

Opinnäytetyö AMK

Rakennus- yhteiskuntatekniikan koulutusohjelma, insinööri AMK

2018

Juhani Uusitalo

PUTKIJOHTOKAIVANNON PAALULAATAT

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

12/2018 | 55 sivua, 20 liitesivua

Juhani Uusitalo

OPINNÄYTETYÖ_PUTKIJOHHTOKAIVANON PAALULAATAT_UUSITALOJUHANI

Tämän työn tavoitteena on tuottaa Ramboll Finland Oy:llä putkijohtokaivantojen paalulaattojen tyyppiinustussarja Vantaan kaupungille. Suunnitelmasta toivottiin apua tilanteeseen, jossa heikkojen pohjaolosuhteiden vuoksi osa putkijohtokaivannosta joudutaan perustamaan paalulaatan varaan. Pohjamaan vaihtelut voivat olla pitkän vesihuoltolinjan matkalla voimakkaitakin, ja on tavallista, että putkijohtokaivannon perustamistavat vaihtelevat vesihuoltolinjan matkalla.

Työssä tarkastellaan 2 000 mm, 3 000 mm sekä 4 000 mm leveiden paalulaattojen rakenteiden mitoituksia. Tarkasteltaviksi valikoituivat 3 000 mm:n, 5 000 mm:n ja 7 000 mm:n sorapenkereiden rakennevahvuudet. Näiden perusteella paalulaatoista luotiin mitta- ja raudituspiirustussarjat, joissa esitetään laattojen paalujaot, poikkileikkausten detaljit sekä laatalta vaadittava teräsmäärä laatan rakenteellisen kestävyuden varmistamiseksi.

Työssä käsitellään tarkemmin Liikenneviraston Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaisesti putkijohtokaivannon paalulaatalle ja paalulaatan siirtymälaatalle tulevia kuormia sekä niiden vaikutusta paalulaatan rakenteeseen. Lisäksi työssä tutustutaan myös teräsbetoni- sekä teräsputkipaalujen mitoittamiseen ja sijoitteluun Rakennusteollisuuden tuotelehti PO-2016:n sekä SSAB:n ja HT:n teräsputkipaalujen suunnitteluohjeiden näkökulmasta.

Työn lopussa esitetään Lusas Bridge FEM -laskentaohjelmalla luodut rakenneanalyysit yhdestä tarkasteltavasta rakenteesta sekä samalla periaatteella lasketut ja taulukoidut laattojen mitoitusvoimasuureet. Näiden lisäksi työssä esitetään Liikenneviraston Eurokoodin soveltamisohjeen Betonirakenteiden suunnittelu – NCC12 mukaiset taivutus, lävistys sekä halkeamaleveydestarkastelut paalulaattarakenteelle.

ASIASANAT:

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, rakennetekniikka, rakennustekniikka, rakennesuunnittelu, kunnallistekniikka, paalulaatta, taitorakenne, putkijohtokaivanto.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering

12/2018 | 55 pages, 20 pages in appendices

Juhani Uusitalo

PILE SLAB FOUNDATION OF A WATER SUPPLY AND SEWERAGE SYSTEM PIPELINES

Purpose of this thesis was to produce a standard-project drawing for a pile slab build under a water supply and sewerage system pipelines. Request for the drawing was to gain assistance for pile slab design when water supply and sewerage system was designed on weak ground circumstances. Ground circumstances vary greatly along the pipelines. Therefore, it is very common that foundation type varies along the pipelines from ground-supported to pile slabs.

A case study in this thesis was a structural dimensioning of 2000 mm, 3000 mm and 4000 mm wide pile slabs which locates 3000 mm, 5000 mm and 7000 mm underground. Previously mentioned general technical drawing contains dimensioning and reinforcement drawings including sufficient number of details that clarifies the work. Focus of the drawings is in pile layout and reinforcement detailing that are essential for structural durability of pile slabs.

The main goal of this thesis was to determine all the structural loads that strain the structure and their effect on the structural dimensioning according to the guidelines of the Finnish Transport Agency. Work also touches on dimensioning of steel piles and steel reinforced concrete piles according to manufactures design instructions that are based on the pile driving guide 2016 by the Finnish Association of Civil Engineers (Paalutusohje 2016).

Structural dimensioning of the structures is based on analyses made with Lusas Bridge Finite Element System. Results from one of the analyses and calculation principles that were used through every slab are being presented at the end of this thesis.

KEYWORDS:

Civil and construction engineering, structural engineering, structural design, municipal engineering, pile slab, water supply and sewerage system pipeline.

Alkusanat

Työn tekeminen osoittautui mielenkiintoiseksi ja haastavaksi tehtäväksi. Tyytyväisenä raapustan kesällä 2018 alkaneen urakan jälkeen näitä viimeisiä lauseita. Haluan kiittää työni ohjaajia Ramboll Finlandilla toimineita Tiina Lobbasta (DI) ja Harri Koskista (DI) sekä Turun ammattikorkeakoulun talonrakennustekniikan vastuopettajana toimivaa Olli Hautaniemeä (DI). Tämän työn tekemiseen liittyneiden muutamien keskusteluiden lisäksi haluan opintojeni puolesta mainita Harri Viljamaan (DI) ja Liisa Larkelan (DI) opetuksen ollen inspiroivaa ja antaneen hyvän pohjan tämän työn tekemiselle. Kollegoistani kiitän Tomi Aarniota (DI) ja Reino Heikinheimoa (DI) työn tekemisen aikana käymistä keskusteluista, jotka ovat auttaneet aiheeseen syventymisessä.

Turussa 21.12.2018

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	10
2 PALULAATAT PUTKIJOHTOKAIVANNOISSA	12
3 PAALULAATALLE JA SIIRTYMÄLAATALLE KOHDISTUVAT KUORMAT	13
3.1 Pysyvät kuormat	13
3.2 Hyötykuormat	14
3.3 Paalulaattarakenteelle kohdistuvien rakenne- ja liikennekuormat	14
3.4 Paalulaattarakenteelle kohdistuvien jarru- ja kiihdytyskuormien käsittely	16
3.5 Paalulaattaan kohdistuvan maanpaineen ja pystykuormitusten vaikutukset	17
3.6 Siirtymälaatalle kohdistuvat kuormat	20
4 PAALULAATAN MITOITUSPERUSTEET	22
4.1 Ohjeet ja normistot	22
4.2 Paalulaatan rasitusluokkaryhmät Liikenneviraston ohjeen mukaan	22
4.3 Paalulaatan kuivatus ja veden poisto	23
4.4 Päärakenteiden materiaaliominaisuudet	24
4.5 Nurjahduskestävyys ja geotekninen puristuskestävyys	25
4.6 Rakennemallissa käytetty paalujousi	31
4.7 Paalujen keskiöetäisyydet	33
5 PAALULAATAN RAKENTEELLINEN MITOITUS	35
5.1 Mitoituksessa käytettävät materiaaliarvot	35
5.2 Virumaluvun laskenta	37
5.3 Taivutus	39
5.4 Lävistys	42
5.5 Halkeamaleveyden laskenta	44
6 RAKENNELASKKELMIEN YHTEENVETO SEKÄ TULOKSENA SYNTYNEET TYYPPIPIIRUSTUKSET	50
7 LOPUKSI	55
LÄHTEET	56

LIITTEET

Liite 1. Paalujen keskiöetäisyyksien minimietäisyyksien taulukkoarvoja teräsbetoni- ja teräsputkipaaluille

Liite 2. Lusas Bridge FEM-laskentaohjelmassa saadut mitoitusvoimasuureet tarkastelluille laatoille sekä esimerkkilaskelmat ja kuvaajat seitsemän metriä korkean penkereen alle rakennettavasta neljä metriä leveästä paalulaatasta

KAAVAT

Kaava 1. Laattaa kuormittavien rakennekuormien laskentatapa.	14
Kaava 2. Jarrutuksesta aiheutuvan viivakuorman laskeminen.	16
Kaava 3. Vinosta jarrutuksesta tai sivuluisusta aiheutuva poikittainen kuorma.	16
Kaava 4 Penkereen omasta painosta ja liikennekuormasta paalulaataan syntyvän sisäisen vaakavoiman (halkaisuvoiman) laskenta lepopaineena.	18
Kaava 5 Lepopainekertoimen laskenta.	19
Kaava 6. Konsolille kohdistuva kuorma siirtymälaatan rakennepainoista.	20
Kaava 7. Konsolille kohdistuva kuorma siirtymälaatan liikennekuormista.	20
Kaava 8. Alustaluvun määrittäminen suljetun leikkauslujuuden perusteella pitkäaikaiselle kuormitusyhdistelmälle.	32
Kaava 9. Alustaluvun määrittäminen suljetun leikkauslujuuden perusteella lyhytaikaiselle kuormitusyhdistelmälle.	32
Kaava 10 Jousivakion määrittäminen alustaluvun avulla.	32
Kaava 11. Poikkileikkaukseltaan neliön muotoisen paalun keskiöetäisyyden minimiarvon laskenta.	33
Kaava 12. Poikkileikkaukseltaan pyöreän muotoisen paalun keskiöetäisyyden minimiarvon laskenta.	33
Kaava 13. Betonin puristuslujuuden laskenta.	35
Kaava 14. Betonin vetolujuuden laskenta.	36
Kaava 15. Betonin kimmokertoimen laskenta.	36
Kaava 16. Betonirakenteessa käytettävien harjaterästen myötölujuuden mitoitusarvon laskenta.	37
Kaava 17. Haihtumiselle alttiin piirin mitta paalulaatassa.	37
Kaava 18. Poikkileikkauksen muunnettu paksuus virumalukua laskettaessa.	37
Kaava 19. Kertoimet, joilla huomioidaan betonin lujuuden vaikutus virumalukua laskettaessa.	38
Kaava 20. Likimääräinen suhteellisesta kosteudesta ja muunnetusta paksuudesta riippuva kerroin.	38
Kaava 21. Likiarvo kertoimelle, joka kuvaa virumisen kehittymistä ajan myötä kuormittumisen alkamisen jälkeen.	38
Kaava 22. Kerroin, jolla huomioidaan betonin kuormittumisen alkamisajan vaikutus nimelliseen virumalukuun.	38
Kaava 23. Kerroin, jolla huomioidaan betonin lujuuden vaikutus nimelliseen virumalukuun	38
Kaava 24. Kerroin, jolla huomioidaan suhteellisen kosteuden vaikutus nimelliseen virumalukuun	39

Kaava 25 Nimellisen virumaluvun likiarvo.	39
Kaava 26. Virumaluvun laskenta Eurokoodi 2:en mukaan sementin laatua huomioimatta.	39
Kaava 27. Tehollisen betonin kimmokertoimen laskenta virumaluvun avulla.	39
Kaava 28. Teräsbetonirakenteen poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen määrittämiseen tarvittavat parametrit.	39
Kaava 29 Betonipeitteen nimellisarvo	40
Kaava 30. Halkeamaleveyden laskennassa käytettävän betonipeitteen arvo.	40
Kaava 31 Teräsbetonirakenteen poikkileikkauksen tehollinen korkeus	40
Kaava 32. Rakenteessa käytettävä vähimmäisraudoitus.	40
Kaava 33. Rakenteessa käytettäväksi valittu teräsmäärä.	41
Kaava 35. Tarkasteltavan poikkileikkauksen mekaaninen raudoitussuhde valitulla teräsmäärällä.	41
Kaava 36. Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus valitulla teräsmäärällä.	41
Kaava 37. Tarkasteltavan poikkileikkauksen suhteellinen momentti valitulla teräsmäärällä.	41
Kaava 38. Tarkasteltavan poikkileikkauksen momenttikestävyys valitulla teräsmäärällä.	41
Kaava 39. Taivutuskestävyyden käyttöaste valitulla teräsmäärällä.	41
Kaava 40. Leikkausraudoittamattoman teräsbetonilaatan lävistyskestävyyden laskenta.	44
Kaava 41. Laatan lävistyskestävyyden käyttöasteen laskeminen lävistysraudoittamattomasta rakenteesta.	44
Kaava 42. Leikkausraudoitetun teräsbetonilaatan lävistyskestävyyden laskenta.	44
Kaava 43. Halkeamalaskennassa käytettävien harjaterästankojen ekvivalentin halkaisijan laskenta.	45
Kaava 44. Rakenneteräksiä ympäröivän vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen korkeus.	46
Kaava 45. Rakenneteräksiä ympäröivän vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen pinta-ala	46
Kaava. 46 Poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus haljenneessa tilassa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	46
Kaava 47. Poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi haljenneessa tilassa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	47
Kaava 48. Vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen korkeus haljenneessa poikkileikkauksessa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	47
Kaava 49. Vetojännityksen alaisen betonialueen pinta-ala haljenneessa tilassa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	47
Kaava 50. Efektiivinen raudoitussuhde lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	47
Kaava 51. Vedettyjen betoniterästen jännitys haljenneessa tilassa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	47
Kaava 52. Betoniterästen ja betonin venymien erotus lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	47
Kaava 53. Suurin mahdollinen halkeamaväli lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	47
Kaava 54. Halkeamaleveyden laskenta lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	48
Kaava 55. Halkeamaleveyslaskennan käyttöaste lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	48
Kaava 56. Poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	48
Kaava 57. Poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	48
Kaava 58. Vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen korkeus haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	48

Kaava 59. Vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen pinta-ala haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	49
Kaava 60. Efektiivinen raudoitussuhde pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	49
Kaava 61. Betoniterästen jännitys haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	49
Kaava 62. Betoniterästen ja betonin venymien erotus pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	49
Kaava 63. Suurin mahdollinen halkeamaväli pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	49
Kaava 64. Halkeamaleveyden laskenta pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	49
Kaava 65. Halkeamaleveyslaskennan käyttöaste pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä.	49

KUVAT

Kuva 1 Penkereen omasta painosta aiheutuvan pystysuoran kuorman jakautuminen paalulaatan yläpinnalle	15
Kuva 2. Paalulaattaan pystysuoran liikennekuorman aiheuttama maanpainekuorma	18
Kuva 3. Paalulaattaan pystysuoran liikennekuorman aiheuttama maanpainekuorma laatan poikittaissuunnassa	20
Kuva 4. Mitta- ja raudituspiirustukset 2 metriä leveistä laatoista.	51
Kuva 5. Mitta- ja raudituspiirustukset 3 metriä leveistä laatoista.	52
Kuva 6. Mitta- ja raudituspiirustukset 4 metriä leveistä laatoista.	53
Kuva 7. Leikkauspiirustukset konsolin kohdalta.	54
Kuva 8. Taivutus laatan pituussuuntaan murtorajatilan kuormitusyhdistelyllä.	1
Kuva 9. Taivutus laatan pituussuuntaan käyttörajatilan tavallisella kuormitusyhdistelyllä.	2
Kuva 10. Taivutus laatan pituussuuntaan käyttörajatilan pitkäaikaisella kuormitusyhdistelyllä.	2
Kuva 11. Taivutus laatan poikittaissuuntaan murtorajatilan kuormitusyhdistelyllä.	3
Kuva 12. Taivutus laatan poikittaissuuntaan käyttörajatilan tavallisella kuormitusyhdistelyllä.	3
Kuva 13. Taivutus laatan poikittaissuuntaan käyttörajatilan pitkäaikaisella kuormitusyhdistelyllä.	4
Kuva 14. Paalujen yläpään tukireaktiot.	4
Kuva 15. Laatan siirtymät Globaalin x-akselin suuntaan.	5
Kuva 16. Laatan siirtymät Globaalin y-akselin suuntaan.	5
Kuva 17. Laatan siirtymät Globaalin z-akselin suuntaan.	6

TAULUKOT

Taulukko 1. Paalulaatalle kohdistuvat kuormat	15
Taulukko 2. Pengerkorkeuden funktiona jakautuneet jarrukuormat.	17
Taulukko 3 Paalulaattaan päällä olevaan penkereeseen maan omasta painosta ja liikennekuormasta syntyvä sisäisen vaakavoiman FH, k lasketut arvot	19
Taulukko 4. Konsolille kohdistuvat kuormat 3 metriä pitkältä siirtymälaatalta.	21
Taulukko 5. Konsolille kohdistuvat kuormat 5 metriä pitkältä siirtymälaatalta.	21

Taulukko 6. Paalulaattojen betonirakenteiden vähimmäisvaatimukset Liikennevirasto	23
Taulukko 7. Teräsputkipaalujen vakioteräslajit	24
Taulukko 8. Teräsbetonipaalujen puristuskestävyydet murtorajatilassa	26
Taulukko 9. Paaluun kohdistuvien rakennekuormien prosentuaalinen osuus kokonaiskuormasta työssä käsitellyillä pengerkorkeuksilla	27
Taulukko 10. RTB-250-16 ja RTB-300-16 teräsbetonipaalujen puristuskestävyydet paalulaatan päälle tulevan pengerkorkeuden funktiona	28
Taulukko 11. Teräsputkipaalujen rakenteen puristuskestävyyden, sekä geoteknisen kestävyuden mitoitusarvot korroosiovaran ollessa 1,2 mm	29
Taulukko 12. Teräsputkipaalujen rakenteen puristuskestävyyden sekä geoteknisen kestävyuden mitoitusarvot korroosiovaran ollessa 2,0 mm	30
Taulukko 13. Tasapainoraudoituksen edellyttämät suhteellisen momentin sekä puristusvyöhykkeen suhteellisen korkeuden raja-arvot	42
Taulukko 14 Rakennelaskelmissa käytetyt kuormien yhdistelykertoimet	50
Taulukko. 15 Rakenteessa vaadittavat teräsmäärät 2 metriä leveissä laatoissa.	52
Taulukko 16. Rakenteessa vaadittavat teräsmäärät 3 metriä leveissä laatoissa.	52
Taulukko 17. Rakenteessa vaadittavat teräsmäärät 4 metriä leveissä laatoissa.	53
Taulukko 18. 250x250 teräsbetonipaalujen keskiöetäisyyksien minimiarvot.	1
Taulukko 19. 300x300 teräsbetonipaalujen keskiöetäisyyksien minimiarvot.	1
Taulukko 20. 350x350 teräsbetonipaalujen keskiöetäisyyksien minimiarvot.	2
Taulukko 21. d125 teräsputkipaalujen keskiöetäisyyksien minimiarvot.	2
Taulukko 22. d140 teräsputkipaalujen keskiöetäisyyksien minimiarvot.	2
Taulukko 23. d170 teräsputkipaalujen keskiöetäisyyksien minimiarvot.	2
Taulukko 24. Tarkasteltavien paalulaattojen kootut mitoitusvoimasuureet.	17

1 JOHDANTO

Työn tavoitteena on tuottaa suunnittelun avuksi putkijohtokaivantojen paalulaattojen tyyppiirustussarja tilanteeseen, jossa osalla vesihuoltolinjan matkalla perustamisolosuhteet ovat niin heikot, että maanvaraisesta perustamisesta joudutaan siirtymään paalulaattaperustukselle.

Työn pohja-aineistoksi Vantaan kaupungilta toimitettiin Hans Palviaisen Aalto yliopistolla loppuvuodesta 2017 Vantaan kaupungille laadittu diplomityö Putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalun kehittäminen. Palviaisen työ onkin toiminut tämän työn ohjaavana pohja-aineistona ja toisaalta myös työn aihetta rajaavana tekijänä. Työssä ei juurikaan käsitellä paalulaattojen geoteknisen suunnittelun perusteita, kaivannon suunnittelua ja tukemista eikä putkijohtokaivannon vesihuoltojärjestelmän osia.

Paalulaattojen suunnitteluprosessi on rakenteen yksinkertaisuudesta huolimatta työläs ja monivaiheinen prosessi. Alussa rakennuspaikalla suoritetaan tarpeellinen määrä maaperätutkimuksia ja kartoitetaan laatan perustamissyvyys sekä tarvittavan laatan leveys. Tämän jälkeen arvioidaan kullekin laatan osalle tulevien rakenne- ja hyötykuormien mitoitusarvot. Kuormituksena huomioidaan laatan päälle tulevista täytöistä laattaan kohdistuvat kuormat sekä liikennekuormat. Lisäksi huomioitavaksi tulevat laatan pituus- ja vaakasuunnassa vaikuttavat kiihdytys- ja jarrukuormat.

Paalulaatta suunnitellaan käytännössä aina sadan vuoden käyttöiälle, jolloin liikennekuormien huomioimatta jättäminen rakenteen mitoituksessa ei rakennuspaikan nykyisestä kaavoituksesta riippumatta ole käytännössä mahdollista. Valmistuttuaan paalulaatta sijaitsee putkijohtokaivannon täyttöjen sekä vesihuoltojärjestelmän rakenteiden alapuolella. Liikennekuormien huomioimisella pyritään varmistumaan siitä, että rakenne kestäisi rakennuspaikalle myöhemmin rakennettavan liikennöitävän alueen aiheuttamat kuormat rakennetta vahvistamatta.

Paalulaatan rakenteellisessa mitoituksessa ensimmäinen ratkaiseva tekijä on yhdelle paalulle kohdistuvan kuormituspinta-alan haarukoiminen paalun yläpään tukireaktion mitoitusarvon selvittämiseksi. Paalulle kohdistuvalla kuormalla määritetään paalun mitoituksessa paalun nurjahduskestävyys sekä paalun geotekninen puristuskestävyys. Näiden lisäksi paalun yläpään tukireaktio toimii mitoitusarvona laatan murtorajatilan lävisyyskestävyyttä tarkasteltaessa. Valitulla laatan leveydellä onkin laatan päälle tulevien

rakennekerrosten paksuuden lisäksi suuri vaikutus paalujaon määrittämisessä. Suunnittelun lähtötietojen merkitys korostuu aivan paalulaatan suunnittelun alkuvaiheessa, sillä jo pienikin muutos edellä mainittuihin lähtötietoihin vaikuttaa oleellisesti paalujen sijoitteluun ja paalujen koon valintaan.

Laatan rakennelaskelmissa huomioidaan murtorajatilamitoituksessa laatan taivutus- ja lävistyskestävyys sekä käyttörajatilamitoituksessa sadan vuoden suunnitellun käyttöajan mukainen halkeamaleveystarkastelu. Taivutus- ja halkeamaleveystarkastelu saadaan lähtökohtaisesti hoidettua laatan raudoituksella lävistyskestävyyden tullessa yleensä paalulaatan rakenteen mitoittavaksi tekijäksi. Paalun yläpäähän kohdistuva kuormitus määrittää laatan paalujaon, käytettävät paalut sekä paalujen lukumäärän.

Putkijohtokaivannon paalulaattojen rakennesuunnitelmissa esitetään mittapiirustukset, joissa on tarkemmin esitetty laattojen mitat ja nurkkapisteiden koordinaatit sekä korkeus-asetat käytettävässä korkeusjärjestelmässä, paalujen katkaisutasot sekä keskipisteiden koordinaatit, paalujen kaltevuudet, paalujen arvioitu tunkeutumistaso sekä laatan poikkileikkaus- ja pituusleikkauspiirustukset. Paalulaatan rakennesuunnitelmissa esitetään lisäksi raudituspiirustusten tasokuvat, poikkileikkaukset jokaisesta toisistaan eroavasta laatan raudoitettusta osasta sekä vaadittava määrä raudoitukseen liittyviä detaljeita suunnitelmien lukemisen helpottamiseksi. Lisäksi suunnitelmissa esitetään yleispiirustus rakennettavasta alueesta, jossa paalulaatan sijainti esitetään suhteessa muihin laattaa ympäröiviin rakenteisiin ja järjestelmiin. Lisäksi esitettäväksi tulevat pohjamaan maalajirajat ja kantavan maaperän taso.

Paalulaattojen suunnitteluprosessi onkin osoittautunut rakennuttajan näkökulmasta hitaaksi prosessiksi. Varsinkin muutossuunnitelmien toimittaminen työmaalle toivotussa aikataulussa on osoittautunut haasteelliseksi. (Palviainen 2017, 11.)

Tässä työssä kehitettävällä putkijohtokaivantojen paalulaattojen tyyppi- ja raudituspiirustussarjalla pyritään luomaan lähtökohdat laattala vaadittavan paalujaon haarukoimiselle. Lisäksi pyritään luomaan luotettavat listat laatan rakenteessa vaadittavasta teräsmäärästä, joiden perusteella laattaan tulevien materiaalien hankinnoista voidaan aloittaa neuvottelemaan samanaikaisesti suunnittelun aloittamisen kanssa. Tällä kaikella tähdätään siihen, että parhaassa mahdollisessa tilanteessa materiaalityylit ja -toimitukset ovat jo tehtynä suunnitelmien valmistuessa.

2 PALULAATAT PUTKIJOHTOKAIVANNOISSA

Maanrakennuskohteissa yleisenä pohjavahvistusmenetelmänä painumien hallinnassa käytetään paalulaattarakennetta. Putkijohtokaivannon paalulaatta on paikallavalettu, rakennepaksuudeltaan noin 400 mm, kallion varaan tai kantavaan maaperään teräs- taikka teräsbetonipaaluilla perustettava kapeahko, tasainen sekä nivelellisillä liitoksilla paalujen päällä lepäävä teräsbetoninen pilarilaattarakenne. Paalulaattojen avulla pyritään hallitsemaan painumaeroja vesihuoltolinjojen matkalla esiintyvien vaihtelevien pohjaolosuhteiden vuoksi.

Vesihuoltolinjoille tyypillistä on, että ne saattavat kulkea kohtalaisen syvällä maan pinnasta katsottuna. Valtaosassa sadevesi- sekä jätevesiviemäreiden virtauksesta toimii painovoiman avulla, jolloin linja vaatii tietyn pituuskaltevuuden koko linjan pituudelle. Vesihuoltojärjestelmän päälle vaaditaan lisäksi maa-ainesta muun muassa jakamaan maan pinnalta linjaan kohdistuvia liikennekuormien aiheuttamia rasituksia sekä talvisin estämään roudan linjaan jääytymisestä aiheutuneita tukoksia tai vaurioita. Vesihuoltolinjalle saattaa aiheutua painumia jouduttaessa korvaamaan putkijohtokaivannosta pois kaivettu maa-aines kokonaan tai osittain tilavuuspainoltaan rakennuspaikan pohjamaata raskaammalla kalliomurskeella tai vaikkapa luonnon soralla. Ratkaisulla pyritään varmistamaan, että painovoiman avulla toimivat viettoviemärit toimisivat suunnitellusti vielä vuosien kuluttua rakentamisesta. Samoin vesijohdon runkolinjan painumia tasaamalla halutaan varmistaa, ettei yhteiskunnan vesihuolto vaarannu mahdollisten painumien linjaan aiheuttamien vaurioiden vuoksi.

Rakenteessa käytettävien paalujen valinta tehdään tapauskohtaisesti suunniteltavassa kohteessa vallitsevien pohja- ja paalutusolosuhteiden perusteella. Tämä työ on tehty olettaen paaluja ympäröivän maa-aineksen olevan kaikkialla tasalaatuista savea, jonka suljetun leikkauslujuuden karakteristinen arvo on 5 kPa. Rakennemallissa paalut on mallinnettu 20 metriä syvälle paalutettaviksi.

3 PAALULAATALLE JA SIIRTYMÄLAATALLE KOHDISTUVAT KUORMAT

Betonirakenteiden eurokoodeihin perustuvien lujuuslaskelmien mukaisessa mitoituksessa määritetään rakenteen mitat sekä rakenteessa vaadittu teräsmäärä rakenteen kohdistuvien kuormien aiheuttamien sisäisten jännitystilojen vastaanottamiseksi. Tässä luvussa esitetään Liikenneviraston paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaiset paalulaattarakenteeseen kohdistuvat rakenne- ja hyötykuormat. Tässä työssä sovelletaan paalulaatalle kohdistuvien kuormien osalta Liikenneviraston Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjetta, jolloin laatan päälle tulevan pengerkorkeuden on oltava vähintään 1,4 metriä. Mikäli pengerkorkeus jää alle 1,4 metriin, mitoitetaan paalulaatan rakenne siltana, jolloin rakenteeseen kohdistuvat kuormat määräytyvät Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet mukaan. (Patjas ym 2014, 8.) Lisäksi voidaan todeta, että vesihuoltojärjestelmän rakenteet tarvitsevat yläpuolelleen enemmän mursketäyttöä, mitä alle 1,4 metrin pengerkorkeudesta jää tilaa.

3.1 Pysyvät kuormat

Pysyvinä kuormina paalulaatan rakennelaskelmissa huomioidaan laatan rakenteen omapaino sekä laatan päälle rakennettavan penkereen paino sekä mahdollisten kaivannon lopputäyttöjen tai tien pintakerrosten materiaalien painot. Standardissa SFS-EN 1991-1-1 liitteen A taulukoissa esitetään materiaalien tilavuuspainoja. Ellei hankekohtaisesti toisin määrätä, voidaan rakenneosien painoa laskettaessa käyttää seuraavia edellä mainitun standardin taulukoituja tilavuuspainoja. (Liikennevirasto 2017, NCCI1, 8.)

$$\delta_i = h \cdot \gamma_i,$$

missä

$$\gamma_{betoni} = 25,00 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sullottu \text{ kivimurske}} = 21,50 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{asfalttibetoni} = 25,00 \text{ kN/m}^3$$

Kaava 1. Laattaa kuormittavien rakennekuormien laskentatapa (Liikennevirasto 2017, NCCI1, 8).

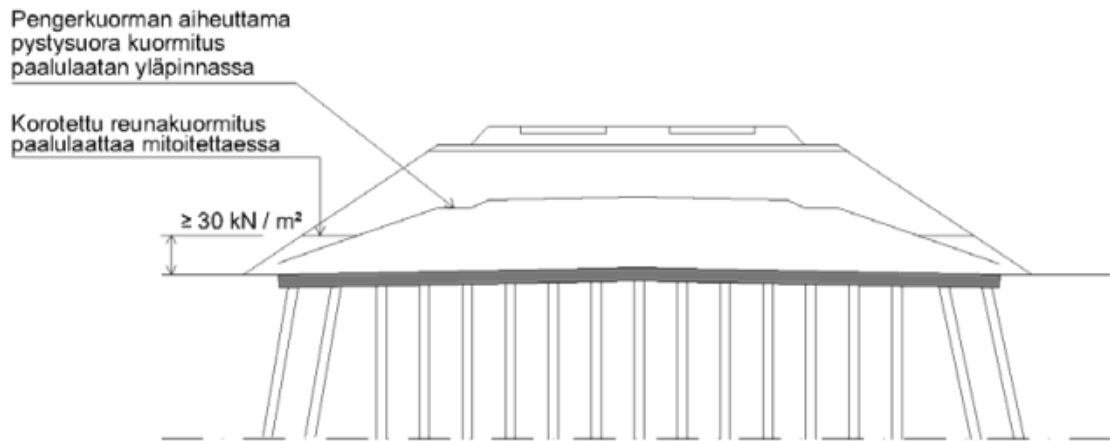
3.2 Hyötykuormat

Hyötykuormina paalulaattarakenteen mitoituslaskelmissa huomioidaan Liikenneviraston paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeessa esitetyt LM1-kuormituskaavion mukainen laatalle tasaisesti pengerkorkeuden funktiona jakautunut liikennekuorma. Kuorman jakautumisen laskenta perustuu oletukseen, jonka mukaan LM1:n telikuorma jakaantuu penkereessä Boussinesqin teorian mukaan. Kuormaan sisältyy lisäksi noin kolmenkymmenen prosentin suuruinen liikennekuorman dynaaminen lisä. (Patjas ym 2014, 19.)

3.3 Paalulaattarakenteelle kohdistuvien rakenne- ja liikennekuormat

Penkereen ja rakenteiden oman painon sekä hyötykuormien oletetaan siirtyvän paalulaatan paaluille. Maassa olevan paalun painoa ei suunnitteluohjeen mukaan tarvitse ottaa laskelmissa huomioon, sillä paalujen mitoituskuormat lasketaan paalujen yläpään tukireaktioista ja käytännön mitoituksessa onkin ehkä kätevintä käyttää paaluja ympäröivän maa-aineksen ominaisuuksien mukaan valmiiksi laskettuja ja taulukoituja paalujen mitoitusarvoja. (Patjas ym 2014, 17–18.)

Kuvassa 1 on esitetty paalulaatalle kohdistuvan pengersä ja liikennekuorman kuormitusalue. Kuormitusalueen täysi intensiteetti rajataan luiskassa ajoradan reunalla jyrkimillään kaltevuudessa 2:1. Laatan reunoille kohdistuvan kuorman oletetaan olevan kuitenkin vähintään 30 kPa:n suuruinen. (Patjas ym 2014, 18–20.)



Kuva 1 Penkereen omasta painosta aiheutuvan pystysuoran kuorman jakautuminen paalulaatan yläpinnalle (Patjas ym 2014, 18–20).

Putkijohtokaivannon alle rakennettavissa paalulaatoissa penger kuormittaa laattaa pääsääntöisesti tasapaksuna ja laatalle tasaisesti jakautuneena pystysuuntaisena kuormana. Kuorman jakautuminen pengerkorkeuden mukaan on esitetty taulukossa 1. (Patjas ym 2014, 18–20.)

Taulukko 1. Paalulaatalle kohdistuvat kuormat (Patjas ym 2014, 18–20).

PENGERKUORMA PAALULAATALLA, NCCI1			
Pengerkorkeus h [m]	γ_{murske} [kN/m^3]	δ_{murske} [kPa]	LM1 tie [kPa]
1,40	21,50	30,10	53,00
2,00	21,50	43,00	42,00
2,50	21,50	53,75	35,00
3,00	21,50	64,50	30,00
3,50	21,50	75,25	26,00
4,00	21,50	86,00	23,00
4,50	21,50	96,75	20,00
5,00	21,50	107,50	19,00
5,50	21,50	118,25	17,00
6,00	21,50	129,00	16,00
6,50	21,50	139,75	15,00
7,00	21,50	150,50	14,00
7,50	21,50	161,25	
8,00	21,50	172,00	
8,50	21,50	182,75	
9,00	21,50	193,50	
9,50	21,50	204,25	
10,00	21,50	215,00	

3.4 Paalulaattarakenteelle kohdistuvien jarru- ja kiihdytyskuormien käsittely

Paalulaatalle kohdistuvina kuormina huomioidaan lisäksi pengerkorkeuden funktiona jakautuneet Liikenneviraston ohjeessa NCCI esitetyt jarrutuksesta ja kiihdytyksestä aiheutuvat vaakasuuntaiset kuormat sekä vinosta jarrutuksesta aiheutuva poikittainen vaakakuorma (Liikennevirasto 2017, NCCI1 12–13.)

$$Q_{lk} = 360 + 2,7 \cdot L \text{ [kN]}.$$

Kaava 2. Jarrutuksesta aiheutuvan viivakuorman laskeminen (Liikennevirasto 2017, NCCI1 12).

$$Q_{trk} = 0,25 \cdot Q_{lk}$$

Kaava 3. Vinosta jarrutuksesta tai sivuluisusta aiheutuva poikittainen kuorma (Liikennevirasto 2017, NCCI1 12–13).

Jarrukuormaa määriteltäessä tarkoitetaan parametrilla L teräsbetonirakenteen yhtenäisen osan pituutta, joka vastaa etäisyyttä kahden ylimenokohdan välillä, jotka eivät siirrä vaakakuormia. Suomessa käytettävän jarrukuorman ylärajana pidetään 500 kN. Vinosta jarrutuksesta tai sivuluisusta aiheutuva poikittainen kuormaa Q_{trk} pidetään suuruudeltaan 25 %:n osana pituussuuntaisesta jarru- tai kiihdytyskuormasta. Molemmat edellä esitetyt vaakasuuntaiset kuormat vaikuttavat rakenteessa samanaikaisesti. (Liikennevirasto 2017, NCCI1 12–13.)

Lasketuista vaakakuormien arvoista on Q_{lk} :n oletettu jakautuneen laattarakenteen päällä sijaitsevan oletetun 3 metriä leveän ajokaistan päälle tasaisena paalulaatan pituussuuntaisesti vaikuttavana viivakuormana. Kuorman on laskelmissa oletettu jakautuvan tasaisesti 2:1-menetelmällä penkereen lävitse vaikuttamaan paalulaatan päällä. Rakennemallissa kuorma on asetettu vaikuttamaan tasaisena viivakuormana aina jokaiselle paalukaistalle kerrallaan. Kuorma Q_{trk} on sijoitettu rakennemalliin vaikuttamaan pistekuormana yksittäisen paalun kohdalle. Edellä kuvatut paalulaatan pintaan pengerkorkeuden suhteen vaikuttavat jarrukuormat on esitetty taulukossa 2.

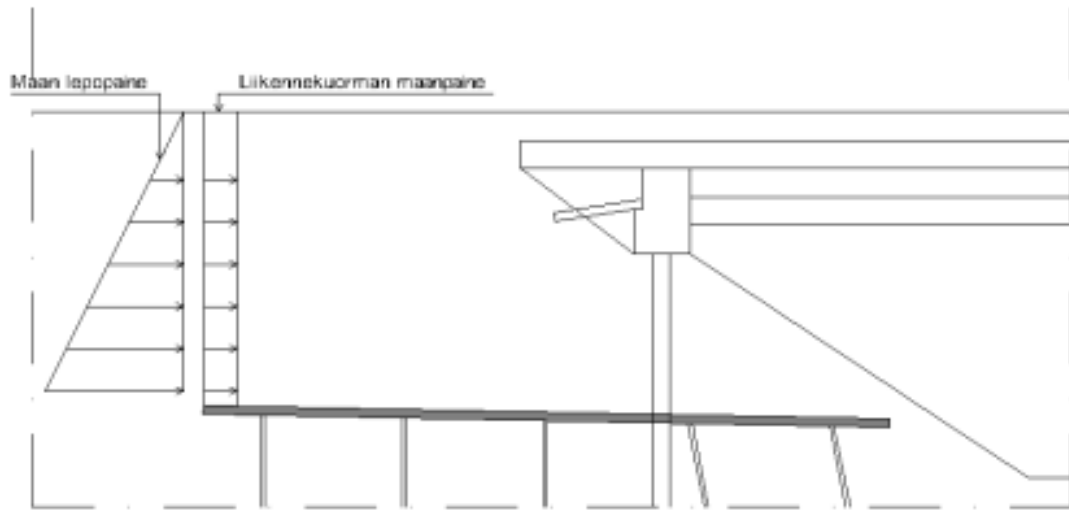
Taulukko 2. Pengerkorkeuden funktiona jakautuneet jarrukuormat.

Pengerkorkeus h [m]	Ajokaistan le- veys	L [m]	Q_{lk} = $360 + 2,7$ $\cdot L$ [kN]	Q_{lk} 2: 1 – menetelmällä jakautuneena	0,25 $\cdot Q_{lk}$ [kN]
1,40	3,00	40,00	468	106,36	26,59
2,00	3,00	40,00	468	93,60	23,40
2,50	3,00	40,00	468	85,09	21,27
3,00	3,00	40,00	468	78,00	19,50
3,50	3,00	40,00	468	72,00	18,00
4,00	3,00	40,00	468	66,86	16,71
4,50	3,00	40,00	468	62,40	15,60
5,00	3,00	40,00	468	58,50	14,63
5,50	3,00	40,00	468	55,06	13,76
6,00	3,00	40,00	468	52,00	13,00
6,50	3,00	40,00	468	49,26	12,32
7,00	3,00	40,00	468	46,80	11,70
7,50	3,00	40,00	468	44,57	11,14
8,00	3,00	40,00	468	42,55	10,64
8,50	3,00	40,00	468	40,70	10,17
9,00	3,00	40,00	468	39,00	9,75
9,50	3,00	40,00	468	37,44	9,36
10,00	3,00	40,00	468	36,00	9,00

3.5 Paalulaattaan kohdistuvan maanpaineen ja pystykuormitusten vaikutukset

Paalulaattaan aiheutuu vaakasuoria kuormia väylän viereisistä täytöistä, viereisen ajoradan penkereestä sekä tiepenkereestä väylän pituussuunnassa (Patjas ym 2014, 21–22). Tämän työn laskelmissa ei työn yleisluonteisuuden vuoksi ole huomioitu muita mahdollisia maanpaineen vaikutuksesta aiheutuvia paalulaattaan kohdistuvia kuormia kuin pystysuoran liikennekuorman aiheuttama vaakasuuntainen voima. Paalulaattaan kohdistuvan vaakasuuntaisen halkaisuvoiman $F_{H,k}$ laattaan aiheuttama sisäinen jännitys otetaan ohjeen mukaan vastaan laatan raudoituksella – ei vinopaaluilla. Voiman

oletetaan vaikuttavan väylän suuntaisesti seuraavassa kuvassa esitetyllä tavalla. (Patjas ym 2014, 22–23, 37.)



Kuva 2. Paalulaattaan pystysuoran liikennekuorman aiheuttama maanpainekuorma (Patjas ym 2014, 22).

Alapuolella esitetyllä kaavalla laskettavan kuorman voidaan olettaa jakautuvan tasaisesti laatan molemmille pinnoille (Patjas ym 2014, 23).

$$F_{H,k} = K_0 \cdot \left(\gamma_m \cdot \frac{H^2}{2} + q_k \cdot H \right),$$

missä

$F_{H,k}$ vaakakuorman ominaisarvo

H penkereen korkeus laatan tai paaluhatturakenteen yläpinnasta rakenteen ulkoreunassa

γ_m penkereen keskimääräinen tilavuuspaino

K_0 lepopainekerroin

φ kitkakulma, soralle 38 deg

q_k liikennekuorma; tiellä liikennekuorman arvona voidaan käyttää 20 kPa ja kevyeen liikenteen väylällä 10 kPa

Kaava 4 Penkereen omasta painosta ja liikennekuormasta paalulaattaan syntyvän sisäisen vaakavoiman (halkaisuvoiman) laskenta lepopaineena (Patjas ym 2014, 23).

$$K_0 = (1 - \sin \varphi) \cdot \sqrt{OCR} \cdot (1 + \sin \beta)$$

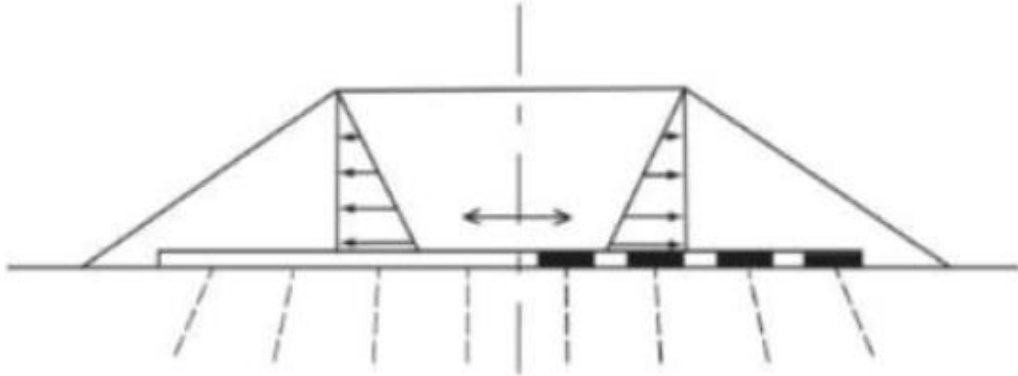
- OCR* ylikonsolidoitumissuhde, tässä työssä on käytetty arvoa 0,92
- φ kitkakulma
- β maanpinnan kaltevuus vaakatasosta ylöspäin, joka voi laskelmissa enimmillään olla tehokkaan leikkauskestävyyskulman φ suuruinen

Kaava 5 Lepopaine kertoimen laskenta (Heikkilä ym 2017, 73–74.)

Taulukko 3 Paalulaattaan päällä olevaan penkereeseen maan omasta painosta ja liikennekuormasta syntyvä sisäisen vaakavoiman $F_{H,k}$ lasketut arvot (Patjas ym 2014, 23).

h [m]	γ_m [kPa]	φ	OCR	β	q [kPa]	K_0	$F_{H,k}$ [kN/m]
1,4	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	18,09
2,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	30,60
2,5	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	43,20
3,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	57,79
3,5	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	74,35
4,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	92,90
4,5	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	113,43
5,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	135,94
5,5	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	160,43
6,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	186,90
6,5	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	215,36
7,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	245,79
7,5	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	278,21
8,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	312,61
8,5	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	348,99
9,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	387,35
9,5	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	427,70
10,0	21,5	38	0,92	0,0	20,0	0,37	470,02

Kuvassa 3 on vielä esitetty voiman $F_{H,k}$ vaikutus penkereen sivuttaissuunnassa (Patjas ym 2014, 22).



Kuva 3. Paalulaattaan pystysuoran liikennekuorman aiheuttama maanpaine kuorma laatan poikittaissuunnassa (Patjas ym 2014, 22.)

3.6 Siirtymälaatalle kohdistuvat kuormat

Siirtymälaatalle kohdistuvat samat kuormat kuin paalulaatallekin. Siirtymälaatan keräämän kuorman vaikutus kohdistuu paalulaatan pään konsolin tukipinnan puoliväliin pystysuorana konsolin suuntaisena viivakuormana. Siirtymälaatan oletetaan olevan kuormituksen jakautumisen suhteen olevan yksiaukkoinen palkki, jonka jännemitta on 60 % sen pituudesta. Viivakuorman konsolille aiheuttaman taivutusmomentin momenttivarsi on puolestaan puolet konsolin pituudesta. Siirtymälaatalta konsolille siirtyvät kuormat lasketaan kaavoilla 6 ja 7. (Liikennevirasto NCCI 1 2017, 18). Siirtymälaatoilta konsolille siirtyvät kuormat on esitetty pengerkorkeuden funktiona taulukoissa 4 ja 5.

$$\gamma_{k,s-laatta} = 0,6 \cdot L \cdot (\gamma_{k,murske} \cdot h + \gamma_{k,laatta} \cdot h_{laatta})$$

Kaava 6. Konsolille kohdistuva kuorma siirtymälaatan rakennepainoista (Liikennevirasto NCCI 1 2017, 18.)

$$q_{k,s-laatta} = 0,6 \cdot L \cdot q_{k,LM1}$$

Kaava 7. Konsolille kohdistuva kuorma siirtymälaatan liikennekuormista (Liikennevirasto NCCI 1 2017, 18.)

Taulukko 4. Konsolille kohdistuvat kuormat 3 metriä pitkältä siirtymälaatalta liikennekuormista (Liikennevirasto NCCI 1 2017, 18.)

Penkereen korkeus h [m]	Siirtymälaatta L [m]	$G_{k,konsoli}$ [kN/m]	$M_{ed,G}$ [kNm/m]	$Q_{k,konsoli}$ [kN/m]	$M_{ed,Q}$ [kNm/m]
1,4	3,0	33,84	4,23	47,25	5,91
2,0	3,0	45,45	5,68	36,90	4,61
2,5	3,0	55,13	6,89	31,50	3,94
3,0	3,0	64,80	8,10	27,00	3,38
3,5	3,0	74,48	9,31	24,75	3,09
4,0	3,0	75,15	10,52	20,25	2,53
4,5	3,0	93,83	11,73	18,00	2,25
5,0	3,0	103,50	12,94	17,10	2,14
5,5	3,0	113,18	14,15	15,75	1,97
6,0	3,0	122,85	15,36	15,30	1,91
6,5	3,0	132,53	16,57	14,40	1,80
7,0	3,0	142,20	17,78	13,50	1,69
7,5	3,0	151,88	18,98		
8,0	3,0	161,55	20,19		
8,5	3,0	171,23	21,40		
9,0	3,0	180,90	22,61		
9,5	3,0	190,58	23,82		
10,0	3,0	200,25	25,03		

Taulukko 5. Konsolille kohdistuvat kuormat 5 metriä pitkältä siirtymälaatalta liikennekuormista (Liikennevirasto NCCI 1 2017, 18.)

Penkereen korkeus h [m]	Siirtymälaatta L [m]	$G_{k,konsoli}$ [kN/m]	$M_{ed,G}$ [kNm/m]	$Q_{k,konsoli}$ [kN/m]	$M_{ed,Q}$ [kNm/m]
1,4	5,0	56,40	7,05	78,75	9,84
2,0	5,0	75,75	9,47	61,50	7,69
2,5	5,0	91,88	11,48	52,50	6,56
3,0	5,0	108,00	13,50	45,00	5,63
3,5	5,0	124,13	15,52	41,25	5,16
4,0	5,0	140,25	17,53	33,75	4,22
4,5	5,0	156,38	19,55	30,00	3,75
5,0	5,0	172,50	21,56	28,50	3,56
5,5	5,0	188,63	23,58	26,25	3,28
6,0	5,0	204,75	25,59	25,50	3,19
6,5	5,0	220,88	27,61	24,00	3,00
7,0	5,0	237,00	29,63	22,50	2,81
7,5	5,0	253,13	31,64		
8,0	5,0	268,25	33,66		
8,5	5,0	285,38	35,67		
9,0	5,0	301,50	37,69		
9,5	5,0	317,63	39,70		
10,0	5,0	333,75	41,72		

4 PAALULAATAN MITOITUSPERUSTEET

4.1 Ohjeet ja normistot

Työssä noudatetaan seuraavia ohjeita ja normistoja:

- Eurokoodi, Rakenteiden suunnitteluperusteet, SFS-EN 1990 + A1 + AC Rakenteiden suunnitteluperusteet
- Eurokoodi 1, Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat, SFS-EN 1991-2
- Eurokoodi 2, Betonirakenteiden suunnittelu. Betonisillat. Mitoittaminen ja yksityiskohtainen suunnittelu, SFS-EN 1992-2 + AC
- Eurokoodi 7, Geotekninen suunnittelu. Osat 1 ja 2, SFS-EN 1997-1 + A1 + AC ja SFS 1997-2 + AC
- Eurokoodin sovellusohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1, LO24/2017
- Eurokoodin sovellusohje, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI2, LO31/2017
- Eurokoodin sovellusohje, Geotekninen suunnittelu – NCCI7, LO13/2017
- Siltojen rakennelaskelmat LO12/2012
- Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu, pohjarakenteiden suunnitteluohjeet, LO5/2017
- Infrarakenteiden yleiset laatuvaatimukset, InfraRYL osa 1, 2010 ja osat 2 ja 3, 2006
- Suomen Rakennusinsinöörien Liiton Paalutusohje 2016 254-2-2016
- Rakennusteollisuuden tuotelehti PO-2016:n mukaiseen paalutustyöhön.

4.2 Paalulaatan rasisusluokkaryhmät Liikenneviraston ohjeen mukaan

Paalulaattojen rasisusluokkaryhmän valintaan eniten vaikuttaa, sijaitseeko paalulaatta liikennöidyllä vai liikennöimättömällä alueella. Lisäksi merkitystä on liikennöidyn alueen liikennemäärillä sekä talvihoitoluokalla. Mikäli paalulaatta sijaitsee liikennöidyllä alueella, jonka keskivuorokausiliikenne ylittää 1 500 ajoneuvo ja kuuluu talvihoitoluokkaan Is tai I, kuuluu paalulaatta rasisusluokkaryhmään R1. Keskivuorokausiliikennemäärien ollessa

1 500 ja 350 ajoneuvon välillä ja talvihoitoluokan ollessa Ib tai ITb, kuuluu paalulaatta rasisitusluokkaryhmään R2. Mikäli paalulaatta ei kuulu kumpaankaan edellä mainittuun rasisitusluokkaryhmään, kuuluu paalulaatta tällöin rasisitusluokkaryhmään R4. Paalulaattojen betonirakenteiden vähimmäisvaatimukset riippuvat käytettävästä rasisitusluokkaryhmästä. (Laaksonen 2017, 27, 30.)

Taulukko 6. Paalulaattojen betonirakenteiden vähimmäisvaatimukset (Laaksonen 2017, 30).

Rakenneosa	Rakenneseosan tunnus	Rasisitusluokkaryhmä	Rasisitusluokat	Vaatimukset				Suunnittelukäyttöikä
				Lujusluokka	P-lukuvaatimus	Betonipitteen nimellisarvo [mm] (vähimmäisarvo)	Raudostustyyppi (1)	
Paaluhatut, paalulaatat ja niihin liittyvät siirtymälaatat yleensä (4)	Ro30	R4	XC2	C25/30 (7)	-	50/100 (25) (3)	tr	100
						50/100 (35) (3)	jr	
Suolaveden rasittamat (2 paaluhatut, paalulaatat ja niihin liittyvät siirtymälaatat (4)	Ro31	R1 R2	XC2, XD1	C30/37	-	50/100 (35) (3)	tr	100
		55/100 (45) (3)				jr		
Suolaveden rasittama paalulaatan yläpinta, johon ei tehdä veden poistoa (vaakasuora) (4)	Ro32	R1 R2	XC2, XD3	C35/45	-	60 (40)	tr	100
		65 (55)				jr		

4.3 Paalulaatan kuivatus ja veden poisto

Paalulaatan pintavedet kerätään rakenteen ulkopuolelle ja johdetaan alueen taikka väylän kuivatusjärjestelmään. Vedenpoisto paalulaatoissa hoidetaan ensisijaisesti laatan pintaan tehtävillä kallistuksilla tai vaihtoehtoisesti laatan rakenteen lävitse ulottuvilla rei'illä. Pinnan on oltava vähintään 1:50 kalteva paalulaatoissa, joissa vesi poistetaan kallistusten avulla. Kun käytetään laatan rakenteen lävitse ulottuvia reikiä, tulee niitä vaakasuoralla laatalta olla vähintään 1 kpl / 20 m² ja reiän halkaisijan on vähintään oltava 70 mm. (Patjas ym 2014, 30.) Lisäksi tulee muistaa, ettei reikiä saa tehdä 1 500 mm:n säteelle paalun ulkoreunasta. (Laaksonen 2017, 62).

4.4 Päärakenteiden materiaaliominaisuudet

Paalulaatan rakenteessa käytettävä betoni on materiaaliominaisuuksiltaan Ro31 R1 tai R2, XC2 XD1, C35/45. Rakenteen suojabetonin minimiarvot c_{nom} ovat 50/100 ja suunniteltu käyttöikä 100 vuotta (Laaksonen 2017, 30).

Siirtymälaatan rakenteessa käytettävä betoni on materiaaliominaisuuksiltaan Ro31, R1 tai R2, XC2 XD1. Rakenteen suojabetonin minimiarvo c_{nom} on 50 (Laaksonen 2017, 26).

Paaluissa käytettävä betoni on materiaaliominaisuuksiltaan Ro13, R4, XC2, C40/50 tai C45/55 (Rakennusteollisuus 2018, 5.)

Paalulaatan rakenteessa käytetään materiaaliominaisuuksiltaan A500HW tai B500B olevaa teräslaatuja.

Teräsbetonipaaluina käytetään työssä RTB-250-16-, RTB-300-16-, RTC-300-16- tai RTC-350-16 lyöntipaaluja.

Teräsputkipaaluina työssä käytetään RRs125/6,3 S550J2H, RR140/8 S460MH, RRs140/8 S550J2H, RR140/10 S460MH, RRs140/10 S550J2H, RR170/10 S460MH, RRs170/10 S550J2H, RR170/12,5 S460MH, RR220/10 S460MH tai RRs220/10 S550J2H.

Taulukko 7. Teräsputkipaalujen vakioteräslajit (SSAB 2018, 4).

Teräslaji	Hiilielivälentti	Kemiallinen koostumus				Mekaaniset ominaisuudet				
		CEV max. [%]	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	A5min [%]	T *) [C]
S355J2H	0,45	0,22	1,6	0,03	0,03	355	470-630	20	-20	27
A440J2H	0,45	0,16	1,6	0,02	0,02	440	490-630	17	-20	27
S460MH	0,46	0,16	1,7	0,035	0,03	460	530-720	17	-30	27
S550J2H	0,47	0,12	1,9	0,02	0,02	550	605-760	14	-20	27

4.5 Nurjahduskestävyys ja geotekninen puristuskestävyys

Tukipaalujen sijoittelu ja paalujako perustuu lähtökohtaisesti paalujen rakenteelliselle kestävyydelle murtorajatilassa paaluihin aksiaalisesti kohdistuvia kuormia vastaan. Mitoittavaksi tekijäksi teräsbetonipaaluilla tulevat paalun nurjahdus sekä paalun kärjen geotekninen puristuskestävyys. (Rakennusteollisuus 2018, 13.) Seuraavalta sivulla löytyvässä taulukko 8:ssa on esitetty Rakennusteollisuuden tuotelehti PO-2016:ssa esitetyjä teräsbetonipaalujen puristuskapasiteetteja murtorajatilassa.

Taulukko 8. Teräsbetonipaalujen puristuskestävyydet murtorajatilassa (Rakennusteollisuus 2018, 13).

Paalutyyppe		$R_{d:str}$ [kN]							$R_{d:geo}$ [kN] *)		
		P [%]	L [%]	3	5	c_s [kN/m ²]			PTL1	PTL2	PTL3**)
RTB-250-16	Jatkettu paalu	100	0	375	508	613	739	805	624	698	791
		50	50	473	636	760	899	(947)			
		0	100	548	721	838	(947)	(1000)			
	Jatkamaton paalu	100	0	532	692	808	(927)				
		50	50	669	867	990	(1077)				
		0	100	764	933	1017	(1103)				
RTB-300-16	Jatkettu paalu	100	0	541	733	885	1063	1149	895	1001	1134
		50	50	678	916	1093	1282	(1344)			
		0	100	789	1036	1204	(1357)	(1431)			
	Jatkamaton paalu	100	0	765	995	1161	(1325)				
		50	50	967	1247	1415	(1532)				
		0	100	1099	1338	1455	(1574)				
RTC-300-16	Jatkettu paalu	100	0	578	788	957	1163	1277	1026	1147	1300
		50	50	733	987	1184	1427	(1549)			
		0	100	843	1121	1324	(1526)	(1622)			
	Jatkamaton paalu	100	0	826	1087	1283	1498				
		50	50	1049	1369	1595	(1778)				
		0	100	1195	1496	1661	(1821)				
RTC-350-16	Jatkettu paalu	100	0	790	1077	1307	1589	1746	1394	1558	1765
		50	50	1001	1346	1616	1946	(2092)			
		0	100	1149	1529	1805	(2078)	(2209)			
	Jatkamaton paalu	100	0	1128	1484	1750	2043				
		50	50	1431	1868	2174	(2411)				
		0	100	1629	2039	2260	(2478)				

*) Korrelaatiokerroin $\xi_s = 1,47$

***) Paalutustyöluokassa PTL3 lyötävien paalujen geotekninen kestävyys $R_{d:geo}$ on aina varmistettava joko dynaamisilla tai staattisilla koekuormituksilla.

Suluissa esitetty paalun rakenteellinen kestävyys ($R_{d:str}$) arvo tai tyhjä ruutu tarkoittaa sitä, että paalun puristuskestävyys tulee Tuotelehden loppulyöntitaulukkoa käytettäessä kaikissa tapauksissa määräytymään paalun geoteknisen kantavuuden maksimiarvon perusteella.

Taulukossa $R_{d:str}$ on paalun rakenteellinen kestävyys, jolloin murtotavaksi muodostuu paalun stabiliteetin menetys paalua ympäröivän maakerroksen murtuessa taikka paalu-poikkileikkauksen kapasiteetin ylittyminen.

$R_{d:geo}$ on paalun geotekninen kantavuus eli paalun suurin lyömällä osoitettavissa oleva murtorajatilan puristuskestävyys eri paalutustyöluokissa PO-2016 mukaiseen paalutustyöhön laaditun RT:n tuotelehden loppulyöntiarvoja käytettäessä. (Rakennusteollisuus, 13).

Taulukossa on esitetty paalua ympäröivän maa-aineksen suljetun leikkauslujuuden karakteristisen arvon perusteella saadut paalun nurjahduskestävyyden mitoitusarvot sekä paalun kärjen geoteknisen puristuskestävyyden arvot paalutustyöluokan mukaan. Näistä kahdesta pienempi valitaan paalukuorman mitoittavaksi arvoksi. Taulukossa on annettu arvot sekä jatketulle että jatkamattomalle paalulle kohdistuvan pysyvän ja muuttuvan kuorman keskinäisen suhteen mukaan kolmelle eri kuormitustapaukselle. (Rakennusteollisuus 2018, 12.)

1. pysyvää kuormaa 100 % ja muuttuvaa kuormaa 0 %
2. pysyvää 50 % ja muuttuvaa 50 %
3. pysyvää 0 % ja muuttuvaa 100 %. (Rakennusteollisuus 2018, 12.)

Taulukon nurjahduskestävyyden väliarvot interpoloidaan lineaarisesti pysyvän ja muuttuvan kuorman keskinäisen suhteen perusteella kokonaiskuormasta. (Rakennusteollisuus, 12–13.)

Laskettaessa teräsbetonipaalun taulukon mukaista puristuskapasiteettia lasketaan ensin rakennekuormien osuus paaluun kohdistuvasta kokonaiskuormasta.

Taulukko 9. Paaluun kohdistuvien rakennekuormien prosentuaalinen osuus kokonaiskuormasta työssä käsitellyillä pengerkorkeuksilla (Rakennusteollisuus 2018, 12).

$$\begin{array}{l}
 z = -3 \text{ m} \\
 G_{k3} := 64.50 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 10.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad Q_{k3} := 30.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad G_{k3\%} := \frac{G_{k3}}{G_{k3} + Q_{k3}} = 71.292\% \\
 z = -5 \text{ m} \\
 G_{k5} := 107.50 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 10.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad Q_{k5} := 19.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad G_{k5\%} := \frac{G_{k5}}{G_{k5} + Q_{k5}} = 86.081\% \\
 z = -7 \text{ m} \\
 G_{k7} := 150.50 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 10.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad Q_{k7} := 14.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad G_{k7\%} := \frac{G_{k7}}{G_{k7} + Q_{k7}} = 91.977\%
 \end{array}$$

Laskettujen rakennekuormien suhteellisten osuuksien perusteella saadaan paalujen nurjahduskestävyys laskettua. Seuraavassa esitetään RTB-250-16- ja RTB-300-16 teräsbetonipaalujen nurjahduskestävyyksien arvot työssä tarkasteltaville tilanteille.

Taulukko 10. RTB-250-16 ja RTB-300-16 teräsbetonipaalujen puristuskestävyydet paalulaatan päälle tulevan pengerkorkeuden funktiona (Rakennusteollisuus 2018, 12).

RTB-250-16

$$z = -3 \text{ m}$$

$$R_{d,250.3m} := 636 \text{ kN} - \frac{G_{k3\%} - 50\%}{100\% - 50\%} \cdot (636 \text{ kN} - 508 \text{ kN}) = 581.493 \cdot \text{kN}$$

$$z = -5 \text{ m}$$

$$R_{d,250.5m} := 636 \text{ kN} - \frac{G_{k5\%} - 50\%}{100\% - 50\%} \cdot (636 \text{ kN} - 508 \text{ kN}) = 543.634 \cdot \text{kN}$$

$$z = -7 \text{ m}$$

$$R_{d,250.7m} := 636 \text{ kN} - \frac{G_{k7\%} - 50\%}{100\% - 50\%} \cdot (636 \text{ kN} - 508 \text{ kN}) = 528.539 \cdot \text{kN}$$

RTB-300-16

$$z = -3 \text{ m}$$

$$R_{d,300.3m} := 916 \text{ kN} - \frac{G_{k3\%} - 50\%}{100\% - 50\%} \cdot (916 \text{ kN} - 733 \text{ kN}) = 838.072 \cdot \text{kN}$$

$$z = -5 \text{ m}$$

$$R_{d,300.5m} := 916 \text{ kN} - \frac{G_{k5\%} - 50\%}{100\% - 50\%} \cdot (916 \text{ kN} - 733 \text{ kN}) = 783.945 \cdot \text{kN}$$

$$z = -7 \text{ m}$$

$$R_{d,300.7m} := 916 \text{ kN} - \frac{G_{k7\%} - 50\%}{100\% - 50\%} \cdot (916 \text{ kN} - 733 \text{ kN}) = 762.364 \cdot \text{kN}$$

Seuraavista kahdesta taulukosta löytyvät vastaavasti teräsputkipaaluja käytettäessä paalun mitoittavana tekijänä kyseeseen tulevat paalun nurjahduksen sekä kärjen geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvot (SSAB 2018, 24).

Taulukko 11. Teräsputkipaalujen rakenteen puristuskestävyyden, sekä geoteknisen kestävyyden mitoitusarvot korroosiovaran ollessa 1,2 mm (SSAB 2018,24).

Paalu	Teräslaji	Aikutaipuma	Korroosiovara 1,2 mm						Geoteknisen kestävyyden mitoitusarvot R_s [kN]		
			Rakenteen puristuskestävyyden mitoitusarvo R_s [kN]						PTL1	PTL2	PTL3
			suljettu leikkauslujuus c_{ak} [kPa]								
		δ_p	5	7	10	15	20	30			
RR75	S460MH	L./400	210	257	318	359	377	398	195	259	324
		L./600	245	298	346	377	395	415			
RR90	S460MH	L./400	274	336	406	439	458	481	230	307	384
		L./600	320	389	427	460	479	501			
RRs100/6.3	S550J2H	L./400	345	422	523	594	624	660	318	423	529
		L./600	401	487	571	623	653	687			
RR115/6.3	S460MH	L./400	421	516	562	600	622	648	301	401	502
		L./600	489	550	590	628	649	672			
RR115/8	S460MH	L./400	464	568	694	751	786	826	376	502	627
		L./600	541	657	730	788	822	860			
RRs115/8	S550J2H	L./400	464	568	703	854	903	961	450	600	749
		L./600	541	657	807	896	946	1002			
RRs125/6.3	S550J2H	L./400	504	616	729	787	821	859	402	536	670
		L./600	582	704	766	823	856	892			
RR140/8	S460MH	L./400	653	799	901	965	1004	1048	466	621	777
		L./600	758	877	947	1011	1047	1088			
RRs140/8	S550J2H	L./400	653	799	988	1107	1162	1225	557	743	929
		L./600	758	921	1066	1160	1214	1275			
RR140/10	S460MH	L./400	710	870	1078	1177	1233	1299	574	765	956
		L./600	829	1007	1140	1236	1291	1353			
RRs140/10	S550J2H	L./400	710	870	1078	1334	1414	1509	686	915	1143
		L./600	829	1007	1237	1401	1482	1577			
RR170/10	S460MH	L./400	975	1194	1384	1488	1549	1621	700	934	1167
		L./600	1134	1343	1455	1559	1618	1684			
RRs170/10	S550J2H	L./400	975	1194	1477	1700	1789	1893	837	1116	1396
		L./600	1134	1377	1632	1784	1872	1971			
RR170/12.5	S460MH	L./400	1057	1295	1604	1797	1887	1992	862	1149	1436
		L./600	1234	1501	1736	1887	1976	2076			
RR220/10	S460MH	L./400	1519	1802	1929	2048	2118	2199	925	1233	1542
		L./600	1751	1895	2023	2139	2204	2277			
RRs220/10	S550J2H	L./400	1519	1858	2193	2365	2466	2582	1106	1475	1843
		L./600	1756	2117	2302	2474	2572	2679			
RR220/12.5	S460MH	L./400	1654	2026	2331	2505	2607	2726	1142	1523	1904
		L./600	1922	2265	2451	2624	2722	2832			
RRs220/12.5	S550J2H	L./400	1654	2026	2506	2865	3013	3185	1366	1821	2277
		L./600	1922	2336	2752	3004	3151	3315			
RR270/10	S460MH	L./400	2188	2674	2518	2651	2728	2817	1163	1551	1939
		L./600	2332	2494	2635	2760	2831	2910			
RRs270/10	S550J2H	L./400	2188	2396	2540	2671	2748	2835	1391	1855	2319
		L./600	2351	2514	2655	2779	2848	2926			
RR270/12.5	S460MH	L./400	2391	2867	3074	3268	3382	3513	1441	1921	2401
		L./600	2767	3016	3225	3414	3520	3639			
RRs270/12.5	S550J2H	L./400	2391	2926	3491	3770	3934	4123	1722	2296	2871
		L./600	2767	3359	3665	3945	4104	4280			
RR320/10	S460MH	L./400	2432	2555	2663	2763	2821	2889	1389	1852	2314
		L./600	2553	2672	2773	2862	2913	2972			
RRs320/10	S550J2H	L./400	2739	2908	3056	3192	3270	3361	1660	2214	2767
		L./600	2877	3045	3187	3312	3381	3460			
RR320/12.5	S460MH	L./400	3177	3559	3786	3997	4120	4261	1722	2296	2870
		L./600	3483	3740	3966	4166	4279	4405			
RRs320/12.5	S550J2H	L./400	3177	3883	4331	4636	4813	5016	2059	2745	3432
		L./600	3663	4211	4542	4842	5010	5195			

Taulukko 12. Teräspuutkipaalujuen rakenteen puristuskestävyyden sekä geoteknisen kestävyuden mitoitusarvot korroosiovaran ollessa 2,0 mm (SSAB 2018, 24).

Korroosiovara 2.0 mm											
RR75	S460MH	L./400	191	234	284	307	321	338	195	259	324
		L./600	223	271	299	323	336	351			
RR90	S460MH	L./400	251	308	350	376	391	408	230	307	384
		L./600	292	341	368	393	408	424			
RRs100/6.3	S550J2H	L./400	317	388	472	511	535	561	318	423	529
		L./600	367	446	496	535	558	583			
RR115/6.3	S460MH	L./400	388	453	484	513	530	550	301	401	502
		L./600	441	476	507	536	551	569			
RR115/8	S460MH	L./400	435	532	623	671	699	732	376	502	627
		L./600	506	604	655	703	730	761			
RRs115/8	S550J2H	L./400	435	532	659	766	807	851	450	600	749
		L./600	506	614	734	803	844	890			
RRs125/6.3	S550J2H	L./400	464	567	631	676	701	731	402	536	670
		L./600	535	614	662	706	730	757			
RR140/8	S460MH	L./400	613	751	808	861	892	928	466	621	777
		L./600	711	791	848	900	930	962			
RRs140/8	S550J2H	L./400	613	751	915	991	1036	1088	557	743	929
		L./600	711	863	961	1038	1082	1131			
RR140/10	S460MH	L./400	675	827	999	1080	1128	1185	574	765	956
		L./600	787	956	1051	1133	1180	1232			
RRs140/10	S550J2H	L./400	675	827	1024	1228	1298	1380	686	915	1143
		L./600	787	956	1171	1289	1359	1438			
RR170/10	S460MH	L./400	929	1138	1274	1364	1417	1479	700	934	1167
		L./600	1079	1242	1339	1428	1478	1535			
RRs170/10	S550J2H	L./400	929	1138	1407	1564	1641	1730	837	1116	1396
		L./600	1079	1310	1509	1640	1715	1799			
RR170/12.5	S460MH	L./400	1016	1245	1542	1682	1762	1855	862	1149	1436
		L./600	1185	1441	1630	1765	1844	1932			
RR220/10	S460MH	L./400	1451	1663	1773	1876	1936	2005	925	1233	1542
		L./600	1623	1748	1858	1957	2012	2075			
RRs220/10	S550J2H	L./400	1451	1774	2024	2172	2259	2358	1106	1475	1843
		L./600	1675	1962	2123	2271	2353	2444			
RR220/12.5	S460MH	L./400	1594	1952	2187	2343	2434	2540	1142	1523	1904
		L./600	1850	2132	2299	2452	2539	2636			
RRs220/12.5	S550J2H	L./400	1594	1952	2414	2687	2819	2971	1366	1821	2277
		L./600	1850	2248	2590	2816	2946	3091			
RR270/10	S460MH	L./400	2050	2188	2312	2426	2492	2569	1163	1551	1939
		L./600	2156	2297	2417	2542	2583	2651			
RRs270/10	S550J2H	L./400	2055	2192	2313	2423	2487	2561	1391	1855	2319
		L./600	2160	2297	2415	2517	2575	2640			
RR270/12.5	S460MH	L./400	2308	2696	2881	3055	3156	3273	1441	1921	2401
		L./600	2626	2835	3022	3188	3282	3387			
RRs270/12.5	S550J2H	L./400	2308	2823	3282	3532	3678	3845	1722	2296	2871
		L./600	2667	3174	3444	3693	3834	3988			
RR320/10	S460MH	L./400	2221	2325	2416	2499	2548	2606	1389	1852	2314
		L./600	2328	2427	2511	2586	2629	2678			
RRs320/10	S550J2H	L./400	2508	2651	2775	2888	2954	3030	1660	2214	2767
		L./600	2632	2772	2889	2992	3050	3116			
RR320/12.5	S460MH	L./400	3069	3343	3546	3734	3843	3969	1722	2296	2870
		L./600	3281	3512	3712	3889	3989	4101			
RRs320/12.5	S550J2H	L./400	3069	3375	3579	3766	3875	3999	2059	2745	3432
		L./600	3310	3542	3742	3919	4017	4128			
RR320/12.5	S460MH	L./400	3177	3559	3786	3997	4120	4261	1722	2296	2870
		L./600	3483	3740	3966	4166	4279	4405			
RRs320/12.5	S550J2H	L./400	3177	3883	4331	4636	4813	5016	2059	2745	3432
		L./600	3663	4211	4542	4842	5010	5195			

Taulukoissa on esitetty paalujuen nurjahduskestävyyden arvot paalua ympäröivän maan aineksen suljetun leikkauslujuuden karakteristisen arvon perusteella sekä paalun kärjen geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvot paalutustyöluokan perusteella. Näistä mitoittavaksi valitaan jälleen pienempi arvo (SSAB 2018, 23).

Suojaamattoman teräspaalujuen korroosioksi sadan vuoden ajalle homogeenisissa luonnonmaaoolosuhteissa pohjavedenpinnan ylä- tai alapuolella otaksutaan vähintään 1,2 mm paalujuen ulkopinnasta. Tiivistetyissä kivennäismaatäytöissä pohjavedenpinnan ylä- tai alapuolella korroosiovarana pidetään 1,5 mm. Tiivistämättömissä kivennäismaatäytöissä pohjavedenpinnan ylä- tai alapuolella korroosiovarana pidetään 2,0 mm. Korroosio voidaan jättää huomioimatta alapäästään suljettujen tai täyteen betonoitujen paalujuen sisäpinnoilla. (SSAB 2018, 21). Tässä työssä ei oteta kantaa tiivistämättömien, ei-aggressiivisten kivennäismaatäytöiden paalujuen korroosiovaraan 100 vuoden käyttöiän paaluille, eikä tavanomaisista poikkeavien tai aggressiivisten maaperäolosuhteiden vaikutukseen käytettävään korroosiovaraan.

4.6 Rakennemallissa käytetty paalujousi

Paalua ympäröivän maa-aineksen paaluun kohdistama sivuttaistuenta vaikuttaa paalun puristuskestävyyden mitoitusarvon valintaan paalun geoteknisen sekä nurjahduskestävyyden välillä. Yleisesti ottaen sivuttaistuennaltaan riittämättömiksi on katsottu paalut, jotka ovat osittain tai kokonaan ilmassa, vedessä tai maa-aineskerroksessa ja joiden redusoitu siipikairauksella määritelty suljetun leikkauslujuuden karakteristinen arvo on pienempi kuin 20 kPa. Sivuttaistuenta ei lisäksi yleensä käytetä hyväksi tilanteessa, jossa paalua ympäröivän eloperäisen maa-aineskerroksen leikkauslujuus on pienempi kuin 5 kPa. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 106.)

Nykyisten teräsbetonipaalujen mitoitustaulukossa on paalun nurjahduskestävyyden mitoitusarvot laskettu jopa 3 kPa:n suljetun leikkauslujuuden karakteristiselle arvolle. Tilanetta voitaneen tulkita siten, että esitetyt arvot voivat tulla käytettäväksi paalutettavan maaperän ollessa muuta kuin eloperäistä. Eloperäisinä maalajikerrostumina pidetään turvekerrostumia, joita on syntynyt soistumisen tuloksena. Soistumiselle otolliset kosteusolosuhteet syntyvät paikoissa, joissa vesistöt pääsevät kasvamaan umpeen, sekä tulvamaiden, merenrantojen ja metsämaiden soistumisen seurauksena. (Rantamäki ym. 2006, 44.) Toisaalta asiaa voisi tulkita myös niin, että 3 kPa:n leikkauslujuuden maaperäalueilla ei paalujen voida olettaa ottavan vastaan minkään muun suuntaisia kuin aksiaalisesti paalua kuormittavia voimia. Tällöin paalulaataan ja paaluihin kohdistuvat vaakakuormat joudutaan ottamaan vastaan vinopaaluilla, joista osa voi olla puristettuja ja osa vedettyjä. Lisäksi paalujen oletetaan tarvitsevan tällaisessa tilanteessa jäykät liitoksen molempiin päihinsä. Huomioitavaa on, että tämän työn tuloksia ei voida millään tavalla soveltaa edellä kuvatuissa olosuhteissa, joissa paalua ympäröivän maa-aineksen suljettu leikkauslujuus on alle 5 kPa.

Paalulaatan rakenteen mitoituksessa käytetyssä rakennemallissa on sivuttaissiirtymien todenmukaisuuden varmistamiseksi käytetty paalujen sivuttaistuentana Paalutusohje 2016:ssa esitettyä vaativien rakennuskohteiden ja toisen geoteknisen luokan nurjahdusmitoitukseen sopivaa suljetun leikkauslujuuden perusteella koheesiomaalle määritettävää paalun jousivakiota. Huomioitavaa on, että jousivakiota on tässä yhteydessä käytetty ainoastaan todenmukaisen rakennemallin luomiseen FEM-laskentaohjelmassa tilanteessa, jossa paalulaatan päälle tulevan mursketäytön paksuus on vähintään 1,4 m. Vaativissa kohteissa ja GL2-luokassa voidaan koheesiomaan alustaluku määrittää

suljetun leikkauslujuuden avulla seuraavilla kaavoilla. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 99–100.)

$$k_s = 20 \dots 50 \cdot \frac{s_u}{d}$$

Kaava 8. Alustaluvun määrittäminen suljetun leikkauslujuuden perusteella pitkäaikaiselle kuormitusyhdistelmälle (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 100).

$$k_s = 50 \dots 150 \cdot \frac{s_u}{d},$$

joissa

k_s	alustaluku
s_u	maaperätutkimusten perusteella määritetty paalua ympäröivän maa-aineksen suljetun leikkauslujuuden arvo
d	paalun halkaisija

Kaava 9. Alustaluvun määrittäminen suljetun leikkauslujuuden perusteella lyhytaikaiselle kuormitusyhdistelmälle (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 100).

Tässä työssä on alustaluvun laskennassa käytetty vakiokerrointa 50 sekä lyhyt- että pitkäaikaisen kuormitusyhdistelmän mukaisten siirtymien laskennassa. Paalun jousivakion määrittämisessä alustaluvun avulla huomioidaan sekä paalun halkaisija että käytettävien jousien välinen etäisyys (Heikkilä ym 2017, liite 10/4.)

$$k_j = k_s \cdot d \cdot l,$$

missä

k_j	jousivakio
l	jousiväli

Kaava 10 Jousivakion määrittäminen alustaluvun avulla (Heikkilä 2017, liite 10/4).

4.7 Paalujen keskiötäisyydet

Lyöntipaaluja paalutettaessa paalujen oletetaan taipuvan paalukoneen järkäleen pudotuksen paalun yläpään kohdistavan kuorman sekä maaperän paalun alapään kohdistavasta vastuksen vaikutuksesta. Jatkettuja paaluja käytettäessä paalujen oletetaan taipuvan maaperässä sinikäyrän muotoon, jossa paalujen liitoskohdat otaksutaan käyrän nollakohdiksi (Suomen Rakennusinsinöörien liitto 2016, 107). Ohjeet poikkileikkaukseltaan neliön sekä pyöreän muotoisten tukipaalujen keskiötäisyyksien minimiarvot on esitetty Paalutusohje 2016:ssa. Ohjeessa poikkileikkaukseltaan neliön muotoisten paalujen keskiötäisyyden minimiarvoksi paalutussyvyyden ollessa alle 10 m on annettu $3d$ ja paalutussyvyyden ollessa yli 25 m on annettu $4d$. Poikkileikkaukseltaan pyöreän mallisten tuki- ja kitkapaalujen keskiötäisyyksien minimiarvoiksi paalutussyvyyden ollessa alle 10 m on annettu $2,7d$ ja paalutussyvyyden ollessa yli 25 m on annettu $3,5d$. Keskiötäisyyden minimiarvot 10 ja 25 metrin paalutussyvyyksien väliltä interpoloidaan lineaarisesti. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179.) Laskentakaava väliarvojen interpoloimiseen sekä luetteloidut paalujen keskiötäisyyksien minimiarvoista löytyvät liitteestä 1. Laskentatapa paalujen keskiötäisyyden minimiarvojen laskemiseksi on esitetty seuraavassa:

$$\boxplus_{min} = 3d + \left(\frac{h - 10m}{25m - 10m} \right) \cdot (4d - 3d)$$

Kaava 11. Poikkileikkaukseltaan neliön muotoisen paalun keskiötäisyyden minimiarvon laskenta (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179).

$$\oplus_{min} = 3d + \left(\frac{h-10m}{25m-10m} \right) \cdot (4d - 3d),$$

joissa

h paalutussyvyys

d paalun halkaisija

Kaava 12. Poikkileikkaukseltaan pyöreän muotoisen paalun keskiötäisyyden minimiarvon laskenta (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179).

Pienpaalujen suurin sallittu sijaintipoikkeama yksittäiselle paalulle on ± 100 mm (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 183). Poikkeamien suurimpia sallittuja ääriarvoja

on kuitenkin rajoitettu siten, että kahden vierekkäisen paalun keskinäinen etäisyys ei saa kasvaa 150 mm suuremmaksi. Paalulaatta suunnitellaan kestämään annettujen toleranssien sisällä säilyvien paalupoikkeamien vaikutuksen laatan rakenteen rasituksille. (Patjas ym 2014, 44).

5 PAALULAATAN RAKENTEELLINEN MITOITUS

5.1 Mitoituksessa käytettävät materiaaliarvot

Esitetään betonirakenteiden rakennelaskelmissa käytettävien materiaaliominaisuuksien mitoitusarvot (Nykyri 2013, 35–37.)

Rakennelaskelmissa käytettävät betonin puristuslujuuden arvot:

$$f_{ck} = \text{betonin lieriölujuus}$$

$$f_{ck,cube} = \text{betonin kuutiolujuus}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}, \text{ betonin puristuslujuuden keskiarvo}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \text{ betonin puristuslujuuden mitoitusarvo,}$$

missä

α_{cc} betonin puristuslujuuskerroin Suomessa 0,85

γ_c betonin materiaalin osavarmuuskerroin, 1,5. Voidaan kuitenkin käyttää lukua 1,35 kun toteutusluokka on 3 ja toleranssiluokka on 2.

Kaava 13. Betonin puristuslujuuden laskenta (Nykyri 2013, 35–36).

Rakennelaskelmissa käytettävät betonin vetolujuuden arvot:

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,30 \text{ MPa} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{2/3}, & \text{kun } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2,13 \text{ MPa} \cdot \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right), & \text{kun } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \end{cases}, \text{ betonin vetolujuus}$$

$$f_{ctk,0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm}, \text{ betonin vetolujuuden 5\%:n fraktiili}$$

$$f_{ctk,0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm}, \text{ betonin vetolujuuden 95\%:n fraktiili}$$

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c}, \text{ betonin vetolujuuden mitoitusarvo,}$$

missä

α_{ct} betonin vetolujuuskerroin, Suomessa 1,00

γ_c betonin vetolujuuden materiaaliosavarmuusluku, Suomessa 1,00.

Kaava 14. Betonin vetolujuuden laskenta (Nykyri 2013, 36–37).

Rakennelaskelmissa käytettävä betonin kimmokerroin:

Betonin muodonmuutokset ovat lyhytaikaisessa kuormituksessa palautuvia ja kimmoisia jännitystasolle $0,3\text{--}0,4 f_c$ saakka. Kyseisellä jännitystasolla jännityksen ja muodonmuutoksen suhdetta kuvataan kimkokertoimella E . Seuraavassa esitettävien kimmokerrointen käyttö soveltuu käyttörajatarkasteluihin, joissa rakenteen jännitystasot jäävät alhaisiksi. (Nykyri 2013, 42–43).

$$E_{cm} = 22 \text{ GPa} \left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0,3}, \text{ betonin kimmokertoimen suunnitteluarvo}$$

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}, \text{ betonin tangenttikimmokerroin,}$$

joka kuvaa betonin jännitysvenymäriippuvuuden kulmakerrointa ko. kovaajan origossa.

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}, \text{ nurjahdusmitoituksessa käytettävä betonin kimmokerroin,}$$

missä

γ_{CE} on betonin kimmokertoimen osavarmuusluku 1,2

Kaava 15. Betonin kimmokertoimen laskenta (Nykyri 2013, 42–43).

Rakennelaskelmissa käytettävät harjaterästankojen materiaaliarvot (Nykyri P 2013, 50.)

$$E_s = 200 \text{ GPa}, \text{ betoniterästen kimmokerroin}$$

$$f_{yk} = \text{betoniterästen myötölujuuden ominaisarvo}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \text{ betoniterästen myötölujuuden mitoitusarvo,}$$

missä

γ_s betoniterästen materiaaliosavarmuusluku 1,15. Voidaan kuitenkin käyttää lukua 1,10 kun toteutusluokka on 3 ja toleranssiluokka on 2.

Kaava 16. Betonirakenteessa käytettävien harjaterästen myötölujuuden mitoitusarvon laskenta (Nykyri P 2013, 50).

5.2 Virumaluvun laskenta

Virumamuodonmuutos tapahtuu kuormitetussa betonissa ajan kuluessa ja ilmentyen vähitellen lisääntyvänä taipumana. Kymmenessä vuodessa taipumat voivat kasvaa 2–3-kertaisiksi välittömään muodonmuutokseen verrattuna. Rakenneosien mitoituksessa viruma määritellään virumaluvun φ avulla. Virumamuodonmuutoksen selvittämiseksi kerrotaan betonin välitön kimmainen muodonmuutos ε_c virumaluvulla. (Nykyri 2013, 43–44.) Tässä työssä virumaluvun ja siten virumamuodonmuutoksen selvittämisessä on käytetty seuraavassa esitettävää Eurokoodi 2:n ohjeellista virumaluvun laskentamallia. Huomioitavaa on, ettei sementtilaadun vaikutusta huomioida näissä laskelmissa.

Lähtötiedoiksi asetetaan ulkotiloille käytettävä ympäristön suhteellinen kosteus prosentteina (Laaksonen 2017, Liite1/3(5)).

$$RH = 80\%$$

Rakennelaskelmissa tarkasteltavan poikkileikkauksen mitat:

$$b_w = \textit{tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys}$$

$$h = \textit{poikkileikkauksen korkeus}$$

$$A_c = \textit{poikkileikkauksen pinta - ala}$$

$$u = 2 \cdot b_w$$

Kaava 17. Haihtumiselle alttiin piirin mitta paalulaatassa (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{h}$$

Kaava 18. Poikkileikkauksen muunnettu paksuus virumalukua laskettaessa (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

$$\alpha_1 = \left(\frac{35\text{MPa}}{f_{cm}}\right)^{-0,7}, \alpha_2 = \left(\frac{35\text{MPa}}{f_{cm}}\right)^{-0,2}, \alpha_3 = \left(\frac{35\text{MPa}}{f_{cm}}\right)^{-0,5}$$

Kaava 19. Kertoimet, joilla huomioidaan betonin lujuuden vaikutus virumalukua laskettaessa (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

$$\beta_H = \begin{cases} 1,5 \cdot (1 + (0,012 \cdot RH)^{18}) \cdot h_0 + 250 \leq 1500, & \text{kun } f_{cm} \leq 35 \\ 1,5 \cdot (1 + (0,012 \cdot RH)^{18}) \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3, & \text{kun } f_{cm} \geq 35 \end{cases}$$

Kaava 20. Likimääräinen suhteellisesta kosteudesta ja muunnetusta paksuudesta riippuva kerroin (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

Määritetään betonipoikkileikkauksen iät vuorokausina tarkasteltavina ajankohtina.

$$t_0 = \text{betonin ikä kuormituksen alkaessa}$$

$$t = \text{betonin ikä tarkasteluajankohtana}$$

$$\beta_{c(t,t_0)} = \left(\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)}\right)^{0,3}$$

Kaava 21. Likiarvo kertoimelle, joka kuvaa virumisen kehittymistä ajan myötä kuormittumisen alkamisen jälkeen (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

$$\beta_{(t_0)} = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,02})}$$

Kaava 22. Kerroin, jolla huomioidaan betonin kuormittumisen alkamisajan vaikutus nimelliseen virumalukuun (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

$$\beta_{(f_{cm})} = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

Kaava 23. Kerroin, jolla huomioidaan betonin lujuuden vaikutus nimelliseen virumalukuun (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

$$\varphi_{RH} = \begin{cases} 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}}, & \text{kun } f_{cm} \leq 35\text{MPa} \\ 1 + \left(\frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1\right) \cdot \alpha_2, & \text{kun } f_{cm} \geq 35\text{MPa} \end{cases}$$

Kaava 24. Kerroin, jolla huomioidaan suhteellisen kosteuden vaikutus nimelliseen virumalukuun (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta_{(f_{cm})} \cdot \beta_{(t_0)}$$

Kaava 25 Nimellisen virumaluvun likiarvo (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

Lopulta päästään laskemaan itse virumaluku:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_{(f_{cm})} \cdot \beta_{(t_0)}$$

Kaava 26. Virumaluvun laskenta Eurokoodi 2:en mukaan sementin laatua huomioimatta (Suomen standardoimisliitto SFS 2015, 197–198).

Lasketaan vielä betonin tehollinen kimmokerroin viruman aiheuttamien muodonmuutosten huomioimiseksi (Nykyri 2013, 45):

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)}$$

Kaava 27. Tehollisen betonin kimmokertoimen laskenta virumaluvun avulla (Nykyri 2013, 45).

5.3 Taivutus

Lasketaan ensin betonipoikkileikkauksen puristusvyöhykkeen määrittelyyn käytetyt parametrit (Nykyri 2013, 93):

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 \text{ kun } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}, \text{ kun } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\eta = \begin{cases} 1,0 \text{ kun } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}, \\ 1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200}, \text{ kun } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases}$$

Kaava 28. Teräsbetonirakenteen poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen määrittämiseen tarvittavat parametrit (Nykyri 2013, 93).

Määritellään laskelmissa käytettävät betonipeitteet (Laaksonen 2017, 32):

$c_{min,dur}$ ympäristöolosuhteiden ja käyttöiän vaatima vähimmäisarvo

c_{dev} betonipeitteen sallittu mittapoikkeama. Paalulaatoille ja paaluhatturakenteille 10 mm muottia vasten valetut pinnat ja laatan yläpinta ja 25 mm maata tai kalliota vasten betonoitava pinta.

$c_{nom} = c_{min,dur} + c_{dev}$ betonipeitteen nimellisarvo

Kaava 29 Betonipeitteen nimellisarvo

c_{true} kuvaa lähinnä betonipintaa olevan halkeilua rajoittavan jännittämättömän raudoituksen todellinen betonipeite.

$c_w = \min \begin{cases} c_{true} \\ 1,4 \cdot c_{min,dur} \\ 50 \text{ mm} \end{cases}$ halkeamaleveyslaskennassa käytettävä betonipeite

Kaava 30. Halkeamaleveyden laskennassa käytettävän betonipeitteen arvo (Laaksonen 2017, 32).

Betonin poikkileikkaussuureet on esitetty virumaluvun laskennan yhteydessä.

$b_w = \text{tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys}$

$h = \text{poikkileikkauksen korkeus}$

$A_c = \text{poikkileikkauksen pinta - ala}$

Lasketaan poikkileikkauksen tehollinen korkeus (Nykyri P 2014, 51.)

$$d = h - c_{true} - \frac{1,1 \cdot \phi}{2}$$

Kaava 31 Teräsbetonirakenteen poikkileikkauksen tehollinen korkeus

Lasketaan teräsbetonilaatan mitoitusvoimasuureet valitulle poikkileikkaukselle (Nykyri 2014, 51–52, 80):

$$A_{s,min} = \max \begin{cases} 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d \\ 0,0013 \cdot d \end{cases}, \text{poikkileikkauksen minimiraudoitusmäärä} \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

Kaava 32. Rakenteessa käytettävä vähimmäisraudoitus (Nykyri 2014, 80).

$$A_{s,toteutunut} = n \cdot \frac{\pi \cdot \phi^2}{4}, \text{ poikkileikkauksessa käytettävä teräsmäärä } [mm^2/m],$$

missä

n on tarkasteltavassa poikkileikkauksessa käytettävien terästen lukumäärä

ϕ on tarkasteltavassa poikkileikkauksessa käytettävien terästen halkaisija.

Kaava 33. Rakenteessa käytettäväksi valittu teräsmäärä.

Analysoidaan poikkileikkauksen taivutuskestävyys valitulla teräsmäärällä:

$$\omega = \frac{A_{s,tot}}{d} \cdot \frac{f_{yd}}{\eta \cdot f_{cd}}$$

Kaava 34. Tarkasteltavan poikkileikkauksen mekaaninen raudoitussuhde valitulla teräsmäärällä (Nykyri 2014, 54).

$$\beta = \omega$$

Kaava 35. Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus valitulla teräsmäärällä (Nykyri 2014, 54).

$$\mu = \beta \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)$$

Kaava 36. Tarkasteltavan poikkileikkauksen suhteellinen momentti valitulla teräsmäärällä (Nykyri 2014, 54).

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

Kaava 37. Tarkasteltavan poikkileikkauksen momenttikestävyys valitulla teräsmäärällä (Nykyri 2014, 54).

$$KA = \frac{M_{ed}}{M_{rd}}$$

Kaava 38. Taivutuskestävyyden käyttöaste valitulla teräsmäärällä (Nykyri 2014, 55).

Teräsbetonirakenteen mitoittamisessa pyritään saavuttamaan raudoituksen ja rakenteen poikkileikkauksen suhteen tasapainoraudoitettu tila. Tasapainoraudoitettussa rakenteessa alapinnan terästen on päästävä myötäämään ennen rakenteen murtumista.

Rakenteen puristusvyöhykkeen korkeus suunnitellaan betonin lujuusluokkaan nähden riittävän korkeaksi, jotta rakenteessa ei pääse tapahtumaan puristurmumaa ennen alapinnan rakenneterästen myötäämistä. Tasapainoraidoitettujen tilan saavuttamisen varmistamiseksi on rakenteessa käytettävälle teräsmäärälle asetettu minimiarvot, joita suunnittelussa ei saa alittaa. Lisäksi rakennelaskelmissa määritettäville puristusvyöhykkeen suhteelliselle korkeudelle ja poikkileikkauksen suhteelliselle momentille on asetettu käytettävän raudoituksen myötölujuuden sekä valikoidun teräksen osavarmuusluvun mukaan vaihtelevat maksimiarvot. Taulukossa 11 esitetään betonirakenteiden suunnittelun oppikirjassa esitetyt tasapainoraidoituksen edellyttämät suhteellisen momentin sekä puristusvyöhykkeen suhteellisen korkeuden raja-arvot. Haluttaessa mitoittaa rakenne siten, että ennen murtumista rakenteeseen pääsee muodostumaan selvästi havaittavissa oleva plastinen muodonmuutos, rajoitetaan puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus β_{bd} 70 % tasolle raja-arvosta. (Nykyri 2013, 97.)

Taulukko 13. Tasapainoraidoituksen edellyttämät suhteellisen momentin sekä puristusvyöhykkeen suhteellisen korkeuden raja-arvot (Nykyri 2013, 97).

Osavarmuus	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$		$f_{yk} = 600 \text{ MPa}$		$f_{yk} = 700 \text{ MPa}$	
	β_{bd}	μ_{bd}	β_{bd}	μ_{bd}	β_{bd}	μ_{bd}
$\gamma_s = 1,15$	0,493	0,372	0,458	0,353	0,428	0,336
$\gamma_s = 1,10$	0,485	0,367	0,450	0,349	0,419	0,331

5.4 Lävistys

Lävistysmurtumassa syntyy pistemäisen kuorman aiheuttama paikallinen murtuma kuormitetun kohdan ympäristössä. Lävistyessään murtuu laatta kartiomaisesti menettäen kantavuutensa. Pilarilaatoilla murtuminen etenee tyypillisesti ensimmäiseksi pilarin juureen syntyvistä taivutushalkeamista. Taivutushalkeamia syntyy etäämmälle pilarin reunasta pistekuorman vastakkaisella puolella olevan pinnan raudoituksen vaikutuksesta. Halkeamat kaareutuvat kohti pilaria ja pilarin ja laatan alapintaan syntyvää puristusvyöhykettä. Taivutusraudituksen vetäessä laatan pintaan lisää laatussa lävistyskartiksi yhtyviä halkeamia. Lävistyskuorma riippuu tässä mekanismissa pilarin poikkileikkauksmittojen ja laatan paksuuden suhteesta sekä taivutusraudituksen määrästä. (Nykyri 2014, 64.) Lävistysvoimaa laskettaessa ei tarvitse huomioida lävistyskartion rajoittamalle alueelle kohdistuvaa kuormitusta (Patjas ym 2014, 38).

Seuraavassa esitetään Liikenneviraston Eurokodin soveltamisohjeen, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2:n mukainen laattarakenteen lävistystarkastelu (Laaksonen 2017, 61–62).

Betonin lujuudelle käytetään lävistysmitoituksessa enintään lujuusluokkaa C50/60.

Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyyden laskentatapa:

$$V_c = k \cdot \beta \cdot (1 + 50) \cdot u \cdot d \cdot f_{cd},$$

missä

$$k = \begin{cases} 1,6 - d \geq 1,0, \text{ kun } \rho_c \geq 2400 \text{ kg/m}^2 \\ 0,8, & \text{ kun } \rho_c \leq 2400 \text{ kg/m}^2 \end{cases},$$

ρ_c betonin tiheys

$$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5e}{A_u}}$$

$$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,008$$

$$\rho_x = \min \left\{ \frac{A_{sl,x}}{d}, 0,02 \right\} \quad \text{tehollinen vetoraidoitussuhde tarkasteltavaan suuntaan x}$$

$$\rho_y = \min \left\{ \frac{A_{sl,y}}{d}, 0,02 \right\} \quad \text{tehollinen vetoraidoitussuhde tarkasteltavaan suuntaan y}$$

$A_{sl,i}$ lävistyspiirin sivuun nähden kohtisuorassa suunnassa oleva vedetyn pinnan teräs

e on lävistysvoiman epäkeskeisyys leikkautuvan alueen painopisteestä

A_u on tuen reunasta etäisyydellä $0,5d$ olevan leikkauksen rajoittama pinta-ala

u on pienempi seuraavista:

- i. Tuen reunasta etäisyydellä $0,5d$ oleva piiri
- ii. Piiri, joka saadaan korvaamalla i)-kohdan mukaisen piirin vapaan reunan puoleiset osat tältä piiriltä vapaille reunoille piirretyillä normaaleilla.

Kaava 39. Leikkausraudoittamattoman teräsbetoni­laatan lävistyskestävyyden laskenta (Laaksonen 2017, 61–62).

Huomioitavaa on, että mikäli laatussa on reikiä tuen reunasta etäisyydellä 5d, ei piiriin u lasketa niitä osia, jotka jäävät reikien reunoista tuen keskipisteeseen piirrettyjen suorien väliin.

$$KA_{\text{lävistys}} = \frac{V_{ed}}{V_c}$$

Kaava 40. Laatan lävistyskestävyyden käyttöasteen laskeminen lävistysraudoittamattomasta rakenteesta (Laaksonen 2017, 61–62).

Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys lasketaan kaavalla:

$$V_u = 0,25 \cdot V_c + V_s \leq 2 \cdot V_c,$$

missä

$V_s = A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha$ lävistysterästen määrän huomioiva luku­arvo

f_{yd} on korkeintaan 300 MPa

α on raudoituksen ja laatan tason välinen kulma, vähintään 30

Huomioitavaa on, että leikkausraudoitukseen A_{sw} saa laskea raudoituksen alueelle tuen reunasta etäisyydelle 1,5d tuen reunasta.

Kaava 41. Leikkausraudoitetun teräsbetoni­laatan lävistyskestävyyden laskenta (Laaksonen 2017, 62).

5.5 Halkeamaleveyden laskenta

Käyttörajalana paalulaatoille tarkastetaan laatan halkeamaleveys tai sitä pikemminkin rajoitetaan. Liikenneviraston Eurokoodin soveltamisohjeessa, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2:ssa on paalulaattojen halkeamaleveyden raja-arvoiksi 100 vuoden käyttö­il­le annettu tavallisella kuormitusyhdistelyllä 0,2 mm ja pitkäaikaisella kuormitusyhdistelyllä 0,15 mm. Teräsbetonirakenteen mekaaninen käyttäytyminen eroaa käyttörajalassa murtorajatilasta, jossa raudoituksen jännitystilä jää selvästi myötölujuutta alhaisemmaksi pysyen lineaarisesti kimmoisella alueella. Myös betonin käyttäytyminen eroaa

käyttörajatilassa murtorajatilasta. Betonissa käyttäytymiseen vaikuttaa kuormitusaika ja siten myös viruma tulee ottaa huomioon muodonmuutoksia lisäävänä tekijänä. (Nykryri 2013, 203.)

Esitetään Liikenneviraston Eurokoodin soveltamisohjeen, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2:n mukainen halkeamaleveystarkastelu sekä tavalliselle että pitkäaikaiselle kuormitusyhdistelmälle.

Ensin esitetään molemmissa laskelmissa käytettäviä lähtöolettamia (Laaksonen 2017, 69):

c_w halkeamalaskennassa käytettävä betonipeite

$$\phi_{eq} = \frac{\sum n_i \phi_i^2}{n_i \phi_i},$$

missä

n käytettävien harjatankojen määrä tarkasteltavassa poikkileikkauksessa

ϕ_i käytettävien harjatankojen halkaisija

Kaava 42. Halkeamalaskennassa käytettävien harjaterästankojen ekvivalentin halkaisijan laskenta (Laaksonen 2017, 69).

k_1 lähinnä betonipintaa olevien tankojen pinnan huomioon ottava kerroin, joka on 0,8 tangoille, joilla on hyvä tartunta ja 1,6 sileäpintaisille tangoille

k_2 venymäjakauman huomioiva kerroin, joka on 0,5 taivutukselle ja 1,0 pelkälle vedolle

A_s halkeilua rajoittavan jännittämättömän raudoituksen määrä $[mm^2/m]$

A_p jänneraudoituksen pinta-ala $A_{c,eff}$ sisällä

$A_{c,eff}$ betoniteräksiä tai jänneteräksiä ympäröivän, vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen pinta-ala, kun alueen korkeus on $h_{c,eff}$

$$h_{c,eff} = \min \begin{cases} 2,5 \cdot (h - d) \\ \frac{h-x}{3} \\ \frac{h}{2} \end{cases}$$

Kaava 43. Rakenneteräksiä ympäröivän vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen korkeus (Laaksonen 2017, 69).

$$A_{c,eff} = b_w \cdot h_{c,eff}$$

Kaava 44. Rakenneteräksiä ympäröivän vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen pinta-ala (Laaksonen 2017, 69).

k_t Kuorman vaikutuksesta riippuva kerroin, joka on 0,6 lyhytaikaiselle kuormitusyhdistelmälle ja 0,4 pitkäaikaiselle kuormitusyhdistelmälle

Huomioitavaa on, että vaikka kertoimessa k_t on jo huomioitu betonin pitkäaikaisvaikutukset. Betonin viruma huomioidaan kimmokerrointa määritettäessä kuitenkin poikkileikkauksen tasapainon laskennassa (Laaksonen 2017, 70).

ξ Parametri, joka kuvaa tartuntajänteiden tartuntalujuuden ja betoniterästen tartuntalujuuden suhdetta, joka on 0,8 käytettäessä tartuntajänteitä, 0,7 käytettäessä injektoituja ankkurijänteitä, kun betonin lujuusluokka $\leq C50/60$ ja 0,35 käytettäessä injektoituja ankkurijänteitä, kun betonin lujuusluokka $\geq C70/85$. (Laaksonen 2017, 69.) Kahden edellisen sarakkeen väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti. Lisäksi liikenneviraston ohjeissa termille suosotellaan käytettävän arvoa 0. (Laaksonen 2017, 69–70.)

Esitetään halkeamaleveydestä tarkastelun laskenta lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä

$$X_L = d \cdot \frac{A_s}{b_w \cdot d} \cdot \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\frac{A_s}{b_w \cdot d} \cdot \frac{E_s}{E_{cm}}}} \right)$$

Kaava. 45 Poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus haljenneessa tilassa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Nykyri 2013, 235).

$$z_L = d - \frac{X_L}{3}$$

Kaava 46. Poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi haljenneessa tilassa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Nykyri 2013, 235).

$$h_{c,eff,L} = \min \begin{cases} 2,5 \cdot (h - d) \\ \frac{h - X_L}{3} \\ \frac{h}{2} \end{cases}$$

Kaava 47. Vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen korkeus haljenneessa poikkileikkauksessa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$A_{c,eff,L} = b_w \cdot h_{c,eff,L}$$

Kaava 48. Vetojännityksen alaisen betonialueen pinta-ala haljenneessa tilassa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$\rho_{p,eff,L} = \frac{A_s + \sqrt{\xi \cdot \frac{\phi_{eq}}{\phi_p}} \cdot A_p}{A_{c,eff,L}}$$

Kaava 49. Efektiivinen raudoitussuhde lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$\delta_{s,L} = \frac{M_{ek,L}}{A_s \cdot z_L}$$

Kaava 50. Vedettyjen betoniterästen jännitys haljenneessa tilassa lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Nykyri 2013, 206).

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\delta_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,eff,L}} \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \rho_{p,eff,L}\right)}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

Kaava 51. Betoniterästen ja betonin venymien erotus lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70.)

$$s_{r,max,L} = 3,4 + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot 0,425 \cdot \phi_{eq}}{\rho_{p,eff,L}}$$

Kaava 52. Suurin mahdollinen halkeamaväli lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$w_{k,L} = s_{r,max,L} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}),$$

missä

$w_{max,L}$ halkeamaleveyden raja-arvo lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä

Kaava 53. Halkeamaleveyden laskenta lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$KA_{halkeama} = \frac{w_{k,L}}{w_{max,L}}$$

Kaava 54. Halkeamaleveyslaskennan käyttöaste lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

Esitetään halkeamaleveystarkastelun laskenta pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä

$$X_p = d \cdot \frac{A_s}{b_w \cdot d} \cdot \frac{E_s}{E_{c,eff}} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\frac{A_s}{b_w \cdot d} \frac{E_s}{E_{c,eff}}}} \right)$$

Kaava 55. Poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Nykyri 2013, 235).

$$z_p = d - \frac{X_p}{3}$$

Kaava 56. Poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Nykyri 2013, 235).

$$h_{c,eff,P} = \min \begin{cases} 2,5 \cdot (h - d) \\ \frac{h - X_p}{3} \\ \frac{h}{2} \end{cases}$$

Kaava 57. Vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen korkeus haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$A_{c,eff,P} = b_w \cdot h_{c,eff,P}$$

Kaava 58. Vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen pinta-ala haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$\rho_{p,eff,P} = \frac{A_s + \sqrt{\xi \cdot \frac{\phi_{eq}}{\phi_p} \cdot A_p}}{A_{c,eff,P}}$$

Kaava 59. Efektiivinen raudoitussuhde pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$\delta_{s,P} = \frac{M_{ek,P}}{A_s \cdot z_P}$$

Kaava 60. Betoniterästen jännitys haljenneessa tilassa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Nykyri 2013, 206).

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\delta_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,eff,P}} \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \rho_{p,eff,P}\right)}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

Kaava 61. Betoniterästen ja betonin venymien erotus pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$s_{r,max,P} = 3,4 + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot 0,425 \cdot \phi_{eq}}{\rho_{p,eff,P}}$$

Kaava 62. Suurin mahdollinen halkeamaväli pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$w_{k,P} = s_{r,max,P} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}),$$

missä

$w_{max,P}$ halkeamaleveyden raja-arvo pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä

Kaava 63. Halkeamaleveyden laskenta pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

$$KA_{halkeama} = \frac{w_{k,P}}{w_{max,P}}$$

Kaava 64. Halkeamaleveyslaskennan käyttöaste pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä (Laaksonen 2017, 69–70).

6 RAKENNELASKELMIEN YHTEENVETO SEKÄ TULOKSENA SYNTYNEET TYYPPIPIIRUSTUKSET

Jokaisesta työssä käsitellystä paalulaatasta luotiin oma rakennemalli Lusas Bridge FEM-laskentaohjelmalla. Paalulaatat on luotu rakennemalleihin mitoiltaan myöhemmin esitettyjen suunnitelmien mukaisiksi. Laatan toiseen päähän on mallinnettu kuormat 3 metriä pitkistä siirtymälaatasta. Toinen pää on jätetty mallinnuksessa taas ilman siirtymälaatan kuormia. Huomioitavaa on, että jouduttaessa käyttämään 5 metriä pitkiä siirtymälaattoja joudutaan laatan konsolin alapuoleisten paalujen tukireaktiot sekä laatan taivutusmomentit tarkastamaan uudelleen.

Kuormitus on lisätty laatalle kappaleessa 3 esitetyllä tavalla rakenteen omanpainon, pengerkuorman, sekä LM1-liikennekuorman kuormittaessa paalulaattaa tasaisesti jakautuneena kuormana. Jarru- ja kiihdytyskuormat on lisätty rakennemalliin laatan pituussuunnaltaisesti vaikuttavina viivakuormina aina yhdelle paalulaatan paalukaistalle kerrallaan. Vinnosta jarrutuksesta aiheutuvat kuormat on lisätty vaikuttamaan rakennemallissa aina yhden laatan reunimmaisen paalun kohdalle kerrallaan.

Yhdistelykertoimina on käytetty taulukossa 14 esitettyjä Liikenneviraston paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaisia kertoimia (Liikennevirasto 2017, 36–37.)

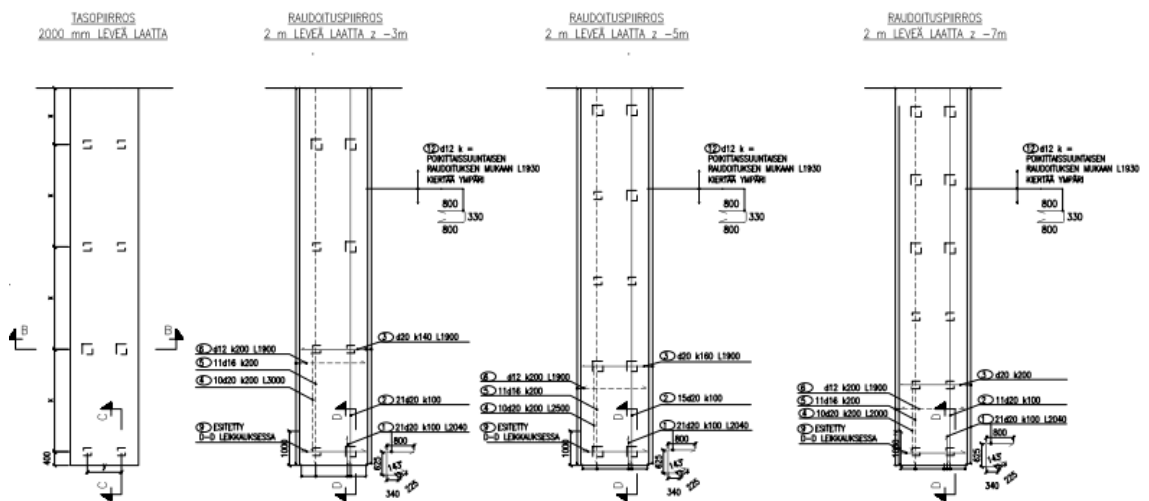
Taulukko 14 Rakennelaskelmissa käytetyt kuormien yhdistelykertoimet (Patjas ym 2017, 36–37).

Kuormien yhdistelykertoimen							
Kuorma	MRT 0	MRT 1	MRT 3 LM1+vaaka	MRT11	KRT 1b	KRT 11b	KRT 1c
g	1,35	1,25	1,25	1,25	1	1	1
q	-	1,35	,35	1,5x0,75	0,68	0,68	-
q TLEP	-	1,35x0,75	1,35x0,75	1,35	-	0,75	-

Paalulaatan rakennelaskelmat on laadittu kappaleessa 4 esitetyllä tavalla laatan taivutus- ja lävistyskestävyydelle sekä halkeamaleveystarkastelulle. Lävistystarkastelussa paalun poikkileikkauksena on laskelmissa käytetty 250 mm x 250 mm. Kun lävistyksen

käyttöasteet ilman lävistyskuorman redusointia ylittävät laskelmissa 90 % tulee paalun poikkileikkaukseksi tai paaluhatun pinta-alaksi valita 300 mm x 300 mm. Lisäksi laatan siirtymät on rakennemallissa tarkastettu. Liitteessä 2 on esitetty esimerkkinä kuvaajat ja laskelmat seitsemän metriä korkean penkereen alle rakennettavasta neljä metriä leveästä paalulaatasta. Liitteessä esitetään lisäksi luettelo edellä esitetyllä periaatteella saaduista tarkastelun kohteena olleiden paalulaattojen mitoitusvoimasuureista.

Siirtymien hallitsemiseksi on rakennemallissa käytetty kappaleessa 4.6 kuvatun laskennan mukaisia koheesiomaan jousivakioita. Laskelmissa käytetyn alustaluvun arvo on laskettu seuraavassa esitetyllä tavalla, $k_s = 50 \cdot \frac{5 \text{ kPa}}{0,30 \text{ m}} = 833,3 \text{ kN/m}^3$. Rakennemallissa käytetyn 0,25 m elementtijaon johdosta on jousivakion arvoksi laskettu seuraavassa esitettävä arvo, $k_j = 833,3 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m} = 62,5 \text{ kN/m}$. (Heikkilä ym 2017, LIITE10/2 (27).)

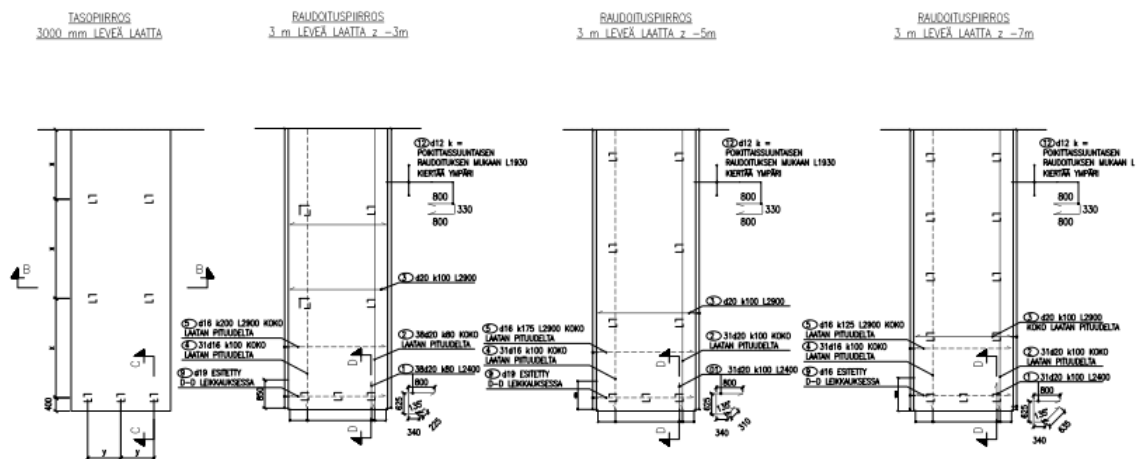


Kuva 4. Mitta- ja raudoituspiirustukset 2 metriä leveistä laatoista.

2000 MM LAATTA, Z -3000 MM, C35/45, h = 400 MM, PALUUSYVYYS = -20 M												
Teräs- litrat	PalkuØ		Terästen dimensiot									
	x	y	d	k	a	b	c	d	L			
1	3000	1000										
2			20	100	800	625	340	225	3190			
3			20	100					*			
4			20	200					1900			
5			20	200					3000 **			
6			20	2000					*			
9			12	200					1900			
10			16	ESITETTY D-D LEIKKAUKSESSA						1900		
11			12	100	600	225	610	860	2295			
12			25	500					500			
12			12	800	330	800			1930			

* Teräs sijoitus koko laatan pituussuunnan mitalle.
 Jätköpannat:
 Ø12 630 mm
 Ø16 820 mm
 Ø20 1200 mm
 Ø25 1600 mm
 ** Raudotte sijaitsee vain laatan pituussuunnassa

Taulukko. 15 Rakenteessa vaadittavat teräsmäärät 2 metriä leveissä laatoissa.

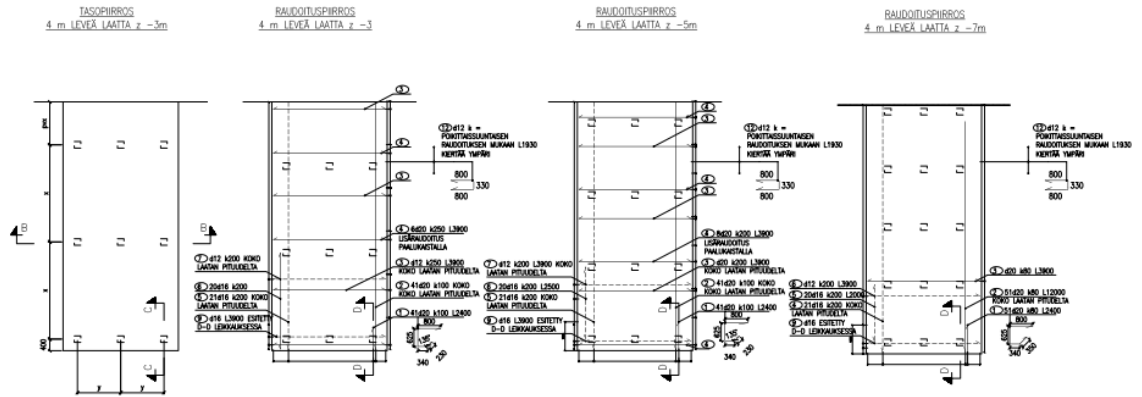


Kuva 5. Mitta- ja raudotuspierustukset 3 metriä leveistä laatoista.

3000 MM LAATTA, Z -3000 MM, C35/45, h = 400 MM, PALUUSYVYYS = -20 M												
Teräs- litrat	PalkuØ		Terästen dimensiot									
	x	y-korkeus	y-laatta	d	k	a	b	c	d	L		
1	2800	1000	1850									
2				20	80	800	625	340	225	2400		
3				20	80				*			
4				20	100				2900			
5				16	100				*			
6				16	200				2900			
9				16	ESITETTY D-D LEIKKAUKSESSA						2900	
10				12	100	600	225	610	860	2295		
11				25	500				500			
12				12	800	330	800		1930			

* Teräs sijoitus koko laatan pituussuunnan mitalle.
 Jätköpannat:
 Ø12 630 mm
 Ø16 820 mm
 Ø20 1200 mm
 Ø25 1600 mm

Taulukko 16. Rakenteessa vaadittavat teräsmäärät 3 metriä leveissä laatoissa.



Kuva 6. Mitta- ja raudituspiirustukset 4 metriä leveistä laatoista.

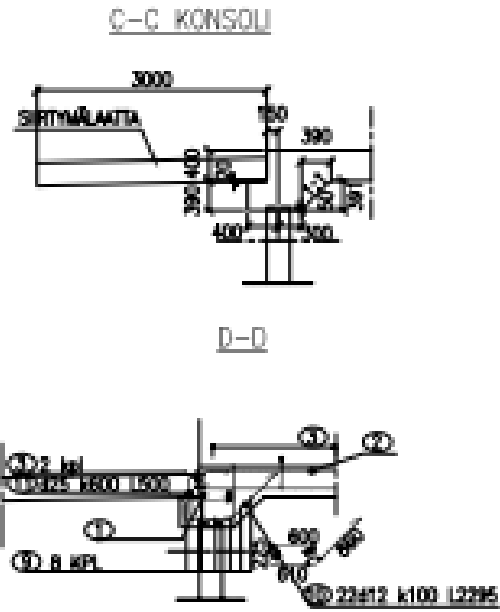
4000 MM LAATTA, Z -3000 MM, C35/45, h = 400 MM, PALAUTUSPIIRUSTUS -30 M														
Teräs litery	Pituudet			Terästen dimensiot										
	x	y	korkeus	y	Laatta	d	k	a	b	c	d	L		
1	3000	1250	1250	20	100	800	625	340	230	2400				
2				20	100				*					
3				20	250					3800				
4				20	250					3800				
5				16	200					*				
6				16	200					3000	*			
7				12	200					*				
9				16	ESTETTY 0-0 LEIKKAUKSESSA									
10				12	100	600	225	610	860	2295				
11				25	600					500				
12				12	800	330	800			1930				

4000 MM LAATTA, Z -5000 MM, C35/45, h = 400 MM, PALAUTUSPIIRUSTUS -30 M														
Teräs litery	Pituudet			Terästen dimensiot										
	x	y	korkeus	y	Laatta	d	k	a	b	c	d	L		
1	2500	1250	1250	20	80	800	625	340	230	2400				
2				20	80				*					
3				20	200					3800				
4				20	200					3800				
5				20	220					*				
6				20	200					2500	*			
7				12	200					*				
9				16	ESTETTY 0-0 LEIKKAUKSESSA							3800		
10				12	100	600	225	610	860	2295				
11				25	600					500				
12				12	800	330	800			1930				

4000 MM LAATTA, Z -7000 MM, C35/45, h = 400 MM, PALAUTUSPIIRUSTUS -30 M														
Teräs litery	Pituudet			Terästen dimensiot										
	x	y	korkeus	y	Laatta	d	k	a	b	c	d	L		
1	2000	1250	1250	20	80	800	250	340	350	2400				
2				20	80				*					
3				20	80					3900				
4				16	200					3900				
5				16	200					2000	*			
6				12	200					3600	*			
9				16	ESTETTY 0-0 LEIKKAUKSESSA							3600		
10				12	100	600	225	610	860	2295				
11				25	600					500				
12				12	800	330	800			1930				

* Teräs mittaukseen mukaan
 jätetty
 #12 820 mm
 #16 920 mm
 #20 1250 mm
 #25 1450 mm
 ** Rauditus alustaa vain kaston pölytyrmiästä postin/tilasta

Taulukko 17. Rakenteessa vaadittavat teräsmäärät 4 metriä leveissä laatoissa.



Kuva 7. Leikkauspiirustukset konsolin kohdalta.

7 LOPUKSI

Työssä lähdettiin hakemaan ratkaisua vesihuoltolinjan paalulaattaperustusten suunnittelun nopeuttamiseksi. Suunnittelun toteuttaminen oli aiemmin osoittautunut aikaa vieväksi varsinkin muutossuunnitelmien osalta. Tarkoituksena oli luoda tyyppiirustussarjat putkijohtokaivannon paalulaatoille kolmelle laatan leveydelle, kahdella eri perustamis- syvyydellä.

Työn tuotoksena syntyneet yleispiirustussarjat suunniteltiin olettamalla paalua ympäröivän maa-aineksen olevan kaikkialla tasalaatuista savea, jonka suljetun leikkauslujuuden arvo on 5 kPa. Todellisessa kohteessa tuo arvo saattaa vaihdella paljonkin ja paalujen sijoittelun määräävät suunnitteluarvot tuleekin aina erikseen tarkastaa. Ihan senkin vuoksi, että näin pääsee vaikuttamaan paalujen rakennevahvuuden valintaan. Suunnitelmissa ei lisäksi ole varauduttu tilanteeseen, missä paalulaattaan saattaa aiheutua vaakasuuntaisia kuormia rakenteen viereisistä maanrakennuspuolen penger-, tai täyttö- rakenteista. Huomioitavaa on lisäksi, että suunnitelmien paalulaatat on suunniteltu kolme metriä pitkien siirtymälaattojen kuormille. Käytettäessä 5 metriä pitkiä siirtymälaattoja tulee konsolin paalut ja rakenteessa vaadittava teräsmäärä tarkistaa.

Työn lopputuloksena syntyneitä suunnitelmia voidaan periaatteessa käyttää toivottuun tarkoitukseen suunnittelun avuksi ja materiaalityöaloitusten aloittamiseksi samanaikaisesti suunnittelun aloittamisen yhteydessä. Varsinkin hankkeen alkuvaiheessa voidaan pitkähkön putkijohtokaivannon paalulaatan materiaalien tilauksia aloitella suunnittelun käynnistämisen kanssa samanaikaisesti. Kuitenkaan aivan koko laatan pituudelle ei teräksiä ei välttämättä kannata tämän työn perusteella tilata, sillä kohdekohtaisesti on mahdollista suunnitella rakentaa paalulaatta tässä työssä esitettyä eriävillä teräsmäärillä ja paalujaolla. Lisäksi rakenteessa vaadittavat teräsmäärät sekä käytettäväksi valikoituvat paalut ja paalujaot tulee aina kohdekohtaisesti erikseen tarkistaa.

Tulevaisuutta ajatellen voisi tämän työn aineiston pohjalta luodun parametriseen suunnittelupolun luominen olla seuraava vaihe paalulaattojen suunnittelun nopeuttamiseksi

LÄHTEET

Heikkilä J.; Tolla P.; Uotinen V–M.; Lilja H.; Noponen S.; Liikenneviraston ohjeita 13/2017, Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI7, Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet 21.4.2017, Liikennevirasto, Helsinki 2017.

HTM-yhtiöt, HT-teräspaalujen suunnittelu- ja asennusohjeet, Paalutusohje RIL254 PO-2016 mukaisesti ver. 3/2017, HTM-yhtiöt, 2017.

Laaksonen A.; Liikenneviraston ohjeita 31/2017, Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2, Liikennevirasto, Helsinki 2017.

Liikennevirasto.; Liikenneviraston ohjeita 24/2017, Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1, Liikennevirasto, Helsinki 2017.

Liikenneviraston ohjeita 12/2012, Siltojen rakennelaskelmat. Liikennevirasto, Helsinki 2012.

Nykyri Pekka. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. Suomen betoniyhdistys ry. Multiprint Oy Vantaa, 2013

Nykyri Pekka. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. Suomen betoniyhdistys ry. Multiprint Oy Tampere, 2015

Palviainen Hans, Putkijohtokaivantojen paalulaattojen suunnittelutyökalun kehittäminen, Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten, Aalto-yliopisto, Insinöörیتieteiden korkeakoulu, 2017.

Patjas E.; Mantere P.; Elomaa J.; Yläsaari L.; Liikenneviraston ohjeita 5/2014, Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu, Pohjarakenteiden suunnitteluohjeet, Liikennevirasto, Helsinki 2014.

Rantamäki M. Jääskeläinen R. Tammirinne M. Geotekniikka, 21. muuttumaton painos, Oy Yliopistokustannus/Otatieto 1979, Hakapaino Oy, Helsinki 2006.

RT Rakennusteollisuus, Tuotelehti PO-2016 mukaiseen paalutuksen suunnitteluun ja paalutus-työhön RT betonipaaluilla, Rakennusteollisuus RT ry, Betoniteollisuus toimiala, 2018.

SSAB, RR – ja RD -paalut, suunnittelu- ja asennusohjeet, SSAB, 2018

Suomen rakennusinsinöörin liitto RIL ry ja Suomen geotekninen yhdistys SGY ry, Paalutusohje 2016, RIL 254-2016, Grano Oy, 2016.

Suomen standardisoimisliitto SFS, SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015.

Liite 1 Paalujen keskiötäisyyksien minimietäisyyksien taulukkoarvoja teräsbetoni- ja teräsputkipaaluille

Paalujen sallitut keskiötäisyydet - Teräsbetonipaalu $d = 0,25$		
Paalun pituus [m]	minimiarvo	0,25
10	0,80	m
11	0,80	m
12	0,80	m
13	0,80	m
14	0,82	m
15	0,83	m
16	0,85	m
17	0,87	m
18	0,88	m
19	0,90	m
20	0,92	m
21	0,93	m
22	0,95	m
23	0,97	m
24	0,98	m
25	1,00	m

Taulukko 18. 250x250 teräsbetonipaalujen keskiötäisyyksien minimiarvot (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179).

Paalujen sallitut keskiötäisyydet - Teräsbetonipaalu $d = 0,30$ m		
Paalun pituus [m]	minimiarvo	0,30
10	0,90	m
11	0,92	m
12	0,94	m
13	0,96	m
14	0,98	m
15	1,00	m
16	1,02	m
17	1,04	m
18	1,06	m
19	1,08	m
20	1,10	m
21	1,12	m
22	1,14	m
23	1,16	m
24	1,18	m
25	1,20	m

Taulukko 19. 300x300 teräsbetonipaalujen keskiötäisyyksien minimiarvot (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179).

Paalujen sallitut keskiötäisyydet - Teräsbetonipaalu d = 0,35 m		
Paalun pituus [m]	minimiarvo	0,35
10	1,05	m
11	1,07	m
12	1,10	m
13	1,12	m
14	1,14	m
15	1,17	m
16	1,19	m
17	1,21	m
18	1,24	m
19	1,26	m
20	1,28	m
21	1,31	m
22	1,33	m
23	1,35	m
24	1,38	m
25	1,40	m

Taulukko 20. 350x350 teräsbetonipaalujen keskiötäisyyksien minimiarvot (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179).

Paalujen sallitut keskiötäisyydet - Teräspuutkipaalu d = 0,127 m		
Paalun pituus [m]	minimiarvo	0,127
-	0,80	m

Taulukko 21. d125 teräspuutkipaalujen keskiötäisyyksien minimiarvot (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179).

Paalujen sallitut keskiötäisyydet - Teräspuutkipaalu d = 0,1397 m		
Paalun pituus [m]	minimiarvo	0,138
-	0,80	m

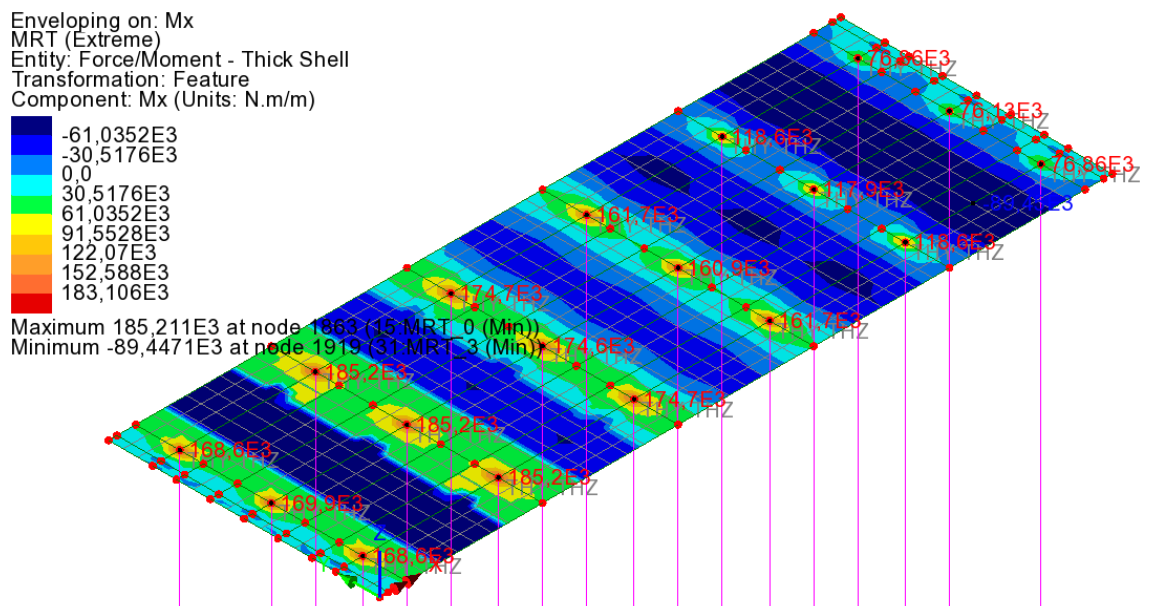
Taulukko 22. d140 teräspuutkipaalujen keskiötäisyyksien minimiarvot (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179).

Paalujen sallitut keskiötäisyydet - Teräspuutkipaalu d = 0,1683 m		
Paalun pituus [m]	minimiarvo	0,168
-	0,80	m

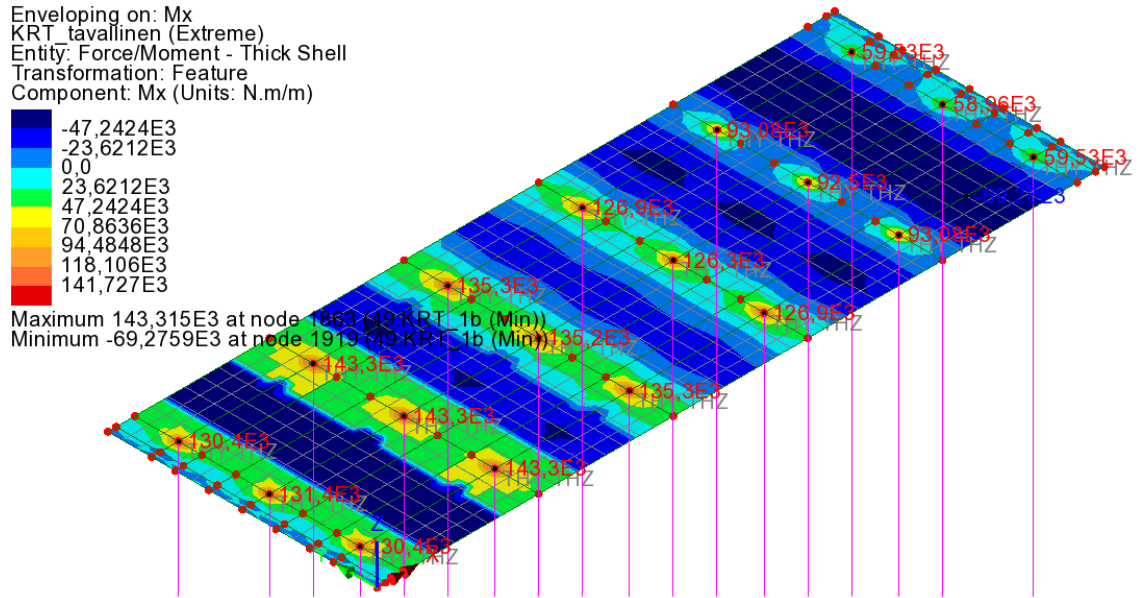
Taulukko 23. d170 teräspuutkipaalujen keskiötäisyyksien minimiarvot (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto 2016, 179).

Liite 2 Lusas Bridge FEM-laskentaohjelmasta saadun mitoitusvoimasuureet tarkasteltaville paalulaatoille sekä esimerkkilaskelmat 4 metriä leveästä 7 metriä korkean penkereen alle rakennettavasta paalulaatasta

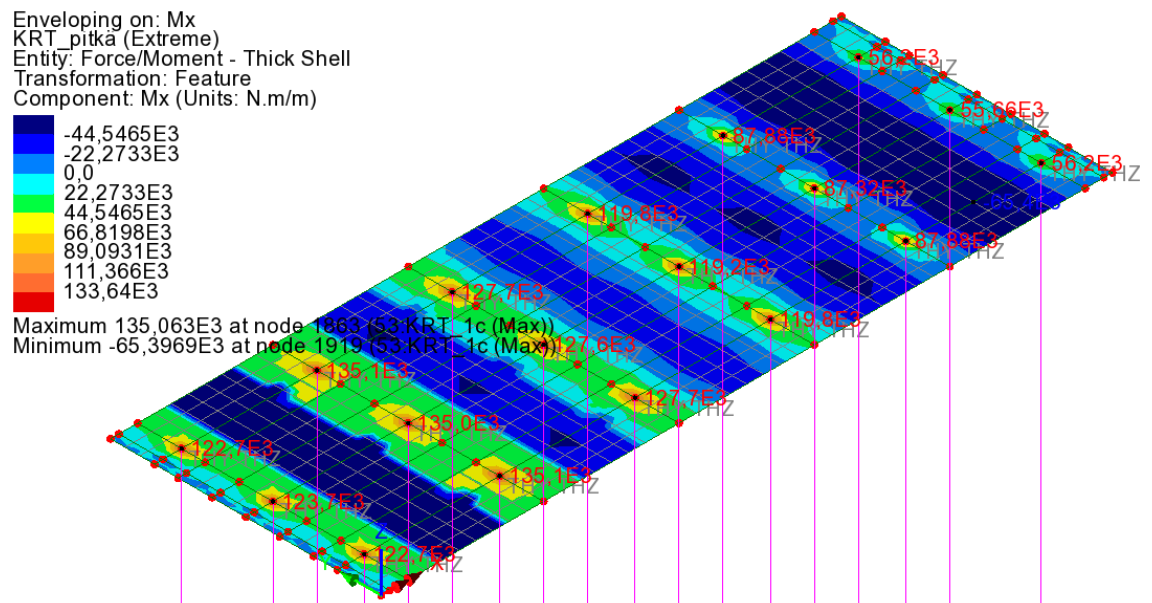
Esitetään aluksi esimerkkikuvaajat 4 metriä leveästä paalulaatasta, jonka päälle tulevan penkereen korkeus on 7 metriä.



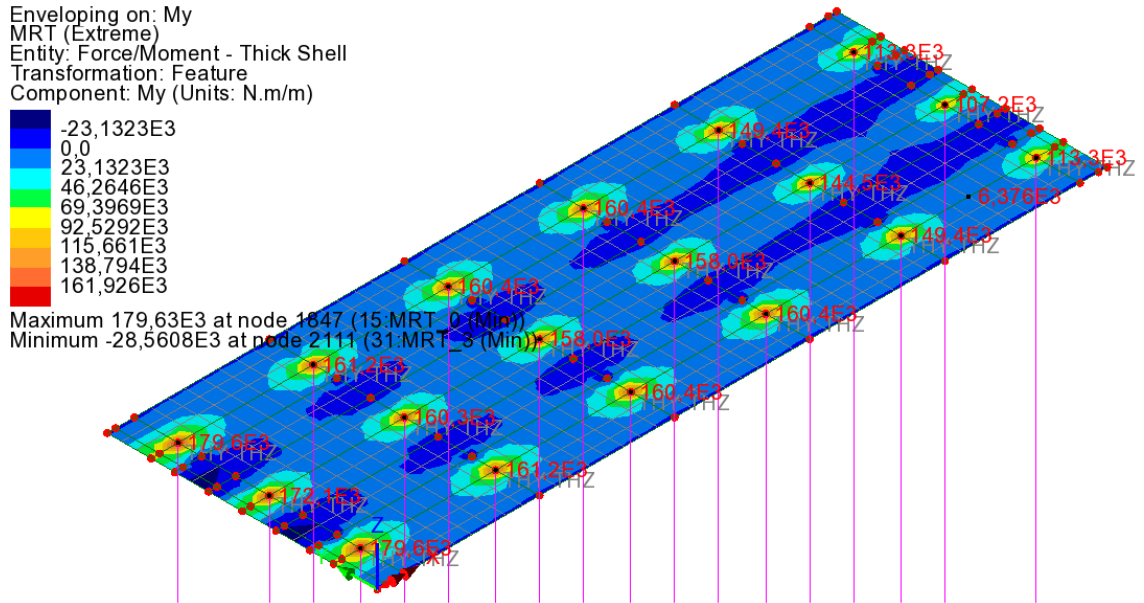
Kuva 8. Taivutus laatan pituussuuntaan murtorajatilän kuormitusyhdistelyllä.



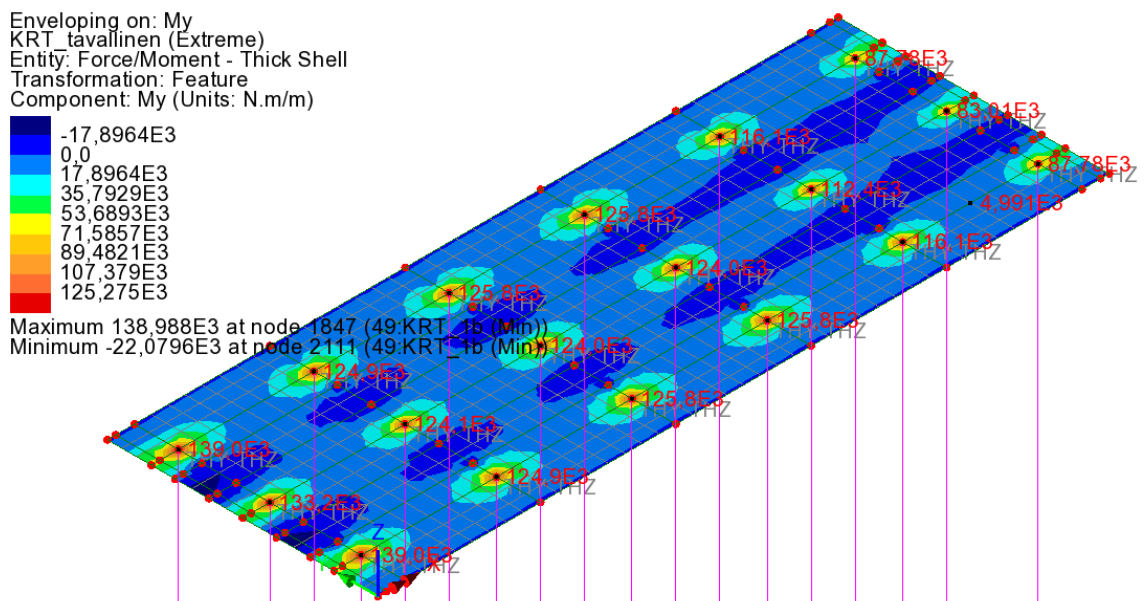
Kuva 9. Taivutus laatan pituussuuntaan käyttörajatilan tavallisella kuormitusyhdistelyllä.



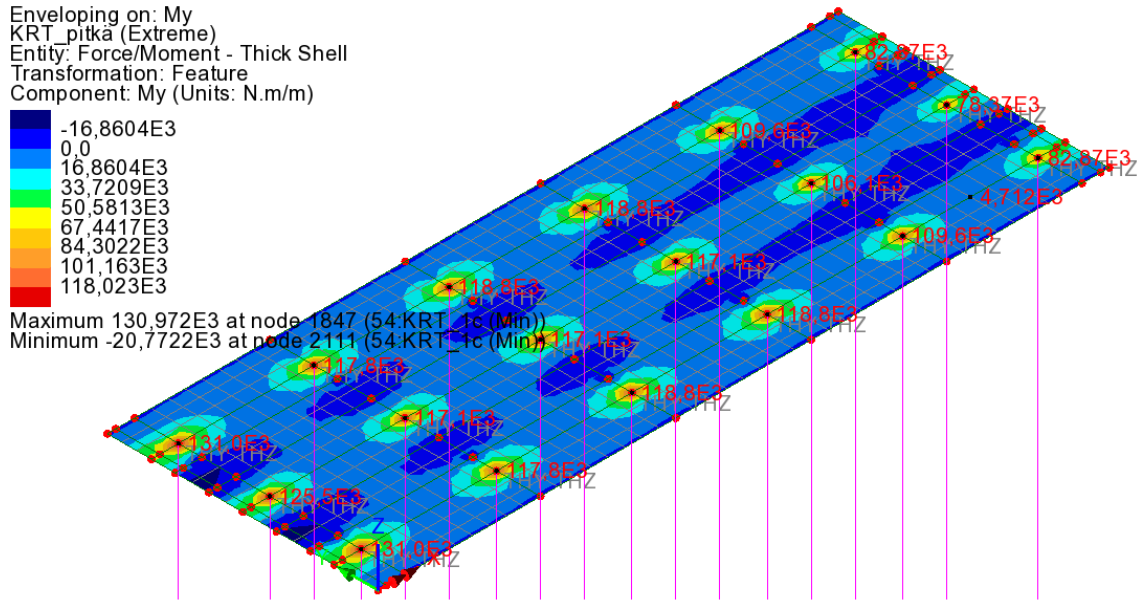
Kuva 10. Taivutus laatan pituussuuntaan käyttörajatilan pitkäaikaisella kuormitusyhdistelyllä.



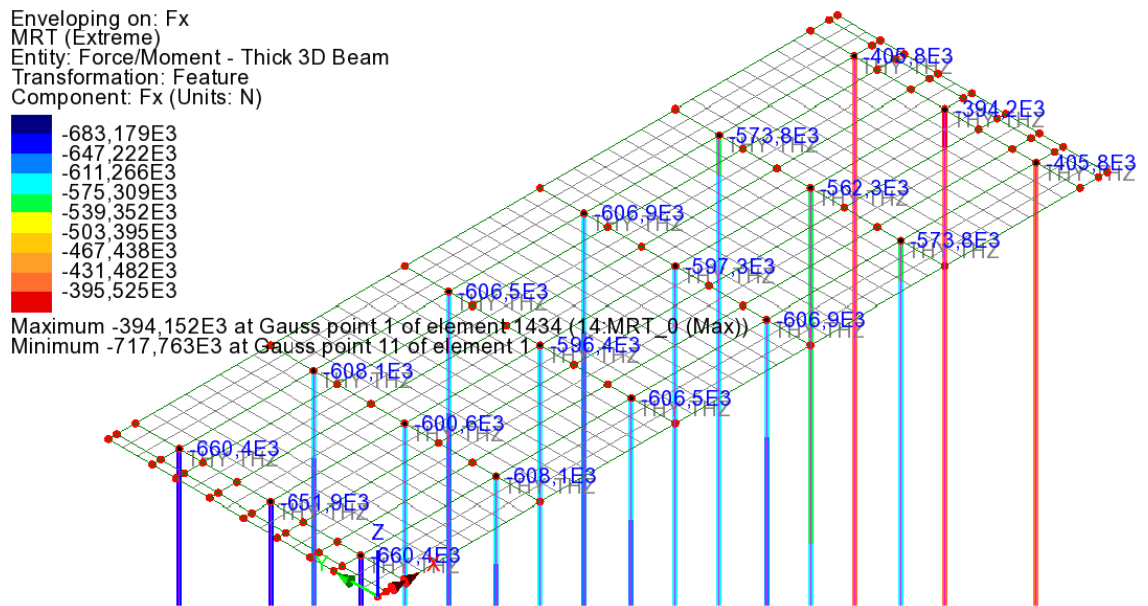
Kuva 11. Taivutus laatan poikittaissuuntaan murtorajatilän kuormitusyhdistelyllä.



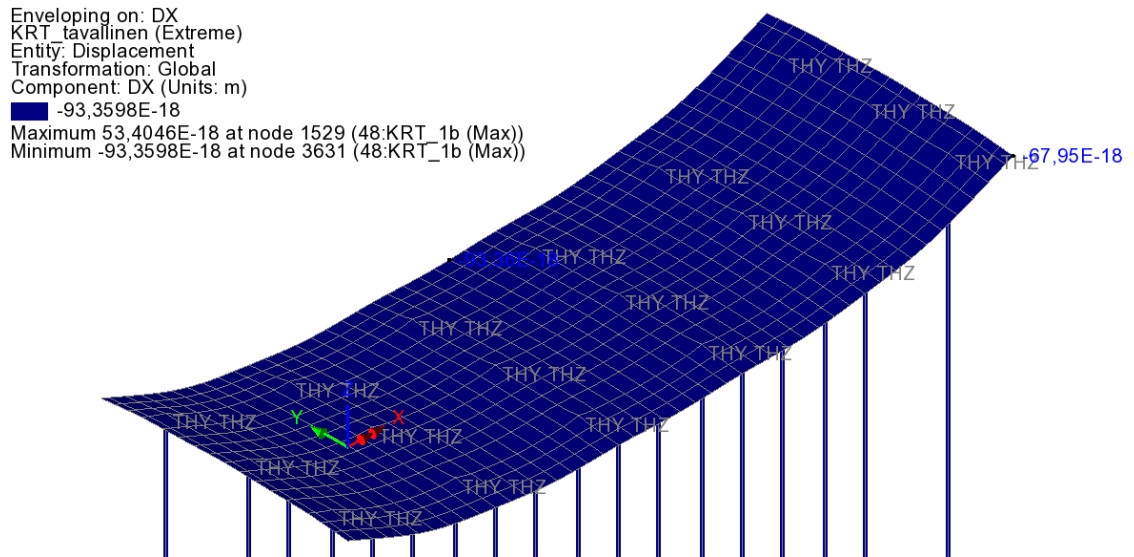
Kuva 12. Taivutus laatan poikittaissuuntaan käyttörajatilän tavallisella kuormitusyhdistelyllä.



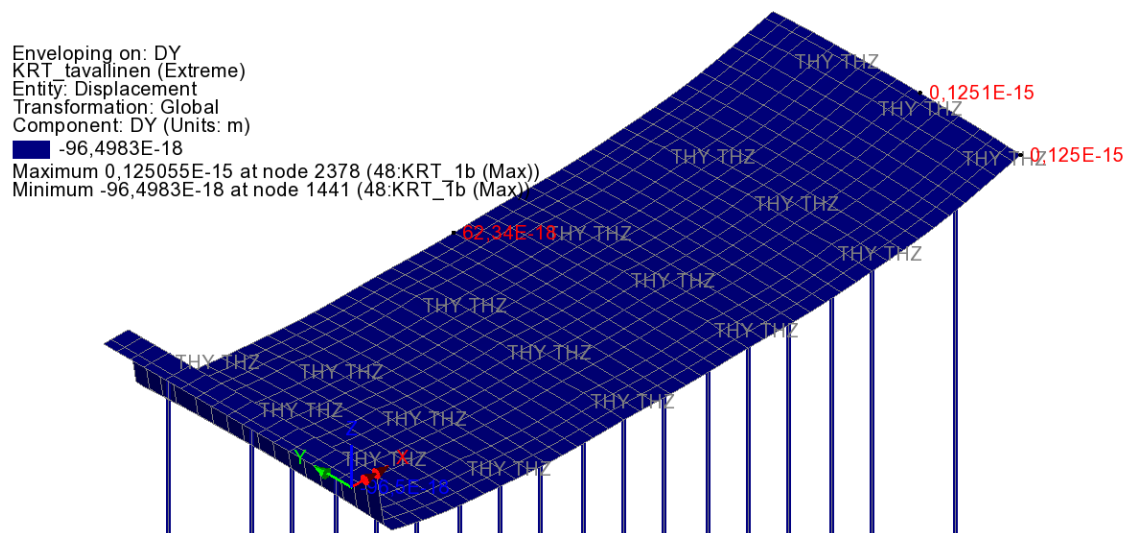
Kuva 13. Taivutus laatan poikittaissuuntaan käyttörajatilan pitkäaikaisella kuormitusyhdistelyllä.



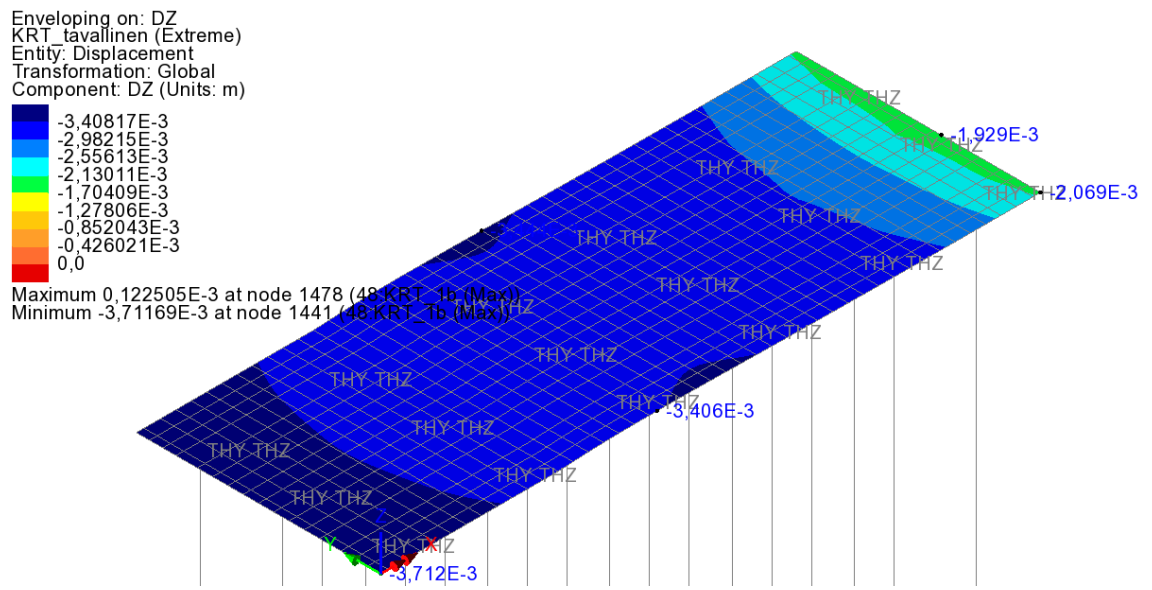
Kuva 14. Paalujen yläpään tukireaktiot.



Kuva 15. Laatan siirtymät Globaalien x-akselin suuntaan.



Kuva 16. Laatan siirtymät Globaalien y-akselin suuntaan.



Kuva 17. Laatan siirtymät Globaalin z-akselin suuntaan.

Esimerkkilaskelmat 4 metriä leveästä ja 7 metriä korkean penkereen alle rakennettavasta paalulaatasta

SFS-EN 1992 1-1 + A1 + AC

Virumaluvun laskenta

$$RH := 80\%$$

$$h := 400\text{mm}$$

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

$$A_c := b_w \cdot h = 0.4\text{m}^2$$

$$u := 2b_w = 2 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 400 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha_1 := \left(\frac{35\text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{-0.7} = 1.155 \quad \alpha_2 := \left(\frac{35\text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{-0.2} = 1.042 \quad \alpha_3 := \left(\frac{35\text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{-0.5} = 1.108$$

$$\beta_H := 1.5 \cdot \left[1 + (0.012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot \frac{h_0}{\text{mm}} + 250 \cdot \alpha_3 = 877.102$$

$$t_0 := 28 \quad t := 365 \cdot 100 = 3.65 \times 10^4$$

$$\beta_{c,t,t_0} := \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right)^{-0.3} = 1.007$$

$$\beta_{t_0} := \frac{1}{(0.1 + t_0^{0.20})} = 0.488$$

$$\beta_{f_{cm}} := \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}}} = 2.562$$

$$\varphi_{RH} := \text{if} \left[f_{cm} \leq 35\text{MPa}, 1 + \frac{1 + \frac{RH}{100\%}}{3 \cdot \sqrt{\frac{h_0}{\text{mm}}}}, 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100\%}}{3 \cdot \sqrt{\frac{h_0}{\text{mm}}}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 = 1.369$$

$$\varphi_0 := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f_{cm}} \cdot \beta_{t_0} = 1.713$$

$$\varphi_{t,t_0} := \varphi_0 \cdot \beta_{c,t,t_0} = 1.725$$

MATERIAALIARVOT

kNm := kN·m

$$\gamma_c := 1.5 \quad \gamma_s := 1.15 \quad \gamma_{CE} := 1.2$$

$$\alpha_{cc} := 0.85 \quad \alpha_{ct} := 1.00$$

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa} \quad f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 43 \text{ MPa} \quad f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.833 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_e} = 434.783 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := \text{if} \left[f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}, 0.30 \cdot \text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}}, 2.12 \cdot \text{MPa} \cdot \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{\text{MPa}} \right) \right] = 3.21 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctk.0.05} := 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.247 \cdot \text{MPa} \quad f_{ctk.0.95} := 1.3 \cdot f_{ctm} = 4.173 \cdot \text{MPa}$$

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

$$\lambda := \text{if} \left(f_{ck} \leq 50 \cdot \text{MPa}, 0.80, 1 - \frac{f_{ck} - 50 \cdot \text{MPa}}{400 \cdot \text{MPa}} \right) = 0.8$$

$$\eta := \text{if} \left(f_{ck} \leq 50 \cdot \text{MPa}, 1.00, \frac{f_{ck} - 50 \cdot \text{MPa}}{200 \cdot \text{MPa}} \right) = 1$$

$$E_s = 200 \cdot \text{GPa}$$

$$E_{cm} := 22 \cdot \text{GPa} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot \text{MPa}} \right)^{0.3} = 34.077 \cdot \text{GPa}$$

$$E_c := 1.05 \cdot E_{cm} = 35.781 \cdot \text{GPa}$$

$$E_{cd} := \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} = 28.398 \cdot \text{GPa}$$

Virumaluku

$$\varphi_{t,t0} = 1.725$$

$$E_{c,\text{eff}} := \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{t,t0}} = 12.505 \cdot \text{GPa}$$

Betonipeitteet

$c_{\min.dur} := 35 \cdot \text{mm}$

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

$c_{true} := 50 \cdot \text{mm}$

$c_{nom} := c_{\min.dur} + c_{dev} = 45 \cdot \text{mm}$

$c_w := \min(c_{true}, 1.4 \cdot c_{\min.dur}, 50 \cdot \text{mm}) = 49 \cdot \text{mm}$

$h = 0.4 \text{ m}$

$b_w = 1 \cdot \text{m}$

$\phi_x := 20 \cdot \text{mm}$

$\phi_y := 20 \cdot \text{mm}$

$d_x := h - c_{true} - 1.1 \cdot \phi_y - \frac{1.1 \cdot \phi_x}{2} - 50 \cdot \text{mm} = 267 \cdot \text{mm}$

$d_y := h - c_{true} - \frac{1.1 \cdot \phi_y}{2} - 50 \cdot \text{mm} = 289 \cdot \text{mm}$

Suorakaiteen muotoisen paalun poikkileikkauksen sivumitat

$D_x := 250 \cdot \text{mm}$

$D_y := 250 \cdot \text{mm}$

LAATAN YLÄPINNAN RAUDOITUS PITUUSSUUNTAAN

$M_{xT} \quad M_{ed,x} := 185.2 \cdot \text{kNm}$

$N_{ed,x} := 609 \cdot \text{kN}$

LAATAN PAALUT

$\mu_x := \frac{M_{ed,x}}{b_w \cdot d_x^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}} = 0.131 \quad \text{OK, jos } < 0.493$

$\beta_x := 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_x} = 0.141 \quad \text{OK, jos } < 0.372$

$\omega_x := \beta_x$

$A_{s,vaad,x} := \omega_x \cdot b_w \cdot d_x \cdot \frac{\eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = 1.716 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$

$n_{s,x} := 12.5 \quad A_{s,min,x} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_w \cdot d_x, 0.0013 \cdot b_w \cdot d_x\right) = 445.671 \cdot \text{mm}^2$

$A_{s,tot,x} := n_{s,x} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_x^2}{4} = 3.927 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{s,max,x} := 0.06 \cdot A_c = 2.4 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$

$k_{\phi,x} := \frac{b_w}{n_{s,x}} = 80 \cdot \text{mm}$

Raudoitus vähintään d20 k80

Analysoidaan poikkileikkauksen taivutuskestävyys valitulla raudoituksella

$$\omega_{x1} := \frac{A_{s,tot,x} \cdot f_{yd}}{b_w \cdot d_x \cdot \eta \cdot f_{cd}} = 0.322$$

Lasketaan puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus

$$\beta_{x1} := \omega_{x1} = 0.322 \quad \text{OK, jos } < 0.493$$

Lasketaan poikkileikkauksen suhteellinen momentti

$$\mu_{x1} := \beta_{x1} \cdot \left(1 - \frac{\beta_{x1}}{2}\right) = 0.27 \quad \text{OK, jos } < 0.372$$

Lasketaan poikkileikkauksen taivutuskestävyys

$$M_{rd,x} := \mu_{x1} \cdot b_w \cdot d_x^2 \cdot \eta \cdot f_{cd} = 382.381 \cdot \text{kNm}$$

$$\text{Käyttöaste}_x := \frac{M_{ed,x}}{M_{rd,x}} = 0.484$$

LÄVISTYSLASKENNASSA VAADITTUJA LÄHTÖTIE TOJA

Suorakaiteen muotoisen paalun poikkileikkauksen sivumitat

$$D_x = 0.25 \text{ m}$$

$$D_y = 0.25 \text{ m}$$

Lävistyspiirin rajoittama pinta-ala

$$A_u := (0.5 \cdot d_x + D_x + 0.5 \cdot d_x) \cdot (0.5 \cdot d_y + D_y + 0.5 \cdot d_y) = 0.279 \text{ m}^2$$

Reunaetäisyys re_x

$$re_x := 625 \text{ mm}$$

Lävistyspiirin sivumitta x

$$x := 2 \cdot 0.5 \cdot d_x + D_x = 517 \cdot \text{mm}$$

Paalun tukireaktio

$$V_{edx} := N_{edx} = 609 \cdot \text{kN}$$

Lävistyspiiri

$$u_x := \min \left[2x + 2y, x + 2y + 2 \left(re_x - \frac{d_y}{2} \right) \right] = 2.112 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

$$e_{paalu} := 0 \cdot \text{m}$$

LÄVISTYSTARKASTELU NCCI2

Leikkausraudoittamaton rakenne

$$k_x := \max\left(1.6 - \frac{d_x}{m}, 1.0\right) = 1.333$$

$$k_y := \max\left(1.6 - \frac{d_y}{m}, 1.0\right) = 1.311$$

$$k_{\text{lävistys}} := \frac{k_x + k_y}{2} = 1.322$$

$$\beta_{2x} := \frac{0.4}{1 + \frac{1.5 \cdot e_{\text{paalu}}}{\sqrt{A_u}}} = 0.4$$

$$\frac{x}{b_w} = 0.517$$

$$b_{w,x} := x \quad b_{w,y} := y$$

$$A_{sl,x} := A_{s,tot,x} \cdot \frac{x}{b_w} = 2.03 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$\frac{y}{b_w} = 0.539$$

$$A_{sl,y} := A_{s,tot,y} \cdot \frac{y}{b_w} = 2.117 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_y := \min\left(\frac{A_{sl,y}}{b_{w,y} \cdot d_y}, 0.02\right) = 0.014$$

$$\rho_x := \min\left(\frac{A_{sl,x}}{b_{w,x} \cdot d_x}, 0.02\right) = 0.015$$

$$\rho_{\text{lävistys}} := \min(\sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}, 0.008) = 8 \times 10^{-3}$$

Laatan lävistyskapasiteetti

$$V_{cx} := k_{\text{lävistys}} \cdot \beta_{2x} \cdot (1 + 50 \cdot \rho_{\text{lävistys}}) \cdot u_x \cdot (d_x) \cdot f_{ctd} = 625.362 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste

$$L_{1x} := \frac{V_{edx}}{V_{cx}} = 0.974$$

Redusoidaan lävistyslaskelmasta kuormat, jotka sijaitsevat etäisyydellä d tuen reunasta

$$A_{ud} := (2 \cdot d_x + D_x) \cdot (2 \cdot d_y + D_y) = 0.649 \cdot \text{m}^2$$

Alue jolta kuormitus voidaan redusoida

$$\text{Pysyvät kuormat} \quad g_{kL} := 150.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \gamma_g := 1.25$$

$$\text{Muuttuvat kuormat} \quad q_{kL} := 14 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \gamma_q := 1.35$$

$$\text{Muut redusoitavat kuormat} \quad V_{ekR} := 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \gamma_{q2} := 1.15$$

$$V_{edR} := (\gamma_g \cdot g_{kL} + \gamma_q \cdot q_{kL} + \gamma_{q2} \cdot V_{ekR}) \cdot A_{ud} = 141.856 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste redusoinnin jälkeen

$$L_{2x} := \frac{V_{edx} - V_{edR}}{V_{cx}} = 0.747$$

**HALKEAMALEVEYSTARKASTELU
YLÄPINTA LAATAN PITUUSSUUNTAAN**

$$M_{ek.Lx} := 143.3 \cdot \text{kNm}$$

$$c_{\text{min.dur}} = 35 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{eq.x} := \frac{n_{s.x} \cdot \phi_x^2}{n_{s.x} \cdot \phi_x} = 0.02 \text{ m}$$

$$M_{ek.Px} := 135.1 \cdot \text{kNm}$$

$$c_{\text{dev}} = 10 \cdot \text{mm}$$

$$k_{1v} := 0.8$$

$$c_{\text{nom}} = 45 \cdot \text{mm}$$

$$k_{2v} := 0.5$$

$$c_{\text{true}} = 50 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s.x} := A_{s.tot.x} = 3.927 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$c_w = 49 \cdot \text{mm}$$

$$A_{p.x} := 0 \cdot \text{mm}^2$$

$$k_{tL.x} := 0.6 \quad \text{Lyhytaikainen kuormitusyhdistelmä}$$

$$k_{tP.x} := 0.4 \quad \text{Pitkäaikainen KY.}$$

$$\xi_x := 0$$

$$\phi_{p.x} := 1 \cdot \text{mm}^2$$

LYHYTAIKAINEN YHDISTELMÄ

$$X_{xL} := d_x \cdot \frac{A_{s,x}}{b_w \cdot d_x} \cdot \frac{E_s}{E_{cm}} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\frac{A_{s,x}}{b_w \cdot d_x} \cdot \frac{E_s}{E_{cm}}}} \right) = 90.26 \cdot \text{mm}$$

$$z_{xL} := d_x - \frac{X_{xL}}{3} = 236.913 \cdot \text{mm}$$

$$h_{c,eff,xL} := \min \left[2.5 \cdot (h - d_x), \frac{(h - X_{xL})}{3}, \frac{h}{2} \right] = 103.247 \cdot \text{mm}$$

$$A_{c,eff,xL} := h_{c,eff,xL} \cdot b_w = 1.032 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_{p,eff,xL} := \frac{A_{s,x} + \sqrt{\xi_x \cdot \frac{\phi_{eq,x}}{\phi_{p,x}}} \cdot A_{p,x}}{A_{c,eff,xL}} = 0.038$$

$$\sigma_{s,Lx} := \frac{M_{ek,Lx}}{A_{s,x} \cdot z_{xL}} = 154.027 \cdot \text{MPa}$$

$$\epsilon_{erotusLx} := \frac{\sigma_{s,Lx} - k_{tL,x} \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,eff,xL}} \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \rho_{p,eff,xL} \right)}{E_s} = 4.604 \times 10^{-4}$$

$$s_{r,maxLx} := 3.4 \cdot c_w + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot 0.425 \cdot \phi_{eq,x}}{\rho_{p,eff,xL}} = 255.991 \cdot \text{mm}$$

$$w_{k,Lx} := s_{r,maxLx} \cdot (\epsilon_{erotusLx}) = 0.118 \cdot \text{mm}$$

$$w_{max,Lx} := 0.2 \cdot \text{mm} \quad \text{Käyttöaste}$$

$$K_{hLx} := \frac{w_{k,Lx}}{w_{max,Lx}} = 0.589$$

PITKÄAIKAINEN YHDISTELMÄ

$$X_{xP} := d_x \cdot \frac{A_{s,x}}{b_w \cdot d_x} \cdot \frac{E_s}{E_{c,eff}} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\frac{A_{s,x}}{b_w \cdot d_x} \cdot \frac{E_s}{E_{c,eff}}}} \right) = 130.8 \cdot \text{mm}$$

$$z_{xP} := d_x - \frac{X_{xP}}{3} = 223.4 \cdot \text{mm}$$

$$h_{c,eff,xP} := \min \left[2.5 \cdot (h - d_x), \frac{(h - X_{xP})}{3}, \frac{h}{2} \right] = 89.733 \cdot \text{mm}$$

$$A_{c,eff,xP} := h_{c,eff,xP} \cdot b_w = 8.973 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_{p,eff,xP} := \frac{A_{s,x} + \sqrt{\xi_x \cdot \frac{\phi_{eq,x}}{\phi_{p,x}} \cdot A_{p,x}}}{A_{c,eff,xP}} = 0.044$$

$$\sigma_{s,Px} := \frac{M_{ek,Px}}{A_{s,x} \cdot z_{xP}} = 153.997 \cdot \text{MPa}$$

$$\epsilon_{erotusPx} := \frac{\sigma_{s,Px} - k_{tP,x} \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,eff,xP}} \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \rho_{p,eff,xP} \right)}{E_s} = 5.856 \times 10^{-4}$$

$$s_{r,maxPx} := 3.4 \cdot c_w + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot 0.425 \cdot \phi_{eq,x}}{\rho_{p,eff,xP}} = 244.292 \cdot \text{mm}$$

$$w_{k,Px} := s_{r,maxPx} \cdot (\epsilon_{erotusPx}) = 0.143 \cdot \text{mm}$$

$$w_{max,Px} := 0.15 \cdot \text{mm} \quad \text{Käyttöaste}$$

$$K_{hPx} := \frac{w_{k,Px}}{w_{max,Px}} = 0.954$$

Taulukossa 24 esitetään rakennemalleista saadut rakennelaskelmien perusteena olevat mitoitusvoimasuureet. Paalulaatan elementtiverkon jakona on tässä laskennassa käytetty 250 mm ja paalujen yläpäiden pinta-aloina 300x300 mm².

2 metriä leveä paa- lulaatta z = - 3 m		MRT [kNm/m]	KRT tavalli- nen [kNm/m]	KRT pitkäaikainen [kNm/m]	A.s.vaad [mm ²]	A.s.val [mm ²]	KA [%]
	MxT	159	113	89	1452	3142	70,4 H
	MyT	107	72	56	887	1571	58,0 H
	MxB	-108	-77	-60	1210	1608	78,8 H
	MyB	-19	-13	-10	183	565	32,9 T
	tukireak- tiot [kN]	konsoli	354				48,2 L
		laatta	419				70,4 L
2 metriä leveä paa- lulaatta z = - 5 m							
	MxT	152	115	104	1386	3142	89,2 H
	MyT	106	80	72	870	1963	82,5 H
	MxB	-100	-76	-68	1114	2011	74,4 H
	MyB	-23	-17	-16	227	565	40,8 T
	tukireak- tiot [kN]	konsoli	424				56,1 L
		laatta	445				74,8 L
2 metriä leveä paa- lulaatta z = - 7 m							
	MxT	146	113	107	1330	3142	92,7 H
	MyT	114	88	83	937	2240	87,9 H
	MxB	-85	-66	-62	945	1608	85,3 H
	MyB	-32	-25	23	322	565	57,6 T
	tukireak- tiot [kN]	konsoli	495				64,6 L
		laatta	453				76,2 L
3 metriä leveä paa- lulaatta z = - 3 m							
	MxT	191	136	107	1771	3927	74,5 H
	MyT	144	103	81	1197	3142	81,7 L
	MxB	-113	-85	-67	1299	2011	71,4 H
	MyB	-62	-44	35	635	1005	64,3 T
	tukireak- tiot [kN]	konsoli	358				51,8 L
		laatta	587				93,9 L
							80,1 Lr

3 metriä leveää paa- lulaatta z = - 5 m							
	MxT	167	126	114	1534	3927	75,5 H
	MyT	147	113	101	1226	3142	75,6 H
	MxB	-110	-53	75	1267	2011	89,4 H
	MyB	-74	-56	-50	760	1148	67,4 T
	tukireak- tiot [kN]	konsoli	425				62,8 L
		laatta	613				98,2 L 80,3 Lr
3 metriä leveää paa- lulaatta z = - 7 m							
	MxT	140	109	103	1276	3142	87,7 H
	MyT	142	112	105	1184	3142	80,5 H
	MxB	-105	-81	-77	1204	2011	93,5 H
	MyB	-86	-67	-63	897	1608	74,3 H
	tukireak- tiot [kN]	konsoli	503				74,4 L
		laatta	613				98,0 L 75,3 Lr
4 metriä leveää paa- lulaatta z = - 3 m							
	MxT	192	137	107	1780	3142	93,6 H
	MyT	149	106	84	1246	2513	76,6 H
	MxB	-111	-79	-62	1246	2011	64,6 T
	MyB	-17	-12	-9	134	565	29,5 T
	tukireak- tiot [kN]	konsoli	475				71,7 L
		laatta	557				89,0 L
4 metriä leveää paa- lulaatta z = - 5 m							
	MxT	188	142	128	1739	3927	88,5 H
	MyT	159	121	109	1332	3142	84,6 H
	MxB	-103	-78	-71	1158	2011	80,0 H
	MyB	-22	-17	-15	221	565	39,7 T
	tukireak- tio	konsoli	567				82,0 L
		laatta	593				94,8 L 77,0 Lr
4 metriä leveää paa- lulaatta z = - 5 m							

	MxT	185	143	135	1716	3927	95,4 H
	MyT	180	140	131	1517	3927	81,7 H
H	MxB	-90	-69	-66	994	2011	69,1 H
	MyB	-29	-22	-21	286	565	51,2 T
	tukireak- tio	konsoli	663				93,6 L
		laatta	609				97,4 L 74,7 Lr

Taulukko 24. Tarkasteltavien paalulaattojen kootut mitoitusvoimasuureet.

Taulukossa

MxT = taivutusmomentin mitoitusarvo laatan yläpinnassa pituussuuntaan

MyT = taivutusmomentin mitoitusarvo laatan yläpinnassa poikittaissuuntaan

MxB = taivutusmomentin mitoitusarvo laatan alapinnassa pituussuuntaan

MyB = taivutusmomentin mitoitusarvo laatan alapinnassa poikittaissuuntaan

MRT = murtorajatilän mukaisen kuormitusyhdistelmän antama suunnitteluarvo

KRT tavallinen = käyttörajatilän tavallisen kuormitusyhdistelmän antama suunnitteluarvo

KRT pitkä = käyttörajatilän pitkäaikaisen kuormitusyhdistelmän antama suunnitteluarvo

A.s.vaad = rakenteessa vaadittava rakenneterästen määrä

A.s.val = rakenteeseen valittu rakenneterästen määrä

KA = käyttöaste

T = käyttöaste taivutuksen ollessa mitoittava tekijä

H = käyttöaste halkeamaleveyden ollessa mitoittava tekijä

L = käyttöaste lävistyksen ollessa mitoittava tekijä

L_r = käyttöaste lävistyksen ollessa mitoittava tekijä redusoidun lävistyskuorman vaikuttaessa

