

Siiri Kiviniemi

**PYÖREÄN BETONI-TERÄSLIITTOPOIKKILEIKKAUKSEN KES-  
TÄVYYDEN MITOITUS TAIVUTUSMOMENTIN JA NORMAALIVOI-  
MAN YHTEISVAIKUTUSKUVAAJAN AVULLA**

**PYÖREÄN BETONI-TERÄSLIITTOPOIKKILEIKKAUKSEN KESTÄVYY-  
DEN MITOITUS TAIVUTUSMOMENTIN JA NORMAALIVOIMAN YHTEIS-  
VAIKUTUSKUVAAJAN AVULLA**

Siiri Kiviniemi  
Opinnäytetyö  
Kevät 2019  
Rakentamistekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakentamistekniikan tutkinto-ohjelma, rakennetekniikka

---

Tekijä: Siiri Kiviniemi  
Opinnäytetyön nimi: Pyöreän betoni-teräслиittoikkileikkauksen kestävyysmitoitustavutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaajan avulla  
Työn ohjaajat: Antti Ukonmaanaho, Tuomo Järvenpää  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2019  
Sivumäärä: 48 sivua + 3 liitettä

---

Liittopikkileikkausta käytetään niin talo- kuin infrarakentamisen puolella. Opinnäytetyössä perehdyttiin liittopikkileikkauksen mitoittamiseen sillanrakentamisen näkökulmasta. Työssä keskityttiin erityisesti liittopaaluihin ja niiden toimintaan.

Insinööritoimisto Ponvia Oy:llä oli toiveena saada helppokäyttöinen mitoitusohjelma pyöreälle betoni-teräслиittoikkileikkaukselle, jota ympäröi teräspuikprofiili. Yrityksessä aiemmin käytetty SSAB:n mitoitusohjelma RRPileCalc ei vastannut täysin tilaajan toiveita liittopaalujen mitoituksessa, sillä mitoitusohjelmassa olivat vain SSAB:n omat yleisimmin käytettävät teräspuikpaalujen koot. Tästä syystä tilaaja toivoi mitoitusohjelmaa, johon olisi mahdollista määrittää itse poikkileikkauksen tiedot.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa helppokäyttöinen mitoitusohjelma liittopikkileikkaukselle, jonka mitoittavana tekijänä toimi taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus. Mitoitusohjelma toteutettiin voimassa olevien standardien mukaisesti. Poikkileikkauksen kestävyys määritettiin normaalivoiman ja yhteisvaikutuskuvaajan avulla niin, että poikkileikkaukselle laskettiin maksimikestävyys silloin, kun sitä kuormittavat normaalivoima ja taivutusmomentti. Mitoitusohjelmaan piirrettiin näiden tietojen perusteella laskettu yhteisvaikutuskuvaaja, jonka rajaamalle alueelle muilla tavoin määriteltävien poikkileikkauksen kohdistuvien normaalivoiman ja taivutusmomentin voimaparien tuli sijoittua. Mikäli voimaparit eivät sijoittuneet yhteisvaikutuskuvaajan rajaamalle alueelle, tuli rakenteen poikkileikkausta kasvattaa tai lisätä rakenteeseen betoniterästä.

Työn tuloksena valmistui mitoitusohjelma pyöreälle betoni-teräслиittorakenteiselle poikkileikkaukselle, jota ympäröi teräspuikprofiili. Mitoitusohjelmaa on mahdollista käyttää vain poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3, sillä poikkileikkausluokassa 4 rakenteelle tulisi ottaa huomioon myös paikallinen lommahdus. Kuitenkaan tapauksissa, joissa mitoitusohjelmaa tullaan käyttämään, poikkileikkaus harvoin ylittää poikkileikkausluokkaan 4.

Opinnäytetyössä laadittu mitoitusohjelma saatiin toimimaan tilaajan vaatimusten mukaisesti. Mitoitusohjelmaa on myös mahdollista jatkojalostaa tilaajan toiveiden mukaisesti, esimerkiksi lisäämällä leikkausvoiman vaikutus liittopikkileikkaukseen.

---

Asiasanat: betoni-teräслиittorakenne, liittopikkileikkaus, liittopaalu, liittopilari, normaalivoima, taivutusmomentti

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Civil engineering, Structural Engineering

---

Author: Siiri Kiviniemi

Title of thesis: Dimensioning Resistance of Circular Concrete-Steel Composite's Cross-Section with Joint Effect Graph

Supervisors: Antti Ukonmaanaho, Tuomo Järvenpää

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2019

Pages: 48 + 3 appendices

---

This thesis was assigned by Insinööritoimisto Ponvia Ltd. They had a desire to get dimensioning tool which is easy to use. The purpose of the dimensioning tool is to dimension the circular composite cross-section. The cross-section formed by circular reinforced concrete and shell of structural steel. Earlier the assigner has used SSAB's software called RRpileCalc, which did not answer the assigner desires, because the information of software has only SSAB's own dimensions of steel pipe pile. For these reasons the assigner wanted own dimensioning tool.

The interaction of bending moment and normal force served as the dimensioning factor of the dimensioning tool. The tool was made following valid standards. The maximum resistance was calculated for cross-section loaded by the bending moment and normal force. It was defined by the interaction graph of bending moment and normal force. Force pairs that have been calculated in other ways had to be the area marked off by the interaction graph. The cross-section should be enlarged or amount of reinforcing steel increased in the structure if the force pairs exceeds the interaction graph. The dimensioning tool was made with Mathcad 15.0.

A dimensioning tool was completed as a result of the thesis. It is possible to use the tool in cross-section classes 1, 2 and 3. It does not operate in class 4 because local buckling should be taken into consideration when dimensioning class 4. In cases where the tool will be used cross-section class 4 is rarely reached, so this was not problem.

The objectives of the work were achieved, the dimensioning tool works well, and it is easy to edit in the future. For example the effect of the shear force to cross-section could be later added to the tool.

---

Keywords: bending moment, composite column, composite, concrete, cross-section, normal force, steel

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää työn tilaajaa Insinööritoimisto Ponvia Oy:tä, sekä erityisesti Tuomo Järvenpäästä mielenkiintoisesta aiheesta sekä avusta opinnäytetyön parissa.

Lisäksi haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa Antti Ukonmaanahoa opinnäytetyön ohjauksesta sekä Soili Fabritiusta kielellisestä ohjauksesta.

Haluan myös kiittää opiskelukavereita tsemppaavasta ja hyvästä ilmapiiristä koko opiskelujeni ajalta.

Suurin kiitos kuuluu kuitenkin perheelleni, parhaimmille ystäväilleni sekä erityisesti avopuolisolleni Miskalle, jotka kannustamisellaan ja tuellaan mahdollistivat tämän saavutuksen.

Oulussa 5.5.2019

Siiri Kiviniemi

# SISÄLLYS

|  |    |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ  | 3  |
| ABSTRACT   | 4  |
| ALKULAUSE  | 5  |
| SISÄLLYS   | 6  |
| SANASTO  | 8  |
| 1 JOHDANTO   | 11 |
| 2 LIITTORAKENTEIDEN KÄYTTÖALUEET   | 12 |
| 2.1 Liittorakenteiden käyttökohteet ja hyödyt                                | 12 |
| 2.2 Materiaalit liittorakenteessa  | 13 |
| 2.2.1 Rakenneteräs   | 13 |
| 2.2.2 Betoni ja betoniteräs  | 14 |
| 2.3 Liittopilarit  | 15 |
| 2.4 Suunnitteluperusteet ja vaatimukset                                      | 17 |
| 3 BETONI-TERÄSLIITTOPOIKKILEIKKAUKSEN MITOITUS                               | 18 |
| 3.1 Poikkileikkausluokitus   | 18 |
| 3.2 Korroosion vaikutus suunnitteluun  | 21 |
| 3.3 Materiaalien lujuudet  | 23 |
| 3.4 Jännityksen ja venymän välinen yhteys                                    | 24 |
| 3.5 Kappaleen rasitukset   | 30 |
| 3.5.1 Normaalivoima $N$  | 30 |
| 3.5.2 Taivutusmomentti $M_t$   | 31 |
| 3.6 Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus                        | 31 |
| 3.7 Yksinkertaistettu M-N-yhteisvaikutuskuvaaja                              | 33 |
| 4 MITOITUSTYÖKALUN LAATIMINEN  | 37 |
| 4.1 Mitoitustyökalun perustiedot   | 37 |
| 4.2 Mitoitustyökalun toteutus vaiheittain                                    | 38 |
| 4.3 Yksinkertaistetun M-N-yhteisvaikutuskuvaajan laadinta tarkistusta varten | 42 |
| 4.4 Tulosten vertailu  | 43 |
| 5 YHTEENVETO   | 45 |
| LÄHTEET  | 46 |

## LIITTEET

Liite 1 Valmis mitoitustyökalu

Liite 2 Paalun RD600/18, S440J2H poikkileikkauksen vertailu

Liite 3 Paalun RD800/20, S440J2H poikkileikkauksen vertailu

Liite 4 Paalun RD800/20, S355J2H poikkileikkauksen vertailu

## SANASTO

|                    |   |
|--------------------|---|
| A                  | Kappaleen pinta-ala (mm <sup>2</sup> )  |
| A <sub>a</sub>     | Rakenneteräksen pinta-ala (mm <sup>2</sup> )  |
| A <sub>c</sub>     | Betonin pinta-ala (mm <sup>2</sup> )  |
| A <sub>s</sub>     | Betoniterästen pinta-ala (mm <sup>2</sup> )   |
| A <sub>s1</sub>    | Yhden betoniteräksen pinta-ala (mm <sup>2</sup> )   |
| α <sub>cc</sub>    | Betoniosan kerroin, putkipilarissa 1,0  |
| D                  | Koko poikkileikkauksen halkaisija (mm)  |
| D <sub>c</sub>     | Betoniosan halkaisija (mm)  |
| D <sub>corr</sub>  | Koko poikkileikkauksen halkaisija, josta huomioitu korroosiovara (mm)   |
| D <sub>n</sub>     | $\frac{\frac{\pi}{4}f_{cd}D_c^2}{2Df_{cd}+4t(2f_{ad}-f_{cd})}$ , normaalivoiman vaikutuksen huomioiminen halkaisijassa (mm) |
| δ                  | $\frac{A_a f_{yd}}{N_{pIRd}}$ , teräsosakerroin   |
| D <sub>s</sub>     | Betoniterästen painopisteiden väliin jäävä halkaisija (mm)  |
| E <sub>a</sub>     | Rakenneteräksen kimmokerroin (MPa)  |
| E                  | Kimmokerroin (MPa)  |
| E <sub>s</sub>     | Betoniteräksen kimmokerroin (MPa)   |
| ε <sub>a</sub>     | Rakenneteräksen venymä  |
| ε <sub>c</sub>     | Betonin puristuma   |
| ε <sub>c.ed2</sub> | Poikkileikkauksen yläpinnan venymän raja-arvo   |



|                  |  |
|------------------|--|
| $\epsilon_{cu2}$ | Betonin murtopuristuma   |
| $\epsilon_{c2}$  | Betonin myötöpuristuma   |
| $\epsilon_s$     | Betoniteräksen venymä  |
| $\epsilon_{s1}$  | Poikkileikkauksen venymän raja-arvo  |
| $\epsilon_{ud}$  | Betoniteräksen venymäraja  |
| $f_a$            | Rakenneteräksen myötöraja (MPa) (standardissa $f_y$ )  |
| $f_{ad}$         | Rakenneteräksen mitoituslujuus (MPa)   |
| $f_{cd}$         | Betonin lieriölujuuden mitoitusarvo (MPa)  |
| $f_{ck}$         | Betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden iässä (MPa)  |
| $f_{yd}$         | Betoniteräksen mitoitusarvo (MPa)  |
| $f_{yk}$         | Betoniteräksen myötölujuus (MPa)   |
| $M$              | Taivutusmomentti (kNm)   |
| $M_{Ed}$         | Taivutusmomentin mitoitusarvo (kNm)  |
| $M_{max.Rd}$     | Suurin mahdollinen taivutuskestävyys, joka poikkileikkauksessa voi esiintyä jäykkäplastisen jännitys jakauman vallitessa (kNm) |
| $M_{n.Rd}$       | Normaalivoiman vaikutuksesta taivutuskestävyyteen aiheutuva lisäys (kNm)   |
| $M_{pl.Rd}$      | Plastinen taivutuskestävyys (kNm)  |
| $N$              | Normaalivoima (kN)   |
| $n$              | EkspONENTTI  |
| $N_{Ed}$         | Puristavan normaalivoiman mitoitusarvo   |
| $n_k$            | Tarkastelupisteiden lukumäärä  |
| $N_{pl.Rd}$      | Plastinen normaalivoima (kN)   |

|             |  |
|-------------|--|
| $N_{pm.Rd}$ | Pisteeseen C vaikuttava normaalivoima (kN)                   |
| $\sigma$    | Nimellisjännitys (MPa)                                       |
| $\sigma_a$  | Rakenneteräksen jännitys (MPa)                               |
| $\sigma_c$  | Betonin jännitys (MPa)                                       |
| $\sigma_s$  | Betoniteräksen jännitys (MPa)                                |
| $\gamma_a$  | Rakenneteräksen osavarmuusluku (standardissa $\gamma_{M0}$ ) |
| $\gamma_c$  | Betonin osavarmuusluku                                       |
| $\gamma_s$  | Betoniteräksen osavarmuusluku                                |

# 1 JOHDANTO

Työn tilaajalla Insinööritoimisto Ponvia Oy:llä oli toiveena saada helppokäyttöinen betoni-teräsliittopoikkileikkauksen mitoitus työkalu liittopaalujen mitoitusta varten. Aiemmin käytössä ollut SSAB:n mitoitusohjelma RRpileCalc ei täysin vastaa asiakkaan toiveita, sillä mitoitusohjelma kattaa ainoastaan SSAB:n omat yleisimmin käytössä olevat teräsputki-paalujen koot. Tämän vuoksi heillä on tarvetta mitoitus työkalulle, johon on mahdollista itse määrittää poikkileikkauksen tiedot.

Työn tavoitteena on tuottaa mitoitus työkalu helpottamaan pyöreän betoni-teräsliittopoikkileikkauksen mitoitusta, joka toteutetaan voimassa olevien standardien pohjalta. Mitoitus työkalu toteutetaan Mathcad 15.0 -ohjelmistolla ja mitoittavana tekijänä toimivat taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus. Liittopoikkileikkauksia on olemassa useita erilaisia, mutta tässä työssä keskitytään tarkastelemaan vain raudoitettua pyöreää betonista liittopoikkileikkausta, jota ympäröi teräsputki profiili.

Työssä perehdytään liittorakenteiden toimintaan, ominaisuuksiin sekä käyttökohteisiin. Lisäksi perehdytään mitoitus työkalun valmistumisprosessiin sekä sen toimintaan mitoituksessa sekä verrataan tuloksia SSAB:n mitoitusohjelmalla saatuihin tuloksiin sekä standardissa SFS-EN 1994-1-1 esitettyyn yksinkertaiseen taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaajaan.

Työn tilaajana toiminut Insinööritoimisto Ponvia Oy on perustettu vuonna 2005 jatkamaan Insinööritoimisto Rantakokko & Co Oy:n toimintaa siltojen sekä vesi- ja satamarakenteiden suunnittelu- ja kehitystehtävissä. Insinööritoimisto Ponvia Oy sijaitsee Oulussa ja sen erikoisosaamisiin siltatekniikassa kuuluvat mm. jännitetyt betonisillat, vinoköysisillat ja teräksiset liittopalkkisillat.

## 2 LIITTORAKENTEIDEN KÄYTTÖALUEET

Liittorakenteiksi kutsutaan yleisesti kaikkia niitä rakenteita, joissa yhdistyy kaksi eri materiaalia liitettynä toisiinsa joko mekaanisesti tai muunlaisella liitoksella. Tällä mahdollistetaan rakenteelle suurempi jäykkyys tai kestävyys kuin se pelkällä yhdellä materiaalilla olisi. Liittorakenteiksi ei kuitenkaan luokitella kaikkia rakenteita, vaikka ne täyttäisivätkin edellä mainitun ehdon. Esimerkiksi kahden lujuusominaisuuksiltaan erilaisen teräs- tai betoniosan liitoksia ei lasketa liittorakenteeksi. Näitä ovat esimerkiksi hitsatut levypalkit, jotka muodostuvat kahdesta lujuusominaisuuksiltaan erilaisen teräsosan liitoksista, sekä kahden betoniosan muodostamat rakenteet, jotka ovat liitettynä joko mekaanisesti ja/tai osien väliseen tartuntaan perustuvana. (1, s. 13.)

Standardissa SFS-EN 1994-1-1 liittorakenneosa määritellään seuraavasti: ”Kantava rakenneosa, jossa betonista ja rakenneteräksestä tai kylmämuovatususta teräksestä valmistettuja komponentteja toisiinsa liitettynä siten, että liitoksissa betonin ja teräksen välinen pitkäaikainen liukuminen samoin kuin komponenttien irtoaminen toisistaan pysyy rajallisenä” (2, s. 11).

### 2.1 Liittorakenteiden käyttökohteet ja hyödyt

Liittorakenteita käytetään jonkun verran talonrakennuksen sekä infrarakentamisen puolella esimerkiksi sillanrakentamisessa. Liittorakennetta on mahdollista käyttää pilareina, palkkeina, laattoina sekä maanpaineseininä. Talonrakennuksessa liittorakenteet ovat yleistyneet betonin palonkestävyyden ansiosta. Sillanrakennuksessa liittorakenteita käytetään muun muassa siltojen kansissa sekä liittopilareissa. (3, s. 12-13.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään ainoastaan pyöreän liittopilarin mitoitukseen.

Liittorakenteiden valinta perustuu samaan kuin minkä tahansa muun rakennetyypin valinta. Siihen vaikuttavat muun muassa rakenteellisuus, säilyvyys, kustannukset sekä työtekniikka ja arkkitehtuuri. (3, s. 12-13.)

Liittorakenteen etuja esimerkiksi talonrakentamisessa ovat mahdolliset liittorakenteiset välipohjat, joissa betonivalulle ei tarvita erillistä muotitusta ja teräslevystä saadaan rakenteelle samalla vetoraudoitus. Myös pyöreässä liittopilarissa teräsputkiprofiilia voidaan käyttää samalla muottina. Sillanrakennuksessa etuihin kuuluvat muun muassa se, että

liittorakenteella mahdollistetaan rakenteelle alhaisempi omapaino sekä pienempi rakennekorkeus. (3, s. 12-13.)

## **2.2 Materiaalit liittorakenteessa**

Luvuissa 2.2.1–2.2.2 perehdytään betoni-teräслиittopoikkileikkauksessa käytettävien rakenneteräksen, betonin sekä betoniteräksen ominaisuuksiin.

### **2.2.1 Rakenneteräs**

Teräs on tärkein jatkojalostettu rauta rakennusteollisuudessa ja siinä hiilipitoisuus on alle 1,7 %. Teräksessä on raudan ja hiilen lisäksi seosaineita, joko tarkoituksella tai epäpuhauksina. Teräksen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa seosaineilla, ja niillä voidaan parantaa esimerkiksi teräksen lujuus- ja sitkeysominaisuuksia sekä korroosion kestävyyttä. Näillä seosaineilla on erittäin suuri merkitys teräksen lopullisiin ominaisuuksiin. (4, s. 180.)

Rakenneteräksen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat muun muassa sen korkeat lujuusarvot, niin vedossa kuin puristuksessa, materiaalin kimmoisuus suhteellisen suuriin jännityksiin sekä pienet ajasta riippuvat muodonmuutokset. Rakenneteräksen epäedullisia ominaisuuksia ovat muun muassa sen korroosion kestävyys ja kunnossapitokustannukset, taipumus menettää stabiiliutensa ja tästä syystä johtuva jäykisteiden tarve sekä rakenteen taipumus värähtelyyn sekä väsymismurtumaan. Yksi teräksen epäedullisista ominaisuuksista on korroosio, eli syöpyminen, joka johtuu ympäristön kanssa tapahtuvasta sähkökemiallisista reaktioista. (4, s. 182.)

Rakenneteräksiä on olemassa yleisiä rakennusteräksiä sekä erikoislujia rakenneteräksiä. Yleisiä rakennusteräksiä ovat seostamattomat rakenneteräkset. Rakenneteräs on seostamatonta silloin, kun se sisältää raudan ja hiilen lisäksi myös muita aineita, jotka ovat siihen valmistusmenetelmästä tai raaka-aineista jäänyttä. Seostettua rakenneteräs on silloin, kun siinä on lisäaineita, joilla pyritään parantamaan esimerkiksi rakenneteräksen lujuutta, kovuutta ja karkenevuutta. Olemassa on myös erikoislujia rakenneteräksiä, joihin kuuluu niin kutsuttu hienoraeteräs, jota käytetään muun muassa silloissa ja offshore-rakenteissa. (4, s. 190.)

### 2.2.2 Betoni ja betoniteräs

Betonia käytetään valtavasti ympäri maailman ja se onkin maailman suosituin rakennusmateriaali. Sen suosio perustuu monikäyttöisyyteen sekä hyviin ominaisuuksiin, kuten turvallisuuteen, kosteuden keston, edullisuuteen, lujuuteen ja jäykkyyteen sekä muokattavuuteen. Käyttökohteita betonilla on useita niin talonrakennuksen kuin infrarakentamisenkin puolella. Betonia käytetään paljon myös perustuksissa betonilaattana ja -paaluina, sillä se kestää muita materiaaleja paremmin maaperästä tulevia rasituksia ja sillä on hyvä kosteuden kesto. (5, linkit Perustietopaketti -> Betoni rakennusmateriaalina -> Betonin ominaisuudet ja käyttö.)

Betoni valmistetaan suhteittamalla eri osa-aineita keskenään. Osa-aineita ovat runkoaine, sementti, vesi, mineraaliset seosaineet, lisäaineet sekä muut aineet. Betonin sidosaineena toimii sementti, joka kovettuttuaan luo betonille sen lujuuden. Lisäaineita käytetään parantamaan tuoreen betonin ominaisuuksia. Näitä lisäaineita on esimerkiksi notkistimet, huokostimet sekä hidastimet. Huokostimen tehtävänä on lisätä betonin ilmapiitoisuutta, jolla voidaan parantaa betonin pakkasenkestävyyttä. Hidastimien tehtävä on taas siirtää sitoutumista myöhemmäksi. (4, s. 144.)

Betonin ominaisuuksia on sen hyvä puristuslujuus, joka on yleensä 30...100 MPa. Korkealujuusbetoniksi luokitellaan betonit, jonka lujuus on välillä 60...100 MPa. Tässä työssä ei keskitytä ollenkaan korkealujuusbetoniin, sillä liittopilareita ei pystytä mitoittamaan luotettavasti, mikäli lujuus on yli 50 MPa. Betonin käyttö perustuu sen hyvään puristuslujuuteen. Sen vetolujuus on suhteellisen pieni, se on nimittäin vain noin 10 % puristuslujuudesta, minkä vuoksi betoniin lisätään vetorautoitus. Rautoituksen ansiosta betonin sitkeys voidaan varmistaa. (5, linkit Perustietopaketti -> Ominaisuudet ja edut -> Betonin lujuus.) Betonin lujuuteen vaikuttavat muun muassa sementin laatu ja määrä, vesi-sementtisuhte sekä runkoaineen laatu ja rakeisuus. Näistä eniten puristuslujuuteen vaikuttavat vesi-sementtisuhte, betonin ikä sekä sementtilaatu. (4, s. 148.)

Betonin muodonmuutoksia ovat kuormituksista aiheutuvat välitön kimmoinen muodonmuutos sekä hidastettu kimmoinen muodonmuutos ja viruma. Välitön kimmoinen muodonmuutos tapahtuu heti kuormituksen alettua ja palautuu sitten, kun kuormitus lakkaa vaikuttamasta. Hidastettua kimmoista muodonmuutosta syntyy, kun jännitys ylittää puolet

betonin puristuslujuudesta, eli plastista muodonmuutosta. Viruma on ajasta johtuvaa muodonmuutosta, jota syntyy, kun kuormitus vaikuttaa pitkän ajan. (4, s. 149.)

Betoniteräksellä tarkoitetaan harjakuvioitua terästä, joka on valmistettu kuumavalssamalla ja/tai kylmämuokkaamalla hiiliteräksestä, austeniittisesta tai austeniittis-ferriittisestä teräksestä (6). Austeniittisellä teräksellä tarkoitetaan haponkestävää ruostumatonta terästä, joka on teräslaatuina hyvin lämmönkestävää. Austeniittis-ferriittisellä teräksellä taas tarkoitetaan ruostumatonta terästä, jolla on hyvät korroosio-ominaisuudet. (7.)

Betonin ja betoniteräksen yhteistoiminnan avulla rakenne kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Tartunnan avulla jännitykset siirtyvät betonilta betoniterästangoilta betonille sekä toisinpäin. Betoniraudoiteille tärkeää on betonipeitteen riittävä paksuus, jolla suojataan raudoitteen ruostuminen sekä varmistetaan betonin ja betoniteräksen välinen tartunta. Lisäksi betonipeitteellä suojataan betoniterästä tulipalolta. (8.)

Betoniterästen tulee täyttää niille asetetut vaatimukset, jotka on määrätty SFS-standardeissa. Lisäksi betoniterästen tulee olla sertifioituja, joka osoitetaan teräsripussa SFS-merkinnällä. Käytettäviä betoniteräksiä ovat kylmämuokatut B500K, B700K sekä B600KX, joissa merkinnällä B tarkoitetaan kylmämuokattua terästä ja merkinnällä K kylmämuokattua harjakuviota. Kuumavalssattuja betoniteräksiä ovat A500HW sekä A700HW, joissa merkinnällä A tarkoitetaan kuumavalssattua terästä ja merkinnällä H kuumavalssattua harjakuviota sekä W hitsattavaa terästä. Näiden terästyypien merkittävimpiä eroja on se, että ainoastaan kuumavalssattua saadaan hitsata työmaalla. Kuumavalssattu teräs on sitkeämpää, eli ennen murtumista venymä on suurempi kuin kylmämuokatulla, lisäksi kuumavalssatuissa tangoissa tartunta on parempi. (8, linkit betoniteräkset.)

### **2.3 Liittopilarit**

Liittopilareiksi luokitellaan kaikki ne pilarit, joissa kantavina rakenteina on sekä rakenne-teräsosa että betoni joko raudoitettuna tai raudoittamattomana. Pilarin ominaisuuksiin voidaan ottaa huomioon myös betoniraudoitus silloin, kun se voi plastisoitua nurjahtamatta ja kuorma voi jakaantua kaikkien materiaalien kesken. (1, s. 183.) Liittopilarit ovat yleensä kaksoissymmetrisiä, mistä seuraa, että halkeamattomalla betonilla ja teräsprofiililla on silloin sama painopiste. Kun kyseessä on halkeamaton betoni, betoni- ja teräsosan välille

ei kehity liitoksen leikkausvuota muuttuvan momentin vaikutuksesta. Halkeilu muuttaa paikallisesti betoniosan painopisteen paikkaa pois poikkileikkauksen keskiöstä. Tästä kehittyvä leikkausvuo on kuitenkin niin pieni, että sillä ei ole mitoituksen kannalta merkitystä. Pilareita mitoittaessa käyttörajatilatarkastusta ei tehdä, sillä vain pilarin kestävyydellä on merkitystä. (1, s. 184.)

Liittopilareita käytettiin alkuun hyvin harvoin, sillä betonin ei ajateltu lisäävän kestävyyttä rakennepoikkileikkauksessa. Kuitenkin myöhemmin kuormituskokeissa huomattiin, että murtorajatilassa betoni ja betoniteräs kehittävät lujuuksiansa vastaavan osan kestävydestä. (1, s. 183.) Liittopilarit ovat alkujaan kehittyneet teräspilarin palonsuojaustarpeesta, sillä vaikka teräs onkin palamaton materiaali, se kuumenee niin nopeasti, että suojaamaton teräsrakenne kestää standardipaloa vain noin 15 minuuttia. Betonilla taas on todella hyvä lämmönvarauskyky, joten se sitoo palossa kehittyvää kuumuutta itseensä paremmin kuin hyvin eristävät kevyet pintamateriaalit. (5, linkit Perustietopaketti -> Turvallisuus -> Betonin -> Paloturvallisuus & palovahingot.)

Teräsbetonipilareiden mitoitus perustuu poikkileikkauksen mitoitukseen, jossa otetaan huomioon, että pilarit murtuvat taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuksesta. Pilarin pituuden kasvaessa taivutusmomentin vaikutus lisääntyy, mutta kestävyys teräsbetonipilareissa saavutetaan murtumisen seurauksena, vaikka ennen murtumista sivusiirtymät voivat kasvaa oleellisesti. Teräspilareissa taas pääpaino on epästabiliustarkastelussa, sillä hoikkeudet näissä ovat luonnostaan suurempia ja vain rajoitetuissa tapauksissa on puhtaasti plastisia murtumia. (1, s. 184.)

Käyttäytymiseltään liittopilarit sijoittuvat teräsbetoni- ja teräspilarien väliin. Kyseessä ei ole stabiiliuden menetys, ellei hoikkuus ole huomattavan suuri, vaikka murtumiseen kuuluukin taipuman lisääntyminen. Kestävyys liittopilareissa saavutetaan useimmiten samalla tavalla kuin teräsbetonipilareissa, ellei pilarin paikallinen lommahdus rajoita plastisen kestävyuden saavuttamista teräsosassa. Teräspoikkileikkauksen mittasuhteita yleensä rajoitetaan lommahduksen estämiseksi niin, että koko poikkileikkauksen voidaan olettaa plastisoitumisen kehittyessä toimivan tehollisena. (1, s. 184.)



## 2.4 Suunnitteluperusteet ja vaatimukset

Liittorakenteiden suunnittelussa tulee noudattaa voimassaolevia standardeja. Liittorakenteiden yleiset säännöt määritellään standardissa EN 1994. Standardi on jaettu kolmeen osaan, joista SFS-EN 1994-1-1 kattaa liittorakenteiden yleiset ja rakennuksia koskevat säännöt, SFS-EN 1994-1-2 käsittelee liittorakenteiden palomitoitusta sekä SFS-EN 1994-2 sisältää liittorakenteisia siltoja koskevat lisäsäännöt. Tässä työssä ei perehdytä liittorakenteita koskevaan palomitoitukseen.

Standardin SFS-EN 1994-1-1 luvussa 2 määritellään liittorakenteiden suunnitteluperusteet. Siellä mainitaan, että liittorakenteet tulee suunnitella standardissa EN 1990 esitettyjen yleisten sääntöjen sekä kyseisessä luvussa esitettyjen lisäsääntöjen mukaan. Vaatimusten katsotaan täyttyvän, kun suunnittelussa käytetään rajatilamitoitusta yhdessä osavarmuuslukumenetelmän kanssa standardin EN 1990 mukaisesti ja standardin EN 1991 mukaisia kuormia. Kuormat yhdistellään standardin EN 1990 mukaisesti ja kestävyys, säilyvyys sekä käyttökelpoisuus standardin SFS EN 1994-1-1 mukaisesti. Näitä edellä mainittuja asioita tulee noudattaa kokonaisuutena, jotta vaatimukset täyttyvät liittorakenteiden osalta. (2, s. 20.)

Standardin SFS-EN 1994-1-1 luvussa 3 käsitellään materiaaleihin liittyviä vaatimuksia. Normaali betonin ominaisuudet saadaan standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdasta 3.1, ellei eurokoodissa 4 mainita toisin. Standardi kattaa ainoastaan liittorakenteiden mitoituksen silloin, kun betonin lujuusluokka on välillä C20/25...C50/60. Betoniterästä koskevat vaatimukset saadaan standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdasta 3.2. Lisäksi liittorakenteissa kimmokertoimen mitoitusravona  $E_s$  voidaan käyttää rakenneteräksen kanssa samaa arvoa. Rakenneterästä koskevat vaatimukset saadaan standardin SFS-EN 1993-1-1 kohdista 3.1 ja 3.2. Standardin SFS-EN 1994-1 osan 1 säännöt koskevat rakenneterästä silloin, kun sen nimellinen myötölujuus on enintään 460 N/mm<sup>2</sup>. (2, s. 22.)

### 3 BETONI-TERÄSLIITTOPOIKKILEIKKAUKSEN MITOITUS

Betoni-teräслиitto poikkileikkauksen mitoituksessa tulee ottaa huomioon niin teräs- kuin teräsbetoniosankin mitoitukseen vaikuttavat tekijät. Näitä ovat esimerkiksi teräsosassa huomioitava poikkileikkausluokitus. Liittopilariksi luokitellaan ne pilarit, jotka täyttävät kaavan 1 mukaisen ehdon. Mikäli ehto ei täyty, kyseessä on teräs- tai teräsbetonipilari. (2, s. 53.)

$$0,2 \leq \delta \leq 0,9$$

KAAVA 1

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}}, \text{ teräsosakerroin}$$

$A_a$  = rakenneteräksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$f_{yd}$  = rakenneteräksen mitoituslujuus, käytetään muualla merkintää  $f_{ad}$  (MPa)

$N_{pl,Rd}$  = plastinen normaalivoima (kN)

Poikkileikkauksessa saa olla betoniterästä enintään 6 % betonin pinta-alasta. Betoniteräksen suhteellinen määrä poikkileikkauksen pinta-alasta lasketaan kaavalla 2. (2, s.55.)

$$\frac{A_s}{A_c} \leq 6\%$$

KAAVA 2

$A_s$  = betoniterästen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$A_c$  = betonin pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

Luvuissa 3.1-3.7 käsitellään liittopoikkileikkauksen mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi kerrotaan liittopoikkileikkauksen kestävyuden mitoituksesta taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaajan avulla.

#### 3.1 Poikkileikkausluokitus

Poikkileikkausluokka tulee aina tarkistaa teräsrakenteille. Standardissa SFS-EN 1994-1-1 mainitaan, että poikkileikkausluokitus liittorakenteen teräsosalle luokitellaan samoilla perusteilla kuin standardissa SFS-EN 1993-1-1. (2, s.30.) Poikkileikkausluokituksen tarkoituksena on tunnistaa, kuinka paljon paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkauksen

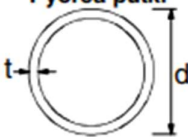
kestävyyttä ja kiertymiskykyä. Näitä poikkileikkausluokkia on olemassa yhteensä neljä ja ne määritellään standardissa SFS-EN 1993-1-1 luvussa 5.5.2 taulukon 1 mukaisesti. (9, s. 42)

*TAULUKKO 1. Poikkileikkausluokkien määritelmät (9, s. 42)*

| Poikkileikkausluokka   | Määritelmä  |
|------------------------|---|
| Poikkileikkausluokka 1 | Plastisuusteorian mukaisen tarkastelun vaatima, riittävän kiertymiskyvyn omaava nivel voi syntyä ilman, että poikkileikkauksen kestävyyttä tarvitsee pienentää.                       |
| Poikkileikkausluokka 2 | Plastisuusteorian mukainen sauvan taivutuskestävyys voi kehittyä, mutta paikallinen lommahdus rajoittaa kiertymiskykyä.   |
| Poikkileikkausluokka 3 | Sauvan äärimmäisessä puristetussa reunassa laskettu jännitys voi saavuttaa myötörajan, mutta paikallinen lommahdus estää plastisuusteorian mukaisen momenttikestävyyden kehittymisen. |
| Poikkileikkausluokka 4 | Paikallinen lommahdus esiintyy ennen kuin myötöraja saavutetaan poikkileikkauksen jossakin pisteessä.   |

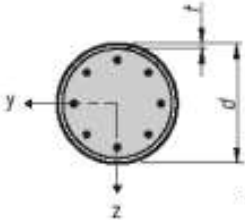
Poikkileikkausluokitus on riippuvainen puristettujen osien leveys-paksuussuhteesta. Näihin puristettuihin osiin luokitellaan jokainen osa, johon tarkasteltavan kuormitusyhdistelmän vaikutuksesta syntyy joko täysi tai osittainen puristus. (9, s. 43.) Poikkileikkauksessa eri osat voivat kuulua eri poikkileikkausluokkiin ja poikkileikkausluokka määräytyy vähiten suotuisten puristettujen osien perusteella. Standardin SFS-EN 1993-1-1 taulukossa 5.2 esitetään poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 raja-arvot. Ne osat, jotka eivät täytä taulukon raja-arvoja, kuuluvat poikkileikkausluokkaan 4. Taulukossa 2 esitetään pyöreälle putkelle suurimmat leveys-paksuussuhteet. (9, s. 47.)

*TAULUKKO 2. Puristetun taso-osan suurimmat leveys-paksuussuhteet pyöreälle putkelle (9, s. 47)*

| Pyöreä putki  |   |      |      |      |      |      |
|---|---|------|------|------|------|------|
|  |   |      |      |      |      |      |
| Poikkileikkauksluokka   | Taivutettu ja/tai puristettu poikkileikkaus |      |      |      |      |      |
| 1   | $d/t \leq 50\epsilon^2$                     |      |      |      |      |      |
| 2   | $d/t \leq 70\epsilon^2$                     |      |      |      |      |      |
| 3   | $d/t \leq 90\epsilon^2$                     |      |      |      |      |      |
| <b>Huom.</b> Kun $d/t > 90\epsilon^2$ , ks. EN 1993-1-6.                          |   |      |      |      |      |      |
| $\epsilon = \sqrt{235/f_y}$   | $f_y$                                       | 235  | 275  | 355  | 420  | 460  |
|   | $\epsilon$                                  | 1,00 | 0,92 | 0,81 | 0,75 | 0,71 |
|   | $\epsilon^2$                                | 1,00 | 0,85 | 0,66 | 0,56 | 0,51 |

Standardissa SFS-EN 1994-1-1 kohdassa 6.7 määritetään liittopoikkileikkaukseen liittyvät suunnittelu ehdot. Kohdassa mainitaan, että liittopoikkileikkauksessa teräsprofiilin lommahduksen vaikutus kestävyys täytyy suunnittelussa ottaa huomioon, mikäli taulukon 6.3 suhteiden enimmäisarvot ylittyvät. Taulukossa 3 esitetään pyöreän liittopoikkileikkauksen suhteiden  $d/t$  enimmäisarvot, jolloin lommahduksen vaikutusta kestävyys ei tarvitse huomioida. (2, s. 54.)

**TAULUKKO 3.** Suhteiden  $d/t$  enimmäisarvot, jolloin lommahdusta ei tarvitse ottaa huomioon (9, s. 54)

| Poikkileikkaus  | Suhteiden $(d/t)$ , $(h/t)$ ja $(b/t)$ enimmäisarvot |
|---|--|
| Pyöreät teräsputkiprofiilit  | $\max (d/t) = 90 \frac{235}{f_y}$                    |

Tässä työssä ei perehdytä ollenkaan poikkileikkausluokkaan 4, sillä mitoitus työkalu toteutetaan niin, ettei poikkileikkaus voi koskaan ylittää poikkileikkausluokan 3 raja-arvoja, ja näin ollen lommahduksen vaikutusta kestävyys ei tarvitse huomioida.

### 3.2 Korroosion vaikutus suunnitteluun

Korroosiolla tarkoitetaan metallin hapettumista ympäristön vaikutuksesta, mitä esiintyy monella eri tavalla. Yleisin korroosion esiintymistyyppi on yleinen korroosio, jolla tarkoitetaan metallin syöpmistä koko pinta-alaltaan tasaisesti. (10, linkit Lyhyesti korroosiosta.) Tätä korroosion muotoa esiintyy myös teräspaaluissa.

Standardissa SFS-EN 1993-5 luvussa 4 käsitellään teräspaalun säilyvyyteen vaikuttavia tekijöitä. Rakenteen käyttöikää voidaan pidentää esimerkiksi teräksen paksuuden lisäämisellä korroosiovaraa varten. Mikäli näin tehdään, kyseisen standardin kohdassa 4.4 määritetään korroosionopeudet suunnittelua varten. (11, s. 27.) Normaalissa ilmastossa ilmatilakorroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen arvoksi voidaan valita 0,01 mm vuodessa ja meriolosuhteiden vaikuttaessa rakenteen toimivuuteen 0,02 mm vuodessa. Maa-aineksen korroosionopeuteen vaikuttavat merkittävästi maa-aineksen tyyppi, pohjaveden pinnan tason vaihtelu, hapen esiintyminen sekä epäpuhtauksien esiintyminen. (11, s. 29.) Tavanomaisissa olosuhteissa maan sisällä suojaamattomassa teräspaalussa keskimääräiseksi korroosioksi otaksutaan vähintään 1,2 mm sadassa vuodessa paalun ulkopuolista syöpyvää pintaa kohti. Korroosiota ei tarvitse huomioida paalujen sisäpinnoilla, mikäli teräspalkkipaalu on täytetty betonilla tai se on suljettu alapäästään. (12, s. 113.) Taulukossa 3 esitetään maahan asennettujen suojaamattomien paalujen korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen suositeltavat arvot suunnittelussa pohjaveden pinnan ylä- ja alapuolella (11, s. 29).

*TAULUKKO 4. Maahan asennettujen suojaamattomien paalujen paksuuden (mm), ohenemisen suositeltavat arvot pohjaveden pinnan ylä- ja alapuolella (11, s. 29)*

| Suunnitelmassa edellytetty käyttöikä  | 5 vuotta | 25 vuotta | 50 vuotta | 75 vuotta | 100 vuotta |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Häiriintymättömät luonnonmaat (hiekkä, siltti, savi, liuske...)   | 0,00     | 0,30      | 0,60      | 0,90      | 1,20       |
| Pilaantuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet   | 0,15     | 0,75      | 1,50      | 2,25      | 3,00       |
| Aggressiiviset luonnon maat (suo, räme, turve...)   | 0,20     | 1,00      | 1,75      | 2,50      | 3,25       |
| Tiivistämättömät ja ei- aggressiiviset kivennäis-<br>maatäytöt (savi, liuske, hiekkä, siltti...)  | 0,18     | 0,70      | 1,20      | 1,70      | 2,20       |
| Tiivistämättömät ja aggressiiviset täytemaat<br>(tuhka, kuona...)   | 0,50     | 2,00      | 3,25      | 4,50      | 5,75       |
| Huomautukset:<br>1) Korroosionopeudet tiivistetyissä täytöissä ovat hitaampia kuin tiivistämättömissä. Tiivistetyissä täytöissä taulukon luvut jaetaan kahdella.<br>2) 5 ja 25 vuoden arvot perustuvat mittauksiin, kun taas muut arvot on ekstrapoloitu. |          |           |           |           |            |

Taulukossa 5 esitetään makeaan veteen tai meriveteen asennettujen paalujen korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen suositeltavat arvot suunnittelussa (11, s. 29).

*TAULUKKO 5. Makeaan veteen tai meriveteen asennettujen paalujen korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen suositeltavat arvot (mm) (11, s. 30)*

| Suunnitelmassa edellytetty käyttöikä   | 5 vuotta | 25 vuotta | 50 vuotta | 75 vuotta | 100 vuotta |
|--|----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Tavallinen makea vesi (joki, laivakulkuinen kanava...) suuren rasituksen alueella (vesiraja)   | 0,15     | 0,55      | 0,90      | 1,15      | 1,40       |
| Erittäin saastunut makea vesi (viemäri, teollisuusjätevesi...) suuren rasituksen alueella (vesiraja)   | 0,30     | 1,30      | 2,30      | 3,30      | 4,30       |
| Merivesi lauhkeassa ilmastossa suuren rasituksen alueella (matala vesi ja roiskealueet)  | 0,55     | 1,90      | 3,75      | 5,60      | 7,50       |
| Merivesi lauhkeassa ilmastossa pysyvästi veden alla olevalla alueella tai vuorovesialueella  | 0,25     | 0,90      | 1,75      | 2,60      | 3,50       |
| Huomautukset:<br>1) Korroosionopeus on yleensä suurin roiskealueella tai vuorovesialueella laskuvien tasolla. Useimmissa tapauksissa suurimmat taivutusjännitykset kuitenkin esiintyvät pysyvästi veden alla olevalla alueella, ks. kuva 4-1.<br>2) 5 ja 25 vuoden arvot perustuvat mittauksiin, kun taas muut arvot on ekstrapoloitu. |          |           |           |           |            |

### 3.3 Materiaalien lujuudet

Materiaalin lujuudella tarkoitetaan sitä, kuinka paljon materiaali kestää kuormitusta murtumatta. Jonkin asteinen lujuus ja jäykkyys on ominaista kaikille kiinteille materiaaleille eli ne kestävät ulkoisten voimien vaikutusta tietyissä määrin ilman murtumista tai suuria geometrisia muutoksia. (13, s.143.)

Betonilla rakenteen lujuuteen vaikuttaa eniten vesi-sementtisuhte sekä lämpötila, jossa valu tehdään. Betonin lujuusluokkaa, jonka mukaan rakenne on suunniteltu, kutsutaan nimellislujuudeksi. On tärkeää muistaa, että rakenteita saa kuormittaa täydellä kuormalla vasta silloin kun nimellislujuus on saavutettu. (14, linkit Lujuuden kehitys.) Käsite ominaislujuus määritellään standardissa SFS-EN 206:2014 + A1:2016 seuraavalla tavalla: ”lujuusarvo, jonka alapuolelle oletetaan jäävän 5 % tarkasteltavan betonierän kaikkien lujuusmääritysten arvoista”. Samassa standardissa puristuslujuusluokka määritellään seuraavalla tavalla: ”luokittelu, jossa otetaan huomioon betonityyppi (normaalipainoinen betoni, raskas- tai kevytbetoni), pienin ominaispuristuslujuus, joka on määritetty lieriömäisistä koekappaleista (halkaisija 150 mm ja korkeus 300 mm) ja pienin ominaispuristuslujuus, joka on määritetty kuutiomaisista koekappaleista (särmä 150 mm)”. (15, s.19.) Puristuslujuuden avulla voidaan laskea betonille puristuslujuuden mitoituslujuus kaavalla 3 (2, s. 20).

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \text{KAAVA 3}$$

$f_{cd}$  = betonin puristuslujuuden mitoituslujuus (MPa)

$\alpha_{cc}$  = putkipilareissa 1,0

$f_{ck}$  = betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä (MPa)

$\gamma_c$  = betonin osavarmuusluku

Betoniteräksen myötölujuus  $f_{yk}$  määritetään tangon myötökuorman ominaisarvona jaetuna nimellisellä poikkileikkausalueella (9, s. 39). Betoniteräksen mitoituslujuus saadaan myötölujuuden  $f_{yk}$  avulla kaavalla 4 (1, s. 187).

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad \text{KAAVA 4}$$

$f_{yd}$  = Betoniteräksen mitoituslujuus (MPa)

$f_{yk}$  = Betoniteräksen myötölujuus (MPa)

$\gamma_s$  = Betoniteräksen osavarmuusluku

Betonin ja betoniteräksen osavarmuusluvut esitetään taulukossa 6 (16, s. 24).

*TAULUKKO 6. Betonin ja betoniteräksen osavarmuusluvut (16, s. 24)*

| Osavarmuusluvut             | Betoni | Betoniteräs |
|-----------------------------|--------|-------------|
| Normaalit                   | 1,5    | 1,15        |
| Pienennetyt                 | 1,35   | 1,1         |
| Onnettomuus- ja palotilanne | 1,0    | 1,0         |
| Väsymismitoitus             | 1,5    | 1,15        |

Rakenneteräksen myötörajan  $f_y$  (tässä työssä käytetään selvyyden vuoksi merkintää  $f_a$ ) valitaan nimelliset arvot seuraavasti: joko käytetään suoraan tuotestandardin arvoa  $f_y = R_{eH}$  tai käytetään standardissa SFS-EN 1993-1-1 sivulla 26 esitetyn taulukon 3.1 mukaista yksinkertaistusta. (9, s. 25.) Mitoituslujuus rakenneteräkselle saadaan kaavalla 5 (1, s. 187).

$$f_{ad} = \frac{f_a}{\gamma_a}$$

KAAVA 5

$f_{ad}$  = rakenneteräksen mitoituslujuus (MPa)

$f_a$  = rakenneteräksen myötölujuus (MPa)

$\gamma_a$  = rakenneteräksen osavarmuusluku

Rakenneteräksen osavarmuuslukuna käytetään yleensä arvoa  $\gamma_{M0} = 1,00$  (9, s. 48).

Tässä työssä käytetään selkeyden vuoksi osavarmuusluvun merkintänä  $\gamma_a$ .

### 3.4 Jännityksen ja venymän välinen yhteys

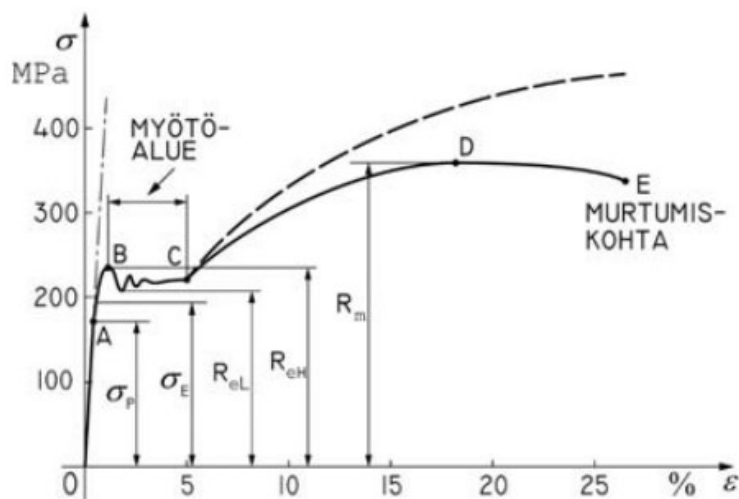
Jännitysten ja venymien välinen yhteys sekä materiaalin kyky kestää kuormitusta murtumatta ovat lujuusopillisesti materiaalin tärkeimpiä ominaisuuksia. Jännitysten ja venymien



välistä yhteyttä, eli  $\sigma\varepsilon$ -yhteyttä, kutsutaan materiaaliyhtälöksi. Eri materiaaleilla jännitys-venymäkäyrät saattavat poiketa toisistaan huomattavastikin. (17, s. 34.)

Sitkeiksi materiaaleiksi kutsutaan niitä materiaaleja, joissa ennen sauvan murtumista tapahtuu voimakas venyminen ja näitä ovat monet teräkset. Hauraita materiaaleja taas ovat ne materiaalit, joissa murtuminen tapahtuu jo melko pienelläkin venymällä, ja esimerkiksi betoni luokitellaan hauraisiin materiaaleihin. (17, s. 34.) Sauvassa tapahtuu poikittaista supistumista, eli kuroutumista, mikä on teräksellä hyvinkin voimakasta. Haurilla materiaaleilla tällaista korostunutta kuroutumista ei esiinny tavallisissa lämpötiloissa. (17, s. 35.)

Sitkeän teräksen  $\sigma\varepsilon$ -käyrän ominaisuudet ovat lujuusopillisesti hyvin mielenkiintoisia. Teräksen jännitys on suhteellisuusrajaan  $\sigma_p$  suoraan verrannollinen venymään. Vaikka teräksen jännitys kasvaa tätä suuremmaksi, käyttäytyy materiaali vielä kimmoisesti, eli venymä on vielä sauvassa täysin palautuvaa. Jännityksen ylittäessä kimmorajan  $\sigma_E$  sauvaan jää kuormituksen poistamisen jälkeen pysyvää venymää. (17, s. 35.) Jännitys saavuttaa niin sanotun myötörajan  $R_e$  venymän edelleen kasvaessa, jolloin venymä kasvaa ilman tarvittavan voiman lisäämistä. Ylemmäksi myötörajaksi  $R_{eH}$  kutsutaan sitä jännityksen arvoa, jolla myötö alkaa. Alempi myötöraja  $R_{eL}$  on myötöalueella esiintyvä pienin jännitys. Lopulta saavutetaan murtolujuus  $R_m$ , joka on kokeen aikana nimellisjännityksen suurin arvo, ja lopulta murtuminen tapahtuu kuvassa 1 esitettyssä pisteessä E. (17, s. 36.)



SITKEÄN RAKENNETERÄKSEN  $\sigma\varepsilon$ -KÄYRÄ

*KUVA 1. Sitkeän rakenneteräksen  $\sigma\varepsilon$ -käyrä (18, s. 16)*

$\sigma\varepsilon$ -käyrän alkuosalla useimpien rakennusmateriaalien käyttäytyminen on lineaarisesti kimmoista suhteellisuusrajaan  $\sigma_p$  saakka. Useimmissa tapauksissa käytettäessä esimerkiksi metalleja ja betonia rakenteet suunnitellaan niin, että materiaalin käyttäytyminen voidaan olettaa lineaarisesti kimmoiseksi. Tällöin jännityksen ja venymän välinen yhteys voidaan esittää yksinkertaisesti yhtälöllä, joka esitetään kaavassa 6. Kaavassa esitetyllä kimmokerroinella  $E$  kuvataan materiaalin jäykkyyttä tarkasteltavassa materiaalipisteessä. (17, s. 38.)

$$\sigma = E\varepsilon$$

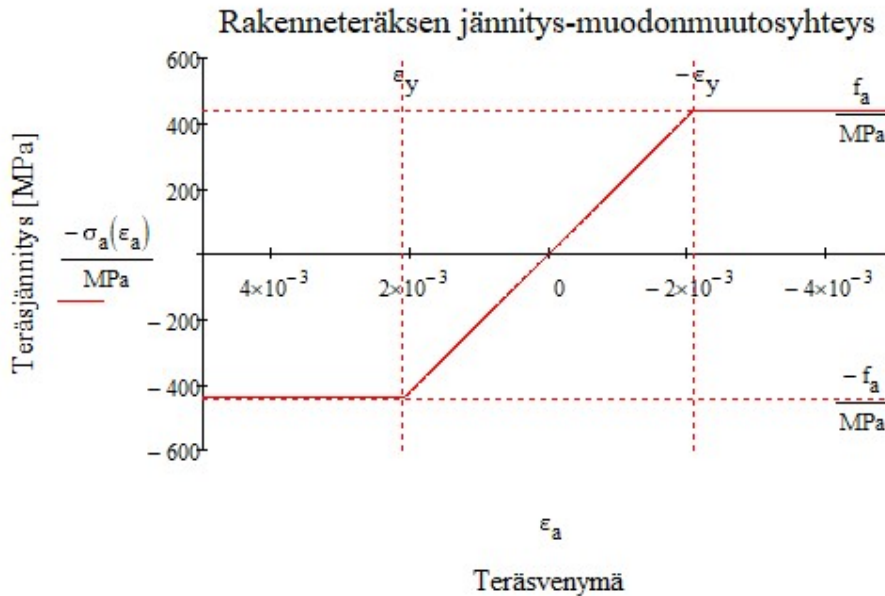
KAAVA 6

$\sigma$  = nimellijännitys (MPa)

$E$  = kimmokerroin (MPa)

$\varepsilon$  = venymä

Useiden rakennemateriaalien  $\sigma\varepsilon$ -käyrää kuvaajan alkuosalla kuvaa hyvin HOOKEEn lain esittämä lineaarinen jännitys-venymäyhteys ja joissain yhteyksissä tarvitaan  $R_e$  ylittäviä jännityksiä vastaavaa  $\sigma\varepsilon$ -käyrää, kuten rakenteen sortumiskuormituksen määrittämisessä (17, s. 38). Tässä tapauksessa esimerkiksi rakenneteräksillä voidaan  $\sigma\varepsilon$ -käyrä korvata murtoviivalla, joka esitetään kuvassa 2. Tätä mallia kutsutaan lineaarisesti kimmoiseksi, ideaalisesti plastiseksi materiaaliksi, ja tällä materiaalimallilla plastisten venymien alueella jännitysvenymäkäyrä on vaakasuora. (17, s.43.)



*KUVA 2. Rakenneteräksen jännitysvenymäkäyrä*

Rakennetta kutsutaan kimmoiseksi silloin, kun se kuormituksen poistuttua palaa alkupe-  
räiseen tilaansa täydellisesti. Venymät pysyvät kimmoisina, kun materiaalia kuormitetaan  
niin, että jännitys ei ylitä kimmorajaa. Mikäli materiaalia kuormitetaan kimmottomalle alu-  
eelle, syntyy materiaalille pysyvää venymää. (17, s. 45.) Venymä on pituuden muutos ja  
siitä voidaan käyttää myös nimitystä normaalivenymä. Venymän merkissäntönä on, että  
kun se on positiivista, sauva pitenee, ja negatiivista, kun sauva lyhenee. Kun sauva lyhe-  
nee, sitä kutsutaan puristumaksi. Venymä ilmoitetaan prosentteina tai promilleina ja esi-  
merkiksi teräksillä se on promillen suuruusluokkaa. (17, s.29.)

Kun mitoitetaan betonista poikkileikkausta, voidaan käyttää kaavan 7 mukaista jännitys-  
muodonmuutosyhteyttä, kun betonin puristuma  $\epsilon_c$  on välillä  $0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2}$  (19, s. 36). Puris-  
tumalla  $\epsilon_{c2}$  tarkoitetaan betonin myötöpuristumaa.

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

KAAVA 7

$\sigma_c$  = betonin jännitys (MPa)

$f_{cd}$  = betonin puristuslujuuden mitoituslujuus (MPa)

$\epsilon_c$  = betonin puristuma

$\epsilon_{c2}$  = betonin myötöpuristuma

$n$  = eksponentti

Kun betonin puristuma  $\epsilon_c$  on välillä  $\epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu2}$ , lasketaan betonin jännitys kaavalla 8 (19, s. 36).

$$\sigma_c = f_{cd}$$

KAAVA 8

$\sigma_c$  = betonin jännitys (MPa)

$f_{cd}$  = betonin puristuslujuuden mitoituslujuus (MPa)

Taulukossa 7 on esitettyä betonin myötöpuristuman  $\epsilon_{c2}$ , murtopuristuman  $\epsilon_{cu2}$  sekä eksponentin  $n$  arvot, kun  $f_{ck} \leq 50$  MPa ja  $f_{ck} > 50$  MPa (19, s. 30).

TAULUKKO 7. Betonin puristumien sekä eksponentin kaavat

|                  | $f_{ck} \leq 50$ MPa | $f_{ck} > 50$ MPa   |
|------------------|----------------------|---|
| $\epsilon_{c2}$  | 2,00 ‰               | $\left[ 2,0 + 0,085 \left( \frac{f_{ck}}{MPa} - 50 \right)^{0,53} \right] \cdot 0,001$                    |
| $\epsilon_{cu2}$ | 3,5 ‰                | $\left[ 2,6 + 35 \left[ \left( 90 - \frac{f_{ck}}{MPa} \right) \cdot 0,001 \right]^4 \right] \cdot 0,001$ |
| $n$              | 2                    | $1,4 + 23,4 \left[ \left( 90 - \frac{f_{ck}}{MPa} \right) \cdot 0,001 \right]^4$                          |

Betoniteräkselle jännityksen arvona voidaan käyttää  $\sigma_s = f_{yd}$ , kun betoniteräksen venymä  $\epsilon_s$  on betoniteräksen venymärajan  $\epsilon_{ud}$  ja betoniteräksen myötövenymän  $\epsilon_{yd}$  välillä. Silloin, kun, betoniteräksen venymä jää välille  $-\epsilon_{yd} < \epsilon_s < \epsilon_{yd}$ , lasketaan se HOOKEEn lain avulla kaavalla 9.

$$\sigma_s = \epsilon_s E_s$$

KAAVA 9

$\sigma_s$  = betoniteräksen jännitys (MPa)

$\varepsilon_s$  = betoniteräksen venymä

$E_s$  = betoniteräksen kimmokerroin (MPa)

Rakenneteräksen jännitys saadaan samalla periaatteella kuin betoniteräksenkin jännitys, jolloin raja-arvona käytetään rakenneteräksen myötövenymää  $\varepsilon_y$ . Eli kun rakenneteräksen venymä on pienempi kuin rakenneteräksen myötövenymä, saadaan se suoraan  $\sigma_a = f_{ad}$ . Silloin kun rakenneteräksen venymä on välillä  $-\varepsilon_y < \varepsilon_a < \varepsilon_y$ , saadaan jännitys kaavalla 10.

$$\sigma_a = \varepsilon_a E_a$$

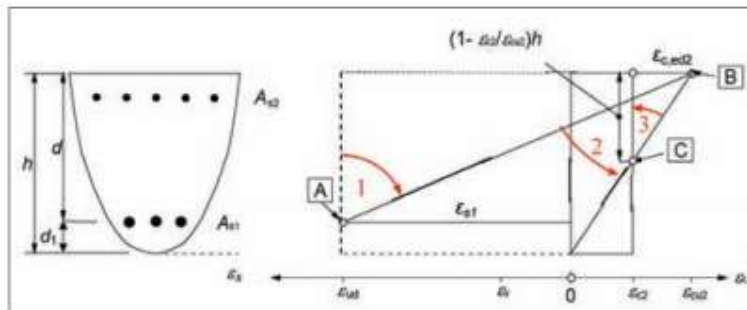
KAAVA 10

$\sigma_a$  = rakenneteräksen jännitys (MPa)

$\varepsilon_a$  = rakenneteräksen venymä

$E_a$  = betoniteräksen kimmokerroin (MPa)

Liittopoikkileikkauksen puristuma ympyräpoikkileikkauksessa voidaan laskea kolmen alueen avulla. Alueet ovat esitetty kuvassa 3. Alueet muodostuvat niin, että alue 1 kiertää pisteen A ympäri, joka on betoniteräksen venymäraja  $\varepsilon_{ud}$ . Alue 2 kiertää pisteen B ympäri, joka on betonin maksimipuristuma  $\varepsilon_{cu2}$  ja alue 3 kiertää pisteen B ympäri, joka on puhtaasti puristetun liittopoikkileikkauksen maksimipuristuma  $\varepsilon_{c2}$ .



KUVA 3. Poikkileikkauksessa mahdolliset venymät (20, s.26)

Taulukossa 8 esitetään alueittain raja-arvot venymille.

TAULUKKO 8. Venymien raja-arvot alueittain

|                    | <b>Alue 1</b>                        | <b>Alue 2</b>  | <b>Alue 3</b>  |
|--------------------|--------------------------------------|--|--|
| $\epsilon_{s1}$    | $\epsilon_{ud}$                      | $\epsilon_{ud} \dots \frac{\epsilon_{cu2}}{D} \cdot d_1$ | $\frac{\epsilon_{cu2}}{D} \cdot d_1 \dots \epsilon_{c2}$ |
| $\epsilon_{c.ed2}$ | $\epsilon_{ud} \dots \epsilon_{cu2}$ | $\epsilon_{cu2}$   | $\epsilon_{cu2} \dots \epsilon_{c2}$                     |

### 3.5 Kappaleen rasitukset

Kappaleen rasituksilla tarkoitetaan niitä sisäisiä voimia, jotka pitävät kappaleen koossa, kun sitä kuormitetaan. Näitä ovat normaalivoima  $N$ , taivutusmomentti  $M$  sekä leikkausvoima  $Q$ . Näiden edellä mainittujen voimasuureiden avulla voidaan selvittää kappaleeseen kohdistuvat suurimmat rasitukset ja näin ollen on mahdollista valita kappaleelle riittävän kestävä materiaali sekä poikkileikkauksen mitat. (21, s. 177.) Tässä työssä ei perehdytä ollenkaan leikkausvoimaan, sillä kyseiseen rakenteeseen sitä ei kohdistu.

#### 3.5.1 Normaalivoima $N$

Normaalivoima  $N$  on yksi pilariin kohdistuvista jännitysresultanteista ja se kohdistuu kohtisuorassa poikkileikkauspintaan nähden. Se voi olla joko vetoa tai puristusta. Merkissäännöksi on sovittu, että vetorasitus on positiivista ja puristusrasitus negatiivista. Vetorasituksella tarkoitetaan sitä, kun normaalivoima kohdistuu pois päin materiaalista, ja puristusrasituksella taas tarkoitetaan sitä, kun normaalivoima kohdistuu materiaaliin päin. (21, s. 181.)

Kun halutaan tietää normaalivoiman arvot poikkileikkauksen eri kohdissa, piirretään normaalivoimakuvio, eli  $N$ -kuvio, jolla on mahdollista esittää mittakaavassa, kuinka suuri normaalivoima mihinkin kohtaan poikkileikkausta kohdistuu. Normaalivoima voidaan laskea kaavalla 11. (21, s. 182.)

$$N = \sigma A$$

KAAVA 11

$N$  = normaalivoima (N)

$\sigma$  = normaalijännitys (N/mm<sup>2</sup>)

$A$  = kappaleen poikkileikkausala (mm<sup>2</sup>)

Normaalivoimaa tarvitaan yleensä, kun halutaan selvittää esimerkiksi kappaleeseen kohdistuvia jännityksiä (21, s. 181).

### 3.5.2 Taivutusmomentti $M_t$

Taivutusmomentti  $M_t$  on yksi pilariin kohdistuvista jännitysresultanteista ja se muodostuu kahdesta sisäisestä voimasysteemin muodostamasta momentin voimaparista. Sen tarkoitus on estää leikkauksen eri puolilla olevien kappaleen osien kääntymisen toisiinsa nähden leikkausten kohdalla. Merkkisopimuksesta seuraa, että taivutusmomentti on positiivinen silloin, kun se venyttää kappaleen pystysuuntaisen akselin positiivisen puolen säikeitä. (21, s. 185.)

Kun halutaan tietää taivutusmomentin arvot poikkileikkauksen eri kohdissa, piirretään taivutusmomenttikuvio, eli  $M_t$ -kuvio, jolla on mahdollista esittää mittakaavassa, kuinka suuri taivutusmomentti mihinkin kohtaan poikkileikkausta kohdistuu (21, s. 185). Taivutusmomentti saadaan yksinkertaisesti niin sanotulla voima kertaa varsi -menetelmällä. Taivutusmomentin selvittäminen on tärkeää, jotta suunnittelija näkee, missä kohtaa rakennetta rasitus on suurimmillaan. (22, s. 7.)

### 3.6 Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus

Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutusta kuvataan periaatteessa samalla tavalla kuin teräsbetonipilareissa. Yhteisvaikutuskuvaajassa esitettyjä suljettuja lausekkeitä ei voida tuottaa niin, että diagrammin kaikki pisteet olisi mahdollista määrittää käsinlaskennalla. Kuitenkin diagrammi on mahdollista toteuttaa ohjelmoituna, kun oletetaan plastisen neutraaliakselin sijainti eri pisteisiin poikkileikkauksessa ja voidaan laskea kyseisen sijainnin perusteella taivutusmomentin ja normaalivoiman arvot. Taivutusmomentin arvot poikkileikkauksen eri sijainneissa saadaan kaavalla 12. (1, s. 191.)

$$M = \int_{A_a} \sigma_a y dA_a + \int_{A_s} \sigma_s y dA_s + \int_{A_c} \sigma_c y dA_c \quad \text{KAAVA 12}$$

$M$  = taivutusmomentti (kNm)

$A_a$  = rakenneteräksen pinta-ala ( $\text{mm}^2$ )

$\sigma_a$  = rakenneteräksen jännitys,  $\frac{f_a}{\gamma_a}$  (MPa)

$y$  = momenttivarsi (mm)

$A_s$  = betoniterästen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$\sigma_s$  = betoniteräksen jännitys,  $\frac{f_y}{\gamma_s}$  (MPa)

$A_c$  = betonin pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$\sigma_a$  = betonin jännitys,  $\alpha_{cc} \frac{f_c}{\gamma_c}$  (MPa)

Normaalivoiman arvot poikkileikkauksen eri sijainneissa saadaan kaavalla 13 (1, s.191).

$$N = \int_{A_a} \sigma_a dA_a + \int_{A_s} \sigma_s dA_s + \int_{A_c} \sigma_c dA_c \quad \text{KAAVA 13}$$

$N$  = normaalivoima (kN)

$A_a$  = rakenneteräksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

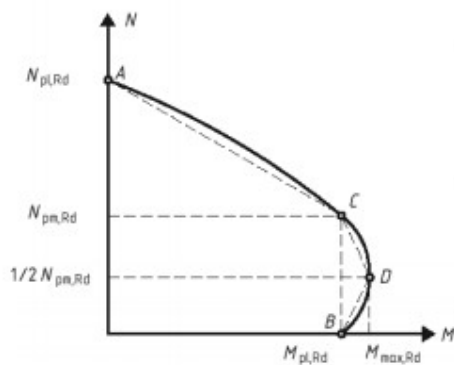
$\sigma_a$  = rakenneteräksen jännitys,  $\frac{f_a}{\gamma_a}$  (MPa)

$A_s$  = betoniterästen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$\sigma_s$  = betoniteräksen jännitys,  $\frac{f_y}{\gamma_s}$  (MPa)

$A_c$  = betonin pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

Kuvassa 4 esitetään taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaajan tarkka muoto (2, s. 56).

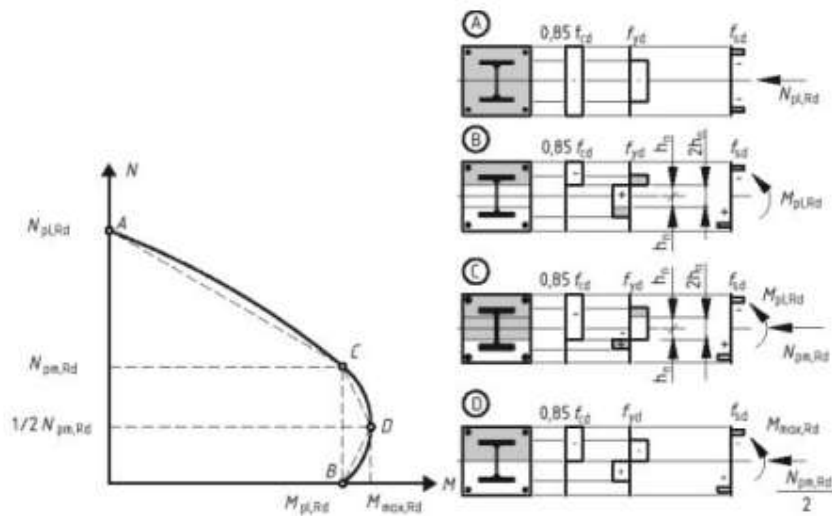




KUVA 4. Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaajan tarkka muoto (2, s. 56)

### 3.7 Yksinkertaistettu M-N-yhteisvaikutuskuvaaja

Standardissa SFS-EN 1994-1-1 esitetään yksinkertaistettu suunnittelumenetelmä, jonka avulla yhteisvaikutuskuvaaja voidaan muodostaa myös monikulmioksi kulkemaan neljän tunnetun pisteen kautta. Tätä yksinkertaistettua yhteisvaikutuskuvaajaa käytetään tarkistamaan tarkasti toteutettu taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaaja. Oppikirjassa BY58 esitetään näille neljälle helposti määritettäville pisteille normaalivoiman ja taivutusmomentin kaavat. Kuvassa 5 on esitettyä yksinkertaistettu yhteisvaikutuskuvaaja, joka kulkee määrittelypisteiden A, B, C ja D kautta. (2, s. 56.)



Kuva 6.19 Yksinkertaistettu yhteisvaikutuskäyrä ja sitä vastaavien määrittelypisteiden jännitysjaakaumat

Ympyräpoikkielekauksessa  $h_1 = D_n$

Puikoprofilissa  $\alpha_{sc} = 1,0$

Kuvat SFS-EN 1994-1-1 s.56

KUVA 5. Yksinkertaistettu M-N-yhteisvaikutuskuvaaja sekä määrittelypisteet (2, s. 56)

Määrittelypisteessä A esiintyy vain normaalivoimaa  $N_{pl,Rd}$ , joka saadaan laskemalla plastisuusteorian mukaiset komponenttien kestävyudet yhteen kaavalla 14 (2, s. 55).

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{ad} + A_c f_{cd} + A_s f_{yd}$$

KAAVA 14

$N_{pl.Rd}$  = plastinen normaalivoima (kN)

$A_a$  = rakenneteräksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$f_{ad}$  = rakenneteräksen mitoituslujuus (MPa)

$A_c$  = betonin pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$f_{cd}$  = betonin mitoituslujuus (MPa)

$A_s$  = betoniterästen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$f_{yd}$  = betoniterästen mitoituslujuus (MPa)

Määrittelypisteessä B esiintyy ainoastaan taivutusmomenttia  $M_{pl.Rd}$ , joka on plastisuusteorian mukainen liittopoikkileikkauksen taivutuskestävyys. Tämä saadaan laskemalla suurin mahdollinen taivutuskestävyys  $M_{max.Rd}$ , joka poikkileikkauksessa voi esiintyä jäykkäplastisen jännitys jakauman vallitessa sekä normaalivoiman vaikutuksesta aiheutuva lisäys taivutuskestävyyteen  $M_{n,Rd}$ . Taivutuskestävyyden  $M_{max.Rd}$  arvo saadaan kaavalla 15. (1, s. 195.)

$$M_{max.Rd} = W_{pa}f_{ad} + W_{ps}f_{yd} + W_{pc} \frac{f_{cd}}{2} \quad \text{KAAVA 15}$$

$M_{max.Rd}$  = suurin mahdollinen taivutuskestävyys, joka poikkileikkauksessa voi esiintyä jäykkäplastisen jännitys jakauman vallitessa (kNm)

$W_{pa} = 0,167D^3 - W_{pc} - W_{ps}$ , rakenneteräksen plastinen taivutusvastus (mm<sup>3</sup>)

$f_{ad}$  = rakenneteräksen mitoituslujuus (MPa)

$W_{ps} = 1,7n_s D_s \frac{A_{s1}}{6}$ , betoniterästen plastinen taivutusvastus (mm<sup>3</sup>)

$f_{yd}$  = betoniterästen mitoituslujuus (MPa)

$W_{pc} = 0,167D_c^3 - W_{ps}$ , betonin plastinen taivutusvastus (mm<sup>3</sup>)

$f_{cd}$  = betonin mitoituslujuus (MPa)

Normaalivoiman vaikutuksesta taivutuskestävyyteen aiheutuva lisäys  $M_{n.Rd}$  saadaan kaavalla 16 (1, s. 195).

$$M_{n.Rd} = W_{pan}f_{ad} + W_{pcn}\frac{f_{cd}}{2} \quad \text{KAAVA 16}$$

$M_{n.Rd}$  = normaalivoiman vaikutuksesta taivutuskestävyyteen aiheutuva lisäys (kNm)

$W_{pan} = 2tD_n^2$ , rakenneteräksen taivutusvastus, kun normaalivoima otetaan huomioon ( $\text{mm}^3$ )

$f_{ad}$  = rakenneteräksen mitoituslujuus (MPa)

$W_{pcn} = D_cD_n^2$ , betonin taivutusvastus, kun normaalivoima otetaan huomioon ( $\text{mm}^3$ )

$f_{cd}$  = betonin mitoituslujuus (MPa)

$D_n = \frac{\frac{\pi}{4}f_{cd}D_c^2}{2Df_{cd}+4t(2f_{ad}-f_{cd})}$ , normaalivoiman vaikutuksen huomioiminen halkaisijassa (mm)

Plastinen taivutuskestävyys  $M_{pl.Rd}$  saadaan vähentämällä taivutuskestävyys  $M_{n.Rd}$  taivutuskestävyydestä  $M_{max.Rd}$  kaavalla 17 (1, s. 195).

$$M_{pl.Rd} = M_{max.Rd} - M_{n.Rd} \quad \text{KAAVA 17}$$

$M_{pl.Rd}$  = plastinen taivutuskestävyys (kNm)

$M_{max.Rd}$  = suurin mahdollinen taivutuskestävyys, joka poikkileikkauksessa voi esiintyä jäykkäplastisen jännitysjakautuman vallitessa (kNm)

$M_{n.Rd}$  = normaalivoiman vaikutuksesta taivutuskestävyyteen aiheutuva lisäys (kNm)

Määrittelypisteessä C esiintyy plastista taivutusmomenttia sekä normaalivoimaa  $N_{pm.Rd}$ , joka saadaan kaavalla 18 (1, s. 192).

$$N_{pm.Rd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} A_c \quad \text{KAAVA 18}$$

$N_{pm.Rd}$  = pisteeseen C vaikuttava normaalivoima (kN)

$f_{ck}$  = betonin mitoituslujuus (MPa)

$\gamma_c$  = betonin osavarmuusluku

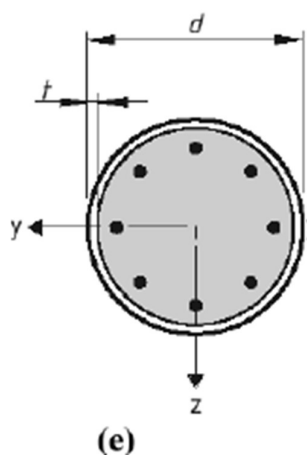
$A_c$  = betonin pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

Määrittelypisteessä D esiintyy puolet normaalivoiman  $N_{pm.Rd}$  arvosta sekä suurin mahdollinen taivutuskestävyys  $M_{max.Rd}$ .

## 4 MITOITUSTYÖKALUN LAATIMINEN

Opinnäytetyössä laadittiin mitoitus työkalu liittorakenteiselle raudoitetulle betonipilarille, jota ympäröi teräsputkiprofiili. Mitoitus työkalu laadittiin standardin SFS EN-1994-1-1 ohjeiden sekä siihen perustuvan Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus BY 58 -oppikirjan mukaan. Mitoitus työkalu toteutettiin Mathcad 15.0 -laskentaohjelmistolla, jolla valmista mitoitus työkalua on helppo käyttää. Työn tilaajana toimi insinööritoimisto Ponvia Oy, jolla oli tarvetta helppokäyttöiselle liittopoikkileikkauksen mitoitus työkalulle.

Mitoitus työkalun periaatteena on tarkastella liittopoikkileikkauksen kestävyyttä taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuksen puitteissa niin, että muulla tavoin lasketut taivutusmomentin ja normaalivoiman mitoitusarvot eivät koskaan ylitä materiaalien ominaislujuuksia. Kuvassa 6 on esitetty liittopoikkileikkaustyyppi, jolle mitoitus työkalu toteutettiin.



KUVA 6. Pyöreä liittopoikkileikkaus (3, s. 53)

### 4.1 Mitoitus työkalun perustiedot

Mitoitus työkalun laatiminen aloitettiin syöttämällä laskentapohjaan rakenteen poikkileikkaustiedot, teräsosien kimmokertoimet sekä materiaalien mitoituslujuudet niin, että niitä olisi mahdollista muuttaa jälkeenpäin taulukon 9 materiaalilujuuksien rajoissa.

TAULUKKO 9. Materiaalien lujuuksien raja-arvot

|                             | Betoni          | Betoniteräs | Rakenneteräs |
|-----------------------------|-----------------|-------------|--------------|
| lujuuksien raja-arvot [MPa] | C20/25...C50/60 | 400...600   | ≤ S460       |

Laskentapohjaan syötettiin myös betoniterästen lukumäärät ja halkaisijat niin, että niitä olisi mahdollista muuttaa kolmessa eri kerroksessa. Tämä kuitenkin toteutettiin niin, että vain 1. kerroksen teräkset ovat pakollisia laskentapohjan toimivuuden kannalta. Kuvassa 7 esitetään betoniterästen sijainnit ja pakollisuudet poikkileikkauksessa.

### Terästen sijainti ja pakollisuus poikkileikkauksessa



KUVA 7. Terästen sijainti poikkileikkauksessa

Laskentapohjaan syötettiin myös taulukko voimasuurepareja varten. Niitä ovat tässä laskentapohjassa taivutusmomentti ja normaalivoima. Taulukon avulla voimasuureparit piirtyvät lopulliseen M-N-yhteisvaikutuskuvaajaan niin, että kuvaajassa pisteinä esitetyt voimasuureparit eivät saa ylittää yhteisvaikutuskuvaajan arvoja.

#### 4.2 Mitoitustyökalun toteutus vaiheittain

Perustietojen syöttämisen jälkeen laskentapohjan toteutus aloitettiin laskemalla mitoitus työkaluun lähtöarvoista tarvittavat materiaaliominaisuudet, joihin kuuluivat muun muassa betonin venymien  $\epsilon_{cu2}$  sekä  $\epsilon_{c2}$  arvojen laskeminen sekä eksponentin  $n$  arvon laskeminen. Myös korroosiovara otettiin tässä huomioon niin, että sekä teräsputkiprofiilista että kokonaishalkaisijasta vähennettiin korroosiovaran verran. Näitä arvoja käytettiin sitten teräsprofiilin paksuutena sekä poikkileikkauksen halkaisijana.

Tämän jälkeen laskentapohjaan määritettiin kaavat betoniterästen pinta-alojen laskemiseksi kerroksittain sekä niiden yhteenlaskettu pinta-ala. Myös betoniterästen jakovälit laskettiin kerroksittain. Laskentapohjaan syötettiin ehtoja, jotta se toimisi, vaikka betoniteräksiä olisi vain yhdessä kerroksessa. Toisen ja kolmannen kerroksen betoniteräkset laskettiin niin, että laskentapohja ei huomioi niitä laskennassa, mikäli näiden kerrosten halkaisija- ja/tai lukumääräkenttiä ei ole täytetty. Tämän jälkeen jokaiselle kerrokselle laskettiin oma  $d$  mitta, eli etäisyys betonin ulkopinnasta teräskerroksen keskelle. Näiden avulla betoniteräksille laskettiin neliömomentti ja sen avulla laskettiin etäisyys betonin ulkopinnasta teräsryhmän keskelle.

Mitoitustyökaluun toteutettiin myös poikkileikkauskuvaaja, jonka avulla on mahdollista nähdä helposti betoniterästen lukumäärät ja sijainnit poikkileikkauksessa. Tämä helpottaa mitoitustyökalun käyttäjää näkemään konkreettisesti, kuinka paljon poikkileikkaus tulee sisältämään betoniterästä. Poikkileikkauskuvaajaan syötettiin myös tieto rakenneteräskuoresta niin, että se olisi nähtävillä myös kuvaajassa.

Poikkileikkauskuvaajan muodostamisen jälkeen mitoitustyökaluun syötettiin kaavat betonin, betoniteräksen sekä rakenneteräksen jännitysten laskemiseksi. Materiaaleille laadittiin jännitysvenymäkuvaajat. Tämän jälkeen betonille laskettiin alueittain puristuma ympyräpoikkileikkauksessa. Lisäksi sekä betoniteräkselle että rakenneteräkselle muodostettiin kaava venymän laskemiseksi ympyräpoikkileikkauksessa. Näistä muodostettiin jännityksille kaavat, jotka ovat riippuvaisia venymän ja puristuman suuruudesta.

Jännitysten laskemisen jälkeen muodostettiin normaalivoimalle ja taivutusmomentille integraalilausekkeet, jotka vastasivat poikkileikkauksen ylä- ja alapinnan venymiä. Lausekkeet toteutettiin niin, että ne laskevat normaalivoiman ja taivutusmomentin arvot venymien  $\epsilon_{s1}$  ja  $\epsilon_{c,ed2}$  suhteen.

Venymiä tarkasteltiin alueittain niin, että aluetta 1 tarkasteltiin pisteen A ympäri, joka on betoniteräksen venymäraja  $\epsilon_{ud}$ . Aluetta 2 tarkasteltiin pisteen B ympäri, joka on betonin maksimipuristuma  $\epsilon_{cu2}$ . Aluetta 3 tarkasteltiin pisteen C ympäri, joka on puhtaasti puristetun liittopoikkileikkauksen maksimipuristuma  $\epsilon_{c2}$ . Alueet on esitetty kuvassa 3 luvussa 3.4. Näiden alueiden avulla muodostettiin lausekkeet, joiden avulla saatiin laskettua jakovälit venymien arvoille. Taulukossa 10 on esitettyinä lausekkeet, joiden avulla tarkastelupisteiden jakovälit saatiin laskettua.

TAULUKKO 10. Venymien  $\varepsilon_{s1}$  ja  $\varepsilon_{c.ed2}$  jakovälit alueittain

|                       | Alue 1   | Alue 2   | Alue 3   |
|-----------------------|--|--|--|
| $\varepsilon_{s1}$    | $\varepsilon_{ud}$                                 | $\frac{\varepsilon_{ud} + \frac{\varepsilon_{cu2}}{D} \cdot d_1}{n_k}$ | $\frac{\varepsilon_{c2} - \frac{\varepsilon_{cu2}}{D} \cdot d_1}{n_k}$ |
| $\varepsilon_{c.ed2}$ | $\frac{\varepsilon_{ud} + \varepsilon_{cu2}}{n_k}$ | $\varepsilon_{cu2}$  | $\frac{\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2}}{n_k}$                     |

Tarkastelupisteiden jakovälit saatiin jakamalla venymien vaihteluväli tarkastelupisteiden lukumäärällä  $n_k$ , mikä valittiin mielivaltaisesti alueittain mutta kuitenkin niin, että alueelle oli mahdollista saada riittävän tarkat normaalivoiman ja taivutusmomentin arvot. Jakoväliden laskemisen jälkeen muodostettiin matriisit normaalivoimalle ja taivutusmomentille alueittain.

Alueella 1 normaalivoiman ja taivutusmomentin arvot saatiin kuvan 8 matriisilausekkeiden avulla. Niihin määrättiin vaihteluvälit nolasta tarkastelupisteiden lukumäärään  $n_k$ . Tällä alueella tarkastelupisteiden lukumääräksi oli määritelty 20, joten kaavat laskivat normaalivoimalle ja taivutusmomentille yhteensä 20 eri arvoa.

$$N_{Ed1} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_k \\ b_i = -N_{Ed}(\varepsilon_{ud}, \varepsilon_{ud} - jv_1 \cdot i) \\ b \end{cases} \quad M_{Ed1} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_k \\ b_i \leftarrow M_{Ed}(\varepsilon_{ud}, \varepsilon_{ud} - jv_1 \cdot i) \\ b \end{cases}$$

KUVA 8. Normaalivoiman ja taivutusmomentin matriisilausekkeet alueella 1

Alueella 2 normaalivoiman ja taivutusmomentin matriisilausekkeet muodostettiin samalla tavalla kuin alueella 1, mutta venymien vaihteluvälit sekä tarkastelupisteiden lukumäärä olivat erit. Alueella 2 tarkastelupisteiden lukumääräksi oli määrätty 100, jotta normaalivoimalle ja taivutusmomentille saataisiin riittävästi arvoja kuvaajan muodostamista varten. Kuvassa 9 on esitetty normaalivoimalle ja taivutusmomentille matriisilausekkeet tällä alueella.



$$N_{Ed2} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_k \\ b_i \leftarrow -N_{Ed}(\varepsilon_{ud} - jv_1 \cdot i, -\varepsilon_{cu2}) \\ b \end{cases} \quad M_{Ed2} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_k \\ b_i \leftarrow M_{Ed}(\varepsilon_{ud} - jv_1 \cdot i, -\varepsilon_{cu2}) \\ b \end{cases}$$

KUVA 9. Normaalivoiman ja taivutusmomentin matriisilausekkeet alueella 2

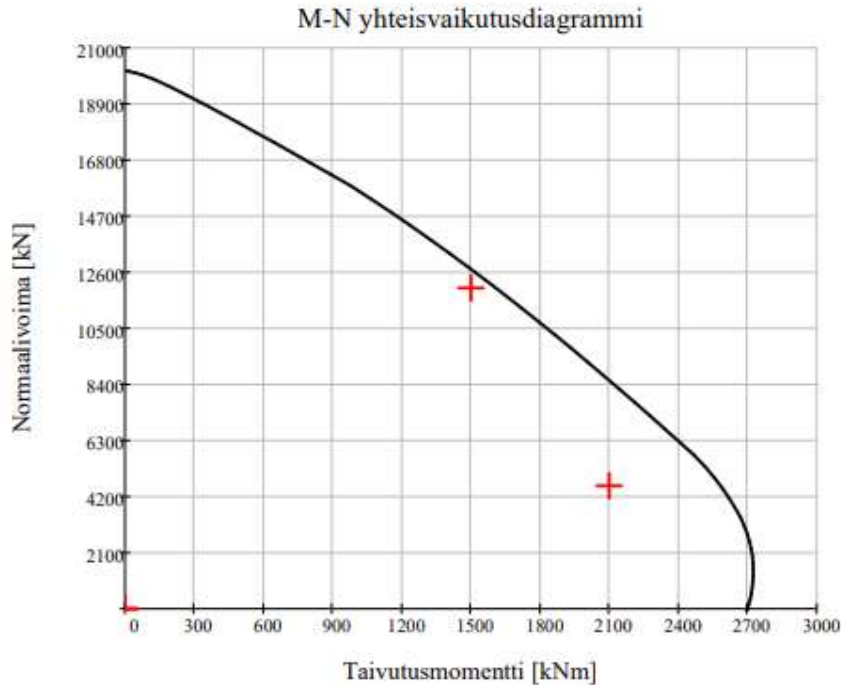
Alueella 3 normaalivoiman ja taivutusmomentin matriisilausekkeet muodostettiin kuvan 10 mukaan. Tälle alueelle tarkastelupisteiden lukumääräksi oli määrätty 15.

$$N_{Ed3} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_k \\ b_i \leftarrow -N_{Ed}\left(-\frac{\varepsilon_{cu2}}{D} \cdot d_1 - jv_1 \cdot i, -\varepsilon_{cu2} + jv_2 \cdot i\right) \\ b \end{cases} \quad M_{Ed3} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_k \\ b_i \leftarrow M_{Ed}\left(-\frac{\varepsilon_{cu2}}{D} \cdot d_1 - jv_1 \cdot i, -\varepsilon_{cu2} + jv_2 \cdot i\right) \\ b \end{cases}$$

KUVA 10. Normaalivoiman ja taivutusmomentin matriisilausekkeet alueella 3

Tämän jälkeen alueista muodostettiin taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaaja. Alueiden normaalivoimat sekä taivutusmomentit yhdistettiin yhdeksi arvojoukoksi kuvaajan muodostamista varten Mathcad 15.0 -ohjelmassa olevalla Stack-komennolla.

Tämän jälkeen kuvaajaa varten laskettiin normaalivoimalle ja taivutusmomentille maksimiarvot, joilla määrättiin x- ja y-akselille maksimiarvot. Kuvassa 11 esitetään valmis taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaaja sekä voimasuureparit. Kuvaajaan syötettiin ehto siitä, että mikäli poikkileikkaus menisi poikkileikkausluokkaan 4, kuvaaja ei piirtyisi. Tämän todettiin olevan selkein keino osoittaa laskentapohjan käyttäjälle, mikäli poikkileikkausluokka on suurempi kuin poikkileikkausluokka 3. Tästä kirjoitettiin myös alustusteksti laskentapohjaan, jotta käyttäjä tarkistaisi aina ehdot poikkileikkausluokalle sekä teräsosakertoimelle, jolla määritetään, onko kyseessä liittorakenne.



*KUVA 11. M-N-yhteisvaikutusdiagrammi*

Tämän jälkeen yhteisvaikutuskuvaajassa esiintyvät arvot tulostettiin taulukkoon, josta ne olisi helppo poimia jatkokäyttöä varten.

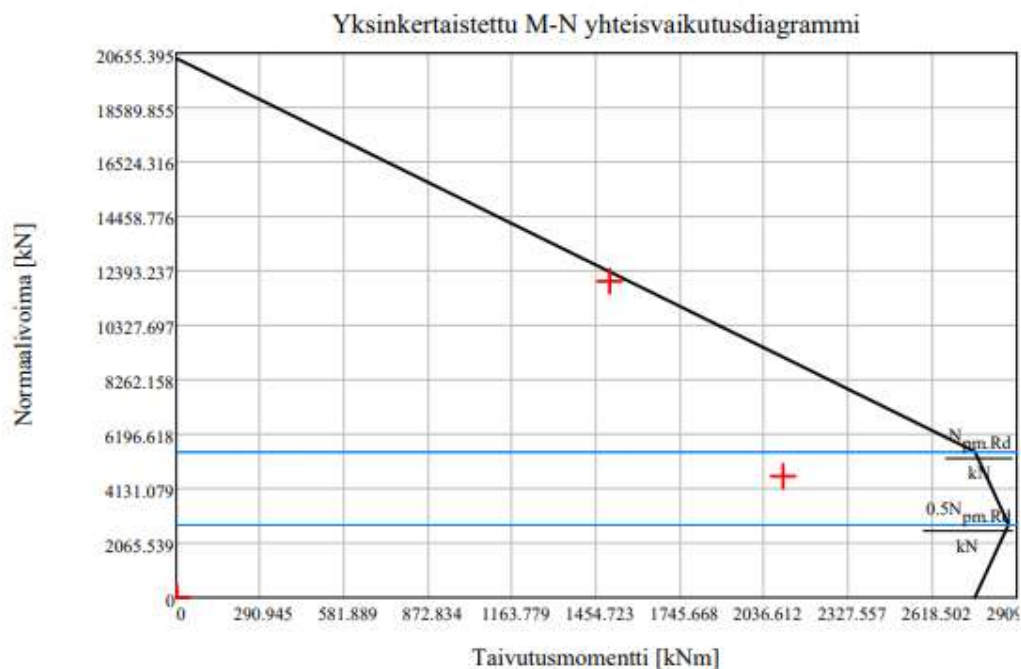
### 4.3 Yksinkertaistetun M-N-yhteisvaikutuskuvaajan laadinta tarkistusta varten

Yksinkertaistettu yhteisvaikutuskuvaaja muodostettiin, jotta tarkempaa yhteisvaikutuskuvaajaa voitaisiin verrata siihen ja selvittää, toimiiko mitoitustyökalu oikein. Yksinkertaistetussa yhteisvaikutuskuvaajassa esiintyi neljä tunnettua määrittelypistettä, jotka lopuksi yhdistettiin keskenään kuvaajan muodostamista varten. Määrittelypisteisiin laskettiin niitä vastaavat normaalivoiman ja taivutusmomentin arvot, jotka on esitetty kuvassa 12.

|                           |                           |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <u>Määrittelypiste A:</u> | <u>Määrittelypiste B:</u> | <u>Määrittelypiste C:</u> | <u>Määrittelypiste D:</u> |
| $M = 0$                   | $M = M_{pl,Rd}$           | $M = M_{pl,Rd}$           | $M = M_{max,Rd}$          |
| $N = N_{pl,Rd}$           | $N = 0$                   | $N = N_{pm,Rd}$           | $N = 0,5 \cdot N_{pm,Rd}$ |

*KUVA 12. Määrittelypisteet yksinkertaistetussa yhteisvaikutuskuvaajassa*

Määrittelypisteet yhdistettiin arvojoukoiksi aina Mathcad 15.0 -ohjelmassa olevalla Stack-komennolla. Tämän jälkeen muodostettiin yksinkertaistettu yhteisvaikutuskuvaaja yhdistämällä pisteet toisiinsa. Kuvassa 13 on esitetty yksinkertaistettu yhteisvaikutuskuvaaja.



KUVA 13. Yksinkertaistettu yhteisvaikutuskuvaaja

Liitteessä 1 on esitetty valmis mitoitusyökalu.

#### 4.4 Tulosten vertailu

Mitoitusyökalun valmistuttua laskentapohjan toimivuutta testattiin vertaamalla useamman poikkileikkauksen tuloksia RRpileCalcilla saatuihin tuloksiin sekä eurokoodissa 4 esitettyyn yksinkertaistettuun yhteisvaikutuskuvaajaan. Liitteissä 2, 3 ja 4 on esitetty Excel-taulukot sekä poikkileikkausten tiedot, jotka ovat olleet mukana vertailussa.

Vertailussa huomattiin, että RRpileCalcin sekä mitoitusyökalun kuvaajat eivät eroa toisistaan juurikaan, mutta yksinkertaistettu yhteisvaikutuskuvaaja antaa suuremman kapasiteetin, vaikka standardissa on mainittuna, että tämä kuvaaja olisi aina varmallalla puolella. Tätä tutkiessa selvisi, että tästä aiheesta oli tehty tutkimus Construction of the interaction curve of concrete-encased composite columns based on the deformation domains of reinforced concrete sections (23).

Tutkimuksessa todettiin, että mitä vähemmän poikkileikkauksessa on terästä, sitä lähemmäs tulokset saadaan vastaamaan Eurokoodissa 4 esitettyä yksinkertaistettua yhteisvaikutuskuvaajaa.

Kun asiaa selvitettiin pitemmälle, tultiin siihen tulokseen, että Eurokoodissa 4 esitetty yksinkertaistetussa kuvaajassa käytetään taivutusmomentille ja normaalivoimalle täysplastisia arvoja, jotka sallivat rakenteelle suuremman kapasiteetin kuin tässä työssä laske-  
tuilla arvoilla annetaan. Tästä tultiin siihen johtopäätökseen, että mitoitustyökalu ja RRpi-  
lecalc antavat tulokset varmemmalle puolelle kuin Eurokoodi 4 sallii, joten mitoitustyökalu  
voidaan ottaa käyttöön tällaisenaan.

## 5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli laatia mitoitusyökalu liittorakenteiselle pyöreälle betonipoikkileikkaukselle, jota ympäröi teräsputkiprofiili. Mitoitusyökalussa tarkasteltiin pyöreän liittopoikkileikkauksen kestävyyttä taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaajan avulla. Työn tilaajana toimi insinööritoimisto Ponvia Oy, jolla oli tarvetta helppokäyttöiselle liittopoikkileikkauksen mitoitusyökalulle.

Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaajan laatimisessa vastaan tuli paljon uutta ja vaativaa asiaa, joiden sisäistämiseen meni yllättävän paljon aikaa. Kuitenkin kaiken selvittämisen ja avun myötä mitoitusyökalu saatiin toimimaan ja vastaamaan tilaajan tarpeita.

Työn edetessä vastaan tuli myös teräsrakenteiden poikkileikkausluokitus, jolloin mitoitusyökalussa päädyttiin ratkaisuun, että sillä ei voida mitoittaa poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvia poikkileikkauksia, koska teoria tässä olisi todella haastavaa saada toimimaan laskentapohjassa. Kuitenkin tilanteissa, joissa mitoitusyökalua käytetään, hyvin harvoissa poikkileikkaus ylittää poikkileikkausluokkaan 4.

Valmiin mitoitusyökalun tulosten vertailussa vastaan tuli yllättävä haaste, sillä Eurokoodi 4:n yksinkertaistettu yhteisvaikutuskuvaaja antoi suuremman kapasiteetin kuin, mitä mitoitusyökalu sekä SSAB:n paalujen mitoitusohjelma RRPilecalc. Tätä selvitetessä löytyi kuitenkin tutkimus, jossa oli tutkittu kyseistä asiaa ja todettiin, että mitoitusyökalu toimii ja se on mahdollista ottaa käyttöön ilman muutoksia.

Työn haasteena oli myös teorian löytäminen, sillä lähes kaikki teokset, joissa liittorakenteita käsiteltiin, keskittyivät ainoastaan liittopalkkien tutkimiseen. Lopulta löytyi myös riittävä määrä teoksia, joissa käsiteltiin myös liittopilareita, joten tietoa työn tekemiseen löytyi riittävästi.

Työssä onnistuttiin hyvin, sillä apua oli saatavilla kiitettävästi ongelmakohtien ratkaisemiseksi. Tulevaisuudessa tarpeiden tullen mitoitusyökalua on mahdollista myös parantaa tilaajan toiveiden mukaan, esimerkiksi lisätä leikkausvoiman vaikutus liittopoikkileikkauksessa standardin mukaisesti.

## LÄHTEET

1. Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Eurocode 4 -oppikirja BY 58. 2012. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys.
2. SFS-EN 1994-1-1 + AC Eurokoodi 4: Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2005. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.
3. Kouhi, Jouko - Koukkari, Heli 1989. Betoni-teräslittorakenteet. Espoo: VTT.
4. Rakennustieto Oy - Siikanen, Unto 2009. Rakennusaineoppi. Helsinki: Rakennustieto Oy.
5. Tietoa Betonista, Perustietopaketti. Betoniteollisuus Ry. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/>. Hakupäivä 28.2.2019.
6. 125/2016, Ympäristöministeriön asetus hitsattavien betoniterästen ja betoniteräsverkkojen olennaisista teknisistä vaatimuksista. 2016. Finlex Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20160125>. Hakupäivä 4.4.2019.
7. Ruostumattomat teräkset. Tibnor. Saatavissa: <https://www.tibnor.fi/tarjontamme/materialit/ruostumattomat-terakset>. Hakupäivä 4.4.2019.
8. Rauditus. Betoniteollisuus Ry. Saatavissa: <http://www.valmisbetoni.fi/toteutus/raudoitus>. Hakupäivä 4.4.2019.
9. SFS-EN 1993-1-1 + AC Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2005. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.
10. Lyhyesti korroosiosta. 2015. Jet-Steel Oy. Saatavissa: <http://jetsteeloy.blogspot.com/2015/11/lyhyesti-korroosiosta.html>. Hakupäivä 19.3.2019.
11. SFS-EN 1993-5 + AC Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 5: Paalut. 2007. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

12. RIL 254-2016. Paalutusohje 2016. PO-2016. Osa 1: suunnittelun perusteet. osa 2: paalutusohje. 2016. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
13. Salmi, Tapio 2006. Teknillisen mekaniikan perusteet. Tampere: Pressus Oy.
14. Lujuuden kehitys. Betoniteollisuus Ry. Saatavissa: <http://www.valmisbetoni.fi/toteutus/betoniteknologia/lujuuden-kehitys>. Hakupäivä 30.3.2019.
15. SFS-EN 206:2014 + A1:2016. Betoni. Määrittely, Ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus. 2016. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.
16. Eurokoodin soveltamisohje Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. 2017. Väylä. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2017-31\\_ncci2\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-31_ncci2_web.pdf). Hakupäivä 30.3.2019.
17. Koski, Juhani - Outinen, Hannu - Salmi, Tapio 2003. Lujuusopin perusteet. Tampere: Pressus Oy.
18. Kuula, Kai. 2016. T510304 Lujuusoppi 4 op. Luennot syksyllä 2016. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
19. SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2015. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.
20. Interaction diagrams for reinforced concrete circular cross-section. 2012. Željko Smolčić - Davor Grandić. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/279439878\\_Interaction\\_diagrams\\_for\\_reinforced\\_concrete\\_circular\\_cross-section](https://www.researchgate.net/publication/279439878_Interaction_diagrams_for_reinforced_concrete_circular_cross-section). Hakupäivä 25.1.2019.
21. Salmi, Tapio 2014. Statiikka. Tampere: Pressus Oy.
22. Suoran palkin taivutus. 2005. Pearson Education South Asia Pte Ltd. Saatavissa: <https://docplayer.fi/3715710-Tavoitteet-maarittaa-taivutuksen-normaalijannitykset-miten-maaritetaan-leikkaus-ja-taivutusmomenttijakaumat.html>. Hakupäivä 30.3.2019.
23. Construction of the interaction curve of concrete-encased composite columns based on the deformation domains of reinforced concrete sections. 2015. Rocha P.A.S. –

Silva K.I.DA Saatavissa: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_art-text&pid=S1983-41952015000400447](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S1983-41952015000400447). Hakupäivä 13.3.2019.



**Pyöreän liitopilarin M-N yhteisvaikutusdiagrammi (SFS-EN 1994-1-1/NCCI4):****Kohde:**

Huom!

Laskentapohja ei toimi poikkileikkausluokassa 4, sillä paikallisen lommahduksen vaikutuksia ei ole otettu tässä pohjassa huomioon.

Tarkista aina, että poikkileikkausluokan ehto täyttyy.

**Kuvaaja ei piirry jos ehto ei täyty**

$$\frac{D_{corr}}{r_{corr}} \leq 90 \cdot \left( \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_a}} \right)^2 = 1$$

Teräsosakertoimen  $\delta_a$  tulee täyttää ehto,

jotta poikkileikkaus luokitellaan liitorakenteeksi. (Esitetty alla)

**Betoni:**

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa} \quad \gamma_c = 1.35$$

$$f_{cd} = 1.0 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 22.2 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{cu2} = 0.0035 \quad \epsilon_{c2} = 0.002 \quad n = 2$$

**Betoniteräs:**

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad \gamma_s := 1.10$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 455 \text{ MPa} \quad E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$\epsilon_{ud} = 0.010$$

**Rakenneteräs:**

$$f_a = 355 \text{ MPa} \quad \gamma_a = 1.0$$

$$f_{ad} := \frac{f_a}{\gamma_a} = 355 \text{ MPa} \quad E_a = 210 \text{ GPa}$$

**Mitoitusvoimasuuret:**Syötä alla olevaan taulukkoon  $M_{Ed}$ ,  $N_{Ed}$  voimasuurepareja, jotka näytetään yhteisvaikutusdiagrammissa:

|   | $M_{Ed}$         | $N_{Ed}$         |
|---|------------------|------------------|
|   | 0                | 1                |
| 0 | $2.1 \cdot 10^3$ | $4.6 \cdot 10^3$ |
| 1 | $1.5 \cdot 10^3$ | $1.2 \cdot 10^4$ |
| 2 | 0                | 0                |
| 3 | 0                | 0                |
| 4 |                  |                  |
| 5 |                  |                  |

Voimasuuret :=

|           | Tankojen lukumäärä: | Tangon halkaisija:       | Terästen jakoväli:      | Teräsrikin keskikohdan etäisyys 1. kerroksen terästen keskellä: | Terästen sijainnin manuaalinen säätö poikkileikkauskuvaajaa varten: |
|-----------|---------------------|--------------------------|-------------------------|---|---|
| 1. kerros | $n_{s1} = 12$       | $\phi_1 = 32 \text{ mm}$ | $kk_1 = 118 \text{ mm}$ |   |   |
| 2. kerros | $n_{s2} = 0$        | $\phi_2 = 0 \text{ mm}$  | $kk_2 = 0 \text{ mm}$   | $e_2 = 0 \text{ mm}$  | $\alpha_{2,m} = 0 \text{ deg}$                                      |
| 3. kerros | $n_{s3} = 0$        | $\phi_3 = 0 \text{ mm}$  | $kk_3 = 0 \text{ mm}$   | $e_3 = 0 \text{ mm}$  | $\alpha_{3,m} = 0 \text{ deg}$                                      |

Laskentaa

## Poikkileikkaustiedot:

$$D_a = 610\text{mm} \quad c_{\text{nom}} = 45\text{mm}$$

 $D_a$  = kokonais halkaisija     $c_{\text{cor}}$  = korroosiovara

$$t = 18\text{mm} \quad c_{\text{cor}} = 2\text{mm} \quad \phi_{\text{halka}} = 0\text{mm} \quad d = 513\text{mm}$$

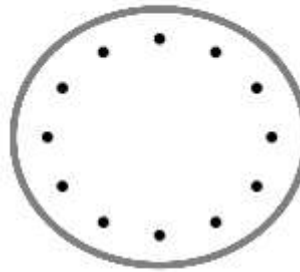
$$A_c = 249119\text{mm}^2$$

$$A_s = 9651\text{mm}^2$$

$$A_a = 29657\text{mm}^2$$

$$A_{\text{tot}} = A_c + A_s + A_a = 288426\text{mm}^2$$

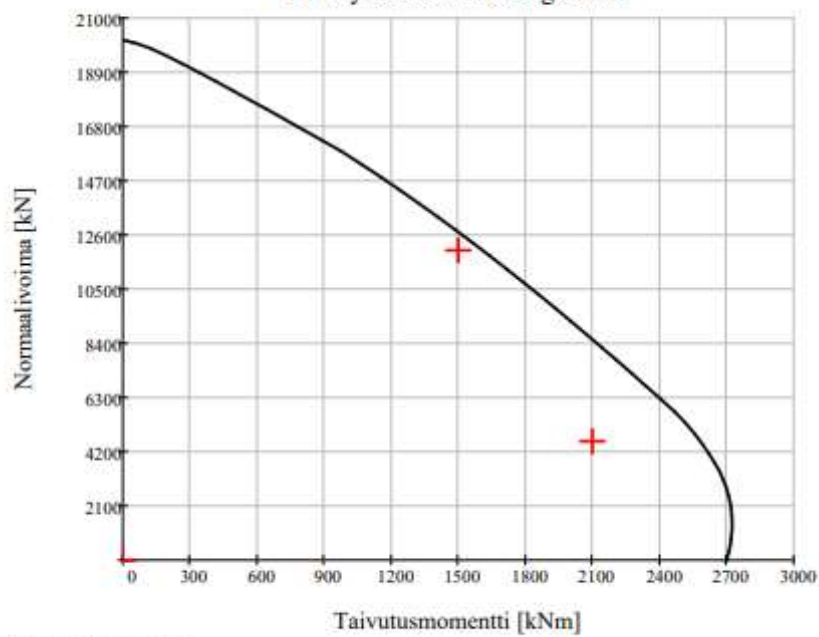
## Poikkileikkaus:



$$\frac{A_s}{A_c} = 3.9\% \leq 6\%$$

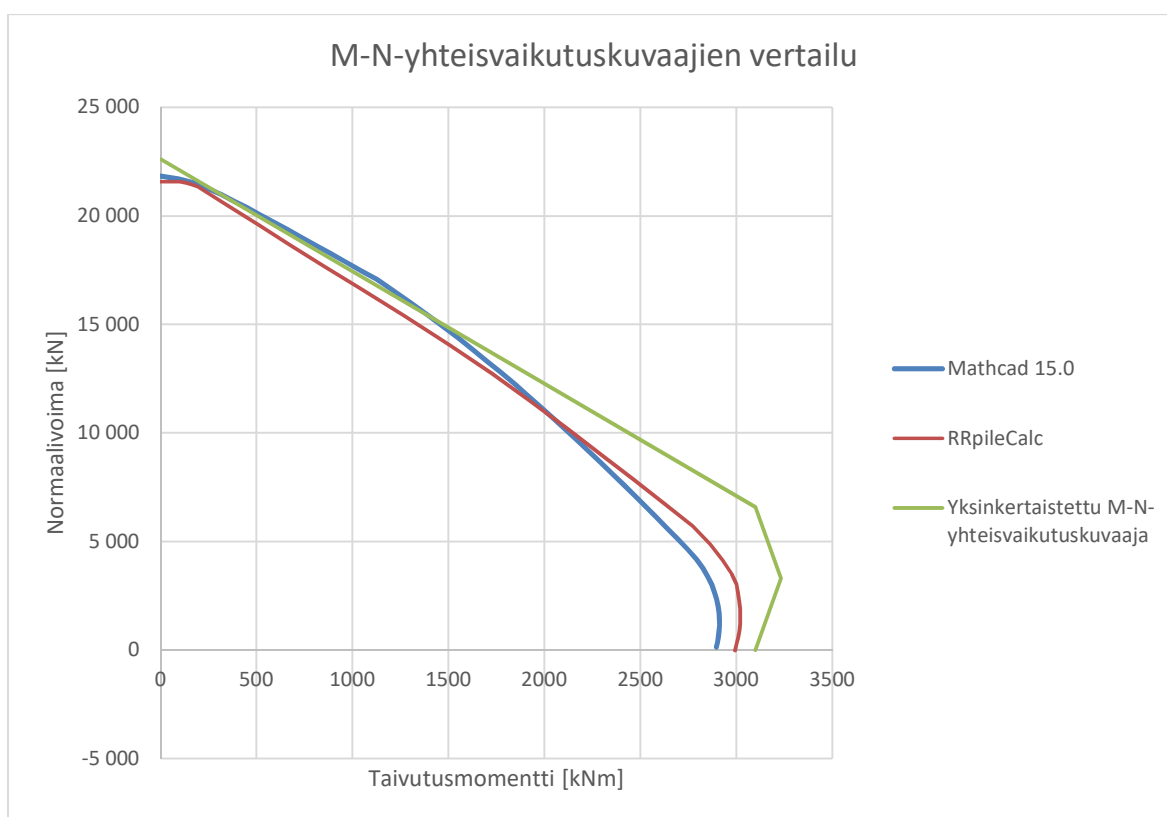
$$0.2 \leq \delta_a \leq 0.9 = 1$$

## M-N yhteisvaikutusdiagrammi

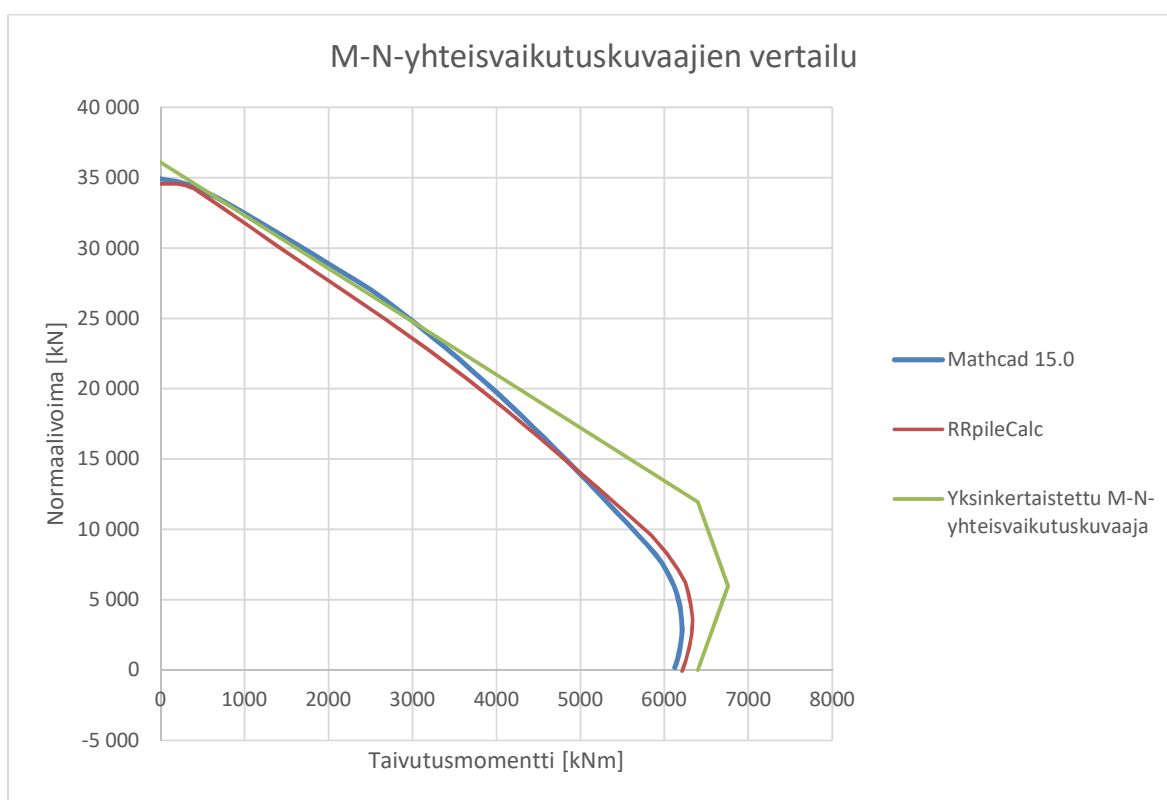


Tulokset taulukkomuodossa

| Poikkileikkauksen tiedot: |             |
|---------------------------|-------------|
| Paalukoko:                | RD600/18    |
| ulkohalk.[mm]:            | 610         |
| Poikkileikkausluokka      | 2           |
| Betoni:                   | C35/45      |
| Teräslaji:                | S440J2H     |
| Korroosiovara [mm]:       | 2           |
| Raudoitteet:              |             |
| Lujuus                    | A500HW      |
| Rauditus:                 | 8 $\phi$ 32 |
| Betonipeite [mm]:         | 45          |



| Poikkileikkauksen tiedot: |              |
|---------------------------|--------------|
| Paalukoko:                | RD800/20     |
| ulkohalk.[mm]:            | 813          |
| Poikkileikkausluokka      | 3            |
| Betoni:                   | C35/45       |
| Teräslaji:                | S440J2H      |
| Korroosiovara [mm]:       | 2            |
| Raudoitteet:              |              |
| Lujuus                    | A500HW       |
| Raudoitus:                | 12 $\phi$ 32 |
| Betonipeite [mm]:         | 45           |



| Poikkileikkauksen tiedot: |              |
|---------------------------|--------------|
| Paalukoko:                | RD800/20     |
| ulkohalk.[mm]:            | 813          |
| Poikkileikkausluokka      | 3            |
| Betoni:                   | C35/45       |
| Teräslaji:                | S355J2H      |
| Korroosiovara [mm]:       | 2            |
| Raudoitteet:              |              |
| Lujuus                    | A500HW       |
| Raudoitus:                | 12 $\phi$ 32 |
| Betonipeite [mm]:         | 45           |

