

Opinnäytetyö

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK

Rakennesuunnittelu

2022

Riikka Ihalin

# Satamalaiturin liikuntasaumojen välisen lohkon kantavien rakenteiden mitoitus

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri

2022 | 49 sivua

Riikka Ihalin

## Satamalaiturin liikuntasauvojen välisen lohkon kantavien rakenteiden mitoitus

Suomen huoltovarmuuteen vaikuttaa satamien sujuva logistiikka.

Opinnäytetyössä suunniteltiin erään Suomen sataman paalulaiturin lohkon kantavia rakenteita Insinööritoimisto Profundin toimeksiantona. Pääpaino suunnittelussa oli teräsbetoni-laattojen ja -palkkien mitoituksessa, jonka lisäksi työssä mitoitettiin myös teräspaaluja ja liikuntasauvojen terästapit.

Suunnittelussa voitiin vaikuttaa vain terästen määrään, sillä laattojen ja palkkien mitat oli ennalta määritetty yleissuunnitteluvaiheessa.

Autodeskin Robot-laskentaohjelmaan muodostettiin eri kuormitusten mukaisia laskentamalleja, joista laskettiin suurimmat mitoittavat momentit, leikkausvoimat ja vääntömomentit. Teräsbetonisten rakenteiden teräksen mitoitettiin Eurokoodi 2:n mukaisesti ja teräspaalujen sekä liikuntasauvomateriaalien kestävyys laskettiin Eurokoodi 3:n mukaisesti.

Laivan törmäys fenderiin osoittautui monessa tapauksessa teräksiä mitoittavaksi voimaksi. Lisäksi ajoneuvonosturin kuorma mitoitti erään palkin teräksiä kuorman osuessa palkin kohdalle.

Työ muodosti lähtökohdan lohkon rakenteiden toteutukselle, sillä lopullinen rakenne poikkeaa tässä työssä esitetystä muun muassa valutavaltaan ja paalujen rakenteelta.

Asiasanat:

satamahankkeet, laiturit, rakennesuunnittelu, kantavat rakenteet, teräsbetoni

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Civil Engineering

2022 | 49 pages

Riikka Ihalin

## The structural design of the load-bearing structures of a Finnish pier

The aim of this thesis work was to design load-bearing structures for one segment of a Finnish pier. The focus was on designing the reinforcing steel structures of the concrete slabs and beams. Moreover, the strength of the steel bars in the movement joint and the steel piles were calculated. The main dimensions of the segment were pre-defined in the general plan of the pier.

Calculation models were completed in Autodesk Robot Structural Analysis program to determine the largest moments for the slabs and piles, and moments, shearing and torque forces for the beams. The reinforced concrete structures were designed according to Eurocode 2 and the steel structures according to Eurocode 3.

The crash load of a ship created the largest forces to the majority of the slabs, beams and piles. In addition, a mobile crane strained a number of beams when its weight hit on the beam.

This work formed the basis on the structural design of the pier segment, since certain details, such as the casting mode, was changed after the finalization of this work. Moreover, the piles will be implemented as composite structures.

Keywords:

harbours; piers; structural design; load-bearing structures; reinforced concrete

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet</b>	<b>8</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>9</b>
<b>2 Tausta</b>	<b>12</b>
2.1 Rakennuspaikka	12
2.2 Suunnittelussa käytettävät standardit, normit ja ohjeet	12
2.3 Laiturilohkon geometria	13
2.4 Liikuntasauamat	14
2.5 Laiturilohkon rakenne	15
2.6 Laiturilohkon kuormat	15
<b>3 Suunnitteluprosessin kuvaus</b>	<b>21</b>
<b>4 Menetelmät</b>	<b>22</b>
4.1 FEM-laskenta	22
4.2 Teräsbetonisten rakenneosien terästen, paalujen ja liikuntasauamatappien mitoitus	22
4.3 Raudoituspöörustukset	22
<b>5 Toteutus</b>	<b>23</b>
5.1 Laiturilohkon FEM-laskentamalli	23
5.2 Kuormayhdistelmät	24
<b>6 Tulokset</b>	<b>27</b>
6.1 Mitoittavat kuormitukset ja rakenneteräokset	27
6.1.1 Laattojen terästen mitoitus, laatta 56	28
6.1.2 Laattojen terästen mitoitus, laatta 57	29
6.1.3 Laattojen terästen mitoitus, laatta 58	31
6.1.4 Laattojen lävistysraudoituksen mitoitus	33
6.1.5 Laattojen terästen mitoitus, käyttöasteet	34
6.2 Palkkien terästen mitoitus	34
6.2.1 Palkkien terästen mitoitus, reunapalkit 1 ja 2	35

6.2.2 Palkkien terästen mitoitus, mairinnoususillan alapuolinen palkki 3	39
6.2.3 Palkkien terästen mitoitus, matkustajasillan alapuoliset palkit 4 ja 5	41
6.2.4 Palkkien terästen mitoitus, käyttöasteet	44
6.3 Liikuntasaumaterästappien mitoitus	44
6.4 Paalujen kuormitukset	45
<b>7 Yhteenveto</b>	<b>47</b>
<b>Lähteet</b>	<b>49</b>

## **Liitteet**

- Liite 1. Laatan terästen laskenta, laatta 57
- Liite 2. Laatan lävistysmitoitus, laatta 58
- Liite 3. Palkin raudoitus, reunapalkit 1 ja 2
- Liite 4. Liikuntasaumaterästen mitoitus
- Liite 5. Tukipaalujen mitoitus

## **Kaavat**

- Kaava 1. Murtorajatilan mitoituksessa käytetty kaava kuormien yhdistämiseen. (SFS-EN 1990, kaava 6.10b). 24
- Kaava 2. Käyttörajatilassa (tavallinen) käytetty kaava kuormien yhdistämiseen (SFS-EN 1990, kaava 6.15a). 24
- Kaava 3. Käyttörajatilassa (pitkäaikainen) käytetty kaava kuormien yhdistämiseen (SFS-EN 1990, kaava 6.16a). 24
- Kaava 4. Momentin pyöritys tuella. (Väyläviraston ohjeita 5/2022, NCCI 2, kaava 5.3.) 29

## Kuvat

Kuva 1. Paalulaituri (Stening & Vähäkäkelä 2008, 26)	11
Kuva 2. Laiturilohkon geometria.	14
Kuva 3. Laiturilohkoa kuormittavat omat painot.	17
Kuva 4. Laiturilohkon hyötykuormat.	17
Kuva 5. Ajoneuvonosturin sijainnit laiturilohkolla.	18
Kuva 6. Laiturilohkon lumi, tuuli ja jääkuormat.	19
Kuva 7. Laiturilohkon fenderikuormat.	20
Kuva 8. Laiturilohkon suunnitteluprosessi.	21
Kuva 9. Laiturilohkon FEM-laskentamalli.	23
Kuva 10. Laiturilohkon rakenneosat.	27
Kuva 11. Laatan 56 momenttikartat Y-suuntaan.	28
Kuva 12 Laatan 57 momenttikartat Y-suuntaan.	30
Kuva 13. Laatan 58 momenttikartat Y-suuntaan.	32
Kuva 14. Reunapalkkien 1 ja 2 suurimmat mitoittavat taivutusmomentit murtorajatilassa (MRT).	36
Kuva 15. Reunapalkkien 1 ja 2 suurimmat mitoittavat taivutusmomentit käyttörajatiloissa (FRE&QPR).	37
Kuva 16. Reunapalkkien 1 ja 2 suurimmat mitoittavat leikkausvoimat ja vääntömomentit murtorajatilassa.	38
Kuva 17. Reunapalkin poikkileikkauksen raudituspiirustus.	39
Kuva 18. Maihinnoususillan alapuolisen palkin 3 suurimmat mitoittavat taivutusmomentit.	40
Kuva 19. Maihinnoususillan alapuolisen palkin 3 suurimmat mitoittavat leikkausvoimat ja vääntömomentit murtorajatilassa.	41
Kuva 20. Matkustajasillan alapuolisten palkkien 4 ja 5 suurimmat mitoittavat taivutusmomentit murtorajatilassa ja käyttörajatilassa.	42
Kuva 21. Matkustajasillan alapuolisten palkkien 4 ja 5 suurimmat mitoittavat leikkausvoimat ja vääntömomentit murtorajatilassa.	43
Kuva 22. Paalukuormat.	46

## Taulukot

Taulukko 1. Laiturilohkoon vaikuttavat kuormat	16
Taulukko 2. Laiturilohkon kantavien rakenteiden mitoituksessa käytetyt kuormayhdistelmät.	25
Taulukko 3. Kuormien yhdistelykertoimet ja osavarmuusluvut.	26
Taulukko 4. Laatan 56 mitoittavat momentit sekä lasketut teräkset.	29
Taulukko 5. Laatan 57 mitoittavat momentit sekä lasketut teräkset.	30
Taulukko 6. Laatan 58 mitoittavat momentit sekä lasketut teräkset.	32
Taulukko 7. Laattojen 57 ja 58 lävistysraudoituksen mitoitus.	33
Taulukko 8. Laattojen raudoitusten käyttöasteet.	34
Taulukko 9. Reunapalkkien 1 ja 2 mitoittavat voimat ja raudoitukset.	38
Taulukko 10. Maihinnoususillan alapuolisen palkin 3 mitoittavat voimat ja raudoitukset.	41
Taulukko 11. Matkustajasillan alapuolisten palkkien 4 ja 5 mitoittavat voimat ja raudoitukset.	43
Taulukko 12. Palkkien raudoitusten käyttöasteet.	44

## Käytetyt lyhenteet

C35/45	betonin puristuslujuusluokka
CC2	seuraamusluokka 2
3D	kolmiulotteinen
FEM	lujuuslaskenta ( <i>eng.</i> finite element method)
FRE	tavallinen ( <i>eng.</i> frequent)
G	oma paino
k	samansuuntaisten terästen väli
$K_{FI}$	seuraamusluokasta riippuva kansallinen kerroin
KRT	käyttörajatila
M	momentti
MRT	murtorajatila
N	normaalivoima
NW	alivedenkorkeus
P50	pakkas–suola-rasitusta kuvaava huokoisuusluku
Q	hyötykuorma
QPR	pitkäaikainen ( <i>eng.</i> quasi-permanent)
S355	rakenneteräs, myötölujuus 355 N / mm <sup>2</sup>
T	harjateräs
V	leikkausvoima
XC	betonin rasitusluokka, karbonatisoitumisesta aiheutuva teräksen korroosio
XF	betonin rasitusluokka, jäätymis–sulamis-rasitus
XS	betonin rasitusluokka, meriveden aiheuttama korroosio



# 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin erään Suomeen rakennettavan paalulaattarakenteisen satamalaiturin liikuntasaumojen välisen lohkon kantavia rakenteita Insinööritoimisto Profund Oy:n (Turku) toimeksiantona.

Suomen huoltovarmuuden kannalta satamilla on suuri merkitys, sillä sijaintimme on verrattavissa saareen. Tästä saatiin havainnollistava kokemus koronapandemian alettua keväällä 2020, jolloin liikkumisen rajoittaminen mullisti myös rahdin kulun. Satamainvestoinnit liittyvät usein maaliikenteen kehittämishankkeisiin, matkustaja-autolauttaliikenteen parantamiseen sekä satamista riippuvan teollisuuden hankkeisiin. Monet vientiin suuntautuneet teollisuuslaitokset sijaitsevat joko lähellä satamia tai hyvien kulkuyhteyksien päässä niistä, mikä sujuvoittaa logistiikkaa ulkomaille. (Sundberg & Karvonen 2021, 14–15)

Suomalaisiin satamiin investoidaan jatkuvasti. Traficomien Turun yliopiston Brahea-keskuksessa teettämän selvityksen mukaan vuosina 2016–2020 satamanpitäjät investoivat satamiin yhteensä noin 545 miljoonaa euroa ja satamaoperointiyritykset noin 285 miljoonaa euroa. Kokonaisinvestoinneista 93 % käytettiin rannikon satamien kehittämiseen, joista suuri osa oli yleisiä satamia. Näiden investoinnit ylittivät aikaisemmin ilmoitetut suunnitelmat ja esimerkiksi Lounais-Suomen yleisiin satamiin investoitiin noin 97 miljoonaa euroa enemmän kuin vuonna 2016 oli arvioitu. (Sundberg & Karvonen 2021, 9.)

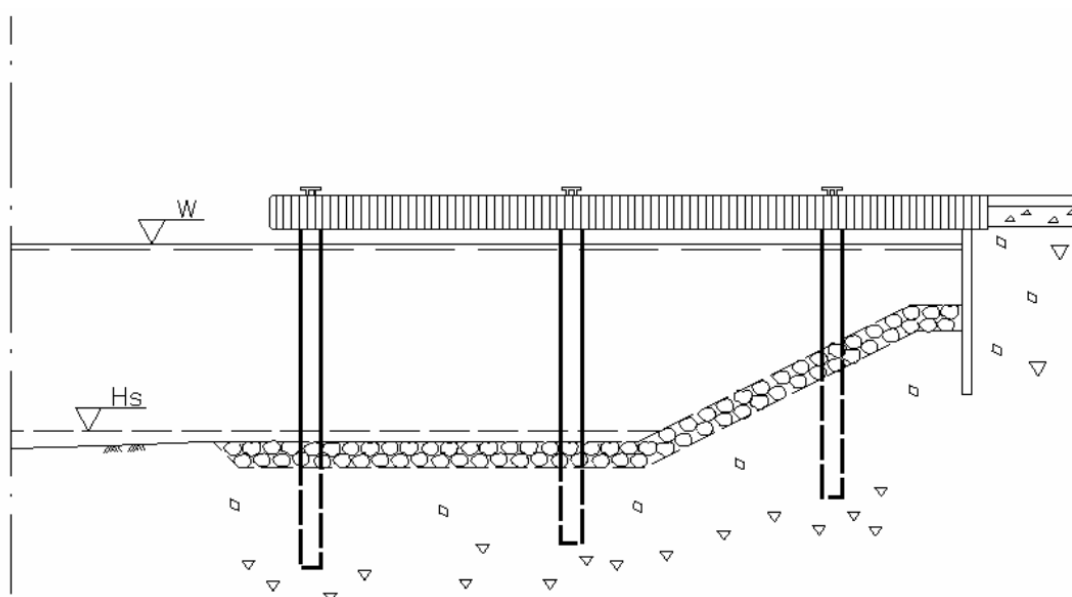
Laiturit veivät vuosina 2016–2020 satamanpitäjien investoinneista lähes 30 %, yhteensä noin 156 miljoonaa euroa. Uusia laitureita rakennettiin muun muassa Helsinkiin Hernesaareen, HaminaKotkan, Rauman, Kokkolan, Hangon, Maarianhaminan, Naantalın, Vaasan ja Kemin satamiin. Tämän lisäksi vanhoja laitureita kunnostettiin ja varusteltiin vastaamaan paremmin tulevia käyttötarpeita. (Sundberg & Karvonen 2021, 10–12).

Seuraavan viisivuotisjakson eli vuosille 2021–2025 suunniteltujen satamainvestointien odotetaan kasvavan kokonaisuudessaan yli miljardiin

euroon, mikä on lähes 17 % enemmän kuin jakson 2016–2020 investoinnit. Eniten investointien arvioidaan kasvavan Pohjanlahden yleisissä satamissa. Laiturien osuus suunnitelluista investoinneista on suuri, 317 miljoonaa euroa, eli noin kaksinkertainen siihen nähden, mitä se oli vuosina 2016–2020. (Sundberg & Karvonen 2021, 13–14.)

Suomessa laiturit luokitellaan viiteen eri tyyppiryhmään: massiivi-, paalu-, ponttiseinä-, ponttoni- ja settiseinälaitureihin. Kun lisäksi huomioidaan laiturin staattinen rakenne, jaotellaan massiivilaiturit kallioseinä-, kivimuuri-, arkku-, kasuuni-, kulmatukimuuri- sekä massiiviblokkilaitureihin, ja settiseinälaiturit teräsbetoni- ja puusettiseinälaitureihin. Nämä staattisen rakenteen mukaiset laiturityypit tarkentuvat edelleen rakennusmateriaalin mukaan. Materiaaleja ovat useimmiten teräsbetoni, teräs tai puu. (Stening & Vähäkäkelä 2008, 25.) Laituriluokkia on sen sijaan vain kaksi: pistolaituri ja rantalaituri (Stening & Vähäkäkelä 2008, 34).

Tässä opinnäytetyössä on suunniteltu Suomeen rakennettavan teräsbetonisen paalulaiturin kantavia rakenteita yhden liikuntasauvojen välisen lohkon osalta. Havainnollistava kuva tällaisen paalulaiturin rakenteesta on esitetty kuvassa 1. Lohkot perustetaan moreenista tukensa ottavien teräksisten paalujen varaan, jotka täytetään teräsbetonilla. Laiturin kantava rakenne on paalulaattarakenne, joka sisältää myös toiminnallisia palkkeja, esimerkiksi reunapalkit, joihin pollarit ja automooring-laitteet kiinnittyvät.



Kuva 1. Paalulaituri (Stening & Vähäkäkelä 2008, 26).

Opinnäytetyössä laadittiin ensin FEM-laskentamalli Autodeskin Robot -laskentaohjelmaan, jonka avulla määritettiin laiturilohkon rakenneosille (laatoille, palkeille, paaluille ja liikuntasaumateräksille) mitoittavat kuormitukset. Näiden maksimivoimien avulla mitoitettiin teräsbetonirakenteiden teräkset, tarkastettiin teräksisten tukipaalujen nurjahduskestävyys sekä mitoitettiin liikuntasaumateräkset. Kantavien teräsbetonirakenteiden suunnittelu perustui standardiin SFS-EN 1992-1-1, jota täydennettiin Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeella ”Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2 (5/2022)”. Teräksisten tukipaalujen alustava mitoitus ja liikuntasaumaterästappien mitoitus tehtiin standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaisesti. Yhdestä teräsbetonipalkista piirrettiin esimerkinomaisesti raudoituspirstukset.

## 2 Tausta

### 2.1 Rakennuspaikka

Suunnittelun kohteena oleva laituri rakennetaan Suomessa suistoalueelle, jossa perustamista haastaa paksu savikerros. Lisäksi kiinteän kalliopinnan päälle on kerrostunut paksu moreenikerros, jota käytetään hyväksi teräksisten tukipaalujen tuennassa. Moreenikerroksen paksuuden vuoksi rakenteita ei voida ankkuroida kallioon. Uusi laituri rakennetaan osittain vanhojen tihtaalien varaan, sillä niiden tukipaalut ovat hyväkuntoisia sekä myös vaikeasti poistettavia. Vanhojen tihtaalien teräsbetonirakenteista poistetaan tarvittava määrä, jotta uudet laiturirakenteet mahtuvat niille suunnitetuille paikoille. Vanhat tihtaalit osallistuvat myös uusien rakenteiden tuentaan ja tässä työssä yhden tihtaalin vanhat paalut on mallinnettu Autodesk Robot FEM-laskentamalliin.

### 2.2 Suunnittelussa käytettävät standardit, normit ja ohjeet

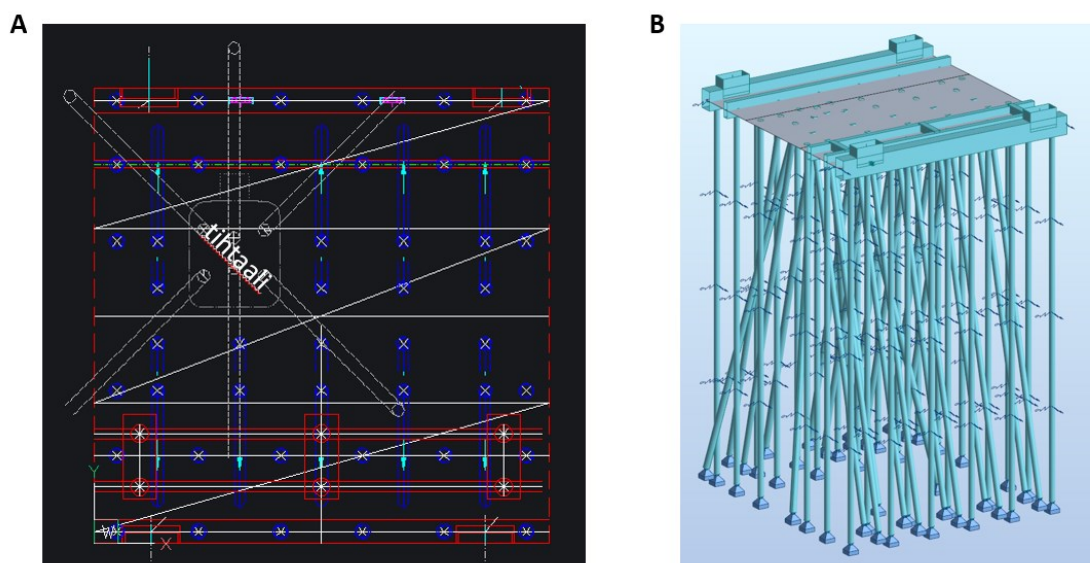
Laiturilohkon kantavat teräsbetonirakenteet (laatat ja palkit) mitoitettiin standardin SFS-EN 1992-1-1 mukaisesti. Kyseisen eurokoodin ohjeistusta täydennettiin Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeella ”Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2 (5/2022)”. Lisäksi teräksisten tukipaalujen alustava mitoitus ja liikuntasaumaterästappien mitoitus tehtiin standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaisesti.

Kuormien laskennassa rakenteiden omat painot laskettiin standardin SFS-EN 1991-1-1/AC mukaisesti. Laturirakenteille spesifisten kuormien, kuten hyötykuorman, tungoskuorman, tuulikuorman ja reunapaalujen jääkuormien, arviot saatiin julkaisusta RIL 201-3-2013 ”Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat – vesirakenteet”. Muut kuormat, kuten matkustajasillan, mobiilinosturien, fenderien ja onnettomuudesta johtuvan törmäyksen aikaansaamat kuormitukset, oli määritetty yhteistyössä tilaajan kanssa.

Teräsbetonirakenteet suunniteltiin 50 vuoden suunnittelukäyttöiälle. Tällöin vedenpinnan yläpuolisille teräsbetonirakenteille rasisluokiksi saatiin XC4 (karbonatisoitumisesta aiheutuva korroosio; betonipinnat, jotka ovat kosketuksissa veden kanssa, mutta eivät pitkään kosketuksissa), XS3 (meriveden kloridien aiheuttama korroosio; merirakenteiden osat vuoroveden ja roiskeen vyöhykkeellä) ja XF4 (jäädytys- sulatusrasitus; suuri vedellä kyllästyminen ja merivesi) (RIL 201-3-2013, taulukko 2). Rakenteisiin valittiin C35/45 betoni. Betonin P-lukuvaatimus uusimman NCCI 2 Eurokoodin soveltamisohjeen mukaan (Väyläviraston ohjeita 5/2022, NCCI 2, taulukko 1.1) on P50 (meressä oleva tukirakenne, tasolta NW 1 m ylöspäin). Viidenkymmenen vuoden käyttöiän mukainen betonipeitteen paksuuden nimellisarvo on 50 mm. Betonirakenteiden totetusluokka on 2 ja toteutustoleranssi 10 mm. Käyttörajatilamitoituksen halkeamaleveydet ovat tavalliselle kuormitusyhdistelmälle (FRE) 0,25 mm ja pitkäaikaiselle kuormitusyhdistelmälle (QPR) 0,15 mm, jossa huomioitiin myös betonin viruma (RIL 201-3-2013, taulukko 4).

### 2.3 Laiturilohkon geometria

Laiturilohkon suunnittelussa käytetään lähtökohtana satama-alueelle tehtyä yleissuunnitelmaa, josta saadaan lohkon geometria. Täten muun muassa kantavien teräsbetonilaattojen mitat, mukaan lukien korkeudet, on yleissuunnitelmassa jo ennalta määritetty. Samoin uusien tukipaalujen ja vanhojen rakenteiden, kuten tihtaalien, sijainti on merkitty yleissuunnitelmaan. Tämän opinnäytetyön kohteena olevan laiturilohkon geometria on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Laiturilohkon geometria. A) Satama-alueen yleissuunnitelmassa kuvattu laiturilohkon geometria. B) Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmaan rakennettu 3D-malli laiturilohkosta tukipaaluineen.

## 2.4 Liikuntasaumat

Laiturilohko rajoittuu molemmilta puolilta liikuntasaumoihin, joiden pituus on 30 metriä. Teräsbetonirakenteiden suunnittelussa tulee huomioida virumasta, rakenteiden kutistumisesta ja lämpötilasta aiheutuvat muodonmuutokset, ellei rakenteeseen ole suunniteltu liikuntasauvoja (SFS-EN 1992-1-1, luku 2.3.3). Näiden liikuntasauvojen etäisyydet tulee suunnitella hankekohtaisesti (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2019, 14). Tässä hankkeessa käytettiin standardissa esitettyä 30 metrin suositusarvoa liikuntasauvojen väliselle etäisyydelle, mikä määrittä lohkon leveyden.

Liikuntasauva voidaan suunnitella joko voimaa välittäväksi tai välittämättömäksi rakenteeksi. Tässä työssä liikuntasauvoihin suunniteltiin leikkausvoimaa siirtävät tappivaarnat, joiden toinen pää pääsee liikkumaan vapaasti tapin suunnassa mahdollistaen liikuntasauvan liikkeen. (Elementtisuunnittelu 2020.)

## 2.5 Laiturilohkon rakenne

Laiturilohkon kantava rakenne on paalulaattarakenne. Se koostuu kolmesta yhteen valetusta laatasta (10 m x 30 m), joista reunalaattojen paksuus on 700 mm ja keskimmäisen laatan paksuus 1 100 mm. Laattojen lisäksi rakenteessa on toiminnallisia palkkeja: kaksi teräsbetonista reunapalkkia (1 600 mm x 2 300 mm), maihinnoususillan alapuolinen teräsbetonipalkki (700 mm x 1 900 mm), johon kiinnitetään maihinnoususillan kisko ja kaksi matkustajasillan alapuolista teräsbetonipalkkia (700 mm x 1 600 mm). Laattojen ja palkkien mitat on määritelty laiturin yleissuunnitelmassa, ja niitä ei voi mitoitusvaiheessa muuttaa. Laattarakenne tukeutuu moreenikerroksesta tukensa ottaviin teräspaaluihin ( $\varnothing$  711 mm, S355, seinämäpaksuus 14,2 mm, n: 52), joihin valetaan teräsbetonisisus, joten ne toimivat liittorakenteina. Osa teräspaaluista (6 kpl) sijaitsee vanhassa tihtaalissa. Lohkojen väliseen liikuntasamaan sijoitetaan terästappeja ( $\varnothing$  50 mm, k900, n: 29) välittämään kuormat lohkon reunalta viereiselle lohkolle.

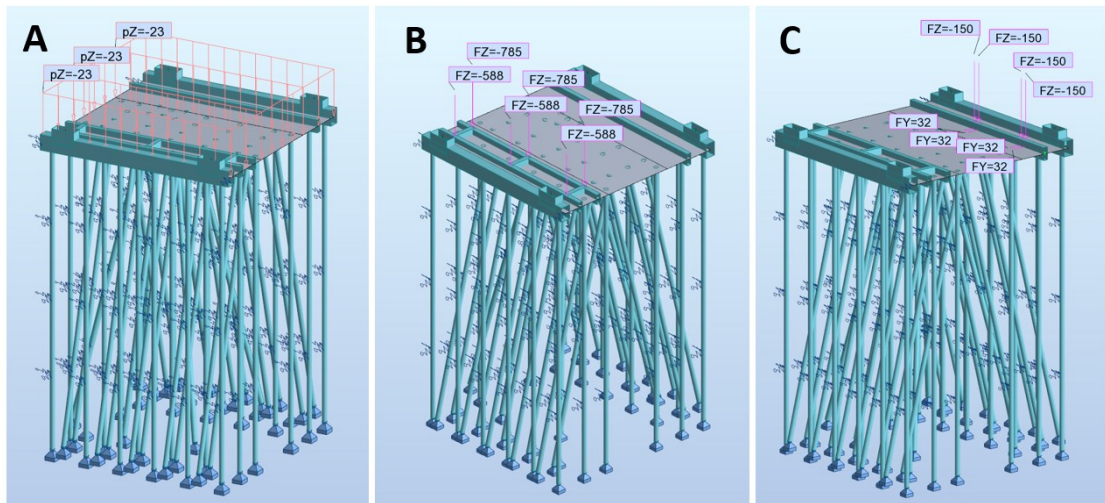
## 2.6 Laiturilohkon kuormat

Laiturilohkoa kuormittaa rakenteiden omien painojen lisäksi: hyötykuorma, fenderikuormat, ajoneuvonosturit, matkustajasillan ja maihinnoususillan omat painot sekä niihin liittyvät tungos-, tuuli- ja lumikuormat, laivan törmäyksestä aiheutuva onnettomuuskuorma sekä laiturin reunapaaluihin vaikuttava jääkuorma. Kuormien tarkempi kuvaus on esitetty taulukossa 1 ja sijainnit lohkon geometriassa kuvissa 3–7.

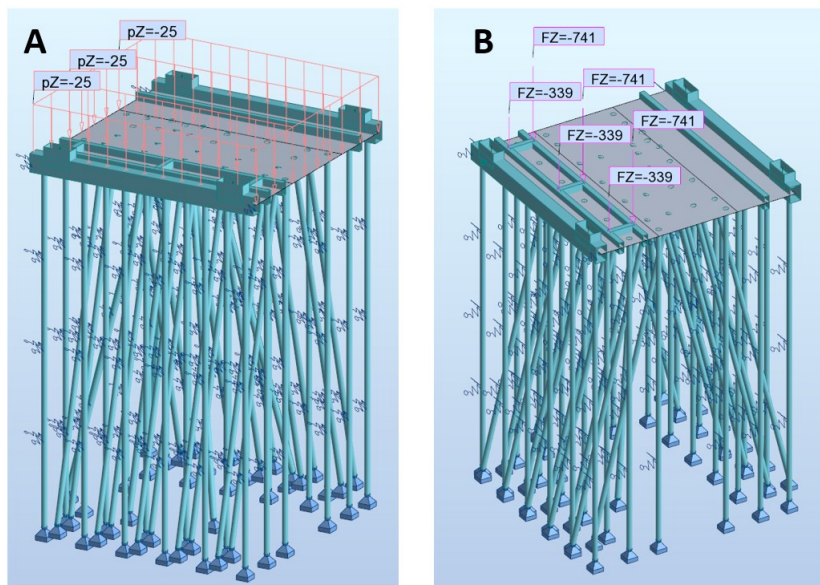
Taulukko 1. Laiturilohkoon vaikuttavat kuormat.

<b>Nro</b>	<b>Kuvaus</b>	<b>Suuruus</b>
<b>1</b>	Teräsbetonirakenteiden ja pintarakenteiden (mursketäyttö ja asfaltti) omat painot.	23 kN/m <sup>2</sup>
<b>2</b>	Hyötykuorma	25 kN/m <sup>2</sup>
<b>3</b>	Ajoneuvonosturi, tassukuorma	295 kN/m <sup>2</sup>
<b>4</b>	Matkustajasilta (kuormassa huomioitu maihinnoususillan epäkeskinen omapainokuormitus matkustajasillalle)	ks. kuva 3
<b>5</b>	Maihinnoususilta (kuormassa huomioitu tuulikuorma kaakosta)	ks. kuva 3
<b>6</b>	Fenderikuorma, törmäys	2 800 kN
<b>7</b>	Fenderikuorma, ylös ja alas	±560 kN
<b>8</b>	Fenderikuorma, onnettomuus	2 800 kN
<b>9</b>	Tungoskuorma, matkustajasilta (kuormassa huomioitu maihinnoususillan epäkeskinen tungoskuormarasitus matkustajasillalle)	ks. kuva 3
<b>10</b>	Tuulikuorma, matkustajasilta	ks. kuva 5
<b>11</b>	Lumikuorma, matkustajasilta (kuormassa huomioitu maihinnoususillan epäkeskinen lumikuormarasitus matkustajasillalle)	ks. kuva 5
<b>12</b>	Jääkuorma, reunapaalut, kohti laituria	180 kN/paalu

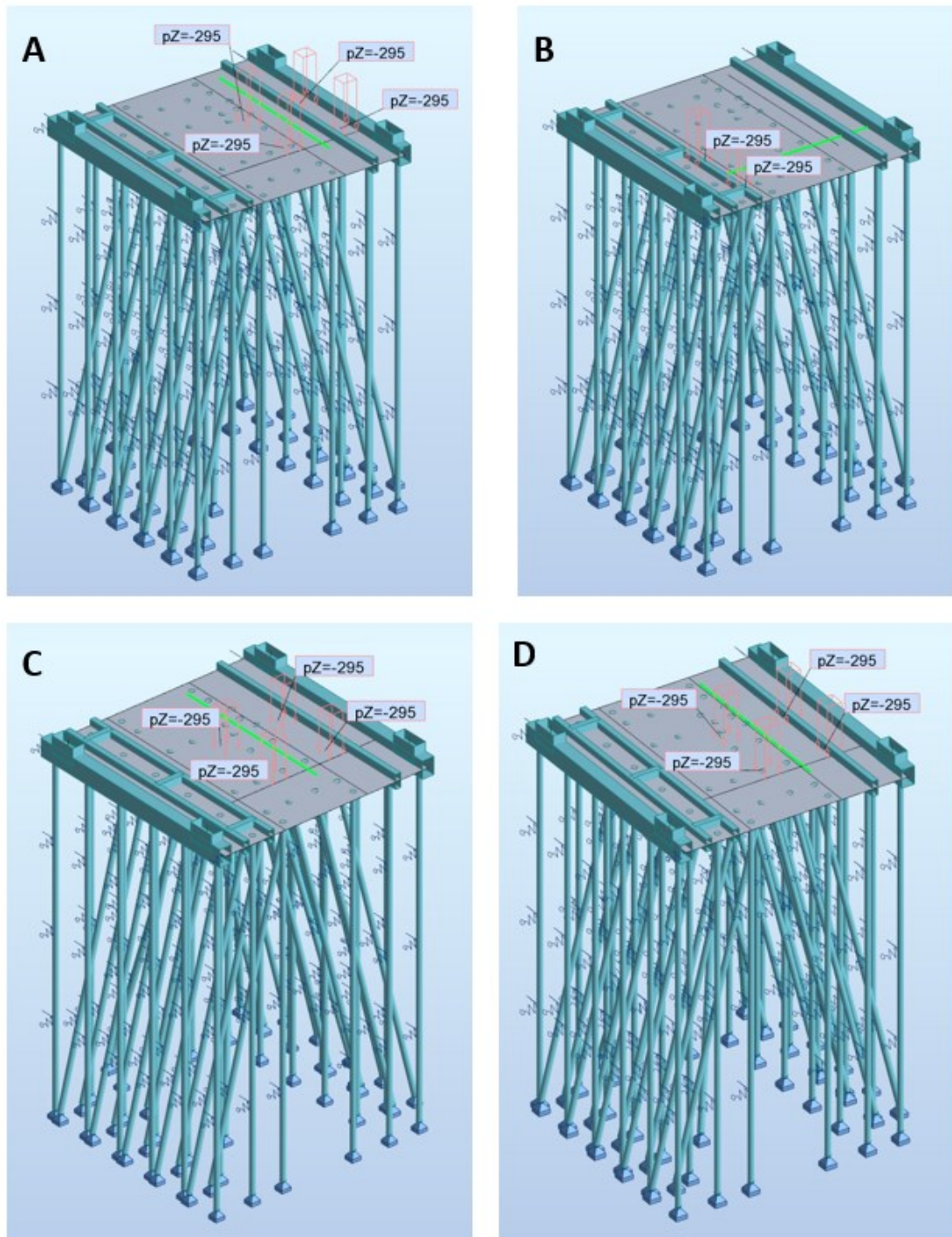




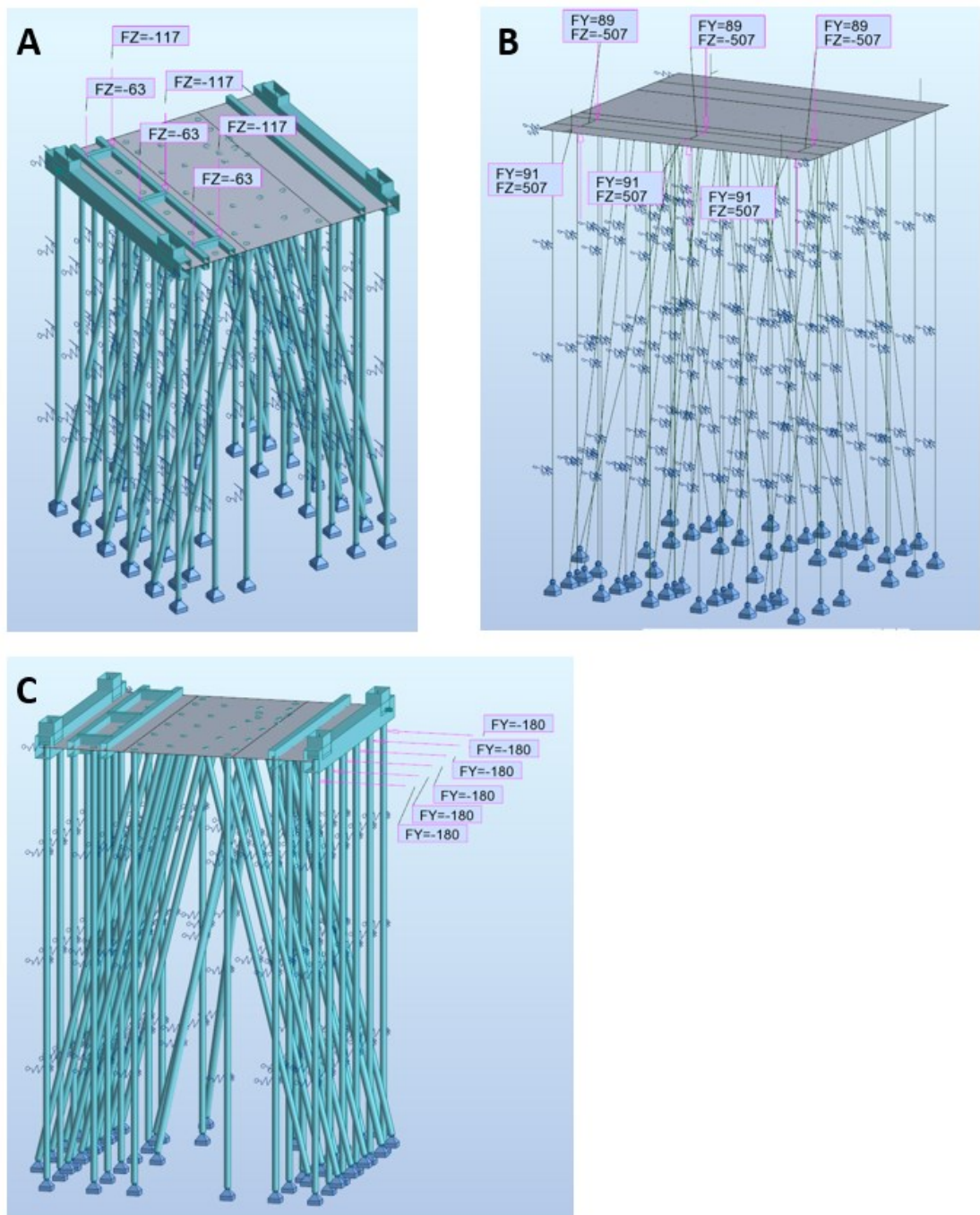
Kuva 3. Laiturilohkoa kuormittavat omat painot (rakenteiden omien painojen lisäksi). A) Mursketäyttö ja asfaltti, B) matkustajasilta, C) maihinnoususilta. Matkustajasillan omapainoissa on huomioitu siihen yhdistyvän maihinnoususillan epäkeskinen omapaino. Maihinnoususillan omapainoissa on huomioitu kaakkoistuulen tuulikuorma.



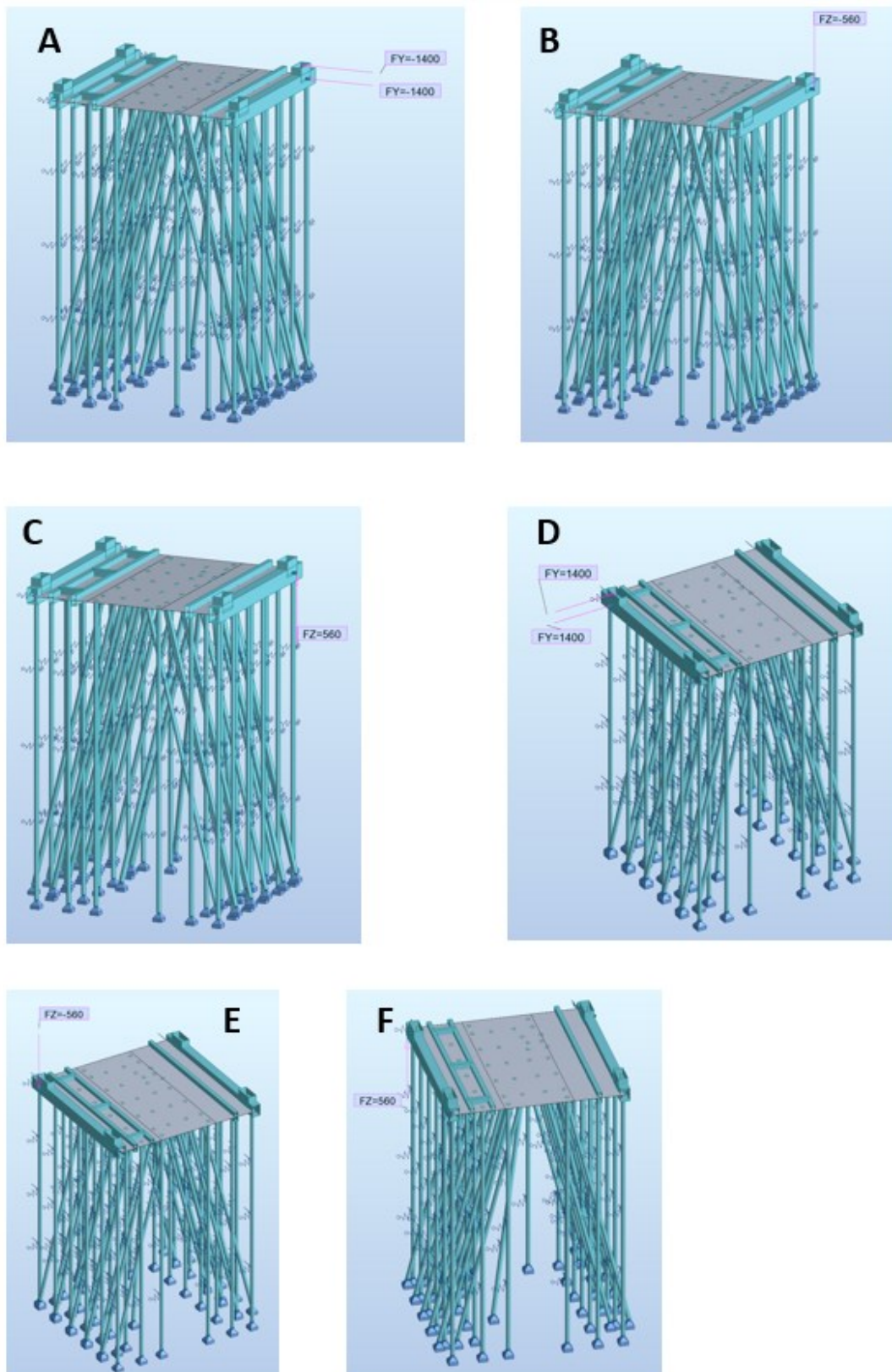
Kuva 4. Laiturilohkon hyötykuormat. A) Lohkolle laskettu tavarahyötykuorma ja B) matkustajasillan tungoskuorma. Matkustajasillan tungoskuormassa on huomioitu siihen epäkeskisesti kiinnittyvän maihinnoususillan tungoskuorma.



Kuva 5. Ajoneuvonosturin sijainnit laiturilohkolla. A) Laatalle 56 suurin kuormitus, B) poikittainen kulkureitti, C) laatalle 57 suuret rasitukset, D) ajoneuvonosturi palkin 3 päällä.



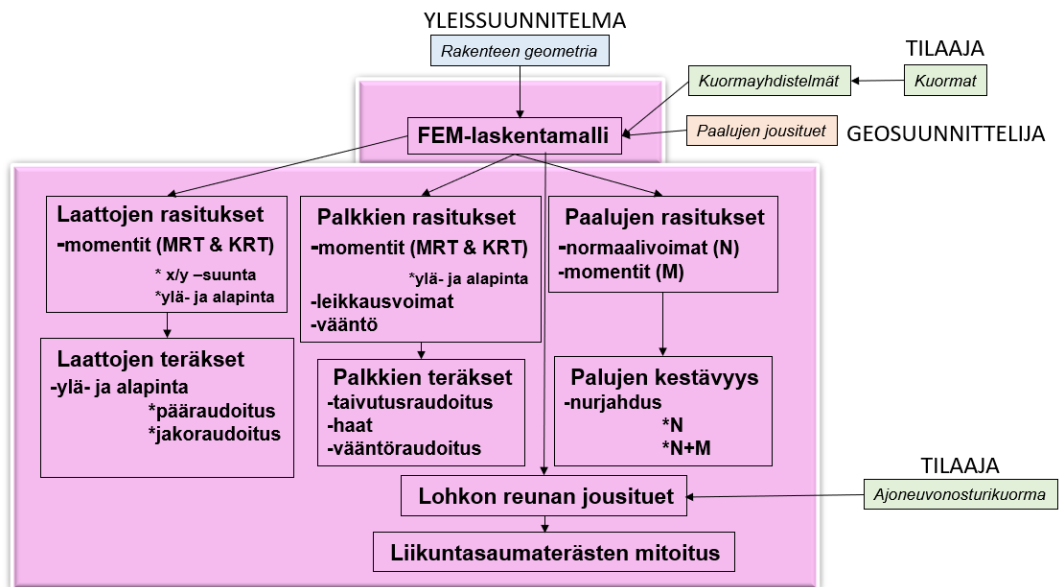
Kuva 6. Laiturilohkon lumi, tuuli ja jääkuormat. A) Matkustajasillan lumikuorma, B) matkustajasillan tuulikuorma, C) reunapaalujen jääkuorma. Matkustajasillan lumikuormassa on huomioitu siihen epäkeskisesti kiinnittyvän maihinnoususillan lumikuorma.



Kuva 7. Laiturilohkon fenderikuormat normaalissa (A–C) ja onnettomuus-tilanteessa (D–F)

### 3 Suunnitteluprosessin kuvaus

Opinnäytetyössä toteutettu laiturilohkon suunnitteluprosessi on esitetty Kuvassa 8. Rakenteen geometria saatiin laiturin yleissuunnitelmasta, kuormat ja kuormayhdistelmät oli määritelty yhdessä tilaajan kanssa ja paalujen jousituenta-arvot FEM-malliin saatiin geosuunnittelijalta. Työssä rakennettiin ensin FEM-laskentamalli yllä mainittujen esitietojen perusteella. Tämän jälkeen FEM-laskennasta saatiin eri rakenneosien rasitukset, joiden perusteella suunniteltiin teräsbetonisten laattojen ja palkkien raudoitukset sekä tarkastettiin teräksisten paalujen kestävyys. Lisäksi viereiseltä lohkolta saatava tuenta mallinnettiin FEM-laskentaan, minkä avulla laiturilohkon reunalle määritettiin jousituet. Näiden jousitukien ja lohkon reunalle osuvan ajoneuvonosturikuorman avulla mitoitettiin liikuntasamaan asennettavat liikuntasaumaterästäpit.



Kuva 8. Laiturilohkon suunnitteluprosessi.

## 4 Menetelmät

### 4.1 FEM-laskenta

Laiturilohkon FEM-laskenta suoritettiin Autodeskin Robot Structural Analysis Professional 2018 -laskentaohjelmalla (Autodesk, San Rafael, CA, Yhdysvallat). Kaikki rakenteet mallinnettiin oikeissa mitoissa teräsbetonisina rakenteina, jolloin malliin saatiin mukaan myös rakenteiden todelliset omat painot kuormayhdistelmiä varten.

### 4.2 Teräsbetonisten rakenneosien terästen, paalujen ja liikuntasaumatapppien mitoitus

Suunnittelussa käytetyt standardit, normit ja ohjeet on kuvattu opinnäytteen luvussa 2.2. Laskenta suoritettiin PTC Mathcad Prime 3.1 -ohjelmalla (PTC Inc., Boston, MA, Yhdysvallat). Liikuntasaumaterästappien mitoituksessa hyödynnettiin myös Microsoft Excel for Microsoft 365 (Version 2205 Build 16.0.15225.20278) -taulukkolaskentaohjelmaa.

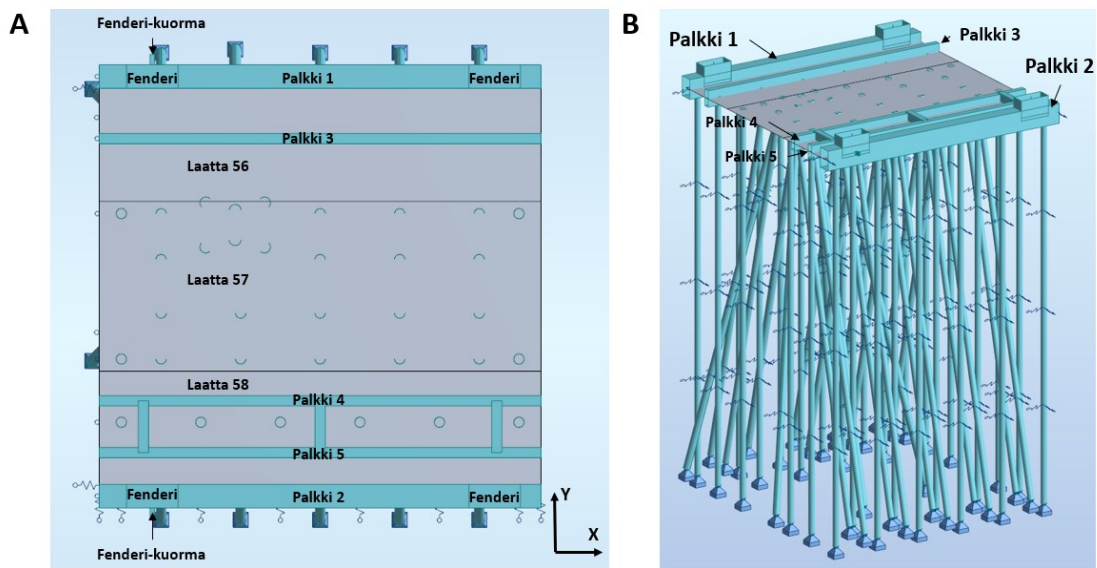
### 4.3 Raudoituspiirustukset

Opinnäytetyössä esitetyt raudoituspiirustukset piirrettiin BricsCAD Pro V21 -suunnitteluohjelmalla (Bricsys NV, Ghent, Belgia).

## 5 Toteutus

### 5.1 Laiturilohkon FEM-laskentamalli

Laiturilohkon FEM-laskentamalli on esitetty kuvassa 9. FEM-malli rakennettiin Autodesk Robot -laskentaohjelmaan siten, että kaikki teräsbetonirakenteet mallinnettiin niiden todellisissa mitoissa. Näin saatiin mallinnettua kaikki rakennelman omat painot. Laatasto tuettiin mallissa teräspalkkipaaluihin ( $\varnothing$  711 mm), joiden tuenta paalujen päässä oli nivelellinen. Paalujen pituudelle mallinnettiin kolmeen pisteeseen x- ja y- suunnassa jousitukia, joiden suuruus oli ylhäältä alaspäin lueteltuna 4 750, 9 750 ja 16 500 kN/m. Nämä paalujen jousituet jakoivat 45 metriä pitkät paalut neljään yhtä suureen osaan ja niillä mallinnettiin savesta saatava tuki. Jousitukien suuruudet olivat geosuunnittelijan laskemia. Fendereille mallinnettiin kahdet törmäyspisteet 0,33 ja 2,33 metrin korkeuteen. Lohkon reunoihin sijoitettiin jousitukia (28 400 (kN/m) / m, k1000) mallintamaan viereiseltä lohkolta saatavaa tukea. Jousitukien laskenta on esitetty yksityiskohtaisesti luvussa 6.3.



Kuva 9. Laiturilohkon Autodesk Robot -ohjelmaan rakennettu FEM-laskentamalli. Lohkon FEM-malli A) ylhäältä ja B) etelästä katsottuna.

## 5.2 Kuormayhdistelmät

Aikaisemmin esitetyistä kuormista (taulukko 1, kuvat 3–7) tehtiin kuormayhdistelmät käyttäen kaavoja 1–3. Seuraamusluokkana suunnittelussa käytettiin CC2:ta, jolloin  $K_{FI}$  arvoksi tuli 1,0. Murtorajatilatarkastelussa ei käytetty eurokoodin kaavaa 6.10a, koska laiturilohkolle tulevat muut kuormitukset olivat omiin painoihin nähden merkittävässä osassa.

$$MRT: K_{FI} \times 1,15 \times \sum G_{k,j} + K_{FI} \times 1,5 \times Q_{k,1} + K_{FI} \times 1,5 \times \sum \psi_{0,i} \times Q_{k,i}$$

Kaava 1. Murtorajatilan mitoituksessa käytetty kaava kuormien yhdistämiseen. (SFS-EN 1990, kaava 6.10b).

Käyttörajatilassa kuormien yhdistämisessä käytettiin ensin tavallista (FRE) kuormien yhdistelykaavaa (kaava 2) laskettaessa halkeamaleveyden määritykseen tarvittavia kuormituksia.

$$KRT (FRE): \sum G_{k,j} + \psi_{1,1} \times Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \times Q_{k,i}$$

Kaava 2. Käyttörajatilassa (tavallinen) käytetty kaava kuormien yhdistämiseen (SFS-EN 1990, kaava 6.15a).

Lisäksi halkeamaleveys määritettiin käyttämällä pitkäaikaisia kuormayhdistelmiä (kaava 3), jolloin huomioitiin myös rakenteen viruma.

$$KRT (QPR): \sum G_{k,j} + \sum \psi_{2,i} \times Q_{k,i}$$

Kaava 3. Käyttörajatilassa (pitkäaikainen) käytetty kaava kuormien yhdistämiseen (SFS-EN 1990, kaava 6.16a).



Kuormayhdistelmät on esitetty taulukossa 2. Kuormayhdistelmä 3e-onnettomuus poikkesi tavanomaisesta onnettomuusmitoituksesta siten, että vain onnettomuuskuormalla, eli kaakosta tulevalla fenderikuormalla oli yhdistelykertoimena 1,0 ja muiden kuormien yhdistelykertoimet olivat MRT-kuormayhdistelmän mukaiset. Näin kyseiseen kuormitusyhdistelmään saatiin lisävarmuutta.

Taulukko 2. Laiturilohkon kantavien rakenteiden mitoituksessa käytetyt kuormayhdistelmät ja niiden lyhyt kuvaus.

Tunnus	Kuormat (ks. taulukko 1)	Kuvaus
<b>1a</b>	1 + 2 + 4 + 5 + 6 + 7	Laiturilla täysi hyötykuorma. Laiva rantautuu.
<b>1b</b>	1 + 4 + 5 + 6 + 7	Laiturilla ei hyötykuormaa. Laiva rantautuu.
<b>2c</b>	1 + 3 + 4 + 5	Laiturilla ei hyötykuormaa. Ajoneuvonosturi lohkolla.
<b>2d</b>	1 + 4 + 5	Kuormittamassa vain rakenteiden omat painot.
<b>3e</b>	1 + 2 + 4 + 5 + 7 + 9 + 10 + 11	Laiva laiturissa. Laiturilla täysi hyötykuorma. Maihinnoususillalla ja matkustajasillalla tungoskuorma, lumikuorma ja tuulikuorma.
<b>3e-onnettomuus</b>	1+2+4+5+7+8+9+10+11	Kuten kuormayhdistelmä 3e, mutta toinen laiva törmää laiturin vastakkaisen puolen fenderiin.
<b>4a</b>	1+2+4+5+12	Kaikki rakenteiden omat painot ja lisäksi jääkuorma laiturin reunapaaluja vasten.

RIL 201-3-2013:n mukaiset yhdistelykertoimet eri kuormille on esitetty taulukossa 3.

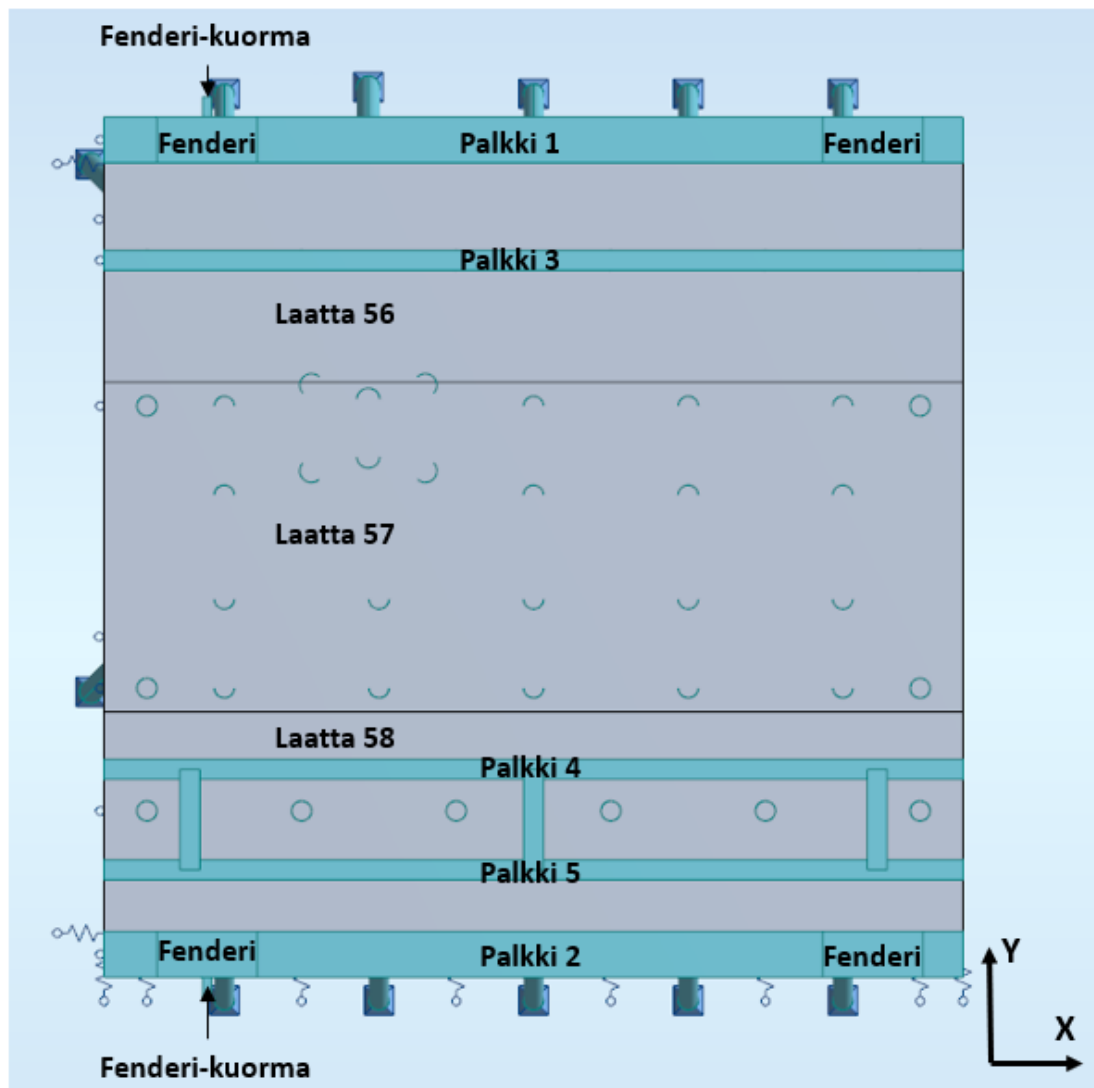
Taulukko 3. Kuormien yhdistelykertoimet ja osavarmuusluvut (RIL 201-2-2013, taulukot 12, 14, 17, 18, 20, 28). Hyötykuorma (tavara), tungoskuorma ja ajoneuvonosturin  $\psi_0$ -kertoimiksi annettiin taulukkoarvoja suuremmat kertoimet, jotta niiden osuus murtorajatilan kuormituslaskennassa ei nollautuisi.

Kuorma	Osavarmuusluvut SETB-STR/GEO	Yhdistelykertoimet		
		$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
<b>Hyötykuorma, tavara</b>	1,5	0,7 (0)	0,5	0,3
<b>Tungoskuorma</b>	1,5	0,7 (0)	0,4	0
<b>Ajoneuvonosturi</b>	1,5	0,8 (0)	0,75	0
<b>Tuuli (rakennus)</b>	1,4	0,6	0,2	0
<b>Tuuli (pollari, fenderi)</b>	1,4	0,4	0,2	0
<b>Lumi</b>	1,5	0	0,4	0,2
<b>Fenderi</b>	1,5	0,4	0,4	0
<b>Jääkuorma</b>	1,4	0,7	0,3	0

## 6 Tulokset

### 6.1 Mitoittavat kuormitukset ja rakenneeräkset

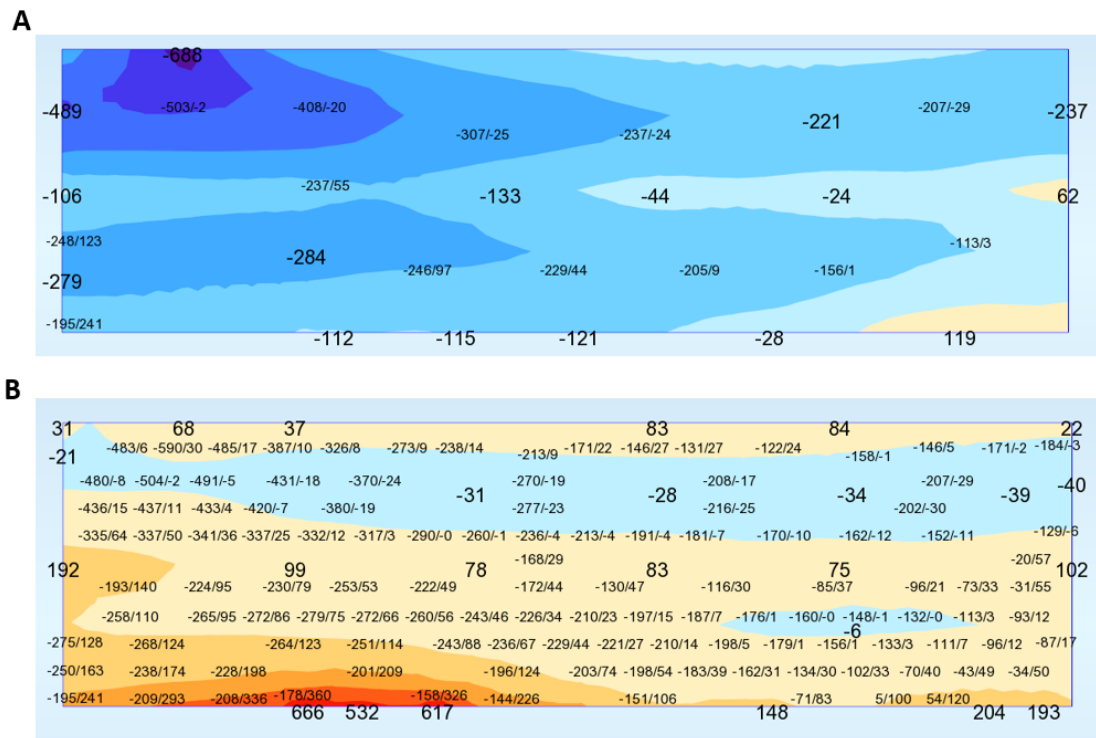
Seuraavassa on esitetty mitoittavat kuormitukset jokaiselle lohkon rakenneosalle sekä näille kuormituksille saadut betoniteräkset. Lohkon rakenneosat on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Laiturilohkon rakenneosat. X-Y-koordinaatisto kuvaa FEM-laskennassa käytettyä koordinaatistoa.

### 6.1.1 Laattojen terästen mitoitus, laatta 56

Laatan 56 raudoituksen mitoitti kuormitusyhdistelmä 1a, jossa oli kaikki lohkon omat painot sekä palkin 1 fenderille tulevat kuormat. Momenttikartat (Y-suuntaiset momentit) on esitetty kuvassa 11. Koska tässä kuormitustapauksessa suurimmat momentit sekä laatan alapinnassa, että yläpinnassa olivat paikallisia ja pistemäisiä, pyrittiin koko laatan kattavalle raudoitukselle hakemaan mitoittavaa momenttia tämän pistemäisen suuren momentin läheisestä FEM-mallin laskentasolmupisteestä. Tarkemmat mitoituksessa käytetyt momenttien arvot sekä X- että Y-suuntaan sekä mitoituslaskennasta saadut teräkset on esitetty taulukossa 4.



Kuva 11. Laatan 56 momenttikartat Y-suuntaan kuormitusyhdistelmällä 1a (kaikki lohkon omat painot ja fenderikuorma palkin 1 fenderiin). A) Laatan alapinnan ja B) yläpinnan Y-suuntaiset momentit on esitetty omissa kartoissa.

Taulukko 4. Laatan 56 mitoittavat momentit sekä lasketut teräkset. Laatan 56 teräkset laskettiin kuten laatalle 57, jonka laskenta on esitetty liitteessä 1.

	ALAPINTA		YLÄPINTA	
	x-suunta	y-suunta	x-suunta	y-suunta
<b>MRT</b>	147 kN×m	538 kN×m	125 kN×m	302 kN×m
<b>KRT (FRE)</b>	56 kN×m	188 kN×m	85 kN×m	217 kN×m
<b>KRT (QPR)</b>	29 kN×m	90 kN×m	79 kN×m	209 kN×m
<b>Raudoitus</b>	T16k200	T20k150	T20k190	T25k150

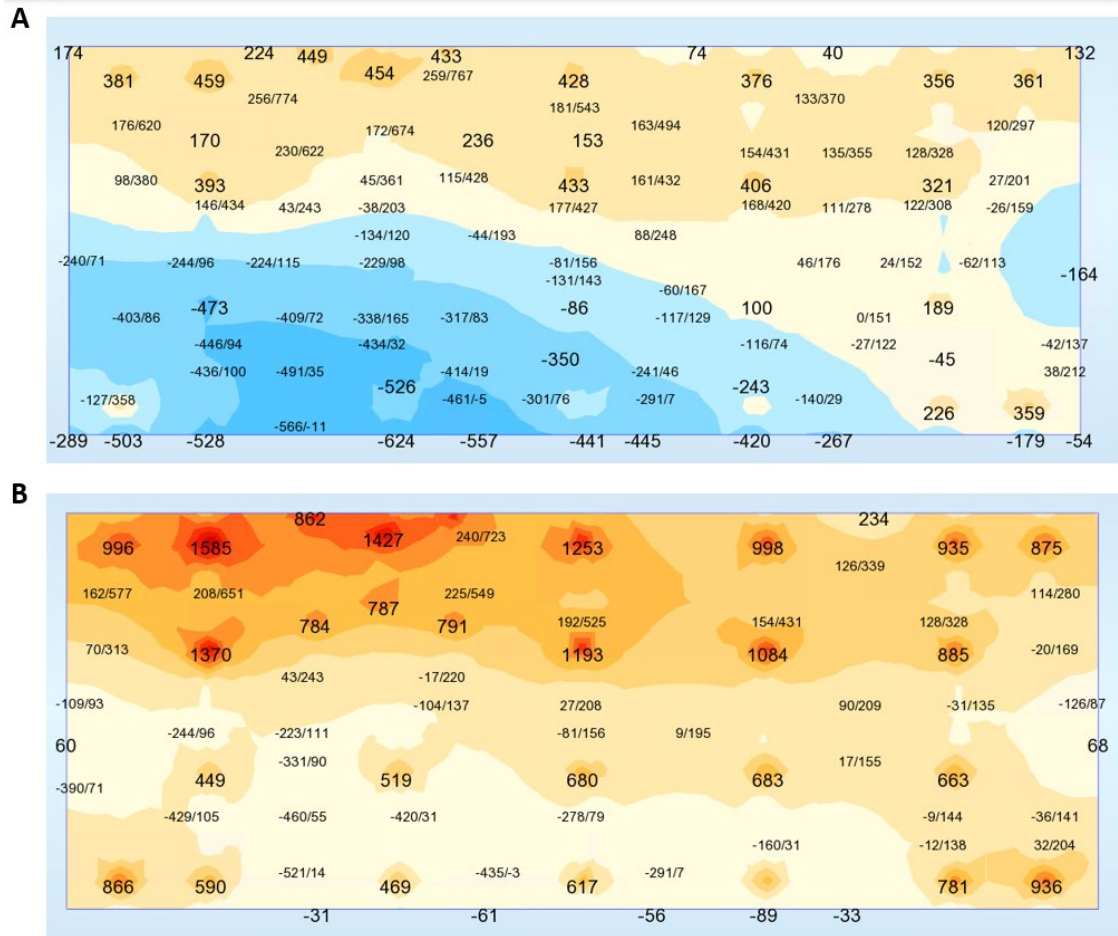
### 6.1.2 Laattojen terästen mitoitus, laatta 57

Paalulaatan 57 raudoituksen mitoitti kuormitusyhdistelmä 3e-onnettomuus (kaikki lohkon omat painot, maihinnoususillan ja matkustajasillan tungoskuormat, tuulikuormat ja lumikuormat sekä palkin 2 fenderikuorma) ja 2c (vain yläpinta X-suunta, KRT (QPR), jossa oli kaikki lohkon omat painot sekä laatalle 57 tuleva mobiilinosturikuorma. Momenttikartat (Y-suuntaiset momentit) on esitetty kuvassa 12. Koska laatan yläpinnan momentit olivat pistemäisiä ja sijaitsivat tukien eli paalujen kohdalla, voitiin momenteille tehdä momentin pyöristys tuella kaavan 4 mukaisesti.

$$M(Ed(k)) = M - F \times \frac{D}{3 * \pi}$$

Kaava 4. Momentin pyöristys tuella. M: FEM-laskennasta saatu tuen yläpuolinen momentti; F: tukivoima; D: tuen eli paalun halkaisija. (Väyläviraston ohjeita 5/2022, NCCI 2, kaava 5.3.)

Tarkemmat mitoituksessa käytetyt momenttien arvot sekä X- että Y-suuntaan ja mitoituslaskennasta saadut teräkset on esitetty taulukossa 5.



Kuva 12 Laatan 57 momenttikartat Y-suuntaan kuormitusyhdistelmällä 3e-Onnettomuus (kaikki lohkon omat painot, maihinnoususillan ja matkustajasillan tungoskuormat, tuulikuormat ja lumikuormat sekä palkin 2 fenderikuormat). A) Laatan alapinnan ja B) yläpinnan Y-suuntaiset momentit on esitetty omissa kartoissa.

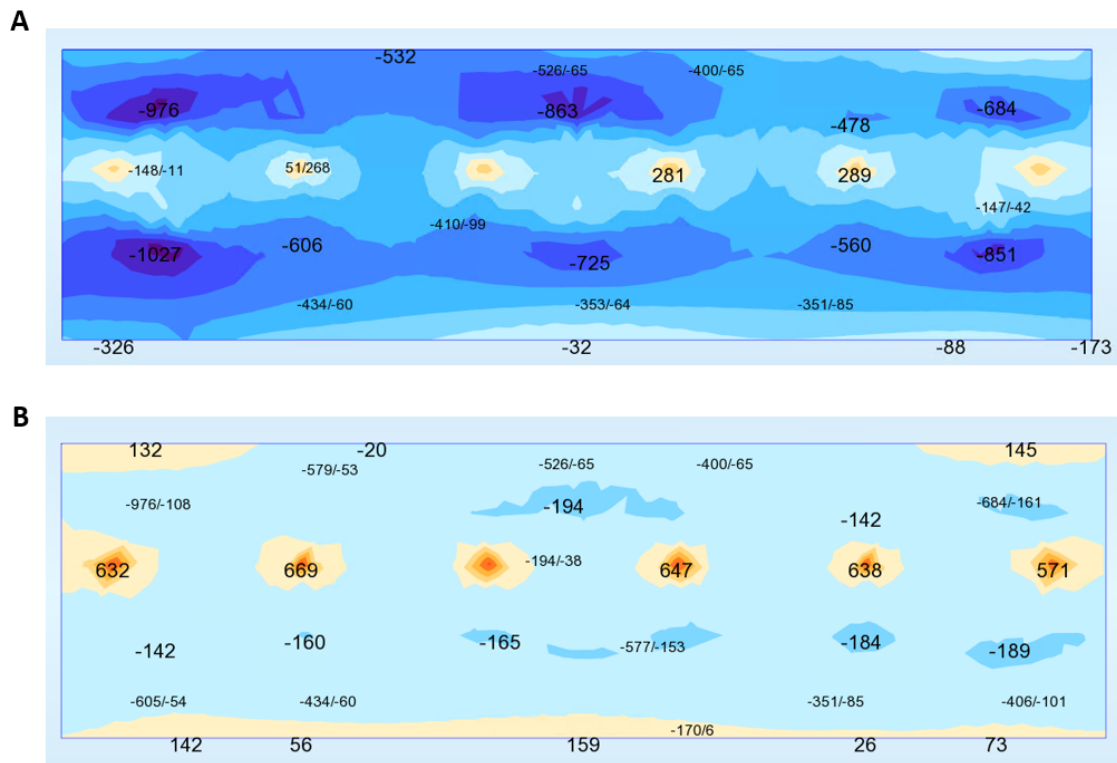
Taulukko 5. Laatan 57 mitoittavat momentit sekä lasketut teräkset. Laatan 57 laskenta on esitetty liitteessä 1.

	ALAPINTA		YLÄPINTA	
	x-suunta	y-suunta	x-suunta	y-suunta
<b>ULS</b>	635 kN×m	473 kN×m	1 103 kN×m	1 356 kN×m
<b>SLS (FRE)</b>	386 kN×m	252 kN×m	558 kN×m	691 kN×m
<b>SLS (QPR)</b>	190 kN×m	150 kN×m	416 kN×m	494 kN×m
<b>Raudoitus</b>	T20k130	T20k180	T25k120	T25k125

### 6.1.3 Laattojen terästen mitoitus, laatta 58

Paalulaatan 58 raudoituksen mitoitti kuormitusyhdistelmä 3e-onnettomuus, jossa oli kaikki lohkon omat painot, matkustajasillan ja maihinnoususillan tungoskuormat, tuulikuormat ja lumikuormat sekä palkin 2 fendereille tulevat kuormat. Momenttikartat (Y-suuntaiset momentit) on esitetty kuvassa 13. Koska laatan yläpinnan momentit olivat pistemäisiä ja sijaitsivat tukien eli paalujen kohdalla, voitiin mitoittaville momenteille tehdä momentin pyöritys tuella kaavan 4 mukaisesti kuten laatalle 57.

Tarkemmat mitoituksessa käytetyt momenttien arvot sekä X- ja Y-suuntaan ja mitoituslaskennassa saadut teräkset on esitetty taulukossa 6. Käytännössä laatan 58 yläpinnan raudoituksen mitoitti lävistysmitoitus. Laatta oli ohuempi kuin laatta 57 ja toisin kuin laatan 56 kohdalla, paalut eivät saaneet tukea palkeista, mikä johti siihen, että paalujen 18, 19, 20 ja 21 kohdalla tukivoimat kasvoivat niin suuriksi, että nämä paalut lävistivät laatan maksimimomentin mitoittamassa yläpinnan raudoituksessa. Tästä johtuen laatan yläpinnan raudoitus mitoitettiin lävistyksen mukaan T25k100 (suurin leikkausvoima paalun 19 kohdalla oli 3e kuormitustilanteessa 3 016 kN).



Kuva 13. Laatan 58 momenttikartat Y-suuntaan kuormitusyhdistelmällä 3e-Onnettomuus (kaikki lohkon D omat painot, mairinnoususillan ja matkustajasillan tungoskuormat, tuulikuormat ja lumikuormat sekä palkin 2 fenderikuormat). A) Laatan alapinnan ja B) yläpinnan Y-suuntaiset momentit on esitetty omissa kartoissa.

Taulukko 6. Laatan 58 mitoittavat momentit sekä lasketut teräkset. Laatan 58 teräkset laskettiin, kuten laatalle 57, jonka laskenta on esitetty liitteessä 1.

	ALAPINTA		YLÄPINTA	
	x-suunta	y-suunta	x-suunta	y-suunta
<b>ULS</b>	384 kN×m	944 kN×m	615 kN×m	412 kN×m
<b>SLS (FRE)</b>	177 kN×m	464 kN×m	351 kN×m	266 kN×m
<b>SLS (QPR)</b>	145 kN×m	371 kN×m	334 kN×m	251 kN×m
<b>Raudoitus</b>	T20k130	T25k110	T25k100	T25k100



#### 6.1.4 Laattojen lävistysraudoituksen mitoitus

Lävistysmitoitus laskettiin vain laatoille 57 ja 58, sillä laatan 56 tukipaalut sijaitsevat palkkien alla. Laskenta osoitti, että myös paalujen 18, 20, ja 21 kohdalla kokonaiskuorman aiheuttama leikkausjännitys ylitti lävistyskestävyyden. Siksi laatan 58 yläpinnan raudoitusta tihennettiin koko alalta T25k100 sekä Y- että X-suuntaan. Yhteenveto lävistysraudoituksen mitoituksesta on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Laattojen 57 ja 58 lävistysraudoituksen mitoitus. Esimerkkilaskenta lävistysraudoitukselle on esitetty liitteessä 2 (laatta 58).

Laatta	Paalu	Kuorma	V <sub>Ed</sub> (kN)	Lävistysraudoitus	Ala (m <sup>2</sup> )	Käyttöaste	
						Ilman	Lisäter.
57	33	3e-onnet.	3 625	Ei tarvita	N/A	85 %	N/A
58	19	3e	3 016	T25k100 (y ja x)	10x30m	124 %	99 %

### 6.1.5 Laattojen terästen mitoitus, käyttöasteet

Laattojen 56–58 raudoitusten käyttöasteet murtorajatilassa ja käyttörajatilassa (FRE & QPR) on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Laattojen raudoitusten käyttöasteet murtorajatilassa (MRT) sekä käyttörajatilassa (FRE & QPR). Mitoittavat käyttöasteet on korostettu vihreällä.

Laatta		ALAPINTA		YLÄPINTA	
		x-suunta	y-suunta	x-suunta	y-suunta
56	MRT	56 %	97 %	30 %	36 %
	KRT (FRE)	83 %	83 %	63 %	55 %
	KRT (QPR)	70 %	68 %	94 %	88 %
57	MRT	61 %	62 %	65 %	81 %
	KRT (FRE)	97 %	90 %	74 %	85 %
	KRT (QPR)	82 %	91 %	95 %	99 %
58	MRT	63 %	84 %	53 %	34 %
	KRT (FRE)	69 %	83 %	51 %	37 %
	KRT (QPR)	91 %	96 %	79 %	57 %

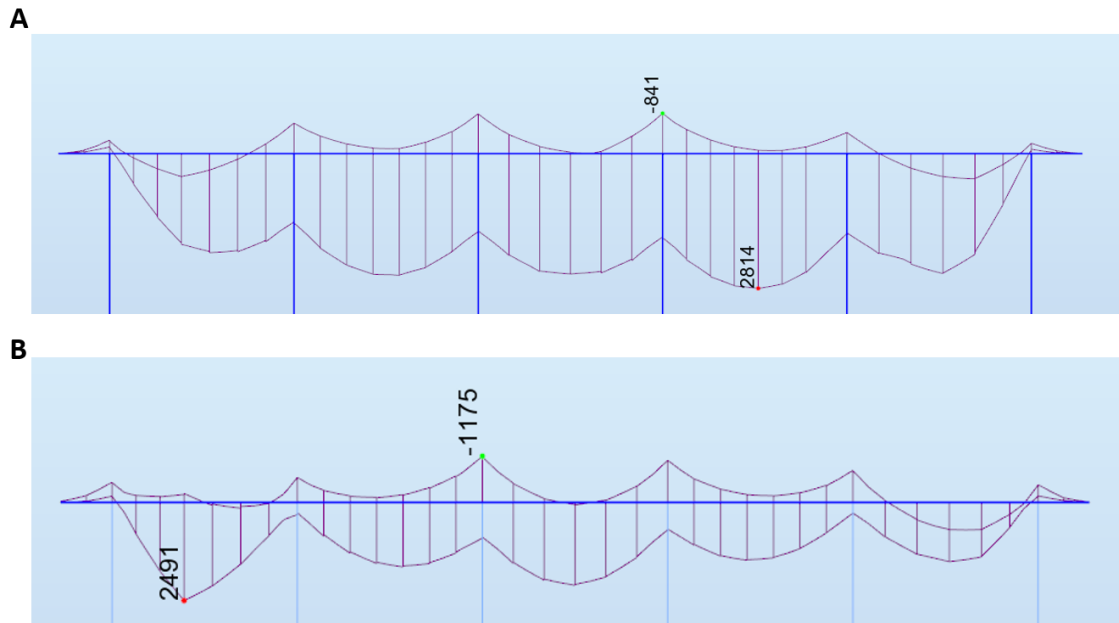
### 6.2 Palkkien terästen mitoitus

Palkkien raudoitukset mitoitetiin identtisiksi identtisille palkeille. Täten reunapalkkien raudoitus mitoitetiin käyttäen näiden palkkien suurinta mitoittavaa momenttia, leikkausvoimaa ja vääntöä. Samoin matkustajasillan alapuoliset palkit 4 ja 5 mitoitetiin käyttäen näiden palkkien suurimpia rasituksia. Vain yksittäinen palkki 3, joka sijaitsee matkustajasillan alla, mitoitetiin erikseen. Palkkien mitoittavat momentit (taivutusraudoitus), leikkausvoimat (leikkausraudoitus), vääntö ja lasketut raudoitukset on esitetty taulukoissa 9–11. Hakateräkset ovat 4-leikkeisiä NCCI2:n mukaisesti, jolloin

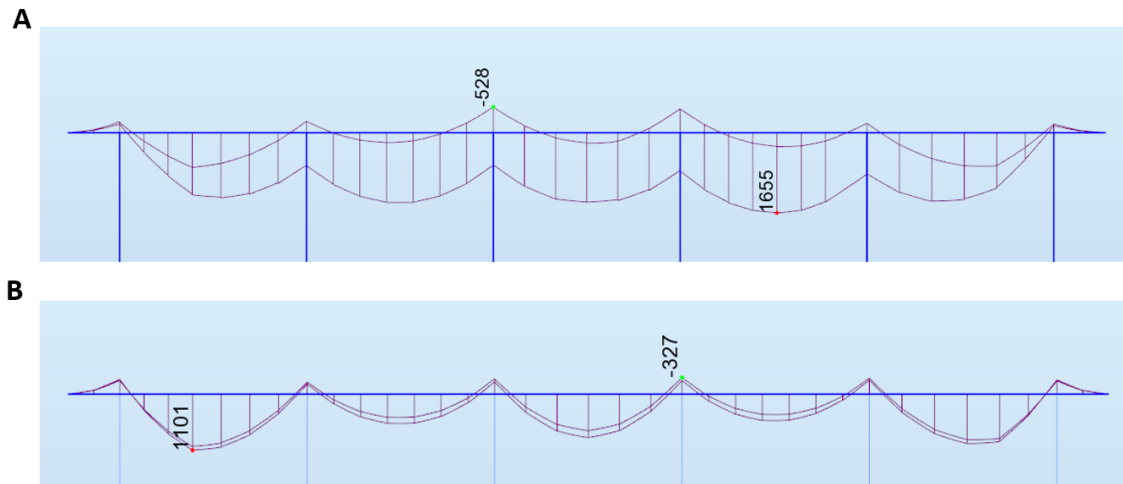
hakaterästen poikkisuuntainen etäisyys palkeille 1 ja 2 on 479 mm ja muille palkeille 179 mm. Molemmat arvot alittavat leikkausraudoitustankojen maksimietäisyyden poikkisuunnassa, joka on 600 mm. Hakaterästen maksimietäisyys pitkittäissuunnassa on 200 mm vääntöraudoitustissa palkissa, mikä muodostui kaikkien palkkien osalta määrääväksi etäisyydeksi. Vääntöraudoitus mitoitettiin suurimman vääntömomentin mukaan, jos laskenta osoitti, että palkki halkeilee ilman vääntöraudoitusta. Vain palkin 3 osalta vääntömomentti jäi niin pieneksi, että palkki olisi kestänyt ilman uuman raudoitusta. On suositeltavaa, ettei rakenteissa mitään pintoja jätetä raudoittamatta, varsinkin kun kyseessä on massiiviset rakenteet ja tulevan käyttöikänsä aikaisia kaikkia kuormitustilanteita on vaikea ennakoida (Gustafsson 2022). Siksi myös palkille 3 suunniteltiin uuman raudoitus (T16k150), jolloin vääntöteräksiä sijoitettiin uuman molemmin puolin yksitoista kappaletta. Esimerkkilaskenta palkeille on esitetty liitteessä 3.

#### 6.2.1 Palkkien terästen mitoitus, reunapalkit 1 ja 2

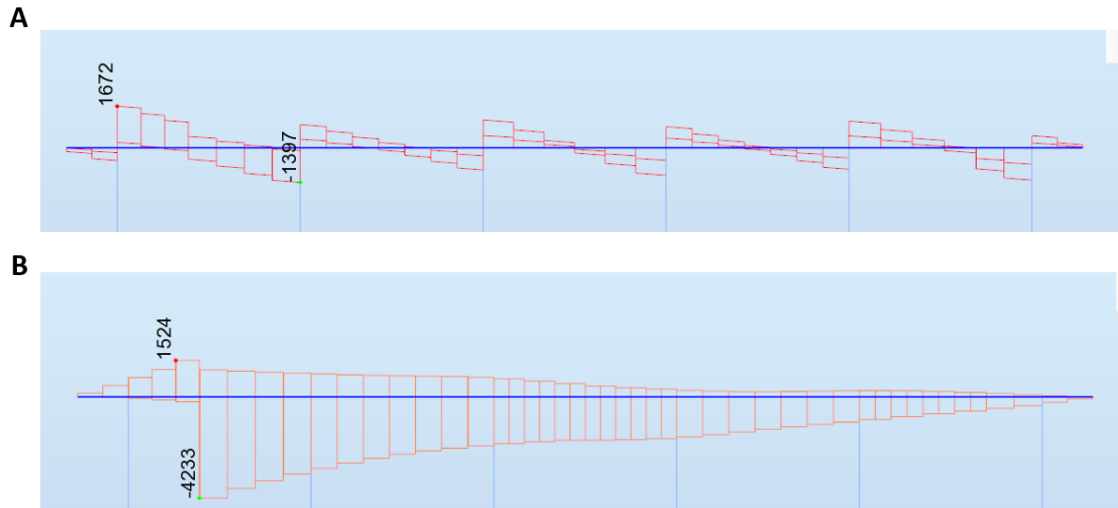
Laiturilohkon reunapalkkien raudoitukset mitoitettiin samanlaisiksi käyttäen suurimpia mitoittavia taivutusmomenteja (kuva 14 ja 15), leikkausvoimia (kuva 16A) ja vääntömomenttia (kuva 16B). Näiden mitoitusvoimien avulla lasketut reunapalkkien raudoitukset on esitetty taulukossa 7. Vääntöraudoituksen rajakuormaksi saatiin 2 915 kN×m, jonka avulla reunapalkkien vääntöraudoitus mitoitettiin symmetriseksi palkin molempiin päihin fenderituen kyljestä 1,45 m palkin keskikohdan suuntaan (T16k80), koska fenderikuormat ovat mahdollisia palkin molempiin päihin.



Kuva 14. Reunapalkkien 1 ja 2 suurimmat mitoittavat taivutusmomentit murtorajatilassa (MRT) A) palkin ala- ja B) yläpinnan taivutusraudoituksille. Suurin taivutusmomentti palkin alapinnassa saatiin kuormitusyhdistelmällä 2c, jossa mobiilinosturi sijaitsi lähellä palkkia 1. Suurin taivutusmomentti palkin yläpinnalle aiheutui kuormituksesta 3e-onnettomuus palkille 2. Onnettomuuskuormituksessa oli kaikki lohkon omat painot, maihinnoususillan ja matkustajasillan tungoskuormat, tuulikuormat ja lumikuormat sekä palkin 2 fenderikuormat.



Kuva 15. A) Reunapalkkien 1 ja 2 suurimmat mitoittavat taivutusmomentit käyttörajatilassa (FRE) palkin ala- ja yläpinnan taivutusraudoituksille sekä B) suurimmat mitoittavat taivutusmomentit käyttörajatilassa (QPR) palkin ala- ja yläpinnan taivutusraudoituksille. A) Suurin taivutusmomentti (FRE) palkin ala- ja yläpinnassa saatiin kuormitusyhdistelmällä 2c, jossa mobiilinosturi sijaitsi lähellä palkkia 1. B) Suurin taivutusmomentti (QPR) sekä palkin ala- että yläpinnassa saatiin kuormitusyhdistelmällä 3e-Onnettomus palkille 2. Onnettomuuskuormituksessa oli kaikki lohkon omat painot, maihinnoususillan ja matkustajasillan tungoskuormat, tuulikuorma ja lumikuormat sekä palkin 2 fenderikuormat.



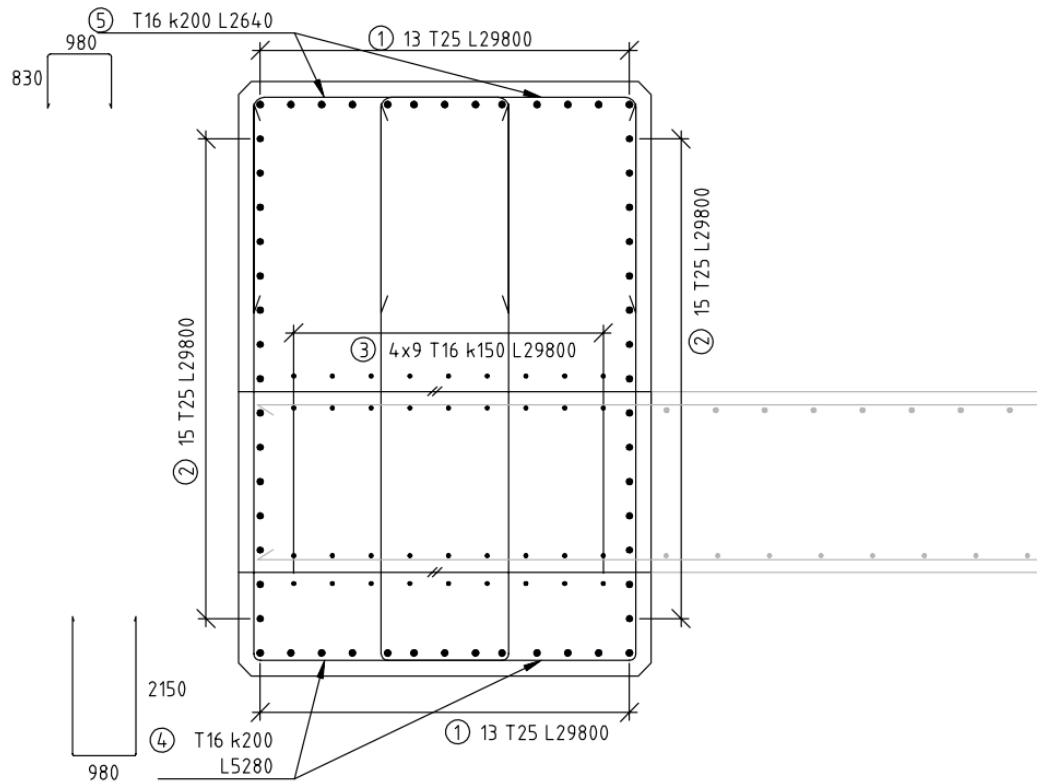
Kuva 16. Reunapalkkien 1 ja 2 suurimmat mitoittavat A) leikkausvoimat ja B) vääntömomentit murtorajatilassa. Suurimmat leikkausvoimat ja vääntömomentit aiheutuivat kuormituksesta 3e-onnettomuus palkille 2.

Onnettomuuskuormituksessa oli mukana kaikki lohkon omat painot, maihinnoususillan ja matkustajasillan tungoskuormat, tuulikuormat ja lumikuormat sekä palkin 2 fenderikuorma.

Taulukko 9. Reunapalkkien 1 ja 2 mitoittavat voimat ja raudoitukset. Esimerkkilaskenta palkeille on esitetty liitteessä 3.

	TAIVUTUS (kN×m)		LEIKKAUS kN	VÄÄNTÖ kN×m	
	Alapinta	Yläpinta	Haat	Sivut	Haat
<b>MRT</b>	2 814	1 175	1 672 kN	4 233	4 233
<b>KRT (FRE)</b>	1 655	528			
<b>KRT (QPR)</b>	1 101	327			
<b>Raudoitus</b>	13T25	13T25	T16k200	15T25	T16k80

Reunapalkin poikkileikkauksen raudoituspiirustus on esitetty kuvassa 17.

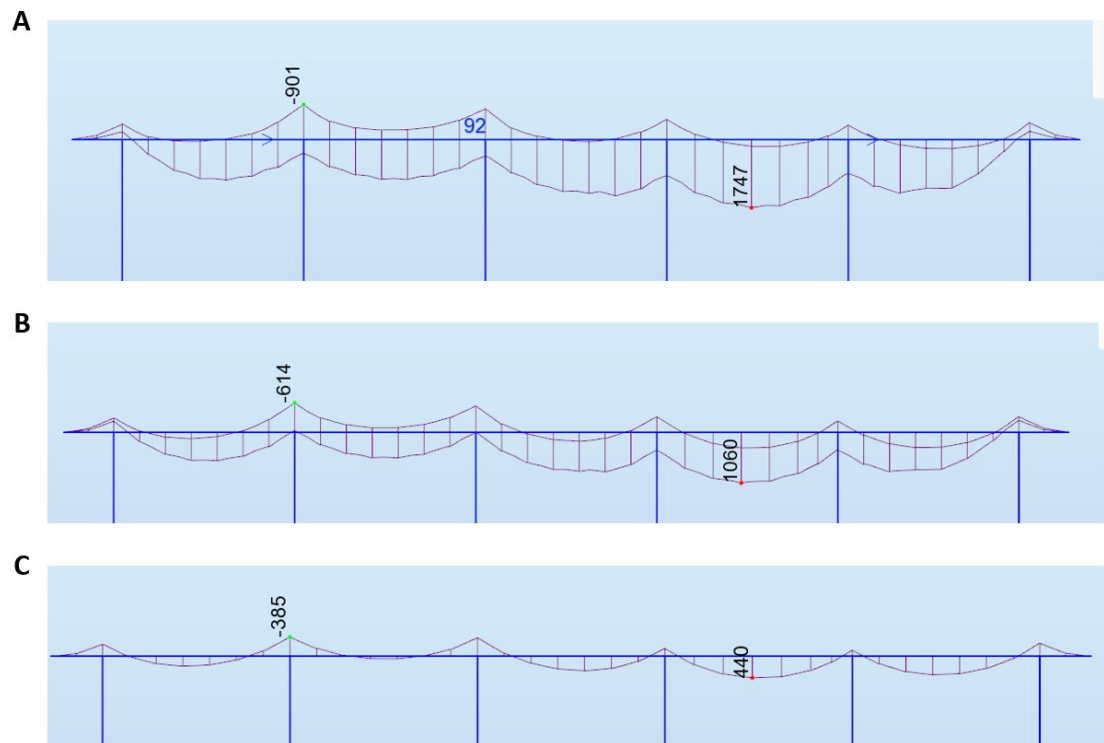


Kuva 17. Reunapalkin poikkileikkauksen raudituspiirustus. Piirustuksessa on esitetty palkin ylä- ja alapinnan tavutusraudoitukset (1), palkin sivujen vääntöraudoitukset (2), kolmevaiheisen valun edellyttämät valmistusaikaista halkeilua estävät teräkset (3) sekä nelileikkeiset hakateräkset (4 ja 5). Hakateräksiä tihennetään k200 jaosta k80 jakoon niillä osin palkkia, joissa fenderikuorman aiheuttama vääntö edellyttää tiheämmän kuin k200 jaon. Laatan 56 teräkset on esitetty kuvassa harmaalla.

### 6.2.2 Palkkien terästen mitoitus, maihinnoususillan alapuolinen palkki 3

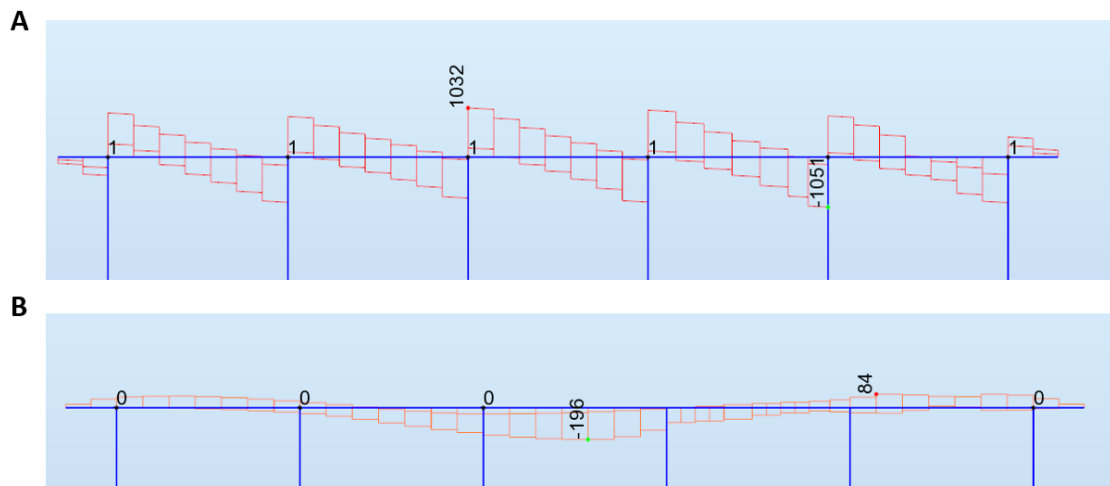
Laiturilohkon maihinnoususillan alapuolisen palkin raudoitukset mitoitettiin erikseen käyttäen palkille saatuja suurimpia mitoittavia taivutusmomenteja (kuva 18), leikkausvoimia (kuva 19A) ja vääntömomenttia (kuva 19B). Näiden mitoitusvoimien avulla lasketut maihinnoususillan alapuolisen palkin 3 raudoitukset on esitetty taulukossa 10. Käytännössä palkille aiheutunut suurin

vääntömomentti oli niin pieni, ettei sen perusteella palkin uumia olisi täytynyt vääntöraudoittaa. Kuitenkin palkin uumiin sijoitettiin T16k150 teräkset, jotta kaikki pinnat tulisi raudoitettua.



Kuva 18. Maihinnoususillan alapuolisen palkin 3 suurimmat mitoittavat taivutusmomentit A) murtorajatilassa (MRT), B) käyttörajatilassa (FRE) ja C) (QPR) palkin ala- ja yläpinnan taivutusraudoituksille. Kaikissa tapauksissa suurimmat taivutusmomentit saatiin kuormitusyhdistelmällä 2c, jossa mobiilinosturi sijaitsi palkin 3 päällä.





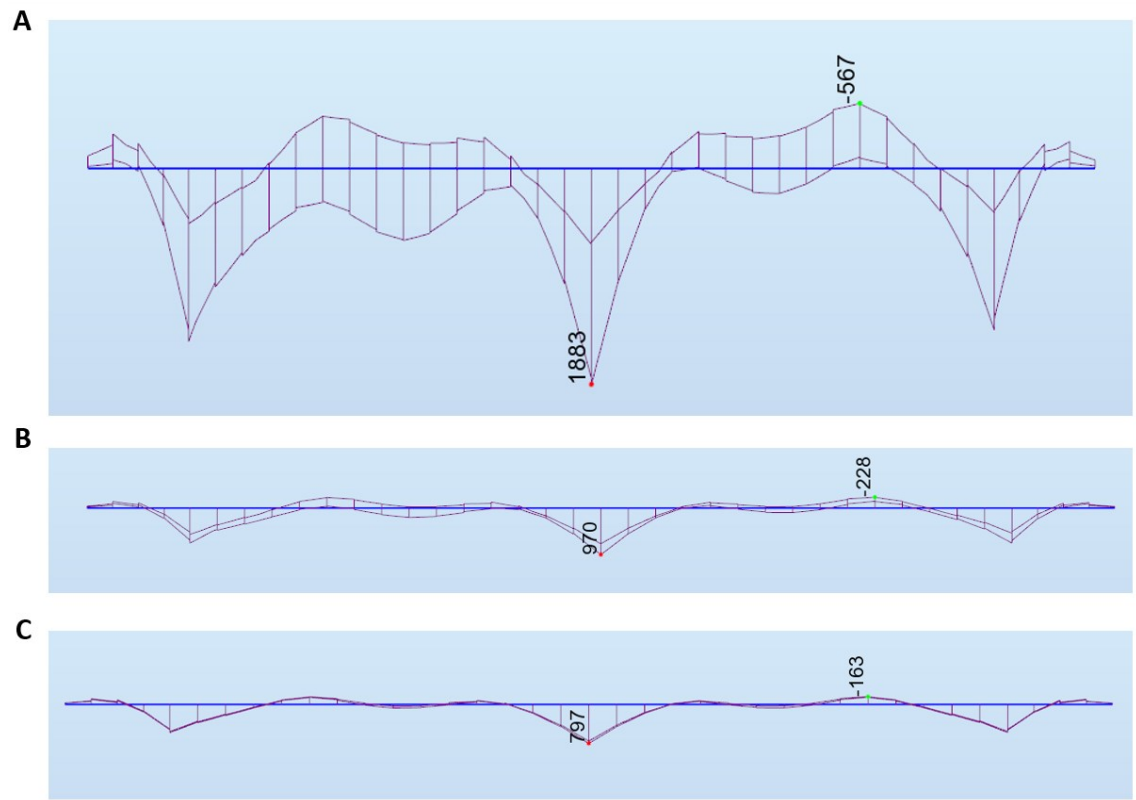
Kuva 19. Maihinnoususillan alapuolisen palkin 3 suurimmat mitoittavat A) leikkausvoimat ja B) vääntömomentit murtorajatilassa. Suurimmat leikkausvoimat ja vääntömomentit aiheutuivat kuormitusyhdistelmästä 2c, jossa mobiilinosturi sijaitsi Palkin 3 päällä.

Taulukko 10. Maihinnoususillan alapuolisen palkin 3 mitoittavat voimat ja raudoitukset. Palkki 3 laskettiin kuten Palkit 1 ja 2, joiden laskenta on esitetty Liitteessä 3.

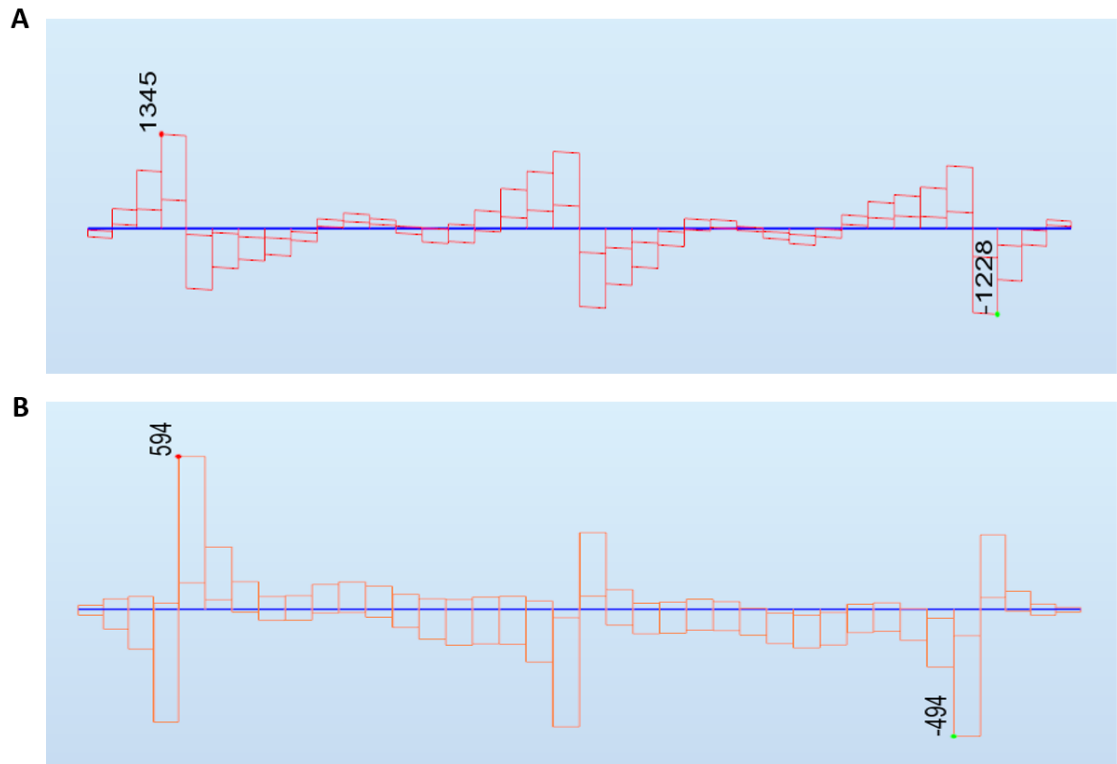
	TAIVUTUS (kN×m)		LEIKKAUS (kN)	VÄÄNTÖ (kN×m)	
	Alapinta	Yläpinta	Haat	Sivut	Haat
<b>MRT</b>	1 747	901	1 051 kN	196	196
<b>KRT (FRE)</b>	1 060	614			
<b>KRT (QPR)</b>	440	385			
<b>Raudoitus</b>	7T25	5T25	T16k200	11T16	T16k200

### 6.2.3 Palkkien terästen mitoitus, matkustajasillan alapuoliset palkit 4 ja 5

Laiturilohkon matkustajasillan alapuolisten palkkien raudoitukset mitoitettiin samanlaisiksi käyttäen suurimpia mitoittavia taivutusmomenteja (kuva 20), leikkausvoimia (kuva 21A) ja vääntömomenttia (kuva 21B). Näiden mitoitusvoimien avulla lasketut palkkien 4 ja 5 raudoitukset on esitetty taulukossa 11.



Kuva 20. Matkustajasillan alapuolisten palkkien 4 ja 5 suurimmat mitoittavat taivutusmomentit A) murtorajatilassa ja käyttöraajatilassa B) tavallisella ja C) pitkäaikaisella kuormituksella palkin ala- ja yläpinnan taivutusraudoituksille. Kaikissa tapauksissa suurimmat taivutusmomentit saatiin kuormitusyhdistelmällä 3e-onnettomuus palkille 4. Onnettomuuskuormituksessa oli kaikki laiturilohkon omat painot, maihinnoususillan ja matkustajasillan tungoskuormat, tuulikuormat ja lumikuormat sekä palkin 2 fenderikuormat.



Kuva 21. Matkustajasillan alapuolisten palkkien 4 ja 5 suurimmat mitoittavat A) leikkausvoimat ja B) vääntömomentit murtorajatilassa. Suurimmat leikkausvoimat (palkki 4) ja vääntömomentit (palkki 5) aiheutuivat kuormitusyhdistelmästä 3e-onnettomuus. Onnettomuuskuormituksessa oli kaikki laiturilohkon omat painot, mairinnoususillan ja matkustajasillan tungoskuormat, tuulikuormat ja lumikuormat sekä palkin 2 fenderikuormat.

Taulukko 11. Matkustajasillan alapuolisten palkkien 4 ja 5 mitoittavat voimat ja raudoitukset. Palkit 4 ja 5 laskettiin kuten Palkit 1 ja 2, joiden laskenta on esitetty liitteessä 3.

	TAIVUTUS (kN×m)		LEIKKAUS (kN)	VÄÄNTÖ (kN×m)	
	Alapinta	Yläpinta	Haat	Sivut	Haat
<b>MRT</b>	1 883	567	1 345	594	594
<b>KRT (FRE)</b>	970	228			
<b>KRT (QPR)</b>	797	163			
<b>Raudoitus</b>	9T25	5T25	T16k200	7T20	T16k180

### 6.2.4 Palkkien terästen mitoitus, käyttöasteet

Palkkien 1–5 raudoitusten käyttöasteet murtorajatilassa (MRT) ja käyttörajatilassa: tavallinen (FRE) ja pitkäaikainen (QPR) kuormitus on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Palkkien raudoitusten käyttöasteet murtorajatilassa (MRT) sekä käyttörajatilassa tavallisessa (FRE) ja pitkäaikaisessa (QPR) kuormituksessa.

Palkki		TAIVUTUS		LEIKKAUS	VÄÄNTÖ	
		Alapinta	Yläpinta	Haat	Sivut	Haat
1 ja 2	ULS	46 %	19 %	48 %	97 %	94 %
	FRE	61 %	20 %			
	QPR	69 %	21 %			
3	ULS	66 %	47 %	37 %	0 %	0 %
	FRE	83 %	78 %			
	QPR	57 %	83 %			
4 ja 5	ULS	67 %	72 %	57 %	91 %	99 %
	FRE	66 %	35 %			
	QPR	86 %	76 %			

### 6.3 Liikuntasaumaterästappien mitoitus

Liikuntasaumojen terästappeja mitoitettaessa laiturilohkon reunalle määriteltiin FEM-mallissa viivakuormat, joiden suuruus vaihteli 100–400 kN/m välillä aina 100 kN/m:n välein. Jokaisella kuormituksella laskettiin suman solmujen siirtymien keskiarvo, jota käytettiin jousivakion laskennassa. Viivakuorma jaettiin tällä siirtymien keskiarvolla, jolloin saatiin jousivakio. Jatkolaskentaa varten näistä eri kuormitusten jousivakioista otettiin keskiarvo (28 400 (kN/m) / m).

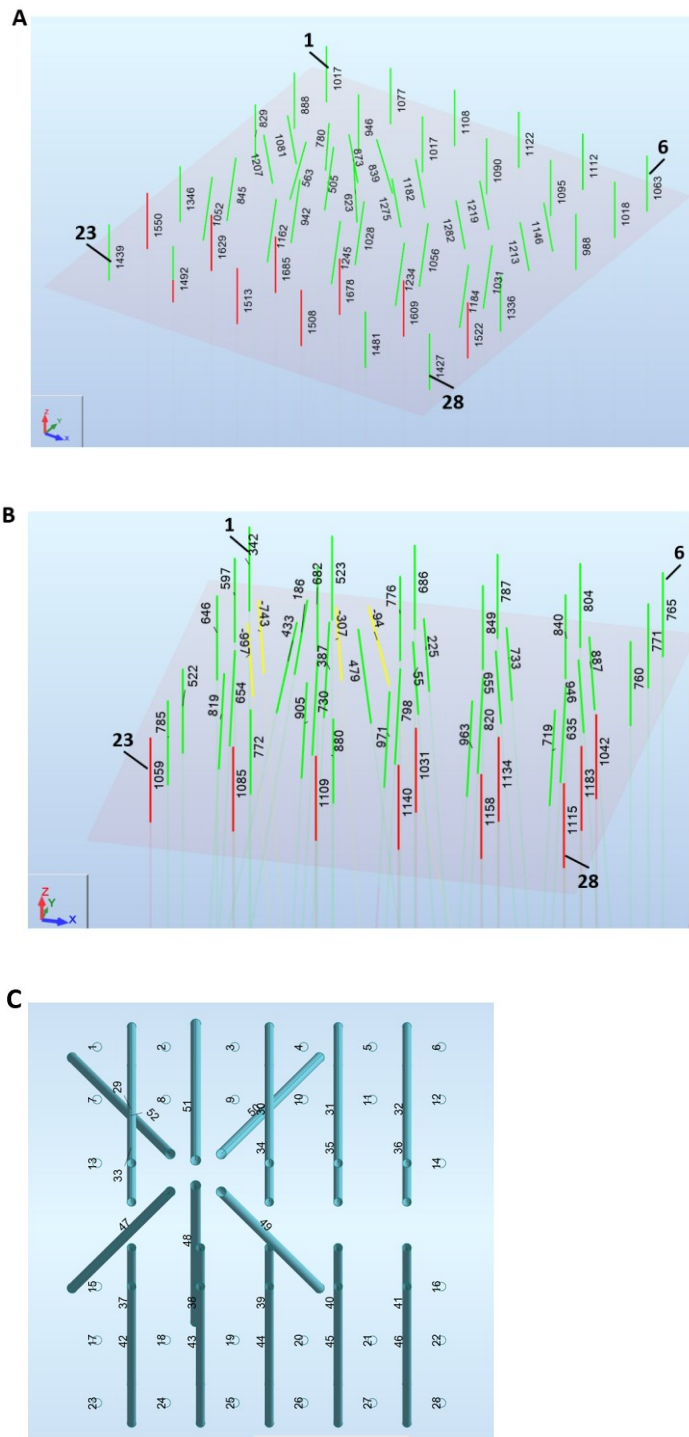
Laatan reunaan määritettiin tämän suuruiset jousituet metrin välen (reunan jokaisen solmun kohdalle).

Jousitukien määrittämisen jälkeen ajoneuvonosturin tassukuorma sijoitettiin FEM-mallissa lohkon liikuntasauman reunalle, minkä jälkeen solmujen  $F_z$ -leikkausvoimat summattiin ja jaettiin suunniteltujen tappien (k900, n: 29) määrällä, jolloin saatiin jokaiselle tapille tuleva leikkausvoima. Tapin halkaisijaksi valittiin 50 mm (S355 teräs), jolloin nivelellisestä mitoituksesta saatiin suurimmat käyttöasteet. Kaikki käyttöasteet jäivät alle sadan prosentin. Terästappimitoitus on esitetty liitteessä 4.

#### 6.4 Paalujen kuormitukset

Paalujen yläpään normaalivoimat laskettiin pelkillä omilla painoilla (1, 4, 5) ja ne on esitetty Kuvassa 22A. Tällä kuormituksella paaluihin aiheutui pelkkää puristusta, joiden maksimiarvot sijoittuivat matkustajasillan alapuolisille paaluille. Lisäksi vastaavat normaalivoimat laskettiin kuormitustapauksille 1a ja 1b (1, 2, 4, 5, 6, 7), joista saatiin suurin paaluille aiheutunut veto (Kuva 22B). Suurimman vetoa aiheuttavan normaalivoiman (-999 kN) sai aikaan kuormitusyhdistelmä 1a ja 1b paalulle 33.

Suurin normaalivoima, 3 625 kN (puristusta) aiheutui kuormitusyhdistelmästä 3e-onnettomuus paalulle 33 (Kuva 22C). Kyseisellä paalulla maksimimomentti oli 188 kN×m kohdassa 11,25 m, jossa samanaikainen normaalivoima oli 3 533 kN. Vastaaviksi käyttöasteiksi näille kahdelle eri kuormitukselle ( i) normaalivoiman maksimi, ii) suurin momentti ja sitä vastaava normaalivoima), saatiin 38 % ja 43 % (liite 5). Maksimimomentin (459 kN×m) aiheutti kuormitusyhdistelmä 4a (jääkuorman aiheuttama momentti) reunapaalulle 1. Tämän momentin ja vastaavan normaalivoiman (1 295 kN) kuormituksen käyttöasteeksi saatiin 37 % (liite 5).



Kuva 22. Paalukuormat (nomaalivoimat) A) rakenteen omilla painoilla ja B) kuormitustapauksilla 1a ja 1b, joista aiheutui suurin veto (keltainen) paaluille. Suurimmat arvot (noin 1 600 kN) sijaitsivat matkustajasillan alapuolisilla paaluilla omien painojen kohdalla ja palkin 2 vieressä kuormitustapauksessa 1a ja 1b. C) Lohkon paalujen numerointi ja sijainti. Paalut 1–46 ovat uusia teräspaaluja ja paalut 47–52 vanhoja tihtaalissa sijaitsevia paaluja.

## 7 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin erään Suomeen rakennettavan pistolaiturin kantavia rakenteita toimeksiantona Insinööritoimisto Profundille. Sunnittelun lähtökohtana olevat kuormitusyhdistelmät olivat valmiiksi määriteltyinä ennen suunnittelun alkua, joten niihin ei tässä työssä keskitytty. Suunnitteluprosessi alkoi dwg-piirustuksen muokkaamisella FEM-laskentaan sopivaksi malliksi, minkä jälkeen eri kuormitustilanteista rakennettiin FEM-laskentaohjelmassa yhteensä seitsemän erilaista mallia. Näiden mallien avulla määritettiin murtorajatilassa paaluille aiheutuvat maksiminormaalivoimat ja momentit, laattojen ylä- ja alapintojen maksimimomentit sekä toiminnallisten palkkien maksimi leikkausvoimat, ylä- ja alapintojen momentit sekä vääntövoimat.

Käyttörajalimitoitusta varten määritettiin käyttörajatilassa tavalliset ja pitkäaikaiset maksimimomentit, joita tarvittiin halkeilumitoituksen laskentaan. Pitkäaikaisessa kuormituksessa huomioitiin myös viruman vaikutus. Halkeilua on tärkeää rajoittaa pistolaiturin kaltaisissa murtovedelle altistuvissa rakenteissa, sillä syviin halkeamiin pääsevä suolapitoinen vesi aiheuttaa terästen korroosiota ja lyhentää merkittävästi käyttöikää. Halkeamaleveyden suositusarvot määräytyivät suunnittelukäyttöiän sekä käytettävän betonin rasitusluokan mukaan (RIL 201-3-2013, taulukko 4). Ajoneuvonosturin kuorman avulla mitoitettiin kahden lohkon välille asennettavat liikuntasaumateräkset, joiden avulla rakenteessa kuormat siirtyvät lohkolta viereiselle lohkolle.

Fenderikuorma, eli aluksen törmäys laituriin joko rantautumisen yhteydessä tai onnettomuuden seurauksena, muodostui monessa tapauksessa laattojen maksimimomentteja mitoittavaksi kuormaksi. Fenderikuorman lisäksi palkeilla merkittävä kuormitus oli ajoneuvonosturi, jos sen kuormitus sattui osumaan palkin kohdalle. Näin ollen oli tärkeää, että laskennassa käytettiin useita erilaisia malleja, joissa testattiin ajoneuvonosturin erilaisia liikeratoja.

Koska työssä suunniteltiin paalulaattarakenteinen laituri, laattojen lävistysmitoitus piti tarkistaa. Paaluihin kohdistuvat normaalivoimat kasvoivat paikoitellen noin 3 000 kN:iin. Lävistysraudoituksen tarve tarkastettiin vain

niiden laatojen osalta, joiden paalut kiinnittyivät suoraan laattoihin, eikä paalujen yläpuolella sijainnut toiminnallisia palkkirakenteita. Laskelmissa vain toisen näistä, eli ohuemman laatan raudoitus, vaati vahvistusta suurien lävistysvoimien johdosta. Käytännössä lävistysraudoitus toteutettiin laatan yläpinnan teräsverkkoa tihentämällä, sillä se oli yksinkertaisin ja kustannustehokkain tapa vahvistaa raudoitusta kestävämmän paalujen aiheuttamat lävistysvoimat. Toinen tapa olisi ollut käyttää perinteistä lävistysraudoitusta ja toteuttaa se esimerkiksi kaupallisten raudoitusjärjestelmien avulla. Suurissa rakennuskohteissa valmiit raudoitusjärjestelmät nostavat kustannusarviota merkittävästi, eikä niiden käyttö ole perusteltua, jos rakenteen vahvistus pystytään toteuttamaan muilla keinoin.

Teräsbetonisten rakenteiden eli laattojen ja palkkien lisäksi opinnäytetyössä laskettiin teräspaalujen kestävyys. Paalujen laskennassa oletettiin niiden olevan onttoja teräspaaluja, vaikka tosiasiallisesti paalut toteutetaan liittorakenteina, joissa teräspaalujen sisään valetaan teräksellä vahvistettu betoni. Kyseinen liittorakenne on huomattavasti kestävämpi kuin pelkkä teräskuori, joten voidaan olettaa, että kyseinen rakenne kestää vähintään samat rasitukset kuin työssä mitoitettu teräspuutkipaalu. Lisäksi liittorakenne on huomattavasti painavampi kuin pelkkä teräspuutkipaalu, mikä vähentää ankkuroinnin tarvetta paaluilla, joihin kohdistuu vain vähäistä vetoa.

Opinnäytetyössä pistolaiturin rakenne suunniteltiin siten, että laiturin valua varten alapinta muotitettaisiin kokonaan. Käytännössä alapinnan muotit on haastava purkaa, joten yhtenä vaihtoehtona voitaisiin käyttää rakenteeseen jääviä elementteinä valmistettavia kuorilaattoja. Tällaisen rakenteen mitoitus kuitenkin poikkeaa joiltain osin tässä työssä esitetystä mitoituksesta, muun muassa käyttörajatilamitoituksen halkeamaleveyden laskennan osalta. Opinnäytetyö muodosti pohjan laiturilohkon suunnittelulle, jota tarkennettiin myöhemmin muun muassa paalujen rakenteen ja laattojen valutapaan perustuen.



## Lähteet

Elementtisuunnittelu 2020. Liikuntasauamat. Betonia Oy. Viitattu 21.9.2022.

<https://www.elementtisuunnittelu.fi/liitokset/liitosten-toiminta/liikuntasauamat>

RIL 201-3-2013. 2013. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat.

Vesirakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry. Helsinki.

SFS-EN 1990 +A1 +AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. SFS 2010. 2. painos.

SFS-EN 1991-1-1/AC. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. SFS 2011.

SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

SFS-EN 1993-1-1/A1. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS 2014. 1. painos.

Stening, M. & Vähäkäkelä, M. 2008. Tielaitureiden inventointiohje. Tiehallinto. Helsinki.

Sundberg, P. & Karvonen, T. 2021. Investoinnit Suomen satamiin 2016–2025. Liikenne ja viestintävirasto Traficom. Helsinki.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2019. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Betonirakenteet. Ympäristöministeriö. Helsinki.

Väyläviraston ohjeita 5/2022. 2022. Eurokoodin soveltamisohje.

Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. Väylävirasto. Helsinki.

## Laatan terästen laskenta

1 of 9

Rakennusosa: LAATTA 57 H1100 , Yläpinta Y-suuntainen momentti

Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

### Materiaali

**Betoni C35/45**

Betonin puristuslujuus  $f_{ck} := 35 \cdot \text{MPa}$  osavarmuusluku  $\gamma_c := 1.5$  Toteutusluokka 2

$$f_{ctm} := 0.3 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa} = 3.21 \text{ MPa}$$

Vetolujuus (5 % fraktiili)  $f_{ctk.005} := 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.247 \text{ MPa}$

Puristuslujuuden mitoitusarvo  $f_{cd} := 0.85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Vetolujuuden mitoitusarvo  $f_{ctd} := \frac{f_{ctk.005}}{\gamma_c} = 1.498 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Puristuslujuuden keskiarvo

Betonin kimmokerroin

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \cdot \text{MPa} = 43 \text{ MPa} \quad E_{cm} := 22 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10 \cdot \text{MPa}} \right)^{0.3} \cdot \text{GPa} = 34077 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bilineaarisen jännitys-muodonmuutosyhteyden mukaan (NCCI 2 (2022): Kuva 3.7)

- muodonmuutos maksimilujuudessa  $\varepsilon_{c3} := 0.00175$

- betonin murtopuristuma  $\varepsilon_{cu} := 0.0035$

Rasitusten ja käyttöiän mukainen betonipeitteen paksuus

Betonipeitteen nimellispaksuus  $c_{nom} := 50 \cdot \text{mm}$

Raudoituksen mittapoikkeama  $\Delta c_{dev} := 10 \cdot \text{mm}$

Ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvovaatimus

$$c_{min.dur} := c_{nom} - \Delta c_{dev} = 40 \text{ mm}$$

Lähinnä betonipintaa olevan halkeilua rajoittavan jännittämättömän raudoituksen todellinen betonipeite

$$c_{true} := c_{nom} + 10 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$$

Halkeamaleveyslaskennassa käytettävä betonipeite

$$c := \min(c_{true}, 1.4 \cdot c_{min.dur}, 50 \text{ mm}) = 50 \text{ mm}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

**Betoniteräs B500B**

Myötöraja

$$f_{yk} := 500 \cdot \frac{N}{mm^2} \quad \text{osavarmuusluku } \gamma_s := 1.15 \quad \text{Toteutusluokka 2}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 435 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Kimmokerroin } E_s := 2.0 \cdot 10^5 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Suurinta voimaa vastaavan venymän ominaisarvo (sitkeysluokka B)  $\varepsilon_{uk} := 0.005$ 

$$\text{Myötövenymän mitoitusarvo} \quad \varepsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 0.002$$

$$\text{Murtovenymän mitoitusarvo} \quad \varepsilon_{ud} := 0.010$$

**1. MURTORAJATILA****1.1 TAIVUTUSMOMENTTIKAPASITEETTI (ULS)****Poikkileikkaustiedot**

$$\text{Laatan paksuus} \quad h := 1100 \text{ mm} \quad \text{leveys } b := 1000 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Tangon halkaisija} \quad \phi := 25 \cdot \text{mm} \quad C := 125 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Raudoitusala} \quad A_s := \frac{b}{C} \cdot (0.5 \cdot \phi)^2 \cdot \pi = 3927 \text{ mm}^2$$

$$\text{Betonipeitteen paksuus} \quad c_{true} = 60 \text{ mm}$$

$$\text{Tehollinen korkeus} \quad d := h - c_{true} - 0.5 \cdot \phi = (1 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$\text{Raudoituksen normaalivoima} \quad N_s := A_s \cdot f_{yd} = 1707 \text{ kN}$$

$$\text{Puristusvyöhykkeen tehollinen korkeus} \quad y := \frac{N_s}{b \cdot f_{cd}} = 86 \text{ mm}$$

$$\text{Puristusvyöhykkeen korkeus} \quad x := \frac{y}{0.8} = 108 \text{ mm}$$

$$\text{Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus} \quad \beta := \frac{y}{d} = 0.084$$

$$\varepsilon_s := \frac{f_{yk}}{E_s} = 0.0025$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

$$\varepsilon_{cu} := 0.0035$$

$$\beta_b := 0.8 \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_s} \right) = 0.467 \quad \text{vaatimus} \quad \beta_b \geq \beta$$

OK

Betonin puristusvyöhykkeen  
puristuskestävyys

$$N_c := 0.8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 1707 \text{ kN}$$

$$\text{Sisäinen momenttivarsi} \quad z := d - 0.5 \cdot y = 984 \text{ mm}$$

### Taivutusmomenttikapasiteetti

$$M_u := N_c \cdot z = 1681 \text{ kNm}$$

$$M_d := 1356 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_d}{M_u} = 0.807 \quad \text{käyttöaste 81 \%}$$

### Minimiraudoitus:

$$A_{smin1} := 0.26 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot \frac{d}{f_{yk}} = 1715 \text{ mm}^2$$

$$C_2 := b \cdot (0.5 \cdot \phi)^2 \cdot \frac{\pi}{A_{smin1}} = 286 \text{ mm}$$

$$A_{smin2} := 0.0013 \cdot b \cdot d = 1336 \text{ mm}^2$$

$$C_1 := b \cdot (0.5 \cdot \phi)^2 \cdot \frac{\pi}{A_{smin2}} = 367 \text{ mm}$$

## 2. KÄYTTÖRAJATILA

$$\text{Raudoitusala} \quad A_s = 3927 \text{ mm}^2$$

$$\text{Halkeamaleveyslaskennan betonipeite} \quad c = 50 \text{ mm}$$

$$\text{Tartuntaominaisuus (raudoitus) kerroin} \quad k_1 := 0.8$$

hyvä tartunta

$$\text{Poikkileikkauksen jännitys jakauman kerroin} \quad k_2 := 0.5$$

taivutus

$$\text{Kuorman vaikutusajan kerroin} \quad k_t := 0.4$$

pitkäaikaiset kuormat

Raudoitusala käyttörajatilassa

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.869 \quad \text{kimmokertoimien suhde} \quad \rho_0 := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.004 \quad \text{suhteellinen raudoitusala}$$

Puristusvyöhykkeen korkeus

$$x_p := \alpha_e \cdot \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_0}} - 1 \right) = 195.8 \text{ mm}$$

sisäinen momenttivarsi

$$z_0 := d - \frac{x_p}{3} = 962.2 \text{ mm}$$

Tehollisen vetoalueen pinta-ala betonissa

Tehollinen korkeus

$$h_{c,ef} := \min \left( 2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x_p)}{3}, \left( \frac{h}{2} \right) \right) = 181.3 \text{ mm}$$

$$A_{c,eff} := b \cdot h_{c,ef} = 181250 \text{ mm}^2$$

Teräksen halkaisija  $\phi = 25 \text{ mm}$

$$\rho_{\rho,eff} := \frac{A_s}{A_{c,eff}} = 2.167 \text{ 1\%}$$

## 2.1 LYHYTAIKAINEN KUORMITUSYHDISTELMÄ (FRE)

$w_{max} := 0.25 \cdot \text{mm}$  Sallitu halkeamaleveys 50 v käyttöiällä

Taivutusmomentti käyttörajatilassa (FRE)

$$M_k := 691 \cdot \text{kNm}$$

Halkeaman terästen jännitys

$$\sigma_s := \frac{M_k}{z_0 \cdot A_s} = 183 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Raudoituksen ja betonin venymäero

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\rho,eff}} \cdot \left( 1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \rho_{\rho,eff} \right)}{E_s} = 0.058 \text{ 1\%}$$

$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.055 \text{ 1\%}$  vähimmäisarvo

$$\varepsilon_x := \begin{cases} \varepsilon_{x1} & \text{if } \varepsilon_{x1} \geq \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{x2} & \text{else} \end{cases} = 0.058 \text{ 1\%}$$

vastaava teräsjännitys

$$\varepsilon_x \cdot E_s = 116 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$k_3 := 3.4$        $k_4 := 0.425$       kansalliset kertoimet

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{\rho,eff}} = 366 \text{ mm}$$

#### Halkeamaleveys

$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.213 \text{ mm}$  = laskettu halkeamaleveys

Sallittu halkeamaleveys       $w_{max} = 0.25 \text{ mm}$

$$\frac{w}{w_{max}} = 0.85 \quad \text{käyttöaste } 85 \%$$

Raudoitus vähintään:

$$\phi := 25 \text{ mm} \quad C := 125 \text{ mm} \quad A_s = 3927 \text{ mm}^2$$

## 2.2 PITKÄAIKAINEN KUORMITUSYHDISTELMÄ (QPR), ilman virumaa

$w_{max} := 0.15 \cdot \text{mm}$       Sallittu halkeamaleveys 50 v käyttöiällä

Taivutusmomentti käyttörajatilassa (QPR)       $M_k := 494 \cdot \text{kNm}$

Halkeaman terästen jännitys       $\sigma_s := \frac{M_k}{z_0 \cdot A_s} = 131 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Raudoituksen ja betonin venymäero

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\rho,eff}} \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \rho_{\rho,eff}\right)}{E_s} = 0.032 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.039 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_x := \begin{cases} \varepsilon_{x1} & \text{if } \varepsilon_{x1} \geq \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{x2} & \text{else} \end{cases} = 0.039 \text{ 1\%}$$

vastaava teräsjännitys       $\varepsilon_x \cdot E_s = 78 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$k_3 := 3.4$        $k_4 := 0.425$       kansalliset kertoimet

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{p,eff}} = 366 \text{ mm}$$

**Halkeamaleveys**

$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.144 \text{ mm}$  =laskettu halkeamaleveys

Sallittu halkeamaleveys       $w_{max} = 0.15 \text{ mm}$       50 vuoden käyttöikä

$$\frac{w}{w_{max}} = 0.957 \quad \text{Käyttöaste } 96 \%$$

KRT mitoitus (QPR), viruma huomioitu

## Lähtötiedot

$RH := 80\%$  Ilman suhteellinen kosteus, rakenne ulkotilassa

$t_0 := 28 \text{ d}$  Betonin kuormitusikä

C35/45 Betonin lujuusluokka  
Sideaine normaalisti kovettuva

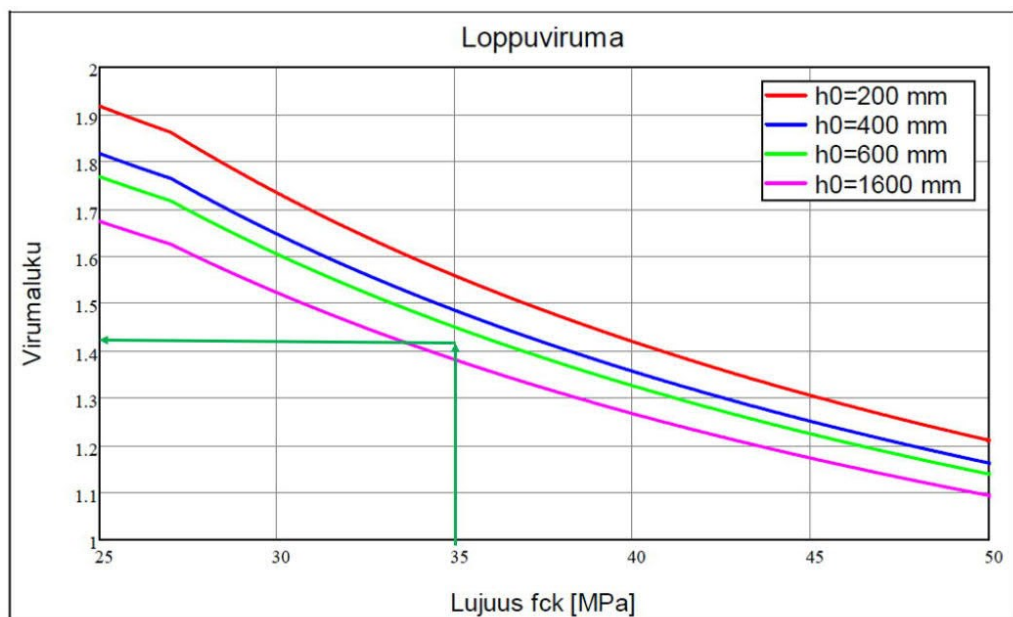
$b_{tot} := 30 \text{ m}$   $h := 1100 \text{ mm}$

$A_c := b_{tot} \cdot h = 33000000 \text{ mm}^2$  Betonipoikkileikkauksen ala

$u_c := 2 b_{tot} + 2 h = 62200 \text{ mm}$  Kuivuvan betonin piiri

$h_0 := 2 \cdot \frac{A_c}{u_c} = 1061 \text{ mm}$  Muunnettu paksuus

## NCCI.2:n mukainen virumaluvun määrittäminen



Kuva 3.4 Virumaluku muunnetun paksuuden arvoilla 200–1600 mm,  $t = \infty$ ,  $RH = 80\%$ , sementtityyppi N

$\varphi := 1.43$

$$E_{c,eff} := \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = 14.024 \text{ GPa}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.



Raudoituksen leikkauksen pa	$A_s = 3927 \text{ mm}^2$
Betonipeitteen paksuus KRT laskuissa	$c = 50 \text{ mm}$
Tartuntakerroin, hyvä	$k_1 := 0.8$
Taivutuskerroin	$k_2 := 0.5$
Kuorman vaikutusajan kerroin	$k_t := 0.4$ pitkäaikaiset kuormitukset

$$b := 1000 \text{ mm}$$

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{c,eff}} = 14.262 \quad \rho_0 := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.004$$

$$\text{Puristusvyöhykkeen korkeus} \quad x_p := \alpha_e \cdot \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_0}} - 1 \right) = 287.8 \text{ mm}$$

$$\text{Sisäinen momenttivarsi} \quad z_0 := d - \frac{x_p}{3} = 931.6 \text{ mm}$$

Suhteellinen raudoitusala

$$\text{Korkeus} \quad h_{c,ef} := \min \left( 2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x_p)}{3}, \left( \frac{h}{2} \right) \right) = 181.3 \text{ mm}$$

$$A_{c,eff} := b \cdot h_{c,ef} = 181250 \text{ mm}^2$$

**Teräksen halkaisija**  $\phi = 25 \text{ mm}$

$$\rho_{\rho,eff} := \frac{A_s}{A_{c,eff}} = 2.167 \text{ 1\%}$$

## 2.2 PITKÄAIKAINEN KUORMITUSYHDISTELMÄ (QPR)

$$w_{max} := 0.15 \cdot \text{mm} \quad \text{Sallitu halkeamaleveys 50 v käyttöiällä}$$

$$\text{Taivutusmomentti, QPR} \quad M_k := 494 \cdot \text{kNm}$$

$$\text{Teräksen jännitys halkeamassa} \quad \sigma_s := \frac{M_k}{z_0 \cdot A_s} = 135 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Raudoituksen ja betonin venymäero

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\rho,eff}} \cdot \left( 1 + \frac{E_s}{E_{c,eff}} \cdot \rho_{\rho,eff} \right)}{E_s} = 0.029 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.041 \text{ 1\%}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

$$\varepsilon_x := \begin{cases} \varepsilon_{x1} & \text{if } \varepsilon_{x1} \geq \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{x2} & \text{else} \end{cases} = 0.041 \text{ 1\%}$$

$$\text{Vastaava teräsännitys} \quad \varepsilon_x \cdot E_s = 81 \frac{N}{mm^2}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

kansalliset kertoimet

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{p,eff}} = 366 \text{ mm}$$

**Halkeamaleveys**

$$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.148 \text{ mm} \quad \text{=laskettu halkeamaleveys}$$

$$\text{Sallittu halkeamaleveys} \quad w_{max} = 0.15 \text{ mm}$$

$$\frac{w}{w_{max}} = 0.99 \quad \text{käyttöaste 99 \%}$$

## Laatan lävistysmitoitus

1/4

Laatta 58

$$\begin{aligned}
 V_{Ed} &:= 3016 \text{ kN} && \text{kokonaiskuorma, kuormitus 3e, paalu 19} \\
 \gamma_c &:= 1.5 && \text{betonin materiaaliveikotusluku} \\
 \alpha_{ct} &:= 1.0 && \text{betonin vetolujuuskerroin} \\
 d_y &:= 628 \text{ mm} && \text{yläpinnan d-mitta y-suuntaan} \\
 d_x &:= 603 \text{ mm} && \text{yläpinnan d-mitta x-suuntaan} \\
 d_1 &:= \frac{d_y + d_x}{2} = 615.5 \text{ mm} && \text{tehollinen d-mitta} \\
 D &:= 711 \text{ mm} && \text{paalun halkaisija} \\
 b &:= 6 \cdot d_1 + D = 4404 \text{ mm} && \text{laskennallinen raudoituskaista} \\
 \phi_y &:= 25 \text{ mm} && c_y := 140 \text{ mm} \\
 A_{sy} &:= (0.5 \cdot \phi_y)^2 \cdot \pi = 490.874 \text{ mm}^2 \\
 \phi_x &:= 25 \text{ mm} && c_x := 110 \text{ mm} \\
 A_{sx} &:= (0.5 \cdot \phi_x)^2 \cdot \pi = 490.874 \text{ mm}^2 \\
 f_{ck} &:= 35 \text{ MPa} && f_{ctk} := 2.2 \text{ MPa} && f_{ctd} := \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} = 1.467 \text{ MPa} \\
 u_1 &:= \pi \cdot (D + 2 \cdot 2 \cdot d_1) = 9968 \text{ mm} && \text{perustarkistuspiiri} \\
 \beta &:= 1.15 && \text{epäkeskisen kuorman kerroin, sisäpilari} && \text{EC2, kuva 6.21N} \\
 v_{Ed,1} &:= \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{d_1 \cdot u_1} = 0.565 \text{ MPa} && \text{Mitoitusjännitys} \\
 C_{Rd,c} &:= \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.12 && \text{Uuden Eurokoodin mukainen suositus} \\
 C_{Rd,c} &:= \frac{0.3}{\gamma_c} \cdot \frac{\left(\frac{D}{d_1} + 1.5\right)}{\left(\frac{D}{d_1} + 4\right)} = 0.103 && \text{Kansallinen liite, kun} \\
 &&& \text{leikkausraudoittamaton tai} \\
 &&& \text{lävistyskestävyyden yläraja}
 \end{aligned}$$

$$\rho_{Ly} := \frac{A_{sy}}{d_y \cdot c_y} = 0.006 \quad \text{raudoitussuhde} \quad 2/4$$

$$\rho_{Lx} := \frac{A_{sx}}{d_x \cdot c_x} = 0.007 \quad \text{raudoitussuhde}$$

$$\rho_L := \min(\sqrt{\rho_{Ly} \cdot \rho_{Lx}}, 0.02) = 0.006 \quad \text{geometrinen raudoitussuhde}$$

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_1}} = 1.57 < 2.0$$

$$v_{Rd,c} := C_{Rd,c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_L \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} = 0.457 \text{ MPa} \quad \text{Lävistyskestävyys}$$

$$\frac{v_{Ed,1}}{v_{Rd,c}} = 1.238 > 1, \quad \text{Tarvitsee leikkausraudoituksen}$$

$$V_{Rd,max} := 1.6 \cdot v_{Rd,c} \cdot \frac{u_1 \cdot d_1}{\beta} = 3897 \text{ kN} \quad \text{Lävistyskestävyyden yläraja}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = 0.774 < 1$$

Voidaan parantaa lävistyskestävyyttä tihentämällä raudoitusta

$$u_{out} := \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{v_{Rd,c} \cdot d_1} = 12.342 \text{ m} \quad \text{Lisätarkistuspiiri, jonka ulkopuolella laatta kestää ilman lävistysraudoitusta}$$

Piirin etäisyys paalun kyljestä

$$e_{out} := u_{out} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} - \left(\frac{D}{2}\right) = 1.609 \text{ m}$$

## LEIKKAUSRAUDOITUSMITOITUS RAUDOITUSVÄLIÄ TIHENTÄMÄLLÄ

3/4

$$\phi_y := 25 \text{ mm} \quad c_y := 100 \text{ mm}$$

$$A_{sy} := (0.5 \cdot \phi_y)^2 \cdot \pi = 490.874 \text{ mm}^2$$

$$\phi_x := 25 \text{ mm} \quad c_x := 100 \text{ mm}$$

$$A_{sx} := (0.5 \cdot \phi_x)^2 \cdot \pi = 490.874 \text{ mm}^2$$

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$$

$$u_0 := \pi \cdot D = 2234 \text{ mm} \quad \text{pilarin piiri}$$

$$u_1 := \pi \cdot (D + 2 \cdot 2 \cdot d_1) = 9968 \text{ mm} \quad \text{perustarkistuspiiri}$$

$$\beta := 1.15 \quad \text{epäkeskisen kuorman kerroin, sisäpilari} \quad \text{EC2, kuva 6.21N}$$

$$v_{Ed,1} := \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{d_1 \cdot u_1} = 0.565 \text{ MPa} \quad \text{Mitoitusjännitys}$$

$$C_{Rd,c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.12$$

Uuden Eurokoodin mukainen suositus  
leikkausraudoitetulle rakenteelle

$$\rho_{Ly} := \frac{A_{sy}}{d_y \cdot c_y} = 0.008$$

raudoitussuhde

$$\rho_{Lx} := \frac{A_{sx}}{d_x \cdot c_x} = 0.008$$

raudoitussuhde

$$\rho_L := \min(\sqrt{\rho_{Ly} \cdot \rho_{Lx}}, 0.02) = 0.008$$

geometrinen raudoitussuhde

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_1}} = 1.57$$

&lt;2.0

111

$$v_{Rd.c} := C_{Rd.c} \cdot k \cdot \left( 100 \cdot \rho_L \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} = 0.572 \text{ MPa} \quad \text{Lävistyskestävyys} \quad 4/4$$

$$\frac{v_{Ed.1}}{v_{Rd.c}} = 0.989 < 1, \text{ OK}$$

Tihennys tehtävä e(out):n etäisyydellä paalun sivusta

$$e_{out} = 1.609 \text{ m}$$

$$D_{out} := 2 \cdot e_{out} + D = 3.929 \text{ m}$$

Jos vain yksi paalu kuormittaisi, tihennettäisiin raudoitusta 4 m x 4 m alalta paalun 19 ympärillä T25k100 mm

Rajaleikkausvoima laatalle 58

$$C_{Rd.c} := \frac{0.3}{\gamma_c} \cdot \frac{\left( \frac{D}{d_1} + 1.5 \right)}{\left( \frac{D}{d_1} + 4 \right)} = 0.103 \quad \text{Leikkausraudoittamattomalle laatalle}$$

$$V_{Ed.lim} := \frac{C_{Rd.c}}{\beta} \cdot d_1 \cdot u_1 \cdot k \cdot \left( 100 \cdot \rho_L \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} = 2618 \text{ kN}$$

Tämä raja ylittyy paaluilla 18,19,20 ja 21 Kuormitusyhdistelmässä 3e

TIHENNETÄÄN LAATAN 58 YLÄPINNAN RAUDOITUSTA KOKO ALALLA T25k100

## Palkin raudoitus

Laiturilohko  
Reunapalkki 1 ja 2

1/21

EN 1992-1-1 Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt  
Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu NCCI2, Väylävirasto (5/2022)

$$b := 1600 \text{ mm} \quad h := 2300 \text{ mm}$$

$$f_{yk} := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \gamma_s := 1.15 \quad E_s := 2.0 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teräs:  
B500B  $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad f_{yd} = 434.783 \text{ MPa}$

Betoni  
rasitusluokka: XC4, XS3, XF4  
Valittu lujuusluokka C35/45  
P50  
NCCI 2 (5/2022)

RIL 201-3-2013, Taulukko 2: Suunnittelukäyttöikä 50 vuotta,  
Laiturin kansirakenteen yläpinta, rakenne merivesialueella

$$f_{ck} := 35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \alpha_{cc} := 0.85 \quad \gamma_c := 1.5 \quad f_{cm} := f_{ck} + 8 \cdot \text{MPa} = 43 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.833 \text{ MPa} \quad E_{cm} := 22 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10 \cdot \text{MPa}} \right)^{0.3} \text{ GPa} = (3.408 \cdot 10^4) \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := 0.3 \text{ MPa} \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} = 3.21 \text{ MPa}$$

Taivutusraudoitus

$$\phi := 25 \text{ mm} \quad \text{pääteräs}$$

$$\phi_h := 16 \text{ mm} \quad \text{haat}$$

Betonipeitteen nimellisarvo  
RIL 201-3-2013, Taulukko 2:  
Suunnittelukäyttöikä 50 vuotta, Laiturin  
kansirakenteen yläpinta, rakenne  
merivesialueella

$$c_{nom} := 50 \text{ mm}$$

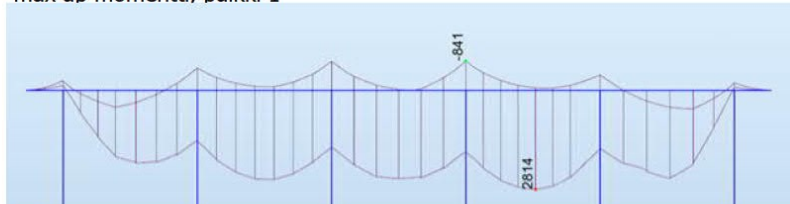
$$\Delta c_{dev} := 10 \text{ mm} \quad \text{NCCI 2, kohta 4.4.1.3, muuttia vasten valettu pinta ja laatan yläpinta}$$

$$c_{min\_dur} := c_{nom} - \Delta c_{dev} = 40 \text{ mm}$$

$$c_{true} := c_{nom} + 10 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$$

$$c := \min(c_{true}, 1.4 \cdot c_{min\_dur}, 50 \text{ mm}) = 50 \text{ mm}$$

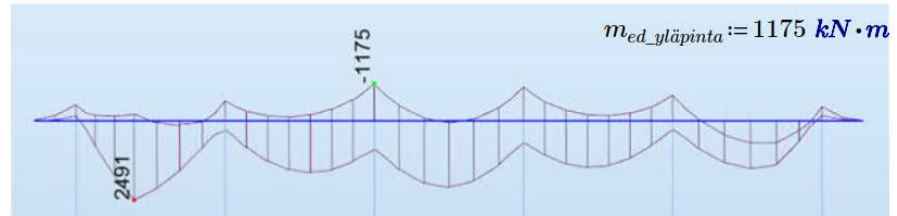
Kuormitusyhdistelmä 2c, mobiilinsturi1,  $m_{ed\_alapinta} := 2814 \text{ kN} \cdot \text{m}$   
max ap momentti, palkki 1



Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Kuormitusyhdistelmä 3e-onnettomuus max yp momentti, palkki 2

2/21

Teräsmitoitus alapinta

$$d := h - c_{true} - 1.1 \cdot \phi_h - \frac{(1.1 \cdot \phi)}{2} = (2.209 \cdot 10^3) \text{ mm} \quad \text{tehollinen korkeus}$$

$$\mu := \frac{m_{ed\_alapinta}}{d^2 \cdot f_{cd} \cdot b} = 0.018 \quad < \mu_b = 0.372 \quad \text{suhteellinen momentti}$$

$$\beta := 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} = 0.018 \quad \text{tehollisen puristusvyöhykkeen suht. korkeus}$$

$$\omega := \beta = 0.018 \quad \text{mekaaninen raudoitussuhde}$$

$$z := d \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = (2.188 \cdot 10^3) \text{ mm} \quad \text{sisäinen momenttivarsi}$$

$$A_s := \frac{m_{ed\_alapinta}}{z \cdot f_{yd}} = (2.958 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad \text{vetoraudoituksen pinta-ala}$$

$$A_{s,min} := \max\left(b \cdot 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d, b \cdot 0.0013 \cdot d\right) = (5.899 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad \text{NCCI 2, kaava 9.1}$$

Valittu rauditus

$$A_{s\phi} := \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \quad A_{s\phi} = 490.874 \text{ mm}^2$$

tankomäärä

$$\frac{A_{s,min}}{A_{s\phi}} = 12.017 \quad \text{Tarvitaan 13} \quad \frac{A_s}{A_{s\phi} \cdot 13} = 0.463$$

Taivutusraudoituksen  
käyttöaste 46.3%Etäisyys tankojen välillä  $\phi_h := 16 \text{ mm}$ 

$$\alpha := \frac{(b - 2 \cdot c_{true} - 2 \cdot \phi_h - 13 \cdot \phi)}{12} \quad \alpha = 93.583 \text{ mm}$$

 $d_g := 32 \text{ mm}$ 

Maksimiraekoko



$$\alpha_{min} := \max(d_g + 3 \text{ mm}, \phi, 25 \text{ mm}) = 35 \text{ mm}$$

$$\alpha_{max} := 200 \text{ mm} \quad \text{NCCI 2, kohta 9.2}$$

3/21

VALITTU TAIVUTUSRAUDOITUS ALAPINTAAN 13T25

Teräsmitoitus yläpinta

$$\phi := 25 \text{ mm}$$

$$d := h - c_{true} - 1.1 \cdot \phi_h - \frac{(1.1 \cdot \phi)}{2} = (2.209 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$\mu := \frac{m_{ed\_yläpinta}}{d^2 \cdot f_{cd} \cdot b} = 0.008 \quad < \mu_b = 0.372 \quad \text{suhteellinen momentti}$$

$$\beta := 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} = 0.008 \quad \text{tehollisen puristusvyöhykkeen suht. korkeus}$$

$$\omega := \beta = 0.008 \quad \text{mekaaninen raudoitussuhde}$$

$$z := d \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = (2.2 \cdot 10^3) \text{ mm} \quad \text{sisäinen momenttivarsi}$$

$$A_s := \frac{m_{ed\_yläpinta}}{z \cdot f_{yd}} = (1.228 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad \text{vetoraudoituksen pinta-ala}$$

$$A_{s,min} := \max\left(b \cdot 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d, b \cdot 0.0013 \cdot d\right) = (5.899 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

Valittu raudoitus

$$A_{s\phi} := \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \quad A_{s\phi} = 490.874 \text{ mm}^2$$

tankomäärä

$$\frac{A_{s,min}}{A_{s\phi}} = 12.017 \quad \text{Tarvitaan 13} \quad \frac{A_s}{A_{s\phi} \cdot 13} = 0.192 \quad \text{Taivutusraudoituksen käyttöaste 19.2\%}$$

Etäisyys tankojen välillä  $\phi_h := 16 \text{ mm}$ 

$$\alpha := \frac{(b - 2 \cdot c_{true} - 2 \cdot \phi_h - 13 \cdot \phi)}{12} \quad \alpha = 93.583 \text{ mm}$$

 $d_g := 32 \text{ mm}$  Maksimiraekoko

$$\alpha_{min} := \max(d_g + 3 \text{ mm}, \phi, 25 \text{ mm}) = 35 \text{ mm}$$

$$\alpha_{max} := 200 \text{ mm} \quad \text{NCCI 2, kohta 9.2}$$

VALITTU TAIVUTUSRAUDOITUS YLÄPINTAAN 13T25

4/21

Lohko D, Reunapalkin 1 ja 2leikkausraudoitus

Kuormitusyhdistelmä 3e-onnettomuus, Palkki 2



$$V_{Ed} := 1672 \text{ kN} \quad \text{Haat kohtisuorassa: } \alpha := 45^\circ$$

$$4\text{-leikkeinen T16} \quad \phi_h := 16 \text{ mm}$$

$$A_{sw} := 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_h}{2}\right)^2 = 804.248 \text{ mm}^2 \quad \theta := 45^\circ$$

$$z := 0.9 \cdot d = (1.988 \cdot 10^3) \text{ mm} \quad \text{sisäinen momenttivarsi}$$

$$s := \frac{A_{sw}}{V_{Ed}} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot \cot(\theta) = 415.714 \text{ mm}$$

$$s = 416 \text{ mm}$$

$$s_{min} := \frac{A_{sw}}{0.08 \cdot b} \cdot \frac{500}{\sqrt{35}} = 531.026 \text{ mm} \quad \text{minimihakaväli}$$

$$s_{max} := 200 \text{ mm} \quad \text{NCCI 2, kohta 9.2, vääntökuormitettu palkki}$$

Valitaan hakaraudoitukseksi T16k200

$$\frac{s_{max}}{s} = 0.481 \quad \text{Leikkausraudoituksen käyttöaste 48.1\%}$$

Leikkauskestävyyden yläraja

$$v := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}}\right) = 0.516$$

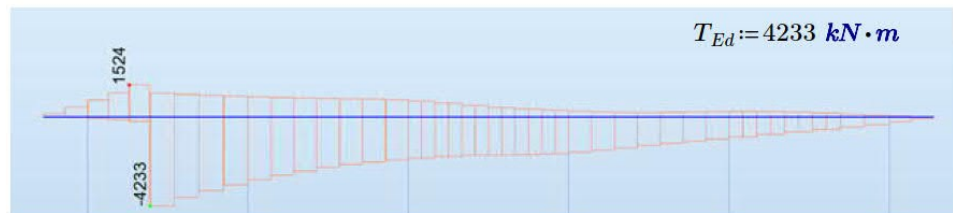
$$V_{rd,max} := v \cdot f_{cd} \cdot b \cdot z \cdot \left(\frac{\cot(\theta) + \cot(\alpha)}{1 + \cot(\theta)^2}\right) = (3.255 \cdot 10^4) \text{ kN} \quad > V_{Ed}$$

Puristusrmurtokestävyys riittävä valitulla  $\theta_n$  arvolla

Palkin vääntökestävyys

5/21

Mitoittava vääntö Kuormitusyhdistelmästä 3e-ONNETTOMUUS: Palkki 2



$\phi_h := 16 \text{ mm}$  hakarautoitus  
 $\phi_1 := 25 \text{ mm}$  alapinnan päätangot  
 $\phi_2 := 25 \text{ mm}$  yläpinnan päätangot

Tehollinen korkeus

$$d_1 := h - c_{true} - 1.1 \cdot \phi_h - 1.1 \cdot \frac{\phi_1}{2} = (2.209 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$d_2 := c_{true} + 1.1 \cdot \phi_h + 1.1 \cdot \frac{\phi_2}{2} = 91.35 \text{ mm}$$

$d_s := d_2 = 91.35 \text{ mm}$  Rautoituksen keskiöetäisyys

$A := b \cdot h = 3.68 \text{ m}^2$  Poikkipinta-ala

$u := 2 \cdot (b + h) = 7.8 \text{ m}$  Poikkileikkauksen piiri

Tehollisen kotelon seinämän paksuus

$$t_{ef} := \max\left(2 \cdot d_s, \frac{A}{u}\right) = 471.795 \text{ mm}$$

Tehollisen poikkileikkauksen mitat

$$b_0 := b - t_{ef} = (1.128 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$h_0 := h - t_{ef} = (1.828 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$A_k := b_0 \cdot h_0 = 2.063 \text{ m}^2$$

$$u_k := 2 \cdot (b_0 + h_0) = 5.913 \text{ m}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Vääntöhalkeilukestävyys

6/21

$$\alpha_{ct} := 1$$

$$f_{ctk_{0.05}} := 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.247 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} := \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk_{0.05}}}{\gamma_c} = 1.498 \text{ MPa}$$

$$T_{Rd,c} := 2 \cdot A_k \cdot t_{ef} \cdot f_{ctd} = (2.915 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m} < T_{Ed}$$

Palkki tarvitsee erillisen vääntöraudoituksen

VÄÄNTÖRAUDOITUKSEN MITOITUS

Pituussuuntainen raudoitus

Valitaan puristussauvan kaltevuus  $\theta := 45^\circ$ 

$$A_{sL} := \frac{(T_{Ed} \cdot u_k)}{2 \cdot A_k \cdot f_{yd} \cdot \tan(\theta)} = (1.395 \cdot 10^4) \text{ mm}^2 \quad \phi_T := 25 \text{ mm}$$

$$N := \frac{A_{sL}}{\pi \cdot \left(\frac{\phi_T}{2}\right)^2} = 28.429 \quad \text{Tankomäärä}$$

Sijoitetaan pitkille sivuille kummallekin 15T25 lisätankoa vastaanottamaan vääntöä

$$\frac{A_{sL}}{30 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_T}{2}\right)^2} = 0.948 \quad \text{Vääntöraudoituksen käyttöaste 94.8 \%}$$

$$\alpha := \frac{(h - 2 \cdot c_{true} - 2 \cdot \phi_h - 2 \cdot \phi - 15 \cdot \phi_T)}{16} = 107.688 \text{ mm} \quad \text{Vääntötankojen etäisyys}$$

Hakaraudoitus  $\phi_h := 16 \text{ mm}$ 

$$A_{sw} := \pi \cdot \left(\frac{\phi_h}{2}\right)^2 = 201.062 \text{ mm}^2$$

Hakaväli:

$$s := 2 \cdot \frac{A_{sw}}{T_{Ed}} \cdot A_k \cdot f_{yd} \cdot \cot(\theta) = 85.192 \text{ mm}$$

$$s_{max} := \frac{u}{8} = 975 \text{ mm} \quad \text{Suurin sallittu hakaväli}$$

$$s_{max} := 200 \text{ mm} \quad \text{NCCI 2, kohta 9.2, vääntökuormitettu palkki}$$

Valitaan haat T16k80

$$s := 80 \text{ mm}$$

7/21

Raudoitusehto (NCCI2, Kaava 6.18)

$$\frac{(A_{sL} \cdot s)}{A_{sw} \cdot u_k} = 0.939 \quad 1/3 < 0.939 < 3 \quad \text{raudoitusehto täyttyy}$$

VÄÄNTÖKESTÄVYYDEN YLÄRAJA

$$v := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}}\right) = 0.516$$

$$T_{Rd,max} := 2 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) = (9.959 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{BY211, Osa 1}$$

Oppikirja, Kaava (10/5.8)

$$T_{Rd,max} := 0.25 \cdot f_{cd} \cdot 2 \cdot A_k \cdot t_{ef} = (9.65 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{NCCI2, Kaava 6.20} \quad > T_{Ed}$$

Puristusmurtokestävyys on riittävä

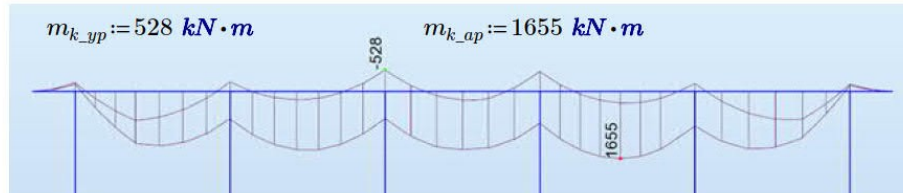
YHDISTETTY VÄÄNTÖ JA LEIKKAUSKESTÄVYYS

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{rd,max}} = 0.49 \quad < 1.0 \quad \text{OK!} \quad \text{Puristussauvojen kestävyys}$$

KÄYTTÖRAJATILAMITOITUS  
FRE

Palkki 1, kuormitusyhdistelmä 2c

8/21



Alapinnan laskenta

$$\phi := 25 \text{ mm} \quad n := 13 \quad A_s := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = (6.381 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$c = 50 \text{ mm}$$

$$k_1 := 0.8 \quad \text{raudoituksen tartuntaominaisuuden kerroin}$$

$$k_2 := 0.5 \quad \text{poikkileikkauksen jännitys jakauman kerroin}$$

$$k_t := 0.4 \quad \text{pitkäaikaisten kuormien kerroin}$$

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.869 \quad \rho_0 := \frac{A_s}{b \cdot d} = 1.806 \cdot 10^{-3}$$

$$x_p := \alpha_e \cdot \rho_0 \cdot d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_0}} - 1 \right) = 299 \text{ mm} \quad \text{puristusvyöhykkeen korkeus}$$

$$z_0 := d - \frac{x_p}{3} = (2.109 \cdot 10^3) \text{ mm} \quad \text{sisäinen momenttivarsi}$$

Suhteellinen raudoitusala

$$h_{c,ef} := \min \left( 2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x_p)}{3}, \left(\frac{h}{2}\right) \right) = 228.375 \text{ mm} \quad \text{korkeus}$$

$$A_{c,ef} := b \cdot h_{c,ef} = (3.654 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

Raudoituksen halkaisija  $\phi = 25 \text{ mm}$

$$\rho_{p,eff} := \frac{A_s}{A_{c,ef}} = 1.746 \text{ \%}$$

Lyhytaikainen kuormitus (FRE)

$$w_{max} := 0.25 \text{ mm} \quad \text{Sallittu halkeamaleveys, 50 v käyttöikä}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

$$m_k := m_{k\_ap} = (1.655 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m} \quad 9/21$$

$$\sigma_s := \frac{m_k}{z_0 \cdot A_s} = 122.974 \text{ MPa} \quad \text{raudoituksen jännitys halkeamassa}$$

Raudoituksen keskimääräinen venymä (venymäero)

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\left( \sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\rho,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{\rho,eff}) \right)}{E_s} = 0.021 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.037 \text{ 1\%} \quad \varepsilon_{x1} < \varepsilon_{x2}$$

$$\varepsilon_x := \varepsilon_{x2} = 0.037 \text{ 1\%}$$

Vastaava teräksen jännitys

$$\varepsilon_x \cdot E_s = 73.784 \text{ MPa}$$

$$k_3 := 3.4 \quad k_4 := 0.425 \quad \text{kansalliset kertoimet}$$

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{(k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi)}{\rho_{\rho,eff}} = 413.357 \text{ mm}$$

Halkeamaleveys

$$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.152 \text{ mm} \quad \text{Laskettu halkeamaleveys}$$

$$\text{Sallittu halkeamaleveys} \quad w_{max} = 0.25 \text{ mm}$$

$$w < w_{max} \quad \text{OK!}$$

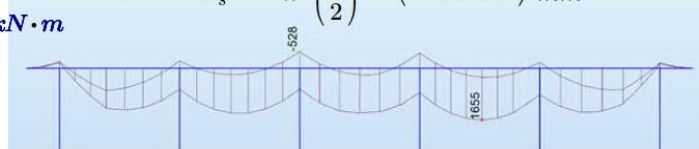
$$\frac{w}{w_{max}} = 0.61 \quad \text{käyttöaste 61\%}$$

Yläpinnan laskenta

10/21

$$\phi := 25 \text{ mm} \quad n := 13 \quad A_s := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = (6.381 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$m_{k\_yp} := 528 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



$$c = 50 \text{ mm}$$

$$k_1 := 0.8$$

raudoituksen tartuntaominaisuuden kerroin

$$k_2 := 0.5$$

poikkileikkauksen jännitys jakauman kerroin

$$k_t := 0.4$$

pitkäaikaisten kuormien kerroin

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.869$$

$$\rho_0 := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.002$$

$$x_p := \alpha_e \cdot \rho_0 \cdot d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_0}} - 1 \right) = 299 \text{ mm}$$

puristusvyöhykkeen korkeus

$$z_0 := d - \frac{x_p}{3} = (2.109 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

sisäinen momenttivarsi

Suhteellinen raudoitusala

$$h_{c.ef} := \min \left( 2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x_p)}{3}, \left( \frac{h}{2} \right) \right) = 228.375 \text{ mm}$$

korkeus

$$A_{c.ef} := b \cdot h_{c.ef} = (3.654 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

Raudoituksen halkaisija

$$\phi = 25 \text{ mm}$$

$$\rho_{p.ef} := \frac{A_s}{A_{c.ef}} = 1.746 \text{ \%}$$

Lyhytaikainen kuormitus (FRE)

$$w_{max} := 0.25 \text{ mm}$$

Sallittu halkeamaleveys, 50 v käyttöikä

$$m_k := m_{k\_yp} = 528 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_s := \frac{m_k}{z_0 \cdot A_s} = 39.233 \text{ MPa}$$

raudoituksen jännitys halkeamassa



11/21

Raudoituksen keskimääräinen venymä (venymäero)

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\left( \sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\rho,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{\rho,eff}) \right)}{E_s} = -0.021 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.012 \text{ 1\%} \quad \varepsilon_{x1} < \varepsilon_{x2}$$

$$\varepsilon_x := \varepsilon_{x2} = 0.012 \text{ 1\%}$$

Vastaava teräksen jännitys

$$\varepsilon_x \cdot E_s = 23.54 \text{ MPa}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

kansalliset kertoimet

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{(k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi)}{\rho_{\rho,eff}} = 413.357 \text{ mm}$$

Halkeamaleveys

$$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.049 \text{ mm}$$

Laskettu halkeamaleveys

Sallittu halkeamaleveys

$$w_{max} = 0.25 \text{ mm}$$

$$w < w_{max}$$

OK!

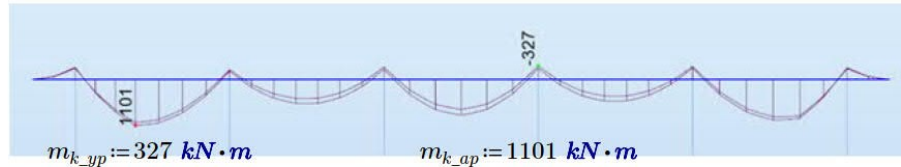
$$\frac{w}{w_{max}} = 0.195$$

Käyttöaste 20 %

KÄYTTÖRAJATILAMITOITUS  
QPR

Palkki 2, kuormitusyhdistelmä 3e-  
ONNETTOMUUS

12/21



Alapinnan laskenta

Pitkäaikainen kuormitus (QPR), VIRUMAA EI HUOMIOITU

$$\phi := 25 \text{ mm} \quad n := 13 \quad A_s := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = (6.381 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$w_{max} := 0.15 \text{ mm} \quad \text{Sallittu halkeamaleveys, 50 v käyttöikä}$$

$$\rho_0 := \frac{A_s}{b \cdot d} = 1.806 \cdot 10^{-3}$$

$$x_p := \alpha_e \cdot \rho_0 \cdot d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_0}} - 1 \right) = 299 \text{ mm} \quad \text{puristusvyöhykkeen korkeus}$$

$$z_0 := d - \frac{x_p}{3} = (2.109 \cdot 10^3) \text{ mm} \quad \text{sisäinen momenttivarsi}$$

Suhteellinen raudoitusala

$$h_{c,ef} := \min \left( 2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x_p)}{3}, \left(\frac{h}{2}\right) \right) = 228.375 \text{ mm} \quad \text{korkeus}$$

$$A_{c,ef} := b \cdot h_{c,ef} = (3.654 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

Raudoituksen halkaisija       $\phi = 25 \text{ mm}$

$$\rho_{\rho,eff} := \frac{A_s}{A_{c,ef}} = 1.746 \text{ \%}$$

$$m_k := m_{k,ap} = (1.101 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

13/21

$$\sigma_s := \frac{m_k}{z_0 \cdot A_s} = 81.809 \text{ MPa} \quad \text{raudoituksen jännitys halkeamassa}$$

Raudoituksen keskimääräinen venymä (venymäero)

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\left( \sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff}) \right)}{E_s} = (3.758 \cdot 10^{-4}) \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.025 \text{ 1\%} \quad \varepsilon_{x1} < \varepsilon_{x2}$$

$$\varepsilon_x := \varepsilon_{x2} = 0.025 \text{ 1\%}$$

Vastaava teräksen jännitys

$$\varepsilon_x \cdot E_s = 49.085 \text{ MPa}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

kansalliset kertoimet

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{(k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi)}{\rho_{p,eff}} = 413.357 \text{ mm}$$

Halkeamaleveys

$$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.101 \text{ mm}$$

Laskettu halkeamaleveys

$$\text{Sallittu halkeamaleveys} \quad w_{max} = 0.15 \text{ mm}$$

$$w < w_{max}$$

OK!

$$\frac{w}{w_{max}} = 0.676$$

käyttöaste 68%

Yläpinnan laskenta

Pitkäaikainen kuormitus (QPR)

14/21

$$\phi := 25 \text{ mm} \quad n := 13 \quad A_s := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = (6.381 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$w_{max} := 0.15 \text{ mm} \quad \text{Sallittu halkeamaleveys, 50 v käyttöikä}$$

$$m_k := m_{k\_yp} = 327 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_s := \frac{m_k}{z_0 \cdot A_s} = 24.297 \text{ MPa} \quad \text{raudoituksen jännitys halkeamassa}$$

$$\rho_0 := \frac{A_s}{b \cdot d} = 1.806 \cdot 10^{-3}$$

$$x_p := \alpha_e \cdot \rho_0 \cdot d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_0}} - 1 \right) = 299 \text{ mm} \quad \text{puristusvyöhykkeen korkeus}$$

$$z_0 := d - \frac{x_p}{3} = (2.109 \cdot 10^3) \text{ mm} \quad \text{sisäinen momenttivarsi}$$

Suhteellinen raudoitusala

$$h_{c,ef} := \min \left( 2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x_p)}{3}, \left(\frac{h}{2}\right) \right) = 228.375 \text{ mm} \quad \text{korkeus}$$

$$A_{c,ef} := b \cdot h_{c,ef} = (3.654 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

Raudoituksen halkaisija  $\phi = 25 \text{ mm}$ 

$$\rho_{\rho,eff} := \frac{A_s}{A_{c,ef}} = 1.746 \text{ \%}$$

Raudoituksen keskimääräinen venymä (venymäero)

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\left( \sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\rho,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{\rho,eff}) \right)}{E_s} = -0.028 \text{ \%}$$

$$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.007 \text{ \%} \quad \varepsilon_{x1} < \varepsilon_{x2}$$

$$\varepsilon_x := \varepsilon_{x2} = 0.007 \text{ \%}$$

15/21

Vastaava teräksen jännitys

$$\varepsilon_x \cdot E_s = 14.578 \text{ MPa}$$

$$k_3 := 3.4 \quad k_4 := 0.425 \quad \text{kansalliset kertoimet}$$

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{(k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi)}{\rho_{p,eff}} = 413.357 \text{ mm}$$

Halkeamaleveys

$$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.03 \text{ mm}$$

Laskettu halkeamaleveys

$$\text{Sallittu halkeamaleveys} \quad w_{max} = 0.15 \text{ mm}$$

$$w < w_{max} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{w}{w_{max}} = 0.201 \quad \text{käyttöaste 20\%}$$

16/21

KRT mitoitus (QPR), viruma huomioitu, palkin alapinta

## Lähtötiedot

$RH := 80\%$  Ilman suhteellinen kosteus, rakenne ulkotilassa

$t_0 := 28 \text{ d}$  Betonin kuormitusikä

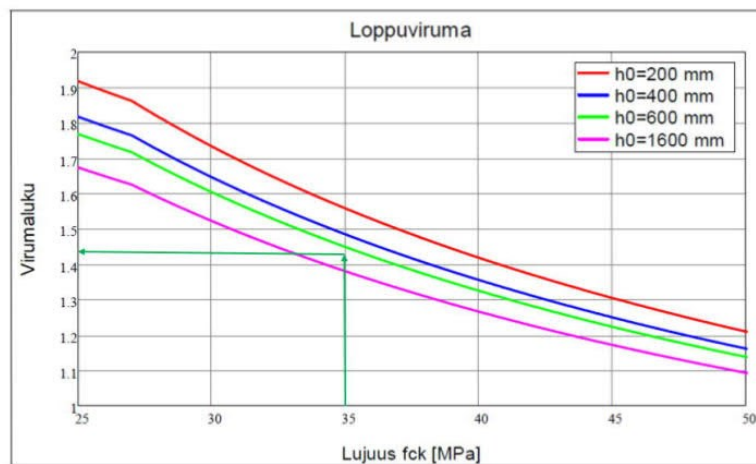
C35/45 Betonin lujuusluokka  
Sideaine normaalisti kovettuva

$b_{tot} := 1600 \text{ mm}$   $h := 2300 \text{ mm}$   
 $A_c := b_{tot} \cdot h = 3680000 \text{ mm}^2$  Betonipoikkileikkauksen ala

$u_c := 2 \cdot b_{tot} + 2 \cdot h = 7800 \text{ mm}$  Kuivuvan betonin piiri

$h_0 := 2 \cdot \frac{A_c}{u_c} = 944 \text{ mm}$  Muunnettu paksuus

## NCCI.2:n mukainen virumaluvun määrittäminen



Kuva 3.4 Virumaluku muunnetun paksuuden arvoilla 200–1600 mm,  $t = \infty$ ,  $RH = 80\%$ , sementtityyppi N

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

$$\varphi := 1.44$$

17/21

$$E_{c,eff} := \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = 13.966 \text{ GPa}$$

Raudoituksen leikkauksen pa  
 $\phi := 25 \text{ mm}$        $n := 13$        $A_s := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = (6.381 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$

Betonipeitteen paksuus KRT laskuissa       $c = 50 \text{ mm}$

Tartuntakerroin, hyvä       $k_1 := 0.8$

Taivutuskerroin       $k_2 := 0.5$

Kuorman vaikutusajan kerroin       $k_t := 0.4$       pitkäaikaiset kuormitukset

$$b = 1600 \text{ mm}$$

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{c,eff}} = 14.32$$

$$\rho_0 := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.002$$

Puristusvyöhykkeen korkeus       $x_p := \alpha_e \cdot \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_0}} - 1 \right) = 448.4 \text{ mm}$

Sisäinen momenttivarsi       $z_0 := d - \frac{x_p}{3} = (2.1 \cdot 10^3) \text{ mm}$

Suhteellinen raudoitusala

Korkeus       $h_{c,ef} := \min \left( 2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x_p)}{3}, \left( \frac{h}{2} \right) \right) = 228.4 \text{ mm}$

$$A_{c,eff} := b \cdot h_{c,ef} = 365400 \text{ mm}^2$$

Teräksen halkaisija       $\phi = 25 \text{ mm}$

$$\rho_{p,eff} := \frac{A_s}{A_{c,eff}} = 1.746 \text{ 1\%}$$

#### PITKÄAIKAINEN KUORMITUSYHDISTELMÄ (QPR)

$$w_{max} := 0.15 \cdot \text{mm} \quad \text{Sallitu halkeamaleveys 50 v käyttöiällä}$$

Taivutusmomentti, QPR

$$M_k := 1101 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

18/21

Teräksen jännitys halkeamassa

$$\sigma_s := \frac{M_k}{z_0 \cdot A_s} = 84 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Betonin tehollinen ala vetojännitetyn teräksen ympärillä

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\rho,eff}} \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{c,eff}} \cdot \rho_{\rho,eff}\right)}{E_s} = -0.004 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.025 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_x := \varepsilon_{x2} = 0.025 \text{ 1\%}$$

$$\text{Vastaava teräsajännitys} \quad \varepsilon_x \cdot E_s = 50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

kansalliset kertoimet

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{\rho,eff}} = 413 \text{ mm}$$

**Halkeamaleveys**

$$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.104 \text{ mm} = \text{laskettu halkeamaleveys}$$

Sallittu halkeamaleveys

$$w_{max} = 0.15 \text{ mm}$$

$$\frac{w}{w_{max}} = 0.69$$

käyttöaste 69 %



## KRT mitoitus (QPR), viruma huomioitu, palkin yläpinta

19/21

## Lähtötiedot

$RH := 80\%$  Ilman suhteellinen kosteus, rakenne ulkotilassa

$t_0 := 28 \text{ d}$  Betonin kuormitusikä

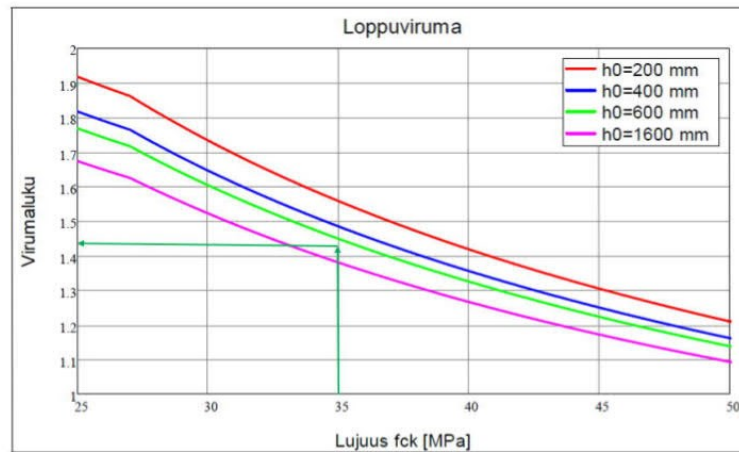
C35/45 Betonin lujuusluokka  
Sideaine normaalisti kovettuva

$b_{tot} := 1600 \text{ mm}$   $h := 2300 \text{ mm}$   
 $A_c := b_{tot} \cdot h = 3680000 \text{ mm}^2$  Betonipoikkileikkauksen ala

$u_c := 2 b_{tot} + 2 h = 7800 \text{ mm}$  Kuivuvan betonin piiri

$h_0 := 2 \cdot \frac{A_c}{u_c} = 944 \text{ mm}$  Muunnettu paksuus

## NCCI.2:n mukainen virumaluvun määrittäminen



Kuva 3.4 Virumaluku muunnetun paksuuden arvoilla 200–1600 mm,  $t = \infty$ ,  $RH = 80\%$ , sementtityyppi N

$$\varphi := 1.44$$

20/21

$$E_{c,eff} := \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = 13.966 \text{ GPa}$$

Raudoituksen leikkauksen pa

$$\phi := 25 \text{ mm} \quad n := 13 \quad A_s := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = (6.381 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

Betonipeitteen paksuus KRT laskuissa  $c = 50 \text{ mm}$

Tartuntakerroin, hyvä  $k_1 := 0.8$

Taivutuskerroin  $k_2 := 0.5$

Kuorman vaikutusajan kerroin  $k_t := 0.4$  pitkäaikaiset kuormitukset

$$b = 1600 \text{ mm}$$

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{c,eff}} = 14.32 \quad \rho_0 := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.002$$

Puristusvyöhykkeen korkeus

$$x_p := \alpha_e \cdot \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot d \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_0}} - 1 \right) = 448.4 \text{ mm}$$

Sisäinen momenttivarsi

$$z_0 := d - \frac{x_p}{3} = (2.1 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

Suhteellinen raudoitusalala

Korkeus

$$h_{c,ef} := \min \left( 2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x_p)}{3}, \left( \frac{h}{2} \right) \right) = 228.4 \text{ mm}$$

$$A_{c,eff} := b \cdot h_{c,ef} = 365400 \text{ mm}^2$$

Teräksen halkaisija  $\phi = 25 \text{ mm}$

$$\rho_{p,eff} := \frac{A_s}{A_{c,eff}} = 1.746 \text{ 1\%}$$

**PITKÄAIKAINEN KUORMITUSYHDISTELMÄ (QPR)**

21/21

$$w_{max} := 0.15 \cdot mm \quad \text{Sallitu halkeamaleveys 50 v käyttöiällä}$$

$$\text{Taivutusmomentti, QPR} \quad M_k := 327 \cdot kN \cdot m$$

$$\text{Teräksen jännitys halkeamassa} \quad \sigma_s := \frac{M_k}{z_0 \cdot A_s} = 25 \frac{N}{mm^2}$$

Betonin tehollinen ala vetojännitetyn teräksen ympärillä

$$\varepsilon_{x1} := \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\rho,eff}} \cdot \left( 1 + \frac{E_s}{E_{c,eff}} \cdot \rho_{\rho,eff} \right)}{E_s} = -0.034 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_{x2} := 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.007 \text{ 1\%}$$

$$\varepsilon_x := \varepsilon_{x2} = 0.007 \text{ 1\%}$$

$$\text{Vastaava teräsännitys} \quad \varepsilon_x \cdot E_s = 15 \frac{N}{mm^2}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

kansalliset kertoimet

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{\rho,eff}} = 413 \text{ mm}$$

**Halkeamaleveys**

$$w := s_{r,max} \cdot \varepsilon_x = 0.031 \text{ mm} = \text{laskettu halkeamaleveys}$$

$$\text{Sallittu halkeamaleveys} \quad w_{max} = 0.15 \text{ mm}$$

$$\frac{w}{w_{max}} = 0.21 \quad \text{käyttöaste 21\%}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

## Liikuntasaumaterästen mitoitus

1/3

$V_{tot} := 1579 \text{ kN}$	Mobiilinosturin aiheuttama leikkausvoima koko liikuntasaumalle
$b := 26.6 \text{ m} - 2 \cdot 0.3 \text{ m} = 26 \text{ m}$	jakoalueen leveys
$k := 900 \text{ mm}$	tappien jakoväli
$n := \frac{b}{k} = 28.889$	tappien lukumäärä
$n := 29$	
$V_k := \frac{V_{tot}}{n} = 54.4 \text{ kN}$	tapin karakteristinen leikkausvoima
$V_d := 1.5 \cdot V_k = 81.7 \text{ kN}$	tapin leikkausvoiman suunnitteluarvo
$e := 0.05 \text{ m}$	liikuntasauman leveys
$d := 50 \text{ mm}$	tapin halkaisija
$\rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	teräksen tiheys
$A := \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 19.6 \text{ cm}^2$	tapin leikkauksen pinta-ala
$I := \pi \cdot \frac{d^4}{64} = 30.7 \text{ cm}^4$	tapin jäyhyysmomentti
$W_{el} := \pi \cdot \frac{d^3}{32} = 12.272 \text{ cm}^3$	tapin elastinen taivutusvastus
$m := \rho \cdot A = 15.413 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$	tapin pituusmassa
$f := g \cdot m = 0.151 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	tapin pituusvoima
$f_y := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	tapin leikkauslujuus
$\gamma_M := 1.00$	teräksen varmuuskerroin
$\sigma_{sall} := f_y = 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	sallittu taivutusjännitys
$k_Q := 0.75$	

$$Q_{sall} := k_Q \cdot \sigma_{sall} \cdot \frac{A}{\sqrt{3}} = 301.8 \text{ kN}$$

sallittu leikkausvoima

2/3

$$M_{sall} := \sigma_{sall} \cdot W_{el} = 4.357 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

sallittu momentti

## NIVELELLINEN MITOITUS

$$M_d := V_d \cdot e = 4.084 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_1 := \frac{M_d}{W_{el}} = 332.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

taivutusjännityksen maksimi

$$\tau_1 := \frac{V_d}{A} = 41.6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

leikkausjännitys tasan poikkipinnalle

$$v_{Mis} := \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau_1^2} = 340.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

yhdistetty jännitys

$$\frac{V_d}{Q_{sall}} = 27.1 \text{ 1\%}$$

leikkausvoiman käyttöaste

$$\frac{M_d}{M_{sall}} = 93.7 \text{ 1\%}$$

momentin käyttöaste

$$\frac{v_{Mis}}{\sigma_{sall}} = 95.9 \text{ 1\%}$$

jännityksen käyttöaste

## JÄYKKÄ MITOITUS

$$M_d := V_d \cdot \frac{e}{2} = 2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_1 := \frac{M_d}{W_{el}} = 166.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

taivutusjännityksen maksimi

$$\tau_1 := \frac{V_d}{A} = 41.6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

leikkausjännitys tasan poikkipinnalle

$$v_{Mis} := \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau_1^2} = 181.3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

yhdistetty jännitys

$$\frac{V_d}{Q_{sall}} = 27.1 \text{ 1\%}$$

leikkausvoiman käyttöaste

3/3

$$\frac{M_d}{M_{sall}} = 46.9 \text{ 1\%}$$

momentin käyttöaste

$$\frac{v_{Mis}}{\sigma_{sall}} = 51.1 \text{ 1\%}$$

jännityksen käyttöaste

VALITAAN TAPIT: d:50mm, k900

## Tukipaalujen mitoitus

1/3

Käytettävät paalut: SSAB, RR 700/14.2

$$f_y := 355 \text{ MPa} \quad E := 210000 \text{ MPa} \quad \gamma_{M1} := 1.0$$

$$D := 711 \text{ mm} \quad \text{paalun halkaisija}$$

$$R := \frac{D}{2} = 356 \text{ mm} \quad \text{paalun ulkosäde}$$

$$t := 14.2 \text{ mm} \quad \text{paalun seinämäpaksuus}$$

$$d := D - 2 \cdot t = 683 \text{ mm} \quad \text{paalun sisähalkaisija}$$

$$r := R - t = 341 \text{ mm} \quad \text{paalun sisäsäde}$$

$$A := \pi \cdot (R^2 - r^2) = 31085 \text{ mm}^2$$

$$W := \frac{\pi \cdot (R^4 - r^4)}{4 \cdot R} = 5309008 \text{ mm}^3 \quad \text{paalun taivutusvastus}$$

$$I := \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = 1887352325 \text{ mm}^4 \quad \text{jäyhyysmomentti, korroosiota ei huomioitu}$$

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0.814$$

$$h_w := 9 \text{ m} \quad \text{veden syvyys}$$

$$L_{cr} := h_w + 2 \text{ m} = 11 \text{ m} \quad \text{paalun nurjahduspituus}$$

Poikkileikkausluokka

$$\frac{D}{t \cdot \varepsilon} = 61.541 < 70, \text{ Kuuluu poikkileikkausluokkaan 2}$$

$$N_{Rd} := f_y \cdot A = 11035 \text{ kN}$$

$$N_{Rk} := N_{Rd} = 11035 \text{ kN}$$

$EI := 337561 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$       2 mm korroosiovähennys      2/3

$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2} = 27534 \text{ kN}$       paalun nurjahduskuorma

$\lambda := \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr}}} = 0.633$       muunnettu hoikkuus

$\alpha := 0.21$       epätarkkuustekijä, kuumavalsattu, nurjahduskäyrä a, S355

$\phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 0.746$

$\chi := \min\left(\frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}}, 1.0\right) = 0.877$       Nurjahduksen pienennystekijä

Vain normaalivoimaa, paalu 33, Kuormitusyhdistelmä 3e-ONNETTOMUUS

$N_{Ed} := 3625 \text{ kN}$

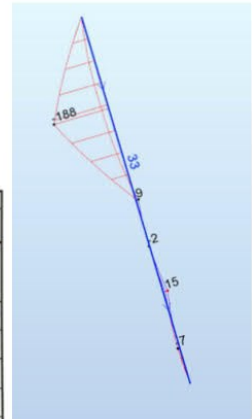
$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0.375 < 1.0$ , Paalu kestää nurjahdamatta

Sekä normaalivoimaa että momenttia, paalu 33, Kuormitus 3e-ONNETTOMUUS

$N_{Ed} := 3533 \text{ kN}$        $M_{Ed} := 188 \text{ kN} \cdot \text{m}$

$M_{Rk} := f_y \cdot W = 1885 \text{ kN} \cdot \text{m}$

$\chi_{LT} := 1.0$       rakenneputkille



Momenttipinta	Alue	$C_{m1}$ ja $C_{m2}$ ja $C_{m3}$	
		Tasan jakaantunut kuormitus	Pistemäinen kuormitus
$M$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0.6 + 0.4\psi \geq 0.4$	
$M_b$	$0 \leq \alpha \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0.2 + 0.8\alpha \geq 0.4$
	$-1 \leq \alpha < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0.1 - 0.8\alpha \geq 0.4$
$M_b$	$0 \leq \alpha \leq 1$	$-1 \leq \psi < 0$	$0.1(1-\psi) - 0.8\alpha \geq 0.4$
		$0 \leq \psi \leq 1$	$0.95 + 0.05\alpha$
	$-1 \leq \alpha < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0.90 + 0.10\alpha$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0.95 + 0.05\alpha(1+2\psi)$
			$0.90 + 0.10\alpha(1+2\psi)$



$$M := -188 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad \text{momentti merenpohjassa}$$

$$\psi := 0$$

3/3

$$C_{my} := 0.6 + 0.4 \cdot \psi = 0.6 \quad > 0.4 \quad \text{pistemäinen kuormitus}$$

$$k_{yy} := C_{my} \cdot \left( 1 + 0.6 \cdot \lambda \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0.683 \quad < \quad C_{my} \cdot \left( 1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0.731$$

Yllä kimmoteorian mukainen mitoitus

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0.433 \quad < 1.0 \quad \text{Paalu kestää nurjahtamatta}$$

Sekä normaalivoimaa, että momenttia, paalu 1, Kuormitusyhdistelmä 4a

$$N_{Ed} := 1295 \text{ kN} \quad M_{Ed} := 459 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{Rk} := f_y \cdot W = 1885 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\chi_{LT} := 1.0 \quad \text{rakenneputkille}$$

$$M_h := -28 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad \text{momentti merenpohjassa}$$

$$M_s := -459 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad \text{maksimimomentti}$$

$$\alpha_h := \frac{M_h}{M_s} = 0.061 \quad \psi := 0$$

$$C_{my} := 0.9 + 0.1 \cdot \alpha_h = 0.906 \quad \text{pistemäinen kuormitus}$$



$$k_{yy} := C_{my} \cdot \left( 1 + 0.6 \cdot \lambda \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0.952 \quad < \quad C_{my} \cdot \left( 1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0.979$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0.366 \quad < 1.0 \quad \text{Paalu kestää nurjahtamatta}$$

