

## Selvitys rautateille rakennettavien kaukalo- palkkisiltojen päätypalkkien halkeamien syistä

SUOSITUKSET KESTÄVÄN RAKENTEN SUUNNITTELUUN





# Selvitys rautateille rakennettavien kaukalopalkkisiltojen päätypalkkien halkeamien syistä

Suositukset kestävän rakenteen suunnitteluun

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 64/2015

*Kannen kuva: Juho-Pekka Oijusluoma*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-173-2

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

**Selvitys rautateille rakennettävien kaukalopalkkisiltojen päätypalkkien halkeamien syistä – Suositukset kestäväen rakenteen suunnitteluun.** Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 64/2015. 23 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-173-2.

**Avainsanat:** jännitetty, kaukalopalkkisilta, päätypalkki, halkeilu

## Tiivistelmä

Tässä selvityksessä tutkittiin jännitetyn kaukalopalkkisillan halkeamien muodostumista niiden päätypalkkeihin. Tutkimuksessa analysoitiin esimerkkirakennetta kahdella kaupallisella FE-ohjelmalla. Rakenteelle tehtiin herkkyystarkastelu, jossa varioitiin rakenteen geometriaa.

Saaduista tuloksista huomattiin, että halkeamien syntymistä voidaan päätypalkissa vähentää jännittämällä tai lisäämällä raudoittemäärää. Päätypalkin ulkopintaan kannattaa asentaa varmistukseksi vedeneristys.

**Utredning om orsaker till sprickor i tvärbalkarna på trågbalkbroar på järnvägar – Rekommendationer för planering av en hållbar konstruktion.** Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 64/2015. 23 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-173-2.

**Nyckelord:** förspänd, betongbalktråg, tvärbalk, sprickbildning

## Sammanfattning

I denna utredning undersöktes sprickbildningen i tvärbalkarna i förspända trågbalkbroar på järnvägar. I undersökningen analyserades en exempelkonstruktion med två kommersiella FE-program. För konstruktionen gjordes en känslighetsanalys, där konstruktionens geometri varierade.

Av resultaten framkom att man kan minska uppkomsten av sprickor i tvärbalken genom förspänning eller ökad mängd armering. Det lönar sig att för säkerhets skull installera vattenisolerings i tvärbalkens yttre yta.

**Study on the reasons why crackings occur in the end beams of through girder railway bridges - Recommendations for planning a durable construction.** Finnish Transport Agency, Technology and Environment. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 64/2015. 23 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-173-2.

**Keywords:** prestressed railway bridge, end beam, cracking

## Summary

In this report the cracking of a post-tensioned bridge end beam was analyzed. The analysis was carried out with two commercial FE-programs and the sensitivity of the results was checked by varying the geometry parameters.

The result was that the cracking of the end beam can be decreased either by post-tensioning or by increasing the amount of reinforcement. It is recommended that the outer surface be protected by waterproofing.

## Esipuhe

Jännitetty ulokkeellinen kaukalopalkkisilta on yleinen siltatyyppe ratahankkeissa. Siltojen päätypalkeissa on havaittu halkeamia sillan jännittämisen jälkeen. Liikennevirasto päätti teettää erillistarkastelun halkeilun syiden selvittämiseksi.

Tarkastelussa rakennetta analysoitiin FEM-ohjelmilla ja tutkittiin päätyyn syntyviä jännitystiloja. Tulosten perusteella esitetään vaihtoehtoisia tapoja halkeilun ja siitä aiheutuvien haittojen vähentämiseksi.

Tarkastelun suorittivat Sweco Rakennetekniikka Oy:ssä Pertti Kaista, Risto Parkkila, Sami Katisko, Mikko Hilli ja Leo-Ville Miettinen. Työtä ohjasi Liikennevirastossa Sami Noponen.

Helsingissä lokakuussa 2015

Liikennevirasto  
Tekniikka ja ympäristö -osasto



# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	8
2	YLEISTIEDOT LASKETTAVASTA SILLASTA JA KUORMITUKSET .....	9
3	SILTARAKENTEEN ANALYSOINTI SOFISTIK-OHJELMALLA .....	11
3.1	Analyysiin liittyvät rajoitukset ja epävarmuustekijät .....	12
3.2	Herkkyystarkastelu .....	12
3.3	Analyysien tulokset .....	12
4	VERTAILULASKENTA GTSTRUDL FE-OHJELMISTOLLA .....	20
4.1	Laskennan tulokset .....	20
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET .....	23

# 1 Johdanto

Kaukalopalkkisiltojen päätypalkeissa on lähivuosina havaittu sillan jännittämisen jälkeä muodostuvia halkeamia. Päätypalkin keskialueelle on tällöin syntynyt joko yksi tai muutama rinnakkainen palkin läpi ulottuva halkeama (Kuva 1.).



*Kuva 1. Kuvassa on päätypalkin halkeama sillan aukon puolella. Halkeama on syntynyt jännittämisen jälkeen ennen sillan käyttöönottoa.*

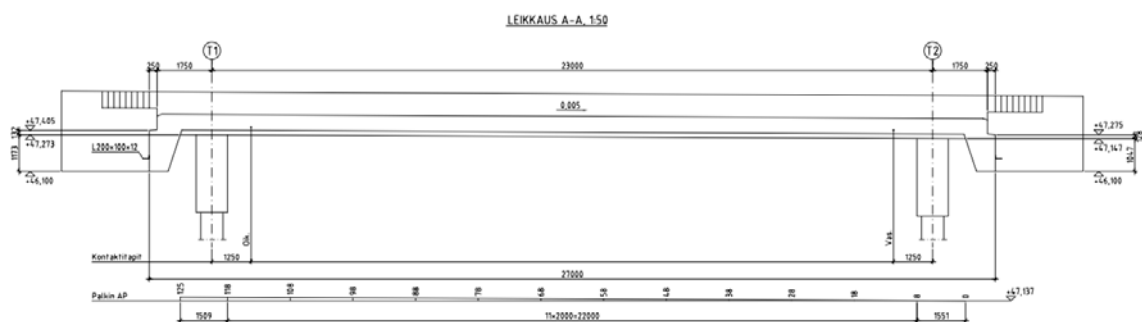
Tässä tutkimuksessa laskettiin erilaisten päätypalkkien jännitystiloja kahdella FE-ohjelmalla, kun kuormituksena on joko jännevoima tai muu pitkäaikainen kuormitus. Erilaisille rakenteille laskettuja jännityksiä ja poikkileikkauksen halkeamista verrattiin keskenään. Selvityksen lopussa annetaan suositukset kaukalopalkkisillan päätypalkin suunnitteluun.

## 2 Yleistiedot laskettavasta sillasta ja kuormitukset

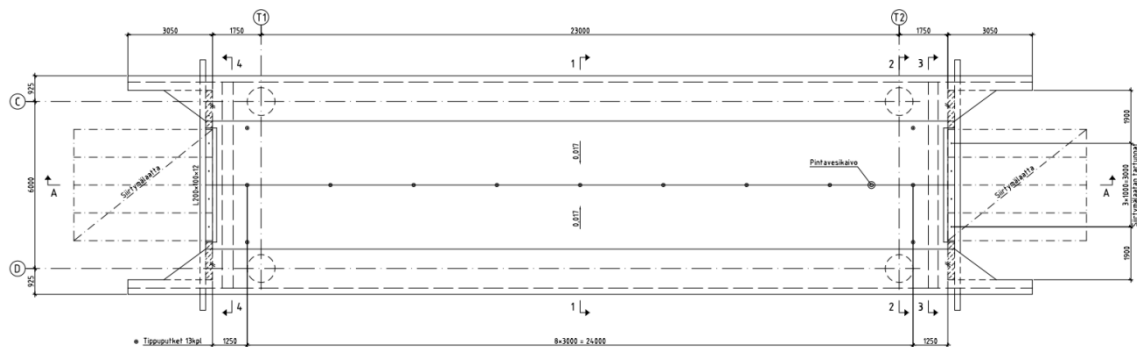
Esimerkkilaskennassa lasketaan jännitetty betoninen ulokepalkkisilta, jolle tehdään herkkyystarkastelu varioimalla sen rakenteita kohdan 3.2 mukaan. Sillan yleistiedot on esitetty taulukossa 1 ja sillan geometria kuvissa 2–5.

Taulukko 1. Sillan yleistiedot

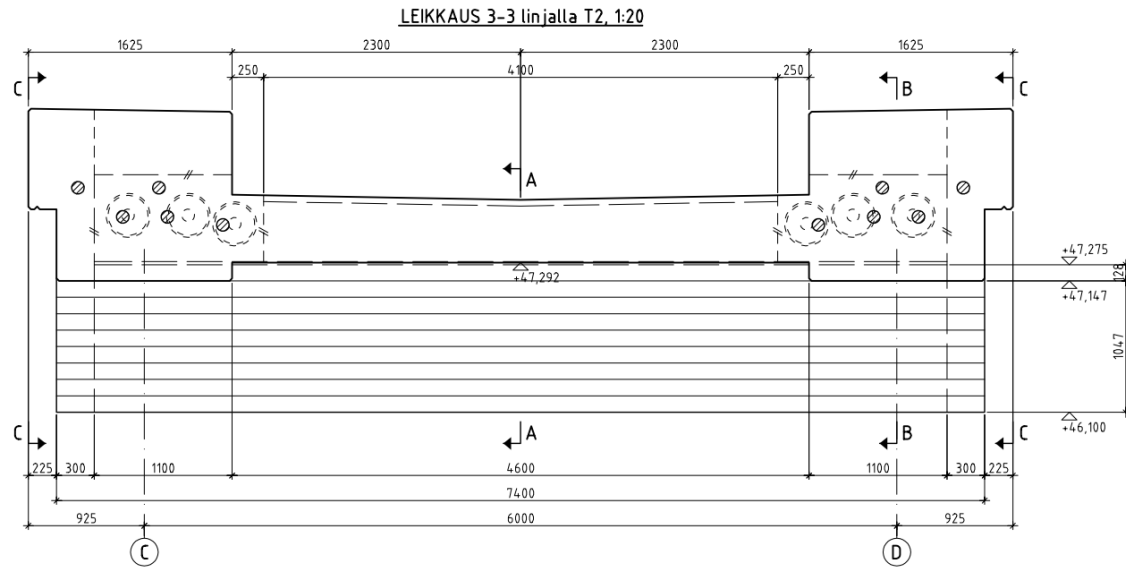
Tyyppi	Jännitetty betoninen ulokekaukalopalkkisilta
Jännemitat JM	1,75+23+1,75
Hyödyllinen leveys HL	7,35
Rakennekorkeus	1,370
Hoikkuus	16,8



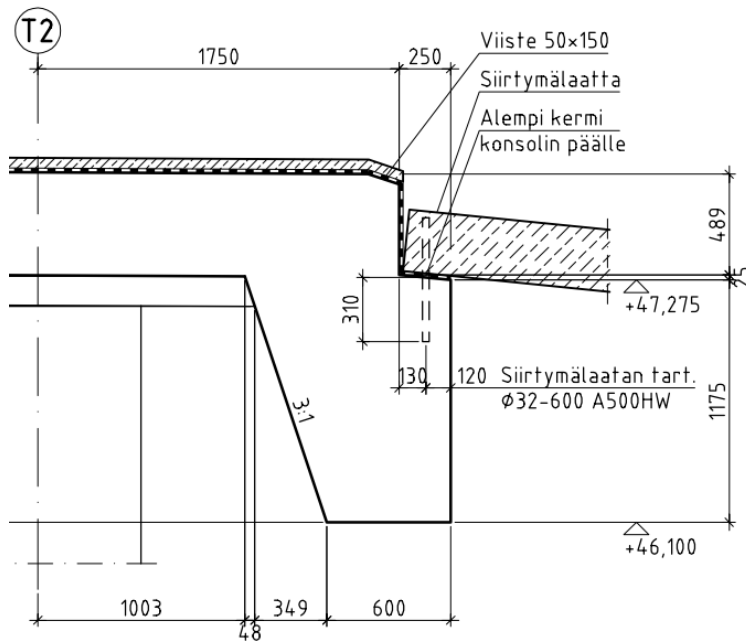
Kuva 2. Sillan pituusleikkaus



Kuva 3. Sillan tasokuva



Kuva 4. Sillan poikkileikkaus



Kuva 5. Sillan päätypalkin poikkileikkaus. Herkkyystarkasteluissa päätypalkkirakennetta varioidaan kohdan 3.2 vaihtoehtojen mukaisesti

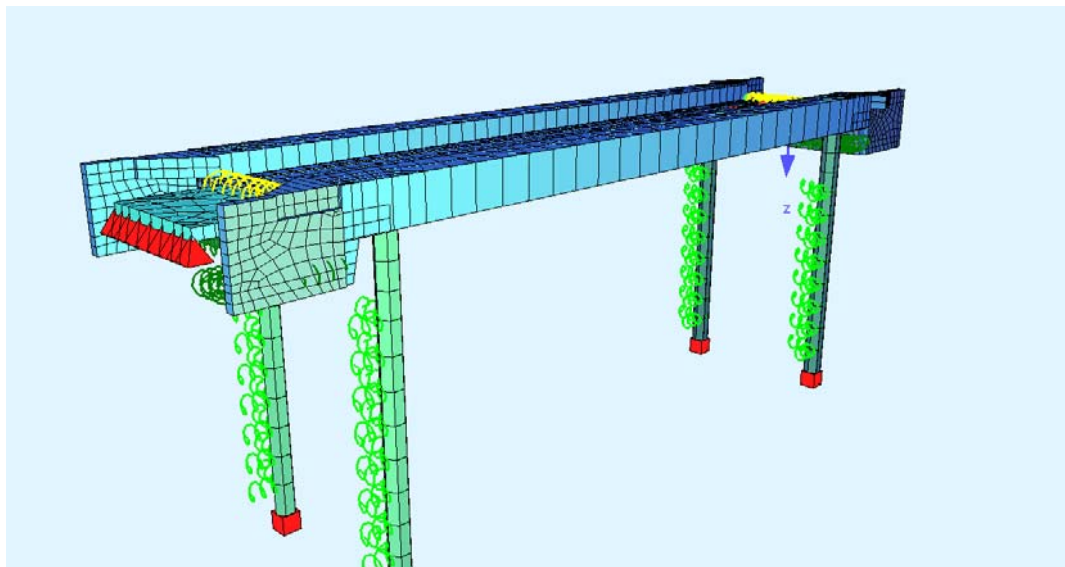
Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ainoastaan jännittämistyön aikaista tilannetta sekä pitkäaikaistilannetta jännittämisen jälkeen, koska halkeamat liittyvät muodostumisajankohtansa perusteella sillan jännittämiseen. Pitkäaikaistilanteessa on otettu huomioon myös maanpaine lepopaineen suuruisena kuormana. Muuttuvia kuormia ei otettu huomioon.

Rakenteeseen vaikuttavat pysyvät kuormat ovat:

- rakenteen omapaino
- pääpalkkien jännitysvoima 18 MN
- kutistuma ja viruma 28 päivän kohdalla ja pitkäaikaistilanteessa
- lepopaine pitkäaikaistilanteessa

### 3 Siltarakenteen analysointi Sofistik-ohjelmalla

Silta mallinnettiin kolmiulotteisena rakenteena, joka koostui palkkielementeistä ja kuorielementeistä. Kuorielementeillä tarkoitetaan tässä Sofistik-ohjelman yhteydessä kaksiulotteisia elementtejä, jotka ottavat huomioon sisäiset kalvovoimat taivutusmomenttien lisäksi. Sillasta tehty rakennemalli on esitetty kuvassa 6. Sillan paalut mallinnettiin palkkielementeillä ja päätypalkit, kansilaatta, siipimuurit, siirtymälaatat ja kaukalopalkit kuorielementeillä. Kuorielementtien koko määrättiin samaksi kuin kansilaatan paksuus 500 mm, paitsi kaukalopalkkien ja siirtymälaattojen elementtien, jotka ovat tätä hieman suurempia.



Kuva 6. Rakennemalli.

Sillan pääty- ja kaukalopalkkien ja siipimuurien oletetaan kiinnittyvän jäykästi sillan kansilaattaan. Siirtymälaatta on mallinnettu siten, että se kiinnittyy nivelellisesti siltaan ja sen vapaa reuna on tuettu nivelellisesti, jotta mallin laskenta pysyy stabiilina. Lisäksi maan tukeva vaikutus on huomioitu jousien avulla. Paalut kiinnittyvät nivelellisesti sillan kansirakenteisiin ja ne on kiinnitetty momenttjäykästi kallioon mallin vakauttamiseksi. Paaluihin ja siipimuuureihin kohdistuva maan sivuvastus on mallinnettu jousilla.

Sillan rakennetta tutkittiin sekä jännittämättömällä että jännitetyllä päätypalkilla. Jänneet oletettiin tartunnattomiksi ja suoriksi. Kun jännegeometria on oletettu suoraksi, betoniin ei kohdistu jänneen kaarevuudesta aiheutuvia ohjausvoimia. Jänneet mallinnettiin jänneen päissä betoniin kohdistuvina pistekuormina. Rakenne oletetaan jännitettäväksi 28 päivän iässä, jolloin betonin lujuus on saavuttanut lujuusluokan C40/50.

### 3.1 Analyysiin liittyvät rajoitukset ja epävarmuustekijät

Tehty analyysi ei huomioi muita epälineaarisuuksia kuin viruman. Merkittävä tuloksiin vaikuttava epälineaarisuus, jota ei huomioitu mallissa, on poikkileikkauksen halkeilu. Halkeilun vaikutus voimasuureisiin on tarkasteltu erikseen.

Malli ei myöskään huomioi poikkileikkauksen epäsäännöllisestä raudoituksesta sekä kutistumasta aiheutuvia paikallisia vetojännityksiä. Lisäjännityksiä saattaa aiheutua sivupinnan teräsiin, jos rakenteen ylä- ja alapinnat ovat raskaasti raudoitettuja.

### 3.2 Herkkyystarkastelu

Rakenteelle tehtiin herkkyysanalyysi varioimalla sillan rakenteita ja poikkipalkin jännittämistä. Variointi tehtiin muuttamalla yhtä muuttujaa kerrallaan. Eri variaatiot, joita analysoitiin, olivat:

1. Alkuperäinen jännittämätön ulokesiltarakenne, jonka korkeus  $h$  on 1,69 m ja leveys  $b$  on 1 m (kuva 6)
2. Siltarakenne, jossa paalut on siirretty pääpalkkien alta päätypalkin alle. Analyysissä tarkasteltiin vain päätypalkkia, jännemitan kasvua ei huomioitu kanneen mitoituksessa.
3. Pääpalkit ovat 200 mm alempana suhteessa kanteen ja päätypalkkiin.
4. Päätypalkkia on levennetty noin 50 %, jolloin sen leveydeksi saadaan 1,55 m. Teräsjako on pidetty samansuuruisena kuin alkuperäisellä rakenteella.
5. Päätypalkkia on korotettu noin 50 % 2,46 m:iin. Teräsjako on pidetty samansuuruisena kuin alkuperäisellä rakenteella.
6. Jännitetty siltarakenne, jossa päätypalkki on jännitetty poikkileikkauksen painopisteessä 1 MN voimalla.
7. Jänne on nostettu painopisteen yläpuolelle siten, että pelkästä jännevoimasta syntyvä jännitys häviää palkin alapinnassa. Jännevoima on 1 MN.
8. Edellistä kohtaa 7 vastaava pitkäaikaistilanne
9. Jänne on nostettu painopisteen yläpuolelle siten, että jännevoimasta syntyvä jännitys häviää palkin alapinnassa. Jännevoima on 3 MN
10. Poikkileikkaukseen on sijoitettu useampi jänne epäkeskeisesti painopisteen suhteen. Jännevoimien resultantti on 7 MN.
11. Edellistä kohtaa 10 vastaava pitkäaikaistilanne

### 3.3 Analyysien tulokset

Halkeamattomalle päätypalkin poikkileikkaukselle lasketut voimasuureet ja sisäiset jännitykset on esitetty taulukossa 2. Taulukossa on laskettu suureet kohdassa 3.2 kuvatuille tilanteille 1–11. Taulukosta nähdään, että poikkileikkauksien vetojännitykset ovat betonin vetolujuutta suurempia, mikä tarkoittaa sitä, että betoniin syntyy halkeamia. Suurimmat vetojännitykset ovat kansilaatassa, päätypalkin yläosassa ja siirtymälaattakonsolin alueella. Saaduista tuloksista voidaan päätellä, että jännitysvoiman on oltava vähintään 7 MN, jotta päätypalkin vetojännitys alittaa betonin vetolujuuden.

Halkeilleille päätypalkeille lasketut halkeamaleveydet ja terästen suurimmat ja pienimmät jännitykset on esitetty taulukossa 3. Halkeillut alkuperäinen rakenne on esitetty kuvassa 7. Kuvasta 7 nähdään, että lähes puolet palkin korkeudesta on molemmilta sivuilta vedetty. Tämän takia on todennäköistä, että rakenteeseen muodostuu koko poikkileikkauksen läpi meneviä halkeamia. Kuvassa 8 on esitetty poikkileikkaus tilanteessa, jossa paalut on siirretty päätypalkin alle. Kuvasta nähdään, että paalujen siirtämisellä ei ole merkittävästi vaikutusta vetojännitykseen verrattuna alkuperäiseen tilanteeseen (kuva 7). Kuvista 9 ja 11 nähdään, että myöskään kansilaatan nostamisella ja päätypalkin korkeuden kasvattamisella ei ole merkittävää vaikutusta vetojännitysalueeseen. Sen sijaan päätypalkin leventämisellä (kuva 10) saadaan sillan puoleinen pinta puristetuksi, jolloin rakenteen läpi ulottuvien halkeamien syntyminen ei ole todennäköistä.

Taulukko 2. Halkeamattoman päätypalkin jännitysvertailu

Eriolaisten rakenneratkaisuiden vertailua	N[MN]	Pysty	poikki	Betonijännitykset		Halkeaako?
		Mx[MNm]	My[MNm]	Maksimi	Minimi	
Ehjä poikkileikkaus	[MN]	[MNm]	[MNm]	[Mpa]	[Mpa]	
Alkuperäinen (h=1.69 b=1m)	1.778	0.884	0.562	4.9	-1.9	Kyllä
Paalut pp alla	1.574	0.706	0.490	4.2	-1.5	Kyllä
Palkit 200mm alempana	2.008	0.924	0.554	5.0	-1.9	Kyllä
+50% levennetty pp (B=1.55m leveä)	2.004	0.949	1.571	4.5	-2.2	Kyllä
+50% korkeampi pp (H=2.46m korkea)	1.986	1.763	0.792	4.8	-2.2	Kyllä
Jännitetty pp 1MN (häviöiden jälkeen)	0.928	0.998	0.560	4.5	-2.8	Kyllä
1MN jänne pp yläpuolella	1.227	0.764	0.551	4.4	-2	Kyllä
Vastaava pitkäaikaistilanne	1.379	0.429	0.500	3.9	-1.4	Kyllä
3MN jänne pp yläpuolella	0.123	0.444	0.528	3.1	-2.4	Osa halkeaa
7MN jänne epäkeskeisesti	-2.689	0.145	0.454	0.5	-4.3	Ei
7MN jänne epäkeskeisesti pitkäaikainen	-2.551	-0.201	0.399	0.7	-4.5	Ei

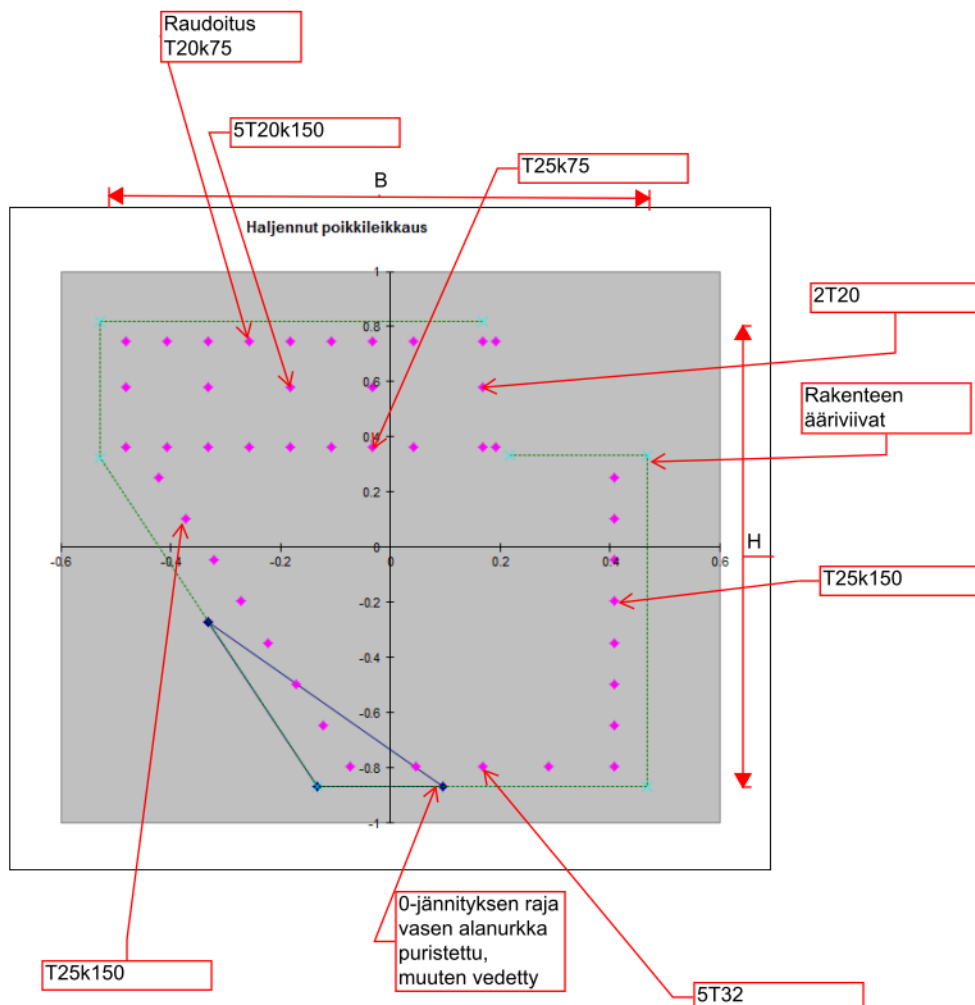
Betonin keskimääräinen vetolujuus (C40/50)  $f_{ctm}=3.5\text{MPa}$

Betonin 5% fraktiili vetolujuus (C40/50)  $f_{ctk,0,05}=2.5\text{MPa}$

Taulukko 3. Haljenneen poikkileikkauksen teräsännitykset ja halkeamakoot

Eriolaisten rakeneratkaisuiden vertailua	Pysty		Poikki		Teräsännitys		Halkeamat		Aukon pinta	Sallittu halkeamakoko
	N	Mx	My	Maksimi	Minimi	Läpihalkeama	Maanpuoli			
Halkeillut poikkileikkaus	[N]	[MNm]	[MNm]	[Mpa]	[Mpa]		[mm]	[mm]	[mm]	
Alkuperäinen (h=1.69 b=1m)	1.778	0.884	0.286	249	-23	Kyllä	0.23	0.04	0.28	
Paalut pp alla	1.574	0.706	0.286	218	-17	Kyllä	0.2	0.02	0.28	
Palkit 200mm alempana	2.008	0.924	0.286	268	-21	Kyllä	0.25	0.05	0.28	
+50% levennetty pp (B=1.55m leveä)	2.004	0.949	0.876	189	-7	Ei	0.17	-	0.28	
+50% korkeampi pp (H=2.46m korkea)	1.986	1.763	0.457	231	-32	Kyllä	0.2	0.03	0.28	
Jännitetty pp 1MN (häviöiden jälkeen)	0.928	0.998	0.372	206	-38	Kyllä	0.19	0.02	0.10	
1MN jänne pp yläpuolella	1.227	0.764	0.372	206	-23	Ei	0.19	0.01	0.10	
Vastaava pitkäaikaistilanne	1.379	0.429	0.312	178	2	Ei	0.16	0.01	0	
3MN jänne pp yläpuolella	0.123	0.444	0.404	86	-18	Ei	0.04	-	0.10	
7MN jänne* epäkeskeisesti	-2.689	0.145	0.454	1	-25	Ei	-	-	0.10	
7MN jänne* epäkeskeisesti pitkäaikainen	-2.551	-0.201	0.399	2	-26	Ei	-	-	0	

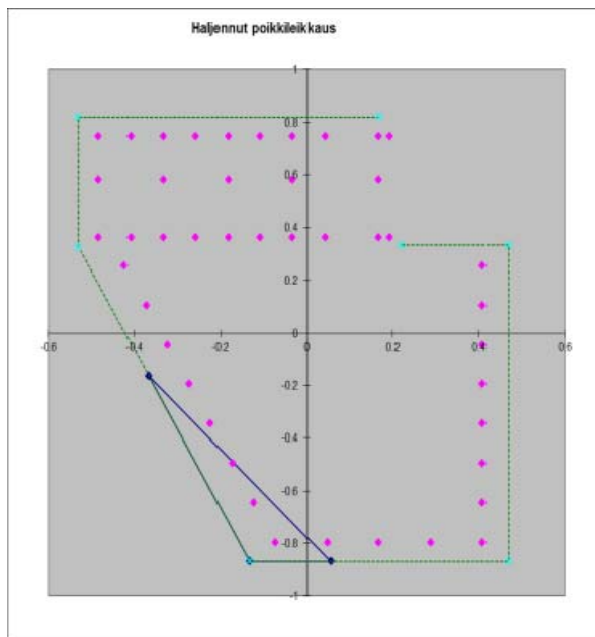
\*5 kpl Macalloy d50 St835/1040



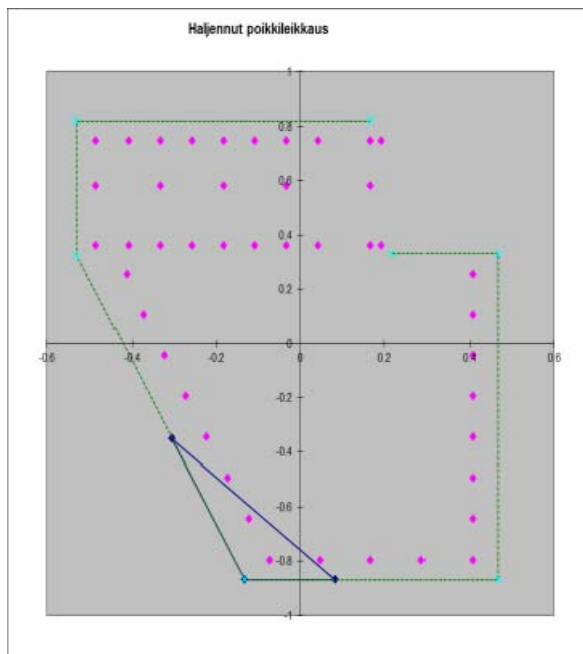
Kuva 7. Alkuperäisen rakenteen haljennut poikkileikkaus



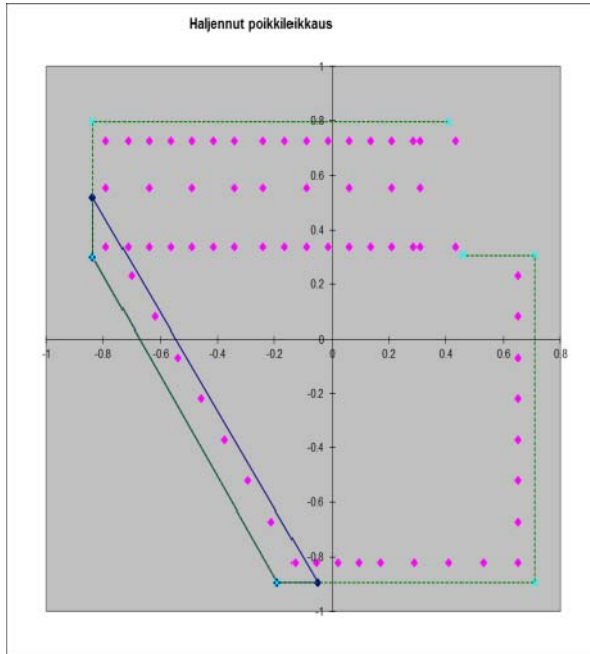
Kuvista 12–17 nähdään, että jännittäminen kasvattaa puristetun pinnan osuutta. Tilanteessa, jossa 1 MN suuruinen jännevoima vaikuttaa poikkileikkauksen painopisteessä (kuva 12), päätypalkkiin syntyy vielä läpihalkeamia. Jänneen nostaminen painopisteen yläpuolelle (kuva 13) nostaa puristuspinnan reunan laatan alapinnan tasolle, jolloin läpihalkeamia ei todennäköisesti synny. Poikkileikkauksissa, joissa vaikuttaa suuruudeltaan 1 MN, tai 3 MN jännevoima (kuvat 12–15), jänteet sijaitsevat vedetyllä alueella. Kun jännevoimaa kasvatetaan 7 MN:iin, saadaan lähes koko poikkileikkaus puristetuksi myös pitkäaikaisessa tilanteessa (kuvat 16 ja 17). Kuvista nähdään myös, että jänteet sijaitsevat puristetulla alueella ohjeen *Betonirakenteiden suunnitelu NCCI2* mukaisesti.



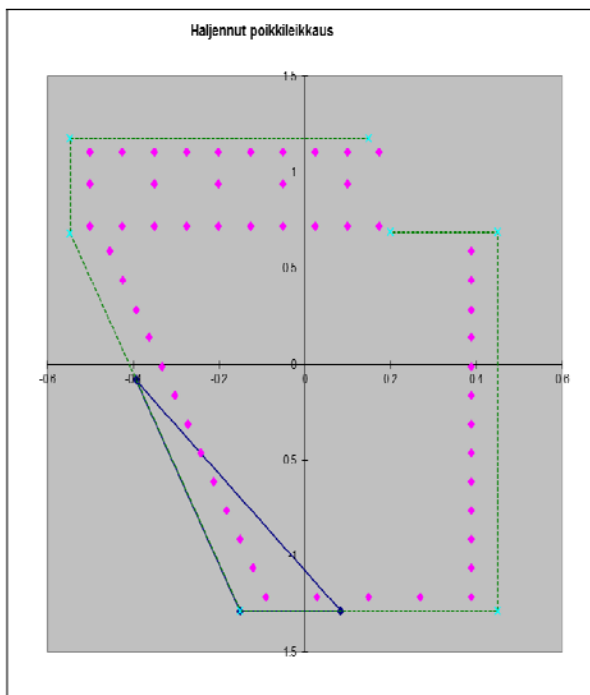
Kuva 8. Paalut on siirretty päätypalkin alle pääpalkkien alta.



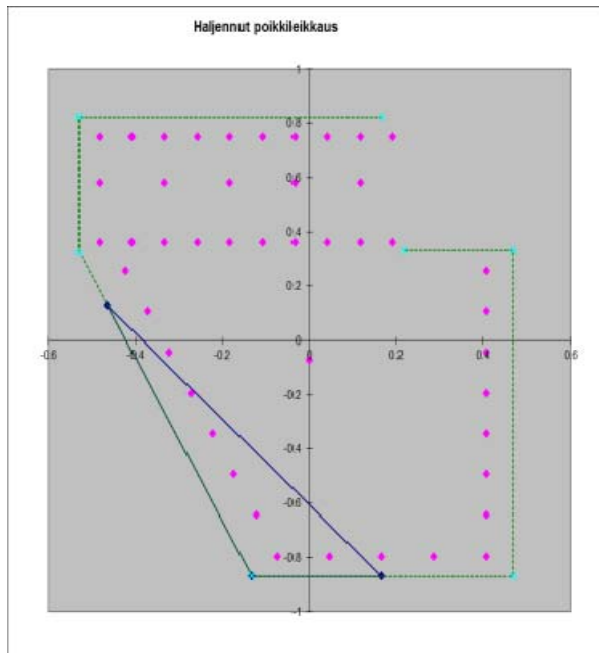
Kuva 9. Pääpalkit ovat 200 mm alempana suhteessa kanteen ja päätypalkkiin.



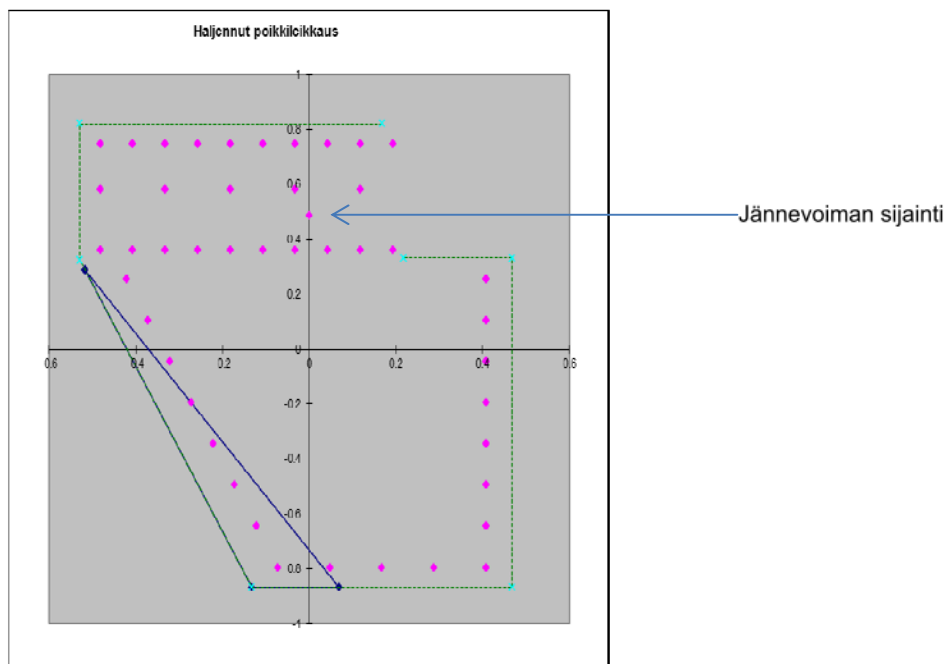
Kuva 10. Noin 50 % levennetty päätypalkki.



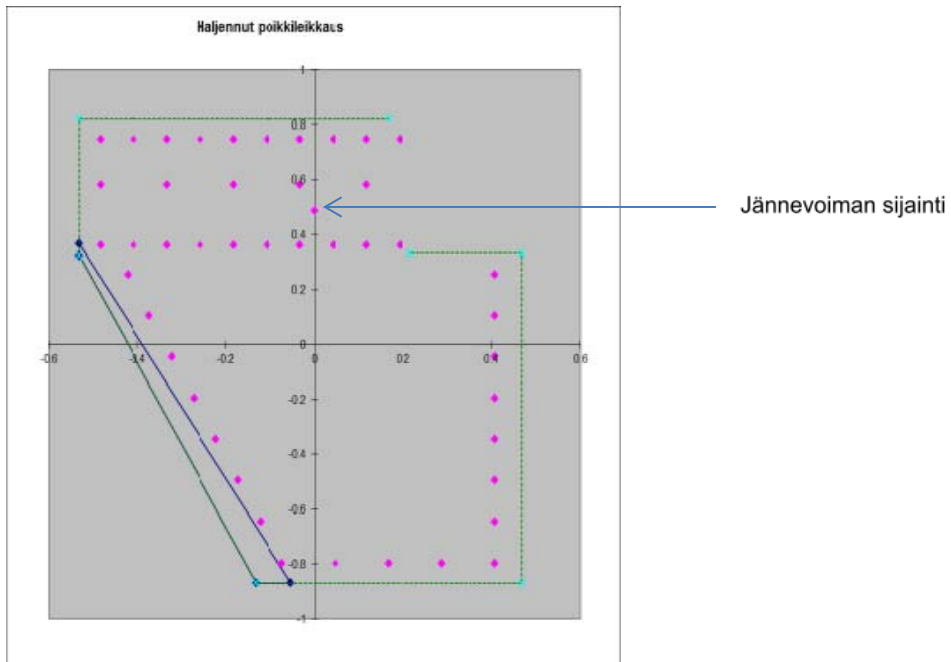
Kuva 11. Noin 50 % korotettu päätypalkki.



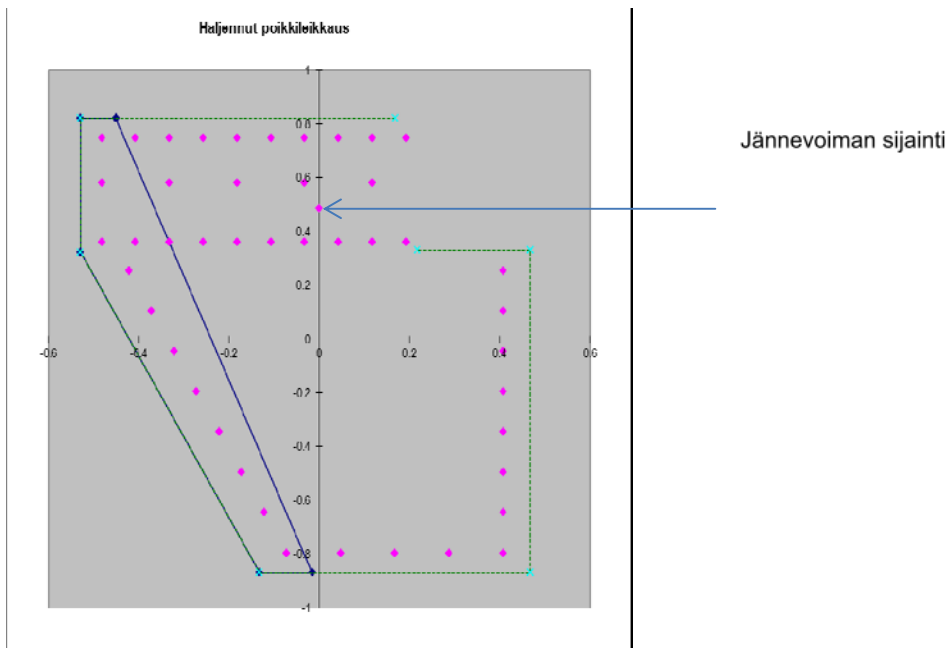
Kuva 12. Alkuperäisen rakenteen päätypalkki on jännitetty 1 MN suuruisella voimalla päätypalkin painopisteestä.



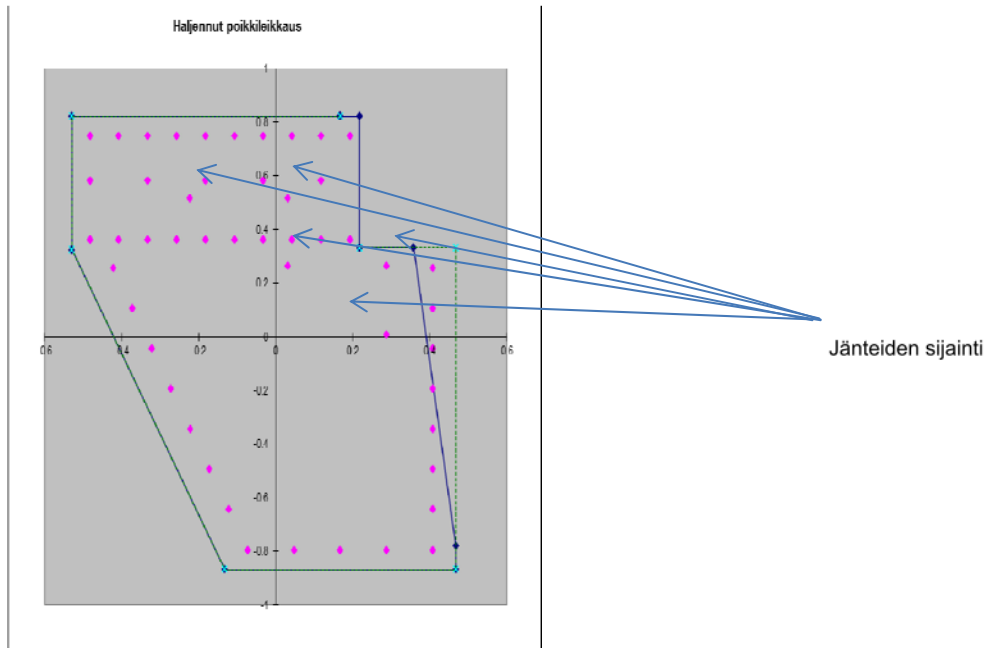
Kuva 13. Jänne nostettu painopisteen yläpuolelle, sellaiselle korkeudelle, että jännitys häviää alapinnassa.



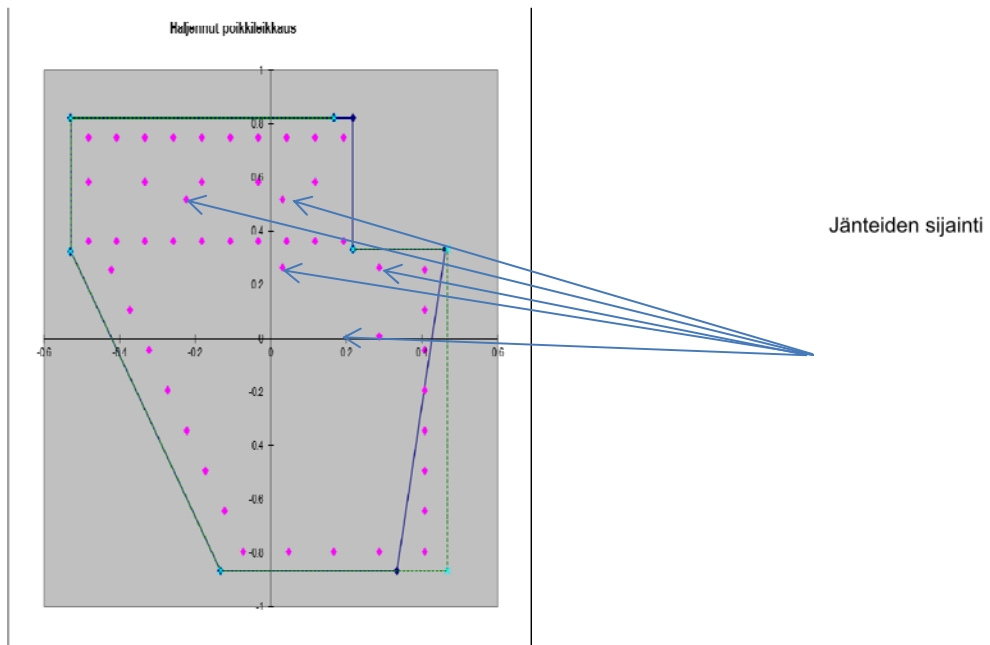
Kuva 14. Pitkäaikaistilanne 1 MN suuruisella jännevoimalla.



Kuva 15. Poikkileikkauksessa 3 MN suuruinen jännevoima on sijoitettu painopisteen yläpuolelle siten, että alapinnassa jännitys häviää.



Kuva 16. Poikkileikkauksessa vaikuttaa yhteenlasketulta suuruudelta 7 MN jännevoima, joka vaikuttaa epäkeskisesti poikkileikkauksen painopisteen suhteen.

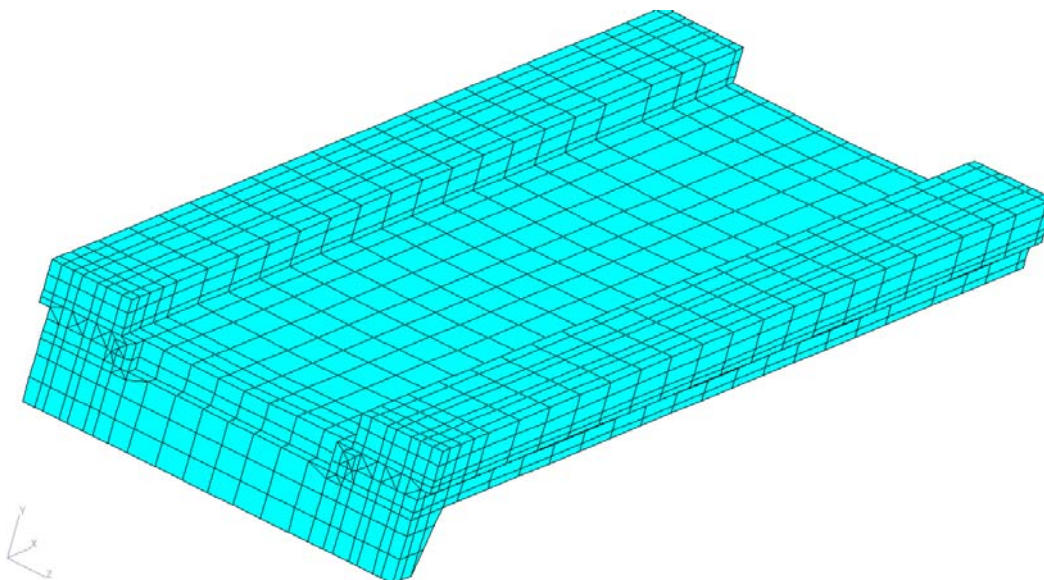


Kuva 17. Pitkäaikainen tilanne 7 MN jännevoimalla puristetulle poikkileikkaukselle.

## 4 Vertailulaskenta GTStrudl FE-ohjelmistolla

Laskennan oikeellisuuden varmistamiseksi päätypalkin jännitykset laskettiin myös GTStrudl FE-ohjelmalla tehdyllä mallilla.

GTStrudl-ohjelmalla tehdyssä lineaarisessa analyysissä rakennemallissa käytettiin kolmiulotteisia niin sanottuja solid-elementejä. Geometrian yksinkertaistamisen vuoksi, silta mallinnettiin ilman siipimuuria sekä toisen pään päätypalkkia. Elementtien sivujen pituuden vaihtelivat välillä 0,1–1,5m. Päätypalkissa käytettiin tiheämpää jakoa kuin kentässä. Jännevoima mallinnettiin ankkureiden kokoiselle alueelle kohdistuvana tasaisena pintakuormana. Jänneistä aiheutuvaa ohjausvoimaa ei otettu huomioon, mikä vastaa tilannetta, jossa jänteet ovat suoria. Kyseistä siltatyyppiä käytetään yleensä siirrettävänä siltana, joten se tuettiin siten että silta pääsee liikkumaan vapaasti sekä pituus että sivusuunnassa.

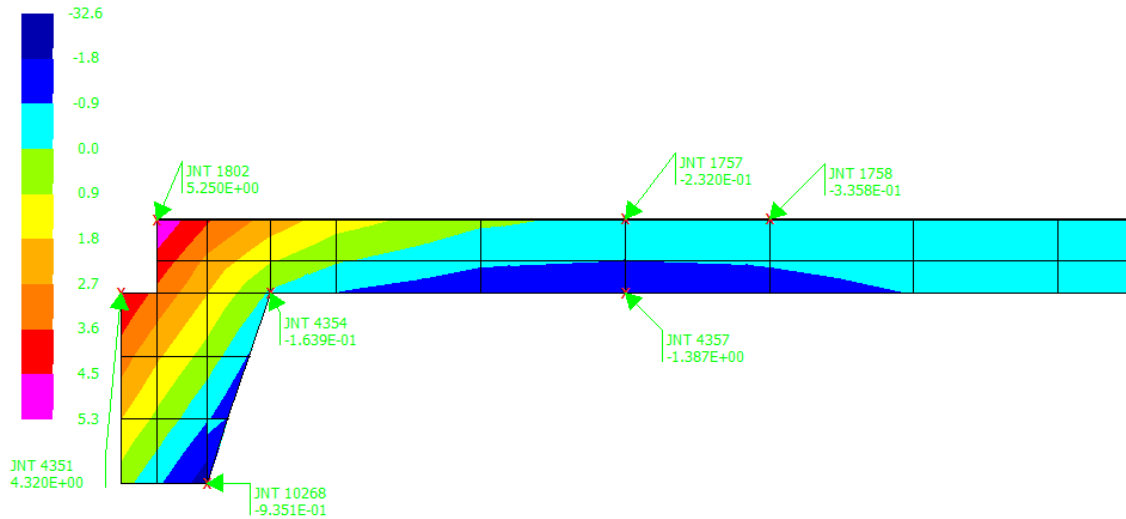


Kuva 18. Rakennemalli GTStrudl-ohjelmalla lasketusta sillasta

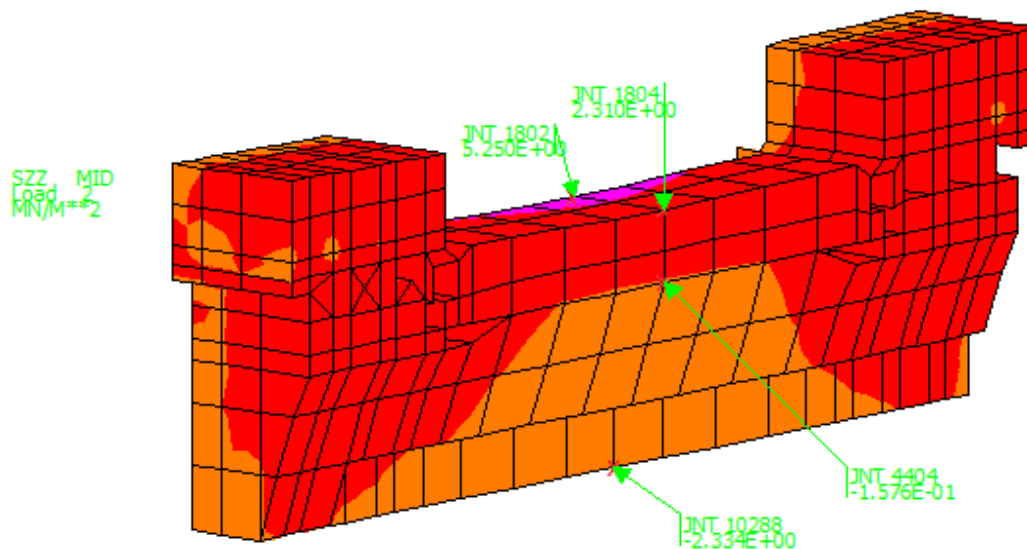
### 4.1 Laskennan tulokset

Kuvassa 19 on pituusleikkaus sillan keskeltä, jossa on esitetty sillan jännittämisestä aiheutuvat poikkisuuntaiset jännitykset. Suurin vetojännitys  $5,25 \text{ MN/m}^2$  sijaitsee siirtymälaatan yläpuolella ja suurin puristusjännitys  $0,346 \text{ MN/m}^2$  esiintyy laatasta noin 5 m etäisyydellä päätypalkista. Päätypalkissa vaikuttava normaalivoiman resultantti on  $1,84 \text{ MN}$ . Normaalivoima kasvaa arvoon  $2,115 \text{ MN}$  kun resultantin laskennassa huomioidaan myös yksi elementti laatasta. Lisää elementtejä huomioitaessa alkaa vetovoiman resultantti pienenemään. Laskennassa ei huomioitu halkeilun epälineaarisia vaikutuksia, jos ne olisi otettu huomioon, olisi vedetty alue siirtynyt kansilaatan suuntaan.

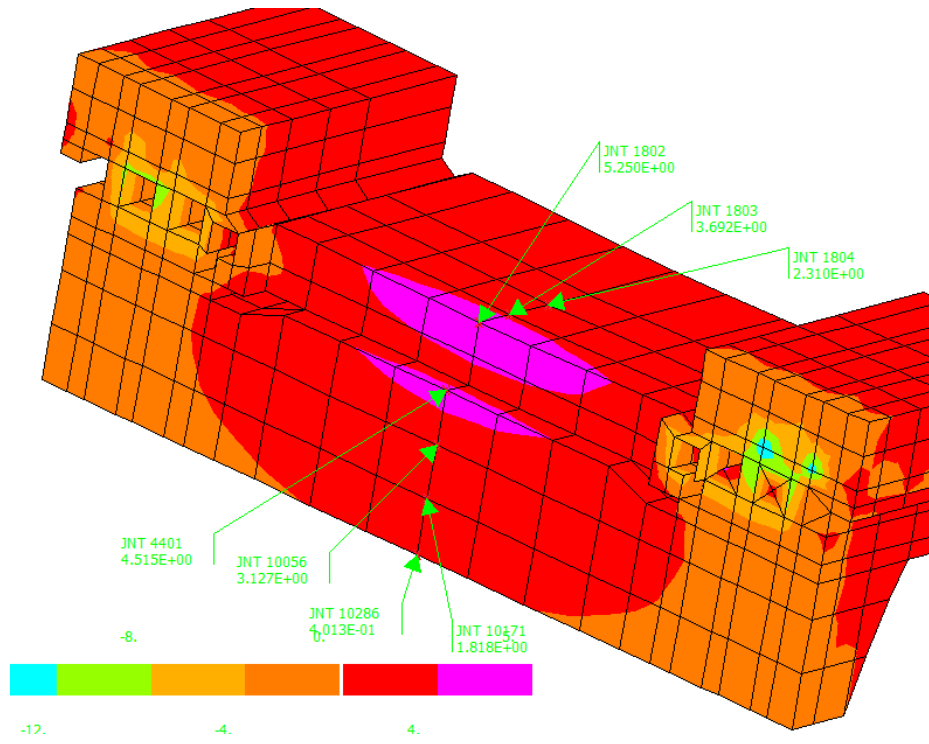
GT Strudl -ohjelmalla lasketut päätypalkissa vaikuttavat voimasuureet (kuvat 19–21) vastaavat hyvin kappaleessa 3 esitettyjä Sofistikin kuorielementtimallilla laskettuja voimasuureita/jännitysjaakumia, joten voidaan todeta voimasuureiden olevan oikeaa suuruusluokkaa.



Kuva 19. Poikkisuuntaiset jännitykset sillan keskilinjalla



Kuva 20. Poikkisuuntaiset jännitykset sillan puolella



Kuva 21. Poikkisuuntaiset jännitykset sillan päädysssä



## 5 Johtopäätökset ja suositukset

Laskelmatarkastelujen perusteella tutkittavan sillan päätypalkkiin syntyy vetovoima, jonka suuruus on n. 10% yhden pääpalkin jännevoimasta. Vetovoiman suuruus vastaa hyvin perinteisillä käsinlaskumenetelmillä laskettua sillan päädyn poikittaisen veto-voiman arvoa. Vetovoimasta päätypalkkiin syntyy läpihalkeama tai -halkeamia, joiden leveys kuitenkin jää alle sallitun, mikäli päätypalkin vaakasuuntainen raudoitus on riittävä. Läpihalkeamat aiheuttavat sen, että sillan taustalta pääsee vuotamaan vesiä halkeaman läpi, mikä alentaa merkittävästi rakenteen käyttöikää kyseisellä alueella.

Tutkimuksen perusteella toimivia toimenpiteitä halkeilun vähentämiseksi ovat:

- Raudoituksen lisääminen erityisesti kansilaatan pään ja päätypalkin yläosaan sekä siirtymälaattakonsolin reuna-alueille hillitsee halkeamien muodostumista ja rajoittaa halkeamakokoa. Käytännön ongelmana raudoituksen lisäämiselle on, että alueella ovat myös jänneankkurit ja niihin liittyvä lisäraudoitus.
- Pelkkä raudoituksen lisääminen ei riitä vaan myös vesivuodot päätypalkin läpi on estettävä esimerkiksi jatkamalla kansilaatan vedeneristystä päätypalkin alapintaan saakka.
- Kun kasvatetaan päätypalkin paksuutta riittävästi erityisesti poikkipalkin yläosassa, saadaan vetojännityksiä pienennettyä ja lisää tilaa raudoitukselle. Tällöin myös saadaan laskennallisesti poistettua halkeilu aukon puolelta päätypalkkia, jolloin veden ei pitäisi päästä vuotamaan palkin läpi.
- Päätypalkki jännitetään poikkisuunnassa ennen sillan jännittämistä, jolla voidaan estää halkeamien syntyminen osittain tai kokonaan.

**Suosittelava menetelmä halkeilun rajoittamiseksi:**

- **Päätypalkki mitoitetaan siten, että se täyttää pitkäaikaiskuormien halkeamaleveysvaatimukset, kun koko päädyn halkaisuvoima otetaan päätypalkille. Vetovoiman resultantti sijaitsee suunnilleen kansilaatan alapinnan tasolla.**
- **Päätypalkin paksuus valitaan riittävän suureksi.**
- **Kannen vedeneristys ulotetaan koko päätypalkin takaosalle**





