

Mikko Lappalainen

KANNAKEVÄLILASKENTAOHJELMA

KANNAKEVÄLILASKENTAOHJELMA

Mikko Lappalainen
Opinnäytetyö
Kevät 2024
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, tuotantotekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Mikko Lappalainen

Opinnäytetyön nimi: Kannakevälilaskentaohjelma

Työn ohjaaja: Kai Jokinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2024

Sivumäärä: 30 + 0 liitettä

Insinööriyön tavoitteena on kehittää Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmapohjainen työkalu Rejlers Finland Oy:n putkistosuunnittelijoille. Työkalun tehtävänä on helpottaa suunnittelijoiden työtä putkiston suunnitteluvaiheessa tarjoamalla apua putkeen kohdistuvien voimien tarkasteluun kannakevälillä ilman syvällistä statiikan tai lujuusopin osaamista. Laskentatyökalu on suunniteltu toimimaan osana jo olemassa olevaa työprosessia eikä sen tarkoituksena ole korvata erillistä lujuuslaskentaa. Tarkoituksena on, että suunnittelija voi työkalun avulla itsenäisesti tarkistaa putkeen kohdistuvia voimia, eikä suunniteltuja putkia tarvitse jatkuvasti käyttää erillisellä lujuuslaskijalla.

Työ vaati tekijältä perehtymistä sekä käytössä oleviin standardeihin että statiikkaan ja lujuuslaskentaan. Keskeisessä osiossa oli standardisarjan SFS-EN 13480 osat 2 ja 3, joista löytyvien kaavojen ja materiaalien luokittelun avulla osa laskuista saadaan laskettua. Myös PSK:n putkistostandardit, kuten PSK 2402 ja PSK-käsikirja 8 olivat tärkeässä roolissa.

Työn tuloksena oli helppokäyttöinen ja selkeä Microsoft Excel -pohjainen laskentatyökalu, jolla onnistuu sekä niveltuetun että jäykästi tuetun putken tukipisteiden välillä vallitsevien voimien tarkastelu. Lisäksi käyttäjä voi lisätä putkelle yhden pistekuorman haluamaansa paikkaan. Työkalun avulla voidaan nähdä esimerkiksi putkeen kohdistuva suurin taivutusmomentti, suurin taipuma, taipuma mahdollisen pistekuorman kohdalla sekä taivutusjäännitys.

Asiasanat: putkistosuunnittelu, putkisto, teollisuus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering, Option of Production technology

Author: Mikko Lappalainen
Title of thesis: Pipe Support Analyzing Tool
Supervisor: Kai Jokinen
Term and year when the thesis was submitted: spring 2024
Number of pages: 30 + 0 appendices

The objective of this thesis project was to create a user-friendly and efficient Microsoft Excel-based tool tailored for pipe designers at Rejlers Finland Oy. The tool is designed to streamline the design process by providing assistance in examining forces acting on the pipe between the supports without requiring in-depth knowledge of statics or strength of materials. It is intended to complement the existing workflow rather than replace separate strength calculations.

The result of the project was an easy-to-use and clear Microsoft Excel-based calculation tool capable of examining forces between support points for both guided and anchored supports. Additionally, users can add a single point load to the pipe at any desired location. The tool allows users to see parameters such as the maximum bending moment, maximum deflection, deflection at the point of the point load, and bending stress.

Keywords: piping design, piping, industry

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| LYHENTEET JA KÄYTETYT TERMIT | 6 |
| SUUREET | 7 |
| 1 JOHDANTO | 8 |
| 2 PUTKISTOT TEOLLISUUDESSA..... | 9 |
| 2.1 Putkistosuunnittelu | 9 |
| 2.2 Materiaalit..... | 9 |
| 2.3 Standardisoidut teräkset..... | 10 |
| 2.4 Putkikannakkeet..... | 11 |
| 2.4.1 Liukukannake..... | 11 |
| 2.4.2 Kiintopiste | 13 |
| 3 LASKEMISEEN VAIKUTTAVAT SUUREET | 15 |
| 3.1 Kimmokerroin | 15 |
| 3.2 Lämpötila..... | 15 |
| 4 LASKENTATYÖKALU | 17 |
| 4.1 Toiminta | 17 |
| 4.1.1 DN-tietokanta | 19 |
| 4.1.2 Materiaalien tietokanta | 21 |
| 4.2 Microsoft Excel | 21 |
| 4.3 Laskentakaavat | 22 |
| 4.3.1 Niveltuettu putki | 23 |
| 4.3.2 Jäykästi tuettu putki | 24 |
| 5 KEHITTÄMISIDEAT | 27 |
| 6 YHTEENVETO | 28 |
| LÄHTEET | 29 |

LYHENTEET JA KÄYTETYT TERMIT

| | |
|---------------|---|
| CEN: | <i>European Committee for Standardization</i> |
| DN: | <i>Nominal Diameter, Nimellishalkaisija</i> |
| ECISS: | <i>European Committee for Iron and Steel Standardization</i> |
| Fluidi: | <i>Aine, jossa rakenneosat liikkuvat vapaasti toistensa suhteen</i> |
| ISO: | <i>International Organization for Standardization</i> |
| OD: | <i>Outside Diameter, Ulkohalkaisija</i> |
| Polyeteeni: | <i>Maailman käytetyin muovilaatu</i> |
| Polypropeeni: | <i>Yksi maailman käytetyimmistä muoveista</i> |
| SFS: | <i>Suomen Standardisoimisliitto ry</i> |
| Standardi: | <i>Määritelmä jostakin, miten asia pitäisi tehdä</i> |

SUUREET

| | |
|--------------|---|
| A_y | Tukivoima putken vasemmassa laidassa |
| B | Etäisyys pistekuormaan putken vasemmasta laidasta |
| C | Etäisyys putken oikeaan laitaan pistekuormasta |
| E | Kimmomoduuli |
| F | Pistekuorma |
| I | Neliömomentti |
| L | Putken pituus |
| M_L | Putken rasituksesta johtuva momentti putken vasemmassa laidassa |
| M_R | Putken rasituksesta johtuva momentti putken oikeassa laidassa. |
| $M(x)$ | Taivutusmomentti |
| q | Tasainen kuorma |
| t | Lämpötila |
| y | Suora etäisyys neutraaliin akseliin |
| ρ | Taipuma |
| ΣM_L | Kokonaismomentti vasemmalla |
| ΣM_R | Kokonaismomentti oikealla |

1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tavoitteena oli kehittää Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmapohjainen työkalu Rejlers Finland Oy:n putkistosuunnittelijoille. Työkalun pääasiallinen tehtävä on helpottaa suunnittelijoiden työtä putkiston suunnitteluvaiheessa tarjoamalla apua putkeen kohdistuvien voimien tarkasteluun kannakevälillä ilman syvällistä statiikan tai lujuusopin osaamista. Laskentatyökalu on suunniteltu toimimaan osana jo olemassa olevaa työprosessia eikä sen tarkoituksena ole korvata erillistä lujuuslaskentaa. Näin suunniteltuja putkia ei tarvitse jatkuvasti käyttää erillisellä lujuuslaskijalla, mikä nopeuttaa suunnitteluprosessia ja mahdollistaa suunnittelijoiden tehokkaamman työskentelyn.

Rejlers Finland Oy on osa Rejlers-konsernia, joka on pohjoismainen konsultointi- ja suunnitteluyritys. Rejlers-konsernilla työskentelee noin 3300 ammattilaista pohjoismaissa ja Yhdistyneissä Arabiemiirikunnissa, joista yli 1000 asiantuntijaa työskentelee Suomessa yli 20 paikkakunnalla (Rejlers 2024). Rejlers tarjoaa teknistä osaamista ja innovatiivisia ratkaisuja energia-, teollisuus-, infrastruktuuri- ja telekommunikaatioaloilla.

Insinööriyön teoriaosassa luvussa 2 käydään hieman läpi putkistoja, niiden käyttöä teollisuudessa, erilaisia putkistomateriaaleja ja erilaisia kannakointitapoja. Luvussa 3 käydään läpi putkiston mitoittamiseen liittyviä fysikaalisia suureita. Luvussa 4 esitellään insinööriyön tuloksena syntynyt laskentatyökalu. Luvun 4 alaluvuissa käydään aluksi läpi laskentatyökalun toimintaa ja osia, joista työkalu koostuu. Lopuksi esitellään kuinka työkalu hoitaa tarvittavat laskentatoimitukset. Luku 5 käsittelee, kuinka työkalua voitaisiin mahdollisesti parantaa tulevaisuudessa. Lopuksi luvussa 6 pohditaan, kuinka insinööriyöstä suoriuduttiin, saavutettiin tavoitteet ja minkälaisia ongelmia matkan aikana ilmeni.

2 PUTKISTOT TEOLLISUUDESSA

Teollisuudessa käytetään usein erilaisia putkilinjoja aineen siirtämiseen paikasta toiseen. Yleisesti näissä putkilinjoissa siirrettävä aine on fluidi, eli joko neste tai kaasu. Putket eivät itsenäisesti pysty siirtämään ainetta paikasta toiseen, vaan apuna on käytettävä ulkopuolista voimaa. Ulkopuolinen voima voi olla joko pumpun ja moottorin avulla tuotettu tai maan vetovoima. Pumpua käytettäessä yleensä luodaan ylipaine linjan alkuun ja saadaan aikaan työntävä voima putkilinjan suuntaan. Harvemmin käytettävä tapa on pumpata linjaan alipaine linjan loppupäästä. Tällöin saadaan aikaan vetävä voima linjaan. Mikäli maan vetovoimaa halutaan käyttää, täytyy putkilinjassa olla viettoa, eli linjan täytyy olla kaltevassa kulmassa. Yleisesti putkilinjoja, joissa siirrettävä aine liikkuu pelkästään painovoiman avulla, ei käytetä tarkoituksissa, joissa aineen täytyy virrata tasaisella nopeudella ja paineella, sillä näissä linjoissa virtaavan aineen nopeus ja paine voivat vaihdella. Usein putkilinjat asetetaan viettämään, vaikka linjassa käytettäisiinkin pumpua, sillä tämä helpottaa linjan tyhjentämistä tarpeen vaatiessa. Mikäli vietto ei ole mahdollinen, asennetaan tästä syystä tyhjennys linjan alimpaan kohtaan.

2.1 Putkistosuunnittelu

Putkistosuunnittelu on osa laitossuunnittelun kokonaisuutta. Sen tarkoituksena on tarvittavan tiedon tuottaminen putkiston hankintaa ja asennusta varten, sekä pitkällä tähtäimellä mahdollistaa putkiston huoltaminen. Putkiston suunnittelussa on myös otettava huomioon mahdollisten laitteiden ja instrumenttien sijoittelu siten, että niiden käyttäminen sekä huoltaminen on mahdollista. Huomioitava on myös se, ettei laitteiden ja instrumenttien sijoittelu vaikuta prosessin toimivuuteen. (PSK 2402, 13–14.)

2.2 Materiaalit

Teollisuudessa käytettävät putket on lähes aina valmistettu teräksistä. Teräksestä valmistettuja putkia käytetään laajalti, sillä teräksen ominaisuudet, kuten lämmön- ja paineenkesto, kemikaalien kestävyys ja rakenteellinen kestävyys ovat erittäin hyviä. Lisäksi teräsputkia on mahdollista hitsata,

mikä tekee niiden mahdollisesta korjaamisesta helppoa. Mikäli linjassa virtaa esimerkiksi vahvoja happoja tai emäksiä, jotka voivat reagoida metallien kanssa, hyvä vaihtoehto teräksille on myös erilaiset muovit, kuten polypropeeni tai polyeteeni. Siviilikohteissa, kuten talojen viemäroinneissä, käytetään usein muovisia putkia, sillä niiden hankinta ja asentaminen on edullisempaa verrattuna metallisiin putkiin.

2.3 Standardisoidut teräkset

Kansainvälisesti terässtandardeja laatii standardisoimisjärjestö ISO sekä Euroopassa standardisoimisjärjestö CEN. Terässtandardeilla on Euroopassa pitkä historia, joka yltää aina 1950-luvulle saakka, jolloin Euroopan hiili- ja teräsyhteisön ensimmäiset EURONORM-standardit julkaistiin. EURONORM-standardit päivitettiin myöhemmin vuonna 1986 perustetun ECISS:n toimesta eurooppalaisiksi EN-standardeiksi. ECISS jatkoi tätä vuoteen 2017 asti CEN:n liitännäisjäsenenä. (Terässtandardit, 5.)

Standardien avulla pyritään nimensä mukaan standardisoimaan, eli vakioimaan tuotteiden ominaisuudet, määritelmät, mitat ja toleranssit sekä tuotteiden testausmenetelmät. Näiden avulla tuotteen tilaaja voi olla varma tilaamansa tuotteen ominaisuuksista toimittajasta riippumatta. (Terässtandardit, 5–7.)

Teräkset on jaettu standardissa SFS-EN 13480-2 luokittelujärjestelmän mukaisiin ryhmiin. Teräkset jaetaan ryhmiin niiden koostumuksen ja fyysisten ominaisuuksien mukaan. Teräksien jakaminen ryhmiin muiden ominaispiirteiltään samanlaisten kanssa helpottaa esimerkiksi terästen fyysisten ominaisuuksien, kuten kimmokertoimen tai lämpölaajenemisen laskemista, sillä standardissa SFS-EN 13480-3 on valmiiksi laskettu polynomikertoimia eri teräsryhmille mm. mainittujen ominaisuuksien laskemiseen. Polynomikertoimet löytyvät standardista SFS-EN 13480-3:2017 ja ne ovat esitettynä kappaleessa 3.2 olevassa taulukossa 1.

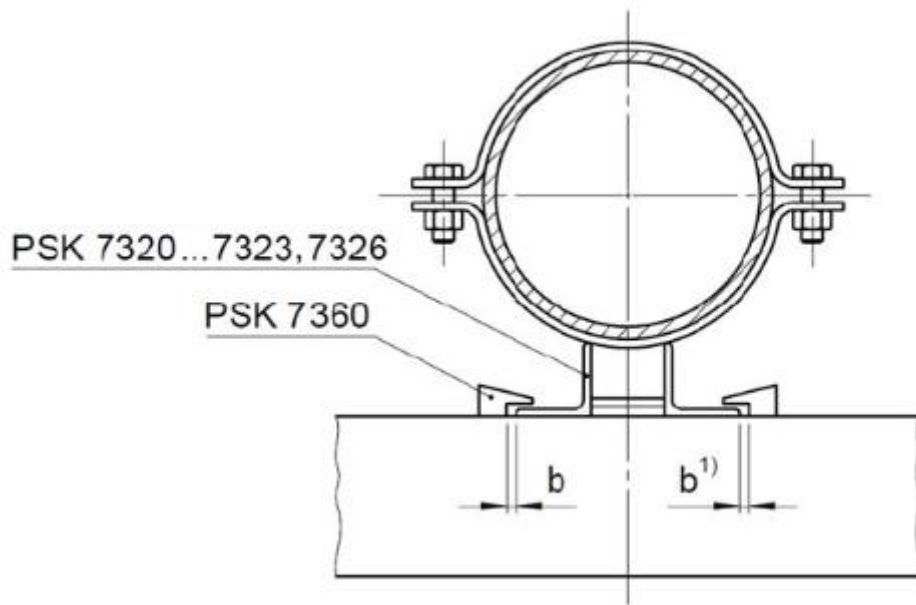
2.4 Putkikannakkeet

Putkiston kannakoinnin tärkein tehtävä on putkiston tukeminen sen omaa ja sisällön painoa sekä ulkopuolisia voimia vastaan. Ulkopuolisia voimia voivat olla esimerkiksi tuulen tai lumen aiheuttamat kuormitukset. Yleensä nämä kuormitukset otetaan kannakoinnin suunnittelun osalta huomioon vain pystysuuntaisina. (PSK-käsikirja 8, 14.)

Kannakoinnin toinen tärkeä tehtävä on putkiston lämpöliikkeiden ohjaaminen ja estäminen. Tällä varmistetaan, ettei putkistoon, kannakkeisiin tai niihin liittyviin laitteisiin kohdistu liian suuria voimia, jotka johtuvat lämpölaajenemisesta. Lämpölaajenemisen aiheuttamat liikkeet voivat olla hyvinkin suuria ja ne vaikuttavat jokaisessa suunnassa, jossa liike estetään. (PSK-käsikirja 8, 14.)

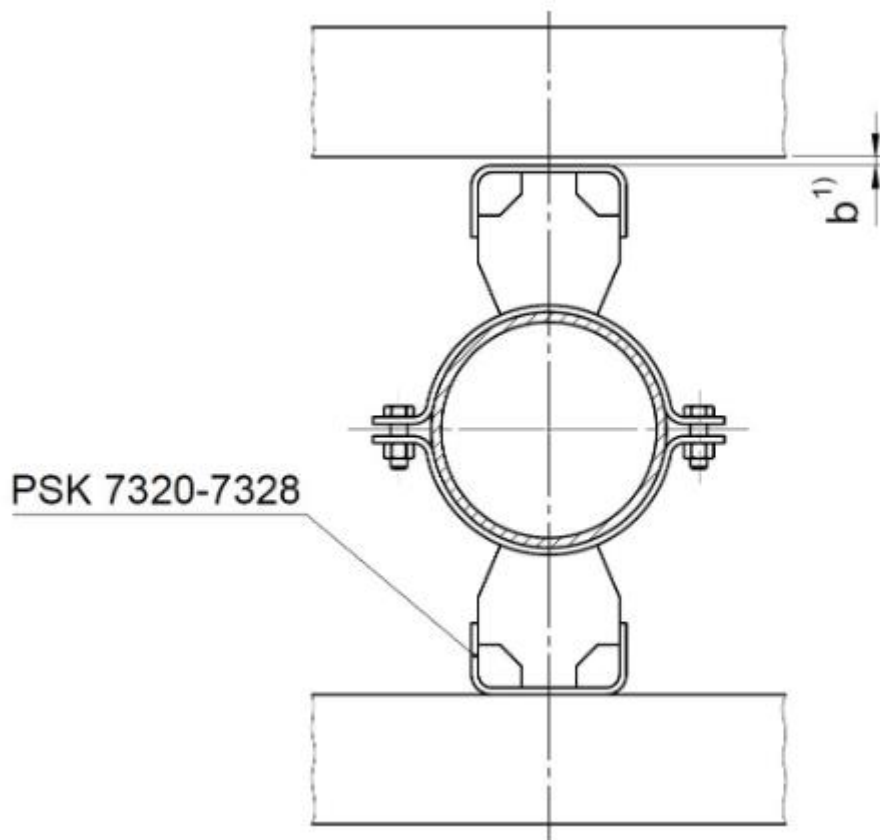
2.4.1 Liukukannake

Liukukannakkeella tarkoitetaan kannaketta, joka sallii putken liikkumisen aksiaalisuunnassa. Liukukannake voi olla myös kynsiohjattu, kuten kuvassa 1, jolloin liike estetään poikittaissuunnassa. (Henell 2011, 22). Kynsiohjattua liukukannaketta ei kuitenkaan suositella lämpöliikkeiden ohjaamiseen, vaan sen tarkoitus on ottaa vastaan ulkoisia voimia, kuten tuulta, ja estää liukukannakkeen irtaamisen sekundäärikannakkeelta.



KUVA 1. Kynsiohjattu liukukannake. (PSK 7306, 3.)

Mikäli liukukannakkeella halutaan ohjata lämpöliikkeitä, tulee käyttää 2-, 3- tai 4-puolista ohjausta. Tällöin lämpöliikkeiden voimat eivät kohdistu ainoastaan pienten kynsien varaan, vaan koko sekundäärikannake voidaan suunnitella kestävämmän voimia. Kuvassa 2 on esitetty 2-puolinen ohjaus.



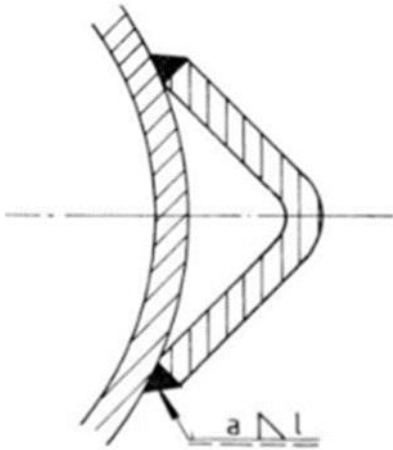
KUVA 2. Esimerkki 2-puolisesta ohjauksesta. (PSK 7306, 4.)

1- tai 2-puolisella liukukannakkeella voidaan myös tarvittaessa rajoittaa putken liike aksiaalisuunnassa ja sallia vain poikittainen liike, mutta tällöin ne luetaan jo kiintopisteiksi.

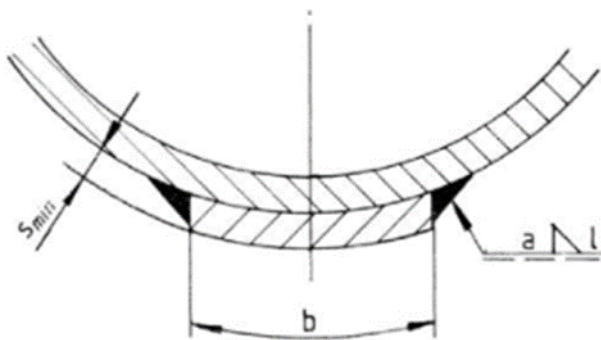
2.4.2 Kiintopiste

Kiintopisteellä estetään putken liikkuminen kokonaan. Liukujalka hitsataan kiinni sekundäärikanakkeeseen ja putkeen hitsataan estopalaja, jotta putki ei pääse liikkumaan aksiaalisuunnassa kannakkeen sisällä. Standardin PSK 7362 mukaiset estopalat on esitetty kuvissa 3 ja 4. Jotta kiintopiste kestäisi suurempia voimia, voidaan liukujalkojen lukumäärää lisätä. Kun liukujalkoja lisätään, on hyvä muistaa, ettei varsinkaan kuumilla putkilla kaikkia liukujalkoja voida hitsata sekundääriin kiinni, jotta putken säteensuuntainen lämpölaajeneminen olisi mahdollista. (PSK-käsikirja 8, 22.)

Putkistojen liitokset erilaisiin laitteisiin, kuten säiliöihin tai pumppuihin katsotaan myös kiintopisteiksi. Tällöin myös putken kiertymä katsotaan estetyksi. Kun putken kiertymäkin on estetty, on kyseessä momenttijäykkä tuki. (PSK-käsikirja 8, 9.)



KUVA 3. Estopala B. (PSK 7362, 2.)



KUVA 4. Estopala A. (PSK 7362, 2.)

3 LASKEMISEEN VAIKUTTAVAT SUUREET

3.1 Kimmokerroin

Kimmokerroin eli kimmomoduuli kuvaa kappaleen elastisia ominaisuuksia, kun kappale kokee yhdensuuntaisia veto- tai puristusvoimia. Toisin sanoen kimmokerroin on mittari materiaalin kyvystä vastustaa muodonmuutosta rasituksen alaisena. (Encyclopædia Britannica, Inc. 2024.)

Kun materiaali valitaan standardin SFS-EN 13480-2 mukaan, saadaan materiaalin kimmokerroin laskettua halutussa lämpötilassa käyttäen standardista SFS-EN 13480-3 löytyviä polynomikertoimia kaavalla:

$$E_t = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 \quad (\text{KAAVA 1})$$

missä

E = Kimmomoduuli

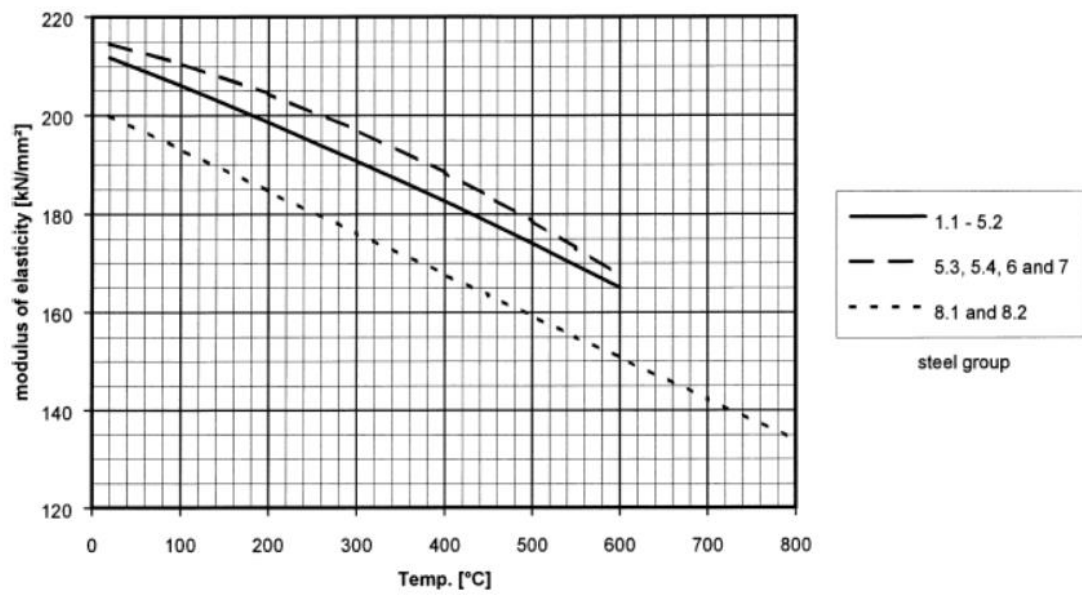
t = Lämpötila.

3.2 Lämpötila

Lämpötilan noustessa metallien kimmokerroin laskee. Kuvassa 5 voidaan nähdä standardin SFS-EN 13480-3 mukaan lämpötilan vaikutus eri teräsryhmien kimmokertoimiin. Jotta lämpötilan vaikutusta kimmokertoimeen olisi helpompi arvioida, on standardissa määritetty kokeellisesti osoitetut polynomikertoimet jokaiselle teräsryhmälle, jotka löytyvät taulukosta 1 (Lahdenvesi 2023, 11).

TAULUKKO 1. Polynomikertoimet kimmomoduulille E_t (SFS-EN 13480-3:2017, 252.).

| Teräsryhmä | Polynomikertoimet | | |
|------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| | C_0 | C_1 | C_2 |
| 1–4, 5.1 ja 5.2 | 213,16 | $-6,91 \cdot 10^{-2}$ | $-1,824 \cdot 10^{-5}$ |
| 5.3, 5.4, 6 ja 7 | 215,44 | $-4,28 \cdot 10^{-2}$ | $-6,185 \cdot 10^{-5}$ |
| 8.1 ja 8.2 | 201,66 | $-8,48 \cdot 10^{-2}$ | 0 |



KUVA 5. Lämpötilan vaikutus kimmomoduuliin teräsryhmittäin (SFS-EN 13480-3:2017, 254.).

4 LASKENTATYÖKALU

Tämän insinööriyön tavoitteena oli luoda Microsoft Excel -pohjainen laskentatyökalu nopeuttamaan Rejlers Finland Oy:n putkistosuunnittelijoiden työtä. Laskentatyökalun on tarkoitus toimia apuna suunnittelijalle putkiston suunnitteluvaiheessa. Suunnittelija pystyy laskurin avulla tarkastelemaan putkeen kohdistuvia voimia kannakevälillä ilman syvempää statiikan tai lujuusopin osaamista. Työkalun ei ole tarkoitus korvata erillistä lujuuslaskentaa, vaan sen tarkoitus on toimia jo olemassa olevan työprosessin rinnalla.

Nykyisessä muodossaan laskentatyökalulla onnistuu vaakatasoisten suorien putkien tarkastelu kahden kannakkeen välillä. Lisäksi putkessa voi olla yksi vapaasti asetettava pistekuorma, esimerkiksi venttiili tai instrumentti. Putken nimelliskoon käyttäjä voi valita väliltä DN10–DN1200 ja seinämän paksuuden vapaasti kirjoittamalla. Lisäksi ohjelman käyttämistä varten täytyy olla tiedossa putken tiheys, putken sisällön tiheys sekä mahdollisen eristyksen tiheys ja paksuus. Lämpötila on myös käyttäjän valittavissa.

Laskentatyökalu on rakennettu siten, että jatkossa esimerkiksi uusien materiaalien tai putken nimelliskokojen lisääminen ja muokkaaminen onnistuu helposti ilman että laskentatyökalun toimivuus muuttuisi. Tämä mahdollistaa laskentatyökalun helpon käyttämisen, vaikka vastaan tulisi uusia materiaaleja.

Kannakevälin maksimipituudelle ei laskurissa ole käytännössä rajaa. Laskentatyökalu jakaa putken dynaamisesti 100 tarkasteltavaan osaan, joten pidemmällä väleillä teoriassa tarkkuus heikentyy. Työkalun käytön kannalta tällä ei ole merkitystä, sillä tulos on käyttötarkoitukseensa silti riittävän tarkka.

4.1 Toiminta

Kuvassa 6 on esitetty laskentatyökalun suunniteltu käyttöliittymä. Suunnitellussa käyttöliittymässä käyttäjä voi syöttää tietoa vaaleansinisellä pohjalla oleviin soluihin. Ohjelma täyttää auto-

maattisesti jokaisen oranssilla pohjalla olevan solun käyttäjän syöttämien tietojen perusteella. Käyttäjä voi vapaasti täyttää muut solut paitsi kohdat "Putken koko" ja "Materiaali". Näihin käyttäjä voi valita arvot pudotusvalikoista. Nämä arvot ohjelma saa valmiiksi määritellyistä tietokannoista. Ohjelman ylläpitäjä voi halutessaan päivittää näitä tietokantoja laajentaakseen tuettavia materiaaleja tai putkikokoja. Valmiiksi ohjelmasta löytyy yleisimmät DN-koot, sekä muutama yleinen putkisto-materiaali. Tietokannat on tehty Exceliin omille välilehdillensä.

OHJELMA KOEKÄYTTÖSSÄ
Kysymykset, kommentit ja yhteydenotot: Mikko Lappalainen ja Tero Pääkkönen

| | | |
|------------------------|----|---|
| Putken koko | DN | <input type="text" value="200"/> |
| Putken seinämä | | <input type="text" value="4,5"/> mm |
| Putken tiheys | | <input type="text" value="7850"/> kg/m ³ |
| Putken sisällön tiheys | | <input type="text" value="1000"/> kg/m ³ |
| Eristyksen paksuus | | <input type="text" value="120"/> mm |
| Eristyksen tiheys | | <input type="text" value="120"/> kg/m ³ |
| Materiaali | | <input type="text" value="P235GH"/> |
| Lämpötila | | <input type="text" value="20"/> °C |

| | | |
|------------------|---|---------------------------------------|
| Kannakeväli | A | <input type="text" value="10000"/> mm |
| Pistekuorma | F | <input type="text" value="100"/> N |
| Kuorman sijainti | B | <input type="text" value="5000"/> mm |

| | | |
|--|--|--|
| Kannakeväliillä vaikuttava tasainen kuorma | | <input type="text" value="7240,04"/> N |
| I | | <input type="text" value="17472396,38"/> mm ⁴ |
| W | | <input type="text" value="159492,44"/> mm ³ |

Niveltuettu putki

| | | |
|-------------------------------|--|---|
| Max taivutusmomentti | | <input type="text" value="9296,60"/> Nm |
| Suurin taipuma | | <input type="text" value="26,04"/> mm |
| Taivutusjännitys | | <input type="text" value="58,29"/> MPa |
| Taipuma pistekuorman kohdalla | | <input type="text" value="26,04"/> mm |

Jäykästietuettu putki

| | | |
|-------------------------------|--|---|
| Max taivutusmomentti | | <input type="text" value="6158,36"/> Nm |
| Suurin taipuma | | <input type="text" value="5,24"/> mm |
| Taivutusjännitys | | <input type="text" value="38,61"/> MPa |
| Taipuma pistekuorman kohdalla | | <input type="text" value="5,24"/> mm |

The diagram shows a horizontal pipe supported by two points, A and B. A downward force F is applied at a distance B from the left support. The total length between supports is A.

| | | |
|------------------|--|---|
| Putken oma paino | | <input type="text" value="23,82"/> kg/m |
| Kokonaispaino | | <input type="text" value="73,83"/> kg/m |
| Virtausala | | <input type="text" value="34669,05"/> mm ² |
| Putken tilavuus | | <input type="text" value="0,346691"/> m ³ |
| Putken pinta-ala | | <input type="text" value="3033,84"/> mm ² |
| Neliömomentti I | | <input type="text" value="17472396"/> mm ⁴ |
| Taivutusvastus W | | <input type="text" value="159492,4"/> mm ³ |
| Neliömomentti It | | <input type="text" value="34944793"/> mm ⁴ |
| Vääntövastus Wt | | <input type="text" value="318984,9"/> mm ³ |
| Kimmomoduuli | | <input type="text" value="211770,7"/> MPa |

KUVA 6. Laskentatyökalu

Laskutoimitukset suoritetaan omilla välilehdillensä, josta ne haetaan laskurin etusivulle. Tämä selkeyttää työkalua ja helpottaa sen käyttämistä. Välilehdiltä on helppo tarkistaa, millä kaavalla mikäkin on laskettu ja ohjelman ylläpitäjän on helppo tehdä muutoksia kaavoihin tarvittaessa. Niveltuetulla ja jäykästi tuetulla putkella on omat välilehtensä ja yleisillä laskukaavoilla, jotka käyvät molempiin putkiin, on omansa. Tästä huolimatta joissakin soluissa etusivulla suoritetaan yksinkertaisia laskuja tai Excelin funktioita. Esimerkkinä "Suurin taipuma" -soluissa käytetään Excelin MIN-funktiota suurimman taipuman löytämiseksi. Lisäksi taipuma muutetaan negatiivisesta positiiviseksi ja sen yksikköä muutetaan luettavuuden helpottamiseksi. Kuvassa 7 on pieni ote laskentakaavojen välilehdeltä.

Putken oma paino

$$M_{\text{putke}} = p \times (d_o^2 - (d_o - 2 \times t)^2) \times 1 \times \frac{\pi}{4000}$$

d_o mm d_i mm

Paino kg/m

Putken tilavuus

$$V = \pi \times (d_i/2)^2 \times L$$

Tilavuus m³

KUVA 7. Ote laskentakaavojen välilehdeltä

Käyttäjän ei tarvitse valita, haluaako hän laskea niveltuetun vai jäykästi tuetun putken arvoja, vaan ohjelma laskee molemmat näkyville samanaikaisesti. Tällä tavoin käyttäjän on helppo esimerkiksi vertailla erilaisia kannakointivaihtoehtoja saatujen arvojen perusteella, mikäli käytettävä kannakointitapa ei ole vielä selvillä.

4.1.1 DN-tietokanta

Putken nimelliskoko DN on kansainvälisen standardisointijärjestö ISO:n käyttämä kokojärjestelmä putkistoille. Se koostuu kirjainyhdistelmästä "DN", sekä dimensiottomasta kokonaisluvusta. Esimerkkinä "DN 20". Kokonaisluku ei ole suoraan yhteydessä putken sisä- tai ulkohalkaisijaan, vaan se on "noin" sisä- ja ulkohalkaisijan keskiarvo. Esimerkin "DN 20" oikea ulkohalkaisija on noin 26,9 mm.

DN-tietokantaan, taulukko 2, on kerätty yleisimmät DN-putkikoot. Tietokannassa jokaiselle DN-koolle on annettu ulkohalkaisija, OD, millimetreinä. Sisähalkaisijaa ei tietokannassa ole, sillä sitä ei ennalta voi tietää, vaan se määräytyy käyttäjän antaman seinämän paksuuden avulla.

TAULUKKO 2. DN-kokojen tietokanta

| DN | OD (mm) |
|------|---------|
| 10 | 17,2 |
| 15 | 21,3 |
| 20 | 26,9 |
| 25 | 33,7 |
| 32 | 42,4 |
| 40 | 48,3 |
| 50 | 60,3 |
| 65 | 76,1 |
| 80 | 88,9 |
| 100 | 114,3 |
| 125 | 139,7 |
| 150 | 168,3 |
| 200 | 219,1 |
| 250 | 273 |
| 300 | 323,9 |
| 350 | 355,6 |
| 400 | 406,4 |
| 450 | 457 |
| 500 | 508 |
| 600 | 610 |
| 700 | 711 |
| 800 | 813 |
| 900 | 914 |
| 1000 | 1016 |
| 1200 | 1219 |

4.1.2 Materiaalien tietokanta

Materiaalien tietokannassa on lista materiaaleista, joita laskurissa voi käyttää. Tietokannassa on sarakkeet metallin ryhmälle, itse materiaalille ja kimmomoduulille. Tietokanta ja sarakkeet näkyvät taulukossa 3. Kimmomoduuli lasketaan materiaalille automaattisesti ryhmän perusteella sekä halutussa lämpötilassa käyttäen aiemmin mainittuja polynomikertoimia, jotka löytyvät taulukosta 1.

TAULUKKO 3. Materiaalien tietokanta

| Ryhmä | Materiaali | Kimmomoduuli |
|-------|------------|--------------|
| 1.1 | P235GH | 211,770704 |
| 8.1 | 1.4307 | 199,964 |
| 8.1 | 1.4432 | 199,964 |

4.2 Microsoft Excel

Laskentaohjelman pohjaksi valikoitui Microsoftin Excel-taulukkolaskentaohjelma. Excel valittiin, koska se on Rejlersillä laajasti käytössä, ja sen avulla on toteutettu muitakin laskentaohjelmia suunnittelijoiden avuksi.

Microsoft Excelin avulla laskentaohjelman toteuttaminen oli helppoa, sillä Excelistä löytyy hyvin laaja valikoima hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten sisäänrakennettuja funktioita tai solujen tietojen kelpoisuuden tarkistaminen. Näitä ominaisuuksia hyödyntäen ohjelma saatiin rakennettua, eikä Exceliin tarvinnut ladata minkäänlaisia kolmannen osapuolen lisäosia. Tämän takia laskentaohjelma toimii millä tahansa tietokoneella, jolla on Microsoft Excel tai pääsy Excelin verkkoversioon. Käyttäjän ei tarvitse ladata erillistä ohjelmistoa koneellensa tai kolmannen osapuolen lisäosia, vaan laskentaohjelmaa pystyy käyttämään suoraan avaamalla Excel-tiedoston.

4.3 Laskentakaavat

Laskemisessa on käytetty tehokkaasti hyödyksi Excelin taulukkolaskentaominaisuuksia. Aluksi putki jaetaan dynaamisesti 100 osaan hyödyntäen Excelistä löytyvää ROW-funktiota, joka palauttaa halutun solun rivinumeron. Tämä saadaan tehtyä, kun ensin osaksi 1 määritellään 0 metriä ja osaksi 100 haluttu kannakeväli. Tämän jälkeen puuttuvien osien pituus saadaan laskettua hyödyntäen Exceliä. Kuvassa 8 sarakkeessa B näkyy osien numerointi ja solussa C osien pituus. Kuvankaappauksen ottohetkellä kannakevälinä oli 10 m.

| | A | B | C |
|----|---|----|-------|
| 1 | | | |
| 2 | | x | |
| 3 | | 1 | 0 |
| 4 | | 2 | 0,101 |
| 5 | | 3 | 0,202 |
| 6 | | 4 | 0,303 |
| 7 | | 5 | 0,404 |
| 8 | | 6 | 0,505 |
| 9 | | 7 | 0,606 |
| 10 | | 8 | 0,707 |
| 11 | | 9 | 0,808 |
| 12 | | 10 | 0,909 |
| 13 | | 11 | 1,010 |
| 14 | | 12 | 1,111 |
| 15 | | 13 | 1,212 |
| 16 | | 14 | 1,313 |
| 17 | | 15 | 1,414 |
| 18 | | 16 | 1,515 |

KUVA 8. Ote putken jakamisesta osiin

Taivutusmomentin laskut on jaettu kahteen sarakkeeseen, D ja E. Sarakkeessa D lasketaan arvot pistekuorman kohdalle asti ja sarakkeessa E pistekuorman kohdalta loppuun saakka. Näiden vieressä on sarake F, jossa arvot ovat summattuna samaan sarakkeeseen laskemisen helpottamiseksi. Sarakkeet näkyvät kuvassa 9.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
|---|---|---|----------|----------|--------|------------|------------|------------|------------------|------------------|---|
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | x | $M_1(x)$ | $M_2(x)$ | $M(x)$ | Taipuma ac | Taipuma cb | Taipuma ab | Taipuma yhteensä | Taivutusjännitys | |

KUVA 9. Kuvankaappaus laskentavälilehdeltä

4.3.1 Niveltuettu putki

Taivutusmomentti niveltuetylle putkelle saadaan laskettua kahdella kaavalla. Kaavalla 2 saadaan laskettua taivutusmomentit kun $0 \leq x \leq$ pistekuorman sijainti ja kaavalla 3 kun pistekuorman sijainti $\leq x \leq$ putken pituus.

$$M_1(x) = \left(q \times \frac{x}{2}\right) \times x^2 + Ay \times x \quad (\text{KAAVA 2})$$

$$M_2(x) = (F \times B) - (Ay - F) \times x - \left(q \times \frac{x}{2}\right) \times x^2 \quad (\text{KAAVA 3})$$

missä

q = tasainen kuorma

Ay = tukivoima putken vasemmassa laidassa

F = pistekuorma

B = etäisyys pistekuormaan putken vasemmasta laidasta.

Taipuman laskemiseen tarvitaan kolmea kaavaa. Taipuma lasketaan kaavalla 4 välillä $0 \leq x \leq$ pistekuorman sijainti, kaavalla 5 pistekuorman sijainti $\leq x \leq$ putken pituus ja kaavalla 6 koko putken pituudelta. Kaavoissa 4 ja 5 ei oteta tasaista kuormaa huomioon ja kaavassa 6 huomioidaan pelkästään tasainen kuorma. Lopuksi nämä summataan yhteen, jolloin saadaan kokonaistaipuma.

$$\rho_B = \left(\frac{F \times C \times x}{6 \times L \times E \times I}\right) \times (L^2 - C^2 - x^2) \quad (\text{KAAVA 4})$$

$$\rho_C = \left(\frac{F \times B \times (L-x)}{6 \times L \times E \times I}\right) \times (L^2 - B^2 - (L-x)^2) \quad (\text{KAAVA 5})$$

$$\rho_A = \left(\frac{q \times x}{24 \times E \times I}\right) \times (L^3 - 2 \times L \times x^2 + x^3) \quad (\text{KAAVA 6})$$

missä

F = pistekuorma

B = etäisyys pistekuormaan putken vasemmasta laidasta

C = etäisyys putken oikeaan laitaan pistekuormasta

L = putken pituus

E = kimmomoduuli

I = neliömomentti

q = tasainen kuorma.

Taivutusjäännitys lasketaan niveltuetylle putkelle käyttäen seuraavaa kaavaa:

$$\rho_x = \frac{M(x) \times y}{I} \quad (\text{KAAVA 7})$$

missä

$M(x)$ = taivutusmomentti

y = suora etäisyys neutraaliin akseliin

I = neliömomentti.

Tukivoimat A_y ja B_y niveltuetulle putkelle saadaan laskemalla ensin tukivoima B_y putken oikeassa laidassa käyttäen kaavaa 8, tämän jälkeen tukivoima A_y putken vasemmassa laidassa voidaan laskea kaavalla 9.

$$B_y = \frac{q \times \frac{L}{2} + F \times B}{L} \quad (\text{KAAVA 8})$$

$$A_y = F + q - B_y \quad (\text{KAAVA 9})$$

missä

q = tasainen kuorma

L = putken pituus

F = pistekuorma

B = etäisyys pistekuormaan putken vasemmasta laidasta.

4.3.2 Jäykästi tuettu putki

Jäykästi tuettuun putkeen kohdistuvien voimien laskeminen onnistuu melkein samoja kaavoja käyttäen kuin niveltuetun putken. Jäykästi tuetun putken kanssa putken päihin kohdistuu myös vääntävä voima, joka täytyy laskuissa huomioida.

Taivutusmomentin laskeminen noudattaa samaa periaatetta kuin niveltuetussa putkessa, eli momentit lasketaan kahdessa osassa, kun $0 \leq x \leq$ pistekuorman sijainti ja kun pistekuorman sijainti $\leq x \leq$ putken pituus ja lopuksi summataan yhteen sarakkeessa $M(x)$.

$$M_1(x) = \left(q \times \frac{x}{2} \right) \times x^2 + A_y \times x - M_L \quad (\text{KAAVA 10})$$

$$M_2(x) = \left(q \times \frac{x}{2} \right) \times x^2 - (F \times A_y) \times x + (M_L + F \times B) \quad (\text{KAAVA 11})$$

missä

q = tasainen kuorma

A_y = tukivoima putken vasemmassa laidassa

M_L = putken rasituksesta johtuva momentti putken vasemmassa laidassa

F = pistekuorma

B = etäisyys pistekuormaan putken vasemmasta laidasta.

$$\rho_B = \left(\frac{F \times C^2 \times x^2}{6 \times E \times I \times L^3} \right) \times (3 \times B \times L - 3 \times B \times x - C \times x) \quad (\text{KAAVA 12})$$

$$\rho_C = \left(\frac{F \times B^2 \times (L-x)^2}{6 \times E \times I \times L^3} \right) \times (3 \times C \times x - B \times L + B \times x) \quad (\text{KAAVA 13})$$

$$\rho_A = \left(\frac{q \times x^2}{24 \times E \times I} \right) \times (L - x)^2 \quad (\text{KAAVA 14})$$

missä

F = pistekuorma

B = etäisyys pistekuormaan putken vasemmasta laidasta

C = etäisyys putken oikeaan laitaan pistekuormasta

L = putken pituus

E = kimmomoduuli

I = neliömomentti

q = tasainen kuorma.

Taivutusjäännitys lasketaan samaa kaavaa käyttäen jäykästi tuetulle putkelle kuin niveltuetullekin. Katso kaava 7.

Tukivoimat A_y ja B_y jäykästi tuetulle putkelle saadaan aluksi laskemalla momentit M_L ja M_R putken molemmissa päissä. Nämä momentit saadaan ensin laskemalla momentit pelkästään pistekuormaa käyttäen ja tämän jälkeen muuta kuormaa käyttäen. Lopuksi momentit summataan yhteen.

$$M_L = \left(\frac{F \times B \times C^2}{L^2} \right) + \left(\frac{q \times L^2}{12} \right) \quad (\text{KAAVA 15})$$

$$M_R = \left(\frac{F \times B^2 \times C}{L^2} \right) + \left(\frac{q \times L^2}{12} \right) \quad (\text{KAAVA 16})$$

missä

F = pistekuorma

B = etäisyys pistekuormaan putken vasemmasta laidasta

C = etäisyys putken oikeaan laitaan pistekuormasta

L = putken pituus

q = tasainen kuorma.

Kuten kaavasta 15 ja 16 näkee, lasketaan tasainen kuorma käyttäen samaa kaavaa sekä momentissa M_L , että momentissa M_R . Tämä johtuu siitä, että tasainen kuorma q jakaantuu tasan molempiin päihin.

Kun momentit M_L ja M_R on laskettu, voidaan laskea ΣM_L ja ΣM_R käyttäen kaavoja 17 ja 18.

$$\Sigma M_L = F \times B + q \times L \times \left(L \times \frac{1}{2} \right) + M_L + M_R \quad (\text{KAAVA 17})$$

$$\Sigma M_R = F \times C - q \times L \times \left(L - L \times \frac{1}{2} \right) + M_L + M_R \quad (\text{KAAVA 18})$$

missä

F = pistekuorma

B = etäisyys pistekuormaan putken vasemmasta laidasta

C = etäisyys putken oikeaan laitaan pistekuormasta

L = putken pituus

q = tasainen kuorma

M_L = putken rasituksesta johtuva momentti putken vasemmassa laidassa

M_R = putken rasituksesta johtuva momentti putken oikeassa laidassa.

Lopulta kun ΣM_L ja ΣM_R ovat selvillä, voidaan tukivoimat A_y ja B_y laskea seuraavilla kaavoilla:

$$A_y = \frac{\Sigma M_R}{L} \quad (\text{KAAVA 19})$$

$$B_y = \frac{\Sigma M_L}{L} \quad (\text{KAAVA 20})$$

missä

ΣM_R = kokonaismomentti oikealla

ΣM_L = kokonaismomentti vasemmalla

L = putken pituus.

5 KEHITTÄMISIDEAT

Laskentaohjelma antaa jo nykyisessä muodossaan paljon hyödyllistä tietoa suunnittelijalle, mutta sitä on mahdollista jatkokehittää. Ohjelma rajattiin nykyiseen muotoonsa, jottei työ paisuisi opinnäytetyön rajojen ylitse.

Mahdollisia jatkokehitysideoita laskentaohjelmalle voisi olla esimerkiksi taipuman tarkastaminen standardissa PSK 7304 annettuja raja-arvoja vastaan ja ilmoittamalla tästä käyttäjälle, jääkö taipuma raja-arvojen sisälle vai meneekö se yli. Mikäli raja-arvo ylitetään, ohjelma voisi laskea suositeltavan kannakevälin valmiiksi.

Ohjelmaan voisi myös lisätä tietokannan yleisimmistä putkistoissa siirrettävistä fluideista ja niiden tiheyksistä. Käyttäjä voisi helposti valita listasta haluamansa fluidin ja ohjelma täyttää tiheyden automaattisesti. Myös eristeistä voisi tehdä vastaavanlaisen listan. Tietysti käyttäjälle pitää jäädä vaihtoehdoksi myös täyttää itse nämä kohdat.

Nykyisellään ohjelmalla voi laskea vain suoria ja halkaisijaltaan muuttumattomia putken osuuksia yhdellä pistekuormalla tai ilman. Toisen pistekuorman lisääminen ohjelmaan voisi olla hyödyllistä. Myös putkiin, jotka eivät ole vain suoria, tai putkiin, joiden halkaisija muuttuu kannekeväliillä, kohdistuvia voimia voisi olla hyödyllistä pystyä laskemaan, mutta näiden lisääminen nykyiseen ohjelmaan voisi olla haastavaa.

6 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa laskentatyökalu käyttäen Microsoftin Excel - taulukkolaskentaohjelmaa. Laskentatyökalun tarkoituksena on tehostaa suunnitteluprosessia ja helpottaa putkistosuunnittelijoiden työtä. Työn tuloksena saatiin tehtyä toimiva, laskennallisesti oikeita tuloksia antava laskentaohjelma.

Haasteita insinööriyön tekemisessä aiheutui lähinnä kaavojen soveltamisessa haluttuun käyttötarkoitukseen. Tarkemmin haasteita ilmeni niveltuetuun ja jäykästi tuettuun putkeen kohdistuvien voimien laskemisessa. Täytyi keksiä, miten voimat voidaan laskea halutun pituiselle putkelle ja halutulla pistekuormalla missä kohti putkea tahansa käyttäen samoja kaavoja.

Insinööriyön aihe oli tekijälleen erittäin mielenkiintoinen ja sopivalla tavalla haastava. Työn tekeminen vaati perehtymistä sekä erilaisiin standardeihin, että lujuusopin ja statiikan kaavoihin. Työ vaati myös Excelin hieman syvällisempää käyttöä. Mielenkiintoiseksi työn teki hyvä aihe, joka vaati paljon uuden oppimista, mutta myös paljon vanhojen asioiden kertaamista.

LÄHTEET

Encyclopædia Britannica, Inc 2024. Young's modulus. Hakupäivä 30.1.2024. <https://www.britannica.com/science/bulk-modulus>.

Henell, Antti 2011. Kannakoinnin merkitys prosessiputkistojen suunnittelussa. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Paperikoneteknologian koulutusohjelma, Tekniikka ja liikenne. Insinööriyö. Hakupäivä 20.2.2024. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201103223434>.

Jääntti, Jukka 2020. Putkistosuunnittelu. LAB-ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Insinööriyö. Hakupäivä 30.1.2024. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021052711794>.

Lahdenvesi, Pauliina 2023. Työkalu teollisuusputkistojen geometrisen käyttöasteen määrittämiseksi. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Bio- ja kemiantekniikka. Insinööriyö. Hakupäivä 31.1.2024. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2023081524727>.

Metalliteollisuuden Standardointiyhdistys ry 2019. Terässtandardit. Hakupäivä 7.2.2024. https://metsta.fi/wp-content/uploads/2020/05/Terasstandardit_2019.pdf.

PSK 2402 2021. Teollisuuden putkistot. Putkistosuunnittelun perusteet. PSK Standardi. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry. Hakupäivä 8.2.2024.

PSK 7306 2023. Putkiston kannakointi. Ohjaukset ja kiintopisteet. PSK Standardi. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry. Hakupäivä 20.2.2024.

PSK 7362 2021. Putkiston kannakointi. Estopala. PSK Standardi. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry. Hakupäivä 20.2.2024.

PSK-käsikirja 8 2021. Putkiston kannakointi. 3. painos. PSK-käsikirja. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry. Hakupäivä 20.2.2024.

Rejlers 2024. Alati jalostuvaa insinööriosaamista. Huomisen yhteiskunnan hyväksi. Verkkoaineisto. Hakupäivä 1.3.2024. <https://www.rejlers.fi/Meista/>.

SFS 2017. SFS-EN 13480-3:2017:en. Metallic industrial piping. Part 3: Design and calculation.
Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.