

FREE TENDON LAYOUT JÄNNEBETONIRAKENTEISSA



Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Rakentaminen, Visamäki

Syksy 2021

Eveliina Pajuoja

TIIVISTELMÄ

Vahanan Suunnittelupalvelut Oy:ssa on laajennettu suunnittelutarjontaa jälkijännitettyjen betonirakenteiden suunnitteluun. Tämä on luonut tarpeen kehittää jännebetonirakenteiden suunnittelua.

Tähän asti käytetyin jälkijännitettyjen betonirakenteiden suunnitteluperiaate on ollut paraabeligeometria. Sen laskeminen on suhteellisen yksinkertaista, mutta toteutus työmaalla vaatii paljon työtä. Paraabeli tuetaan raudoituspukeilla, jotka tehdään erikseen jokaista paraabelia vastaavaksi työmaalla ja se vie aikaa ja materiaaleja. Tässä työssä on tarkoitus tutkia vaihtoehtoja ratkaisua suunnitteluun ja toteutukseen.

Free tendon layout on Klemens Maierin Itävallassa kehittämä punosgeometria, jossa punokset sidotaan kentässä alapinnan raudoitukseen, keskituilla yläpinnan raudoitukseen ja korkoerossa se roikkuu vapaasti ”köytenä”. Työmaalla punosta ei siis tarvitse tukea pukeilla, joka säästää aikaa ja siten rahaa.

Työssä on laskennallisesti tutkittu paraabeligeometrian, free tendon layoutin sekä yksinkertaistetun punosgeometrian eroja käyttämällä esimerkkirakennetta. Työ on rajattu koskemaan palkkilaatastoja sekä yhtä punostyyppiä.

Avainsanat Tartunnaton jänne, free tendon layout, jälkijännitetty rakenne

Sivut 58 sivua ja liitteitä 60 sivua

Visamäki

Author	Eveliina Pajuoja	Year 2021
Subject	Free tendon layout in prestressed concrete structures	
Supervisors	Tapio Korkeamäki, Antti Haapasalmi	

ABSTRACT

Vahanen Suunnittelupalvelut Oy has extended its construction design offering to the design of prestressed concrete structures. This has created a need to develop the design of prestressed concrete structures.

Until now, the most used design principle for prestressed concrete structures has been parabolic geometry. It is relatively simple to calculate, but implementation at site requires a lot of work. The parabola is supported by reinforcement stands that are made separately to match each parabola on site and it takes time and materials. This work aims to explore an alternative solution to design and implementation.

Free tendon layout is tendon geometry developed by Klemens Maier in Austria, in which tendons are tied to reinforcement of the lower surface at middle span, in the middle supports to the reinforcement of upper surface and between it hangs freely as a “rope”. At the construction site, therefore, the tendon does not need to be supported with reinforcement stands, which saves time and thus money.

The differences between parabolic geometry, free tendon layout and simplified tendon geometry have been computationally investigated using an example structure. In this work we survey only beam slabs and one tendon type.

Keywords Unbonded tendon, free tendon layout, prestressed concrete

Pages 58 pages and appendices 60 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tartunnattomilla jänteillä jännitetyt rakenteet	2
2.1	Jännitettyjen betonirakenteiden historia	2
2.2	Jännitetyt betonirakenteet.....	3
2.2.1	Esijännitetty rakenne	3
2.2.2	Jälkijännitetty rakenne.....	5
3	Materiaaliominaisuudet	7
3.1	Betoni	7
3.2	Betoniteräs	9
3.3	Jännepunos.....	11
3.3.1	Jännepunoksen osavarmuusluvut	11
3.3.2	Lujuus	11
3.3.3	Mitoitusoletukset	12
3.3.4	Jännittämisvoima.....	13
3.3.5	Jännevoima	13
3.3.6	Jännepunoksen myötölujuuden suunnitteluarvo	15
3.4	Ankkurit ja jatkoskappaleet.....	15
4	Jännityshäviöt	16
4.1	Betonin kimmoisesta kokoonpuristumisesta aiheutuvat häviöt.....	17
4.2	Kitkahäviöt.....	18
4.3	Ankkurointihäviöt	20
4.4	Ajasta riippuvaiset häviöt	23
5	Punosgeometriat ja ohjausvoimat.....	25
5.1	Ohjausvoimat.....	26
5.2	Punosgeometriat yksi- ja moniaukkoisissa rakenteissa	28
5.2.1	Paraabeligeometria	28
5.2.2	Yksinkertaistettu punosgeometria	29
5.2.3	Free tendon layout	30
6	Mitoitusvertailu	32
6.1	Suunnitteluperiaatteet.....	32
6.1.1	Alustava laatan poikkileikkauksen mitoitus	34
6.1.2	Kuormien ja kuormitusyhdistelmien määrittely	34
6.2	Jännitysten ja halkeilun rajoittaminen.....	35

6.3	Taipumien rajoittaminen.....	37
6.4	Murtorajatilamitoitus.....	37
6.4.1	Jännevoimien vaikutukset.....	37
6.4.2	Normaalivoima ja taivutus	39
6.4.3	Hyperstaattinen momentti	41
6.5	Tulokset	41
6.5.1	Kitka- ja lukitushäviöt sekä keskimääräinen jännevoima	43
6.5.2	Ohjausvoimat	44
6.5.3	Jännitykset.....	47
6.5.4	Adapt PT/RC	48
7	Johtopäätökset	55
	Lähteet	58

Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1.	Paraabelinen ja free tendon layout punosgeometria	1
Kuva 2.	Esijännitetty jänneteräs kaarevalla muodolla (Naaman, 2004, s. 10).....	3
Kuva 3.	Laitteisto, jolla jänneterästä saadaan painettua alaspäin (Naaman, 2004, s. 11).4	
Kuva 4.	Esimerkki ontelolaatan kantokykykäyrästä (Parma Oy)	5
Kuva 5.	Tartunnaton jänne (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 17)	6
Kuva 6.	Erilaisia ankkureita (Naaman, 2004, s. 17).....	6
Kuva 7.	Erilaisia ankkureita (BBR VT International Ltd, 2020a, s. 16).....	7
Kuva 8.	Tyypillisen betoniteräksen jännitys-venymäkuvaaja (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 39)	9
Kuva 9.	Betoniteräksen idealisoitu jännitys-venymäkuvaaja ja mitoituskuvaajat (veto- ja puristusjännitystilat). (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 41)	10
Kuva 10.	Jänneteräksen tyypillinen jännitys-venymäyhteyden kuvaaja (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 13).....	11
Kuva 11.	Jänneteräksen idealisoitu jännitys-venymäkuvaaja ja mitoituskuvaajat, vetojännitys ja venymä positiivisina. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 14).....	12
Kuva 12.	Betonin kimmoinen kokoon puristuma jännittämisen yhteydessä. (a) Vapaa punos. (b) Jännitetty punos. (c) Kuormittamaton betoni. (d) Betonin kokoon puristuma. (Naaman, 2004, s. 465)	17

Kuva 13. Kitkan ja kaarevuuden vaikutus jännitykseen (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 22)	19
Kuva 14. Lukitusliukuman sisäisen energian häviö ja vaikutusalue (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 79)	20
Kuva 15. Lukitusliukuman sisäisen energian häviö ja vaikutus lyhyissä rakenteissa (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 79).....	21
Kuva 16. Punoksen sidonta free tendon layoutissa (Maier, 2002, s. 7)	25
Kuva 17. Punosgeometria yksiaukkoisessa rakenteessa a) kaksoisparaabeli, b) free tendon layout c) yksinkertaistettu.....	26
Kuva 18. Esimerkkejä kuormien tasapainottamisesta jännittämällä (Naaman, 2004, s. 122)	28
Kuva 19. Paraabeligeometria	29
Kuva 20. Yksinkertaistettu punosgeometria	29
Kuva 21. Free tendon layoutin mukainen punosgeometria	30
Kuva 22. Jänteen muoto ja ohjausvoima keskituella.....	31
Kuva 23. Jänteen muoto ja ohjausvoima reunatuella	31
Kuva 24. Esimerkkikohteen tasopiirustus	33
Kuva 25. Jatkuvien laattojen mittasuositukset (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 45)34	
Kuva 26. Puristusraudoittamattoman poikkileikkauksen taivutuskestävyys tartunnattomissa jännerakenteissa (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 28)	40
Kuva 27. Paraabeligeometrian punosgeometria laskelmissa	42
Kuva 28. Free tendon layoutin punosgeometria laskelmissa	42
Kuva 29. Yksinkertaistetun geometrian punosgeometria laskelmissa	42
Kuva 30. Ohjausvoimat ja niistä aiheutuva momenttikuvaaja paraabeligeometriassa .	45
Kuva 31. Ohjausvoimat ja niistä aiheutuva momenttikuvaaja free tendon layoutissa ..	45
Kuva 32. Ohjausvoimat ja niistä aiheutuva momenttikuvaaja yksinkertaistetussa geometriassa	46
Kuva 33. Rakennemalli Adaptissa	48
Kuva 34. Ohjausvoimat free tendon layoutissa.....	51
Kuva 35. Free tendon layout, ohjausvoimat tasaisena kuormana	52
Kuva 36. Free tendon layout 2, ohjausvoimat tuen vieressä.....	52
Kuva 37. Free tendon layout 3, ohjausvoimat kolmannespisteessä	52

Kuva 38. Erään jännemenetelmän ohje sidonnasta free tendon layoutissa	57
Taulukko 1. Betonin materiaaliominaisuudet (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 30).....	7
Taulukko 2. Sisäisten ankkurijänteiden ja ulkopuolisten tartunnattomien jänteiden kitkakertoimet (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 79)	20
Taulukko 3. Vastakaarilla varustetun punoksen korkeusasema ja ohjausvoimat (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 68).....	29
Taulukko 4. Yksinkertaistetun punosgeometrian punoksen korkeusasema ja ohjausvoimat	30
Taulukko 5. Punoksen korkeusasemat ja ohjausvoimat keskituella free tendon layoutissa (Maier, 2002, s. 4)	30
Taulukko 6. Punoksen korkeusasemat ja ohjausvoimat reunatuella free tendon layoutissa (Maier, 2002, s. 4)	31
Taulukko 7. Kuormat ja yhdistelykertoimet	35
Taulukko 8. Kuormitusyhdistelmät.....	35
Taulukko 9. Halkeamaleveyksien raja-arvot W_{max} [mm] (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 32)	36
Taulukko 10. Kitka- ja lukitushäviöt	43
Taulukko 11. Keskimääräinen jännevoima häviöiden jälkeen	43
Taulukko 12. Ohjausvoimat tuilla paraabeligeometriassa ja free tendon layoutissa	44
Taulukko 13. Ohjausvoimat kentässä paraabeligeometriassa ja free tendon layoutissa	44
Taulukko 14. Jännitykset	47
Taulukko 15. Jännityserot käsin lasketun ja ohjelmiston välillä, paraabeligeometria ...	49
Taulukko 16. Jännityserot käsin lasketun ja ohjelmiston välillä, free tendon layout.....	50
Taulukko 17. Erot free tendon layoutissa eri ohjausvoima-asetteluilla	53
Taulukko 18. Jännityserot käsin lasketun ja ohjelmiston välillä, yksinkertaistettu geometria	54
Kaava 1. Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	8
Kaava 2. Betonin vetolujuuden mitoitusarvo.....	8
Kaava 3. Teräksen myötölujuuden mitoitusarvo.....	10
Kaava 4. Suurin jännettä kuormittava voima	13

Kaava 5. Alkujännevoima	14
Kaava 6. Jännevoiman keskimääräinen arvo.....	15
Kaava 7. Jänneteräksen myötölujuuden suunnitteluarvo	15
Kaava 8. Betonin kimmoisesta kokoonpuristumisesta aiheutuva häviö	17
Kaava 9. Ankkurijänteen kitkahäviö.....	18
Kaava 10. Ulkoisen energian menetys	21
Kaava 11. Sisäisen energian menetys x:n funktiona.....	21
Kaava 12. Lukitusliukuman vaikutusalue	22
Kaava 13. Lukitushäviön suuruus.....	22
Kaava 14. Jännevoiman suuruus välittömien häviöiden jälkeen.....	23
Kaava 15. Keskimääräinen jännevoima rakenteessa.....	23
Kaava 16. Yksinkertaistettu laskentatapa ajasta riippuvien häviöiden määrittämiseksi (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 79).....	24
Kaava 17. Ohjausvoiman suuruus kohdassa "x" (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 110).	27
Kaava 18. Poikkileikkauksen halkeilukestävyys	37
Kaava 19. Jännevoiman mitoitusarvo	37
Kaava 20. Jänteen pituuden muutoksesta aiheutuva jännityslisäys kentässä.....	38
Kaava 21. Jänteen pituuden muutoksesta aiheutuva jännityslisäys tuella.....	38
Kaava 22. Hyperstaattinen momentti (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 110)	41

Liitteet

Liite 1	Laatan mitoitus, paraabeligeometria
Liite 2	Laatan mitoitus, free tendon layout
Liite 3	Laatan mitoitus, yksinkertaistettu geometria

1 Johdanto

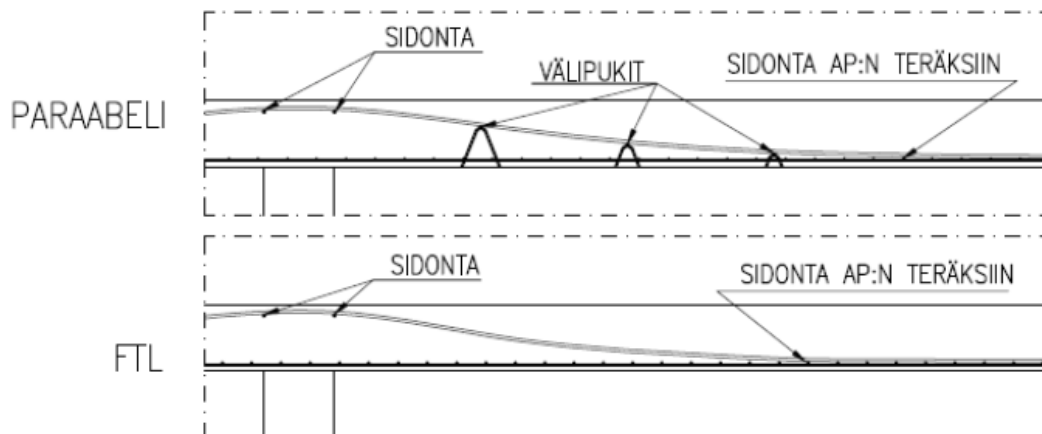
Opinnäytetyö tehdään Vahanen Suunnittelupalvelut Oy:lle. Vahanen Suunnittelupalvelut Oy tarjoaa korjaus- ja uudisrakentamisen suunnittelupalveluita ympäri Suomen.

Jälkijännitettyjen rakenteiden työmaatekniikka on haastavaa ja monimutkaista.

Laattarakenteissa jokainen jänne asennetaan paraabelin muotoon raudoituspukeilla, joita on useita erilaisia ja kokoisia paraabelin kohdasta riippuen. Jänneet tämän jälkeen sidotaan raudoituspukkeihin kiinni 1,0–1,3 m välein.

Klemens Maier Itävallasta kyseenalaisti 90-luvulla jänneiden sidonnan. Hän kehitti menetelmän, jolla jänneet voitiin kiinnittää raudoitteisiin vain kaaren ylä- ja alaosasta ja tällä välillä jänne roikkuu vapaana eli ”köytenä”. Tämä tekniikka tunnetaan nimellä free tendon layout.

Kuva 1. Paraabelinen ja free tendon layout punosgeometria



Työmailla on toivottu free tendon layoutin käyttöönottoa suunnittelussa, jotta työmaan työmäärä vähenisi huomattavasti. Samalla rakenteen hintaa saataisi pudotettua ja aikaa menisi vähemmän. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan free tendon layoutin eroja perinteiseen paraabeligeometriaan sekä yksinkertaistettuun geometriaan verrattuna ja selvitetään, millaisia asioita suunnittelussa on otettava huomioon free tendon layoutia käytettäessä.

Työ rajataan koskemaan matalia (alle 450 mm paksuja) laattarakenteita sekä yhtä 15,7 mm rasvapunostyyppiä. Tarkastelu tehdään käyttämällä esimerkkikohdetta.

2 Tartunnattomilla jänteillä jännitetyt rakenteet

2.1 Jännitettyjen betonirakenteiden historia

Alla olevat kappaleet on vapaasti suomennettu lähteestä (Naaman, 2004, ss. 4–5).

Ensimmäinen sovellus jännitetyistä rakenteista on ilmeisesti kehitetty vuonna 1886 P.H. Jacksonin toimesta Kaliforniassa Yhdysvalloissa. Hän sai patentin terästankojen kiristämismenetelmälle, jolla sidottiin betonikappaleita puristuskaariksi.

1888 saksalainen C.E.W. Doehring sai patentin betonilaatan jännittämisestä metallilangoilla. Tuolloin saatavilla olevan teräksen alhainen myötölujuus aiheutti ongelmia jännitetyn rakenteen toiminnassa, teräkseen ei saatu tarpeeksi suurta jännitystä. Jännitys rakenteessa väheni huomattavasti tai jopa katosi jännityshäviöiden, viruman ja betonin kutistumisen vuoksi. Vuonna 1908 Yhdysvalloissa G.R. Steiner ehdotti ongelman ratkaisuksi uudelleen jännittämistä. Samaan aikaan esimerkiksi saksalaiset tutkijat J. Mandl ja M. Koenen yrittivät selvittää jännityshäviöiden lähteitä ja arvioida niiden ajallista kehitystä.

Jännityshäviöiden vaikutukset ensimmäisenä ymmärsi ranskalainen Eugene Freyssinet. Kerättyään kokemusta kaarisiltojen rakentamisesta, hän ehdotti jännebetonirakenteissa käytettäväksi korkealujuusterästä, jolla on korkea venymiskapasiteetti. Vuonna 1940 hän esitteli kiila-ankkuroitavan kaapelin, jossa oli 12 vaijeria. Tähän perustuvia järjestelmiä käytetään edelleen. Tällä tavalla suunniteltiin useita siltoja Ranskassa ja Euroopassa ja jännitetystä betonista tuli kilpailija rakenneteräkselle.

Tämän jälkeen jännebetonirakenteiden kehittämistä jatkettiin useiden eri tutkijoiden toimesta useissa eri maissa. Nykyään jännebetonin käyttö on laajalti hyväksyttyä ja käytettyä. Vuosikymmenien kokemus on osoittanut jännebetonirakenteet toimivaksi ja nykyään sitä käytetään monissa eri paikoissa, mm. silloissa, palkeissa ja tunneleissa.

2.2 Jännitetyt betonirakenteet

2.2.1 Esijännitetty rakenne

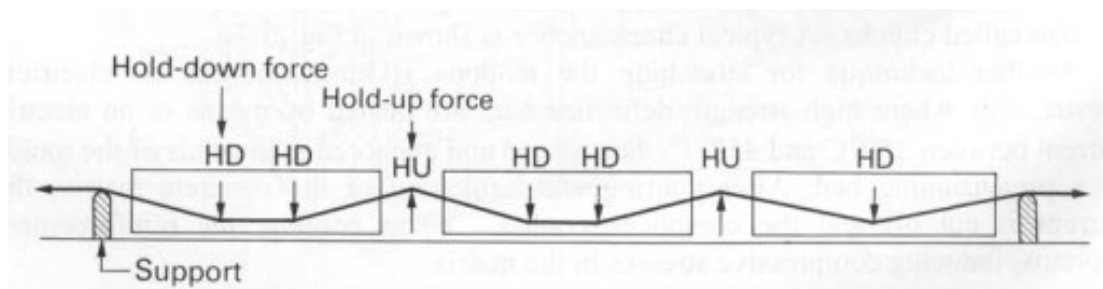
Esijännitettyssä rakenteessa jänneteräkset on jännitetty ennen betonin valua hydraulisilla tunkeilla ja kiinnitetty valumuottiin. Jänneteräkset venytetään haluttuun pituuteen, jonka jälkeen betoni valetaan. Valun kovettuttua terästen ankkurointi vapautetaan ja teräs yrittää lyhentyä alkuperäiseen pituuteensa. Jänneteräksen ja betonin liitos yrittää vastustaa teräksen lyhentymistä ja aiheuttaa betoniin puristusjännityksen. (Naaman, 2004, ss. 9-10)

Esijännitys voidaan tehdä myös venyttämällä teräksiä sähkötermisellä tai sähköisellä esijännittämällä. Tällöin korkealujuusteräksestä muotoillut tangot lämmitetään sähkövirralla 250–450°C ja ankkuroidaan päistään. Betonin valun ja kovettumisen jälkeen sähkövirta katkaistaan ja teräs jäähtyy. Jäähtyessään teräs lyhenee aiheuttaen puristusjännityksiä betoniin. (Naaman, 2004, ss. 9-10)

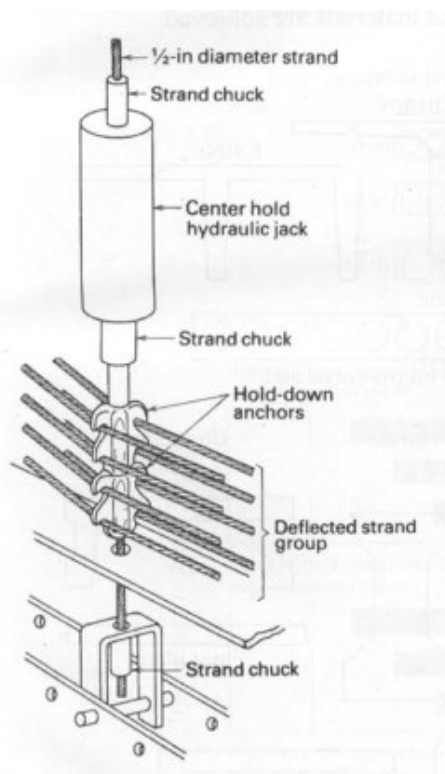
Sähkötermistä esijännitystä on käytetty Neuvostoliitossa sekä Itä-Euroopassa. Tekniikkana se ei ole kovin käytetty johtuen ylimääräisistä turvallisuusvaatimuksista ja sillä saavutetaan melko alhaisia jännityksiä. (Naaman, 2004, ss. 9–10)

Riippuen jännitettävästä rakenteesta jänneteräs voi olla suora tai kaareva. Suoria teräksiä käytetään mm. ontelo- ja kuorilaatoissa. Kaareva muoto saadaan aikaiseksi painamalla ja vetämällä teräksiä haluttuun muotoon. Alla kuva kaarevasta jänneteräksen muodosta sekä laitteistosta, jolla terästä saadaan painettua alaspäin.

Kuva 2. Esijännitetty jänneteräs kaarevalla muodolla (Naaman, 2004, s. 10).

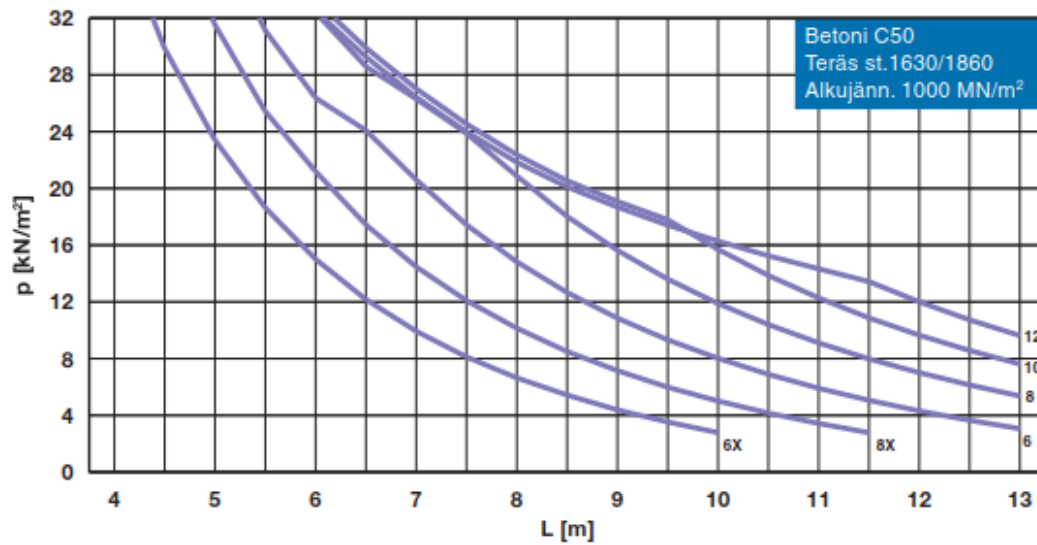


Kuva 3. Laitteisto, jolla jänneterästä saadaan painettua alaspäin (Naaman, 2004, s. 11).



Esijännitystä käytetään yleensä esivalmistetuissa jännitettyissä elementtirakenteissa. Esimerkiksi ontelolaatat ovat hyvä esimerkki pitkälle mekanisoidusta esijännitetystä elementtirakenteesta. Jänneteräkset jännitetään valupedin matkalta ja ankkuroidaan valupedin molemmissa päissä. Tämän jälkeen betoni valetaan ja tehdään tarvittavat varaukset. Betonin kovettuttua teräkset vapautetaan ja ontelolaatat katkaistaan sopivan pituisiksi. Elementtejä voidaan tällöin valmistaa massatuotantona mutta eri pituisina ja eri varauksilla. Käyttämällä betonissa kiihdyttimiä päästään 24 tunnin tuotantonopeuteen ja olosuhteet sekä elementtien laatu on tehtaassa valvottua. Ontelolaatoille on kehitetty myös valmiita mitoituskäyriä, joiden perusteella suunnittelija voi valita kohteeseen sopivan ontelolaatan ilman erillistä mitoitusta. Tuotteen valmistaja tekee jänneteräksien lopullisen mitoituksen kohteen kuormien, jänneväljen ja ontelolaatan reikien perusteella.

Kuva 4. Esimerkki ontelolaatan kantokyvykäyrästä (Parma Oy)



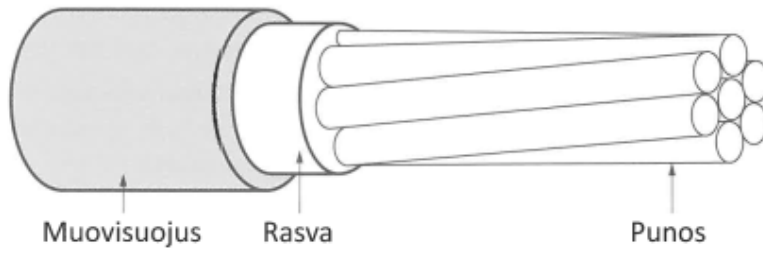
2.2.2 Jälkijännitetty rakenne

Jälkijännitetyissä rakenteissa jänneteräkset jännitetään betonivalun kovettumisen jälkeen. Jälkijännitetyissä rakenteissa voidaan käyttää tartunnallisia tai tartunnattomia jänteitä.

Tartunnallisissa jänteissä käytetään umpinaisia metallisia tai muovisia putkia, jonka sisällä teräs kulkee. Putket asennetaan paikoilleen ennen betonin valua ja teräs voi olla putken sisällä valmiiksi tai se voidaan asentaa betonivalun kovettuttua. Betonin saavutettua riittävä lujuus, jänneteräkset jännitetään haluttuun jännitykseen ja ankkuroidaan. Tämän jälkeen teräksen ja putken väli injektoidaan laastilla, jolla varmistetaan teräksen ja betonin välinen tartunta. Laasti-injektointi myös vähentää rakenteen halkeilua ja jänneteräksen korroosioriskiä. (Naaman, 2004, s. 16)

Mikäli putken ja jänneteräksen välissä on rasvakerros, puhutaan tartunnattomista jänteistä. Tällöin teräksen jännevoima siirtyy betoniin vain ankkureiden välityksellä ja teräksen ja betonin välillä ei ole tartuntaa. Työn suoritus tapahtuu samalla tavalla kuin tartunnallisilla jänteillä, mutta teräkset ovat valmiiksi putken sisällä. Tätä tekniikkaa on laajasti käytetty asuintalojen ja parkkitalojen laatoissa, joissa on useita jännevälejä, sen rakenteellisen tehokkuuden ja kustannustehokkuuden vuoksi. (Naaman, 2004, s. 16)

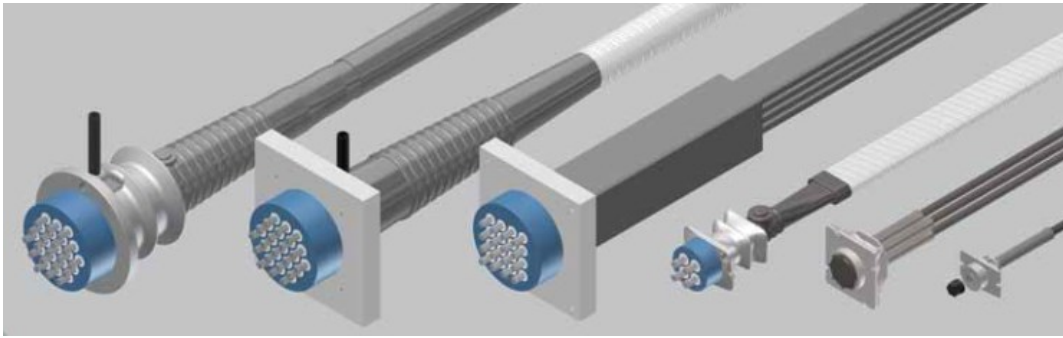
Kuva 5. Tartunnaton jänne (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 17)



Kuva 6. Erilaisia ankkureita (Naaman, 2004, s. 17)



Kuva 7. Erilaisia ankkureita (BBR VT International Ltd, 2020a, s. 16)



3 Materiaaliominaisuudet

3.1 Betoni

Betonin puristuslujuus osoitetaan lujuusluokkien avulla, jotka liittyvät standardin EN 206-1 mukaiseen lieriölujuuden f_{ck} tai kuutiolujuuden $f_{ck,cube}$ (5% fraktiilia vastaavaan) ominaisarvoon. Lieriölujuutta $f_{ck,cube}$ vastaavat ominaislujuudet ja suunnitteluun tarvittavat mekaaniset ominaisuudet esitetään taulukossa alla. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 28)

Taulukko 1. Betonin materiaaliominaisuudet (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 30)

Betonin lujuusluokka															Analyttinen yhteys/viittaus
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5 % fraktiili
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95 % fraktiili
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)^{0,3}]$ (f_{cm} MPa)
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	ks. kuvaa 3.2 $\epsilon_{c1}(\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	ks. kuvaa 3.2 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu1}(\text{‰}) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	ks. kuvaa 3.3 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c2}(\text{‰}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ks. kuvaa 3.3 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu2}(\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c3}(\text{‰}) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu3}(\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo määritellään kaavalla:

Kaava 1. Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C$$

missä

f_{cd}	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo [MPa]
α_{cc}	kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät
f_{ck}	betonin puristuslujuuden ominaisarvo [MPa]
γ_C	betonin osavarmuusluku

Betonin vetolujuuden mitoitusarvo saadaan alla olevasta kaavasta:

Kaava 2. Betonin vetolujuuden mitoitusarvo

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{ctk0,05} / \gamma_C$$

f_{ctd}	betonin vetolujuuden mitoitusarvo [MPa]
α_{ct}	kerroin, jonka avulla otetaan huomioon vetolujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta riippuvat epäedulliset tekijät
$f_{ctk0,05}$	betonin vetolujuuden ominaisarvo [MPa]

Kutistuminen ja viruma ovat betonin ominaisuuksia, jotka ovat ajasta riippuvaisia. Ne ovat myös riippuvaisia ympäristön kosteudesta, rakenneosan mitoista ja betonin koostumuksesta. Virumiseen vaikuttaa myös betonin kovettumisaste kuormituksen alkaessa, ja se riippuu kuormituksen kestosta ja suuruudesta.

Kokonaiskutistuminen koostuu kahdesta osasta, sisäisestä kutistumasta ja kuivumiskutistumasta. Kuivumiskutistuma riippuu veden siirtymisestä kovettuneen betonin läpi ja kehittyy siksi hitaasti. Betonin kovettuessa kehittyy sisäinen kutistuma, siksi merkittävä osa kutistumisesta kehittyy valua seuraavina ensimmäisinä päivinä. Sisäinen

kutistuma on suoraan verrannollinen betonin lujuuteen. Se on tarpeen huomioida erityisesti silloin, kun uutta betonia valetaan kovettunutta betonia vasten.

Kutistumisen ja viruman vaikutukset otetaan yleensä huomioon tarkasteltaessa käyttörajatiloja. Murtorajatiloissa vaikutukset otetaan huomioon vain, kun niiden vaikutukset ovat merkittäviä. Mikäli rakenneosien sitkeys ja kiertymiskyky ovat riittäviä, näitä vaikutuksia ei tarvitse ottaa huomioon.

Kun viruminen otetaan huomioon, sen vaikutukset määritetään mitoituksen yhteydessä sisällyttämällä se kuormien pitkäaikaisyhdistelmään tarkasteltavasta mitoitusilanteesta riippumatta. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, ss. 24, 31 ja 33)

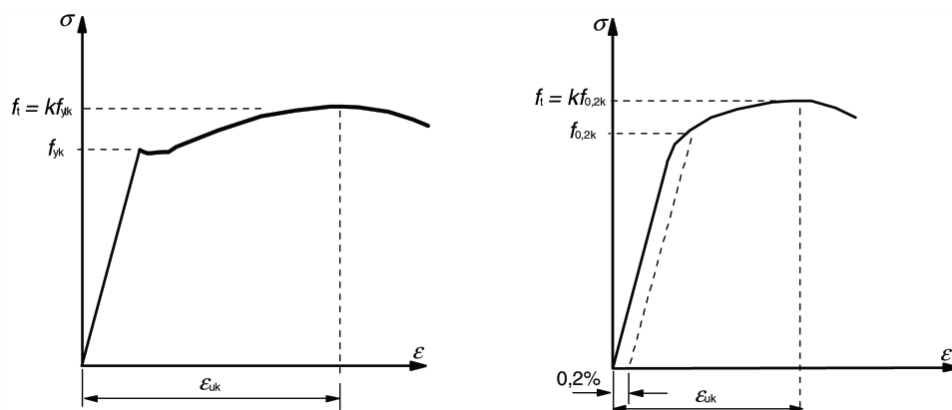
3.2 Betoniteräs

Betoniteräksen myötölujuus f_{yk} (tai $0,2$ raja, $f_{0,2k}$) määritellään tangon myötökuorman ominaisarvona jaettuna nimellisellä poikkileikkausalalla. Vetolujuus f_{tk} määritellään tangon kestäjän suurimman vetovoiman ominaisarvona jaettuna nimellisellä poikkileikkausalalla.

Raudoituksen sitkeys määritellään vetolujuuden ja myötölujuuden suhteen $(f_t/f_y)_k$ ja suurinta voimaa vastaavan venymän ominaisarvon ϵ_{uk} avulla. Sitkeyden tulee olla riittävä. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 39)

Kuva 8 esittää tyypillisen kuumavalssatun ja kylmämuovatus teräksen jännitys-venymäkuvaajia.

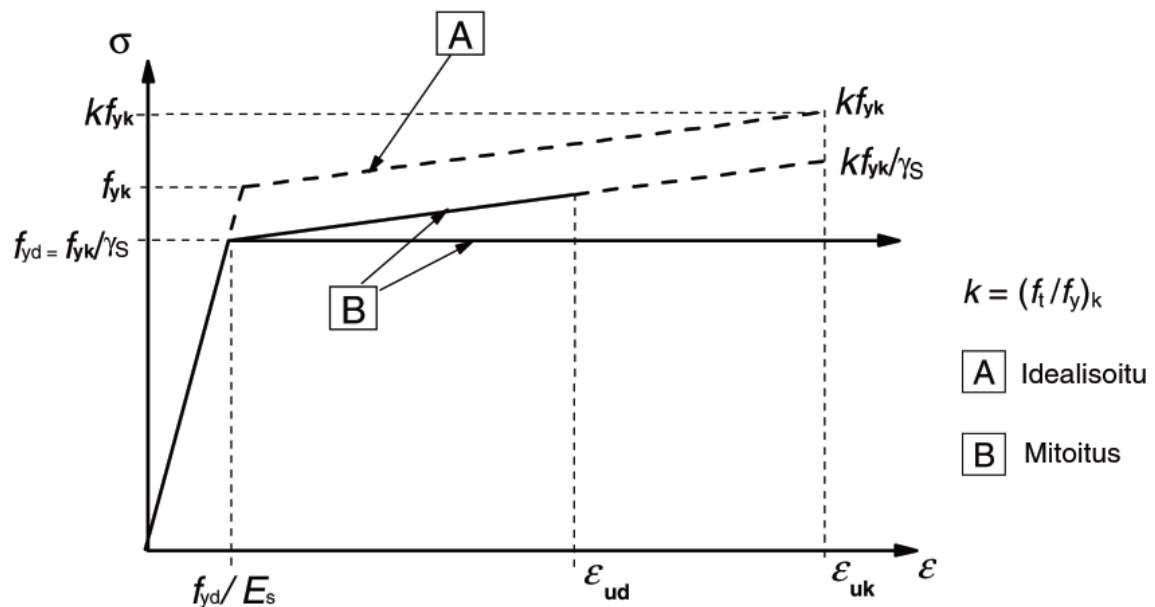
Kuva 8. Tyypillisen betoniteräksen jännitys-venymäkuvaajia (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 39)



Mallina jännitys-venymäyhteydelle voidaan käyttää jompaakumpaa seuraavista:

- jännitys nousee muodonmuutoksen sallittuun ylärajaan ϵ_{ud} asti ($\epsilon_{ud}=0,9\epsilon_{uk}$). Jännitys määritetään Kuva 8 suorasta, jossa muodonmuutosta ϵ_{uk} vastaa jännitys kf_{yk}/γ_s , missä $k=(f_t/f_y)_k$. Lujuussuhteen $(f_t/f_y)_k$ arvo esitetään SFS-EN 1992-1-1+A1+AC liitteessä C.
- jännitys pysyy vakiona myötörajan saavuttamisen jälkeen, jolloin muodonmuutoksen suuruutta ei tarvitse rajoittaa. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 41)

Kuva 9. Betoniteräksen idealisoitu jännitys-venymäkuvaaja ja mitoituskuvaajat (veto- ja puristusjännitystilat). (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 41)



Betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo saadaan kaavasta:

Kaava 3. Teräksen myötölujuuden mitoitusarvo

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

missä

f_{yd}	betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo [MPa]
f_{yk}	betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo [MPa]
γ_s	betoniteräksen osavarmuusluku

3.3 Jännepunos

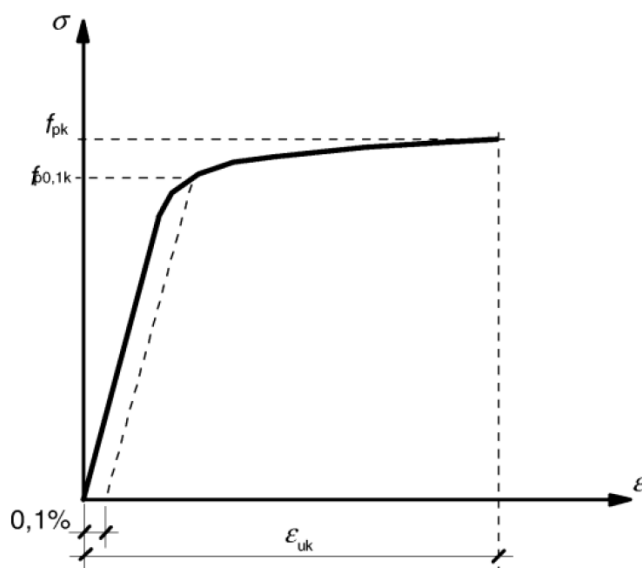
3.3.1 Jännepunoksen osavarmuusluvut

Jännepunokselle käytetään osavarmuuslukuna $\gamma=1,15$ normaalisti vallitsevissa ja tilapäisissä tilanteissa. Mikäli käytössä on SFS-EN 13670 mukainen toteutusluokka 3 ja toleranssiluokka 2 sekä betonin valmistuksen laadunvalvonta on varmennettu, voidaan käyttää pienennettyä osavarmuus-lukua $\gamma=1,10$. Onnettomuustilanteessa käytetään arvoa $\gamma=1,0$. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 10)

3.3.2 Lujuus

Jänneteräksille määritetään kaksi eri lujuutta. 0,1-raja ($f_{p0,1k}$) määritellään jakamalla 0,1 %:n pysyvää muodonmuutosta vastaava kuorman ominaisarvo nimellispoikkileikkauksella, eli jänneteräs saavuttaa 0,1 % pysyvän muodonmuutoksen. Vetolujuuden vaadittava arvo (f_{pk}) määritetään jakamalla vetävän normaalivoiman ylärajan ominaisarvo nimellispoikkileikkauksella. Jänneteräksen tyypillinen jännitys-venymäyhteyden kuvaaja on esitetty alla olevassa kuvassa. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 12)

Kuva 10. Jänneteräksen tyypillinen jännitys-venymäyhteyden kuvaaja (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 13)

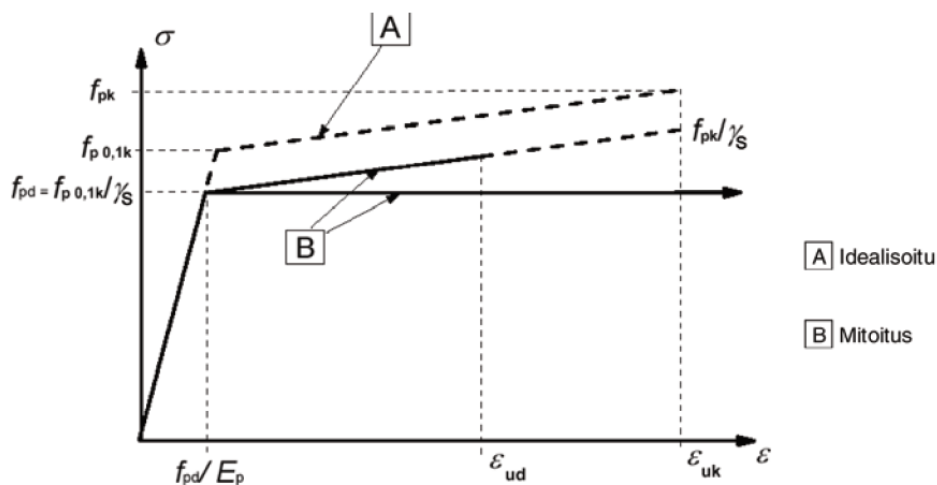


3.3.3 Mitoitusoletukset

Rakenneanalyysi suoritetaan jänneteräksen nimellisen poikkileikkausalan, lujuuksien sekä suurinta voimaa vastaavan venymän ominaisarvojen $f_{p0,1k}$, f_{pk} ja ϵ_{uk} perusteella. Punosten kimmokertoimen E_p mitoitusarvoksi voidaan olettaa 195 GPa, todellinen arvo voi vaihdella valmistusmenetelmästä riippuen 180...210 GPa. Asianmukainen arvo esitetään toimituserää seuraavissa koetodistuksissa. Näiden arvojen voidaan olettaa esiintyvän jänneteräksen lämpötilavälillä -40...+100 °C valmiissa rakenteessa. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 14)

Teräksen jännityksen mitoitusarvona f_{pd} käytetään arvoa $f_{p0,1k}/\gamma_s$, katso Kuva 11. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 14)

Kuva 11. Jänneteräksen idealisoitu jännitys-venymäkuvaaja ja mitoituskuvaajat, vetojännitys ja venymä positiivisina. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 14)



Mitoitettaessa poikkileikkauksia, voidaan käyttää jompaakumpaa jännitysmallia (Kuva 11).

- jännitys nousee venymän sallittuun ylärajaan ϵ_{ud} asti, malli voi perustua todelliseen tunnettuun jännitys-venymäyhteyteen, kun myötöjännitys pienennetään Kuva 11 kanssa vastaavasti.
- plastinen jännitys on vakio ilman venymärajoitusta
- muodonmuutoksen ϵ_{ud} yläraja on 2 % ja $f_{p0,1k}/f_{pk} = 0,9$.

Mikäli jänneteräksen myötölujittumista hyödynnetään mitoituksessa, tulee jänneteräksen valmistajalta selvittää todellinen murtovenymä ϵ_{uk} . Murtovenymälle käytetään arvoa 8,0 % jos tämä ei ole mahdollista. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 14)

3.3.4 Jännittämisvoima

Suurin jännettä kuormittava voima, P_{max} (jännittämisen aikainen, jänteen aktiivisessa päässä vaikuttava voima) saa olla enintään:

Kaava 4. Suurin jännettä kuormittava voima

$$P_{max} = A_p \sigma_{p,max}$$

missä

P_{max} suurin jännettä kuormittava voima [kN]

A_p jänteen poikkileikkauksen ala [mm²]

$\sigma_{p,max}$ jänteeeseen vaikuttava suurin jännitys = $\min\{0,8f_{pk}; 0,9f_{p0,1k}\}$ [MPa]

Jos tunkin voima pystytään mittaamaan ± 5 %:n tarkkuudella jännittämisvoiman loppuarvosta, sallitaan ylijännittäminen. Tällaisessa tapauksessa suurinta jännittämisvoimaa voidaan suurentaa arvoon $0,95f_{p0,1k}A_p$ (esim. pitkässä jänneprofiilissa esiintyvä odottamattoman suuri kitka). (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 19)

3.3.5 Jännevoima

Jännevoiman osavarmuusluvulle $\gamma_{p, fav}$ voidaan normaalisti vallitsevissa ja tilapäisissä mitoitusilanteissa käyttää arvoa 1,0. Yleensä ei etukäteen tiedetä sekundäärimomentin suuntaa, ja se voi olla rakenteen eri kohdissa edullinen tai epäedullinen. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 10)

Jännevoiman osavarmuuslukuna voidaan käyttää arvoa 0,9 tai 1,1 mikäli koko rakenteen tarkastelussa tarvitaan erilaista osavarmuuslukua edullisille ja epäedullisille vaikutuksille.

Paikallisia alueita, esimerkiksi ankkurialueita, tarkasteltaessa käytetään arvoa $\gamma_{p, fav} = 1,2$.
(Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 10)

SFS-EN 1992-1-1+A1+AC s.77 mukaan tietyllä hetkellä t ja etäisyydellä (tai kaaren pituudella) x jänteen aktiivisesta päästä vallitseva keskimääräinen jännevoima $P_{m,t}(x)$ on jänteen aktiiviseen päähän vaikuttava maksimivoima P_{max} , josta on vähennetty välittömät ja ajasta riippuvat häviöt (katso luku 4).

Välittömästi betonin jännittämisen ja ankkuroinnin jälkeen (ankkurijänne) tai jännevoiman laukaisun jälkeen (tartuntajänne) vaikuttava alkujännevoima $P_{m0}(x)$ hetkellä $t=t_0$, saadaan vähentämällä jännittämishetkellä vallitsevasta voimasta P_{max} alkuhäviöt $\Delta P_i(x)$.

Alkujännevoima saa enintään olla:

Kaava 5. Alkujännevoima

$$P_{m0}(x) = A_p \cdot \sigma_{pm0}(x)$$

missä

$P_{m0}(x)$	alkujännevoima [kN]
$\sigma_{pm0}(x)$	jänneteräksen jännitys välittömästi jännittämisen tai jännevoiman siirron jälkeen [MPa] = $\min \{k_7 f_{pk}; k_8 f_{p0,1k}\}$

Käytettävät kertoimien k_7 ja k_8 arvot kussakin maassa voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Suositusarvo kertoimelle k_7 on 0,75 ja kertoimelle k_8 on 0,85.

Määritettäessä välittömiä häviöitä $\Delta P_i(x)$ otetaan huomioon luvun 4 mukaiset häviöt.

Keskimääräinen jännevoiman arvo $P_{m,t}(x)$ hetkellä $t > t_0$ määritetään jännemenetelmän mukaisesti. Välittömien häviöiden lisäksi huomioon otetaan ajasta riippuvat jännevoiman häviöt $\Delta P_{c+s+r}(x)$ (kts. luku 4.4), jotka johtuvat betonin virumisesta, kutistumisesta ja jänneteräksen pitkäaikaisesta relaksaatiosta. Keskimääräinen arvo jännevoimalle (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 77):

Kaava 6. Jännevoiman keskimääräinen arvo

$$P_{m,t}(x) = P_{m0}(x) - \Delta P_{c+s+r}(x)$$

3.3.6 Jännepunoksen myötölujuuden suunnitteluarvo

Jänneteräksen myötölujuuden suunnitteluarvo saadaan alla olevasta kaavasta (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 44):

Kaava 7. Jänneteräksen myötölujuuden suunnitteluarvo

$$f_{pd} = f_{pk} / \gamma_s$$

missä

f_{pd} jänneteräksen myötölujuuden suunnitteluarvo [MPa]

f_{pk} jänneteräksen myötölujuuden ominaisarvo [MPa]

γ_s betoni- ja jänneteräksen osavarmuusluku

3.4 Ankkurit ja jatkoskappaleet

Ankkureilla siirretään jänteissä vaikuttavat voimat betoniin ankkurointialueella, ja jatkoskappaleilla eli muhveilla yhdistetään jänteen osat yhtenäiseksi jänteeeksi.

Käytettävällä jännemenetelmällä tulee olla asianomainen eurooppalaisen arvioinnin kansallinen tyyppihyväksyntä tai rakennuspaikkakohtainen selvitys. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 15)

Ankkureilla ja jatkoskappaleilla tulee olla riittävät lujuus-, sitkeys ja väsymisominaisuudet ja niiden tulee täyttää suunnitelmien vaatimukset. Tämä tarkoittaa sitä, että komponenttien muoto- ja materiaaliominaisuuksilla tulee olla asianomainen eurooppalainen tekninen hyväksyntä ja niiden tulee kestää yhtä paljon kuin jänneteräs. Lisäksi jänneteräkseen ei saa aiheutua murtumia ankkurin tai jatkoskappaleen liitoksessa ja kappaleiden murtovenymän tulee olla ≥ 2 %. Ankkuria ei saa sijoittaa alueelle, jossa esiintyy muista syistä suuria

jännityksiä ja ankkurin ja jatkoskappaleiden komponenttien väsymisominaisuudet tulee olla asianomaisen eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaisia. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 15)

Jotta jännevoima voi siirtyä betoniin, ankkurointialueiden- ja laitteiden lujuuksien tulee olla riittäviä. Ankkuroinnin toimivuus ei saa huonontua ankkurointialueelle mahdollisesti muodostuvien halkeamien vuoksi. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 16)

Jatkoskappaleita ei yleensä sijoiteta välitukien läheisyyteen ja samassa poikkileikkauksessa voidaan jatkaa 50 % tai alle jänneteräksistä. Mikäli voidaan osoittaa, että suurempi osuus ei aiheuta rakenteen varmuuden heikentymistä, voidaan samassa poikkileikkauksessa jatkaa yli 50 % jänneteräksistä. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 148)

4 Jännityshäviöt

Jänteessä oleva voima ei ole sama koko rakenteen elinkaaren, ja tämä on otettava huomioon suunnittelussa. Useat seikat rakenteen elinkaaren aikana vaikuttavat jännevoiman pienenemiseen, vaikka ympäristö- ja kuormitusolosuhteet pysyisivät samoina. Jännityshäviöt jaetaan välittömiin (tapahtuvat heti jännittämisen jälkeen tai sen yhteydessä) ja pitkäaikaisiin tai ajasta riippuvaisiin jännityshäviöihin. Välittömiä jännityshäviöitä aiheuttavat

- betonin kimmainen kokoonpuristuma
- kitka
- ankkureiden lukitusliukuma (ankkurointihäviöt)

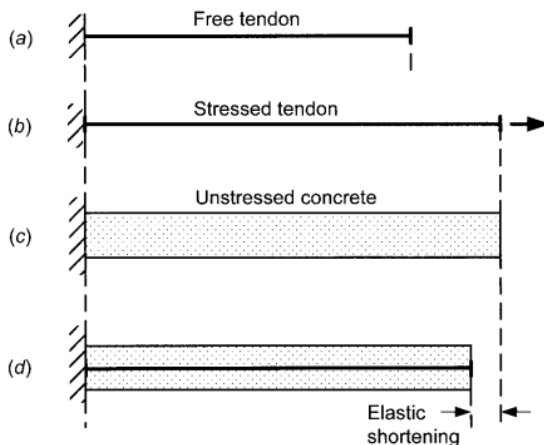
Pitkäaikaisia jännityshäviöitä aiheuttavat

- betonin kutistuma
- betonin viruma
- jännepunoksen relaksaatio

4.1 Betonin kimmoisesta kokoonpuristumisesta aiheutuvat häviöt

Kuva 12 esittää betonin kimmoista kokoonpuristumista. Jänneteräksen jännittäminen aiheuttaa betoniin puristavan normaalivoiman ja betoni puristuu kasaan Kuva 12 mukaisesti. Tämä vaikuttaa punosten pituuteen ja myös jännevoiman pienentymiseen. Jännevoiman häviö betonin kimmoisesta kokoonpuristumisesta tulisi määrittää betonin kimmokertoimen perusteella jännityshetkellä. (Naaman, 2004, s. 465)

Kuva 12. Betonin kimmainen kokoonpuristuma jännittämisen yhteydessä. (a) Vapaa punos. (b) Jännitetty punos. (c) Kuormittamaton betoni. (d) Betonin kokoonpuristuma. (Naaman, 2004, s. 465)



Betonin muodonmuutosta vastaava häviö jännevoimassa ja jänneterästen jännitysjärjestys tulee huomioida. Tämä häviö voidaan olettaa keskimääräiseksi häviöksi kullekin jänneteräkselle seuraavalla kaavalla (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 78):

Kaava 8. Betonin kimmoisesta kokoonpuristumisesta aiheutuva häviö

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \left[\frac{j^* \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} \right]$$

missä

ΔP_{el} betonin kimmoisesta kokoonpuristumisesta aiheutuva häviö [kN]

$\Delta \sigma_c(t)$ hetkellä t aiheutettu jännityksen muutos [MPa] jänneterästen painopisteessä

j	kerroin, jonka arvo on
	<ul style="list-style-type: none"> • $(n-1)/2n$ missä n on peräkkäin jännitettyjen samanlaisten jänneterästen lukumäärä. Likimääräistykseenä kertoimelle j voidaan käyttää arvoa 1/2 • 1 kun tarkastellaan jännittämisen jälkeen vaikuttamaan tulleiden pysyvien kuormien aiheuttamia muodonmuutoksia
E_p	jänneteräksen kimmokerroin [GPa]
$E_{cm}(t)$	betonin kimmokerroin jännityshetkellä [GPa]
A_p	jännepunosten pinta-ala [mm ²]

4.2 Kitkahäviöt

Kirjan BY69 s.22 (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017) mukaan ankkurijänteiden kitkahäviöt voidaan arvioida kaavalla:

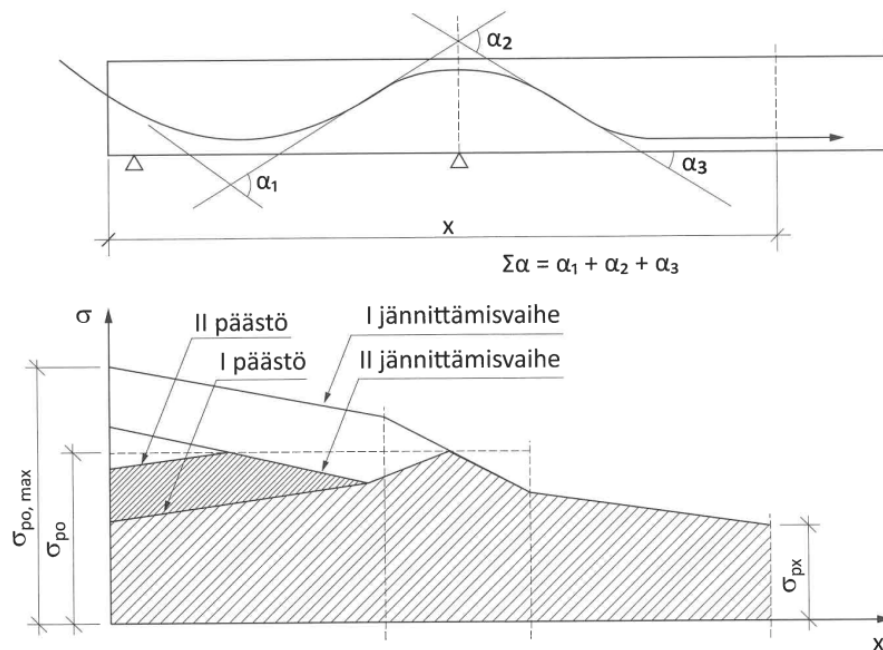
Kaava 9. Ankkurijänteen kitkahäviö

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{\max} * (1 - e^{-\mu(\theta + kx)})$$

missä

$\Delta P_{\mu}(x)$	ankkurijänteen kitkahäviö [kN]
θ	ankkurijänteen suunnan muutosten summa radiaaneina etäisyydellä x (riippumatta suunnasta tai merkistä) [rad]
μ	jänneteräksen ja sen suoja putken välinen kitkakerroin
k	suoja putken tukipisteiden välille syntyviä riippumia (nuolikorkeuksia) vastaavien suunnan muutosten aaltoisuusluku (pituusyksikköä kohti) [1/m]
x	jänneteräksiä pitkin mitattu etäisyys jännityspästä [mm]

Kuva 13. Kitkan ja kaarevuuden vaikutus jännitykseen (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 22)



Aaltoisuusluvun k ja kitkakertoimen μ arvot esitetään kansallisessa tuotehyväksynnässä tai eurooppalaisessa teknisessä arvioinnissa. Kitkakertoimen arvo riippuu jänneterästen ja suojausputken ominaisuuksista, jänneteräksen pituuden muutoksesta, jänneteräksen profiilista ja mahdollisesta ruosteesta. Aaltoisuusluvun arvo riippuu työnsuorituksen laadusta, käytettävän suojausputken tyypistä, jänneteräksen tukien välisestä etäisyydestä ja betonia valettaessa käytettävästä tärytysasteesta. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 22)

Kitkakertoimelle voidaan olettaa Taulukko 2 mukaiset arvot mikäli eurooppalaisessa teknisessä hyväksynnässä esitettävistä tiedoista ei ole käytettävissä. Samoin aaltoisuusluvun arvot ovat yleensä välillä $0,005 < k < 0,01$ metriä kohti. Ulkopuolisten jänteiden aaltoisuudesta aiheutuvat jännityshäviöt voidaan jättää huomiotta. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 78)

Taulukko 2. Sisäisten ankkurijänteiden ja ulkopuolisten tartunnattomien jänteiden kitkakertoimet (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 79)

	Sisäiset jänteet ¹⁾	Ulkopuoliset tartunnattomat jänteet			
		Terässuojaputki / voitelematon	HDPE- suojaputki / voitelematon	Terässuojaputki / voideltu	HDPE- suojaputki / voideltu
Kylmävedetty lanka	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Punos	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Harjapintainen tanko	0,65	–	–	–	–
Sileä pyöreä tanko	0,33	–	–	–	–

¹⁾ jänteille, jotka täyttävät noin puolet suojaputkesta

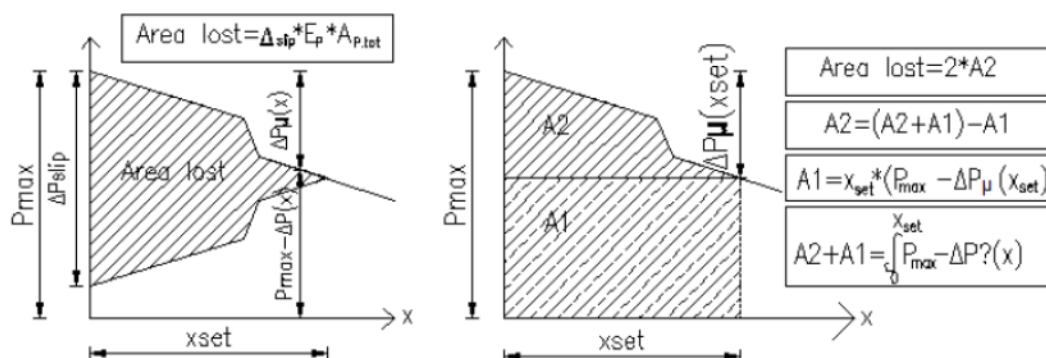
HUOM. HDPE = high density polyethene – suuritiheyspolyeteeni.

4.3 Ankkurointihäviöt

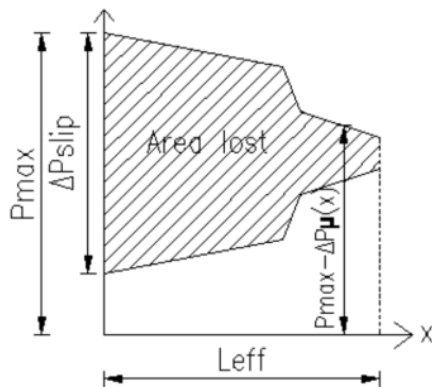
Ankkureiden kiilojen liukumisesta, jännittämisen jälkeisestä toiminnasta ja itse ankkurin muodonmuutoksesta aiheutuvat häviöt otetaan huomioon. Ankkureiden lukitusliukuma tapahtuu jännittämisen jälkeen punoksen aktiivipäässä. Punoksessa oleva voima siirtyy tunkilta ankkurille ja ennen kuin kiila lukittuu paikoilleen, se liikkuu jännevoiman vaikutuksesta.

Aktiivipään lukitusliukumasta aiheutuva lukitushäviö lasketaan käyttämällä energiaperiaatetta. Aktiiviankkurin liukumasta aiheutuva ulkoisen energian häviö tulee olla yhtä suuri kuin lukitusliukuman kitkasta aiheutuva sisäisen energian häviö. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 79)

Kuva 14. Lukitusliukuman sisäisen energian häviö ja vaikutusalue (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 79)



Kuva 15. Lukitusliukuman sisäisen energian häviö ja vaikutus lyhyissä rakenteissa (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 79)



Ulkoisen ja sisäisen energian menetykselle pätee Kaava 10 ja Kaava 11.

Kaava 10. Ulkoisen energian menetys

$$\Delta p_E = E_p * \Delta_{slip} * A_p$$

Kaava 11. Sisäisen energian menetys x:n funktiona

$$\Delta p_I(x) = 2 * \left[\int_0^x (P_{max} - \Delta P_{\mu}(x)) dx - (P_{max} - \Delta P_{\mu}(x)) * x \right]$$

Sisäisen ja ulkoisen energian menetys tulee olla tasapainossa, eli $\Delta p_I(x) = \Delta p_E$. Mikäli sisäisen energian menetys kappaleen päässä on pienempi kuin ulkoisen energian menetys, lukitushäviö ulottuu koko kappaleen yli. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 79)

Yksinkertaisissa rakenteissa, joissa ankkurointihäviö ei vaikuta koko jänteen matkalla, ja punosgeometria muodostuu vain yhdestä paraabelista, lukitusliukuman vaikutusalue voidaan laskea alla olevalla kaavalla. Muissa tapauksissa x_{set} voidaan ratkaista iteroimalla sisäisen ja ulkoisen energian menetyksen lausekkeita.

Kaava 12. Lukitusliukuman vaikutusalue

$$x_{\text{set}} = \sqrt{\frac{E_p * \Delta_{\text{slip}} * A_p}{\frac{\Delta P_{\mu}(L)}{L}}}$$

Lukitushäviön suuruus kappaleen päässä:

Kaava 13. Lukitushäviön suuruus

$$\Delta P_{\text{sl}} = 2 * \Delta P_{\mu}(L) + \frac{\Delta p_E - \Delta p_I(L)}{L}$$

missä

Δp_E	ulkoisen energian häviö [MNm]
P_{max}	jännitysvoima [kN]
E_p	jänneteräksen kimmokerroin [GPa]
A_p	jänneteräksen pinta-ala [mm ²]
Δ_{slip}	lukitusliukuma [mm]
Δp_I	sisäisen energian häviö [MNm]
P_{max}	maksimi jännitysvoima [kN]
$\Delta P_{\mu}(x)$	kitkahäviö [kN]
x	tarkasteltava pituus [mm]
x_{set}	lukitusliukuman vaikutusetäisyys [mm]
L	rakenteen jänneväli [mm]
ΔP_{sl}	lukitusliukuman jännityshäviö [kN]

Eurooppalaisessa teknisessä arvioinnissa tai kansallisessa tuotehyväksynnässä esitetään kiilojen liukumisen arvot. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 23)

Jännevoiman suuruus välittömien häviöiden jälkeen voidaan laskea Kaava 14 ja keskimääräinen jännevoima rakenteessa Kaava 15.

Kaava 14. Jännevoiman suuruus välittömien häviöiden jälkeen

$$P_{m0}(x) = P_{\max} - \Delta P_{el} - \Delta P_{sl} - \Delta P_{\mu}(x), x \leq x_{set}$$

$$P_{m0}(x) = P_{\max} - \Delta P_{el} - \Delta P_{\mu}(x), x \geq x_{set}$$

Kaava 15. Keskimääräinen jännevoima rakenteessa

$$P_m = \frac{1}{L} \int_0^L P_{m0}(x) dx$$

missä

P_m keskimääräinen jännevoima [kN]

L rakenteen pituus [mm]

P_{m0} jännevoiman suuruus välittömien häviöiden jälkeen [kN]

4.4 Ajasta riippuvaiset häviöt

SFS-EN 1992-1-1+A1+AC s.79 kohdan 5.10.6 mukaan huomioon ottamalla seuraavat jännityksen pienennystekijät a) ja b), voidaan laskea ajasta riippuvat häviöt

- a) muodonmuutoksen pienentymisestä johtuva, minkä syynä on pysyvien kuormien aiheuttamaa virumista ja kutistumista vastaava betonin muodonmuutos
- b) vetojännityksen aiheuttaman relaksaation tuottama jännityksen pieneneminen

Ajasta riippuvien häviöiden määrittämiseksi yksinkertaistettu laskentatapa kohdassa x pysyvien kuormien vaikuttaessa esitetään seuraavassa kaavassa:

Kaava 16. Yksinkertaistettu laskentatapa ajasta riippuvien häviöiden määrittämiseksi (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 79).

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \Delta \sigma_{p,c+s+r} = A_p \frac{\left(\varepsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta \sigma_{pr} + \left(\frac{E_p}{E_{cm}} \right) \phi(t, t_0) \sigma_{c,QP} \right)}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} Z_{cp}^2 \right) [1 + 0,8 \phi(t, t_0)]}$$

missä

$\Delta \sigma_{p,c+s+r}$	virumisesta, kutistumisesta ja relaksaatiosta kohdassa x ja hetkellä t aiheutuva jänneterästen jännityksen vaihtelun itseisarvo [MPa]
ε_{cs}	SFS-EN 1992-1-1+A1+AC kohdan 3.1.4 (6) mukaisesti arvioidun kutistuman itseisarvo
E_p	jänneteräksen itseisarvo [GPa]
E_{cm}	betonin kimmokerroin [GPa]
$\Delta \sigma_{pr}$	jänneteräksen relaksaatiosta aiheutuvan jänneterästen jännityksen muutoksen itseisarvo kohdassa x hetkellä t. Se määritetään jännitykselle $\sigma_p = \sigma_p(G + P_{m0} + \psi_2 Q)$, joka tarkoittaa alkujännevoimasta ja pitkäaikaiskuormista aiheutuvaa jänneteräksen alkutilanteen jännitystä $\sigma_p = \sigma_p(G + P_{m0} + \psi_2 Q)$. [MPa]
$\phi(t, t_0)$	virumaluku hetkellä t, kun betonin kuormittaminen on alkanut hetkellä t_0
$\sigma_{c,QP}$	omasta painosta, alkujännevoimasta ja muista mahdollisista pitkäaikaisista kuormista aiheutuva, jänneterästen kohdalla vaikuttava betonin jännitys. Jännityksen $\sigma_{c,QP}$ arvoon voi vaikuttaa tarkasteltavasta rakentamisvaiheesta riippuen osa omaa painoa ja alkujännevoima tai täysi pitkäaikaisten kuormien yhdistelmä ($\sigma_c(G + P_{m0} + \psi_2 Q)$)
A_p	kaikkien kohdassa x olevien jänneterästen ala [mm ²]
A_c	betonipoikkileikkauksen ala [mm ²]
I_c	betonipoikkileikkauksen jäyhyysmomentti [mm ⁴]
Z_{cp}	betonipoikkileikkauksen painopisteen ja jänneterästen painopisteen välinen etäisyys [mm]

Kaava 16 sijoitetaan puristusjännitykset ja vastaavat muodonmuutokset positiivisiin etumerkeihin.

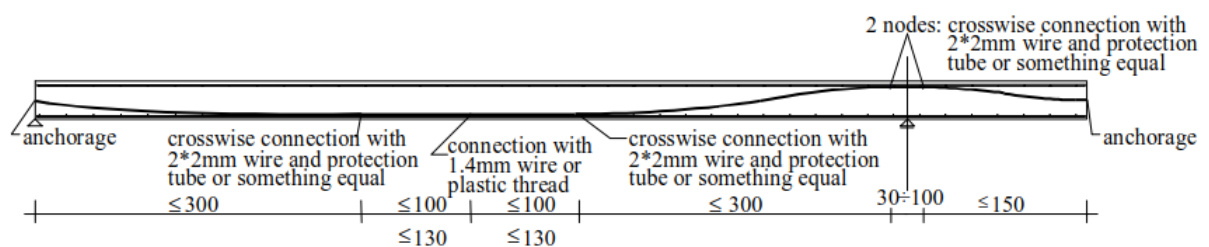
Kaava 16 soveltuu injektoiduille ankkurijänteille käytettäessä jännitysten paikallisia arvoja ja tartunnattomille ankkurijänteille käytettäessä jännitysten keskimääräisiä arvoja. Kun kyseessä on ulkopuoliset jänteet, keskiarvot lasketaan ohjurien idealisoitujen kohtien rajoittamien suorien osien alueelta ja betonin sisäisillä jänteillä pitkin koko pituutta. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC, s. 80)

5 Punosgeometriat ja ohjausvoimat

Yleisin käytetty punosgeometria on kaksoisparaabeli, eli punos seuraa paraabelin muotoa kentässä ja tuille se tuodaan vastaparaabelilla. Punosten kulku noudattaa pääosin ulkoisen momenttipinnan muodostamaa kuviota. Kentässä paraabelin alin kohta sijoitetaan taivutusmomentin maksimikohtaan ja käännepeiste sijoitetaan mahdollisimman lähelle tukea. Punos nousee tuen kohdalla ylös vastustamaan tuella olevaa momenttia. Tuotevalmistajat määrittävät minimitaivutussäteen R_{\min} punokselle, jota käyttämällä punoksen uloimpien lankojen pintajännitystä ei tarvitse punosgeometrian suunnanmuutoksissa tarkistaa. Tartunnattomille yksittäisille punoksille minimitaivutussäde on 2,5 m (European Technical Assessment ETA-06-0165, 2016, s. 9)

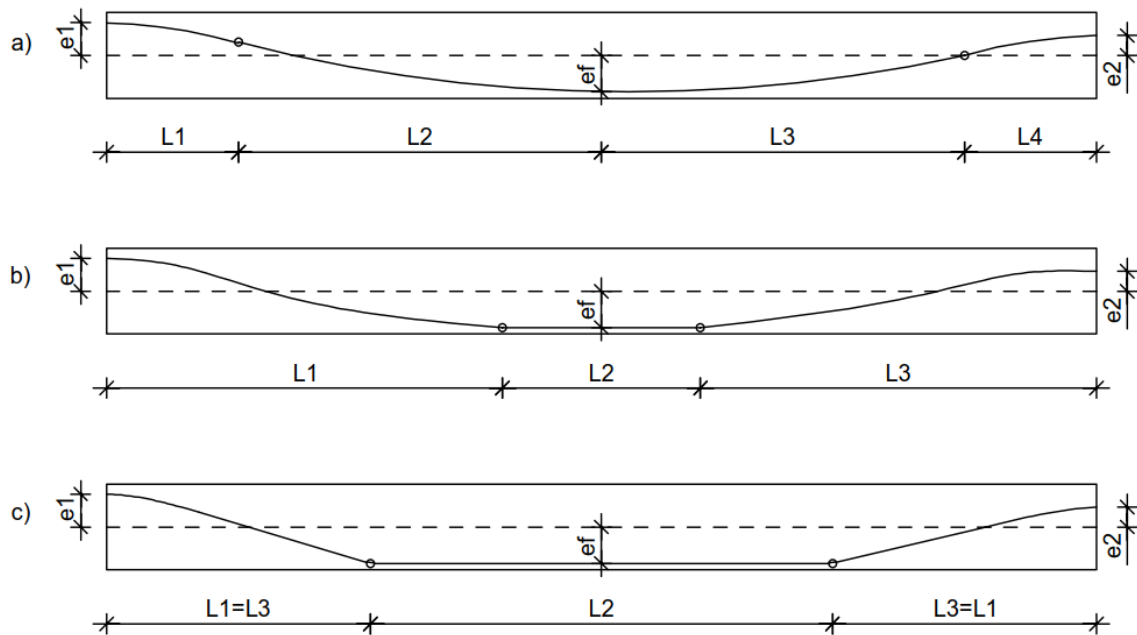
Free tendon layoutin mukaisen punosgeometrian muoto riippuu punoksen korkeimman ja alimman pisteen välisestä etäisyydestä, punoksen jäyhyysmomentista, painosta ja punoksen kimmomoduulista. Punos laskeutuu tuen kohdalta vapaasti alapinnan raudoituksen päälle. Punoksen sidonta tapahtuu tuilla sekä kentässä, nousuissa ja laskuissa ei punosta sidota lainkaan.

Kuva 16. Punoksen sidonta free tendon layoutissa (Maier, 2002, s. 7)



Yksinkertaistetussa punosgeometriassa punos tuodaan tuelta kenttään aina saman pituisella matkalla, riippumatta kentän pituudesta. Voidaan tehdä oletus, että punokseen ei muodostu paraabelia, vaan se tulee suorana tuelta.

Kuva 17. Punosgeometria yksiaukkoisessa rakenteessa a) kaksoisparaabeli, b) free tendon layout c) yksinkertaistettu



5.1 Ohjausvoimat

Jännepunoksen kaareva muoto aiheuttaa rakenteeseen voimia, jotka voidaan kuvata rakenteeseen aiheutuvina ulkoisina kuormina, ohjausvoimina. Kentässä ylöspäin aukeava paraabeli aiheuttaa nostavan voiman rakenteeseen, kun taas tuella alaspäin aukeava paraabeli aiheuttaa rakenteeseen alaspäin suuntautuvan voiman. Rakenteen päässä olevat päätymomentit aiheutuvat jännepunoksen epäkeskeisyydestä rakenteen neutraaliakselilta. Suora jännepunos ei aiheuta ohjausvoimia.

Ohjausvoimia hyödynnetään muun ulkoisen kuorman tasapainottamisessa. Jänteen geometria voidaan valita kuormituksen aiheuttaman momenttikuvaajan mukaan. Esimerkiksi tasainen kuorma aiheuttaa rakenteeseen ylöspäin aukeavan paraabelin muotoisen momenttikuvaajan, joka voidaan tasapainottaa paraabelin muotoisella jännemuodolla. (Naaman, 2004, s. 122)

Ohjausvoiman suuruus vaihtelee koko jänteen matkalla, sillä myös jännevoiman P suuruus vaihtelee. Koko jänteen matkalla voidaan käyttää laskennassa keskimääräistä jännevoimaa tai useampiaukkoisissa rakenteissa jänneittäin. Ohjausvoiman suuruus voidaan selvittää alla olevalla kaavalla:

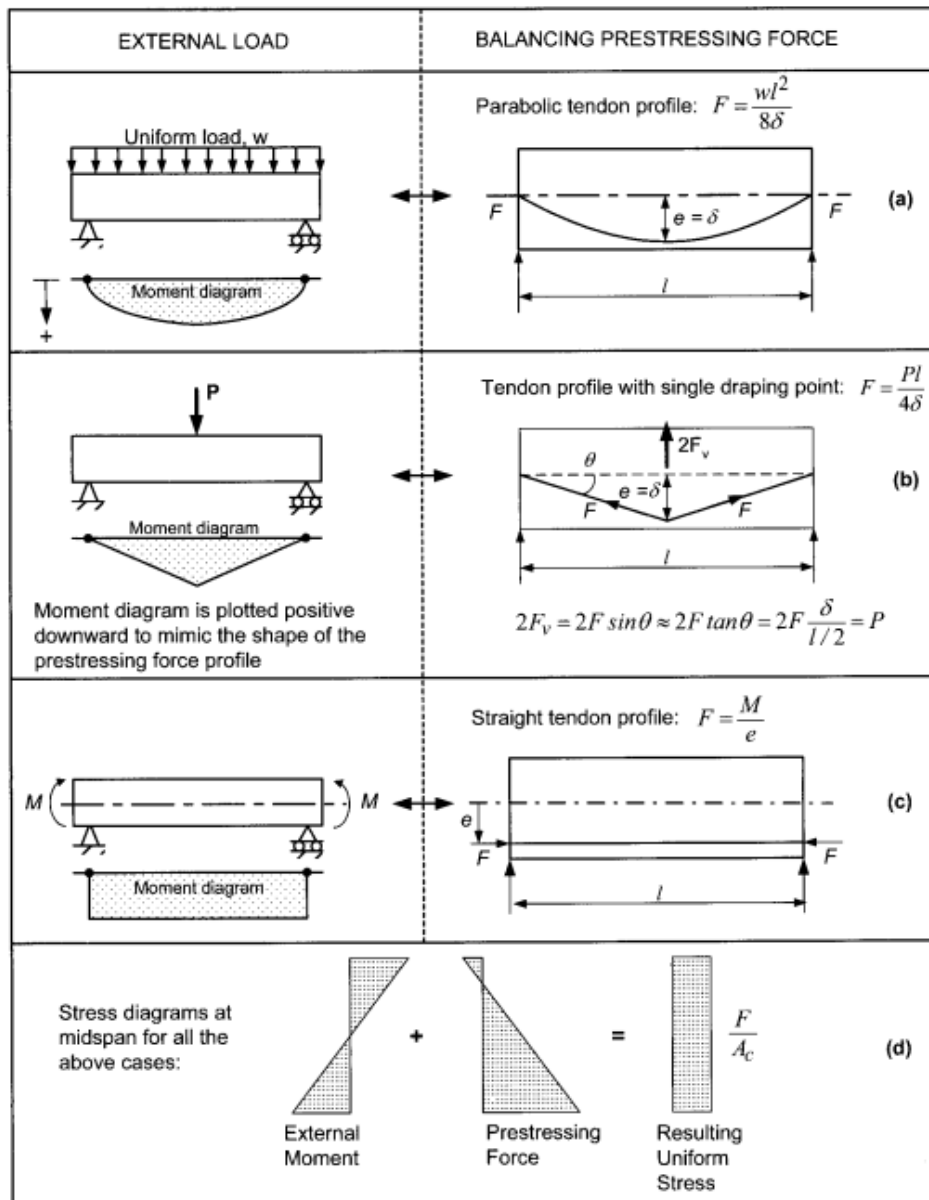
Kaava 17. Ohjausvoiman suuruus kohdassa "x" (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 110).

$$p(x) = P_m \frac{d^2}{dx^2} y(x)$$

missä

$p(x)$	ohjausvoima
P_m	keskimääräinen jännevoima
$y(x)$	jänteen profiilia kuvaava yhtälö

Kuva 18. Esimerkkejä kuormien tasapainottamisesta jännittämällä (Naaman, 2004, s. 122)

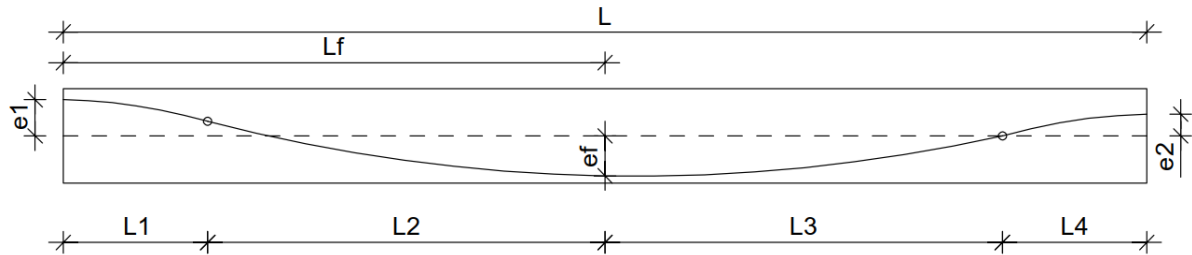


5.2 Punosgeometriat yksi- ja moniaukkoisissa rakenteissa

5.2.1 Paraabeligeometria

Alla kuva paraabeligeometrian mukaisesta punosgeometriasta, sekä yhtälöt punoksen korkeusaseman ja ohjausvoimien laskentaan. Punosgeometrian kaava voidaan johtaa toisen asteen polynomifunktiosta.

Kuva 19. Paraabeligeometria



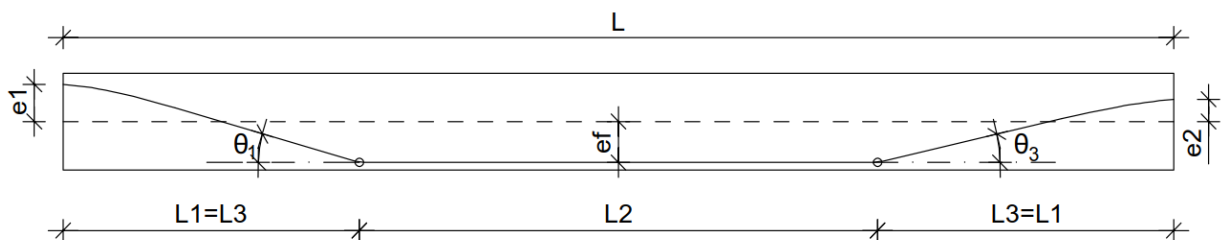
Taulukko 3. Vastakaarilla varustetun punoksen korkeusasema ja ohjausvoimat (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 68)

	Punoksen korkeusasema	Ohjausvoimat
$0 \leq x \leq L_1$	$e(x) = e_1 + \frac{(e_f - e_1)}{L_1(L_1 + L_2)} x^2$	$p_1 = \frac{2P(e_f - e_1)}{L_1(L_1 + L_2)}$
$L_1 \leq x \leq L_1 + L_2$	$e(x) = e_f - \frac{(e_f - e_1)}{L_2(L_1 + L_2)} (x - L_1)^2$	$p_2 = \frac{2P(e_1 - e_f)}{L_2(L_1 + L_2)}$
$L_1 + L_2 \leq x \leq L - L_4$	$e(x) = e_f - \frac{(e_f - e_2)}{L_3(L_3 + L_4)} (x - L_1)^2$	$p_3 = \frac{2P(e_2 - e_f)}{L_3(L_3 + L_4)}$
$L - L_4 \leq x \leq L$	$e(x) = e_2 + \frac{(e_f - e_2)}{L_4(L_3 + L_4)} (L - x)^2$	$p_4 = \frac{2P(e_f - e_2)}{L_4(L_3 + L_4)}$

5.2.2 Yksinkertaistettu punosgeometria

Alla kuva yksinkertaistetusta punosgeometriasta, sen muotoa voidaan ajatella harped-profiilina. Alla myös yhtälöt punoksen korkeusasemalle sekä ohjausvoimille.

Kuva 20. Yksinkertaistettu punosgeometria



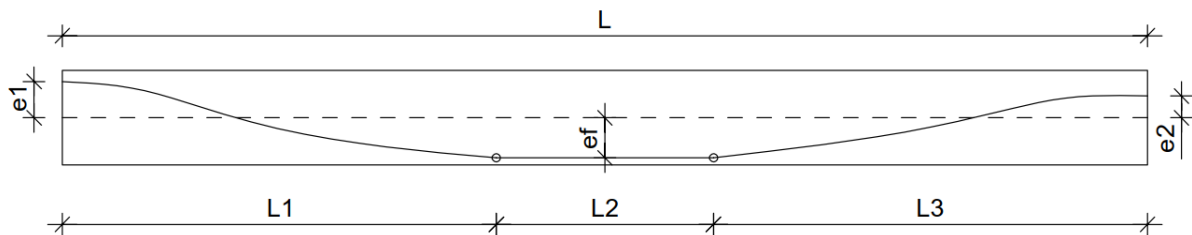
Taulukko 4. Yksinkertaistetun punosgeometrian punoksen korkeusasema ja ohjausvoimat

	Punoksen korkeusasema	Ohjausvoimat
$0 \leq x \leq L_1$	$e(x) = -\left(\frac{e_1 - e_f}{L_1}\right)x + e_1$	$p_1 = P \cdot \theta_1$
$L_1 \leq x \leq L - L_3$	$e(x) = e_f$	$p_2 = 0$
$L - L_3 \leq x \leq L$	$e(x) = \left(\frac{e_f - e_2}{L_3}\right) * (L - x) + e_2$	$p_3 = P \cdot \theta_3$

5.2.3 Free tendon layout

Alla kuva free tendon layoutin mukaisesta punosgeometriasta sekä yhtälöt punoksen korkeusaseman ja ohjausvoimien laskentaan. Punos seuraa neljännen asteen polynomifunktiota. (Maier, 2002, s. 3)

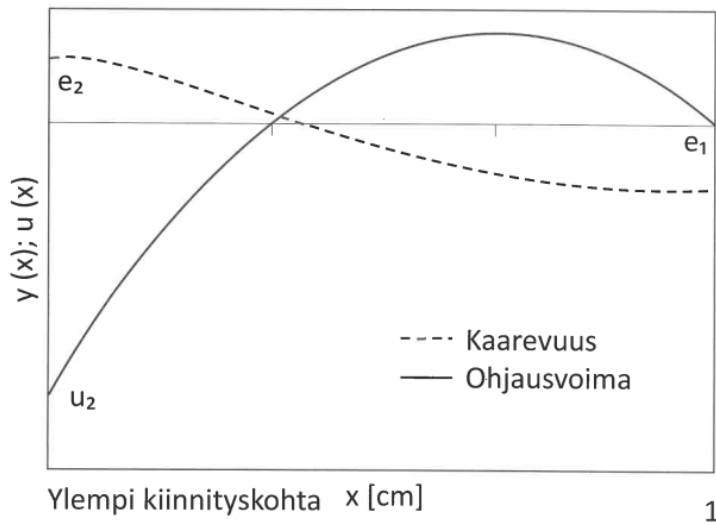
Kuva 21. Free tendon layoutin mukainen punosgeometria



Taulukko 5. Punoksen korkeusasemat ja ohjausvoimat keskituella free tendon layoutissa (Maier, 2002, s. 4)

	Punoksen korkeusasema	Ohjausvoimat
$0 \leq x \leq L_1$	$e(x) = (e_1 - e_f) \left[-3 \frac{x^4}{L_1^4} + 8 \frac{x^3}{L_1^3} - 6 \frac{x^2}{L_1^2} + 1 \right] + e_f$	$p_1 = P(e_1 - e_f) \left[-36 \frac{x^2}{L_1^4} + 48 \frac{x}{L_1^3} - \frac{12}{L_1^2} \right]$
$L_1 \leq x \leq L - L_3$	$e(x) = e_f$	$p_2 = 0$
$L - L_3 \leq x \leq L$	$e(x) = (e_2 - e_f) \left[-3 \frac{(L-x)^4}{L_3^4} + 8 \frac{(L-x)^3}{L_3^3} - 6 \frac{(L-x)^2}{L_3^2} + 1 \right] + e_f$	$p_3 = P(e_2 - e_f) \left[-36 \frac{x^2}{L_3^4} + 48 \frac{x}{L_3^3} - \frac{12}{L_3^2} \right]$

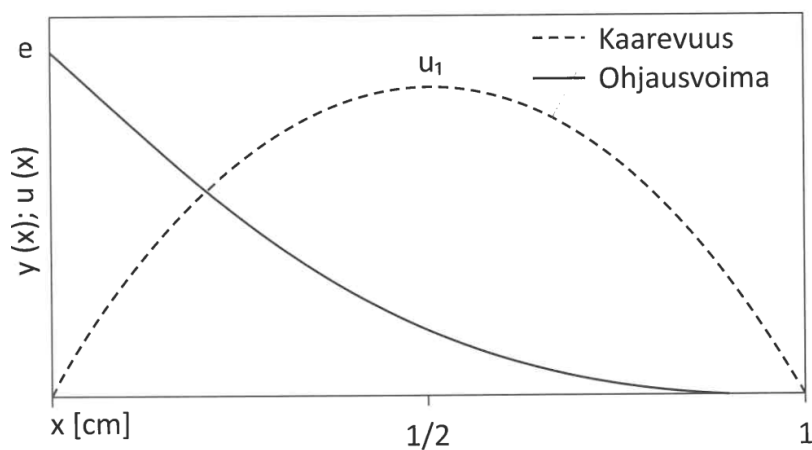
Kuva 22. Jänteen muoto ja ohjausvoima keskituella



Taulukko 6. Punoksen korkeusasemat ja ohjausvoimat reunatuella free tendon layoutissa (Maier, 2002, s. 4)

	Punoksen korkeusasema	Ohjausvoimat
$0 \leq x \leq L_1$	$e(x) = (e_1 - e_f) \left[-3 \frac{x^4}{L_1^4} + 8 \frac{x^3}{L_1^3} - 6 \frac{x^2}{L_1^2} + 1 \right] + e_f$	$p_1 = 12 * P^* (e_1 - e_f) \left[-\frac{x^2}{L_1^4} + \frac{x}{L_1^3} \right]$
$L_1 \leq x \leq L - L_3$	$e(x) = e_f$	$p_2 = 0$
$L - L_3 \leq x \leq L$	$e(x) = (e_2 - e_f) \left[-3 \frac{(L-x)^4}{L_3^4} + 8 \frac{(L-x)^3}{L_3^3} - 6 \frac{(L-x)^2}{L_3^2} + 1 \right] + e_f$	$p_3 = 12 * P^* (e_2 - e_f) \left[-\frac{x^2}{L_3^4} + \frac{x}{L_3^3} \right]$

Kuva 23. Jänteen muoto ja ohjausvoima reunatuella



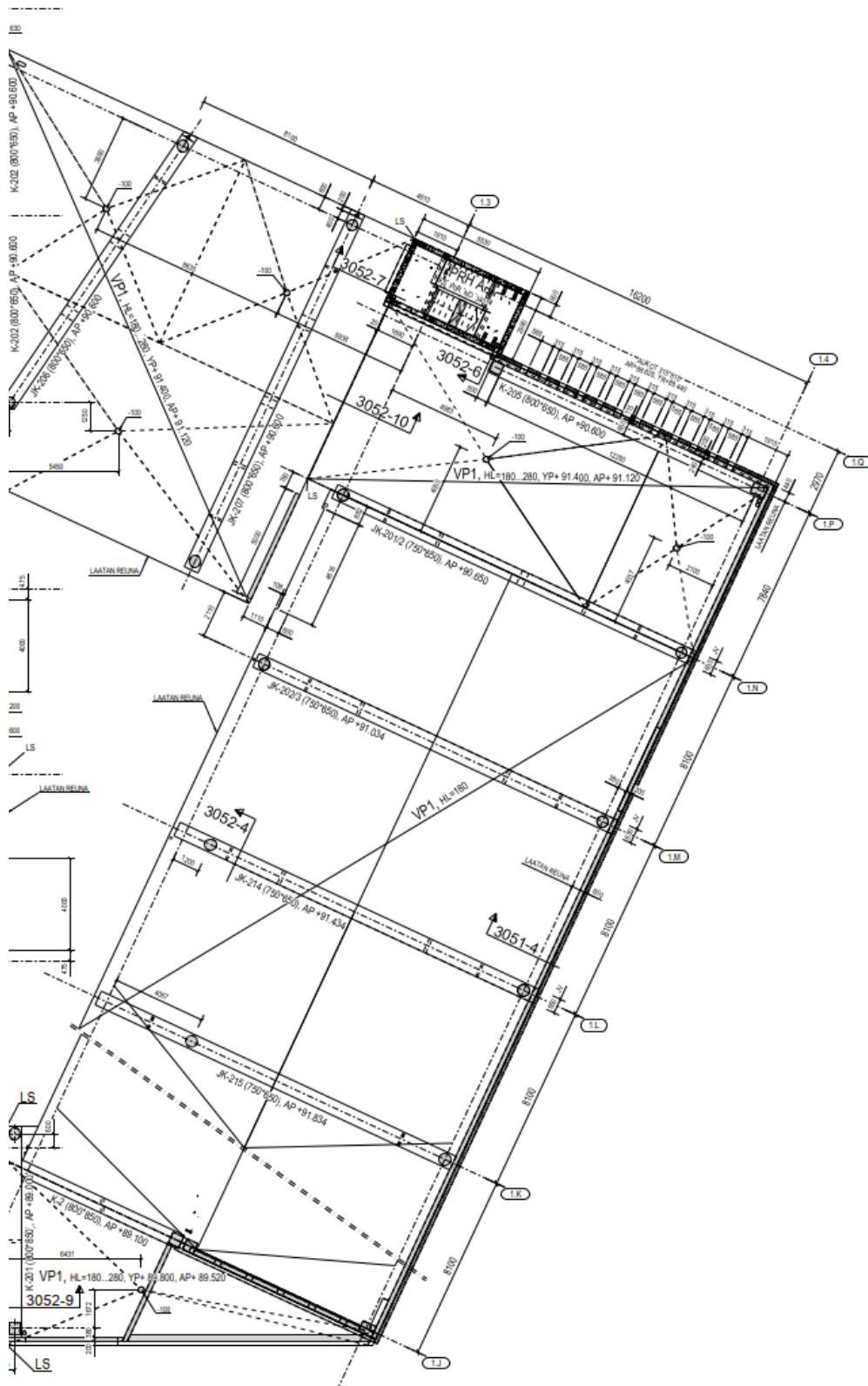
6 Mitoitusvertailu

Esimerkkirakenne on tyypillinen pysäköintilaitoksen taso. Alla olevassa kuvassa näkyy osa esimerkikohteen tasopiirustuksesta. Laskelmat on tehty mod. 1.3–1.4/1.0-1.J rajaamalta alueelta. Yksinkertaistuksen vuoksi alareunassa nähtävä kolmion muotoinen alue on laskettu suorakaiteen muotoisena pisimmän jännevälän mukaan. Myöskään paksumpia laatanosia päissä ei ole huomioitu, vaan laatat on suunniteltu saman paksuisina.

6.1 Suunnitteluperiaatteet

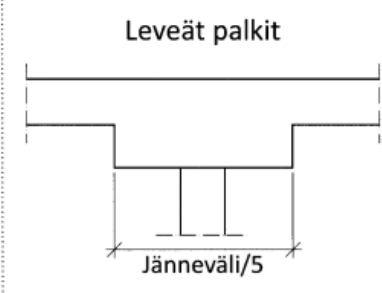
- Seuraamusluokka: CC2
- Luotettavuusluokka: RC2
- Suunniteltu käyttöikä: 100 vuotta
- Toleranssiluokka: 2
- Toteutusluokka: 2
- Rasitusluokka: XC3,4; XD1; XF2
- Kylmä tila
- Betoni: C35/45
- Käytettävä jännemenetelmä: BBR VT CONA CMM (ETA-06/0165)
- Käytettävä jännepunos: SFS-1265-3-Y-1860-S-7-15,7R1 (ETA-06/0165)
- Betonin lujuus jännityshetkellä: C23/28

Kuva 24. Esimerkkikohteen tasopiirustus



6.1.1 Alustava laatan poikkileikkauksen mitoitus

Kuva 25. Jatkuvien laattojen mittasuositukset (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 45)

Suositukset jatkuvien yhteen suuntaan kantavien laattojen korkeuksille jännevälän suhteessa L/h ($6 \text{ m} \leq L \leq 13 \text{ m}$)		
Kuorma Q_k [kN/m^2] (pysyvä pintakuorma + hyötykuorma)	Leveät palkit	Kapeat palkit
		Jänneväli/5
2,5	45	42
5,0	40	38
10,0	35	34

yllä olevan kuvan mukaisesti määritellään alustava poikkileikkaus. Pisin jänneväli esimerkkirakenteessa on 8100 mm. Palkkien leveys on 650 mm, eli ne ovat lähempänä kapeita palkkeja kuin leveitä palkkeja. Hyötykuorma kohteessa on $2,5 \text{ kN/m}^2$, muita pysyviä pintakuormia ei ole.

$$8100 \text{ mm} / 42 = 192,8 \text{ mm}$$

Valitaan laatan alustavaksi korkeudeksi $h=180 \text{ mm}$ ja korotetaan paksuutta tarvittaessa.

6.1.2 Kuormien ja kuormitusyhdistelmien määrittely

Omien painojen lisäksi kuormituksissa huomioidaan:

- Pysyvä kuorma ripustuksista $g=0,25 \text{ kN/m}^2$
- Hyötykuorma ajoneuvoista $q=2,5 \text{ kN/m}^2$ (kuormaluokka F)

Taulukko 7. Kuormat ja yhdistelykertoimet

Nimi	Kuvaus ja suuruus	Kuormakerroin			
		γ_i	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Omapaino SW	Kantavien rakenteiden omapaino 25kN/m ³	$\gamma_G=1,35$	1	1	1
Ripustuskuorma DL	0,25kN/m ²	$\epsilon\gamma_G=1,15$	1	1	1
Hyötykuorma LL	2,5kN/m ²	$\gamma_Q=1,5$	0,7	0,7	0,6
Jännevoima PT	Jännevoima kaikkien häviöiden jälkeen	$\gamma_P=1,0$	1	1	1
Jännevoima HYP	Jännevoiman aiheuttama pakkovoima		1	1	1

Taulukko 8. Kuormitusyhdistelmät

Käyttörajan kuormitusyhdistelmät	
Jännittämisen aikainen yhdistelmä	1,0 SW + 1,15 PT
Pitkäaikaisyhdistely	1,0 SW + 1,0 DL + 1,0 PT + 0,6 LL
Tavallinen yhdistelmä	1,0 SW + 1,0 DL + 1,0 PT + 0,7 LL
Ominaisyhdistelmä	1,0 SW + 1,0 DL + 1,0 PT + 1,0 LL
Murtorajan yhdistelyt	1,35 SW + 1,35 DL + 1,0 HYP
	1,15 SW + 1,15 DL + 1,5 LL + 1,0 HYP

6.2 Jännitysten ja halkeilun rajoittaminen

Mikäli poikkileikkaus halutaan pitää halkeilemattomana, betonin puristusjännitys rajoitetaan jännityshetkellä arvoon $0,6 f_{ck}$ ja vetojännitys arvoon $f_{ct,eff}$. Rakenne on raudoitettava rajaamaan halkeilua, mikäli vetojännitys ylittyy.

Ominaisyhdistelmällä betonin puristusjännitys rajoitetaan arvoon $0,6 f_{ck}$ ja arvoon $0,45 f_{ck}$ pitkäaikaisella kuormayhdistelmällä. Virumisen epälineaarisuus otetaan huomioon pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä, kun puristusjännitys ylittää arvon $0,45 f_{ck}$. Arvoa $f_{ct,eff}$ voidaan käyttää betonin sallittuna vetojännityksenä. Tavallisella ja pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä poikkileikkaus katsotaan haljenneeksi, mikäli rakenteen kuormitushistorian aikana vetojännitys ylittää arvon $f_{ct,eff}$. Mikäli asianomaisella kuormitusyhdistelmällä poikkileikkaus on kokonaan puristettu, voidaan poikkileikkausta pitää halkeilemattomana, vaikka vetojännityksen arvo $f_{ct,eff}$ olisi ylittynyt poikkileikkauksen kuormitushistorian aikana. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 31)

Lähtökohtaisesti rakenteet suunnitellaan halkeamattomiksi jännityshetkellä. Mikäli tämä ei kohtuullisesti ole mahdollista, suositellaan sallittuna halkeamaleveyden arvona käytettävän korkeintaan 0,4 mm:n arvoa alueilla, jotka sulkeutuvat pysyvien pintakuormien vaikutuksesta. Muilla alueilla noudatetaan säilyvyyden ja vesitiiveyden vaatimuksia jännityshetkellä. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 32)

Taulukko 9. Halkeamaleveyksien raja-arvot W_{\max} [mm] (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 32)

Rasitusluokka	Tavallinen kuormayhdistelmä	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä
X0, XC1	-	0,40 ¹
XC2, XC3, XC4, XD1, XS1	-2,3,4	0,30
XD2, XD3, XS2, XS3	-2,3,4	0,20

1) Rasitusluokkien X0 ja XC1 yhteydessä halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen. Tämä raja on asetettu, jotta tavallisesti saavutetaan kelvollinen ulkonäkö. Jos ulkonäköehtoja ei aseteta, tätä rajaa voidaan väljentää.

2) Ilman erillistä vedeneristyskerrosta olevilla pysäköintitasoilla yläpinnan sallittu halkeamaleveys on 0,20 mm vesitiivyyden kannalta.

3) Ilman erillistä vedeneristyskerrosta olevilla pihakansilla yläpinnan sallittu halkeamaleveys on 0,10 mm vesitiivyyden kannalta.

4) Vesitiivyyttä vaativilta rakenteilta läpihalkeamien muodostumista pyritään välttämään jäykistävien rakenteiden suotuisalla sijoittamisella pakkovoimien minimoimiseksi. Läpihalkeamat rajoitetaan 0,10 mm halkeamaleveyteen.

Huom! Hankekohtaisesti voidaan rakenteille asettaa tiukempia vaatimuksia. Esimerkiksi kevyesti kuormitetuilla pysäköintitasorakenteilla betoni voidaan rajoittaa vetojännityksettömäksi pelkkien pysyvien kuormien vaikuttaessa rakenteeseen.

Alueilla, joissa voi esiintyä vetoa, on tarkistettava vähimmäisraudoitusala SFS-EN 1992-1-1 kohdan 7.3.2 mukaisesti halkeilun rajoittamiseksi. Jännebetonirakenneosien poikkileikkauksissa, joissa kuormien ominaisyhdistelmän ja jännevoiman ominaisarvon vaikuttaessa betoni on puristettuna tai betonin vetojännityksen itseisarvo on pienempi kuin f_{ctm} tai sitä pienempi $f_{ctm}(t)$, mikäli halkeilun syntyminen on odotettavissa ennen 28 vuorokauden ikää, halkeilun rajoittamisen vähimmäisraudoitusta ei vaadita. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 43)

Pysyvästi tartunnattomilla jänteillä jännitetyissä rakenneosissa tulee osoittaa, että taivutuskestävyys on murtorajatilassa suurempi kuin halkeilukestävyys. Taivutuskestävyyden murtorajatilassa tulee olla 1,15-kertainen halkeilukestävyteen verrattuna. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 43)

Poikkileikkauksen halkeilukestävyys voidaan laskea alla olevalla kaavalla (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 43).

Kaava 18. Poikkileikkauksen halkeilukestävyys

$$M_{cr} = (f_{ctm,eff} + \sigma_c) W$$

missä

$f_{ctm,eff}$ taivutusvetolujuus [MPa]

σ_c keskeinen puristusjännitys [MPa]

W poikkileikkauksen vedetyn reunan taivutusvastus [m³]

6.3 Taipumien rajoittaminen

Taipumarajana voidaan käyttää enintään arvoa $L/250$ viruma ja rakenteen halkeilu pitkäaikaiskuormilla huomioiden. Hankekohtaisesti taipumarajaa voidaan tiukentaa esimerkiksi ulkonäöllisistä syistä tai liittyvien rakenteiden taipumarajan takia. Vedenpoiston toimivuus voi aiheuttaa taipumarajaan tiukempia vaatimuksia. Pysäköintitasoilla vähimmäiskallistukseksi suositellaan yleensä 1:100–1:60 (1,0 % - 1,67 %). Taipuman laskentaa edellytetään yleensä jännitetyiltä kantavilta tasorakenteilta huomioiden rakenteen viruma ja mahdollinen halkeilu. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 33)

6.4 Murtorajatilamitoitus

6.4.1 Jännevoimien vaikutukset

Yleisesti jännevoiman mitoitusarvo voidaan määrittää Kaava 19:

Kaava 19. Jännevoiman mitoitusarvo

$$P_{d,t}(x) = \gamma_p P_{m,t}(x)$$

missä

$P_{d,t}(x)$	jännevoiman mitoitusarvo [kN]
γ_P	osavarmuusluku
$P_{m,t}(x)$	keskimääräinen jännevoima etäisyydellä x [kN]

Laskettaessa jänneteräksen jännityksen lisäystä, pysyvästi tartunnattomilla jänteillä tehdyissä rakenteissa on yleensä tarpeen ottaa huomioon koko rakenneosan pituuden muutos. Mikäli yksityiskohtaista laskelmaa ei tehdä, voidaan olettaa jännityksen lisäyksen tehollista jännevoimaa vastaavasta arvosta murtorajatilan jännitykseen olevan $\Delta\sigma_{p,ULS}=50\text{MPa}$.

Jos jännityksen lisäys murtorajatilassa lasketaan tarkemmin, voidaan käyttää arvoa $L/50$ rakenteen taipumana. Jänteen pituuden muutoksesta ΔL aiheutuva jänteen jännityslisäys $\Delta\sigma_{p,ULS}$ lasketaan seuraavilla kaavoilla (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 25):

Kaava 20. Jänteen pituuden muutoksesta aiheutuva jännityslisäys kentässä

$$\Delta\sigma_{p,ULS} = \left(\frac{\Delta L}{L_A} \right) E_p$$

Kaava 21. Jänteen pituuden muutoksesta aiheutuva jännityslisäys tuella

$$\Delta\sigma_{p,ULS} = \left(\frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{L_A} \right) E_p$$

missä

L_A	ankkurien välimatka [mm]
E_p	jännepunoksen kimmokerroin [GPa]
ΔL_1 ja ΔL_2	jänteen pituuden muutoksia tuen viereisissä kentissä [mm]

Tämän lisäksi jänneteräksen on täytettävä ehto:

$$\Delta\sigma_{p,ULS} + \sigma_p < f_{pd}$$

missä

f_{pd}	jänneteräksen mitoituslujuus [MPa]
σ_p	jänneteräksen jännitys tarkasteluhetkellä [MPa]

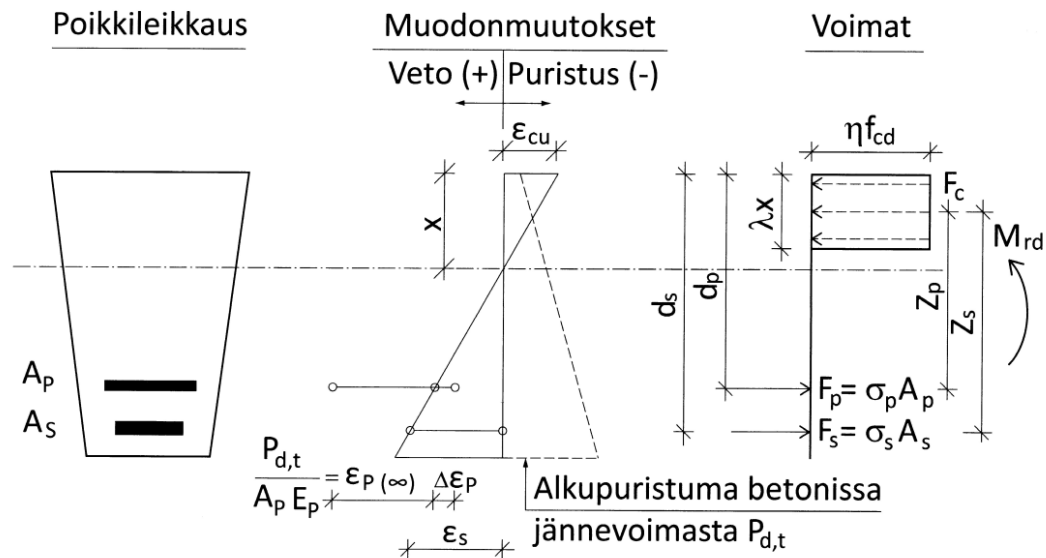
Tarkemman laskennan tapauksessa jännityksen lisäys murtorajatilassa rajoitetaan arvoon $\Delta\sigma_{p,ULS}=100\text{MPa}$. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 26)

6.4.2 Normaalivoima ja taivutus

Teräsbetoni- ja jännebetonipoikkileikkausten taivutuskestävyyttä murtorajatilassa määritettäessä tehdään seuraavat oletukset (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 27):

- poikkileikkaustasot säilyvät tasoina
- vedossa ja puristuksessa tartunnallisen raudoituksen muodonmuutos on sama kuin ympäröivän betonin muodonmuutos
- betonin vetolujuutta ei huomioida
- puristusjäännitykset betonissa määritetään SFS-EN 1992-1-1 kohdassa 3.1.7 esitetyn mitoituksen käytettävän jännityksen ja muodonmuutoksen välisen yhteyden perusteella
- jänneterästen alkuvenymä huomioidaan määritettäessä niiden jännityksiä

Kuva 26. Puristusraudoittamattoman poikkileikkauksen taivutuskestävyys tartunnattomissa jännerakenteissa (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 28)



Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden tulee täyttää ehto (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 28):

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

$$M_{Rd} \geq M_{E,Gd} + M_{E,Qd} + \gamma_{p, fav} M_2$$

$$M_{bal} = M_p + M_2 = Pe + M_2$$

$$M_2 = M_{bal} - Pe$$

missä

M_{bal} jännevoimasta aiheutuva momentti

M_p primäärimomentti

M_2 sekundaarimomentti eli hyperstaattinen momentti

P jännevoima

e jännevoiman epäkeskisyyden poikkileikkauksen painopisteestä

6.4.3 Hyperstaattinen momentti

Rakenteeseen aiheutuu ulkoisia tukireaktioita jännevoiman ohjausvoimista. Näitä kutsutaan hyperstaattiseksi momentiksi. Hyperstaattinen momentti voidaan laskea esimerkiksi vähentämällä ohjausvoimien aiheuttamasta momentista jännevoiman epäkeskisyys kerrottuna jännevoimalla, eli

Kaava 22. Hyperstaattinen momentti (Suomen Betoniyhdistys ry, 2017, s. 110)

$$M_2(x) = M_{bal}(x) - e_p(x) * P$$

missä

$M_{bal}(x)$ ohjausvoimien aiheuttama momentti kohdassa x [kNm]

$e_p(x)$ jännevoiman epäkeskisyys kohdassa x [m]

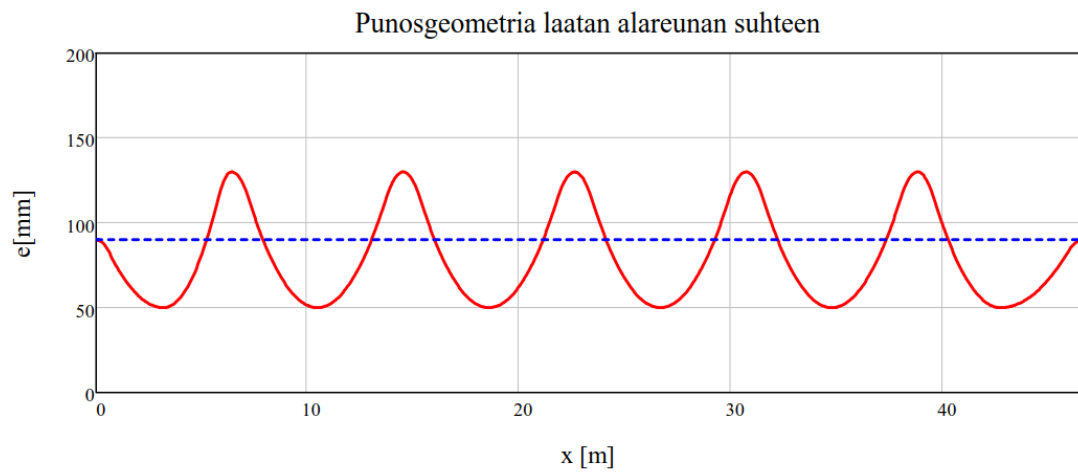
P jännevoima [kN]

Hyperstaattista momenttia aiheutuu jälkijännitetyissä jatkuvissa staattisesti määräämättömissä rakenteissa, jossa tuet estävät vapaan muodonmuutoksen. Esimerkiksi yksiaukkoisissa palkki- ja laattarakenteissa ei muodostu hyperstaattista momenttia. Rakenteesta johtuen hyperstaattiset momentit voivat olla huomattavia, eli ne on huomioitava murtorajatilan mitoituksessa. Esimerkkitapauksessa ei huomioitu hyperstaattista momenttia, sillä laatan tapauksissa hyperstaattinen momentti on yleensä pieni. Jatkuvissa palkeissa hyperstaattinen momentti on suuri ja huomioitava mitoituksessa.

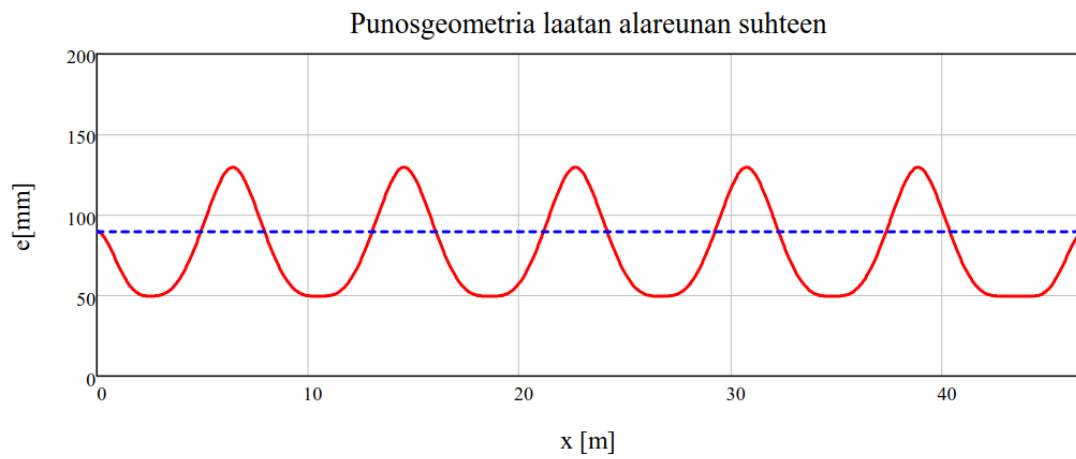
6.5 Tulokset

Alla laskelmissa punoksen korkeusaseman kaavojen mukaan tehdyt punosgeometrian kuvaajat. Kuvista voidaan huomata, että kohteen jänneväleillä paraabeligeometrian ja free tendon layoutin punosgeometrian ero on pieni. Pidemmällä jänneväleillä eroavaisuus korostuu enemmän.

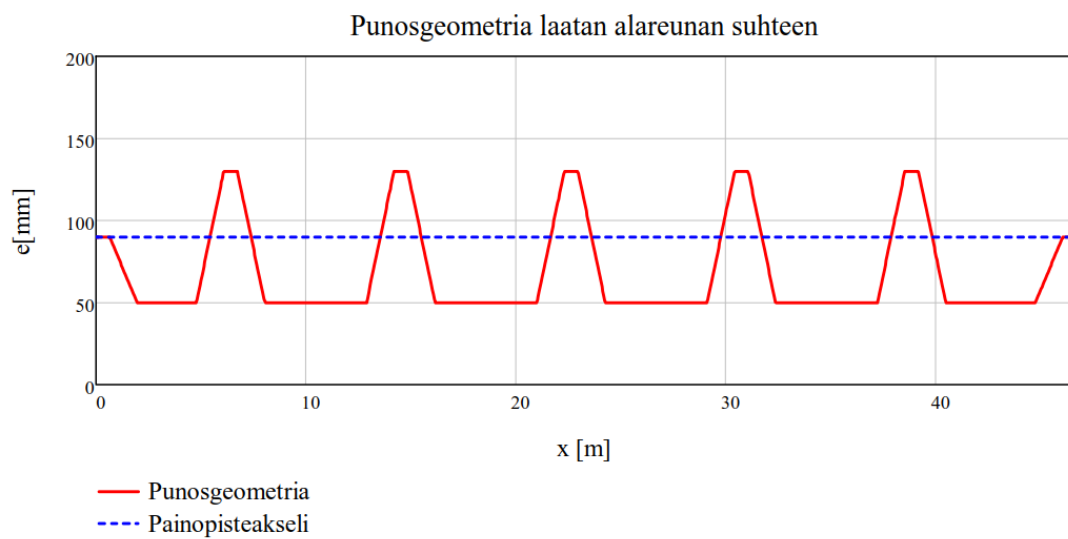
Kuva 27. Paraabeligeometrian punosgeometria laskelmissa



Kuva 28. Free tendon layoutin punosgeometria laskelmissa



Kuva 29. Yksinkertaistetun geometrian punosgeometria laskelmissa



Kaikissa tapauksissa on käytetty mitoituskaistana 5500 mm levyistä aluetta ja punosten kokonaislukumäärä kaistalla on 10 kpl. Lopputilanteessa kaistalle lisätään vielä yksi punos, jota ei käytetä laskennassa mukana. Punokset ovat 15,7 mm rasvapunosia ja niiden tunkkausvoima per punos on 215 kN. Punoksien kokonaisvoima on siten 2150 kN.

6.5.1 Kitka- ja lukitushäviöt sekä keskimääräinen jännevoima

Yksinkertaistetussa geometriassa kitkahäviöiden suuruus on suurin. Myös lukitushäviö on yksinkertaistetussa geometriassa suurin ja free tendon layoutissa pienin. Syy tähän on se, että yksinkertaistetussa punosgeometriassa punoksessa on terävämpiä käännoiksiä, jolloin myös kitkaa on enemmän. Paraabeligeometrian ja free tendon layoutin lukitushäviön suuruudessa on 1,95kN eli alle 2 % eroavaisuus. Kitkahäviöissä on 1,44 kN ero eli myöskin alle 2 %. Relaksaatiohäviö sekä ajasta riippuvat häviöt ovat kaikissa tapauksissa suunnilleen samansuuruisia johtuen materiaaleista sekä tarkasteltavasta ajanjaksosta, jotka kaikissa tapauksissa ovat samat.

Taulukko 10. Kitka- ja lukitushäviöt

	Paraabeligeometria	Free tendon layout	Yksinkertaistettu geometria
Kitkahäviön suuruus koko rakenteessa	141,44 kN	140,00 kN	184,50 kN
Lukitushäviön suuruus	151,43 kN	149,48 kN	171,35 kN

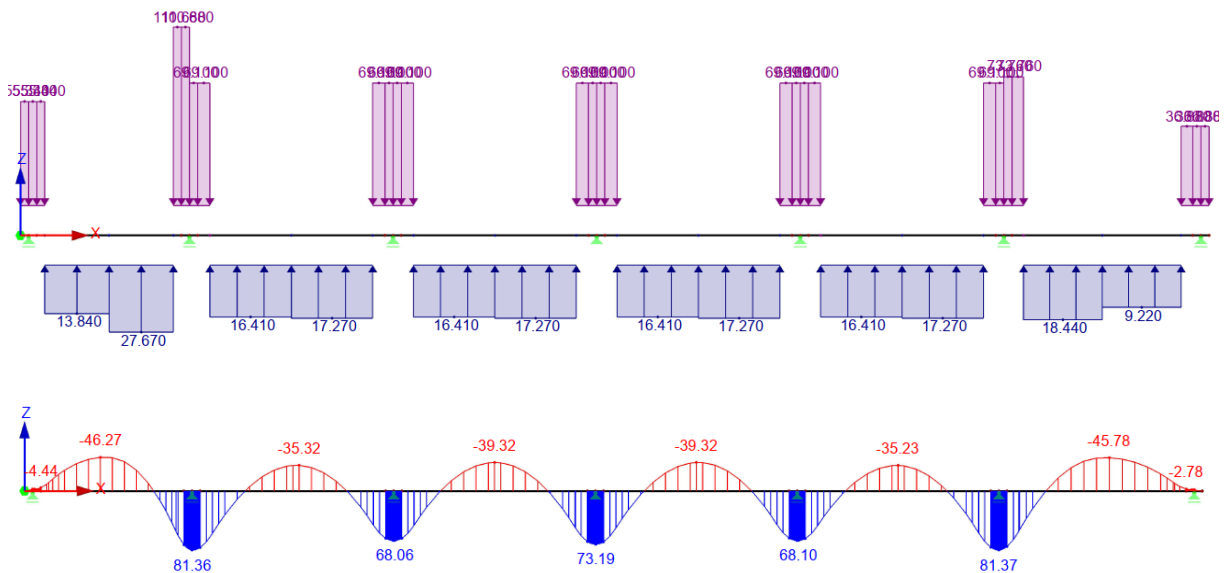
Taulukko 11. Keskimääräinen jännevoima häviöiden jälkeen

	Paraabeligeometria	Free tendon layout	Yksinkertaistettu geometria
keskimääräinen jännevoima häviöiden jälkeen	1763 kN	1764 kN	1742 kN

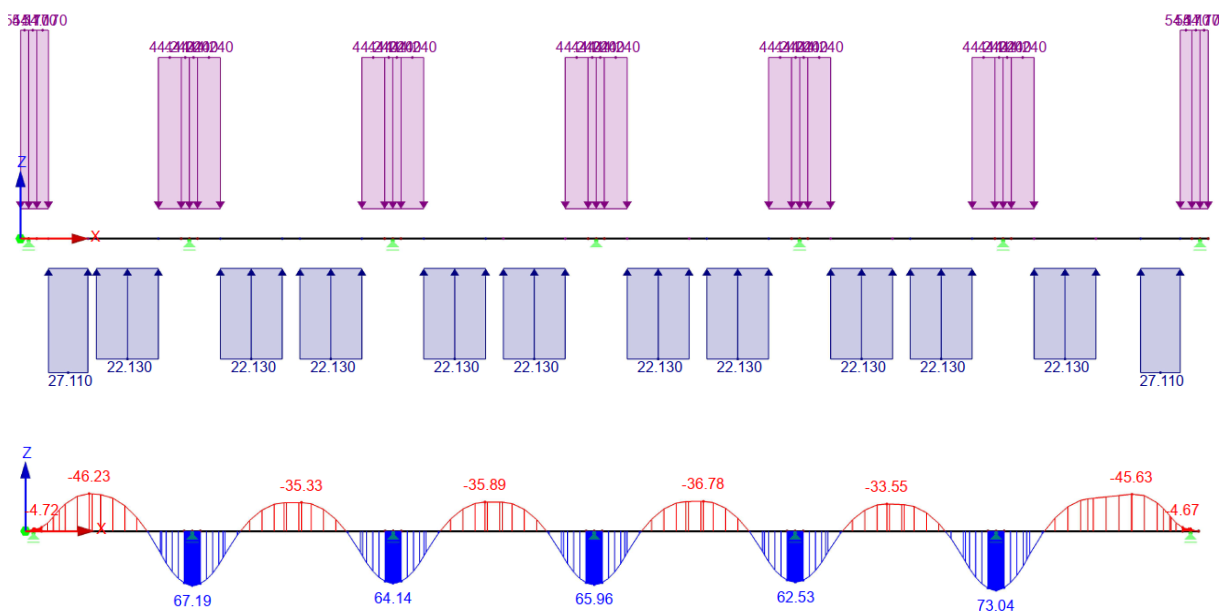
Kaikkien häviöiden jälkeen keskimääräinen jännevoima paraabeligeometrian ja free tendon layoutin välillä oli käytännössä sama, eroa vain 1 kN. Yksinkertaistetussa geometriassa ero on suurempi johtuen lukitushäviön ja kitkahäviön suuruudesta.

Ohjaisvoimien momenttikuvaajista voidaan huomata, että paraabeligeometriasta aiheutuu suuremmat momentit tukien kohdalla kuin free tendon layoutissa. Jännevälin keskialueilla momentit ovat lähellä toisiaan. Yksinkertaistetussa punosgeometriassa tukialueen momentit ovat huomattavasti suuremmat kuin muissa tapauksissa mutta kenttämomentit pienemmät.

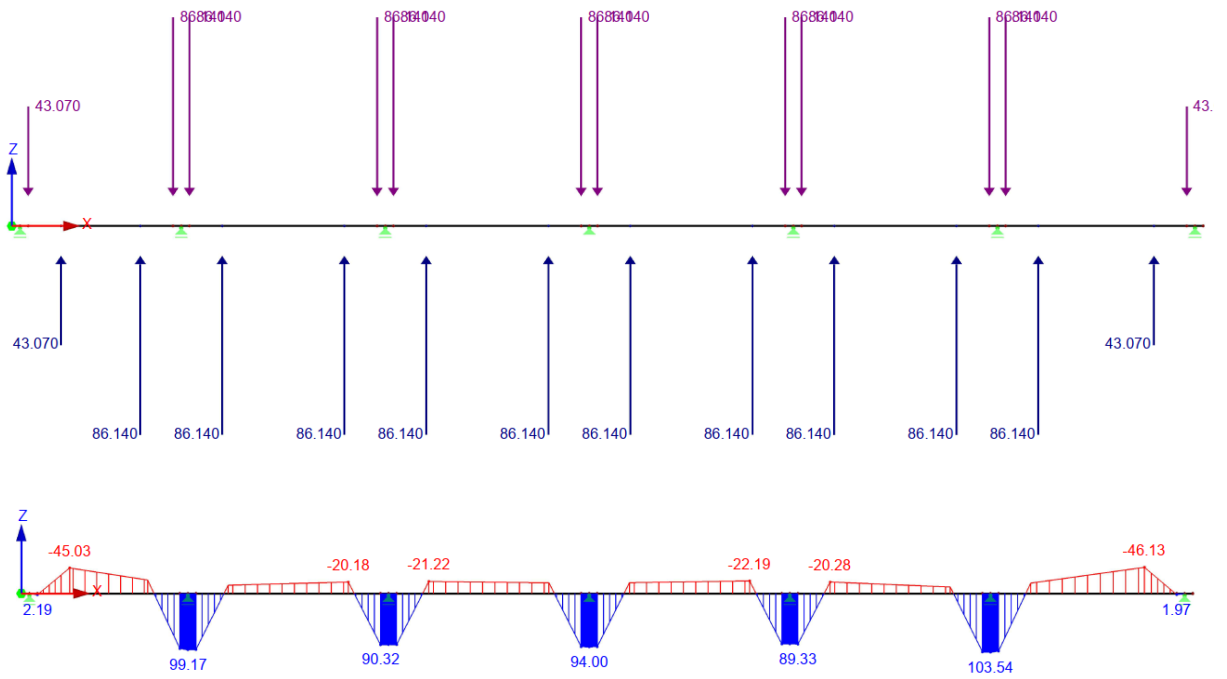
Kuva 30. Ohjaisvoimat ja niistä aiheutuva momenttikuvaaja paraabeligeometriassa



Kuva 31. Ohjaisvoimat ja niistä aiheutuva momenttikuvaaja free tendon layoutissa



Kuva 32. Ohjausvoimat ja niistä aiheutuva momenttikuvaaja yksinkertaistetussa geometriassa



6.5.3 Jännitykset

alla olevassa taulukossa - = puristusjännitystä ja +=vetojännitystä.

Taulukko 14. Jännitykset

	Paraabeli	Free tendon layout	Yksinkertaistettu geometria	Sallittu jännitys
Jännitystilanne, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	0,175 MPa	0,44 MPa	0,22 MPa	2,4 MPa
Jännitystilanne, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	0,41 MPa	0,39 MPa	0,71 MPa	2,4 MPa
Jännitystilanne, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-3,74 MPa	-4,0 MPa	-3,74 MPa	-13,8 MPa
Jännitystilanne, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-3,97 MPa	-3,96 MPa	-4,22 MPa	-13,8 MPa
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-6,42 MPa	-6,65 MPa	-5,72 MPa	-15,75 MPa
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,22 MPa	-6,26 MPa	-6,50 MPa	-15,75 MPa
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	3,2 MPa	3,42 MPa	2,54 MPa	4,54 MPa
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	2,96 MPa	3,01 MPa	3,30 MPa	4,54 MPa
Ominaisyhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-7,76 MPa	-8,0 MPa	-7,07 MPa	-21 MPa
Ominaisyhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-7,43 MPa	-7,51 MPa	-7,76 MPa	-21 MPa

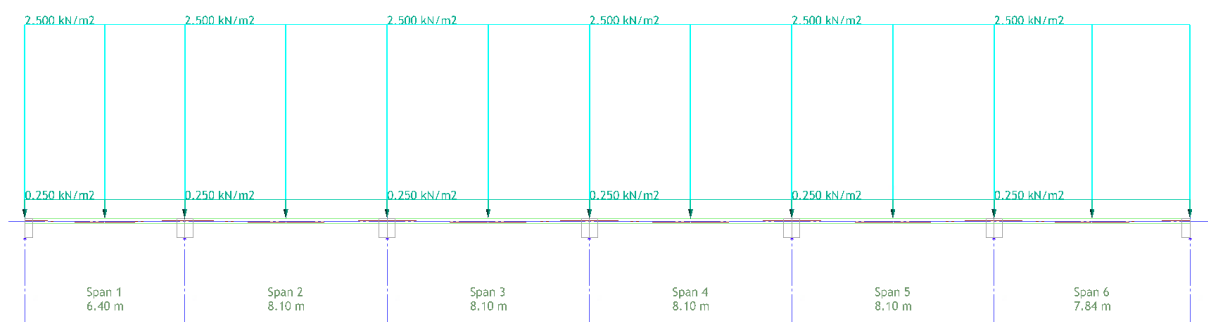
Ominaisyhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	4,2 MPa	4,43 MPa	3,56 MPa	4,54 MPa
Ominaisyhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	3,87 MPa	3,95 MPa	4,25 MPa	4,54 MPa
Pysyvien kuormien yhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	0,84 MPa	1,07 MPa	0,24 MPa	4,54 MPa
Pysyvien kuormien yhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	0,83 MPa	0,83 MPa	1,09 MPa	4,54 MPa

Yllä olevan taulukon perusteella voidaan todeta, että kenttäalueella paraabeligeometrialla saadaan 8–10 % pienemmät jännitykset kuin yksinkertaistetulla geometrialla. Tukialueella tilanne on vastakkainen, eli yksinkertaistetulla geometrialla saadaan 10–15 % pienemmät jännitykset kuin paraabeligeometrialla. Free tendon layoutissa saadaan tukialueella kaikista suurimmat jännitykset, 5–10 % suuremmat kuin paraabeligeometrialla, ja kenttäalueella hyvin lähelle samansuuruiset kuin paraabeligeometrialla.

6.5.4 Adapt PT/RC

Laskelmat tarkistettiin vielä Adapt PT/RC-ohjelmistolla. Ohjelmalla voi suunnitella palkkeja sekä yhteen ja kahteen suuntaan kantavia laattarakenteita. Jännepunokset voivat olla tartunnallisia tai tartunnattomia. Lisäksi ohjelmalla voi suunnitella raudoitettuja laattarakenteita.

Kuva 33. Rakennemalli Adaptissa



Taulukko 15. Jännityserot käsin lasketun ja ohjelmiston välillä, paraabeligeometria

	Käsin laskenta	Adapt PT/RC	Ero
Jännitystilanne, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	0,175 MPa	0,09 MPa	48 %
Jännitystilanne, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	0,41 MPa	0,46 MPa	-13 %
Jännitystilanne, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-3,74 MPa	-4,30 MPa	-15 %
Jännitystilanne, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-4,00 MPa	-4,46 MPa	-12 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	2,86 MPa	2,85 MPa	0 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	2,66 MPa	2,63 MPa	1 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-6,42MPa	-6,51 MPa	-1 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,22 MPa	-6,13 MPa	2 %
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	3,2 MPa	3,18 MPa	1 %
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	2,96 MPa	2,90 MPa	2 %
Tavallinen yhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-6,76 MPa	-6,83 MPa	-1 %
Tavallinen yhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,52 MPa	-6,41 MPa	2 %

Käsin laskennan ja Adaptin arvot ovat samansuuruiset. Jännitystilanteessa eroa on enemmän, se todennäköisesti johtuu siitä, että ohjausvoimat on hieman eri tavalla laskettu ja aseteltu Adaptissa ja ero näkyy selvimmin juuri jännitystilanteessa, jossa vaikuttaa vain oma paino, punosvoima sekä ohjausvoimat. Murtorajatilan kuormituksista tulevat momenttikuvaajat olivat käsin laskennassa ja Adaptissa samanlaiset.

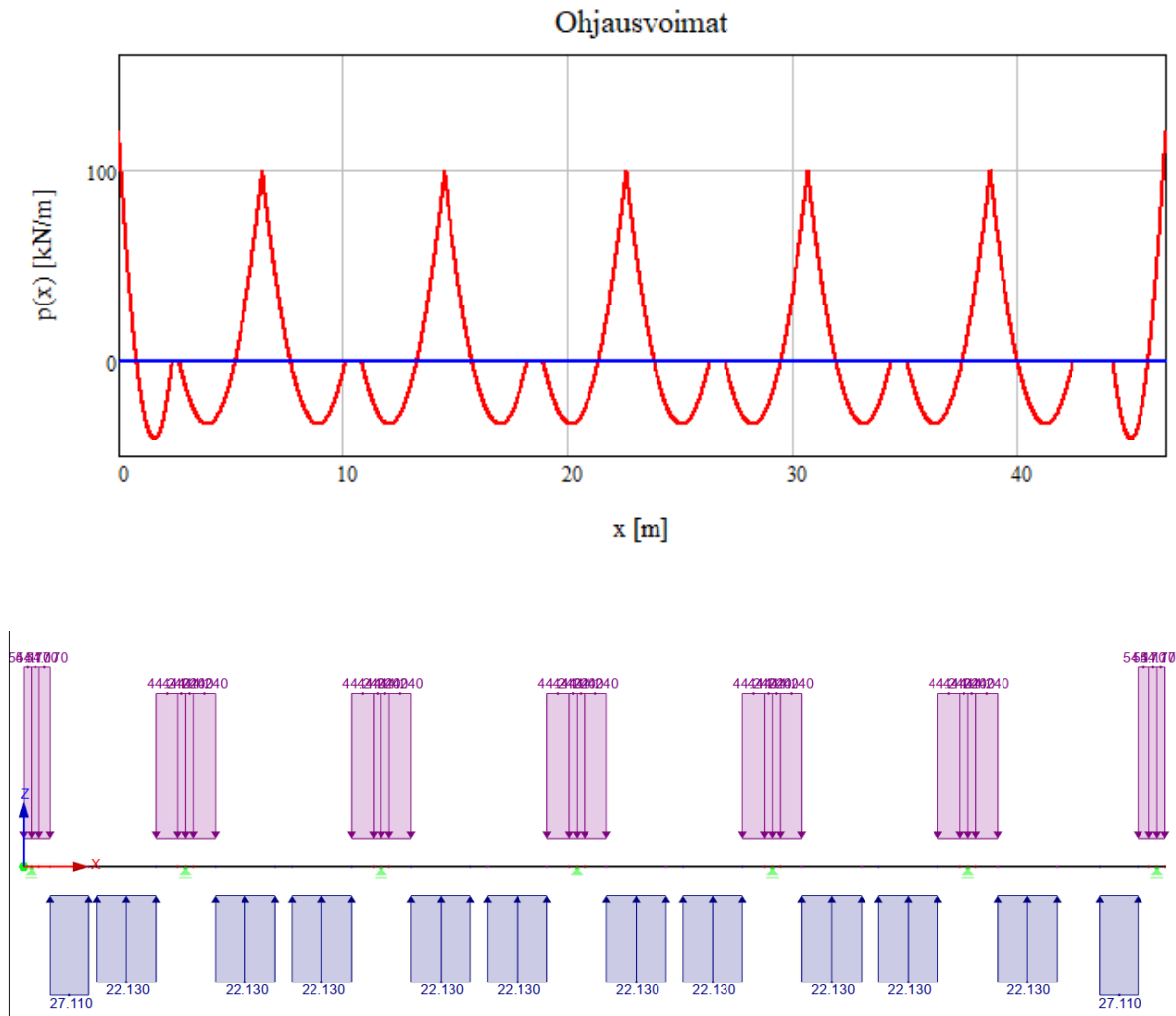
Taulukko 16. Jännityserot käsin lasketun ja ohjelmiston välillä, free tendon layout

	Käsin laskenta	Adapt PT/RC	Ero
Jännitystilanne, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	0,44 MPa	0,08 MPa	81 %
Jännitystilanne, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	0,39 MPa	0 MPa	-
Jännitystilanne, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-3,99 MPa	-4,14 MPa	-4 %
Jännitystilanne, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-3,96 MPa	-3,8 MPa	4 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	3,08 MPa	2,71 MPa	12 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	2,69 MPa	2,16 MPa	20 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-6,65 MPa	-6,37 MPa	4 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,26 MPa	-5,67 MPa	9 %
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	3,42 MPa	3,02 MPa	12 %
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	3,01 MPa	2,44 MPa	19 %
Tavallinen yhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-6,99 MPa	-6,69 MPa	4 %
Tavallinen yhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,57 MPa	-5,95 MPa	9 %

Free tendon layoutissa voidaan havaita suuremmat erot vetojännityksissä kuin puristusjännityksissä. Tämä johtuu siitä, että käsin laskelmissa on tehty ohjausvoimissa yksinkertaistus, ohjausvoimat on jaettu tasaiseksi kuormaksi, kun ne todellisuudessa ovat paraabelimaiset. Tästä syystä momentit ja siten jännitykset jakautuvat kentässä ja tuella hieman eri tavalla. Adaptissa ohjausvoimat todennäköisesti määritellään eri tavalla, ja siksi saadaan niin suuria eroja vetojännityksissä. Murtorajatilan kuormituksista tulevat momenttikuvaajat olivat käsin laskennassa ja Adaptissa samanlaiset, eli ero on

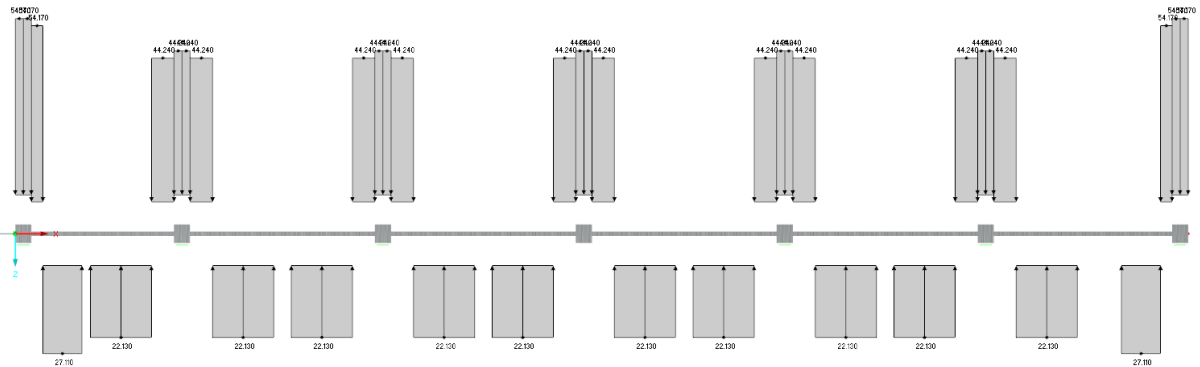
ohjausvoimissa. Alla olevassa kuvassa on esitetty ero laskennallisen ohjausvoiman ja laskennassa käytetyn yksinkertaistuksen välillä.

Kuva 34. Ohjausvoimat free tendon layoutissa

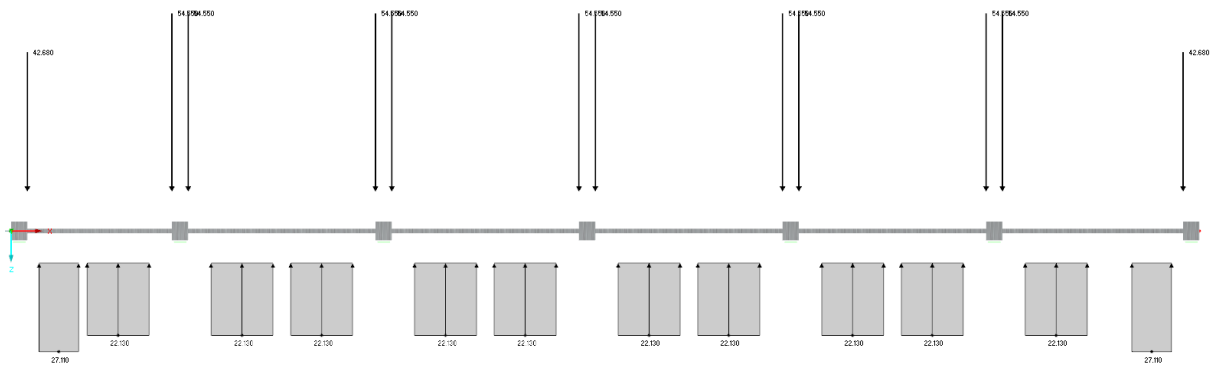


Tarkastuksen tueksi tutkittiin, miten vaikuttaa, jos tuella oleva ohjausvoima laitetaan pistekuormana. Tukialueella laskennallinen ohjausvoima tekee piikin ja laskeutuu alas tehden kolmion muotoisen ohjausvoimakuormituksen, kuten kuvassa 34. Tutkittiin, miten vaikuttaa lopputuloksiin, jos ohjausvoima vaikuttaa kolmion kolmannespisteessä tai aivan tukialueen reunalla.

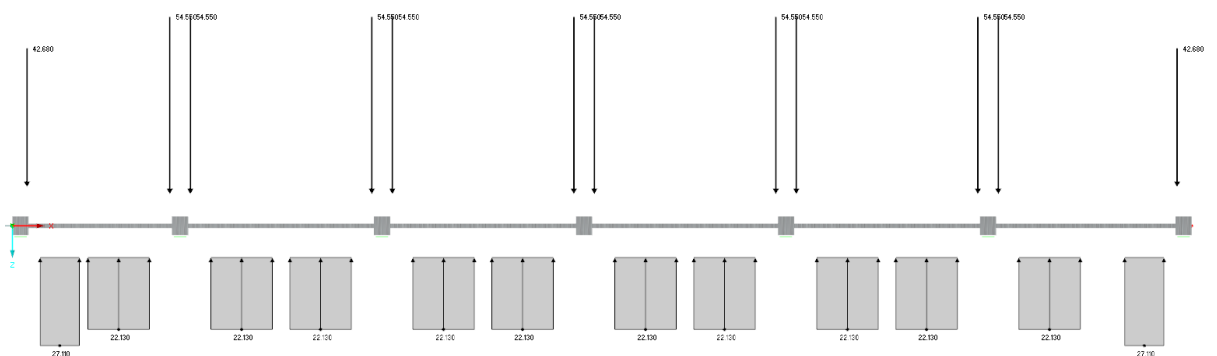
Kuva 35. Free tendon layout, ohjausvoimat tasaisena kuormana



Kuva 36. Free tendon layout 2, ohjausvoimat tuen vieressä



Kuva 37. Free tendon layout 3, ohjausvoimat kolmannespisteessä



Molemmilla tapauksilla, jossa ohjausvoimat syötettiin pistekuormana, saatiin vetojännityksiä tukialueella pienennettyä. Adaptin arvoja lähimpänä oli tapaus, jossa ohjausvoima oli kolmion kolmannespisteessä, eli keskituilla tukialueen ulkopuolella ja reunatuilla tukialueella. Tällä tapauksella erot Adaptiin tuen vetojännityksissä olivat 1–5 % luokkaa.

Kenttäalueen vetojännityksissä ei saatu kummallakaan tapauksella eroja yksinkertaistukseen verrattuna, ero Adaptiin oli 17–20 %. Puristusjännityksiä saatiin molemmilla tapauksilla myös lähemmäs Adaptin arvoja, ero Adaptin tuen puristusjännityksissä oli 2–4 % ja kentän puristusjännityksissä 10 %. Kaikista tutkituista versioista varsinaisessa laskennassa käytetty yksinkertaistus on jännityksien puolesta varmimmalla puolella, sillä saadaan suurimmat jännitykset ja siten myös suurin punosmäärä.

Alla olevaan taulukkoon on vielä koottu jännitykset eri ohjausvoima-asetteluilla free tendon layoutissa verrattuna keskenään. Free tendon layoutissa ohjausvoimat ovat tasaisena kuormana kaikkialla, free tendon layout 2:ssa tukialueen ohjausvoimat ovat pistekuormana tuen vieressä ja free tendon layout 3:ssa tukialueen ohjausvoimat ovat pistekuormana ohjausvoiman kolmannespisteessä. Kentän ohjausvoimat kaikissa free tendon layout tapauksissa ovat tasaisena kuormana.

Taulukko 17. Erot free tendon layoutissa eri ohjausvoima-asetteluilla

	Free tendon layout	Free tendon layout 2	Free tendon layout 3	Adapt
Jännitystilanne, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	0,44 MPa	-0,21 MPa	-0,06 MPa	0,08 MPa
Jännitystilanne, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	0,39 MPa	0,36 MPa	0,3 MPa	0 MPa
Jännitystilanne, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-3,99 MPa	-3,36 MPa	-3,51 MPa	-4,14 MPa
Jännitystilanne, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-3,96 MPa	-3,93 MPa	-3,87 MPa	-3,8 MPa
Pitkäaikaisyhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	3,08 MPa	2,53 MPa	2,66 MPa	2,71 MPa

Pitkäaikaisyhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	2,69 MPa	2,66 MPa	2,62 MPa	2,16 MPa
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-6,65 MPa	-6,1 MPa	-6,22 MPa	-6,37 MPa
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,26 MPa	-6,23 MPa	-6,18 MPa	-5,67 MPa
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	3,42 MPa	2,87 MPa	3,0 MPa	3,02 MPa
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	3,01 MPa	2,98 MPa	2,93 MPa	2,44 MPa
Tavallinen yhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-6,99 MPa	-6,43 MPa	-6,56 MPa	-6,69 MPa
Tavallinen yhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,57 MPa	-6,54 MPa	-6,5 MPa	-5,95 MPa

Taulukko 18. Jännityserot käsin lasketun ja ohjelmiston välillä, yksinkertaistettu geometria

	Käsin laskenta	Adapt PT/RC	Ero
Jännitystilanne, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	0,22 MPa	0 MPa	-
Jännitystilanne, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	0,71 MPa	0,52 MPa	26 %
Jännitystilanne, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-3,74 MPa	-3,61 MPa	3 %
Jännitystilanne, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-4,22 MPa	-4,55 MPa	-8 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	2,20 MPa	2,01 MPa	5 %

Pitkäaikaisyhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	2,98 MPa	2,81 MPa	6 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-5,72 MPa	-5,76 MPa	-1 %
Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,50 MPa	-6,3 MPa	3 %
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys tukialueella yläpinnassa	2,54 MPa	2,41 MPa	5 %
Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys kenttäalueella alapinnassa	3,30 MPa	3,09 MPa	6 %
Tavallinen yhdistelmä, puristusjännitys tukialueella alapinnassa	-6,05 MPa	-6,09 MPa	-1 %
Tavallinen yhdistelmä, puristusjännitys kenttäalueella yläpinnassa	-6,82 MPa	-6,58 MPa	3 %

Yksinkertaistetussa geometriassa saadut jännitykset ovat samaa suuruusluokkaa käsin laskennassa ja Adaptissa. Suurin ero tässäkin tulee jännitystilanteesta ja todennäköisesti siitä syystä, että ohjausvoimien määrittelyssä on pieni ero käsin laskennan ja Adaptin välillä. Murtorajatilan kuormituksista tulevat momenttikuvaajat olivat käsin laskennassa ja Adaptissa samanlaiset.

7 Johtopäätökset

Opinnäytetyössä oli tarkoitus tutkia free tendon layoutin mukaisen punosgeometrian eroja paraabeligeometriaan. Vertailuun otettiin mukaan toinen yleisesti käytetty punosgeometria eli yksinkertaistettu punosgeometria.

Laskelmien perusteella free tendon layout antaa samansuuruisia arvoja kuin paraabeligeometria. Ankkurointihäviöt ja keskimääräinen jännevoima ovat hyvin lähellä toisiaan. Ohjausvoimissa on eroavaisuutta enemmän, mutta free tendon layoutin ohjausvoimilla saadaan pienemmät tasapainottavat momentit kuin paraabeligeometrialla. Näissä laskelmissa käytettiin samaa punosmäärää kaikissa tilanteissa, jotta saatiin vertailukelpoisia jännityksen arvoja. Tosiasiassa punoksia saatetaan tarvita 1–2 kpl enemmän free tendon layoutissa kuin paraabeligeometriassa. Tämä ei kuitenkaan

kokonaiskustannuksissa vaikuta yhtä paljon kuin työn väheneminen tuentatarpeen poistumisella. Kentän alapinnan raudoituksen tai tuen kohdalla yläpinnan raudoituksen määrässä ei ole eroa.

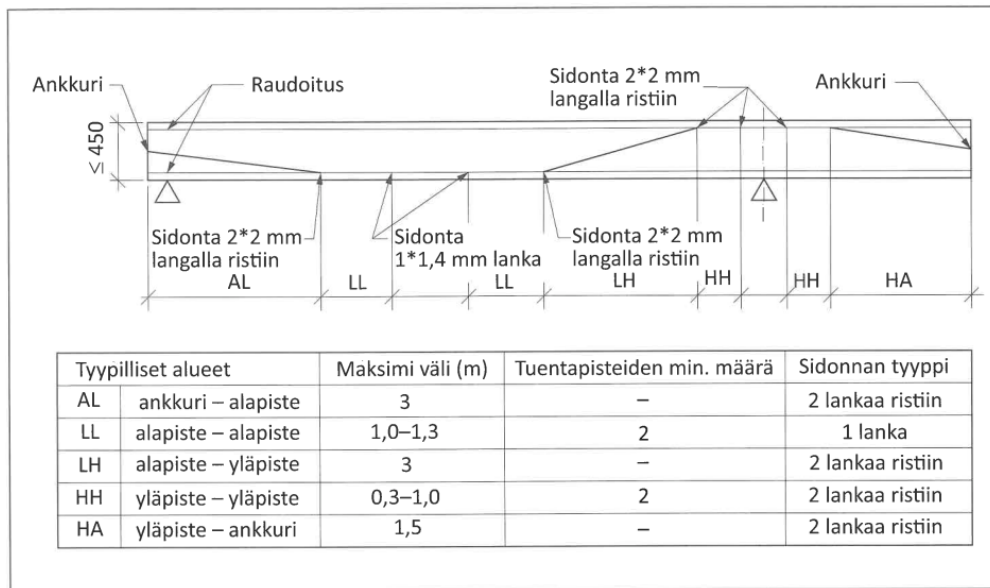
Yksinkertaistetussa punosgeometriassa oli eniten eroavaisuuksia kahteen muuhun punosgeometriaan verrattuna. Tuen kohdalla ohjausvoimista aiheutuva momentti oli kaikista suurin, mutta kenttäalueilla pienin. Jännitykset tällä tapauksella on tukialueilla kaikista pienimmät ja kenttäalueilla suurimmat, mutta ero näyttäisi olevan alle 1,0 MPa. Raudoituksen määrä yksinkertaistetussa on hieman isompi tuen kohdalla kuin muissa tapauksissa.

Johtopäätöksenä laskelmien perusteella voidaan todeta, että eri punosgeometrioilla saaduissa jännityksissä ei ole suuria eroja toistensa suhteen.

Yksinkertaistetulla geometrialla ja free tendon layoutilla saadaan työmaa-aikana kustannussäästöjä, sillä punoksen tuentaa raudoituspukeilla ei tarvitse tehdä lainkaan ja sidontaa ei tarvitse tehdä niin tiheästi. Free tendon layoutissa huomioitavaa on, että punokset on tukialueilla sidottava 2*2 mm paksuisilla langoilla. Mikäli sidonta tehdään pienemmillä langoilla, tulee jännepunoksen ympärille kiinnityskohtaan lisätä 2 mm paksu suojaputki punoksen suojakuoren vaurioitumisen estämiseksi.

Klemens Maier tutki myös punosten vaakasuuntaista siirtymistä valun aikana free tendon layoutissa ja tuli lopputulokseen, että punosten pysymiseksi paikoillaan tulee noudattaa yllä olevia ohjeita punoksen sidonnasta. Tällöin punoksen jäykkyys tukialueilla paranee ja se todennäköisemmin pysyy valun aikana paikoillaan.

Kuva 38. Erään jännemenetelmän ohje sidonnasta free tendon layoutissa



Lähteet

- BBR VT International Ltd. (10. 9 2020a). *BBR VT CONA CMX Strong and versatile volume 1: system applications*. Noudettu osoitteesta Naulankanta:
https://www.naulankanta.fi/files/bbr_cona_cmx_vol1_sysapp_en_rev3_1216.pdf
- BBR VT International Ltd. (20. 8 2020b). *BBR VT CONA CMX The Ultimate design guide volume 2: system specifications*. Noudettu osoitteesta Naulankanta:
<https://www.naulankanta.fi/files/CONA-CMX-Vol-2.pdf>
- European Technical Assessment ETA-06-0165. (2016). *BBR VT CONA CMM: Unbonded Post-tensioning System*.
- Maier, K. (2002). Free Tendon Layout. IABSE Symposium Melbourne 2002.
- Naaman, A. (2004). *Prestressed concrete analysis and design fundamentals. 2. painos*. Ann Arbor, Michigan USA: Techno Press 3000.
- SFS 1265-1. (2014). *Jänneteräkset Osa 1: Yleiset vaatimukset*. Noudettu osoitteesta 13.12.2019: <https://online.sfs.fi>
- SFS 1265-3. (2014). *Jänneteräkset Osa 3: Punos*. Noudettu osoitteesta 13.12.2019: <https://online.sfs.fi>
- SFS-EN 1992-1-1+A1+AC. (ei pvm). *Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. Noudettu osoitteesta 19.11.2019: <https://online.sfs.fi>
- Suomen Betoniyhdistys ry & Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. (2011). *RIL 202-2011/BY61-2011 Betonirakenteiden suunnitteluohje*. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry & Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Suomen Betoniyhdistys ry. (2008). *BY210: Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008*. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
- Suomen Betoniyhdistys ry. (2017). *BY69: Tartunnattomat jänteet betonirakenteissa 2017*. Helsinki: BY-Koulutus Oy.
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. (2016). *RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat; Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3 ja EN 1991-1-4*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Liite 1: Laatan mitoitus, paraabeligeometria

Materiaaliominaisuudet

Betoni

Lieriölujuuden ominaisarvo	$f_{ck} := 35\text{MPa}$
Betonin lieriölujuuden ominaisarvo jännityshetkellä	$f_{ck,i} := 23\text{MPa}$
Betonin taivutusvetolujuuden keskiarvo	$f_{ctm} := 3.2\text{MPa}$
Betonin vetolujuuden 5% fraktiili	$f_{ctk,0.05} := 2\text{MPa}$
Betonin taivutusvetolujuus jännityshetkellä	$f_{ctm,i} := 2.4\text{MPa}$
Kimmokertoimen keskiarvo	$E_{cm} := 34\text{GPa}$
Kimmokertoimen keskiarvo jännityshetkellä	$E_{cm,i} := 31\text{GPa}$
Betonin murtopuristuma murtorajatilassa	$\epsilon_{cu3} := 0.35\%$

Betoniteräket

Vetolujuuden ominaisarvo ja kimmokerroin	$f_{yk} := 500\text{MPa}$
Betoniterästen kimmokerroin	$E_s := 200\text{GPa}$
Betoniterästen murtovenymä	$\epsilon_{uk} := 5\%$ (Sitkeysluokka B)

Jänneteräket

0,1- rajan ja vetolujuuden ominaisarvo	$f_{p0.1k} := 1640\text{MPa}$ $f_{pk} := 1860\text{MPa}$
Jänneteräksen kimmokertoimen mitoitusarvo	$E_p := 195\text{GPa}$
Relaksaatiohäviö 1000 tuntia jännittämisen jälkeen	$\rho_{1000} := 2.5\%$ Luokka 2, pieni relaksaatio
Punoksen halkaisija	$\phi_p := 15.7\text{mm}$
Yhden punoksen pinta-ala	$A_{p,1} := 150\text{mm}^2$
Suurin sallittu jännittämisvoima	$\sigma_{p,max.all} := \min(0.8 \cdot f_{pk}, 0.9 \cdot f_{p0.1k})$ $\sigma_{p,max.all} = 1.476 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$
Suurin sallittu jännevoima välittömien häviöiden jälkeen	$\sigma_{p,m0.all} := \min(0.75 \cdot f_{pk}, 0.85 \cdot f_{p0.1k})$ $\sigma_{p,m0.all} = 1.394 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$

Osavarmuusluvut

Jännevoiman suunnitteluvarvon osavarmuusluku murtorajatilassa	$\gamma_{P.fav} := 1$
Betonin osavarmuusluku ja pienennyskerroin murtorajatilassa	$\alpha_{cc} := 0.85$ $\alpha_{ct} := 0.85$
Betoniterästen osavarmuusluku	$\gamma_S := 1.15$ $\gamma_C := 1.5$

Suunnittelulujuudet

Betonin puristuslujuuden suunnittelu-arvo

$$f_{cd} := \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_C} = 19.833 \cdot \text{MPa}$$

Vetolujuuden mitoitusarvo

$$f_{ctd} := \frac{\alpha_{ct} \cdot f_{ctk} \cdot 0.05}{\gamma_C} = 1.133 \cdot \text{MPa}$$

Betoniterästen myötölujuuden suunnittelu-arvo

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_S} = 434.783 \cdot \text{MPa}$$

Jänneterästen myötölujuuden suunnittelu-arvo

$$f_{pd} := \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_S} = 1.426 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Laatan mittatiedot

Laatan paksuus

$$h := 180 \text{ mm}$$

Laatan mitoituskaistan leveys

$$b_w := 5500 \text{ mm}$$

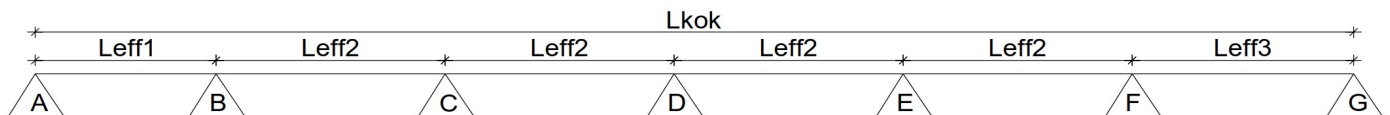
Laatan jännevälit

$$L_{\text{eff1}} := 6.4 \text{ m}$$

$$L_{\text{eff2}} := 8.1 \text{ m}$$

$$L_{\text{eff3}} := 7.84 \text{ m}$$

$$L_{\text{kok}} := L_{\text{eff1}} + 4 \cdot L_{\text{eff2}} + L_{\text{eff3}} = 46.64 \text{ m}$$



Laatan mitoituskaista on valittu siten, että siinä pystytään ottamaan yhden punoksen vaurioituminen samassa poikkileikkauksessa jonka leveys on

$$L_{\text{mit}} := \frac{1}{3} \cdot L_{\text{eff2}} + \frac{1}{3} \cdot L_{\text{eff3}} = 5.313 \text{ m}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } b_w > L_{\text{mit}} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$$

Taivutusvetolujuus

Korotettu taivutusvetolujuus

$$f_{\text{ctm.fl}} := \max\left(1, 1.6 - \frac{h}{1\text{m}}\right) \cdot f_{\text{ctm}}$$

$$f_{\text{ctm.fl}} = 4.544 \cdot \text{MPa}$$

Laskelmissa käytettävä taivutusvetolujuus

$$f_{\text{ct.eff}} := f_{\text{ctm.fl}} = 4.544 \cdot \text{MPa}$$

Halkeilemattoman poikkileikkauksen poikkileikkausominaisuudet

Poikkileikkauksen pinta-ala normaalivoiman vaikutuksia laskettaessa	$A_{gr} := b_w \cdot h = 0.99 \text{ m}^2$
Poikkileikkauksen painopisteen korkeus yläreunasta	$y_{gr} := 0.5 \cdot h = 90 \cdot \text{mm}$
Jäyhyysmomentti	$I_{gr} := \frac{b_w \cdot h^3}{12} = 2.673 \times 10^{-3} \text{ m}^4$
Suorakaidepoikkileikkauksen taisutusvastus	$W_{gr} := \frac{b_w \cdot h^2}{6} = 0.03 \cdot \text{m}^3$
Sydänkuvion yläreuna	$k_T := \frac{-W_{gr}}{A_{gr}} = -30 \cdot \text{mm}$
Sydänkuvion alareuna	$k_B := \frac{W_{gr}}{A_{gr}} = 30 \cdot \text{mm}$

Kuormat

Rakenteen omapaino SW	$g_{sw} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot A_{gr} = 24.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Pysyvä hyötykuorma DL	$g_1 := b_w \cdot 0.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1.375 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Muuttuva hyötykuorma LL	$q_1 := b_w \cdot 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 13.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
	$\psi_1 := 0.7 \quad \psi_2 := 0.6$

Koordinaatisto

Poikkileikkausominaisuuksia laskettaessa käytetään seuraavaa koordinaatistoa:

- Positiivinen +y suunta on alaspäin poikkileikkauksen painopisteestä (PP)
- Negatiivinen -y suunta on ylöspäin poikkileikkauksen painopisteestä (PP)
- Positiivinen (+) jännitys on vetoa
- Negatiivinen (-) jännitys on puristusta

Punosgeometria

Sijoitetaan punokset siten, että punokset ovat laatan painopisteessä laatan päissä. Kentässä mahdollisimman alhaalla (jakoterästen päällä) ja tuilla mahdollisimman ylhäällä (palkin pääterästen päällä, hakaterästen välissä).

Punosten epäkeskisyydet laatan painopisteakseleilta

Epäkeskisyyys päätytuella A ja G	$e_A := 0 \text{ mm} \quad e_G := 0 \text{ mm}$
Epäkeskisyyys reunakentässä A...B	$e_{f1} := 0.5 \cdot h - 50 \text{ mm} - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyyys välituella B	$e_B := -0.5 \cdot h + 50 \text{ mm} + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyyys reunakentässä B...C	$e_{f2} := 0.5 \cdot h - 50 \text{ mm} - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyyys välituella C	$e_C := -0.5 \cdot h + 50 \text{ mm} + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot \text{mm}$

Epäkeskisyys reunakentässä C...D	$e_{f3} := 0.5 \cdot h - 50\text{mm} - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyys välituella D	$e_D := -0.5 \cdot h + 50\text{mm} + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyys reunakentässä D...E	$e_{f4} := 0.5 \cdot h - 50\text{mm} - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyys välituella E	$e_E := -0.5 \cdot h + 50\text{mm} + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyys reunakentässä E...F	$e_{f5} := 0.5 \cdot h - 50\text{mm} - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyys välituella F	$e_F := -0.5 \cdot h + 50\text{mm} + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot \text{mm}$
Epäkeskisyys reunakentässä F...G	$e_{f6} := 0.5 \cdot h - 50\text{mm} - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot \text{mm}$
Punosten käänneasteiden sijainnit	
Mitta L1	$L_1 := 0.1 \cdot L_{\text{eff1}} = 640 \cdot \text{mm}$
Mitta Lf1	$L_{f1} := 0.5 \cdot L_{\text{eff1}} = 3.2 \times 10^3 \cdot \text{mm}$
Mitta L2	$L_2 := 0.1 \cdot L_{\text{eff1}} = 640 \cdot \text{mm}$
Mitta L3	$L_3 := 0.1 \cdot L_{\text{eff2}} = 810 \cdot \text{mm}$
Mitta Lf2	$L_{f2} := 0.5 \cdot L_{\text{eff2}} = 4.05 \times 10^3 \cdot \text{mm}$
Mitta L4	$L_4 := 0.1 \cdot L_{\text{eff2}} = 810 \cdot \text{mm}$
Mitta L5	$L_5 := 0.1 \cdot L_{\text{eff3}} = 784 \cdot \text{mm}$
Mitta Lf3	$L_{f3} := 0.5 \cdot L_{\text{eff3}} = 3.92 \times 10^3 \cdot \text{mm}$
Mitta L6	$L_6 := 0.1 \cdot L_{\text{eff3}} = 784 \cdot \text{mm}$

Jänneväli A-B

$$y_{1AB}(x) := e_A + \frac{(e_{f1} - e_A)}{L_1 \cdot [L_1 + (L_{f1} - L_1)]} \cdot x^2$$

$$y_{2AB}(x) := e_{f1} - \frac{(e_{f1} - e_A)}{(L_{f1} - L_1) \cdot [L_1 + (L_{f1} - L_1)]} \cdot (x - L_{f1})^2$$

$$y_{3AB}(x) := e_{f1} - \frac{(e_{f1} - e_B)}{(L_{f1} - L_2) \cdot [(L_{f1} - L_2) + L_2]} \cdot (x - L_{f1})^2$$

$$y_{4AB}(x) := e_B + \frac{(e_{f1} - e_B)}{L_2 \cdot [(L_{f1} - L_2) + L_2]} \cdot (L_{\text{eff1}} - x)^2$$

$$y_{AB}(x) := \begin{cases} y_{1AB}(x) & \text{if } 0 \leq x \leq L_1 \\ y_{2AB}(x) & \text{if } L_1 < x \leq L_{f1} \\ y_{3AB}(x) & \text{if } L_{f1} < x < L_{\text{eff1}} - L_2 \\ y_{4AB}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} - L_2 \leq x \leq L_{\text{eff1}} \end{cases}$$

Jänneväli B-C

$$y_{1BC}(x) := e_B + \frac{(e_{f2} - e_B)}{L_3 \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} \cdot (x - L_{\text{eff1}})^2$$

$$y_{2BC}(x) := e_{f2} - \frac{(e_{f2} - e_B)}{(L_{f2} - L_3) \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} \cdot (x - L_{f2} - L_{\text{eff1}})^2$$

$$y_{3BC}(x) := e_{f2} - \frac{(e_{f2} - e_C)}{(L_{f2} - L_4) \cdot [(L_{f2} - L_4) + L_4]} \cdot (x - L_{f2} - L_{\text{eff1}})^2$$

$$y_{4BC}(x) := e_C + \frac{(e_{f2} - e_C)}{L_4 \cdot [(L_{f2} - L_4) + L_4]} \cdot (L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} - x)^2$$

$$y_{BC}(x) := \begin{cases} y_{1BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} \leq x \leq L_{\text{eff1}} + L_3 \\ y_{2BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + L_3 < x \leq L_{\text{eff1}} + L_{f2} \\ y_{3BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + L_{f2} < x < L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} - L_4 \\ y_{4BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} - L_4 \leq x \leq L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} \end{cases}$$

Jänneväli C-D

$$y_{1CD}(x) := e_C + \frac{(e_{f3} - e_C)}{L_3 \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} \cdot [x - (L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}})]^2$$

$$y_{2CD}(x) := e_{f3} - \frac{(e_{f3} - e_C)}{(L_{f2} - L_3) \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} \cdot [x - L_{f2} - (L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}})]^2$$

$$y_{3CD}(x) := e_{f3} - \frac{(e_{f3} - e_D)}{(L_{f2} - L_4) \cdot [(L_{f2} - L_4) + L_4]} \cdot [x - L_{f2} - (L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}})]^2$$

$$y_{4CD}(x) := e_D + \frac{(e_{f3} - e_D)}{L_4 \cdot [(L_{f2} - L_4) + L_4]} \cdot (L_{\text{eff1}} + 2L_{\text{eff2}} - x)^2$$

$$y_{CD}(x) := \begin{cases} y_{1CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} \leq x \leq L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} + L_3 \\ y_{2CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} + L_3 < x \leq L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} + L_{f2} \\ y_{3CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} + L_{f2} < x < L_{\text{eff1}} + 2L_{\text{eff2}} - L_4 \\ y_{4CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + 2L_{\text{eff2}} - L_4 \leq x \leq L_{\text{eff1}} + 2L_{\text{eff2}} \end{cases}$$

Jänneväli D-E

$$y_{1DE}(x) := e_D + \frac{(e_{f4} - e_D)}{L_3 \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} \cdot [x - (L_{eff1} + 2L_{eff2})]^2$$

$$y_{2DE}(x) := e_{f4} - \frac{(e_{f4} - e_D)}{(L_{f2} - L_3) \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} \cdot [x - L_{f2} - (L_{eff1} + 2L_{eff2})]^2$$

$$y_{3DE}(x) := e_{f4} - \frac{(e_{f4} - e_E)}{(L_{f2} - L_4) \cdot [(L_{f2} - L_4) + L_4]} \cdot [x - L_{f2} - (L_{eff1} + 2L_{eff2})]^2$$

$$y_{4DE}(x) := e_E + \frac{(e_{f4} - e_E)}{L_4 \cdot [(L_{f2} - L_4) + L_4]} \cdot (L_{eff1} + 3L_{eff2} - x)^2$$

$$y_{DE}(x) := \begin{cases} y_{1DE}(x) & \text{if } L_{eff1} + 2L_{eff2} \leq x \leq L_{eff1} + 2L_{eff2} + L_3 \\ y_{2DE}(x) & \text{if } L_{eff1} + 2L_{eff2} + L_3 < x \leq L_{eff1} + 2L_{eff2} + L_{f2} \\ y_{3DE}(x) & \text{if } L_{eff1} + 2L_{eff2} + L_{f2} < x < L_{eff1} + 3L_{eff2} - L_4 \\ y_{4DE}(x) & \text{if } L_{eff1} + 3L_{eff2} - L_4 \leq x \leq L_{eff1} + 3L_{eff2} \end{cases}$$

Jänneväli E-F

$$y_{1EF}(x) := e_E + \frac{(e_{f5} - e_E)}{L_3 \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} \cdot [x - (L_{eff1} + 3L_{eff2})]^2$$

$$y_{2EF}(x) := e_{f5} - \frac{(e_{f5} - e_E)}{(L_{f2} - L_3) \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} \cdot [x - L_{f2} - (L_{eff1} + 3L_{eff2})]^2$$

$$y_{3EF}(x) := e_{f5} - \frac{(e_{f5} - e_F)}{(L_{f2} - L_4) \cdot [(L_{f2} - L_4) + L_4]} \cdot [x - L_{f2} - (L_{eff1} + 3L_{eff2})]^2$$

$$y_{4EF}(x) := e_F + \frac{(e_{f5} - e_F)}{L_4 \cdot [(L_{f2} - L_4) + L_4]} \cdot (L_{eff1} + 4L_{eff2} - x)^2$$

$$y_{EF}(x) := \begin{cases} y_{1EF}(x) & \text{if } L_{eff1} + 3L_{eff2} \leq x \leq L_{eff1} + 3L_{eff2} + L_3 \\ y_{2EF}(x) & \text{if } L_{eff1} + 3L_{eff2} + L_3 < x \leq L_{eff1} + 3L_{eff2} + L_{f2} \\ y_{3EF}(x) & \text{if } L_{eff1} + 3L_{eff2} + L_{f2} < x < L_{eff1} + 4L_{eff2} - L_4 \\ y_{4EF}(x) & \text{if } L_{eff1} + 4L_{eff2} - L_4 \leq x \leq L_{eff1} + 4L_{eff2} \end{cases}$$

Jänneväli F-G

$$y_{1FG}(x) := e_F + \frac{(e_{f6} - e_F)}{L_5 \cdot [L_5 + (L_{f3} - L_5)]} \cdot [x - (L_{eff1} + 4L_{eff2})]^2$$

$$y_{2FG}(x) := e_{f6} - \frac{(e_{f6} - e_F)}{(L_{f3} - L_5) \cdot [L_5 + (L_{f3} - L_5)]} \cdot [x - L_{f3} - (L_{eff1} + 4L_{eff2})]^2$$

$$y_{3FG}(x) := e_{f6} - \frac{(e_{f6} - e_G)}{(L_{f3} - L_6) \cdot [(L_{f3} - L_6) + L_6]} \cdot [x - L_{f3} - (L_{eff1} + 4L_{eff2})]^2$$

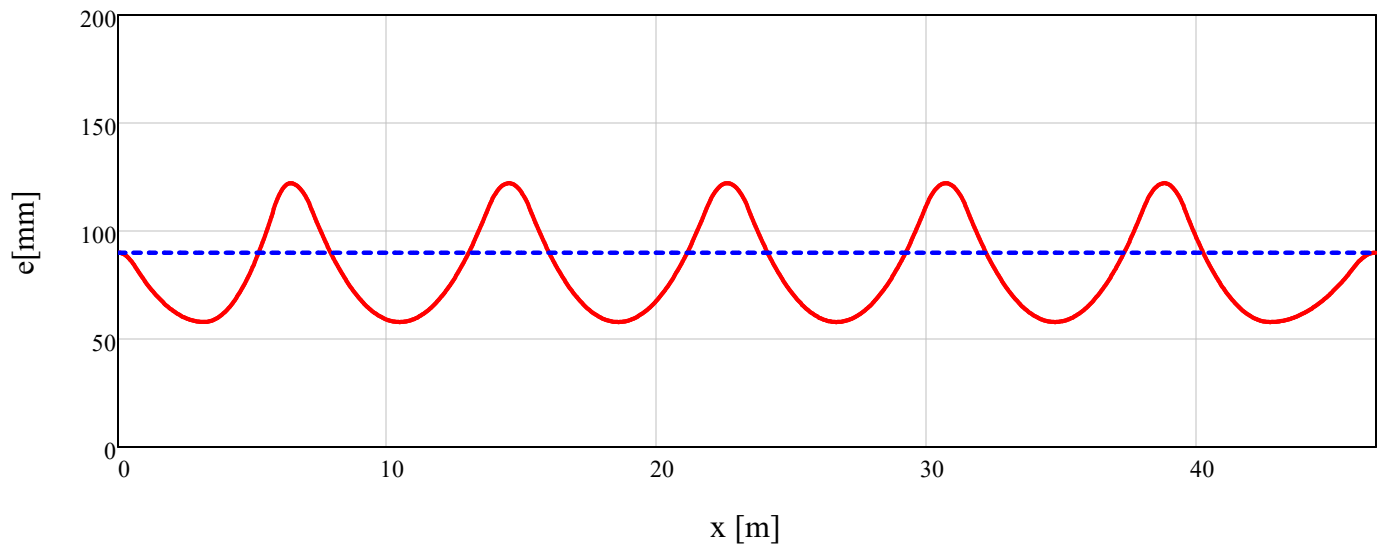
$$y_{4FG}(x) := e_G + \frac{(e_{f6} - e_G)}{L_6 \cdot [(L_{f3} - L_6) + L_6]} \cdot (L_{eff1} + 4L_{eff2} + L_{eff3} - x)^2$$

$$y_{FG}(x) := \begin{cases} y_{1FG}(x) & \text{if } L_{eff1} + 4L_{eff2} \leq x \leq L_{eff1} + 4L_{eff2} + L_5 \\ y_{2FG}(x) & \text{if } L_{eff1} + 4L_{eff2} + L_5 < x \leq L_{eff1} + 4L_{eff2} + L_{f3} \\ y_{3FG}(x) & \text{if } L_{eff1} + 4L_{eff2} + L_{f3} < x < L_{eff1} + 4L_{eff2} + L_{eff3} - L_6 \\ y_{4FG}(x) & \text{if } L_{eff1} + 4L_{eff2} + L_{eff3} - L_6 \leq x \leq L_{eff1} + 4L_{eff2} + L_{eff3} \end{cases}$$

Koko rakenteen punosgeometria

$$y(x) := \begin{cases} y_{AB}(x) & \text{if } 0 \leq x \leq L_{eff1} \\ y_{BC}(x) & \text{if } L_{eff1} < x \leq L_{eff1} + L_{eff2} \\ y_{CD}(x) & \text{if } L_{eff1} + L_{eff2} < x \leq L_{eff1} + 2 \cdot L_{eff2} \\ y_{DE}(x) & \text{if } L_{eff1} + 2 \cdot L_{eff2} < x \leq L_{eff1} + 3 \cdot L_{eff2} \\ y_{EF}(x) & \text{if } L_{eff1} + 3 \cdot L_{eff2} < x \leq L_{eff1} + 4 \cdot L_{eff2} \\ y_{FG}(x) & \text{if } L_{eff1} + 4 \cdot L_{eff2} < x \leq L_{eff1} + 4 \cdot L_{eff2} + L_{eff3} \end{cases}$$

Punosgeometria laatan alareunan suhteen



— Punosgeometria
 - - - Painopisteakseli

Tarkistetaan, että punoksen kääntösäde tuen lähellä ei ole liian pieni

$$R_{\min} := \frac{L_3 \cdot (L_{f2})}{2 \cdot (e_{f2} - e_B)} = 25.509 \text{ m}$$

"OK" if $R_{\min} > 2.5 \text{ m}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise

Punosten kokonaislukumäärä	$n_p := 10$	plus yksi punos vauriotilanteen varalta
Punosten kk-jako	$\frac{b_w}{n_p + 1} = 500 \cdot \text{mm}$	
	Valitaan kk-jako 500	
Tunkka usvoima per punos	$P_{\max,1} := 215 \text{ kN}$	
Palkkiin kohdistuva kokonaisvoima punoksista	$P_{\max} := n_p \cdot P_{\max,1} = 2.15 \times 10^3 \cdot \text{kN}$	
Punosten kokonaispinta-ala	$A_p := n_p \cdot A_{p,1} = 1.5 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$	

Ankurijänneiden jännevoimien välittömien alkuhäviöiden laskenta

Kitkerroin	$\mu := 0.06$
Aaltoisuusluku	$\beta := 0.00873 \cdot \frac{1}{\text{m}}$
Lukitusliukuma	$\Delta_{\text{slip}} := 6 \text{ mm}$

Betonin välittömästä muodonmuutoksesta johtuvan häviön laskenta

Laskelmissa otaksutaan, että punokset jännitetään yksitellen

Yhden punoksen jännittämisestä aiheutuva keskimääräinen jännitys betonissa

$$\Delta\sigma_{C,i} := \frac{P_{\max,1}}{A_{gr}} = 0.217 \cdot \text{MPa}$$

Kerroin "j"

$$j := \frac{n_p - 1}{2n_p} = 0.45$$

Välitön häviö kimmoisesta kokoonpuristumasta

$$\Delta P_{e1} := A_p \cdot E_p \cdot \sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{j \cdot |\Delta\sigma_{C,i}|}{E_{cm,i}} \right)$$

$$\Delta P_{e1} = 9.221 \cdot \text{kN}$$

Kitkahäviöiden laskenta

Punosten kulma kohdassa x

$$\alpha(x) := \frac{d}{dx} y(x)$$

Punosten kulmanmuutos kohdassa x

$$d\alpha(x) := \left| \frac{d^2}{dx^2} y(x) \right|$$

Punosten kulmanmuutosten summa kohdassa x

$$\theta(x) := \int_0^x d\alpha(x) dx$$

Kitkahäviö kohdassa x

$$\Delta P_{\mu}(x) := P_{\max} \cdot \left[1 - e^{-\mu \cdot (\theta(x) + \beta \cdot x)} \right]$$

$$\Delta P_{\mu}(L_{\text{kok}}) = 141.439 \cdot \text{kN}$$

Ankkurointi- ja lukitushäviöiden laskenta

Laatan ankkurointiliukuman laskennassa sovelletaan vastaavaa energiaperiaatetta kuin palkin ankkurointiliukuman laskennassa

Ulkoisen energian menetys $\Delta P_E := E_p \cdot \Delta_{slip} \cdot A_p = 1.755 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$

Lukitushäviön pituuden ratkaisu $x_{set} := 23.135 \text{m}$

Sisäisen energian menetys
x:n funktiona $\Delta P_I(x) := 2 \cdot \left[\int_0^x (P_{max} - \Delta P_{\mu}(x)) dx - (P_{max} - \Delta P_{\mu}(x)) \cdot x \right]$

Sisäisen ja ulkoisen energian
menetyksen tulee olla tasapainossa $\Delta P_I = E_p \cdot \Delta_{slip} \cdot A_p$

Sisäisen energian menetys
lukitushäviön pituudelta $\Delta P_I(x_{set}) = 1.755 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$

Lukitushäviön suuruus laatan päässä $\Delta P_{sl} := 2 \cdot \Delta P_{\mu}(x_{set}) = 151.43 \cdot \text{kN}$

Jännevoiman suuruus välittömästi jännittämisen ja ankkuroinnin jälkeen

Jännevoiman arvo välittömästi
jännittämisen ja ankkuroinnin
jälkeen $P_{m,0}(x) := \left[\begin{array}{l} (P_{max} - \Delta P_{sl} + \Delta P_{\mu}(x)) \text{ if } x \leq x_{set} \\ (P_{max} - \Delta P_{\mu}(x)) \text{ otherwise} \end{array} \right] - \Delta P_{el}$

Tarkistetaan, että jännevoiman suuruus välittömien häviöiden jälkeen ei ole liian suuri

Jännevoima saavuttaa maksimiaron
lukitushäviöiden päätekohtassa $\sigma_{pm0,max} := \frac{P_{m,0}(x_{set})}{A_p} = 1.377 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$

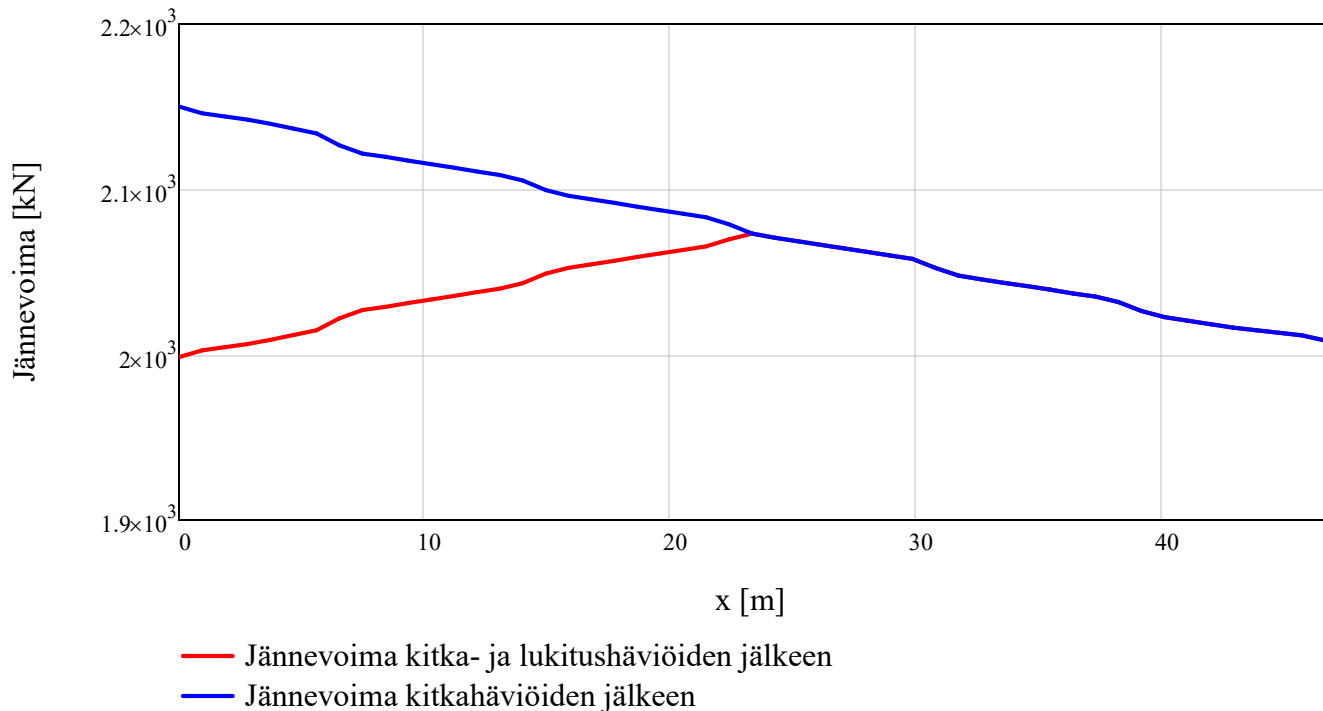
Jänneiden sallittu jännitys
jännittämisen jälkeen $\sigma_{pm0,all} := \min(0.75 \cdot f_{pk}, 0.85 \cdot f_{p0.1k})$

$$\sigma_{pm0,all} = 1.394 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \sigma_{pm0,max} < \sigma_{pm0,all} = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

$$x := 0, \frac{L_{\text{kok}}}{50} .. L_{\text{kok}}$$

Välittömät häviöt



Jännevoiman ajasta riipuvat häviöt tartunta- ja ankkurijänteissä

Relaksaatiohäviöiden laskenta

Jännittämishetkellä vallitsevan jännityksen keskimääräinen itseisarvo punoksissa

Suunnittelussa käytettävä relaksaatiohäviön arvo

$$\sigma_{pi} := \frac{P_{m,0} \left(\frac{L_{\text{kok}}}{2} \right)}{A_p} = 1.376 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta\sigma_{pr} := 3 \cdot \rho_{1000} \cdot \sigma_{pi} = 103.198 \cdot \text{MPa}$$

Ajasta riippuvien häviöiden laskenta



Laskelmissa käytettävä arvo virumaluvulle

$$\varphi_{wi} := 1.75$$



Laskelmissa käytettävä arvo kutistumalle

$$\epsilon_{cs} := 0.040\%$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen puristusjännitys betonissa jänteiden korkeudella

$$\sigma_{c,QP} := \frac{P_{m,0} \left(\frac{L_{\text{kok}}}{2} \right)}{A_{gr}} = 2.085 \cdot \text{MPa}$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen vetojännitys jänneteräksissä

$$\sigma_{p,QP} := \frac{P_{m,0} \left(\frac{L_{\text{kok}}}{2} \right)}{A_p} = 1.376 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen betonipoikkileikkauksen painopisteen ja jänneterästen painopisteen välinen etäisyys

$$z_{cp} := 0 \text{ mm}$$

Ajasta riippuvat häviöt

$$\Delta\sigma_{p.c.s.r} := \frac{\epsilon_{cs} \cdot E_p + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi \cdot |\sigma_{c.QP}| + 0.8 \cdot \Delta\sigma_{pr}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_{gr}} \cdot \left(1 + \frac{A_{gr}}{I_{gr}} \cdot z_{cp}^2\right)} \cdot (1 + 0.8 \cdot \varphi)$$

$$\Delta\sigma_{p.c.s.r} = 177.776 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta P_{c.s.r} := A_p \cdot \Delta\sigma_{p.c.s.r} = 266.663 \cdot \text{kN}$$

Ohjausvoimien laskenta

Keskimääräisen jännevoiman laskenta

Jännevoiman keskimääräinen arvo kohdassa x kaikkien häviöiden jälkeen

$$P_{m.t}(x) := P_{m.0}(x) - \Delta P_{c.s.r}$$

Käytetään laskelmissa yksinkertaistuksen vuoksi samaa keskimääräistä jännevoimaa kaikissa jänteissä

Keskimääräinen jännevoima kaikkien häviöiden jälkeen jänteessä #1...6

$$P_{m.t} := \frac{1}{L_{\text{kok}}} \cdot \int_0^{L_{\text{kok}}} P_{m.t}(x) dx$$

$$P_{m.t} = 1.763 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Keskimääräinen puristusjännitys poikkileikkauksessa

$$\sigma_{c.m} := \frac{P_{m.t}}{A_{gr}} = 1.78 \cdot \text{MPa}$$

Ohjausvoima kohdassa "x"

$$p(x) := P_{m.t} \cdot \frac{d^2}{dx^2} y(x)$$

Ohjausvoimien suuruus jänteessä A-B

$$P_{AB1} := \frac{2 \cdot P_{m.t} \cdot (e_{f1} - e_A)}{L_1 \cdot [L_1 + (L_{f1} - L_1)]} = 55.342 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{AB2} := \frac{2 \cdot P_{m.t} \cdot (e_A - e_{f1})}{(L_{f1} - L_1) \cdot [L_1 + (L_{f1} - L_1)]} = -13.835 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{AB3} := \frac{2 \cdot P_{m.t} \cdot (e_B - e_{f1})}{(L_{f1} - L_2) \cdot [(L_{f1} - L_2) + L_2]} = -27.671 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{AB4} := \frac{2 \cdot P_{m.t} \cdot (e_{f1} - e_B)}{L_2 \cdot [L_2 + (L_{f1} - L_2)]} = 110.683 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ohjaisvoimien suuruus jänteissä A-B, B-C, C-D, D-E, E-F

$$p_{BC1} := \frac{2 \cdot P_{m,t} \cdot (e_{f2} - e_B)}{L_3 \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} = 69.099 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$p_{BC2} := \frac{2 \cdot P_{m,t} \cdot (e_B - e_{f2})}{(L_{f2} - L_2) \cdot [L_2 + (L_{f2} - L_2)]} = -16.414 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$p_{BC3} := \frac{2 \cdot P_{m,t} \cdot (e_C - e_{f2})}{(L_{f2} - L_3) \cdot [(L_{f2} - L_3) + L_3]} = -17.275 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$p_{BC4} := \frac{2 \cdot P_{m,t} \cdot (e_{f2} - e_C)}{L_3 \cdot [L_3 + (L_{f2} - L_3)]} = 69.099 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ohjaisvoimien suuruus jänteissä F-G

$$p_{FG1} := \frac{2 \cdot P_{m,t} \cdot (e_{f3} - e_F)}{L_5 \cdot [L_5 + (L_{f3} - L_5)]} = 73.758 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

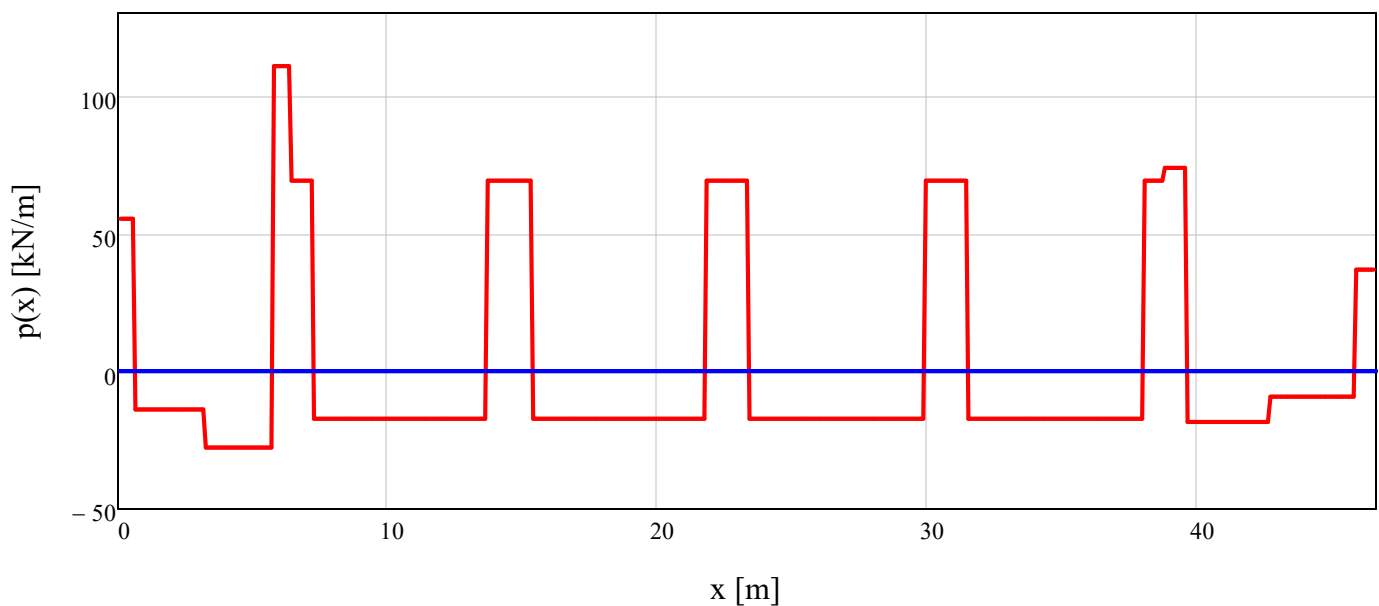
$$p_{FG2} := \frac{2 \cdot P_{m,t} \cdot (e_F - e_{f3})}{(L_{f3} - L_5) \cdot [L_5 + (L_{f3} - L_5)]} = -18.44 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$p_{FG3} := \frac{2 \cdot P_{m,t} \cdot (e_G - e_{f3})}{(L_{f3} - L_6) \cdot [(L_{f3} - L_6) + L_6]} = -9.22 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$p_{FG4} := \frac{2 \cdot P_{m,t} \cdot (e_{f3} - e_G)}{L_6 \cdot [L_6 + (L_{f3} - L_6)]} = 36.879 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$x := 0, \frac{L_{\text{kok}}}{500} .. L_{\text{kok}}$$

Ohjaisvoimat



Laatan halkeilukestävyys

$$M_{cr} := W_{gr} \cdot \left(f_{ct,eff} + \frac{P_{m,t}}{A_{gr}} \right) = 187.837 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Mitoitus murtorajatilassa

Mitoitetaan tarvittavat teräsket ensin murtorajatilassa. Teräsmäärää lisätään jos käyttörajatilan tarkastelut niin vaativat.

Mitoitus taivutukselle

Alapinnan vetoterästen mitoitus kriittisessä poikkileikkauksessa

Mitoitetaan tarvittava teräsmäärä jänteen keskellä taivutukselle

Suojabetoni jakoterästen pintaan

$$c_{bot} := 40 \text{ mm}$$

Jakoterästen halkaisija

$$\phi_j := 10 \text{ mm}$$

Pääterästen halkaisija

$$\phi_m := 12 \text{ mm}$$

Pääterästen lukumäärä

$$n_{bot} := 18$$

Taivutuskestävyyden laskennassa käytettävät EC2 parametrit teholliselle lujudelle ja jännitysblokin korkeudelle

$$\lambda := 0.8$$

$$\eta := 1$$

Pääterästen kk-jako

$$\frac{b_w}{n_{bot}} = 305.556 \cdot \text{mm} \quad \text{Valitaan T12 k300 alapintaan}$$

Jänneterästen jännitysten lisäys murtorajatilassa

$$\Delta\sigma_{ULS} := 50 \text{ MPa}$$

Jännevoiman suunnitteluarvo murtorajatilassa

$$P_{d,t} := \frac{P_{m,t}}{\gamma_{P,fav}} = 1.763 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Tehollinen jännitys jänneteräksissä

$$\sigma_{pd} := \min \left(\frac{P_{d,t}}{A_p} + \Delta\sigma_{ULS}, f_{pd} \right)$$

$$\sigma_{pd} = 1.225 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Laskelmissa käytettävä teräsmäärä

$$A_s := n_{bot} \cdot 0.25 \cdot \phi_m^2 \cdot \pi = 2.036 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Vetoterästen tehollinen korkeus

$$d_s := h - c_{bot} - \phi_j - 0.5 \cdot \phi_m = 124 \cdot \text{mm}$$

Jänneterästen tehollinen korkeus tarkasteltavassa poikkileikkauksessa

$$d_p := y(0.5 \cdot L_{eff2}) + 0.5 \cdot h = 116.479 \cdot \text{mm}$$

Neutraaliakselin korkeus

$$x := \frac{A_p \cdot \sigma_{pd} + A_s \cdot f_{yd}}{\lambda \cdot b_w \cdot \eta \cdot f_{cd}} = 31.201 \cdot \text{mm}$$

Jännitysblokin korkeus

$$\lambda \cdot x = 24.961 \cdot \text{mm}$$

Tarkistetaan että otaksuma
vetoterästen myötäämisestä pitää paikkansa

$$\varepsilon_s := \frac{\varepsilon_{cu3} \cdot (d_s - x)}{x} = 1.041\%$$

$$\frac{f_{yd}}{E_s} = 0.217\%$$

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \varepsilon_s \geq \frac{f_{yd}}{E_s} & = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

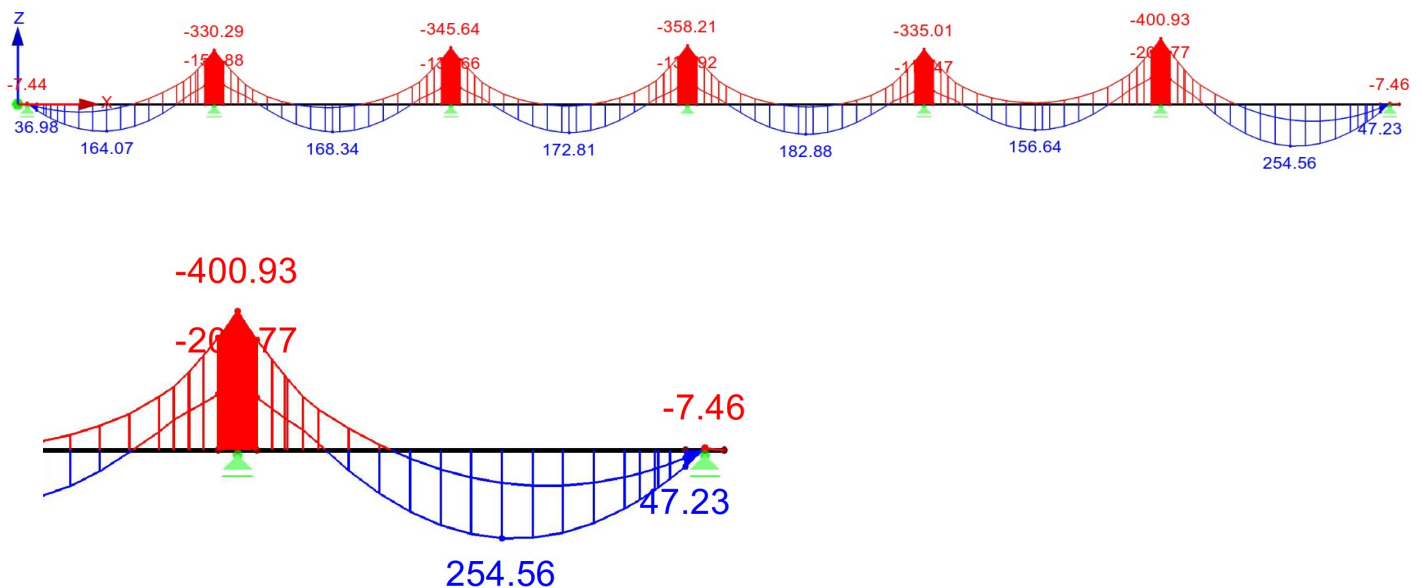
Momenttikapasiteetti

$$M_{Rd} := \left(d_p - \frac{\lambda \cdot x}{2}\right) \cdot A_p \cdot \sigma_{pd} + \left(d_s - \frac{\lambda \cdot x}{2}\right) \cdot A_s \cdot f_{yd} = 289.822 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Maksimimomentti kriittisessä poikkileikkauksessa kuvaajasta

$$M_{Ed, \text{pos}} := 255 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } M_{Rd} \geq M_{Ed, \text{pos}} & = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$



Yläpinnan vetoterästen mitoitus kriittisessä poikkileikkauksessa

Suojabetoni pääterästen pintaan

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

Pääterästen halkaisija

$$\phi_{\text{top}} := 12 \text{ mm}$$

Pääterästen lukumäärä

$$n_{\text{top}} := 18$$

Pääterästen kk-jako

$$\frac{b_w}{n_{\text{top}}} = 305.556 \cdot \text{mm}$$

Valitaan T12 k300 yläpintaan

Laskelmissa käytettävä teräsmäärä	$A_{s,top} := n_{top} \cdot 0.25 \cdot \phi_m^2 \cdot \pi$
	$A_{s,top} = 2.036 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$
Vetoterästen tehollinen korkeus	$d_{s,top} := h - c_{top} - 0.5 \cdot \phi_m = 124 \cdot \text{mm}$
Jänneterästen tehollinen korkeus tarkasteltavassa poikkileikkauksessa	$d_{p,top} := y(L_{eff2}) - 0.5 \cdot h = -84.911 \cdot \text{mm}$
Neutraaliakselin korkeus	$\bar{x} := \frac{A_p \cdot \sigma_{pd} + A_{s,top} \cdot f_{yd}}{\lambda \cdot b_w \cdot \eta \cdot f_{cd}} = 31.201 \cdot \text{mm}$
Jännitysblokin korkeus	$\lambda \cdot x = 24.961 \cdot \text{mm}$

Momenttikapasiteetti

$$M_{Rd,neg} := \left(|d_{p,top}| - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \cdot A_p \cdot \sigma_{pd} + \left(d_{s,top} - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \cdot A_{s,top} \cdot f_{yd} = 231.811 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Maksimimomentti kriittisessä poikkileikkauksessa kuvaajasta

$$M_{Ed,neg} := 209.77 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

"OK" if $M_{Rd,neg} \geq M_{Ed,neg}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise

Laskelmissa on käytetty taivutusmomentin arvoa tuen vieressä.

Taivutuksen edellyttämän vähimmäisraudoituksen tarkastelu

Haurasmurtumasta aiheutuva riski huomioidaan käyttämällä EC2 kappaleen 9.2.1 mukaista vähimmäisraudoitusta

Laatan vähimmäisraudoitus positiiviselle momentille

$$d_s = 0.124 \text{ m}$$

$$A_{s,min} := \max \left(0.26 \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{yk}}, 0.0013 \right) \cdot b_w \cdot d_s \quad A_{s,min} = 1.611 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

"OK" if $A_s \geq A_{s,min}$ = "OK"

"TARKISTA" otherwise

"OK" if $A_{s,top} \geq A_{s,min}$ = "OK"

"TARKISTA" otherwise

Tarkistetaan onko taivutuskestävyys vähintään 1,15 kertaa suurempi kuin halkeamamomentti (9.2.1.1(4))

Halkeamamomentti kun alapinta vedetty

$$M_{cr} := W_{gr} \cdot \left(f_{ct,eff} + \frac{P_{m,t}}{A_{gr}} \right)$$

$$M_{cr} = 187.837 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

"OK" if $M_{Rd} \geq 1.15 \cdot M_{cr}$ = "OK"

"TARKISTA" otherwise

"OK" if $M_{Rd,neg} \geq 1.15 \cdot M_{cr}$ = "OK"

"TARKISTA" otherwise

Laatan jakoraidoituksen tarkastelu

Jakoraidoituksen vähimmäispinta-ala

$$A_{s,\min,j} := 0.2 \cdot \frac{A_s}{b_w} = 74.027 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Jakoraidoituksen kk-jako

$$kk_j := \min \left(400 \text{mm}, 2 \cdot h, \frac{0.25 \cdot \pi \cdot \phi_j^2}{A_{s,\min,j}} \right)$$

$$kk_j = 360 \cdot \text{mm}$$

Mitoitus leikkaukselle kriittisessä poikkileikkauksessaLeikkauskestävyys leikkauraidoittamattomana

Momenttivarsi leikkauksimitoituksessa

$$z := 0.9 \cdot d_s = 111.6 \cdot \text{mm}$$

kerroin "k"

$$k_{6.2a} := \min \left(1 + \sqrt{200 \frac{\text{mm}}{d_s}}, 2 \right) = 2$$

Käytetään yksinkertaistuksen vuoksi leikkauskestävyyden laskennassa vetoraidoituksena edellä laskettua minimiraidoitusta

Kriittisen poikkileikkauksen taakse ankkuroitu
vetoraidoitus leikkauskestävyyden laskennassa

$$A_{SL} := A_{s,\min} = 1.611 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Raidoitussuhde

$$\rho_1 := \min \left(\frac{A_{SL}}{b_w \cdot d_s}, 0.02 \right) = 0.236\%$$

kerroin "k1"

$$k_1 := 0.15$$

Kerroin $C_{Rd,c}$

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

Leikkauslujuus

$$v_{\min} := 0.035 \cdot k_{6.2a} \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa}$$

$$v_{\min} = 0.586 \cdot \text{MPa}$$

Keskeinen puristusjännitys

$$\sigma_{cp} := \min \left(\frac{P_{d,t}}{A_{gr}}, 0.2 \cdot f_{cd} \right) = 1.78 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{Rd,c,a} := \left[C_{Rd,c} \cdot k_{6.2a} \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d_s = 513.146 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rd,c,b} := (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d_s = 581.564 \cdot \text{kN}$$

Leikkauskestävyys leikkauraidoittamana

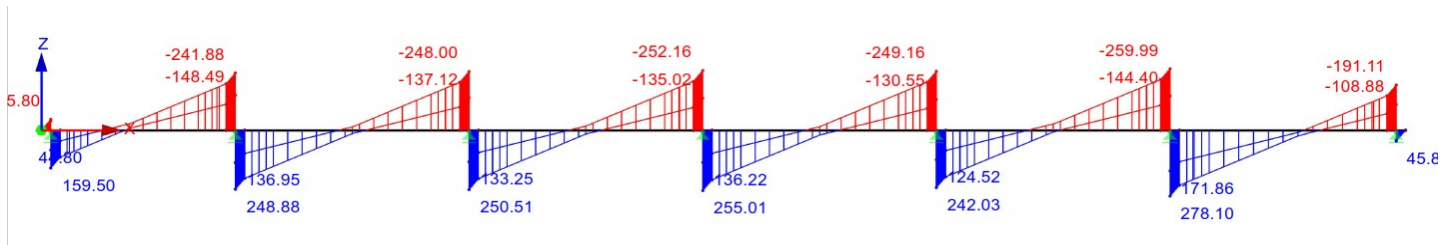
$$V_{Rd,c} := \max(V_{Rd,c,a}, V_{Rd,c,b})$$

$$V_{Rd,c} = 581.564 \cdot \text{kN}$$

Maksimileikkausvoima

$$V_{Ed} := 172 \text{ kN}$$

"OK" if $V_{Rd.c} \geq V_{Ed}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise



Alapinnan raudoitusten ankkurointi reunatuilla

Tuelle ulotettavan raudoituksen minimimäärä
 (9.2.1.4(1))

$$\beta_2 := 0.25$$

$$A_{s,\min,t} := A_s \cdot \beta_2 = 508.938 \cdot \text{mm}^2$$

Levitysmitta

$$a_L := d_s = 124 \cdot \text{mm}$$

Normaalivoima kaavassa

$$N_{Ed} := 0$$

Ankkuroitava vetovoima reunatuella

$$F_{Ed,t} := V_{Ed} \cdot \frac{a_L}{z} = 191.111 \cdot \text{kN}$$

Vaadittu vetoteräsmäärä reunatuella

$$A_{s,\text{req},t} := \frac{F_{Ed,t}}{f_{yd}} = 439.556 \cdot \text{mm}^2$$

Valitaan reunalenkit T8k300

$$A_{s,t} := \frac{b_w}{300 \text{ mm}} \cdot (8 \text{ mm})^2 \cdot 0.25 \cdot \pi$$

$$A_{s,t} = 921.534 \cdot \text{mm}^2$$

Mitoitus käyttörajatilassa

Jännitystarkastelut

Yläpinnan jännitys

$$\sigma_{\text{top}} := \frac{-P}{A_{\text{gr}}} + \frac{M}{-W_{\text{gr}}}$$

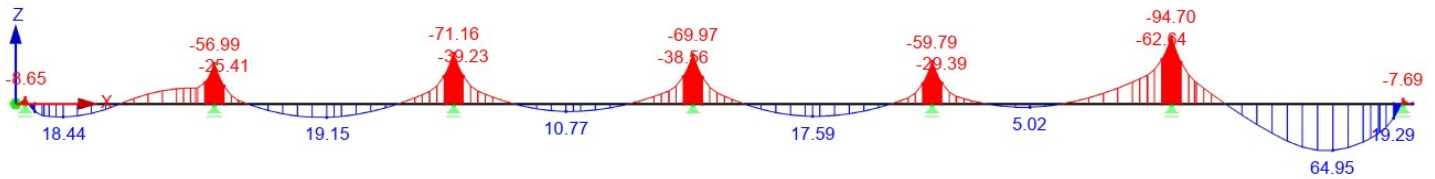
Alapinnan jännitys

$$\sigma_{\text{bot}} := \frac{-P}{A_{\text{gr}}} + \frac{M}{W_{\text{gr}}}$$

Tarkistetaan jännitysehdot ja maksimijännitykset:

Jännitystilanne:

Alkutilanteen jännitykset määrävässä poikkileikkauksessa



$$\sigma_{\text{top.at}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-58.08 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 0.175 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.ak}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{64.95 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -3.967 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.at}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-58.08 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -3.736 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.ak}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{64.95 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 0.406 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{ap}} := \min(\sigma_{\text{top.ak}}, \sigma_{\text{top.at}}, \sigma_{\text{bot.at}}, \sigma_{\text{bot.ak}}) = -3.967 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{av}} := \max(\sigma_{\text{top.ak}}, \sigma_{\text{top.at}}, \sigma_{\text{bot.at}}, \sigma_{\text{bot.ak}}) = 0.406 \cdot \text{MPa}$$

Alkutilanne, vetojännitys

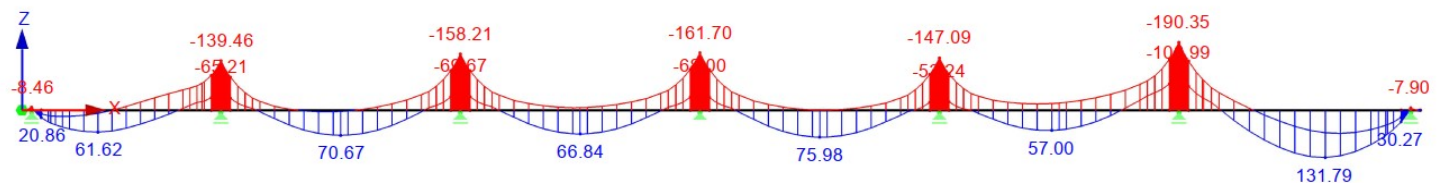
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } f_{\text{ctm.i}} \geq \sigma_{\text{av}} = \text{"OK"} \quad f_{\text{ctm.i}} = 2.4 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Alkutilanne, puristusjännitys

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } -0.6 \cdot f_{\text{ck.i}} \leq \sigma_{\text{ap}} = \text{"OK"} \quad -0.6 \cdot f_{\text{ck.i}} = -13.8 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Lopputilanne:

Pitkäaikaisyhdistelmän jännitykset määrävässä poikkileikkauksessa



$$\sigma_{\text{top.pyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-137.8 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 2.859 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.pyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{131.79 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -6.218 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.pyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-137.8 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -6.42 \cdot \text{MPa}$$

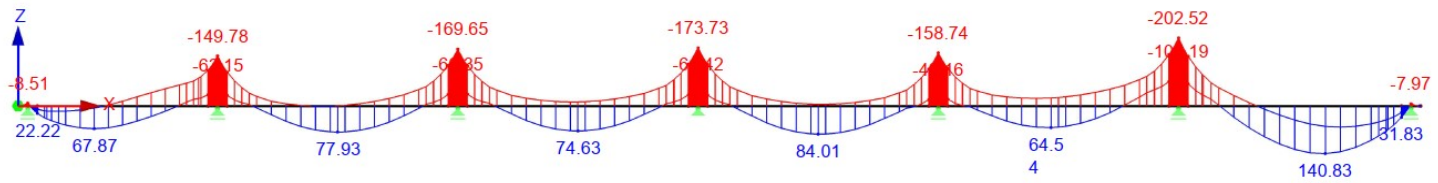
$$\sigma_{\text{bot.pyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{131.79 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 2.657 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{pyp}} := \min(\sigma_{\text{top.pyk}}, \sigma_{\text{bot.pyk}}, \sigma_{\text{top.pyt}}, \sigma_{\text{bot.pyt}}) = -6.42 \cdot \text{MPa}$$

Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } -0.45 \cdot f_{\text{ck}} \leq \sigma_{\text{pyp}} = \text{"OK"} \quad -0.45 \cdot f_{\text{ck}} = -15.75 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Tavallisen yhdistelmän jännitykset määrävässä poikkileikkauksessa



$$\sigma_{\text{top.tyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-147.8 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 3.196 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.tyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{140.83 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -6.522 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.tyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-147.8 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -6.757 \cdot \text{MPa}$$

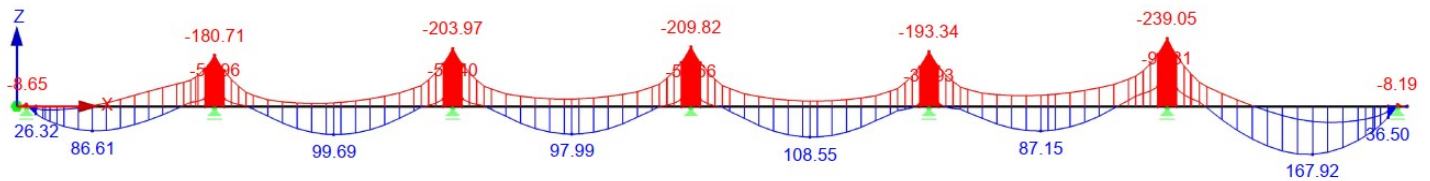
$$\sigma_{\text{bot.tyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{140.83 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 2.961 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{tyv}} := \max(\sigma_{\text{top.tyk}}, \sigma_{\text{bot.tyk}}, \sigma_{\text{top.tyt}}, \sigma_{\text{bot.tyt}}) = 3.196 \cdot \text{MPa}$$

Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } f_{\text{ct,eff}} \geq \sigma_{\text{tyv}} = \text{"OK"} & f_{\text{ct,eff}} = 4.544 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ominaisyhdistelmän jännitykset määrävässä poikkileikkauksessa



$$\sigma_{\text{top.oyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-177.7 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 4.203 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.oyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{167.92 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -7.434 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.oyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-177.7 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -7.764 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.oyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{167.92 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 3.873 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{oyv}} := \min(\sigma_{\text{top.oyk}}, \sigma_{\text{bot.oyk}}, \sigma_{\text{top.oyt}}, \sigma_{\text{bot.oyt}}) = -7.764 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{oyv}} := \max(\sigma_{\text{top.oyk}}, \sigma_{\text{bot.oyk}}, \sigma_{\text{top.oyt}}, \sigma_{\text{bot.oyt}}) = 4.203 \cdot \text{MPa}$$

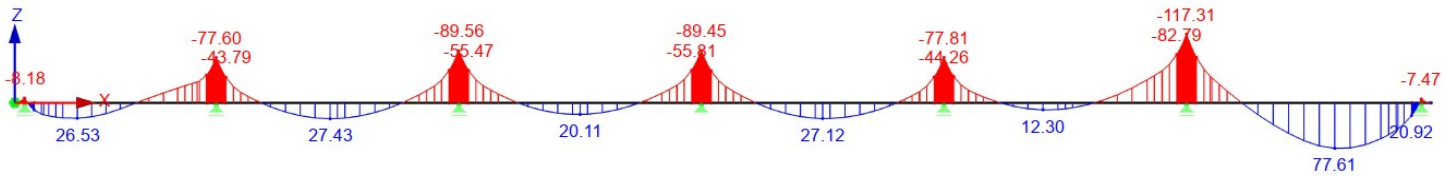
Ominaisyhdistelmä, puristusjännitys

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } -0.6 \cdot f_{\text{ck}} \leq \sigma_{\text{oyv}} = \text{"OK"} & -0.6 \cdot f_{\text{ck}} = -21 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ominaisyhdistelmä, vetojännitys

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } f_{\text{ct,eff}} \geq \sigma_{\text{oyv}} = \text{"OK"} & f_{\text{ct,eff}} = 4.544 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Pysyvien kuormien yhdistelmän jännitykset määräävässä poikkileikkauksessa



$$\sigma_{\text{top.pkyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-77.84 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 0.84 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.pkyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{77.61 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -4.394 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.pkyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-77.84 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -4.401 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.pkyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{77.61 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 0.833 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{pkyv}} := \max(\sigma_{\text{top.pkyk}}, \sigma_{\text{bot.pkyk}}, \sigma_{\text{top.pkyt}}, \sigma_{\text{bot.pkyt}}) = 0.84 \cdot \text{MPa}$$

Pysyvien kuormien yhdistelmä, vetojännitys

"OK" if $f_{\text{ct,eff}} \geq \sigma_{\text{pkyv}}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise

$$f_{\text{ct,eff}} = 4.544 \cdot \text{MPa}$$

Johtopäätökset:

- Rakenne ei halkeile jännitystilanteessa
- Puristusjännitykset ovat hyväksyttävissä rajoissa kaikissa kuormitustilanteissa
- Rakenne ei halkeile missään kuormitustilanteessa

Liite 2: Laatan mitoitus, free tendon layout

Materiaalioinaisuudet

Betoni

Lieriölujuuden ominaisarvo	$f_{ck} := 35\text{MPa}$
Betonin lieriölujuuden ominaisarvo jännityshetkellä	$f_{ck,i} := 23\text{MPa}$
Betonin taivutusvetolujuuden keskiarvo	$f_{ctm} := 3.2\text{MPa}$
Betonin vetolujuuden 5% fraktiili	$f_{ctk,0.05} := 2\text{MPa}$
Betonin taivutusvetolujuus jännityshetkellä	$f_{ctm,i} := 2.4\text{MPa}$
Kimmokertoimen keskiarvo	$E_{cm} := 34\text{GPa}$
Kimmokertoimen keskiarvo jännityshetkellä	$E_{cm,i} := 31\text{GPa}$
Betonin murtopuristuma murtorajatilassa	$\epsilon_{cu3} := 0.35\%$

Betoniteräket

Vetolujuuden ominaisarvo ja kimmokerroin	$f_{yk} := 500\text{MPa}$
Betoniterästen kimmokerroin	$E_s := 200\text{GPa}$
Betoniterästen murtovenymä	$\epsilon_{uk} := 5\%$ (Sitkeysluokka B)

Jänneteräket

0,1- rajan ja vetolujuuden ominaisarvo	$f_{p0.1k} := 1640\text{MPa}$ $f_{pk} := 1860\text{MPa}$
Jänneteräksen kimmokertoimen mitoitusarvo	$E_p := 195\text{GPa}$
Relaksaatiohäviö 1000 tuntia jännittämisen jälkeen	$\rho_{1000} := 2.5\%$ Luokka 2, pieni relaksaatio
Punoksen halkaisija	$\phi_p := 15.7\text{mm}$
Yhden punoksen pinta-ala	$A_{p,1} := 150\text{mm}^2$
Punoksen massa	$\xi_p := 0.0013 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Punoksen jäyhyysmomentti	$I_p := 269.2\text{mm}^4$
Suurin sallittu jännittämisvoima	$\sigma_{p,max.all} := \min(0.8 \cdot f_{pk}, 0.9 \cdot f_{p0.1k})$ $\sigma_{p,max.all} = 1.476 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$
Suurin sallittu jännevoima välittömien häviöiden jälkeen	$\sigma_{p,m0.all} := \min(0.75 \cdot f_{pk}, 0.85 \cdot f_{p0.1k})$ $\sigma_{p,m0.all} = 1.394 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$

Osavarmuusluvut

Jännevoiman suunnitteluarvo osavarmuusluku murtorajatilassa	$\gamma_{P,fav} := 1$
Betonin osavarmuusluku ja pienennyskerroin murtorajatilassa	$\alpha_{cc} := 0.85$ $\alpha_{ct} := 0.85$
Betoniterästen osavarmuusluku	$\gamma_S := 1.15$ $\gamma_C := 1.5$

Suunnittelulujuudet

Betonin puristuslujuuden suunnitteluarvo

$$f_{cd} := \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_C} = 19.833 \cdot \text{MPa}$$

Vetolujuuden mitoitusarvo

$$f_{ctd} := \frac{\alpha_{ct} \cdot f_{ctk.0.05}}{\gamma_C} = 1.133 \cdot \text{MPa}$$

Betoniterästen myötölujuuden suunnitteluarvo

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_S} = 434.783 \cdot \text{MPa}$$

Jänneterästen myötölujuuden suunnitteluarvo

$$f_{pd} := \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_S} = 1.426 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Laatan mittatiedot

Laatan paksuus

$$h := 180 \text{mm}$$

Laatan mitoituskaistan leveys

$$b_w := 5500 \text{mm}$$

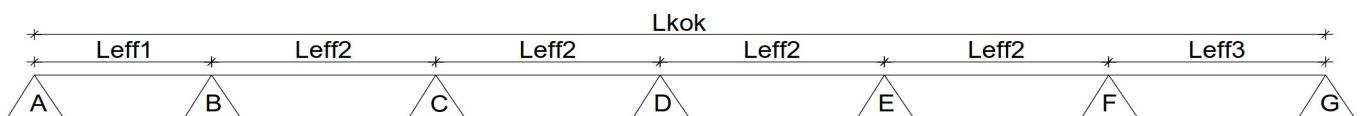
Laatan jännevälit

$$L_{\text{eff1}} := 6.4 \text{m}$$

$$L_{\text{eff2}} := 8.1 \text{m}$$

$$L_{\text{eff3}} := 7.84 \text{m}$$

$$L_{\text{kok}} := L_{\text{eff1}} + 4 \cdot L_{\text{eff2}} + L_{\text{eff3}} = 46.64 \text{m}$$



Laatan mitoituskaista on valittu siten, että siinä pystytään ottamaan yhden punoksen vaurioituminen samassa poikkileikkauksessa jonka leveys on

$$L_{\text{mit}} := \frac{1}{3} \cdot L_{\text{eff2}} + \frac{1}{3} \cdot L_{\text{eff3}} = 5.313 \text{m}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } b_w > L_{\text{mit}} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$$

Taivutusvetolujuus

Korotettu taivutusvetolujuus

$$f_{\text{ctm.fl}} := \max\left(1, 1.6 - \frac{h}{1\text{m}}\right) \cdot f_{\text{ctm}}$$

$$f_{\text{ctm.fl}} = 4.544 \cdot \text{MPa}$$

Laskelmissa käytettävä taivutusvetolujuus

$$f_{\text{ct,eff}} := f_{\text{ctm.fl}} = 4.544 \cdot \text{MPa}$$

Halkeilemattoman poikkileikkauksen poikkileikkausominaisuudet

Poikkileikkauksen pinta-ala normaalivoiman vaikutuksia laskettaessa

$$A_{\text{gr}} := b_w \cdot h = 0.99 \text{m}^2$$

Poikkileikkauksen painopisteen korkeus yläreunasta

$$y_{\text{gr}} := 0.5 \cdot h = 90 \text{mm}$$

Jähyysmomentti

$$I_{\text{gr}} := \frac{b_w \cdot h^3}{12} = 2.673 \times 10^{-3} \text{m}^4$$

Suorakaidepoikkileikkauksen taisutusvastus

$$W_{gr} := \frac{b_w \cdot h^2}{6} = 0.03 \cdot m^3$$

Sydänkuvion yläreuna

$$k_T := \frac{-W_{gr}}{A_{gr}} = -30 \cdot mm$$

Sydänkuvion alareuna

$$k_B := \frac{W_{gr}}{A_{gr}} = 30 \cdot mm$$

Kuormat

Rakenteen omapaino SW

$$g_{sw} := 25 \frac{kN}{m^3} \cdot A_{gr} = 24.75 \cdot \frac{kN}{m}$$

Pysyvä hyötykuorma DL

$$g_1 := b_w \cdot 0.25 \frac{kN}{m^2} = 1.375 \cdot \frac{kN}{m}$$

Muuttuva hyötykuorma LL

$$q_1 := b_w \cdot 2.5 \frac{kN}{m^2} = 13.75 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$\psi_1 := 0.7 \quad \psi_2 := 0.6$$

Koordinaatisto

Poikkileikkauksominaisuuksia laskettaessa käytetään seuraavaa koordinaatistoa:

- Positiivinen +y suunta on alaspäin poikkileikkauksen painopisteestä (PP)
- Negatiivinen -y suunta on ylöspäin poikkileikkauksen painopisteestä (PP)
- Positiivinen (+) jännitys on vetoa
- Negatiivinen (-) jännitys on puristusta

Punosgeometria

Sijoitetaan punokset siten, että punokset ovat laatan painopisteessä laatan päissä. Kentässä mahdollisimman alhaalla (jakoterästen päällä) ja tuilla mahdollisimman ylhäällä (palkin pääterästen päällä, hakaterästen välissä).

Punosten epäkeskisyydet laatan painopisteakselilta

Epäkeskisyys päätytuella A ja G

$$e_A := 0mm \quad e_G := 0mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä A...B

$$e_{f1} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella B

$$e_B := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä B...C

$$e_{f2} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella C

$$e_C := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä C...D

$$e_{f3} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella D

$$e_D := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä D...E

$$e_{f4} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella E

$$e_E := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä E...F

$$e_{f5} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella F $e_F := -0.5 \cdot h + 50\text{mm} + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot \text{mm}$

Epäkeskisyys reunakentässä F..G $e_{f6} := 0.5 \cdot h - 50\text{mm} - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot \text{mm}$

Laskeutumispituus L1 $L_1 := \sqrt[4]{\frac{24 \cdot I_p \cdot E_p \cdot (|e_A| + |e_{f1}|)}{g_p}} = 2.363 \text{ m}$

Laskeutumispituus L3 $L_3 := \sqrt[4]{\frac{72 \cdot I_p \cdot E_p \cdot (|e_B| + |e_{f1}|)}{g_p}} = 3.698 \text{ m}$

Laskeutumispituus L4 $L_4 := \sqrt[4]{\frac{72 \cdot I_p \cdot E_p \cdot (|e_B| + |e_{f2}|)}{g_p}} = 3.698 \text{ m}$

Laskeutumispituus L6 $L_6 := \sqrt[4]{\frac{72 \cdot I_p \cdot E_p \cdot (|e_C| + |e_{f2}|)}{g_p}} = 3.698 \text{ m}$

Laskeutumispituus L7 $L_7 := \sqrt[4]{\frac{72 \cdot I_p \cdot E_p \cdot (|e_F| + |e_{f6}|)}{g_p}} = 3.698 \text{ m}$

Laskeutumispituus L9 $L_9 := \sqrt[4]{\frac{24 \cdot I_p \cdot E_p \cdot (|e_G| + |e_{f6}|)}{g_p}} = 2.363 \text{ m}$

Jänneväli A-B

$$y_{1AB}(x) := (e_A - e_{f1}) \cdot \left(-3 \cdot \frac{x^4}{L_1^4} + 8 \cdot \frac{x^3}{L_1^3} - 6 \cdot \frac{x^2}{L_1^2} + 1 \right) + e_{f1}$$

$$y_{2AB}(x) := e_{f1}$$

$$y_{3AB}(x) := (e_B - e_{f1}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{(L_{\text{eff1}} - x)^4}{L_3^4} + 8 \cdot \frac{(L_{\text{eff1}} - x)^3}{L_3^3} - 6 \cdot \frac{(L_{\text{eff1}} - x)^2}{L_3^2} + 1 \right] + e_{f1}$$

$$y_{AB}(x) := \begin{cases} y_{1AB}(x) & \text{if } 0 \leq x \leq L_1 \\ y_{2AB}(x) & \text{if } L_1 < x \leq L_{\text{eff1}} - L_3 \\ y_{3AB}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} - L_3 < x < L_{\text{eff1}} \end{cases}$$

Jänneväli B-C

$$y_{1BC}(x) := (e_B - e_{f2}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{(x - L_{\text{eff1}})^4}{L_4^4} + 8 \cdot \frac{(x - L_{\text{eff1}})^3}{L_4^3} - 6 \cdot \frac{(x - L_{\text{eff1}})^2}{L_4^2} + 1 \right] + e_{f2}$$

$$y_{2BC}(x) := e_{f2}$$

$$y_{3BC}(x) := (e_C - e_{f2}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{[(L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}}) - x]^4}{L_6^4} + 8 \cdot \frac{[(L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}}) - x]^3}{L_6^3} - 6 \cdot \frac{[(L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}}) - x]^2}{L_6^2} + 1 \right] + e_{f2}$$

$$y_{BC}(x) := \begin{cases} y_{1BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + L_4 \\ y_{2BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_4 < x \leq L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - L_6 \\ y_{3BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - L_6 < x < L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} \end{cases}$$

Jänneväli C-D

$$y_{1CD}(x) := (e_C - e_{f3}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2})]^4}{L_4^4} + 8 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2})]^3}{L_4^3} - 6 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2})]^2}{L_4^2} + 1 \right] + e_{f3}$$

$$y_{2CD}(x) := e_{f3}$$

$$y_{3CD}(x) := (e_D - e_{f3}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2}) - x]^4}{L_6^4} + 8 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2}) - x]^3}{L_6^3} - 6 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2}) - x]^2}{L_6^2} + 1 \right] + e_{f3}$$

$$y_{CD}(x) := \begin{cases} y_{1CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + L_4 \\ y_{2CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + L_4 < x \leq L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - L_6 \\ y_{3CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - L_6 < x < L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} \end{cases}$$

Jänneväli D-E

$$y_{1DE}(x) := (e_D - e_{f4}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2})]^4}{L_4^4} + 8 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2})]^3}{L_4^3} - 6 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2})]^2}{L_4^2} + 1 \right] + e_{f4}$$

$$y_{2DE}(x) := e_{f4}$$

$$y_{3DE}(x) := (e_E - e_{f4}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2}) - x]^4}{L_6^4} + 8 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2}) - x]^3}{L_6^3} - 6 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2}) - x]^2}{L_6^2} + 1 \right] + e_{f4}$$

$$y_{DE}(x) := \begin{cases} y_{1DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + L_4 \\ y_{2DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + L_4 < x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - L_6 \\ y_{3DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - L_6 < x < L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} \end{cases}$$

Jänneväli E-F

$$y_{1EF}(x) := (e_E - e_{f5}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2})]^4}{L_4^4} + 8 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2})]^3}{L_4^3} - 6 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2})]^2}{L_4^2} + 1 \right] + e_{f5}$$

$$y_{2EF}(x) := e_{f5}$$

$$y_{3EF}(x) := (e_F - e_{f5}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2}) - x]^4}{L_6^4} + 8 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2}) - x]^3}{L_6^3} - 6 \cdot \frac{[(L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2}) - x]^2}{L_6^2} + 1 \right] + e_{f5}$$

$$y_{EF}(x) := \begin{cases} y_{1EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + L_4 \\ y_{2EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + L_4 < x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} - L_6 \\ y_{3EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} - L_6 < x < L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} \end{cases}$$

Jänneväli F-G

$$y_{1FG}(x) := (e_F - e_{f6}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}})]^4}{L_7^4} + 8 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}})]^3}{L_7^3} - 6 \cdot \frac{[x - (L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}})]^2}{L_7^2} + 1 \right] + e_{f6}$$

$$y_{2FG}(x) := e_{f6}$$

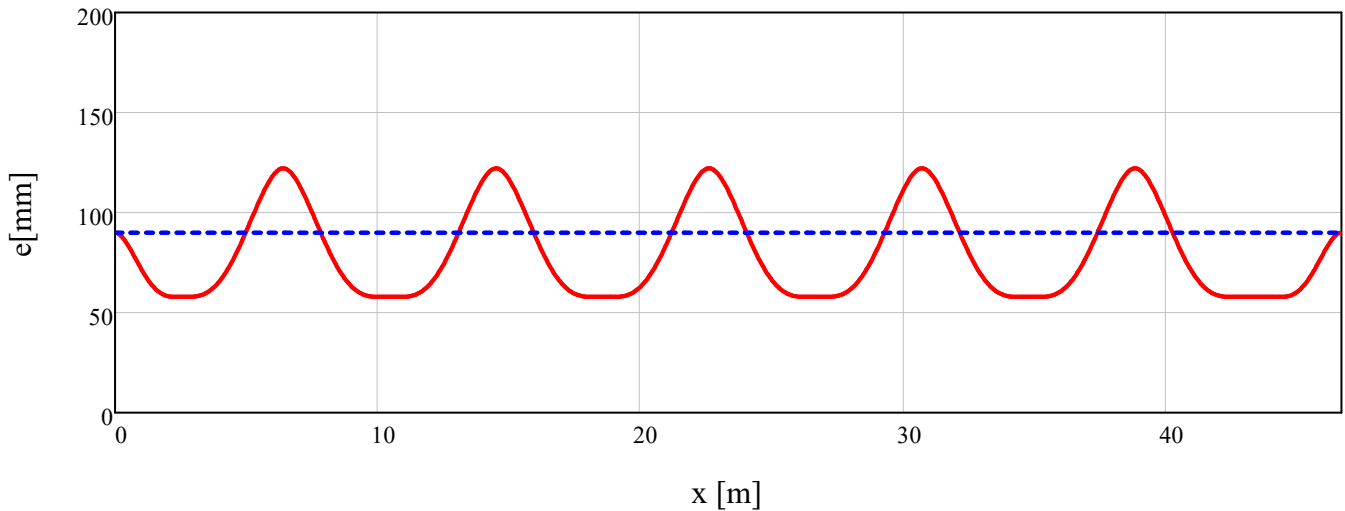
$$y_{3FG}(x) := (e_G - e_{f6}) \cdot \left[-3 \cdot \frac{(L_{\text{kok}} - x)^4}{L_9^4} + 8 \cdot \frac{(L_{\text{kok}} - x)^3}{L_9^3} - 6 \cdot \frac{(L_{\text{kok}} - x)^2}{L_9^2} + 1 \right] + e_{f6}$$

$$y_{FG}(x) := \begin{cases} y_{1FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} \leq x \leq L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} + L_7 \\ y_{2FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} + L_7 < x \leq L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} + L_{\text{eff3}} - L_9 \\ y_{3FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} + L_{\text{eff3}} - L_9 < x < L_{\text{kok}} \end{cases}$$

Koko rakenteen punosgeometria

$$y(x) := \begin{cases} y_{AB}(x) & \text{if } 0 \leq x \leq L_{\text{eff1}} \\ y_{BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} < x \leq L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} \\ y_{CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} < x \leq L_{\text{eff1}} + 2 \cdot L_{\text{eff2}} \\ y_{DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + 2 \cdot L_{\text{eff2}} < x \leq L_{\text{eff1}} + 3 \cdot L_{\text{eff2}} \\ y_{EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + 3 \cdot L_{\text{eff2}} < x \leq L_{\text{eff1}} + 4 \cdot L_{\text{eff2}} \\ y_{FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} + 4 \cdot L_{\text{eff2}} < x \leq L_{\text{kok}} \end{cases}$$

Punosgeometria laatan alareunan suhteen



— Punosgeometria
 - - - Painopiste akseli

Tarkistetaan, että punoksen kääntösäde tuen lähellä ei ole liian pieni

$$R_{\min} := \frac{L_3 \cdot \left(\frac{L_{\text{eff2}}}{2} \right)}{2 \cdot (e_{f2} - e_B)} = 116.451 \text{ m}$$

"OK" if $R_{\min} > 2.5 \text{ m}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise

Punosten kokonaislukumäärä	$n_p := 10$	plus yksi punos vauriotilanteen varalta
Punosten kk-jako	$\frac{b_w}{n_p + 1} = 500 \cdot \text{mm}$	
	Valitaan kk-jako 500mm	
Tunkkausvoima per punos	$P_{\max,1} := 215 \text{ kN}$	
Palkkiin kohdistuva kokonaisvoima punoksista	$P_{\max} := n_p \cdot P_{\max,1} = 2.15 \times 10^3 \cdot \text{kN}$	
Punosten kokonaispinta-ala	$A_p := n_p \cdot A_{p,1} = 1.5 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$	

Ankkurijänneiden jännevoimien välittömien alkuhäviöiden laskenta

Kitkakerroin	$\mu := 0.06$
Aaltoisuusluku	$\beta := 0.00873 \cdot \frac{1}{\text{m}}$
Lukitusliukuma	$\Delta_{\text{slip}} := 6 \text{ mm}$

Betonin välittömästä muodonmuutoksesta johtuvan häviön laskenta

Laskelmissa otaksutaan, että punokset jännitetään yksitellen

Yhden punoksen jännittämisestä aiheutuva keskimääräinen jännitys betonissa

$$\Delta\sigma_{C,i} := \frac{P_{\max,1}}{A_{gr}} = 0.217 \cdot \text{MPa}$$

Kerroin "j"

$$j := \frac{n_p - 1}{2n_p} = 0.45$$

Välitön häviö kimmoisesta kokoonpuristumasta

$$\Delta P_{el} := A_p \cdot E_p \cdot \sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{j \cdot |\Delta\sigma_{C,i}|}{E_{cm,i}} \right)$$

$$\Delta P_{el} = 9.221 \cdot \text{kN}$$

Kitkahäviöiden laskenta

Punosten kulma kohdassa x

$$\alpha(x) := \frac{d}{dx} y(x)$$

Punosten kulmanmuutos kohdassa x

$$d\alpha(x) := \left| \frac{d^2}{dx^2} y(x) \right|$$

Punosten kulmanmuutosten summa kohdassa x

$$\theta(x) := \int_0^x d\alpha(x) dx$$

Kitkahäviö kohdassa x

$$\Delta P_{\mu}(x) := P_{\max} \cdot \left[1 - e^{-\mu \cdot (\theta(x) + \beta \cdot x)} \right]$$

$$\Delta P_{\mu}(L_{\text{kok}}) = 140.002 \cdot \text{kN}$$

Ankkurointi- ja lukitushäviöiden laskenta

Laatan ankkurointiliukuman laskennassa sovelletaan vastaavaa energiaperiaatetta kuin palkin ankkurointiliukuman laskennassa

Ulkoisen energian menetys $\Delta p_E := E_p \cdot \Delta_{slip} \cdot A_p = 1.755 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$

Lukitushäviön pituuden ratkaisu $x_{set} := 23.40\text{m}$

Sisäisen energian menetys
x:n funktiona $\Delta p_I(x) := 2 \cdot \left[\int_0^x (P_{max} - \Delta P_{\mu}(x)) dx - (P_{max} - \Delta P_{\mu}(x)) \cdot x \right]$

Sisäisen ja ulkoisen energian
menetyksen tulee olla tasapainossa $\Delta p_I = E_p \cdot \Delta_{slip} \cdot A_p$

Sisäisen energian menetys
lukitushäviön pituudelta $\Delta p_I(x_{set}) = 1.755 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$

Lukitushäviön suuruus laatan päässä $\Delta P_{sl} := 2 \cdot \Delta P_{\mu}(x_{set}) = 149.477 \cdot \text{kN}$

Jännevoiman suuruus välittömästi jännittämisen ja ankkuroinnin jälkeen

Jännevoiman arvo välittömästi
jännittämisen ja ankkuroinnin
jälkeen $P_{m.0}(x) := \left[\begin{array}{l} (P_{max} - \Delta P_{sl} + \Delta P_{\mu}(x)) \text{ if } x \leq x_{set} \\ (P_{max} - \Delta P_{\mu}(x)) \text{ otherwise} \end{array} \right] - \Delta P_{el}$

Tarkistetaan, että jännevoiman suuruus välittömien häviöiden jälkeen ei ole liian suuri

Jännevoima saavuttaa maksimiarvon
lukitushäviöiden päätekohtadassa $\sigma_{pm0.max} := \frac{P_{m.0}(x_{set})}{A_p} = 1.377 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$

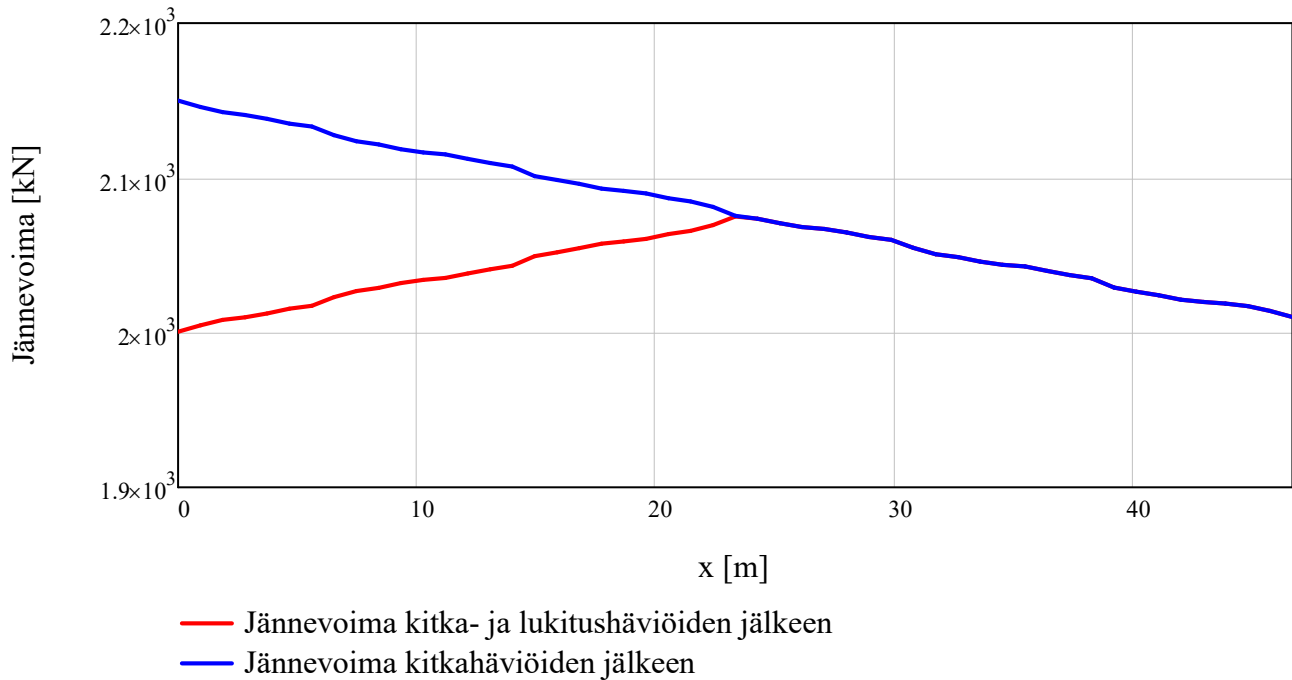
Jänneiden sallittu jännitys
jännittämisen jälkeen $\sigma_{pm0.all} := \min(0.75 \cdot f_{pk}, 0.85 \cdot f_{p0.1k})$

$$\sigma_{pm0.all} = 1.394 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \sigma_{pm0.max} < \sigma_{pm0.all} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$$

$$x := 0, \frac{L_{\text{kok}}}{50} .. L_{\text{kok}}$$

Välittömät häviöt



x := x

Jännevoiman ajasta riipuvat häviöt tartunta- ja ankkurijänteissä

Relaksaatiohäviöiden laskenta

Jännittämishetkellä vallitsevan jännityksen keskimääräinen itseisarvo punoksissa

$$\sigma_{pi} := \frac{P_{m,0} \left(\frac{L_{\text{kok}}}{2} \right)}{A_p} = 1.377 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Suunnittelussa käytettävä relaksaatiohäviön arvo

$$\Delta\sigma_{pr} := 3 \cdot \rho_{1000} \cdot \sigma_{pi} = 103.288 \cdot \text{MPa}$$

Ajasta riippuvien häviöiden laskenta



Laskelmissa käytettävä arvo virumaluvulle

$$\varphi := 1.75$$



Laskelmissa käytettävä arvo kutistumalle

$$\epsilon_{cs} := 0.040\%$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen puristusjännitys betonissa jänteiden korkeudella

$$\sigma_{c,QP} := \frac{P_{m,0} \left(\frac{L_{\text{kok}}}{2} \right)}{A_{gr}} = 2.087 \cdot \text{MPa}$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen vetojännitys jänneteräksissä

$$\sigma_{p,QP} := \frac{P_{m,0} \left(\frac{L_{\text{kok}}}{2} \right)}{A_p} = 1.377 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen betonipoikkileikkauksen painopisteen ja jänneterästen painopisteen välinen etäisyys

$$z_{cp} := 0 \text{ mm}$$

Ajasta riippuvat häviöt

$$\Delta\sigma_{p.c.s.r} := \frac{\epsilon_{cs} \cdot E_p + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi \cdot |\sigma_{c.QP}| + 0.8 \cdot \Delta\sigma_{pr}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_{gr}} \cdot \left(1 + \frac{A_{gr}}{I_{gr}} \cdot z_{cp}^2\right) \cdot (1 + 0.8 \cdot \varphi)}$$

$$\Delta\sigma_{p.c.s.r} = 177.864 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta P_{c.s.r} := A_p \cdot \Delta\sigma_{p.c.s.r} = 266.796 \cdot \text{kN}$$

Ohjausvoimien laskenta

Keskimääräisen jännevoiman laskenta

Jännevoiman keskimääräinen arvo
kohdassa x kaikkien häviöiden jälkeen

$$P_{m.0}(x) := P_{m.0}(x) - \Delta P_{c.s.r}$$

Käytetään laskelmissa yksinkertaistuksen vuoksi samaa keskimääräistä jännevoimaa
kaikissa jänteissä

Keskimääräinen jännevoima kaikkien
häviöiden jälkeen jänteessä #1...6

$$P_{m.t} := \frac{1}{L_{\text{kok}}} \cdot \left(\int_0^{L_{\text{kok}}} P_{m.0}(x) dx \right)$$

$$P_{m.t} = 1.764 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Keskimääräinen puristusjännitys
poikkileikkauksessa

$$\sigma_{c.m} := \frac{P_{m.t}}{A_{gr}} = 1.782 \cdot \text{MPa}$$

Ohjausvoima kohdassa "x"

$$p(x) := P_{m.t} \cdot \frac{d^2}{dx^2} y(x)$$

Ohjausvoimien keskimääräinen suuruus jänteessä A-B

$$\frac{d^2}{dx^2} y_{1AB}(x) \text{ solve} \rightarrow \left(\frac{0.78753230654902666672 \cdot \text{m}}{2.3625969196470799999 \cdot \text{m}} \right) k_1 := 788 \text{mm}$$

$$\frac{d^2}{dx^2} y_{3AB}(x) \text{ solve} \rightarrow \left(\frac{2.70233599213171 \cdot \text{m}}{5.16744533071057 \cdot \text{m}} \right) k_2 := L_{\text{eff1}} - 1233 \text{mm} = 5.167 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

$$P_{\text{posAB1}} := \int_0^{k_1} p(x) dx = 42.683 \cdot \text{kN}$$

$$P_{\text{negAB1}} := \int_{k_1}^{L_1} p(x) dx = -42.683 \cdot \text{kN}$$

Tasaisena kuormana $\frac{P_{\text{posAB1}}}{k_1 - 0 \text{mm}} = 54.166 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

$$\frac{P_{\text{negAB1}}}{L_1 - k_1} = -27.107 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{\text{posAB2}} := \int_{k_2}^{L_{\text{eff1}}} p(x) dx = 54.545 \cdot \text{kN}$$

$$P_{\text{negAB2}} := \int_{L_{\text{eff1}} - L_3}^{k_2} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

Tasaisena kuormana $\frac{P_{\text{posAB2}}}{L_{\text{eff1}} - k_2} = 44.238 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

$$\frac{P_{\text{negAB2}}}{k_2 - (L_{\text{eff1}} - L_3)} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ohjausvoimien keskimääräinen suuruus jänteessä B-C

$$\frac{d^2}{dx^2}y_{1BC}(x) \text{ solve} \rightarrow \left(\begin{array}{l} 7.63255466928943 \cdot \text{m} \\ 10.09766400786829 \cdot \text{m} \end{array} \right) \quad k_3 := 1233 \text{mm} + L_{\text{eff}1} = 7.633 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{d^2}{dx^2}y_{3BC}(x) \text{ solve} \rightarrow \left(\begin{array}{l} 10.80233599213171 \cdot \text{m} \\ 13.26744533071057 \cdot \text{m} \end{array} \right) \quad k_4 := L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - 1233 \text{mm} = 1.327 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

$$P_{\text{posBC}1} := \int_0^{k_3} p(x) dx = 54.539 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negBC}1} := \int_{k_3}^{L_{\text{eff}1}+L_4} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posBC}1}}{k_3 - L_{\text{eff}1}} = 44.233 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negBC}1}}{L_{\text{eff}1} + L_4 - k_3} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{\text{posBC}2} := \int_{k_4}^{L_{\text{eff}1}+L_{\text{eff}2}} p(x) dx = 54.545 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negBC}2} := \int_{L_{\text{eff}1}+L_{\text{eff}2}-L_6}^{k_4} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posBC}2}}{L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - k_4} = 44.238 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negBC}2}}{k_4 - (L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - L_6)} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ohjausvoimien keskimääräinen suuruus jänteessä C-D

$$\frac{d^2}{dx^2}y_{1CD}(x) \text{ solve} \rightarrow \left(\begin{array}{l} 15.73255466928943 \cdot \text{m} \\ 18.19766400786829 \cdot \text{m} \end{array} \right) \quad k_5 := 1233 \text{mm} + L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} = 1.573 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{d^2}{dx^2}y_{3CD}(x) \text{ solve} \rightarrow \left(\begin{array}{l} 18.90233599213171 \cdot \text{m} \\ 21.36744533071057 \cdot \text{m} \end{array} \right) \quad k_6 := L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - 1233 \text{mm} = 2.137 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

$$P_{\text{posCD}1} := \int_0^{k_5} p(x) dx = 54.54 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negCD}1} := \int_{k_5}^{L_{\text{eff}1}+L_{\text{eff}2}+L_4} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posCD}1}}{k_5 - (L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2})} = 44.234 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negCD}1}}{L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + L_4 - k_5} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{\text{posCD}2} := \int_{k_6}^{L_{\text{eff}1}+2 \cdot L_{\text{eff}2}} p(x) dx = 54.544 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negCD}2} := \int_{L_{\text{eff}1}+2L_{\text{eff}2}-L_6}^{k_6} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posCD}2}}{L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - k_6} = 44.237 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negCD}2}}{k_6 - (L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - L_6)} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ohjausvoimien keskimääräinen suuruus jänteessä D-E

$$\frac{d^2}{dx^2}y_{1DE}(x) \text{ solve} \rightarrow \left(\begin{array}{l} 23.83255466928943 \cdot \text{m} \\ 26.29766400786829 \cdot \text{m} \end{array} \right) \quad k_7 := 1233 \text{mm} + L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} = 2.383 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{d^2}{dx^2}y_{3DE}(x) \text{ solve} \rightarrow \left(\begin{array}{l} 27.00233599213171 \cdot \text{m} \\ 29.46744533071057 \cdot \text{m} \end{array} \right) \quad k_8 := L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - 1233 \text{mm} = 2.947 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

$$P_{\text{posDE}1} := \int_0^{k_7} p(x) dx = 54.539 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negDE}1} := \int_{k_7}^{L_{\text{eff}1}+2 \cdot L_{\text{eff}2}+L_4} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posDE1}}}{k_7 - (L_{\text{eff1}} + 2L_{\text{eff2}})} = 44.233 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negDE1}}}{L_{\text{eff1}} + 2L_{\text{eff2}} + L_4 - k_7} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{\text{posDE2}} := \int_{k_8}^{L_{\text{eff1}} + 3L_{\text{eff2}}} p(x) dx = 54.544 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negDE2}} := \int_{L_{\text{eff1}} + 3L_{\text{eff2}} - L_6}^{k_8} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posDE2}}}{L_{\text{eff1}} + 3L_{\text{eff2}} - k_8} = 44.237 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negCD2}}}{k_8 - (L_{\text{eff1}} + 3L_{\text{eff2}} - L_6)} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ohjausvoimien keskimääräinen suuruus jänteessä E-F

$$\frac{d^2}{dx^2} y_{1EF}(x) \text{ solve} \rightarrow \begin{pmatrix} 31.93255466928943 \cdot \text{m} \\ 34.39766400786829 \cdot \text{m} \end{pmatrix} \quad k_9 := 1233 \text{mm} + L_{\text{eff1}} + 3L_{\text{eff2}} = 3.193 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{d^2}{dx^2} y_{3EF}(x) \text{ solve} \rightarrow \begin{pmatrix} 35.10233599213171 \cdot \text{m} \\ 37.56744533071057 \cdot \text{m} \end{pmatrix} \quad k_{10} := L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} - 1233 \text{mm} = 3.757 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

$$P_{\text{posEF1}} := \int_0^{k_9} p(x) dx = 54.543 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negEF1}} := \int_{k_9}^{L_{\text{eff1}} + 3L_{\text{eff2}} + L_4} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posEF1}}}{k_9 - (L_{\text{eff1}} + 3L_{\text{eff2}})} = 44.236 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negEF1}}}{L_{\text{eff1}} + 3L_{\text{eff2}} + L_4 - k_9} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{\text{posEF2}} := \int_{k_{10}}^{L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}}} p(x) dx = 54.545 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negEF2}} := \int_{L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} - L_6}^{k_{10}} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posEF2}}}{L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} - k_{10}} = 44.238 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negEF2}}}{k_{10} - (L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} - L_6)} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ohjausvoimien keskimääräinen suuruus jänteissä F-G

$$\frac{d^2}{dx^2} y_{1FG}(x) \text{ solve} \rightarrow \begin{pmatrix} 40.03255466928943 \cdot \text{m} \\ 42.49766400786829 \cdot \text{m} \end{pmatrix} \quad k_{11} := 1233 \text{mm} + L_{\text{eff1}} + 4 \cdot L_{\text{eff2}} = 4.003 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{d^2}{dx^2} y_{3FG}(x) \text{ solve} \rightarrow \begin{pmatrix} 44.27740308035292 \cdot \text{m} \\ 45.852467693450973333 \cdot \text{m} \end{pmatrix} \quad k_{12} := 45852 \text{mm}$$

$$P_{\text{posFG1}} := \int_0^{k_{11}} p(x) dx = 54.546 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negFG1}} := \int_{k_{11}}^{L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} + L_7} p(x) dx = -54.544 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posFG1}}}{k_{11} - (L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}})} = 44.238 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negFG1}}}{L_{\text{eff1}} + 4L_{\text{eff2}} + L_4 - k_{11}} = -22.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

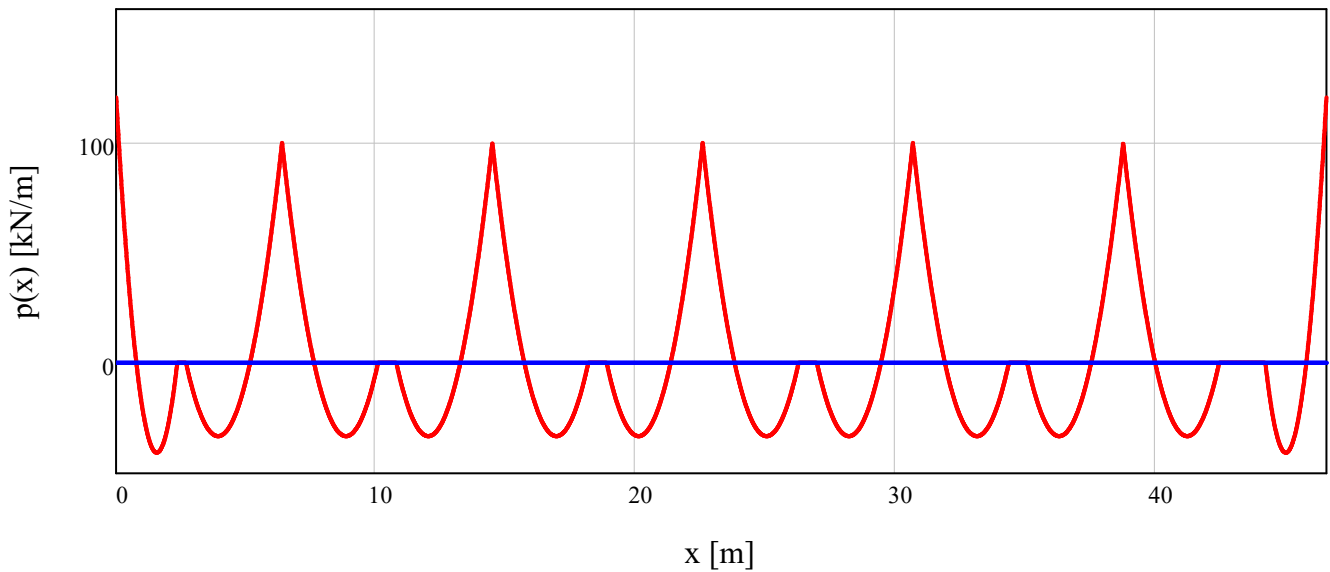
$$P_{\text{posFG2}} := \int_{k_{12}}^{L_{\text{kok}}} p(x) dx = 42.683 \cdot \text{kN} \quad P_{\text{negFG2}} := \int_{L_{\text{kok}} - L_9}^{k_{12}} p(x) dx = -42.683 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tasaisena kuormana} \quad \frac{P_{\text{posFG2}}}{L_{\text{kok}} - k_{12}} = 54.167 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \frac{P_{\text{negFG2}}}{k_{12} - (L_{\text{kok}} - L_9)} = -27.107 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



$$x := 0, \frac{L_{\text{kok}}}{5000} \cdot L_{\text{kok}}$$

Ohjausvoimat



Laatan halkeilukestävyys

$$M_{\text{cr}} := W_{\text{gr}} \cdot \left(f_{\text{ct,eff}} + \frac{P_{\text{m,t}}}{A_{\text{gr}}} \right) = 187.888 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Mitoitus murtorajatilassa

Mitoitetaan tarvittavat teräkset ensin murtorajatilassa. Teräsmäärää lisätään jos käyttörajatilan tarkastelut niin vaativat.

Mitoitus taivutukselle

Alapinnan vetoterästen mitoitus kriittisessä poikkileikkauksessa

Mitoitetaan tarvittava teräsmäärä jänteen keskellä taivutukselle

Suojabetoni jakoterästen pintaan

$$c_{\text{bot}} := 40 \text{ mm}$$

Jakoterästen halkaisija

$$\phi_j := 10 \text{ mm}$$

Pääterästen halkaisija

$$\phi_m := 12 \text{ mm}$$

Pääterästen lukumäärä

$$n_{\text{bot}} := 18$$

Taivutuskestävyyden laskennassa käytettävät EC2 parametrit teholliselle lujuudelle ja jännitysblokin korkeudelle

$$\lambda := 0.8$$

$$\eta := 1$$

Pääterästen kk-jako

$$\frac{b_w}{n_{\text{bot}}} = 305.556 \cdot \text{mm} \quad \text{Valitaan T12 k300 alapintaan}$$

Jänneterästen jännitysten lisäys murtorajatilassa

$$\Delta\sigma_{\text{ULS}} := 50 \text{ MPa}$$

Jännevoiman suunnittelu-arvo murtorajatilassa

$$P_{\text{d,t}} := \frac{P_{\text{m,t}}}{\gamma_{\text{P,fav}}} = 1.764 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Tehollinen jännitys jänneteräksissä

$$\sigma_{pd} := \min\left(\frac{P_{d,t}}{A_p} + \Delta\sigma_{ULS}, f_{pd}\right)$$

$$\sigma_{pd} = 1.226 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Laskelmissa käytettävä teräsmäärä

$$A_s := n_{bot} \cdot 0.25 \cdot \phi_m^2 \cdot \pi = 2.036 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Vetoterästen tehollinen korkeus

$$d_s := h - c_{bot} - \phi_j - 0.5 \cdot \phi_m = 124 \cdot \text{mm}$$

Jänneterästen tehollinen korkeus tarkasteltavassa poikkileikkauksessa

$$d_p := y(0.5 \cdot L_{eff2}) + 0.5 \cdot h = 113.102 \cdot \text{mm}$$

Neutraaliakselin korkeus

$$x := \frac{A_p \cdot \sigma_{pd} + A_s \cdot f_{yd}}{\lambda \cdot b_w \cdot \eta \cdot f_{cd}} = 31.22 \cdot \text{mm}$$

Jännitysblokin korkeus

$$\lambda \cdot x = 24.976 \cdot \text{mm}$$

Tarkistetaan että otaksuma vetoterästen myötäämisestä pitää paikkansa

$$\epsilon_s := \frac{\epsilon_{cu3} \cdot (d_s - x)}{x} = 1.04 \cdot \%$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \quad \text{if } \epsilon_s \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

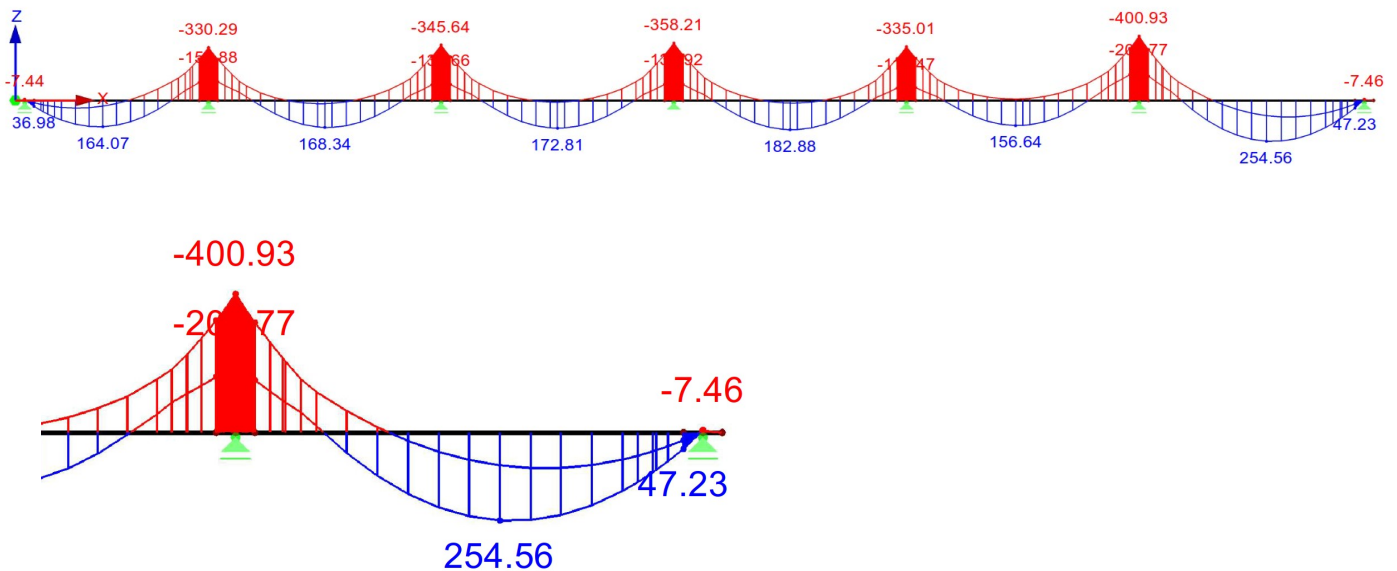
Momenttikapasiteetti

$$M_{Rd} := \left(d_p - \frac{\lambda \cdot x}{2}\right) \cdot A_p \cdot \sigma_{pd} + \left(d_s - \frac{\lambda \cdot x}{2}\right) \cdot A_s \cdot f_{yd} = 283.766 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Maksimimomentti kriittisessä poikkileikkauksessa kuvaajasta

$$M_{Ed, pos} := 255 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \quad \text{if } M_{Rd} \geq M_{Ed, pos} \quad = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$



Yläpinnan vetoterästen mitoitus kriittisessä poikkileikkauksessa

Suojabetoni pääterästen pintaan	$c_{top} := 50\text{mm}$
Pääterästen halkaisija	$\phi_m := 12\text{mm}$
Pääterästen lukumäärä	$n_{top} := 18$
Pääterästen kk-jako	$\frac{b_w}{n_{top}} = 305.556\cdot\text{mm}$

Valitaan T12 k300 yläpintaan

Laskelmissa käytettävä teräsmäärä	$A_{s,top} := n_{top} \cdot 0.25 \cdot \phi_m^2 \cdot \pi$ $A_{s,top} = 2.036 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$
Vetoterästen tehollinen korkeus	$d_{s,top} := h - c_{top} - 0.5 \cdot \phi_m = 124\cdot\text{mm}$
Jänneterästen tehollinen korkeus tarkasteltavassa poikkileikkauksessa	$d_{p,top} := y(L_{eff2}) - 0.5 \cdot h = -81.973\cdot\text{mm}$
Neutraaliakselin korkeus	$\bar{x} := \frac{A_p \cdot \sigma_{pd} + A_{s,top} \cdot f_{yd}}{\lambda \cdot b_w \cdot \eta \cdot f_{cd}} = 31.22\cdot\text{mm}$
Jännitysblokin korkeus	$\lambda \cdot x = 24.976\cdot\text{mm}$

Momenttikapasiteetti

$$M_{Rd,neg} := \left(|d_{p,top}| - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \cdot A_p \cdot \sigma_{pd} + \left(d_{s,top} - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \cdot A_{s,top} \cdot f_{yd} = 226.509 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Maksimimomentti kriittisessä poikkileikkauksessa kuvaajasta

$$M_{Ed,neg} := 209.77 \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } M_{Rd,neg} \geq M_{Ed,neg} = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Laskelmissa on käytetty taivutusmomentin arvoa tuen vieressä.

Taivutuksen edellyttämän vähimmäisraudoituksen tarkastelu

Haurasmurtumasta aiheutuva riski huomioidaan käyttämällä EC2 kappaleen 9.2.1 mukaista vähimmäisraudoitusta

Laatan vähimmäisraudoitus positiiviselle momentille

$$A_{s,min} := \max \left(0.26 \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{yk}}, 0.0013 \right) \cdot b_w \cdot d_s \quad A_{s,min} = 1.611 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } A_s \geq A_{s,min} = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \\ \text{"OK"} \text{ if } A_{s,top} \geq A_{s,min} = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Tarkistetaan onko taivutuskestävyys vähintään 1,15 kertaa suurempi kuin halkeamamomentti (9.2.1.1(4))

$$\text{Halkeamamomentti kun alapinta vedetty} \quad M_{cr} := W_{gr} \cdot \left(f_{ct,eff} + \frac{P_{m,t}}{A_{gr}} \right)$$

$$M_{cr} = 187.888 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

"OK" if $M_{Rd} \geq 1.15 \cdot M_{cr}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise
 "OK" if $M_{Rd.neg} \geq 1.15 \cdot M_{cr}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise

Laatan jakoraidoituksen tarkastelu

Jakoraidoituksen vähimmäispinta-ala

$$A_{s,min,j} := 0.2 \cdot \frac{A_s}{b_w} = 74.027 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Jakoraidoituksen kk-jako

$$kk_j := \min \left(400 \text{mm}, 2 \cdot h, \frac{0.25 \cdot \pi \cdot \phi_j^2}{A_{s,min,j}} \right)$$

$$kk_j = 360 \cdot \text{mm}$$

Mitoitus leikkaukselle kriittisessä poikkileikkauksessa

Leikkauskestävyys leikkauraidoittamattomana

Momenttivarsi leikkausmitoituksessa

$$z := 0.9 \cdot d_s = 111.6 \cdot \text{mm}$$

kerroin "k"

$$k_{6.2a} := \min \left(1 + \sqrt{200 \frac{\text{mm}}{d_s}}, 2 \right) = 2$$

Käytetään yksinkertaistuksen vuoksi leikkauskestävyyden laskennassa vetoraidoituksena edellä laskettua minimiraidoitusta

Kriittisen poikkileikkauksen taakse ankkuroitu vetoraidoitus leikkauskestävyyden laskennassa

$$A_{SL} := A_{s,min} = 1.611 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Raidoitussuhde

$$\rho_1 := \min \left(\frac{A_{SL}}{b_w \cdot d_s}, 0.02 \right) = 0.236\%$$

kerroin "k1"

$$k_{1,1} := 0.15$$

Kerroin $C_{Rd,c}$

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

Leikkauslujuus

$$v_{min} := 0.035 \cdot k_{6.2a} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa}$$

$$v_{min} = 0.586 \cdot \text{MPa}$$

Keskeinen puristusjännitys

$$\sigma_{cp} := \min \left(\frac{P_{d,t}}{A_{gr}}, 0.2 \cdot f_{cd} \right) = 1.782 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{Rd,c,a} := \left[C_{Rd,c} \cdot k_{6.2a} \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d_s = 513.321 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rd,c,b} := (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d_s = 581.739 \cdot \text{kN}$$

Leikkauskestävyys leikkauraidoittamattomana

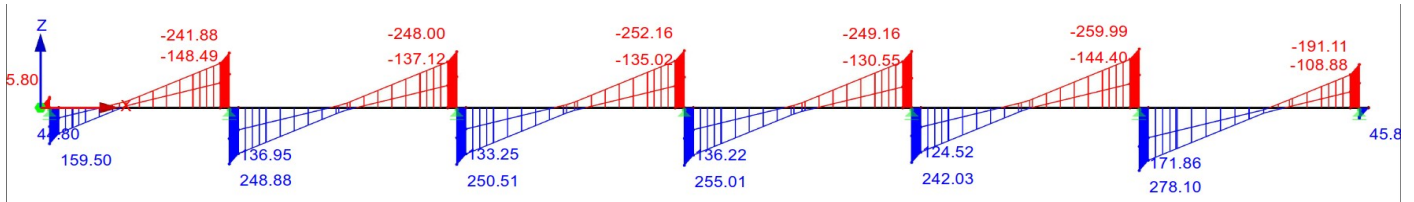
$$V_{Rd,c} := \max(V_{Rd,c,a}, V_{Rd,c,b})$$

$$V_{Rd,c} = 581.739 \cdot \text{kN}$$

Maksimileikkausvoima

$$V_{Ed} := 172 \text{ kN}$$

"OK" if $V_{Rd.c} \geq V_{Ed}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise



Alapinnan raudoitusten ankkurointi reunatuilla

Tuele ulotettavan raudituksen minimimäärä
 (9.2.1.4(1))

$$\beta_2 := 0.25$$

$$A_{s,\min,t} := A_s \cdot \beta_2 = 508.938 \cdot \text{mm}^2$$

Levitysmitta

$$a_L := d_s = 124 \cdot \text{mm}$$

Normaalivoima kaavassa

$$N_{Ed} := 0$$

Ankkuroitava vetovoima reunatuella

$$F_{Ed,t} := V_{Ed} \cdot \frac{a_L}{z} = 191.111 \cdot \text{kN}$$

Vaadittu vetoteräsmäärä reunatuella

$$A_{s,\text{req},t} := \frac{F_{Ed,t}}{f_{yd}} = 439.556 \cdot \text{mm}^2$$

Valitaan reunalenkit T8k300

$$A_{s,t} := \frac{b_w}{300 \text{ mm}} \cdot (8 \text{ mm})^2 \cdot 0.25 \cdot \pi$$

$$A_{s,t} = 921.534 \cdot \text{mm}^2$$

Mitoitus käyttörajatilassa

Jännitystarkastelut

Yläpinnan jännitys

$$\sigma_{\text{top}} := \frac{-P}{A_{\text{gr}}} + \frac{M}{-W_{\text{gr}}}$$

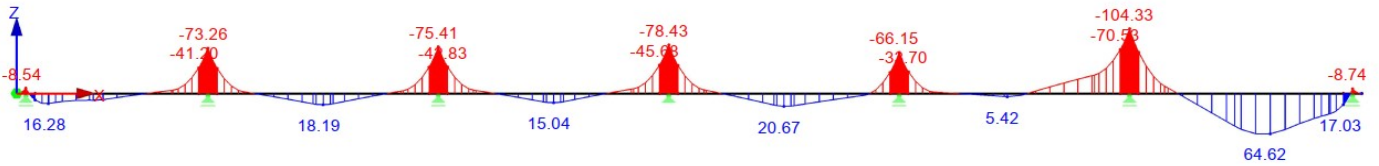
Alapinnan jännitys

$$\sigma_{\text{bot}} := \frac{-P}{A_{\text{gr}}} + \frac{M}{W_{\text{gr}}}$$

Tarkistetaan jännitysehdot ja maksimijännitykset:

Jännitystilanne:

Alkutilanteen jännitykset määrävssä poikkileikkauksessa



$$\sigma_{\text{top.at}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-65.84\text{kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 0.435\cdot\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.ak}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{64.62\text{kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -3.958\cdot\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.at}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-65.84\text{kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -3.999\cdot\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.ak}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{64.62\text{kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 0.394\cdot\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{ap}} := \min(\sigma_{\text{top.ak}}, \sigma_{\text{top.at}}, \sigma_{\text{bot.at}}, \sigma_{\text{bot.ak}}) = -3.999\cdot\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{av}} := \max(\sigma_{\text{top.ak}}, \sigma_{\text{top.at}}, \sigma_{\text{bot.at}}, \sigma_{\text{bot.ak}}) = 0.435\cdot\text{MPa}$$

Alkutilanne, vetojännitys

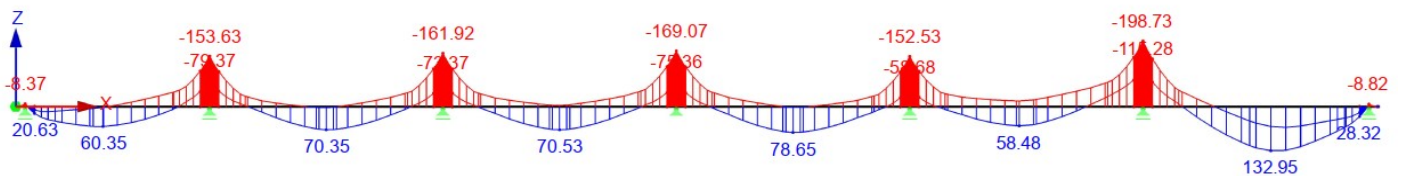
$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } f_{\text{ctm.i}} \geq \sigma_{\text{av}} & = \text{"OK"} & f_{\text{ctm.i}} = 2.4\cdot\text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Alkutilanne, puristusjännitys

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } -0.6\cdot f_{\text{ck.i}} \leq \sigma_{\text{ap}} & = \text{"OK"} & -0.6\cdot f_{\text{ck.i}} = -13.8\cdot\text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Lopputilanne:

Pitkäaikaisyhdistelmän jännitykset määrävssä poikkileikkauksessa



$$\sigma_{\text{top.pyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-144.54\text{kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 3.084\cdot\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.pyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{132.95\text{kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -6.259\cdot\text{MPa}$$

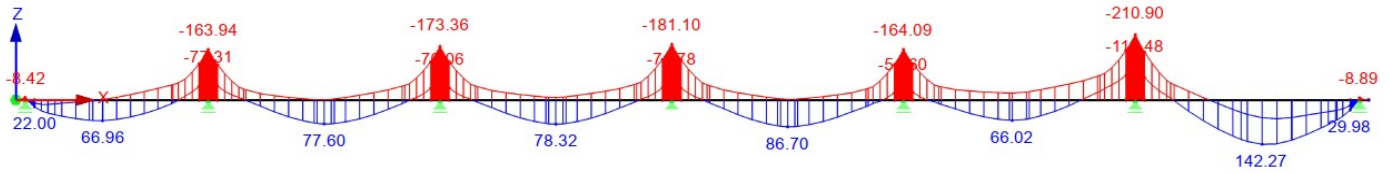
$$\sigma_{\text{bot.pyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-144.54\text{kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -6.649\cdot\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.pyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{132.95\text{kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 2.694\cdot\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{pyp}} := \min(\sigma_{\text{top.pyk}}, \sigma_{\text{bot.pyk}}, \sigma_{\text{top.pyt}}, \sigma_{\text{bot.pyt}}) = -6.649\cdot\text{MPa}$$

Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } -0.45 \cdot f_{ck} \leq \sigma_{pyp} = \text{"OK"} \quad -0.45 \cdot f_{ck} = -15.75 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Tavallisen yhdistelmän jännitykset määrävssä poikkileikkauksessa

$$\sigma_{\text{top.tyt}} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{-154.54 \text{ kN} \cdot \text{m}}{-W_{gr}} = 3.421 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.tyk}} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{142.27 \text{ kN} \cdot \text{m}}{-W_{gr}} = -6.572 \cdot \text{MPa}$$

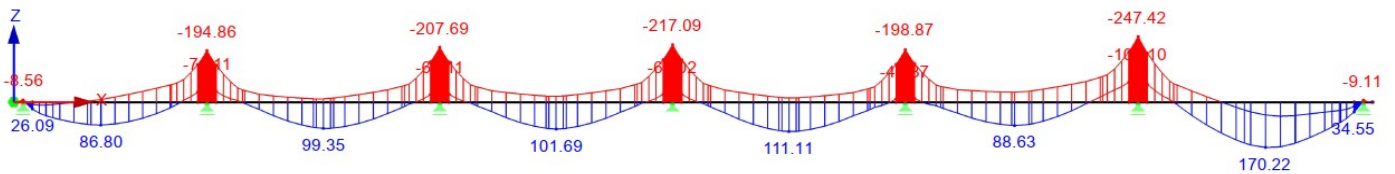
$$\sigma_{\text{bot.tyt}} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{-154.54 \text{ kN} \cdot \text{m}}{W_{gr}} = -6.986 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.tyk}} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{142.27 \text{ kN} \cdot \text{m}}{W_{gr}} = 3.008 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{tyv}} := \max(\sigma_{\text{top.tyk}}, \sigma_{\text{bot.tyk}}, \sigma_{\text{top.tyt}}, \sigma_{\text{bot.tyt}}) = 3.421 \cdot \text{MPa}$$

Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } f_{\text{ct.eff}} \geq \sigma_{\text{tyv}} = \text{"OK"} \quad f_{\text{ct.eff}} = 4.544 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Ominaisyhdistelmän jännitykset määrävssä poikkileikkauksessa

$$\sigma_{\text{top.oyt}} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{-184.52 \text{ kN} \cdot \text{m}}{-W_{gr}} = 4.431 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.oym}} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{170.22 \text{ kN} \cdot \text{m}}{-W_{gr}} = -7.513 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.oyt}} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{-184.52 \text{ kN} \cdot \text{m}}{W_{gr}} = -7.995 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.oym}} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{170.22 \text{ kN} \cdot \text{m}}{W_{gr}} = 3.949 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{oyv}} := \min(\sigma_{\text{top.oym}}, \sigma_{\text{bot.oym}}, \sigma_{\text{top.oyt}}, \sigma_{\text{bot.oyt}}) = -7.995 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{oyv}} := \max(\sigma_{\text{top.oym}}, \sigma_{\text{bot.oym}}, \sigma_{\text{top.oyt}}, \sigma_{\text{bot.oyt}}) = 4.431 \cdot \text{MPa}$$

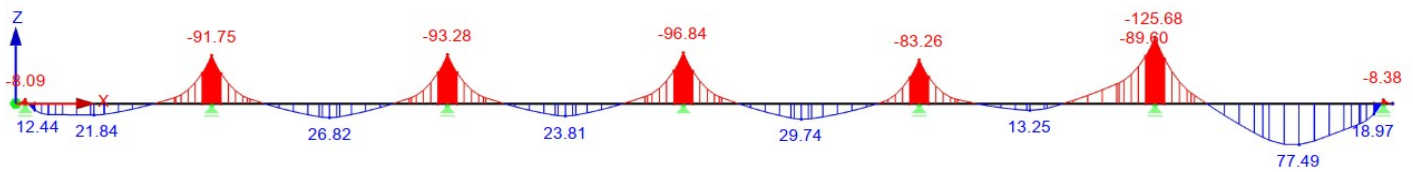
Ominaisyhdistelmä, puristusjännitys

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } -0.6 \cdot f_{ck} \leq \sigma_{\text{oyv}} = \text{"OK"} \quad -0.6 \cdot f_{ck} = -21 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Ominaisyhdistelmä, vetojännitys

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } f_{\text{ct.eff}} \geq \sigma_{\text{oyv}} = \text{"OK"} \quad f_{\text{ct.eff}} = 4.544 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Pysyvien kuormien yhdistelmän jännitykset määräävässä poikkileikkauksessa



$$\sigma_{\text{top.pkyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-84.59 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 1.066 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.pkyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{77.49 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -4.391 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.pkyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-84.59 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -4.63 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.pkyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{77.49 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 0.827 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{pkyv}} := \max(\sigma_{\text{top.pkyk}}, \sigma_{\text{bot.pkyk}}, \sigma_{\text{top.pkyt}}, \sigma_{\text{bot.pkyt}}) = 1.066 \cdot \text{MPa}$$

Pysyvien kuormien yhdistelmä, vetojännitys

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } f_{\text{ct,eff}} \geq \sigma_{\text{pkyv}} = \text{"OK"} & f_{\text{ct,eff}} = 4.544 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Johtopäätökset:

- Rakenne ei halkeile jännitystilanteessa
- Puristusjännitykset ovat hyväksyttävissä rajoissa kaikissa kuormitustilanteissa
- Rakenne ei halkeile missään kuormitustilanteessa

Liite 3: Laatan mitoitus, yksinkertaistettu geometria**Materiaaliominaisuudet****Betoni**

Lieriölujuuden ominaisarvo	$f_{ck} := 35\text{MPa}$
Betonin lieriölujuuden ominaisarvo jännityshetkellä	$f_{ck,i} := 23\text{MPa}$
Betonin taivutusvetolujuuden keskiarvo	$f_{ctm} := 3.2\text{MPa}$
Betonin vetolujuuden 5% fraktiili	$f_{ctk,0.05} := 2\text{MPa}$
Betonin taivutusvetolujuus jännityshetkellä	$f_{ctm,i} := 2.4\text{MPa}$
Kimmokerroimen keskiarvo	$E_{cm} := 34\text{GPa}$
Kimmokerroimen keskiarvo jännityshetkellä	$E_{cm,i} := 31\text{GPa}$
Betonin murtopuristuma murtorajatilassa	$\epsilon_{cu3} := 0.35\%$

Betoniteräket

Vetolujuuden ominaisarvo ja kimmokerroin	$f_{yk} := 500\text{MPa}$
Betoniterästen kimmokerroin	$E_s := 200\text{GPa}$
Betoniterästen murtovenymä	$\epsilon_{uk} := 5\%$ (Sitkeysluokka B)

Jänneteräket

0,1- rajan ja vetolujuuden ominaisarvo	$f_{p0.1k} := 1640\text{MPa}$ $f_{pk} := 1860\text{MPa}$
Jänneteräksen kimmokerroimen mitoitusarvo	$E_p := 195\text{GPa}$
Relaksaatiohäviö 1000 tuntia jännittämisen jälkeen	$\rho_{1000} := 2.5\%$ Luokka 2, pieni relaksaatio
Punoksen halkaisija	$\phi_p := 15.7\text{mm}$
Yhden punoksen pinta-ala	$A_{p,1} := 150\text{mm}^2$
Suurin sallittu jännittämisvoima	$\sigma_{p,max.all} := \min(0.8 \cdot f_{pk}, 0.9 \cdot f_{p0.1k})$ $\sigma_{p,max.all} = 1.476 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$
Suurin sallittu jännevoima välittömien häviöiden jälkeen	$\sigma_{p,m0.all} := \min(0.75 \cdot f_{pk}, 0.85 \cdot f_{p0.1k})$ $\sigma_{p,m0.all} = 1.394 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$

Osavarmuusluvut

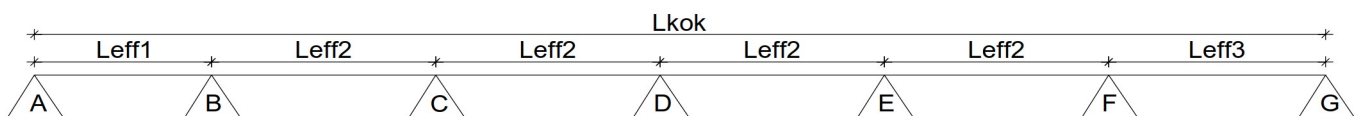
Jännevoiman suunnitteluarvon osavarmuusluku murtorajatilassa	$\gamma_{P,fav} := 1$
Betonin osavarmuusluku ja pienennyskerroin murtorajatilassa	$\alpha_{cc} := 0.85$ $\alpha_{ct} := 0.85$
Betoniterästen osavarmuusluku	$\gamma_S := 1.15$ $\gamma_C := 1.5$

Suunnittelulujuudet

Betonin puristuslujuuden suunnitteluarvo	$f_{cd} := \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_C} = 19.833 \cdot \text{MPa}$
Vetolujuuden mitoitusarvo	$f_{ctd} := \frac{\alpha_{ct} \cdot f_{ctk.0.05}}{\gamma_C} = 1.133 \cdot \text{MPa}$
Betoniterästen myötölujuuden suunnitteluarvo	$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_S} = 434.783 \cdot \text{MPa}$
Jänneterästen myötölujuuden suunnitteluarvo	$f_{pd} := \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_S} = 1.426 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$

Laatan mittatiedot

Laatan paksuus	$h := 180 \text{mm}$
Laatan mitoituskaistan leveys	$b_w := 5500 \text{mm}$
Laatan jännevälit	$L_{\text{eff1}} := 6.4 \text{m}$
	$L_{\text{eff2}} := 8.1 \text{m}$
	$L_{\text{eff3}} := 7.84 \text{m}$
	$L_{\text{kok}} := L_{\text{eff1}} + 4 \cdot L_{\text{eff2}} + L_{\text{eff3}} = 46.64 \text{m}$



Laatan mitoituskaista on valittu siten, että siinä pystytään ottamaan yhden punoksen vaurioituminen samassa poikkileikkauksessa jonka leveys on

$$L_{\text{mit}} := \frac{1}{3} \cdot L_{\text{eff2}} + \frac{1}{3} \cdot L_{\text{eff3}} = 5.313 \text{ m}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } b_w > L_{\text{mit}} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$$

Taivutusvetolujuus

Korotettu taivutusvetolujuus	$f_{\text{ctm.fl}} := \max\left(1, 1.6 - \frac{h}{1\text{m}}\right) \cdot f_{\text{ctm}}$
	$f_{\text{ctm.fl}} = 4.544 \cdot \text{MPa}$
Laskelmissa käytettävä taivutusvetolujuus	$f_{\text{ct,eff}} := f_{\text{ctm.fl}} = 4.544 \cdot \text{MPa}$

Halkeilemattoman poikkileikkauksen poikkileikkauksominaisuudet

Poikkileikkauksen pinta-ala normaalivoiman vaikutuksia laskettaessa	$A_{\text{gr}} := b_w \cdot h = 0.99 \text{ m}^2$
Poikkileikkauksen painopisteen korkeus yläreunasta	$y_{\text{gr}} := 0.5 \cdot h = 90 \text{ mm}$
Jähyysmomentti	$I_{\text{gr}} := \frac{b_w \cdot h^3}{12} = 2.673 \times 10^{-3} \text{ m}^4$

Suorakaidepoikkileikkauksen taisutusvastus

$$W_{gr} := \frac{b_w \cdot h^2}{6} = 0.03 \cdot m^3$$

Sydänkuvion yläreuna

$$k_T := \frac{-W_{gr}}{A_{gr}} = -30 \cdot mm$$

Sydänkuvion alareuna

$$k_B := \frac{W_{gr}}{A_{gr}} = 30 \cdot mm$$

Kuormat

Rakenteen omapaino SW

$$g_{sw} := 25 \frac{kN}{m^3} \cdot A_{gr} = 24.75 \cdot \frac{kN}{m}$$

Pysyvä hyötykuorma DL

$$g_1 := b_w \cdot 0.25 \frac{kN}{m^2} = 1.375 \cdot \frac{kN}{m}$$

Muuttuva hyötykuorma LL

$$q_1 := b_w \cdot 2.5 \frac{kN}{m^2} = 13.75 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$\psi_1 := 0.7 \quad \psi_2 := 0.6$$

Koordinaatisto

Poikkileikkauksominaisuuksia laskettaessa käytetään seuraavaa koordinaatistoa:

- Positiivinen +y suunta on alaspäin poikkileikkauksen painopisteestä (PP)
- Negatiivinen -y suunta on ylöspäin poikkileikkauksen painopisteestä (PP)
- Positiivinen (+) jännitys on vetoa
- Negatiivinen (-) jännitys on puristusta

Punosgeometria

Sijoitetaan punokset siten, että punokset ovat laatan painopisteessä laatan päissä. Kentässä mahdollisimman alhaalla (jakoterästen päällä) ja tuilla mahdollisimman ylhäällä (palkin pääterästen päällä, hakaterästen välissä).

Punosten epäkeskisyydet laatan painopisteakseleilta

Epäkeskisyys päätytuella A ja G

$$e_A := 0mm \quad e_G := 0mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä A...B

$$e_{f1} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella B

$$e_B := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä B...C

$$e_{f2} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella C

$$e_C := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä C...D

$$e_{f3} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella D

$$e_D := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä D...E

$$e_{f4} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella E

$$e_E := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä E...F

$$e_{f5} := 0.5 \cdot h - 50mm - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys välituella F

$$e_F := -0.5 \cdot h + 50mm + \frac{\phi_p}{2} = -32.15 \cdot mm$$

Epäkeskisyys reunakentässä F..G

$$e_{f6} := 0.5 \cdot h - 50\text{mm} - \frac{\phi_p}{2} = 32.15 \cdot \text{mm}$$

Punosten käännepestien sijainnit

Mitta L1

$$L_1 := 1300\text{mm}$$

Mitta L2

$$L_2 := 1300\text{mm}$$

Palkin leveys

$$b_b := 650\text{mm}$$

Jänneväli A-B

$$y_{1AB}(x) := e_A$$

$$y_{2AB}(x) := -\left(\frac{e_A - e_{f1}}{L_1}\right) \cdot \left(x - \frac{b_b}{2}\right) + e_A$$

$$y_{3AB}(x) := e_{f1}$$

$$y_{4AB}(x) := \left(\frac{e_{f1} - e_B}{L_2}\right) \cdot \left(L_{\text{eff1}} - \frac{b_b}{2} - x\right) + e_B$$

$$y_{5AB}(x) := e_B$$

$$y_{AB}(x) := \begin{cases} y_{1AB}(x) & \text{if } 0 \leq x \leq \frac{b_b}{2} \\ y_{2AB}(x) & \text{if } \frac{b_b}{2} < x \leq \frac{b_b}{2} + L_1 \\ y_{3AB}(x) & \text{if } \frac{b_b}{2} + L_1 < x \leq L_{\text{eff1}} - L_2 - \frac{b_b}{2} \\ y_{4AB}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} - L_2 - \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff1}} - \frac{b_b}{2} \\ y_{5AB}(x) & \text{if } L_{\text{eff1}} - \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff1}} \end{cases}$$

Jänneväli B-C

$$y_{1BC}(x) := e_B$$

$$y_{2BC}(x) := -\left(\frac{e_B - e_{f2}}{L_1}\right) \cdot \left(x - L_{\text{eff1}} - \frac{b_b}{2}\right) + e_B$$

$$y_{3BC}(x) := e_{f2}$$

$$y_{4BC}(x) := \left(\frac{e_{f2} - e_C}{L_2}\right) \cdot \left(L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}} - \frac{b_b}{2} - x\right) + e_C$$

$$y_{5BC}(x) := e_C$$

$$y_{BC}(x) := \begin{cases} y_{1BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + \frac{b_b}{2} \\ y_{2BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\ y_{3BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + \frac{b_b}{2} + L_1 < x \leq L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \\ y_{4BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 < x \leq L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \\ y_{5BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} \end{cases}$$

Jänneväli C-D

$$y_{1CD}(x) := e_C$$

$$y_{2CD}(x) := -\left(\frac{e_C - e_{f3}}{L_1}\right) \cdot \left[x - \left(L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \right) \right] + e_C$$

$$y_{3CD}(x) := e_{f3}$$

$$y_{4CD}(x) := \left(\frac{e_{f3} - e_D}{L_2}\right) \cdot \left[\left(L_{\text{eff}1} + 2 \cdot L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \right) - x \right] + e_D$$

$$y_{5CD}(x) := e_D$$

$$y_{CD}(x) := \begin{cases} y_{1CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \\ y_{2CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\ y_{3CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 < x \leq L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \\ y_{4CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 < x \leq L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \\ y_{5CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} \end{cases}$$

Jänneväli D-E

$$y_{1DE}(x) := e_D$$

$$y_{2DE}(x) := -\left(\frac{e_D - e_{f4}}{L_1}\right) \cdot \left[x - \left(L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \right) \right] + e_D$$

$$y_{3DE}(x) := e_{f4}$$

$$y_{4DE}(x) := \left(\frac{e_{f4} - e_E}{L_2}\right) \cdot \left[\left(L_{\text{eff}1} + 3 \cdot L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \right) - x \right] + e_E$$

$$y_{5DE}(x) := e_E$$

$$y_{DE}(x) := \begin{cases} y_{1DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \\ y_{2DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\ y_{3DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 < x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \\ y_{4DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 < x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \\ y_{5DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} \end{cases}$$

Jänneväli E-F

$$y_{1EF}(x) := e_E$$

$$y_{2EF}(x) := -\left(\frac{e_E - e_{f5}}{L_1}\right) \cdot \left[x - \left(L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \right) \right] + e_E$$

$$y_{3EF}(x) := e_{f5}$$

$$y_{4EF}(x) := \left(\frac{e_{f5} - e_F}{L_2}\right) \cdot \left[\left(L_{\text{eff}1} + 4 \cdot L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \right) - x \right] + e_F$$

$$y_{5EF}(x) := e_F$$

$$y_{EF}(x) := \begin{cases} y_{1EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \\ y_{2EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\ y_{3EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 < x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \\ y_{4EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 < x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \\ y_{5EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} \end{cases}$$

Jänneväli F-G

$$y_{1FG}(x) := e_F$$

$$y_{2FG}(x) := -\left(\frac{e_F - e_{f6}}{L_1}\right) \cdot \left[x - \left(L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \right) \right] + e_F$$

$$y_{3FG}(x) := e_{f6}$$

$$y_{4FG}(x) := \left(\frac{e_{f6} - e_G}{L_2}\right) \cdot \left(L_{\text{kok}} - \frac{b_b}{2} - x \right) + e_G$$

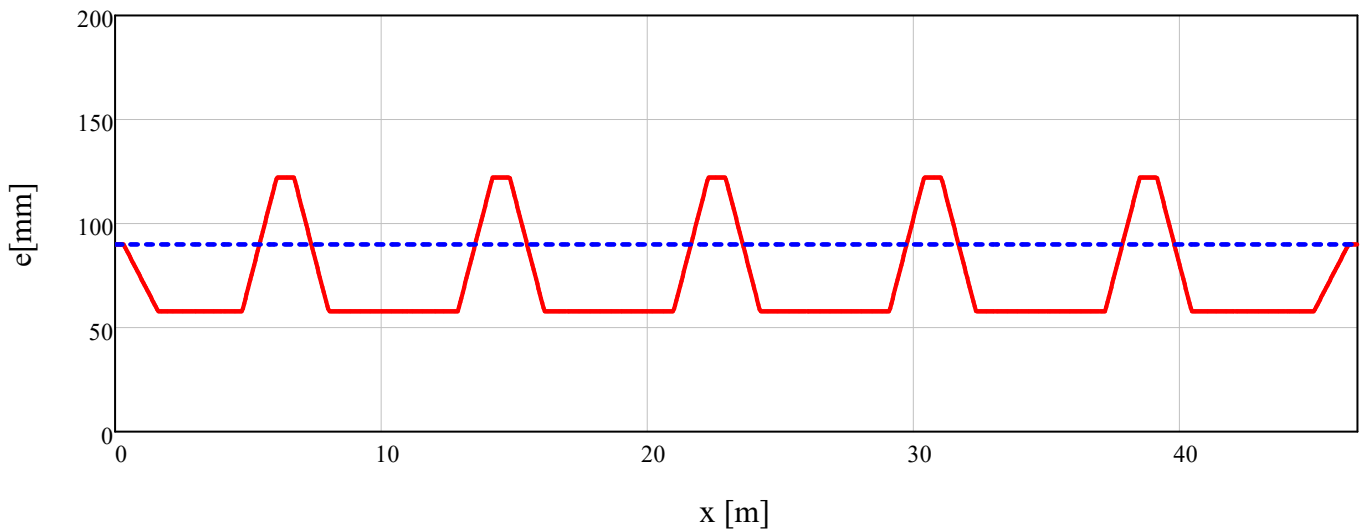
$$y_{5FG}(x) := e_G$$

$$y_{FG}(x) := \begin{cases} y_{1FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \\ y_{2FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\ y_{3FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 < x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + L_{\text{eff}3} - \frac{b_b}{2} - L_2 \\ y_{4FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + L_{\text{eff}3} - \frac{b_b}{2} - L_2 < x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + L_{\text{eff}3} - \frac{b_b}{2} \\ y_{5FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + L_{\text{eff}3} - \frac{b_b}{2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + L_{\text{eff}3} \end{cases}$$

Koko rakenteen punosgeometria

$$y(x) := \begin{cases} y_{AB}(x) & \text{if } 0 \leq x \leq L_{\text{eff}1} \\ y_{BC}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} < x \leq L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} \\ y_{CD}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 2 \cdot L_{\text{eff}2} \\ y_{DE}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 2 \cdot L_{\text{eff}2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 3 \cdot L_{\text{eff}2} \\ y_{EF}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 3 \cdot L_{\text{eff}2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 4 \cdot L_{\text{eff}2} \\ y_{FG}(x) & \text{if } L_{\text{eff}1} + 4 \cdot L_{\text{eff}2} < x \leq L_{\text{eff}1} + 4 \cdot L_{\text{eff}2} + L_{\text{eff}3} \end{cases}$$

Punosgeometria laatan alareunan suhteen



— Punosgeometria
 - - - Painopisteakseli

Tarkistetaan, että punoksen kääntösäde tuen lähellä ei ole liian pieni

$$R_{\min} := \frac{L_1 \cdot \left(\frac{L_{\text{eff}1}}{2} \right)}{2 \cdot (e_{f2} - e_B)} = 32.348 \text{ m}$$

"OK" if $R_{\min} > 2.5 \text{ m}$ = "OK"
 "TARKISTA" otherwise

Punosten kokonaislukumäärä

$n_p := 10$ plus yksi punos
 vauriotilanteen varalta

Punosten kk-jako	$\frac{b_w}{n_p + 1} = 500 \cdot \text{mm}$
	Valitaan kk-jako 500mm
Tunkkausvoima per punos	$P_{\max.1} := 215 \text{ kN}$
Laataan kohdistuva kokonaisvoima punoksista	$P_{\max} := n_p \cdot P_{\max.1} = 2.15 \times 10^3 \cdot \text{kN}$
Punosten kokonaispinta-ala	$A_p := n_p \cdot A_{p.1} = 1.5 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$

Ankkurijänneiden jännevoimien välittömien alkuhäviöiden laskenta

Kitkakerroin	$\mu := 0.06$
Aaltoisuusluku	$\beta := 0.00873 \cdot \frac{1}{\text{m}}$
Lukitusliukuma	$\Delta_{\text{slip}} := 6 \text{ mm}$

Betonin välittömästä muodonmuutoksesta johtuvan häviön laskenta

Laskelmissa otaksutaan, että punokset jännitetään yksitellen

Yhden punoksen jännittämisestä aiheutuva keskimääräinen jännitys betonissa

$$\Delta\sigma_{C,i} := \frac{P_{\max.1}}{A_{gr}} = 0.217 \cdot \text{MPa}$$

Kerroin "j"

$$j := \frac{n_p - 1}{2n_p} = 0.45$$

Välitön häviö kimmoisesta kokoonpuristumasta

$$\Delta P_{el} := A_p \cdot E_p \cdot \sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{j \cdot |\Delta\sigma_{C,i}|}{E_{cm,i}} \right)$$

$$\Delta P_{el} = 9.221 \cdot \text{kN}$$

Kitkahäviöiden laskenta

Punosten kulmanmuutokset

$$\alpha_1 := \frac{e_{f1} - e_A}{L_1} = 0.025$$

$$\alpha_7 := \frac{e_{f4} - e_D}{L_1} = 0.049$$

$$\alpha_2 := \frac{e_B - e_{f1}}{L_2} = -0.049$$

$$\alpha_8 := \frac{e_E - e_{f4}}{L_2} = -0.049$$

$$\alpha_3 := \frac{e_{f2} - e_B}{L_1} = 0.049$$

$$\alpha_9 := \frac{e_{f5} - e_E}{L_1} = 0.049$$

$$\alpha_4 := \frac{e_C - e_{f2}}{L_2} = -0.049$$

$$\alpha_{10} := \frac{e_F - e_{f5}}{L_2} = -0.049$$

$$\alpha_5 := \frac{e_{f3} - e_C}{L_1} = 0.049$$

$$\alpha_{11} := \frac{e_{f6} - e_F}{L_1} = 0.049$$

$$\alpha_6 := \frac{e_D - e_{f3}}{L_2} = -0.049$$

$$\alpha_{12} := \frac{e_G - e_{f6}}{L_2} = -0.025$$

Punosten kulmanmuutosten summa kohdassa x

$$\begin{aligned}
\theta(x) := & 0 \quad \text{if } 0 \leq x < \frac{b_b}{2} \\
& \alpha_1 \quad \text{if } \frac{b_b}{2} \leq x < L_1 + \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 \quad \text{if } L_1 + \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} - L_2 - \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 + \alpha_2 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} - L_2 - \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} - \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} - \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} \leq x < L_{\text{eff}1} + \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + \alpha_3 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + \frac{b_b}{2} + L_1 \leq x < L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + |\alpha_4| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \leq x < L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} \leq x < L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + \alpha_5 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \leq x < L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + |\alpha_6| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \leq x < L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} \leq x < L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + \alpha_7 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 2L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \leq x < L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + |\alpha_8| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \leq x < L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} \\
& 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} \leq x \leq L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + \alpha_9 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \\
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + 2\cdot\alpha_9 \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 3L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \leq x < L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} \\
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + 2\cdot\alpha_9 + |\alpha_{10}| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} - L_2 \leq x < L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} \\
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + 2\alpha_9 + 2\cdot|\alpha_{10}| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} - \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} \\
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + 2\alpha_9 + 2\cdot|\alpha_{10}| \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} \leq x < L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} \\
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + 2\alpha_9 + 2\cdot|\alpha_{10}| + \alpha_{11} \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} \\
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + 2\alpha_9 + 2\cdot|\alpha_{10}| + 2\alpha_{11} \quad \text{if } L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \leq x < L_{\text{eff}1} + 4L_{\text{eff}2} + \frac{b_b}{2} + L_1 \\
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + 2\alpha_9 + 2\cdot|\alpha_{10}| + 2\alpha_{11} + |\alpha_{12}| \quad \text{if } L_{\text{kok}} - \frac{b_b}{2} - L_2 \leq x < L_{\text{kok}} - \frac{b_b}{2} \\
 & 2\alpha_1 + 2|\alpha_2| + 2\alpha_3 + 2\cdot|\alpha_4| + 2\alpha_5 + 2|\alpha_6| + 2\alpha_7 + 2|\alpha_8| + 2\alpha_9 + 2\cdot|\alpha_{10}| + 2\alpha_{11} + 2\cdot|\alpha_{12}| \quad \text{if } L_{\text{kok}} - \frac{b_b}{2} \leq x < L_{\text{kok}}
 \end{aligned}$$

Kitkahäviö kohdassa x

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\mu}(x) &:= P_{\text{max}} \cdot \left[1 - e^{-\mu \cdot (\theta(x) + \beta \cdot x)} \right] \\
 \Delta P_{\mu}(L_{\text{kok}}) &= 184.496 \cdot \text{kN}
 \end{aligned}$$

Ankkurointi- ja lukitushäviöiden laskenta

Laatan ankkurointiliukuman laskennassa sovelletaan vastaavaa energiaperiaatetta kuin palkin ankkurointiliukuman laskennassa

Ulkoisen energian menetys

$$\Delta p_E := E_p \cdot \Delta_{\text{slip}} \cdot A_p = 1.755 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Lukitushäviön pituuden ratkaisu

$$x_{\text{set}} := 20.975 \text{m}$$

Sisäisen energian menetys x:n funktiona

$$\Delta p_I(x) := 2 \cdot \left[\int_0^x (P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x)) dx - (P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x)) \cdot x \right]$$

Sisäisen ja ulkoisen energian menetyksen tulee olla tasapainossa

$$\Delta p_I = E_p \cdot \Delta_{\text{slip}} \cdot A_p$$

Sisäisen energian menetys lukitushäviön pituudelta

$$\Delta p_I(x_{\text{set}}) = 1.827 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}$$

Lukitushäviön suuruus laatan päässä

$$\Delta P_{\text{sl}} := 2 \cdot \Delta P_{\mu}(x_{\text{set}}) = 171.346 \cdot \text{kN}$$

Jännevoiman suuruus välittömästi jännittämisen ja ankkuroinnin jälkeen

Jännevoiman arvo välittömästi jännittämisen ja ankkuroinnin jälkeen

$$P_{m,0}(x) := \left[\begin{aligned} & (P_{\text{max}} - \Delta P_{\text{sl}} + \Delta P_{\mu}(x)) \quad \text{if } x \leq x_{\text{set}} \\ & (P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x)) \quad \text{otherwise} \end{aligned} \right] - \Delta P_{\text{el}}$$

Tarkistetaan, että jännevoiman suuruus välittömien häviöiden jälkeen ei ole liian suuri

Jännevoima saavuttaa maksimiarvon lukitushäviöiden päätekohtassa

$$\sigma_{pm0.max} := \frac{P_{m.0}(x_{set})}{A_p} = 1.37 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Jänneiden sallittu jännitys jännittämisen jälkeen

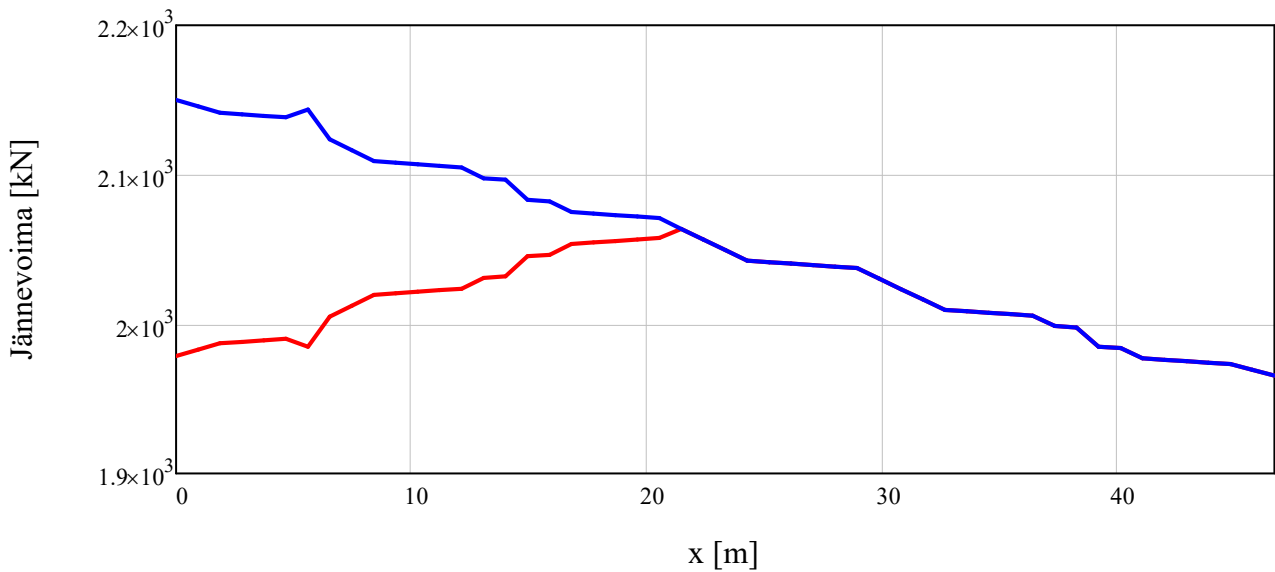
$$\sigma_{pm0.all} := \min(0.75 \cdot f_{pk}, 0.85 \cdot f_{p0.1k})$$

$$\sigma_{pm0.all} = 1.394 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

"OK" if $\sigma_{pm0.max} < \sigma_{pm0.all}$ = "OK"
"TARKISTA" otherwise

$$x := 0, \frac{L_{kok}}{50} .. L_{kok}$$

Välittömät häviöt



— Jännevoima kitka- ja lukitushäviöiden jälkeen

— Jännevoima kitkahäviöiden jälkeen

Jännevoiman ajasta riipuvat häviöt tartunta- ja ankkurijänneissä

Relaksaatiohäviöiden laskenta

Jännittämishetkellä vallitsevan jännityksen keskimääräinen itseisarvo punoksissa

$$\sigma_{pi} := \frac{P_{m.0}\left(\frac{L_{kok}}{2}\right)}{A_p} = 1.36 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Suunnittelussa käytettävä relaksaatiohäviön arvo

$$\Delta\sigma_{pr} := 3 \cdot \rho_{1000} \cdot \sigma_{pi} = 102.019 \cdot \text{MPa}$$

Ajasta riippuvien häviöiden laskenta



Laskelmissa käytettävä arvo virumaluvulle

$$\varphi_{wv} := 1.75$$



Laskelmissa käytettävä arvo kutistumalle

$$\epsilon_{cs} := 0.040\%$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen puristusjännitys betonissa jänneiden korkeudella

$$\sigma_{c.QP} := \frac{P_{m.0}\left(\frac{L_{kok}}{2}\right)}{A_{gr}} = 2.061 \cdot \text{MPa}$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen vetojännitys jänneteräksissä

$$\sigma_{p.QP} := \frac{P_{m.0} \left(\frac{L_{kok}}{2} \right)}{A_p} = 1.36 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Häviölaskelmissa otaksuttu keskimääräinen betonipoikkileikkauksen painopisteen ja jänneterästen painopisteen välinen etäisyys

$$z_{cp} := 0 \text{ mm}$$

Ajasta riippuvat häviöt

$$\Delta\sigma_{p.c.s.r} := \frac{\epsilon_{cs} \cdot E_p + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi \cdot |\sigma_{c.QP}| + 0.8 \cdot \Delta\sigma_{pr}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_{gr}} \cdot \left(1 + \frac{A_{gr}}{I_{gr}} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot (1 + 0.8 \cdot \varphi)}$$

$$\Delta\sigma_{p.c.s.r} = 176.617 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta P_{c.s.r} := A_p \cdot \Delta\sigma_{p.c.s.r} = 264.925 \cdot \text{kN}$$

Ohjausvoimien laskenta

Keskimääräisen jännevoiman laskenta

Jännevoiman keskimääräinen arvo kohdassa x kaikkien häviöiden jälkeen

$$P_{m.t}(x) := P_{m.0}(x) - \Delta P_{c.s.r}$$

Käytetään laskelmissa yksinkertaistuksen vuoksi samaa keskimääräistä jännevoimaa kaikissa jänteissä

Keskimääräinen jännevoima kaikkien häviöiden jälkeen jänteessä #1...6

$$P_{m.t} := \frac{1}{L_{kok}} \cdot \int_0^{L_{kok}} P_{m.t}(x) dx$$

$$P_{m.t} = 1.742 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Keskimääräinen puristusjännitys poikkileikkauksessa

$$\sigma_{c.m} := \frac{P_{m.t}}{A_{gr}} = 1.759 \cdot \text{MPa}$$

Ohjausvoimien suuruus jänteessä A-B kulmamutosten kohdassa

$$P_{AB1} := P_{m.t} \cdot \alpha_1 = 43.069 \cdot \text{kN}$$

$$P_{AB2} := 0$$

$$P_{AB3} := P_{m.t} \cdot \alpha_2 = -86.138 \cdot \text{kN}$$

Ohjausvoimien suuruus jänteissä A-B, B-C, C-D, D-E, E-F kulmamutoksen kohdassa

$$P_{BC1} := P_{m.t} \cdot \alpha_3 = 86.138 \cdot \text{kN}$$

$$P_{BC2} := 0$$

$$P_{BC3} := P_{m.t} \cdot \alpha_4 = -86.138 \cdot \text{kN}$$

$$P_{CD1} := P_{m.t} \cdot \alpha_5 = 86.138 \cdot \text{kN}$$

$$P_{CD2} := 0$$

$$P_{CD3} := P_{m.t} \cdot \alpha_6 = -86.138 \cdot \text{kN}$$

$$P_{DE1} := P_{m,t} \cdot \alpha_7 = 86.138 \cdot \text{kN}$$

$$P_{DE2} := 0$$

$$P_{DE3} := P_{m,t} \cdot \alpha_8 = -86.138 \cdot \text{kN}$$

$$P_{EF1} := P_{m,t} \cdot \alpha_9 = 86.138 \cdot \text{kN}$$

$$P_{EF2} := 0$$

$$P_{EF3} := P_{m,t} \cdot \alpha_{10} = -86.138 \cdot \text{kN}$$

Ohjausvoimien suuruus jänteissä F-G kulmamuuotoksen kohdassa

$$P_{FG1} := P_{m,t} \cdot \alpha_{11} = 86.138 \cdot \text{kN}$$

$$P_{FG2} := 0$$

$$P_{FG3} := P_{m,t} \cdot \alpha_{12} = -43.069 \cdot \text{kN}$$

Laatan halkeilukestävyys

$$M_{cr} := W_{gr} \cdot \left(f_{ct,eff} + \frac{P_{m,t}}{A_{gr}} \right) = 187.202 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Mitoitus murtorajatilassa

Mitoitetaan tarvittavat teräkset ensin murtorajatilassa. Teräsmäärää lisätään jos käyttörajatilan tarkastelut niin vaativat.

Mitoitus taivutukselle

Alapinnan vetoterästen mitoitus kriittisessä poikkileikkauksessa

Mitoitetaan tarvittava teräsmäärä jänteen keskellä taivutukselle

Suojabetoni jakoterästen pintaan

$$c_{bot} := 40 \text{ mm}$$

Jakoterästen halkaisija

$$\phi_j := 10 \text{ mm}$$

Pääterästen halkaisija

$$\phi_m := 12 \text{ mm}$$

Pääterästen lukumäärä

$$n_{bot} := 18$$

Taivutuskestävyyden laskennassa käytettävät EC2 parametrit teholliselle lujudelle ja jännitysblokin korkeudelle

$$\lambda := 0.8$$

$$\eta := 1$$

Pääterästen kk-jako

$$\frac{b_w}{n_{bot}} = 305.556 \cdot \text{mm} \quad \text{Valitaan T12 k300 alapintaan}$$

Jänneterästen jännitysten lisäys murtorajatilassa

$$\Delta\sigma_{ULS} := 50 \text{ MPa}$$

Jännevoiman suunnittelu-arvo murtorajatilassa

$$P_{d,t} := \frac{P_{m,t}}{\gamma_{P,fav}} = 1.742 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Tehollinen jännitys jänneteräksissä

$$\sigma_{pd} := \min \left(\frac{P_{d,t}}{A_p} + \Delta\sigma_{ULS}, f_{pd} \right)$$

$$\sigma_{pd} = 1.211 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

Laskelmissa käytettävä teräsmäärä	$A_s := n_{\text{bot}} \cdot 0.25 \cdot \phi_m^2 \cdot \pi = 2.036 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$
Vetoterästen tehollinen korkeus	$d_s := h - c_{\text{bot}} - \phi_j - 0.5 \cdot \phi_m = 124 \cdot \text{mm}$
Jänneterästen tehollinen korkeus tarkasteltavassa poikkileikkauksessa	$d_p := y(0.5 \cdot L_{\text{eff}2}) + 0.5 \cdot h = 122.15 \cdot \text{mm}$
Neutraaliakselin korkeus	$x := \frac{A_p \cdot \sigma_{\text{pd}} + A_s \cdot f_{\text{yd}}}{\lambda \cdot b_w \cdot \eta \cdot f_{\text{cd}}} = 30.958 \cdot \text{mm}$
Jännitysblokin korkeus	$\lambda \cdot x = 24.767 \cdot \text{mm}$
Tarkistetaan että otaksuma vetoterästen myötäämisestä pitää paikkansa	$\epsilon_s := \frac{\epsilon_{\text{cu}3} \cdot (d_s - x)}{x} = 1.052 \cdot \%$
	$\left \begin{array}{l} \text{"OK"} \quad \text{if } \epsilon_s \geq \frac{f_{\text{yd}}}{E_s} \\ \text{"TARKISTA"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$

Momenttikapasiteetti

$$M_{\text{Rd}} := \left(d_p - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \cdot A_p \cdot \sigma_{\text{pd}} + \left(d_s - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \cdot A_s \cdot f_{\text{yd}} = 298.186 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Maksimimomentti kriittisessä poikkileikkauksessa kuvaajasta

$$M_{\text{Ed, pos}} := 209.77 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \quad \text{if } M_{\text{Rd}} \geq M_{\text{Ed, pos}} \\ \text{"TARKISTA"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$$

Yläpinnan vetoterästen mitoitus kriittisessä poikkileikkauksessa

Suojabetoni pääterästen pintaan	$c_{\text{top}} := 50 \text{ mm}$
Pääterästen halkaisija	$\phi_m := 12 \text{ mm}$
Pääterästen lukumäärä	$n_{\text{top}} := 27$
Pääterästen kk-jako	$\frac{b_w}{n_{\text{top}}} = 203.704 \cdot \text{mm}$
	Valitaan T12 k200 yläpintaan
Laskelmissa käytettävä teräsmäärä	$A_{s, \text{top}} := n_{\text{top}} \cdot 0.25 \cdot \phi_m^2 \cdot \pi$ $A_{s, \text{top}} = 3.054 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$
Vetoterästen tehollinen korkeus	$d_{s, \text{top}} := h - c_{\text{top}} - 0.5 \cdot \phi_m = 124 \cdot \text{mm}$
Jänneterästen tehollinen korkeus tarkasteltavassa poikkileikkauksessa	$d_{p, \text{top}} := y(L_{\text{eff}2}) - 0.5 \cdot h = -57.85 \cdot \text{mm}$
Neutraaliakselin korkeus	$x := \frac{A_p \cdot \sigma_{\text{pd}} + A_{s, \text{top}} \cdot f_{\text{yd}}}{\lambda \cdot b_w \cdot \eta \cdot f_{\text{cd}}} = 36.03 \cdot \text{mm}$
Jännitysblokin korkeus	$\lambda \cdot x = 28.824 \cdot \text{mm}$

Momenttikapasiteetti

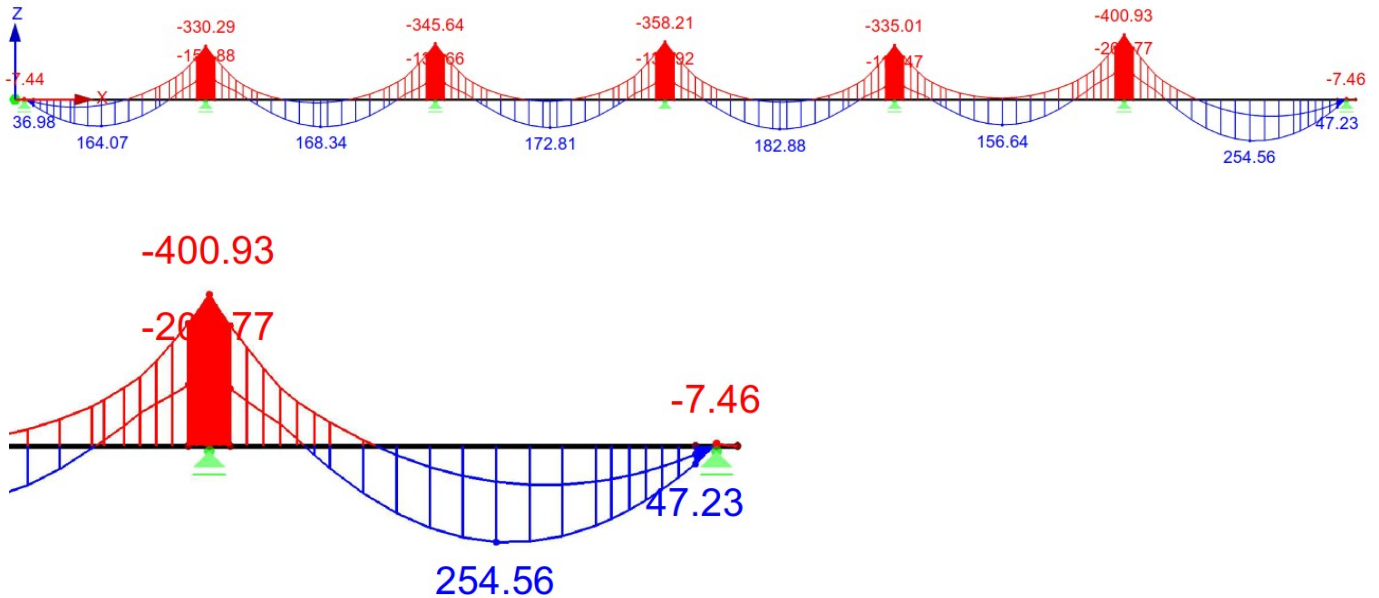
$$M_{\text{Rd, neg}} := \left(\left| d_{p, \text{top}} \right| - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \cdot A_p \cdot \sigma_{\text{pd}} + \left(d_{s, \text{top}} - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \cdot A_{s, \text{top}} \cdot f_{\text{yd}} = 224.403 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Maksimimomentti kriittisessä poikkileikkauksessa kuvaajasta

$$M_{Ed.neg} := 172 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } M_{Rd.neg} \geq M_{Ed.neg} & = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Laskelmissa on käytetty taivutusmomentin arvoa tuen vieressä.



Taivutuksen edellyttämän vähimmäisraudoituksen tarkastelu

Haurasmurtumasta aiheutuva riski huomioidaan käyttämällä EC2 kappaleen 9.2.1 mukaista vähimmäisraudoitusta

Laatan vähimmäisraudoitus positiiviselle momentille

$$A_{s,min} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{yk}}, 0.0013\right) \cdot b_w \cdot d_s \quad A_{s,min} = 1.611 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } A_s \geq A_{s,min} & = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \\ \text{"OK"} & \text{if } A_{s,top} \geq A_{s,min} & = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Tarkistetaan onko taivutuskestävyys vähintään 1,15 kertaa suurempi kuin halkeamamomentti (9.2.1.1(4))

Halkeamamomentti kun alapinta vedetty

$$M_{cr} := W_{gr} \cdot \left(f_{ct,eff} + \frac{P_{m,t}}{A_{gr}} \right)$$

$$M_{cr} = 187.202 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } M_{Rd} \geq 1.15 \cdot M_{cr} & = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \\ \text{"OK"} & \text{if } M_{Rd.neg} \geq 1.15 \cdot M_{cr} & = \text{"OK"} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Laatan jakoraidoituksen tarkastelu

Jakoraidoituksen vähimmäispinta-ala

$$A_{s,\min,j} := 0.2 \cdot \frac{A_s}{b_w} = 74.027 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Jakoraidoituksen kk-jako

$$kk_j := \min \left(400 \text{mm}, 2 \cdot h, \frac{0.25 \cdot \pi \cdot \phi_j^2}{A_{s,\min,j}} \right)$$

$$kk_j = 360 \cdot \text{mm}$$

Mitoitus leikkaukselle kriittisessä poikkileikkauksessaLeikkauskestävyys leikkauraidoittamattomana

Momenttivarsi leikkausmitoituksessa

$$z := 0.9 \cdot d_s = 111.6 \cdot \text{mm}$$

kerroin "k"

$$k_{6,2a} := \min \left(1 + \sqrt{200 \frac{\text{mm}}{d_s}}, 2 \right) = 2$$

Käytetään yksinkertaistuksen vuoksi leikkauskestävyyden laskennassa vetoraidoituksena edellä laskettua minimiraidoitusta

Kriittisen poikkileikkauksen taakse ankkuroitu vetoraidoitus leikkauskestävyyden laskennassa

$$A_{SL} := A_{s,\min} = 1.611 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Raidoitussuhde

$$\rho_1 := \min \left(\frac{A_{SL}}{b_w \cdot d_s}, 0.02 \right) = 0.236\%$$

kerroin "k1"

$$k_1 := 0.15$$

Kerroin $C_{Rd,c}$

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

Leikkauslujuus

$$v_{\min} := 0.035 \cdot k_{6,2a}^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa}$$

$$v_{\min} = 0.586 \cdot \text{MPa}$$

Keskeinen puristusjännitys

$$\sigma_{cp} := \min \left(\frac{P_{d,t}}{A_{gr}}, 0.2 \cdot f_{cd} \right) = 1.759 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{Rd,c,a} := \left[C_{Rd,c} \cdot k_{6,2a} \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d_s = 510.96 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rd,c,b} := (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d_s = 579.379 \cdot \text{kN}$$

Leikkauskestävyys leikkauraidoittamattomana

$$V_{Rd,c} := \max(V_{Rd,c,a}, V_{Rd,c,b})$$

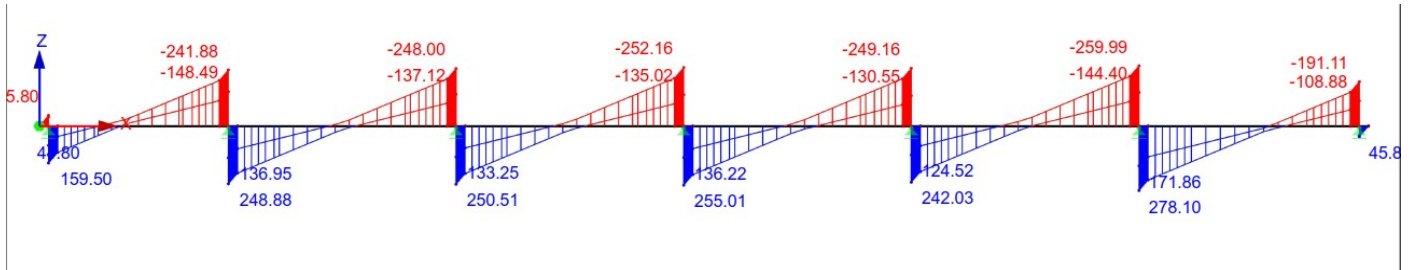
$$V_{Rd,c} = 579.379 \cdot \text{kN}$$

Maksimileikkausvoima

$$V_{Ed} := 172 \text{ kN}$$

"OK" if $V_{Rd.c} \geq V_{Ed}$ = "OK"

"TARKISTA" otherwise



Alapinnan raudoitusten ankkurointi reunatuilla

Tuelle ulotettavan raudituksen minimimäärä
(9.2.1.4(1))

$$\beta_2 := 0.25$$

$$A_{s,\min,t} := A_s \cdot \beta_2 = 508.938 \cdot \text{mm}^2$$

Levitysmitta

$$a_L := d_s = 124 \cdot \text{mm}$$

Normaalivoima kaavassa

$$N_{Ed} := 0$$

Ankkuroitava vetovoima reunatuella

$$F_{Ed,t} := V_{Ed} \cdot \frac{a_L}{z} = 191.111 \cdot \text{kN}$$

Vaadittu vetoteräsmäärä reunatuella

$$A_{s,\text{req},t} := \frac{F_{Ed,t}}{f_{yd}} = 439.556 \cdot \text{mm}^2$$

Valitaan reunalenkit T8k300

$$A_{s,t} := \frac{b_w}{300 \text{ mm}} \cdot (8 \text{ mm})^2 \cdot 0.25 \cdot \pi$$

$$A_{s,t} = 921.534 \cdot \text{mm}^2$$

Mitoitus käyttörajatilassa

Jännitystarkastelut

Yläpinnan jännitys

$$\sigma_{top} := \frac{-P}{A_{gr}} + \frac{M}{-W_{gr}}$$

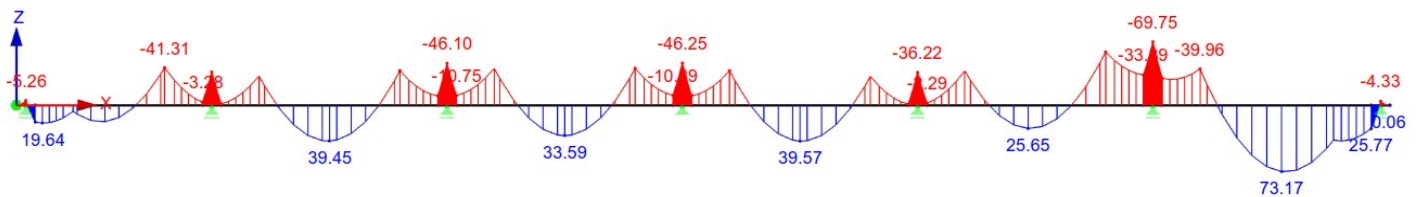
Alapinnan jännitys

$$\sigma_{bot} := \frac{-P}{A_{gr}} + \frac{M}{W_{gr}}$$

Tarkistetaan jännitysehdot ja maksimijännitykset:

Jännitystilanne:

Alkutilanteen jännitykset määrävissä poikkileikkauksissa



$$\sigma_{top.at} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{-58.71 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{gr}} = 0.218 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{top.ak} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{73.17 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{gr}} = -4.223 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{bot.at} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{-58.71 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{gr}} = -3.736 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{bot.ak} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{73.17 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{gr}} = 0.705 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{ap} := \min(\sigma_{top.ak}, \sigma_{top.at}, \sigma_{bot.at}, \sigma_{bot.ak}) = -4.223 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{av} := \max(\sigma_{top.ak}, \sigma_{top.at}, \sigma_{bot.at}, \sigma_{bot.ak}) = 0.705 \cdot \text{MPa}$$

Alkutilanne, vetojännitys

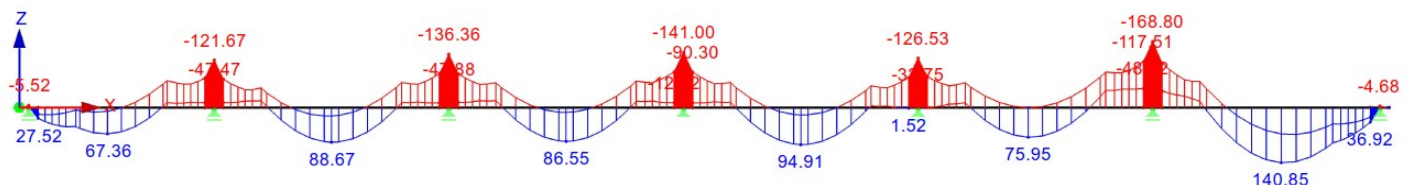
$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } f_{ctm.i} \geq \sigma_{av} & = \text{"OK"} & f_{ctm.i} = 2.4 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Alkutilanne, puristusjännitys

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } -0.6 \cdot f_{ck.i} \leq \sigma_{ap} & = \text{"OK"} & -0.6 \cdot f_{ck.i} = -13.8 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Lopputilanne:

Pitkäaikaisyhdistelmän jännitykset määrävissä poikkileikkauksissa



$$\sigma_{top.pyt} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{-117.51 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{gr}} = 2.197 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{top.pyk} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{140.85 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{gr}} = -6.502 \cdot \text{MPa}$$

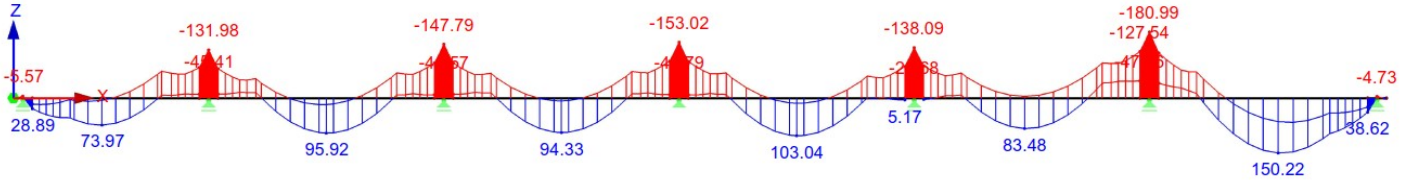
$$\sigma_{bot.pyt} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{-117.51 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{gr}} = -5.716 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{bot.pyk} := \frac{-P_{m.t}}{A_{gr}} + \frac{140.85 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{gr}} = 2.983 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{pyp} := \min(\sigma_{top.pyk}, \sigma_{bot.pyk}, \sigma_{top.pyt}, \sigma_{bot.pyt}) = -6.502 \cdot \text{MPa}$$

Pitkäaikaisyhdistelmä, puristusjännitys

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } -0.45 \cdot f_{ck} \leq \sigma_{pyp} = \text{"OK"} \quad -0.45 \cdot f_{ck} = -15.75 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Tavallisen yhdistelmän määrävissä poikkileikkauksissa

$$\sigma_{\text{top.tyt}} := \frac{-P_{m,t}}{A_{gr}} + \frac{-127.54 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{gr}} = 2.535 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.tyk}} := \frac{-P_{m,t}}{A_{gr}} + \frac{150.22 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{gr}} = -6.817 \cdot \text{MPa}$$

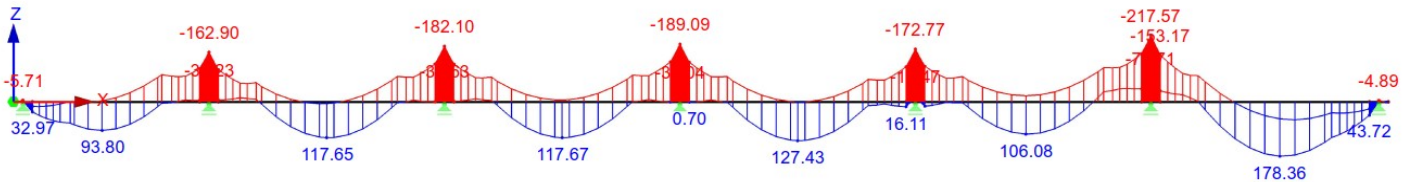
$$\sigma_{\text{bot.tyt}} := \frac{-P_{m,t}}{A_{gr}} + \frac{-127.54 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{gr}} = -6.053 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.tyk}} := \frac{-P_{m,t}}{A_{gr}} + \frac{150.22 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{gr}} = 3.299 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{tyv}} := \max(\sigma_{\text{top.tyk}}, \sigma_{\text{bot.tyk}}, \sigma_{\text{top.tyt}}, \sigma_{\text{bot.tyt}}) = 3.299 \cdot \text{MPa}$$

Tavallinen yhdistelmä, vetojännitys

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } f_{ct,eff} \geq \sigma_{tyv} = \text{"OK"} \quad f_{ct,eff} = 4.544 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Ominaisyhdistelmän jännitykset määrävissä poikkileikkauksissa

$$\sigma_{\text{top.oyt}} := \frac{-P_{m,t}}{A_{gr}} + \frac{-157.82 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{gr}} = 3.555 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.oym}} := \frac{-P_{m,t}}{A_{gr}} + \frac{178.36 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{gr}} = -7.764 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.oyt}} := \frac{-P_{m,t}}{A_{gr}} + \frac{-157.82 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{gr}} = -7.073 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.oym}} := \frac{-P_{m,t}}{A_{gr}} + \frac{178.36 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{gr}} = 4.246 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{oyv}} := \min(\sigma_{\text{top.oym}}, \sigma_{\text{bot.oym}}, \sigma_{\text{top.oyt}}, \sigma_{\text{bot.oyt}}) = -7.764 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{oyv}} := \max(\sigma_{\text{top.oym}}, \sigma_{\text{bot.oym}}, \sigma_{\text{top.oyt}}, \sigma_{\text{bot.oyt}}) = 4.246 \cdot \text{MPa}$$

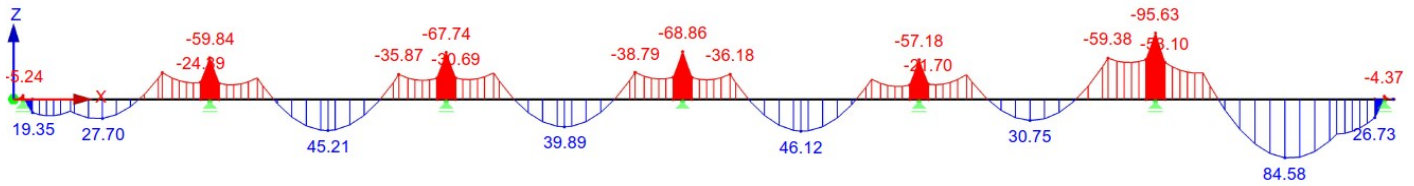
Ominaisyhdistelmä, puristusjännitys

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } -0.6 \cdot f_{ck} \leq \sigma_{oyv} = \text{"OK"} \quad -0.6 \cdot f_{ck} = -21 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Ominaisyhdistelmä, vetojännitys

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } f_{ct,eff} \geq \sigma_{oyv} = \text{"OK"} \quad f_{ct,eff} = 4.544 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Pysyvien kuormien yhdistelmän jännitykset määrävissä poikkileikkauksissa



$$\sigma_{\text{top.pkyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-59.39 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = 0.241 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{top.pkyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{84.58 \text{ kN}\cdot\text{m}}{-W_{\text{gr}}} = -4.607 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.pkyt}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{-59.39 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = -3.759 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{bot.pkyk}} := \frac{-P_{\text{m.t}}}{A_{\text{gr}}} + \frac{84.58 \text{ kN}\cdot\text{m}}{W_{\text{gr}}} = 1.089 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{pkyv}} := \max(\sigma_{\text{top.pkyk}}, \sigma_{\text{bot.pkyk}}, \sigma_{\text{top.pkyt}}, \sigma_{\text{bot.pkyt}}) = 1.089 \cdot \text{MPa}$$

Pysyvien kuormien yhdistelmä, vetojännitys

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } f_{\text{ct.eff}} \geq \sigma_{\text{pkyv}} = \text{"OK"} & f_{\text{ct.eff}} = 4.544 \cdot \text{MPa} \\ \text{"TARKISTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Johtopäätökset:

- Rakenne ei halkeile jännitystilanteessa
- Puristusjännitykset ovat hyväksyttävissä rajoissa kaikissa kuormitustilanteissa
- Rakenne ei halkeile missään kuormitustilanteessa