
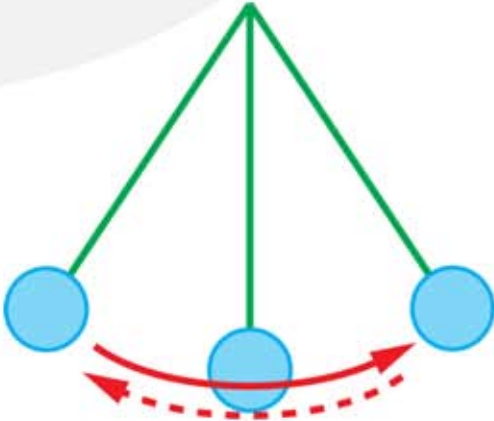


9 Trillingen en golven

havo

9.1 Wat is een trilling?

Trillingstijd, frequentie, uitwijking en amplitude

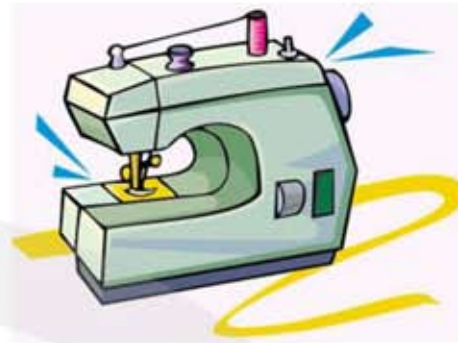
- 1***
- a Wat is een trilling?
 - b Wat is de trillingstijd?
 - c Met welke letters worden de grootte en eenheid van de trillingstijd aangegeven?
 - d Wat is de periode?
 - e Wat is de frequentie?
 - f Wat bedoel je met Hertz (Hz) ?
- 2***
- Leg uit welke van de volgende voorbeelden wel of geen trillingen zijn.
- a De trapper van een fiets tijdens het fietsen.
 - b De beweging van je trommelvlies als je iets hoort.
 - c Een robot die dozen van een lopende band pakt.
 - d Eb en vloed aan de kust.
 - e De beweging van een satelliet om de aarde.
 - f Een kind op een schommel.
 - g Een kind op een wipkip.
 - h Een tak aan een boom die heen-en-weer zwiept.
- 
- 3****
- Een slinger beweegt tussen de uiterste standen A en C. Op een bepaald moment is de slinger in stand A. Over 10 slingeringen doet de slinger 4,0 seconden.
- a Hoe vaak is de slinger in deze tijd in punt A geweest?
 - b Hoe vaak is de slinger in deze tijd in punt B geweest?
 - c Hoe groot is de trillingstijd?
 - d Bereken de frequentie.
- 

4** Een naaimachine maakt 300 steken per minuut.

a Welke frequentie heeft deze machine?

Een auto heeft een toerental van 2400 per minuut.

b Met welke frequentie draait de motor?



5** Soldaten marcheren met een ritme van 120 stappen per minuut.

a Hoeveel seconde duurt een enkele stap.

Een gemiddelde stap is 80 cm. De soldaten moeten 10 km marcheren.

b Bereken hoeveel minuten ze er over doen.

6* Een fluitketel geeft een fluittoon met een frequentie van 650 Hz.

a Bereken de trillingstijd.



7** Een hondenfluitje maakt een fluittoon van $2,1 \cdot 10^4$ Hz.

a Bereken de trillingstijd.

Je geeft een kort signaal dat 0,20 s duurt.

b Hoeveel trillingen bevat dit signaal?



8** Je laat een blokje aan een touw slingeren. In het begin geef je het blokje een uitwijking van 15 cm. Daarna laat je het blokje los. Het blokje beweegt steeds in 0,20 s van de uiterste stand naar de evenwichtsstand.

a Leg uit wat er NIET verandert als je het blokje een tijdje laat slingeren:

- de frequentie
- de uitwijking
- de amplitude
- de trillingstijd

b Wat weet je van de snelheid in de uiterste stand?

- c Wat weet je van de snelheid in de evenwichtsstand?
- d Bereken de frequentie van deze slinger.

9** Een tak aan een boom zwaait 18 keer per minuut heen-en-weer door de wind.

- a Bereken de trillingstijd.
- b Bereken de frequentie.

10*** Een blokje hangt aan een veer en voert een trilling uit. Met een stopwatch wil je de trillingstijd bepalen.

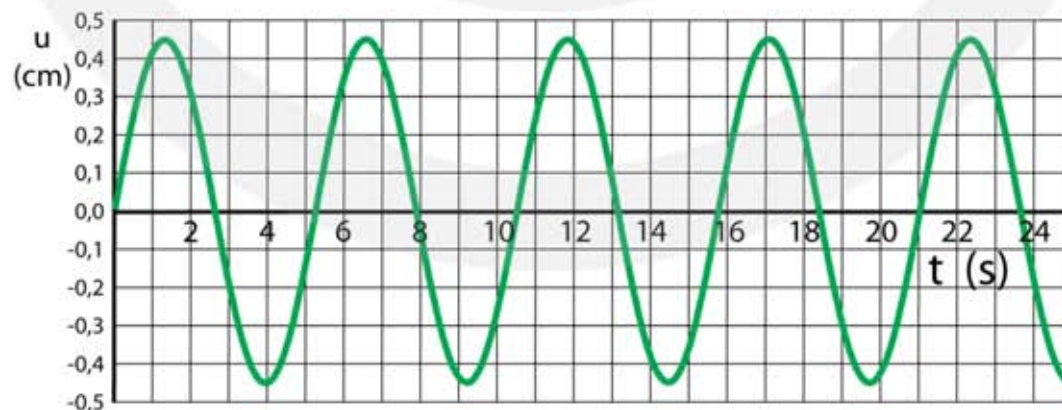
- a Leg uit in welke stand je het beste de stopwatch kunt starten.

Om de trillingstijd te bepalen meet Arend de tijd van één heen en weer gaande beweging. Simon meet de tijd van 10 heen en weer gaande bewegingen en deelt daarna het resultaat door 10.

- b Wie van hen voert de nauwkeurigste meting uit: Arend of Simon, of zijn beide metingen even nauwkeurig?

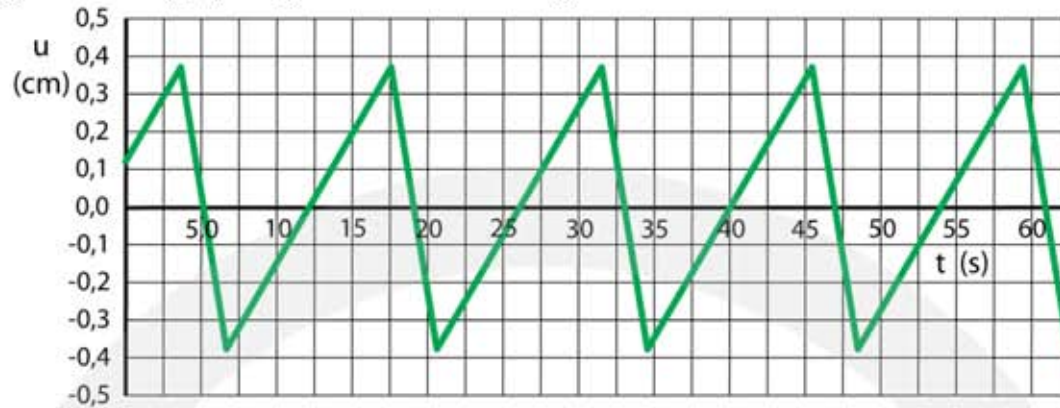
(u, t)-diagram

11** De figuur is het (u, t)-diagram van een trilling.



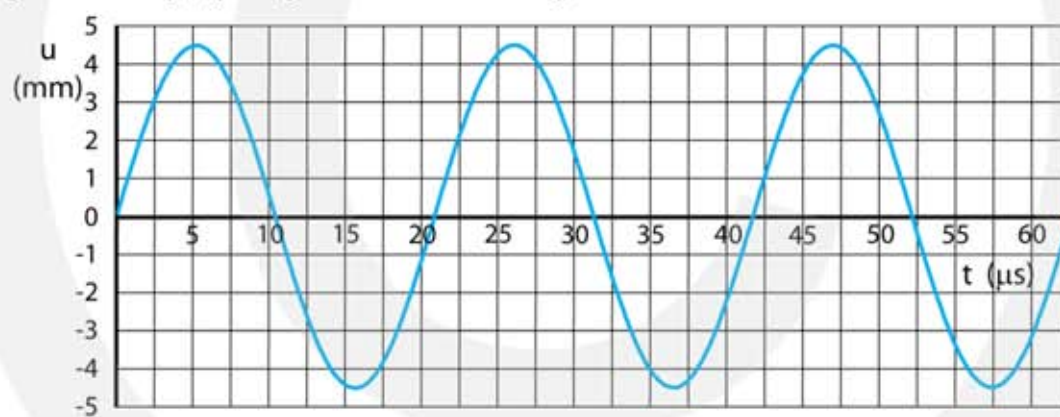
- a Hoe groot is de amplitude?
- b Hoe groot is de trillingstijd?
- c Hoe groot is de frequentie?

12** De figuur is het (u, t)-diagram van een trilling.



- a Hoe groot is de amplitude?
- b Hoe groot is de trillingstijd?
- c Hoe groot is de frequentie?

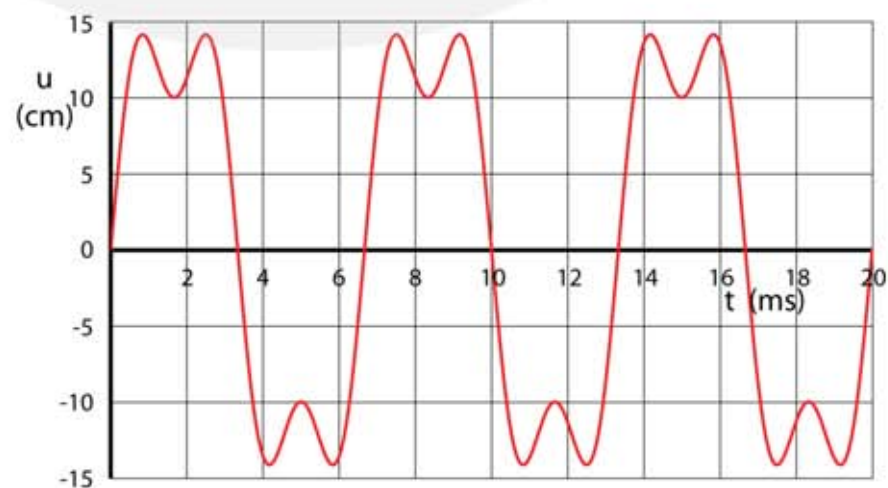
13** De figuur is het (u, t)-diagram van een trilling.



- a Hoe groot is de amplitude?
- b Hoe groot is de trillingstijd?
- c Hoe groot is de frequentie?

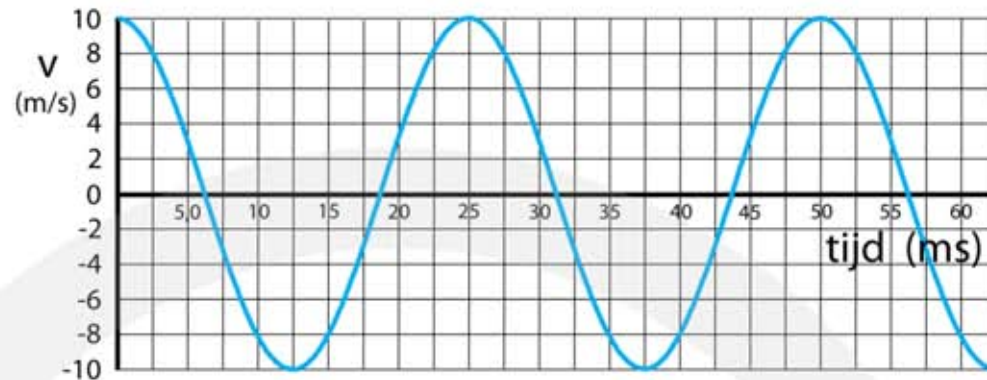
14*** De figuur is het (u, t)-diagram van een trilling.

- a Hoe groot is de amplitude?
- b Hoe groot is de trillingstijd?
- c Hoe groot is de frequentie?



15*** De figuur is het (v, t)-diagram van een trilling.

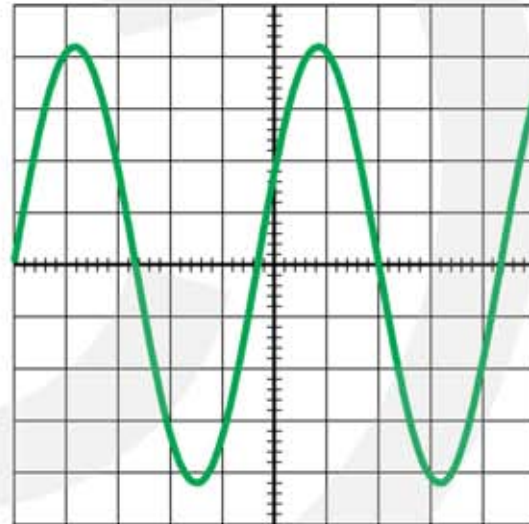
- a Bepaal de trillingstijd.
- b Bepaal de frequentie.
- c Bepaal de amplitude.



Trillingen waarnemen

16** De figuur is het beeld op een oscilloscoop.
De tijdbasis is $20 \mu\text{s} / \text{div}$.
De gevoeligheid is $0,5 \text{ V} / \text{div}$.

- a Bepaal de trillingstijd.
- b Bepaal de frequentie.
- c Bepaal de amplitude.

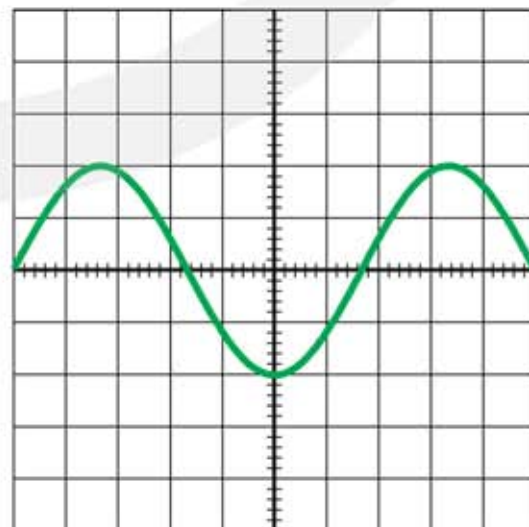


17*** De figuur is het beeld op een oscilloscoop.
De tijdbasis is $5 \mu\text{s} / \text{div}$.
De gevoeligheid is $0,2 \text{ mV} / \text{div}$.

- a Bepaal de trillingstijd.
- b Bepaal de frequentie.
- c Bepaal de amplitude.

Je wilt dat het signaal van boven tot onder het scherm vult.

- d Leg uit wat je moet doen met de tijdbasis.
- e Leg uit wat je moet doen met de gevoeligheid.

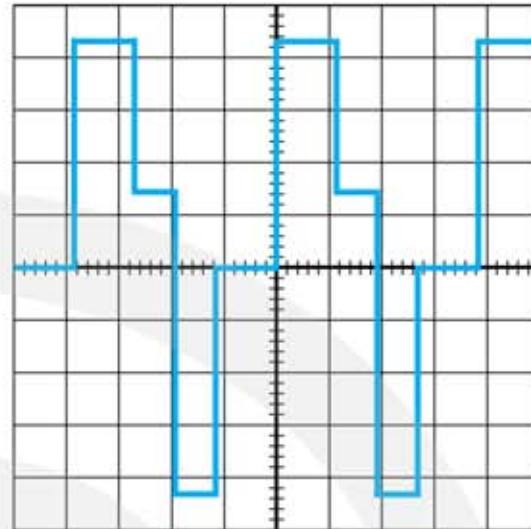


- 18***** De figuur is het beeld op een oscilloscoop.
De tijdbasis is 50 ms / div.
De gevoeligheid is 0,2 V / div.

- Bepaal de trillingstijd.
- Bepaal de frequentie.
- Bepaal de amplitude.

Je verandert de tijdbasis van de oscilloscoop naar 20 mV/div.

- Leg uit of je nu meer of minder trillingen op het scherm ziet.



- 19***** De figuur is een elektrocardiogram (ECG).

De tijdbasis is 20 ms / div.

De gevoeligheid is 200 μ V / div.



- Hoeveel tijd zit er tussen de punten P en T?
- Hoeveel slagen geeft het hart per minuut?
- Hoeveel millivolt is het signaal bij punt R?

- 20****** De figuur is een elektrocardiogram (ECG). De hartslag is 116 slagen per minuut

- Hoe groot is de tijdbasis?
(de tijd van één klein hokje)

Bij de piek is de spanning 1,6 mV.

- Hoe groot is de gevoeligheid?



9.2 Eigentrilling en resonantie

Massaveersysteem

- 1**** Voor een massaveersysteem geldt: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$
- a Bereken de trillingstijd als $m = 400 \text{ g}$ en $C = 2,0 \text{ N/m}$.
 - b Bereken de trillingstijd als $m = 800 \text{ g}$ en $C = 2,0 \text{ N/m}$.
 - c Bereken de trillingstijd als $m = 400 \text{ g}$ en $C = 4,0 \text{ N/m}$.

- 2**** Voor een massaveersysteem geldt: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$
- a Bereken de massa als $T = 1,0 \text{ s}$ en $C = 10 \text{ N/m}$.
 - b Bereken de massa als $T = 2,0 \text{ s}$ en $C = 10 \text{ N/m}$.
 - c Bereken de massa als $T = 1,0 \text{ s}$ en $C = 20 \text{ N/m}$.

- 3***** Voor een massaveersysteem geldt: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$
- a Bereken de veerconstante als $T = 10 \text{ s}$ en $m = 5,0 \text{ kg}$.
 - b Bereken de veerconstante als $T = 20 \text{ s}$ en $m = 5,0 \text{ kg}$.
 - c Bereken de veerconstante als $T = 10 \text{ s}$ en $m = 10 \text{ kg}$.

- 4**** Een auto heeft een massa van 950 kg . De veerconstante van de vering van de auto is $4,0 \cdot 10^4 \text{ N/m}$. Op een hobbelige weg gaat de auto op en neer trillen.
- a Hoe groot is de trillingstijd van de auto?
 - b Hoe groot is de frequentie van de auto?
 - c Waar dienen de schokdempers bij een auto voor?



5*** Een chauffeur bepaalt haar massa met een verende stoel. De veerconstante van de stoel is 800 N/m. De lege stoel trilt met 1,00 Hz. Als de chauffeur op de stoel zit is de frequentie 0,500 Hz.

- a Bereken de massa van de stoel.
- b Bereken de massa van de chauffeur.

6*** Je hangt een blokje met een massa van 20 gram aan een veer en laat het blokje trillen. De trillingstijd is 0,50 s. Je wilt een trillingstijd van precies één seconde krijgen.

- a Beredeneer met behulp van de formule $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$ hoeveel extra massa die je aan de veer moet hangen.

Je kunt ook een trillingstijd van precies één seconde krijgen door niet extra gewicht toe te voegen maar door een andere veer te nemen.

- b Leg uit of je een veer moet kiezen met een grotere of met een kleinere veerconstante.

- c Beredeneer met behulp van de formule $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$ hoeveel groter of kleiner de veerconstante moet zijn.

7**** In de wieg van een baby hangt een poppetje aan een veer. De massa van het poppetje is 50 gram. Als je het poppetje naar beneden trekt en daarna loslaat gaat hij trillen met een trillingstijd van 0,80 s.

- a Bereken de veerconstante van de veer.

Als het poppetje stil hangt heeft de veer een lengte van 20 cm.

- b Bereken de lengte van de veer als er geen poppetje aan hangt.

HINT gebruik $F_{\text{veer}} = C \cdot u$ met $F_{\text{veer}} = F_z = m \cdot g$

8**** Je hangt een blokje van 250 gram aan een spiraalveer. De veer rekt hierdoor 150 mm uit.

- a Bereken de veerconstante van de spiraalveer.

HINT gebruik $F_{\text{veer}} = C \cdot u$ met $F_{\text{veer}} = F_z = m \cdot g$

Daarna breng je het blokje in trilling door de veer 5,0 cm verder uit te rekken en daarna los te laten.

- b** Hoe groot is de amplitude?
- c** Met welke trillingstijd gaat het blokje trillen?
- d** Hoe groot is de frequentie?
- e** Hoeveel trillingen zijn er per minuut?

Als het blokje tot stilstand is gekomen breng je het opnieuw in trilling door de veer 10 cm verder uit te rekken en daarna los te laten.

- f** Hoe groot zullen de trillingstijd en de frequentie nu zijn?
- g** Bereken de versnelling van het blokje onmiddellijk na het loslaten.
HINT vergeet de zwaartekracht niet
- h** Leg uit of de gemiddelde snelheid bij een amplitude van 10 cm groter, kleiner of gelijk is aan de gemiddelde snelheid bij een amplitude van 5,0 cm.

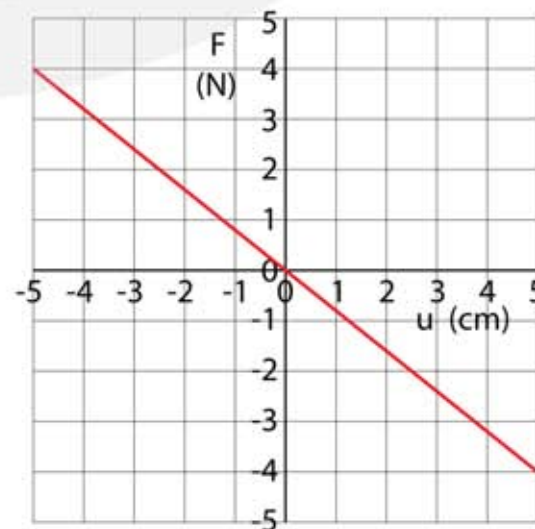
- 9**** Om een elastiek 1,0 cm uit te rekken heb je 0,3 N kracht nodig. Om het elastiek 5,0 cm uit te rekken heb je 2,0 N kracht nodig. Je hangt een blokje aan het elastiek en brengt het in trilling.

- a** Leg uit of het blokje een harmonische trilling gaat uitvoeren.



- 10****** In de figuur zie je het (F, u)-diagram van een veer. Je hangt een steen aan de veer en rekt de veer 5,0 cm uit. Daarna laat je het blokje los en gaat het trillen. De trillingstijd is 2,0 s.

- a** Leg uit of de steen een harmonische trilling gaat uitvoeren.
- b** Schets de (u, t)-grafiek van de steen voor één trilling.
- c** Schets de (F, t)-grafiek van de steen voor één trilling.
- d** Schets de (v, t)-grafiek van de steen voor één trilling.
- e** Bereken de massa van de steen.



11**** Een dobber trilt harmonisch in het water.

- a** Geef het wiskundig verband tussen de resulterende kracht en de uitwijking.

Om de dobber 2,0 cm op te tillen heb je een kracht van 0,028 N nodig.

- b** Bereken de veerconstante.

Je duwt de dobber met een kracht van 0,020 N naar beneden.

- c** Hoeveel centimeter gaat de dobber naar beneden?

Je laat de dobber los die dan gaat hij trillen met een trillingstijd van 1,2 s.

- d** Hoeveel gram weegt de dobber?



Slinger

12** Voor een slinger geldt: $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$

- a** Bereken de trillingstijd als $\ell = 2,0$ m.

- b** Bereken de frequentie als $\ell = 4,0$ cm.

13** Voor een slinger geldt: $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$

- a** Bereken de lengte als $T = 4,0$ s.

- b** Bereken de lengte als $T = 1,6$ minuten.

- c** Bereken de lengte als $T = 25$ ms (milliseconden).

14** Ella zit op een schommel. Sofie trekt de schommel 1 meter naar achteren en laat dan los.

Ella beweert dat ze een amplitude heeft van 2 m.
Sofie beweert dat Ella een uitwijking heeft van 2 m.

- a** Wie heeft er gelijk, Ella, Sofie of geen van beiden?
b Wanneer is tijdens het schommelen de snelheid nul?
c Wanneer is de snelheid maximaal?



Sofie wil ook op de schommel. Sofie is zwaarder dan Ella.

d Wie heeft de grootste trillingstijd, Ella, Sofie of is de trillingstijd gelijk?

15** De slinger van Foucault

Op de wereldtentoonstelling van 1851 in Parijs werd de eerste slinger van Foucault tentoongesteld. Met zo'n slinger kan de draaisnelheid van de aarde om haar as worden bepaald. Het bijzondere is dat dit kan gebeuren in een afgesloten ruimte, dus zonder zicht op de zon of de sterren of andere astronomische waarnemingen.



De originele slinger van Foucault bestond uit een bol van 28 kg die met een lang koord aan het plafond van het Panthéon in Parijs was vastgemaakt.

De afstand tussen het zwaartepunt van de bol en het ophangpunt aan het plafond is 67 meter. De slinger heeft een maximale uitwijking van 3,0 m.

- a Bereken de trillingstijd van deze slinger met de formule $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$.
- b Bereken de frequentie van deze slinger.

16*** Drie slingers van verschillende lengte zijn naast elkaar opgehangen. Hun lengtes zijn 1,0 m, 4,0 m en 9,0 m.

- a Bereken voor iedere slinger de trillingstijd. Gebruik $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$
- b Bereken de verhouding van de trillingstijden.

17**** Een sloopkogel hangt aan een lange kabel. Hij wordt met een touw naar rechts getrokken en vervolgens losgelaten zonder beginsnelheid. De kabel is precies verticaal op het moment dat de kogel tegen een muur botst. De tijdsduur tussen het loslaten van het touw en het botsen tegen de muur van de kogel is 2,6 s.



- a Bereken de lengte van de kabel.

Resonantie

- 18**** Als je een stemvork aanslaat gaat hij met 440 Hz trillen. Je hoort dan zachtjes de muziknoot a1. Om het geluid harder te maken kun je de stemvork met de achterkant tegen een raam houden.

a Leg uit waardoor er versterking optreedt.

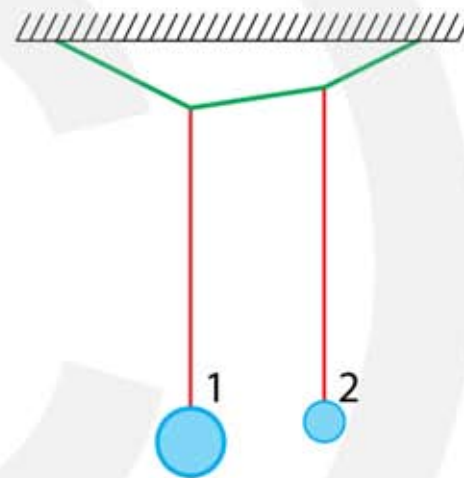
Als je de stemvork tegen het raam houdt dooft het geluid sneller uit.

b Leg uit waarom dit het geval is.

- 19**** Twee slingers zijn naast elkaar opgehangen, zie figuur. De massa van slinger 1 is vijf keer zo groot als de massa van slinger 2. Slinger 1 heeft een lengte van 1,5 m

Slinger 1 wordt in trilling gebracht en na een poosje gaat slinger 2 ook bewegen. Er is sprake van resonantie.

- a** Leg uit wat met resonantie wordt bedoeld.
b Bereken de lengte van slinger 2.



- 20****** Een auto rijdt over een weg waarop iedere 10 meter een hobbel is aangebracht. De auto is geveerd met $C = 5,0 \cdot 10^4 \text{ N/m}$. Bij een snelheid van 12 m/s gaat de auto heftig op en neer vanwege resonantie.

- a** Hoe groot is de massa van de auto met chauffeur?
HINT bereken de tijd tussen twee hobbels en stel dit gelijk aan T_{eigen}



Er stappen 2 passagiers in de auto met een gezamenlijke massa van 150 kg.

- b** Bereken bij welke snelheid er nu resonantie optreedt.
HINT bereken eerst T_{eigen}

9.3 Lopende golven

- 1**** In een stadion ontstaat een "wave" doordat de mensen die naast elkaar zitten vlak na elkaar opstaan, hun armen omhoogsteken en daarna weer gaan zitten. Hierdoor ontstaat een golf die horizontaal door het stadion beweegt.



- a** Leg uit of deze golf transversaal of longitudinaal is.

In het stadion is de afstand tussen het midden van twee stoeltjes 50 cm. De tijd tussen het opstaan van twee mensen die naast elkaar zitten is 0,40 s.

- b** Bereken de snelheid waarmee de golf beweegt.

Bij een bepaalde rij is een rondje in het stadion 400 meter lang.

- c** Bereken hoe lang de golf erover doet om één keer rond te gaan.

- 2**** In een eend met haar kuikens zwemt in de sloot. Er vaart een boot voorbij die een golf veroorzaakt.

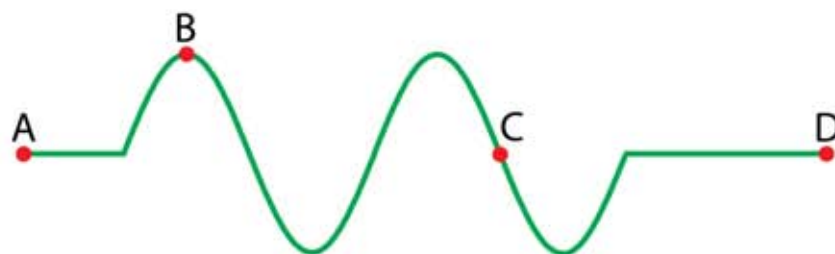


- a** Leg uit of de eendjes hierdoor horizontaal of verticaal gaan bewegen.

Als de golf voorbij is kijkt eend achterom om te zien of haar kuikens niet zijn afgedreven.

- b** Leg uit of de afstand tussen de kuikens na de golf groter is geworden, kleiner is geworden of gelijk is gebleven.

- 3***** In de figuur zie je een koord waarin een golf naar rechts beweegt.



- a** Leg uit hoe punt A zijn beweging is begonnen, vanuit de evenwichtsstand omhoog of omlaag.

- b** Bepaal hoeveel trillingen B heeft uitgevoerd.
- c** Bepaal hoeveel trillingen C heeft uitgevoerd.
- d** De snelheid van punt B is op dit moment nul. Leg dit uit.
- e** Geef met een pijl de richting van de snelheid van punt C aan.

Neem aan dat er geen demping is.

- f** Leg uit of de hoeveelheid energie in het koord groter wordt, kleiner wordt of gelijk blijft.
- g** Leg uit of de amplitude waarmee punt C trilt groter, kleiner of gelijk is aan de amplitude van punt B.

Neem aan dat er wel demping is.

- h** Leg uit of de hoeveelheid energie in het koord groter wordt, kleiner wordt of gelijk blijft.
- i** Leg uit of de amplitude waarmee punt C trilt groter, kleiner of gelijk is aan de amplitude van punt B.

- 4*** In een golfslagbad worden golven opgewekt met een trillingstijd van 5,0 s en een golflengte van 7,5 m.

- a** Hoe groot is de frequentie?
- b** Hoe groot is de golfsnelheid?

- 5**** Een schip vaart over een rivier en veroorzaakt daarbij een golf. De golf heeft een snelheid van 2,3 m/s. De afstand tussen het schip en de oever is 46 m.

- a** Hoe lang doet de golf erover om van het schip naar de oever te gaan?

Aan de oever staat iemand te vissen. Als de watergolf zijn dobber bereikt begint de dobber op een neer te bewegen. Het duurt steeds 0,80 s voordat de dobber opnieuw zijn hoogste punt bereikt.

- b** Bereken de golflengte van de golf.
- c** Hoeveel golven zijn er tussen het schip en de oever?



6**

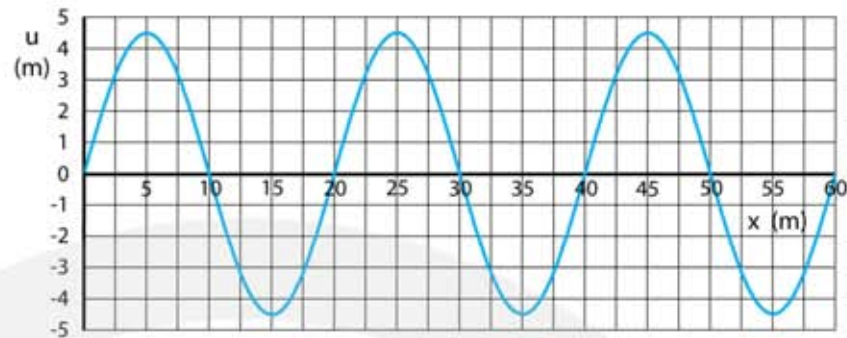
In de figuur zie je een het (u, x)-diagram van een golf.

a Bepaal de golflengte.

b Bepaal de amplitude.

De golfsnelheid is 840 m/s.

c Hoe groot is de frequentie?



7**

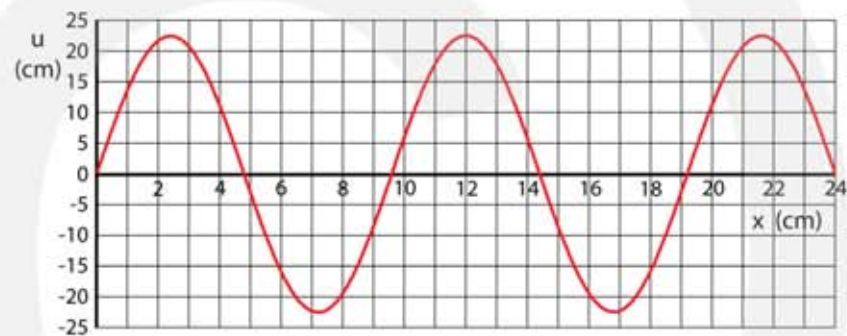
In de figuur zie je een het (u, x)-diagram van een golf.

a Bepaal de golflengte.

b Bepaal de amplitude.

De frequentie is 50 Hz.

c Hoe groot is de golfsnelheid?



8***

In een koord beweegt een golf naar rechts. Van het koord zijn twee foto's gemaakt. Zie figuur. De onderste foto is 0,40 s later opgenomen dan de bovenste foto. De foto's laten het koord 20 keer verkleind zien.



a Bepaal de golflengte.

b Bepaal de golfsnelheid.

c Bereken de frequentie.

- d Hoe lang heeft punt A getrild?
- e Hoeveel tijd er is verstreken tussen het moment waarop A in trilling is gebracht en het moment waarop de onderste opname is gemaakt.

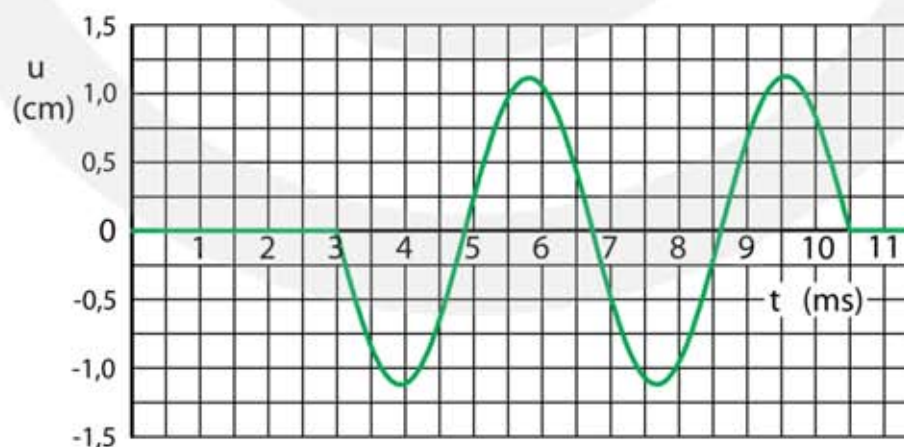
9*** Een zeebeving is een aardbeving onder water. Door een zeebeving kan een tsunami worden veroorzaakt. Een tsunami die ontstaat in Hawaï doet er 12,5 uur over om de kust van Zuid-Amerika te bereiken en heeft dan een afstand van 9000 km afgelegd.

- a Bereken de golfsnelheid van de tsunami.

De golfsnelheid is recht evenredig met de wortel van de waterdiepte: $v_{\text{golf}} = C \cdot \sqrt{d}$. C is een vast getal. Als de golf in ondiep water komt verandert de golflengte maar de frequentie blijft hetzelfde.

- b Leg uit waarom de frequentie niet verandert.
- c Leg uit of in ondiep water de golflengte groter of kleiner wordt.

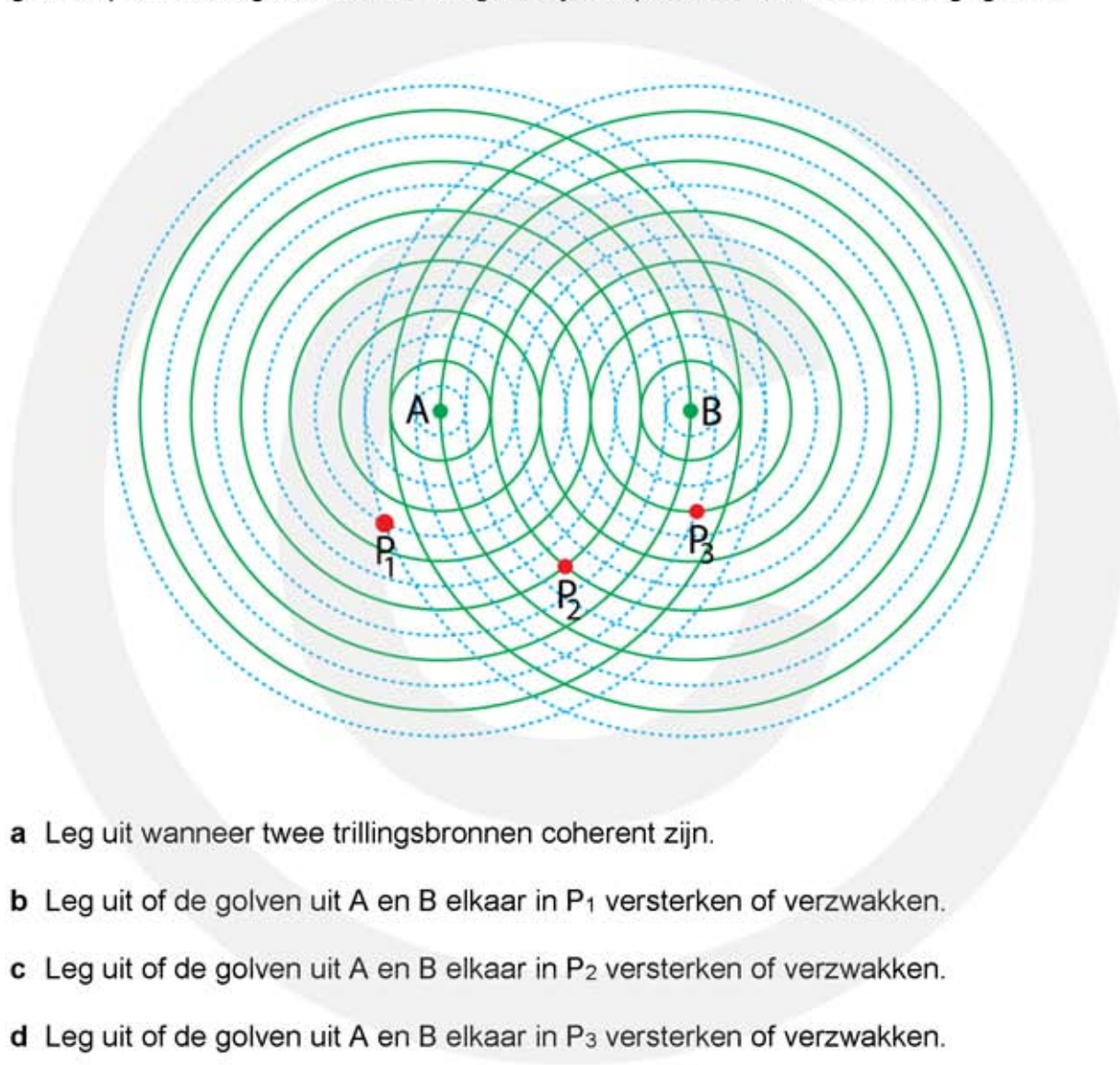
10**** Tussen de punten A en B is een koord gespannen. Punt A begint op $t = 0$ te trillen en voert slechts twee volledige trillingen uit. Hierdoor ontstaat een lopende transversale golf in het koord. Op het $t = 3,0$ ms bereikt de golf punt P dat 1,8 m vanaf A ligt. Het (u, t) -diagram van punt P is weergegeven in de figuur. Een positieve uitwijking u is naar boven gericht.



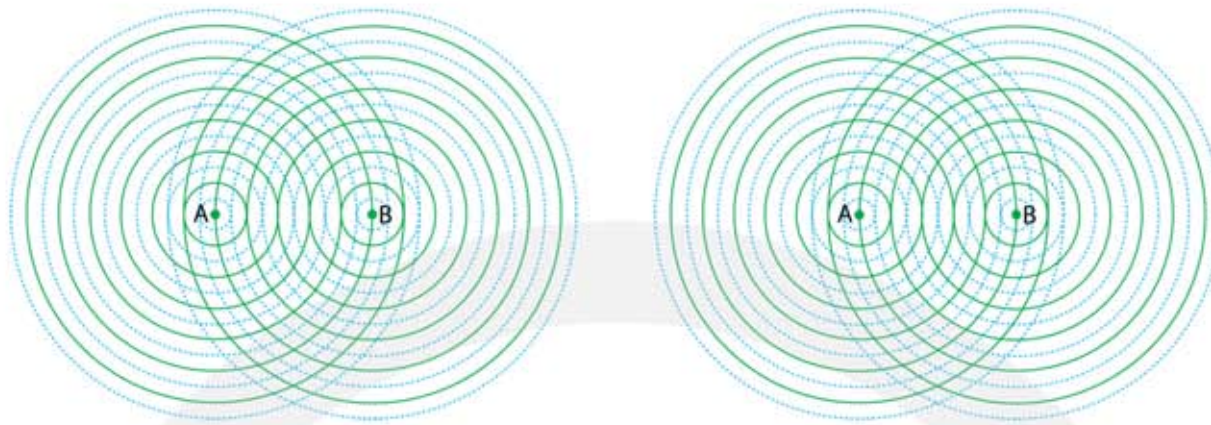
- a Bereken of A op $t = 0$ omhoog of omlaag begon te bewegen.
- b Bepaal de amplitude van de lopende golf.
- c Bepaal de golflengte van de lopende golf.
HINT bereken eerst de golfsnelheid en bepaal daarna de frequentie

9.4 Interferentie

- 1**** In de figuur zie je het golfpatroon veroorzaakt door twee coherente trillingsbronnen A en B. In de figuur zijn de groene getrokken cirkels golfbergen en de blauwe gestreepte cirkels golfdalen. In de figuur zijn de punten P_1 , P_2 en P_3 aangegeven.



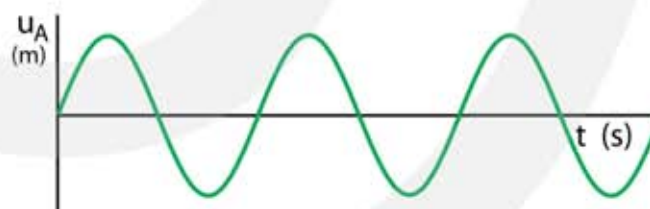
- a Leg uit wanneer twee trillingsbronnen coherent zijn.
 - b Leg uit of de golven uit A en B elkaar in P_1 versterken of verzwakken.
 - c Leg uit of de golven uit A en B elkaar in P_2 versterken of verzwakken.
 - d Leg uit of de golven uit A en B elkaar in P_3 versterken of verzwakken.
- 2**** In de figuur zie je het golfpatroon veroorzaakt door twee coherente trillingsbronnen A en B. In de figuur zijn de groene getrokken cirkels golfbergen en de blauwe gestreepte cirkels golfdalen.
- a Schets de buiklijnen in het linker figuur.
 - b Schets de knooplijnen in het rechter figuur.



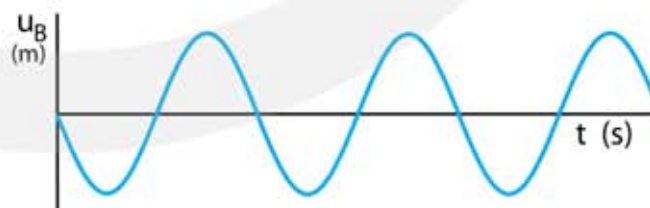
3*** Het patroon van buiklijnen en knooplijnen kan worden beïnvloed.

- Leg uit hoe het patroon verandert als de frequentie van de trillingsbronnen toeneemt en de golfsnelheid gelijk blijft. **HINT** gebruik $v_{\text{golf}} = f \cdot \lambda$
- Leg uit hoe het patroon verandert als de golfsnelheid toeneemt en de frequentie gelijk blijft. **HINT** gebruik $v_{\text{golf}} = f \cdot \lambda$

4*** In de figuur zie je (u, t) -diagrammen van punt P. Het bovenste diagram hoort bij de golf veroorzaakt door bron A. Het onderste diagram hoort bij de golf veroorzaakt door bron B.



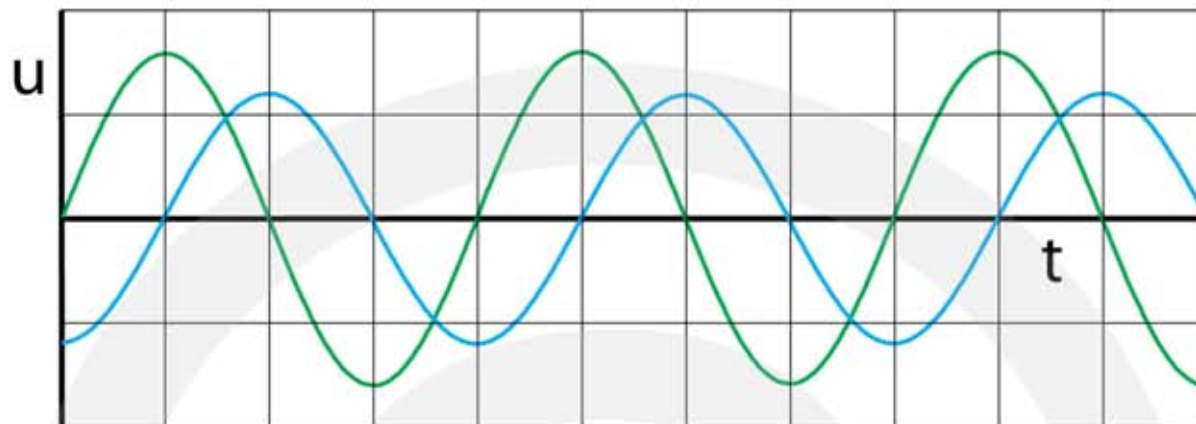
- Ligt punt P op een buiklijn of op een knooplijn?



- Schets het (u, t) -diagram in punt P veroorzaakt door de bronnen A en B samen.



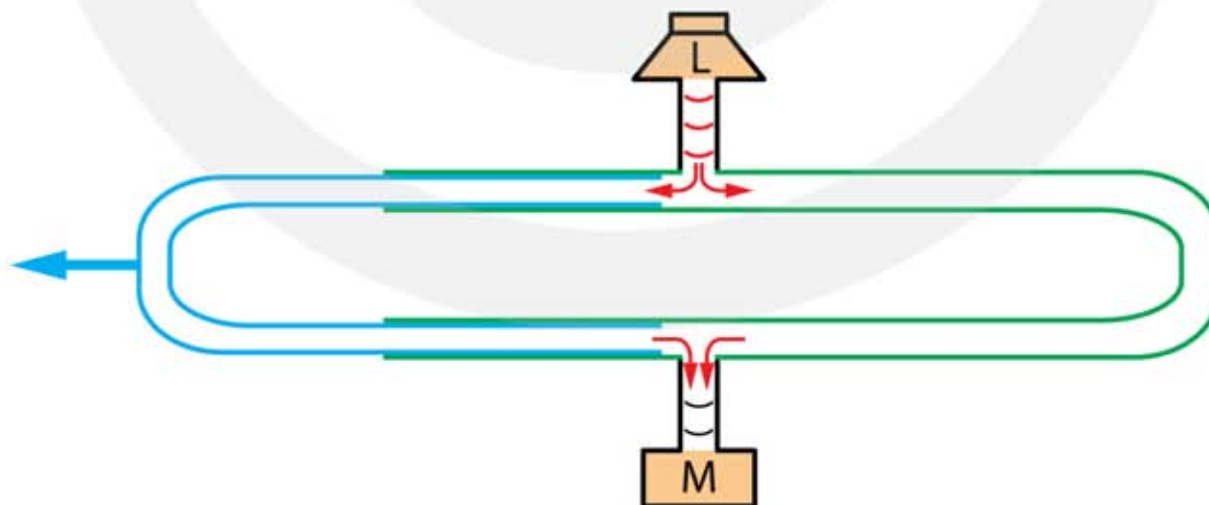
- 5**** In de figuur zie je (u, t) -diagrammen van punt P. De groene grafiek met de grootste amplitude hoort bij de golf veroorzaakt door bron A. De blauwe grafiek met de kleinste amplitude hoort bij de golf veroorzaakt door bron B.



- a Ligt punt P op een buiklijn, op een knooplijn of tussen een buiklijn en een knooplijn in?
 HINT als twee golfbergen tegelijk aankomen ligt P op een buiklijn en als een golfberg tegelijk aankomt met een golfdal ligt P op een knooplijn
- b Schets in de figuur het (u, t) -diagram veroorzaakt door de bronnen A en B samen.

6**** **Toestel van Quincke**

In de figuur zie je het toestel van Quincke. Met dit toestel heeft Georg Hermann Quincke eind 19^e eeuw de voorplantingssnelheid van geluid in lucht bepaald.



Het toestel van Quincke bestaat uit twee pijpen die, net als bij een trombone, in elkaar schuiven. Bovenin is een opening, waarop luidspreker L is aangesloten. Onderin is een andere opening met microfoon M.

Als de geluidsgolven bij de vertakking komen worden ze gesplitst. De helft gaat linksom en de andere helft rechtsom. Bij de microfoon komen de golven weer samen.

De golven die linksom gaan leggen een grotere afstand af dan de golven rechtsom. Als het verschil in afstand gelijk is aan de golflengte versterken de golven elkaar.

- a** Leg dit uit.
- b** Wat gebeurt er met de golven als het verschil in afstand gelijk is aan de helft van de golflengte?

De frequentie van het geluid is 500 Hz. De golfsnelheid van geluid is 343 m/s.

- c** Hoe groot is het verschil in afstand als de golven elkaar versterken?
- d** Hoe groot is het verschil in afstand als de golven elkaar uitdoven?
- e** Hoever moet de linkerbuis worden uitgetrokken om voor de eerste keer uitdoving te krijgen?
- f** Hoever moet de linkerbuis worden uitgetrokken om voor de tweede keer uitdoving te krijgen?

9.5 Geluid

1** Je gehoor is het gevoeligst voor geluid met een frequentie van $4,5 \cdot 10^3$ Hz.

a Bereken de trillingstijd van je trommelvlies als je deze frequentie hoort.

De hoogste toon die je kunt horen heeft een frequentie van 20 kHz en de laagste toon een frequentie van 20 Hz.

b Bereken de trillingstijd van je trommelvlies als je de hoogste toon en als je de laagste toon hoort.

2** Een stemvork trilt met 261,63 Hz (muzieknoot c1). De snelheid van geluid in lucht bij 20 °C is 343 m/s.

a Bereken de golflengte in lucht bij een temperatuur van 20°C.

In de winter is de temperatuur gedaald tot 0 °C.

b Leg uit of de stemvork bij deze temperatuur hogere toon, een lagere toon of dezelfde toonhoogte geeft.

De snelheid van geluid in lucht bij 0 °C is 332 m/s.

c Bereken de golflengte in lucht bij een temperatuur van 0 °C.



3** Een blokfluit maakt een toon met een golflengte van 780 mm. De temperatuur is 20 °C. De snelheid van geluid in lucht bij 20 °C is 343 m/s.

a Bereken de frequentie van de toon.

Op een warme dag is de temperatuur opgelopen tot 40 °C. De snelheid van geluid in lucht bij 40 °C is 354 m/s.

b Bereken de golflengte van dezelfde toon in millimeter.



4** Een dolfijn maakt een fluitend geluid met een frequentie van 800 Hz. De geluidssnelheid in zeewater is 1510 m/s.

a Bereken de golflengte van deze toon in zeewater.

De snelheid van geluid in lucht bij 20 °C is 343 m/s.

b Bereken de golflengte van deze toon in lucht bij een temperatuur van 20 °C.

5** Ultrasoon geluid heeft een frequentie hoger dan 20.000 Hz. Mensen kunnen dit geluid niet horen. Dolfijnen communiceren met elkaar door ultrasone tonen te maken. Een dolfijn maakt op zeker moment een ultrasone toon met een golflengte van 25 mm. De geluidssnelheid in zeewater is 1510 m/s.

a Bereken de frequentie van deze toon in kHz.

Infrasoon geluid heeft een frequentie lager dan 20 Hz. Mensen kunnen dit geluid niet horen maar als het hard genoeg is wel voelen. Olifanten communiceren met infrason geluid van bijvoorbeeld 14 Hz. De snelheid van geluid in lucht bij 20 °C is 343 m/s.

b Bereken de golflengte van een toon van 14 Hz.



6*** Om te onderzoeken met welke snelheid geluid zich in ijzer voortplant, slaat Jan met een hamer op de spoorrails. Op 150 m afstand ligt Cato met één oor op de rails. Cato hoort vlak na elkaar twee klappen. De geluidssnelheid in lucht is 343 m/s. De geluidssnelheid in ijzer is 5100 m/s.

a Leg uit waarom ze niet één maar twee klappen hoort

b Bereken hoeveel tijd er zit tussen de klappen die Cato hoort.

Bij een tweede experiment boort Jan een gaatje in de rails. De boormachine heeft een toerental van 18000 toeren per minuut wat te horen is als fluittoon.

c Leg uit of Cato één of twee verschillende toonhoogten hoort.



- d Bereken de golflengte van de toon in ijzer
- e Bereken de golflengte van de toon in lucht.

7**** Op 6,0 km hoogte bevindt zich op plaats A een onweerswolk. Zie figuur. Plotseling springt er een bliksem uit de wolk naar de aarde en slaat in op punt B. De bliksem verwarmt de lucht waardoor er een harde knal (de donder) ontstaat. De geluids-snelheid in lucht is 343 m/s.

Vera bevindt zich op 3,0 km afstand van punt B. Zie figuur.

- a Bereken de afstand tussen Vera en punt A.

De tijd waarmee de bliksem van A naar B gaat is te verwaarlozen. Ook de tijd waarin het licht naar Vera gaat mogen we ook verwaarlozen.

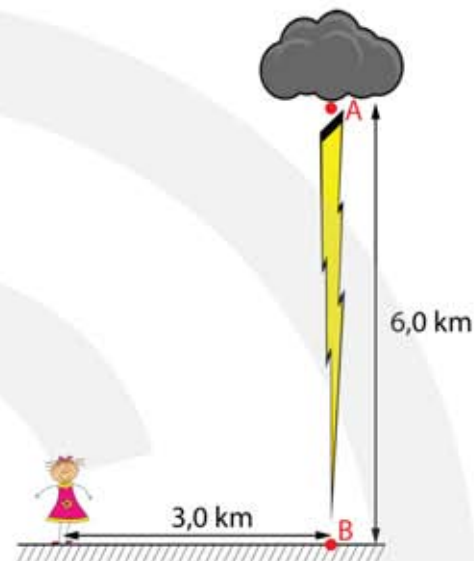
- b Hoeveel tijd zit er tussen het moment waarop Vera de bliksem ziet en het moment waarop ze de donder begint te horen?

Het valt Vera op dat de donder enige tijd aanhoudt.

- c Bereken hoe lang de donder aanhoudt.

In werkelijkheid duurt de donder langer dan het antwoord bij c.

- d Leg uit wat hiervan een reden kan zijn.



Afstand tot de geluidsbron bij bolvormige golven

8** Op een afstand van 15 meter is de intensiteit van de schoolbel $1,0 \text{ mW/m}^2$.

- a Wat is het uitgezonden vermogen van de schoolbel?
- b Bereken hoe groot de intensiteit is op 30 m afstand?
- c Bereken hoe groot de intensiteit is op 3,0 km afstand?



- 9***** Tijdens een onweer slaat de bliksem 10 meter van je vandaan in. Je hoort een keiharde knal met een intensiteit van $1,0 \text{ W/m}^2$. Je vriend woont een paar straten verderop op een afstand van 320 meter van de inslag.



- a Bereken het vermogen van de bron.
- b Bereken de intensiteit die je vriend hoort.

Het menselijk oor kan een intensiteit van 10^{-10} W/m^2 nog horen.

- c Is de knal op 100 km afstand nog hoorbaar?

- 10***** Je gaat naar een popconcert. Op 2,0 m afstand van de luidsprekers is het geluidsintensiteit 500 mW/m^2 . Om geen gehoorbeschadiging op te lopen mag de het geluidsintensiteit niet groter zijn dan $5,0 \text{ mW/m}^2$.



- a Bereken hoever je van de luidspreker moet gaan staan om geen gehoorbeschadiging op te lopen.

Je doet oordopjes in die 98% van de geluidsenergie tegenhouden.

- b Bereken met hoeveel W/m^2 door de oordopjes wordt doorgelaten als je op een afstand van 2,0 m van de luidspreker staat.
- c Bereken hoe dicht je met oordoppen bij de luidspreker kunt gaan staan om $5,0 \text{ mW/m}^2$ geluidsintensiteit te horen.

- 11****** Met een drillboor maakt Harrie een gat in een betonnen vloer en is daarbij blootgesteld aan een geluidsintensiteit van 100 mW/m^2 . Om geen gehoorbeschadiging te krijgen draag Harrie gehoorbescherming. Harry wil de geluidsintensiteit terugbrengen tot $100 \mu\text{W/m}^2$.

- a Bereken hoeveel procent van de geluidsenergie de gehoorbescherming moet tegenhouden.

De afstand tussen de drillboor en de oren van Harry is 1,5 m.



- b Bereken op welke afstand je van de drillboor moet gaan staan om zonder gehoorbescherming ook aan maximaal $100 \mu\text{W/m}^2$ te worden blootgesteld.

9.6 Staande golven

Twee vaste uiteinden (snaarinstrumenten)

- 1**** In de figuur zie je een staande golf in een aan twee kanten vastgemaakt koord.

- a** Geef in de figuur de plaatsen van de buiken en van de knopen aan.



Het koord heeft een lengte van 2,4 m.

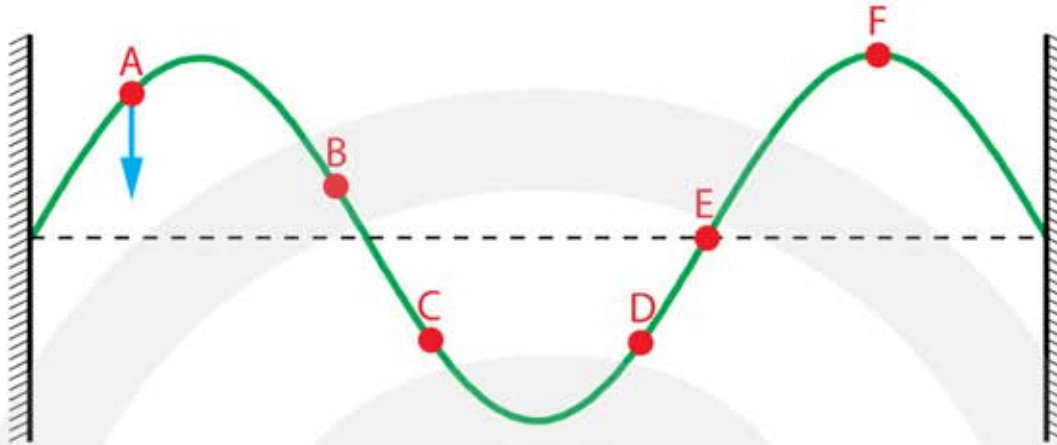
- b** Bepaal de golflengte van de staande golf.

- 2**** In de figuur zie je een staande golf in een aan twee kanten vastgemaakt koord. De stand van het koord op $t=0$ is te zien. Op $t=0$ heeft het koord zijn uiterste stand. Bij de vragen a t/m d ga je de stand van het koord op een later tijdstip tekenen. Gebruik steeds een andere kleur.



- a** Teken de stand van het koord op $t = \frac{1}{4} T$ (een kwart trillingstijd later).
b Teken de stand van het koord op $t = \frac{1}{2} T$ (een halve trillingstijd later).
c Teken de stand van het koord op $t = \frac{3}{4} T$ (een $\frac{3}{4}$ trillingstijd later).
d Teken de stand van het koord op $t = T$ (één trillingstijd later).

- 3*** In de figuur zie je een staande golf in een aan twee kanten vastgemaakt koord. De richting waarin punt A beweegt is met een pijl aangegeven.



- Teken de richtingen waarin de punten B t/m F bewegen.
- Zet de punten A t/m F in volgorde van snelheid. Ga van de hoogste naar de laagste snelheid.

Timo beweert dat er bij een staande golf momenten zijn waarin alle punten van het koord stilstaan. Lucas is het niet met Timo eens en beweert dat alleen de knopen stilstaan en alle andere punten altijd bewegen.

- Wie heeft er gelijk, Timo, Lucas of geen van beiden?

- 4***
- Teken in onderstaande figuur een staande golf met 1 buik.
 - Teken met een andere kleur een staande golf met 2 buiken.
 - Teken met een andere kleur een staande golf met 5 knopen.



5** In een aan twee kanten vastgemaakte snaar zijn 5 buiken.

a Welke boventoon heeft deze staande golf?

De grondtoon van de snaar heeft een frequentie van 200 Hz.

b Welke frequentie heeft deze boventoon met 5 buiken?

6*** Een snaar met een lengte van 60 cm trilt met een grondtoon van 300 Hz.

a Bereken de golflengte van de staande golf in de snaar.

b Bereken de golfsnelheid.

c Bereken de frequentie van de tweede boventoon.

d Bereken de frequentie van de vijfde boventoon.

7**** Een gitarist gebruikt soms een capo. Dit is een klem die op de snaren wordt gezet. Zie figuur.



a Met welk doel brengt een gitarist een capo aan?

Een gitaarsnaar met een lengte van 75 cm trilt met een grondtoon van 280 Hz. De gitarist zet een capo op 25 cm vanaf de kop van de gitaar (waar de stemknoppen zitten).

b Bereken de frequentie van de grondtoon waarmee de snaar met capo gaat trillen.
HINT bereken eerst de golfsnelheid

De gitarist wil een grondtoon maken van 500 Hz.

c Op welke plaats, gerekend vanaf de kop van de gitaar, moet hij de capo zetten?

8*** Een viool is een snaarinstrument. De A-snaar trilt met een frequentie van 440 Hz. De golven in de snaar hebben een snelheid van 290 m/s.

- a** Bereken de lengte van de snaar.
HINT bereken eerst de golflengte

Met je vinger kun je een snaar afklemmen, zodat deze korter wordt. Een violist wil een octaaf hoger spelen. De frequentie is dan 880 Hz.

- b** Op welke plaats moet de violist de snaar afklemmen?

De violist wil met dezelfde snaar een toon maken met een frequentie van 587 Hz. De snaar trilt tussen de vinger en de kam midden op de viool. Zie figuur.

- c** Op welke afstand van de kam moet hij de snaar afklemmen?



9**** Een piano is een snaarinstrument. Zie figuur.



Om een piano te stemmen worden de snaren strakker of minder strak gespannen.

- a** Leg uit of bij het stemmen van een piano de lengte van de snaar verandert.

Om een snaar met een hogere frequentie te laten trillen moet de golfsnelheid in de snaar groter worden gemaakt.

- b** Leg uit waarom dit het geval is.

Voor een snaar geldt de volgende formule:

$$v_{\text{golf}} = \sqrt{\frac{F_s \cdot \ell}{m}}$$

- v_{golf} is de golfsnelheid (m/s)
- F_s is de spankracht van de snaar (N)
- ℓ is de lengte van de snaar (m)
- m is de massa van de snaar (kg)

Victor beweert dat je de spankracht kleiner moet maken om de snaar hoger te stemmen. Mats beweert dat je de spankracht groter moet maken.

c Leg uit wie er gelijk heeft, Victor, Mats of geen van beiden.

Twee losse uiteinden (orgelpijp)

10**

In de figuur zie je drie pijpen die aan beide kanten open zijn.

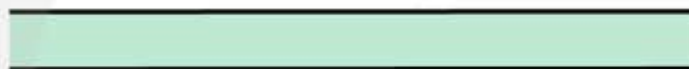


1^e

a Geef met letter B de plaatsen van de buiken en met letter K de plaatsen van de knopen aan voor de 1^e, de 2^e en de 3^e boventoon.



2^e



3^e

De tweede boventoon heeft een frequentie van 300 Hz.

b Bereken de frequentie van de grondtoon.

c Bereken de frequenties van de 1^e en van de 3^e boventoon.

11****

In de figuur zie je een sopraanblokfluit.



a Leg uit waarom je door alle gaatjes dicht te maken de laagste toon krijgt.

De laagste toon van de fluit is een C met een frequentie van 523 Hz. Een blokfluit heeft twee open uiteinden. De bovenkant van de fluit begint bij de inkeping. Bij 20 °C is de golfsnelheid in lucht 343 m/s.

b Bereken hoe lang de fluit is van de inkeping tot het uiteinde aan de rechterkant.

c Welke gaatjes moet je dicht houden als je een G speelt met een frequentie van 784 Hz?

- 12***** In de Sint Bavokerk (Grote Kerk) in Haarlem bevindt zich het indrukwekkende Müllerorgel uit 1738. Aan de zijkanten zijn twee "pedaaltorens", waarin pijpen van bijna 11 meter lang staan opgesteld.



De grondtoon uit deze pijpen geeft de toon C0 met een frequentie van 16,35 Hz.

- a** Leg uit of je deze toon kunt horen.

Een orgelpijp heeft twee open uiteinden. De onderkant van de pijp begint bij de inkeping. Bij 20 °C is de golfsnelheid in lucht 343 m/s.

- b** Bereken de lengte van de langste orgelpijp van de inkeping tot het uiteinde.

De hoogste toon van het orgel (E3) heeft een frequentie van 1318,5 Hz.

- c** Bereken de lengte van de kortste orgelpijp van de inkeping tot het uiteinde.

Het orgel heeft 5000 pijpen verdeeld over 64 registers. Met deze registers kunnen verschillende klanken worden gemaakt.

- d** Leg uit hoe verschillende registers verschillende klanken kunnen maken.

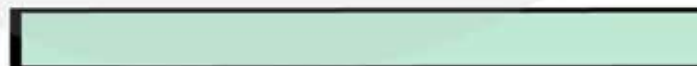
Een vast en een los uiteinde

- 13***** In de figuur zie je drie pijpen die aan één kant dicht zijn en aan één kant open.

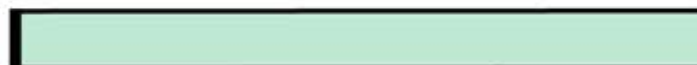


1^e

- a** Geef met letter B de plaatsen van de buiken en met letter K de plaatsen van de knopen aan voor de 1^e, de 2^e en de 3^e boventoon.



2^e



3^e

De eerste boventoon heeft een frequentie van 300 Hz.

- b** Bereken de frequentie van de grondtoon.

- c** Bereken de frequenties van de 2^e, de 3^e en de 4^e boventoon.

14** In een luchtkolom zitten 3 knopen en 3 buiken.

- a Heeft deze luchtkolom twee open uiteinden of één open en één dicht uiteinde?
- b Welke boventoon is aanwezig in de buis?

15*** Een buis met een open en een dicht uiteinde heeft een lengte van 60 cm. Voor het open uiteinde wordt een luidspreker geplaatst. Bij 20 °C is de golfsnelheid in lucht 343 m/s.



- a Bereken de frequentie van de tweede boventoon in de buis.
HINT bereken eerst de golflengte
- b Geef met letter B de plaatsen van de buiken en met letter K de plaatsen van de knopen aan voor de 4^e boventoon.
- c Bereken de frequentie van de vierde boventoon in de buis.

16*** De laagste toon die een hoorn kan voortbrengen bij kamertemperatuur is de B van 61,74 Hz. De plaats waar de lippen trillen is een dicht uiteinde. Het andere uiteinde is open. Bij 20 °C is de golfsnelheid in lucht 343 m/s.



- a Hoe lang is de buis van een hoorn?
HINT bereken eerst de golflengte
- b Bereken de frequentie van de eerste boventoon. *HINT bereken eerst de golflengte*

Als je een ventiel indrukt wordt de buis korter.

- c Leg uit of de toon hierdoor lager of hoger wordt.

Als de hoornist een tijdje aan het spelen is krijgt de lucht in zijn instrument een hogere temperatuur. Hierdoor neemt de golfsnelheid in lucht toe.

- d Leg uit of de toon hierdoor lager of hoger wordt.

17**** Een panfluit bestaat uit een aantal buisjes die aan de onderkant dicht zijn. Bij een panfluit heeft de langste buis een lengte van 32,8 cm. Bij 20 °C is de golfsnelheid in lucht 343 m/s.

- a** Bereken de frequentie van de grondtoon bij kamertemperatuur.

HINT bereken eerst de golflengte

- b** Zoek op welke muzieknoot dit is.

De frequentie die het kortste buisje voortbrengt is vier keer zo groot als die van de het langste buisje.

- c** Bereken de lengte van het kortste buisje.

Door hard over een buisje te blazen kan de fluitist de eerste boventoon maken.

- d** Bereken de frequentie van de eerste boventoon van het langste buisje.

HINT bereken eerst de golflengte

- e** Zoek op welke muzieknoot dit is.

- f** Bereken de frequentie van de eerste boventoon van het kortste buisje.

HINT bereken eerst de golflengte



18**** De frequentie van de eerste boventoon is drie keer zo groot als de frequentie van de grondtoon.

- a** Zijn er twee gesloten uiteinden, twee open uiteinden, één open en één gesloten uiteinde, of geen van drie?

De frequentie van de tweede boventoon is vier keer zo groot als de frequentie van de grondtoon.

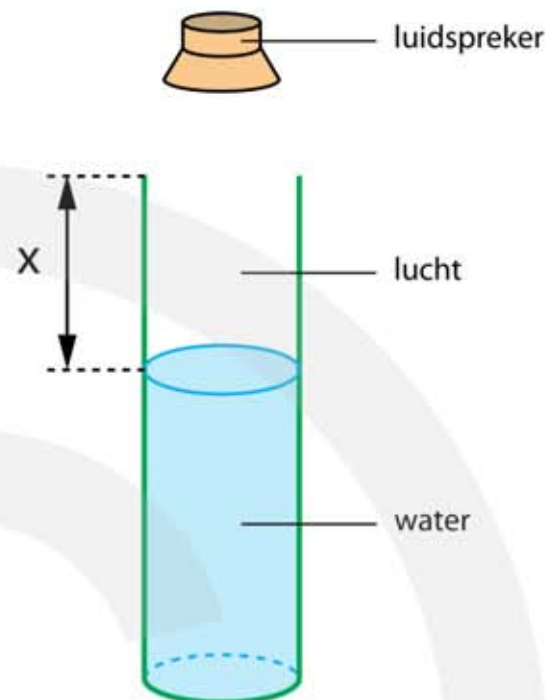
- b** Zijn er twee gesloten uiteinden, twee open uiteinden, één open en één gesloten uiteinde, of geen van drie?

- 19****** Een luidspreker brengt een toon van 500 Hz voort en wordt boven een buis geplaatst, die gedeeltelijk met water is gevuld. Zie figuur 1.

De afstand van het wateroppervlak tot de bovenkant van de buis noemen we x . Bij bepaalde waarden van x ontstaan staande golven in de luchtkolom boven het water.

Op het grensvlak van water en lucht ontstaat altijd een knoop. De buik die bij het open uiteinde ontstaat, ligt 2,4 cm boven de rand van de buis. Bij 20 °C is de golfsnelheid in lucht 343 m/s.

Figuur 1



- a** Bereken de kleinste afstand x waarbij resonantie optreedt. Geef de uitkomst in drie cijfers achter de komma.

Vervolgens laten we het waterniveau zakken totdat opnieuw resonantie optreedt.

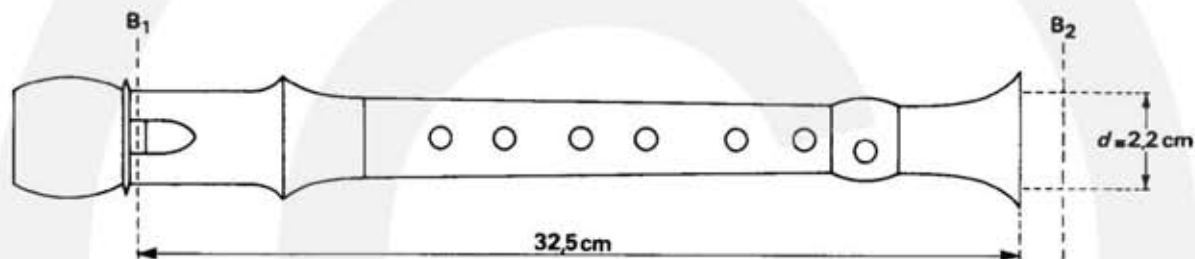
- b** Bereken hoeveel cm het waterniveau hierbij is gedaald.

Examenvragen havo

Blokfluit

De lucht in een blokfluit is in staande longitudinale golfbeweging wanneer een toon wordt voortgebracht. Staande longitudinale golven hebben bij dit vraagstuk dezelfde eigenschappen als staande transversale golven. Als de laagste toon wordt voortgebracht zijn er slechts twee buiken. De ene buik bevindt zich bij B_1 .

De andere buik B_2 valt niet samen met het uiteinde van de fluit, maar ligt iets buiten de opening, namelijk op een afstand van $0,30 \cdot d$ van de opening. De diameter d van de opening is 2,2 cm. Zie figuur 1. Tussen B_1 en B_2 bevindt zich één knoop. De temperatuur van de lucht in de blokfluit is 20 °C.



Figuur 1

- 4p **a** Bereken de frequentie van de laagste toon.

De geluidssnelheid in de lucht is recht evenredig met de wortel uit de absolute temperatuur T volgens de formule:

$$v_{\text{golf}} = C \cdot \sqrt{T}$$

- 2p **b** Bereken de constante C in deze formule. **HINT** vergeet niet de eenheid

De frequentie van de toon die een blokfluit voortbrengt wordt dus beïnvloed door de temperatuur. Een blokfluitspeler wil echter dat een bepaalde toon elke keer dezelfde frequentie heeft. Het is mogelijk om de frequentieverandering ten gevolge van een temperatuurverandering tegen te gaan door het mondstuk van de fluit iets verder in de fluit te duwen of er iets verder uit te trekken. Op deze wijze wordt de afstand van B_1 tot B_2 iets kleiner of iets groter. Als na een tijdje blazen de temperatuur van de lucht in de fluit enigszins is gestegen, moet de blokfluitspeler de afstand van B_1 tot B_2 veranderen.

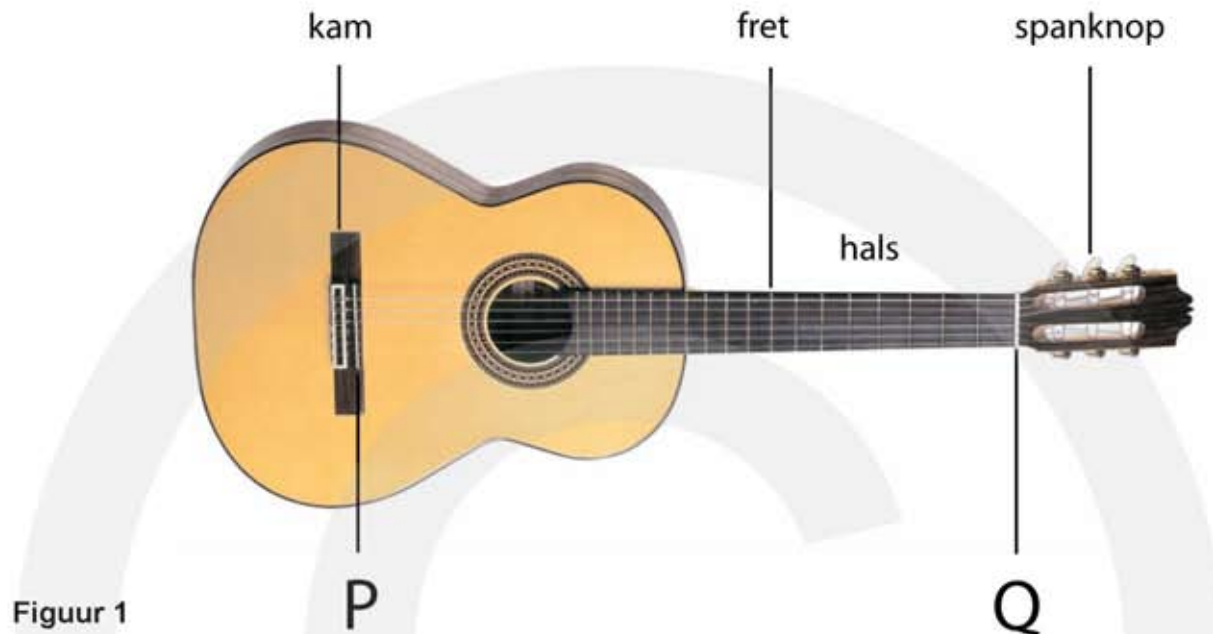
- 3p **c** Leg uit of deze afstand groter dan wel kleiner moet worden gemaakt.

Na een tijdje blazen is de temperatuur van de luchtkolom gestegen van 20 tot 25 °C.

- 5p **d** Breken hoever het mondstuk moet worden verschoven om ervoor te zorgen dat de laagste toon dezelfde frequentie behoudt.

Gitaar

Een gitaar heeft 6 snaren. Elke snaar is gespannen tussen de kam op de klankkast en één van de spanknoppen aan het eind van de hals. Zie figuur 1.



Figuur 1

De bovenste snaar in figuur 1 is de E-snaar. Deze wordt zo gespannen dat hij bij aanslaan een toon voortbrengt met een frequentie van 330 Hz. Deze toon noemt men de 'E'. Van deze snaar komt dan het gedeelte PQ in trilling. De afstand $PQ = 65,0$ cm. We nemen steeds aan dat de snaar uitsluitend in de grondtoon trilt.

- 3p **a** Bereken de snelheid waarmee de trilling zich in de E-snaar voortplant als deze is aangeslagen.

Op de hals van de gitaar is een aantal metalen ribbels aangebracht. Zo'n ribbel noemt men een fret. Door de snaar met de vingers tegen een fret aan te drukken, verkleint men de lengte van het trillende deel van de snaar. De spankracht in de snaar verandert daarbij niet, zodat de voortplantingssnelheid van de trillingen ook niet verandert. Door de E-snaar tegen een bepaalde fret aan te drukken, kan bij het aanslaan tussen de kam en de fret een toon met een frequentie van 494 Hz verkregen worden.

- 4p **b** Geef in figuur 1 met een pijl de fret aan die bij een toon van 494 Hz hoort. Licht je keuze toe met een berekening.

Aardbeving

Bij een aardbeving lopen er longitudinale en transversale golven door de aarde.

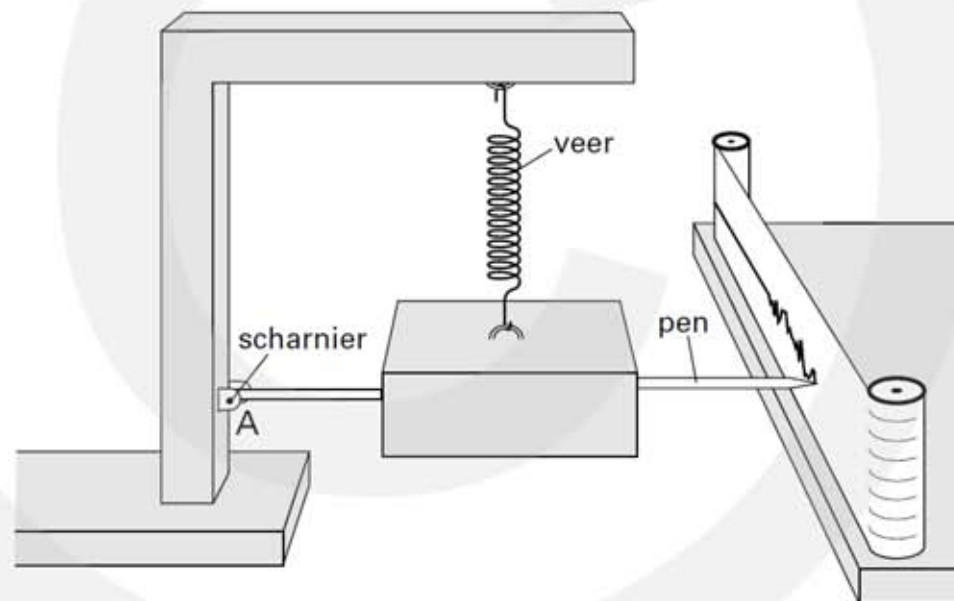
- 2p **a** Noem het verschil tussen longitudinale en transversale golven.

De transversale golven hebben in een bepaald gesteente een voortplantingssnelheid van 3,4 km/s. De frequentie van deze golven is 1,2 Hz.

- 3p **b** Bereken de golflengte van de transversale golven in dit gesteente.

Aardbevingstrillingen worden geregistreerd door een seismograaf. In figuur 1 is een eenvoudig type seismograaf afgebeeld. Een zwaar blok hangt aan een veer en kan zonder wrijving draaien om scharnier A. Het stangetje en scharnier zorgen ervoor dat het blok alleen in verticale richting kan trillen. Bij een aardbeving mag het systeem van veer en blok niet gaan resoneren met de aardbevingstrillingen. Daartoe moet de eigenfrequentie van de veer met blok klein zijn ten opzichte van de frequentie van de aardbevingstrillingen.

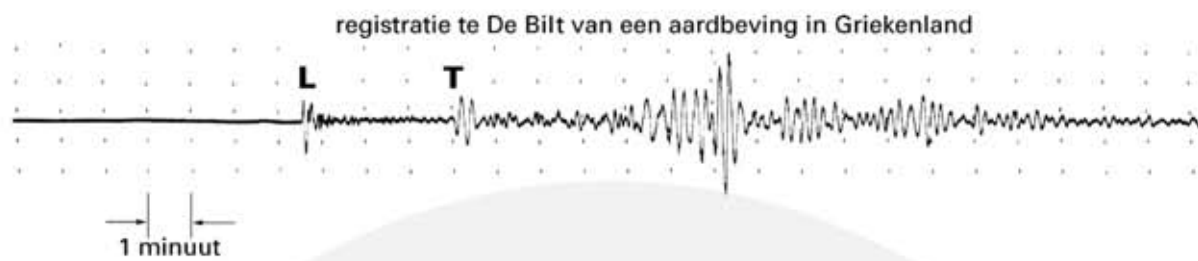
Figuur 1



De eigenfrequentie van de veer met het blok is 0,37 Hz. De massa van het blok is 4,2 kg.

- 4p **c** Bereken de veerconstante van de veer.

De longitudinale golven hebben een andere voortplantingssnelheid dan de transversale. Door dit snelheidsverschil komen de golven niet tegelijk op een meetstation aan. In figuur 2 is een registratie van een aardbeving in Griekenland afgebeeld, gemeten door het KNMI in De Bilt. Op het tijdstip aangegeven met L kwamen de longitudinale golven aan, op het tijdstip T de transversale. De longitudinale golven komen dus het eerst aan. Aangenomen mag worden dat beide soorten golven dezelfde weg hebben gevolgd.

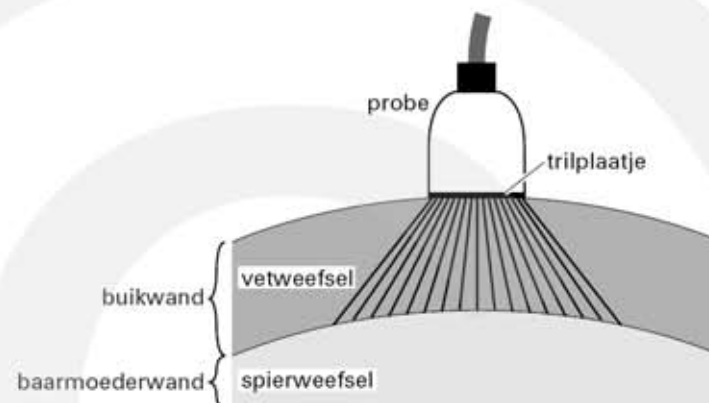


De aardbeving vond plaats op een afstand van $2,3 \cdot 10^3$ km. De gemiddelde snelheid van de transversale golven is 3,4 km/s.

- 4p **d** Bepaal de gemiddelde snelheid van de longitudinale golven. Geef het antwoord in twee significante cijfers.

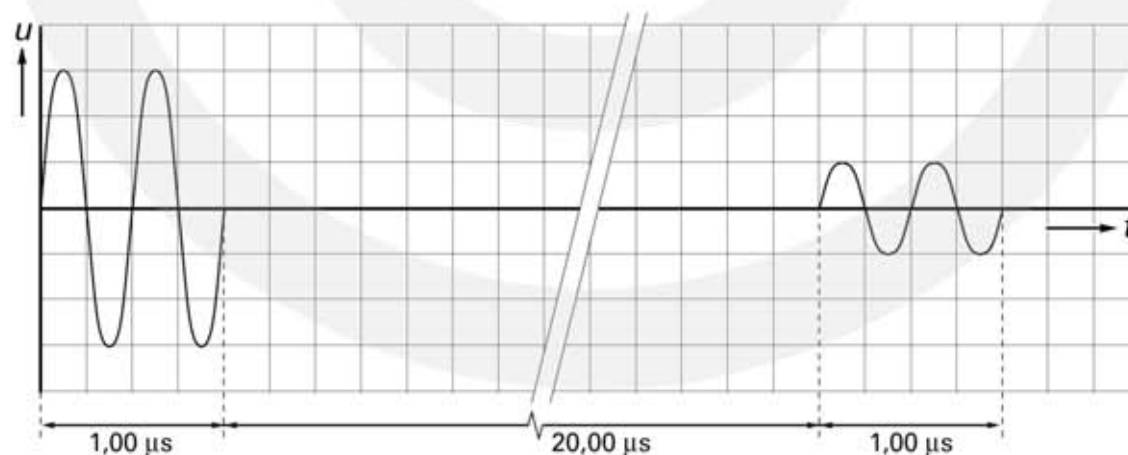
Echoscopie

Echoscopie is een medisch onderzoek waarbij ultrageluid wordt toegepast. Ultrageluid is geluid waarvan de frequentie groter is dan 20 kHz. In figuur 1 is een zogenaamde probe, die op de buik van een zwangere vrouw wordt gehouden, schematisch weergegeven. In het trilplaatje van de probe zit een groot aantal kristallen, die kort na elkaar in verschillende richtingen een signaal uitzenden en ook weer opvangen. In de figuur zijn de buikwand en baarmoederwand vereenvoudigd weergegeven. We nemen aan dat de buikwand alleen uit vetweefsel bestaat en de baarmoederwand alleen uit spierweefsel.



Figuur 1

Het signaal dat loodrecht naar beneden wordt uitgezonden, kan worden gebruikt om de dikte van de vetweefsellag te meten. Het signaal gaat door het vetweefsel en wordt gedeeltelijk teruggekaatst door de wand van de baarmoeder. In figuur 2 is een (uitwijking, tijd)-diagram getekend van het trilplaatje. Geregistreerd zijn het loodrecht naar beneden uitgezonden signaal en het weer opgevangen signaal.



Figuur 2

De geluidssnelheid in het vetweefsel is 1450 m/s.

- 3p **a** Bepaal met behulp van figuur 2 de golflengte van dit ultrageluid in het vetweefsel. Geef de uitkomst in drie significante cijfers.
- 3p **b** Bepaal met behulp van figuur 2 hoe dik het vetweefsel is tussen de probe en de baarmoederwand.

Kerkorgel (aangepast)

In figuur 1 is een kerkorgel afgebeeld. Nynke en Tessa maken een werkstuk over de natuurkundige aspecten van het orgel. De organist is bereid hen te helpen. Hij zegt:

Als ik op een toets druk, wordt lucht in een bepaalde pijp geblazen. De toon die jullie horen, ontstaat omdat de lucht in die pijp in resonantie komt. De lengte van de pijp is daarbij belangrijk. Een lange pijp geeft een lagere toon dan een korte pijp. Voor de toonhoogte is ook van belang of de bovenkant van de orgelpijp open of gesloten is.

Voor de tonen van een orgelpijp die aan de bovenkant gesloten is, geldt:

$$\ell = (2n - 1) \cdot \frac{1}{4} \lambda$$

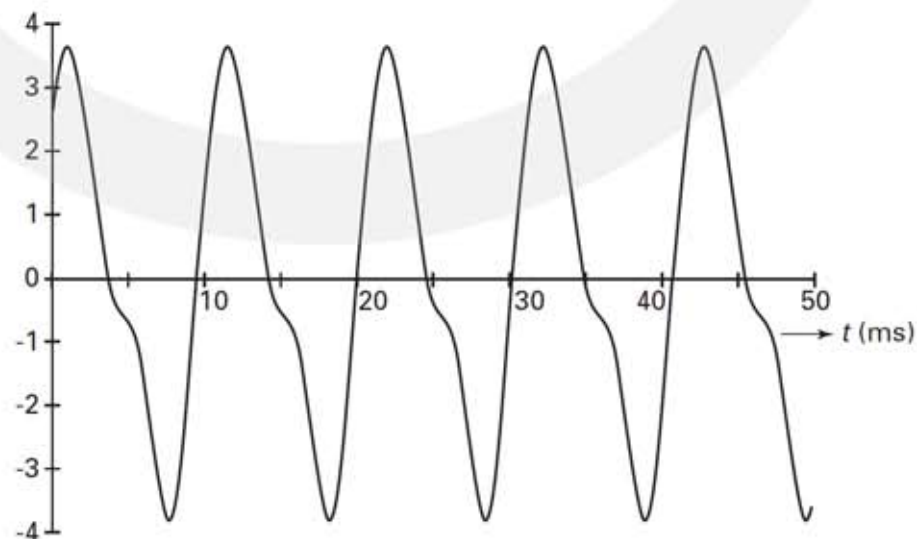
Voor de tonen van een orgelpijp die aan de bovenkant open is, geldt:

$$\ell = n \cdot \frac{1}{2} \lambda$$

n is een geheel getal:

grondtoon: $n = 1$, 1^e boventoon: $n = 2$, 2^e boventoon: $n = 3$, etc.

Nynke vraagt de organist om een willekeurige toon te laten horen. Ze registreert het geluid met een geluidssensor die op een computer is aangesloten. Zie onderstaande Figuur 2.



Figuur 2



Figuur 1

4p a Bepaal de frequentie van deze toon.

Het valt hen op dat het beeld niet sinusvormig is. Nynke zegt: "Volgens mij komt dat door de boventonen." Tessa zegt: "Ik denk dat het orgel niet goed gestemd is."

- 2p **b** Wie van hen heeft gelijk? Licht je mening toe.

De organist speelt een lage a; dat is een toon met een frequentie van 220 Hz. Tessa meet dat de orgelpijp die deze toon als grondtoon produceert 38,7 cm lang is. Ze constateert dat de orgelpijp aan de bovenkant gesloten is.

- 4p **c** Bereken met deze gegevens de geluidssnelheid in lucht.

In figuur 3 is een gesloten orgelpijp getekend. Daarnaast zijn op dezelfde schaal drie open pijpen A, B en C getekend.

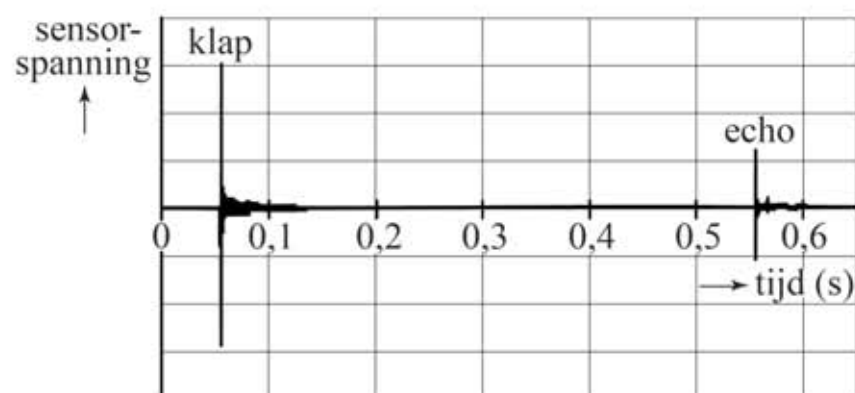
- 3p **d** Leg uit welke van de drie open pijpen A, B of C dezelfde grondtoon heeft als de gesloten pijp.

Figuur 3



Echoput

Nienke staat bij een echoput. Wanneer zij boven de put een geluid maakt, wordt het weerkaatst tegen het water in de put. Even later hoort zij de echo. Het wateroppervlak bevindt zich 86 m onder de rand van de put. Nienke wil dit controleren met een geluidsmeting. Zij geeft een harde klap en meet hoe lang het duurt voordat de echo van de klap te horen is. Zij voert de meting uit met behulp van een geluidssensor. De computer registreert de sensorspanning. Zie figuur 1.



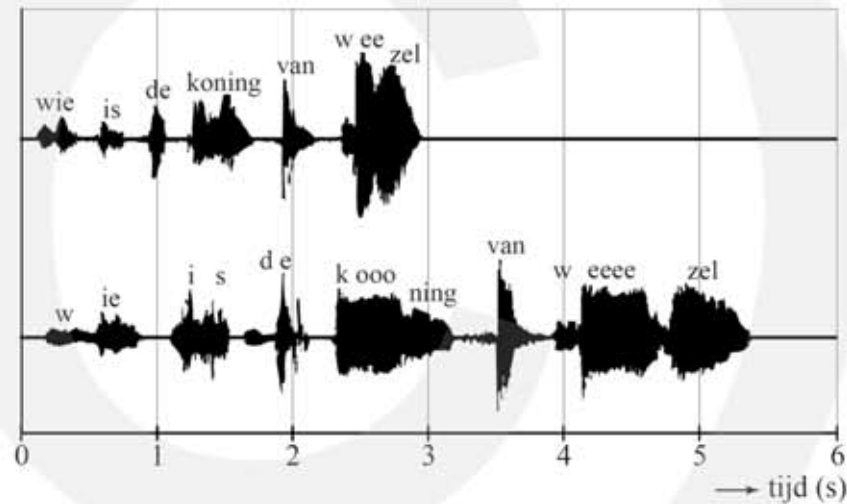
Figuur 1

- 4p **a** Toon aan dat deze meting bevestigt dat het wateroppervlak zich 86 m onder de rand van de put bevindt. Neem aan dat de temperatuur van de lucht in de put 20 °C is.

Nienke laat een steen in de put vallen. Even nadat de steen het wateroppervlak raakt, hoort ze de plons.

- 4p **b** Bereken de tijd tussen het loslaten van de steen en het horen van de plons. Verwaarloos de luchtwrijving op de steen.

Als je iets in de put roept, is de echo zwakker dan het oorspronkelijke geluid. Daarom hoor je de echo pas als je zelf bent uitgesproken. Nienke roept in de echoput: "Wie is de koning van Wezel?" Zij wil graag als antwoord horen: "ezel". Het antwoord dat de put geeft, hangt echter af van de snelheid waarmee de vraag wordt uitgesproken. In figuur 2 is een registratie te zien van een snelle en van een langzame uitspraak.



Figuur 2

- 3p **c** Leg uit welke van deze twee uitspraken, de onderste of de bovenste, het beste "ezel" als antwoord geeft.

Nienke vraagt zich af of het mogelijk is om in de echoput geluidsresonantie op te wekken. De put lijkt wat vorm betreft op een orgelpijp die aan de onderkant dicht en aan de bovenkant open is. Zij maakt geluiden van verschillende toonhoogte boven de put maar zij hoort geen resonantie optreden.

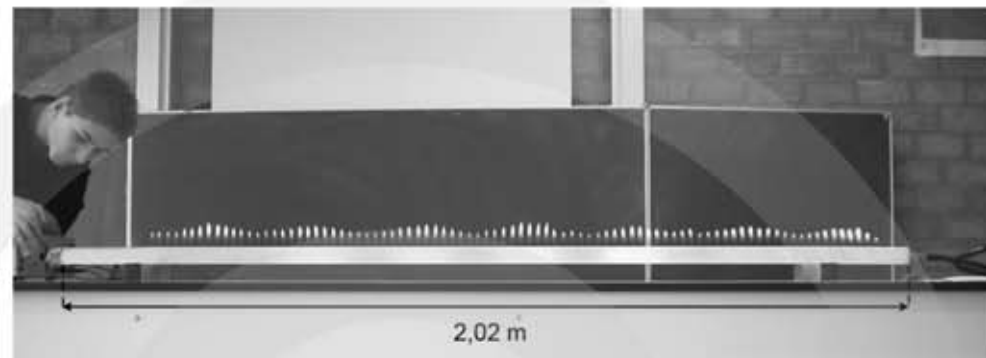
- 4p **d** Geef hiervoor een verklaring. Bereken daartoe eerst de frequentie van de grondtoon van deze 'orgelpijp'.

Buis van Rubens

Marc wil staande geluidsgolven zichtbaar maken met behulp van een buis van Rubens. Dit is een metalen buis waarin aan de bovenkant gaatjes zijn geboord. Het ene uiteinde van de buis is afgesloten met een luidspreker en het andere uiteinde van de buis is op de aardgasleiding aangesloten. De luidspreker is verbonden met een toongenerator.

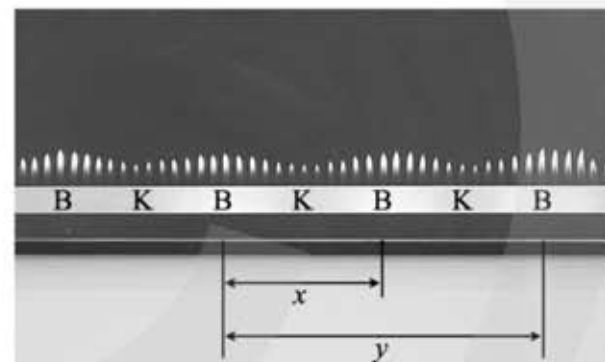
Nadat de buis geheel gevuld is met aardgas steekt hij het gas dat uit de gaatjes stroomt met een aansteker aan¹). Alle vlammetjes zijn dan even hoog. Marc zet de toongenerator aan en draait aan de frequentieknop. Bij bepaalde frequenties ontstaat in de buis een staande geluidsgolf waardoor de vlammen niet meer allemaal even hoog staan. Zie de foto van figuur 1.

Figuur 1



Op de plaatsen waar de vlammen een maximale lengte hebben, bevindt zich in de buis een buik (B). Op de plaatsen waar de vlammen een minimale lengte hebben, bevindt zich in de buis een knoop (K). Zie figuur 2. Hierin zijn de afstanden x en y aangegeven.

Figuur 2



- 1p **a** Welke van de afstanden, x of y , is gelijk aan één hele golflengte?

Op het moment dat de foto genomen is, produceerde de luidspreker een toon van 890 Hz. De hele buis, zoals afgebeeld in figuur 1, is 2,02 m lang.

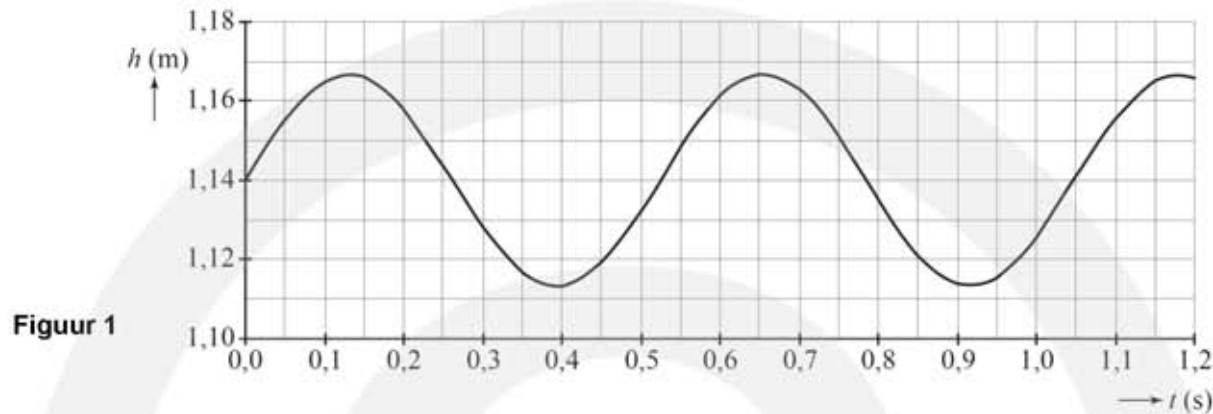
- 4p **b** Bepaal de voortplantingssnelheid van het geluid in aardgas.

Wanneer het gas een tijd gebrand heeft, verdwijnt het golfpatroon van de vlammetjes. Kennelijk treedt er dan geen resonantie meer op. Door de frequentie van de toongenerator iets te veranderen, kan Marc weer hetzelfde golfpatroon als in figuur 1 terugkrijgen. De voortplantingssnelheid van geluid neemt toe als de temperatuur stijgt.

- 4p **c** Beantwoord de volgende vragen:
- Geef een verklaring voor het verdwijnen van de resonantie.
 - Moet Marc een grotere of juist een kleinere frequentie instellen om hetzelfde golfpatroon weer terug te krijgen? Licht je antwoord toe.

Rugzakgenerator

Als een wandelaar met een rugzak loopt, gaat de rugzak op en neer. Daardoor verandert tijdens iedere stap de hoogte van het zwaartepunt van de rugzak. De wandelaar loopt met constante snelheid. Figuur 1 is de grafiek van de hoogte van het zwaartepunt van de rugzak als functie van de tijd.



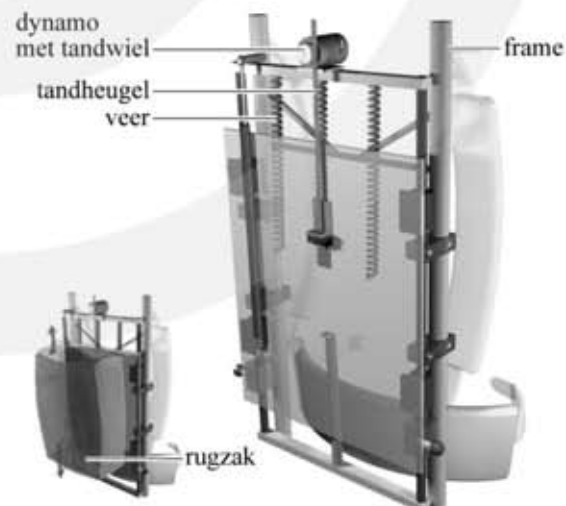
De massa van de rugzak is 29 kg.

- 3p **a** Bepaal met behulp van figuur 1 het verschil tussen de maximale en minimale zwaarte-energie van de rugzak.

Bij iedere stap legt de wandelaar 0,70 m af. Eén periode in het diagram komt overeen met één stap.

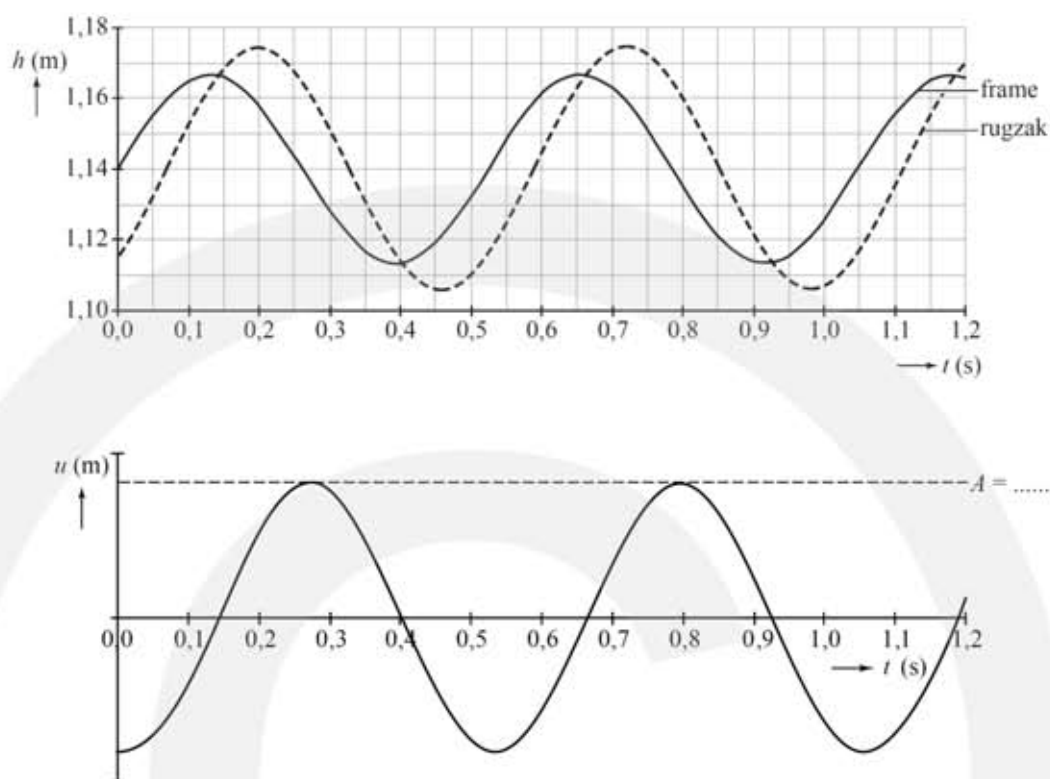
- 3p **b** Bepaal met behulp van figuur 1 de horizontale snelheid van de wandelaar in km/h.

Een Amerikaanse bioloog heeft een manier bedacht om uit de verticale beweging van de rugzak elektrische energie te halen. Hij ontwierp een rugzakgenerator. Deze bestaat uit een frame waarop een dynamo is bevestigd. Aan het frame dat vastzit aan de rug van de wandelaar, wordt de rugzak verend opgehangen. Tijdens het lopen beweegt de rugzak ten opzichte van het frame en drijft, via een zo geheten tandheugel, de dynamo aan. Zie figuur 2.



Figuur 2

De wandelaar gaat met deze rugzak op dezelfde manier lopen als hiervoor. Figuur 3 is de grafiek van de hoogte van het frame en van de rugzak als functie van de tijd.



Figuur 3

Het verschil van de twee grafieken geeft weer hoe de rugzak beweegt ten opzichte van het frame. De grootte van de amplitude A van de trilling die de rugzak ten opzichte van het frame uitvoert, kan worden bepaald met behulp van figuur 3.

- 2p **c** Bepaal met behulp van figuur 3 de grootte van de amplitude A . Licht toe hoe je de grootte van A hebt bepaald.

De dynamo levert een gemiddeld vermogen van 3,7 W.

- 3p **d** Bereken de hoeveelheid energie die is opgewekt na 3,5 uur lopen.

De veerconstante van de twee veren samen is gelijk aan $4,1 \cdot 10^3$ N/m.
De massa van de rugzak is nog steeds 29 kg.

- 3p **e** Bereken de eigenfrequentie van de rugzak.

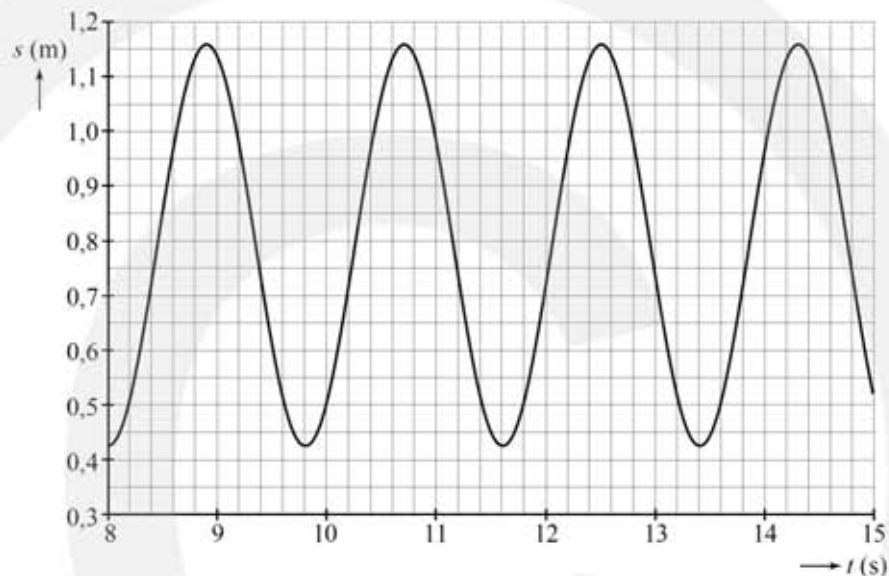
De rugzakgenerator wekt de meeste energie op als de eigenfrequentie van de rugzak gelijk is aan de stapfrequentie. Stel dat aan deze voorwaarde is voldaan. De wandelaar gaat nu sneller lopen door zijn stapfrequentie op te voeren. Om weer de maximale energieoverdracht naar de generator te krijgen, zou de wandelaar de massa van de rugzak moeten veranderen.

- 2p **f** Moet hij daarvoor de massa groter of kleiner maken? Licht je antwoord toe.

Loopbrug

Professor Barrett en twee studenten staan op een loopbrug over een brede sloot. De brug is alleen aan beide oevers vastgemaakt. De professor en de studenten bewegen ritmisch op en neer met een bepaalde frequentie. Daardoor komt de hele brug in trilling.

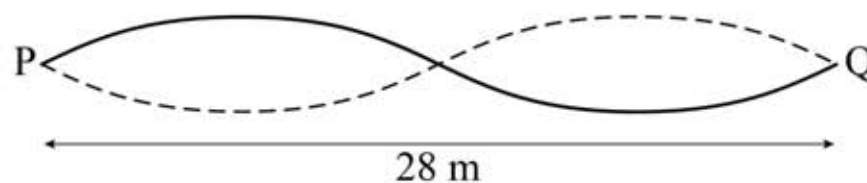
Aan de beweging van de rechthoek van professor Barrett is een videometing gedaan. Het bijbehorende (s, t) -diagram zie je in figuur 1.



Figuur 1

- 2p **a** Bepaal de amplitude van de trilling die de voet van de professor uitvoert.
- 2p **b** Bepaal de frequentie van de trilling die de voet van de professor uitvoert.
- 4p **c** Bepaal maximale snelheid van de voet van de professor.

De brug is ook van opzij gefilmd terwijl de professor en de studenten weer met een frequentie van 0,56 Hz op en neer bewegen. Door de beweging van de professor en de studenten worden in de brug lopende golven opgewekt die tegen de vaste uiteinden P en Q van de brug weerkaatsen. Bij deze frequentie ontstaat dan de staande golf waarvan in figuur 2 de uiterste standen schematisch zijn weergegeven. Deze figuur is niet op schaal. De lengte van de brug is 28 m.



Figuur 2

- 3p **d** Bereken de voortplantingssnelheid van de lopende golven in de brug.

Op een andere film bewegen de professor en de studenten met een hogere frequentie op en neer. Op die manier kunnen ze staande golven in de brug opwekken met meer buiken en knopen. Ze gaan met een frequentie van 0,84 Hz bewegen.

- 3p **e** Teken in figuur 3 de uiterste standen van de staande golf die bij deze frequentie in de brug ontstaat. Licht je tekening toe met een berekening of een redenering.

Figuur 3

P •

• Q

Aan beide kanten van de brug staat een waarschuwingsbord met de tekst:

*Indien u met meerdere personen tegelijk
over deze brug wilt lopen, is het veiliger
om uit de pas te lopen!
(uit de pas lopen betekent niet in de hetzelfde ritme lopen)*

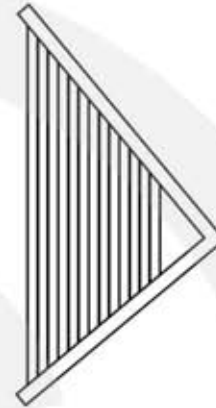
- 1p **f** Leg uit waarom dat een goed advies is.

Harp

Al in het oude Egypte speelde men harp. Op de foto in figuur 1 zie je een Egyptenaar een hoekharp bespelen. In figuur 2 is de hoekharp schematisch getekend. De snaren van deze hoekharp zijn allemaal even dik, van hetzelfde materiaal en met dezelfde spankracht gespannen.



Figuur 1



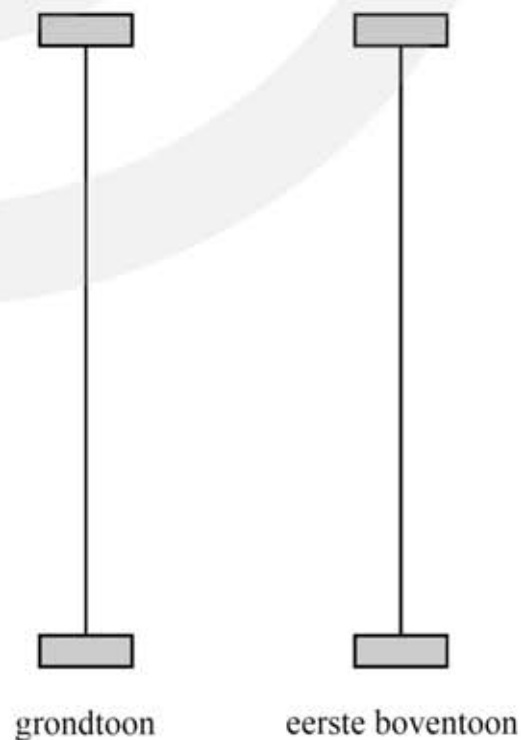
Figuur 2

Als een snaar wordt aangetokkeld, gaat hij trillen. De golfsnelheid in elke snaar is $4,0 \cdot 10^2$ m/s. Eén van de snaren heeft een lengte van 45 cm.

- 3p **a** Bereken de frequentie van de grondtoon van deze snaar.
- 2p **b** Leg uit of een langere snaar een hogere of een lagere grondtoon geeft.

Als een snaar trilt, kan de harpist de eerste boventoon laten horen door op de juiste plek de snaar met een vinger licht te dempen.

In figuur 3 is de snaar twee keer getekend.



Figuur 3

- 3p **c** Voer de volgende opdrachten uit:
- Geef in figuur 3 de plaats van de knoop/knopen (K) en buik/buiken (B) aan bij een snaar die trilt in de grondtoon.
 - Geef in figuur 3 de plaats van de knoop/knopen (K) en buik/buiken (B) aan bij een snaar die trilt in de eerste boventoon.
 - Geef in de tekening van de grondtoon met een pijltje aan waar de harpist de snaar licht gedempt heeft.

De golfsnelheid v in een snaar is te berekenen met $v = \sqrt{\frac{F_s \cdot \ell}{m}}$

Hierin is:

- F_s de spankracht (in N)
- ℓ de lengte van de snaar (in m)
- m de massa van de snaar (in kg)

- 3p **d** Laat zien dat $\sqrt{\frac{F_s \cdot \ell}{m}}$ dezelfde eenheid heeft als v .

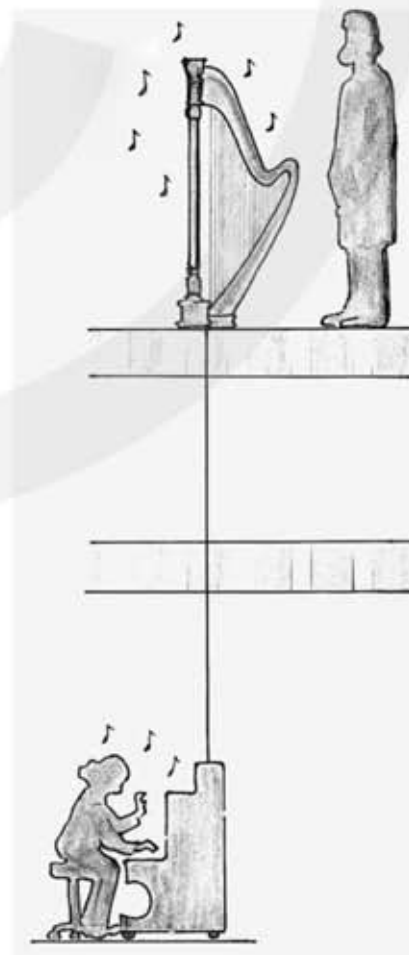
Tegenwoordig kan men snaren kopen die gemaakt zijn van staal of van nylon. We vergelijken een stalen snaar met een nylon snaar. Beide snaren zijn even lang, even dik en met dezelfde kracht gespannen.

- 3p **e** Welke snaar geeft de hoogste toon? Licht je antwoord toe.

Professor John Tyndall heeft in 1867 tijdens een lezing van het Royal Institution in Londen een harp op 'magische wijze' een wijsje laten spelen. In de vloer van de zaal was precies onder de harp een gat geboord. In dit gat paste een houten stok die in de kelder op de klankkast van een piano steunde en in de zaal contact maakte met de harp. Als er in de kelder op de piano werd gespeeld, leek het in de zaal alsof de harp uit zichzelf muziek begon te maken. Zie figuur 4.

- 2p **f** Beantwoord nu de volgende vragen:
- Op welk natuurkundig verschijnsel is deze demonstratie gebaseerd?
 - Wat is de rol van de houten stok bij deze demonstratie?

Figuur 4



Parasaurolophus

Hoewel er van dinosauriërs vrij veel bekend is, weten we van de meeste dino's weinig over het geluid dat ze maakten. Een uitzondering hierop is de Parasaurolophus. Deze dino was in het bezit van een grote hoorn boven op de schedel. Zie figuur 1. Deze hoorn diende als klankkast om het geluid te versterken.



Figuur 1

- 1p **a** Op welk natuurkundig verschijnsel is dit gebaseerd?

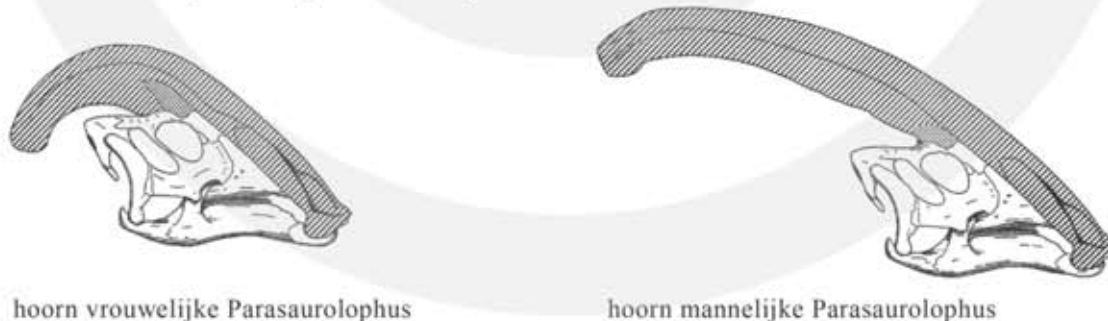
Bij een volwassen mannetje is de hoorn 1,8 m lang. Eén uiteinde van deze hoorn is open, het andere uiteinde is gesloten. De luchttemperatuur in de hoorn is 20 °C.

- 3p **b** Toon met een berekening aan dat de grondtoon die de dino met deze hoorn kon laten horen een frequentie had van 48 Hz.

Onderzoek heeft uitgewezen dat een mannelijke Parasaurolophus een toon kon produceren met een frequentie van $2,4 \cdot 10^2$ Hz. Dit is een boventoon van de grondtoon van 48 Hz.

- 3p **c** Beredeneer of dit de eerste, de tweede, de derde, de vierde of de vijfde boventoon is.

De vrouwelijke Parasaurolophus had ook een hoorn. Deze hoorn was korter dan die van een mannelijk exemplaar. Zie figuur 2



Figuur 2

- 2p **d** Leg uit of de grondtoon van een vrouwelijke Parasaurolophus hoger, lager of even hoog was als die van een mannelijk dier.

De dieren communiceerden met elkaar over grote afstanden. Het geluid dat zij daarbij maakten, passeerde veel bomen. Als een boom smaller is dan de golflengte van het geproduceerde geluid, kan het geluid de boom passeren.

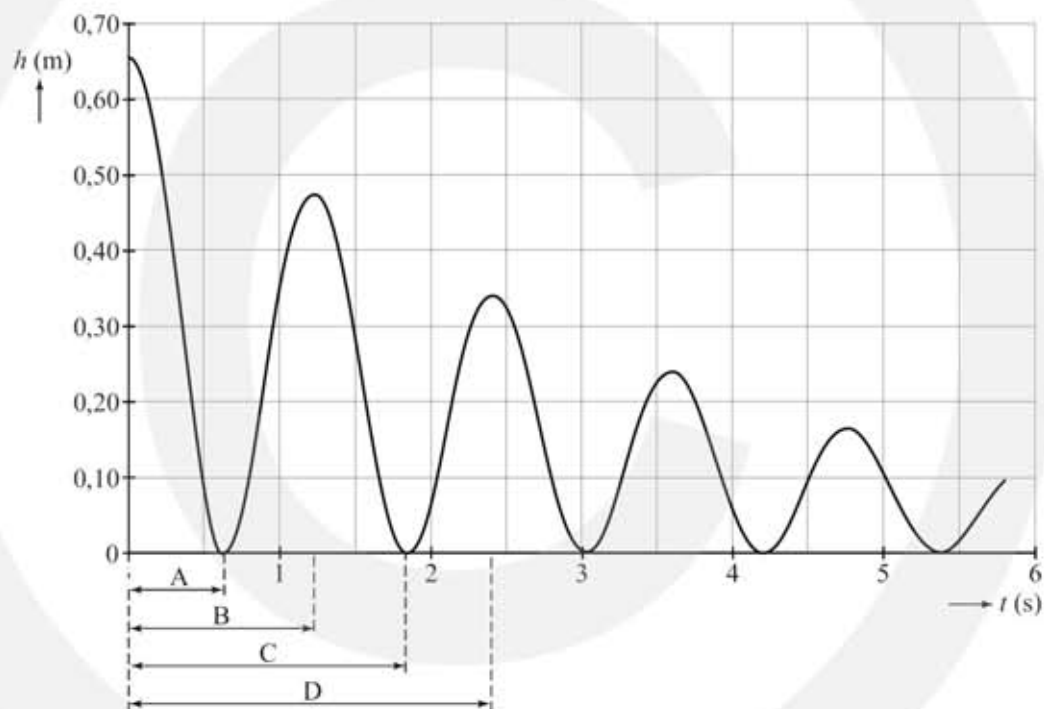
- 3p **e** Beredeneer of voor deze dieren de grondtoon of juist de boventonen het meest geschikt waren om in bossen te communiceren.

Railbaan

In een speeltuin staat een railbaan waarop een skateboard is bevestigd. Fermi stapt op het skateboard en beweegt heen en weer op de railbaan. Zie figuur 1. In figuur 2 is de hoogte van het skateboard als functie van de tijd weergegeven. De hoogte is gemeten ten opzichte van het laagste punt in de railbaan. Fermi startte op $t = 0$ s links op de railbaan.



Figuur 1



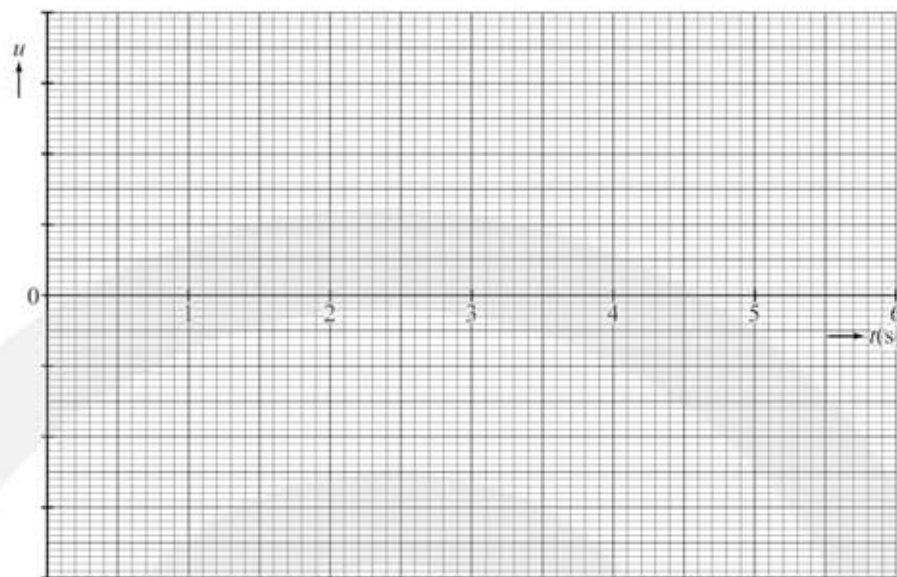
Figuur 2

De trillingstijd van de beweging is de tijd die verstrijkt vanaf $t = 0$ s tot het moment dat Fermi weer in het hoogste punt links is. In figuur 2 zijn vier tijdsintervallen aangegeven. Eén van deze tijdsintervallen is de trillingstijd.

- 2p **a** Leg uit welk tijdsinterval overeenkomt met de trillingstijd van deze beweging.

Het laagste punt op de railbaan is de evenwichtsstand van de trilling. De uitwijking u van trilling is de horizontale afstand tot de evenwichtsstand.

- 4p **b** Schets in figuur 3 het (u,t) -diagram van deze beweging tussen $t = 0$ s en $t = 5,5$ s. De schaalverdeling op de verticale as is niet van belang.



Figuur 3

In figuur 1 beweegt Fermi versneld omlaag. Hiervoor is een resulterende kracht in voorwaartse richting nodig. In de figuur op de uitwerkbijlage is deze kracht met een vectorpijl op schaal weergegeven. In de figuur is ook de zwaartekracht op Fermi met een vectorpijl op schaal weergegeven. De totale massa van Fermi en het skateboard is 31 kg.

5p

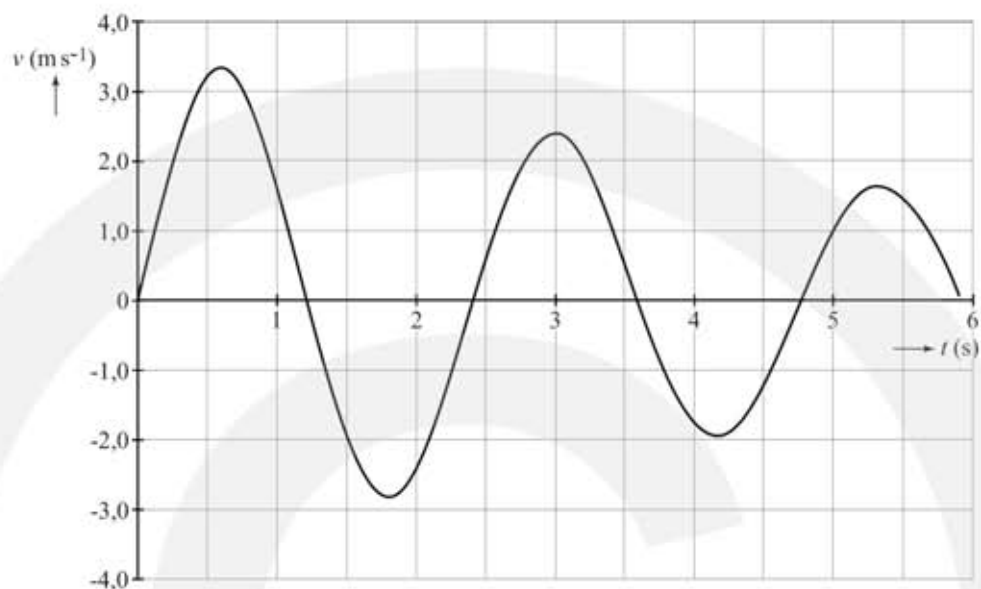
c Voer de volgende opdrachten uit:

- Construeer in figuur 4 de component van de zwaartekracht langs de railbaan.
- Bepaal met behulp van figuur 4 de grootte van de wrijvingskracht (in Newton) langs de railbaan op het moment van de foto.



Figuur 4

In figuur 5 staat het (v,t) -diagram van de beweging. Als Fermi van links naar rechts beweegt is de snelheid positief; als Fermi van rechts naar links beweegt is de snelheid negatief.



Figuur 5

Op een bepaald moment is Fermi voor de eerste keer op het hoogste punt van zijn beweging rechts op de railbaan.

- 3p **d** Bepaal met behulp van figuur 5 de afstand die hij dan langs de baan heeft afgelegd.

Slinger van Wilberforce

De slinger van Wilberforce bestaat uit een veer waar een blok aan hangt. Zie figuur 1. Als het blok verticaal omlaag getrokken wordt en dan wordt losgelaten, ontstaat er een bijzondere beweging. Eerst beweegt het blok op en neer en draait nauwelijks heen en weer. Het draaien neemt toe en het op en neer bewegen neemt af. Na een tijdje draait het blok alleen nog maar heen en weer en is de verticale trilling verdwenen. Vervolgens komt de verticale beweging weer langzaam op gang en neemt het draaien af totdat het blok alleen nog maar op en neer beweegt en niet meer heen en weer draait. Dit herhaalt zich net zo lang totdat het blok door demping tot stilstand komt.



Figuur 1

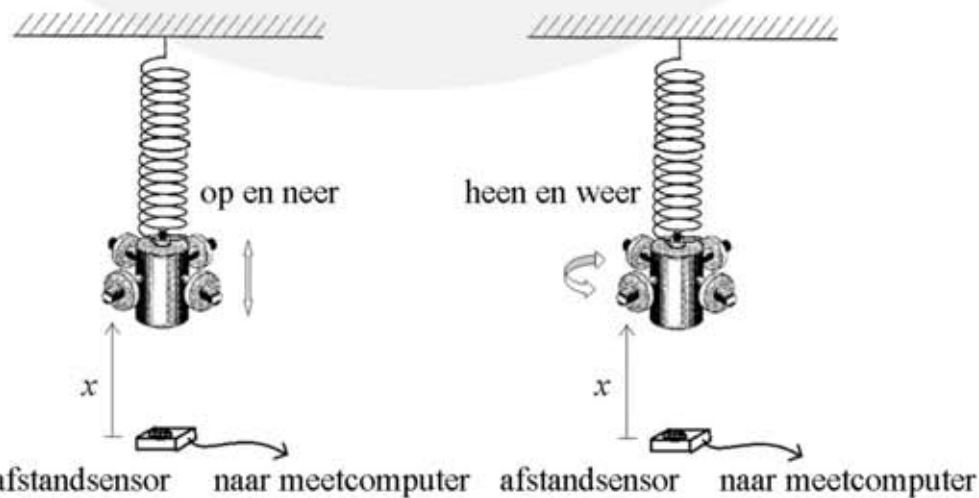
In de opstelling van figuur 1 heeft het blok een massa van 2,8 kg. De veerconstante van de veer is gelijk aan 49 N m^{-1} . Om de beweging te demonstreren, wordt het blok aan de veer voorzichtig 9,0 cm omlaag getrokken, maar nog niet losgelaten.

- 3p **a** Bereken de kracht van de veer die dan op het blok werkt.

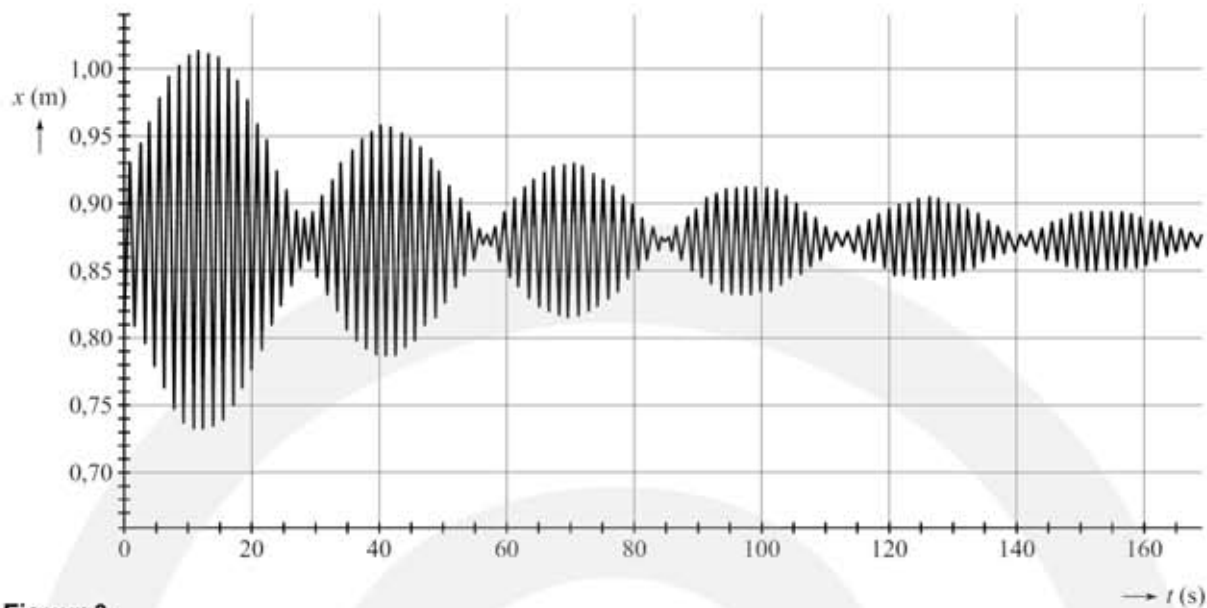
Als het blok wordt losgelaten, gaat de veer trillen met een frequentie van 0,67 Hz.

- 3p **b** Toon dit aan met behulp van een berekening.

Onder de slinger wordt een afstandssensor gelegd, zodat de afstand van de onderkant van het blok tot de sensor als functie van de tijd gemeten kan worden. Zie figuur 2. Het resultaat van zo'n meting is in figuur 3 in een (x,t) -diagram weergegeven.



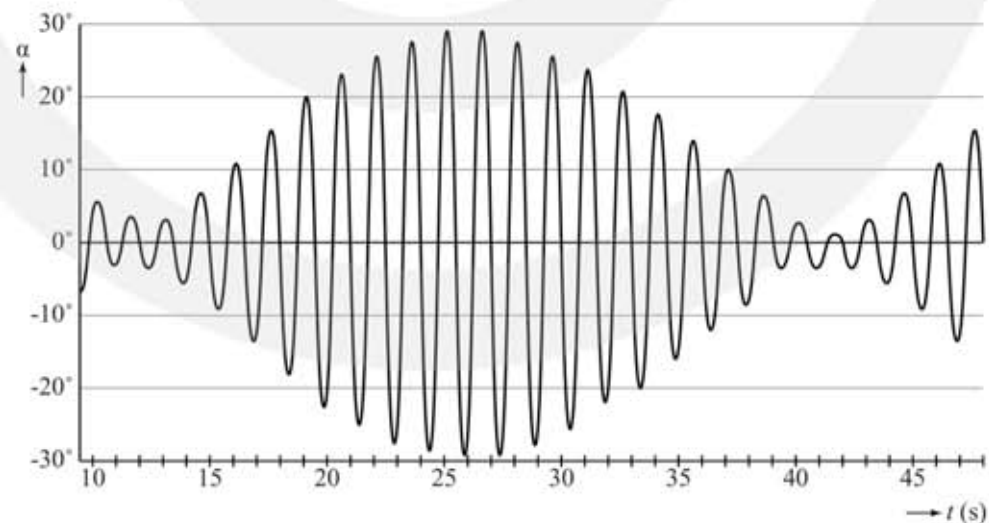
Figuur 2



Figuur 3

- 1p **c** Bepaal met behulp van figuur 3 de afstand van de onderkant van het blok tot de sensor, als het blok tot stilstand is gekomen.
- 2p **d** Geef figuur 3 met de letter V alle tijdstippen aan waarop het blok alléén verticaal op en neer beweegt en niet draait.

Met een draaihoeksensor wordt vervolgens de hoek waarover het blok draait als functie van de tijd gemeten. Het resultaat van deze meting is in figuur 4 weergegeven.



Figuur 4

- 4p **e** Beantwoord nu de volgende vragen:
- Bepaal met behulp van de figuur 4 de draaifrequentie van de slinger van Wilberforce. Licht je antwoord toe.
 - Leg uit of er bij de slinger van Wilberforce sprake is van resonantie.

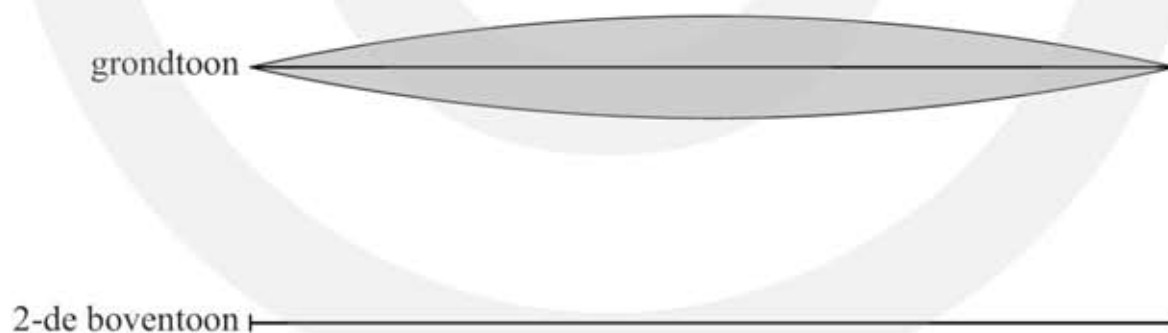
Vleugel

Een vleugel is een muziekinstrument met toetsen en snaren, zie figuur 1. Als een toets wordt ingedrukt slaat een houten hamertje (bekleed met vilt) tegen een strak gespannen snaar die vervolgens gaat trillen.



Figuur 1

De klank die je hoort bestaat uit de grondtoon en enkele boventonen. In figuur 2 is een snaar getekend die trilt in de grondtoon.



Figuur 2

- 2p **a** Geef in figuur 2 de plaats van de knopen en de buiken op deze snaar aan als de snaar trilt in de tweede boventoon.

Afhankelijk van de plek waar het hamertje de snaar raakt, zullen de verschillende boventonen wel of niet meeklinken. Stel dat het hamertje neerkomt op $\frac{1}{3}$ deel van de lengte van de snaar. De boventoon die op deze plek een knoop heeft, klinkt dan niet mee.

1p **b** Welke boventoon klinkt dan niet mee?

- A vierde boventoon
- B zevende boventoon
- C achtste boventoon
- D negende boventoon
- E zestiende boventoon

Aan de vorm van het instrument is te zien dat niet alle snaren even lang zijn. Zie figuur 1. De snaar die de hoogste toon voortbrengt heeft een lengte van 40 cm. De hoogste toon van de vleugel heeft een frequentie van 4186 Hz, de laagste frequentie is 32,70 Hz.

Veronderstel dat alle snaren even strak gespannen zijn, even dik zijn, en van hetzelfde materiaal zijn.

3p **c** Toon met een berekening aan dat de lengte die de langste snaar dan zou moeten hebben niet in een vleugel past.

De toonhoogte van een snaar hangt, behalve van de lengte, ook af van de spankracht in de snaar. Voor de voortplantingssnelheid v van de golven in de snaar geldt:

$$v = \sqrt{\frac{F_s \cdot \ell}{m}}$$

- F_s de spankracht in de snaar;
- m de massa van de snaar;
- ℓ de lengte van de snaar.

Om ervoor te zorgen dat de snaren die de lage tonen moeten voortbrengen toch in de vleugel passen, kun je verschillende maatregelen nemen. Hieronder staan hierover twee beweringen.

	bewering	juist	onjuist
1	De grondtoon van een snaar wordt lager als je de snaar strakker spant.		
2	Als een snaar van roestvrij staal vervangen wordt door een snaar van koper, wordt de grondtoon lager. (De spankracht en de diameter veranderen niet.)		

2p **d** Geef van elke bewering aan of deze bewering juist of onjuist is.

Eén van de snaren heeft een lengte van 90 cm en een massa van 5,7 g. De grondtoon van deze snaar is 220 Hz.

4p **e** Bereken de spankracht in deze snaar.

Het is belangrijk dat een vleugel goed gestemd is. Een pianostemmer kan daarvoor elke snaar precies de juiste spankracht geven. Voor de spankracht waarmee de snaar moet worden gespannen geldt:

$$F_s = \pi \rho \ell^2 d^2 f^2$$

Hierin is:

- ρ de dichtheid van het materiaal van de snaar;
- ℓ de lengte van de snaar;
- d de diameter van de snaar;
- f de frequentie waarmee de snaar moet trillen.

In tabel 15C van Binas is gegeven welke frequenties horen bij welke toetsen van een vleugel. Zo is te zien dat bij de noot a1 een frequentie hoort van 440 Hz.

Eén van de snaren is 80 cm lang, heeft een diameter van 0,94 mm en is gemaakt van roestvrij staal (zie Binas tabel 9). De spankracht in deze snaar is 949 N.

4p **f** Ga met een berekening na welke noot van de vleugel bij deze snaar hoort.