



YLIOPPILASTUTKINTOLAUTAKUNTA  
STUDENTEXAMENSNÄMNDEN

## Fysiikka 26.3.2021

Alustavat hyvän vastauksen piirteet 26.3.2021

Alustavat hyvän vastauksen piirteet on suuntaa-antava kuvaus kokeen tehtäviin odotetuista vastauksista ja tarkoitettu ensisijaisesti tueksi alustavaa arvostelua varten. Se ei välttämättä sisällä ja kuvaa tehtävien kaikkia hyväksytyjä vastauksia. Se ei myöskään ole osa Ylioppilastutkintolautakunnan yleisissä määräyksissä ja ohjeissa tarkoitettua tietoa siitä, miten arvosteluperusteita on sovellettu yksittäisen kokelaan koesuoritukseen. Alustavat hyvän vastauksen piirteet eivät sido Ylioppilastutkintolautakuntaa lopullisen arvostelun perusteiden laadinnassa.

Fysiikan ylioppilaskokeessa arvioinnin kohteita ovat lukion opetussuunnitelman perusteiden mukaisen fysiikan tiedon osaaminen ja soveltamisen taito. Kokeessa arvioidaan myös kokelaan kokeellisen tiedonhankinnan ja -käsittelyn taitoja. Näitä ovat muun muassa kokeensuunnittelu, yleisimpien mittavälineiden käytön hallinta, tulosten esittäminen ja tulkitseminen sekä johtopäätösten tekeminen. Kokeessa arvioidaan niin ikään kokelaan kykyä ymmärtää ja eritellä fysiikan luonteen mukaisia aineistoja. Arvioinnissa kiinnitetään huomiota siihen, että vastauksissa on käytetty fysiikan käsitteitä ja käsiterakenteita asianmukaisesti ja että vastaukset on esitetty selkeästi ja asiasisällön puolesta johdonmukaisesti ja hyvin jäsennellysti.

Hyvä vastaus sisältää vastauksen perustelut, ellei tehtävänannossa ole toisin mainittu. Siitä käy ilmi, että kokelas on tunnistanut oikein fysikaalisen ilmiön ja tarkastelee tilannetta fysikaalisesti mielekkäällä tavalla. Kokelas osaa kuvata sovellettavan

fysikaalisen mallin ja perustella, miksi mallia voidaan käyttää kyseisessä tilanteessa. Kun vastaukseen liittyy tilannekuvioita, voimakuvioita, kytkentäkaavioita tai graafista esityksiä, nämä on tehty selkeästi ja fysiikassa noudatettujen yleisten periaatteiden mukaisesti. Esimerkiksi voimakuviossa voimavektorit on erotettu vektorien komponenteista selkeästi.

Matemaattista käsittelyä vaativan tehtävän hyvässä vastauksessa on suureyhtälöt ja kaavat perusteltu tavalla, joka osoittaa kokelaan hahmottaneen tilanteen fysiikan kannalta oikein. Vastauksessa on esitetty tarvittavat laskut ja muut riittävät perustelut sekä lopputulos. Suureiden arvojen sijoituksia yhtälöön ei tarvitse kirjoittaa näkyviin, jos vastauksessa on selkeästi esitetty, mitä symbolia, lukuarvoa ja yksikköä kullekin suurelle käytetään. Symbolisten laskentaohjelmistojen avulla tehdyt ratkaisut hyväksytään, kunhan ratkaisusta käy ilmi, mihin tilanteeseen ja yhtälöihin ratkaisu symboleineen perustuu ja lopputuloksen yhteydessä on esitetty tehtävänannossa kysytyyn suureen suhteen ratkaistu suureyhtälö.

## Osa 1

1. Monivalintatehtäviä fysiikan eri osa-alueilta (20 p.)

Oikea vastaus 2 p., väärä vastaus 0 p., ei vastausta 0 p.

1.1 Veturiin kohdistuva kokonaisvoima on nolla.

1.2 Liikemäärä säilyy törmäyksessä.

1.3 Vaunu ja veturi kohdistavat toisiinsa yhtä suuret voimat.

1.4 Veturi liikkuu vakiokiihtyvyydellä.

1.5 Veturin liike-energian muutos on suoraan verrannollinen veturin kulkemaan matkaan.

1.6 Hiukkanen alkaa liikkua tasaisella kiihtyvyydellä.

1.7 Hiukkanen pysyy paikallaan.

1.8 Palloon A kohdistuu pienempi paino kuin palloon B.

1.9 Lämpökapasiteetti.

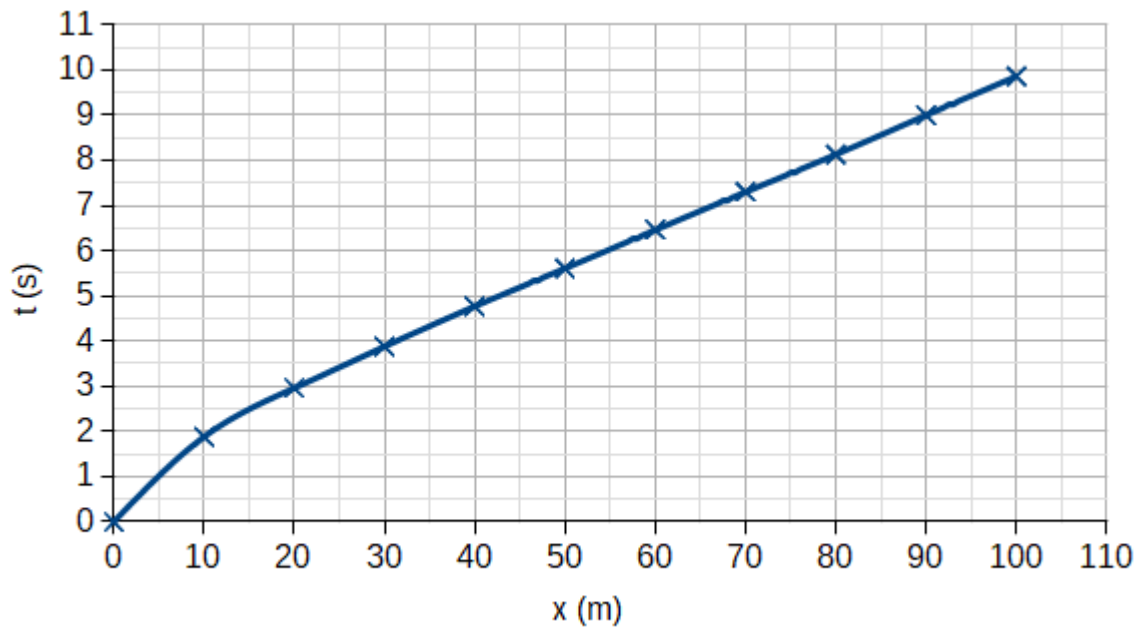
1.10 Kasvihuonekaasut absorboivat Maan pinnan lämpösäteilyä paremmin kuin Auringon säteilyä.

## Osa 2

2. Pikajuoksu (15 p.)

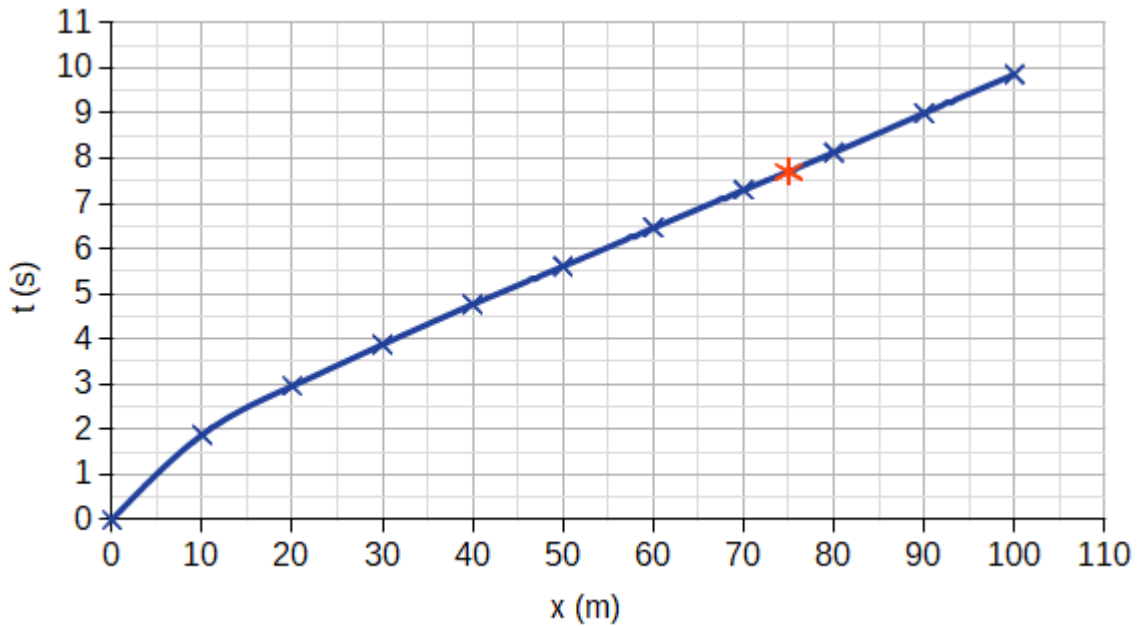
2.1 Kuvaaja.

(5 p.)



2.2 Kuvaajasta lukemalla saadaan, että 75 metrin kohdalla Lewisin aika oli 7,7 sekuntia.

(4 p.)



2.3. Matkavälillä 20–100 m väliajat asettuvat suoralle, joten Lewisin juoksu oli tällä välillä tasaista etenemisliikettä. Tälle välille sovitetun suoran yhtälö on

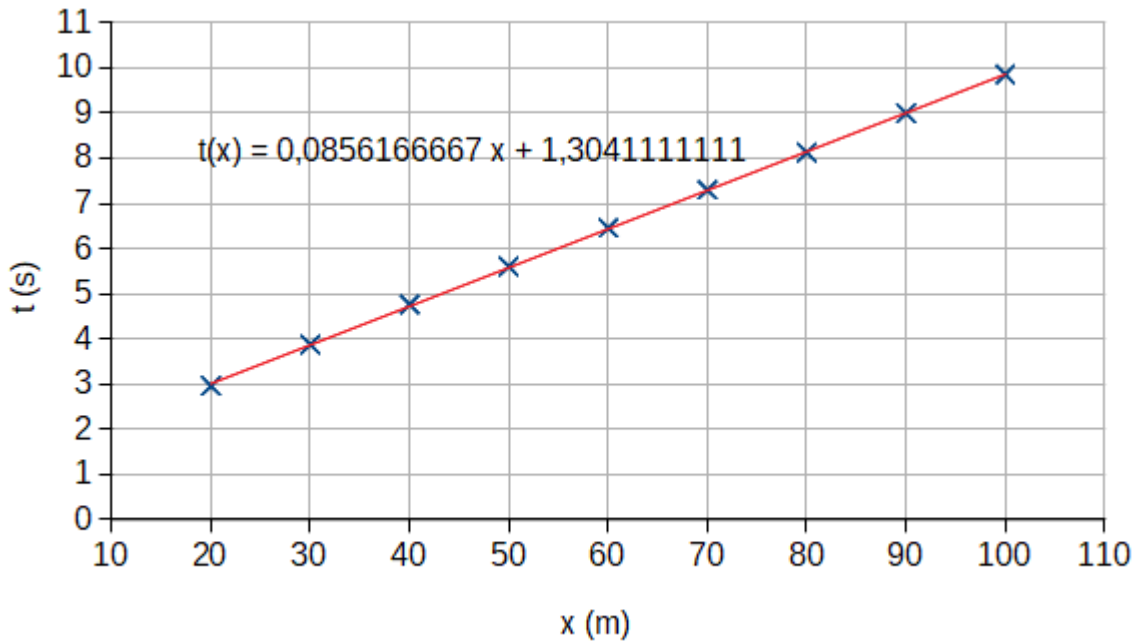
$$t(x) = 0,0856166667 \frac{\text{s}}{\text{m}} x + 1,3041111111 \text{ s}.$$

Suoran kulmakerroin on  $k = 0,0856166667 \frac{\text{s}}{\text{m}}$ .

Jos oletetaan, että Lewis säilyttäisi nopeutensa 200 metriin asti, olisi hänen loppuaikansa 200 m:n matkalla

$$t_{200\text{m}} = t_{100\text{m}} + k\Delta x = 9,86 \text{ s} + 0,0856166667 \frac{\text{s}}{\text{m}} \cdot (200 \text{ m} - 100 \text{ m}) = 18,421667 \text{ s} \approx 18,42 \text{ s}.$$

(6 p.)



### 3. Kaasupullo (15 p.)

Ideaalikaasun tilanyhtälön mukaan pullossa olevan argonikaasun ainemäärä on

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{280 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{8,31451 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 295,15 \text{ K}} = 433,57295 \text{ mol.}$$

(8 p.)

Argonin moolimassa on  $M = 39,948 \text{ g/mol}$ , joten pullossa olevan kaasun massa on

$$m_{\text{Ar}} = nM = 17,320 \text{ kg} \approx 17 \text{ kg.}$$

Argonin ja pullon yhteinen massa on

$$m = m_{\text{Ar}} + m_0 = 43,320 \text{ kg} \approx 43 \text{ kg.}$$

(7 p.)

### 4. Siltakytettä (15 p.)

4.1. Sähkövirran suunta on jännitelähteestä kohti pistettä a eli suuremmasta potentiaalista pienempään. Pisteiden c ja jännitelähteen välillä sähkövirran suunta on edelleen kohti pienempää jännitettä eli kohti jännitelähdettä.

Nämä sähkövirrat ovat yhtä suuret, koska molemmissa tapauksissa on kyse osasta saman virtapiirin haarautumatonta johdinta. Tai: Sähkövirrat ovat yhtä suuret, koska virtapiirin komponenttiin sisään tuleva sähkövirta on aina samansuuruinen kuin poistuva sähkövirta.

(4 p.)

4.2. Kun pisteiden b ja d välillä ei ole sähkövirtaa, myös jännite niiden välillä on nolla.

(3 p.)

4.3. Sähkövirta jakautuu pisteessä a kahteen osaan: sähkövirta  $I_1$  kulkee vastuksen  $R_1$  läpi ja sähkövirta  $I_2$  vastuksen  $R_2$  läpi. Virta  $I_1$  jatkaa säätövastuksen  $R_3$  läpi ja virta  $I_2$  jatkaa tuntemattoman vastuksen  $R_x$  läpi, koska pisteiden b ja d välillä ei ole sähkövirtaa.

Tästä voidaan päätellä, että jännitteet  $U_{ad}$  ja  $U_{ab}$  ovat yhtäsuuret, eli Ohmin lain mukaan pätee

$$R_1 I_1 = R_2 I_2. \quad (1)$$

Myös jännitteet  $U_{dc}$  ja  $U_{bc}$  ovat yhtäsuuret, josta puolestaan seuraa Ohmin lain perusteella

$$R_3 I_1 = R_x I_2. \quad (2)$$

(6 p.)

Jaetaan yhtälöt keskenään, jolloin saadaan

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_x}. \quad (3)$$

Tästä voidaan ratkaista tuntematon resistanssi  $R_x$ :

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_1}. \quad (4)$$

(2 p.)

## 5. Voimat (15 p.)

5.1.

B (4 p.)

$\vec{F}_1$ : Ilmanvastus (1 p.)

$\vec{F}_3$ : Kitka (1 p.)

$\vec{F}_6$ : Pinnan tukivoima (1 p.)

$\vec{F}_7$ : Pinnan tukivoima (1 p.)

$\vec{F}_8$ : Paino (1 p.)

Yksittäisten voimien nimeämisissä vain B-vaihtoehdossa mukana olevat voimat ( $\vec{F}_1, \vec{F}_3, \vec{F}_6, \vec{F}_7, \vec{F}_8$ ) arvostellaan. Voimien nimeämisistä voi saada pisteitä, vaikka olisi valinnut väärän voimakuvion.

5.2.

C (4 p.)

$\vec{F}_1$ : Pinnan tukivoima (1 p.)

$\vec{F}_3$ : Paino (1 p.)

Yksittäisten voimien nimeämisissä vain C-vaihtoehdossa mukana olevat voimat ( $\vec{F}_1, \vec{F}_3$ ) arvostellaan. Voimien nimeämisistä voi saada pisteitä, vaikka olisi valinnut väärän voimakuvion.

## 6. Maanjäristysaallot (15 p.)

6.1 P-aalto etenee järjestyskeskuksesta havaitseen matkan  $s = v_P t_P$ , jossa  $v_P = 8,0 \text{ km/s}$ .

S-aalto etenee saman matkan eli  $s = v_S t_S$ , jossa  $v_S = 4,8 \text{ km/s}$ . Havaittu aikaero on  $t_S - t_P = 30 \text{ s}$ .

Matka  $s$  voidaan selvittää ratkaisemalla ensin joko  $t_P$  tai  $t_S$  yhtälöstä

$$s = v_P t_P = v_S t_S.$$

Siirtämällä termit ja jakamalla  $v_S$ :llä saadaan

$$t_S - \frac{v_P}{v_S} t_P = 0.$$

Sijoitetaan tähän yhtälöön

$$\frac{v_P}{v_S} = \frac{8,0 \text{ km/s}}{4,8 \text{ km/s}} = \frac{5}{3} \quad \text{ja} \quad t_P = t_S - 30 \text{ s},$$

jolloin saadaan aika  $t_S$  ratkaistua:  $t_S = 75 \text{ s}$ .

Etäisyys  $s$  on

$$s = v_S t_S = 4,8 \text{ km/s} \cdot 75 \text{ s} = 360 \text{ km}.$$

Aaltoliikkeen perusyhtälöstä  $v = f\lambda$  saadaan

$$\lambda_P = \frac{v_P}{f_P} = \frac{8,0 \text{ km/s}}{2 \text{ Hz}} = 4 \text{ km} \quad \text{ja} \quad \lambda_S = \frac{v_S}{f_S} = \frac{4,8 \text{ km/s}}{10 \text{ Hz}} = 0,48 \text{ km} \approx 0,5 \text{ km}.$$

(8 p.)

6.2 P-aaltoja voidaan kuvata pitkittäisellä aaltoliikkeellä ja S-aaltoja poikittaisella aaltoliikkeellä.

(3 p.)

Seismiset aallot etenevät eri aineissa ja kerroksissa eri nopeuksilla. Ne taittavat ja heijastuvat aineiden ja eri tiheyksisten kerrosten rajapinnoista. Eri havaintopisteisiin tulleet järjestysaallot ovat kulkeneet maapallon kerrosten läpi eri reittejä.



Yhdistämällä eri havaintopisteiden seismografienn mittaustulokset, saadaan näin tietoa maapallon sisäosien kerrosten rakenteesta ja kerrosten rajapintojen sijainnista.

(2 p.)

S-aaltoja ei esiinny nesteessä, joten niiden puuttuminen tietyillä maanpinnan vyöhykkeillä suhteessa havaittuihin järistyskeskuksiin osoittaa, että maapallon ytimessä on nestemäinen osa. S-aallot eivät esimerkiksi etene maapallon läpi suoraan sen puolelta toiselle.

(2 p.)

## 7. Heijastuminen ohuesta kalvosta (15 p.)

7.1. Valo heijastuu osittain kalvon yläpinnasta ja osittain pinnan ja kalvon rajapinnasta. Nämä heijastuneet aallot interferoivat keskenään.

(2 p.)

Aallot joko vahvistavat tai vaimentavat toisiaan sen mukaan, kuinka suuri vaiheero niillä on. Jos vaihe-eroa ei ole, aallot vahvistavat toisiaan voimakkaimmin. Jos vaihe-ero vastaa puolta aallonpituutta, aallot vaimentavat toisiaan eniten.

(2 p.)

Vaihe-ero riippuu kalvon paksuudesta ja heijastumisissa mahdollisesti tapahtuvista puolta aallonpituutta vastaavista vaihesiirroista.

(2 p.)

7.2. Molemmissa heijastumisissa tapahtuu puolta aallonpituutta vastaava vaihesiirto, koska valo saapuu niissä optisesti harvemmasta aineesta optisesti tiheämpään aineeseen. Tällöin heijastuneet aallot ovat samassa vaiheessa ja vahvistavat toisiaan voimakkaimmin, jos kalvon alapinnalta heijastunut aalto on kulkenut kalvossa yhden aallonpituuden mittaisen matkan (tai tämän matkan kokonaisen monikerran). Jos kalvon paksuutta merkitään  $L$ :llä, saadaan ehto

$$2L = \lambda_{\text{asetoni}}, \quad (5)$$

jossa  $\lambda_{\text{asetoni}}$  on valon aallonpituus asetonissa.

(5 p.)

Valon taittumislain mukaan

$$\frac{\lambda_{\text{asetoni}}}{\lambda_{\text{ilma}}} = \frac{n_{\text{ilma}}}{n_{\text{asetoni}}}, \quad (6)$$

joten

$$\lambda_{\text{asetoni}} = \frac{n_{\text{ilma}}}{n_{\text{asetoni}}} \lambda_{\text{ilma}}. \quad (7)$$

(2 p.)

Asetonikerroksen paksuus on

$$L = \frac{\lambda_{\text{asetoni}}}{2} = \frac{n_{\text{ilma}}}{2n_{\text{asetoni}}} \lambda_{\text{ilma}} \simeq 250 \text{ nm}. \quad (8)$$

(Paksuus voi olla myös tämän monikerta.)

(2 p.)

## 8. Radon (15 p.)

8.1. Radon ja sen radioaktiiviset hajoamistuotteet lähettävät säteilyä, joka ionisoi solujen molekyyliä. Huoneilmassa olevaa radonia päätyy hengityksessä ihmisen keuhkoihin, jossa niiden hajoamisesta syntyvä säteily voi vaurioittaa solujen perimäainesta. Tämä aiheuttaa keuhkosyöpää.

(4 p.)

8.2. Hajoamisketjussa järjestysluku muuttuu seuraavasti:  $92 \rightarrow 90 \rightarrow 91 \rightarrow 92 \rightarrow 90 \rightarrow 88 \rightarrow 86$ . Koska alfahajoamisessa järjestysluku pienenee kahdella ja  $\beta^-$ -hajoamisessa kasvaa yhdellä, niin hajoamisketjussa syntyy neljä alfahiukkasta ja kaksi  $\beta^-$ -hiukkasta.

(5 p.)

8.3. Kaivoveden aktiivisuus litraa kohden on

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N,$$

jossa  $\lambda$  on hajoamisvakio,  $N$  on radioaktiivisten ydinten lukumäärä ja  $T_{1/2}$  on puoliintumisaika. Ydinten lukumäärä on siis

$$N = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} A = \frac{3,82 \cdot 24 \cdot 3\,600 \text{ s}}{\ln 2} \cdot 460 \frac{1}{\text{s}} \approx 219\,030\,000.$$

Vastaus: Yhdessä litrassa porakaivovettä on noin 220 miljoonaa radon-atomia.

(6 p.)

### Osa 3

9. Sauvan tasapaino (20 p.)

9.1. Voimakuvio.

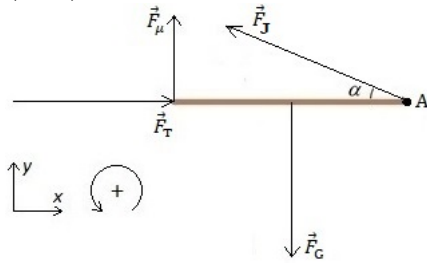
(4 p.)

Sauvan massa ja pituus ovat  $m = 7,9 \text{ kg}$  ja  $L = 1,9 \text{ m}$ , ja putoamiskiihtyvyys on  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Tasapainossa olevaan sauvaan vaikuttavat painon  $\vec{F}_G$  lisäksi seinän aiheuttama tukivoima  $\vec{F}_T$ , seinän aiheuttama kitka  $\vec{F}_\mu$  ja köyden jännitysvoima  $\vec{F}_J$  (ks. kuva).

Kun koordinaatisto, momentin positiivinen suunta ja momenttipiste A valitaan kuvan mukaisesti, saadaan voimaehdot ja momenttiehto muotoon

$$\begin{aligned}\sum F_x &= F_T - F_J \cos \alpha = 0, \\ \sum F_y &= F_\mu + F_J \sin \alpha - F_G = 0, \\ \sum M_A &= F_G \frac{L}{2} - F_\mu L = 0.\end{aligned}$$

(6 p.)



Sauvan paino on  $F_G = mg = 77,5$  N. Momenttiehdosta saadaan kitkavoimaksi  $F_\mu = F_G/2 = 38,75$  N. Sauvan pituus supistuu yhtälöstä, joten se ei vaikuta tulokseen.

Rajatapauksessa sauvan vasen pää on liukumaisillaan ja lepokitka siis suurimmillaan,  $F_\mu = F_{\mu\max} = \mu_0 F_T$ , jossa  $\mu_0 = 0,76$  on seinän ja sauvan välinen lepokitkerroin. Seinän tukivoima on siten  $F_T = F_\mu/\mu_0 = 50,99$  N.

Kun voimaehdot kirjoitetaan muotoon

$$F_J \cos \alpha_r = F_T,$$

$$F_J \sin \alpha_r = F_G - F_\mu,$$

joissa  $\alpha_r$  on kyseistä tilannetta vastaava rajakulma, ja jaetaan alempi yhtälö puolittain ylemmällä, saadaan

$$\tan \alpha_r = \frac{F_G - F_\mu}{F_T} = 0,76.$$

Rajakulma on  $\alpha_r = 37,23^\circ$ . Tasapaino on mahdollinen, kun  $\alpha < \alpha_r \simeq 37^\circ$ .

(4 p.)

9.2. Nyt  $\alpha = 25^\circ < \alpha_r$ , joten tasapaino on mahdollinen. Kohdan 9.1 perusteella  $F_G \simeq 78$  N ja  $F_\mu \simeq 39$  N. Jälkimmäisestä ja ensimmäisestä voimaehdosta saadaan

$$F_J = \frac{F_G - F_\mu}{\sin \alpha} = 91,69 \text{ N} \simeq 92 \text{ N},$$

$$F_T = F_J \cos \alpha = 83,1 \text{ N} \simeq 83 \text{ N}.$$

(6 p.)

## 10. Energiavarasto (20 p.)

10.1. Lämpövarastoon varastoidaan aineiston mukaan enimmillään  $Q = 9\,000$  MWh energiaa. Lämpömäärän  $Q$  ja lämpötilan muutoksen  $\Delta T$  välillä on voimassa yhtälö

$$Q = cm\Delta T,$$

jossa  $c$  on aineen ominaislämpökapasiteetti ja  $m$  on massa. Toisaalta massa on  $m = V\rho$ , jossa  $V$  on tilavuus ja  $\rho$  on tiheys. Lämpötilan muutos on

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{Q}{cV\rho} \\ &= \frac{(9\,000 \cdot 10^6 \text{ Wh}) \cdot (3\,600 \frac{\text{s}}{\text{h}})}{(4\,190 \text{ J}/(\text{kg K})) \cdot (150\,000 \text{ m}^3) \cdot 1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 51.55 \text{ K} \approx 52 \text{ K}.\end{aligned}$$

Veden lämpötila nousee noin  $50$  °C.

(5 p.)

10.2. Taulukkokirjan mukaan veden tiheys lämpötiloissa  $T_0 = 1$  °C ja  $T_1 = 90$  °C on  $\rho_0 = 0,9999$  kg/l ja  $\rho_1 = 0,9653$  kg/l. Vesimäärän massa ei muutu, ja se on  $m = V_0\rho_0$ , jossa  $V_0$  on veden tilavuus alkutilanteessa. Vesimäärän tilavuuden muutos on

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_1 - V_0 = \frac{m}{\rho_1} - \frac{m}{\rho_0} \\ &= V_0 \left( \frac{\rho_0}{\rho_1} - 1 \right) \\ &= 150\,000 \text{ m}^3 \left( \frac{0,99990}{0,96534} - 1 \right) = 5\,370 \text{ m}^3 \approx 5\,400 \text{ m}^3.\end{aligned}$$

Siirtyvän veden tilavuus on  $5\,400$  m<sup>3</sup>.

(5 p.)

10.3. Uusiutuvista energialähteistä tuulivoiman ja aurinkoenergian teho riippuu sääoloista ja vuorokaudenajasta. Fossiilisia polttoaineita käyttävät voimalaitokset

eivät ole riippuvaisia säästä, ja niiden teho on hyvin ennustettavissa ja paremmin sovitettavissa energian kulutushuippuihin. Energiavarastot tasaavat uusiutuvan energian tuotantohuippuja.

(4 p.)

10.4. Sähköakkaa käytetään tasaamaan kulutushuippuja sähköverkossa ja lämpövarastoa käytetään tasaamaan ensisijaisesti tuotantohuippuja kaukolämpöverkossa. Lämpövaraston energian muuttaminen sähköverkossa siirrettäväksi energiaksi ei ole kannattavaa, koska se vaatisi häviöllisen lämpövoimakoneen käyttämistä.

Sähköakku reagoi nopeammin tehontarpeen muutoksiin kuin lämpövarasto.

Sähköakun kapasiteetti on huomattavasti pienempi kuin lämpövaraston, minkä vuoksi se ei sovellu hyvin lämmitykseen käytettävän energian varastointiin.

(6 p.)

## 11. Aurinkopaneeli (20 p.)

11.1. Aurinkoa kohti suuntaaminen lisää aurinkokennoihin osuvan säteilyn intensiteettiä, ts. aurinkokennoihin osuvien fotonien määrää. Tämä puolestaan lisää kennoissa muodostuvien varauksenkuljettajien (elektronien ja aukkojen) määrää ja siten kennosta saatavaa sähkövirtaa.

(3 p.)

11.2. Fotonien energia on käänteisesti verrannollinen aallonpituuteen. Matalaenergisillä fotoneilla ei ole riittävästi energiaa muodostamaan piissä elektroni-aukko-paria (synnyttämään varauksenkuljettajia).

(3 p.)

11.3. Piihin absorboituva fotoni luovuttaa energiansa yhdelle elektronille. Aallonpituuden pienentyessä fotonien energia kasvaa, mutta aurinkokenno ei pysty muuntaamaan sähköä avulla siirrettäväksi energiaksi korkeaenergiaisten fotonien energiasta sitä osuutta, joka ylittää elektroni-aukko-parin muodostumiseen vaadittavan energian. Fotonien energian kasvaessa tämä hukkaan menevä osuus kasvaa, jolloin spekt-

rivaste vastaavasti pienenee.

(5 p.)

11.4. Hyvässä vastauksessa tarkastellaan seuraavia seikkoja:

- Osa kennoon osuneesta säteilystä ei absorboidu, vaan heijastuu kennon pinnasta tai läpäisee kennon.

- Osa säteilystä absorboituu, mutta ei muodosta elektroni-aukko-pareja: säteily, jonka aallonpituus on yli 1100 nm ja säteily, joka absorboituu kennon pintarakenteisiin. Näissä tapauksissa absorboituneen säteilyn energia muuntuu kokonaan kennon sisäenergiaksi.

- Myös sellaisesta kennoon absorboituvasta säteilystä, joka muodostaa elektroni-aukkopareja, ei saada kaikkeaa energiaa sähköisesti siirrettävään muotoon: elektroni-aukko-parin muodostamiseen vaadittavan energian ylittävä osuus menee elektronin liike-energiaksi ja niin kennon sisäenergiaksi. (Lisäksi osaa muodostuneista varauksenkuljettajista ei saada kerättyä ulkoiseen piiriin: mitä kauempana diodin p-n-liitoksesta elektroni-aukko-pari muodostuu, sitä enemmän tapahtuu elektronien ja aukkojen rekombinaatiota, jolloin energiaa muuntuu kennon sisäenergiaksi tai säteilyn energiaksi.)

(5 p.)

11.5. Kuvasta 11.A nähdään, että säteily, jonka aallonpituus on  $\lambda \leq 1100$  nm, muodostaa kennossa varauksenkuljettajia. Aallonpituutta  $\lambda = 1100$  nm vastaava fotonin energia on  $E = hc/\lambda$ , jossa  $h$  on Planckin vakio  $6,62607004 \cdot 10^{-34}$  Js ja  $c$  valonnopeus  $2,99792458 \cdot 10^8$  m/s. Elektroni-aukko-parin muodostumiseen siis tarvitaan energia  $E = hc/\lambda \simeq 1,8 \cdot 10^{-19}$  J = 1,1 eV (hyväksytään arvot 1,0...1,1 eV).

(4 p.)