

10 Golven

VWO

10.1 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 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?

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

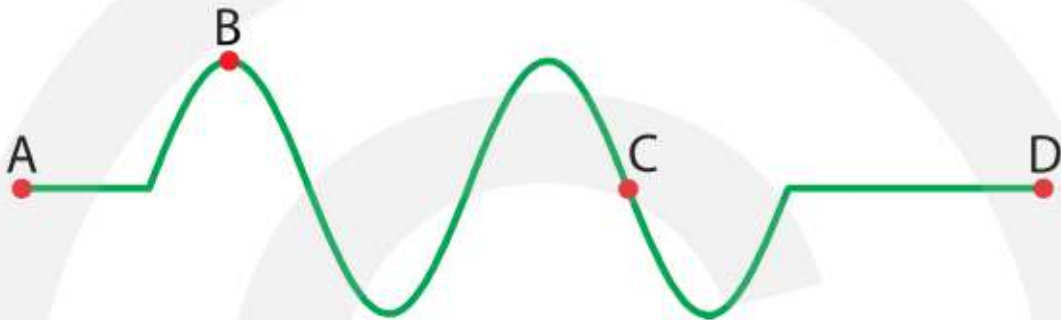
- a** Leg uit of de eendjes hierdoor horizontaal of verticaal gaan bewegen.



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.

4 *** 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.

5** Een schip vaart over een rivier en veroorzaakt daarbij een golf. De golf heeft een snelheid van $2,3 \text{ m/s}$. 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 en neer te bewegen. Het duurt steeds $0,80 \text{ s}$ voordat de dobber opnieuw zijn hoogste punt bereikt.



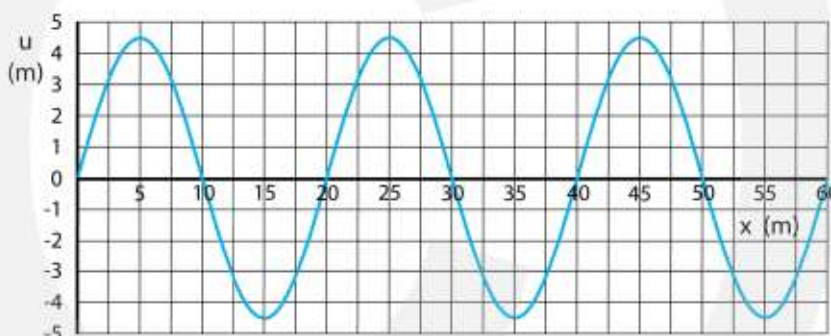
- b** Bereken de golflengte van de golf.
c Hoeveel golven zijn er tussen het schip en de oever?

6** In de figuur zie je een (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?

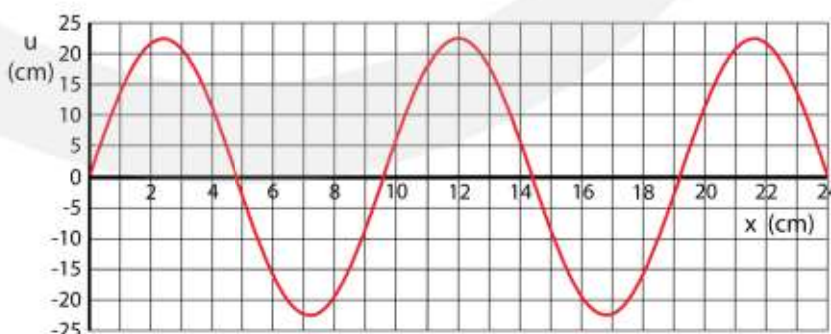


7** In de figuur zie je een (u, x) -diagram van een golf.

- a** Bepaal de golflengte.
b Bepaal de amplitude.

De frequentie is 50 Hz .

- c** Hoe groot is de golfsnelheid?

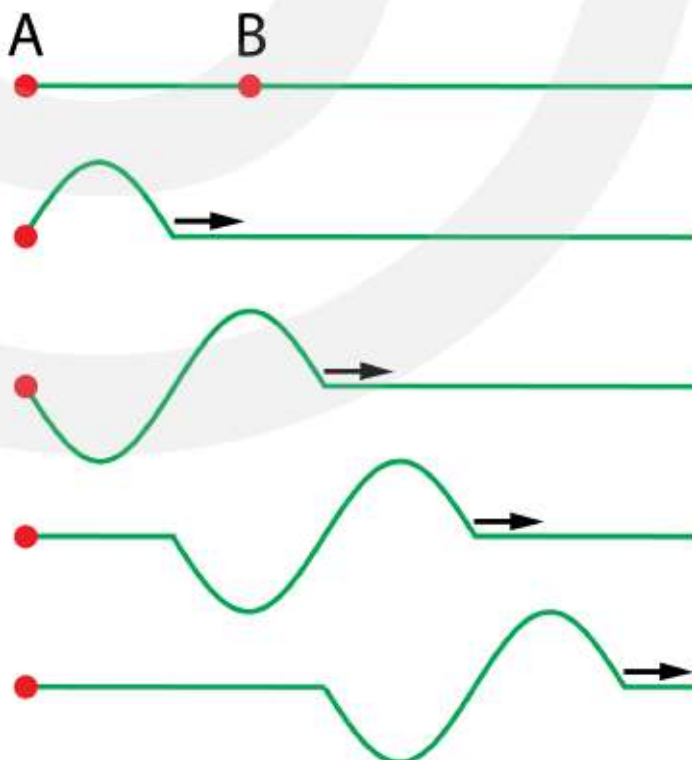


- 8*** In een koord beweegt een golf naar rechts. Van het koord zijn twee foto's gemaakt. Zie figuur. De onderste foto is 0,40 s later opgenomen dan de bovenste foto. De foto's laten het koord 20 keer verkleind zien.



- Bepaal de golflengte.
- Bepaal de golfsnelheid.
- Bereken de frequentie.
- Hoe lang heeft punt A getrild?
- Hoeveel tijd er is verstreken tussen het moment waarop A in trilling is gebracht en het moment waarop de onderste opname is gemaakt.

- 9*** In de figuur zie je een koord met de punten A en B. Op $t=0$ begint punt A aan één enkele slingerbeweging met een frequentie van 500 Hz en een amplitude van 3,0 cm.

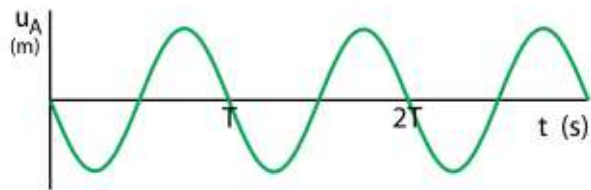


- Teken het (u, t) -diagram van de trilling van punt A tussen $t = 0$ ms en $t = 5,0$ ms.
- Teken het (u, t) -diagram van de trilling van punt B tussen $t = 0$ ms en 5,0 ms.

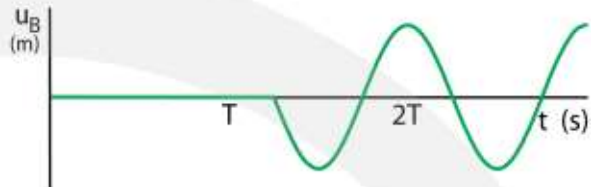
De figuur is 15 keer verkleind afgebeeld.

- Bepaal de golfsnelheid in het koord.
- Bepaal het faseverschil tussen de punten A en B met $\Delta\phi = \Delta x / \lambda$ én met $\Delta\phi = \Delta t / T$.

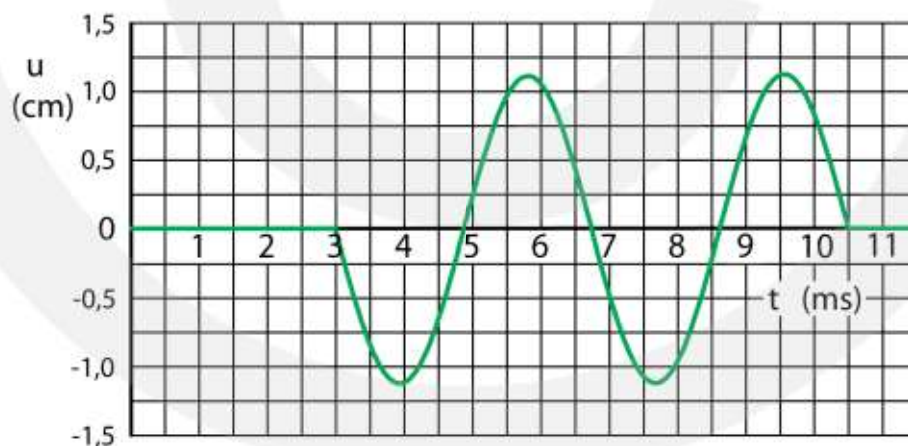
- 10** *** In de figuur zie je (u, t) diagrammen van twee punten A en B op een koord met een lengte van $3,5 \lambda$. Punt A is het linker uiteinde en is op $t=0$ in trilling gebracht.



- Leg uit of punt A op $t=0$ omhoog of omlaag begint te bewegen.
- Leg uit of punt B omhoog of omlaag begint te bewegen.
- Bepaal het faseverschil tussen de punten A en B.
- Teken het (u, x) -diagram van het koord en geef daarin punt B aan.



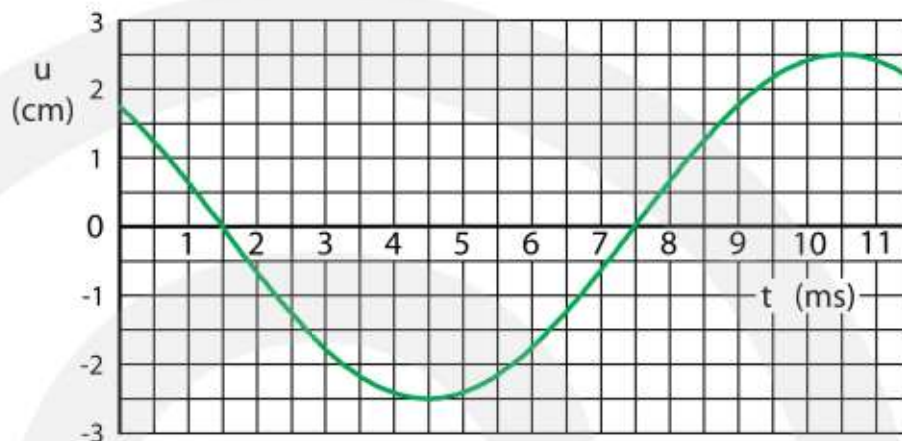
- 11** **** Tussen de punten A en B is een koord gespannen. Punt A begint op $t = 0$ te trillen en voert slechts twee volledige trillingen uit. Hierdoor ontstaat een lopende transversale golf in het koord. Op het $t = 3,0$ ms bereikt de golf punt P dat $1,8$ m vanaf A ligt. Het (u, t) -diagram van punt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



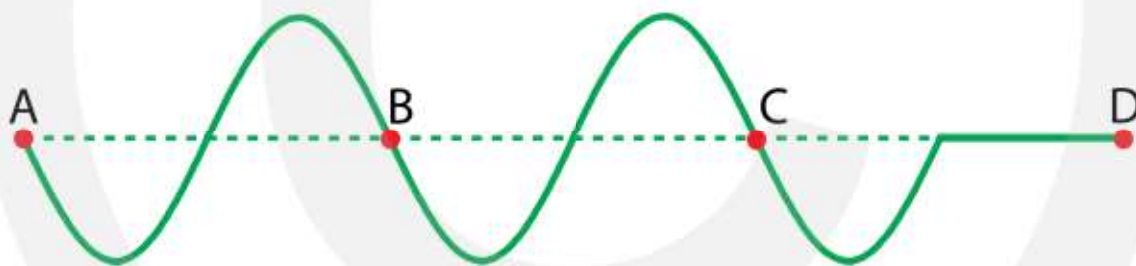
- Beredeneer of A op $t = 0$ omhoog of omlaag begon te bewegen.
- Bepaal de amplitude van de lopende golf.
- Bepaal de golflengte van de lopende golf.
HINT bereken eerst de golfsnelheid en bepaal daarna de frequentie
- Bereken de snelheid van punt P als hij door de evenwichtsstand gaat.
HINT punt P voert een harmonische trilling uit

- 12** **** Punt A van een lang horizontaal koord AD wordt in harmonische trilling gebracht. In het koord ontstaat een lopende transversale golf. Na enige tijd start de tijdmeting. Op $t=0$ trilt A al enige tijd en is dus niet het tijdstip waarop A in trilling is gebracht. Punt B ligt op één golflengte van punt A, zie figuur 2. In figuur 1 zie je een deel van het (u, t) -diagram van punt B.

Figuur 1



In figuur 2 is de stand van het koord op een bepaald tijdstip acht keer verkleind weergegeven.



Figuur 2

- Bepaal de frequentie.
- Bepaal de golfsnelheid.
- Bepaal met behulp van figuur 1 het tijdstip waarop figuur 2 is opgenomen.
- Leg uit waarom figuur 1 niet bij punt C van het koord kan horen.

Punt X ligt 50 cm van punt A. Op een bepaald moment geldt $\varphi_A = 3,2$

- Bereken de fase van punt X op dat moment.

- 13** *** 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.

In ondiep water neemt de amplitude van de golf sterk toe. Bij benadering is de amplitude omgekeerd evenredig met de golfsnelheid: $A = k / v$, k is een constante, niet gelijk aan C.

Bij Hawaï ontstaat een tsunami met een frequentie van $5,0 \cdot 10^{-2}$ Hz en een amplitude van 40 cm. Tussen Hawaï en Zuid-Amerika is de oceaan 5000 m diep.

- d** Bereken de golfsnelheid als het water bij de kust van Zuid-Amerika nog maar 10 m diep is.
e Bereken de amplitude van de tsunami als het water bij de kust van Zuid-Amerika nog maar 10 m diep is.
f Bereken de golflengte van de tsunami tussen Hawaï en Zuid-Amerika.
g Bereken de golflengte van de tsunami bij de kust van Zuid-Amerika waar het water 10 m diep is.

10.2 Transport van energie

Bolvormige golven

1** 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?



2*** 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.

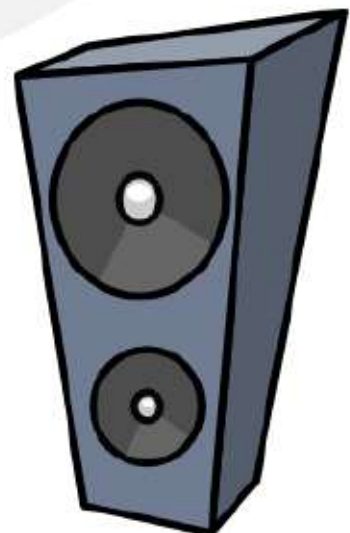
- c** Is de knal op 100 km afstand nog hoorbaar?



3*** 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 geluidsintensiteit niet groter zijn dan $5,0 \text{ mW/m}^2$.

- a** Hoever moet je van de luidspreker gaan staan om geen gehoorbeschadiging op te lopen?

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



- b** Hoeveel W/m^2 wordt er door de oordopjes doorgelaten als je op een afstand van 2,0 m van de luidspreker staat.
- c** Op welke afstand van de luidspreker moet je met oordoppen in gaan staan om $5,0 \text{ mW/m}^2$ geluidsintensiteit te horen?

4 **** 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.



De decibelschaal

5 *** De geluidsniveau van een fanfare op 5,0 meter afstand is 70 decibel.

De relatie tussen het geluidsniveau in dB en de intensiteit is:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12}}$$

- L_p is het geluidsniveau in decibel (dB)
- I is de geluidsintensiteit in W/m^2



- a** Bereken de intensiteit van het geluid van de fanfare op 5,0 m afstand.

Op een bepaald moment spelen ze twee keer zo hard.

- b** Bereken het geluidsniveau dat je dan hoort.

Daarna spelen ze marsmuziek met een geluidsniveau van 76 decibel.

- c** Hoeveel keer meer is de intensiteit van het geluid van 76 dB in vergelijking met de 70 dB die er eerst was?

- 6***** Sofie luistert graag naar 3FM. Het geluid uit de luidsprekers heeft een geluidsniveau van 80 dB. Als er een liedje van Adele wordt gespeeld zet ze haar radio 10 keer zo hard.



De relatie tussen het geluidsniveau in dB en de intensiteit is:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12}}$$

- L_p is het geluidsniveau in decibel (dB)
- I is de geluidsintensiteit in W/m^2

a Bereken hoeveel decibel de geluidssterkte nu is.

De vader van Sofie vindt dat het geluid nu veel te hard staat en zegt dat ze de radio twee keer zo zacht moet zetten. Sofie vindt van niet, maar doet toch wat vader zegt.

b Bereken hoeveel decibel het geluidsniveau nu is.

- 7***** Van je docent natuurkunde mag je met elkaar fluisteren bij het samenwerken. De fluisterende leerlingen produceren een geluidssterkte van 35 decibel. Bij een moeilijke opgave gaan twee leerlingen toch hardop praten. De geluidssterkte wordt hierdoor 50 decibel.

- Volgens Anna is het geluid nu 15 keer zo hard geworden, want $50 - 35 = 15$.
- Volgens Bea is het geluid ongeveer anderhalf keer zo hard geworden, want $50 / 35 = 1,4$.
- Volgens Carla is het geluid nu meer dan 30 keer zo hard geworden.



De relatie tussen het geluidsniveau in dB en de intensiteit is:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12}}$$

- L_p is het geluidsniveau in decibel (dB)
- I is de geluidsintensiteit in W/m^2

a Leg uit wie er gelijk heeft: Anna, Bea of Carla.

De leraar wordt boos en zegt met een stem die twintig keer zo hard is dan het geluid van 50 dB dat iedereen stil moet zijn.

b Bereken hoeveel decibel de boze leraar produceert.

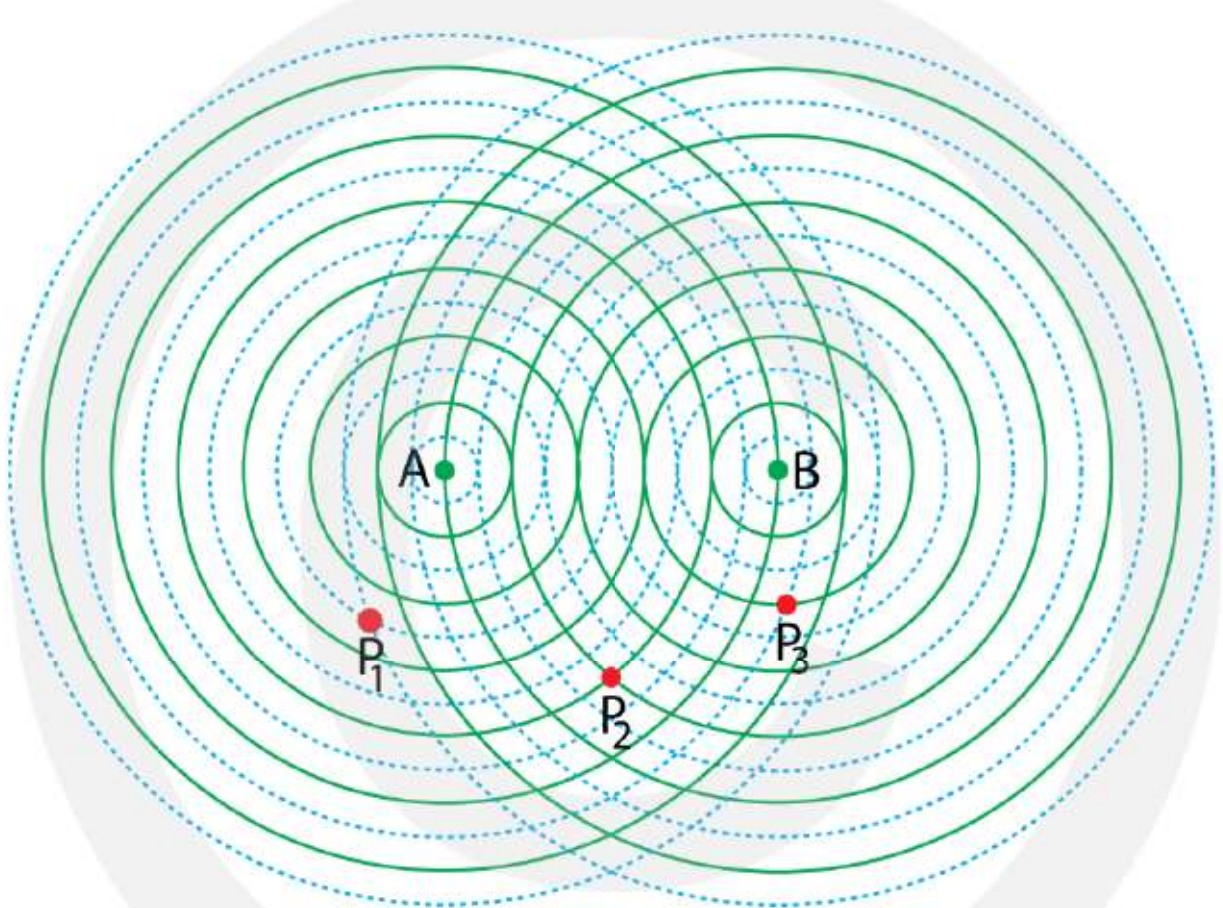
Hierna wordt het stil in de klas. Zelfs vijf keer zo stil als toen iedereen nog fluisterde.

c Bereken hoeveel decibel er nu aanwezig is.

10.3 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.

In de figuur zijn de punten P_1 , P_2 en P_3 aangegeven.

b Bepaal het faseverschil tussen P_1 en de trillingsbronnen A en B.

c Leg uit of de golven uit A en B elkaar in P_1 versterken of verzwakken.

d Bepaal het faseverschil tussen P_2 en trillingsbronnen A en B.

e Leg uit of de golven uit A en B elkaar in P_2 versterken of verzwakken.

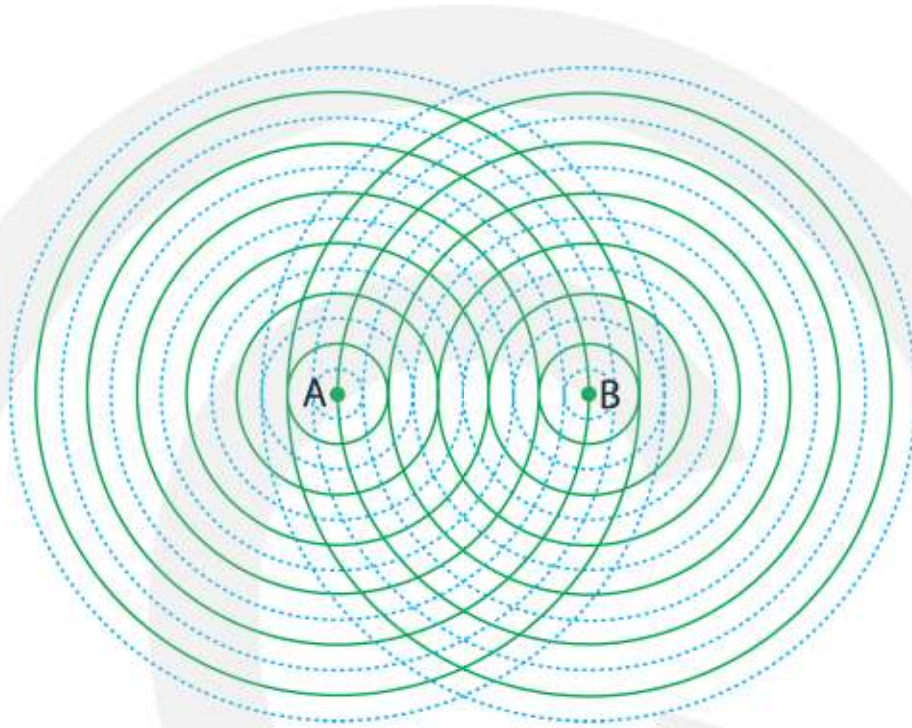
f Bepaal het faseverschil tussen P_3 en trillingsbronnen A en B.

g Leg uit of de golven uit A en B elkaar in P_3 versterken of verzwakken.

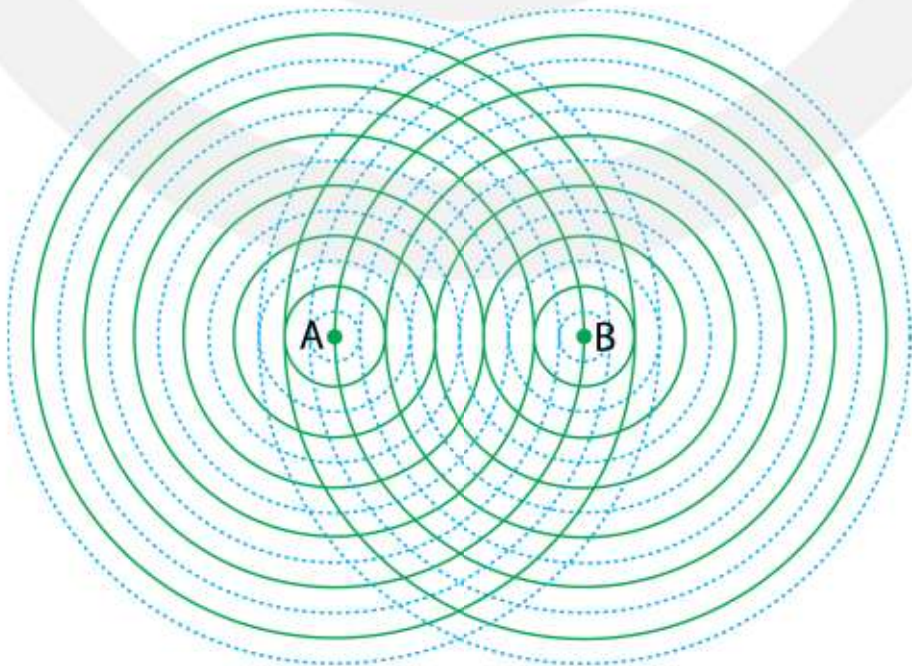
2**

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 onderstaand figuur.



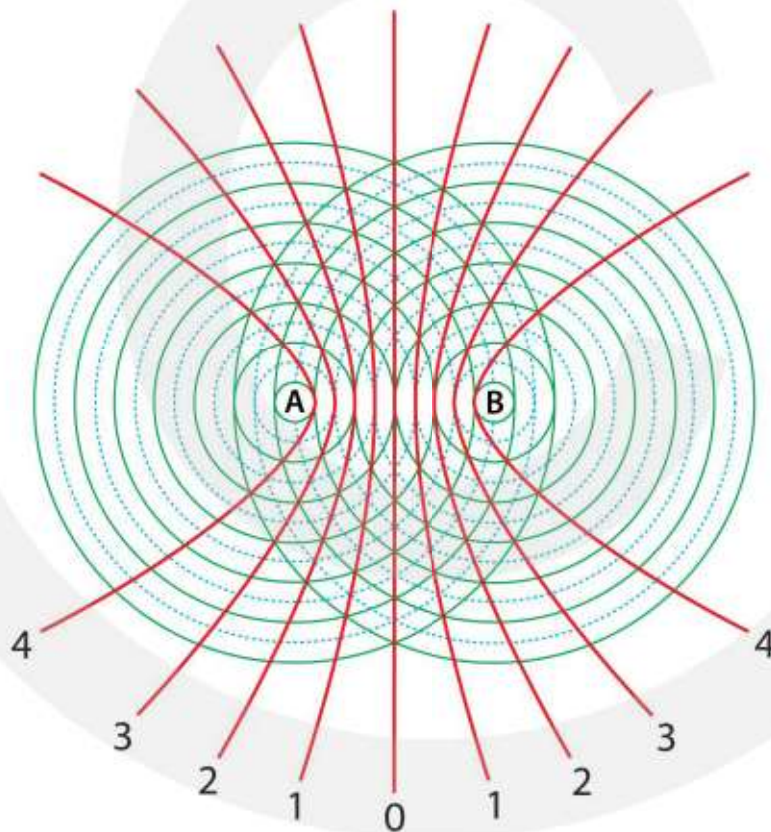
b Schets de knooplijnen in onderstaand figuur.



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

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

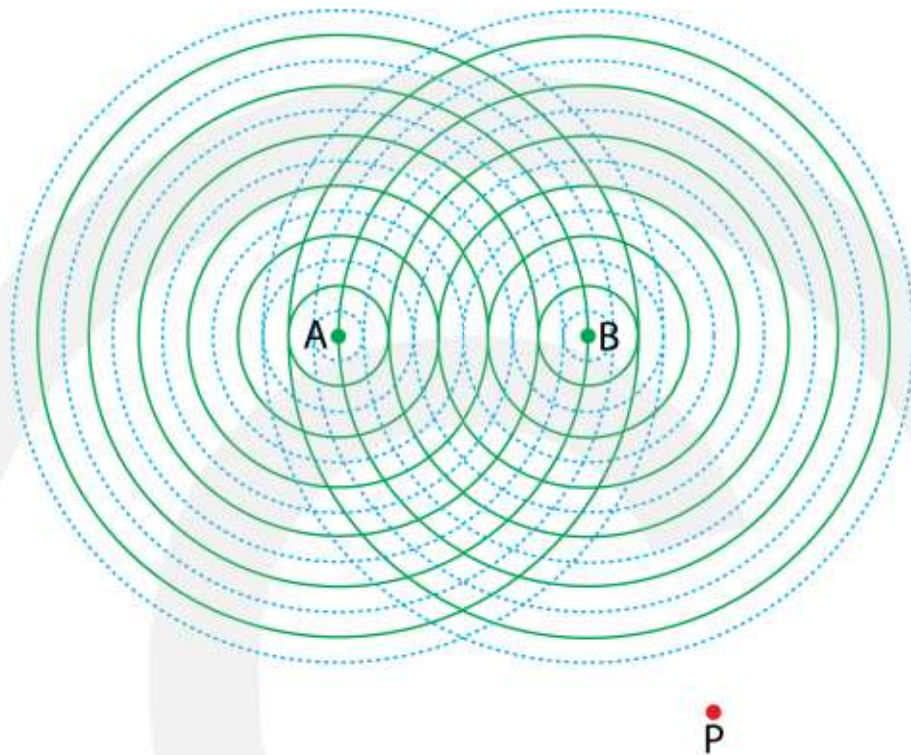
4** In de figuur zie je het golfpatroon veroorzaakt door twee coherente trillingsbronnen A en B. In de figuur zijn de groene getrokken cirkels golfbergen en de blauwe gestreepte cirkels golfdalen. De genummerde rode lijnen zijn buiklijnen.



- a** Leg uit waaruit blijkt dat de genummerde lijnen buiklijn zijn.
- b** Toon aan dat voor de punten op de buiklijn met nummer n geldt: $\Delta\varphi = n$, waarbij $\Delta\varphi$ het faseverschil is tussen de golven uit bron A en B.
- c** Schets met de knooplijnen tussen de buiklijnen en nummer ze vanaf het midden. De twee binnenste lijnen krijgen nummer 0.
- d** Toon aan dat voor de punten op de knooplijn met nummer n geldt: $\Delta\varphi = n + \frac{1}{2}$.

5***

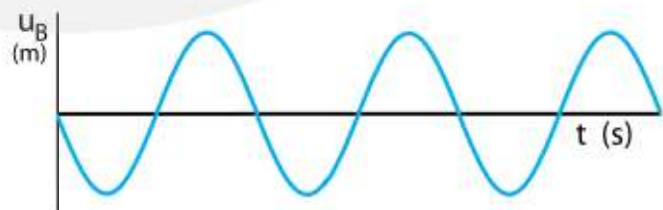
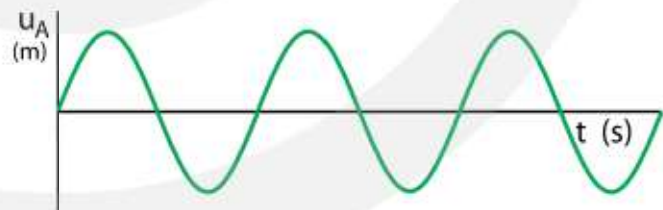
In de figuur zie je het golfpatroon veroorzaakt door twee coherente trillingsbronnen A en B. In de figuur zijn de groene getrokken cirkels golfbergen en de blauwe gestreepte cirkels golfdalen.



- a Bepaal het faseverschil van de golf A en de golf B op punt P.
- b Is er in punt P constructieve interferentie, destructieve interferentie, of geen van beide?

6**

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.

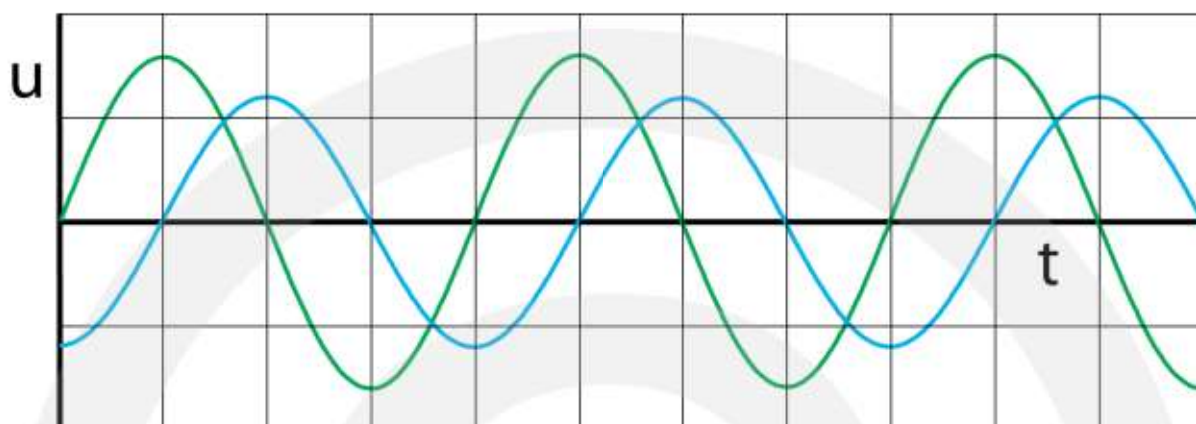


- a Ligt punt P op een buiklijn of op een knooppijn of geen van beide?
- b Schets het (u, t) -diagram in punt P veroorzaakt door de bronnen A en B samen.



7***

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.

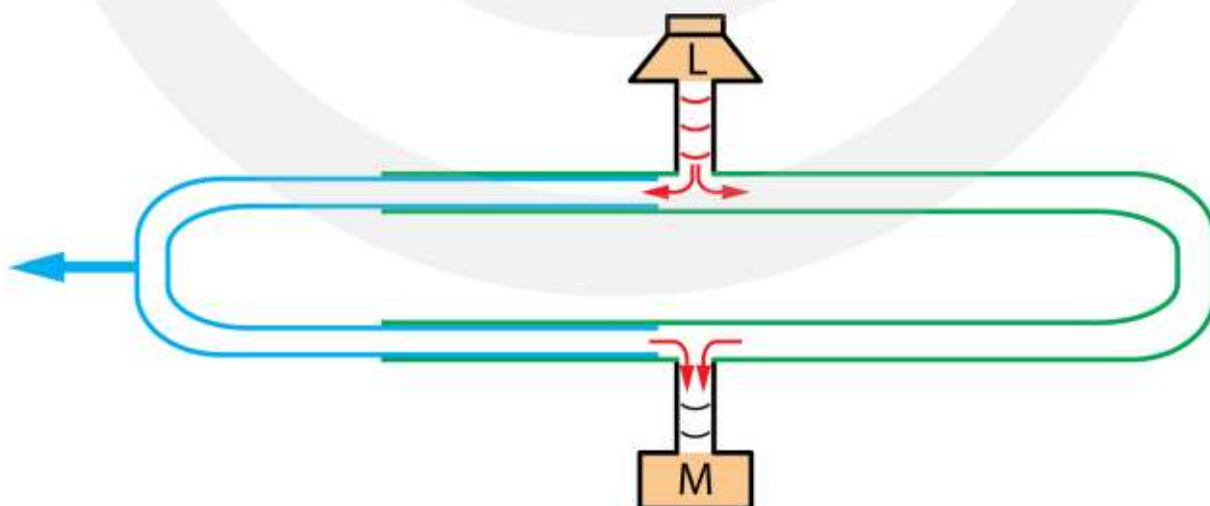


- Leg uit of P op een buiklijn ligt, op een knoopplijn ligt, of tussen een buiklijn en een knoopplijn ligt.
- Schets in de figuur het (u, t) -diagram veroorzaakt door de bronnen A en B samen.

8****

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?

De voorplantingssnelheid van geluid in lucht is afhankelijk van de temperatuur. Bij een hogere temperatuur neemt de geluidssnelheid toe.

g Leg uit of de frequentie van de toon verandert als de temperatuur toeneemt.

h Leg uit of de golflengte verandert als de temperatuur toeneemt.

Met behulp van het toestel van Quincke wil je de frequentie van een bepaalde toon bepalen. De voorplantingssnelheid van geluid in lucht bij een temperatuur van 20 °C is 343 m/s. In het begin is de weglengte linksom en rechtsom gelijk. Je moet de linkerbuis 13,2 cm uitschuiven om de eerste keer vrijwel geen geluid meer op te vangen.

i Bereken de frequentie van de toon.

Je vangt bijna geen geluid meer op. Langzaam stijgt de temperatuur tot 60 °C. Bij deze temperatuur is de geluidssnelheid $v_{\text{golf}} = 365 \text{ m/s}$

j Leg uit of je de linker buis moet inschuiven of moet uitschuiven om te zorgen dat je opnieuw geen geluid meer opvangt.

k Bereken hoeveel je de linker buis moet in- of uitschuiven om opnieuw het geluid maximaal te verzwakken.

10.4 Watergolven, geluid en licht

Oppervlaktgolven van water

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.

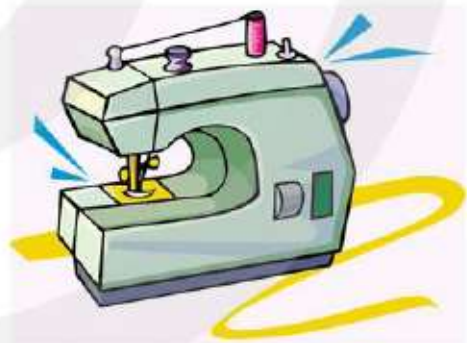
b Bereken de trillingstijd van je trommelvlies als je de hoogste toon en als je de laagste toon hoort.

2** Een naaimachine maakt 300 steken per minuut.

a Welke frequentie heeft deze machine?

Een auto heeft een toerental van 2400 per minuut.

b Welke frequentie hoor je in deze auto?



3** Een stemvork trilt met 261,63 Hz (muzieknoot c1).

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.

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



- 4**** Een blokfluit maakt een toon met een golflengte van 780 mm. De temperatuur is 20 °C.

a Bereken de frequentie van de toon.

Op een warme dag is de temperatuur opgelopen tot 40 °C.

b Bereken de golflengte van de toon in millimeter.



- 5**** Een dolfijn maakt een fluitend geluid met een frequentie van 800 Hz.

a Bereken de golflengte van deze toon in zeewater.

b Bereken de golflengte van deze toon in lucht als $T = 20\text{ °C}$.

- 6**** 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.

a Bereken de frequentie van deze toon.

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.

b Bereken de golflengte van een toon van 14 Hz.



- 7****** Het wereldrecord 100 m sprint is in handen van de Jamaicaanse atleet Usain Bolt. In 2009 liep hij de recordtijd van 9,58 s. De atletiekbaan heeft een breedte van 12 m. Bij de start staan de sprinters naast elkaar opgesteld. Het startschot wordt gegeven langs de buitenbaan op 3,0 meter afstand van de buitenste loper. De temperatuur is 20 °C.

Omdat de buitenste atleet dichterbij de plaats van het startschot vertrekt heeft hij een voordeel.



a Bereken het tijdsvoordeel van de buitenste atleet.

Om het voordeel te compenseren krijgt de binnenste atleet een voorsprong.

b Hoe groot moet de voorsprong zijn om een eerlijke race te krijgen?

8 ***

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.



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.

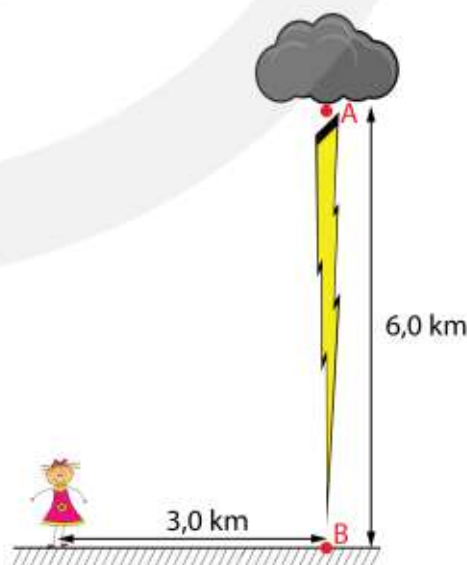
9 ***

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.

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?

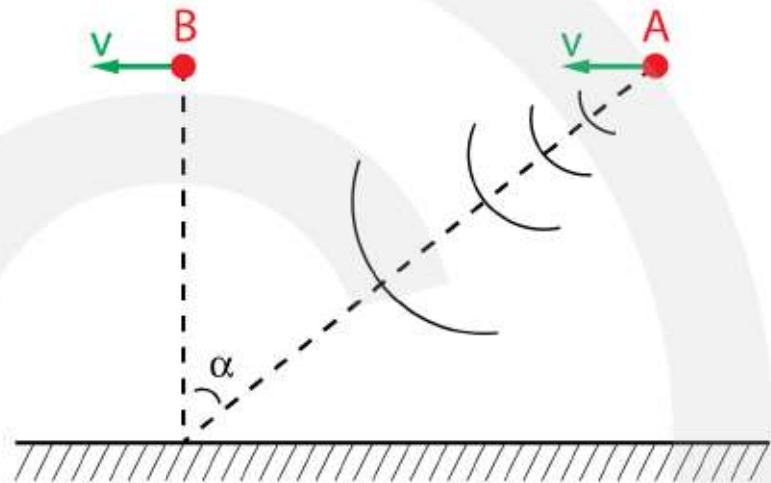
Het valt Vera op dat de donder enige tijd aanhoudt.

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.

- 10** **** Een vliegtuig heeft een constante snelheid van 900 km/h. Op het moment dat je het vliegtuig recht boven je ziet op plaats B, hoor je het geluid van het vliegtuig niet recht boven je maar onder een hoek α op plaats A. Zie figuur.



a Leg uit waarom je het vliegtuig onder een andere hoek hoort dan ziet.

b Bereken hoek α .

Even later komt er een ander vliegtuig voorbij. Dit vliegtuig heeft dezelfde snelheid maar vliegt twee keer zo laag.

c Bereken hoek α voor het tweede vliegtuig.

Licht

10.5 Het dopplereffect

- 1** Bij een formule 1 wedstrijd staat een microfoon vlak langs het circuit. Een raceauto rijdt voorbij met 306 km/h. De motor van de auto heeft een toerental van 18000 toeren per minuut. De temperatuur van de lucht is 20 °C.



- a Bereken de frequentie van het geluid dat de motor produceert.
- b Breken de frequentie van de toon die wordt waargenomen wanneer de raceauto de microfoon nadert.
- c Breken de frequentie van de toon die wordt waargenomen wanneer de raceauto de microfoon is gepasseerd.

- 2** Je zit in een trein en nadert een bewaakte overweg. Bij de overweg klingelt een bel. De bel klinkt 2,0 keer per seconde en produceert een toon van 740 Hz. De temperatuur van de lucht is 20 °C. De trein heeft een snelheid van 140 km/h.



- a Beweegt in dit geval de trillingsbron of de waarnemer?
- b Horen de mensen in de trein een hogere toon, een lagere toon, of een toon van 740 Hz?
- c Klingelt voor de mensen in de trein de bel vaker, minder vaak of even vaak als voor iemand die bij de overweg staat?
- d Bereken de frequentie van de toon die de mensen in de trein waarnemen.
- e Bereken de klinkel-frequentie die de mensen in de trein waarnemen.

- 3*** Je staat op een viaduct boven een snelweg. Een politieauto met sirene komt met hoge snelheid voorbij. Bij het naderen van de politieauto neem je een frequentie waar van 720 Hz. Als hij voorbij is gereden neem je een frequentie van 590 Hz waar. De temperatuur van de lucht is 20 °C.

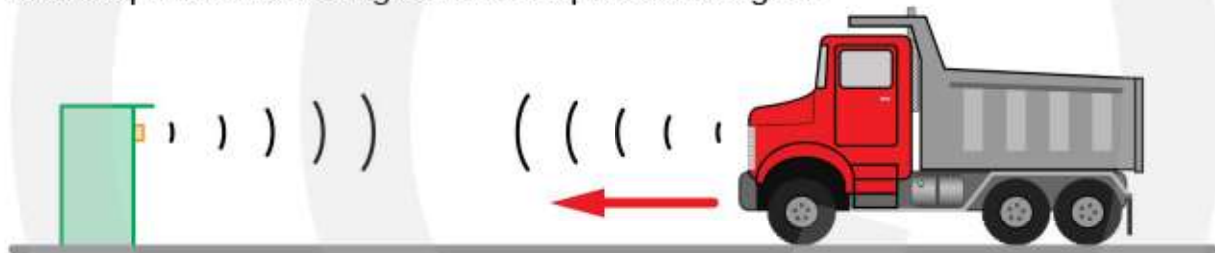
Voor de verhouding van de frequenties bij het naderen en bij het verwijderen geldt:

$$\frac{f_{w \text{ naderen}}}{f_{w \text{ verwijderen}}} = \frac{v_{\text{golf}} + v_{\text{bron}}}{v_{\text{golf}} - v_{\text{bron}}}$$

waarbij voor v_{bron} een positieve waarde moet worden ingevuld.

- Toon dit aan.
- Bereken de snelheid van de politieauto.
- Bereken de frequentie van het geluid dat de sirene uitzendt.

- 4 ****** Om de snelheid van het verkeer te meten gebruikt de politie een meetstation met een geluidsbron en een ontvanger. Dit geluid kaatst tegen een tegemoetkomende vrachtauto terug naar het meetstation. Vanwege het dopplereffect verschilt de waargenomen frequentie met de uitgezonden frequentie. Zie figuur.



Het dopplereffect ontstaat omdat voor de heengaande golf de vrachtauto beweegt ten opzichte van de bron. De vrachtauto ontvangt hierdoor een hogere frequentie dan de bron. Deze hogere frequentie wordt door de vrachtauto uitgezonden en dit is de frequentie van de bron voor de teruggaande golf.

- Beredeneer of de ontvanger een grotere of een kleinere frequentie meet?

Het meetstation zendt frequentie f_{bron} uit en meet frequentie f_w van de teruggekaatste golven. Er geldt:

$$f_w = \frac{v_{\text{golf}} - v}{v_{\text{golf}} + v} \cdot f_{\text{bron}}$$

- f_w is de frequentie die de ontvanger in het meetstation waarneemt in hertz (Hz)
- v_{golf} is de geluidssnelheid in meter per seconde (m/s)
- v is de snelheid van de vrachtauto meter per seconde (m/s)
- f_{bron} is de frequentie die de geluidsbron in het meetstation in hertz (Hz)

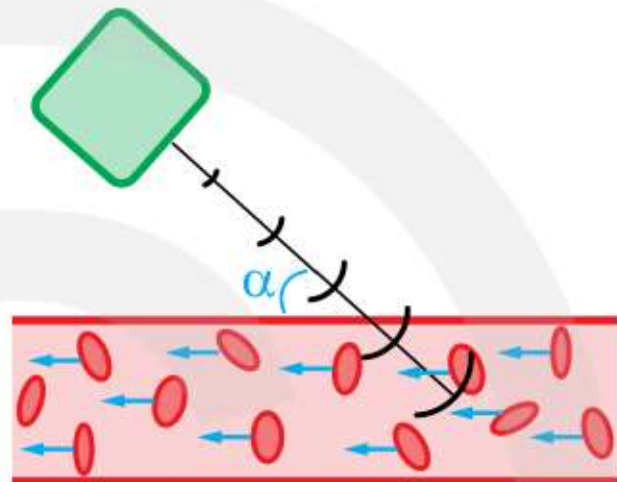
Omdat de vrachtauto het meetstation nadert is v een negatief getal.

- Bewijs deze formule.

De meetstation zendt een frequentie van 1000 Hz uit en ontvangt een frequentie van 850 Hz. De temperatuur van de lucht is 20 °C.

c Bereken de snelheid van de vrachtauto.

5**** De stroomsnelheid van bloed in een ader kun je meten met het dopplereffect. Je gebruikt hierbij ultra-geluidgolven die door de bloedcellen worden teruggekaatst. Zie figuur 1. Door de frequentie van de uitgezonden en teruggekaatste golven met elkaar te vergelijken kun je de stroomsnelheid bepalen. Het voordeel van deze techniek is dat er geen sensor in de ader hoeft te worden aangebracht.



Figuur 1

Omdat er een hoek α is tussen de stroomrichting van het bloed en de richting van de geluidgolven moet er een correctie worden aangebracht. Dit door de stroomsnelheid v te vermenigvuldigen met $\cos \alpha$.

a Leg uit waarom we in de formule $v \cdot \cos \alpha$ moeten gebruiken in plaats van v .

De bloedsnelheidsmeter zendt frequentie f_{bron} uit en meet frequentie f_w van de teruggekaatste golven. Er geldt:

$$f_w = \frac{v_{\text{golf}} - v \cdot \cos \alpha}{v_{\text{golf}} + v \cdot \cos \alpha} \cdot f_{\text{bron}}$$

- f_w is de frequentie die de ontvanger in het meetstation waarneemt in hertz (Hz)
- v_{golf} is de geluidssnelheid in meter per seconde (m/s)
- v is de snelheid van de vrachtauto meter per seconde (m/s)
- α is de hoek tussen de stroomrichting en de richting van de geluidgolven
- f_{bron} is de frequentie die de geluidsbron in het meetstation in hertz (Hz)

Bij een bloedsnelheidsmeting in een ader vind je een dopplerverschuiving van 4,7 kHz. De uitgezonden ultrageluidsgolf heeft een frequentie van 7,0000 MHz. Voor de geluidssnelheid in weefsel en in bloed mag de waarde van water bij 40 °C worden gebruikt. De hoek tussen de geluidsgolven en de ader is 35,0 °.

Om de bloedsnelheid te kunnen meten moet de frequentie van de uitgezonden en van de waargenomen golven met tenminste 5 significanter cijfers worden gemeten.

b Leg uit waarom dit nodig is.

c Bereken de stroomsnelheid van het bloed.

Als de snelheid v veel kleiner is dan de golfsnelheid v_{golf} geldt bij benadering.

$$f_w - f_{\text{bron}} = \frac{2 \cdot v}{v_{\text{golf}}} \cdot f_{\text{bron}} \cdot \cos \alpha$$

d Bereken met deze formule opnieuw de stroomsnelheid van het bloed en vergelijk dit met je antwoord op vraag b.

e Bereken de procentuele afwijking tussen de antwoorden bij vraag c en bij vraag d.

10.6 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.

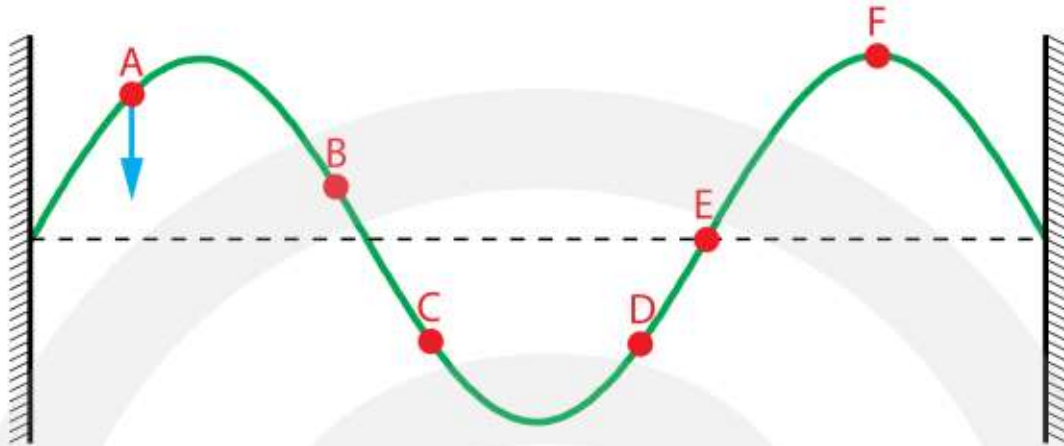
2**

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.



- a Teken de richtingen waarin de punten B t/m F bewegen.
- b 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.

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

- 4***
- a Teken in onderstaande figuur een staande golf met 1 buik.
 - b Teken met een andere kleur een staande golf met 2 buiken.
 - c 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.

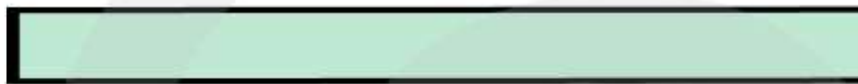
- b** Bereken de frequentie van de grondtoon.

- 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. $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



- 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. $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



- 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.

- a Bereken de frequentie van de grondtoon bij kamertemperatuur, $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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.

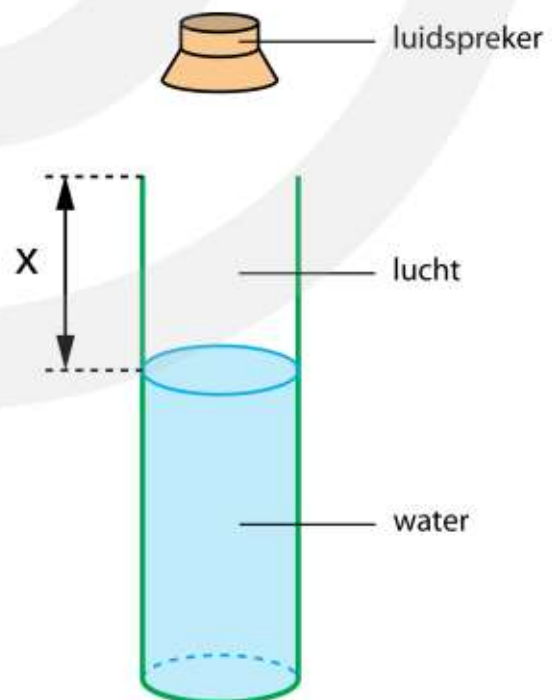
HINT bereken eerst de golflengte



18 **** 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 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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.

19**** 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.

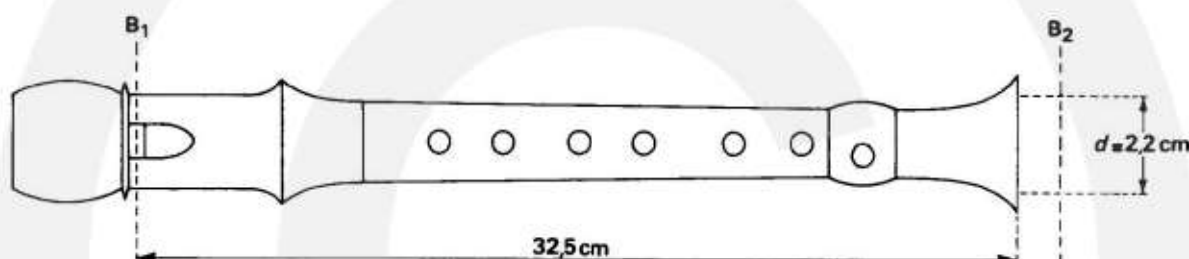
b Zijn er twee gesloten uiteinden, twee open uiteinden, één open en één gesloten uiteinde, of geen van drie?

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.

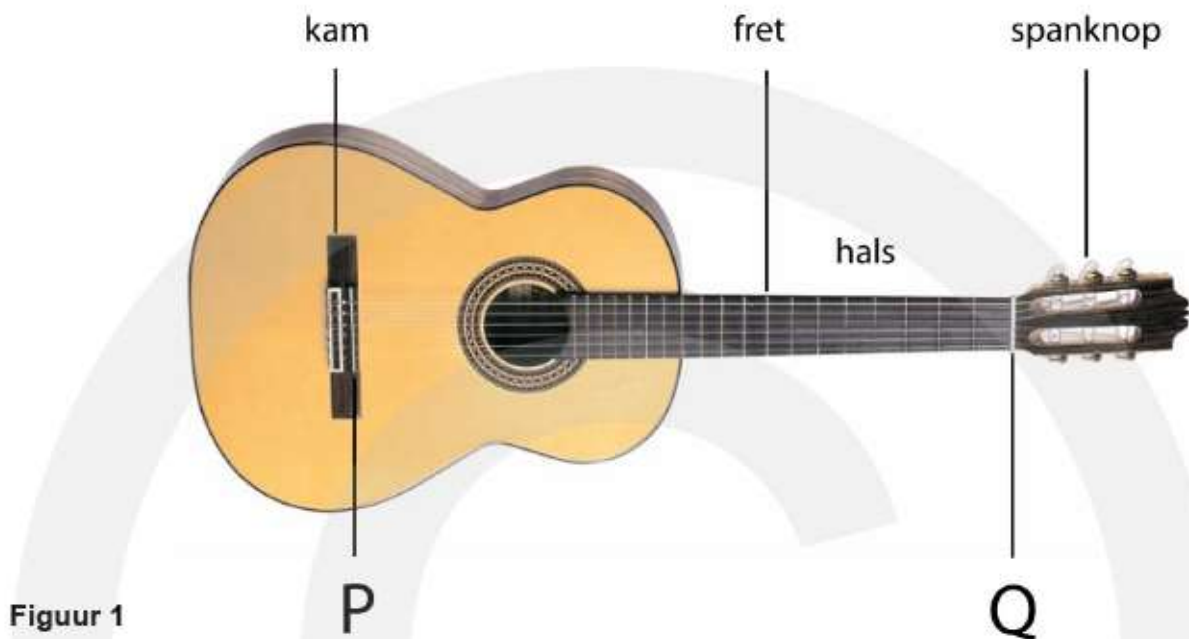
- 3p **c** Leg uit of deze afstand groter dan wel kleiner moet worden gemaakt.

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

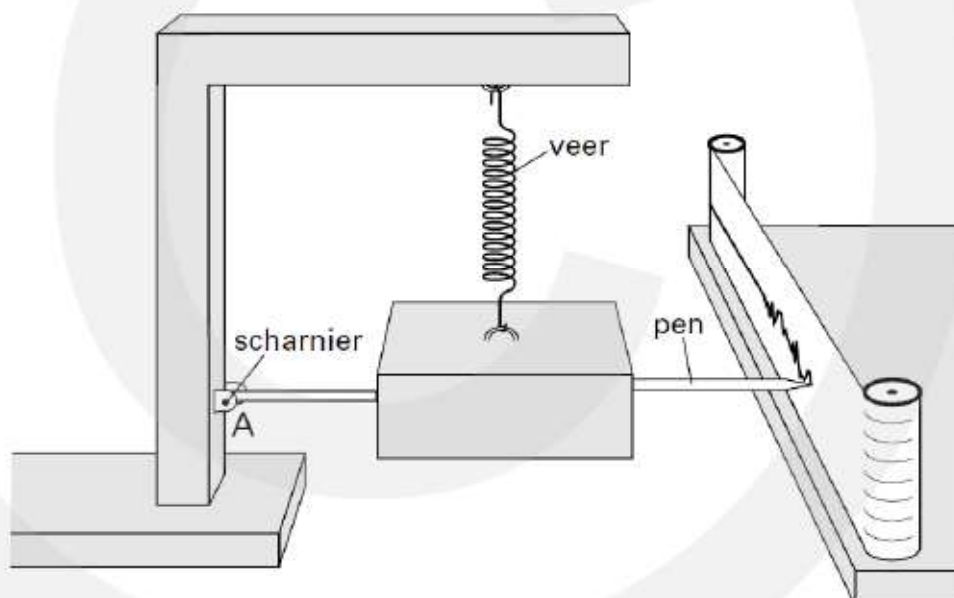
Bij een aardbeving lopen er longitudinale en transversale golven door de aarde.

- 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.

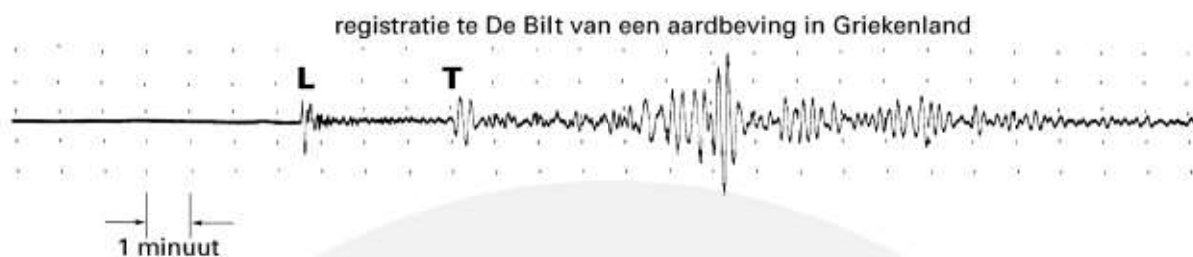


Figuur 1

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.

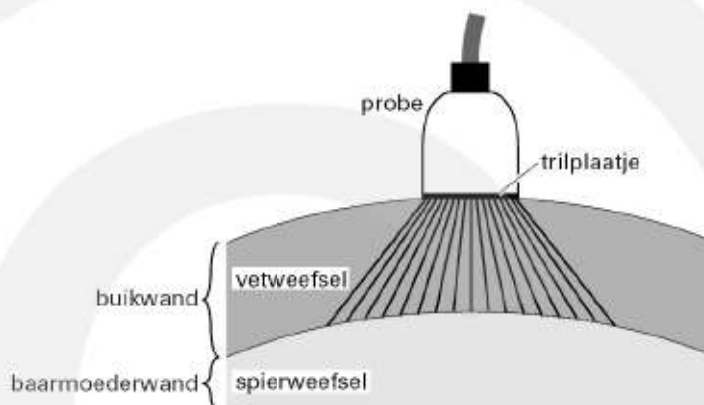


De aardbeving vond plaats op een afstand van $2,3 \cdot 10^3$ km. De gemiddelde snelheid van de transversale golven is 3,4 km/s.

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

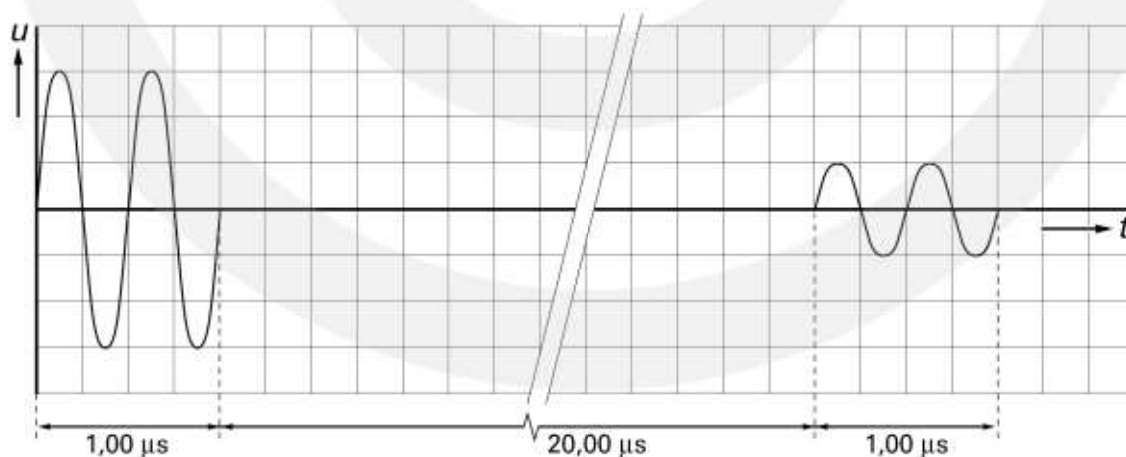
Echoscopie

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 trillplaatje 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 vetweefsellaag 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 trillplaatje. 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:

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

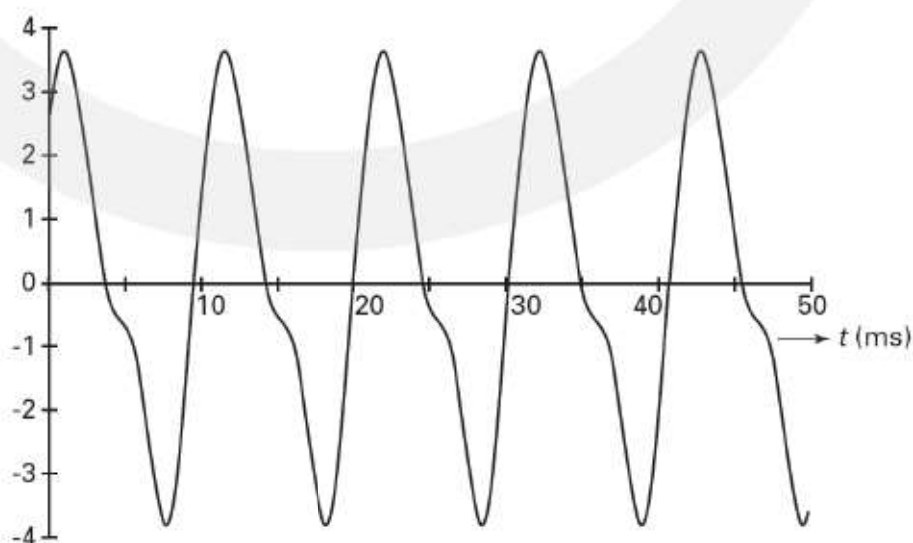
n is een geheel getal:

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 1



Figuur 2

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.

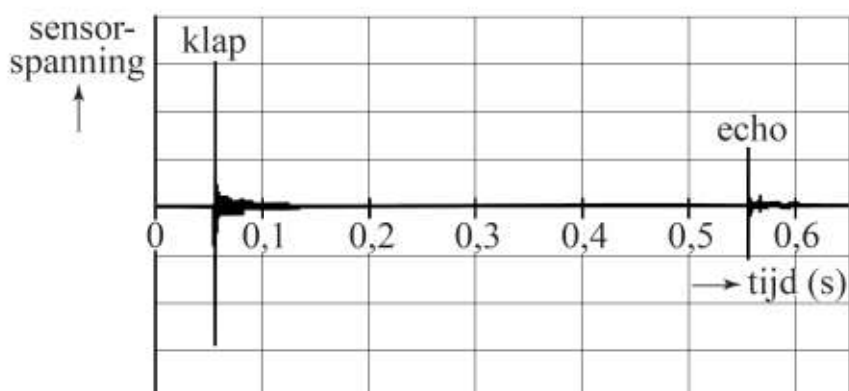
- 3p **d** Leg uit welke van de drie open pijpen A, B of C dezelfde grondtoon heeft als de gesloten pijp.

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.



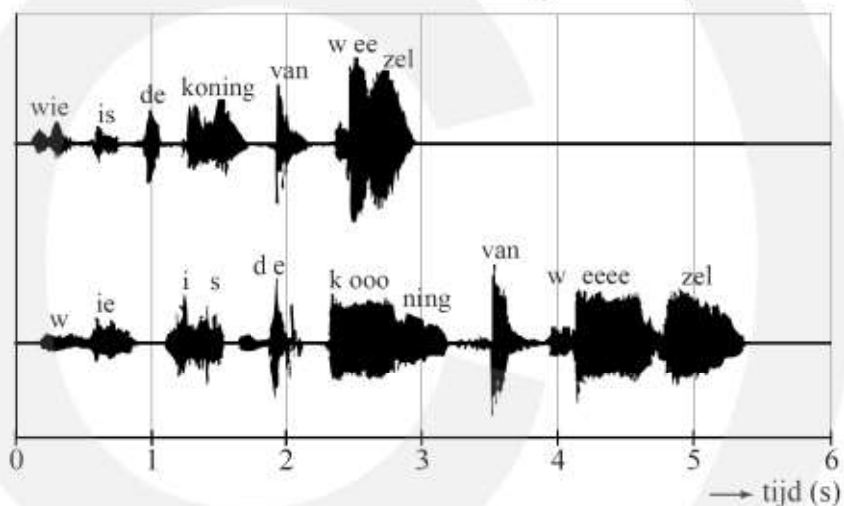
Figuur 1

- 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.

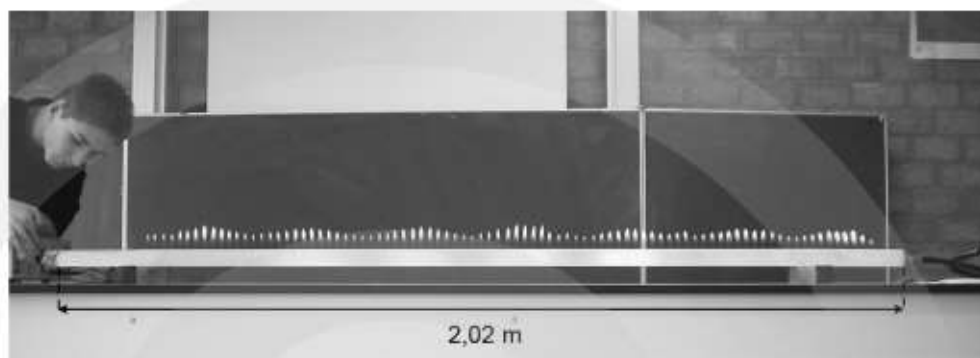
- 4p **d** Geef hiervoor een verklaring. Bereken daartoe eerst de frequentie van de grondtoon van deze 'orgelpijp'.

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.

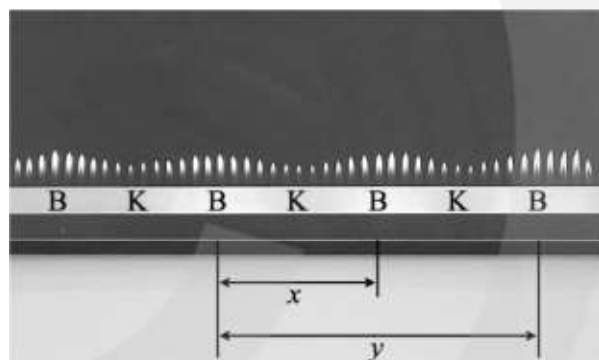
Nadat de buis geheel gevuld is met aardgas steekt hij het gas dat uit de gaatjes stroomt met een aansteker aan¹⁾. Alle vlammetjes zijn dan even hoog. Marc zet de toongenerator aan en draait aan de frequentieknop. Bij bepaalde frequenties ontstaat in de buis een staande geluidsgolf waardoor de vlammen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

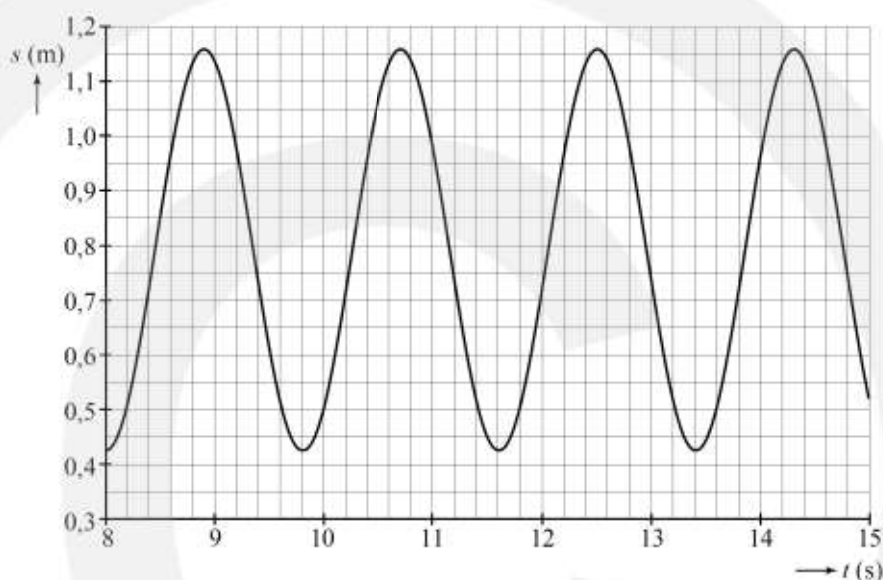
Wanneer het gas een tijd gebrand heeft, verdwijnt het golfpatroon van de vlammetjes. Kennelijk treedt er dan geen resonantie meer op. Door de frequentie van de toongenerator iets te veranderen, kan Marc weer hetzelfde golfpatroon als in figuur 1 terugkrijgen. De voortplantingssnelheid van geluid neemt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

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.

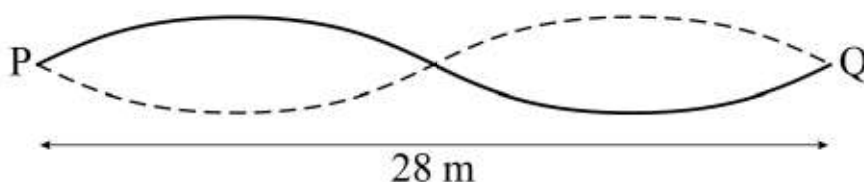
Aan de beweging van de rechtermoet van professor Barrett is een videometing gedaan. Het bijbehorende (s, t)-diagram zie je in figuur 1.



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)*

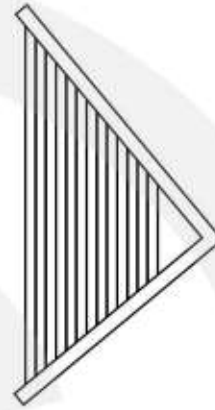
- 1p **f** Leg uit waarom dat een goed advies is.

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



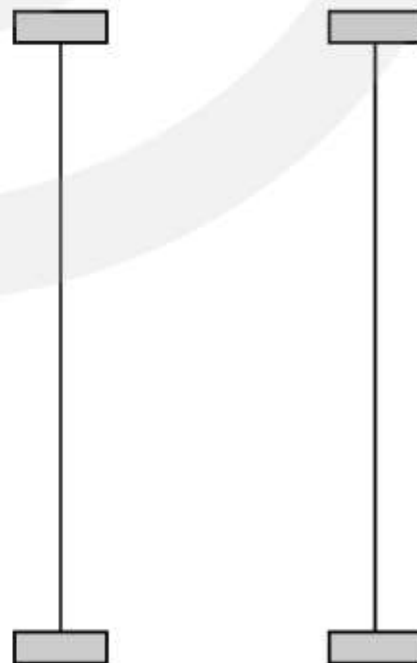
Figuur 2

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

grondtoon

eerste boventoon

- 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 .

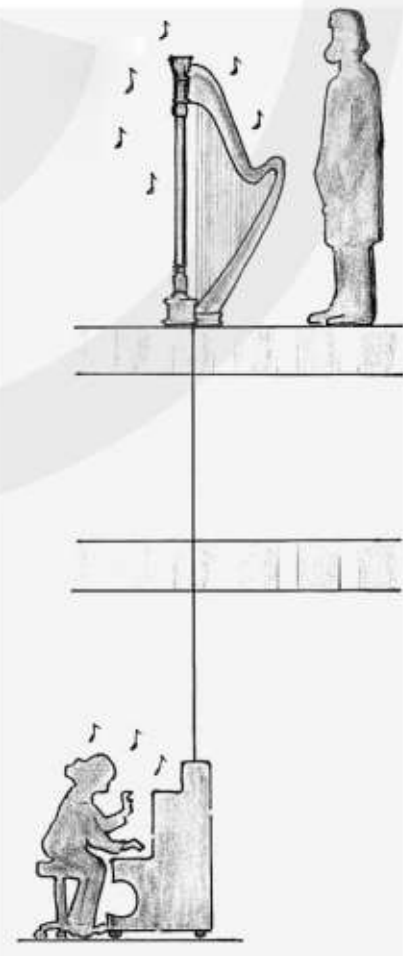
Tegenwoordig kan men snaren kopen die gemaakt zijn van staal of van nylon. We vergelijken een stalen snaar met een nylon snaar. Beide snaren zijn even lang, even dik en met dezelfde kracht gespannen.

- 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.

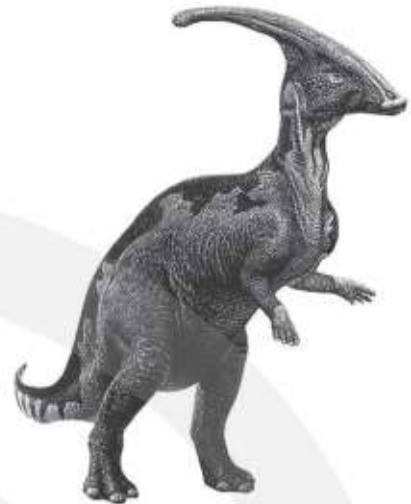
- 2p **f** Beantwoord nu de volgende vragen:
- Op welk natuurkundig verschijnsel is deze demonstratie gebaseerd?
 - Wat is de rol van de houten stok bij deze demonstratie?

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?

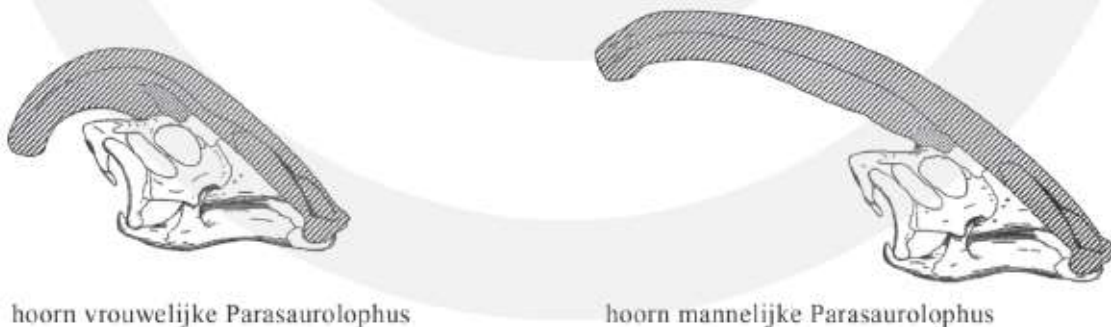
Bij een volwassen mannetje is de hoorn 1,8 m lang. Eén uiteinde van deze hoorn is open, het andere uiteinde is gesloten. De luchttemperatuur in de hoorn is 20 °C.

- 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.

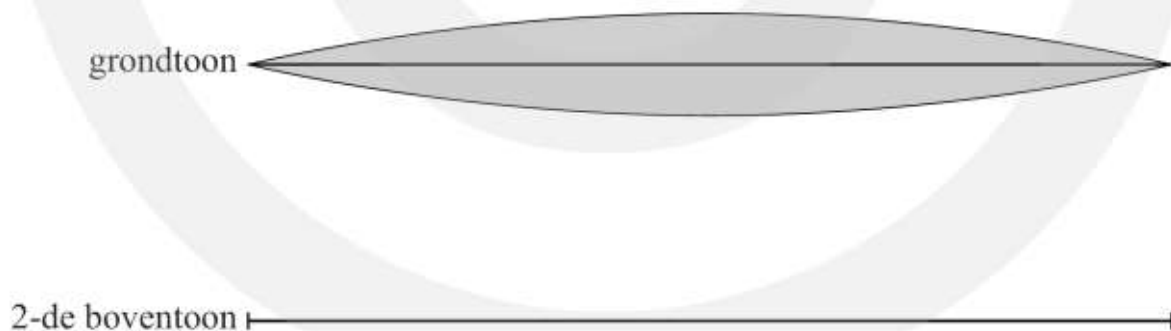
Vleugel

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 $\frac{1}{4}$ 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 is de spankracht in de snaar;
- m is de massa van de snaar;
- ℓ is 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.

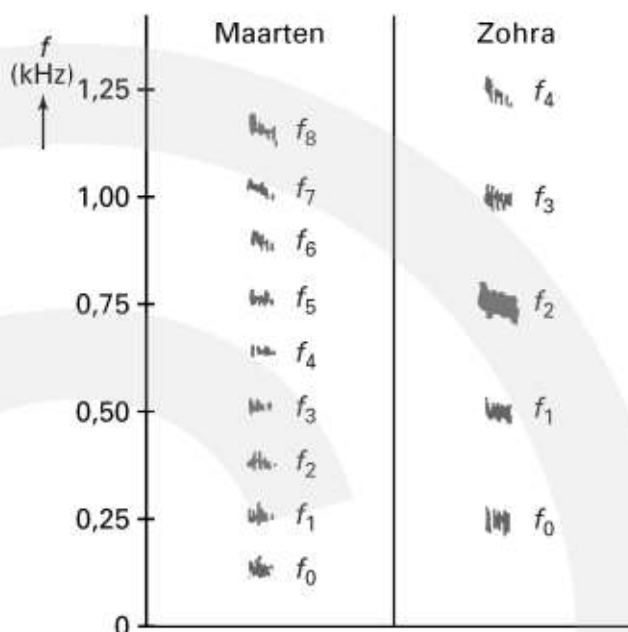
- 4p **f** Ga met een berekening na welke noot van de vleugel bij deze snaar hoort.

Examenvragen vwo

Geluidsanalyse (aangepast)

Er bestaan computer programma's om een frequentie-analyse uit te voeren. Maarten (een jongen) en Zohra (een meisje) gaan met zo'n programma hun stemmen vergelijken. Daartoe spreken zij in de microfoon van een computer allebei de klank 'aa' van het woord 'plaat' in. Na verwerking van dit geluid maakt de computer een diagram waarin alle waargenomen frequenties van deze 'aa'-klank zijn weergegeven. In figuur 1 zijn de diagrammen van Maarten en Zohra naast elkaar gelegd.

Figuur 1



De frequentie is langs de verticale as uitgezet. Van beide stemmen is de frequentie aangegeven van de grondtoon (f_0) en de frequenties van de bijbehorende boven-tonen ($f_1, f_2, \dots$). In de figuur is te zien dat de 'aa'-klank van Maarten uit negen verschillende frequenties bestaat en die van Zohra uit vijf. Maarten en Zohra gaan ervan uit dat stembanden trillen als snaren.

Ze trekken uit de meetresultaten in figuur 1 twee conclusies:

1. stembanden trillen als snaren die aan twee kanten zijn ingeklemd
2. stembanden van jongens zijn langer dan die van meisjes

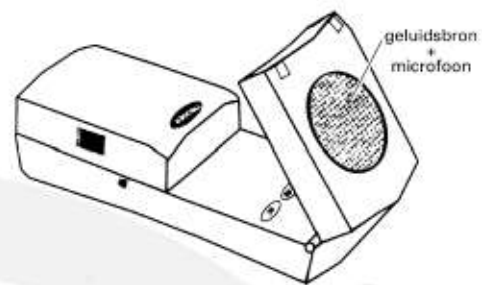
a Welke informatie uit figuur 1 ondersteunt conclusie 1 en welke ondersteunt conclusie 2? Geef een toelichting.

Het geluid dat de kat van Zohra bij het spinnen maakt, wordt eveneens onderzocht. Dat geluid ontstaat als de kat de spieren van het strottenhoofd in een vast ritme samentrekt en ontspant. Maarten en Zohra vinden voor de grondtoon van het spingeluid een frequentie van 26 Hz. De intensiteit van de grondtoon op 3,0 cm afstand van het strottenhoofd van Zohra's kat is $6,3 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (78 dB). Het zwakste geluid dat een mens nog kan horen is sterk afhankelijk van de frequentie en heeft voor een toon van 26 Hz een intensiteit van $6,3 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$ (58 dB).

- 2p **b** Bereken het vermogen van de geluidsbron die het spinnen veroorzaakt.
- 2p **c** Bereken tot op welke afstand van het strottenhoofd de grondtoon nog te horen is.

Bewegingssensor (aangepast)

Het in figuur 1 afgebeelde apparaat is een bewegingssensor. Achter de cirkelvormige opening bevindt zich een geluidsbron die ultrasone pulsen uitzendt. Ultrasoon geluid bestaat uit geluidsgolven met frequenties die groter zijn dan 20 kHz. Het ultrasone geluid verspreidt zich in een kegelvormige bundel. Zie figuur 2.



Figuur 1



Figuur 2

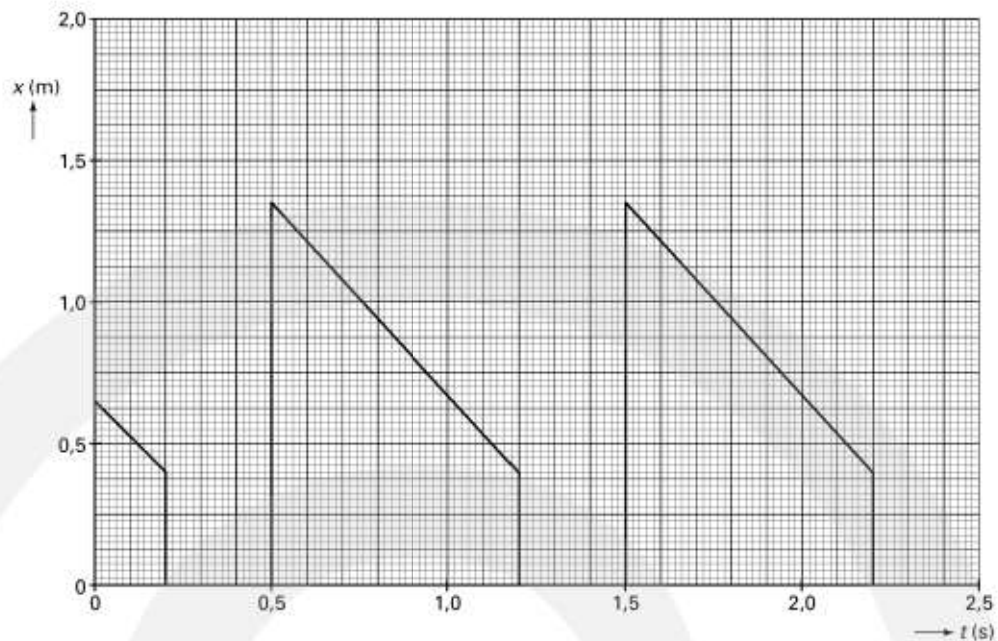
Voorwerpen binnen deze bundel kaatsen geluid terug in de richting van de geluidsbron. Deze echo wordt geregistreerd door een microfoon die zich ook achter de cirkelvormige opening bevindt. De sensor meet de tijd Δt die verstrijkt tussen het begin van een puls en het begin van de echo die hierna arriveert. Met behulp van dit gegeven berekent de sensor de afstand tot het voorwerp. De sensor gebruikt als geluidssnelheid altijd de waarde bij 20 °C.

- 3p **a** Leg uit of de sensor een te grote of een te kleine afstand berekent als de temperatuur tijdens de meting hoger is dan 20 °C.

Objecten die ver weg zijn kaatsen een te zwakke echo terug. De sensor kan ze hierdoor niet registreren.

- 2p **b** Bereken hoeveel keer kleiner de geluidsintensiteit is van een puls die 6,0 m aflegt ten opzichte van een puls die 1,5 m aflegt.

Frans wil een eenparige beweging registreren. Hiertoe loopt hij met constante snelheid in de richting van een muur van het klaslokaal, die hij na 2,5 s bereikt. Tijdens het lopen houdt hij de sensor voortdurend op de muur gericht. Frans laat de meetgegevens door een computer verwerken tot een (x,t)-grafiek. Zie figuur 3.

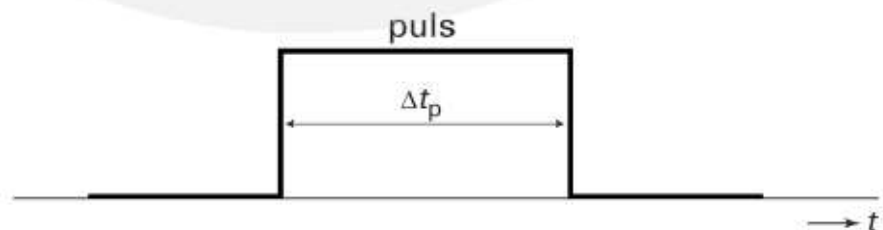


Figuur 3

De grafiek is anders dan Frans had verwacht. Uit de grafiek is wel de juiste snelheid te bepalen, maar de afstanden van de sensor tot de muur zijn in de grafiek niet allemaal goed weergegeven. Het lijkt alsof de sensor nooit meer dan 1,36 m van de muur verwijderd is geweest, terwijl Frans zeker weet dat hij op grotere afstand aan de meting begon. Toen Frans begon te lopen bevond hij zich op een afstand s van de muur.

- 3p **c** Leg uit hoe s met behulp van figuur 3 kan worden bepaald. Je hoeft de berekening niet uit te voeren.

Uit de grafiek blijkt ook dat de sensor soms helemaal geen meetwaarden heeft geregistreerd. Dat komt doordat de sensor geen echo's verwerkt als hij nog bezig is met het uitzenden van een puls. Bij het meten van afstanden kleiner dan 40 cm van de muur is een puls nog niet geheel verzonden als de echo van die puls al op de microfoon valt. De pulsduur Δt_p is de tijd tussen het begin en het einde van het uitzenden van een puls. Zie figuur 4.



Figuur 4

- 4p **d** Bereken de pulsduur Δt_p .

Klarinet (aangepast)

Een klarinet is een houten blaasinstrument. Zie figuur 1.

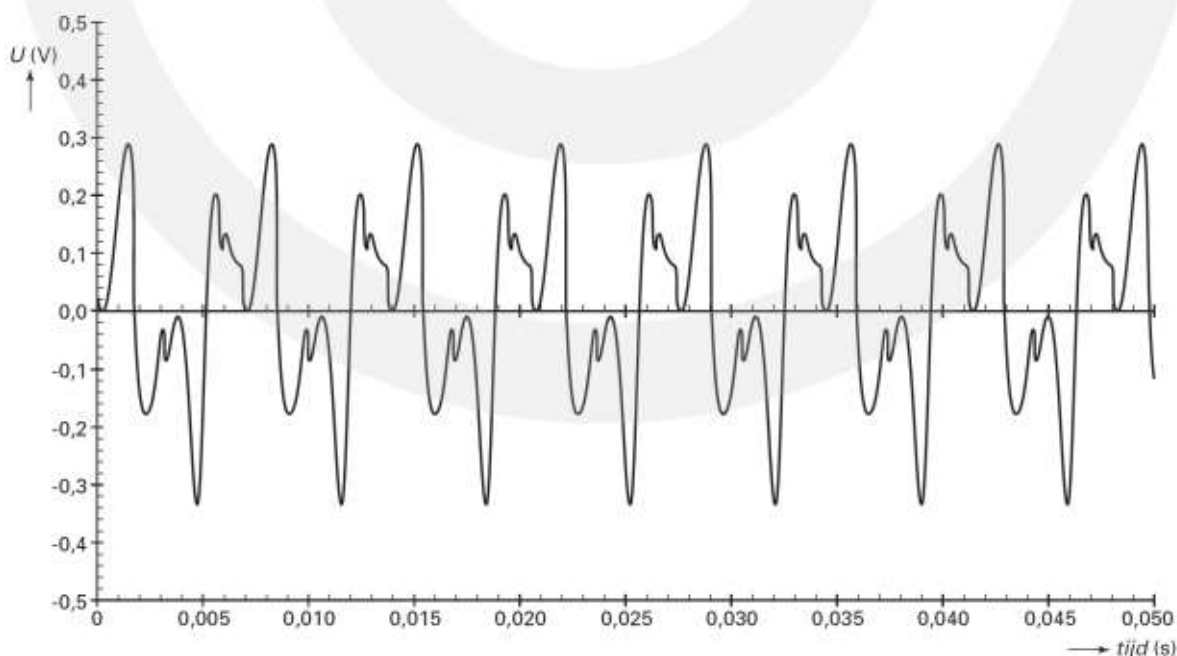


Figuur 1

Aan het mondstuk van de klarinet zit een zogeheten "riet". Bij het aanblazen van de klarinet gaat dit riet trillen. Deze trilling brengt de luchtkolom in het middenstuk van de klarinet in een staande golfbeweging. In de klarinet zitten gaten. Door één of meer van deze gaten te sluiten, kunnen verschillende tonen worden gemaakt. Zo'n toon is geen zuivere harmonische trilling, maar een samenstelling van meerdere harmonische trillingen: een trilling met de grondfrequentie en trillingen met veelvouden van deze grondfrequentie. Als alle gaten gesloten zijn, produceert de klarinet zijn laagste toon.

Bij het open uiteinde (de beker) van de klarinet plaatst men een microfoon.

In figuur 2 is het uitgangssignaal van de microfoon weergegeven als functie van de tijd bij de laagste toon van de klarinet. Bij deze meting was de temperatuur van de lucht in de klarinet 20 °C.

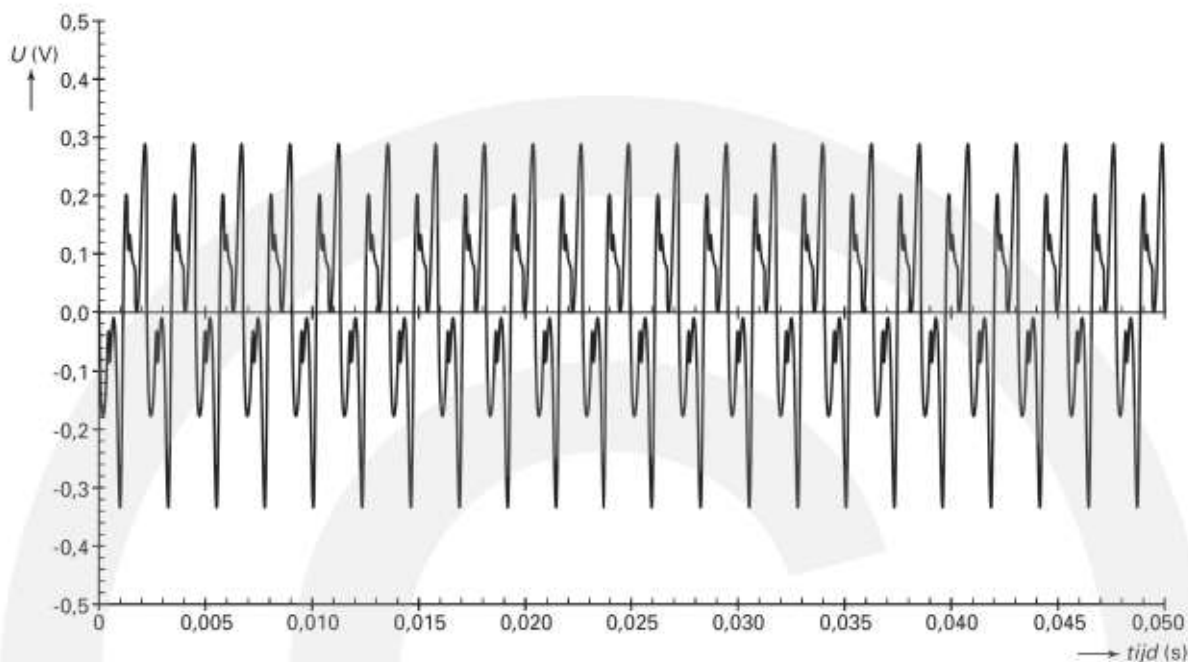


Figuur 2

3p

a Bepaal de grondfrequentie van de laagste toon van de klarinet.

De eerste boventoon van de laagste toon kan gemaakt worden door een bepaald gat te openen. Figuur 3 toont het uitgangssignaal van de microfoon bij deze boventoon.



Figuur 3

- 3p **b** Leg uit of de kant van het riet opgevat kan worden als een gesloten of een open uiteinde.

Op een andere dag worden dezelfde metingen herhaald. Nu blijkt dat de frequentie van de eerste boventoon van de klarinet 3 Hz lager is dan de frequentie die hoort bij figuur 3.

- 3p **c** Laat met behulp van een berekening zien of het verschil van 3 Hz het gevolg zou kunnen zijn van een eventueel temperatuurverschil tussen beide dagen.

Bij een bepaalde toon wordt op een afstand van 30 cm recht voor de beker van de klarinet een geluidsintensiteit van $3,16 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (75 dB) gemeten. Veronderstel dat het instrument steeds dezelfde toon met gelijk vermogen produceert. Behalve de toon van de klarinet is er geen geluid te horen.

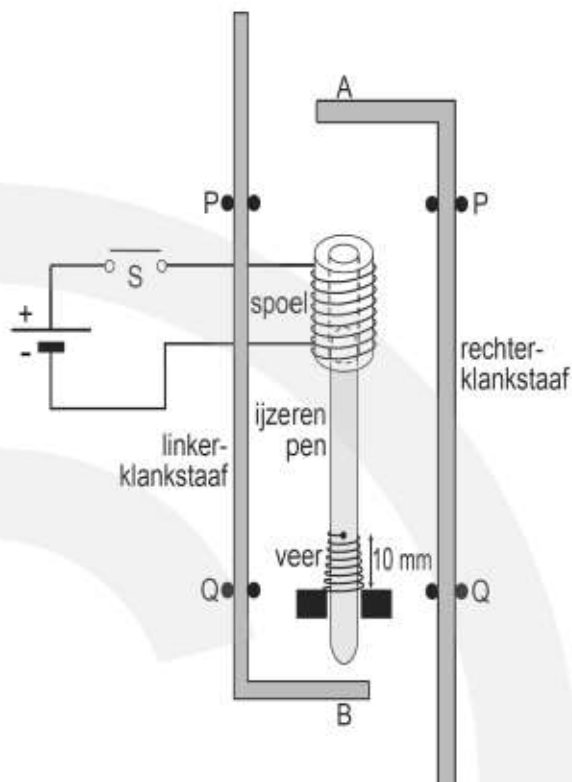
- 3p **d** Bereken de geluidsintensiteit op 1,50 meter van de beker.

Ding-dong (aangepast)

In figuur 1 zie je een schematische tekening van de binnenkant van een bepaald type huisdeurbel: de dingdong.

De metalen klankstaven zitten vast in de punten P en Q. De afstand tussen P en Q is 7,5 cm. Als de rechterklankstaaf aangeslagen wordt, gaat hij trillen.

Er ontstaat een staande transversale golf met knopen bij P en Q. De grondtoon is 392 Hz.



Figuur 1

De 'dong' van de linkerklankstaaf klinkt lager dan de 'ding'. Beide klankstaven zijn van hetzelfde metaal gemaakt en even lang, maar de linkerklankstaaf is dunner. Zie figuur 1.

- 3p **a** Bereken de voortplantingssnelheid van de golven in deze klankstaaf.

De veer zit vast aan de ijzeren pen en beweegt met de pen mee. Zie figuur 1. De spanningsbron levert een spanning van 6,0 V. Als S wordt ingedrukt is de stroomsterkte 0,25 A. De elektrische energie wordt in dit geval voor 4% omgezet in zwaarte-energie van de ijzeren pen. Om de rechterklankstaaf te raken, moet de pen minstens 25 mm omhooggaan. De massa van de ijzeren pen is 12 gram.

- 4p **c** Bereken de tijd dat S minimaal ingedrukt moet zijn om de ijzeren pen 25 mm omhoog te brengen. Verwaarloos hierbij de vrijgekomen veerenergie.

HINT gebruik je kennis van energie en elektriciteit

Als de ijzeren pen terugvalt, wordt hij afgeremd doordat de veer die aan de pen vastzit, ingedrukt wordt. De pen heeft voldoende snelheid om de veer zover in te drukken dat de linkerklankstaaf geraakt wordt. Daarna voert de pen een gedempte harmonische trilling uit zonder de klankstaaf nog te raken. In de ruststand is de veer door de zwaartekracht van de pen 4,0 mm ingedrukt.

- 3p **d** Bereken de trillingstijd van de trilling die de ijzeren pen uitvoert.

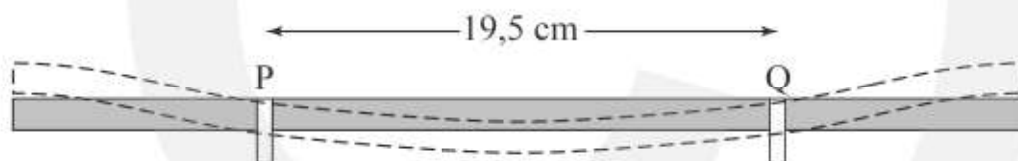
Xylofoon (aangepast)

Een xylofoon is een muziekinstrument. Dit instrument bestaat uit een metalen frame, waarop houten klankstaven liggen die een toon voortbrengen als je er met xylofoonstokken op slaat. Onder de klankstaven hangen resonantiebuizen die het geluid versterken. Zie figuur 1.



Figuur 1

Eén van de klankstaven steunt op de plaatsen P en Q op het frame. Zie figuur 2. Wanneer de klankstaaf in het midden wordt aangeslagen, ontstaat er in de staaf een staande transversale golf met knopen in de punten P en Q.

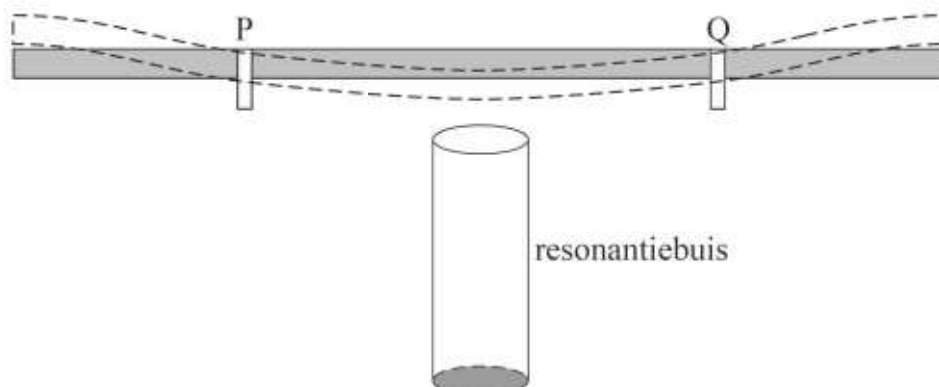


Figuur 2

Deze klankstaaf brengt bij kamertemperatuur een toon voort met een frequentie van 440 Hz.

- 3p **a** Bereken de voortplantingssnelheid van de transversale golven in deze staaf.

De resonantiebuizen die onder de klankstaven hangen, zijn aan de bovenkant open en aan de onderkant gesloten. Zie figuur 3.



Figuur 3

Na het aanslaan van een klankstaaf ontstaat in de lucht van de bijbehorende resonantiebuys een staande longitudinale golf met 1,3 cm boven de buis een buik. De resonantiefrequentie is gelijk aan de frequentie van de klankstaaf. De resonantiebuys brengt de grondtoon voort. De temperatuur is 20 °C.

- 3p **b** Bereken de lengte van de resonantiebuys die onder de klankstaaf van 440 Hz hangt.

Zonder de resonantiebuys geeft de klankstaaf op een bepaalde afstand een geluidsintensiteit van $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$, mét resonantiebuys van $5,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$.

De relatie tussen het geluidsniveau in dB en de intensiteit is:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12}}$$

- L_p is het geluidsniveau in decibel (dB)
- I is de geluidsintensiteit in W/m^2

- 3p **c** Bereken hoeveel decibel het geluidsniveau toeneemt door de resonantiebuys.

Onderwatergeluid (aangepast)

Lees onderstaand artikel.

De Koninklijke marine heeft met groot succes een door TNO ontwikkeld nieuw type sonar getest, LFAS (low frequency active sonar). Deze laagfrequente actieve sonar-systemen zijn gebaseerd op geluid tot 2000 Hz en dragen veel verder in de oceaan dan de tot nu toe gebruikte systemen.

Een sonar zendt onder water geluidsgolven uit die na weerkaatsing tegen voorwerpen kunnen terugkomen. Uit de tijd die het geluid erover doet om heen en terug te gaan, kan de afstand tot het voorwerp bepaald worden.

De sonar van een schip wordt ingezet om een rots onder water op te sporen. De echo van het geluid wordt 4,35 s na het uitzenden opgevangen. De temperatuur van het zeewater is 20 °C.

- 3p **a** Bereken de afstand van het schip tot de rots.

Met een 2,0 kHz sonar kunnen in zee scholen vis worden gedetecteerd. Vissen kleiner dan een halve meter die alleen zwemmen zijn hiermee echter niet of nauwelijks te detecteren.

- 2p **b** Leg met een berekening uit waarom deze vissen slecht met deze sonar kunnen worden gedetecteerd.

HINT vergelijk de golflengte van de geluidsgolven met de afmeting van een vis

Bij de marine gebruikt men onderwatergeluid met een zeer sterk volume. De geluidsbron levert daarbij op 30 m afstand een geluidsniveau van 160 dB.

De relatie tussen het geluidsniveau in dB en de intensiteit is:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12}}$$

- L_p is het geluidsniveau in decibel (dB)
- I is de geluidsintensiteit in W/m^2

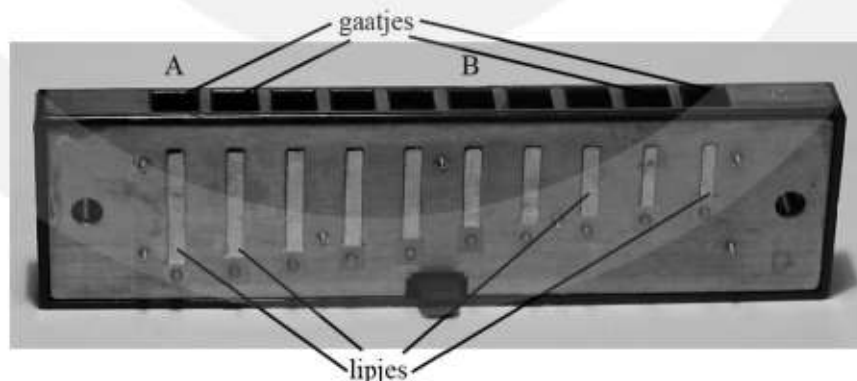
- 3p **c** Bereken het vermogen van deze geluidsbron er van uitgaande dat in alle richtingen even sterk wordt uitgezonden. (In werkelijkheid wordt er maar in een zeer beperkte richting uitgezonden.)

Het gebruik van de LFAS-sonar is omstreden. Dolfijnen en walvissen, die onderling ook communiceren met sonar, worden tot op grote afstand in de war gebracht door deze geluidsgolven. Men gaat ervan uit dat deze dieren last hebben van LFAS zodra het geluidsniveau ervan meer is dan 50 dB, het normale geluidsniveau van een rustige zee.

- 4p **d** Laat met behulp van een berekening zien of deze dieren op $1,0 \cdot 10^3$ km afstand last hebben van bovengenoemde geluidsbron. Verwaarloos daarbij de afname van de sterkte van het geluid door andere oorzaken dan de toegenomen afstand.

Mondharmonica

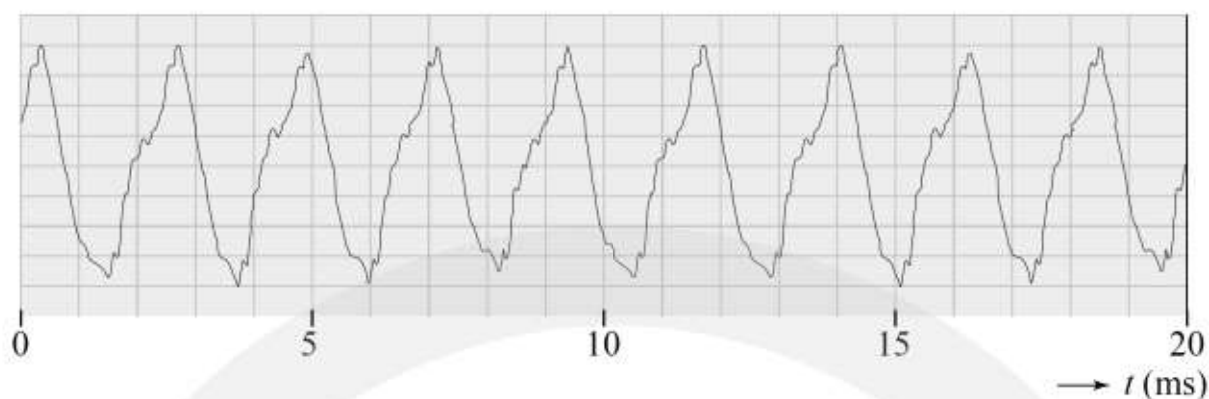
Van een mondharmonica is de beschermkap weggehaald. Zie figuur 1.



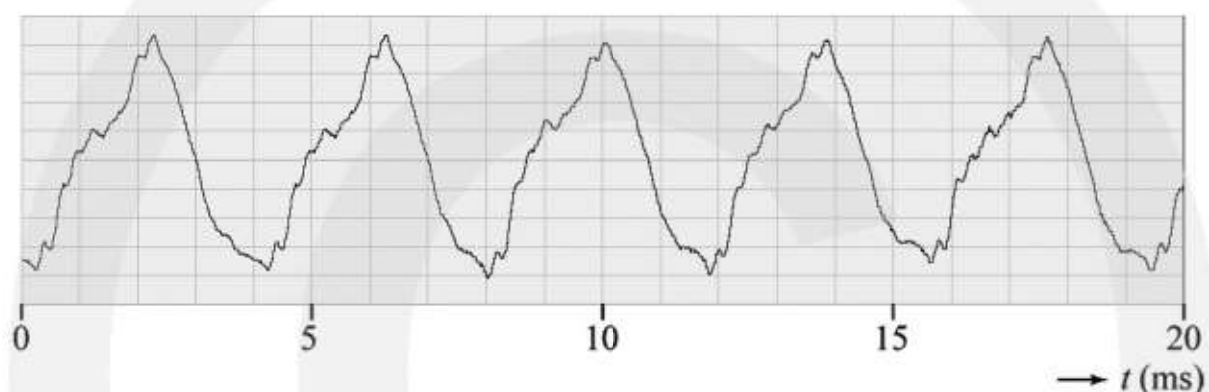
Figuur 1

Deze mondharmonica heeft tien gaatjes. Onder elk gaatje zit een metalen lipje. Als een speler lucht door een gaatje blaast, ontstaat in het lipje onder dat gaatje een staande golf. Het lipje trilt dan in de grondtoon. De lipjes onder de gaatjes A en B zijn even dik en even breed.

Met behulp van een microfoon en een computer zijn twee opnames gemaakt van het geluid, één bij het blazen in gat A en één bij het blazen in gat B. In figuur 2 en 3 zie je het resultaat van de opnames. Elke opname duurde 20 ms.



Figuur 2



Figuur 3

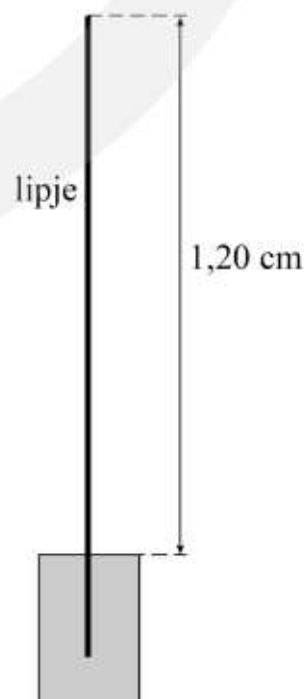
- 3p **a** Leg uit welke van deze figuren correspondeert met gat A.
- 3p **b** Bepaal welke toon in figuur 2 weergegeven is. Gebruik Binas. Geef je antwoord met een letter en een cijfer zoals in Binas.

Een lipje is een dun koperen stripje dat aan één kant is vastgemaakt. Het andere uiteinde kan vrij trillen. Een zijaanzicht van een lipje zie je in figuur 4. Als het lipje van figuur 4 in de grondtoon trilt, ontstaat een toon van 392 Hz.

- 3p **c** Bereken de voortplantingssnelheid van de golven in het lipje.

Naast de grondtoon gaat het lipje (zeker bij hard blazen) ook trillen in de eerste boventoon.

- 2p **d** Geef in figuur 4 de plaatsen aan van de buiken en de knopen in het lipje als het trilt in de eerste boventoon.



Figuur 4

Radarcontrole

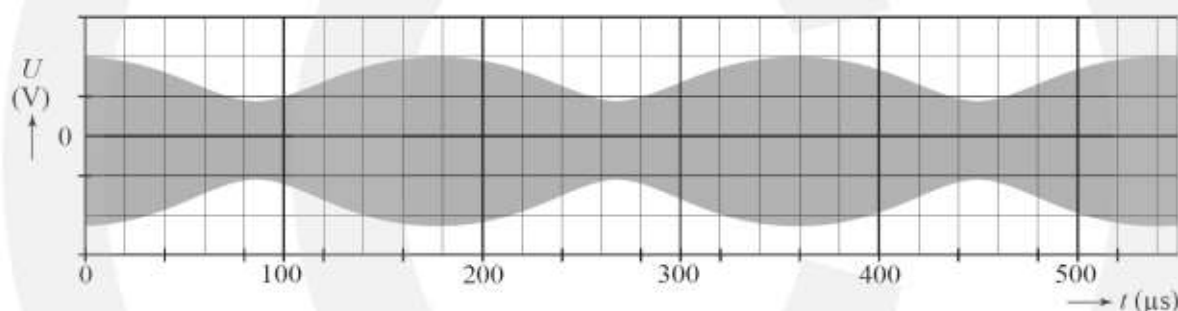
Om de snelheid van een naderende auto te meten kan de politie een radarapparaat gebruiken. Dit apparaat zendt gedurende enige milliseconden radargolven uit die door de rijdende auto worden teruggekaatst. De golflengte van de uitgezonden radargolven is 9,0 mm. Radargolven planten zich voort met de lichtsnelheid.

- 3p **a** Bereken de frequentie van de uitgezonden radargolven.

De teruggekaatste radargolven hebben een veel kleinere amplitude en een iets kleinere golflengte dan de uitgezonden radargolven.

- 2p **b** Geef voor beide veranderingen de oorzaak.

Om de snelheid van de auto te bepalen kan men de teruggekaatste golven laten interfereren met de uitgezonden golven. Hierbij ontstaat een samengestelde golf (zweving) waarvan de amplitude varieert met een bepaalde frequentie. In figuur 1 is zo'n zweving weergegeven.



Figuur 1

De frequentie waarmee de amplitude varieert, is gelijk aan het frequentieverschil Δf tussen de uitgezonden golf en de teruggekaatste golf. Voor het verband tussen Δf en de snelheid v van een auto die op grote afstand nadert, geldt de volgende formule:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda}$$

Hierin is:

- Δf het frequentieverschil in Hz
- v de snelheid van de auto in m s^{-1}
- λ de golflengte van de uitgezonden straling in m

- 4p **c** Bepaal met behulp van figuur 1 de snelheid van de naderende auto in km/h.

Als de auto dichterbij het radarapparaat komt, is deze formule niet juist. Er moet dan gecorrigeerd worden voor het feit, dat de auto niet precies in de richting van het radarapparaat rijdt. Voor de snelheid v moet dan de component van de snelheid in de richting van het radarapparaat ingevuld worden.

- 2p **d** Leg uit of in dat geval de formule een te grote of een te kleine waarde voor de snelheid v geeft.

Spaken van een fietswiel

In figuur 1 zie je het voorwiel van een fiets met 36 spaken. De as van het wiel zit vast aan het frame. Rondom deze as draait de naaf. De spaken zitten vast tussen de naaf en de velg.



Figuur 1

Met de spaken kan het fietswiel worden afgesteld. Daarvoor moet de fietsenmaker alle spaken met een speciale sleutel aanspannen. Door met een pennetje tegen de spaken te tikken en naar de toon die dan klinkt te luisteren, weet de fietsenmaker of de spankracht in de spaken goed is. Als de fietsenmaker tegen een spaak tikt, hoort hij een toon van 300 Hz. Neem aan dat dit de grondtoon van de spaak is. De lengte van een spaak tussen naaf en velg is 30 cm. De massa van een spaak is 6,00 g.

Voor de voortplantingssnelheid van de golven in een spaak geldt:

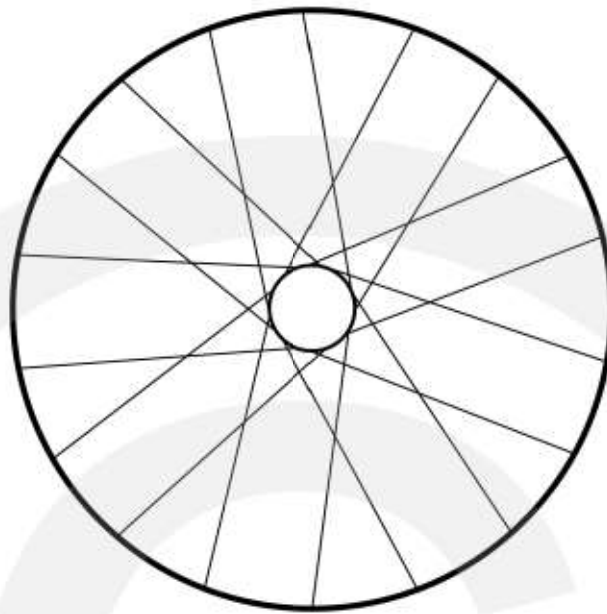
$$v = \sqrt{\frac{F_s}{m_\ell}}$$

- v is de voortplantingssnelheid van de golven in de spaak in m/s
- F_s is de spankracht in de spaak in N
- m_ℓ is de massa per lengte-eenheid van de spaak in kilogram per meter kg/m

- 4p **a** Bereken de spankracht in de spaak.
- 2p **b** Leg met behulp van bovenstaande formule uit of de toon die de spaak geeft hoger of lager wordt als de spaak strakker aangedraaid wordt.

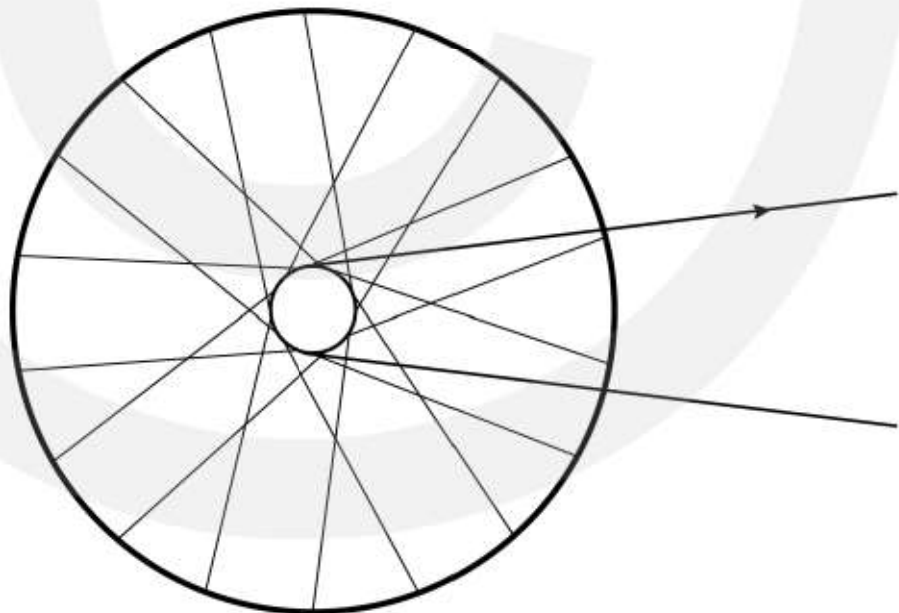
Ook in een achterwiel zitten 36 spaken. In figuur 2 zijn er daarvan 18 getekend.

Dit zijn de spaken die aan één kant van het wiel zitten. Als iemand op de fiets gaat zitten, verandert door het gewicht van de fietser de spankracht in de spaken van het achterwiel.



Figuur 2

- 2p **c** Geef in figuur 2 met letters G ten minste twee spaken aan waarin de spankracht groter wordt en met letters K ten minste twee spaken waarin de spankracht kleiner wordt.



Figuur 3

Door te trappen oefen je via de ketting een kracht uit op de naaf van het achterwiel. Dit is in figuur 3 aangegeven met de pijl. Hierdoor wordt de spankracht in de helft van de spaken groter en in de andere helft kleiner.

- 2p **d** Geef in figuur 3 met letters G ten minste twee spaken aan waarin de spankracht groter wordt en met letters K ten minste twee spaken waarin de spankracht kleiner wordt.

Sopraansaxofoon (aangepast)

Een sopraansaxofoon is het kleinste lid van de saxofoon-familie. Zie figuur 1. Een sopraansax is doorgaans recht, in tegenstelling tot de altsax en grotere leden van de saxofoonfamilie. De sopraansaxofoon staat meestal gestemd in bes en blaast, zoals alle saxofoons, over in het octaaf. De sopraansax is te vergelijken met een klarinet. Beide instrumenten hebben bij het mondstuk één riet. Het verschil in klankleur tussen een sopraansax en een klarinet wordt veroorzaakt door de verschillende boring. Een sopraansaxofoon heeft een conische boring (wordt aan de onderkant steeds breder), terwijl een klarinet een cilindrische boring heeft.



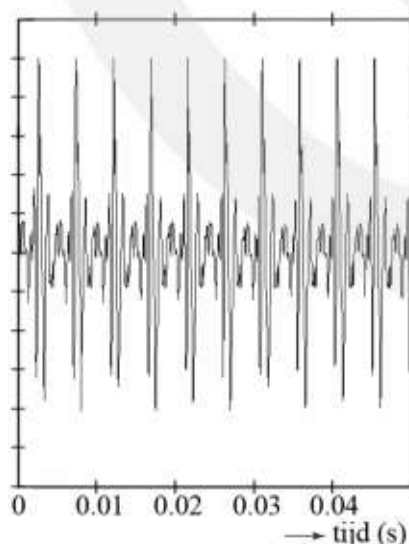
Figuur 1

Mauro en zijn vriend Stef bespreken de toonvorming van de sopraansaxofoon.

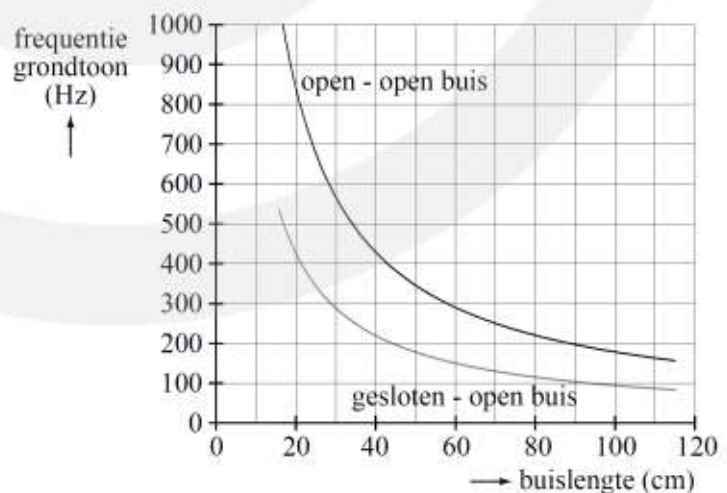
Ze formuleren twee hypothesen:

- 1 De buis heeft één gesloten en één open uiteinde.
- 2 De buis heeft twee open uiteinden.

Deze hypothesen willen ze eerst controleren aan de hand van de grondtoon. Mauro blaast op de saxofoon met alle kleppen dicht. Stef registreert het geluid met een computer. Zie figuur 2. Op internet vinden ze informatie over de frequentie van de grondtoon van beide types buis. Zie figuur 3. De sopraansaxofoon is 66 cm lang.



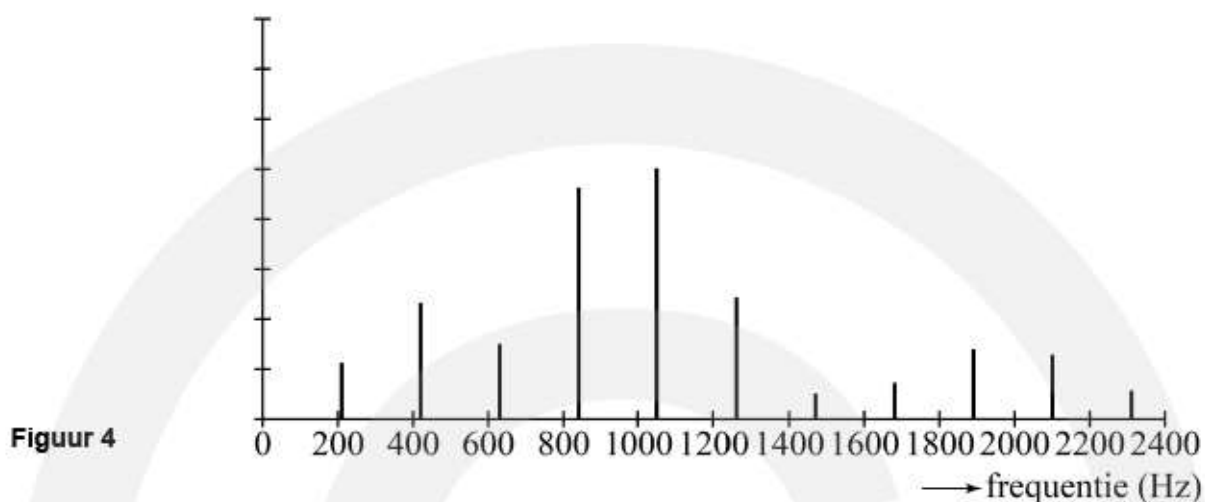
Figuur 2



Figuur 3

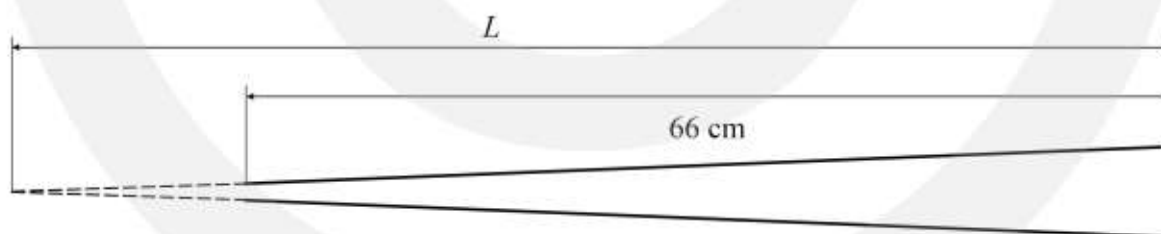
- 4p a Toon aan dat geen van beide hypothesen bevestigd wordt door de gegevens van figuur 2 in combinatie met figuur 3.

Om nog op een andere manier de hypothesen te testen, kijken Stef en Mauro naar de boventonen. In figuur 4 zijn de frequenties van de toon van de saxofoon weergegeven.



- 3p **b** Leg aan de hand van figuur 4 uit dat hypothese 2 het meest gesteund wordt.

Het lijkt er op dat hypothese 2 klopt, maar de grondfrequentie klopt niet. Daarom gaan Mauro en Stef in de literatuur zoeken hoe het precies zit met de toonvorming van een sopraansaxofoon. Zij vinden een theorie, die zegt dat een saxofoon een conische buis heeft. Dat wil zeggen dat de buis een deel van een kegel is. Zie figuur 5. Deze figuur is op schaal.



Figuur 5

Door de conische buis is de toonvorming anders dan bij een klarinet of een orgelpijp. Voor de grondtoon van een conische buis zoals een saxofoon geldt:

$$\lambda = 2 \cdot L$$

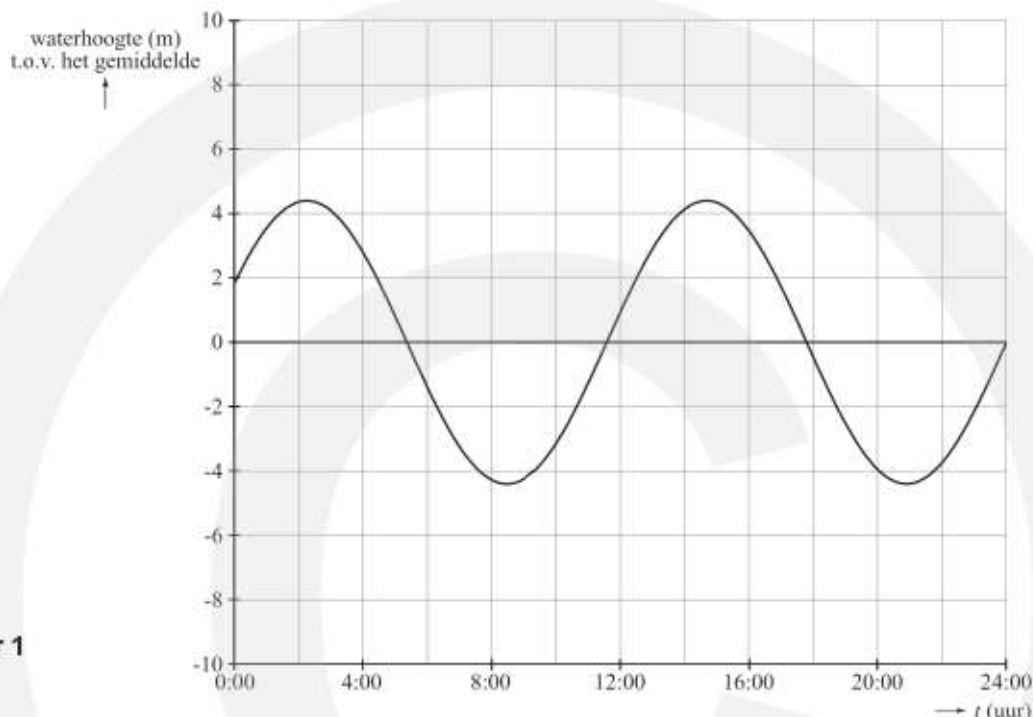
Hierin is:

- λ de golflengte van de grondtoon
- L de akoestische lengte van de conische buis. Deze kan verkregen worden door de lengte van de buis te bepalen tot het denkbeeldig punt waar de dikte gelijk wordt aan nul.

- 4p **c** Laat zien of de metingen van figuur 2 overeenkomen met bovenstaande theorie.

Getijdenresonantie

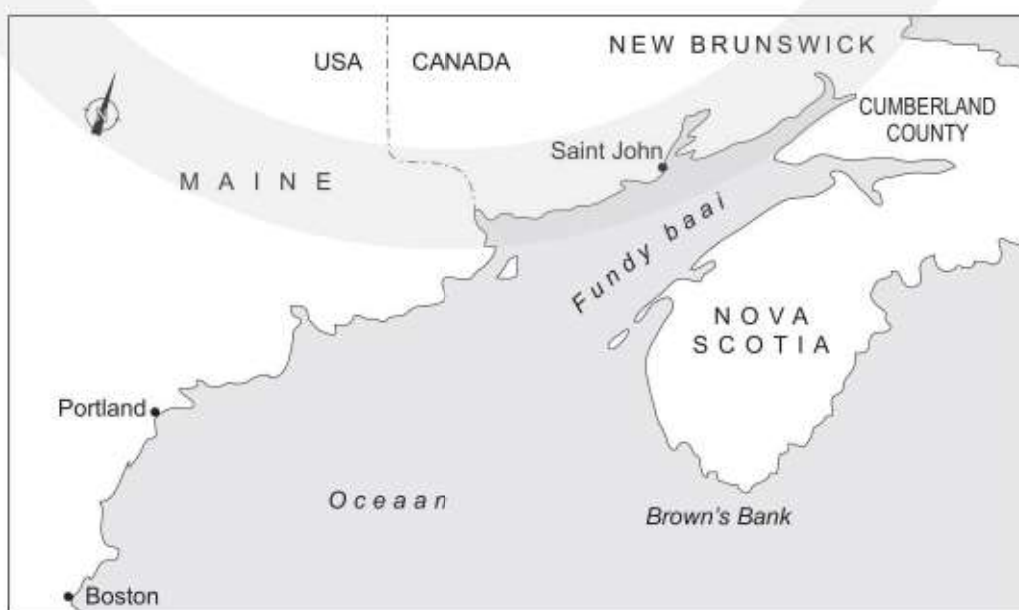
Op sommige plekken op aarde is het verschil tussen eb en vloed zeer groot. De plaats Saint John aan de Fundybaai in Canada is zo'n plaats. De waterhoogte in Saint John is gedurende één etmaal gemeten. Figuur 1 is een grafiek van deze metingen.



Figuur 1

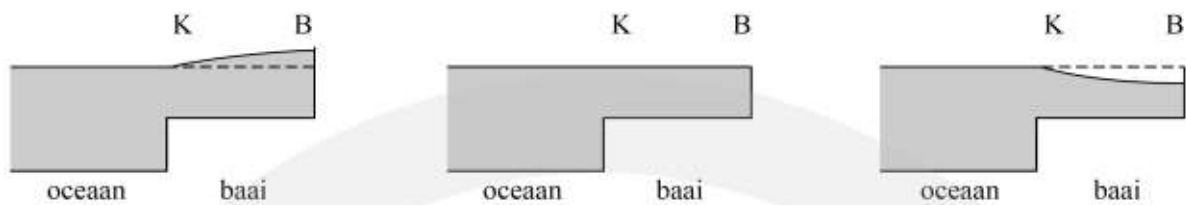
- 3p **a** Bepaal met behulp van de figuur op de uitwerkbijlage de maximale stijgsnelheid van het water in Saint John in centimeter per minuut.

De 325 km lange Fundybaai waaraan Saint John ligt, is weergegeven in figuur 2.



Figuur 2

Door zijn vorm en afmetingen ontstaat in de Fundybaai een staande golf. Deze is in figuur 3 in zijaanzicht op drie momenten schematisch weergegeven. Figuur 3 laat ook zien dat de baai minder diep is dan de oceaan.



Figuur 3

- 3p **b** Schets in figuur 1 de waterhoogte bij Cumberland County, aan het einde van de baai, als functie van de tijd.

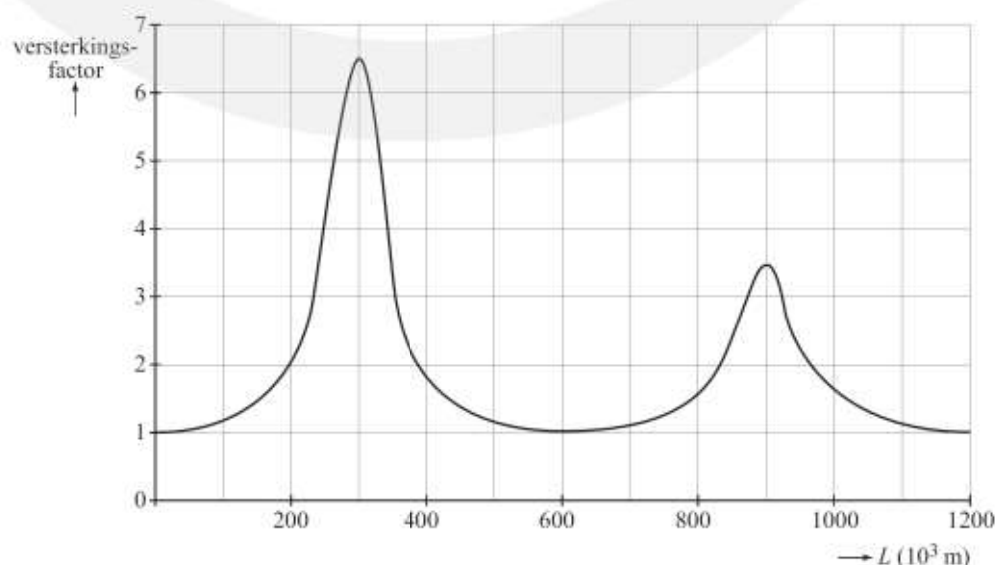
De golflengte van de staande golf is gelijk aan 4 maal de baailengte.

- 2p **c** Leg uit hoe dit blijkt uit figuur 3.

Het verschijnsel dat optreedt in de Fundybaai heet 'getijdenresonantie'. Dit verschijnsel treedt op meerdere plaatsen op aarde op. In een waterloopkundig laboratorium bestuderen wetenschappers met behulp van een computermodel de voorwaarden waaronder getijdenresonantie plaats kan vinden. Bij getijdenresonantie is er sprake van een grote versterkingsfactor. De versterkingsfactor is het maximale hoogteverschil in de baai gedeeld door het hoogteverschil buiten de baai.

$$\text{versterkingsfactor} = \frac{\text{maximale hoogteverschil in de baai}}{\text{hoogteverschil buiten de baai}}$$

De golfsnelheid in de baai hangt af van de diepte van de baai. Een van de modellen levert voor een baai met een diepte gelijk aan de diepte van de Fundybaai de volgende grafiek van de versterkingsfactor als functie van de baailengte L . Zie figuur 4.



Figuur 4

Je ziet dat hier maximale getijdenresonantie optreedt bij een baailengte van 300 km.

- 3p **d** Bepaal welke waarde voor de golfsnelheid gebruikt is in dit model.

Figuur 4 laat zien dat bij een baailengte van 900 km de versterkingsfactor ook hoog is.

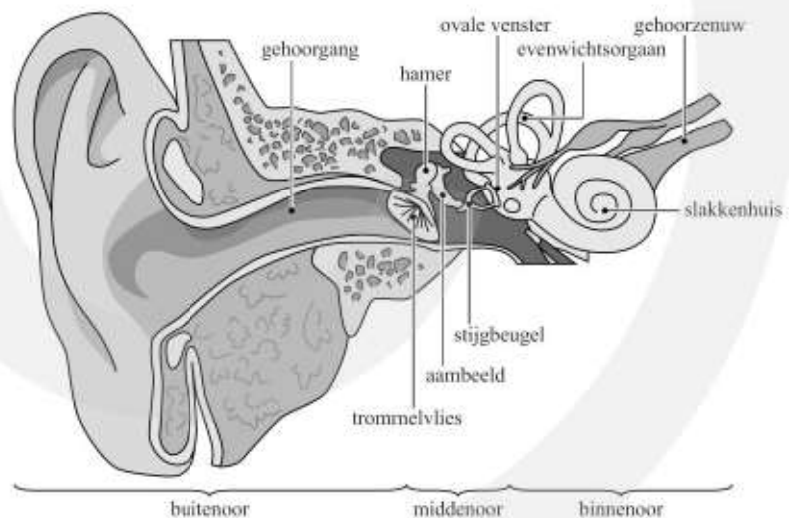
- 2p **e** Verklaar dit.

De werkelijke lengte van de Fundybaai bedraagt 325 km. Door klimaatverandering kan de zeespiegel gaan stijgen. Hierdoor wordt de voortplantingssnelheid in de baai groter, waardoor de maxima in figuur 4 verschuiven. Bewoners aan de Fundybaai maken zich ongerust dat ze hierdoor te maken krijgen met een nog groter getijdenverschil.

- 3p **f** Leg uit of de bewoners aan de baai zich terecht ongerust maken.

Oor

Het oor bestaat uit drie gedeeltes. Zie figuur 1.



Figuur 1

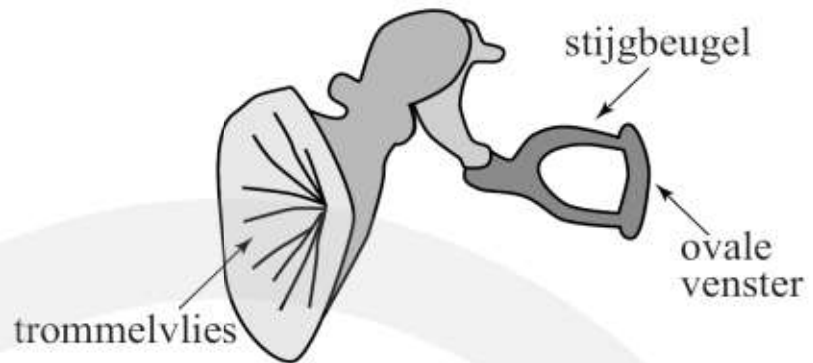
- Het **buitenoor** dat aan één kant wordt afgesloten door het trommelvlies doet dienst als resonantieholt.
- Het **middenoor** brengt geluidstrillingen over van het trommelvlies naar het ovale venster.
- Het **binnenoor** zet trillingen in het slakkenhuis om in zenuwpulsen die naar de hersenen worden gestuurd.

Het **buitenoor** is op te vatten als een buis die aan één kant gesloten is door het trommelvlies. De gehoorgang is bij een volwassen persoon 28 mm lang. Door resonantie wordt geluid met een frequentie van 3 kHz in het buitenoor versterkt.

- 3p **a** Toon dat aan met behulp van een berekening.

- 2p **b** Leg uit of de frequentie waarbij versterking optreedt bij een baby groter of kleiner is dan bij een volwassen persoon.

In het **middenoor** zitten gehoorbeentjes. Zie figuur 2.



Figuur 2

Door de hefboomwerking van de gehoorbeentjes wordt de kracht waarmee de stijgbeugel het ovale venster in beweging brengt met een factor 1,3 versterkt. De oppervlakte van het ovale venster is $\frac{1}{19}$ van de oppervlakte van het trommelvlies.

Voor de druk geldt: $p = \frac{F}{A}$

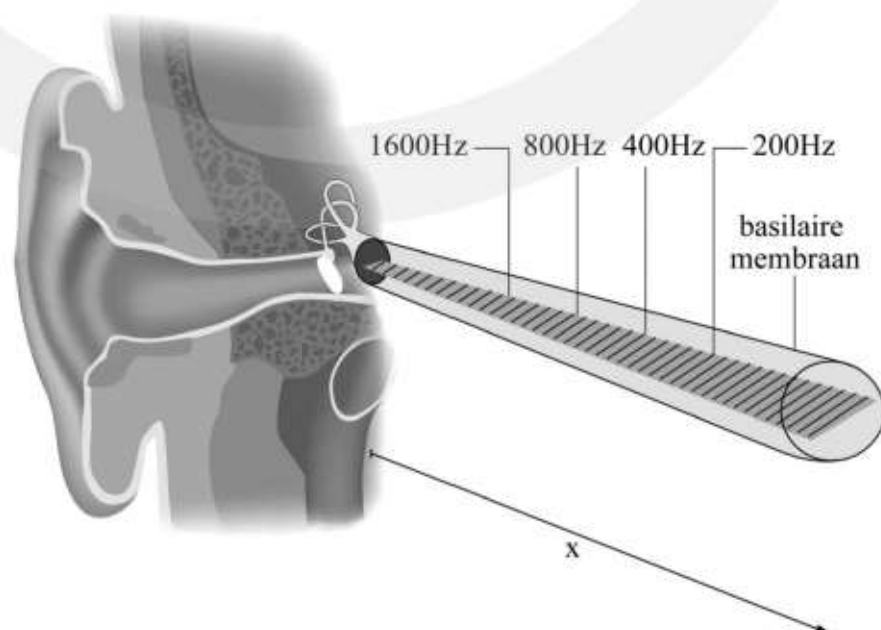
Hierin is:

- p de druk in N m^{-2}
- F de kracht in N
- A het oppervlak in m^2

2p

c Bereken hoeveel maal groter de druk op het ovale venster is vergeleken met de druk op het trommelvlies.

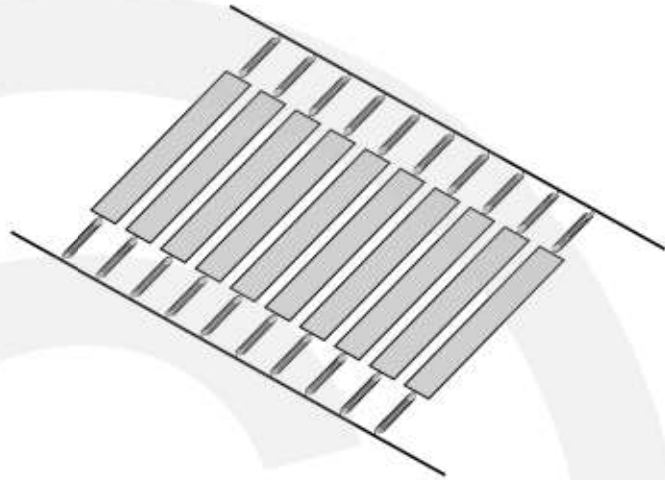
In het **binnenoor** zit het slakkenhuis. In figuur 3 is een tekening gemaakt van het slakkenhuis in uitgerolde toestand. Het is te beschouwen als een met vloeistof gevulde buis met het basilaire (basale) membraan als scheidingswand. Op het basilaire membraan zitten kleine massa's, die allemaal een andere eigenfrequentie hebben.



Figuur 3

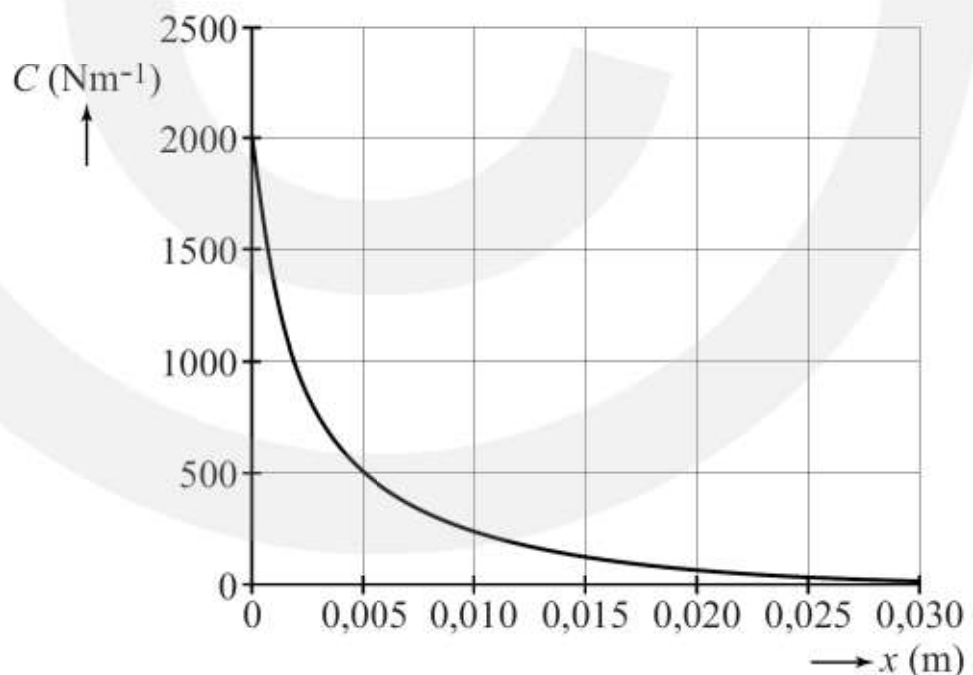
Als het ovale venster in trilling gebracht wordt, ontstaat in de vloeistof rondom het basilaire membraan een druktrilling. Als de eigenfrequentie van een kleine massa gelijk is aan de frequentie van de druktrilling, gaat die kleine massa meetrillen. In figuur 3 zijn de eigenfrequenties op verschillende plaatsen van het basilaire membraan aangegeven.

De werking van het basilaire membraan is te beschrijven met behulp van een model. In dit model bestaat het basilaire membraan uit een groot aantal kleine massa's aan veertjes. In figuur 4 is dit schematisch weergegeven.



Figuur 4

De stijfheid van het basilaire membraan is vergelijkbaar met de veerconstante C van een massa-veersysteem. De stijfheid van het basilaire membraan verandert met de afstand x tot het ovale venster. Zie figuur 5



Figuur 5

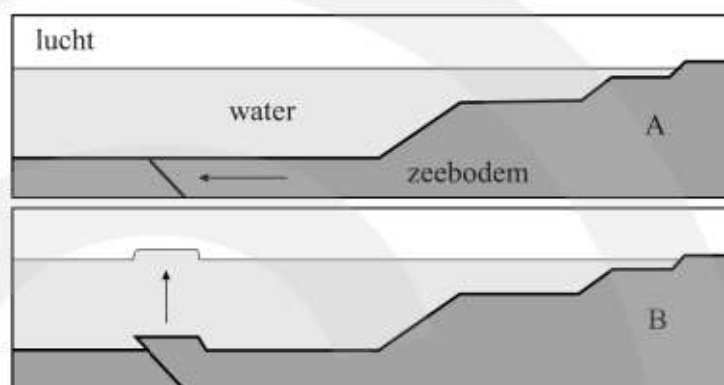
Op een afstand van 5,0 mm van het ovale venster bedraagt de eigenfrequentie 3,0 kHz.

- 3p **d** Bepaal de massa in het gebruikte model op die plaats van het basilaire membraan.
- 2p **e** Laat met behulp een schatting zien of in dit model de massa's toenemen of afnemen als de afstand x groter wordt.

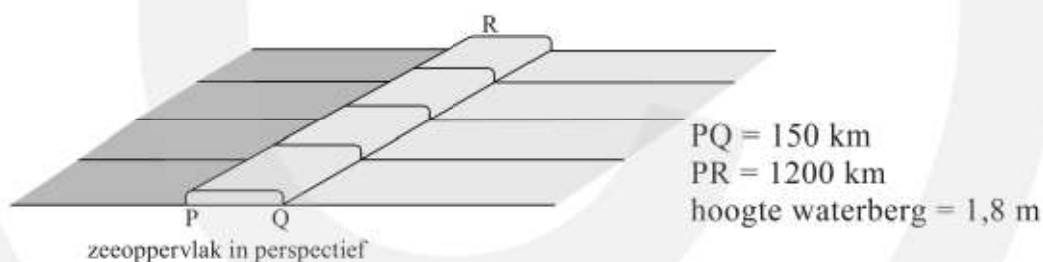
Tsunami

Figuur 1 laat op een vereenvoudigde manier zien hoe een gedeelte van de zeebodem door een aardverschuiving plotseling omhoogkomt. Het zeewater dat boven dat gedeelte zit, wordt omhooggeduwd, waardoor er een 'waterberg' aan het oppervlak ontstaat. Deze waterberg is meestal niet hoog, maar kan in de lengte en de breedte grote afmetingen hebben. Figuur 2 toont zo'n waterberg met zijn afmetingen, in perspectief. De figuren zijn schematisch en niet op schaal.

Figuur 1



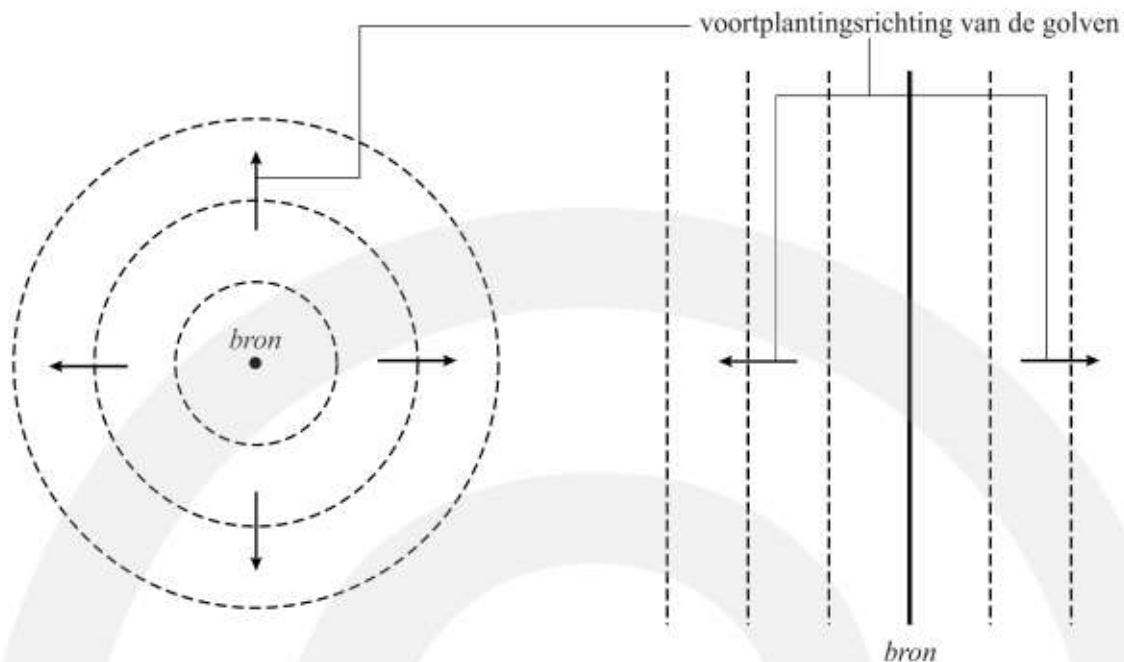
Figuur 2



De waterberg kan een tsunami, een vloedgolf aan de kust, veroorzaken. Het mogelijke gevaar van een tsunami hangt af van de zwaarte-energie van de waterberg ten opzichte van het normale zeepeil. Als deze energie meer dan 0,5 PJ (petajoule) bedraagt, is er kans op een tsunami.

- 4p **a** Ga na met een berekening of de zwaarte-energie van de waterberg in figuur 2 de waarde van 0,5 PJ overschrijdt.

Een tsunami-golf verliest weinig aan hoogte als hij een grote afstand aflegt. Dit in tegenstelling tot een golf vanuit een puntvormige bron zoals bijvoorbeeld veroorzaakt door een steen die in een vijver valt. In de figuren 3 en 4 worden beide situaties vergeleken.



Figuur 3

Figuur 4

- 2p **b** Leg uit waarom de amplitude van een golf in figuur 3 wel sterk afneemt en in figuur 4 (bijna) niet.

Figuur 5A laat zien hoe de waterberg zich naar rechts (en naar links) verplaatst als een golfberg.

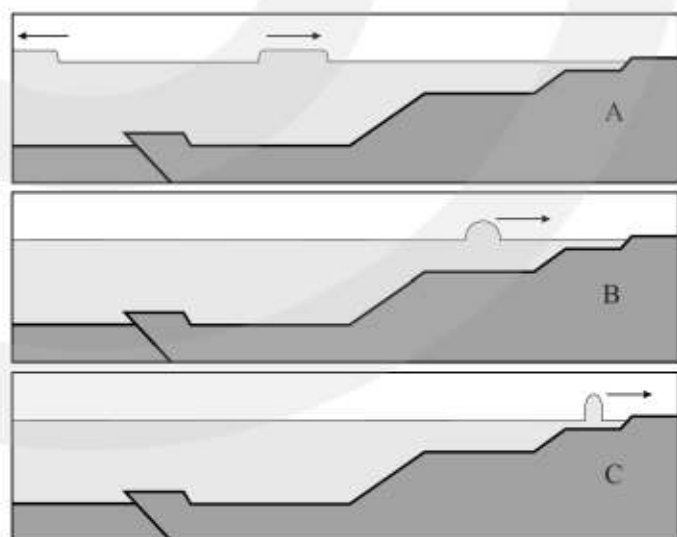
De snelheid v waarmee dat gebeurt, wordt gegeven door:

$$v = \sqrt{g \cdot d}$$

Hierin is:

- g de valversnelling;
- d de diepte van de zee.

In figuur 5B en 5C nadert de waterberg de kust, waarbij de diepte van de zee kleiner wordt. Er treden hierbij twee effecten op: de waterberg wordt smaller en de waterberg wordt hoger.



Figuur 5

- 3p **c** Geef voor beide effecten een natuurkundige verklaring.

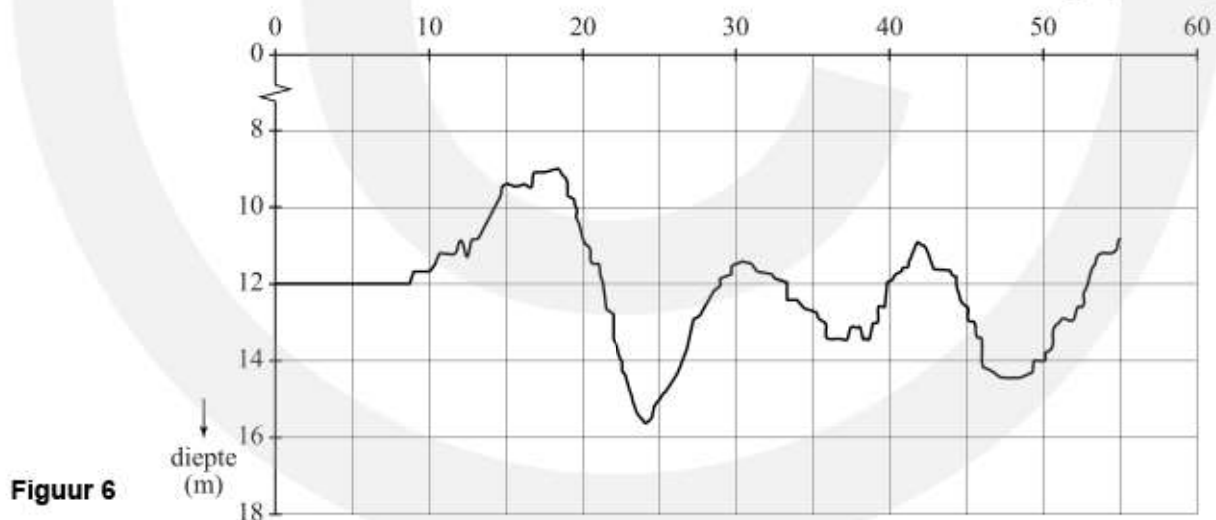
De gevolgen van een tsunami kunnen aan de kust desastreus zijn. Men zoekt dan ook naar manieren om de bevolking van gebieden in de gevarenzone vroegtijdig te waarschuwen. Eén manier werkt als volgt. Een aardverschuiving van de zeebodem veroorzaakt schokgolven door de aardkorst waarvan de voortplantingssnelheid het dubbele is van de voortplantingssnelheid van geluid in steen. Omdat deze snelheid groter is dan de snelheid van de waterberg, bereikt de schokgolf de kust eerder dan de tsunami.

Stel dat een aardverschuiving plaatsvindt op 2500 km van een meetpunt aan de kust en dat de zee een diepte heeft van 3,0 km.

- 4p **d** Bereken het tijdsverschil tussen het waarnemen van de schokgolf en de komst van de tsunami.

In werkelijkheid verloopt het ontstaan van een tsunami vaak complexer dan in figuur 1 is weergegeven. De aardverschuiving vindt meestal in meerdere stappen plaats en soms komen ook verzakkingen van de zeebodem voor. De golf die bij de kust aankomt, is dan ook meestal uitgebreider en kan bestaan uit meerdere golfbergen en golfdalen.

Figuur 6 geeft een registratie van de waargenomen diepte van de zee onder een schip vlak voor de kust van Phuket (Thailand) bij de tsunami van 2004.



- 2p **e** Leg uit met behulp van figuur 6 of bij Phuket eerst een golfdal of eerst een golfberg arriveerde.

De golflengte van de tsunami bepaalt mede hoe hevig de kust wordt getroffen.

- 3p **f** Bepaal met behulp van figuur 6 de golflengte van de tsunami-golven vlak voor de kust van Phuket.