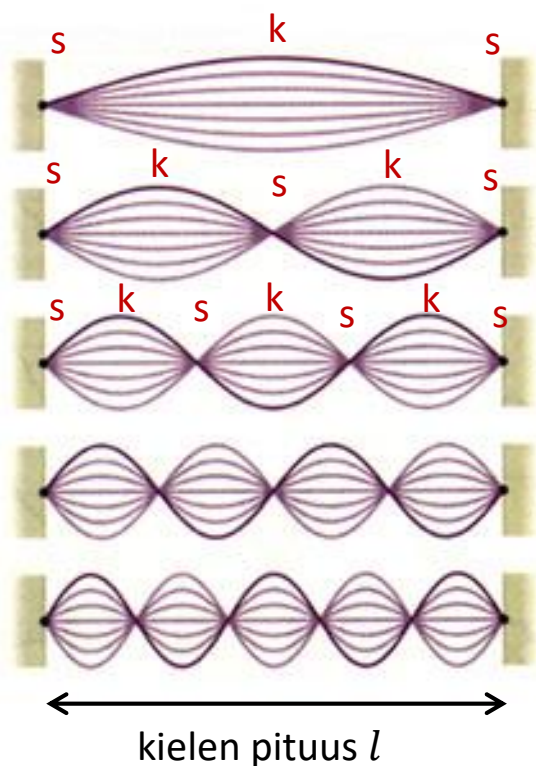


Seisova aaltoliike

- Syntyy kahden vastakkaiseen suuntaan etenevän samanlaisen aallon vahvistaessa toisiaan interferenssi-ilmiön vuoksi.
- Seisova aaltoliike ei etene, mutta se voi synnyttää (energiaa kuljettavia) ääniaaltoja
- Esimerkkinä värähtelevä (kitaran) kieli:
 - Paikallaan pysyviä kohtia kutsutaan *solmuiksi* (s) ja niiden välejä *kuvuiksi* (k)



Perusvärähtely:	$l = \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \lambda = 2l$	Perustaajuus f_1
1. ylävärähtely	$l = \lambda \Leftrightarrow \lambda = \frac{2l}{2}$	$f_2 = 2f_1$ (1. yläsävel)
2. ylävärähtely	$l = \frac{3}{2}\lambda \Leftrightarrow \lambda = \frac{2l}{3}$	$f_3 = 3f_1$ (2. yläsävel)
3. ylävärähtely	$l = 2\lambda \Leftrightarrow \lambda = \frac{2l}{4}$	$f_4 = 4f_1$ (3. yläsävel)
4. ylävärähtely	$l = \frac{5}{2}\lambda \Leftrightarrow \lambda = \frac{2l}{5}$	$f_5 = 5f_1$ (4. yläsävel)

jne.

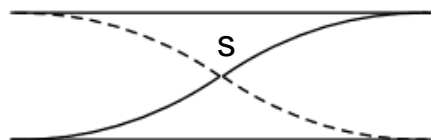
Taajuus ja aallonpituus ovat kääntäen verrannollisia, kun aallon nopeus v on vakio.

Seisova aaltoliike putkessa

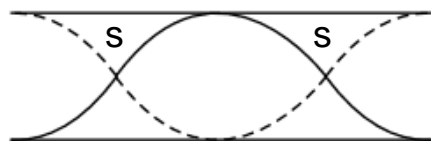
- Putkeen johdettu ääni saa ilman molekyylit värähtelemään
 - Syntyy seisova aalto, kun pitkittäiset aallot interferoivat
- Solmukohdissa ilman molekyylit pysyvät paikallaan
 - Paine-ero on suurimmillaan, koska viereisten kupujen värähtelevät ilmamolekyylit liikkuvat vuoroin kohti ja pois päin solmukohdasta (vrt. mäntä)
- Kupujen kohdalla molekyylin liike on suurinta ja paineen vaihtelut ovat pienimmillään
- Putken avoimeen päähän muodostuu kupu, koska siellä paine on aina sama kuin ulkoinen ilmanpaine

Seuraavissa piirroksissa ilman värähtelyä kuvataan havainnollisuuden vuoksi poikittaisena aaltoliikkeenä:

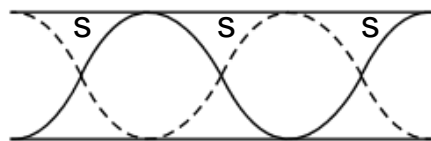
Molemmista päistä avoin putki (pituus = l)



$$l = \frac{\lambda}{2} \quad f_1$$

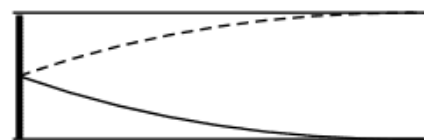


$$l = \lambda \quad f_2 = 2f_1$$

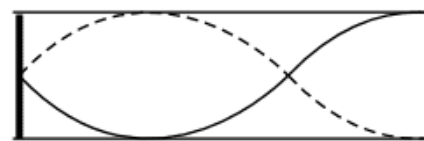


$$l = \frac{3}{2}\lambda \quad f_3 = 3f_1$$

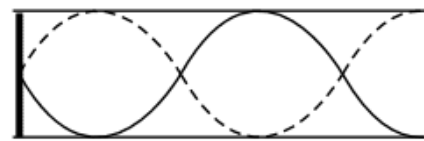
Puoliavoin putki (pituus = l)



$$l = \frac{\lambda}{4} \quad f_1$$



$$l = \frac{3}{4}\lambda \quad f_2 = 3f_1$$

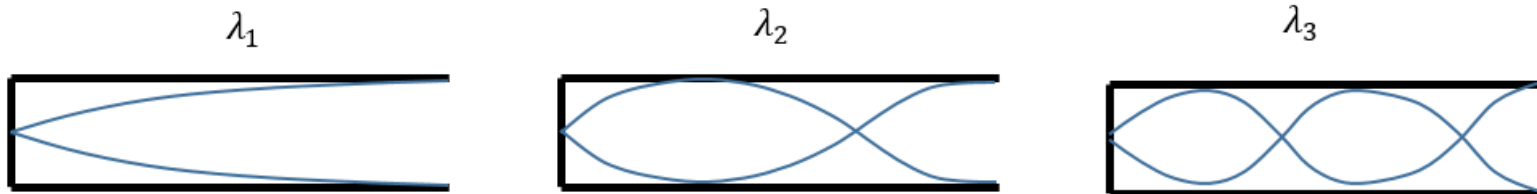


$$l = \frac{5}{4}\lambda \quad f_3 = 5f_1$$

Esimerkki:

Urkupilliä voidaan mallintaa toisesta päästään avoimena putkena.

- Urkupillin pituus on 65,6 cm. Määritä sen ominaistajuuudet +20 °C:ssa. (3 p.)
 - Kuinka suuri on urkupillin perustaajuus, kun urkupilli täytetään ilman sijaan hiilidioksidilla. Miten lämpötilan muutokset vaikuttavat perustaajuuteen? (2 p.)
 - Urkupilli soi perustaajuudellaan. Selitä miten ilman paine vaihtelee ja millaista on ilman molekyylien liike pillin eri kohdissa. (4 p.)
- a) Putkeen muodostuvia seisovia aaltoja voidaan mallintaa piirroksilla, jotka kuvaavat hiukkasten värähtelyä putken eri kohdissa (värähtely on kuitenkin pitkittäistä, ei poikittaista). Putken pituutta voidaan merkitä L :llä ja havaitaan, että ominaisaallonpituudet muodostuvat seuraavan säännön mukaisesti:



$$\lambda_1 = 4L$$

$$\lambda_2 = \frac{4}{3}L$$

$$\lambda_3 = \frac{4}{5}L$$

Yleisesti:

$$\lambda_n = \frac{4}{2n-1}L, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan

$$v = \lambda f \Leftrightarrow f = \frac{v}{\lambda}$$

Ominaistaajuudet voidaan laskea perustaajuuden

$$f_1 = \frac{v}{4L}$$

avulla seuraavasti:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{\frac{4}{2n-1}L} = (2n-1)\frac{v}{4L} = (2n-1)f_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Perustaajuus on

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{343 \text{ m/s}}{4 \cdot 0,65 \text{ m}} \approx 131,92 \text{ Hz} \approx 132 \text{ Hz}$$

Ominaistaajuudet ovat tämän perustaajuuden parittomia monikertoja.

- b) Kuinka suuri on urkupillin perustaajuus, kun urkupilli täytetään ilman sijaan hiilidioksidilla. Miten lämpötilan muutokset vaikuttavat perustaajuuteen? (2 p.)

Aallonpituus on perusvärähtelyssä $\lambda_1 = 4L$ ja taajuus

$$f_1 = \frac{v}{4L}.$$

Äänen nopeus hiilidioksidissa on 260 m/s. Taajuudeksi saadaan

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{260 \text{ m/s}}{4 \cdot 0,65 \text{ m}} = 100 \text{ Hz}$$

Lämpötilan noustessa äänen nopeus kasvaa. Aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan

$$f_1 = \frac{v}{4L},$$

joten mitä suurempi on äänen nopeus, sitä korkeampi on perustaajuus.

- c) Urkupilli soi perustaajuudellaan. Selitä miten ilman paine vaihtelee ja millaista on ilman molekyylien liike pillin eri kohdissa. (4 p.)

Ääni etenee pitkittäisenä aaltoliikkeenä ilmassa. Urkupillin värähdellessä perustaajuudella muodostuu sen sisälle seisova aalto. Ilman molekyylien värähdysliikkeen amplitudi on suurin pillin avoimessa päässä ja pienin suljetussa päässä kuvan mukaisesti. Värähtelyä voidaan kuvata piirroksella, jossa on kupu avoimessa päässä ja solmu suljetussa päässä.

Paineen vaihtelu on päinvastaista hiukkasten värähtelyyn nähden. Avoimessa päässä paine pysyy samana ympäristön kanssa eli siellä on paineen solmukohta. Suljetussa päässä paineen vaihtelut ovat kaikkein suurimmat. Ympäristöön nähden suljetussa päässä on vuoroin alipainetta ja vuoroin ylipainetta. Suljetussa päässä on paineen kupukohta.

