

Kari Ikonen

**TIIVISTELMÄ:** Artikkelissa johdetaan energiatarkastelulla peruskaava paineiskun laskemiseksi ja tarkastellaan nesteeseen sekoittuneen kaasun ja putken seinämän jouston paineiskua heikentävää vaikutusta. Esitetään paineiskun jakautuminen ja paineiskun aiheuttama kuormitus putken supistuskohdassa, laajentumiskohdassa tai putkihaarassa sekä paineiskun aiheuttama sivuttaisvoima putkikäyrässä.

#### JOHDANTO

Paineisku aiheutuu nesteen virtausnopeuden äkillisestä muutoksesta, jossa virtaavan nesteen liike-energia muuttuu muodonmuutosenergiaksi. Virtaus pysähtyy äkillisesti esimerkiksi takaiskuventtiilin sulkeutuessa. Paineisku rasittaa hyvin voimakkaasti putkistoa, siihen liittyviä pumppuja ja venttiilejä sekä putkiston tuentoja. Toisaalta paineiskun vaikutusta vähentää etenkin lyhyissä putkistoissa kuormituksen lyhytaikaisuus, joka aiheutuu paineaallon suuresta etenemisnopeudesta (esimerkiksi vedessä yli kilometrin sekunnissa). Paineiskujen tarkastelu nesteessä /3/ on paljolti analogista iskuaaltojen tarkastelulle kiinteässä aineessa /1/. Merkittävin ero on, että neste ei kestä vetojännitystä.

#### PERUSKAAVA PAINEISKUN VOIMAKKUUDEN LASKEMISEKSI

Tarkastellaan tilannetta suorassa putkessa (kuva 1), jossa virtaa aluksi nestettä tasaisesti nopeudella  $v$  paineessa  $p_0$ . Virtaus pysäytetään äkillisesti kohdassa B, josta lähtee nesteen kokoonpuristuvuudesta ja tiheydestä riippuvalla nopeudella  $\bar{c}$  nesteen suhteen etenevä tiivistysaalto ylävirtaan ja harvennusaalto alavirtaan. Tarkastellaan tilannetta pysäytyskohdasta ylävirtaan päin. Tiivistysaallon oikealla puolella kaikki nestehiukkaset ovat pysähtyneet, mistä on seurauksena paineen nousu  $\Delta p$ . Paineaallon vasemmalla puolella oleviin hiukkasiin sen sijaan virtauksen pysäyttäminen kohdassa B ei ole ehtinyt vaikuttaa, joten niillä on edelleen alkuperäinen nopeus  $v$ . Tarkastellaan virtausalkion energian

säilymistä paineiskussa olettaen sisäenergian muutoksen olevan pelkästään kimmoista muodonmuutosenergiaa. Tilavuudeltaan yksikön suuruisen alkion liike-energia ennen paineiskua on

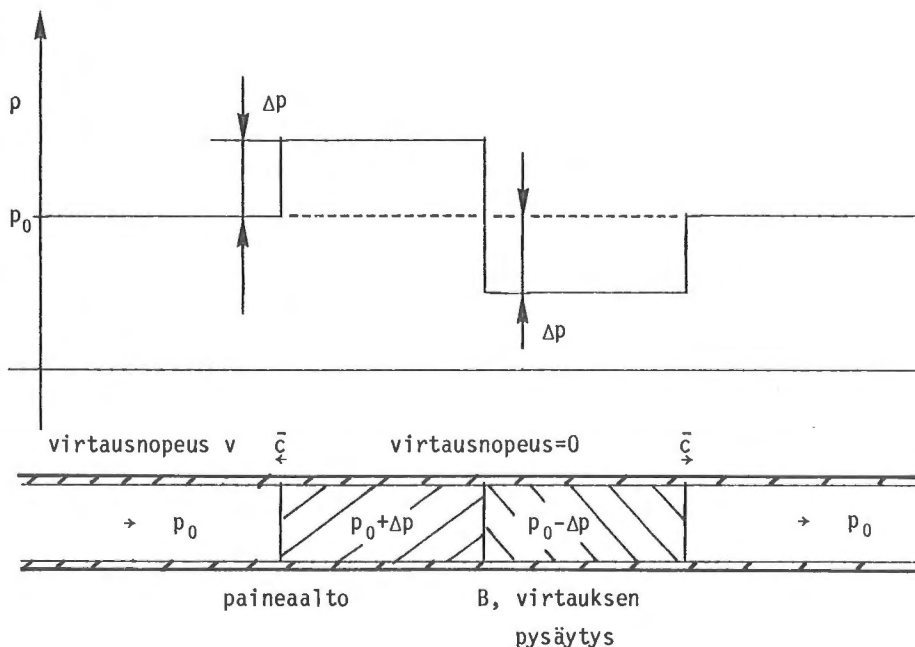
$$E_k = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (1)$$

missä  $\rho$  on nesteen tiheys ja  $v$  virtausnopeus. Tiivistysaallon kuljettua alkion läpi alkio pysähtyy ja sen liike-energia muuttuu muodonmuutosenergiaksi. Heikosti kokoonpuristuvassa nesteessä paineen  $\Delta p$  ja sen aiheuttaman tilavuuden suhteellisen muutoksen  $\Delta V/V$  välinen riippuvuus on lineaarinen, jolloin muodonmuutostyö

$$E_p = - \frac{1}{2} \Delta p \frac{\Delta V}{V}. \quad (2)$$

Tilavuuden suhteellinen muutos esitetään paineen nousun ja nesteen puristuvuuskertoimen (engl. bulk modulus)  $K$  avulla

$$- \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta p}{K}. \quad (3)$$



Kuva 1. Paineiskun eteneminen putkessa.

josta

$$K = K_\lambda \frac{1 + V_g/V_\lambda}{1 + V_g/V_\lambda \cdot K_\lambda/K_g}, \quad (8)$$

missä  $1/K_\lambda$  on nesteen puristuvuuskerroin,  $1/K_g$  kaasun puristuvuuskerroin ja  $V_g/V_\lambda$  kaasun ja nesteen tilavuussuhde sekä  $V = V_g + V_\lambda$ . Seoksen tiheys

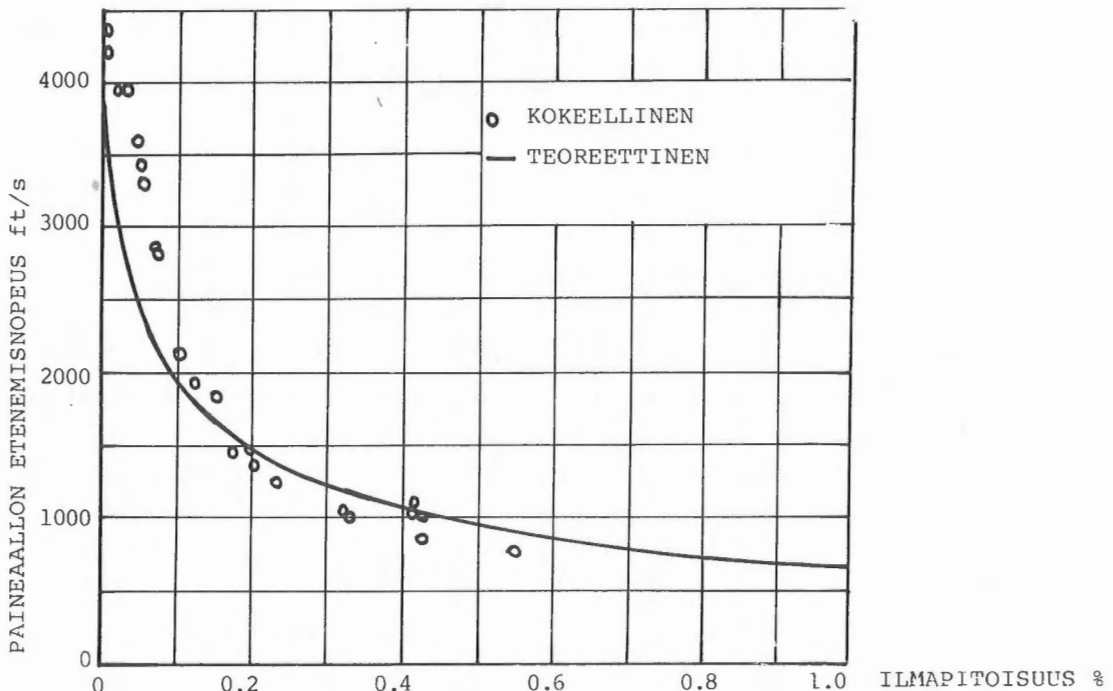
$$\rho = \frac{V_g}{V} \rho_g + \frac{V_\lambda}{V} \rho_\lambda = \rho_\lambda \frac{1 + V_g/V_\lambda \cdot \rho_g/\rho_\lambda}{1 + V_g/V_\lambda}. \quad (9)$$

#### ESIMERKKI

Vedessä ( $K_\lambda = 2026$  MPa,  $\rho_\lambda = 1000$  kg/m<sup>3</sup>) on yksi tilavuusprosentti ilmaa ( $K_g = 0,1437$  MPa,  $\rho_g = 1,227$  kg/m<sup>3</sup>) yhden ilmakehän paineessa. Kaavoista (8) ja (9) saadaan  $K = 14,41$  MPa ja  $\rho = 990$  kg/m<sup>3</sup>. Kaavasta (5) saadaan  $\bar{c} = 120$  m/s, joka on vain kymmenesosa äänen nopeudesta pelkässä vedessä (1423 m/s). Kuva 2 esittää vedessä äänennopeuden riippuvuutta ilmapitoisuudesta.

#### PUTKEN SEINÄMÄN JOUSTON VAIKUTUS PAINEISKUUN

Joustavaseinäisessä putkessa paineaallon etenemisnopeus  $c$  on pienempi kuin nopeus  $\bar{c}$  jäykkäseinäisessä putkessa, jolloin mahdollinen paineisku jonkin verran heikentyy. Kaavaa (6) muodossa



Kuva 2. Äänennopeuden riippuvuus ilmapitoisuudesta vedessä /3/.

Kiinteälle aineelle  $K=E/[3(1-2\nu)]$ , jossa E on kimmokerroin ja  $\nu$  Poissonin suhde. Merkitsemällä energiat (1) ja (2) yhtä suuriksi ja ottamalla yhtälö (3) huomioon saadaan paineen nousuksi

$$\Delta p = \rho \sqrt{K/\rho} v, \quad (4)$$

missä suure

$$\bar{c} = \sqrt{K/\rho} \quad (5)$$

on pitkittäisen aaltoliikkeen etenemisnopeus (äänen nopeus) nesteessä, joten

$$\Delta p = \rho \bar{c} v. \quad (6)$$

Moskovan vesilaitoksen insinööri N. Joukowsky esitti tämän paineiskun peruslaskentakaavan vuonna 1897. Pysäytyskohdan (kuva 1) oikealla puolella paine alenee alkupaineesta  $p_0$  määrän  $\Delta p$ . On kuitenkin huomattava, että neste ei kestä alipainetta, vaan esimerkiksi vesi höyrystyy 21 °C lämpötilassa 0,025 bar absoluuttisessa paineessa, joten kaavan (6) käyttö pätee vain, kun  $p_0 - \Delta p > 0$ . Höyryn joutuessa ylipaineen alaiseksi se muuttuu nopeasti takaisin nesteeksi aiheuttaen paineiskuja (kavitointia).

#### ESIMERKKI

Putkessa virtaa nopeudella  $v=10$  m/s vettä, jonka kokoonpuristuvuus  $K=2026$  MPa, tiheys  $\rho=1000$  kg/m<sup>3</sup> ja  $\bar{c}=\sqrt{K/\rho}=1420$  m/s. Virtauksen äkillisessä pysäytyksessä paineen nousu  $\Delta p=\rho \bar{c} v=14,2$  MPa (=142 bar). Tämä aiheuttaa huomattavan suuren aksiaalisen voiman putkeen.

#### NESTEeseen SEKOITTUNEEN KAASUN PAINEISKUA HEIKENTÄVÄ VAIKUTUS

Nesteeseen sekoittunut kaasu lisää seoksen kokoonpuristuvuutta ja vaimentaa näin huomattavasti paineiskuja, mutta voi toisaalta synnyttää nesteessä painevärähtelyjä. Lisäksi paineiskun vaikutusaika kasvaa, mikä saattaa lisätä putken poikittaisliikkeiden suuruutta etenkin pitkissä mutkittelevissa putkissa. Kaavaa (6) voidaan soveltaa paineiskun laskemiseen, mutta ensin on selvitettävä kaasun vaikutus seoksen puristuvuuskertoimen ja tiheyden alentumiseen. Seoksen puristuvuuskertoimelle K voidaan kirjoittaa /3/

$$\frac{1}{K} = \frac{v_g}{v} \frac{1}{K_g} + \frac{v_l}{v} \frac{1}{K_l}, \quad (7)$$

$$\Delta p = \rho c v \quad (10)$$

voidaan edelleen soveltaa paineiskun laskemiseen, mutta ensin on selvitettävä putken seinämän joustavuuden vaikutus paineiskun etenemisnopeuteen  $c$  tarkastelemalla putken seinämän muodonmuutoksesta aiheutuvaa putken tilavuuden kasvua  $\Delta V$ , minkä voidaan tulkita lisäävän nesteen kokoonpuristuvuutta. Paineisku etenee absoluuttisella nopeudella  $c-v$  tarkastelupituuden  $L$  ajassa  $L/(c-v)$  (kuva 3). Tänä aikana virtaa uutta nestettä vasemmalta alkuperäisellä nopeudella  $v$  tilavuusmäärä

$$V_{in} = AvL/c \approx AvL/c, \quad (11)$$

missä  $A$  on putken sisäpoikkileikkauspinta-ala. Ohutseinämäiseksi oletetussa putkessa paineen nousun  $\Delta p$  aiheuttama aksiaalinen jännitys  $\sigma_a$  ja kehän suuntainen jännitys  $\sigma_t$  ovat

$$\sigma_a = \Delta p \frac{D}{4t} \quad (12a)$$

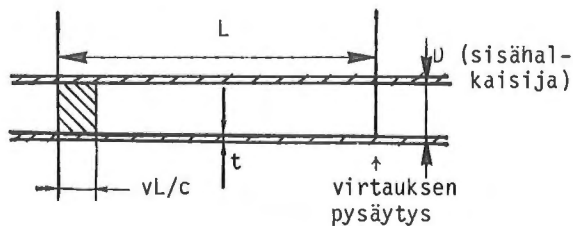
$$\sigma_t = 2\sigma_a. \quad (12b)$$

Vastaavat venymät ovat Hooken lain mukaan

$$\epsilon_a = \Delta p \frac{D}{4Et} (1-2\nu) \quad (13a)$$

$$\epsilon_t = \Delta p \frac{D}{4Et} (2-\nu), \quad (13b)$$

missä  $E$  on putken materiaalin kimmokerroin ja  $\nu$  Poissonin suhde. Pituuden kasvusta  $\Delta L = L\epsilon_a$  ja säteen kasvusta  $\Delta r = \epsilon_t D/2$  aiheutuvat tilavuuden lisäykset  $\Delta V_L$  ja  $\Delta V_r$  ovat



Kuva 3. Paineisku joustavaseinäisessä putkessa.

$$\Delta V_L = \Delta p \frac{LAD}{4Et} (1-2\nu) \quad (14a)$$

$$\Delta V_r = \pi \left[ \left( \frac{D}{2} + \Delta r \right)^2 - \left( \frac{D}{2} \right)^2 \right] L \approx \pi L D \cdot \Delta r = \Delta p \frac{LAD}{2Et} (2-\nu). \quad (14b)$$

Nesteen kokoonpuristumisesta aiheutuu vielä tilavuuden muutos

$$\Delta V_\lambda = - LA \frac{\Delta p}{K}. \quad (15)$$

Sisään virtaavan nesteen tilavuus plus nesteen tilavuuden muutos on sama kuin putken pituuden ja halkaisijan kasvusta johtuva tilavuuden muutos, ts.

$$\Delta V_{in} + \Delta V_\lambda = \Delta V_L + \Delta V_r. \quad (16)$$

Tästä saadaan kaavat (11), (14a), (14b) ja (15) huomioonottaen

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta p}{K} \left( 1 + \beta \frac{KD}{Et} \right), \quad (17)$$

missä lyhenne  $\beta = 5/4 - \nu$ . Jos putken aksiaalinen liike on estetty ( $\epsilon_a = 0$ ),  $\beta = 1 - \nu^2$ . Jos taas putkessa on kohtia, jotka mahdollistavat putken pitkittäisen jännityksettömän ( $\sigma_a = 0$ ) liikkeen,  $\beta = 1$ . Teräkselle ( $\nu = 0,3$ )  $\beta$  voi vaihdella välillä  $0,91 \leq \beta \leq 1$ . Eliminoimalla  $\Delta p$  yhtälön (10) avulla saadaan paineaallon etenemisnopeudeksi

$$c = \sqrt{K/\rho} \left[ 1 + \beta \frac{KD}{Et} \right]^{1/2}. \quad (18)$$

Kun paineen etenemisnopeus on laskettu kaavasta (18), voidaan paineen nousu laskea kaavasta (10) ja jännitykset kaavoista (13a) ja (13b). Mikäli jännitys ylittää materiaalin myötörajan, seinämän joustavuus kasvaa ja paineisku heikentyy.

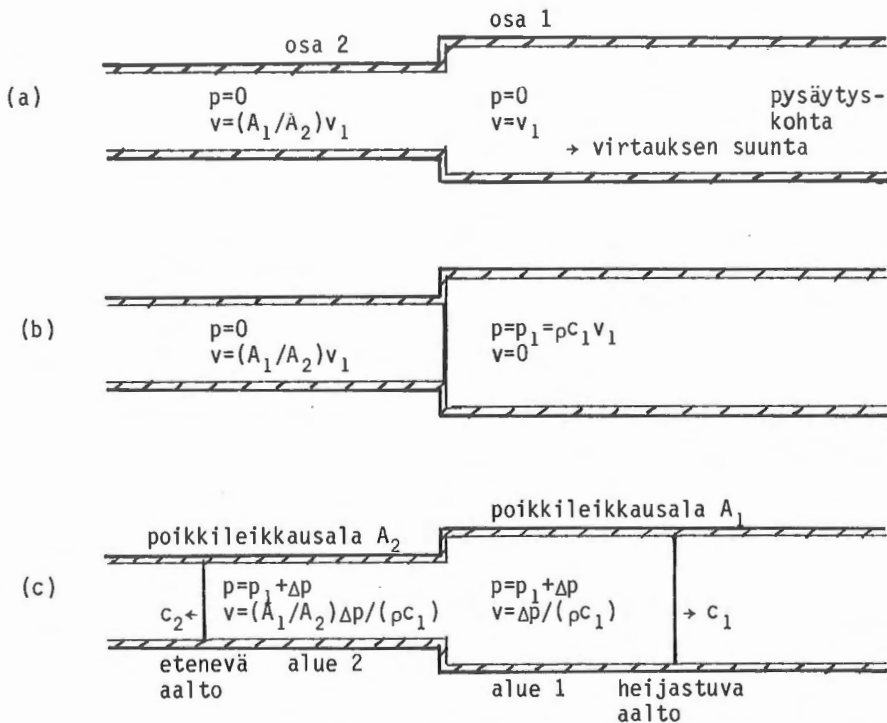
#### ESIMERKKI

Lasketaan seinämän joustamisesta aiheutuva paineiskun voimakkuuden aleneminen ja kehäjännitys teräsputkessa, jonka sisähalkaisija  $D=0,2$  m ja seinämän paksuus  $t=0,005$  m, kun  $E=206$  GPa,  $\nu=0,3$ ,  $\beta=0,95$  ja virtausnopeus ennen pysäytystä  $v=10$  m/s. Putkessa virtaavan veden  $K=2026$  MPa,  $\rho=1000$  kg/m<sup>3</sup> ja  $\bar{c} = \sqrt{K/\rho} = 1423$  m/s (kaava (5)). Kaavasta (18) saadaan  $c=1214$  m/s, joten paineiskun voimakkuus heikentyy 15 %. Kehäjännitykseksi saadaan kaavasta (12b)  $\sigma_t=242,8$  MPa.

# PAINEISKUN JAKAUTUMINEN PUTKEN SUPISTUS- TAI LAAJENTUMISKOHDASSA

Kun paineisku osuu kohtaan, jossa virtauspoikkipinta-ala supistuu tai laajenee, osa paineaallosta jatkaa eteenpäin ja osa heijastuu taaksepäin. Tarkastellaan putkea (kuva (4)), jossa virtaa nestettä aluksi vakionopeudella. Osassa 1 nopeus olkoon  $v_1$ , jolloin osassa 2 nopeus on  $v_2 = (A_1/A_2)v_1$  jatkuvuusyhtälön perusteella. Paine oletetaan nolllaksi ennen virtauksen pysäyttämistä. Putkien seinämien erilainen jousto osissa 1 ja 2 otetaan huomioon, jolloin paineaaltojen etenemisnopeudet osissa 1 ja 2 ovat  $c_1$  ja  $c_2$ .

Pysäytetään virtaus alavirran puolella. Kun paineaalto on tullut epäjatkuvuuskohtaan (kuva 4(b)), on virtaus pysähtynyt epäjatkuvuuskohdan ja pysäyttämiskohdan välillä ja paine on noussut arvoon  $p_1 = \rho c_1 v_1$  (kaava (10)). Tällä hetkellä virtaus osassa 2 jatkuu vielä alkuperäisellä nopeudellaan. Kun aikaa kuluu hieman lisää, on tilanne kuvan 4(c) mukainen. Painerintamien välisellä alueella



Kuva 4. (a) Virtauksen pysäytys epäjatkuvuuskohdasta alavirtaan päin, (b) tilanne hetkellä, kun paineaalto on epäjatkuvuuskohdassa ja (c), kun etenevä ja heijastuva paineaalto ovat edenneet jonkin verran epäjatkuvuuskohdasta.

paine on  $p_1 + \Delta p$ . Heijastuva aalto, joka lisää osassa 1 painetta  $\Delta p$ :n verran aiheuttaa osassa 1 oikealle päin virtausnopeuden  $v = \Delta p / (\rho c_1)$  (kaava (10)). Jatkuvuusyhtälön perusteella osassa 2 virtausnopeus on  $(A_1/A_2)\Delta p / (\rho c_1)$ . Virtausnopeuden muutos  $\Delta v_2$  alkuperäiseen nopeuteen  $v_2 = (A_1/A_2)v_1$  nähden osassa 2 on siten

$$\Delta v_2 = \frac{A_1}{A_2} \left( v_1 - \frac{\Delta p}{\rho c_1} \right) . \quad (19)$$

Tämä muutos nostaa paineen alueessa 2 arvoon  $p_1 + \Delta p$ , joten kaavan (10) mukaan

$$p_1 + \Delta p = \rho c_2 \frac{A_1}{A_2} \left( v_1 - \frac{\Delta p}{\rho c_1} \right) . \quad (20)$$

Jakamalla yhtälön molemmat puolet paineella  $p_1 = \rho c_1 v_1$  saadaan

$$1 + \frac{\Delta p}{p_1} = \frac{A_1/c_1}{A_2/c_2} \left( 1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right) , \quad (21)$$

josta seuraa heijastumiskertoimeksi (engl. reflection factor)

$$r = \frac{\Delta p}{p_1} = \frac{A_1/c_1 - A_2/c_2}{A_1/c_1 + A_2/c_2} \quad (p_1 = \rho c_1 v_1) . \quad (22)$$

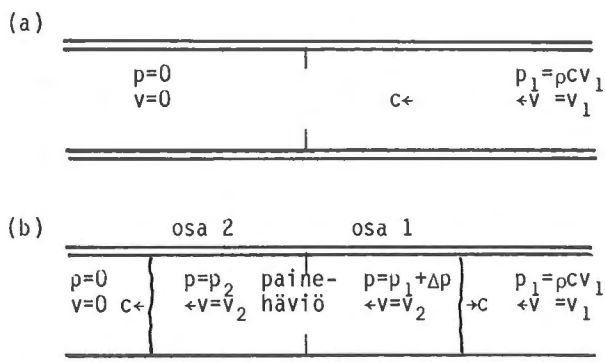
Epäjatkuvuuskohdasta etenevän aallon läpäisykerroin (engl. transmission factor)

$$s = 1 + \frac{\Delta p}{p_1} = \frac{2A_1/c_1}{A_1/c_1 + A_2/c_2} . \quad (23)$$

Epäjatkuvuuskohdassa putkeen vaikuttava aksiaalinen voima

$$F = (p_1 + \Delta p)(A_2 - A_1) . \quad (24)$$

Paineaallon osuessa supistuskohtaan ( $A_2 < A_1$ ) on  $r > 0$ , joten heijastuva tiivistysaalto nostaa painetta. Jos putken pää on suljettu ( $A_2 = 0$ ),  $r = 1$  ja heijastuva tiivistysaalto nostaa paineen kaksinkertaiseksi verrattuna pelkkään virtauksen pysäyttämiseen alueella 1. Paineaallon osuessa laajennuskohtaan ( $A_2 > A_1$ ) on  $r < 0$  ja heijastuva harvennusaalto alentaa painetta. Jos paineaalto kohtaa säiliön ( $A_2 = \infty$ ),  $r = -1$ , joten heijastuva harvennusaalto hävittää paineen putkesta.



Kuva 5. (a) Paineaallon saapuminen supistuskohtaan, (b) paineaallot heijastuksen jälkeen.

#### PAINEISKUN OSUMINEN PAIKALLISEEN SUPISTUSKOHTAAN

Neste on aluksi kaikkialla paikallaan paineettomassa tilassa. Oikealta lähestyy paineaalto voimakkuudeltaan  $p_1$  (kuva 5), johon liittyvä nopeuden muutos on  $v_1$ . Heijastuksen jälkeen nopeus osassa 1 on jatkuvuusyhtälön perusteella sama kuin nopeus  $v_2$  osassa 2. Paine osassa 1 on heijastuksen jälkeen

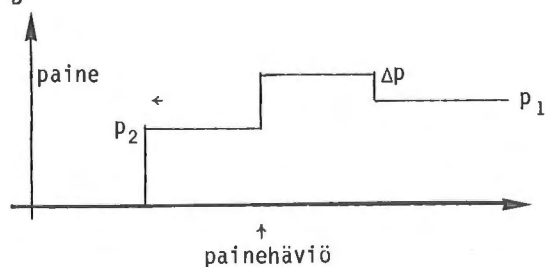
$$p = p_1 + \Delta p = p_1 + \rho c(v_1 - v_2) = 2\rho c v_1 - \rho c v_2. \quad (25)$$

Osassa 2 paine on virtausvastuksen aiheuttaman painehäviön  $(1/2)K_D \rho v_2^2$  ( $K_D$  on häviökerroin) verran osan 1 painetta pienempi, ts.

$$p_2 = \rho c v_2 = 2\rho c v_1 - \rho c v_2 - \frac{1}{2}K_D \rho v_2^2. \quad (26)$$

Ratkaissamalla tästä nopeus  $v_2$  saadaan

$$v_2 = \frac{2c}{K_D} \left[ -1 + \left( 1 + K_D \frac{v_1}{c} \right)^{1/2} \right]. \quad (27)$$



Kuva 6. Paineprofiili kuvan 5(b) tilanteessa.

Häviökertoimen  $K_D$  tulee olla hyvin suuri, jotta nopeus  $v_2$  eroaisi merkittävästi nopeudesta  $v_1$ . Tämän havinnollistamiseksi voidaan neliöjuurilauseke kehittää sarjaksi, jolloin saadaan

$$v_2 \approx v_1 - \frac{1}{4} K_D \frac{v_1^2}{c} \quad (28)$$

Kertapainehäviön aiheuttama nopeuden muutos on siis

$$v_1 - v_2 = \frac{1}{4} K_D \frac{v_1^2}{c} \quad (29)$$

ja heijastuva paineaalto

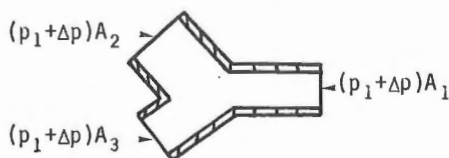
$$\Delta p = \frac{1}{4} \rho K_D v_1^2 \quad (30)$$

eli puolet nopeudella  $v_1$  tapahtuvasti staattisesta painehäviöstä (kuva 6). Yhtälö (30) ei päde, kun  $K_D \rightarrow \infty$ . Maksimiheijastussuhde on suuruudeltaan 1 silloin, kun putki on kokonaan ummessa.

#### PAINEISKUN JAKAUTUMINEN PUTKIHAARASSA

Paineiskun käyttäytymistä haarautumiskohdassa voidaan tarkastella samalla periaatteella kuin edellä tarkasteltiin paineiskun käyttäytymistä laajentumis- tai supistuskohdassa. Paineisku  $p_1$  tulee haaraa 1 pitkin (kuva 7). Heijastuksen jälkeen samansuuruisen paine  $p_1 + \Delta p$  vallitsee kussakin haarassa riippumatta pintaaloista ja paineaaltojen etenemisnopeuksista. Heijastumiskertoimeksi  $r$  ja läpäisykertoimeksi  $s$  saadaan (vrt. kaavat (22) ja (23))

$$r = \frac{\Delta p}{p_1} = \frac{A_1/c_1 - A_2/c_2 - A_3/c_3}{A_1/c_1 + A_2/c_2 + A_3/c_3} \quad (31)$$



Kuva 7. Paineisku putkihaarassa.

$$s = 1 + \frac{\Delta p}{p_1} = \frac{2A_1/c_1}{A_1/c_1 + A_2/c_2 + A_3/c_3} \quad (32)$$

Haaraan vaikuttava resultanttivoima lasketaan summaamalla paineen  $p_1 + \Delta p$  pinta-aloihin  $A_1$ ,  $A_2$  ja  $A_3$  aiheuttamien voimat vektoriaalisesti (kuva 7).

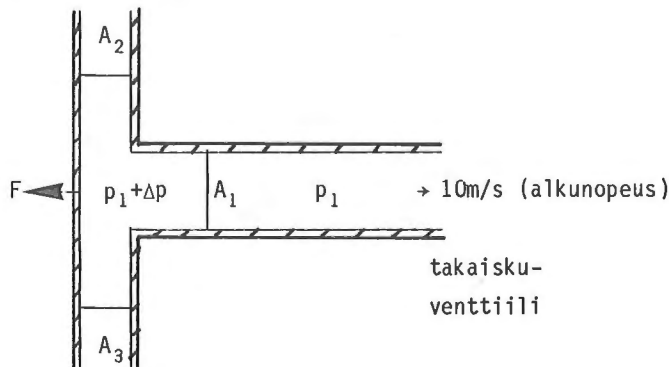
Haaraan kohdistuvaa voimaa voidaan pitää pulssiherätteenä, jonka kesto aika on verrannollinen etäisyyteen, joka on haarasta harvennusaallon aiheuttaviin epäjatkuvuuskohtiin. Mitä pitempi etäisyys on, sitä kauemmin voima vaikuttaa ja sitä suuremmat siirtymät ja jännitykset putkeen syntyvät. Herätteen aiheuttamat värähtelyt ja jännitykset putkistossa voidaan tarvittaessa laskea numeerisella aikaintegroinnilla.

#### ESIMERKKI

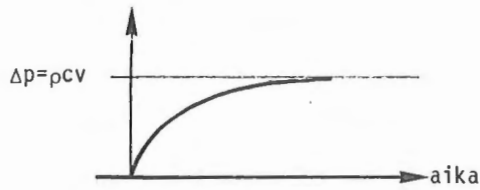
T-liitoksen haarassa 1 (kuva 8) virtaa vettä nopeudella 10 m/s. Virtaus pysäytetään äkillisesti takaiskuventtiilillä, jolloin syntyy paineisku voimakkuudeltaan  $p_1 = \rho c v = 1000 \cdot 1423 \cdot 10 \text{ Pa} = 14,2 \text{ MPa}$ . Oletetaan, että  $A_1 = A_2 = A_3 = \pi/4 \cdot (0,1 \text{ m})^2 = 0,00785 \text{ m}^2$  ja  $c_1 = c_2 = c_3$ , jolloin heijastuskertoimeksi tulee  $r = -1/3$  ja paineeksi  $p$  haaran alueella heijastuksen jälkeen  $p = p_1 + \Delta p = p_1 + r p_1 = 2/3 p_1 = 9,47 \text{ MPa}$ . Liitokseen vaikuttavaksi voimaksi saadaan  $F = 9,47 \cdot 0,00785 \text{ MN} = 74,5 \text{ kN}$ .

#### ÄÄRELLISEN PYSÄYTYSAJAN VAIKUTUS PAINEISKUUN

Jos putki olisi äärettömän pitkä ja virtaus suljetaan vähitellen, nousee paine asympotoottisesti kohti sitä arvoa, joka saataisiin, jos virtaus suljettaisiin äkillisesti (kuva 9). Käytännössä kuitenkin pysäytyskohdasta lähtevät häiriöaallot ehtivät heijastua erinäisistä epäjatkuvuuskohdista ja vaimentua, jos sulke-misaika on pitempi kuin aika, jonka paineaalto tarvitsee kulkeakseen sulkemiskohdasta epäjatkuvuuskohtiin ja takaisin.



Kuva 8. Paineisku T-liitoksessa.



Kuva 9. Paineen nousu pysäytettäessä virtausta äärellisessä ajassa äärettömän pitkässä putkessa.

#### PAINEISKUN AIHEUTTAMA SIVUTTAISVOIMA PUTKIKÄYRÄSSÄ

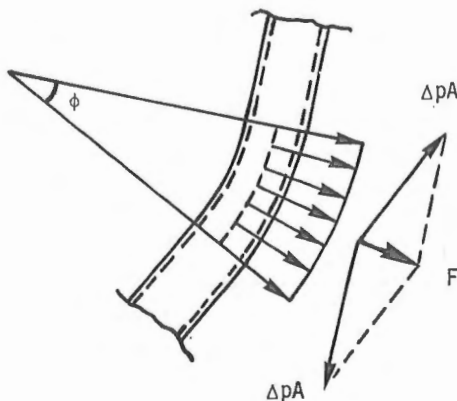
Paineisku aiheuttaa putkikäyrään sivuttaisvoiman, koska putkikäyrässä sisäkaarteeseen puolella paineen vaikutusala on pienempi kuin ulkokaarteeseen puolella. Sivuttaiskuormalle (kuva 10) on johdettavissa helposti kaava

$$F = 2\Delta p A \sin \frac{\phi}{2}, \quad (33)$$

jossa  $\Delta p$  on paineiskun voimakkuus,  $A$  on virtauksen poikkileikkausala ja  $\phi$  putkikäyrän kulman muutos. Paineisku vaimenee putkikäyrässä (suuruusluokka 10 %), koska painerintama joutuu muuttamaan etenemissuuntaansa synnyttäen energiaa kuluttavia häiriöaaltoja. Jos paineiskun ohella virtauksella on merkittävä nopeus, voidaan sen aiheuttama voima laskea vastaavasti kaavasta

$$F = 2A\rho v^2 \sin \frac{\phi}{2}. \quad (34)$$

Paineiskun ja virtauksen yhdessä aiheuttama voima on tällöin



Kuva 10. Paineiskun putkikäyrään aiheuttama sivuttaiskuormitus.

- [2] SIIKONEN, T., A short description of the computer code TMOC. Research Note No. 257, Nuclear Engineering Laboratory, Technical Research Centre of Finland, 1983.
- [3] WYLIE E.B., STREETER V.L., Fluid transients. Mc-Graw-Hill Book Company. NewYork 1978. 329 s.

*Kari Ikonen, tekn.lis., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Ydinvoimatekniikan laboratorio*

$$F = 2A(\rho v^2 + \Delta p) \sin \frac{\phi}{2} . \quad (35)$$

Sijoittamalla  $\Delta p = \rho c \Delta v$  saadaan

$$F = 2A\rho(v^2 + c\Delta v) \sin \frac{\phi}{2} . \quad (36)$$

Esimerkiksi veden tasainen virtaus nopeudella 10 m/s aiheuttaa yhtä suuren sivuttaisvoiman putkikäyrään kuin äkillisestä nopeuden hidastuksesta  $\Delta v = 0,07$  m/s aiheutuva paineisku. Putkea on syytä tukea käyrien kohdista, joissa sivuttaisvoimat vaikuttavat. Tuet on pyrittävä asentamaan siten, että mahdolliset lämpöjännitykset jäävät vähäisiksi. Sivuttaisvoiman ottavat osittain vastaan putkeen syntyvät jännitykset. Varmalla puolella oleva tulos saadaan, jos putken jäykkyyttä ei oteta huomioon ja voiman (36) oletetaan kokonaisuudessaan siirtyvän tukeen.

#### ESIMERKKI

Tarkastellaan putkikäyrää, jonka kulman muutos  $\phi = 90^\circ$  ja sisähalkaisija  $D = 0,2$  m. Oletetaan, että paineisku on synnytetty pysäyttämällä veden virtaus nopeudesta  $v = 2$  m/s. Paineen nousu  $\Delta p = 1000 \cdot 1423 \cdot 2 \text{ Pa} = 2,84 \text{ MPa}$ . Sivuttaisvoimaksi saadaan huomattavan suuri voima  $F = 2 \cdot 2,84 \cdot (\pi/4) \cdot (0,2 \text{ m})^2 \cdot \sin 45^\circ \text{ MN} = 126 \text{ kN}$ .

#### HUOMAUTUKSIA

Paineiskuja voidaan vähentää välttämällä virtausnopeuden äkillisiä pysähdyksiä, lisäämällä putken seinämien joustoa, lisäämällä kaasua nesteeseen tai rakentamalla putken yhteyteen paineiskun aiheuttajan läheisyyteen paineakku, johon paineisku voi purkautua.

#### LÄHDELUETTELO

- [1] JOHNSON, W., Impact Strenght of Materials. Edward Arnold. London 1972.  
236 s.