

Paineiskujen mallintamisen ja havaintojen välisestä poikkeamista

Paineiskujen mallintamisohjelmien tulosten ja havaintojen välillä ilmenee usein poikkeavuuksia, jotka ovat saaneet mallintajat ymmällään ja epäluuloisiksi ohjelmistojen luotettavuuden suhteen. Poikkeamiin on lähes aina löydettävissä selitys, joka johtuu puutteellisista lähtötiedoista, mallintajan kokemattomuudesta, puutteellisesta asian tuntemisesta tai liian yksinkertaistavista mallinnusohjelmista.



MARTTI PULLI
e-mail: martti.pulli@hotmail.com

Kirjoittaja on työurallaan (Maa ja Vesi Oy, Pöyry Environment Oy) toiminut vedensiirtojärjestelmien ja virtaamien hallintaan liittyvän hydraulikan ja laitteisto-suunnittelun erityisasiantuntijana.

Teoreettisten ja havaintojen välisten poikkeamien selittämiseksi on aluksi tarpeen lyhyesti esittää mallinnusohjelmien perustana olevaa teoriaa. Paineiskujen mallintamisessa sovelletaan tietokoneohjelmia, jotka lähes poikkeuksetta perustuvat laajasti testattuun ja luotettavaksi havaittuun karakteristika-menetelmään. Menetelmä perustuu liikeyhtälöiden ja järjestelmän elastisuuden huomioiden jatkuvuusyhtälöiden ratkaisuun (osittaisdifferentiaaliyhtälöt).

Karakteristika-menetelmästä löytyy perusteellista tietoa useista julkaisuista [mm. Streeter et al 1998, Watters 1979]. Viitteistä löytyy myös tietoa muista menetelmistä. Karakteristika

menetelmä on kuitenkin yleisin ja parhaiten soveltuva vesijohtoverkostoiden ja siirtolinjojen paineiskutilanteiden mallintamiseen ja järjestelmää painerasituksilta suojaavien laitteiden ja menetelmien mitoittamiseen.

Asiaa on myös laajasti käsitelty kirjoittajan Virtaustekniikka R2016 kirjassa. Karakteristika-menetelmän etuna muihin menetelmiin verrattuna mainittakoon, että sillä voidaan laskea paine- ja virtaamatilat ajan funktiona halutulla tiheydellä myös verkoston putkien päätepisteiden (solmujen) välisillä osilla.

Matematiikassa karakteristika-menetelmä tarkoittaa osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisua muuntamalla yhtälöt tavallisiksi kokonaisdifferentiaaliyhtälöiksi. Muunnettujen yhtälöiden avulla ratkaisu tapahtuu numeerisesti integroimalla yhtälöt annetuista alkuarvoista lähtien sopivalla ”pinnalla”; tässä käsitellyssä sovelluksessa aika/paikka-koordinaatistossa. Integroinnissa edellisen ajanhetken arvot (Q ja H) toimivat aina seuraavan hetken alkuarvoina.

Oheinen **kuva 1** esittää osittaisdifferentiaaliyhtälöiden kokonaisdifferentiaaliyhtälöiksi muunnetut karakteristika-menetelmän perusyhtälöt.

Numeerista integrointia varten differentiaalit korvataan Δ -arvoilla. Merkitsemällä $\Delta t = \Delta x/c$, kun Δx on määritelty putken pituuden ja putken

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{g}{c} \cdot \frac{dH}{dt} + f \cdot \frac{Q \cdot |Q|}{2 \cdot D \cdot A^2} = 0 \quad (1) \quad C^+ \quad \frac{dx}{dt} = +c \quad (2)$$

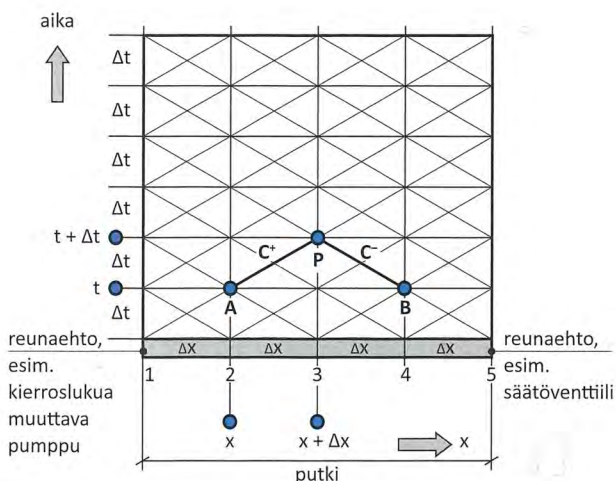
$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dQ}{dt} - \frac{g}{c} \cdot \frac{dH}{dt} + f \cdot \frac{Q \cdot |Q|}{2 \cdot D \cdot A^2} = 0 \quad (3) \quad C^- \quad \frac{dx}{dt} = -c \quad (4)$$

Symbolit:

A = nesteen virtauksen poikkipinta-ala	g = vetovoimakiihtyvyyys (9,81 m/s ²)
$\frac{dQ}{dt}$ = virtaaman derivaatta	c = paineaallon nopeus
$\frac{dH}{dt}$ = painetason derivaatta	f = painehäviökerroin
	dt = integroinnin aikaväli
	D = putken halkaisija

Kuva 1. Karakteristika-menetelmän perusyhtälöt. (Virtaustekniikka R2016)

jako-osien lukumäärän perusteella, **kuva 1** toinen yhtälö toteutuu positiivisella kulmakertoimella olevalla verkko-osan lävistäjällä A–P, jolla myös ensimmäinen yhtälö toteutuu (ks. **kuva 2**). Jos virtaama Q ja painekorkeus H tunnetaan pisteessä A hetkellä t , yhtälö sisältää kaksi tuntematonta pisteessä P hetkellä $t+\Delta t$. Käyttämällä samaa menetelmää C- lävistäjällä B:stä P:hen, ensimmäinen ja kolmas yhtälö voidaan ratkaista samanaikaisesti leikkauspisteessä P arvojen Q ja H ratkaisemiseksi hetkellä $t+\Delta t$.



Kuva 2. Aika-paikkaverkko.

Ensimmäisen ja kolmannen yhtälön integroinnin avulla voidaan ratkaista putkiosuuksien paine- ja virtaamatilat putken välialueen kohdissa $2 \dots N$, jossa N on putkien jako-osuus. Kohdissa 1 ja $N+1$, jotka edustavat putken reunaehtoja tarvitaan ko. kohtaan liittyvän laitteen tai järjestelmän osan fysikaalisen teorian mukaan määritellyjä virtaama- ja painearvoja reunaehdon muuttuessa tai pysyessä muuttumattomana. Reunaehtojen oikea määrittely onkin keskeistä laskelmien ja todellisuuden välisten poikkeamien minimoinnissa.

Yhtälöiden suureiden merkityksestä poikkeamatarkastelun kannalta

Seuraavassa käsitellään joitakin tärkeimpiä syitä, joissa virheelliset määritykset johtavat mallinnusten ja tulosten välisiin poikkeamiin.

Aika-askel Δt

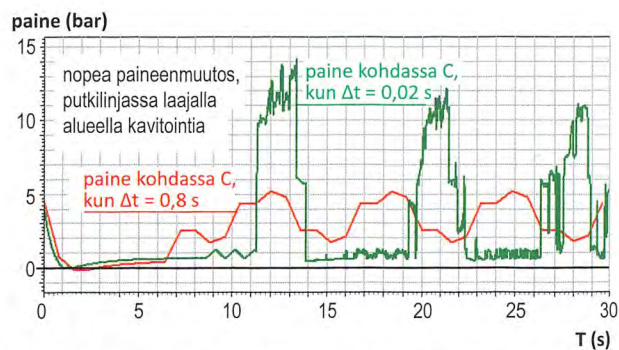
Jos aika-askel valitaan liian pitkäksi, voivat paineenvaihtelun ääriarvot jäädä nopeissa tilanteissa havaitsematta. **Kuvassa 3** esitetään asian merkitys. Kysymyksessä on eräs tapaus, jossa pumppauksen äkillinen pysähtyminen aiheuttaa paineiskutilanteen pumppaamon paine-

putken alussa ja putkeen syntyy laajalla alueella kavitaatioilmiö ja sitä seuraava paineiskutilanne (vihreä käyrä vastaa havaintoja ja teoriaa). Kavitaatio tarkoittaa tilannetta, jossa paine laskee veden höyrystymispaineeseen ja veteen syntyy höyryonteloita (eng. cavity), jotka romahtavat voimakkaasti ”kasaan” paineen jälleen ylittäessä höyrystymispaineen (ilmiötä on yksityiskohtaisesti käsitelty Virtaustekniikka R2016 kirjassa). **Kuvan 3** tapauksessa laskenta on tehty kahdella eri aika-askeleella; 0,8 s (punainen viiva) ja 0,02 s (vihreä viiva). Kuvasta voidaan todeta oleellinen ero kahden tapauksen välillä. Koska karakteristika-menetelmässä käytetään numeerista integrointia, on aika-askelen merkitys helposti ymmärrettävissä. Liian pitkä aika-askel vakioi virheellisesti tapahtuman, eivätkä kaikki järjestelmässä tapahtuvat muutostilanteet ehdi antamaan vaikutustaan oikealla tavalla tai toimintasuunta jatkuu samanlaisena liian kauan.

Alan johtava asiantuntija E. B. Wylie esitti kansainvälisessä konferenssissa karakteristika-menetelmän tarkkuuteen liittyvän analysointimenetelmän, jossa järjestelmän parametrien perusteella voidaan määrittää karakteristika-menetelmän soveltuvuus ja tarkkuus. Tarkkuus riippuu mm. käytettävästä aika-askeleesta, putken painehäviöstä, dimensioista ja virtausnopeudesta. Mikäli lukijalla ei ole käytettävissään mainittua julkaisua, voidaan käytettävissä olevan mallinnusohjelman tuloksia tutkia käyttäen eri aika-askelta. Aika-askelta pienentäen aika-askel voidaan katsoa riittävän lyhyeksi, jos tulokset eivät enää muutu.

Tämä on tärkeä tiedostaa etenkin, jos järjestelmässä tapahtuu kavitaatioita tai muutoksen aiheuttaja on joku nopeataajuista muutosta aiheuttava laite, jolloin voi olla tarpeen käyttää huomattavan lyhyttä aika-askelta.

Kuvan 3 perusteella tutkitussa tapauksessa sopiva aika-askel oli 0,02 sekuntia. Lyhyempiä aika-askelen arvoja kokeiltaessa tulos ei enää muuttunut. Koska jotkut



Kuva 3. Aika-askelen merkitys laskentatarkkuuteen nopeissa muutoksissa, painenvaihtelu pumppaamon paineputken alussa ajan funktiona pumppauksen äkillisen pysähtymisen seurauksena. (Virtaustekniikka R2016)

kaupalliset laskentaohjelmat hyväksyvät verrattain pitkätkin aika-askeleet, on analyysoijan oltava tietoinen asian merkityksestä, jotta käytännöstä ei ilmenisi ikäviä yllätyksiä.

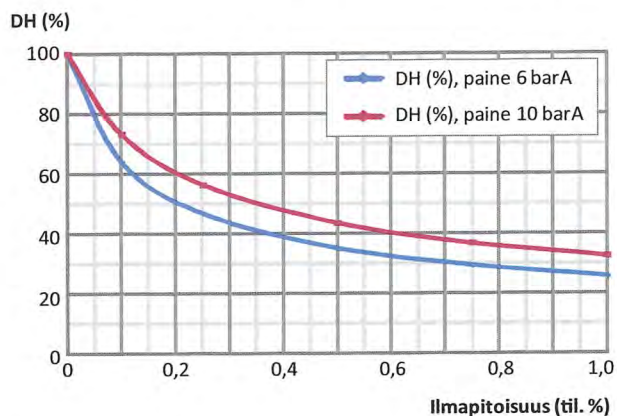
Virtaustekniikka R2016 kirjassa on esitetty em. viitteen perusteella laskettuja ohjearvoja mallintajien käyttöön.

Paineaallon nopeus

Paineaallon nopeus c on keskeinen suure menetelmän käytössä. Paineaallon nopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat: putken kimmomoduli, dimensiot ja nesteen kimmomoduli. Eniten poikkeamia käytännössä aiheuttaa nesteen kimmomoduli, joka voi vaihdella huomattavastikin riippuen nesteessä olevasta ilmasta tai kaasusta. Pienikin pitoisuuden vaihtelu vaikuttaa huomattavasti paineiskuihin. Jos ilma tai kaasu on homogeenisesti jakautunut, se vaikuttaa paineiskuja pienentävästi (neste on joustavampaa). Jos taas ilmaa tai kaasua on epätasaisesti jakaantuneena nesteeseen, paineiskut voivat kasvaa huomattaviin arvoihin ilman virratessa putkistossa olevien kuristuskohtien läpi (esim. osittain auki olevien venttiilien läpi). Ilmiötä on tarkemmin käsitelty Virtaustekniikka R2016 kirjassa.

Kuva 4 esittää ilman tilavuussuhteen vaikutusta teräsputkessa eräissä tapauksissa. Paineenvaihtelu on suoraan verrannollinen paineaallon nopeuteen (Joukowskyn laki), joka on riippuvainen mm. nesteen kimmomodulista. Esimerkiksi paineessa 6 barA tilavuussuhteen ollessa 0,5 prosenttia paineenvaihtelu on vain 35 prosenttia verrattuna yksikomponenttisen veden paineenvaihteluun.

Kuvasta voidaan todeta, että paineenvaihtelun suuruus riippuu ilmakonsentraation lisäksi myös painetasosta (paineen kasvaessa nesteestä tulee jäykempää). Käytännössä nesteen ilma- tai kaasukonsentraatio vaih-



Kuva 4. Ilmapitoisuuden vaikutus paineenvaihteluun DH. (Virtaustekniikka R2016)

telee ja voi joissain tapauksissa olla huomattavaa ja toisinaan taas vähäistä.

Ilmaa voi päästä linjaan useastakin eri syystä. Nesteen komponenttisuus on siis merkittävä selitys havaittuihin teorian ja käytännön välisiin poikkeamiin. Koska ilman tai kaasun läsnäolosta on useita haittoja, on vedenjakelujärjestelmissä tarkoituksenmukaista pyrkiä yksikomponenttiseen virtaukseen käyttämällä tarkoituksenmukaisia ilmanpoistoventtiileitä.

Ohjelmistot laskevat yleensä paineiskutilanteet yksikomponenttisella nesteellä, jota on perusteltua pitää lähtökohdista suunniteltaessa järjestelmiä.

Reunaehdoista

Reunaehdoista ovat kaikki putken alku- ja loppupään komponentit ja verkostojen solmupisteet. Reunaehdoissa tapahtuvat muutokset vaikuttavat keskeisesti paineiskuihin. Mallintajan on tunnettava reunaehtoien teoria voidakseen saavuttaa luotettavia tuloksia.

Seuraavassa käsitellään lyhyesti vain kahta reunaehtoia.

Venttiili

Venttiilien ominaiskäyrän laatu, toiminta-ajat ja käyttösekvenssit ovat tärkeitä ja ne tulee ottaa oikein huomioon. Venttiilien ominaiskäyrän laatua luonnehditaan seuraavasti; pikasulku tyyppi, lineaarinen tyyppi ja tasaprosenttinen tyyppi (ominaiskäyrästä tarkemmin Virtaustekniikka R2016 kirjassa). Venttiilityypeillä kullakin on erilainen ja huomattavasti toisistaan poikkeava vaikutus paineiskuihin. Esimerkiksi tasaprosenttinen venttiili soveltuu hyvin linjoihin, joissa on suurehko painehäviö. Tällaisen venttiilin ominaiskäyrä mahdollistaa lyhyet toiminta-ajat ilman suuria paineenvaihteluita. Pikasulkutyyppinen vaikuttaa vain kapealla asento-alueella ja voi aiheuttaa suuria paineenvaihteluita.

Jos mallinnuksessa on käytetty pikasulkutyyppistä venttiiliä ja todellisuudessa venttiili onkin tasaprosenttinen, mallinnuksen tulos voi poiketa huomattavasti havaitusta.

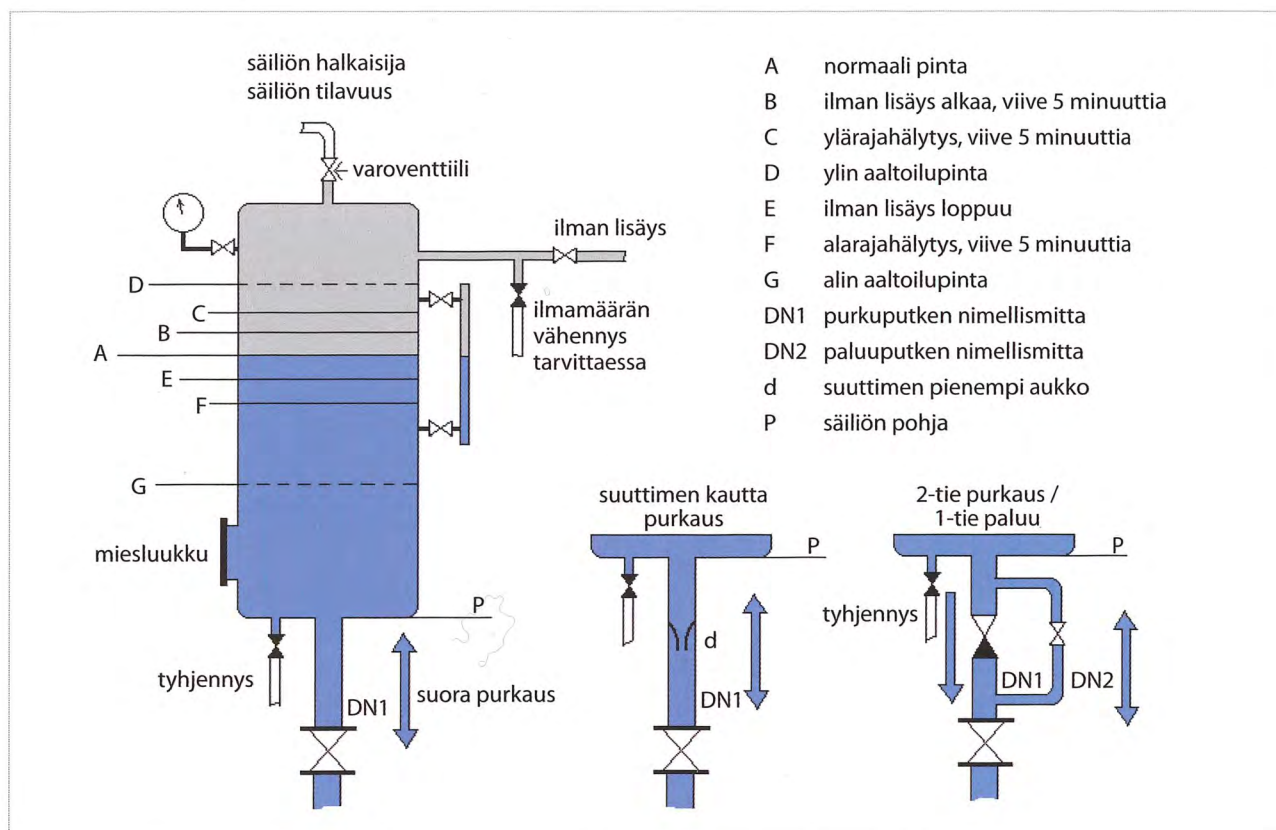
Paineiskun vaimennussäiliön kytkentä linjaan

Kuva 5 esittää painesäiliövaimentimen erilaisia kytkentäperiaatteita ja säiliön toimintaparametreja. Suora purkaus (ensimmäinen kuvake) tarkoittaa säiliön liittämistä painelinjaan pelkällä putkella, suuttimen käyttö purkuputkessa (toinen kuvake) tarkoittaa pienempää painehäviötä säiliöstä linjaan virratessa kuin linjasta säiliöön päin virratessa, jolla on useassa tapauksessa edullinen vaikutus paineiskun

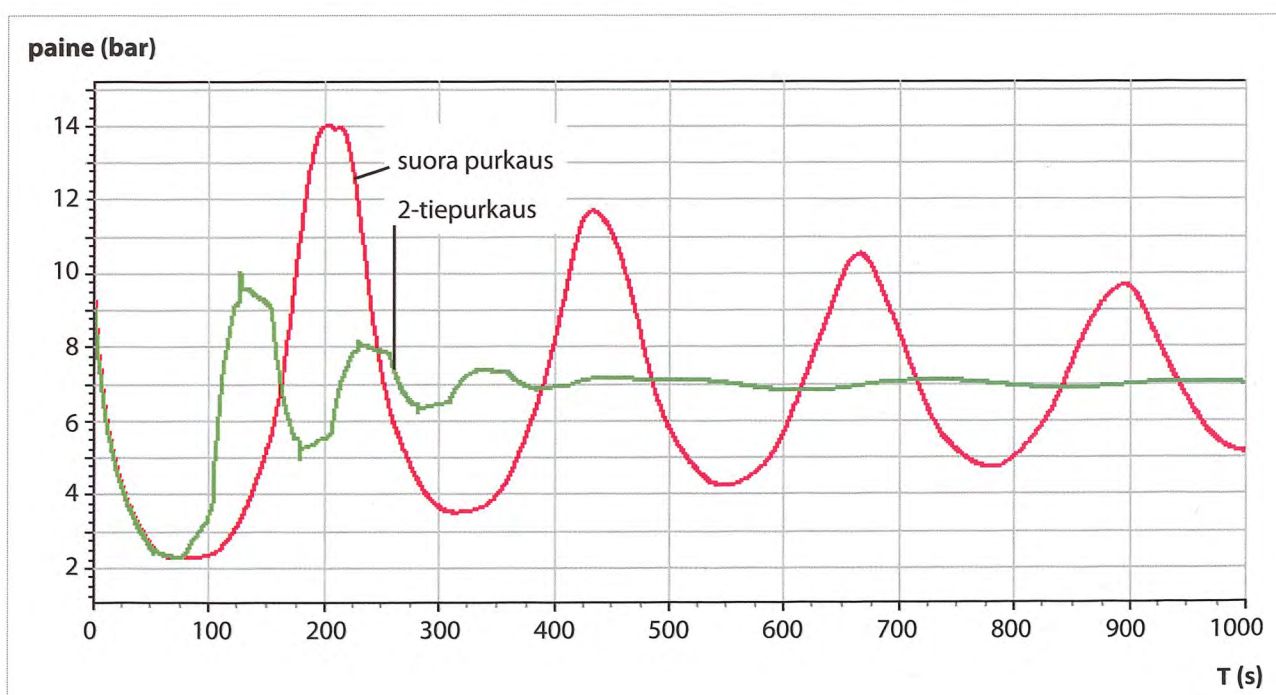
vaimennukseen, kolmas kuvake vastaa toiminnallisesti toista kuvaketta, mutta suuremmalla vaikutuksella sekä on käytännön mukaan helpommin säädettävänä ohitusputken säätöventtiilin avulla. Purkujärjestelmän määrittely on kuitenkin tapauskohtaisesti tutkittava. Joskus

suora kytkentä antaa riittävän vaimennusvaikutuksen riippuen järjestelmän ominaisuuksista.

Kuva 6 esittää kytkentäjärjestelmän merkitystä eräässä tapauksessa.



Kuva 5. Vaimennussäiliö erilaisilla putkistokytkennöillä (Virtaustekniikka R2016).



Kuva 6. Vaimennussäiliön purkuputkiston merkitys paineenvaihteluun (Virtaustekniikka R2016).

Punainen käyrä esittää pumppaamon lähellä tapahtuvaa paineenvaihtelua järjestelmässä, jossa säiliöiden kytkentä painelinjaan tapahtuu suoraan ja vihreä käyrä vastaavaa tilannetta, jossa säiliön purkukuputkeen on asennettu pienen-
vastuksinen takaiskuventtiili ja paluuputkeen pienempi kuristettu palloventtiili. Kuvasta voidaan todeta kaksitie-
järjestelmän edullinen vaikutus paineenvaihtelun amplitudiin ja paineaaltoilun vaimentumiseen.

Yhteenveto

Kirjoituksessa oli vain rajoitetusti mahdollista käsitellä tekijöitä, jotka vaikuttavat mallinnusten tuloksiin. Reunaehtoina käsiteltiin vain kahta monista tarkoitukse-
na havainnollistaa teknisten järjestelmien ja laitteiden oikean määrittelyn sekä ohjelmiston laadun merkitystä laitteiden todellisten parametrien huomioonottamiseksi. Kaikki järjestelmään liittyvät reunaehdot (laitteet, säiliöt, toiminnot, ...), jotka vaikuttavat järjestelmän paine- ja virtaamatiloihin ovat merkittäviä.

Mallinnusohjelmistojen tulee olla sellaisia, että järjestelmän ja laitteistojen kaikki oleelliset parametrit voidaan ottaa huomioon. Tällöin malli voidaan ”rakentaa”

parhaiten vastaamaan todellisuutta ja teoreettisten tulosten ja havaintojen välinen ero vähenee.

Lopuksi voidaan todeta, että ohjelmiston käyttäjän on tunnettava riittävän hyvin aiheeseen liittyvä tekniikka, fysiikka ja matematiikka voidakseen tunnistaa ja tulkita laskentojen tulokset ja ymmärtääkseen kaikki lukuisat aiheeseen liittyvät fysiikan ilmiöt riippuvuuksineen. Ilman tällaista tuntemusta projekti voi edetä väärin tulkintoihin perustuviin päätöksiin ja lopulta johtaa suuriin vahinkoihin. ●

Kirjallisuus

Streeter, Victor L., Wylie, E. Benjamin 1998, Fluid Mechanics, McGraw-Hill.

Watters, Gary Z. 1979, Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines, Ann Arbor Science Publishers.

Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, 7th International Conference, Publication 19, BHR Group, jossa kirjoitus: (Unsteady Internal Flows - Dimensionless Numbers and Time Constants).

Virtaustekniikka R2016, Tammertekniikka, Martti Pulli.

ERIKOISKANSISTOT

Vaativiin infra- ja rakennuskohteisiin

The advertisement features a large background image of a blue grid pattern, likely representing the pipe systems. In the foreground, there are three smaller images: a close-up of a large metal pipe with a flange, a cargo plane with 'HAY PACIFIC CARGO' written on its side, and a modern interior space with a grey floor and white walls.

**SAINT-GOBAIN
PIPE SYSTEMS**

Saint-Gobain Pipe Systems • Merstolantie 16, 29200 HARJAVALTA • Strömberginkuja 2, 00380 HELSINKI
Puh. 0207 424 600 • sgps.finland@saint-gobain.com • www.sgps.fi