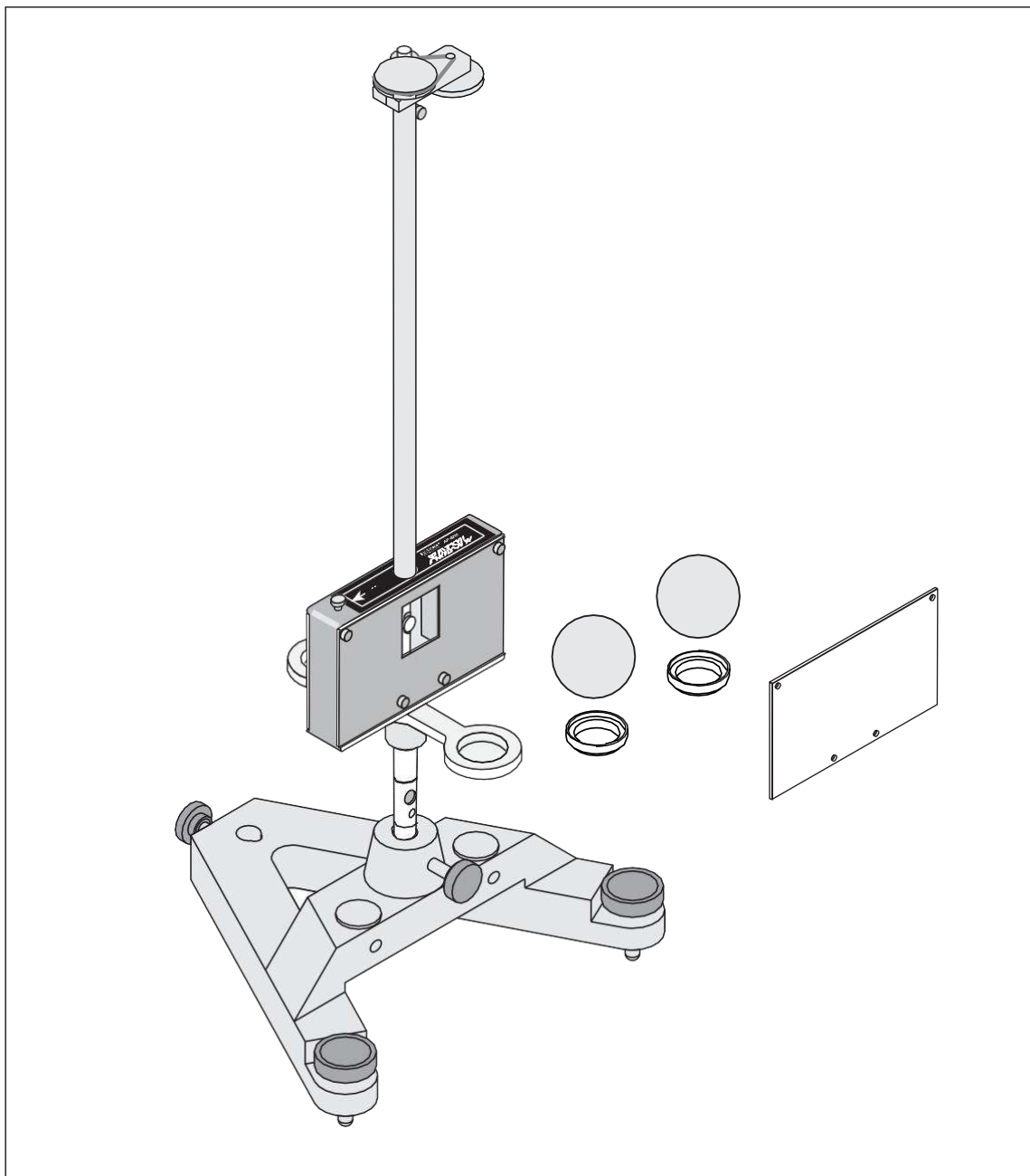




Gravitatsiooniline torsioonkaal

AP-8215A



Märkus: torsioonlindi purunemise vältimiseks peab lukustusmehhanism gravitatsioonilise torsioonkaalu liigutamisel või transportimisel olema mõlemal küljel täielikult üles tõstetud.

Märkus: hoidke karbi sisemusest eemaldatud pakkematerjal alles ja paigaldage see gravitatsioonilise torsioonkaalu liigutamisel või transportimisel uuesti.

Sissejuhatus

PASCO scientificu gravitatsiooniline torsioonkaal AP-8215A kordab üht füüsika ajaloo suurt katset - gravitatsioonikonstandi mõõtmist, mille Henry Cavendish tegi 1798. aastal.

Gravitatsiooniline torsioonkaal koosneb kahest 38.3-grammisest massist, mis on riputatud väga tundliku torsioonlindi külge, ning kahest 1.5-kilogrammisest massist, mida saab paigutada vastavalt vajadusele. Gravitatsiooniline torsioonkaal on suunatud nii, et väikeste kuulide ja Maa vaheline gravitatsioonijõud ei mõjuta mõõtmist (pendel on vertikaalselt ja horisontaalselt peaaegu täiuslikult joondatud). Suured massid viiakse väiksemate masside lähedale ning suurte ja väikeste masside vahelist gravitatsioonijõudu mõõdetakse torsioonlindi väändumist jälgides.

Torsioonlindi väikese väändenurga täpselt mõõtmiseks kasutatakse optilist hooba, mille moodustavad laservalgusallikas ja torsioonpendlile kinnitatud peegel. Võimalikud on kolm mõõtmismeetodit: lõpphälbe meetod, tasakaaluasendite meetod ja kiirendusmeetod.

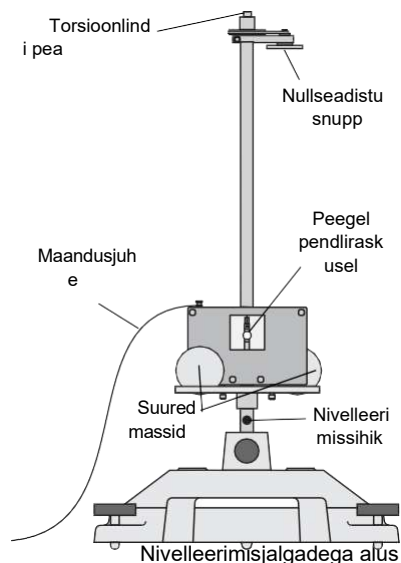
Veidi tausta

Kõigi kehade gravitatsiooniline tõmme Maa poole on ilmne.

Iga keha gravitatsiooniline tõmme iga teise keha suhtes pole seevastu sugugi ilmne. Hoolimata otseste tõendite puudumisest sellise tõmbe kohta igapäevaste esemete vahel suutis Isaac Newton tuletada universaalse gravitatsiooniseaduse.

Newtoni ajal sisaldas iga mõõdetav gravitatsioonijõu näide siiski ühe massina Maad. Seetõttu oli võimatu mõõta konstanti G, teadmata eelnevalt Maa massi (või vastupidi).

Selle probleemi lahendas Henry Cavendish 1798. aastal, kui ta tegi torsioonkaaluga katseid ja mõõtis laboris suhteliselt väikeste kehade vahelist gravitatsioonilist tõmmet. Tema määratud G väärtus võimaldas määrata Maa massi ja tiheduse. Cavendishi katse oli nii hästi üles ehitatud, et täpsemad mõõtmised tehti alles sada aastat hiljem.



Joonis 1: kokkupandud gravitatsiooniline torsioonkaal, valmis Henry Cavendishi klassikalise gravitatsioonikonstandi määramise katse alustamiseks.

Newtoni universaalse gravitatsiooni seadus:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

kus m_1 ja m_2 on kehade massid, r on nende keskpunktide vaheline kaugus ning G on universaalne gravitatsioonikonstant $6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Seadmed

Kaasas:

Gravitatsiooniline torsioonkaal Plastplaat

Nivelleerimisjalgadega tugialus Asendustorsioonlint*

1.5 kg volframkuulid (2) 2-56 x 1/8 ristpeaga kruvid (4)

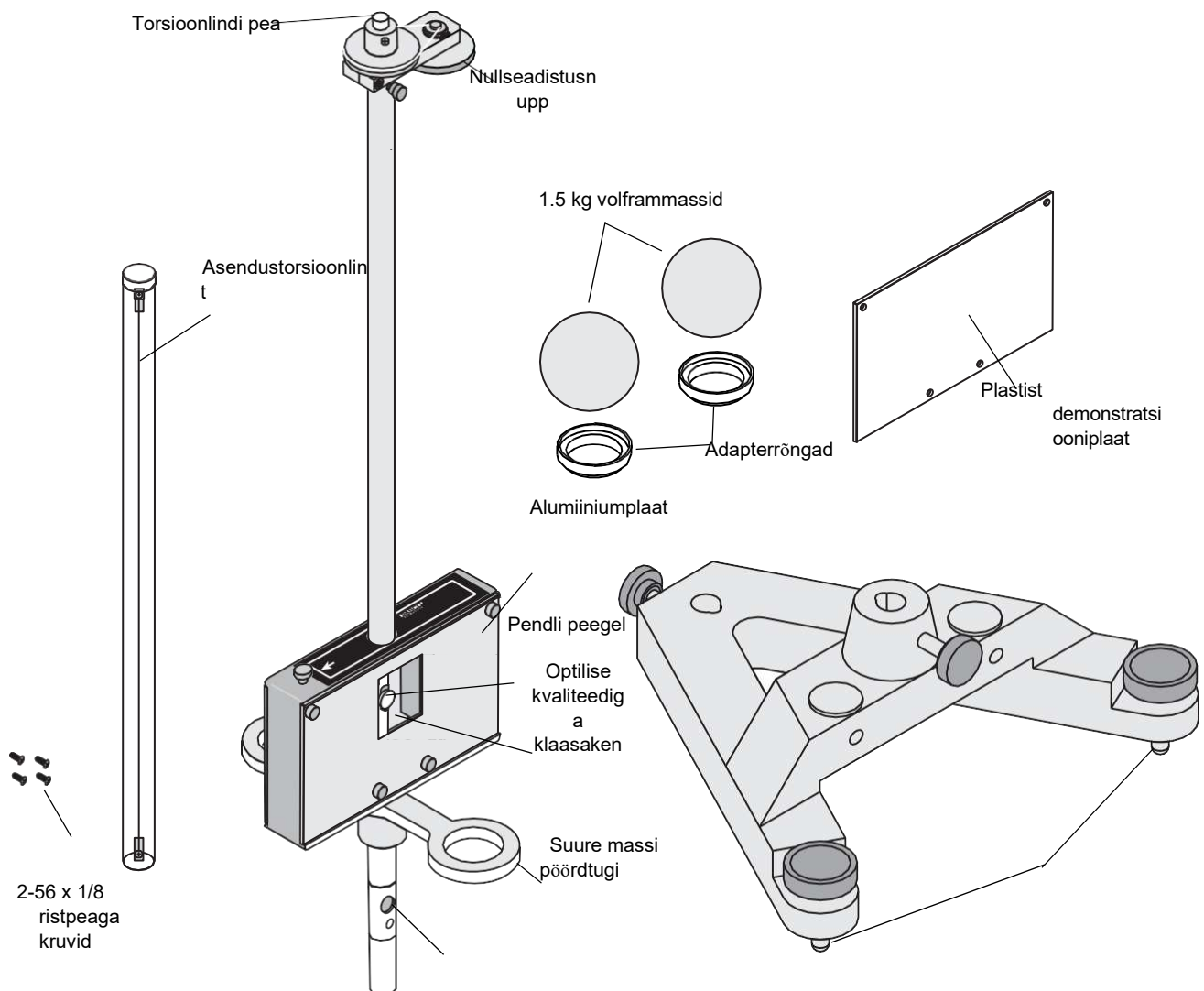
Adapterrõngad (2) Ristpeakruvikeeraja (joonisel puudub)

(*Mudel nr AP-8218)

Lisaks vajalik:

Laservalgusallikas (näiteks PASCO OS-9171 heelium-neoonlaser)

Meetrijoonlaud



Nivelleerimissihik

Nivelleerimisjalad

Joonis 2: komplekti kuuluvad seadmed

Seadme parameetrid

- Väikesed
volframkuulid Mass:
38.3 g $\pm$ 0.2 g (m2)
Raadius: 8.19 mm
Kaugus kuuli keskpunktist torsioonteljeni: d = 50.0 mm
- Suured
volframkuulid Mass:
1500 $\pm$ 10 g (m1)
Raadius: 27.6 mm
- Kaugus suure kuuli keskpunktist väikese kuuli massikeskmeni, kui suur kuul on vastu alumiiniumplaati ja väike kuul asub korpus keskasendis: b = 42.2 mm. (Märkus: tolerantsid võivad varieeruda sõltuvalt pendli horisontaalse joondamise täpsusest.)
- Kaugus peegli pinnast klaasakna välispinnani: 11.4 mm
- Torsioonlint
Materjal: berülliumvask Pikkus:
ligikaudu 260 mm Ristlõige:
0.017 x 0.150 mm

OLULISED MÄRKUSED

1. Gravitatsiooniline torsioonkaal on õrn instrument. Soovitame selle paigaldada suhteliselt turvalisse kohta, kus see on kaitstud õnnetuste ja inimeste eest, kes ei hinda piisavalt õrnu instrumente.
2. Torsioonkaalu esmakordsel paigaldamisel tehke seda kohas, kuhu saate selle enne mõõtmiste alustamist vähemalt üheks päevaks jätta, et torsioonlint saaks alguses tekkiva vähesese pikenemise läbi teha.
3. Hoidke pendliraskus alati lukustusmehhanismidega fikseerituna, välja arvatud seadistamise ja katsete tegemise ajal.

Seadme ülesseadmine

Esmane seadistamine

1. Asetage tugialus tasasele ja stabiilsele lauale sellises kohas, et gravitatsiooniline torsioonkaal jääks seinast või ekraanist vähemalt 5 meetri kaugusele.

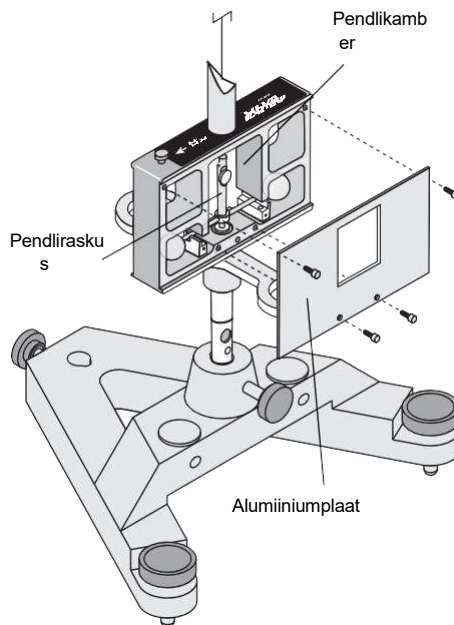
Märkus: parimate tulemuste saamiseks kasutage väga jäika lauda, näiteks optikalauda.

2. Võtke gravitatsiooniline torsioonkaal ettevaatlikult karbist välja ja kinnitage see alusele.
3. Eemaldage eesmine alumiiniumplaat, keerates käsikruvid lahti (joonis 3), ning eemaldage ettevaatlikult pendlikambri pakkimisvaht.

Märkus: hoidke pakkimisvaht alles ja paigaldage see iga kord uuesti, kui gravitatsioonilist torsioonkaalu transporditakse.

4. Kinnitage läbipaistev plastplaat käsikruvidega pendlikambri külge.

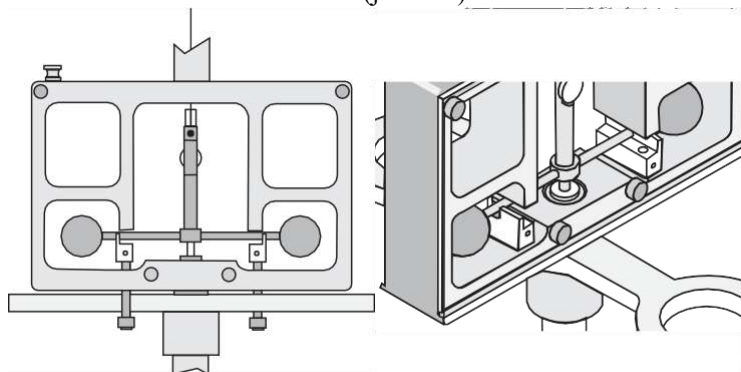
Märkus: ärge puudutage pendlil olevat peeglit.



Joonis 3: plaadi eemaldamine kambrikorpusest

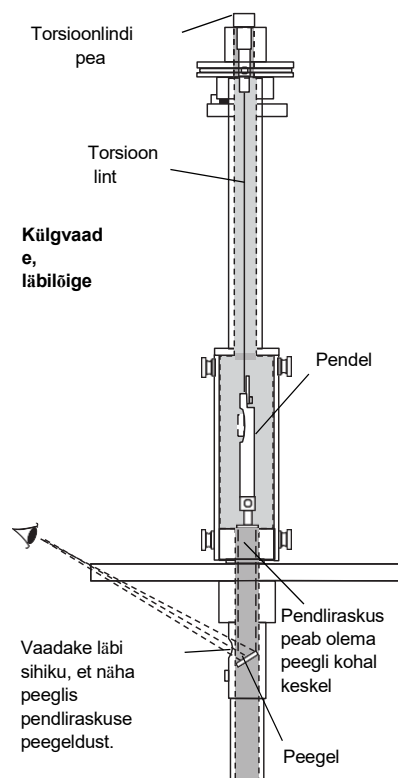
Gravitatsioonilise torsioonkaalu nivelleerimine

1. Vabastage pendel lukustusmehhanismist, keerates korpuse lukustuskruidid lahti ja langetades lukustusmehhanismid madalaimasse asendisse (joonis 4).



Joonis 4: lukustusmehhanismi langetamine pendliraskuse harude vabastamiseks

2. Reguleerige aluse jalgu, kuni pendel paikneb nivelleerimissihiku keskel (joonis 5). (Pendli alus paistab tumeda ringina, mida ümbritseb hele rõngas.)
3. Suunake gravitatsiooniline torsioonkaal nii, et pendliraskusel olev peegel oleks suunatud ekraani või seina poole, mis asub vähemalt 5 meetri kaugusel.



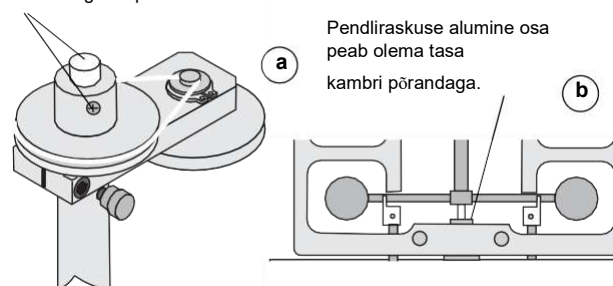
Joonis 5: nivelleerimissihiku kasutamine gravitatsioonilise torsioonkaalu nivelleerimiseks.

Pendli vertikaalne reguleerimine

Pendli alus peab olema pendlikambri põrandaga tasa. Kui see ei ole nii, reguleerige pendli kõrgust:

1. Haarake torsioonlindi peast ja lõdvendage ristpeaga kinnituskruvi (joonis 6a).
2. Reguleerige pendli kõrgust, liigutades torsioonlindi pead üles või alla, kuni pendli alus on pendlikambri põrandaga tasa (joonis 6b).
3. Pingutage kinnituskruvi (ristpeaga).

Haarake torsioonlindi peast ja lõdvendage ristpeakruvi.



Joonis 6: pendliraskuse kõrguse reguleerimine

Märkus: vertikaalne reguleerimine on vajalik ainult esmasel seadistamisel, torsioonlindi vahetamisel või juhul, kui keegi on kinnituskruvi eksikombel lahti-keeranud; tavaliselt ei tehta seda iga katse seadistamisel.

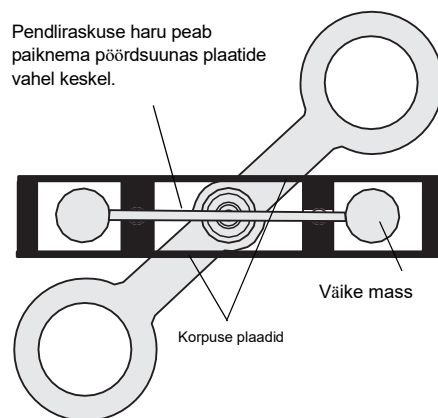
Pendlraskuse harude pöördjoondus (nullimine)

Pendlraskuse harud peavad olema korpuses pöördsuunas keskel, st mõlemast korpuse küljest võrdsel kaugusel (joonis 7). Nende reguleerimiseks:

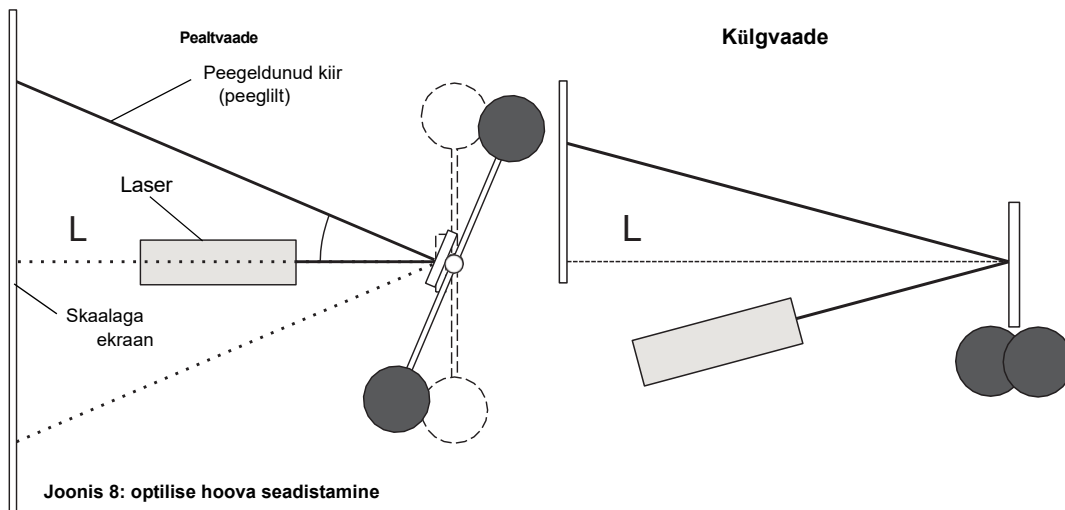
1. Kinnitage seinalle või muule projektsioonipinnale meetermõõdustikuga skaala vähemalt 5 meetri kaugusele pendli peeglist.
2. Asendage plastkate alumiiniumkattega.
3. Seadke laser nii, et selle kiir peegelduks peeglist projektsioonipinnale, kus mõõtmisi teete (ligikaudu 5 meetri kaugusel peeglist). Suunake laserit ülespoole peegli poole nii, et peegeldunud kiir langeks projektsioonipinnale (joonis 8). Klaasakna pinnalt peegeldub ka nõrgem kiir.

Pealtvaade, läbilõige

Pendlraskuse haru peab paiknema pöördsuunas plaatide vahel keskel.

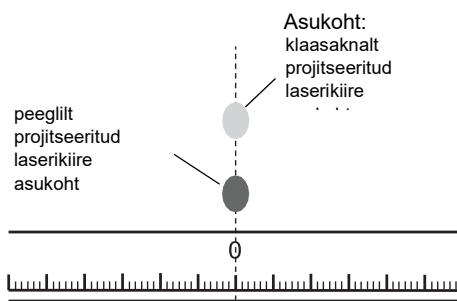


Joonis 7: pendlraskuse pöördjoondamine



Joonis 8: optilise hoova seadistamine

4. Joondage korpus pöördsuunas, pöörates seda, kuni klaasaknalt projitseeruv laserikiir on meetermõõdustikuga skaala keskel (joonis 9).
5. Joondage pendli haru pöördsuunas:
 - a. Tõstke lukustusmehhanisme lukustuskruve keerates, kuni mõlemad lukustusmehhanismid vaevu puudutavad pendli haru. Hoidke seda asendit mõni hetk, kuni pendli võnkumisenergia on summutatud.
 - b. Langetage lukustusmehhanisme ettevaatlikult veidi, et pendel saaks vabalt võnkuda. Vajaduse korral korrake summutamist, et pendlraskuse tugevad võnkumised rahuneksid.
 - c. Jälgige peeglist peegeldunud laserikiirt. Optimaalselt joondatud süsteemis paikneb peeglist peegeldunud kiire võnkumiste tasakaalupunkt vertikaalselt korpuse klaaspinnalt peegeldunud kiire all (joonis 9).



Joonis 9: pendli ideaalne pöördjoondus (nullimine)

d. Kui projektsioonipinnal olevad täpid (laserikiire peegeldused) ei ole vertikaalselt joondatud, lõdvendage nullseadistuse käsikruvi, keerake nullseadistusnuppu veidi, et täpsustada pendliraskuse harude pöördjoondust (joonis 10), ja oodake, kuni pendli liikumine peatub või peaaegu peatub.

e. Korra vajaduse korral samme 4a-4c, kuni täpid on projektsioonipinnal vertikaalselt joondatud.

6. Kui pöördjoondus on lõpetatud, pingutage ettevaatlikult nullseadistuse käsikruvi, vältides süsteemi pöramist.

Nõuanded kiiremaks pöördjoondamiseks:

- Summutage lukustusmehhanismidega kõik tugevad pendliraskuse võnkumised, nagu kirjeldatud;
- Reguleerige pendliraskuse pöördjoondust nullseadistusnupu väikeste ja sujuvate liigutustega;
- Liigutage kannatlikult ja täpselt.

Katse ettevalmistamine

1. Mõõtke täpselt kaugus peeglist projektsioonipinnal oleva skaala nullpunktini (L) (joonis 8). (Kaugus peegli pinnast klaasakna välispinnani on 11.4 mm.)

Märkus: vältige seadme pöramist selle seadistusprotseduuri ajal.

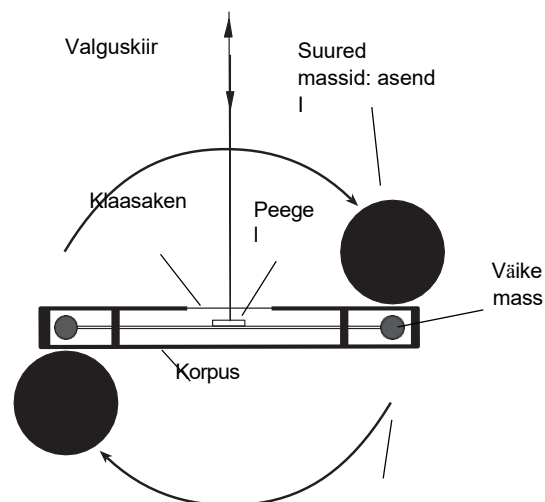
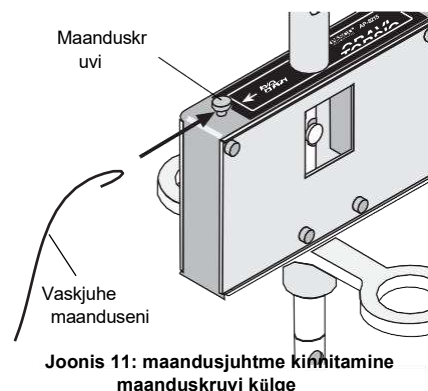
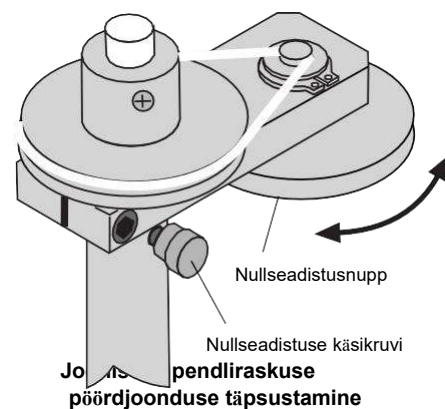
2. Kinnitage vaskjuhe maanduskruvi külge (joonis 11) ja ühendage see maandusega.

3. Asetage adapterrõngad tugihoovale ja suured volframmassid adapterrõngastele ning pöörake hoob asendisse I (joonis 12), vältides massidega korpuse puudutamist.

4. Laske pendlil jõuda puhke-tasakaaluasendisse.

Nüüd saate teha mõõtmise ühega kolmest meetodist: lõpphälbe meetod, tasakaaluasendite meetod või kiirendusmeetod.

Märkus: pendli jõudmine puhke-tasakaaluasendisse võib võtta mitu tundi. Aja lühendamiseks summutage pendli võnkumist, tõstes lukustusmehhanisme sujuvalt üles (lukustuskruve keerates), kuni need puudutavad ristvarrast; hoidke neid selles asendis mitu sekundit, kuni võnkumised on summutatud, ja seejärel langetage lukustusmehhanisme ettevaatlikult veidi.



Suured
massid: asend
II

Gravitatsioonikonstandi mõõtmine

Katse ülevaade

Gravitatsiooniline tõmbejõud 38.3-grammise massi ja 1.5 kg massi vahel, kui nende keskpunktide vahekaugus on ligikaudu 42.2 mm (olukord, mis sarnaneb gravitatsioonilise torsioonkaalu omaga), on ligikaudu 7×10^{-10} njuutonit. Kui see ei tundu mõõtmiseks väikese suurusena, arvestage, et väikese massi kaal on sellest enam kui kakssada miljonit korda suurem.

Maa tõmbe tohutu tugevus väikeste masside suhtes võrreldes nende tõmbega suurte masside suhtes muutis gravitatsioonikonstandi mõõtmise algselt väga keeruliseks. Torsioonkaal (mille leiutas Charles Coulomb) võimaldab selles katses Maa muidu ülekaaluka tõmbe mõju kõrvaldada. Samuti annab see piisavalt väikese jõu, et tasakaalustada suurte ja väikeste masside vahel eksisteerivat imeväikest gravitatsioonijõudu. Selle jõu tekitab väga õhukese berülliumvasest lindi väändumine.

Suured massid paigutatakse esmalt asendisse I, nagu näidatud joonisel 12, ja lastakse kaalul jõuda tasakaalu. Seejärel pööratakse suuri masse hoidev pöördtugi nii, et suured massid liiguvad asendisse II, viies süsteemi tasakaalust välja. Seejärel jälgitakse süsteemi võnkuvat pöördliikumist skaala valguslaigu liikumise kaudu, kui peegel valguskiirt kõrvale suunab.

Väikeste masside liikumise põhjal saab gravitatsioonikonstandi G määrata ühega kolmest meetodist. Meetodi I ehk lõpphälbe meetodi korral lastakse liikumisel jõuda puhke-tasakaaluasendisse - see protsess võtab mitu tundi - ning tulemus on ligikaudu 5% täpsusega. Meetodi II ehk tasakaaluasendite meetodi korral kestab katse 90

minutit või kauem ja annab graafilise analüüsi kasutamisel ligikaudu 5% täpsuse. Meetodi III ehk kiirendusmeetodi korral jälgitakse liikumist ainult 5 minutit ning tulemus on ligikaudu 15% täpsusega.

Märkus: meetodiga I on võimalik saavutada 5% täpsus, kui katse on üles seatud jäigale lauale eraldatud kohas, kus vibratsioon ega õhu liikumine seda ei häiri.

Märkus: meetodiga II on võimalik saavutada 5% täpsus, kui puhke-tasakaaluasendid määratakse graafilise analüüsi programmiga.

MEETOD I: mõõtmine lõpphälbe järgi

Seadistusaeg: ~ 45 minutit; katseaeg: mitu tundi Täpsus: ~ 5%

Teooria

Kui suured massid on asendis I (joonis 13), määratakse iga väikese massi (m_2) ja selle naabruses oleva suure massi (m_1) vaheline gravitatsiooniline tõmme F universaalse gravitatsiooniseaduse järgi:

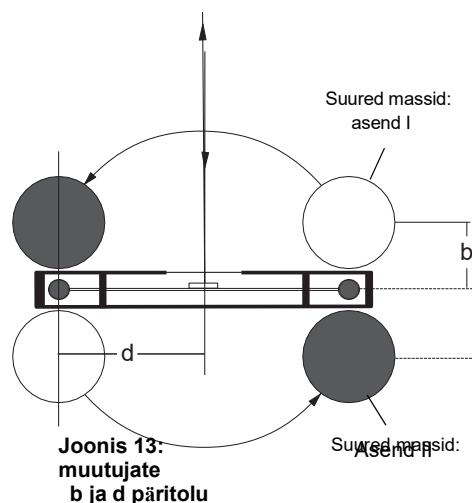
$$F = G \frac{m_1 m_2}{b^2} \quad (1.1)$$

kus b on kahe massi keskpunktide vaheline kaugus.

Kahe väikese massi ja nende naabruses olevate suurte masside vaheline gravitatsiooniline tõmme tekitab süsteemile summaarse pöördemomendi ($\square$ grav):

$$\tau_{grav} = 2Fd \quad (1.2)$$

kus d on pendliraskuse ristdetaili jõuõla pikkus.



Kuna süsteem on tasakaalus, peab väärdunud torsioon-
lint peab tekitama suuruselt võrdse ja vastassuunalise pöördemomendi.
See pöördemoment (τ_{band}) võrdub lindi torsioonikonstandi
(κ) ja lindi väärdenurga (θ) korrutisega,

või:

s2

$$\tau_{\text{band}} = \kappa \theta \quad (1.3)$$

Võrrandite 1.1, 1.2 ja 1.3 ühendamisest ning arvestades,
et $\tau_{\text{grav}} = -\tau_{\text{band}}$, saame:

s1

$$\kappa \theta = \frac{2dGm_1m_2}{b^2}$$

Selle võrrandi teisendamisel saame G avaldise:

$$G = \frac{\kappa \theta b^2}{2dm_1m_2} \quad (1.4)$$

Võrrandi 1.4 ainsate tundmatute κ ja θ määramiseks tuleb jälgida väikeste masside süsteemi võnkumisi pärast tasakaalu häirimist. Tasakaalu (S_1) häirimiseks pööratakse pöördtugi nii, et suured massid liiguvad asendisse II. Seejärel süsteem võngub, kuni aeglustub ja peatub uues tasakaaluasendis (S_2) (joonis 14).

Uues tasakaaluasendis S_2 on torsiooniraat endiselt nurga
 θ võrra väärdunud, kuid vastassuunas võrreldes
asendiga I, seega on nurga kogumuutus 2θ . Arvestades,
et peeglit peegeldumisel nurk samuti kahekordistub
(joonis 15):

$$\Delta S = S_2 - S_1,$$

$$4\theta = 2\theta \tan \frac{\Delta S}{2L}$$

- $\frac{\Delta S}{L}$ S- või

$$\theta = \frac{\Delta S}{4L} \quad (1.5)$$

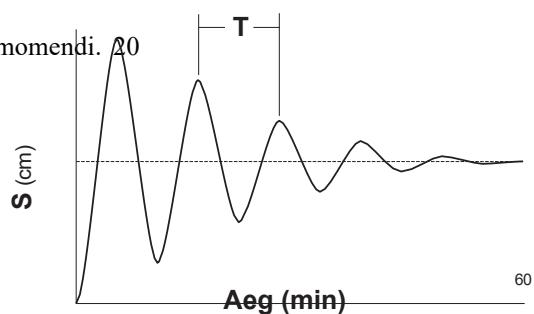
Torsioonikonstandi saab määrata võnkeperioodi (T)
jälgides ja seejärel kasutades võrrandit:

$$T^2 = \frac{4\pi^2 I}{\kappa} \quad (1.6)$$

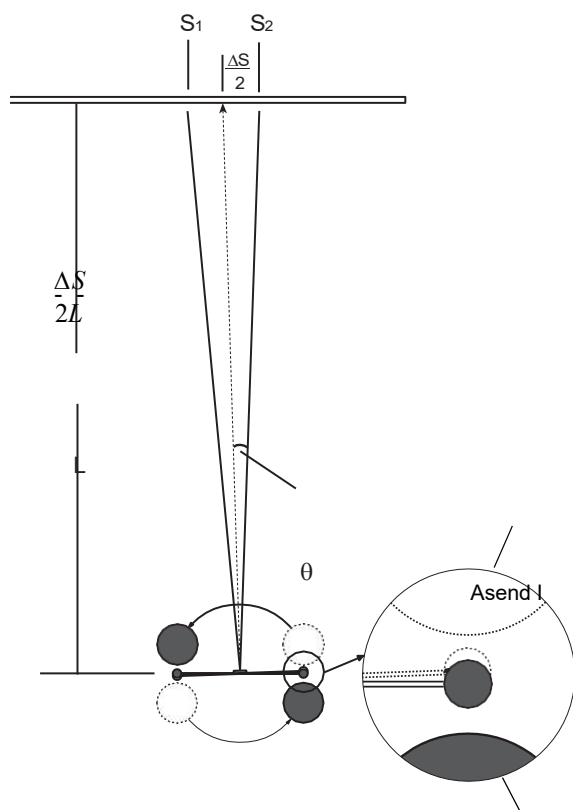
kus I on väikeste masside süsteemi inertsimoment.

Peegli ja väikeste masside tugisüsteemi inertsimoment
on masside endi inertsimomendiga võrreldes tühiselt
väike, seega saab koguinertsimomendi avaldada kujul:

$$I = 2m \left(d^2 + \frac{2}{5} r^2 \right) \quad (1.7)$$



Joonis 14: väikeste masside võnkumiste graafik



Joonis 15: katse skeem optilise hoovaga.s

Asend II

Seega:

$$\kappa = 8\pi^2 m_2 \frac{d^2 + \frac{2}{5}r^2}{T^2} \quad (1.8)$$

Asendades võrrandid 1.5 ja 1.8 võrrandisse 1.4, saame:

$$G = \pi^2 \Delta S b^2 \frac{(d^2 + \frac{2}{5}r^2)}{(T^2 m_1 L d)} \quad (1.9)$$

Kõik võrrandi 1.9 paremal poolel olevad muutujad on teada või mõõdetavad:

$$r = 9.55 \text{ mm}$$

$$d = 50 \text{ mm}$$

$$b = 42.2 \text{ mm}$$

$$m_1 = 1.5 \text{ kg}$$

$$L = (\text{Mõõdke nagu seadistuse sammus } I.)$$

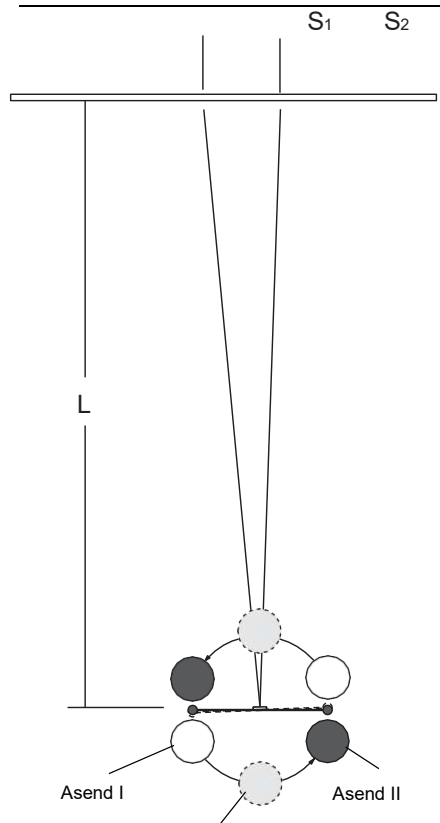
Mõõtes valguslaigu koguhälbe (ΔS) ja võnkeperioodi (T), saab seega määrata G väärtuse.

Töö käik

1. Kui nivelleerimise, joondamise ja seadistamise sammud on tehtud (suured massid asendis I), laske pendlil võnkumine lõpetada.
2. Lülitage laser sisse ja jälgige mitu minutit kaalu asendi I lõpp-punkti, et veenduda süsteemi tasakaalus. Registreerige asendi I lõpp-punkt (S1) võimalikult täpselt ning märkige mõõtevea piirina ka võimalik muutus ajas.
3. Pöörake pöördtugi ettevaatlikult nii, et suured massid liiguvad asendisse II. Kuulid peavad korpust vaevu puudutama, kuid vältige korpuse löömist ja süsteemi häirimist.

Märkus: pendli tasakaalu jõudmiseks kuluvat aega saab vähendada, kui liigutada suuri masse kahes etapis: esmalt liigutage suured massid ja tugi vaheasendisse, mis asub kogu kaare keskpunktis (joonis 16), ning oodake, kuni valguskiir on perioodi jooksul liikunud võimalikult kaugele; seejärel liigutage kuul üle kaare teise poole, kuni suurte masside tugi vaevu korpust puudutab. Liigutage aeglaselt ja sujuvalt ning vältige massitoe liigutamisel korpuse löömist.

4. Kohe pärast pöördtoe pööramist jälgige valguslaiku ja registreerige selle asukoht (S1).



Joonis 16: suurte masside kahe-etapiline liigutamine
võnkumise peatumiseks vajaliku aja vähendamiseks.

etapiline

5. Määrake stopperiga ühe võnkeperioodi (T) kestus. Suurema täpsuse saamiseks mõõtke mitu perioodi ja leidke seejärel ühe perioodi keskmine kestus.

Märkus: perioodi väärtuse (T) täpsus on väga oluline, sest G arvutamisel kasutatakse T ruutu.

6. Oodake, kuni võnkumised peatuvad, ja registreerige puhke-tasakaalupunkt (S2).

Analüüs

1. Kasutage oma tulemusi ja võrrandit 1.9 G väärtuse määramiseks.

Sammus 2 arvatud väärtust mõjutab järgmine süstemaatiline viga. Väikest kuuli tõmbab mitte ainult selle naabruses olev suur kuul, vaid ka kaugem suur kuul, kuigi palju väiksema jõuga. Selle teise jõu geomeetria on näidatud joonisel 17 (vektornooled ei ole tegelike jõududega võrdelised).

Jooniselt 17,

$$f = F_0 \sin \Phi$$

Jõud F_0 on antud gravitatsiooniseadusega, mis antud juhul annab:

$$F_0 = \frac{Gm_2m_1}{(b^2 + 4d^2)}$$

ja sellel on komponent f , mis on jõu F suunale vastupidine:

$$f = \frac{Gm_2m_1b}{(b^2 + 4d^2)^{3/2}} = \beta F$$

See võrrand määratleb mõõtmise parameetri β , mis võrdub f suuruse ja F suuruse suhtega. Kasutades võrrandit $F = Gm_1m_2/b^2$, saab leida, et:

$$\beta = \frac{b^3}{(b^2 + 4d^2)^{3/2}}$$

$$\text{Jooniselt 17, } F_{\text{net}} = F - f = F - \beta F = F(1 - \beta)$$

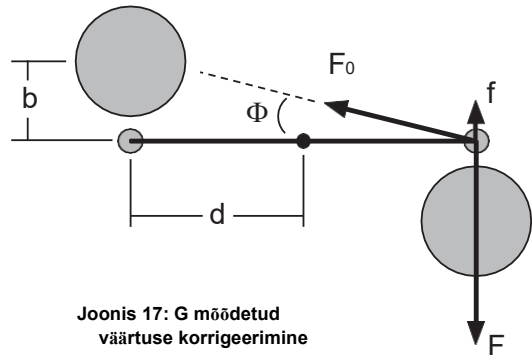
kus F_{net} on mõlema suure massi poolt igale väikesele kuulile mõjuva jõu väärtus ja F on ainult lähima suure massi tõmbef jõud.

$$\text{Samamoodi, } G = G_0(1 - \beta)$$

kus G on katseliselt määratud gravitatsioonikonstandi väärtus ja G_0 on süstemaatilise vea arvestamiseks korrigeeritud väärtus.

$$\text{Lõpuks, } G_0 = G/(1 - \beta)$$

Kasutage seda võrrandit koos võrrandiga 1.9 mõõdetud väärtuse korrigeerimiseks.



MEETOD II: mõõtmine tasakaaluasendite järgi

Vaatlusaeg: ~90+ minutit Täpsus:

~5%

Teooria

Kui suured massid asetatakse pöördtoele ja viiakse asendisse I või II, võngub torsioonkaal mõnda aega enne uues tasakaaluasendis peatumist. Seda võnkumist saab kirjeldada nihkega sumbuva siinuslainena, kus nihke väärtus tähistab kaalu tasakaalupunkti. Leides tasakaalupunkti nii asendi I kui ka asendi II jaoks ja võttes nende vahe, saadakse ΔS väärtus. Ülejäänud teooria on identne meetodi I kirjelduses esitatuga.

Märkus: selle meetodiga 5% täpsuse saavutamiseks on oluline kasutada asukoha- ja ajaandmete graafilist analüüsi, et ekstrapoleerida puhke-tasakaaluasendid, S1 ja S2.

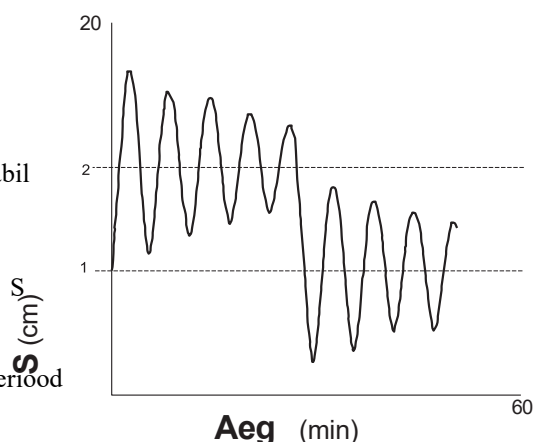
Töö käik

1. Seadistage katse, järgides meetodi I samme 1-3.
2. Kohe pärast pöördtoe pööramist asendisse II jälgige valguslaiku. Registreerige valguslaigu asukoht (S) ja aeg (t) iga 15 sekundi järel. Jätkake asukoha ja aja registreerimist ligikaudu 45 minutit.
3. Pöörake pöördtugi asendisse I. Korrake sammus 2 kirjeldatud protseduuri.

Märkus: kuigi sammu 3 ei pea tegema kohe pärast sammu 2, on soovitatav sellega võimalikult kiiresti jätkata, et vähendada ohtu, et süsteemi kahe mõõtmise vahel häiritakse. Sammu 3 tegemist rohkem kui ühe päeva pärast ei soovitata.

Analüüs

1. Koostage valguslaigu asukoha graafik aja funktsioonina nii asendi I kui ka asendi II jaoks. Saate joonisega 18 sarnase graafiku.
2. Leidke iga konfiguratsiooni tasakaalupunkt, analüüsides vastavaid graafikuid graafilise analüüsi abil S ja ekstrapoleerides puhke-tasakaalupunktid S1 ja S2 (tasakaalupunkt on keskjoon, mille ümber võnkumine toimub). Leidke vahe ja registreerige tulemus väärtusena ΔS .
3. Määrake väikeste masside süsteemi võnkeperiood kahe graafiku analüüsimise teel. Iga graafik annab veidi erineva tulemuse. Leidke nende tulemuste keskmine ja registreerige vastusena T.



Joonis 18: tüüpiline pendli võnkumismuster, mis näitab tasakaaluasendeid.

4. Kasutage oma tulemusi ja võrrandit 1.9 G väärtuse määramiseks.
5. Samm 4 arvutatud väärtust mõjutab sama süstemaatiline viga, mida kirjeldati meetodis I. G0 väärtuse leidmiseks tehke selles jaotises kirjeldatud korrigeerimisprotseduur (Analüüs, samm 3).

MEETOD III: mõõtmine kiirenduse järgi

Vaatlusaeg: ~ 5 minutit Täpsus: ~

15%

Teooria

Kui suured massid on asendis I, määratakse iga väikese massi (m_2) ja selle naabruses oleva suure massi (m_1) vaheline gravitatsiooniline tõmme F universaalse gravitatsiooniseaduse järgi:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{b^2} \quad (3.1)$$

Seda jõudu tasakaalustab väärdunud torsioonlindi pöördemoment, mistõttu süsteem on tasakaalus. Väärdenurk ☐ mõõdetakse, märkides üles valguslaigu asukohta, kus peegeldunud kiir skaalat tabab. See asukoht registreeritakse hoolikalt ning seejärel viiakse suured massid asendisse II. Suurte masside asendi muutus häirib süsteemi tasakaalu ja süsteem hakkab võnkuma, kuni hõõrdumine selle uues tasakaaluasendis peatab.

Kuna väikeste masside võnkeperiood on pikk (ligikaudu 10 minutit), ei liigu need märkimisväärselt kohe pärast suurte masside viimist asendist I asendisse II. Seadistuse sümmeetria tõttu avaldavad suured massid väikestele massidele sama gravitatsioonijõudu nagu asendis I, kuid nüüd vastassuunas. Kuna torsioonlindi tasakaalustav jõud ei ole muutunud, võrdub väikeste masside kiirendamiseks mõjuv kogujõud (F_{total}) nüüd suurte masside algse gravitatsioonijõu kahekordse väärtusega ehk:

$$F_{total} = 2F = 2G \frac{m_1 m_2}{b^2} \quad (3.2)$$

Seetõttu kiireneb iga väike mass oma naabruses oleva suure massi suunas algkiirendusega (a_0), mida väljendab võrrand:

$$m_2 a_0 = 2G \frac{m_1 m_2}{b^2} \quad (3.3)$$

Kui väikesed massid hakkavad liikuma, lõtvub torsioonlint loomulikult üha enam, mistõttu jõud väheneb ja nende kiirendus kahaneb. Kui süsteemi jälgitakse suhteliselt pika aja jooksul nagu meetodis I, on näha selle võnkumist. Kui aga väikeste masside kiirendust saab mõõta enne, kui torsioonlindi pöördemoment märgatavalt muutub, saab G määramiseks kasutada võrrandit 3.3. Liikumise sumbuva harmoonilise iseloomu tõttu püsib algkiirendus esimese ühe kümnendiku võnke jooksul ligikaudu 5% piires konstantsena. Seetõttu saab piisavalt häid tulemusi, kui kiirendus mõõdetakse esimese minuti jooksul pärast suurte masside ümberpaigutamist ja kasutatakse järgmist seost:

$$G = b^2 \frac{a_0}{2m_1} \quad (3.4)$$

Kiirendus mõõdetakse ekraanil oleva valguslaigu nihke jälgimisega. Kui, nagu näidatud joonisel 19:

$\Delta\sigma = \sigma^{\text{TM}}_{\text{ικεστε}} \mu\alpha\sigma\sigma\text{ιδε λινεααρνε νιηε,}$

$d = \text{kaugus väikeste masside massikeskmest torsioonkaalu pöörlemisteljeni,}$

$\Delta\Sigma = \mu\alpha\lambda\gamma\upsilon\sigma\lambda\alpha\iota\gamma\upsilon \nu\text{ιηε εκραανιλ φα}$

$L = \text{skaala kaugus kaalu peeglist, siis, arvestades nurga}$

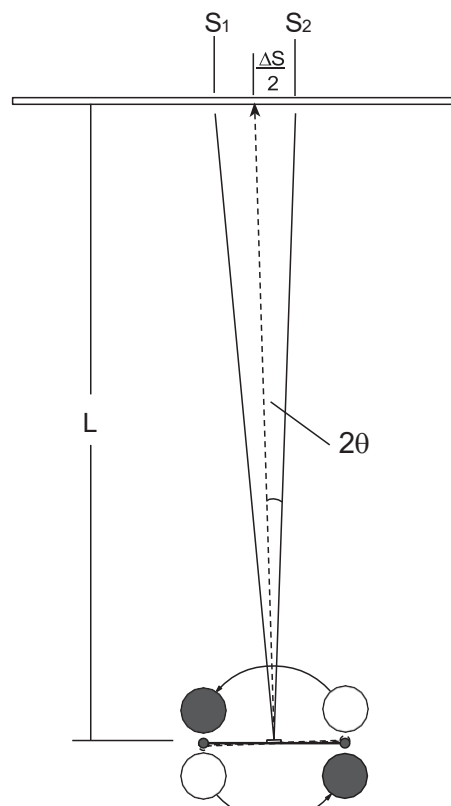
kahekordistumist peegeldumisel,

$$\Delta S = \Delta s \left(\frac{2L}{d} \right) \quad (3.5)$$

Kasutades konstantse kiirendusega keha liikumisvõrrandit ($x = 1/2 at^2$), saab kiirenduse arvutada:

$$a_0 = \frac{2 \Delta s}{t^2} = \frac{\Delta S d}{t^2 L} \quad (3.6)$$

Valguslaigu liikumist ajas jälgides saab kiirenduse määrata võrrandi 3.6 abil ning seejärel gravitatsioonikonstandi võrrandi 3.4 abil.



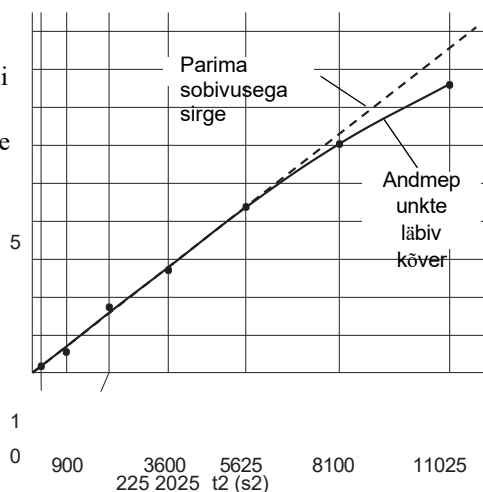
Joonis 19: meetodi III arvutuste lähteandmed

Töö käik

1. Alustage katset, tehes meetodi I töö käigu sammud 1-3.
2. Kohe pärast pöördtoe pööramist jälgige valguslaiku. Registreerige valguslaigu asukoht (S) ja aeg (t) ligikaudu kahe minuti jooksul iga 15 sekundi järel.

Analüüs

1. Koostage valguslaigu nihke graafik ($\square S = S - 9 S1$) aja ruudu (t^2) funktsioonina, kus t^2 on horisontaal- teljel (joonis 20). Tõmmake parima sobivusega sirge läbi 8 esimese vaatlusminuti jooksul täheldatud andmepunktide 7.
2. Määrake parima sobivusega sirge tõus.
3. Kasutage võrrandeid 3.4 ja 3.6 gravitatsiooni- konstandi määramiseks.
4. Sammus 3 arvutatud väärtust mõjutab süstemaatiline viga. Väikest kuuli tõmbab mitte ainult selle naabruses olev suur kuul, vaid ka kaugem suur kuul, kuigi palju väiksema jõuga. Selle jõu korrigeerimiseks kasutage meetodis I kirjeldatud protseduuri (Analüüs, samm 3).



Joonis 20: näidisandmed ja parima sobivusega sirge

Hooldus

Torsioonlinde koostu vahetamine

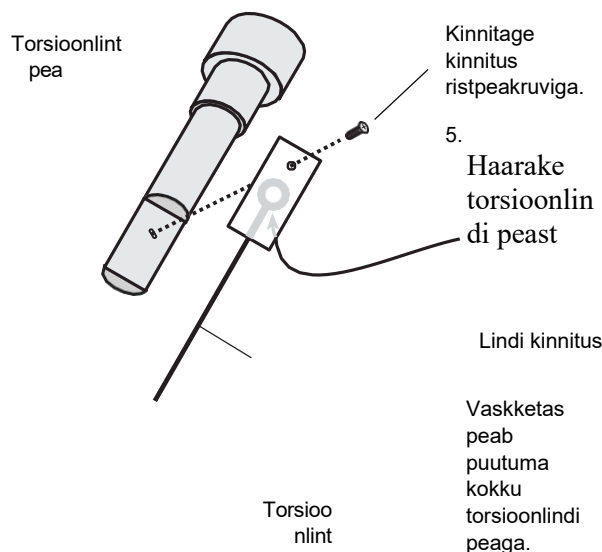
Kui torsioonlint puruneb, vahetage see järgmiselt:

1. Eemaldage plaadid ja tõstke lukustusmehhanism lukustuskruvide abil üles, kuni pendli harud on kindlalt fikseeritud (joonis 21a).
2. Haarake pendliraskusest alumise lindikinnituse lähedalt, et seda stabiliseerida.
3. Lõdvendage torsioonlinde koostu alumise kinnituse ristpeakruvi (joonis 21a) ja eemaldage purunenud lindikoostu alumine pool.
4. Lõdvendage kaalu koostu ülaosas olevat ristpeakruvi (joonis 21b).

2.

Haarake pendliraskusest siit, et seda stabiliseerida.

5. Haarake torsioonlinde peast ja eemaldage purunenud torsioonlinde koostu ülemine osa.
6. Kinnitage uue torsioonlinde ülemine kinnitus ristpeakruviga torsioonlinde pea külge, veendudes, et kinnituse vaskketas puutub kokku torsioonlinde peaga (joonis 22). Joondage kinnitus torsioonlinde pea esiküljega.

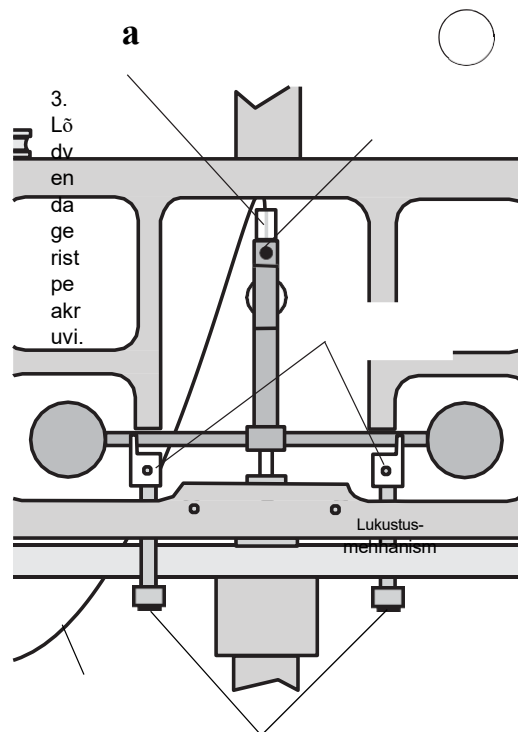


Joonis 22: torsioonlinde koostu ülemise kinnituse kinnitamine torsioonlinde pea külge.

7. Viige lint läbi võlli.
8. Joondage alumine kinnitus nullseadistusnupu abil pendliraskuse esiküljega.



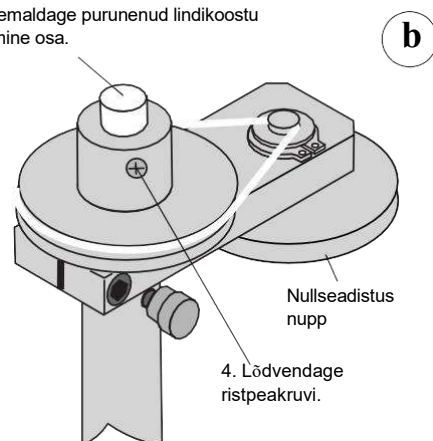
Märkus: veenduge, et lint ei oleks keerdus.



Purunenud torsioonlint

1. Keerake lukustuskruve, kuni lukustusmehhanism fikseerib pendli harud.

ja eemaldage purunenud lindikoostu ülemine osa.



Joonis 21: pendliraskuse fikseerimine enne purunenud torsioonlinde eemaldamist ja torsioonlinde pea vabastamine.

9. Pingutage kaalu ülaosas olev ristpeakruvi, et torsioonlindi pea kinnitada.
10. Kinnitage lindi alumine kinnitus ristpeakruviga pendliraskuse külge.
11. Paigaldage tagaplaat tagasi.
12. Nivelleerige ja joondage pendel vastavalt selle juhendi jaotise „Seadme ülesseadmine” juhistele.

Transportimine ja hoiustamine

1. Gravitatsioonilise torsioonkaalu transportimiseks või hoiustamiseks ettevalmistamine:
 - a. Eemaldage esiplaat.
 - b. Tõstke lukustusmehhanism üles, et pendliraskus kindlalt fikseerida.
 - c. Kontrollige, et torsioonlint ripuks sirgelt toru keskosas. Kui see nii ei ole, langetage lukustusmehhanismid, veenduge, et torsioonraat oleks keskel, ja tõstke lukustusmehhanismid uuesti üles. Korrake vajaduse korral, kuni lint paikneb toru keskel.
 - d. Paigaldage pakkimisvaht pendliraskuse fikseerimiseks uuesti kambrisse. e. Paigaldage plaat tagasi.
2. Gravitatsioonilist torsioonkaalu võib hoiustada horisontaalselt selle transpordikonteineris.
3. Hoiustage seadet jahedas ja kuivas kohas ning kaitske seda põrutuste ja jämeda käsitsemise eest.

Ohutusabinõu

Suured massid on valmistatud volframist, mis ei ole mürgine. Ärge laske 1.5 kg massidel maha kukkuda.

Tehniline tugi

Tagasiside

Kui teil on toote või juhendi kohta kommentaare, andke meile neist teada. Kui teil on ettepanekuid alternatiivsete katsete kohta või leiate juhendist probleemi, palun teatage meile. PASCO hindab igasugust klientide tagasisidet.

Teie tagasiside aitab meil oma toodet hinnata ja täiustada.

Tehnilise toega ühenduse võtmine

Enne PASCO tehnilisele toele helistamist hoidke katseseade ja käesolev kasutusjuhend käepärast. Pange tähele järgmist:

- Toote nimetus ja mudelinumber (nt gravitatsiooniline torsioonkaal, AP-8215A)
- Toote ligikaudne vanus;
- Probleemi üksikasjalik kirjeldus / probleemi kordamiseks vajalik sündmuste jada.

Esita küsimus

Küsi PASCO ametlikult partnerilt Eestis DIFI.NET OÜ

ask@ste.education

<https://oppelabor.ee>

