius on eelmisest 2 mm suurem. Iga momendiindikaatori hoob on läbipaistev ja selle keskjoon näitab jõu mõjusirget.



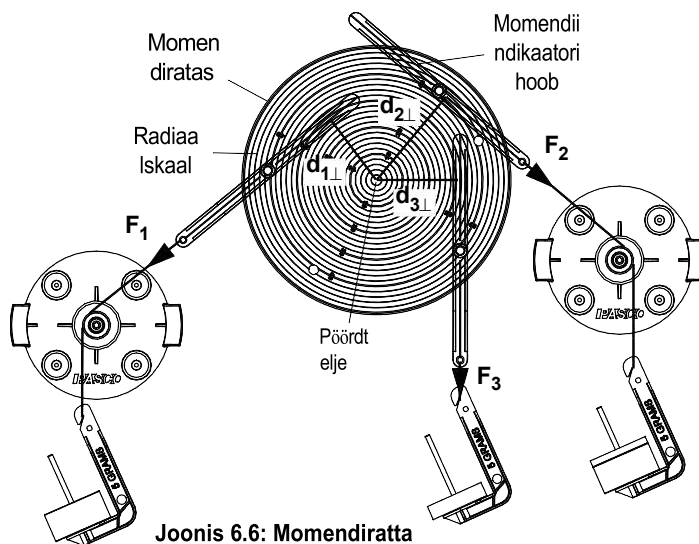
Joonis 6.5: Momendiratta kasutamine

Momendiratta seadistamine

Eemaldage tasakaaluhoob ja paigaldage momendiratas staatikatahvlele nagu diagrammil näidatud. Rakendage rattale plokkide, niidi ja rippuvate massidega kolm jõumomenti.

Mõõdke momendiratta sildi radiaalskaala abil ristkaugus iga jõu mõjusirgest pöördteljeni. Kirjutage kaugused andmetabelisse. Arvutage ja kirjutage üles jõud. Arvutage ja kirjutage üles

iga jõu jõumoment valemiga $\tau = F_{\delta\perp}$. Märkige kindlasti, kas jõumoment on päripäeva või vastupäeva.



Koguresultantjõumomendi määramiseks lahutage vastupäeva jõumomentide summast päripäeva jõumomentide summa.

Andmetabel

	Jõud, F (N)	Ristkaugus, $d_{\perp}$ (m)	Jõumoment, $\tau = F_{\delta\perp}$ (N·m)
1			
2			
3			

Kogujõumoment = _____

Küsimus

Kas katsevea piires on koguresultantjõumoment null, kui momendiratas on tasakaalus?

Laiendus

Korrake protseduuri erinevate jõudude ja nurkadega.

Katse 7: Kaldpind

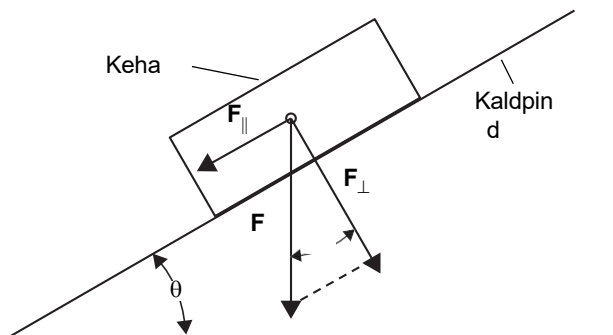
Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelKaldpind	ja käru
Plokk (2)Kinnitav	vedrukaal
Masside ja riputite kom	plektNiit

Sissejuhatus

Oletame, et peate projekteerima kaldtee koos trossiga raske keha hoidmiseks kaldteel. Kui kaldtee kaldenurk on antud, kui suurt jõudu peab tross rakendama, et keha kaldteel hoida? Kui suurt jõudu peab kaldtee taluma?

Selle ülesande võiks lahendada kaldteid ja trosse ehitades ja katsetades või mõõtkavamudeleid testides. Teise võimalusena võiks kasutada teadmisi jõududest ja vektoritest ning lahendada ülesanne matemaatiliselt. Diagrammil on näiteks keha kaal F



Joonis 7.1: Kaldpind

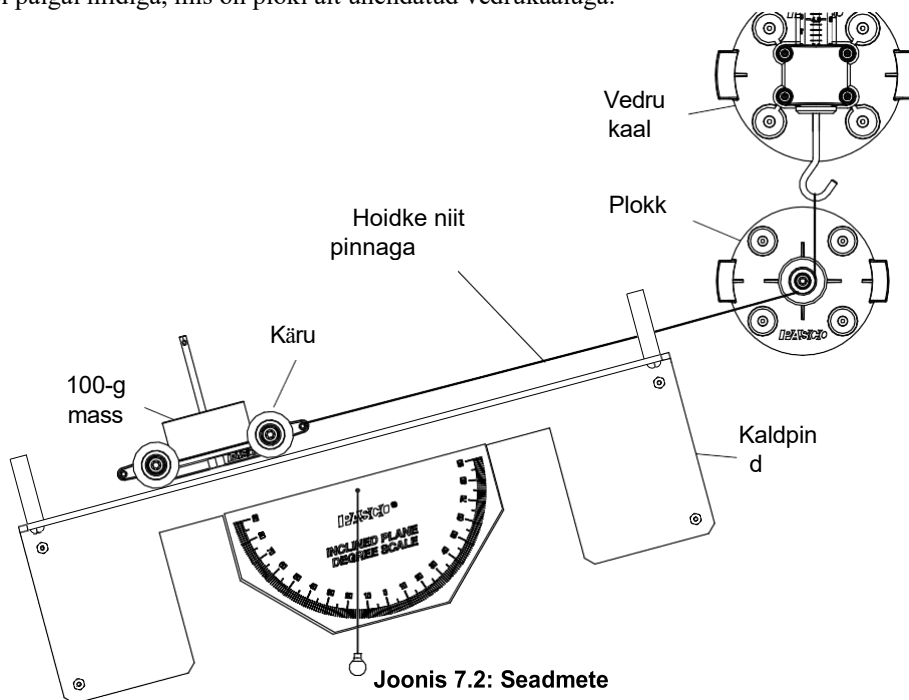
kaldpinnal lahutatav kaheks komponendiks: pinnaga risti olev $F_{\perp}$ ja pinnaga paralleelne $F_{\parallel}$. Nurk θ on kaldpinna kaldenurk. Selles katses võrdlete matemaatilist lahendust otse mõõtkavamudelilt saadud andmetega.

Katse

1. Lisage kärule 100-g mass ning mõõtke ja kirjutage üles kärü kogumass. Arvutage ja kirjutage üles kärü koos massiga kaal.

• kärü kogumass _____ = kärü kaal = _____

2. Paigaldage kaldpind staatikatahvlile. Alustage 15° kaldest. Asetage kärü kaldpinnale ja hoidke kärü kaldteel paigal niidiga, mis on ploki alt ühendatud vedrukaaluga.



Joonis 7.2: Seadmete

Vedrukaalu tekitatud jõud $F_{\mu J \delta \epsilon \tau \delta}$ võrdub raskusjõu komponendiga, mis on kaldpinnaga paralleelne, $F_{\parallel}$. Kaldpinnaga paralleelse jõu arvutatud komponent $F_{\parallel}$ arvutatud $= F \sin \theta$ ja θ , kus θ on pinna nurk.

- Reguleerige kaldpinna kaldenurk kõigile tabelis toodud väärtustele. Täpsete väärtuste saamiseks reguleerige plokki ja vedrukaalu nii, et niit jääks pinnaga paralleelseks. Iga väärtuse korral kirjutage üles pinnaga $\mu J \delta \epsilon \tau \delta$ jõu mõõdetud väärtus $F_{\parallel}$ mõõdetud.
- Iga väärtuse korral arvutage pinnaga paralleelse jõu suurus $F_{\parallel}$ arvutatud $= F \sin \theta$ ja $\mu J \delta \epsilon \tau \delta$ arvutatud väärtus üles.
- Arvutage pinnaga paralleelse jõu mõõdetud ja arvutatud väärtuste protsentuaalne erinevus.

Nurk	$F_{\parallel}$ mõõdetud	$F_{\parallel}$ arvutatud $= F \sin \theta$	Protsentuaalne erinevus*
15°			
30°			
45°			
60°			
75°			

*Protsentuaalne erinevus on mõõdetud ja arvutatud väärtuste erinevuse absoluutväärtus jagatuna mõõdetud ja arvutatud väärtuste keskmisega ning teisendatuna protsendiks.

$$\frac{|\mu J \delta \epsilon \tau \delta - \text{arvutatud}|}{(\mu J \delta \epsilon \tau \delta + \text{arvutatud}) / 2} \times 100\%$$

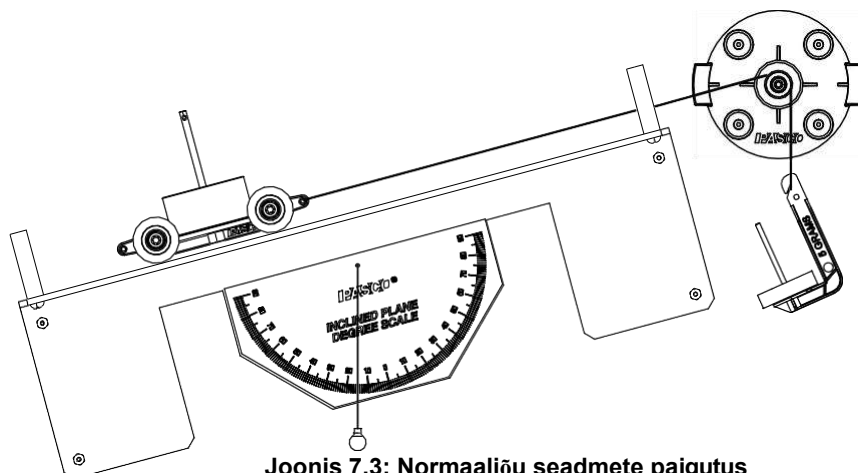
Küsimus

Kui hästi vastab vektormudeli põhjal arvutatud jõud teie mõõdetud jõule?

Normaaljõud

Jõudu, millega kaldpind käru toetab, nimetatakse normaaljõuks (pinnaga risti — „normaalne” — jõud). Jõu vektormudelis on pinnaga risti olev jõukomponent $F_{\perp} = F \cos \theta$. Normaaljõud võrdub käru jõuga kaldpinnale selle pinnaga risti.

Käru kaldpinnale avaldatava jõu mõõtmiseks seadke kaldpind uuesti 15° nurga alla. Asendage vedrukaal massiriputiga, mis on niidiga üle ploki käruka ühendatud. Lisage massiriputile masse, kuni käru ja rippuv mass on tasakaalus. (Teisisõnu võrdub niidi pinge tekitatud jõud käru kaalu pinnaga paralleelse komponendiga.)

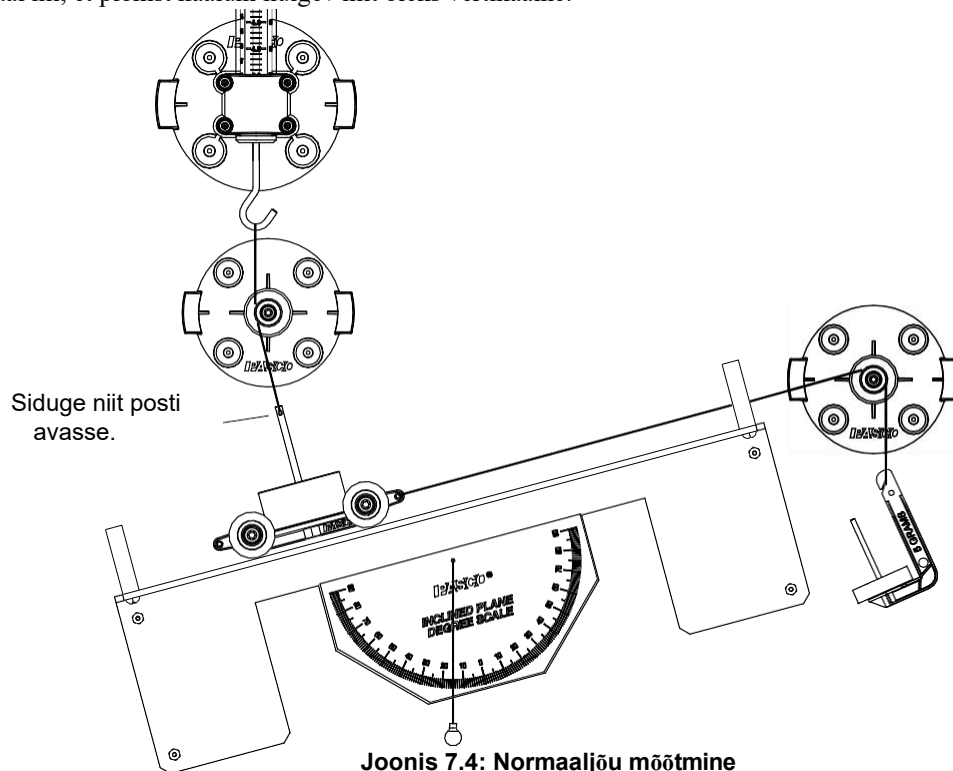


Joonis 7.3: Normaaljõu seadmete paigutus

Kirjutage üles massiriputi kogumass ning arvutage ja kirjutage üles kaal.

- massiriputi kogumass _____ = massiriputi kaal = _____
- Kuidas võrdub massiriputi kaal väärtusega $F \sin \alpha$, mis on káru kaalu kaldpinnaga paralleelne komponent? (Vaadake andmetabelist väärtust 15° juures.)

Lisage staatikatahvile teine plokk ja paigaldage vedrukaal ploki kohale. Siduge niit káru posti ülaosas olevasse avasse. Paigutage plokk nii, et postist láhtuv niit oleks postiga ühel joonel ja seega pinnaga risti. Paigutage vedrukaal nii, et plokist kaaluni kulgev niit oleks vertikaalne.



Tõmmake vedrukaalu ülespoole, kuni jõud tõstab massikáru vaevu kaldpinnalt lahti. Kirjutage vedrukaalu väärtus üles ristjõuna $F_{\perp}$.

$F_{\perp \text{measured}} =$ _____

Arvutage ristjõu väärtus vektormudeli järgi: $F_{\perp \text{calculated}} = F \cos \alpha$. Kirjutage väärtus üles.

$F_{\perp \text{calculated}} =$ _____

Küsimus

Kui hästi vastab vektormudeli põhjal arvutatud jõud teie mõõdetud jõule?

Katse 8: Liugehõõre

Vajalikud seadmed

Nimetus

Nimetus

StaatikatahvelKaldpind	ja hõõrdeplakk
PlokkKinnitav	vedrukaal
Masside ja riputite kom	plektNiit

Teooria

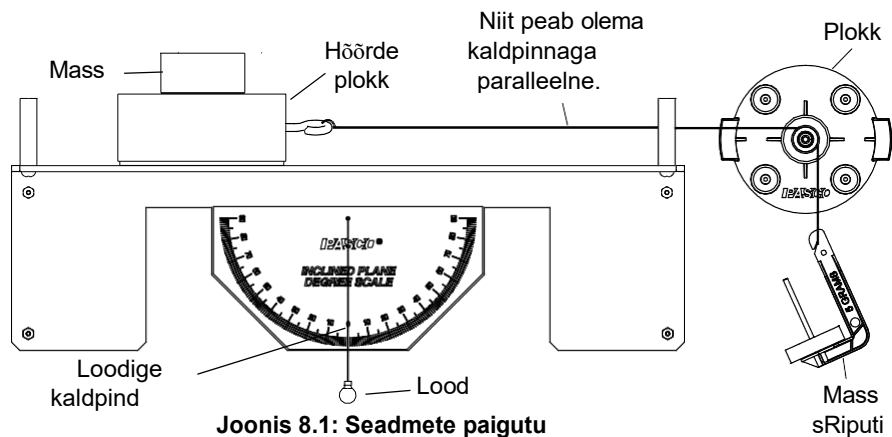
Hõõrdumine on kahe keha vaheline jõud, mis takistab nende vahelist liikumist. Seisuhõõre (ehk paigalseisuhõõre) on hõõrdumine kehade vahel, mis teineteise suhtes ei liigu. Näiteks võib seisuhõõre takistada kehal kaldpinnast alla libisemast. Kui kehale mõjuv väline resultantjõud on seisuhõõrdejõust suurem, hakkab keha libisema. Liugehõõre (ehk kineetiline hõõre) esineb siis, kui kaks keha liiguvad teineteise suhtes. Enamikul juhtudel on kahe keha vaheline seisuhõõre suurem nende vahelisest liugehõõrdest. Kui libisemine on alanud ja libiseva keha liikumine on ühtlane, võrdub väline jõud liugehõõrdejõuga.

Hõõrdumise selgitamisel eeldatakse, et pinnad on väikese osa ulatuses oma kogupinnast aatomtasandil teineteisele väga lähedal. Need aatomtasandil lähestikku olevad pinnad avaldavad teineteisele liikumist pidurdavaid jõude. Kontaktpindala on võrdeline normaaljõuga ja seetõttu on hõõrdejõud normaaljõuga võrdeline, ehk $f \propto FN$, kus f on hõõrdejõud ja FN normaaljõud. Hõõrdejõu ja normaaljõu suhet nimetatakse hõõrdeteguriks ϕ . Hõõrdejõud on $\phi = \frac{f}{FN}$. Hõõrdetegur on ühikuta arv, mis on paljude tavapäraste pinnapaaride korral nulli ja ühe vahel ning määratakse katseliselt.

Selles katses uurite, kuidas normaaljõud, kontaktmaterjalid ja kontaktpindala mõjutavad liugehõõret.

Protseduur

1. Mõõtke vedrukaaluga hõõrdeploki kaal ja kirjutage väärtus üles.
 - hõõrdeploki kaal, $W =$ _____
2. Paigaldage kaldpind staatikatahvile ja loodige pind loodi abil. Asetage hõõrdeplakk kaldpinnale ning ühendage see niidiga üle plokki massiriputiga nagu näidatud.
3. Reguleerige plokki nii, et niit oleks kaldpinnaga paralleelne.



-
4. Lisage või eemaldage massiriputil masse, kuni hõõrdeplokk liigub pärast väikest *tõuget väga* aeglase ja ühtlase kiirusega.

- Kui hõõrdeplakk peatub, on mass liiga väike. Kui hõõrdeplakk kiireneb, on mass liiga suur.
- Rippuva massi kaal, mis on piisav hõõrdeploki tõmbamiseks *ühtlase kiirusega*, on f_k — hõõrdeploki ja kaldpinna vaheline liuge- ehk kineetiline hõõrdejõud.

Muutujad

Muutke järgmisi tegureid ja mõõtke liugehõõrdejõudu.

- **Normaaljõud:** Lisage hõõrdeploki peale massi, et suurendada ploki ja kaldpinna vahelist normaaljõudu.
- **Kontaktmaterjal:** Hõõrdeploki kaks külge on paljas puit. Kaks teist külge on kaetud vildiga. Võrrelge puitpinna liugehõõrdejõudu sama suure viltpinna liugehõõrdejõuga.
- **Kontaktpindala:** Ülemise ja alumise pinna pindala on suurem kui külgpindadel. Võrrelge suurema pindala liugehõõrdejõudu väiksema pindala liugehõõrdejõuga.

Meeldetuletused iga katsekorra kohta:

- Reguleerige massiriputi massi ettevaatlikult, kuni rippuva massi kaal on piisav, et hõõrdeplakk liiguks pärast väikest tõuget väga aeglase ja ühtlase kiirusega.
- Kirjutage üles hõõrdeploki kogumass M ja rippuv mass m (massiriputi ja lisatud masside kogumass).
- Arvutage ja kirjutage üles hõõrdeploki normaaljõud F_N kaldpinnale ning liugehõõrdejõud f_k (rippuva massi kaal).
- Arvutage ja kirjutage üles hõõrdetegur μ , mis on liugehõõrdejõu f_k ja normaaljõu F_N **suhe**.

Andmetabel

Katsekord	Lisatud mass (kg)	Ploki kogumass M	Normaaljõud, $F_N = Mg$	Rippuv mass, m	Hõõrdejõud, $f_k = mg$	Hõõrdetegur, $\mu = f_k/F_N$
1	0.000					
2	0.050					
3	0.100					
4	0.150					
5	0.200					
6	0.250					
Katsekord	Pind	Ploki kogumass M^*	Normaaljõud, $F_N = Mg$	Rippuv mass, m	Hõõrdejõud, $f_k = mg$	Hõõrdetegur, $\mu_k = f_k/F_N$
7	Puit, suur					
8	Vilt, suur					
9	Puit, väike					
10	Vilt, väike					

*Katsekordadel 7 kuni 10 hoidke hõõrdeploki kogumass konstantsena.

Küsimused

1. Mis juhtub katsekordadel 1 kuni 6 liugehõõrdega normaaljõu suurenemisel?
2. Mis juhtub katsekordadel 1 kuni 6 hõõrdeeguriga normaaljõu suurenemisel?
3. Kuidas võrreldub suure puitpinna liugehõõre suure viltpinna liugehõõrdega? Kuidas võrreldub väikese puitpinna liugehõõre väikese viltpinna liugehõõrdega?
4. Kas teie mõõtmiste põhjal sõltub kahe keha vaheline liugehõõre kontaktis olevatest materjalidest?
5. Kuidas võrreldub suure puitpinna liugehõõre väikese puitpinna liugehõõrdega? Kuidas võrreldub suure viltpinna liugehõõre väikese viltpinna liugehõõrdega?
6. Kas teie mõõtmiste põhjal sõltub kahe keha vaheline liugehõõre kehade kontaktpindalast?

Liugehõõre kaldpinnal

Kui hõõrdeplokk ei ole horisontaalsel pinnal, kas liugehõõrdeegur μ_k on erinev?

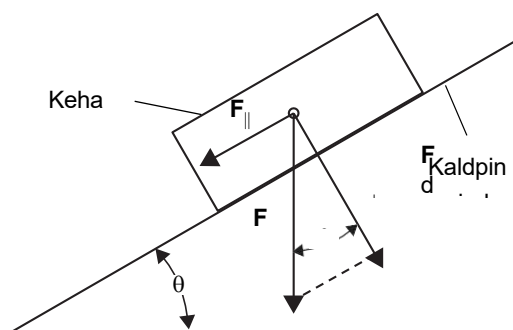
Kui keha on kaldpinnal nurga all, on üks keha kaalu ($F = mg$) **komponent** pinnaga paralleelne ($F_{\parallel}$) ja teine F komponent pinnaga risti ($F_{\perp}$). Teoorias võrdub see risti olev komponent pinna normaaljõuga.

Kui keha ja pinna vahel hõõrdumist ei oleks, kiirendaks keha kaalu paralleelkomponent keha mööda pinda alla. Kuna keha ja pinna vahel on aga hõõrdumine, siis hõõrdejõud ($f = \mu F_N$) takistab paralleelkomponendi mõju. Teisisõnu oleks hõõrdejõu vektor suunatud piki pinda *üles*, kui keha libiseb mööda *pinda* alla.

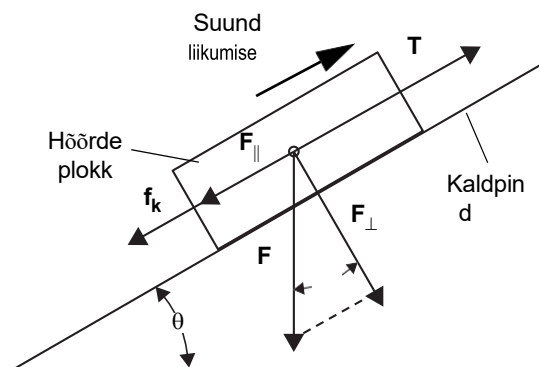
Kujutlege, et keha tõmmatakse piki pinda üles niidi pingega, mis on ühendatud rippuva massiga. Kas liugehõõre ($f_k = \mu_k F_N$) takistaks keha kaalu paralleelkomponenti või oleks liugehõõrde vektor paralleelkomponendiga samas suunas? Mõlemad jõud oleksid suunatud piki pinda alla, kui keha tõmmatakse mööda pinda üles. Kui keha tõmmatakse *ühtlase* kiirusega, on kehale mõjuv resultantjõud null. Kas niidi pinge T võrdub paralleelkomponendi ja liugehõõrde summaga?

Ennustus

Kuidas võrdub ploki kaalu paralleelkomponendi ($F_{\parallel}$) ja liugehõõrde (f_k) summa rippuva massi kaaluga?

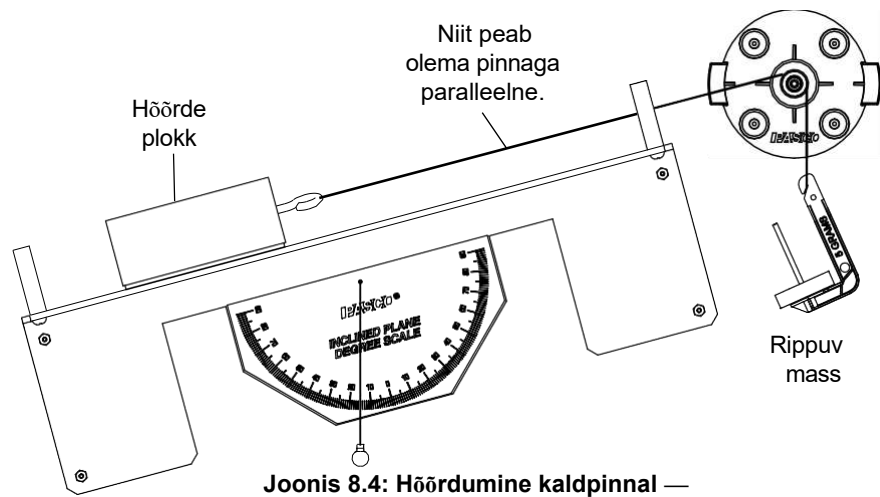


Joonis 8.2: Kaldpind



Joonis 8.3: Jõudiagramm

Protseduur



1. Mõõtke ja kirjutage üles hõõrdeploki kaal W .
 - kaal, $W =$ _____
2. Paigaldage kaldpind staatikatahvile ja seadke nurk θ väärtusele 15° . Paigaldage plokk, massiriputi, niit ja hõõrdeplokk nagu joonisel näidatud. Veenduge, et niit oleks kaldpinnaga paralleelne.
3. Reguleerige massiriputi massi ettevaatlikult, kuni rippuva massi kaal on piisav, et hõõrdeplokk liiguks pärast väikest tõuget väga aeglase ja ühtlase kiirusega mööda kaldpinda üles.
4. Kirjutage üles rippuva massi kogumass m (massiriputi ja lisatud masside mass).

Arvutused

- Pidage meeles, et hõõrdeploki kaal $W = F = Mg$.
5. Arvutage ja kirjutage üles ploki kaalu **paralleelkomponent** $F_{\parallel} = Mg \sin \theta$.
 6. Arvutage ploki kaalu ristkomponent $F_{\perp} = Mg \cos \theta$ ja kirjutage see normaaljõuna F_N **üles**.
 7. Kasutage normaaljõudu F_N ja ploki pinnamaterjali (puit või vilt) liugehõõrdeegurit μ_k , et arvutada liugehõõrdejõud $f_k = \mu_k F_N$.
 8. Arvutage rippuva massi kaal $F_{\text{hanging}} = mg$ ja kirjutage see niidi pingena T **üles**.
 9. Arvutage ja kirjutage üles ploki kaalu paralleelkomponendi $F_{\parallel}$ ja liugehõõrdejõu f_k **summa**.

Andmetabel

Nurk, θ	Ploki mass, M	Rippuv mass, m	Paralleelkomponent, $F_{\parallel} = Mg \sin \theta$	Normaaljõud, $F_{\perp} = F_N = Mg \cos \theta$	Hõõrdejõud, $f_k = \mu_k F_N$	Pinge, $T = mg$

- Ploki kaalu paralleelkomponendi $F_{\parallel}$ ja liugehõõrdejõu f_k summa = _____.

Küsimus

Kuidas võrdub niidi pinge ploki kaalu paralleelkomponendi ja liugehõõrdejõu summaga?

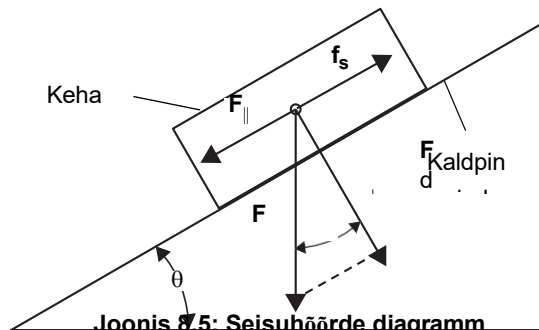
Seisuhõõre kaldpinnal

Kujutlege, et hõõrdeplokk asetatakse kaldpinnale ja pinna üht otsa tõstetakse, kuni plokki kaalu paralleelkomponent hakkab plokki mööda pinda alla tõmbama. Seisuhõõre hoiab plokki pinnal paigal, kuni plokki kaalu paralleelkomponent on seisuhõõrdest suurem. Kui plokk hakkab peaaegu — kuid mitte veel — libisema, on seisuhõõre maksimaalne ja võrdub plokki kaalu paralleelkomponendiga.

Üks viis seisuhõõrde teguri μ_s mõõtmiseks on leida maksimaalne nurk, milleni pinda saab kallutada enne kui plokk hakkab mööda pinda alla libisema. Ploki kaalu pinnaga paralleelne komponent $F_{\parallel}$ on $Mg \sin \theta$, kus M on plokki mass. **Normaaljõud** F_N on plokki kaalu ristkomponent ehk $F_{\perp} = Mg \cos \theta$. Seisuhõõrdejõud f_s on seisuhõõrde teguri μ_s korrutatuna normaaljõuga. Seega $f_s = \mu_s Mg \cos \theta$.

Kui plokk on paigal, võrdub seisuhõõrdejõud plokki kaalu kaldpinnaga paralleelse komponendiga, ehk $Mg \sin \theta = \mu_s Mg \cos \theta$. Lahendades seisuhõõrde teguri μ_s suhtes, saame:

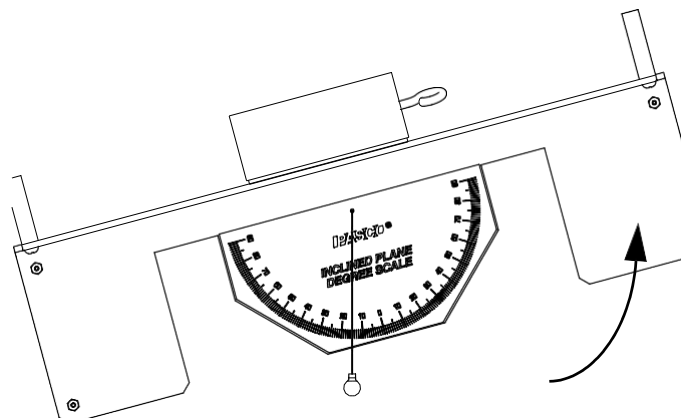
$$\mu_s = \frac{Mg \sin \theta}{Mg \cos \theta} = \tan \theta$$



Joonis 8.5: Seisuhõõre diagramm

Protseduur

1. Paigaldage kaldpind staatikatahvile ja seadke nurk nulliks. Asetage hõõrdeplokk kaldpinnale.
2. Tõstke kaldpinna üht otsa ettevaatlikult, kuni hõõrdeplokk hakkab just libisema. Kirjutage nurk θ $\lambda \epsilon \sigma$.
3. Pöörake hõõrdeplokk teise pinnamaterjali peale ja korrake protseduuri.



Joonis 8.6: Suurendage nurka

Andmetabel

Pinnamaterjal	Nurk	Seisuhõõrde tegur
Puit		
Vilt		

Arvutused

- Arvutage seisuhõõrde tegur nii puidu kui ka vildi jaoks.

Küsimus

- Kuidas võrreldub puidu seisuhõõrde tegur vildi seisuhõõrde teguriga?

Katse 9: Lihtne harmooniline liikumine — mass vedru otsas

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
Staatikatahvel/Kinnitav	vedrukaal
Masside ja riputite	komple
ktNiit Stopper (ME-1234)	

Teooria

Kujutlege vedru otsas ripuvat massi. Rahulikus olekus ripub mass asendis, kus vedrujõud tasakaalustab täpselt massile mõjuva raskusjõu (selle kaalu). Kui mass tõmmatakse sellest algsest punktist (mida nimetatakse tasakaaluasendiks) allapoole, rakendab vedru ülespoole tagasitõmbavat jõudu. Kui mass on algsest punktist kõrgemal, tõmbab gravitatsioon seda alla. Seetõttu on massile mõjuv resultantjõud taastav jõud, sest see kiirendab massi alati tagasi tasakaaluasendi poole.

Varem võisite uurida Hooke'i seadust, mille kohaselt on vedru avaldatav jõud võrdeline kaugusega, mille võrra vedru tavapikkusest pikemaks venitatakse. (See kehtib ka vedru kokkusurumisel.) Seda *seost* väljendab $F = -kx$, kus F on vedru avaldatav jõud, x vedru otsa nihe tasakaaluasendist ja k võrdetegur, mida nimetatakse vedruteguriks.

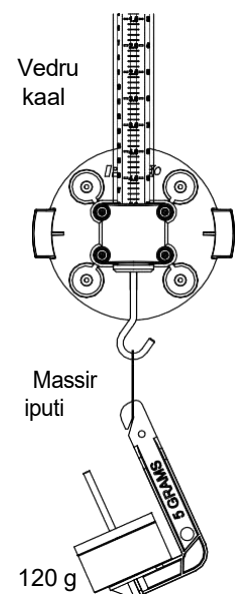
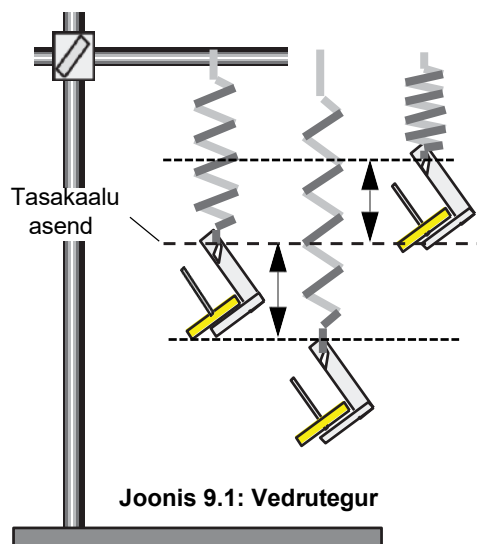
Kui kehale mõjub taastav jõud, mis on võrdeline keha nihkega tasakaaluasendist, nimetatakse tekkivat liikumist lihtsaks harmooniliseks liikumiseks (SHM). Kui vedru otsas oleva massi M lihtsat harmoonilist liikumist analüüsitakse matemaatiliselt Newtoni teise seaduse (ja diferentsiaalvutuse) abil, on liikumise *periood* T järgmine:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$$

Periood T on ühe täieliku võnke (alla-üles-alla) kestus. Selles katses uurite seda lihtsa harmoonilise liikumise perioodi võrrandit.

Protseduur

- Mõõtke ja kirjutage üles vedrukaalu vedru vedrutegur k (vt katset „Hooke'i seadus”).
- Paigaldage vedrukaal staatikatahvile nii, et kaal oleks täiesti vertikaalne. Riputage massiriputi niidiga kaalu külge ja lisage riputile 120 g massi (rippuv kogumass 125 g (0.125 kg)).
- Harjutage järgmist: tõmmake massiriputi mõni sentimeeter alla ja vabastage see sujuvalt nii, et massiriputi võnguks üles ja alla ilma külgsuunas liikumata.



3. Tõmmake massiriputi alla ja vabastage see sujuvalt. Enne mõõtmist laske sellel mõned korrad võnkuda. Kui võnked on sujuvad ja korrapärased, mõõtke vähemalt kümne täieliku võnke (alla-üles-alla) kestus. Võimaluse korral mõõtke nii paljude võngete kestus kui võimalik enne, kui võnkeamplituud muutub liiga väikeseks. Kirjutage võngete arv ja koguaeg üles.
4. Arvutage ja kirjutage üles mõõdetud *period* T_{measured} , jagades koguaja võngete arvuga.
5. Korrake 125 g massi mõõtmist viis korda. Arvutage ja kirjutage üles keskmine mõõdetud periood.
6. Kasutage M ja k väärtusi teoreetilise perioodi $T_{\text{theoretical}}$ *arvutamiseks* ja kirjutage tulemus üles.
7. Korrake protseduuri massidega 175 g ja 225 g (kogumass koos massiriputiga).

Andmetabel

Mass (kg)	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
0.125 kg				
0.125 kg				
0.125 kg				
0.125 kg				
0.125 kg				
Keskmine mõõdetud periood (s)				
0.175 kg				
0.175 kg				
0.175 kg				
0.175 kg				
0.175 kg				
Keskmine mõõdetud periood (s)				
0.225 kg				
0.225 kg				
0.225 kg				
0.225 kg				
0.225 kg				
Keskmine mõõdetud periood (s)				

Küsimused

1. Kui hästi vastab võnkeperioodi teoreetiline väärtus mõõdetud võnkeperioodile?
2. Kas vedru otsas oleva massi perioodi võrrand on füüsikalise tegelikkuse hea matemaatiline mudel? Miks või miks mitte?

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$$

Laiendus

Lisaks rippuvale massile võngub üles ja alla ka muu mass. Vedrukaalu sees olev varras liigub samuti üles ja alla. Rippuva massi võnkumisel liigub ka osa vedrust. Kas see arvestamata mass muudaks teoreetilise perioodi $T_{\text{theoretical}}$ arvutust?

Selle väljaselgitamiseks kasutage võnkeperioodi võrrandit ja arvutage vedrutehuri ning iga massi *keskmise* $m_{\text{õõdetud}}$ perioodi T_{measured} põhjal, milline peaks olema võnkuv *kogumass* M_{total} . Kasutage valemit

$$M_{\text{total}} = \frac{T^2 k}{4\pi^2}$$

kus T on keskmine mõõdetud periood ja k vedrutehur.

Rippuv mass (kg)	Keskmine mõõdetud periood (s)	Arvutatud kogumass (kg)	Uus teoreetiline periood (s)
0.125 kg			
0.175 kg			
0.225 kg			

Pärast kogumassi arvutamist keskmise mõõdetud perioodi ja vedrutehuri põhjal arvutage teoreetiline periood uuesti, kasutades arvutatud kogumassi ja vedrutehurit:

$$T_{\text{new}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{\text{total}}}{k}}$$

Võrrelge arvutatud kogumassi M_{total} rippuva massiga M . Kui palju „lisamassi” ligikaudu võngub lisaks rippuvale massile?

- $M_{\text{extra}} =$ _____

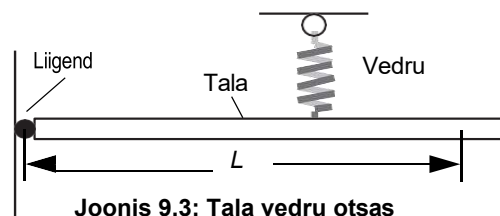
Küsimus

1. Kui hästi vastab iga katsekorra uus teoreetiline võnkeperiood keskmisele mõõdetud võnkeperioodile?
2. Kas vedru otsas võnkuva massi perioodi võrrand on füüsikalise tegelikkuse hea matemaatiline mudel? Miks või miks mitte?

Lihtne harmooniline liikumine — tala vedru otsas

Kujutlege horisontaalset tala, mida ühes otsas toetab liigend ja teises otsas vertikaalne vedru. Kui tala ots tõmmatakse alla, avaldab vedru taastavat jõudu, $F = -kx$, et viia tala tagasi tasakaaluasendisse. Tala võngub üles ja alla perioodiga T . T beam. $Vedru$ otsas oleva massi periood T on järgmine:

$$T = \sqrt{\frac{M}{k}}$$



Joonis 9.3: Tala vedru otsas

kus M on kogu võnkuv mass ja k vedrutegur. Milline on vedru otsas oleva tala periood?

Tala pöörleb ümber liigendi, kui vedruga ühendatud ots võngub. Vedru jõud tala võnkuvale otsale $F = -kx$ tekitab talale jõumomendi. Olgu L tala jõuõla pikkus. Vedru tekitatud jõumoment on $\tau = FL$. Resultantjõumoment tekitab nurkkiirenduse α , mis on jõumomendiga τ võrdelises seoses ja pöördinertsiga I pöördvõrdelises seoses. Seega

$$\alpha = \frac{\tau}{I}$$

ehk $\tau = \alpha I$. Kui seada kaks jõumomendi avaldist võrdseks, saadakse $FL = \alpha I$. Eeldage, et tala on nagu ühest otsast pöörlev peenike varras. Peenikese varra pöördinerts on $I = \frac{1}{3} mL^2$, kus m on tala mass. Kuna talale mõjuv jõud on $F = -kx$, muutub võrrand $FL = \alpha I$ kujule:

$$-kxL = \frac{\alpha mL^2}{3}$$

Tala võnkuva otsa võrkkiirendus a ja tangentsiaalne (lineaarne) kiirendus a_T on omavahel seotud.

Tangentsiaalne kiirendus $a_T = \alpha r$, kus r on pöörlemisraadius. Sel juhul on pöörlemisraadius jõuõlg L , seega $a_T = \alpha L$ ehk $\alpha = a_T/L$. Avaldis muutub kujule:

$$-kxL = \frac{a_T mL^2}{3L}$$

mis lihtsustub kujule

$$-kx = \frac{a_T m}{3}$$

Tangentsiaalse kiirenduse suhtes lahendades saame:

$$a_T = -\frac{3k}{m}x$$

Tangentsiaalne kiirendus $a_T = -\omega^2 x$, seega muutub avaldis kujule:

$$-\omega^2 x = -\frac{3k}{m}x$$

$$\omega^2 = \frac{3k}{m}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{3k}{m}}$$

Kuna nurksagedus $\omega = 2\pi/T$, siis periood $T = 2\pi/\omega$ ehk:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{3k}}$$

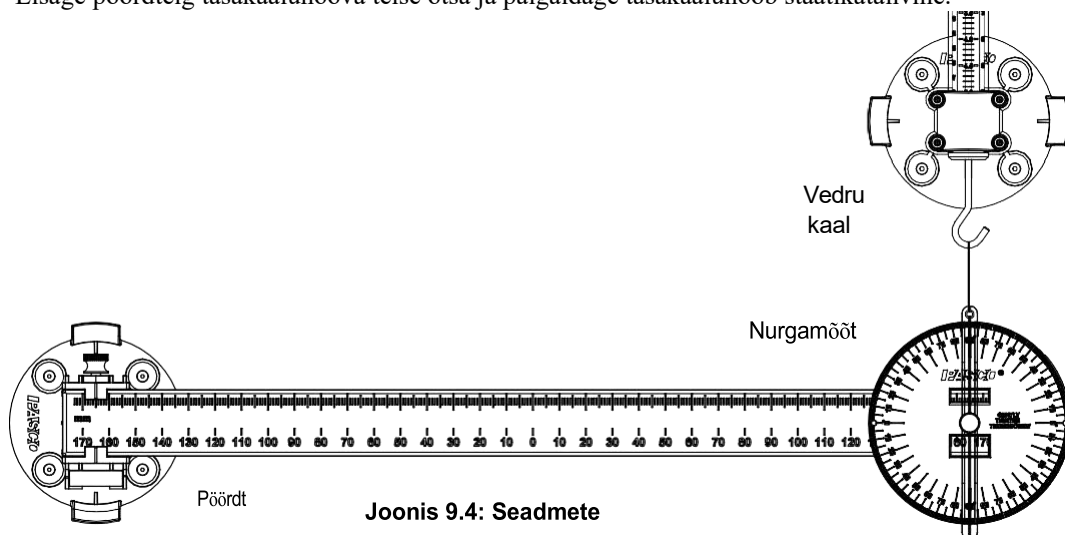
Selles katseosas uurite seda vedru otsas oleva tala lihtsa harmoonilise liikumise võrrandit.

Protseduur

1. Paigaldage tasakaaluhoova ühte otsa nurgamõõtur. Mõõtke ja kirjutage üles hoova ning nurgamõõtu kogumass.

- mass, $m =$ _____

2. Lisage pöördtelg tasakaaluhoova teise otsa ja paigaldage tasakaaluhoob staatikatahvile.



Joonis 9.4: Seadmete

3. Paigaldage vedrukaal staatikatahvile nii, et kaal oleks täiesti vertikaalne. Ühendage nurgamõõtu nurgaindikaator niidiga vedrukaalu alumise konksu külge.
4. Reguleerige tasakaaluhooba ja vedrukaalu nii, et hoob oleks horisontaalne ning kaal vertikaalne ja paikneks otse nurgamõõtu keskpunkti kohal.
5. Suruge tasakaaluhoob alla ja vabastage see sujuvalt. Mõõtke vähemalt kümne täieliku võnke (alla-üles-alla) kestus. Kirjutage võngete arv ja koguaeg üles.
6. Arvutage ja kirjutage üles mõõdetud *period* T_{measured} , jagades koguaja võngete arvuga.
7. Korrake mõõtmist viis korda. Arvutage ja kirjutage üles keskmine mõõdetud periood.
8. Kasutage m ja k väärtusi teoreetilise perioodi $T_{\text{theoretical}}$ *arvutamiseks* ja kirjutage tulemus üles.

Andmetabel

Katsekord	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
1				
2				
3				
4				
5				
Keskmine mõõdetud periood (s)				

Küsimused

1. Kui hästi vastab võnkeperioodi teoreetiline väärtus keskmisele mõõdetud võnkeperioodile?
2. Kas vedru otsas oleva tala perioodi võrrand on füüsikalise tegelikkuse hea matemaatiline mudel? Miks või miks mitte?

Laiendus

Vedrukaalu varras ja osa vedrust võnguvad tala võnkumisel üles ja alla. Kasutage selle katse esimese osa tulemusi, et arvutada kogu võnkuv mass: hoob ja nurgamõõtur ning lisaks ka võnkuvate vedrukaalu osade mass. Arvutage teoreetiline periood $T_{\text{theoretical}}$ *uuesti*.

- Kuidas võrdub uuesti arvatud teoreetiline periood keskmise mõõdetud perioodiga?

Katse 10: Lihtne harmooniline liikumine — lihtpendel

Vajalikud seadmed

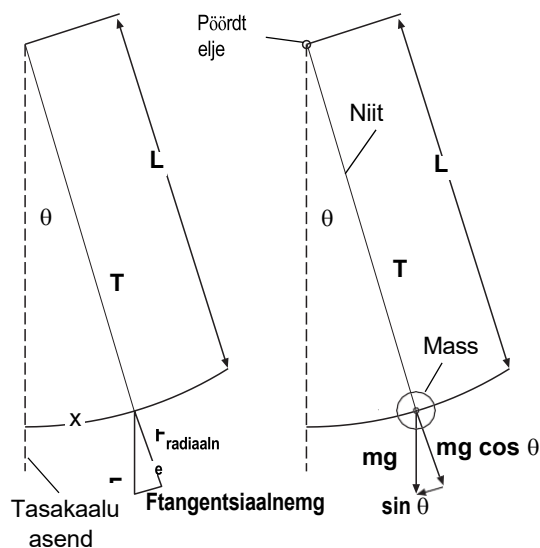
Nimetus	Nimetus
Staatikatahvel/Universaalkinnitus	ja nööriklamber
Niit/Masside	ja riputite komplekt
Stopper (ME-1234)	

Teooria

Lihtne harmooniline liikumine ei piirdu vedru otsas olevate massidega. Tegelikult on see üks looduses levinumaid ja olulisemaid liikumisliike. Alates aatomite võnkumisest kuni lennukitiibade võnkumiseni mängib lihtne harmooniline liikumine paljudes füüsikalistes nähtustes olulist rolli.

Näiteks võnkuva pendli käitumine on väga sarnane vedru otsas oleva massi käitumisega. Neid kahte nähtust võrreldes saab teha ennustusi pendli võnkeperioodi kohta.

Joonisel on näidatud lihtpendel, mille niit ja mass paiknevad vertikaalasendist nurga θ all. Massile mõjuvad kaks jõudu: niidi jõud T ja raskusjõud $F = mg$ saab lahutada kaheks komponendiks. Üks **komponent** F_{radial} paikneb piki niiti. Teine **komponent** $F_{\text{tangential}}$ on niidiga risti ja puutub



Joonis 10.1: Pendel

massikaart massi võnkumise ajal. Kaalu radiaalkomponent $mg \cos \theta$ võrdub niidi kaudu mõjuva jõuga T . Kaalu tangentsiaalkomponent $mg \sin \theta$ on liikumissuunaline ja kiirendab või aeglustab massi.

Joonisel olevate kongruentsete kolmnurkade abil on näha, et massi nihe tasakaaluasendist on kaar, mille pikkus x on ligikaudu $L \tan \theta$. Kui nurk θ on suhteliselt väike (alla 20°), kehtib väga täpselt $\sin \theta = \tan \theta$. Seega väikeste pendli võnkenurkade korral on ligikaudu $F_{\text{tangential}} = mg \tan \theta = mg x/L$. Kuna tangentsiaaljõud on taastav jõud, peaks võrrand olema

$F_{\text{tangential}} = -mg x/L$. Võrreldes seda võrrandit vedru otsas oleva massi taastava jõu võrrandiga, $F = -kx$, on näha, et suurusel mg/L on sama matemaatiline roll kui vedruteguril k . Selle sarnasuse põhjal võib öelda, et pendli võnkeperiood on järgmine:

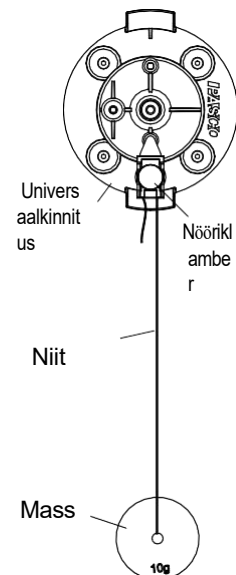
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{mg/L}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

kus m on mass, g raskuskiirendus ja L pendli pikkus pöördteljest rippuva massi massikeskmeni.

Selles katseosas uurite seda pendli lihtsa harmoonilise liikumise perioodi võrrandit.

Protseduur

1. Asetage universaalkinnitus staatikatahvi ülaseri lähedale. Tehke ligikaudu 45 cm pikkusest niidist aas läbi nõõrikambri ja kinnitage nõõriklamber kinnitusele.
2. Kinnitage niidi külge 10 g mass ja reguleerige niidi pikkust nii, et pendel oleks tahvil võimalikult pikk.
3. Mõõtke ja kirjutage üles L — pendli pikkus pöördteljest rippuva massi massikeskmeni. Kirjutage üles m — rippuv mass.
4. Pange mass võnkuma, kuid hoidke võnkenurk mõistlikult väike (alla 20°). Mõõtke 30 võnke kestus. Kirjutage koguaeg üles.
5. Korrake mõõtmist viis korda.
6. Muutke massi. Korrake protseduuri 20 g rippuva massiga ja seejärel 50 g rippuva massiga.
7. Muutke pikkust. Korrake protseduuri algse massi ja kahe erineva pendli pikkusega: esmalt poole algpikkusega ja seejärel veerandi algpikkusega.



Joonis 10.2: Seadistus

Andmetabel

Mass 1 (kg)	Pikkus 1 (m)	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
0.010					
Keskmine mõõdetud periood (s)					
Mass 2 (kg)	Pikkus 1 (m)	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
0.020					
Keskmine mõõdetud periood (s)					
Mass 3 (kg)	Pikkus 1 (m)	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
0.050					
Keskmine mõõdetud periood (s)					

Andmetabel

Mass 1 (kg)	Pikkus 2 (m)	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
0.010					
Keskmine mõõdetud periood (s)					
Mass 1 (kg)	Pikkus 3 (m)	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
0.010					
Keskmine mõõdetud periood (s)					

Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage üles mõõdetud periood, jagades koguaja võngete arvuga.
2. Arvutage ja kirjutage üles keskmine mõõdetud periood.
3. Arvutage ja kirjutage üles teoreetiline periood.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Küsimused

1. Kui hästi vastab lihtpendli võnkeperioodi teoreetiline väärtus mõõdetud võnkeperioodile?
2. Kas lihtpendli perioodi võrrand on füüsikalise tegelikkuse hea matemaatiline mudel? Miks või miks mitte?
3. Kuidas mõjutab lihtpendli massi suurendamine pendli perioodi?
4. Kuidas mõjutab lihtpendli pikkuse muutmine pendli perioodi?

Katse 11A: Lihtne harmooniline liikumine — füüsikaline pendel

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelT	asakaaluhoob
Stopper (ME-1234)	

Teooria

Lihtpendel on mass „massitu” niidi otsas. Füüsikaline pendel on mis tahes jäik keha, mis pöörduv keha mingis punktis nii, et see saab raskusjõu mõjul vertikaaltasandis vabalt pöörleda. Olgu L_{cm} kaugus pöördteljest keha massikeskmene.

Pöörlemist põhjustava jõumomendi tekitab raskusjõu komponent, mis on risti pöördtelge massikeskmega ühendava joonega, $mg \sin \theta$. Jõumoment on jõuõla L_{cm} ja ristjõu korrutis ehk $\tau = L_{cm} mg \sin \theta$. Väikeste nurkade korral $\sin \theta \approx \theta$, seega muutub jõumomendi avaldis kujule $\tau = L_{cm} mg \theta$ ehk $\tau = k\theta$, kus $k = L_{cm} mg$.

Kuna jõumomendi avaldis vastab lihtsat harmoonilist liikumist tegevale kehale mõjuva taastava jõu avaldisele $F = -kx$, saab füüsikalise pendli võnkeperioodi kirjutada järgmiselt:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{L_{cm} mg}}$$

kus I , füüsikalise pendli inertsimoment (pöördinerts), asendab M -i ja $L_{cm} mg$ asendab k vedru otsas oleva massi võnkeperioodi võrrandis,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$$

Eeldage, et tasakaaluhoova tala on ristkülikukujuline varras. Massikeset läbiva telje ümber pöörleva varda inertsimoment massikeskme suhtes on:

$$I_{cm} = \frac{1}{12} mL^2$$

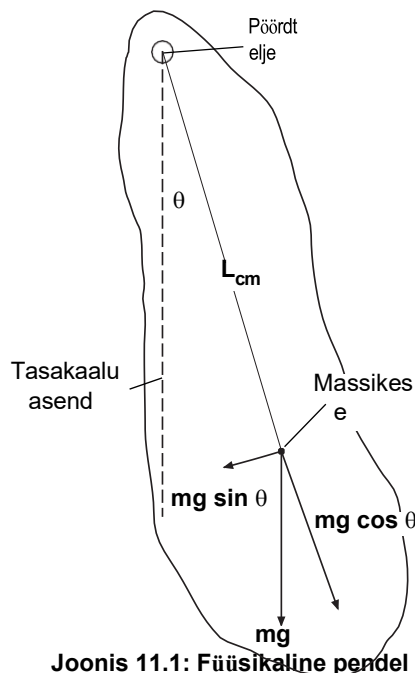
kus m on mass ja L varda pikkus.

Mis juhtub, kui varras pöörduv massikeskme asemel ümber ühe otsa? Kui varras pöörduv ümber mõne muu telje, mis on massikeset läbiva teljega paralleelne, saab paralleeltelje teoreemi abil arvutada inertsimomendi selle paralleeltelje suhtes. Paralleeltelje suhtes olev inertsimoment $I_{parallel}$ on massikeskme suhtes oleva inertsimomendi I_{cm} ja mL_{cm}^2 summa, kus m on mass vardal ja L_{cm} on ristkaugus massikeskmest pöördteljeni ehk

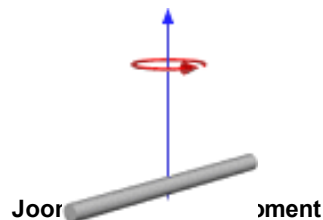
$$I_{parallel} = I_{cm} + mL_{cm}^2 = \frac{1}{12} mL^2 + mL_{cm}^2$$

Võnkeperioodi valem muutub kujule

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12} mL^2 + mL_{cm}^2}{L_{cm} mg}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12} L^2 + L_{cm}^2}{L_{cm} g}}$$



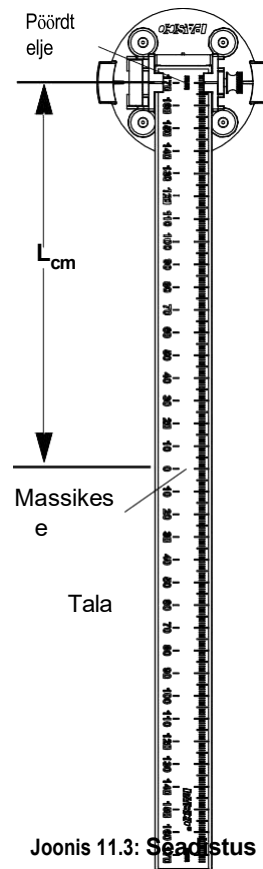
Joonis 11.1: Füüsikaline pendel



Selles katseosas uurite seda fikseeritud pöördtelje ja massikeskme vahekaugusega füüsikalise pendli lihtsa harmoonilise liikumise perioodi võrrandit.

Protseduur

1. Nihutage tasakaaluhoova pöördtelg tala ühe otsa 170 mm märgi juurde ja paigaldage pöördtelg staatikatahvi ülaosa lähedale.
2. Mõõtke ja kirjutage üles tasakaaluhoova tala kogupikkus L ja kaugus L_{cm} pöördteljest massikeskmeni (eeldatavasti märgi „0” juures).
3. Pange tala võnkuma, kuid hoidke võnkenurk mõistlikult väike (alla 20°).
4. Mõõtke ja kirjutage üles 10 võnke koguaeg.
5. Korrake mõõtmist kokku viis korda.



Andmetabel

- Pikkus, L (m) _____ = Kaugus, L_{cm} (m) = _____

Joonis 11.3: Seadistus

Katsekord	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
1				
2				
3				
4				
5				
Keskmine mõõdetud periood (s)				

Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage iga katsekorra mõõdetud periood, jagades koguaaja võngete arvuga. Arvutage keskmine mõõdetud periood.
2. Arvutage teoreetiline periood:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}L^2 + L_{cm}^2}{L_{cm}g}}$$

Küsimused

1. Kui hästi vastab võnkeperioodi teoreetiline väärtus mõõdetud võnkeperioodile?

2. Kas selle füüsikalise pendli teoreetilise perioodi võrrand on füüsikalise tegelikkuse hea matemaatiline mudel? Miks või miks mitte?

Proovige seda

- Kui eeldada, et kaugus L_{cm} pöördteljest massikeskmene on $L/2$, täpselt pool varda pikkusest, annab $I_{parallel}$ lihtsama avaldise:

$$I_{parallel} = I_{cm} + mL^2 = \frac{1}{12}mL^2 + mL^2 = \frac{1}{12}mL^2 + m\left(\frac{L}{2}\right)^2 = \frac{1}{12}mL^2 + \frac{1}{4}mL^2 = \frac{1}{3}mL^2$$

- Asendades selle avaldise füüsikalise pendli võnkeperioodi valemisse, saame:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_{parallel}}{L_{cm}mg}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{3}mL^2}{\frac{L}{2}mg}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{3}mL^2}{\frac{L}{2}mg}} = 2\pi \sqrt{\frac{2L}{3g}}$$

- Kasutage seda avaldist füüsikalise pendli teoreetilise perioodi uuesti arvutamiseks ja võrrelge tulemust mõõdetud võnkeperioodiga.
- Kui suur on erinevus uuesti arvutatud teoreetilise perioodi ja eelmise teoreetilise perioodi vahel?

Laiendus: võnkeperiood suurte nurkade korral

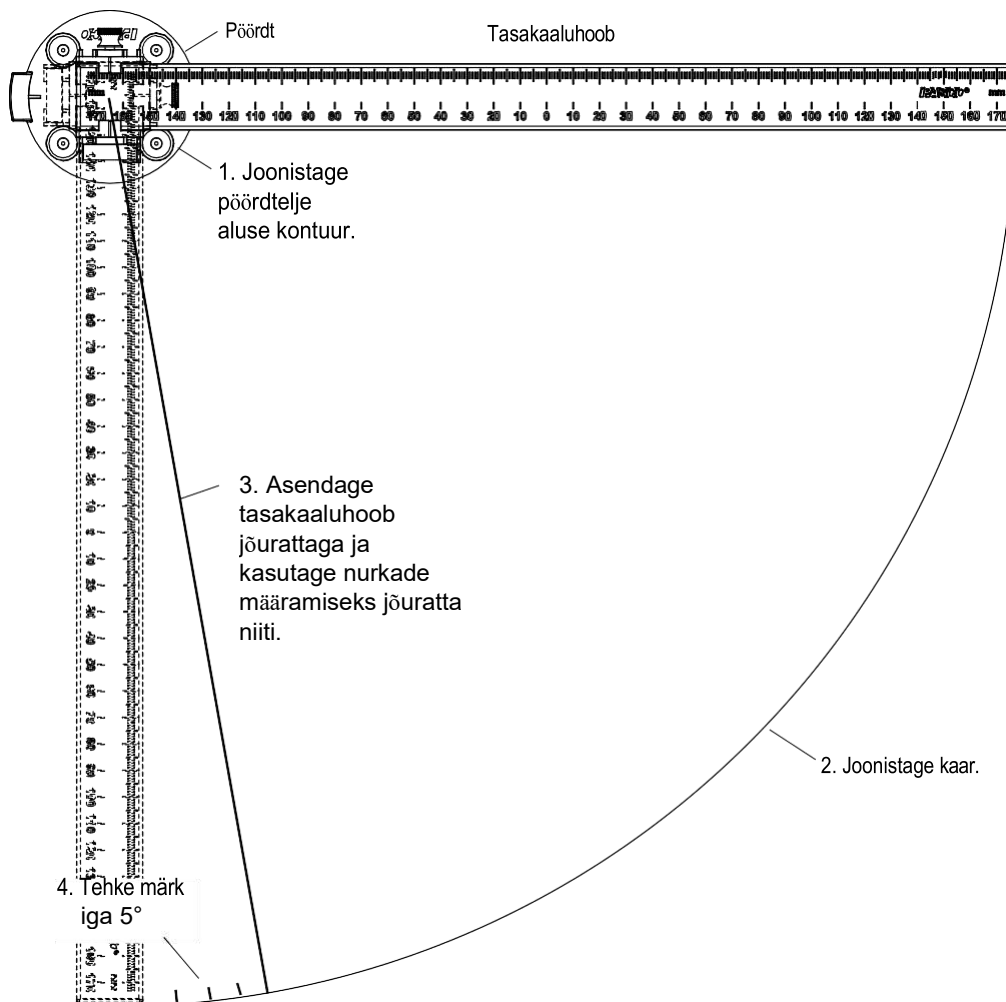
Füüsikalise pendli liikumine on väikeste nurkade korral lihtne harmooniline liikumine. Nurga suurenemisel sin ☐ ☐ ☐ . Kuidas muutub füüsikalise pendli võnkeperiood algse võnkenurga suurenemisel?

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
Staatikatahv	elJouratas
TasakaaluhoobStopper	(ME-1234)
Pliiats või kuivkustutatav mar	kerNiit

Seadistamine

1. Libistage tasakaaluhoova pöördtelg tala ühte otsa ja paigaldage pöördtelg staatikatahvi ülanurka.



Joonis 11.4: Suure nurga võnkumise seadistus

2. Joonistage kuivkustutatava markeri või pliiatsiga pöördtelje aluse kontuur tahvlile.
3. Hoidke kuivkustutatavat markerit või pliiatsit tala otsas tahvliga risti ning liigutage tala ja markerit nii, et joonistate kaare tahvli alumisest nurgast vastasnurka üleval.
4. Pärast kaare joonistamist eemaldage tasakaaluhoob ja asetage jõuratta alus pöördtelje aluse kontuuri. Loodige jõuratas.

5. Pingutage üks jõuketta niit tahvlil oleva kaareni. Seadke niit nii, et see ripuks jõurattast otse alla, tehke kaarele märk ja tähistage see 0° .
6. Hoidke niit pingul ja liigutage seda nii, et nurk vertikaali suhtes oleks 5° . Tehke kaarele märk ja tähistage see.
7. Jätkake niidi liigutamist mööda kaart ja tehke märk iga 5° järel, kuni niit on horisontaalne.
8. Eemaldage jõuratas ja paigaldage tasakaaluhoob tahvlile tagasi algseesse asendisse.

Protseduur

1. Hoidke tasakaaluhoova tala nii, et selle keskjoon osutaks kaarel 5° märgile. Vabastage tala ja mõõtke vähemalt kümne võnke kestus. Kirjutage aeg ja võngete arv üles.
2. Hoidke tala nii, et selle keskjoon osutaks 10° märgile, ja korrake mõõtmist.
3. Jätkake vähemalt kümne võnke koguaja mõõtmist ja üleskirjutamist iga nurga jaoks, kuni jõuate 90° -ni.

Andmetabel

Nurk	Võnked	Koguaeg (s)	Periood (s)	Nurk	Võnked	Koguaeg (s)	Periood (s)
5				50			
10				55			
15				60			
20				65			
25				70			
30				75			
35				80			
40				85			
45				90			

Analüüs

1. Arvutage ja kirjutage üles iga nurga periood, jagades koguaja võngete arvuga.
2. Koostage perioodi sõltuvuse graafik nurgast.

Küsimus

1. Millisest nurgast alates hakkab füüsikalise pendli periood muutuma?
2. Kas periood suureneb või väheneb algnurga suurenemisel?

Katse 11B: Füüsikalise pendli minimaalne periood

Vajalikud seadmed

Nimetus

Nimetus

StaatikatahvelT

asakaaluhoob

Stopper (ME-1234)

Teooria

Füüsikalise pendli võnkeperioodi saab kirjutada järgmiselt:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{L_{cm}mg}}$$

kus I on füüsikalise pendli inertsimoment (pöördinerts), L_{cm} ristkaugus pöördtelje teljest massikeset cm läbiva paralleelteljeni ja m pendli mass.

Ristkülikukujulise *varda* inertsimoment I_{cm} massikeskme suhtes on:

$$I_{cm} = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2)$$

kus a on ristkülikukujulise varda pikkus ja b paksus. Kui pikkus a on aga paksusest b palju suurem, saab massikeskme suhtes oleva inertsimomendi väga hea lähendina kasutada järgmist:

$$I_{cm} = \frac{1}{12}mL^2$$

kus m on mass ja L varda pikkus.

Kui varras pöörduv ümber mõne muu telje, mis on massikeset läbiva teljega paralleelne, ütleb paralleeltelje teoreem, et paralleeltelje suhtes olev inertsimoment $I_{parallel}$ on massikeskme ümber oleva inertsimomendi I_{cm} ja mL^2 summa, kus m on varda $mass$ ja L_{cm} ristkaugus massikeskmest pöördteljeni ehk

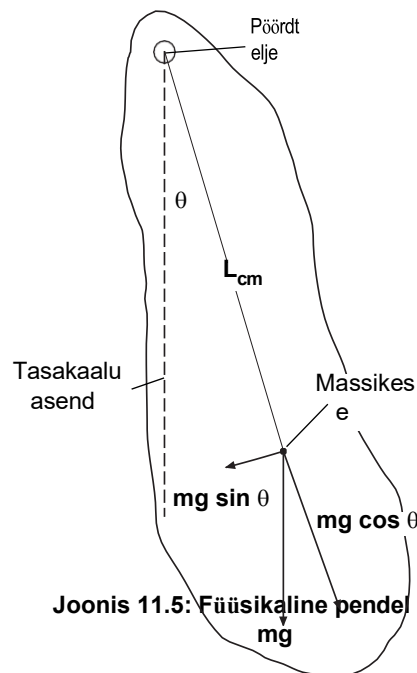
$$I_{parallel} = I_{cm} + mL_{cm}^2 = \frac{1}{12}mL^2 + mL_{cm}^2$$

Võnkeperioodi valem muutub kujule

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}L^2 + L_{cm}^2}{L_{cm}g}}$$

Millise kauguse L_{cm} korral muutub võnkeperiood T minimaalseks?

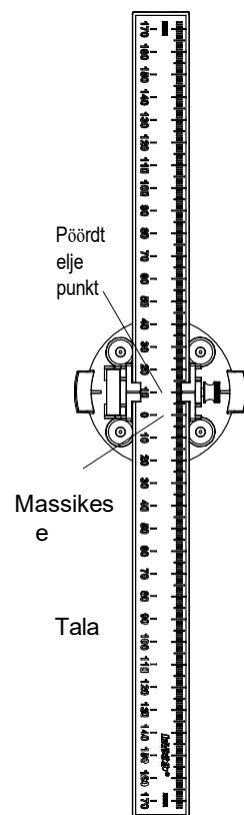
Selles katses määrate pöördtelje ja massikeskme vahelise kauguse L_{cm} , mille korral füüsikalise pendli võnkeperiood on minimaalne.



Joonis 11.5: Füüsikaline pendel

Protseduur

1. Nihutage tasakaaluhoova pöördtelg asendisse, mis on ühe sentimeetri (cm) võrra tala keskpunktist (eeldatavast massikeskmest) kõrgemal. Paigaldage pöördtelg staatikatahvile.
2. Pange tala võnkuma, kuid hoidke võnkenurk mõistlikult väike (alla 20°).
3. Mõõtke ja kirjutage üles 10 võnke koguaeg.
4. Muutke tala asendit nii, et pöördtelg oleks massikeskmest ühe sentimeetri võrra kaugemal. Korrake võnkumise koguaja mõõtmist.
5. Suurendage kaugust L_{cm} veel ühe sentimeetri võrra ja korrake protseduuri.
6. Suurendage kaugust L_{cm} ühe sentimeetri kaupa, kuni jõuate tala 170 mm märgini.
7. Mõõtke ja kirjutage üles tala kogupikkus L .
 - Kogupikkus, $L =$ _____m



Joonis 11.6: Seadistus

Andmetabel

Katsekord	Kaugus, L_{cm} (m)	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				

Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage üles iga kauguse L_{cm} mõõdetud periood, jagades koguaja võngete arvuga.
2. Koostage mõõdetud perioodi sõltuvuse graafik kaugusest L_{cm} , et määrata, milline pikkus annab minimaalse perioodi.

- Minimaalne $L_{cm} =$ _____

3. Leidke diferentsiaalrvutuse abil perioodi tuletis:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}L^2 + L_{cm}^2}{L_{cm}g}}$$

- Seadke tuletis nulliks ja lahendage L_{cm} suhtes, et kinnitada, et see kaugus on $L_{cm} = \frac{1}{\sqrt{12}}L$.
- Arvutage ja kirjutage üles L_{cm} väärtus kogupikkuse L põhjal.
- Teoreetiline $L_{cm} =$ _____

Küsimused

1. Millise pöördtelje ja massikeskme vahelise kauguse (L_{cm}) korral on periood *graafiku* põhjal minimaalne?
2. Kuidas võrdub graafikult saadud minimaalse perioodi kauguse väärtus kauguse teoreetilise (arvutatud) väärtusega?
3. Mis juhtuks, kui nihutaksite pöördtelje tala massikeskmesse ja seejärel tõmbaksite tala kõrvale väikese, alla 20° nurga võrra? Eeldage, et pöördtelg on täiesti hõõrdumiseta.

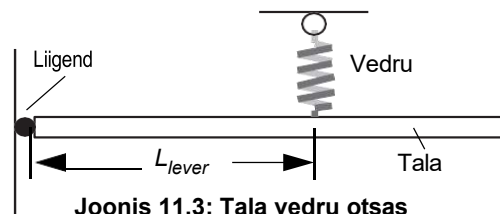
Katse 11C: Lihtne harmooniline liikumine — tala vedru otsas

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelKinnitav	vedrukaal
Masside ja riputite komplekt	ja nurgamõõtur
Stopper (ME-1234)	)Niit

Teooria

Kujutlege horisontaalset tala, mida ühes otsas toetab liigend ja teises otsas vertikaalne vedru. Kui tala nihutatakse, avaldab vedru taastavat jõudu $F = -kx$, et viia tala tagasi tasakaaluasendisse. Tala võngub üles ja alla perioodiga T_{beam} .



Vedru otsas oleva massi periood T on järgmine:

$$T = \sqrt{\frac{M}{k}}$$

kus M on võnkuv mass ja k vedrutegur. Milline on vedru otsas oleva tala periood?

Tala pöörleb liigendi ümber, kui vedru võngub üles ja alla. Vedru jõud talale $F = -kx$ tekitab talale jõumomendi.

Olgu L_{lever} tala jõuõla pikkus. Vedru tekitatud jõumoment

on $\tau = FL_{lever}$. Resultantjõumoment tekitab nurkkiirenduse α , mis on jõumomendiga τ võrdelises seoses ja inertsimomendiga I pöördvõrdelises seoses. Seega

$$\alpha = \frac{\tau}{I}$$

ehk $\tau = \alpha I$. Kahe jõumomendi avaldise võrdsustamisel saame $FL_{lever} = \alpha I$ ehk $-kxL_{lever} = \alpha I$, kus x on vedru üles-alla nihe võnkumise ajal.

Tala nurkkiirendus α ja τ α ν γ ε ν τ σ ι α λ ν ε (lineaarne) kiirendus a_T on omavahel seotud. Tangentsiaalne kiirendus $a_T = \alpha r$, kus r on pöörlemisraadius. Sel juhul on pöörlemisraadius jõuõlg L_{lever} , seega $a_T = L_{lever} \alpha$ ehk $\alpha = a_T / L_{lever}$. Avaldis muutub kujule:

$$-kxL_{lever} = \frac{a_T}{L_{lever}} I$$

Lahendades a_T suhtes, saame:

$$a_T = \frac{kL_{lever}^2}{I} x$$

Selle avaldise kuju on $a_T = \omega^2 x$, kus ω on nurksagedus, seega ω on:

$$\omega = \sqrt{\frac{kL_{lever}^2}{I}} = L_{lever} \sqrt{\frac{k}{I}}$$

Kuna nurksagedus $\omega = 2\pi / T$, siis periood $T = 2\pi / \omega$ ehk:

$$T = \frac{2\pi}{L_{lever} \sqrt{\frac{k}{I}}}$$

kus I on inertsimoment ja k vedrutegur. Kui eeldada, et tala on ristkülikukujuline varras, siis on varda inertsimoment massikeskme suhtes:

$$I_{cm} = \frac{1}{12}ML^2$$

kus M on mass ja L varda pikkus. Paralleeltelje teoreem ennustab, et inertsimoment varda otsas oleva telje suhtes on

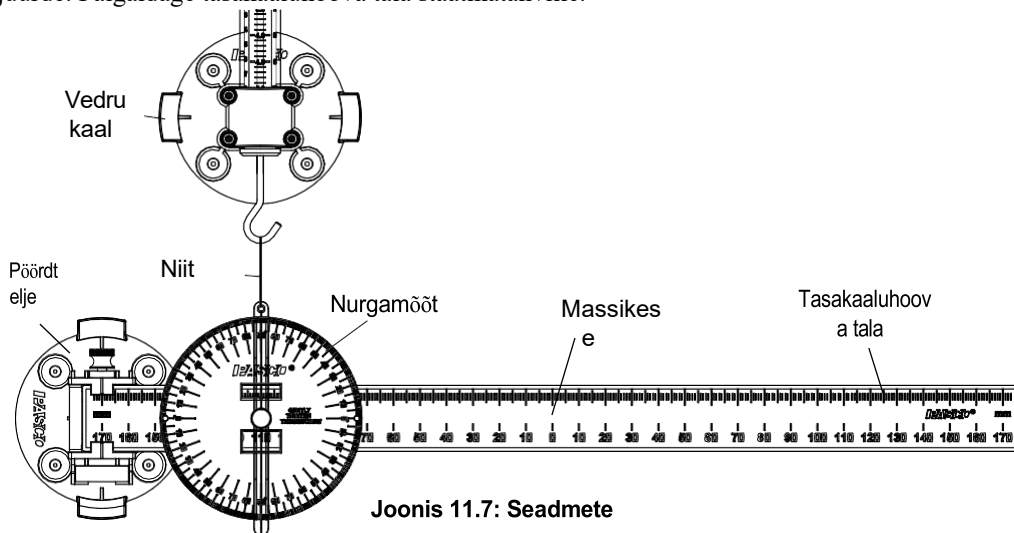
$$I_{parallel} = I_{cm} + ML^2 = \frac{1}{12}ML^2 + ML^2$$

kus L_{cm} on kaugus varda massikeskmest paralleelteljeni (pöördteljeni).

Loomulikult muudaks igasugune talale lisatud mass inertsimomenti. Näiteks kui *punktmass* m asub *pöördteljest* kaugusel r , on selle inertsimoment $I = mr^2$. Kogu inertsimoment oleks summa.

Protseduur

1. Mõõtke ja kirjutage üles tasakaaluhoova tala mass. Mõõtke ja kirjutage üles nurgamõõtuuri mass.
2. Asetage pöördtelg tasakaaluhoova tala 170 mm märgi juurde. Paigaldage nurgamõõtur talale 110 mm märgi juurde. Paigaldage tasakaaluhoova tala staatikatahvile.



Joonis 11.7: Seadmete

3. Paigaldage vedrukaal staatikatahvile nii, et kaal oleks täiesti vertikaalne. Ühendage nurgamõõtuuri nurgaindikaator niidiga vedrukaalu alumise konksu külge.
4. Reguleerige tasakaaluhooba ja vedrukaalu nii, et hoob oleks horisontaalne ja kaal paikneks otse nurgamõõtuuri keskpunkti kohal.
5. Suruge tasakaaluhoova tala väikese nurga võrra (alla 20°) alla ja vabastage see sujuvalt. Mõõtke kümne täieliku võnke (või võimalikult paljude võngete) kestus. Kirjutage võngete arv ja koguaeg üles.
6. Arvutage ja kirjutage üles mõõdetud *period* $T_{measured}$, jagades koguaja võngete arvuga.
7. Korrake nurgamõõtuuri esimese asendi mõõtmist viis korda.
8. Muutke nurgamõõtuuri asendit, nihutades seda 10 millimeetrit (mm) pöördteljest kaugemale, ja korrake mõõtmisi.
9. Korrake protseduuri 90 mm, 80 mm ja 70 mm jaoks, kokku viie kaugusega.

10. Mõõtke ja kirjutage üles tala *pikkus* L ning kaugus pöördteljest tala massikeskmeni (c.o.m.) L_{cm} .
11. Vedrukaalu vedrutehuri k leidmiseks vaadake katset „Hooke’i seadus” ja kirjutage selle väärtus üles.

Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage üles iga katsekorra mõõdetud periood.
2. Arvutage ja kirjutage üles iga jõuõla pikkuse keskmine mõõdetud periood.

Eeldage, et nurgamõõtur on punktmass m *pöördteljest* kaugusel r . Selle inertsimomendi liitmisel tala inertsimomendiga saadakse:

$$I = I_{beam} + mr^2 = \frac{1}{12}ML^2 + ML_{cm}^2 + mr^2$$

Kuna kaugus r *pöördteljest* on ühtlasi jõuõla pikkus L_{lever} , muutub inertsimoment kujule:

$$I = I_{beam} + mr^2 = \frac{1}{12}ML^2 + ML_{cm}^2 + mL_{lever}^2$$

ja võnkeperiood T muutub kujule:

$$T = \frac{2\pi}{L_{lever}} \sqrt{\frac{I}{k}} = \frac{2\pi}{L_{lever}} \sqrt{\frac{\frac{1}{12}ML^2 + ML_{cm}^2 + mL_{lever}^2}{k}}$$

3. Arvutage iga katsekorra teoreetiline *period* $T_{theoretical}$ ja kirjutage tulemus üles.

Andmed

- tala mass, $M =$ _____ nurgamõõduri mass, $m =$ _____
- pikkus, L _____ = kaugus pöördteljest massikeskmeni, $L_{cm} =$ _____
- vedrutehur, $k =$ _____

Andmetabel

L_{lever} (m)	Võnked	Koguaeg (s)	Mõõdetud periood (s)	Teoreetiline periood (s)
0.060				
Keskmine mõõdetud periood (s)				
0.070				
Keskmine mõõdetud periood (s)				
0.080				
Keskmine mõõdetud periood (s)				
0.090				
Keskmine mõõdetud periood (s)				
0.100				
Keskmine mõõdetud periood (s)				

Küsimused

1. Kui hästi vastab võnkeperioodi teoreetiline väärtus iga katsekorra keskmisele mõõdetud võnkeperioodile?
2. Kas vedru otsas oleva tala perioodi vörrand on tala tegeliku perioodi hea matemaatiline mudel? Miks või miks mitte?

Laiendus

- Koostage perioodi T sõltuvuse graafik suurusest $1/L_{\text{lever}}$. Määrake sirge tõus ja võrrelge tõusu väärtust järgmisega:

$$2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}ML^2 + ML_{cm}^2 + mL_{\text{lever}}^2}{k}}$$

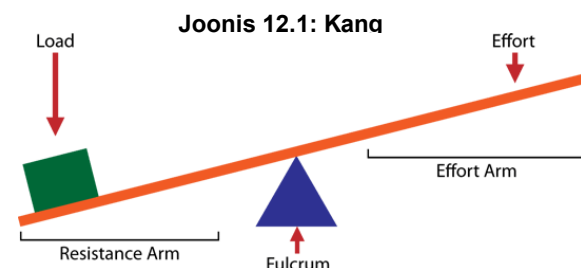
Katse 12: Lihtmasinad — kang

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelKinnitav	vedrukaal
Masside ja riputite komplekt	Tasakaaluhoob
Suur plok	niit
Pliiaats või kuivkustutatav marker	

Teooria

Kangi toimimist saab mõista jõumomendi mõiste abil. Kui rakendatud jõu (mida nimetatakse „pingutuseks”) tekitatud jõumoment muutub tõstetava keha (mida nimetatakse „koormuseks”) jõumomendist suuremaks, pöörduv kang ümber pöördtelje (mida vahel nimetatakse „toetuspunktiks”) ja tõstab koormust. Kuid kange saab selgitada ka töö ja energia jäävuse kaudu.

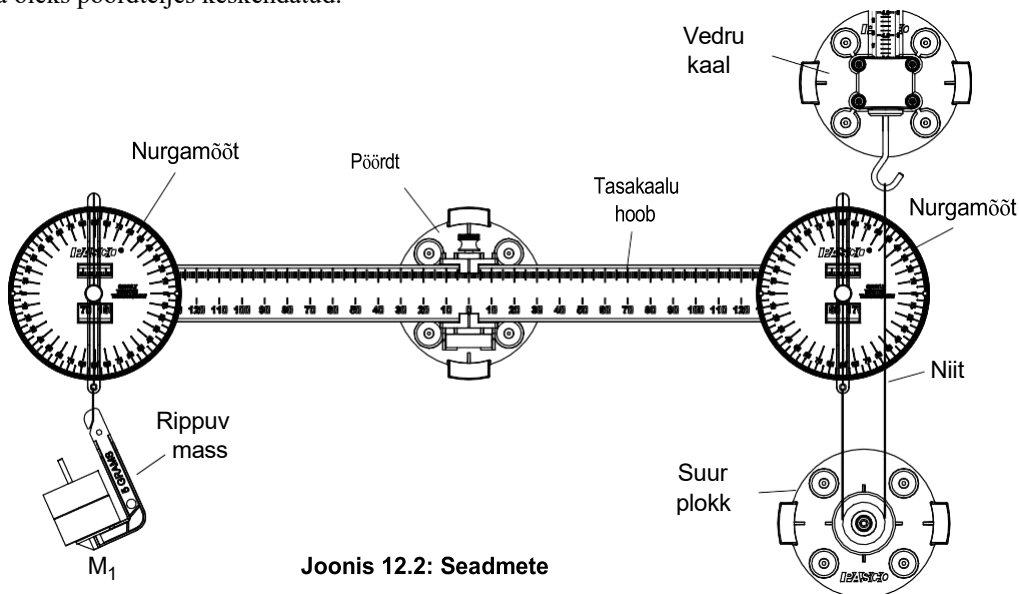


Füüsikas on töö täpne matemaatiline definitsioon kehale rakendatud jõu ja selle jõu mõjumise ajal läbitud vahemaa korrutis ehk $W = Fd$, kus W on töö, F rakendatud jõud ja d keha nihe jõu suunas. (Kui kehale rakendatakse jõudu, kuid keha ei liigu jõu suunas, ei tehta tehniliselt tööd.) Kui isoleeritud süsteemile tehakse tööd, muutub süsteemi energia täpselt tehtud töö võrra ehk $\Delta E = W$, kus ΔE on energia muutus.

Selles katses rakendate kangile mõõdetava töö hulga ja jälgite koormuse gravitatsioonilise potentsiaalse energia muutust.

Seadistamine

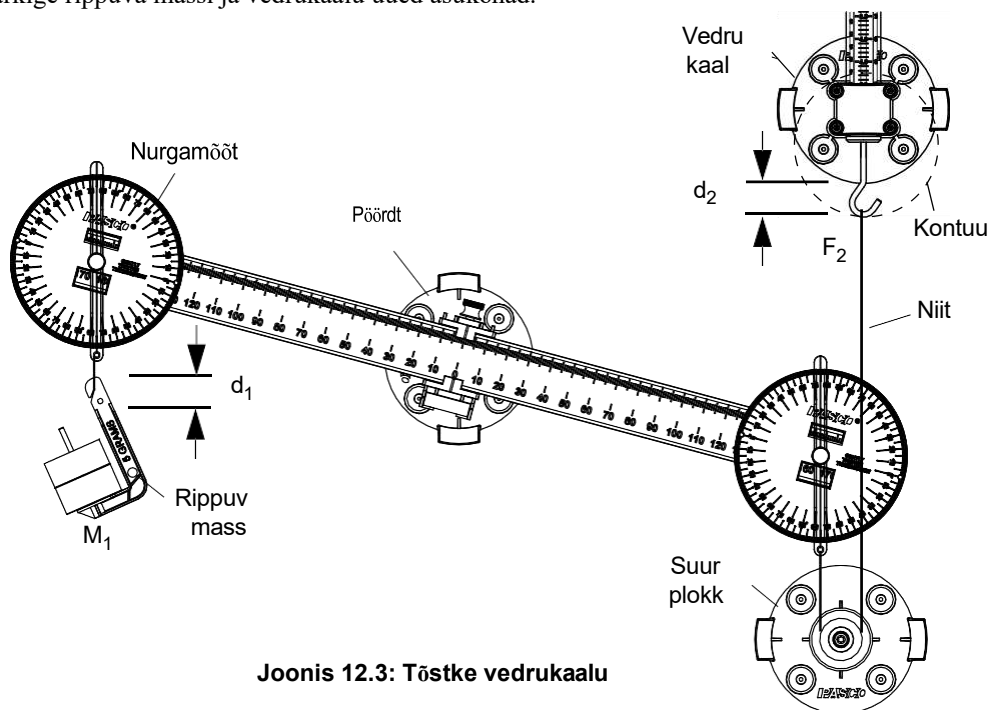
1. Asetage tasakaaluhoova tala kummassegi otsa nurgamõõtur ja paigaldage tasakaaluhoob staatikatahvlile nii, et tala oleks pöördteljes keskendatud.



2. Paigaldage suur plokk ja vedrukaal tasakaaluhoova ühte otsa ning ühendage vedrukaal niidiga tasakaaluhoova nurgamõõduri külge.
3. Riputage teise nurgamõõduri külge niidiga massiriputi ja lisage riputile 200 g massi.
4. Reguleerige suurt plokki ja vedrukaalu nii, et tasakaaluhoova tala oleks horisontaalne ja loodis.

Protseduur

1. Tehke ja kirjutage üles vajalikud mõõtmised, et näidata, et vedrukaalu ja rippuva massi kaalu tekitatud jõumomendid on tasakaalus.
2. Joonistage pliiatsi või kuivkustutatava markeriga staatikatahvlile vedrukaalu aluse kontuur ja rippuva massi ülaosa asukoht.
3. Lükake vedrukaalu aeglaselt ülespoole. (Kui teete seda liigutust piisavalt aeglaselt, ei muutu vedrukaalu näit märgatavalt.)
4. Märkige rippuva massi ja vedrukaalu uued asukohad.



Joonis 12.3: Tõstke vedrukaalu

5. Mõõtke ja kirjutage üles kaugused d_1 (rippuva massi liikumiskaugus) ja d_2 (vedrukaalu liikumiskaugus). Kirjutage üles ka F_2 , vedrukaalu näit, ning M_1 ja W_1 , rippuva massi mass ja kaal.
6. Nihutage rippuva massiga nurgamõõdur uude asukohta ligikaudu poolele teele pöördteljeni ja korrake katset. Mõõtke ja kirjutage üles uued d_1 , d_2 ja F_2 väärtused.

Andmetabel

Nimetus	Katsekord 1	Katsekord 2	Nimetus	Katsekord 1	Katsekord 2
Rippuva massi liikumiskaugus, d_1			Rippuva massi mass, M_1		
Vedrukaalu liikumiskaugus, d_2			Rippuva massi kaal, W_1		
Vedrukaalu jõud, F_2					

Arvutused

- Arvutage ja kirjutage üles süsteemile tehtud töö vedrukaalu tõstmisel, kus $Töö = F_2 d_2$.
- Arvutage ja kirjutage üles rippuva massi potentsiaalse energia muutus selle tõstmisel Maa gravitatsiooniväljas, kus $\Delta E_{\text{potentsiaalne}} = M_1 g d_1$ ja $g = 9.8 \text{ N/kg}$.

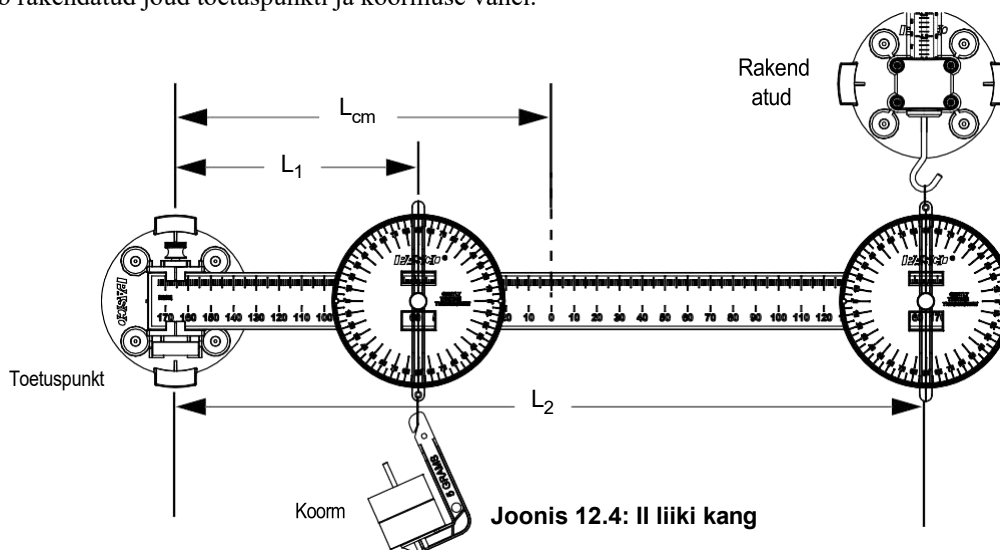
Katsekord	Töö	Potentsiaalse energia muutus
1		
2		

Küsimused

- Kuidas võrdus süsteemile tehtud töö süsteemi potentsiaalse energia muutusega?
- Kuidas muudab kang töö tegemise, näiteks raske koormuse tõstmise, lihtsamaks? Selgitage energia jäävuse kaudu.

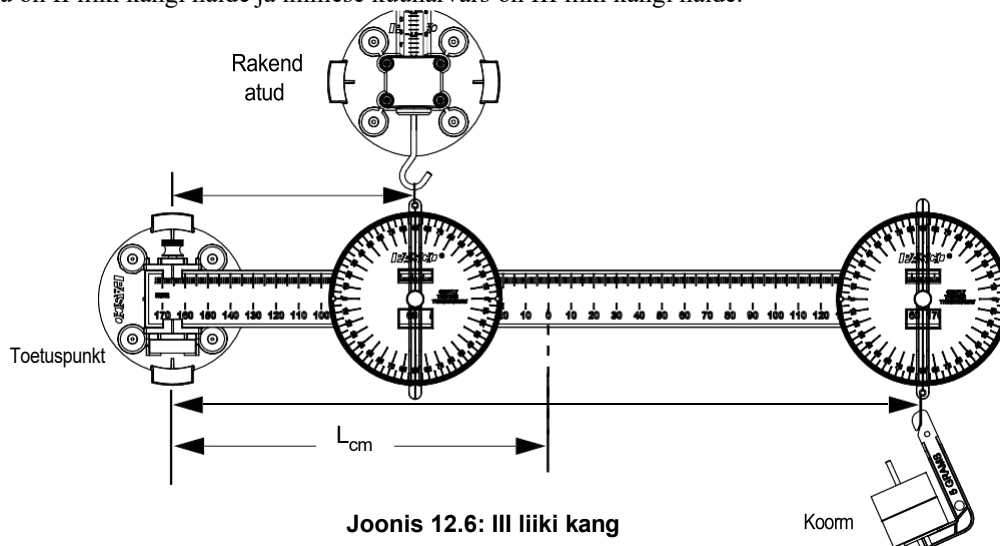
Laiendus

Kangi tüüpi, mille puhul toetuspunkt asub koormuse (rippuva massi) ja rakendatud jõu (vedrukaalu) vahel, nimetatakse I liiki kangiks. II liiki kangil asub koormus toetuspunkti ja rakendatud jõu vahel ning III liiki kangil asub rakendatud jõud toetuspunkti ja koormuse vahel.



Joonis 12.4: II liiki kang

Käru on II liiki kangi näide ja inimese küünarvars on III liiki kangi näide.



Joonis 12.6: III liiki kang

Kui kang on tasakaalus, võrdub pöördtelje (toetuspunkti) suhtes päripäeva mõjuvate jõumomentide summa vastupäeva mõjuvate jõumomentide summaga.

Tehke ja kirjutage üles mõõtmised, mida on vaja määramaks, kas II ja III liiki kangide puhul võrdub päripäeva jõumomentide summa vastupäeva jõumomentide summaga. Kas peate arvestama nurgamõõturite ja tasakaaluhoova tala massiga?

Joonistage oma tulemused ning esitage mõõtmised ja arvutused eraldi paberilehel.

Andmetabel

Tabel 16.1:

Jõuolg	Σ päripäeva jõumoment	Σ vastupäeva jõumoment	Resultantjõumoment
II liik			
III liik			

Küsimused

1. Kas II liiki kangi resultantjõumoment on tasakaalu korral null?
2. Kas III liiki kangi resultantjõumoment on tasakaalu korral null?

Katse 13: Lihtmasinad — kaldpind

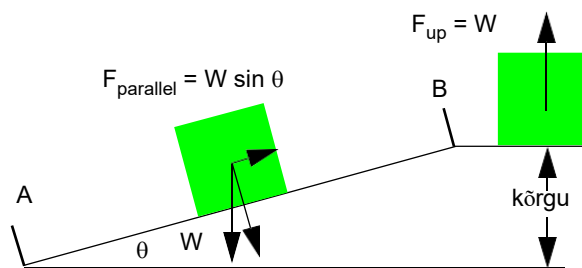
Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
Staatikatahvel ja plokkKinnitav	vedrukaal
Masside ja riputite	komplektKaldpind ja massikäru
Pliiats või kuivkustutatav mar	kerNiit

Sissejuhatus

Kaldpinda, nagu kangigi, kasutatakse sageli raskete kehade tõstmise hõlbustamiseks. Eelmises katses analüüsisite kaldpinna sellist kasutamist mõjuvate jõudude kaudu. Selles katses vaatlete kaldpinda uuesti, kasutades töö ja energia jäävuse mõisteid samamoodi nagu eelmistes katsetes.

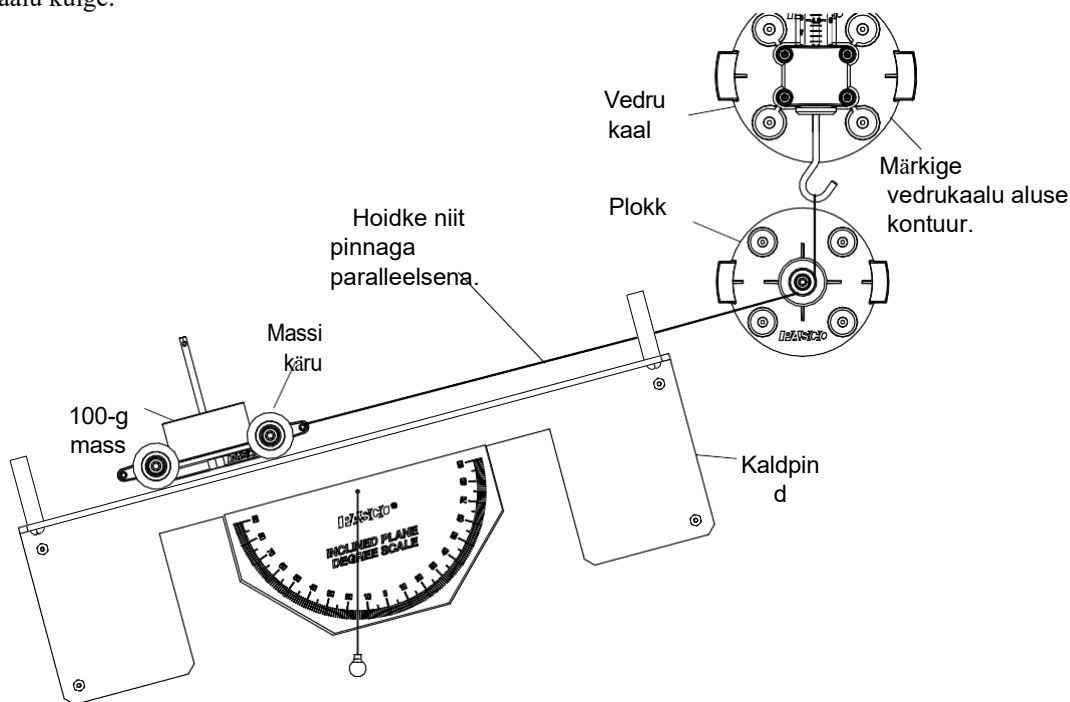
Kaaluga W keha tõstmiseks tehtav töö on kaalu ja kõrguse korrutis. Sama keha üleslükkamiseks mööda kaldpinda on vaja keha kaalust väiksemat jõudu $W \sin \theta$, kuid jõu mõjumise tee on pikem. Nurk θ on pinna kaldenurk.



Joonis 13.1: Kaldpind

Protseduur

- Asetage massikäru tapile 100 g mass ja mõõtke vedrukaaluga käru ning massi kogukaal W .
 - Kaal, $W =$ _____
- Asetage kaldpind staatikatahvile suhteliselt väikese nurga alla (näiteks 15°). Asetage plokk ja vedrukaal tahvlile kaldpinna ühe otsa lähedale. Asetage massikäru kaldpinnale ja ühendage massikäru ots niidiga vedrukaalu külge.



3. Mõõtke ja kirjutage üles vedrukaalu massikärule avaldatava jõu F_1 suurus ja kaldpinna nurk $\square$.

- Jõud, $F_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ Nurk, $\theta = \underline{\hspace{2cm}}$

4. Joonistage pliiatsi või kuivkustutatava markeriga staatikatahvlile vedrukaalu aluse kontuur.

5. Tõstke vedrukaalu aeglaselt — piisavalt aeglaselt, et vedrukaalu näit märgatavalt ei muutuks.

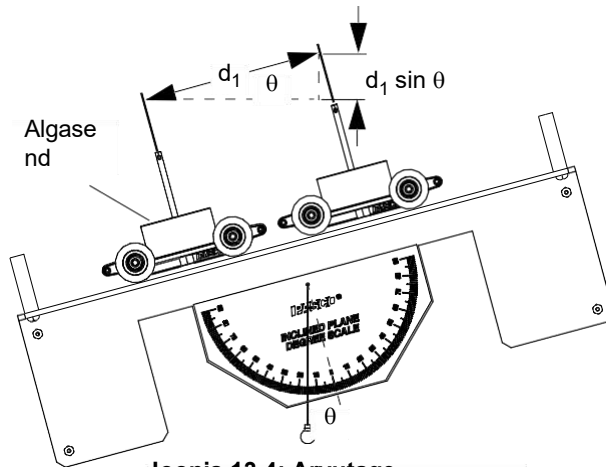
6. Mõõtke ja kirjutage üles kaugus d_1 , mille võrra vedrukaal massikäru tõmbas.

- Kaugus, $d_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

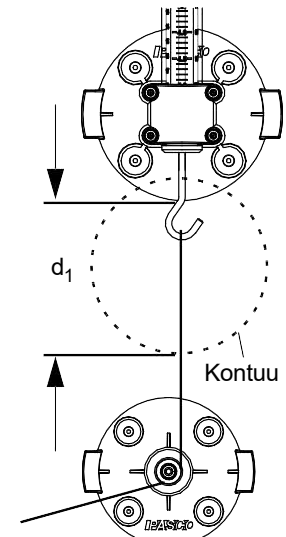
Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage üles kõrgus, mille võrra massikäru tõusis, kui vedrukaal seda mööda kaldpinda üles tõmbas.

- Kõrgus, $d_1 \sin \square = \underline{\hspace{2cm}}$



Joonis 13.4: Arvutage



Joonis 13.3: Mõõtke d_1

2. Arvutage ja kirjutage üles vedrukaalu tehtud töö.

- Töö = $F_1 d_1 = \underline{\hspace{2cm}}$.

3. Arvutage ja kirjutage üles massikäru gravitatsioonilise potentsiaalse energia muutus.

- $\Delta E = \text{Kaal} \times \text{kõrgus} = W d_1 \sin \theta = \underline{\hspace{2cm}}$.

Küsimus

- Kuidas võrdub massikäru gravitatsioonilise potentsiaalse energia muutus vedrukaalu tehtud tööga?

Protseduur

1. Riputage massikäru koos 100 g massiga ettevaatlikult vedrukaalu külge. Kirjutage üles vedrukaalu avaldatav jõud F_2 .

- Jõud, $F_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

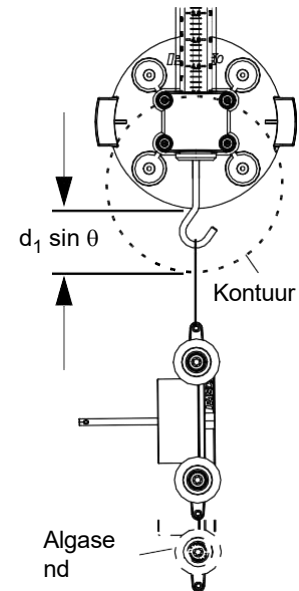
2. Lükake vedrukaalu aeglaselt otse üles kauguse $d_1 \sin \theta$ võrra — kõrguseni, mille võrra massikäru kaldpinnal tõusis. (Tõstke vedrukaalu aeglaselt, et vedrukaalu näit märgatavalt ei muutuks.)

Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage üles töö, mis tehti massikärule selle otse üles tõstmisel kauguse $d_1 \sin \theta$ võrra.
 - $Töö = F d = F_2 d_1 \sin \theta =$ _____
2. Arvutage ja kirjutage üles massikäru gravitatsioonilise potentsiaalse energia muutus.
 - $\Delta E = \text{Kaal} \times \text{kõrgus} = W d_1 \sin \theta =$ _____.

Küsimused

1. Kuidas võrdub kaldpinnal olevale massikärule tehtud töö tööga, mis tehti massikäru otsesel tõstmisel vedrukaaluga?
2. Kuidas teeb kaldpind töö tegemise, näiteks raske koormuse tõstmise, lihtsamaks? Teisisõnu, milline on kaldpinna kasutamise eelis?



Joonis 13.5: Tõstke massikäru

Katse 14: Lihtmasinad — plokk

Vajalikud seadmed

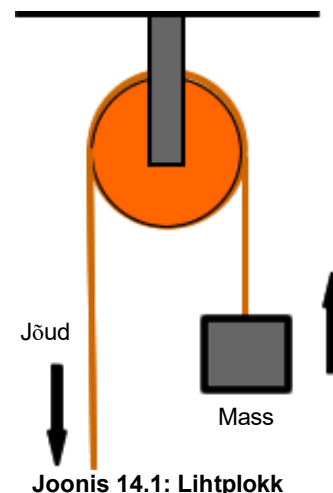
Nimetus	Nimetus
Staatikatahvel ja plokk	Kinnitav vedrukaal
Suur plokk ja väikesed plokid (2)	Topelplokk Masside
ja riputite	komplektiit

Teooria

Eelmistes katsetes kasutasite plokkide rakendatud jõudude suuna muutmiseks. Plokisüsteemi saab aga paigutada nii, et suhteliselt väikesed rakendatud jõud muudetakse palju suuremateks jõududeks, sarnaselt kangi või kaldpinnaga. Selles katses vaatlete plokkide uuesti ja uurite, kuidas plokisüsteemi saab töö tegemisel kasutada rakendatud jõu võimendamiseks.

Ideaalses plokisüsteemis ei oleks plokides hõõrdumist. Näiteks kanduks rakendatud jõud täielikult rippuvale massile.

Nagu kangi ja kaldpinda, saab ka plokisüsteemi mõista kas süsteemile mõjuvaid jõude või süsteemi ja süsteemi poolt tehtavat tööd analüüsides. Selles katses uurite mitut plokisüsteemi.



Joonis 14.1: Lihtplokk

Protseduur

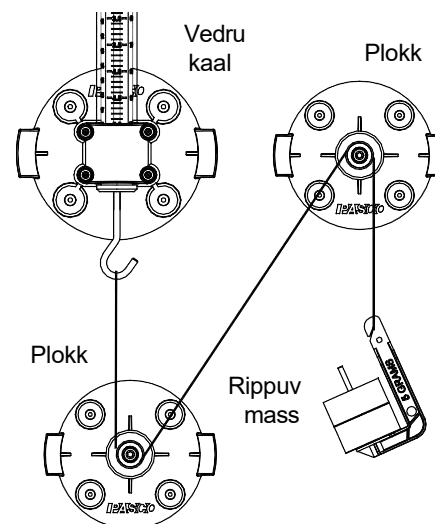
Hõõrdumise mõju on selles katses märgatavam kui kangi või kaldpinna puhul. Alustage plokide hõõrdumise mõju uurimisest.

1. Asetage massiriputile 200 g massi ja mõõtke vedrukaaluga massiriputi ning *massi* kogukaal W . Kirjutage mõõtetulemus üles.

• Kaal, $W =$ _____

2. Paigaldage vedrukaal ja kaks plokki staatikatahvile nagu näidatud ning ühendage vedrukaal niidiga rippuva massi külge. Kirjutage *vedrukaalu* jõunäit F üles.

• Jõud, $F =$ _____



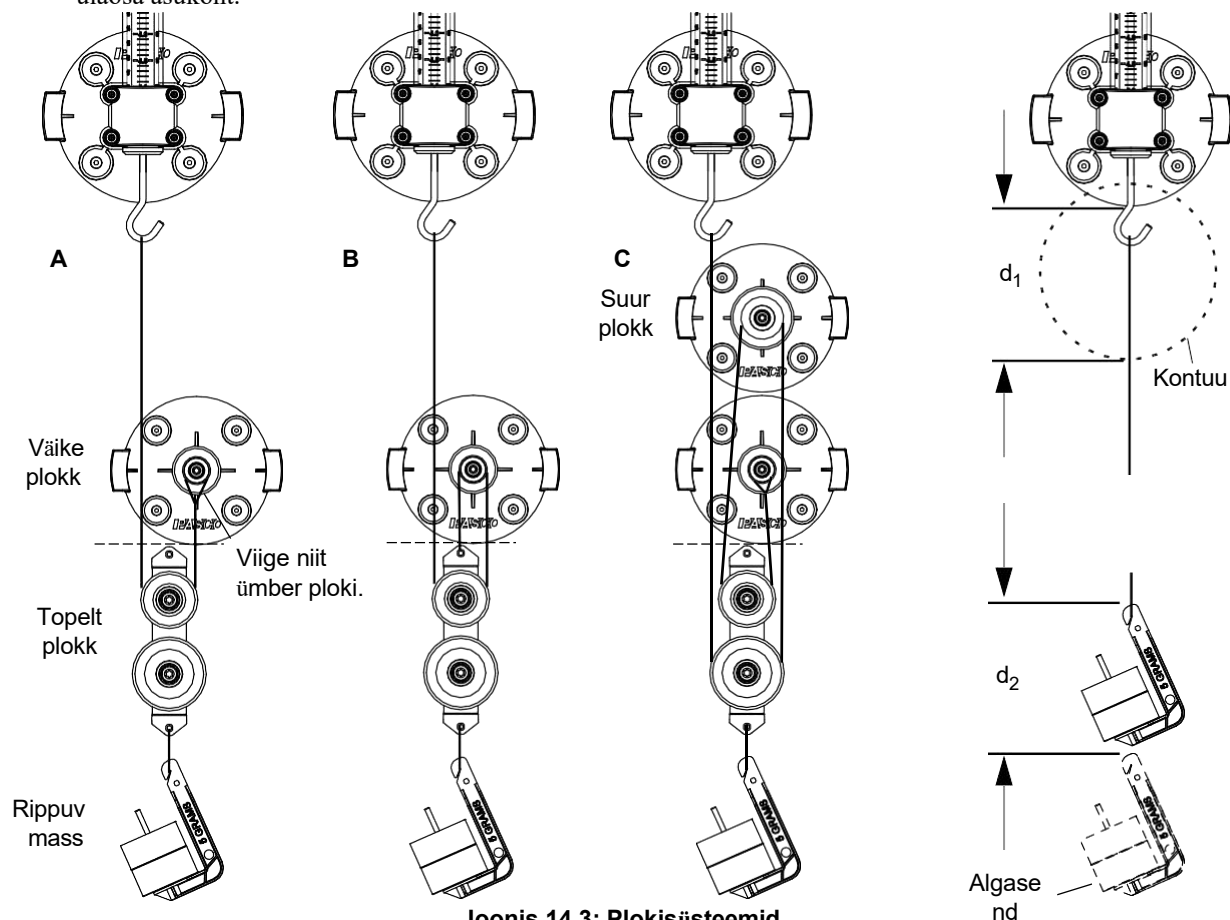
Joonis 14.2: Seadmete paigutus

Küsimus

- Kuidas võrdub plokiseadistuse vedrukaalu jõunäit F rippuva massi kaaluga W ?
3. Paigaldage kõik kolm allpool näidatud plokisüsteemi. Iga plokisüsteemi korral tehke süsteemile tööd, tõstes vedrukaalu aeglaselt. Mõõtke ja kirjutage üles järgmised väärtused:

Tähis	Kirjeldus	Tähis	Kirjeldus
F	Vedrukaalu jõunäit	d_2	Rippuva massi tõstekaugus
W/F	Rippuva massi kaalu ja jõu suhe	Töö	Vedrukaalu tõstmisega tehtud töö ($F \times d_1$)
d_1	Vedrukaalu tõstekaugus	ΔE	Gravitatsioonilise potentsiaalse energia muutus ($W \times d_2$)

4. Joonistage pliiatsi või kuivkustutatava markeriga vedrukaalu aluse kontuur. Märkige ka rippuva massi ülaosa asukoht.



Joonis 14.3: Plokisüsteemid

Pange tähele, et joonised ei ole mõõtkavas. Jätke komponentide vahele suurem vertikaalne vahe.

5. Tõstke vedrukaalu aeglaselt — piisavalt aeglaselt, et vedrukaalu näit märgatavalt ei muutuks.
6. Mõõtke ja kirjutage üles kaugus d_1 , mille võrra vedrukaalu tõsteti. Mõõtke ja kirjutage üles ka kaugus d_2 , mille võrra rippuvat massi tõsteti.

Andmetabel

Süsteem	W	F	W/F	d_1	d_2	Töö	ΔE
A							
B							
C							

Küsimused

- Kuidas võrdub kaalu (W) ja jõu (F) seos vedrukaalu tõstekauguse (d_1) ja rippuva massi tõstekauguse (d_2) seosega?
- Võrrelge W/F väärtust plokisüsteemi joonisel punktiirjoont ületavate niitide arvuga.

Katse 15: Jõud poomile

Vajalikud seadmed

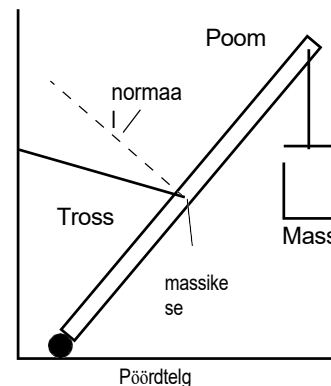
Nimetus	Nimetus
StaatikatahvelKinnitav	vedrukaal ja plokk
Tasakaaluhoob ja nurgamõõturidNiit	Masside
ja riputite komplekt	

Teooria

Trossiga toetatud poomi ülemisse otsa on riputatud mass. Poomi alumist otsa toetab pöördtelg.

Näiteks kui mass on 100 kg ja poomi mass 50 kg, milline on trossi pinge T ? Eeldage, et tross on kinnitatud poomi massikeskmesse ja asub poomi suhtes nurga all. Poom on horisontaali suhtes 50° nurga all.

Poomi tasakaalu korral peab kõigi kulgjõudude (F_x ja F_y) ning kõigi jõumomentide summa olema null. Ühe jõumomendi tekitab trossi pinge. Teise jõumomendi tekitab tala kaal. Kolmanda jõumomendi tekitab rippuva massi kaal.



Joonis 15.1: Riputatud mass

$$\sum \tau \pi^{\text{TM}} \rho \pi^{\text{TM}} \varepsilon \varpi \alpha = (\Omega \Lambda \cos \square \square + \square W_{cm} L_{cm} \cos \beta)$$

$$\sum \tau \varpi \alpha \sigma \tau \nu \pi^{\text{TM}} \varepsilon \varpi \alpha = T L_{cm} \cos \alpha$$

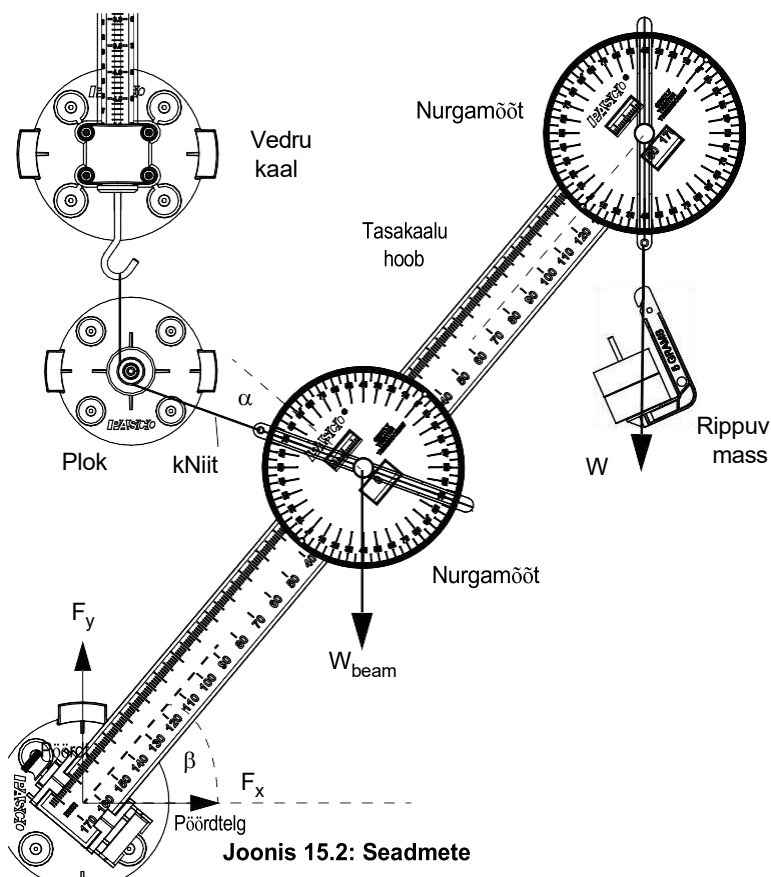
kus W on rippuva massi kaal, L jõuõlg pöördteljest rippuva massi kinnituspunktini, W_{boom} poomi kaal, L_{cm} jõuõlg pöördteljest massikeskmene, β on poomi nurk, T trossi pinge ja $\square$ $\tau \rho \sigma \sigma \iota$ nurk poomi normaalojoone suhtes. poomi.

Kui poom on tasakaalus, on resultantjõumoment null. Trossi pinge T avaldis muutub kujule:

$$T = \frac{(W L \cos \beta) + (W_{cm} L_{cm} \cos \beta)}{L_{cm} \cos \alpha}$$

Protseduur

1. Seadistage tasakaaluhoob nii, et pöördtelg on ühes otsas, nurgamõõtur keskpunktis ja teine nurgamõõtur teises otsas. Paigaldage tasakaaluhoob staatikatahvi alumisse nurka.
2. Paigaldage vedrukaal ja plokk tahvile ning ühendage vedrukaal niidiga tala keskpunktis oleva nurgamõõtu külge.
3. Kinnitage rippuv mass niidiga tala otsas oleva nurgamõõtu külge.
4. Tehke vajalikud mõõtmised ja kirjutage need üles.



Joonis 15.2: Seadmete

Andmetabel

Nimetus	Väärtus
Tasakaaluhoova nurk α	
Niidi nurk β	
Rippuva massi kaal W	
Tala kaal W_{beam}	
Nurgamõõtu kaal	
Jõuõlg L_{cm} pöördteljest massikeskmeni	
Jõuõlg L rippuva massini	
Niidi pinget T	

Arvutused

1. Arvutage pöördtelje suhtes päripäeva mõjuvate jõumomentide summa.
 - Σ jõumomentpäripäeva = _____
2. Arvutage niidi teoreetiline pinget T .
 - Pingeteoreetiline = _____

Küsimus

- Kuidas võrdub vedrukaalu jõunäit trossi pinget teoreetilise väärtusega?

Katse 16: Modifitseeritud Atwoodi masin

Vajalikud seadmed

Nimetus	Nimetus
Staatikatahvel/Väike	plokk (2)
Masside ja riputite kom	plekt/Niit
Stopper/Kuivkustutatav	marker või pliiats

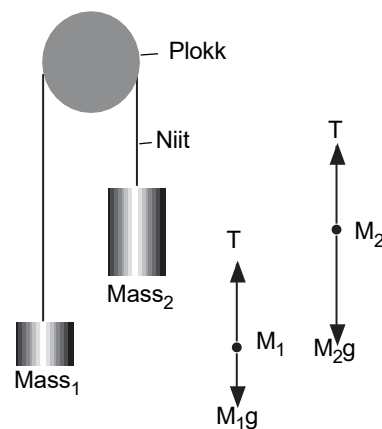
Teooria

Keha kiirendus sõltub rakendatud resultantjõust ja keha massist. Atwoodi masinas määrab kahe rippuva massi erinevus kahe massi süsteemile mõjuva resultantjõu. Resultantjõud kiirendab mõlemat rippuvat massi: raskem mass kiireneb allapoole ja kergem mass ülespoole.

Atwoodi masina leiutas 1784. aastal vaimulik George Atwood, et demonstreerida kiirenduse ja resultantjõu põhimõtteid. Ideaalses

Atwoodi masinas on kaks ebavõrdset massi ühendatud painduva massitu niidiga, mis kulgeb üle hõõrdumiseta massitu ploki. Tegelik Atwoodi masin ei ole nii lihtne kui ideaalne mudel. Niidid ja plokid ei ole massitud ning plokid ei ole hõõrdumiseta. Ploki pöörduv

muudab demonstratsiooni keerukamaks.



Joonis 16.1: Atwoodi vabakehadiagramm

Atwoodi masina vabakehadiagrammil (FBD) on T niidi pinge, $Mass_2$ on suurem kui $Mass_1$ ja g on raskuskiirendus. Kasutades kokkulepet, et üles on positiivne ja alla negatiivne, on kahe massi resultantjõu võrrandid:

$$\begin{aligned} T_1 - M_1g &= F_{net} = M_1a \\ T_2 - M_2g &= F_{net} = M_2(-a) \end{aligned}$$

Ideaalsel juhul (kus niit on massitu ega veni ning plokk on massitu ja hõõrdumiseta) on pinge T mõlema rippuva massi jaoks sama. Seadke $T_1 = T_2$ ja lahendage teoreetilise kiirenduse a suhtes:

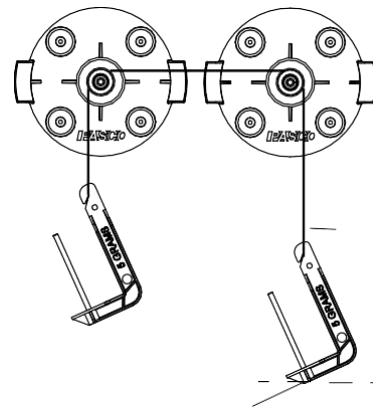
$$a = g \frac{M_2 - M_1}{M_2 + M_1}$$

Teoreetiline kiirendus on kahe jõu erinevus $(M_2g - M_1g)$ jagatuna kahe massi summaga.

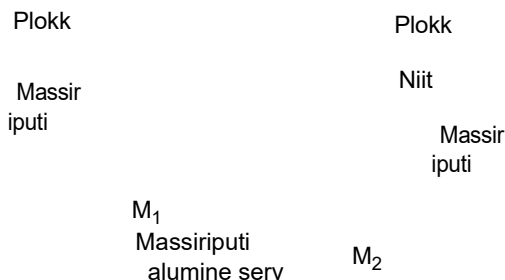
Selles katses uurite Atwoodi masina masside kiirendust. Kiirenduse a saab määrata, mõõtes aega t , mis kulub ühel massil teadaoleva vahemaa d läbimiseks.

$$a = \frac{2d}{t^2}$$

Võrrelge mõõdetud kiirendust teoreetilise kiirendusega.

Seadistamine

1. Asetage kaks väikest plokki staatikatahvile tahvli ülaseri lähedale ja teineteise lähedale. Veenduge, et mõlemad plokid oleksid loodis.
2. Ühendage üks massiriputi teise massiriputiga niidiga nii, et riputid oleksid kahe ploki kohal riputatud.
- MÄRKUS: Tehke niit piisavalt pikk, et raske mass ulatuks peaaegu staatikatahvli aluseni, kui kerge mass on peaaegu ploki juures.



Joonis 16.2: Seadmete paigutus

3. Tõmmake M1 massiriputi alla nii, et M2 massiriputi ülaosa oleks veidi ploki alusest allpool. Tehke kuivkustutatava markeri või pliiatsiga horisontaalne märk staatikatahvile M2 massiriputi alumise servi asukoha tähistamiseks.
4. Mõõtke esimesest märgist vertikaalselt alla 20 cm (0.020 m) ja tehke tahvile teine horisontaalne märk.

Protseduur

1. osa: hoidke kogumass konstantsena

1. Asetage „kergele” (M1) massiriputile: $1 \times 50\text{-g}$, $3 \times 20\text{-g}$, $2 \times 5\text{-g}$, $2 \times 2\text{-g}$, $1 \times 1\text{-g}$. Asetage „raskele” (M2) massiriputile: $1 \times 50\text{-g}$, $3 \times 20\text{-g}$, $1 \times 10\text{-g}$, $1 \times 5\text{-g}$.
2. Arvestades mõlemat 5-g massiriputit, kirjutage andmetabelisse M1 kogumass ja M2 kogumass.
3. Viige 1-g mass kergelt massiriputilt raskele massiriputile (nii et masside erinevus on 1 g). Tõmmake kerge massiriputi alla nii, et raske massiriputi alumine serv oleks staatikatahvli oleva algusmärgiga joondatud.
- MÄRKUS: Takistage riputite pöörlemist või kiikumist.
4. Vabastage kerge massiriputi ja alustage samal hetkel aja mõõtmist. Lõpetage aja mõõtmine, kui raske massiriputi alumine serv jõuab staatikatahvli lõppmärgini. Kirjutage aeg t_1 andmetabelisse. Korrake katset veel kaks korda ja kirjutage tulemused üles.
5. Teiseks katsekorraks asetage 1-g mass tagasi kergele riputile ja viige üks 2-g mass raskele riputile ($\Delta M = 2\text{ g}$). Korrake andmete mõõtmise protseduuri kolm korda.
6. Kolmandaks katsekorraks viige 1-g mass kergelt riputilt raskele riputile ($\Delta M = 3\text{ g}$) ja korrake protseduuri kolm korda.
7. Neljandaks katsekorraks viige 1-g mass raskelt riputilt tagasi kergele riputile ja viige 2-g mass kergelt riputilt raskele riputile ($\Delta M = 4\text{ g}$) ning korrake protseduuri kolm korda.
8. Viiendaks katsekorraks viige 1-g mass kergelt riputilt raskele riputile ($\Delta M = 5\text{ g}$) ja korrake protseduuri kolm korda.

Andmetabel 1: konstantne kogumass

Katsekord	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ΔM (kg)	t_1	t_2	t_3	t_{avg}	$a_{theoretical}$	$a_{measured}$	% erinevus
1			0.001							
2			0.002							
3			0.003							
4			0.004							
5			0.005							

2. osa: hoidke resultantjõud konstantsena

1. Asetage „kergele” (M_1) massiriputile 50-g mass ning „raskele” (M_2) massiriputile 50-g mass ja 5-g mass.
2. Arvestades mõlemat 5-g massiriputit, kirjutage andmetabelisse M_1 kogumass ja M_2 kogumass.
3. Tõmmake kerge massiriputi alla nii, et raske massiriputi alumine serv oleks staatikatahvliil oleva algusmärgiga joondatud.
- MÄRKUS: Takistage riputite pöörlemist või kiikumist.
4. Vabastage kerge massiriputi ja alustage samal hetkel aja mõõtmist. Lõpetage aja mõõtmine, kui raske massiriputi alumine serv jõuab staatikatahvliil lõppmärgini. Kirjutage aeg t_1 andmetabelisse. Korrake katset veel kaks korda ja kirjutage tulemused üles.
5. Teiseks katsekorra lisage kummalegi riputile 20 g massi (kui ΔM on endiselt 5 g). Korrake andmete mõõtmise protseduuri kolm korda.
6. Kolmandaks katsekorra lisage kummalegi riputile veel 20 g massi ja korrake protseduuri kolm korda.
7. Neljandaks katsekorra lisage kummalegi riputile veel 20 g massi ja korrake protseduuri kolm korda.
8. Viiendaks katsekorra lisage kummalegi riputile veel 20 g massi ja korrake protseduuri kolm korda.

Andmetabel 2: konstantne resultantjõud

Katsekord	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ΔM (kg)	t_1	t_2	t_3	t_{avg}	$a_{theoretical}$	$a_{measured}$	% erinevus
1			0.005							
2			0.005							
3			0.005							
4			0.005							
5			0.005							

Arvutused

1. Arvutage ja kirjutage üles iga katsekorra keskmine aeg.
2. Arvutage ja kirjutage üles iga katsekorra teoreetiline kiirendus ja mõõdetud kiirendus.

3. Arvutage ja kirjutage üles iga katsekorra teoreetilise ja mõõdetud kiirenduse protsentuaalne erinevus.

$$\% \text{ erinevus} = \left| \frac{a_{\text{theoretical}} - a_{\text{measured}}}{a_{\text{theoretical}}} \right| \times 100$$

4. Konstantse kogumassi andmete puhul arvutage iga katsekorra resultantjõud ($F_{\text{net}} = \square M \times g$). Koostage resultantjõu (vertikaaltelg) sõltuvuse graafik mõõdetud kiirendusest (horisontaaltelg).

Küsimused

1. Kirjeldage resultantjõu ja mõõdetud kiirenduse graafikut. Mida selle graafiku tõus tähistab?
2. Kuidas seostub resultantjõu sõltuvuse graafik mõõdetud kiirendusest Newtoni teise seadusega?
3. Võrrelge teoreetilise ja mõõdetud kiirenduse protsentuaalset erinevust. Millised põhjused võivad protsentuaalset erinevust selgitada?

Tehniline tugi

Esita küsimus

Küsi PASCO ametlikult partnerilt Eestis DIFI.NET OÜ

ask@ste.education

<https://oppelabor.ee>

Lisateabe saamiseks staatikasüsteemi ja selle kasutusjuhendi uusima versiooni kohta külastage PASCO veebisaiti ja sisestage otsinguaknasse ME-9502.

Piiratud garantii Toote garantii kirjeldust vaadake PASCO kataloogist.

Autoriõigus PASCO scientificu 012-12876B *staatikasüsteemi kasutusjuhend* on autoriõigusega kaitstud ja kõik õigused on reserveeritud. Mittetulunduslikele haridusasutustele antakse luba paljundada selle juhendi mis tahes osa tingimusel, et koopiaid kasutatakse ainult nende laborites ja klassiruumides ning neid ei müüda kasumi saamise eesmärgil. Paljundamine mis tahes muudel asjaoludel ilma PASCO scientificu kirjaliku nõusolekuta on keelatud.

Kaubamärgid PASCO ja PASCO scientific on PASCO scientificu kaubamärgid või registreeritud kaubamärgid Ameerika Ühendriikides ja/või teistes riikides. Kõik muud kaubamärgid, tooted või teenusenimed on või võivad olla nende vastavate omanike kaubamärgid või teenindusmärgid ning neid kasutatakse toodete või teenuste identifitseerimiseks. Lisateavet leiate veebilehelt www.pasco.com/legal.

