

Mira Savolainen

**Teräsbetonipoikkileikkauksen mitoitus Structural Bridge Design
-ohjelmalla ja vertailu KATA-ohjelmaan sekä käsin laskentaan**

**Teräsbetonipoikkileikkauksen mitoitus Structural Bridge Design
-ohjelmalla ja vertailu KATA-ohjelmaan sekä käsin laskentaan**

Mira Savolainen
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, Talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Mira Savolainen

Opinnäytetyön nimi: Teräsbetonipoikkileikkauksen mitoitus Structural Bridge Design -ohjelmalla ja vertailu KATA-ohjelmaan sekä käsin laskentaan

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Designing Reinforced Concrete Cross Section with Structural Bridge Design Program and Comparison with KATA-program and Manual Calculation

Työn ohjaaja(t): lehtori Antti Ukonmaanaho, Oulun Ammattikorkeakoulu, DI Ville Raudasoja, Insinööritoimisto Ponvia Oy

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2022 Sivumäärä: 68 + 2 liitettä

Rakenneteknisessä suunnittelussa käytetään apuna ohjelmia, joilla voidaan täydentää käsin laskentaa. Opinnäytetyön tavoitteena oli saada tietoa SBD-ohjelman toimivuudesta poikkileikkausten mitoituksessa ja soveltuvuudesta työn tilaajayrityksen käyttöön. Tarkoituksena oli saada poikkileikkauksen mitoitus murto- ja käyttörajatilassa toimimaan SBD-ohjelmassa mahdollisimman luotettavalla tavalla ja standardien mukaisesti.

Opinnäytetyössä tutustuttiin mitoitukseen liittyviin standardeihin ja ohjeisiin, Mathcad-laskentapohjiin ja muihin laskennassa käytettäviin ohjelmiin. Sen jälkeen suoritettiin teräsbetonipoikkileikkauksen mitoitus Structural Bridge Design 2022 -ohjelmalla (SBD-ohjelma). Mitoituksen tuloksia verrattiin KATA-ohjelmalla ja käsin laskennalla suoritettavien mitoitusten tuloksiin. Mitoitus suoritettiin kolmessa pelkästään yhdestä suunnasta taivutusmomentin rasittamassa tapauksessa ja kahdessa tapauksessa, jossa vaikuttivat yhtä aikaa normaaliveikutukset sekä molempien pääakselien suuntaiset momentit.

Laskentaprosessit yhtenäistettiin mahdollisimman pitkälle eri laskentamenetelmien välillä. SBD:lla tehdyssä laskennassa saatiin suhteellisen vähän merkitsevän suuruisia eroja verrattuna KATA:lla ja laskentapohjilla suoritettuun laskentaan. KATA:n halkeamaleveyteen syntyi pitkäaikaisella yhdistelmällä eroa venymäeron laskennassa käytettävän eri kimmokerrointen suhteen arvon vuoksi. Opinnäyteprosessin aikana havaittiin muutama päivitystarve Mathcad-laskentapohjan kaavoihin liittyen. Laskentapohjan päivityksen jälkeen tulokset vastasivat hyvin SBD-ohjelman sekä KATA:n antamia tuloksia.

70 mm:n betonipeitteellä käyttörajatilan tavallisella ja pitkäaikaisella yhdistelmällä SBD:n halkeamaväli ja -leveys erosivat muista menetelmistä SBD-ohjelmalla laskettaessa käytetyn todellisen betonipeitteen arvon vuoksi. Tämä tulee ottaa jatkossa tarkasteluun yli 50 mm:n betonipeitteellä mitoituksia tehtäessä ja halkeamaleveyksiä laskettaessa. Opinnäytetyössä todettiin, että SBD on käyttökelpoinen työkalu poikkileikkausten mitoitukseen, kun huomioidaan ohjelman rajoitukset koskien halkeamalaskennassa käytettävää betonipeitteen arvoa sekä arvioidaan kriittisesti tapauskohtaisesti ”Extreme face only” -valinnan käyttämistä tai sitä, milloin on tarkoituksenmukaista suorittaa halkeamalaskenta vain tietyille teräksille.

Asiasanat: teräsbetoni, betonirakenteet, mitoitus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering, Option of House Building Engineering

Author: Mira Savolainen

Title of thesis: Designing Reinforced Concrete Cross Section with Structural Bridge Design Program and Comparison with KATA-program and Manual Calculation

Supervisor(s): Antti Ukonmaanaho Senior Lecturer, Oulu University of Applied Sciences.

DI Ville Raudasoja, Insinööritoimisto Ponvia Ltd

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2022

Number of pages: e.g. 68 + 2 appendices

Various programs are being used in structural design. The objective of the thesis was to receive information concerning the use of and the reliability of the Structural Bridge Design 2022 program (SBD) in reinforced concrete cross section design in ultimate limit state and serviceability states. Adjusting the right settings and coefficients for calculation procedures in the SBD to ensure valid design results, was of the primary importance. The comparison of the results from KATA and Mathcad provided further information about the reliability of the SBD design results.

The results of designing a reinforced concrete cross section with the SBD were compared with the design results from Mathcad and KATA design program. Altogether six design cases were examined. Three cases with a bending moment from one direction and two cases with normal force and bending moment in the direction of both the main axis of the cross section.

It was necessary to examine the standards concerning design procedures, to study the use of SBD, KATA and to study the functioning of the Mathcad calculations notebook. Also, it was necessary to confirm the uniformity of processes of the design methods used. As the process produced information concerning the use of SBD, it also provided some information about the KATA program and resulted in updating some of the calculations in Mathcad.

It was discovered, there are seldom any significant differences in the design results between the methods with a cross section of 50 mm concrete cover. Some differences in the crack widths were discovered in the quasi-permanent combination as KATA uses different value for the modular ratio. The national guide for application of Eurocodes NCCI2 includes 50 mm restriction for c_{min} when calculating a crack width. This is considered in the calculations made on the Mathcad notebook. In KATA it is possible to adjust the cover used in calculations as 50 mm. SBD does not consider the restriction which results as differences in the crack width results with 70 mm concrete cover. There needs to be further examination of designing cross sections with concrete covers over 50 mm.

The SBD was found as a useful tool for designing reinforced concrete cross sections as far as a designer considers its restrictions concerning the concrete cover used in the crack width calculations. Also, one must estimate the need to use "Extreme face only" choice when calculating the crack width and the appropriateness of defining a crack width between specified bars.

Keywords: Reinforced Concrete, Concrete Structures, Design

ALKULAUSE

Suuri kiitos Insinööritoimisto Ponvia Oy:lle ja Tuomo Järvenpäälle mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta opinnäytetyön tekemiseen yritykselle. Erityisesti kiitos Ville Raudasojalle opinnäytetyöni ohjaamisesta. Kiitos Antti Ukonmaanaholle opinnäytetyöni ohjaamisesta.

Lämmin kiitos läheisilleni, joiden tuki opintojen loppuun saattamiseksi on ollut korvaamatonta. Kiitos äiti.

Oulussa 8.5.2022

Mira Savolainen

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	MITOITUSPERUSTEET	9
2.1	Poikkileikkaus.....	9
2.2	Kuormat.....	9
2.3	Murtorajatilamitoitus	10
2.3.1	Betonin ja teräksen jännitys-muodonmuutosriippuvuus	11
2.3.2	Pelkkä taivutus.....	13
2.3.3	Momentin ja normaalivoiman kuormittama poikkileikkaus.....	19
2.4	Käyttörajatilamitoitus	23
2.4.1	Betonirakenteen halkeilu ilmiönä	23
2.4.2	Halkeilun rajoittaminen ja mitoitus halkeamaleveyden hallitsemiseksi	25
2.4.3	Jännitysten rajoittaminen	34
3	TERÄSBETONIPOIKKILEIKKAUKSEN MITOITUS.....	35
3.1	Käsin laskenta	35
3.2	KATA.....	37
3.3	Structural Bridge Design.....	39
4	MITOITUSMENETELMIEN VERTAILU	41
4.1	Käsittävät tapaukset	41
4.2	Mitoitusprosessien standardienmukaisuus ja yhtenäisyys.....	42
4.3	Pelkkää taivutusta koskevat tulokset.....	45
4.3.1	Teräket 1 rivissä, betonipeite 50 mm.....	47
4.3.2	Teräket 1 rivissä, betonipeite 70 mm.....	49
4.3.3	Teräket 2 rivissä, betonipeite 50 mm.....	51
4.4	Normaalivoimaa ja taivutusta koskevat tulokset	53
4.4.1	Teräket 1 rivissä, betonipeite 50 mm.....	54
4.4.2	Teräket 2 rivissä, betonipeite 50 mm.....	57
4.5	Vertailua menetelmien ominaisuuksiin liittyen	59
5	YHTEENVETO	64

LÄHTEET.....	67
Liite 1 KATAN tulokset	
Liite 2 Structural Bridge Design -tulokset	

1 JOHDANTO

Rakenneteknisessä suunnittelussa käytetään apuna ohjelmia, joilla voidaan täydentää käsin laskentaa. Opinnäytetyössä mitoitetaan betonipoikkileikkaus taivutukselle ja normaalivoimalle murto- ja käyttörajatilassa. Opinnäytetyön tavoitteena on edistää Structural Bridge Design -ohjelman laajempaa käyttöönottoa tilaajayrityksessä. Työssä verrataan Structural Bridge Design -ohjelmalla saatavia tuloksia yrityksessä käytössä olevalla KATA-ohjelmalla saatuihin sekä käsin laskettaviin tuloksiin.

Tuloksia vertailemalla on tavoitteena saada lisätietoa uuden ohjelman tulosten luotettavuudesta ja ohjelman soveltuvuudesta yrityksen tarpeisiin. Samalla saadaan tietoa uuden ohjelman käytettävyydestä ja jatkossa huomiota vaativista seikoista luotettavaa mitoitusta ajatellen. Opinnäytetyötä tehtäessä Structural Bridge Design -ohjelmaan asetetaan standardien mukaiset oikeat arvot mitoitusta varten.

Opinnäytetyössä tarkasteltava poikkileikkaus valitaan vastaamaan siltasuunnittelussa yleistä poikkileikkauskokoluokkaa. Mitoitusta varten asetetaan työn kannalta mielenkiintoiset kuormitukset, jotka aiheuttavat tarkoituksenmukaista haastavuutta mitoitukselle. Näin mahdolliset erot käytettävien menetelmien välillä tulevat paremmin esille. Opinnäytetyössä tutustutaan ohjelmiin, asianmukaisiin standardeihin ja ohjeistuksiin mitoituksen taustalla sekä vertaillaan eri menetelmillä saatuja tuloksia keskenään.

Työn toimeksiantajana on Insinööritoimisto Ponvia Oy. Yrityksen erityisosaamista on rakennetekninen suunnittelu, asiantuntija- ja projektinjohtopalvelut taitorakennekohteissa, kuten silta-, vesi- ja satamarakenteissa sekä tuulivoimaloiden perustuksissa (Insinööritoimisto Ponvia Oy 2022).

2 MITOITUSPERUSTEET

Eurokoodin soveltamisohjeessa Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2 esitetään siltojen betonirakenteita koskevat rasitusluokkaryhmät, pakkasenkestävyysvaatimukset, lujuusluokat, rakenteiden toteutusluokat sekä betonipeitteen nimellisarvot (vähimmäisarvot) (Väylävirasto 2022, 25-30).

Eurokoodin soveltamisohjetta Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 käytetään yleisten tie- ja kevyenliikenteen siltojen sekä rautatiesiltojen suunnittelussa. Soveltamisohjeessa on esitetty sillan suunnittelun kuormat ja kuormitusyhdistelmät osavarmuusmenettelyineen, joita ei opinnäytteessä lähdetä tarkemmin avaamaan. (Liikennevirasto 2017.)

Opinnäytteessä esitetään betonipoikkileikkauksen mitoittaminen puhtaan taivutuksen tapauksessa sekä normaalivoiman ja taivutuksen vaikuttaessa yhdessä. Siltarakenteissa normaalivoimaa ja taivutusta voi tyypillisesti esiintyä yhtä aikaa esimerkiksi pilarissa ja jännitettyssä kansirakenteessa. Poikkileikkauksen raudoituksen sijoittamiseen liittyvään käytäntöön ei opinnäytteessä syvennytty tarkemmin.

2.1 Poikkileikkaus

Poikkileikkauksen mitat valittiin läheltä tyypillistä sillan suorakaiteisen pilarin poikkileikkausta. Betonipoikkileikkauksen mitat ovat 0,8 m x 2,1 m. Opinnäytteessä esitetty suorakaidepoikkileikkaus voidaan ajatella sillassa esiintyvänä pilaripoikkileikkauksena kokoluokkansa puolesta. Kaikissa käsiteltävissä tapauksissa poikkileikkauksen ulkomitat ja muoto ovat samat.

2.2 Kuormat

Mitoitukseen käytettävät voimasuureet valittiin niin, että mitoituksen tulokset ovat lähellä sallittuja raja-arvoja, jolloin suoritettavien laskelmien ja ohjelmien väliset mahdolliset eroavaisuudet tulevat paremmin esille. Puhtaan taivutuksen tapauksessa mitoituksessa käytettävät murtorajatilan taivutumismomentit sekä käyttörajatilan ominais-, tavallisen ja pitkäaikaisen kuormitustapauksen

momentit valittiin käyttämällä hyväksi Mathcad-laskentapohjassa esiintyviä suurimpia sallittuja momenteja kunkin kuormitustapauksen kohdalla.

Normaalivoiman ja taivutuksen esiintyessä yhtä aikaa normaalivoiman ja momentin suhde valittiin tyypillisesti kyseisessä siltarakenteessa esiintyvien voimien mukaan. Momenttien ja normaalivoiman suurusluokat on edellä mainittua suhdetta ajatellen asetettu murtorajatilan sallittujen jännitysten ja käyttörajatilan ominaisyhdistelmän jännitysrajojen sekä muiden käyttörajatilayhdistelmien halkeamarajojen maksimin mukaan.

2.3 Murtorajatilamitoitus

Mitoituksessa vaatimuksena on, että rakenteen stabiilius ja kantavuus säilyvät murtorajatilan saavuttamiseen saakka. Murtorajatila voidaan saavuttaa rakenteen ylikuormituksella tai onnettomuustilanteella. Mitoituksella varmistetaan, ettei rakenne saavuta murtorajatilaa niissä käyttöolosuhteissa ja sen käyttöä aikana, johon se on suunniteltu. (Leskelä 2008, 119.)

Teräsbetonirakenteiden murtokuormateoriassa laskettu taivutusvastus perustuu betonin puristusmurtokestävyyteen ja raudoituksen myötölujuuteen vedossa. Edellä mainittuja kestävyysarvoja pienennetään erikseen määritellyillä osavarmuusluvulla. Betonin puristumurtuma voi tapahtua yhtä äkkisesti, kun puolestaan raudoituksen kestävyys pettää vaiheittaisesti. (Megson 2014, 325.) Laskennassa betonin vetolujuutta ei oteta huomioon (Leskelä 2008, 195).

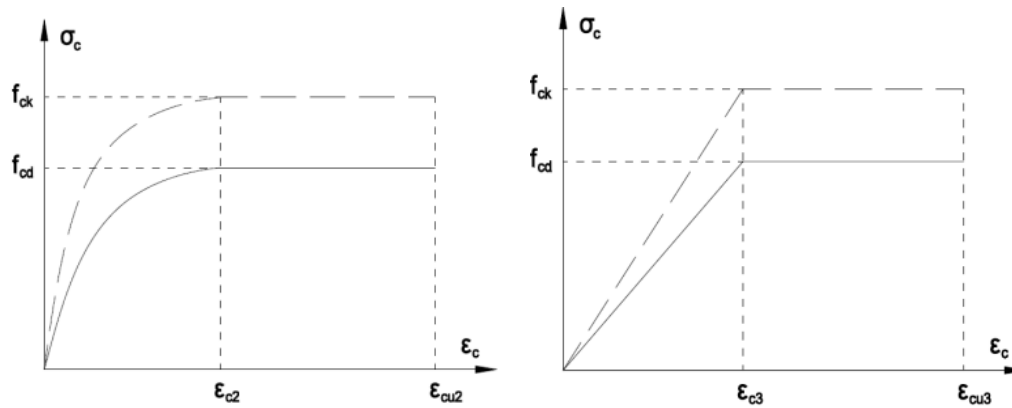
Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 2 annetaan ohjeeksi, että poikkileikkauksen murtumistavan tulee olla sitkeä (Väylävirasto 2022, 51). Sitkeässä murtumassa ilmenee suuria muodonmuutoksia ennen kestävyden rajan saavuttamista (Leskelä 2008, 120). Teräsbetonirakenteen voidaan otaksua olevan sitkeä, kun taivutusraudoitus myötää ($\epsilon_{yd} \geq f_{yd}/E_s$) ennen kuin puristetun reunan betoni saavuttaa murtopuristuman arvon ϵ_{cu2} (3,5 %) tai poikkileikkauksen painopisteessä oleva betoni saavuttaa arvon ϵ_{c2} (2,0 %) (Väylävirasto 2022, 51).

Rakenteen toimintaa kuvattaessa ei käytetä plastisuusteoriaa. Rakenneanalyysi ja mitoitus perustuu lineariseen kimmoteoriaan, johon kuuluu momenttien rajoitettu uudelleen jakautuminen. (Väylävirasto 2022, 31-34.)

2.3.1 Betonin ja teräksen jännitys-muodonmuutosriippuvuus

Jännitysvenymäriippuvuus on keskeinen materiaaliominaisuus poikkileikkausten mitoittamisen kannalta. Vetorasituksen osalta jännityksen ja muodonmuutoksen oletetaan noudattavan samantyyppistä riippuvuutta kuin pienillä puristusrasituksilla. (Leskelä 2008, 41.) Jännitys-muodonmuutosriippuvuutta käytetään poikkileikkauksen jännitysten ja muodonmuutosten määrittämiseen. Riippuvuus määritetään aksiaaliseen puristusrasitukselle. (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 41.)

Poikkileikkauksia mitoitettaessa käytetään betonin jännitys-muodonmuutoskuvioina kuvassa 1 esitettyjä kuvioita (Väylävirasto 2022, 16-17).



KUVA 1. Vasemmalla esitetään betonin paraabeli-suorakaide-jännitysmuodonmuutoskuvio. Oikealla puolestaan esitetään betonin bilineaarinista jännitys-muodonmuutosyhteyttä. (Väylävirasto 2022, 16-17.)

$\epsilon_{c2}, \epsilon_{c3}$ = betonin muodonmuutos lujuuden maksimin saavuttamisen kohdassa

$\epsilon_{cu2}, \epsilon_{cu3}$ = betonin murtopuristuma

f_{cd} = puristuslujuuden mitoitusarvo (MPa)

f_{ck} = betonin lujuuden ominaisarvo (MPa)

NCCI 2 mukaisten siltarakenteiden suunnittelua koskevat säännöt ovat voimassa betoniteräksille, joiden myötölujuus on $f_{yk} = 400 \dots 700 \text{ MPa}$. Teräksellä on oltava riittävä sitkeys, joka määritetään vetolujuuden ja myötörajan välisen suhteen $\left(\frac{f_t}{f_y}\right)_k$ sekä murtovenymän ϵ_{uk} arvoina.

Sitkeysluokista A, B, C on sitkein luokka C. (Väylävirasto 2022, 18-19.) Siltarakenteissa käytetään tyypillisesti B-sitkeysluokan teräksiä.

Raudoituksen suhteen mitoituksessa on mahdollista käyttää myötön jälkeen kasvavaa tai vaakasuoraa jännitysvenymäriippuvuutta. Vaakasuoraa riippuvuutta käytettäessä ei venymää tarvitse rajoittaa. Suunnittelun kannalta on yleensä tarkoituksenmukaista käyttää vaakasuoraa riippuvuutta, jolloin venymä on kaavojen 1 ja 2 mukainen (Suomen Betoniyhdistys 2015, 53).

KAAVA 1. Teräksen jännitysvenymäriippuvuus (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 53)

$$\sigma_s = \begin{cases} \varepsilon_s E_s & \text{kun } \varepsilon_s < \varepsilon_{yd} \\ f_{yd} & \text{kun } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} \end{cases}$$

E_s = teräksen kimmokerroin (GPa)

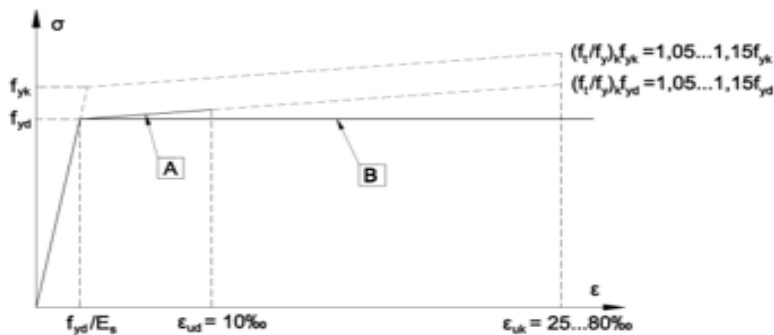
ε_s = teräksen venymä

ε_{yd} = teräksen myötövenymä

KAAVA 2. Teräksen myötövenymä (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 52, 114)

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s}$$

Sillanrakennuksessa suositellaan käytettäväksi kuvassa 2 esitettyä vaihtoehtoa B, siten että muodonmuutos rajoitetaan arvoon $\varepsilon_{ud} = 10\text{‰}$ (Väylävirasto 2022, 20).



KUVA 2. Teräksen jännitys-muodonmuutoskuvaaja (Väylävirasto 2022, 20)

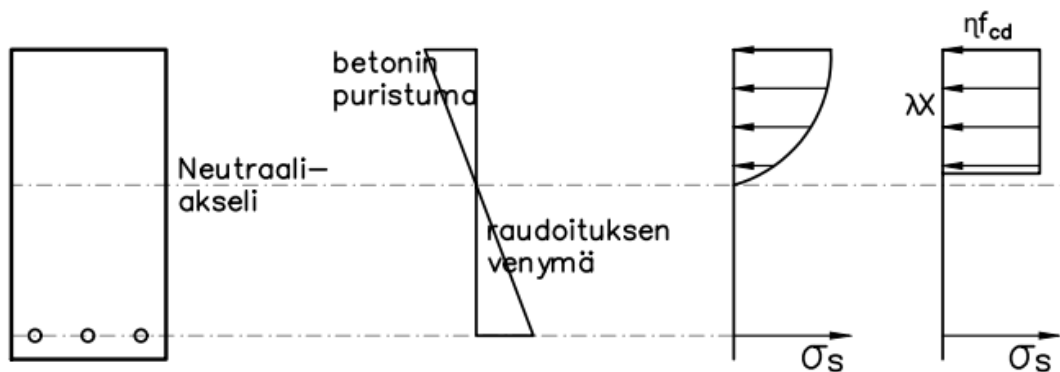
ε_{uk} = teräksen murtovenymä

ε_{ud} = muodonmuutoksen sallittu yläraja

f_{yk} = teräksen myötölujuuden ominaisarvo (MPa)

f_{yd} = mitoituslujuus (MPa)

Muodonmuutosjakauma oletetaan aina lineaariseksi poikkileikkauksen korkeussuunnassa (Leskelä 2008, 195). Murtorajatilan jännitysresultanttia laskettaessa betonin puristusjännitysten jakautumiskuvio on mahdollista korvata kuvassa 3 näkyvällä suorakaiteella. λ -kerroin määrittelee tehollisen korkeuden ja tehollisen lujuuden määrittelevä kerroin on η . (Väylävirasto 2022, 17.)



KUVA 3. Raudoitettun poikkileikkauksen jännitys- ja venymäjakaumat (mukaillen Megson 2014, 326)

$\lambda = 0.8$, kun $f_{ck} \leq 50$ MPa

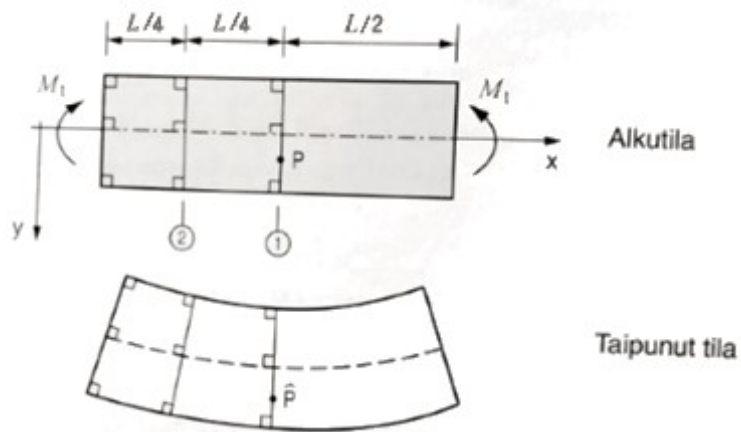
$\eta = 1,0$

f_{cd} = betonin puristuslujuuden mitoitusarvo (MPa)

X = puristusvyöhykkeen korkeus (mm)

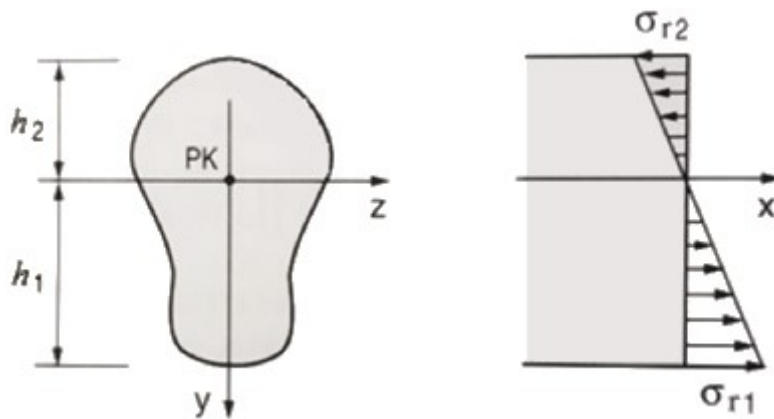
2.3.2 Pelkkä taivutus

Luvussa 2.3.2 käsitellään puhdasta taivutusta eli tapausta, jossa esiintyy ainoastaan poikkileikkaukselta yhdestä suunnasta kuormittava taivutusmomentti. Puhtaassa taivutuksessa poikkileikkauksen kuormitustaso sisältää joka kohdassa poikkileikkauksen toisen pääakselin. Kuvassa 4 esitetään palkin taipuminen pelkässä taivutuksessa. (Salmi & Pajunen 2010, 182.)



KUVA 4. Poikkileikkauksen taipuminen puhtaassa taivutuksessa (mukaillen Salmi & Pajunen 2010, 170)

Neutraaliakseli (NA) on kohtisuorassa kuormitustasoa vastaan. Neutraaliakseli on linja, jonka kohdalla $\sigma_x = 0$. Kuvassa 5 nähdään jännitysten jakaantuminen puhtaan taivutuksen tapauksessa. (Salmi & Pajunen 2010, 182.)



KUVA 5. Poikkileikkauksen jännitykset puhtaassa taivutuksessa (mukaillen Salmi & Pajunen 2010, 178)

Vetoraudoitetussa teräsbetonipoikkileikkauksessa tulee poikkileikkauksen kestävyyksien täyttää kaavan 3 ehto (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 96).

KAAVA 3. Voimien tasapaino (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 96)

$$N_{RC} = N_{RS}$$

N_{RC} = betonin puristusresultantti (kN)

N_{RS} = terästen vetoresultantti (kN)

Puhtaassa taivutuksessa rakennetta kuormittaa ainoastaan taivutusrasitus. Mitoitus esitetään seuraavaksi pääpiirteittäin. Opinnäytteessä ei käsitellä tarkemmin mitoituksessa apuna käytettävien kaavojen johtamista. Mitoitusteorian lähteenä on Betonirakenteiden suunnittelun oppikirjan osa 1. Mitoitus on esitetty tapauksessa, jossa mitoittava taivutusmomentti M_{Ed} on selvillä.

Poikkileikkauksen mitoitus

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden on oltava mitoitusmomenttia suurempi (kaava 4).

KAAVA 4. Mitoitusehto taivutuskestävyydelle (Suomen Betoniyhdistys 2015, 100)

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}$$

M_{Rd} = mitoituskestävyys (kNm)

M_{Ed} = mitoitusmomentti (kNm)

Seuraavaksi lasketaan suhteellinen momentti μ kaavan 5 mukaisesti.

KAAVA 5. Mitoitusmomentin mukainen suhteellinen momentti (Suomen Betoniyhdistys 2015, 98)

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{\eta f_{cd} b d^2}$$

η = tehollisen lujuuden määrittelevä kerroin

f_{cd} = betonin puristuslujuuden mitoitusarvo (MPa)

b = poikkileikkauksen leveys (m)

d = tehollinen korkeus (m)

Tarkistetaan, että suhteellinen momentti on pienempi kuin tasapainoraidoituksen mukainen suhteellinen momentti μ_{bd} (kaava 6).

KAAVA 6. Suhteellisen momentin vertaaminen tasapainoraidoituksen mukaiseen suhteelliseen momenttiin (Suomen Betoniyhdistys 2015, 100)

$$\mu \leq \mu_{bd}$$

Yllä olevan yhtälön ollessa tosi seuraavaksi tarkistetaan puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus β kaavan 7 mukaisesti.

KAAVA 7. Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus (Suomen Betoniyhdistys 2015, 100)

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu}$$

Verrataan puristusvyöhykkeen suhteellista korkeutta tasapainoraidoituksen mukaiseen puristusvyöhykkeen suhteelliseen korkeuteen β_{bd} (kaava 8). Kaavalla 9 voidaan laskea tasapainoraidoitusraja raidoituksen mitoituslujuuden mukaan.

KAAVA 8. Raidoituksen myöntämisen tarkistaminen (Suomen Betoniyhdistys 2015, 104)

$$\beta \leq \beta_{bd} \quad \text{jolloin raidoitus myöntää murtorajatilassa}$$

KAAVA 9. Tasapainoraidoitusraja raidoituksen mitoituslujuuden mukaan (Suomen Betoniyhdistys 2015, 99)

$$\beta_{bd} = \lambda \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}}$$

ε_{cu} = betonin murtopuristuma

ε_{yd} = raidoituksen myötövenymä

Arvot tasapainoraidoituksen mukaiselle suhteelliselle momentille sekä puristusvyöhykkeen suhteelliselle korkeudelle esitetään taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Tasapainoraudoituksen mukaiset β_{bd} ja μ_{bd} (Suomen Betoniyhdistys 2015, 99)

Osavarmuus	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$	
	β_{bd}	μ_{bd}
$\gamma_s = 1,15$	0,493	0,372
$\gamma_s = 1,10$	0,485	0,367

Mekaaninen raudoitussuhde taivutusrasitetulle rakenteelle ilman puristusraudoitusta esitetään kaavalla 10.

KAAVA 10. Mekaaninen raudoitussuhde ω (Suomen Betoniyhdistys 2015, 97,100)

$$\omega = \beta$$

Lasketaan vaadittavan vetoraudoituksen pinta-ala kaavalla 11.

KAAVA 11. Vaadittava vetoraudoitus (Suomen Betoniyhdistys 2015, 101)

$$A_{sRq} = \omega bd \cdot \frac{\eta f_{cd}}{f_{yd}}$$

f_{cd} = betonin lujuuden mitoitusarvo (MPa)

f_{yd} = teräksen lujuuden mitoitusarvo (MPa)

Valitaan raudoitustangot vaaditun raudoituspinta-alan mukaan ja varmistetaan, että toteutuvan raudoituksen ala on suurempi kuin vaadittu raudoituksen ala (kaava 12; kaava 13). Lisäksi varmistetaan, että toteutuva tehollinen korkeus on vähintään laskennassa käytetyn teholliseen korkeuden d suuruinen.

KAAVA 12. Raudoituksen ala (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 103)

$$A_s = n \frac{\phi^2}{4} \pi$$

n = on terästankojen lukumäärä (kpl)

KAAVA 13. Riittävän rauditusmäärän tarkistaminen (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 103)

$$A_{sRq} \leq A_s$$

Poikkileikkauksen momenttikestävyys voidaan laskea kaavalla 14.

KAAVA 14. Momenttikestävyys (Suomen Betoniyhdistys 2015, 104)

$$M_{Rd} = \mu b d^2 \eta f_{cd}$$

Terästen venymäkaava saadaan johdettua venymän muodostamien kolmioiden sivupintojen suhteesta, joka on esitetty kaavassa 15. Teräksen venymät ovat positiivisia ja puristumat negatiivisia. (Leskelä 2008, 210.)

KAAVA 15. Sivupintojen suhde

$$\frac{\varepsilon_s}{d - X} = \frac{\varepsilon_{cu}}{X}$$

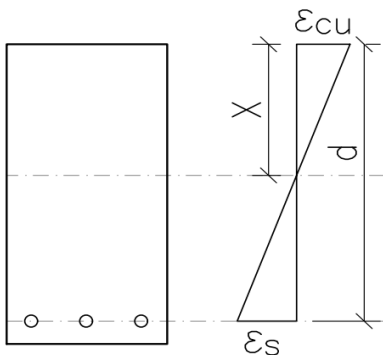
ε_{cu} = betonin murtopuristuma

ε_s = terästen venymä

d = tehollinen korkeus (mm)

X = puristusvyöhykkeen korkeus (mm)

Venymien ε_{cu} ja ε_s muodostamat kolmiot nähdään kuvassa 6.

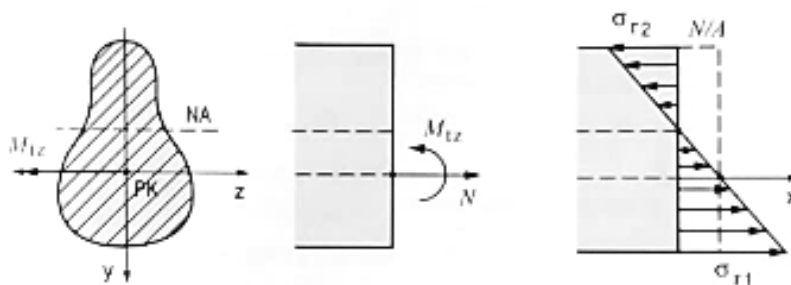


KUVA 6. Poikkileikkauksen venymät (mukaillen Leskelä 2008, 200)

2.3.3 Momentin ja normaalivoiman kuormittama poikkileikkaus

Seuraavaksi käsitellään tilannetta, jossa poikkileikkausta rasittaa sekä normaalivoima että taivutusmomentti. Normaalivoimaa aiheutuu rakenteeseen ulkoisista kuormista, pakkovoimien muodossa sekä rakennetta jännitettäessä. Pakkovoimat ovat rakenteeseen kohdistuvia voimia, jotka aiheutuvat rakenteen estetyistä muodonmuutoksista (Jalonen 2013, VII).

Normaalivoima vaikuttaa poikkileikkauksen jäykkyyteen suuresti: puristava normaalivoima kasvattaa jäykkyyttä ja vetävä voima pienentää rakenteen jäykkyyttä. Puristavan normaalivoiman ja taivutusmomentin vaikuttaessa yhtäaikaisesti poikkileikkauksen puristuspuolen korkeus kasvaa ja vetävän normaalivoiman tapauksessa tapahtuu päinvastoin. Rakenteen esijännityksen vaikutus rakenteen jäykkyyteen on sama kuin puristavan normaalivoimakuormituksen tapauksessa. (Huovinen 1990, 40.) Normaalivoiman vaikutuksesta poikkileikkauksen neutraaliakseli (NA) ei enää kulje poikkileikkauksen pintakeskiön (PK) kautta, mistä on esimerkki kuvassa 7 (Salmi & Pajunen 2010, 189).



KUVA 7. Neutraaliakseli ja jännitysjaakuma poikkileikkauksessa, johon yhteisvaikuttavat normaalivoima ja taivutus (Salmi & Pajunen 2010, 189)

Raudoituksen sijoittaminen tasaisesti poikkileikkaukseen

Opinnäytetyössä tarkastellaan kahdessa tapauksessa joka sivuiltaan raudoitettua poikkileikkausta. Kun symmetriseen poikkileikkaukseen sijoitetaan raudoitusta tasaisesti joka sivulle, kestävyys ja tasapainolausekkeiden johtamisesta tulee haastavaa, sillä poikkileikkauksessa teräkset ovat eri jännitystiloiissa. Käytännössä Normaalivoimakestävyys N_{Ed} lasketaan tällöin sekä

voimatasapainoehdosta että momenttiehdosta iteroimalla puristusosan korkeutta, kunnes tasapainoehdot toteutuvat (kaava 16; kaava 17). (Leskelä 2008, 220-222.)

KAAVA 16. Voimatasapainoehto (Leskelä 2008, 221)

$$N_{ed} = f_{cd}by + \sum \sigma_{si}A_{si}$$

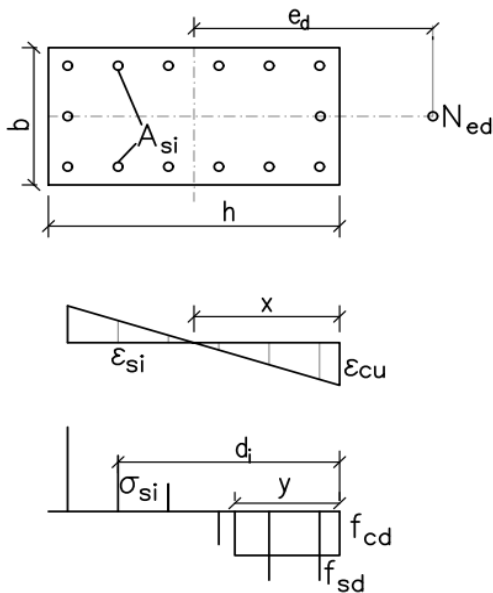
KAAVA 17. Momenttitasapainoehto (Leskelä 2008, 221)

$$N_{ed}e_d = f_{cd}by \left(\frac{h}{2} - \frac{y}{2} \right) + \sum \sigma_{si}A_{si} \left(\frac{h}{2} - d_i \right)$$

$$y = \lambda x$$

$$\lambda = 0,8$$

Voimaresultantti on yhtä suuri ulkoisen normaalivoiman N_{ed} kanssa ja vastaavasti taivutusmomentti on $N_{ed}e_d$ (kuva 8). Laskennassa on huomioitava koordinaatit neutraaliakselilta oikealle negatiivisina ja vasemmalle positiivisina. Jännitysten ja muodonmuutosten kohdalla puristavat voimat ovat negatiivisia ja vetävät positiivisia.

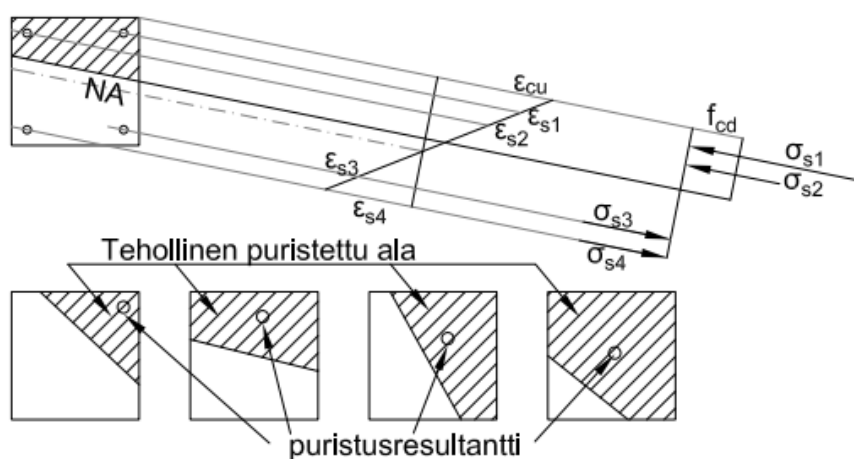


KUVA 8. Sivuiltaan tasaisesti raudoitettun poikkileikkauksen jännitysten jakautuma sekä muodonmuutosjakautuma (Leskelä 2008, 221)

A_{sj} = teräksen pinta-ala (m²)
 b, h = poikkileikkauksen ulkomitat (m)
 d_i = poikkileikkauksen tehollinen korkeus (m)
 ε_{cu} = betonin murtopuristuma
 ε_{si} = teräksen venymä
 e_d = epäkeskisyys (m)
 f_{cd} = betonin lujuuden mitoitusarvo (MPa)
 N_{ed} = normaalivoima (kN)
 x = puristetun osan korkeus (m)
 y = puristusjännityssuorakaiteen korkeus (λx)

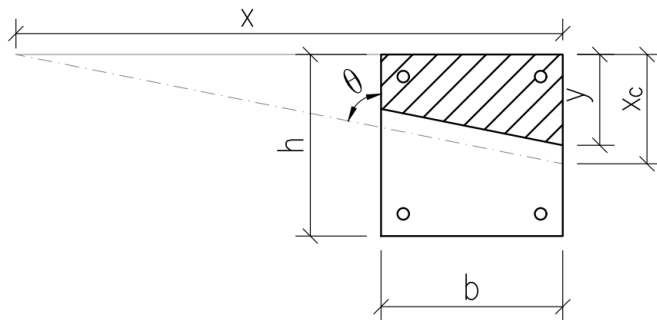
Kaikilta sivuiltaan raudoitettu poikkileikkaus vinossa taivutuksessa

Vinolla taivutuksella tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä sitä, että poikkileikkaukseen kohdistuu taivutusta kahdesta eri suunnasta ja neutraaliakseli asettuu pääakselien suuntiin nähden vinoon. Neutraaliakselin kallistuma riippuu pääakselien suunnissa vaikuttavien taivutusmomenttien suhteesta. (Leskelä 2008, 209.) Epäkeskisen normaalivoiman kuormittaessa poikkileikkausta syntyy siihen taivutusmomenttia. (Suomen betoniyhdistys ry 2016, 100-101.) Vinoon taivutukseen liittyvät erilaiset neutraaliakselin ja puristusresultantin sijainnit, puristusresultantin suuruus ja tehollinen puristettu ala (kuva 9) (Leskelä 2008, 209, 211).



KUVA 9. Raudoitettu poikkileikkaus vinossa taivutuksessa (mukaillen Leskelä 2008, 209-211)

Kuvassa 10 esitetään tarkemmin raudoitettun poikkileikkauksen puristettu osa.



KUVA 10. Raudoitettun poikkileikkauksen puristettu osa. Neutraaliakseli on merkitty pistekatkovivalla (mukaan Leskelä 2008, 209)

b, h = poikkileikkauksen ulkomitat (m)

X = puristettu osa (m)

X_c = puristetun osan korkeus (m)

y = puristusjännityssuorakaiteen korkeus (λx)

θ = Neutraaliakselin kulma (aste)

Vinossa taivutuksessa neutraaliakselin sijainti määräytyy voimien tasapainoehdon (kaava 18) mukaisesti. Neutraaliakselin paikantaminen käsin on työlästä, mutta ohjelmoituna tehtävä onnistuu paremmin. (Leskelä 2008, 210.)

KAAVA 18. Voimien tasapainoehto (Leskelä 2008,210)

$$N_c + \sum_i N_{si} = 0, \quad \text{jossa} \quad N_{si} = A_{si} \sigma_{si}$$

Yhteisvaikutusdiagrammeja voidaan hyödyntää mitoituksessa. Yhteisvaikutusdiagrammit kuvaavat normaalivoiman ja taivutusmomentin eri vaihtoehdot, joiden tuloksena murtuminen tapahtuu (Leskelä 2008, 216). Yhteisvaikutusdiagrammien avulla voidaan poikkileikkaus mitoittaa enemmän rasitetussa suunnassa ja tarkistaa, riittääkö rauditus toisessa suunnassa, tai mitoitus voidaan tehdä kummassakin pääsuunnassa erikseen. (Suomen Betoniyhdistys 2016, 112-113.) NCCI 2:ssa on esitetty ehdot kestävyuden tarkastamiseksi vinossa taivutuksessa.

Yhteenvedona (vinosta) taivutuksesta ja yhtäaikaisesta normaalivoimasta voidaan todeta seuraavaa:

- Normaaliakseli ei kulje enää symmetria-akselilla ja se voi olla vinossa. Rasitetuimmat pisteet mitoituksen kannalta sijaitsevat kaukana neutraaliakselista.
- Normaalivoiman suunnasta riippuen poikkileikkauksen puristus- tai vetoala lisääntyy.
- Raudoituksen jännitystila poikkileikkauksessa vaihtelee ja laskenta on haastavaa joka sivulta raudoitettu poikkileikkauksessa
- Yhteisvaikutuskäyriä voidaan hyödyntää mitoituksessa joissain tapauksissa. Käyrissä on huomioitu taivutuksen ja normaalivoiman yhteisvaikutus. Käyrien avulla saadaan symmetrinen raudoitus kahdelle vastakkaiselle sivulle (käyrästöissä on eri raudoitusmääriä vastaavat kestävyysarvot). Käyrästöjä hyödyntäen voidaan tarvittaessa tehdä molempiin pääsuuntiin mitoitus erikseen.

2.4 Käyttörajatilamitoitus

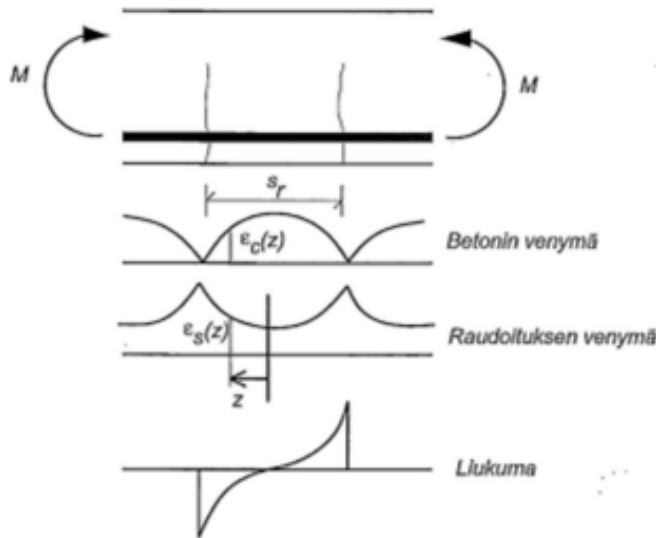
Opinnäytteessä suoritetaan teräsbetonipoikkileikkauksen käyttörajatilatarkastelu halkeilun sekä betonin ja terästen jännitysrajojen suhteen. Käyttörajatila on käyttöolosuhteiden yläraja, missä rakenteelle asetetut käyttökelpoisuusvaatimukset toteutuvat. Ylitettäessä käyttörajatilan rakenne on ylikuormitettu, mutta ei ole saavuttanut välttämättä murtorajatilaa. Käyttörajatilassa rakenteella on käyttökelpoisuusvaatimuksia, joiden tavoitteena on varmistaa rakenteen hyväksyttävien ominaisuuksien säilyminen koko suunnitellun käyttöiän. (Leskelä 2008, 18-19.)

2.4.1 Betonirakenteen halkeilu ilmiönä

Kaikkaa halkeilua ei voida betonirakenteen kohdalla välttää betonin alhaisen vetolujuuden vuoksi, mutta kaikki halkeilu ei kuitenkaan ole haitallista. Halkeaman muodostuessa raudoituksen venymä muodostuu suuremmaksi kuin betonin venymä. Venymien erosta syntyy liukuma. Betonin liukuma raudoituksen pinnassa saa aikaan halkeamaleveyden $w > 0$ kehittymisen. Halkeaman molemmilta puolilta yhteenlaskettu liukuma on halkeamaleveyden mitta. (Leskelä 2008, 350-352.)

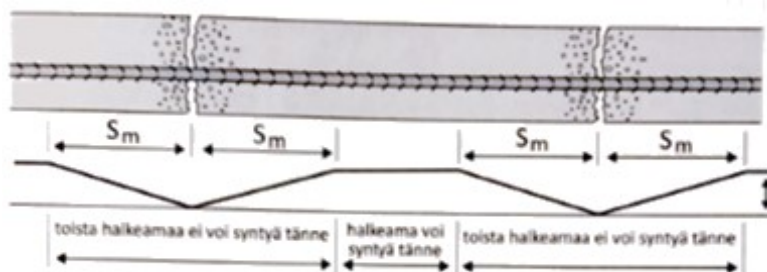
Suunnitteluohjeisiin sisältyvät halkeamaleveyden kaavat esittävät halkeamaleveyttä rakenteen pinnassa. Todellisuudessa raudoituksen korkeudella halkeamaleveydet ovat pienempiä. Kahden

halkeaman keskivälillä betoni venyy ja halkeamassa betonin venymä on nolla. Raudoituksen suurin venymä on halkeamissa ja pienin halkeamien keskivälillä. (Leskelä 2008, 351-352.) Kuvassa 11 esitetään halkeamaan liittyvät muodonmuutokset.



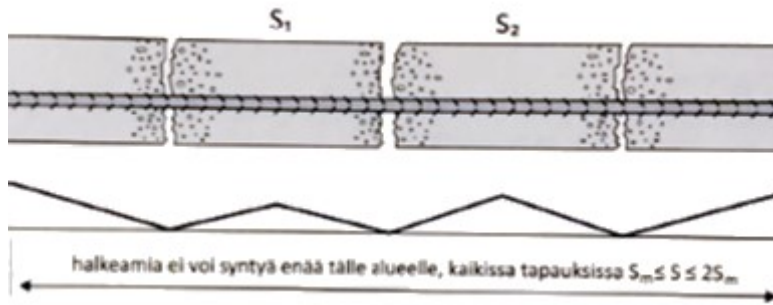
KUVA 11. Halkeamaleveyden laskemisessa tarkasteltavat muodonmuutokset (Leskelä 2008,352)

Ensimmäiset halkeamat muodostuvat suurimman momentin alueelle. Halkeaman kohdalla betonissa ei ole vetojännityksiä, vaan vetovoimat siirtyvät raudoituksen kautta. Tartunnan vaikutuksesta halkeamien välillä betonissa esiintyy vetojännityksiä. Tartuntajännityksien jakautuminen ja suuruus määrittävät raudoituksen ja betonin vetojännityksien jakautumisen. Raudoitustankoa vedettäessä betonin suhteen tangon voima välittyi kokonaan betonille siirtymäpituudeksi kutsutulla matkalla. (Leskelä 2008, 352-353.) Halkeamia voi muodostua rakenteeseen niin kauan kuin halkeamien väliset etäisyydet ovat $2S_m$ (kuva 12) (Leskelä 2008, 353; Suomen Betoniyhdistys 2016b, 45).



KUVA 12. Halkeamien syntyminen (Suomen Betoniyhdistys 2016b, 45)

Kuvassa 13 esitetään, miten halkeamien muodostumisen kannalta on saavutettu tasapainotila, jolloin uusia halkeamia ei enää muodostu.



KUVA 13. Halkeamien syntyminen (Suomen Betoniyhdistys 2016b, 45)

2.4.2 Halkeilun rajoittaminen ja mitoitus halkeamaleveyden hallitsemiseksi

Halkeamaleveyttä rajoitetaan rakenteen säilyvyyden ja ulkonäön vuoksi (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 210-211). Betonirakenteen halkeaminen tapahtuu vetojännityksen ylittäessä betonin vetolujuuden. Ulkoinen kuormitus sekä sisäiset pakkovoimat aiheuttavat vetojännitystä. Kuormituksen aiheuttama halkeilu syntyy tavallisesti heti muottien purkamisen jälkeisenä aikana tai varsinaisen rakenteen käyttöaikana. Laskelmien avulla kuormituksen aiheuttama halkeilu voidaan rajoittaa hyväksyttävälle tasolle. Pakkovoimien aiheuttamaa halkeilua rajoitetaan muun muassa betonimassan koostumuksella sekä valun jälkihoidolla. (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 210-211.)

Honkanen (2015, 29 - 30) tuo esille Pitkäsen esittämää asiaa pakkovoimista seuraavasti. Pakkovoimien (sisäisten rasitusten) muodostamia lisärasituksia pyritään estämään suunnittelun ja jälkihoidon avulla. Pakkovoimasuureet ovat staattisesti määräämättömässä rakenteessa tapahtuvia, ei ulkoisesta kuormituksesta johtuvia, muodonmuutoksia tai siirtymiä. Pakkorasituksia aiheuttavat kutistuma, lämpötilan muutokset ja erot, tukien painumat, viruminen ja jännevoima. Haljenneessa rakenteessa jäykkyyden alentuessa pakkovoimasuureiden summa laskee. (Honkanen 2015, 29-30.)

Halkeilematon teräsbetonirakenne on hyvin jäykkä. Ensimmäisen halkeaman synnyttyä rakenteen jäykkyys pienenee huomattavasti. Taivutettu teräsbetonipoikkileikkaus on sitä jäykempi, mitä korkeampi se on suhteessa poikkileikkauksen leveyteen tarkasteltaessa pinta-alaltaan samansuuruisia poikkileikkauksia. Haljenneessa tilassa poikkileikkauksen jäykkyys on sitä suurempi, mitä kaapeampi poikkileikkauksen puristuspuoli on verrattuna poikkileikkauksen vetopuoleen, koska

poikkileikkauksen puristuspuolen korkeus on siten suurempi. Vetoteräsmäärän kasvaessa myös poikkileikkauksen jäykkyys kasvaa. Suurempi teräsmäärä merkitsee suurempaa vetojäykkyyttä teräksille sekä sitä, että poikkileikkauksen puristuspuolen korkeus kasvaa, mikä lisää poikkileikkauksen jäykkyyttä. Suurempi puristusteräsmäärä merkitsee pienempää betonin puristuspuolen korkeutta, mikä alentaa rakenteen jäykkyyttä. Poikittaisteräsmäärä lisää rakenteen jäykkyyttä suurilla kuormitusasteilla, koska rakenteen poikittaiset teräkset estävät betonin poikittaista laajenemista puristuspuolella, mikä kasvattaa poikkileikkauksen jäykkyyttä. (Huovinen 1990, 31-32.)

Halkeilun rajoittamisen osalta siltojen rakenteet suunnitellaan siten, että ne täyttävät käyttörajatila taulukossa 3 (sivulla 29) annetut arvot. Taulukon 3 halkeamaleveysraja voidaan NCCI 2:n mukaan korottaa luvulla: $c / c_{min,dur} \leq 1,4$. Kaavassa 19 esitetään halkeamalaskennassa käytettävän betonipeitteen arvon määräytyminen.

KAAVA 19. Halkeamaleveyslaskennassa käytettävä betonipeite (Väylävirasto 2022, 30)

$$C = \min(c_{true}, 1,4c_{min,dur}, 50mm)$$

Kuvassa 14 esitetään esimerkki sallitun halkeamaleveyden korottamisesta.

$$c = \min(52, 1,4 \cdot 35, 50) = \min(52, 49, 50) = 49, \text{ jolloin sallittua halkeamaleveyttä voidaan korottaa kertoimella } c/c_{min,dur} = 1,4$$

KUVA 14. Kuvakaappaus NCCI 2 esitetystä esimerkistä halkeamaleveyden korottamiseen liittyen (Väylävirasto 2022, 30)

Halkeamaleveystarkasteluissa tulee käyttää NCCI 2 kohdan 4.2 mukaisia rakenneosien suunnittelukäyttöikä ja rasitusluokkaryhmiä sekä vastaavia rasitusluokkia, jollei rakenteen rasitustilaa toisella tapaa ole arvioitu tarkemmin. Rasitusluokat XF eivät aseta vaatimuksia halkeilun suhteen. Ympäristörasituksen suuruus ja rakenneosan suojaus vaikuttavat rakenneosan laskennalliseen halkeamaleveysrajaan. Ympäristörasitustason määrittäminen tehdään taulukon 2 mukaisesti. Mitoittavimman vaikutuksen antava rasitusluokka määrää tason. Lisäksi halkeamaleveysrajaan vaikuttaa halkeilua aiheuttavien kuormien kesto (käyttörajatilan yhdistelmä) sekä rakennetyyppi. Nämä on esitetty taulukossa 3. Halkeamaleveysraja 50 vuoden käyttöiälle 100 vuoden sijaan saadaan

jakamalla taulukon 3 arvot luvulla 0,7. Ympäristörasitustason 0 arvot ovat samoja käyttöiästä riippumatta. (Väylävirasto 2022, 66-68.)

TAULUKKO 2. Ympäristörasitustason määrittäminen (Väylävirasto 2022, 67)

Ympäristörasitustaso	Rakennesosan rasitustason määrittävät rasitusluokat a)			Esimerkkirakenteita (tarkempi määrittely taulukoista 4.1-4.3)
	Kuvaus	Klorideilta suojattuna	Klorideilta suojaamattomana	
Taso 0	Halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen ja halkeamaleveydet tarkistetaan hyväksyttävän ulkonäön takaamiseksi.	X0 XC1	X0 XC1	Betonipinnat sisätiloissa, joissa ilman kosteus on alhainen.
Taso 1	Halkeamilla on vaikutus rakenteen säilyvyyteen.	XC2 XC3 XC4	XC2 XC3 XC4 XD1 XS1	- Siltojen päällysrakenteet - Siirtymälaatat - Kevyesti kloridirasitetut suojaamattomat tukirakenteet ja tieympäristön varusteet - Kaikki kloridirasitukselta suojatut pinnat.
Taso 2	Halkeamilla on merkittävä vaikutus rakenteen säilyvyyteen.	- (suojatut rakenteet kuuluvat tasolle 1)	XD2 XD3 XS2 XS3	- Suojaamattomat siltöjen reunapalkit - Maa- ja välitukien sekä tieympäristön varusteiden suojaamattomat pinnat suuren suolasumurasituksen vaikutusalueella - Tukirakenteet meriolo-suhteissa - Paalulaatat ilman vedenpoistoa.

a) Kloridirasitukset (rasitusluokat XD ja XS) eivät aseta vaatimuksia rakenteen halkeilun suhteen, mikäli kloridirasitetut pinnat on suojattu kohdan 4.3 mukaisesti.

TAULUKKO 3. Halkeamaleveysrajat (Väylävirasto 2022, 67)

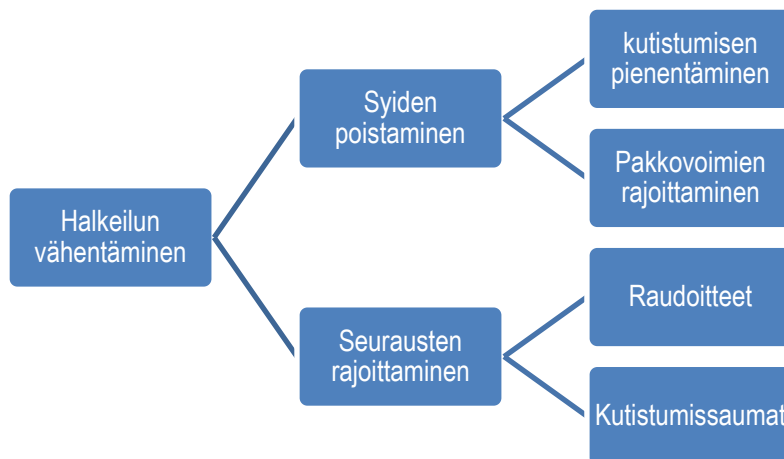
Ympäristörasitustaso	SARAKE 1 Raudoitettuja ja tartunnattomilla jänteillä jännitetyt rakennesosat, w_{max} [mm]		SARAKE 2 Tartunnallisilla jänteillä ^{b)} jännitetyt rakennesosat, w_{max} [mm]	
	Tavallinen kuormitusyhdistely	Pitkäaikainen kuormitusyhdistely	Tavallinen kuormitusyhdistely	Pitkäaikainen kuormitusyhdistely
Taso 0	-	0,3	-	0,2
Taso 1	0,2	0,15	0,07	Vetojännityksetön tila
Taso 2	0,15	0,1	Vetojännityksetön tila	Vetojännityksetön tila

b) Tähän luokkaan kuuluvat suojaputkeen injektoiduilla jänteillä varustetut rakenteet.

Kuormanvaihtojen ja pitkäaikaiskuormituksen keston kasvaessa halkeamaleveydet kasvavat. Halkeamaleveyteen vaikuttavat kuormitushistoria, kuormituksen suuruus, raudoitusuhde, raudoituksen harjakuvio, tankokoko ja betonin lujuus. Toistuvat kuormat suurentavat halkeamaleveyttä nopeammin kuin muuttumattomana pysyvä pitkäaikainen kuormitus. (Leskelä 2008, 355.) Minirauditusvaatimuksilla estetään halkeilun alkamiseen liittyviä muutoksia rakenteessa esimerkiksi raudoituksen äkillistä myötäämistä halkeaman avauduttua. Toisaalta minimiraudituksen avulla vaikutaan halkeamien jakautumiseen ja halkeamaleveyksiin. (Leskelä 2008, 364.) Jännitettyllä rakenteella voi olla jopa halkeilematon poikkileikkaus. Jännitetyt rakenteita ei käsitellä opinnäytetyössä tarkemmin.

Halkeilun vähentämiseksi rakennetta voidaan muuttaa lisäämällä raudoitusmäärää, jolloin raudoituksen jännitys sekä halkeamaväli pienenevät. Raudoituksen tankopaksuutta voidaan pienentää. (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 219.) Tankopaksuuden pienentäminen yksistään vähentää poikkileikkauksen teräsalaan, joten jakoväliä on samalla syytä tihentää.

Suunnitteluvaiheessa on mietittävä liikuntasauvojen, kiinnitysten vaikutus pakkovoimiin ja halkeiluun. Halkeamia on mahdollista ohjata haluttuihin paikkoihin heikentämällä poikkileikkausta ja samalla säilyttämällä rakenteellisen toimivuuden ja ulkonäköseikat tavoitellulla tasolla. Suunnitteluvaiheessa voidaan lisäksi pohtia betonin laadun (lujuuden) vaikutusta suhteessa syntyviin pakkovoimiin ja halkeiluun. (Honkanen 2015, 34.) Kuvassa 15 esitetään kootusti halkeilun vähentämiseen liittyviä toimenpiteitä.



KUVA 15. Halkeilun haittojen vähentäminen suunnitteluvaiheessa (mukaillen Suomen Betoniyhdistys 2016b, 41)

Tarkastellaan halkeamalaskennan teoriaa Betonirakenteiden suunnittelun oppikirjan By 211: osa 1 -kirjassa esitetyn pohjalta.

Käyttörajatilataarkastelussa kuormitusajan vaikutus voidaan ottaa huomioon kimmokertoimien suhteen α_e :n avulla käyttämällä betonin kimmokertoimelle tehollista arvoa $E_{c.eff}$, jonka laskenta on esitetään kaavassa 20 (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 207).

KAAVA 20. Kimmokertoimen tehollinen arvo (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 47)

$$E_{c.eff} = \frac{E_c}{1+\varphi}, \text{ jossa } \varphi \text{ on virumaa kuvaava luku}$$

α_e käytetään lyhytaikaisen tilan tarkastelussa ja $\alpha_{e.eff}$ puolestaan pitkäaikaisen tilan tarkastelussa (kaavat 21; kaava 22).

KAAVA 21. Kimmokertoimien suhde lyhytaikaisen tilan tarkastelussa (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 221)

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

KAAVA 22. Kimmokertoimien suhde pitkäaikaisen tilan tarkastelussa (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 221)

$$\alpha_{e.eff} = \frac{E_s}{E_{c.eff}}$$

E_{cm} = betonin kimmokerroin (GPa)

E_s = betoniteräksen kimmokerroin (GPa)

Lasketaan poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus sekä neliömomentti haljenneessa poikkileikkauksessa. Haljenneessa tilassa puristusvyöhykkeen laskentaan on olemassa useita kaavoja. Tässä opinnäytteessä esitetään yksi (kaava 23), jota käytetään myös Mathcad-laskentapohjassa. Kaavaa sovelletaan tilanteessa, jossa poikkileikkaus ei ole puristusraudoitettu.

KAAVA 23. Puristusraudoittamattoman poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 208)

$$X_{II} = \alpha_e d_1 \rho_1 \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \rho_1}} \right)$$

ρ_1 = suhteellinen raudoitusala

α_e = kimmokertoimien suhde, mitoitustilanteen mukaan joko lyhytaikainen tai pitkäaikainen kimmokertoimen suhdeluku

d_1 = tehollinen korkeus (mm)

Esitettyä puristusvyöhykkeen kaavaa (kaava 23) käytettäessä on huomioitava oikean kimmokertoimen suhteen arvon käyttäminen termin α_e kohdalla sen mukaan, onko kyse lyhyen vai pitkäaikaisen tilan tarkastelusta. Poikkileikkauksen neliömomentti lasketaan sijoittamalla tarpeen mukaan lyhyen ja pitkäaikaisen tilan mukaan laskettujen kimmokertoimien suhde sekä puristuspuunnan korkeus haljenneen tilan neliömomentin kaavaan (kaava 24).

KAAVA 24. Jäyhyysmomentti haljenneessa poikkileikkauksessa (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 208)

$$I_{II} = \frac{bX_{II}^3}{3} + \alpha_e A_{s1} (d_1 - X_{II})^2 + (\alpha_e - 1) A_{s2} (d_2 - X_{II})^2$$

A_{s1} = vektorauoituksen ala

A_{s2} = puristusraudoituksen ala

Käyttörajan halkeamaleveyslaskennassa käytetään aiemmin esille tuotuja lyhytaikaisen tilan arvoja tarkasteltaessa ominaisyhdistelmää ja tavallista yhdistelmää. Pitkäaikaisyhdistelmän tarkastelussa käytetään pitkäaikaiselle tilalle tarkoitettuja arvoja.

Haljenneen poikkileikkauksen betonin ja raudoituksen jännitykset lasketaan kaavojen 25 ja 26, 27 avulla. Sisäinen momenttivarsi saadaan kaavasta 28.

KAAVA 25. Betonin reunajännitys puristetulla reunalla (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 208)

$$\sigma_c = M_{Ed} \frac{X_{II}}{I_{II}}$$

M_{Ed} = Mitoitusmomentti (kNm)

X_{II} = puristusvyöhykkeen korkeus (m)

I_{II} = neliömomentti (m⁴)

KAAVA 26. Raudoituksen jännitys haljenneessa sekä puristetussa alueessa (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 208)

$$\sigma_{s1,2} = \alpha_e \frac{M_{ed}}{I_{II}} (d_{1,2} - X_{II})$$

KAAVA 27. Haljenneen osan raudoituksen vetojännitys (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 209)

$$\sigma_s = \frac{M_{ed}}{A_s z_{II}}$$

z_{II} = sisäinen momenttivarsi (m)

A_s = raudoituksen ala (m²)

KAAVA 28. Sisäinen momenttivarsi (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 209)

$$z_{II} = d - \frac{X_{II}}{3}$$

Esitetään halkeamaleveyden suora laskenta By211 osa 1 mukaisesti. Laskennassa on käytettävä käyttötilanteesta riippuen nimenomaisen käyttörajatilayhdistelmän puristusvyöhykkeen korkeuden

arvoa. Määritetään tehollisen vetoalueen korkeus, tehollinen raudoitusala ja tehollinen vetoalue $A_{c.eff}$ (kaava 29; kaava 30; kaava 31).

KAAVA 29. Tehollisen vetoalueen korkeus (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 213)

$$h_{c.eff} = \min \left\{ 2,5(h - d), \frac{h-x}{3}, \frac{h}{2} \right\}$$

KAAVA 30. Tehollinen raudoitusala (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 213)

$$\rho_{p.eff} = \frac{A_s}{A_{c.eff}}$$

KAAVA 31. Tehollinen vetoalue (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 213)

$$A_{c.eff} = bh_{c.ef}$$

Venymäeron laskennassa (kaava 32) käytetään kimmokertoimien suhdetta α_e lyhytaikaisen tilanteen mukaisesti.

KAAVA 32. Venymäero (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 214)

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct.eff}}{\rho_{p.eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p.eff})}{E_s}$$

$f_{ct.eff}$ = betonin tehollinen vetolujuuden arvo, jonka arvona käytetään yleensä arvoa f_{ctm} .

Lasketaan halkeamavälin maksimiarvo ja poikkileikkauksen halkeamaleveys (kaava 33; kaava 34).

KAAVA 33. Halkeamavälin maksimiarvo (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 212)

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{e,eff}}$$

k_1 = betoniteräksen tartuntaominaisuudet huomioiva kerroin

k_2 = jännitys jakauman huomioiva kerroin

k_3 = kansallisesti valittava kerroin

k_4 = kansallisesti valittava kerroin

c = betonipeite (mm)

KAAVA 34. Poikkileikkauksen halkeamaleveys (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 212)

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

Kertoimien arvot halkeamavälin maksimiarvon laskemiseksi saadaan taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Halkeamalaskennassa käytettävät kertoimet ja niiden selitykset (Suomen Betoniyhdistys 2015, 213)

Kerroin	Kertoimen arvo	Selite
k_1	0,8	hyvä tartunta
	1,6	huono tartunta (lähes sileä)
k_2	0,5	taivutus
	1,0	suora veto
k_3	3,4	kansallisesti valittava kerroin
k_4	0,425	kansallisesti valittava kerroin

Tarkistetaan mitoitus ehdon toteutuminen. Laskennan tuloksena saatavan halkeamaleveyden tulee olla alle sallitun halkeamaleveyden rajan (kaava 35).

KAAVA 35. Mitoitusehdon tarkistaminen (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 219)

$$W_k \leq W_{max}$$

Halkeilukestävydestä voidaan todeta, että poikkileikkaus on haljennut määrävän poikkileikkauksen korkeimman taivutusmomentin ollessa suurempi kuin halkeilumomentti.

2.4.3 Jännitysten rajoittaminen

Eurokoodissa asetetaan raja betonin puristusjännitykselle käyttörajatilan ominaiskuormien ja pitkäaikaiskuormien yhdistelmillä (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 210).

Pituussuuntaisia halkeamia voi esiintyä, jos kuormien ominaisyhdistelmän vallitessa jännitystaso ylittää kriittisen arvon. Tällainen halkeilu voi aiheuttaa säilyvyyden heikkenemistä. Kun ei käytetä muita toimenpiteitä, kuten raudoituksen betonipeitteen suurentamista poikkileikkauksen puristetulla alueella tai poikittaisen raudoituksen avulla estettyä poikkileikkauksen laajenemista, voi olla aiheellista rajoittaa puristusjännitystä alueilla, joihin vaikuttaa rasitusluokan XD, XF tai XS ympäristö. (Suomen Standardisoimisliitto 2006, 32.) Suurin sallittu jännitys betonipoikkileikkauksessa on ominaisyhdistelmällä $0,6f_{ck}$. Raudoituksen vetojännityksen raja ominaisyhdistelmällä on puolestaan $0,8 \cdot f_{yk}$. Kun ominaisyhdistelmässä ovat mukana mahdolliset pakkovoimat, jännitysraja on $1,0 \cdot f_{yk}$. (Väylävirasto 2022, 66.)

Betonin puristusjännityksiä rajoitetaan käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmällä viruman rajoittamiseksi. Virumanmuutos säilyy lineaarisena, jos betonin jännitys ei ylitä $0,45f_{ck}$. Jos jännitys ylittää raja-arvon, viruma kasvaa voimakkaasti, mikä tulee huomioida laskelmissa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2015, 210; Väylävirasto 2022, 66.)

3 TERÄSBETONIPOIKKILEIKKAUKSEN MITOITUS

Opinnäytteessä poikkileikkausten mitoitusta toteutettiin pelkässä taivutuksessa Structural Bridge Design 2022 -ohjelmalla, KATA-ohjelmalla sekä hyödyntäen Mathcad-laskentapohjia. Normaalivoiman ja taivutuksen vaikuttaessa samanaikaisesti tarkasteltiin ainoastaan SBD-ohjelman ja KATAn laskentatuloksia. Normaalivoiman ja taivutuksen yhdistelmä on haastava käsin mitoituksessa. Opinnäytteessä tarkasteltiin mahdollisia laskentatuloksissa esille tulevia eroja SBD:n ja muiden menetelmien välillä. Vertailussa painotettiin Structural Bridge design -ohjelman ominaisuuksia.

3.1 Käsin laskenta

Käsin laskennassa hyödynnettiin yrityksessä jo käytössä olevia Mathcad-laskentapohjia (kuva 16) puhtaan taivutuksen tapauksessa 1-rivisellä ja 2-rivisellä raudoituksella. Samalla tuli tarkasteltua laskentapohjien kaavoja ja toimivuutta. Laskentapohjissa käytettyjä kaavoja ja mitoituksen etene- mistä on esitetty aiemmin opinnäytteen luvuissa 2.3 ja 2.4, joissa kerrotaan murto- ja käyttörajati- lamitoinnuksesta.

Betoni: $f_{ck} = 35/45 \text{ MPa}$ $c_{nom} = 50 \text{ mm}$ $\Delta c_{dev} = 5 \text{ mm}$ $\varphi = 2$

Teräs: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ Pääteräs T32 $k := 150 \text{ mm}$ Jakoteräs Ei ole

Työteräs Ei ole Toteutus lk 3 Tartuntaomin. Harjateräs

Poikkileikkaus: $h := 800 \text{ mm}$ $b := 2100 \text{ mm}$ Ras.lk XD1,XC2,XC3,XC4,XS1

Rasitukset: $M_{mrt} := 3450 \text{ kNm}$ $M_{krt.a} := 2650 \text{ kNm}$ $M_{krt.b} := 1500 \text{ kNm}$ $M_{krt.c} := 1000 \text{ kNm}$

...Laskentaa...

Sallittujen halkemaleyksien ominaisarvot: $w_{k.b.om} = 0.2 \text{ mm}$ $w_{k.c.om} = 0.15 \text{ mm}$

MURTORAJATILA

Tehollinen korkeus	$d = 734 \text{ mm}$	Bet.lask.luj.	$f_{cd} = 22.0 \text{ MPa}$
Suhteellinen momentti	$\mu = 0.13932$	Ter.lask.luj.	$f_{yd} = 454.5 \text{ MPa}$
Teh. puristuspuunnan suht.korkeus	$\beta = 0.15067$		$\beta \leq \beta_{bd} = 1$
Puristuspuunnan korkeus, teräsvenymä	$X_{mrt} = 138 \text{ mm}$		$\epsilon_{s,mrt} = 0.01508$ $\epsilon_{s,mrt} \geq \epsilon_{yd} = 1$
Vaadittu rauditus (mrt)	$A_{s,Rq} = 11176 \text{ mm}^2$	$\phi_p = 32 \text{ mm}$	$k_{Rq} = 151 \text{ mm}$
Valittu rauditus	$A_s = 11259 \text{ mm}^2$	$n = 14$	MRT: sta jää
Murtokestävyys/käyttöaste	$M_{Rd} = 3474 \text{ kNm}$	$\frac{M_{mrt}}{M_{Rd}} = 99. \%$	$A_{s,jää} = 83 \text{ mm}^2$
Mitoitusehto	MRT = "OK!"		

KÄYTTÖRAJATILA

	Ominais-yhdistelmä a	Tavallinen yhdistelmä b	Pitkäaikais-yhdistelmä c
Betonin kimmomoduuli	$E_{cm} = 34.1 \text{ GPa}$	$E_{cm} = 34.1 \text{ GPa}$	$E_{cef} = 11.4 \text{ GPa}$
Kimmainen suhde	$\alpha_1 = 5.9$	$\alpha_1 = 5.9$	$\alpha_2 = 17.6$
Teräksen jännitys	$\sigma_{s0} \leq 0.8 \cdot f_{yk} = 1$	$\sigma_s = 198 \text{ MPa}$	$\sigma_{s2} = 139 \text{ MPa}$
Betonin jännitys	$\sigma_{c0} \leq 0.6 \cdot f_{ck} = 1$		$\sigma_c \leq 0.45 \cdot f_{ck} = 1$
Puristuspuunnan korkeus	$X = 186 \text{ mm}$	$X = 186 \text{ mm}$	$X_2 = 290 \text{ mm}$
Venymäero		$\epsilon_{sm,b} = 0.00064$	$\epsilon_{sm,c} = 0.00046$
Halkeamaväli		$S_{r,max,b} = 337 \text{ mm}$	$S_{r,max,c} = 337 \text{ mm}$
Halkeamaleveys		$w_{kb} = 0.22 \text{ mm}$	$w_{kc} = 0.16 \text{ mm}$
Sallittu halkeamaleveys (NCCI 2 mukaan korotettu)		$w_{k,sall,b} = 0.22 \text{ mm}$	$w_{k,sall,c} = 0.17 \text{ mm}$
Halkeamaleveyslaskennassa käytetty betonipeite ja korotuskerroin (NCCI 2)		$c_1 = 50 \text{ mm}$	$k_{kor} = 1.11$
Taivutuskestävyys	$M_{sall,a} = 2753 \text{ kNm}$	$M_{sall,b} = 1531 \text{ kNm}$	$M_{sall,c} = 1047 \text{ kNm}$
Mitoitusehtojen täytyminen	KRTa = "OK!"	KRTb = "OK!"	KRTc = "OK!"

KUVA 16. Mathcad-laskentapohja (kuvakaappaus Mathcad)

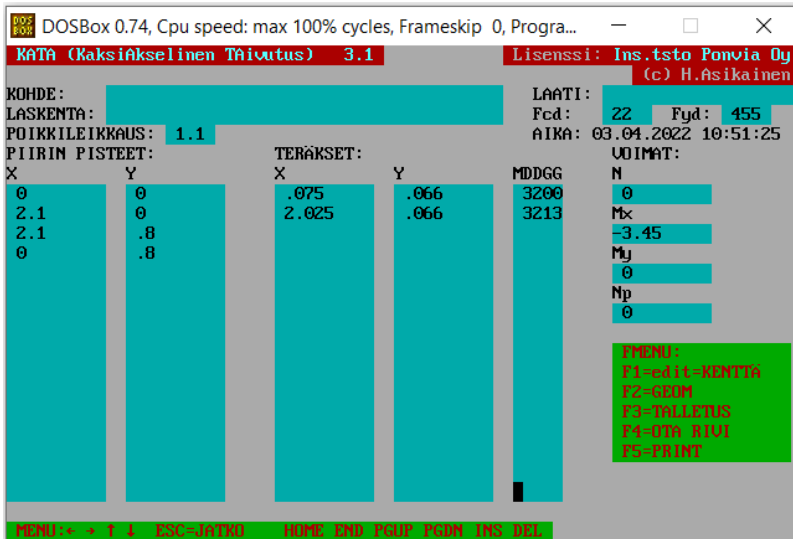
3.2 KATA

KATA on ollut käytössä yrityksessä yli 20 vuotta. Käytössä oleva versio on 3.1, joka on päivitetty Eurokoodin laskennan mukaiseksi. KATAaa hyödynnetään poikkileikkausmitoituksessa, kun normaalivoima ja momentti vaikuttavat yhtä aikaa.

KATA-ohjelman nimi on lyhenne sanoista KaksiAkselinen Taivutus ja sen avulla lasketaan kaksiakselisesti taivutetun teräsbetonipoikkileikkauksen tasapainotila murto- ja käyttörajatilassa. Tuloksina saadaan betonin ja teräksen muodonmuutokset ja -jännitykset poikkileikkauksen nurkkapisteissä sekä teräsrivien ääripisteissä. Käyttörajatilassa lasketaan halkeaman ominaisleveys w_k EC:n mukaisesti halkeamavälin ja raudoituksen keskimääräisen venymän tulona. Kun laskenta kuormitustapaukselle on suoritettu, näkyvät tulosteessa myös poikkileikkauksen pääjäyhyysakselit sekä jännityksen neutraaliakseli ja puristuspinta viivoitettuna. (Asikainen 2012, 1 - 4, 7.)

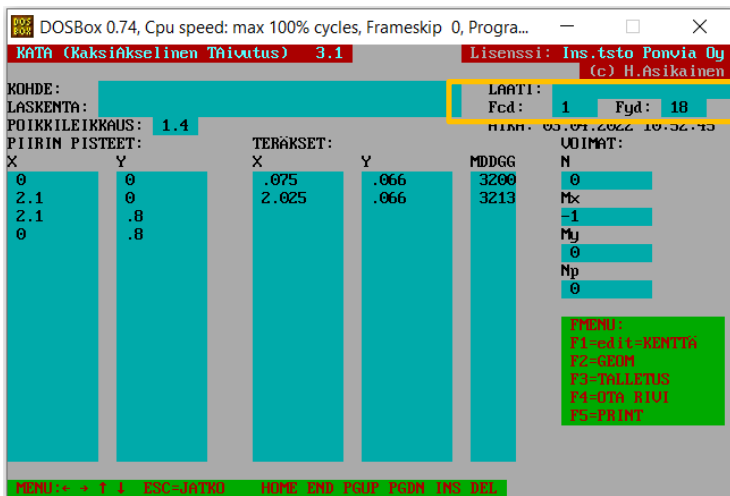
Ohjelman toiminta perustuu kaksiakselisesti taivutetun poikkileikkauksen tasapainotilanteeseen, kun kappaleen ulkoiset ja sisäiset voimat kumoavat toisensa. Sisäiset voimat ovat riippuvaisia muodonmuutostason kiertymästä (α) ja neutraaliakselin sijainnista. Laskennassa epälineaarinen vektoriyhtälö ratkaistaan Newton-Raphson-iteraation avulla. Samaan poikkileikkaukseen voidaan liittää enintään 15 kuormitustapausta. (Asikainen 2012, 3, 7.)

Avaustiedostossa (KATA.INI ja KATA.SNI) annetaan perusarvot numeerisen iterointilaskennan parametreille, materiaalivakioita, näytön grafiikkamäärittely, lisämateriaalien muodonmuutoskuviot sekä ohjelmassa esiintyvät tekstit halutulla kielellä (Asikainen 2012, 5). Kuvassa 17 on esitetty ohjelman käyttöliittymä murtorajatilamitoituksessa.



KUVA 17. KATA:n käyttöliittymä. Murtorajatilassa F_{cd} ja F_{yd} kohtiin syötetään betonin ja terästen lujuuksien mitoitusarvot (kuvakaappaus KATA)

Kuvassa 18 esitetään KATA:n käyttöliittymä käyttörajatilan pitkäaikaista yhdistelmää laskettaessa.



KUVA 18. KATA:ssa käyttörajatila ilmaistaan kimmokertoimien suhteen avulla kohdassa F_{cd} , F_{yd} . (kuvakaappaus KATA)

3.3 Structural Bridge Design

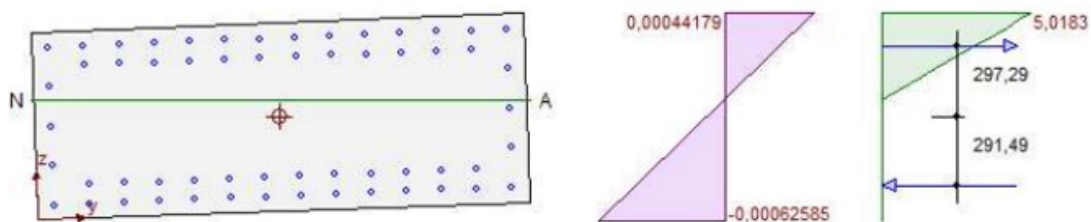
Structural Bridge Design on siltarakenteiden analysointiohjelmisto, jolla voi muun muassa suunnitella rakenneosia. Ohjelmaan voi määrittää materiaalit, geometrian ja tuottaa osien laskelmia graafisessa ympäristössä. (Autodesk 2022.) Ohjelmasta käytetään opinnäytteessä lyhennettä SBD.

Ohjelma suorittaa laskentaa seuraavissa rajatiloissa:

- murtorajatila (ULS Persistent/transient)
- käyttörajatila
 - ominaisyhdistelmä (SLS Characteristic)
 - tavallinen yhdistelmä (SLS Frequent)
 - pitkäaikainen yhdistelmä (SLS Quasi-permanent).

Lisäksi ohjelma suorittaa laskentaa onnettomuus- ja maanjäristysrajatiloissa, joita ei opinnäytteessä tarkemmin käsitellä. (Autodesk 2022.)

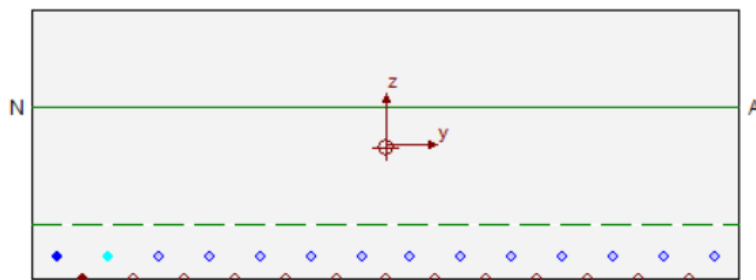
Murtorajatilassa sekä käyttörajatiloissa ohjelma laskee betonin ja terästen minimi- ja maksimijännitykset sekä niitä vastaavat venymät. Betonin maksimijännitys ja betonin maksimivenymät on esitetty ohjelmassa lisäksi kuvina. Murtorajatilassa tuloksissa esitetään neutraaliakselin kulma myötäpäivään akselilta yy. (Kuva 19.)



KUVA 19. Poikkileikkaus murtorajatilalaskennan jälkeen (kuvakaappaus SBD)

Käyttörajatilalaskennassa SBD-ohjelma näyttää neutraaliakselin paikan yhtenäisellä viivalla ja vihreä katkoviiva osoittaa poikkileikkauksen vedetyn pinnan tehollisen korkeuden $h_{c,ef}$ (tehollisen vedetyn alan $A_{c,eff}$ alueen raja) (kuva 20) (Autodesk 2022). Myös murtorajatilassa SBD näyttää neutraaliakselin paikan.

Ohjeen mukaan halkeamaleveydet lasketaan jokaiselle vetoalueella olevalle teräkselle ja sen viereiselle teräkselle jokaiselle vuorollaan. Teoreettinen halkeaman paikka näkyy punaisena ympyränä poikkileikkauksen piirillä. Täysin punainen pallo osoittaa suurimman halkeamaleveyden kohtaa (kuva 20). (Autodesk 2022.) SBD antaa tuloksissa halkeamavälin ja halkeamaleveyden. Lisäksi tuloslistassa on käyttörajatiloissa tavallisella ja pitkäaikaisella yhdistelmällä esitetty jonkin verran tuloksia edeltävää laskentaa. Murtorajatilassa ja käyttörajatilan ominaisyhdistelmällä laskentaa ei ole esitetty.



KUVA 20. Halkeamalaskennan jälkeen poikkileikkauksessa on nähtävissä vihreällä viivalla neutraaliakseli, vihreällä katkoviivalla vedetyn pinnan tehollinen korkeus sekä punaisina ympyröinä teoreettiset halkeamien paikat. Täysin punainen ympyrä poikkileikkauksen piirillä osoittaa suurimman halkeamaleveyden kohtaa. (kuvakaappaus SBD)

4 MITOITUSMENETELMIEN VERTAILU

4.1 Käsiteltävät tapaukset

Aluksi vertailtiin Mathcadin, KATAn ja SBD:n tuloksia pelkän taivutuksen vaikuttaessa, jolloin Mathcad-laskentapohjat soveltuvat hyvin vertailuun. Näin saatiin hyvin käsitystä käsin laskennan sekä ohjelmien mahdollisista eroavaisuuksista. Tämän jälkeen vertailuun otettiin laskennallisesti haastavimmat tapaukset, jossa normaalivoima ja momentti vaikuttavat yhtä aikaa, jolloin tulosten vertailu suoritettiin KATAn ja SBD:n välillä. Opinnäytteessä vertailtiin eri menetelmillä seuraavanlaiset tapaukset:

1. Pelkkä taivutus Mathcadilla, KATAlla, SBD:lla:
 - teräkset 1 rivissä, betonipeite 50 mm
 - teräkset 1 rivissä, betonipeite 70 mm
 - teräkset 2 rivissä, betonipeite 50 mm
2. Normaalivoima+momentti KATAlla ja SBD:lla:
 - teräkset 1 rivissä, betonipeite 50 mm
 - teräkset 2 rivissä, betonipeite 50 mm.

Pelkän taivutuksen kohdalla poikkileikkaus 50 mm:n betonipeitteellä on rajatapaus vertailun osalta siinä mielessä, että opinnäytteessä esitellyistä menetelmistä ainoastaan Mathcad-laskentapohjassa huomioitiin NCCI 2:ssa esitetty c_{min} koskeva 50 mm:n rajoitus halkeamalaskennassa. Pelkän taivutuksen tapaus 70 mm:n betonipeitteellä antoi lisätietoa c_{min} koskevan 50 mm:n rajoituksen vaikutuksista halkeamalaskentaan. Normaalivoima+momentti-tapauksissa esiintyy yhtä aikaa normaalivoima sekä molempien pääkselien suhteen kahdessa suunnassa vaikuttava taivutusmomentti. Pelkän taivutuksen sekä normaalivoima+momentti-tapauksiin tuotiin lisäksi mitoituksellista haastetta asettamalla teräkset kahteen riviin.

4.2 Mitoitusprosessien standardienmukaisuus ja yhtenäisyys

Mahdollisimman luotettavan tulosten vertailun tekemiseksi oli laskentaan vaikuttavat tekijät suunniteltava ja toteutettava niin, että ne ovat mahdollisimman yhdenmukaisia SBD:ssa, KATAssa ja Mathcadissa. Poikkileikkausten laskentaa varten murto- ja käyttörajatiloissa tarkistettiin asetukset ja kertoimet oikeanlaisiksi SBD-ohjelmaan. Kertoimia pääsee ohjelmassa muokkaamaan, kun valittuna on "Materials". Kertoimet voi muuttaa betonin tai raudoituksen tietojen puolella. Kertoimien ja arvojen listaukseen pääsee painamalla "NDP Values" -kohtaa (Click button to edit values).

SBD:ssa valittu suunnittelunormisto oli EN 1992-2:n mukainen. Ohjelman kerroinlistaukseen avautui myös laskentaa koskevia standardin 1992-1-1 osioita. Listassa olevat kertoimet käytiin lävitse tarkastelemalla ensin Eurokoodin soveltamisohjetta NCCI 2, sitten standardia koskien betonisiltoja SFS 1992-2 +AC ja lopuksi, mikäli kerrointa ei aiemmin mainittu edellisissä, tarkasteltiin betonirakenteiden suunnittelun yleisiä sääntöjä koskevaa standardia SFS 1992-1-1 +A1 +AC.

On otettava huomioon, että SBD:iin syötetyt betonin ja teräksen osavarmuuskertoimien arvot ovat NCCI 2 esitetyt pienennetyt arvot (toteutusluokka 3). Mikäli käyttää pohjaa, johon on syötetty valmiiksi kertoimet ja työn toteutusluokka on 2, tulee arvot vaihtaa oikeiksi.

Opinnäytetyötä tehtäessä betoniteräksille käytettiin SBD-laskennassa myöden jälkeen vaakasuoraa jännitysvenymäriippuvuutta. Mikäli halutaan käyttää betoniteräkselle myöden jälkeen kasvavaa jännitysvenymäriippuvuutta (valinta "Reinforcing steel inclined"), tulee tarvittavat arvot muuttaa mitoitusilannetta vastaavaksi. Seuraavaksi tarkastellaan niitä seikkoja, jotka oli välttämätöntä yhtenäistää tai todeta yhtenäisiksi menetelmien kesken laskennan tulosten vertailukelpoisuuden vuoksi.

Varmistettiin raudoituksen jakaantuminen yhdenmukaisella tavalla poikkileikkaukseen jokaisessa käytetyssä menetelmässä. Laskennassa ei huomioida, että harjatankojen harjat vievät 10 % tangon halkaisijan nimellismittaa suuremman tilan (Suomen betoniyhdistys 2015, 103). Kerrointa 1,1 ei käytetty opinnäytetyötä varten tehtävässä laskennassa.

Virumaluku asetettiin 2:ksi käyttörajatilan pitkäaikaisen yhdistelmän laskennassa. SBD:ssa on mahdollista antaa ohjelman laskea syötettyjen tietojen mukaan tarkempi virumaa kuvaava luku,

mutta laskennan yhtenäistämiseksi Mathcadin kanssa asetettiin viruman arvoksi molempiin 2 käytettäessä pitkäaikaisen tilan kimmokerrointa. Loppuviruman arvot ovat tavanomaisesti ulkobetonirakenteille lähellä arvoa 2, välillä 1...2 (Suomen Betoniyhdistys 2015, 47). Viruma vaikuttaa laskennassa käytettävään kimmokertoimeen ja kimmokertoimien suhteeseen. Viruma vaikuttaa niin, että tehollinen kimmokerroin pienenee ajan myötä kuormituksessa viruman vaikutuksesta (Suomen Betoniyhdistys 2015, 45 - 47). KATAn laskennassa käytetään kimmokertoimien suhdetta (oletus 10). 10:tä pienemmillä arvoilla KATAssa lasketaan lyhytaikaista kuormitusta, isommilla lasketaan pitkäaikaista kuormitusta.

Kimmokertoimien suhde asetettiin samansuuruisiksi menetelmien välillä. Mathcadissa ja SBD:ssa käyttörajatilan ominais- ja tavallisessa yhdistelmässä suhteena on n. 5,9 ja pitkäaikaisen yhdistelmän laskennassa suhde on puolestaan 17,6. KATA-laskentaan on pyöristetty kertoimien suhdelluvut tasaluvuiksi 6, 6, 18, mikä kokeiluiden perusteella antaa riittävän tarkkuuden.

Halkeamalaskennassa käytettävä betonipeitteen arvo c_{min} oli huomioitava samalla tavalla ohjelmissa ja käsin laskennassa. Mathcadissa on betonipeitteen laskentakaava NCCI 2:n mukaisesti: $c_{min} = \min(c_{true}, 1,4 * c_{min,dur}, 50 \text{ mm})$. NCCI 2:ssa ohjeeksi annettua halkeamaleveyslaskennassa käytettävää edellä mainittua 50 mm:n arvoa ei ole huomioitu SBD:ssa, mikä aiheuttaa eroavaisuuksia tuloksissa. Vain UK:ssa ja Irlannissa on SBD:n käyttäjillä mahdollisuus vaikuttaa halkeamalasennassa käytettyyn c_{min} :iin vaihtamalla betonipeitteen arvoa "Serviceability Calculations" -valikosta. Suomessa SBD:n laskennassa käytetään todellista betonipeitettä, jonka mukaan teräkset on poikkileikkaukseen asetettu.

KATAssa betonipeitteen vähimmäisarvo määritetään ini-tiedostossa, syöttämällä tietoihin $c_{min,dur}$ -arvo. Edelleen laskennassa käytetty betonipeitteen arvo on KATAssa seuraava:

$$c = \text{vetorauidoituksen betonipeitteen paksuus} = \min(c_{true}, 1,4 * c_{min,dur})$$

eli ohjelma käyttää laskennassa KATAssa c_{true} arvoa, jos se on pienempi kuin $1,4 * c_{min,dur}$

Opinnäytetyössä asetettiin yhdenmukaisuuden ja yksinkertaisuuden vuoksi 50 mm teräksen betonipeitteen arvoksi poikkileikkauksen alapinnasta ja yhdistetyssä kuormituksessa myös yläpinnasta.

K1= teräksen tartuntaominaisuuskerroin, joka harjatangon mukaan on 0,8 ja sileän 1,6. Oletuksena SBD:ssa ja KATAssa arvo on 0,8. Tarkistettiin, että menetelmissä on käytössä sama kerroin. Tarkistettiin menetelmien yhdenmukaisuus myös kuorman vaikutusajan huomioivan kertoimen osalta. Kuorman vaikutusajan huomioiva kerroin 0,4 (pitkä) ja 0,6 (lyhyt) vaihtuu SBD:ssa sen mukaan, onko valittuna lyhyen vai pitkän ajan kimmokerroin laskentaa varten. KATAssa ohjelma huomioi kertoimen sen mukaan, onko käyttötilojen kimmokertoimien suhteen arvo asetettu alle vai yli 10.

SFS 1992-1-1 7.11 sisältää tiedon kertoimesta k2, jonka avulla huomioidaan venymäjakaumaa. SBD laskee kertoimen standardin 7.13 mukaisesti, jos valintaruutuun ei ole laitettu rastia. Jos valintaruutua klikkaa, voi käyttäjä syöttää halutun kertoimen arvon välillä 0,5 ja 1,0. (Autodesk 2022.) Kuvassa 21 nähdään taulukko, johon voi valita käyttörajatilalaskennan arvoja. KATAssa k2-venymäjakaumakerroin on 0,5 taivutuksen mukaan. Epäkeskisen vedon tapauksessa ohjelma laskee kertoimen ja tällöin k2 on välillä 0,5 - 1,0. (Asikainen 2012, 5.)

KUVA 21. Valikko käyttörajatilalaskennan suunnittelutietojen syöttämiseksi (kuvakaappaus SBD)

Kuormien arvot on annettava samansuuruisina eri menetelmissä. SBD:iin ja KATAan arvoja syöttäessä ja tuloksia tulkittaessa oli huomioitava, että ohjelmien välillä osa arvoista on eri yksiköissä. KATA-ohjelmassa tulee erityisesti huomioida, että kuormat annetaan siinä MNm / MN:n arvoisina kNm/ kN:n sijaan.

On varmistettava erityisesti, että SBD-ohjelmaan kohtaan "Loadcase" syötetyt kuormien arvot eivät kertaudu. Asiasta kerrotaan lisää seuraavassa kappaleessa "interpolated"-valintaan liittyen. Käyttörajaatilalaskentaa tehtäessä on erityisen tärkeää kiinnittää huomiota valikon "Design Data for Serviceability Calculations" kohtaan "Elastic modulus used". Ohjelman manuaalissa kerrotaan, että "interpolated" ollessa valintana ohjelma interpoloi pitkäaikaisen ja lyhytaikaisen kimmokertoimen välillä. Jännitykset näin tulevat olemaan rakenteen elinkaaren loppupuolella esiintyviä. Ohjeessa kerrotaan, että jännitysten tarkastelemiseksi juuri rakentamisen jälkeen tulee pitkäaikaista kimmokerointa muokata tilannetta vastaavalla virumaluvulla. Vastaavasti voi valita käyttää kimmokertoimen kohdalla valintaa "Short term". (Autodesk 2019, 3-41.)

Käytettäessä "interpolated"-valintaa on huomioitava, että käyttötilalaskennassa voi tulla eroavaisuuksia halkeamaleveyteen riippuen siitä, miten on valinnut käyttötilojen kohdalla kuormia (Loadcase) syötettäessä Permanent/Variable -kohtaan. Eroja laskentaan voi syntyä, vaikka nimenomaisessa Loadcase-valikossa olisi kertoimien kohdalla arvona 1 tai pelkkä "-". Opinnäytettä varten tehtyjen kokeilujen perusteella todettiin kuormien oikeanlaisen huomioinnin kannalta varmemmaksi käyttää kimmokertoimena selkeästi joko "Short term" - tai "Long term" -valintaa kunkin mitoitustilanteen mukaan.

4.3 Pelkkää taivutusta koskevat tulokset

Tuloksissa esitetään puristusvyöhykkeen korkeus, betonin suurin puristusjännitys ja vastaava venymä sekä teräksen suurin vetojännitys ja sitä vastaava venymä. Lisäksi käyttörajaatilassa tavallisen ja pitkäaikaisen yhdistelmän kohdalla tuloksissa esitetään myös halkeamaväli sekä halkeamaleveys. Ominaisyhdistelmän kohdalla ei esitetä puristusvyöhykkeen korkeuden arvoja, koska SBD-ohjelmassa ei esitetä nimenomaista arvoa ominaisyhdistelmän laskennassa. Esitetty halkeamaleveyden arvo on SBD:n kohdalla suurin halkeamaleveyden arvo. Tapauksessa, jossa terästä on kahdessa rivissä, oli valintana maksimihalkeaman laskennassa "Extreme face only", mikä käytännössä rajasi laskennan alimpaan teräsriiviin poikkileikkauksen alapinnasta.

Ohjelmissa on esitetty poikkileikkauksen puristettu ala ja jokaisen tapauksen alla on esitetty yhdet esimerkkikuvat, jotka ovat samasta kuormitustapauksesta molemmista mitoitushjelmissä. Voidaan

todeta, ettei puristetuissa aloissa ole ohjelmien välillä huomattavia eroavaisuuksia kuvien perusteella.

Mathcad-laskentapohjissa käyttörajatilassa oli esitetty venymäerojen kaavat ja tulokset, mutta ei erikseen teräksen ja betonin venymää, joten lisättiin pohjiin venymien laskentakaavat (kaava 36; kaava 37).

KAAVA 36. Betonin venymä pitkäaikaisessa yhdistelmässä (Mathcad)

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\sigma_{cp}}{E_{cef}}$$

KAAVA 37. Teräksen venymä (Mathcad)

$$\varepsilon_{sp} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s}$$

Murtorajatilalaskentaa varten muokattiin sisäisen momenttivarren kaavaa, koska arvioitiin lisätyn sisäisen momenttivarren (z_m) avulla saatavan todennukaisemman arvon edelleen teräksen jännityksestä (kaava 38). On johdonmukaista käyttää lisättyä kaavaa momenttivarren laskemiseen, koska laskentapohjassa on esitetty murtorajatilassa tehollisen puristusvyöhykkeen korkeus. Lisäksi käyttämällä lisättyä z_m kaavaa saatiin teräksen jännitykselle murtorajatilassa varmemman puolella oleva arvo jännityksen kasvaessa.

KAAVA 38. Murtorajatilan sisäinen momenttivarsi (Mathcad)

$$z_m = d \left(1 - \frac{\beta}{2} \right)$$

Murtorajatilassa poikkileikkauksen mitoitus perustuu Mathcad-laskentapohjassa betonin suorakaitteen muotoisen yksinkertaistetun jännitys jakauman käyttöön. Puristuspinnan korkeus ja venymät eivät ole suoraan verrattavissa ohjelmista saataviin arvoihin. Yksinkertaistettua jännitys jakaamaa käytettäessä betonin murtopuristuman arvo on suoraan betonin venymän arvo ja lisäksi teräksen venymä on laskentapohjassa laskettu betonin murtopuristumaa hyödyntäen. SBD-ohjelmassa

kokeiltiin lisätä murtorajatilakuormaa aivan kestävyuden äärirajoille, jolloin ohjelman arvot lähestyivät puristusvyöhykkeen korkeuden ja venymien osalta Mathcadin arvoja.

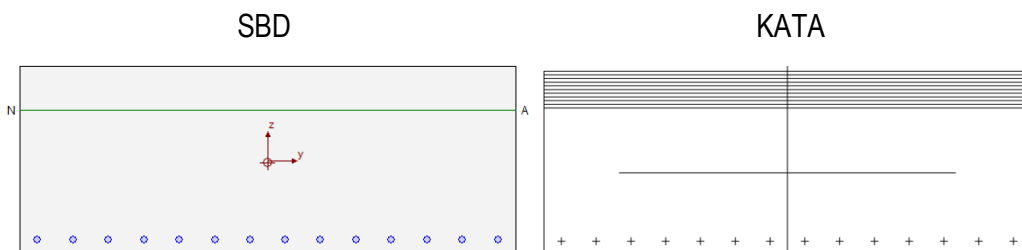
Käyttörajatilan mitoituskuormien merkinnöissä käytetään kirjaimia a, b ja c osoittamaan eri yhdistelmiä: a tarkoittaa ominaisyhdistelmää, b tarkoittaa tavallista yhdistelmää ja c pitkäaikaista yhdistelmää. Taulukoiden keltainen väri merkitsee tuloksissa olevaa eroa Mathcad-laskennan osalta, joka syntyy murtorajatilassa esiintyvistä laskentatapojen erosta menetelmien välillä. Tämä ei kuitenkaan ole virhe sinänsä vaan eroavaisuus laskentatavassa, sillä SBD:n ja KATA:n arvot vastaavat Mathcad-pohjan arvoja, kun murtorajatilan momentti on aivan maksimissaan. Taulukoiden punainen väri tarkoittaa merkityksellistä eroa menetelmien tuloksissa.

4.3.1 Teräket 1 rivissä, betonipeite 50 mm

Luvussa 4.3.1 esitetään tulokset pelkän taivutuksen tapauksesta, jossa raudoitusta on yhdessä rivissä. Tapauksen mitoituskuormat ovat seuraavat:

- MRT: 3 450 kNm
- KRTa: 2 560 kNm
- KRTb: 1 500 kNm
- KRTc: 1 000 kNm.

Kuvassa 22 nähdään ohjelmien antamat kuvat poikkileikkauksista ja niiden puristetuista aloista, joissa ei esiinny merkityksellisiä eroavaisuuksia.



KUVA 22. Poikkileikkaus SBD- ja KATA-ohjelmassa (Kuvakaappaukset ohjelmista)

Ainoa huomattava ero menetelmien tuloksien välillä esiintyi käyttörajatilan pitkäaikaisella yhdistelmällä (taulukko 5). Käyttörajatilassa pitkäaikaisen yhdistelmän halkeamaleveyden arvoissa on suurin ero KATA:n ja laskentapohjasta saadun tuloksen välillä johtuen eroista venymäeron arvoissa. Kokeiluiden perusteella vaikuttaa siltä, että KATA käyttää venymäeron laskennassa eri kimmokerroimen suhdetta kuin Mathcad-laskentapohja ja SBD.

TAULUKKO 5. Tulokset pelkän taivutuksen tapauksessa, kun teräkset ovat 1 rivissä

MRT

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s
SBD	155,9	22,0	0,0023	454,5	0,0085
KATA	158,9	22,0	0,0022	455,0	0,0079
Mathcad	138,2	22,0	0,0035	451,5	0,0151

KRT ominaisyhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD		20,2	0,00059	350,2	0,0018		
KATA		20,0	0,00060	350,5	0,0018		
Mathcad		20,2	0,00059	350,2	0,0018		

KRT tavallinen yhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	185,8	11,4	0,00034	198,2	0,0010	337,4	0,215
KATA	187,5	11,3	0,00034	198,4	0,0010	337,4	0,216
Mathcad	185,8	11,4	0,00034	198,2	0,0010	337,4	0,220

KRT pitkäaikainen yhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	289,6	5,2	0,00045	139,4	0,0007	337,4	0,156
KATA	292,1	5,1	0,00046	139,5	0,0007	337,4	0,141
Mathcad	289,6	5,2	0,00045	139,3	0,0007	337,4	0,160

4.3.2 Teräkset 1 rivissä, betonipeite 70 mm

Suoritettiin poikkileikkauksen mitoitus pelkän taivutusmomentin kuormittamana 70 mm:n betonipeitteellä, jotta saatiin lisätietoa c_{min} koskevan 50 mm:n rajoituksen vaikutuksista halkeamalaskentaan. Poikkileikkaus oli muutoin samanlainen kuin edellisessä tapauksessa. Ainoastaan betonipeitteen arvo oli eri.

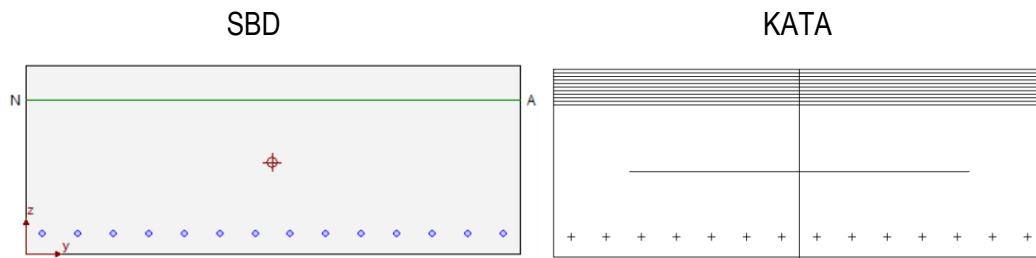
Rasitukset 70 mm:n betonipeitteen tapaukseen valittiin siten, että poikkileikkaus menee kaikilla menetelmillä läpi murtorajatilalaskennasta eli kestää. Käyttörajatilassa kuormat asetettiin niin, että mitoituksen tulokset ovat lähellä sallittuja raja-arvoja. Vertailun vuoksi esitetään rasitukset sekä 50 mm:n betonipeitteen että 70 mm:n betonipeitteen poikkileikkaukselle. Rasitukset 50 mm:n betonipeitteellä ovat seuraavat:

- MRT = 3 450 kNm
- KRTa = 2 650 kNm
- KRTb = 1 500 kNm
- KRTc = 1 000 kNm.

Rasitukset 70 mm:n betonipeitteellä ovat puolestaan seuraavat:

- MRT = 3 355 kNm
- KRTa = 2 630 kNm
- KRTb = 1 290 kNm
- KRTc = 940 kNm.

Kuvassa 23 nähdään ohjelmien antamat kuvat poikkileikkauksista ja niiden puristetuista aloista.



KUVA 23. Poikkileikkaus SBD- ja KATA-ohjelmissa (Kuvakaappaukset ohjelmista)

Kokeilujen perusteella huomattiin eroa venymäeron tuloksiin pitkäaikaisella yhdistelmällä syntyvän jonkin verran siitä, että SBD ja Mathcad käyttävät kimmokertoimien suhteena noin 5,9 ja KATA puolestaan vaikuttaa käyttävän venymäeron laskennassa syötettyä kimmokertoimien suhdetta 18. Ero pitkäaikaisen yhdistelmän halkeamaleveydessä Mathcadin ja KATA:n välille syntyi tästä syystä (taulukko 6).

Käyttörajan tavallisella ja pitkäaikaisella yhdistelmällä halkeamavälin laskennassa käytetty betonipeite (c) vaikutti poikkeavaan halkeamaväliin ja eroon myös halkeamaleveydessä Mathcadin ja SBD-ohjelman välillä. SBD ei ota huomioon NCCI 2:ssa esitettyä 50 mm:n rajoitusta halkeamaleveyslaskennassa huomioitavaan betonipeitteeseen. SBD käyttää todellista betonipeitteen arvoa eikä betonipeitteen arvoa laskentaa varten saa muutettua. KATAssa betonipeite saadaan $c_{min,dur}$ -arvoa muuttamalla asetettua vastaamaan 50:tä mm.

TAULUKKO 6. Tulokset pelkän taivutuksen tapauksessa 70 mm:n betonipeitteellä

MRT

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s
SBD	147,8	22,0	0,0026	454,5	0,0101
KATA	151,7	22,0	0,0025	455,0	0,0092
Mathcad	138,2	22,0	0,0035	452,4	0,0146

KRT ominaisyhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD		21,0	0,00062	357,7	0,0018		
KATA		20,8	0,00062	358,0	0,0018		
Mathcad		21,0	0,00062	357,7	0,0018		

KRT tavallinen yhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	182,8	10,3	0,00030	175,5	0,0009	446,7	0,235
KATA	184,6	10,2	0,00031	175,6	0,0009	378,1	0,199
Mathcad	182,8	10,3	0,00030	175,4	0,0009	378,7	0,199

KRT pitkäaikainen yhdistelmä

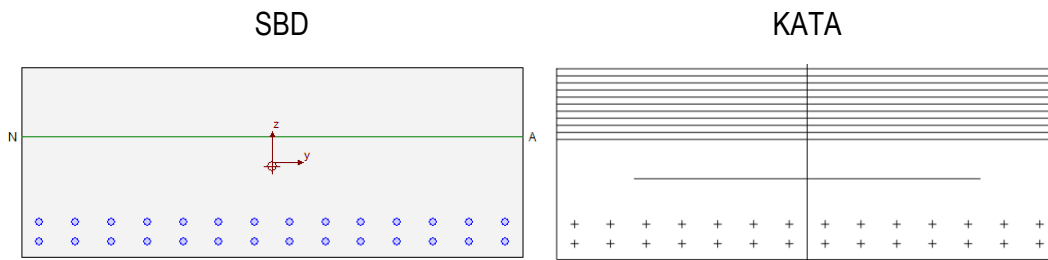
	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	284,7	5,1	0,00045	134,9	0,0007	412,3	0,178
KATA	287,1	5,0	0,00045	135,0	0,0007	343,5	0,139
Mathcad	284,7	5,1	0,00045	134,8	0,0007	344,3	0,148

4.3.3 Teräkset 2 rivissä, betonipeite 50 mm

Luvussa 4.3.3 esitetään tulokset pelkän taivutuksen tapauksesta, jossa raudoitusta on kahdessa rivissä. Tapauksen mitoituskuormat ovat seuraavat:

- MRT: 5 900 kNm
- KRTa 3 200 kNm
- KRTb 2 900 kNm,
- KTRc 2 000 kNm.

Kuvassa 24 nähdään ohjelmien antamat kuvat poikkileikkauksista ja niiden puristetuista aloista.



KUVA 24. Poikkileikkaus SBD- ja KATA-ohjelmissa (Kuvakaappaukset ohjelmista)

Pitkäaikaisella yhdistelmällä eroa halkeamaleveyden tuloksiin syntyi edelleen KATAn ja muiden menetelmien välillä. Kokeiluiden perusteella vaikuttaa siltä, että venymäeron laskennassa käytetty kimmokerrointen suhde on KATAssa eri kuin muissa menetelmissä, mikä aiheuttaa eron.

Tulosten vertailua tehtäessä huomattiin Mathcad-laskentapohjassa muutama päivitystarve kaavoihin liittyen, jotta laskenta tapahtuu kuten pitäisi. Laskentapohjaa muokattiin niin, että saadaan ulomaisen teräsruvin jännitysarvo teräsruvien keskiarvon sijaan. Lisäksi Mathcad-laskentapohjaa päivitettiin siten, että tehollisen raudoitussuhteen laskennassa käytettävä teräsala määräytyy tehollisen vetoalueen korkeuden mukaan. Aiemmin teräsalamassa huomioitiin kaikki poikkileikkauksen teräskätket. Muutoksen jälkeen vetoalueen korkeuden jäädessä alle toisen teräsruvin keskipisteen korkeuden laskentapohja huomioi vain ensimmäisen teräsruvin teräsalam mukaan halkeamalaskennassa. Laskentapohjan päivityksen jälkeen tulokset vastasivat hyvin SBD-ohjelman antamia tuloksia (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Tulokset pelkän taivutuksen tapauksessa, kun teräkset ovat 2 rivissä

MRT

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s
SBD	293,6	22,0	0,0027	454,5	0,0041
KATA	296,5	22,0	0,0027	455,0	0,0039
Mathcad	276,5	22,0	0,0035	454,5	0,0053

KRT ominaisyhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r.max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD		20,7	0,00061	251,1	0,0013		
KATA		20,5	0,00062	251,5	0,0013		
Mathcad		20,8	0,00061	252,6	0,0013		

KRT tavallinen yhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r.max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	239,0	18,7	0,00055	227,6	0,0011	264,9	0,242
KATA	241,1	18,6	0,00056	227,9	0,0011	264,5	0,242
Mathcad	239,0	18,8	0,00055	228,9	0,0011	264,9	0,244

KRT pitkäaikainen yhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r.max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	356,5	9,2	0,00081	172,1	0,0009	320,0	0,207
KATA	359,0	9,2	0,00083	172,4	0,0009	319,1	0,182
Mathcad	356,5	9,3	0,00082	173,5	0,0009	320,0	0,209

4.4 Normaalivoimaa ja taivutusta koskevat tulokset

Taulukoissa esitetään puristusvyöhykkeen korkeus, betonin suurin puristusjännitys ja vastaava venymä sekä teräksen suurin vetojännitys ja sitä vastaava venymä. Edellä mainittujen lisäksi käyttörajatilassa tavallisen ja pitkäaikaisen yhdistelmän kohdalla on esitetty halkeamaväli sekä halkeamaleveys. Ominaisyhdistelmän kohdalla ei esitetä puristusvyöhykkeen korkeuden arvoja, koska SBD-ohjelmassa ei esitetä nimenomaista arvoa ominaisyhdistelmän laskennassa.

Tuloksissa esitettävä halkeamaleveyden arvo on SBD:n kohdalla suurin halkeamaleveyden arvo. Tapauksessa, jossa terästä on kahdessa rivissä, valittiin kuormat laskentaa varten niin, että halkeama asettuu lähelle nimenomaisen käyttörajatilan sallittua halkeamarajaa. Tämän jälkeen laskentaa varten valittiin ”Extreme face only” ja tarkasteltiin valinnan vaikutusta halkeamaleveyteen. Taulukoiden punainen väri tarkoittaa merkityksellistä eroa menetelmien tuloksissa.

Käyttörajatilan mitoituskuormien merkinnöissä käytetään kirjaimia a, b ja c osoittamaan eri yhdistelmiä: a tarkoittaa ominaisyhdistelmää, b tarkoittaa tavallista yhdistelmää ja c pitkäaikaista yhdistelmää. Mitoituskuormat annetaan opinnäytteessä SBD-ohjelman kuormien suuntaisesti (M_y , M_z).

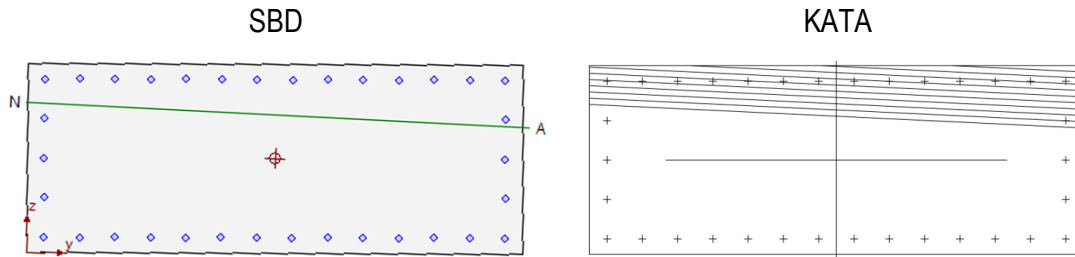
Ohjelmissa on kuvissa esitetty poikkileikkauksen puristettu ala ja jokaisen tapauksen alla on esitetty yhdet esimerkkikuvat, jotka ovat samasta kuormitustapauksesta molemmista mitoitusohjelmista. Voidaan todeta, ettei puristetuissa aloissa ole ohjelmien välillä huomattavia eroavaisuuksia kuvien perusteella.

4.4.1 Teräkset 1 rivissä, betonipeite 50 mm

Luvussa 4.4.1 esitetään tulokset yhdistetyn rasituksen tapauksesta, jossa raudoitusta on yhdessä rivissä. Tapauksen mitoituskuormat ovat seuraavat:

- MRT: $M_y = 4\,200\text{ kNm}$, $M_z = 1\,200\text{ kNm}$, $N = 1\,100\text{ kN}$
- KRTa: $M_y = 2\,600\text{ kNm}$, $M_z = 600\text{ kNm}$, $N = 1\,000\text{ kN}$
- KRTb: $M_y = 1\,700\text{ kNm}$, $M_z = 300\text{ kNm}$, $N = 700\text{ kN}$
- KRTc: $M_y = 1\,150\text{ kNm}$, $M_z = 300\text{ kNm}$, $N = 530\text{ kN}$.

Kuvassa 25 nähdään ohjelmien antamat kuvat poikkileikkauksista ja niiden puristetuista aloista, joissa ei ole havaittavissa merkityksellisiä eroavaisuuksia.



KUVA 25. Poikkileikkaus SBD- ja KATA-ohjelmissa (Kuvakaappaukset ohjelmista)

Laskennan tuloksissa (taulukko 8) oli ohjelmien välillä eroavaisuutta venymäeron osalta siten, että se vaikutti pitkäaikaisen yhdistelmän halkeamaleveyden eroon. KATA vaikuttaa käyttävän pitkäaikaisella yhdistelmällä venymäeron laskennassa eriä kimmokertoimen suhdetta kuin SBD. Lisäksi laskennassa käytettävä tehokkaan vetoalueen ala erosi hieman ohjelmien välillä.

TAULUKKO 8. Tulokset taivutuksen ja normaalivoiman rasittamassa tapauksessa, kun teräkset ovat 1 rivissä

MRT

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s
SBD	262,8	21,6	0,0017	454,5	0,0037
KATA	264,2	21,6	0,0017	455,0	0,0037

KRT ominaisyhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD		20,8	0,00061	290,0	0,0015		
KATA		20,6	0,00062	290,5	0,0015		

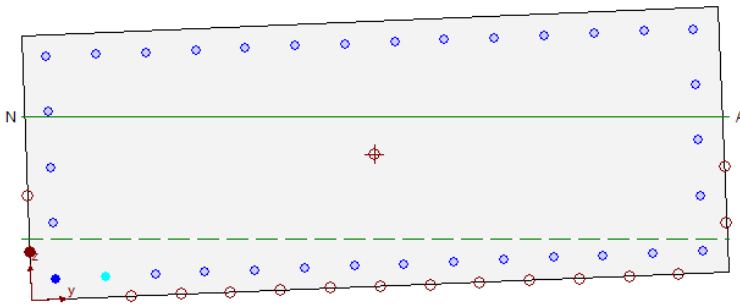
KRT tavallinen yhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	229,9	13,2	0,00039	185,5	0,0009	354,7	0,197
KATA	231,7	13,1	0,00039	185,8	0,0009	354,2	0,197

KRT pitkäaikainen yhdistelmä

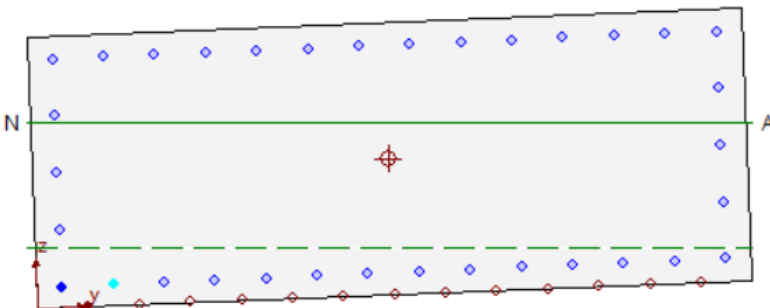
	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r,max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	333,6	5,3	0,00047	136,9	0,0007	312,6	0,150
KATA	335,9	5,3	0,00048	137,2	0,0007	312,2	0,128

SBD-ohjelmassa tarkasteltiin samalla "Extreme face only" -valinnan vaikutusta halkeamaleveyden tuloksiin. Halkeamalaskennan tuloksen kannalta ei tämän tapauksen kohdalla ollut vaikutusta, käyttikö "Extreme face only" -valintaa. Tähän vaikuttaa se, että kaikki rauditus on yhdessä rivissä. Tuloksena saatava suurin halkeaman arvo oli sama, vaikka ilman valintaa suurin halkeama oli punaisen pallon perusteella poikkileikkauksen lyhemmällä sivulla (kuva 26).



KUVA 26. Poikkileikkaus SBD:n halkeamalaskennan jälkeen ilman "Extreme face only" -valintaa. Kuvan täysin punainen pallo on poikkileikkauksen lyhemmällä sivulla vasemmalla. (Kuvakaappaus)

Kuvassa 27 esitetään poikkileikkaus puolestaan "Extreme face only" -valinnan kanssa.



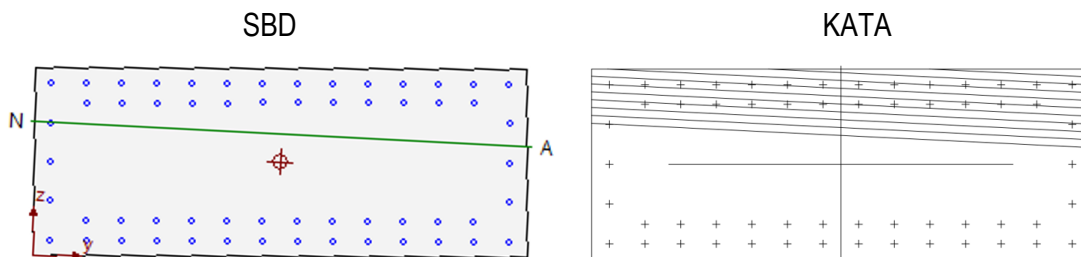
KUVA 27. Poikkileikkaus SBD:n halkeamalaskennan jälkeen "Extreme face only" -valinnan kanssa. Kuvan täysin punainen pallo on poikkileikkauksen pidemmällä sivulla vasemmalla lähellä koordinaatiston y-kirjainta. (Kuvakaappaus)

4.4.2 Teräset 2 rivissä, betonipeite 50 mm

Luvussa 4.4.2 esitetään tulokset yhdistetyn rasituksen tapauksesta, jossa raudoitusta on osittain kahdessa rivissä. Tapauksen mitoituskuormat ovat seuraavat:

- MRT: $M_y = 6\,000\text{ kNm}$, $M_z = 1\,800\text{ kNm}$, $N = 1\,500\text{ kN}$
- KRTa: $M_y = 3\,100\text{ kNm}$, $M_z = 700\text{ kNm}$, $N = 1\,200\text{ kN}$
- KRTb: $M_y = 1\,950\text{ kNm}$, $M_z = 600\text{ kNm}$, $N = 950\text{ kN}$
- KRTc: $M_y = 1\,350\text{ kNm}$, $M_z = 300\text{ kNm}$, $N = 600\text{ kN}$.

Kuvassa 28 nähdään ohjelmien antamat kuvat poikkileikkauksista ja niiden puristetuista aloista.



KUVA 28. Poikkileikkaus vasemmalla SBD:ssa ja oikealla KATAssa (Kuvakaappaukset ohjelmista)

Käyttörajan pitkäaikaisella yhdistelmällä eroa halkeamaleveyden tuloksiin syntyi edelleen KATAssa, johtuen venymäerolaskennassa käytettävästä kimmokerrointen suhteesta. Muuten tulokset ovat yhteneväisiä ohjelmien kesken (taulukko 9).

TAULUKKO 9. Tulokset taivutuksen ja normaalivoiman rasittamassa tapauksessa, kun teräksiä on 2 rivissä

MRT

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s
SBD	342,0	21,8	0,0018	454,5	0,0027
KATA	343,0	21,8	0,0018	455,0	0,0027

KRT ominaisyhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r.max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD		20,8	0,00061	230,6	0,0012		
KATA		20,5	0,00062	231,0	0,0012		

KRT tavallinen yhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r.max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	294,5	13,7	0,00040	144,0	0,0007	273,3	0,131
KATA	296,8	13,5	0,00041	144,3	0,0007	273,1	0,132

KRT pitkäaikainen yhdistelmä

	X [mm]	σ_c [MPa]	ϵ_c	σ_s [MPa]	ϵ_s	$S_{r.max}$ [mm]	W_k [mm]
SBD	364,8	5,0	0,00044	108,5	0,0005	279,7	0,105
KATA	366,6	5,0	0,00045	108,6	0,0005	279,4	0,091

SBD-ohjelmassa tarkasteltiin "Extreme face only"-valinnan vaikutusta laskettuun halkeamaleveyteen. SBD:ssa halkeama kasvaa suureksi, kun teräksiä on useammassa rivissä, jos valittuna ei ole "Extreme face only". Tällaisessa tapauksessa SBD käyttää c:n arvona laskennassa ylemmän teräsrivin suurinta betonipeitettä eli etäisyyttä teräksen pinnasta poikkileikkauksen alapintaan, joka näkyy kuvassa 29 arvona 132,0. Halkeamaväliksi tällöin pitkäaikaisella yhdistelmällä tulisi 558,5 mm, kun ulomman teräsrivin betonipeitteen mukaan laskettu arvo on 279,7 mm.

Reinforcement spacing is within this limit, so

$$\begin{aligned} s_{r,max} &= k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \Phi / \rho_{pmin} && \text{Expression (7,11)} \\ &= 3,4 \cdot 132,0 + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 32,0 / 0,04959 \\ &= 558,505 \text{ mm} \end{aligned}$$

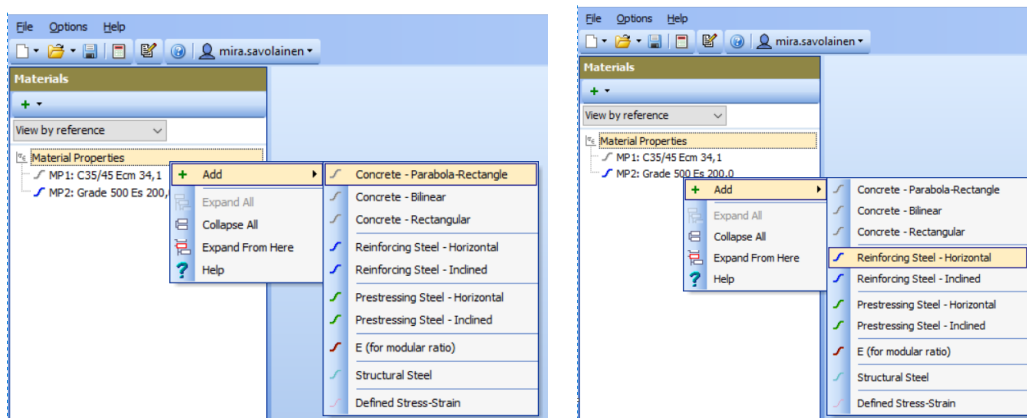
KUVA 29. Pitkäaikaisen yhdistelmän halkeamavälin laskenta ilman "Extreme face only" -valintaa, jolloin c:n arvo on 132,0 mm. (Kuvakaappaus SBD)

Laskennassa oli tämän tapauksen kohdalla suuri merkitys, käyttikö "Extreme face only" -valintaa. Tuloksena saatava suurin halkeama oli paljon pienempi valinnan kanssa. Ilman valintaa halkeamaleveys tavallisella yhdistelmällä oli noin 0,199 mm ja valinnan kanssa halkeamaleveys oli 0,131 mm. Pitkäaikaisella yhdistelmällä halkeamaleveys ilman "Extreme face only" valintaa oli n. 0,15 mm ja valinnan kanssa halkeamaleveys oli 0,105 mm. Tuloksiin vaikuttaa se, että raudoitus on osittain kahdessa rivissä. Käytettäessä valintaa "Extreme face only" halkeamaleveydet vastasivat ohjelmien välillä hyvin toisiaan (taulukko 9).

4.5 Vertailua menetelmien ominaisuuksiin liittyen

Painopiste vertailutietojen tuottamisessa on SBD-ohjelmassa niin, että SBD:n osalta voidaan joitakin asioita esittää yksityiskohtaisemmin.

SBD-ohjelmassa voi valita, käyttääkö laskennassa betonin paraabeli-suorakaide-kuviota vai yksinkertaistettua. Myös raudoituksen jännitys- muodonmuutoskäytöksen voi valita (kuva 30).



KUVA 30. Betonin ja raudoituksen jännitys- muodonmuutoskäytöksen valinta (kuvakaappaus SBD)

Halkeamaväli ja halkeamaleveys ilmoitetaan SBD:ssa millimetreinä ja KATAssa metreinä. Myös puristus- ja vetojännityksien arvot ovat ohjelmissa etumerkeiltään päivänvastaiset.

On kiinnitettävä raudoituksen mallintamisvaiheessa huomiota siihen, että raudoitukset vastaavat eri ohjelmissa toisiaan (kuva 31), koska eroa voi tulla, kun vedetään SBD:ssa kahden nurkkaraudan välille loput raudat käyttämällä tangon kappalemääriä.

18/5	567	32	MP2: Grade 500 Es 200,0						
75	567	32	MP2: Grade 500 Es 200,0				.075	0.567	3202
75	400	32	MP2: Grade 500 Es 200,0				2.025	.216	3200
75	233	32	MP2: Grade 500 Es 200,0				2.025	.584	3202
2025	567	32	MP2: Grade 500 Es 200,0				1.875	.148	3211

KUVA 31. Vasemmalla terästen koordinaatit SBD-ohjelmassa ja oikealla KATAssa (kuvakaappaus ohjelmista)

SBD näyttää kimmokertoimien suhteena käyttörajatilan pitkäaikaisen käyttötilan laskuissa suhdeluvun, jota Mathcadissa käytetään ominais- ja tavallisen tilan laskuissa. On kuitenkin ilmeistä saatujen tulosten perusteella, että käytetty suhde puristusvyöhykkeen korkeuden laskennassa on sama kuin Mathcadissa eli 17.6., koska puhtaassa taivutuksessa käyttörajatilassa yhdellä teräsriivillä puristuspuunnan korkeudet Mathcadissa ja SBD:ssa vastaavat toisiaan.

Opinnäytetyötä tehtäessä kävi esille, että SBD:ssa käyttörajatilan pitkäaikaista yhdistelmää laskettaessa ohjelma ilmoittaa joissakin tapauksissa betonin ja/tai teräksen jännitysten ylittymisestä (kuva 32). Huomiota herättävää ilmoituksessa oli, ettei se lukujen perusteella sovi tarkastelun alla olevan pitkäaikaisen yhdistelmän jännitysrajojen ylittymiseen vaan kokeiluiden perusteella kyseessä on ominaisyhdistelmän jännitysrajojen ylittyminen. Asiaan liittyen tehtiin tiedustelu Autodeskin SBD Forumilla. Vastauksessa todetaan KRT-ominaisyhdistelmän kuormien olevan tyypillisesti suurempia verrattuna pitkäaikaisyhdistelmän kuormiin, joten pitkäaikaisyhdistelmän kuormat eivät ole merkitseviä, mikäli poikkileikkauksen mitoitus ei ole hyväksyttävä ominaiskuormalla.

Opinnäytetyössä kokeiltiin vaihtoehtoa, jossa pitkäaikaisella yhdistelmässä ei niinkään pyritty sallittuun maksimihalkeamaleveyteen vaan jännitysrajan maksimiin (ei huomioitu kuormien suhdetta eri KRT yhdistelmien välillä), jolloin edellä mainittu ilmoitus tuli ohjelmasta. Voidaan todeta, että todellisessa mitoitusilanteessa tällaista ilmoitusta ei tule pitkäaikaisyhdistelmällä laskettaessa. SBD:iin syötetyillä nimenomaisen poikkileikkauksen ominaisyhdistelmän kuormien tuottamilla

jännityksillä ei ole vaikutusta ilmoituksen esille tulemiseen. Ohjelma ei toisin sanoen ota huomioon, vaikka käyttäjä on syöttänyt ominaisyhdistelmän kuormat kyseessä olevan poikkileikkauksen kohdalla ja saadut jännitykset ovat sallituissa rajoissa.

MAXIMUM Strains:		
Material Property	Strain	Stress MPa
C35/45 Ecm 34,1	0,0013363	15,179224
Grade 500 Es 200,0	0,0010405	208,0954


MINIMUM Strains:		
Material Property	Strain	Stress MPa
C35/45 Ecm 34,1	-0,002369	0,0
Grade 500 Es 200,0	-0,002073	-414,6834

WARNING - the section is over-stressed

Over-stress factors are:

Concrete in compression	0,711
Concrete in tension	n/a
Reinforcement in compression	0,520
Reinforcement in tension	1,037

Error

 **EN 1992-1-1 Clause 7.2(2) compression stress limit for exposure classes XD, XF and XS is exceeded.**

Overstress factors given in stress analysis results printout.

KUVA 32. Ilmoitus KRT ominaisyhdistelmän jännitysrajan ylittymisestä ja pitkäaikaisen yhdistelmän jännitykset (kuvakaappaus SBD)

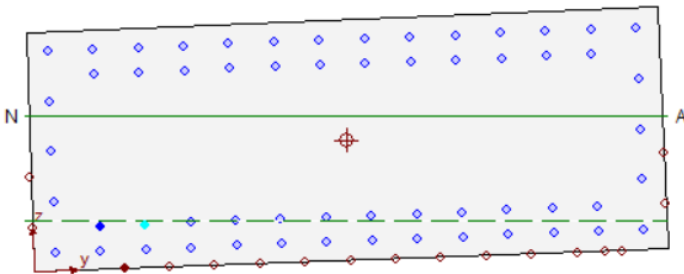
KATAn ohjekirjassa ei kerrota erikseen halkeamalaskentaan liittyen virumaluvusta. Kimmokertoimien suhde ohjelmassa huomioi virumaa. SBD:ssa pitkäaikaisen yhdistelmän jännityksiä voidaan käyttää määrittämään viruman lineaarisuutta tai epälineaarisuutta. Viruma on harvoin epälineaarinen teräsbetonipoikkileikkauksissa ja useammin esijännitetyissä rakenteissa. SBD-ohjelma laskee virumaluvun ja käyttää sitä laskelmissa vain, kun kohta "Specify creep coefficient" ei ole valittuna (kuva 21 sivulla 45). Mikäli virumaluku halutaan SBD-ohjelmalla laskea, täytyy tarkistaa myös muiden täytettäväksi tulevien arvojen oikeellisuus laskentaan liittyen kohdassa "Design Data for Serviceability Calculations".

SBD:ssa on otettava huomioon, että yleensä pitkäaikaisen yhdistelmän laskennassa ei tule esille $0,45 \cdot f_{ck}$ rajan ylittyminen erillisenä ilmoituksena muutoin kuin ajanhetkellä t_0 . Jännitysraja koskee kuitenkin jokaista ajanhetkeä, joten on kiinnitettävä huomiota varsinaiseen betonin jännitykseen tuloksissa. KATAssa ei erikseen ilmoiteta jännitysrajojen ylittymisestä vaan ohjelman käyttäjän tulee osata tulkita ohjelmasta saatuja betonin ja teräksen jännityksiä. Ominaisyhdistelmän jännitysrajan ylittymisestä betonin ja /tai terästen osalta ilmoitetaan SBD:ssa.

Kumpikaan ohjelma ei ilmoita erikseen liian suuresta halkeamaleveydestä, vaikka halkeamarajat SBD:ssa annettiin taulukkoon. Ohjelmissa ei ole huomioitu NCCI2 esille tuotua mahdollisuutta halkeamavälin korotukseen. Mathcad-laskentapohja ilmoittaa jännitysten ja halkeamaleveyksien ylitymisestä, mikä voi pienentää jonkin verran virheiden mahdollisuutta. SBD ei laske halkeamaleveyttä käyttörajatilan ominaisyhdistelmällä. KATA puolestaan laskee halkeamaleveyden myös ominaisyhdistelmällä.

Vertailun perusteella halkeamaleveyksissä ilmeni ohjelmien välillä suhteellisen pieniä eroja tuloksissa, useimmiten tuloksissa esiintyvät erot eivät olleet merkittäviä. On kuitenkin joitakin laskentaan liittyviä seikkoja, jotka tulee erityisesti SBD:ia käyttäessä ja tuloksia tulkitessa ottaa huomioon.

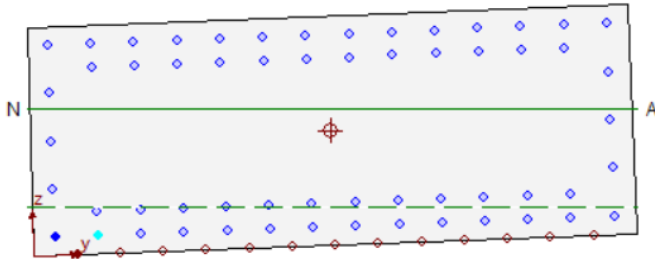
Suunnittelijan on käytettävä harkintaa SBD-ohjelmaa käyttäessä, kuinka luotettavana saatua halkeamaleveyttä pitää. Tapauksessa, jossa raudoitusta on joka sivulla ja osin 2-rivisenä selvitetiin, kuinka saada halkeamalaskennasta luotettavampia tuloksia. Tapauksen tuloksista on kerrottu aiemmin opinnäytteessä. Vastauksena selvitykseen ehdotettiin oikeamman tuloksen saamiseksi vain alimman teräsruuvin valitsemista halkeamalaskennan kohteeksi. Kuvassa 33 esitetään poikkileikkaus ilman ”Extreme face only” -valintaa.



KUVA 33. Halkeamalaskenta ilman ”Extreme face only” -valintaa. Maksimihalkeamaa osoittava punainen pallo on poikkileikkauksen piirillä sinisten pallojen keskivälillä. Siniset pallot ovat ylemmällä teräsruuvillä. (kuvakaappaus SBD)

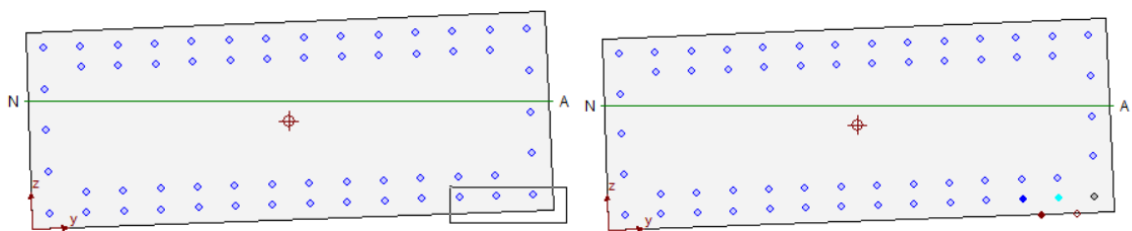
Suunnittelijan tulee arvioida tapauskohtaisesti, milloin luotettavampaan halkeamaleveyteen on mahdollista päästä valitsemalla vain osa raudoituksesta tai käyttämällä ”Extreme face only” -valintaa. ”Extreme face only” -valinta (kuva 34) rajoittaa halkeamalaskennan poikkileikkauksen niille sivuille, joita yhdistää teräksen kautta kulkeva linja, joka on 90 asteen kulmassa neutraaliakseliin

nähdessä (Autodesk 2022). Käytännössä kuvan 34 tapauksessa halkeamalaskenta rajautuu valinnalla poikkileikkauksen pidemmän sivun alimpaan teräsriiviin.



KUVA 34. Halkeamalaskenta "Extreme face only"-valinnalla. Maksimihalkeamaa osoittava punainen pallo on poikkileikkauksen piirillä sinisten pallojen keskivälillä. Siniset pallot ovat alimmalla teräsriivillä. (kuvakaappaus SBD)

Kuvassa 35 on halkeamalaskennan kohteeksi valittu vain osa teräksistä. Valitsemalla halkeamalaskennan kohteeksi vain tietyt teräkset saatiin merkittävästi erilaisia halkeamaleveyden arvoja maksihalkeamaan verrattuna. Esimerkiksi normaalivoiman ja taivutuksen rasittamassa tapauksessa, jossa teräksiä on kahdessa rivissä, saatiin SBD:lla tavallisella yhdistelmällä halkeamaleveydeksi pienimmillään 0,101 mm (maksimi 0,131 mm). Pitkäaikaisella yhdistelmällä valitsemalla laskeuden kohteeksi teräkset lähinnä oikeaa nurkkaa (kuva 35) saatiin halkeamaleveydeksi pienimmillään n. 0,0811 mm (maksimi 0,105 mm).



KUVA 35. Vasemmassa poikkileikkauksessa näkyy ruskea laatikko, jonka osoittaa halkeamalaskentaan valittuja teräksiä. Oikella olevassa poikkileikkauksessa valitut teräkset näkyvät sinisen ja ruskean värisinä ja piirille on ilmestynyt halkeaman kohtia ja maksimihalkeamaa esittävät ympyrät. Maksimihalkeama ei ole enää nurkassa. (kuvakaappaus SBD)

5 YHTEENVETO

Rakenneteknisessä suunnittelussa käytetään apuna ohjelmia, joilla voidaan täydentää käsin laskentaa. Työssä verrattiin Structural Bridge Design -ohjelmalla teräsbetonipoikkileikkauksen mitoituksista saatavia tuloksia yrityksessä jo käytössä olevalla KATA-ohjelmalla saatuihin tuloksiin sekä Mathcad-laskentapohjien avulla laskettuihin tuloksiin. Tavoitteena oli saada tietoa SBD-ohjelman mitoitustulosten luotettavuudesta sekä ohjelman käytettävyydestä ja soveltuvuudesta yrityksen tarpeisiin.

Työ toteutettiin tutustumalla mitoitukseen liittyviin standardeihin ja ohjeisiin, laskentapohjiin ja käytettäviin ohjelmiin. Opinnäytteessä tarkasteltiin aluksi teorian kautta pelkän taivutuksen sekä normaalivoiman ja taivutuksen kuormittaman poikkileikkauksen mitoitusta murtorajatilassa. Käyttörajatilassa tarkasteltiin teoriaa halkeamaleveyden rajoittamiseksi.

Opinnäytetyössä suoritettiin poikkileikkausten mitoittaminen eri menetelmien avulla ja kirjattiin ylös olennaiset havainnot sekä saadut tulokset. Mitoitus suoritettiin kolmessa pelkästään yhdestä suunnasta taivutusmomentin rasittamassa tapauksessa ja kahdessa tapauksessa, jossa vaikuttivat yhtä aikaa normaalivoima sekä molempien pääakselien suuntaiset momentit. Puhtaan taivutuksen kohdalla yhtenä menetelmänä oli mitoituksen suorittaminen hyödyntäen yrityksessä jo käytössä olevia Mathcad-laskentapohjia. Puhtaassa taivutuksessa tulosten vertailu suoritettiin SBD:n, KATA:n ja Mathcad-laskentapohjien välillä. Normaalivoiman ja taivutusmomentin vaikuttaessa yhtä aikaa tarkastelut suoritettiin SBD-ohjelmalla ja KATAlla.

Vertailua varten oli tarpeen tarkastella mitoituksen kannalta olennaisten seikkojen yhteneväisyyttä eri menetelmien välillä. Opinnäytetyössä asetettiin oikeat arvot SBD-ohjelmaan mitoituksen standardien mukaisuuden varmistamiseksi. SBD-ohjelmaa käyttäessä on tärkeää kiinnittää huomiota alkuarvojen oikeellisuuteen ja siihen, että kaikki tarpeellinen on oikein huomioituna laskelmien suorittamista varten, muun muassa kertoimet, kuormat ja poikkileikkauksen raudoitus.

Opinnäyteprosessin aikana saatiin hyvin tietoa myös KATA:n ja Mathcad-laskentapohjien toiminnasta ja toimivuudesta. Tulosten vertailua tehtäessä huomattiin, että teräkset 2 rivissä Mathcad-

laskentapohjassa on muutama päivitystarve kaavoihin liittyen. Laskentapohjan päivityksen jälkeen tulokset vastasivat hyvin SBD-ohjelman sekä KATA:n antamia tuloksia. Kun laskentaprosessit oli eri menetelmissä yhtenäistetty mahdollisimman monen mitoituksen kannalta olennaisen seikan osalta, saatiin SBD:lla tehdyssä laskennassa tuloksena suhteellisen vähän merkitsevän suuruisia eroavaisuuksia verrattuna KATA:lla ja laskentapohjilla suoritettuun laskentaan.

50 mm:n betonipeitteellä merkitsevän suuruisina pidettäviä eroja esiintyi käyttörajatilan pitkäaikaisen yhdistelmän halkeamaleveyksissä KATA:n tuloksissa verrattuna muiden menetelmien tuloksiin. KATA:n laskemaan halkeamalevyyteen syntyi pitkäaikaisella yhdistelmällä eroa sen vuoksi, että KATA vaikuttaa käyttävän venymäeron laskennassa eri kimmokerrointen suhteen arvoa kuin muut tarkastellut menetelmät.

70 mm:n betonipeitteellä käyttörajatilan tavallisella ja pitkäaikaisella yhdistelmällä SBD:n halkeamaväli ja -leveys erosivat muista menetelmistä laskennassa käytetyn betonipeitteen arvon vuoksi. NCCI 2:ssa esitetty c_{min} 50 mm:n rajoitus betonipeitteeseen halkeamalaskennassa on otettu huomioon Mathcad-laskentapohjassa, mutta ei ohjelmissa. KATA:ssa on kuitenkin mahdollista asettaa laskennassa käytettävä betonipeite 50 mm rajoituksen mukaiseksi. Jatkossa SBD:ssa tulee halkeamalevyyden laskennassa ottaa huomioon eri betonipeitteen vaikutus ja tutkia edelleen, miten päästäisiin laskentapohjan kanssa yhteneviin tuloksiin kaikenlaisilla betonipeitteen arvoilla.

Opinnäytetyössä havaittiin, että menetelmistä saatavien tulosten kriittinen tarkastelu sekä eri ohjelmien välinen vertailu ja niiden ominaisuuksiin tutustuminen lisää käsitystä laskentamenetelmillä saatavien tulosten luotettavuudesta. SBD:n käyttäminen vaatii suunnittelijalta ohjelman eri ominaisuuksien sisäistämisen, jotta ohjelmasta haluttu laskennan tulos on oikein. Esimerkiksi halkeamalevyyden määrittämisessä on SBD:ssa mahdollista käyttää "Extreme face only" -valintaa tai valita vain osa teräksistä, joille halkeamaleveys lasketaan. Tuloksissa on merkittäviä eroja valinnoista riippuen. KATA:ssa annettu halkeamaleveys on yksiselitteinen.

Varmuutta tulosten tulkintaan saa lisää, kun ohjelmaa testataan edelleen useammilla poikkileikkauksilla. Käytön myötä päästään yhä paremmin käsiksi ohjelman logiikkaan ja siihen, mitä voi ja kannattaa tehdä laskennan luotettavuuden varmistamiseksi. Opinnäytetyössä toteutusta rajaa käytettävissä oleva aika. Kahden menetelmän käyttäminen rinnakkain tuo lisävarmuutta mitoitukseen, erityisesti aluksi uuden ohjelman kanssa.

Opinnäytetyössä tehtyjen tarkasteluiden ja vertailuiden perusteella voidaan todeta SBD:n olevan käyttökelpoinen työkalu poikkileikkausten mitoitukseen, kun huomioidaan ohjelman rajoitukset koskien halkeamalaskennassa käytettävää betonipeitteen arvoa sekä arvioidaan kriittisesti tapauskohtaisesti ”Extreme face only” -valinnan käyttämistä tai sitä, milloin on tarkoituksenmukaista suorittaa halkeamalaskenta vain tietyille teräksille.

LÄHTEET

1. Asikainen, Heikki 2012. KATa KaksiAkselinen Taivutus Versio 3.0 14.10.2012.
2. Autodesk 2019. Autodesk Structural Bridge Design. Examples Manual Eurocodes.
3. Autodesk 2022. Structural Bridge Design -ohjelman sisällä olevan Help.
4. Honkanen, Iiro 2015. Teräsbetonirakenteiden halkeamaleveyden mitoitus. Metropolia ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Insinöörityö. Hakupäivä 4.2.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/90519/Honkanen_Iiro.pdf?sequence=1.
5. Huovinen, Seppo 1990. Betonirakenteiden suunnittelun erikoiskurssi VII 1990. Suomen Betoniyhdistys r.y. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki: Valopaino Oy.
6. Insinööritoimisto Ponvia Oy 2022. Etusivu. Hakupäivä 22.4.2022. <https://www.ponvia.fi/>.
7. Jalonen, Juha 2013. Levennettävän betonisillan pakkovoimien hallinta. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Hakupäivä 4.2.2022. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21908/jalonen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
8. Leskelä, Matti 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus by 210. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
9. Liikennevirasto 2017. Liikenneviraston ohjeita 24/2017. Eurokoodin soveltamisohje. Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet-NCCI1. Helsinki: Liikennevirasto. Hakupäivä 23.4.2022. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-24_ncci1_web.pdf.
10. Megson, T.H.G 2014. Structural and Stress Analysis Third Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.
11. Salmi, Tapio & Pajunen, Sami 2010. Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy.

12. Suomen Betoniyhdistys ry 2016a. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja, osa 2 2013 by 211. Vaasa: Oy Fram Ab.
13. Suomen Betoniyhdistys 2016b. Betonin kutistuman ja halkeilun hallinta 2016 by 67. Vaasa: Oy Fram Ab.
14. Suomen Betoniyhdistys ry 2015. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja, osa 1 2013 by 211. Tampere: Tammerprint.
15. Suomen Betoniyhdistys ry 2012. Betonitekniikan oppikirja 2005 by 201. Vantaa: Multiprint Oy.
16. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. SFS-EN 1992-1-1 +A1+AC. Hakupäivä 30.12.2021 <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/377991.html.stx>.
17. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2006. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Betonisillat. Mitoittaminen ja yksityiskohtien suunnittelu. SFS-EN 1992-2 +AC. Hakupäivä 2.1.2022 <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/119561.html.stx>.
18. Väylävirasto 2022. Väyläviraston ohjeita 5/2022. Eurokoodin soveltamisohje Betonirakenteiden suunnittelu-NCCI 2. Helsinki: Väylävirasto. Hakupäivä 10.2.2022 https://julkaisut.vayla.fi/pdf22/vo_2022-5_NCCI_2_web.pdf.

KATAN TULOKSET

LIITE 1/1

Ins.tsto Ponvia Oy / MXZ2P.DAT 1
 KOHDE: 16.03.2022
 LASK.: / 1.1 KATA 3.1 / (c) HA

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET KUORMITUKSITTAIN:

NRO	N	Mx	My	GAM	E	Fcd	Fyd
	Ec-	Sc-	Es-	Ss-	Wk		
	Ec+	Sc+	Es+	Ss+	Ep+	Sp+	
1	-1.500000	6.000000	1.800000	3.326849	-0.118040	22.00	455.00
	-0.001812	-21.806608	-0.001440	-288.093750			
	0.003063	0.000000	0.002691	455.000000			
2	-1.200000	3.100000	0.700000	1.883570	-0.155960	Es/Ec=	6.00
	-0.000616	-20.536560	-0.000465	-92.925621	0.000249		
	0.001307	0.000000	0.001155	231.012741			
3	-0.950000	1.950000	0.600000	2.577490	-0.150427	Es/Ec=	6.00
	-0.000405	-13.505592	-0.000310	-62.084984	0.000132		
	0.000816	0.000000	0.000722	144.340042			
4	-0.600000	1.350000	0.300000	2.243639	-0.074523	Es/Ec=	18.00
	-0.000446	-4.951975	-0.000362	-72.371857	0.000091		
	0.000627	0.000000	0.000543	108.643028			

MRT:

+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
+													+
+													+
+													+
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

MAT.VAKIOT: HALKEILLUT
 Fcd = 22.000000 Fyd = 455.000000 Es = 200000

VOIMAT:
 N = -1.500000 Mx = 6.000000 My = 1.800000 Np = 0.000000

POIKKILEIKKAUS:
 Ex = 1.049999 Ey = 0.400000 A = 2.598087
 Ac = 1.680001 As = 0.046646
 Ix = 0.164934 Iy = 0.971596 Ixy = -0.000000
 I1 = 0.971596 I2 = 0.164934 ALF = -90.000015

KATAN TULOKSET

LIITE 1/2

NEUTR.AKSELI:

GAM = 3.326849 E = -0.118040

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET:

Ec- = -0.001812	Ec+ = 0.003063	
Sc- = -21.806608	Sc+ = 0.000000	HALKEILLUT
Es- = -0.001440	Es+ = 0.002691	
Ss- = -288.093750	Ss+ = 455.000000	

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET:

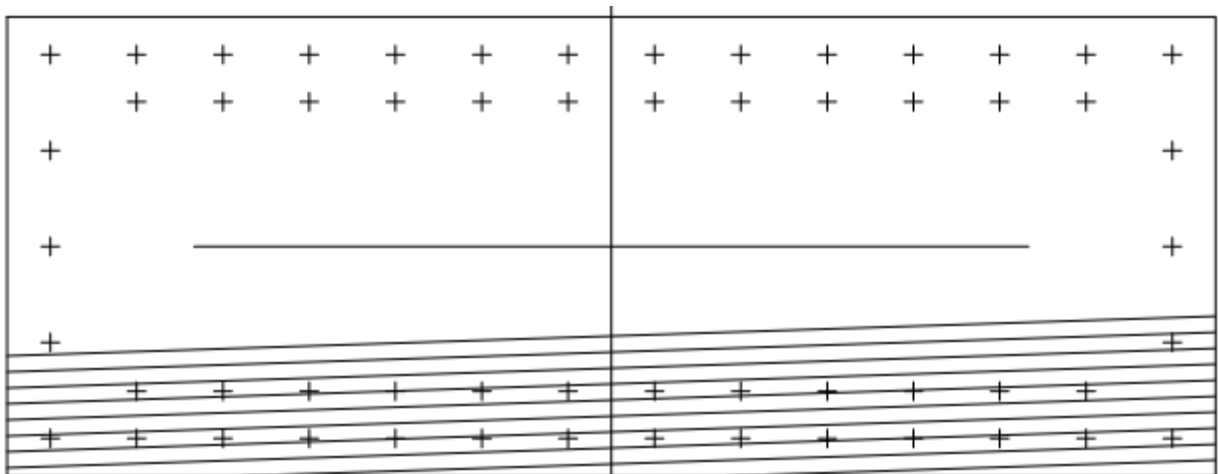
PIIRIN PISTEET:

NRO	X	Y	EPS	SIG
1	0.000000	0.000000	-0.001167	-18.184021
2	2.100000	0.000000	-0.001812	-21.806608
3	2.100000	0.800000	0.002417	0.000000
4	0.000000	0.800000	0.003063	0.000000

TERÄKSET:

NRO	X	Y	EPS	SIG	MDDGG
1	0.075000	0.066000	-0.000841	-168.226257	3200
2	2.025000	0.066000	-0.001440	-288.093750	3213
3	0.075000	0.734000	0.002691	455.000000	3200
4	2.025000	0.734000	0.002091	418.296080	3213
5	0.075000	0.233000	0.000042	8.371190	3200
6	0.075000	0.567000	0.001808	361.566040	3202
7	2.025000	0.233000	-0.000557	-111.496300	3200
8	2.025000	0.567000	0.001208	241.698563	3202
9	0.225000	0.148000	-0.000454	-90.734314	3200
10	1.875000	0.148000	-0.000961	-192.160629	3211
11	0.225000	0.652000	0.002211	442.230470	3200
12	1.875000	0.652000	0.001704	340.804140	3211

**KRT ominaisyhdistelmä:
suhdeluku 6**



KATAN TULOKSET

LIITE 1/3

MAT.VAKIOT:

Ecm = 33333 Es = 200000

HALKEILLUT

VOIMAT:

N = -1.200000 Mx = 3.100000 My = 0.700000 Np = 0.000000

POIKKILEIKKAUS:

Ex = 1.049999 Ey = 0.400000 A = 1.913233
 Ac = 1.680001 As = 0.046646
 Ix = 0.108738 Iy = 0.707381 Ixy = -0.000000
 I1 = 0.707381 I2 = 0.108738 ALF = -90.000031

NEUTR.AKSELI:

GAM = 1.883570 E = -0.155960

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET:

Ec- = -0.000616 Ec+ = 0.001307
 Sc- = -20.536560 Sc+ = 0.000000 HALKEILLUT
 Es- = -0.000465 Es+ = 0.001155
 Ss- = -92.925621 Ss+ = 231.012741

HALKEILUTARKASTELU:

Wk = 0.000249 K1 = 0.800000 Fctm = 3.200000

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET:

PIIRIN PISTEET:

NRO	X	Y	EPS	SIG
1	0.000000	0.000000	-0.000463	-15.443735
2	2.100000	0.000000	-0.000616	-20.536560
3	2.100000	0.800000	0.001154	0.000000
4	0.000000	0.800000	0.001307	0.000000

TERÄKSET:

NRO	X	Y	EPS	SIG	MDDGG
1	0.075000	0.066000	-0.000323	-64.551308	3200
2	2.025000	0.066000	-0.000465	-92.925621	3213
3	0.075000	0.734000	0.001155	231.012741	3200
4	2.025000	0.734000	0.001013	202.638428	3213
5	0.075000	0.233000	0.000047	9.339712	3200
6	0.075000	0.567000	0.000786	157.121719	3202
7	2.025000	0.233000	-0.000095	-19.034605	3200
8	2.025000	0.567000	0.000644	128.747406	3202
9	0.225000	0.148000	-0.000152	-30.452124	3200
10	1.875000	0.148000	-0.000272	-54.461159	3211
11	0.225000	0.652000	0.000963	192.548294	3200
12	1.875000	0.652000	0.000843	168.539246	3211

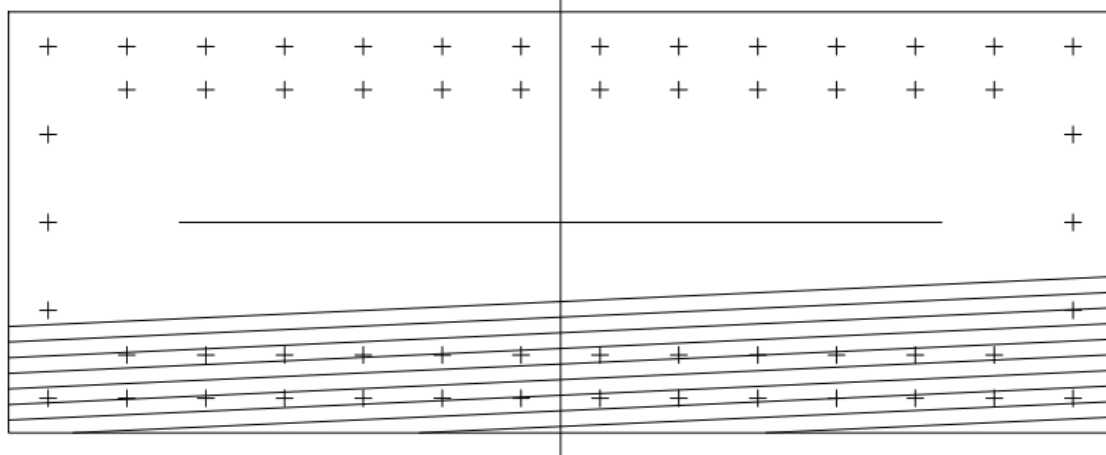
HALKEILUTARKASTELU:

Escm = 0.00092 Ase = 0.01850 K1 = 0.8000 K2 = 0.5000 Kt = 0.6000
 Fii = 0.03200 Ace = 0.34089 C = 0.0500 Ke = 0.7970 Srm = 0.2704

KATAN TULOKSET

LIITE 1/4

KRT tavallinen yhdistelmä:
suhdeluku 6



MAT.VAKIOT:

Ecm = 33333 Es = 200000

HALKEILLUT

VOIMAT:

N = -0.950000 Mx = 1.950000 My = 0.600000 Np = 0.000000

POIKKILEIKKAUS:

Ex = 1.049999 Ey = 0.400000 A = 1.913233
 Ac = 1.680001 As = 0.046646
 Ix = 0.108738 Iy = 0.707381 Ixy = -0.000000
 I1 = 0.707381 I2 = 0.108738 ALF = -90.000031

NEUTR.AKSELI:

GAM = 2.577490 E = -0.150427

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET:

Ec- = -0.000405 Ec+ = 0.000816
 Sc- = -13.505592 Sc+ = 0.000000 HALKEILLUT
 Es- = -0.000310 Es+ = 0.000722
 Ss- = -62.084984 Ss+ = 144.340042

HALKEILUTARKASTELU:

Wk = 0.000132 K1 = 0.800000 Fctm = 3.200000

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET:

PIIRIN PISTEET:

NRO	X	Y	EPS	SIG
1	0.000000	0.000000	-0.000276	-9.202293
2	2.100000	0.000000	-0.000405	-13.505592
3	2.100000	0.800000	0.000687	0.000000
4	0.000000	0.800000	0.000816	0.000000

TERÄKSET:

NRO	X	Y	EPS	SIG	MDDGG
1	0.075000	0.066000	-0.000191	-38.109455	3200
2	2.025000	0.066000	-0.000310	-62.084984	3213
3	0.075000	0.734000	0.000722	144.340042	3200
4	2.025000	0.734000	0.000602	120.364502	3213
5	0.075000	0.233000	0.000038	7.502917	3200

KATAN TULOKSET

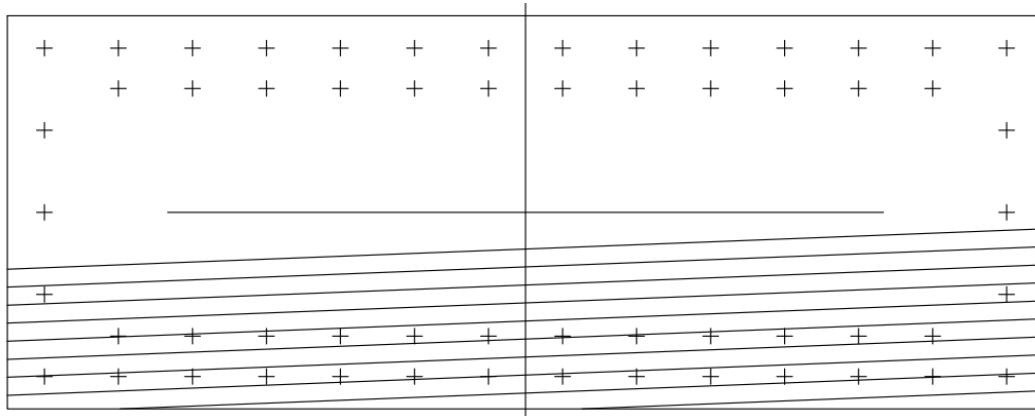
LIITE 1/5

6	0.075000	0.567000	0.000494	98.727654	3202
7	2.025000	0.233000	-0.000082	-16.472609	3200
8	2.025000	0.567000	0.000374	74.752121	3202
9	0.225000	0.148000	-0.000088	-17.557230	3200
10	1.875000	0.148000	-0.000189	-37.844208	3211
11	0.225000	0.652000	0.000600	120.099258	3200
12	1.875000	0.652000	0.000499	99.812271	3211

HALKEILUTARKASTELU:

Escm= 0.00048 Ase = 0.01689 K1 = 0.8000 K2 = 0.5000 Kt = 0.6000
 Fii = 0.03200 Ace = 0.31924 C = 0.0501 Ke = 0.6688 Srm = 0.2731

KRT Pitkäaikainen yhdistelmä:
 suhdeluku 18



MAT.VAKIOT:

Ecm = 11111 Es = 200000

HALKEILLUT

VOIMAT:

N = -0.600000 Mx = 1.350000 My = 0.300000 Np = 0.000000

POIKKILEIKKAUS:

Ex = 1.049999 Ey = 0.400000 A = 2.472990
 Ac = 1.680001 As = 0.046646
 Ix = 0.154669 Iy = 0.923333 Ixy = -0.000000
 I1 = 0.923333 I2 = 0.154669 ALF = -90.000015

NEUTR.AKSELI:

GAM = 2.243639 E = -0.074523

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET:

Ec- = -0.000446 Ec+ = 0.000627
 Sc- = -4.951975 Sc+ = 0.000000 HALKEILLUT
 Es- = -0.000362 Es+ = 0.000543
 Ss- = -72.371857 Ss+ = 108.643028

HALKEILUTARKASTELU:

Wk = 0.000091 K1 = 0.800000 Fctm= 3.200000

KATAN TULOKSET

LIITE 1/6

MUODONMUUTOKSET JA JÄNNITYKSET:

PIIRIN PISTEET:

NRO	X	Y	EPS	SIG
1	0.000000	0.000000	-0.000346	-3.840480
2	2.100000	0.000000	-0.000446	-4.951975
3	2.100000	0.800000	0.000527	0.000000
4	0.000000	0.800000	0.000627	0.000000

TERÄKSET:

NRO	X	Y	EPS	SIG	MDDGG
1	0.075000	0.066000	-0.000269	-53.793995	3200
2	2.025000	0.066000	-0.000362	-72.371857	3213
3	0.075000	0.734000	0.000543	108.643028	3200
4	2.025000	0.734000	0.000450	90.065178	3213
5	0.075000	0.233000	-0.000066	-13.184742	3200
6	0.075000	0.567000	0.000340	68.033768	3202
7	2.025000	0.233000	-0.000159	-31.762600	3200
8	2.025000	0.567000	0.000247	49.455906	3202
9	0.225000	0.148000	-0.000176	-35.283188	3200
10	1.875000	0.148000	-0.000255	-51.002911	3211
11	0.225000	0.652000	0.000436	87.274094	3200
12	1.875000	0.652000	0.000358	71.554375	3211

HALKEILUTARKASTELU:

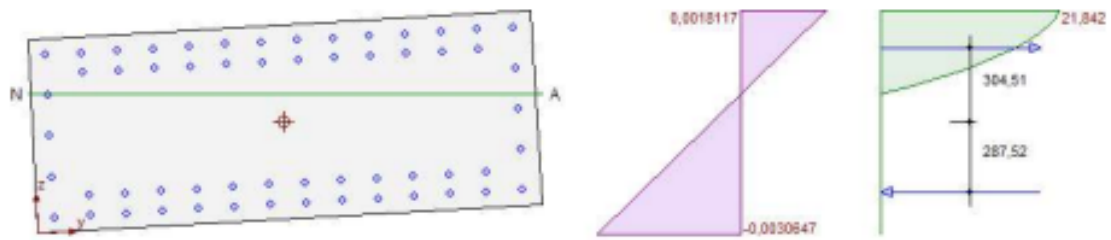
Escm= 0.00033 Ase = 0.01367 K1 = 0.8000 K2 = 0.5000 Kt = 0.4000
 Fii = 0.03200 Ace = 0.27461 C = 0.0501 Ke = 0.6000 Srm = 0.2794

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job: Calc. By:
 Section: Untitled Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808, Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 17.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Ultimate Limit State : STR with recommended NDP values (modified)
 for the Persistent/Transient Combination of Actions



Ref. S11: Loadcase

Neutral axis free to rotate
 Neutral axis angle (applied loads) = 3,32807° (clockwise from yy)

depth in compression = 342,00893 mm

MAXIMUM Strains:

Material Property	Strain	Stress MPa	location	
			y	x
C35/45 Ecm 34,1	0,0018117	21,841687	2100,0	800,0
Grade 500 Re 200,0	0,0014396	287,92096	2025,0	734,0

MINIMUM Strains:

Material Property	Strain	Stress MPa	location	
			y	x
C35/45 Ecm 34,1	-0,0030645	0,0	0,0	0,0
Grade 500 Re 200,0	-0,002693	-454,5455	75,0	66,0

LOADING relative to centroidal axes:

	Applied Loads	Applied Strains	Spare Resistance	(Internal Forces)
Ny kN.m	6000,0	none	n/a	6000,0212
Nz kN.m	1800,0	none	n/a	1800,0115
Ax kN	1500,0	none	n/a	1500,2214

Summary of Internal Forces

Force	Acting

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job: Calc. By:
 Section: Untitled Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808, Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 17.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Ultimate Limit State, STR with recommended NDP values (modified) for the Persistent/Transient Combination of Actions

compression force, F_{cd}

- concrete	7334,5001	762,222
- reinforcement	3688,2395	769,885
- combined	11022,74	764,786

tension force, F_{td}

- reinforcement	-9522,518	172,741
-----------------	-----------	---------

Note: Moments arising from eccentricity of axial loads are relative to the centroidal axis of the section.
 The transformed section centroid is used.

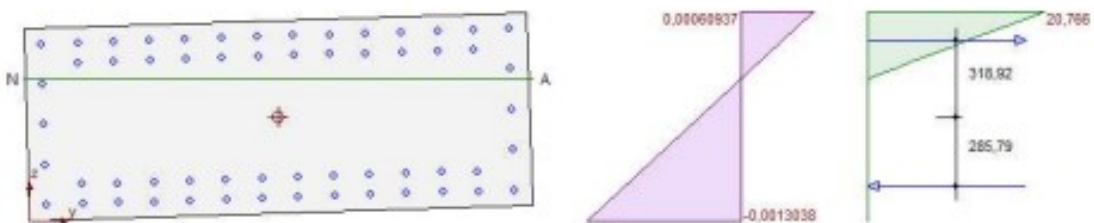
End

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job: Calc. By:
 Section: Untitled Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808, Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 17.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified) for the Characteristic Combination of Actions



Ref. S14: Loadcase

Neutral axis free to rotate
 Neutral axis angle (applied loads) = 1,88002° (clockwise from yy)

Short term elastic modulus value used

MAXIMUM Strains:

Material Property	Strain	Stress MPa	location	
			y	x
C35/45 Ecm 34,1	6,0937E-4	20,765588	2100,0	800,0
Grade 500 Es 200,0	4,5843E-4	91,726974	2025,0	734,0

MINIMUM Strains:

Material Property	Strain	Stress MPa	location	
			y	x
C35/45 Ecm 34,1	-0,001304	0,0	0,0	0,0
Grade 500 Es 200,0	-0,001153	-230,4108	75,0	66,0

LOADING relative to centroidal axes:

	Applied Loads	Applied Strains	Spare Resistance	(Internal Forces)
Permanent				
My kN.m	1100,0	none	n/a	
Mz kN.m	700,0	none	n/a	
Ax kN	1200,0	none	n/a	
Variable				
My kN.m	0,0	none	n/a	1099,9438
Mz kN.m	0,0	none	n/a	701,69541
Ax kN	0,0	none	n/a	1200,0122

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job: Calc. By:
 Section: Untitled Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808_Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 17.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)
 for the Characteristic Combination of Actions

Summary of Internal Forces

	Force kN	Acting Height mm
compression force, $F_{c,d}$		
- concrete	4658,9399	755,367
- reinforcement	1069,7977	743,516
- combined	5728,7376	753,154
tension force, $F_{t,d}$		
- reinforcement	-4528,725	148,44

Note: Moments arising from eccentricity of axial loads are relative to the centroidal axis of the section.
 The transformed section centroid is used.

End

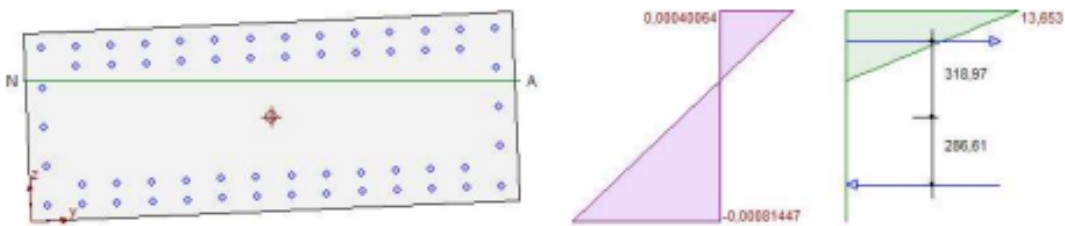
YOUR LOGO INSERTED HERE

Job:
Section: Untitled

Calc. By:
Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808_Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö... \Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 17.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)
for the Frequent Combination of Actions



Ref. SL3: Loadcase

Neutral axis free to rotate
Neutral axis angle (applied loads) = 2,56811° (clockwise from yy)

Short term elastic modulus value used

MAXIMUM Strains:

Material Property	Strain	Stress MPa	location	
			y	x
C35/45 Ecm 34,1	4,0064E-4	13,652837	2100,0	800,0
Grade 500 Ra 200,0	3,0439E-4	61,277319	2025,0	734,0

MINIMUM Strains:

Material Property	Strain	Stress MPa	location	
			y	x
C35/45 Ecm 34,1	-8,145E-4	0,0	0,0	0,0
Grade 500 Ra 200,0	-7,202E-4	-144,0414	75,0	66,0

LOADING relative to centroidal axes:

	Applied Loads	Applied Strains	Spare Resistance	(Internal Forces)
Permanent				
My kN.m	0,0	none	n/a	
Mz kN.m	0,0	none	n/a	
Ax kN	0,0	none	n/a	
Variable				
My kN.m	1950,0	none	n/a	1949,9799
Mz kN.m	600,0	none	n/a	600,42159
Ax kN	950,0	none	n/a	950,00209

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job: Calc. By:
 Section: Untitled Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808, Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 17.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)
 for the Frequent Combination of Actions

Summary of Internal Forces

	Force kN	Acting Height mm
compression force, F_{ed}		
- concrete	3021,8322	767,577
- reinforcement	689,00487	757,021
- combined	3710,8371	765,617
tension force, F_{ed}		
- reinforcement	-2760,835	140,039

Note: Moments arising from eccentricity of axial loads are relative to the centroidal axis of the section.
 The transformed section centroid is used.

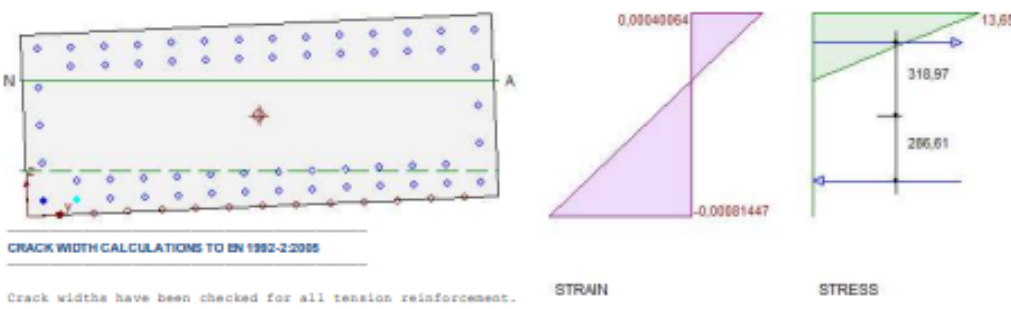
Rnd

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job: Calc. By:
 Section: Untitled Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808, Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 17.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)
 for the Frequent Combination of Actions



CRACK WIDTH CALCULATIONS TO EN 1992-2:2005

Crack widths have been checked for all tension reinforcement.

Calculation of effective area

overall depth $h = 893,291$ mm
 steel centroid depth $d = 733,252$ mm
 neutral axis depth $x = 294,535$ mm
 height of effective area is the least of
 $2,5 * (h - d) = 400,097$
 $(h - x) / 3 = 199,585$
 therefore $h_{eff} = 199,585$ mm
 effective area $A_{s,eff} = 3,20725$ mm²

Summary of data

For critical bar:
 location of bar $y = 75,0$ mm $z = 66,0$ mm
 tension strain in bar $\epsilon_s = 7,2E-4$
 modulus of elasticity $E_s = 200,0$ GPa
 stress in the bar $\sigma_s = 144,041$ MPa
 cover to bar $c = 50,0$ mm
 equivalent diameter, Exp(7,12) $\phi = 32,0$ mm
 spacing to adjacent bar $s_p = 150,0$ mm

modulus of elasticity of concrete $E_{cm} = 34,0771$ GPa
 when cracking first expected,
 age of concrete is 28 days or more,
 for which...
 tensile strength of concrete $f_{ct,eff} = 3,20996$ MPa
 modular ratio $\alpha = E_s / E_{cm} = 5,86904$

area of tension steel within $A_{s,eff}$ $A_s' = 16889,2$ mm²
 area of tendons within $A_{s,eff}$ $A_p' = 0,0$ mm²
 largest bar diameter $\phi_s = 32,0$ mm
 load duration factor $\lambda_s = 0,6$

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job: Untitled Calc. By:
 Section: Untitled Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808, Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 17.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)
 for the Frequent Combination of Actions $k_1 = 0,0$

greater tensile strain of section $\epsilon_1 = 8,842E-4$
 lesser tensile strain of section $\epsilon_2 = 0,0$
 strain distribution coefficient
 $k_2 = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / (2 * \epsilon_1) = 0,5$
 $k_3 = 3,4$
 $k_4 = 0,425$

Calculation of crack width: w (7.3.4)

$$w_k = \sigma_{s,max} \cdot (f_{sm} - f_{sm}) \quad \text{Expression (7,8)}$$

Calculate $\sigma_{s,max} - f_{sm}$

$$f_{sm} - f_{sm} = \frac{\sigma_s - k_1 \cdot (f_{ct,eff} / \rho_{s,eff}) \cdot (1 + \alpha \cdot \rho_{p,eff})}{k_2}$$

where,
 $\rho_{p,eff} = (A_s' + \epsilon_1 \cdot A_p') / A_{s,eff}$ Expression (7,10) (2)
 $\epsilon_1 = \sqrt{\xi}$ Expression (7,5)
 $= 0,89442$

hence,
 $\rho_{p,eff} = (16889,2 + 0,89442 * 0,0) / 3,20725$
 $= 0,05267$

so,

$$f_{sm} - f_{sm} = \frac{1,4425 - 0,6 * (3209,96 / 0,05267) * (1 + 5,86904 * 0,05267)}{2,028}$$

$$= 4,812E-4$$

$$0,6 * \alpha_s / E_s = 0,6 * 144,041 / 200,0$$

$$= 4,322E-4$$

therefore,
 $f_{sm} - f_{sm} = 4,812E-4$

Calculate maximum crack spacing: $s_{r,max}$

The bar spacing limit is given by the expression,

$$s = (c + \phi/2)$$

$$= 5 + (50,0 + 32,0 / 2)$$

$$= 330,0 \text{ mm}$$

Reinforcement spacing is within this limit, so

$$s_{r,max} = k_1 \cdot c + k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \phi / \rho_{p,eff} \quad \text{Expression (7.11)}$$

$$= 3,4 \cdot 50,0 + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 32,0 / 0,05267$$

$$= 273,282 \text{ mm}$$

Calculate crack width

$$w_k = s_{r,max} \cdot (f_{sm} - f_{m1})$$

$$= 273,282 \cdot 4,812 \cdot 10^{-4}$$

$$= 0,13141 \text{ mm}$$

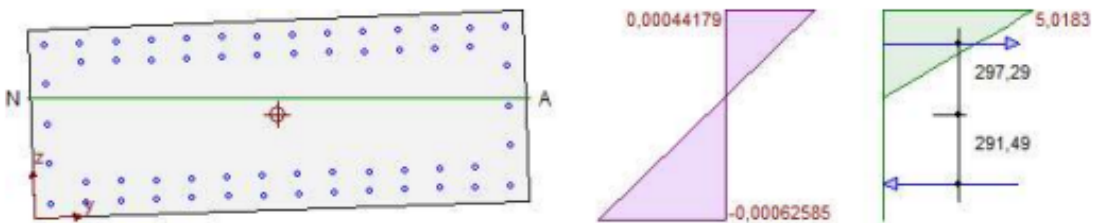
[1] Area of steel within the effective area of concrete in tension is used in this expression.

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job: Calc. By:
 Section: Checked: Untitled

Data File: P:\Sillat\2021\2808, Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 16.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)
 for the Quasi-Permanent Combination of Actions



Ref. SL2: Loadcase

Neutral axis free to rotate
 Neutral axis angle (applied loads) = 2,24037° (clockwise from yy)

$$E_{s,long} = E_s / (1 + \phi)$$

for MP1: C35/45 Ecm 34,1 $\phi = 2,0$

$$E_{s,long} = 11,359 \text{ GPa}$$

Long term elastic modulus value used

Creep coefficient for concrete - EN 1992-2 Annex B

The value for creep coefficient has been specified in the data as:

$$\phi(t, t_0) = 2,0$$

Check for creep non-linearity EN 1992-1-1 clause 3.1.4(4):

At the level of the centroid of the tendons, the compressive stress in the concrete at time

$$t_0 = 3,871 \text{ MPa}$$

This does not exceed $0,45 \cdot f_{cm}(t_0)$, i.e. 15,75 MPa, so non-linear creep is not considered

STRAIN

STRESS

MAXIMUM Strains:

Material Property	Strain	Stress MPa	location	
			y	x
C35/45 Ecm 34,1	4,4179E-4	5,0183295	2100,0	800,0
Grade 500 Es 200,0	3,3836E-4	71,672578	2025,0	734,0

MINIMUM Strains:

Autodesk Structural Bridge Design (22.0.0.147)
© 2022 Autodesk, Inc. All rights reserved.

24/3/2022 11:57 ap.

1

YOUR LOGO INSERTED HERE

Job:
Section: **Untitled**

Calc. By:
Checked:

Data File: P:\Sillat\2021\2808, Poikkileikkauksen mitoitus Bridge design-ohjelmalla, insinöö...\Yhdistetty_MXZ2P.sam 18.3.2022 16.15.54

ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)
for the Quasi-Permanent Combination of Actions

	MPa	y	location	
			x	
C35/45 Ecm 34,1	-6,258E-4	0,0	0,0	0,0
Grade 500 Es 200,0	-5,424E-4	-108,4842	75,0	66,0

LOADING relative to centroidal axes:

	Applied Loads	Applied Strains	Spare Resistance	(Internal Forces)
Permanent				
My kN.m	1350,0	none	n/a	
Mz kN.m	300,0	none	n/a	
Ax kN	600,0	none	n/a	
Variable				
My kN.m	0,0	none	n/a	1349,9819
Mz kN.m	0,0	none	n/a	300,44764
Ax kN	0,0	none	n/a	600,00045

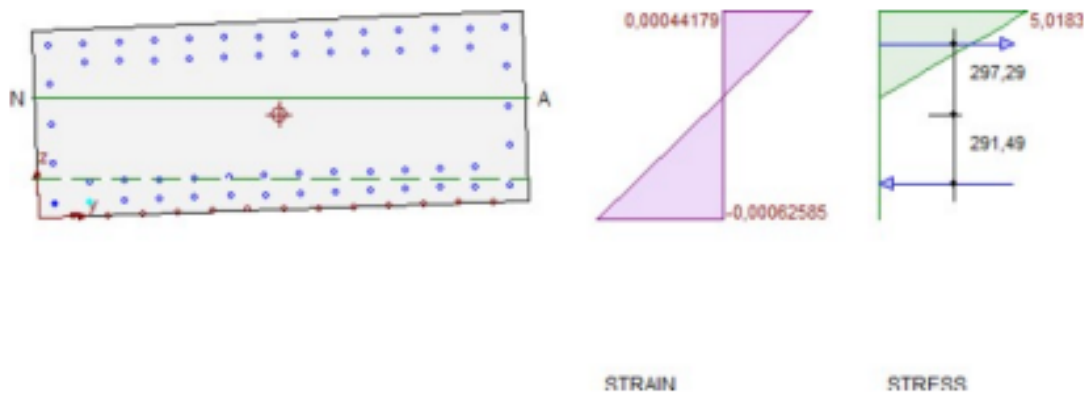
Summary of Internal Forces

	Force kN	Acting Height mm
compression force, F_{sd}		
- concrete	1523,8508	734,717
- reinforcement	1084,2159	742,696
- combined	2608,0667	738,034
tension force, F_{sd}		
- reinforcement	-2008,066	149,249

Note: Moments arising from eccentricity of axial loads are relative to the centroidal axis of the section.
The transformed section centroid is used.

End

YOUR LOGO INSERTED HERE	
Job: Section: Untitled	Calc. By: Checked:
ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)	



CRACK WIDTH CALCULATIONS TO EN 1992-2:2005

Crack widths have been checked for all tension reinforcement.

Calculation of effective area

overall depth		h = 881,481 mm
steel centroid depth		d = 732,232 mm
neutral axis depth		x = 364,758 mm
height of effective area is the least of		
$2,5 * (h - d)$		= 373,123
$(h - x) / 3$		= 172,241
	therefore	$h_{o,eff} = 172,241$ mm
effective area		$A_{o,eff} = 2,757E5$ mm ²

Summary of data

For critical bar:
 location of bar $y = 75,0 \text{ mm}$ $z = 66,0 \text{ mm}$
 tension strain in bar $\epsilon_s = 5,42\text{E-}4$
 modulus of elasticity $E_s = 200,0 \text{ GPa}$
 stress in the bar $\sigma_s = 108,484 \text{ MPa}$
 cover to bar $c = 50,0 \text{ mm}$
 equivalent diameter, Exp(7,12) $\varphi = 32,0 \text{ mm}$
 spacing to adjacent bar $sp = 150,0 \text{ mm}$

 modulus of elasticity of concrete $E_{cm} = 34,0771 \text{ GPa}$
 when cracking first expected,
 age of concrete is 28 days or more,
 for which..

Autodesk Structural Bridge Design (22.0.0.147)
 © 2022 Autodesk, Inc. All rights reserved.

24/3/2022 12:29 ip.

1



YOUR LOGO INSERTED HERE	
Job: Section: Untitled	Calc. By: Checked:
ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)	

tensile strength of concrete $f_{ct,eff} = 3,20996 \text{ MPa}$
 modular ratio $\alpha = E_s / E_{cm} = 5,86904$

 area of tension steel within $A_{s,eff}$ $A_s' = 13672,2 \text{ mm}^2$
 area of tendons within $A_{p,eff}$ $A_p' = 0,0 \text{ mm}^2$
 largest bar diameter $\varphi_s = 32,0 \text{ mm}$
 load duration factor $k_c = 0,4$
 bond strength ratio $\xi = 0,8$
 bond distribution coefficient $k_1 = 0,8$
 greater tensile strain of section $\epsilon_1 = 6,26\text{E-}4$
 lesser tensile strain of section $\epsilon_2 = 0,0$
 strain distribution coefficient
 $k_2 = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / (2 + \epsilon_1) = 0,5$
 $k_3 = 3,4$
 $k_4 = 0,425$

Calculation of crack width: w_k (7,3,4)

$$w_k = \sigma_{s,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad \text{Expression (7,8)}$$

Calculate $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_c \cdot (f_{ct,eff} / \rho_{p,eff}) \cdot (1 + \alpha \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \quad \text{Expression (7,9)}$$

where,

$$\rho_{p,eff} = (A_s' + \xi_1 \cdot A_p') / A_{s,eff} \quad \text{Expression (7,10) (4)}$$

$$\xi_1 = \sqrt{\xi} \quad \text{Expression (7,5)}$$

$$= 0,89442$$

hence,

$$\rho_{p,eff} = (13672,2 + 0,89442 \cdot 0,0) / 2,757\text{E}5$$

$$= 0,04959$$

so,

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{1,085\text{E}5 - 0,4 \cdot (3209,96 / 0,04959) \cdot (1 + 5,86904 \cdot 0,04959)}{2,0\text{E}8}$$

$$= 3,75\text{E-}4$$

$$0,6 \cdot \sigma_s / E_s = 0,6 \cdot 108,484 / 200,0 = 3,25E-4$$

therefore,

$$\epsilon_{st} - \epsilon_{cr} = 3,75E-4$$

Calculate maximum crack spacing: $s_{r,max}$

The bar spacing limit is given by the expression,

$$s_r (c + \phi/2) = 5 \cdot (50,0 + 32,0 / 2) = 330,0 \text{ mm}$$

Reinforcement spacing is within this limit, so

$$s_{r,max} = k_1 \cdot c + k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \phi / \rho_{pact} \quad \text{Expression (7,11)}$$

$$= 3,4 \cdot 50,0 + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 32,0 / 0,04959 = 279,705 \text{ mm}$$

Calculate crack width

YOUR LOGO INSERTED HERE	
Job: Section: Untitled	Calc. By: Checked:
ANALYSIS TO EN 1992-2:2005 Serviceability Limit State with recommended NDP values (modified)	

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{st} - \epsilon_{cr}) = 279,705 \cdot 3,75E-4 = 0,10496 \text{ mm}$$

[1] Area of steel within the effective area of concrete in tension is used in this expression.

End