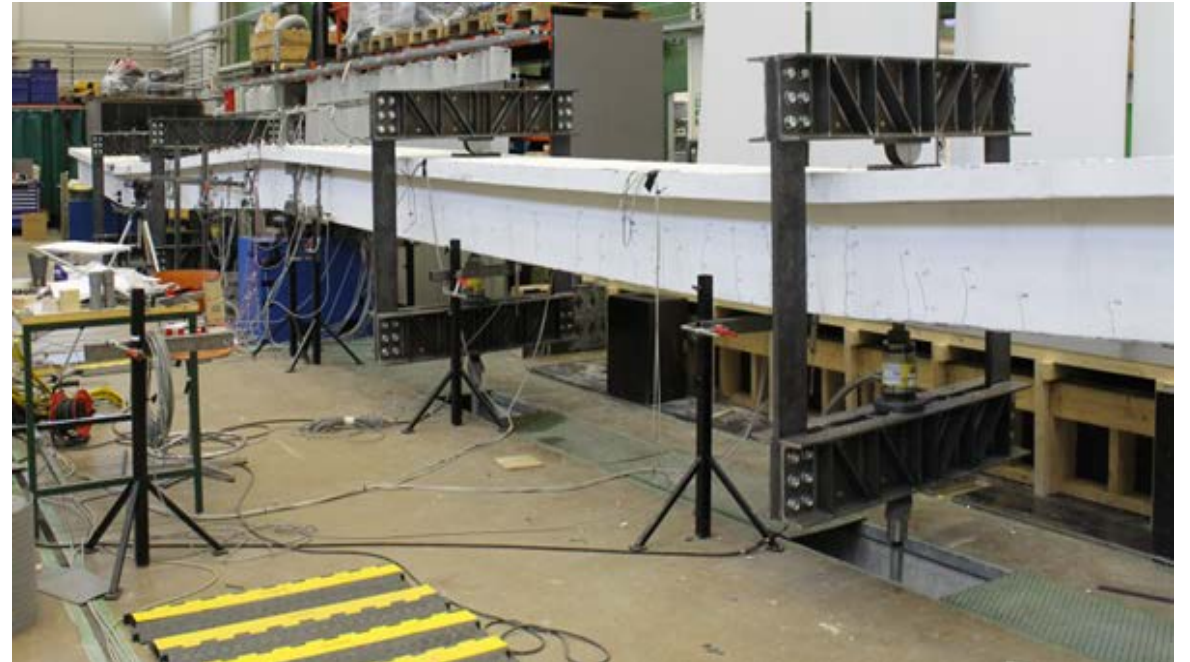


# *Tartunnattomilla jänteillä jännitetyn jatkuvan betonipalkin toiminta lähestyttäessä murtoa*

## *Koekuormitusten tuloksia*

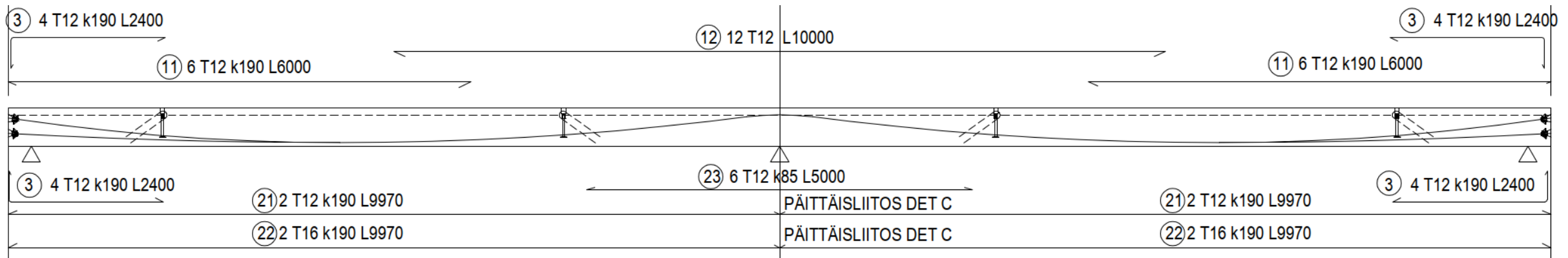
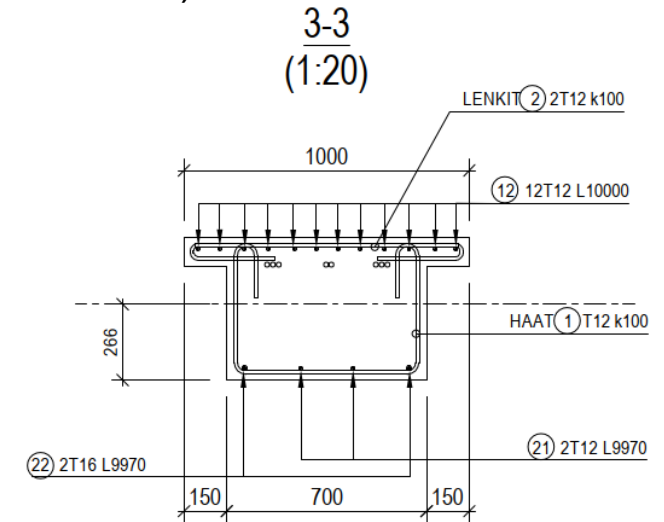


20.11.2024

Tarja Nakari A-Insinöörit Suunnittelu Oy

# Koepalkit

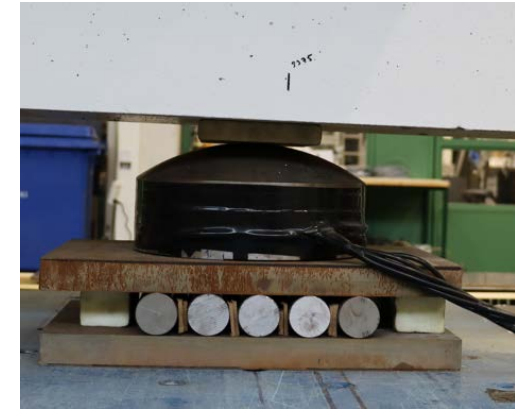
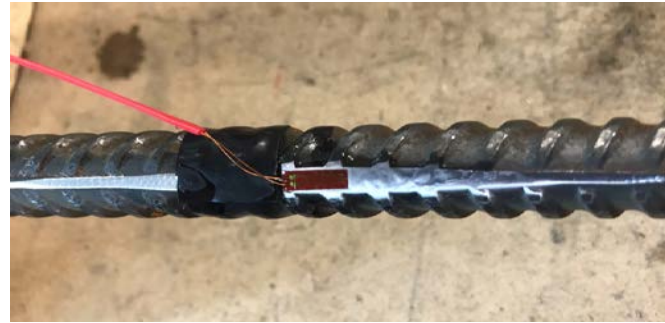
- Jatkuvien, tartunnattomilla jänteillä jännitettyjen betonipalkkien koekuormitukset toteutettiin 08-10/2021 Tampereen Yliopistolla, rakennustekniikan laboratoriossa Hervannassa
- Kaksiaukkoisia koepalkkeja tehtiin **4 kpl**
  - Kaikissa palkeissa oli sama raudoitus kentässä alapinnassa (minimiraudoitus 2T12 + 2T16)
  - B1, myös keskituella oli minimiraudoitus (6T12)
  - B2, keskituen raudoitus kaksinkertaistettiin (12T12)
  - B3, tuella sama yläpinnan raudoitus kuin B2 palkissa, alapinnassa lisäksi 6T12
  - B4, sama tukiraudoitus kuin B2 palkilla, vääntökuormitus lisänä
- Palkin mitat
  - T-poikkileikkaus, pienet laipat
  - Korkeus 500mm, uuman leveys 700mm, laipan leveys 1000mm
  - Jänneväli 10+10m
- Kaikissa sama jännepunosmäärä, 8 kpl  $A_p = 150\text{mm}^2$ , Y1860S7

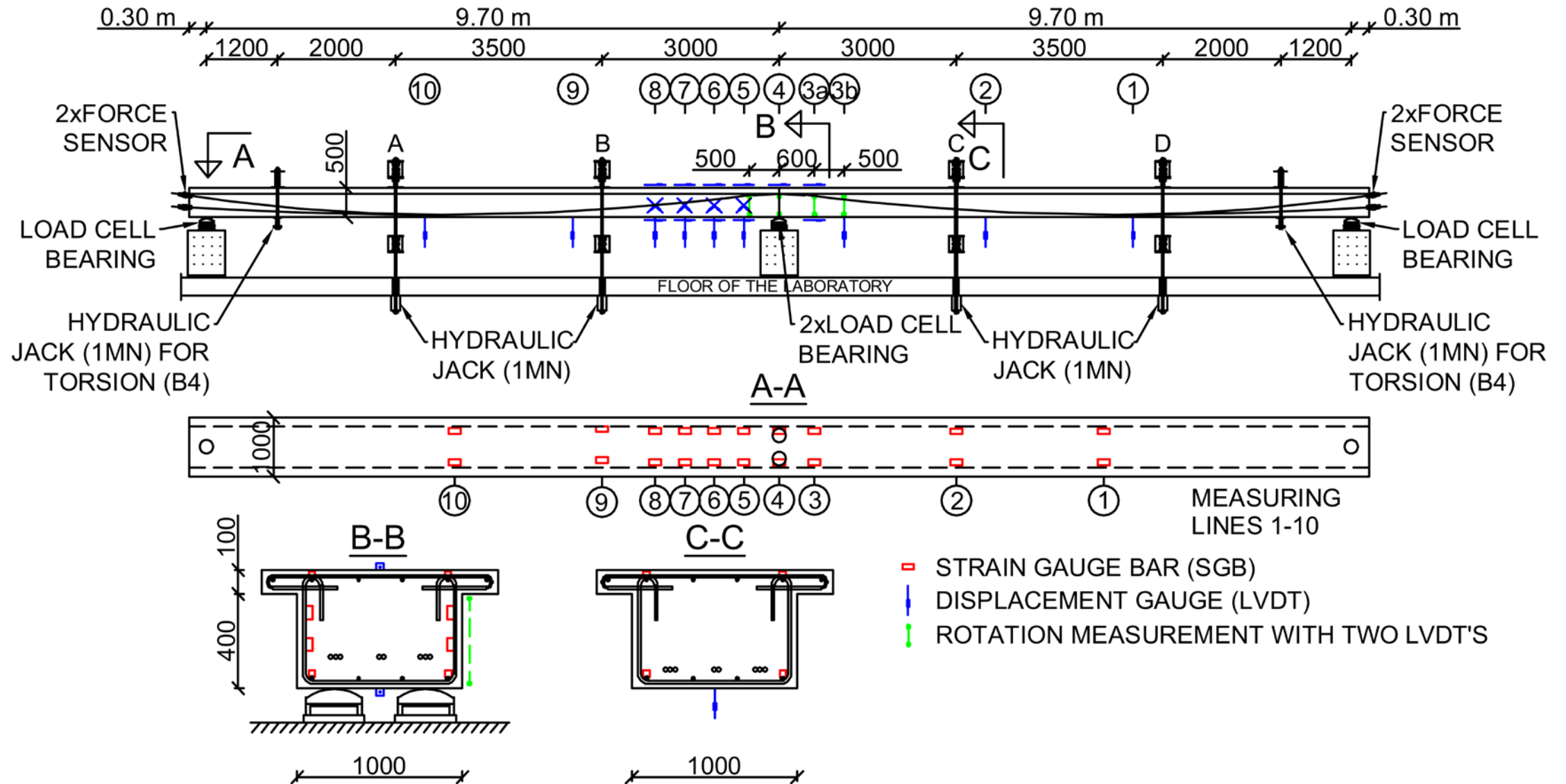




# Mittausjärjestely

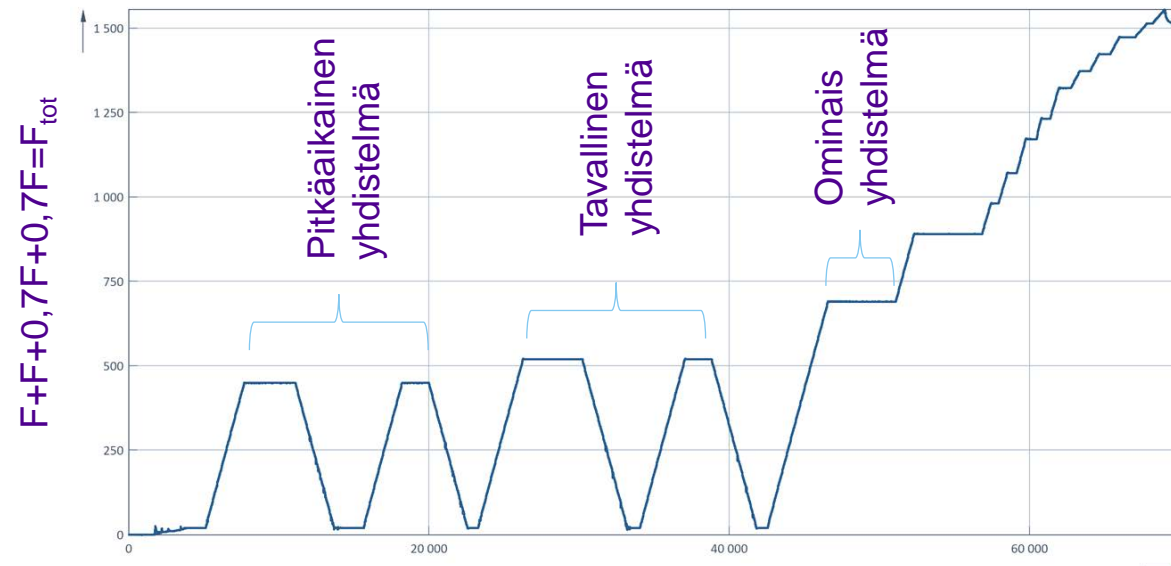
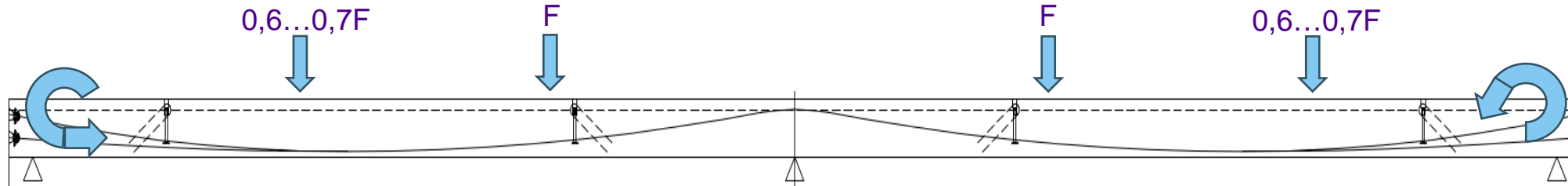
- 1) Voima-anturit 12-14kpl/koepalkki
  - Tukireaktiot
  - Tunkin tuottama voima
  - Voiman mittaus kahdesta jännepunoksesta
- 2) Venymäliuskat 60kpl/koepalkit B1-B3, 80kpl/B4
  - Palkin raudoitusten venymät
- 3) Siirtymämittaukset 37kpl/koepalkit B1-B3, 57kpl/B4
  - Taipuma
  - Ala- ja yläpinnan pituussuuntaiset venymät
  - Kiertymämittaukset





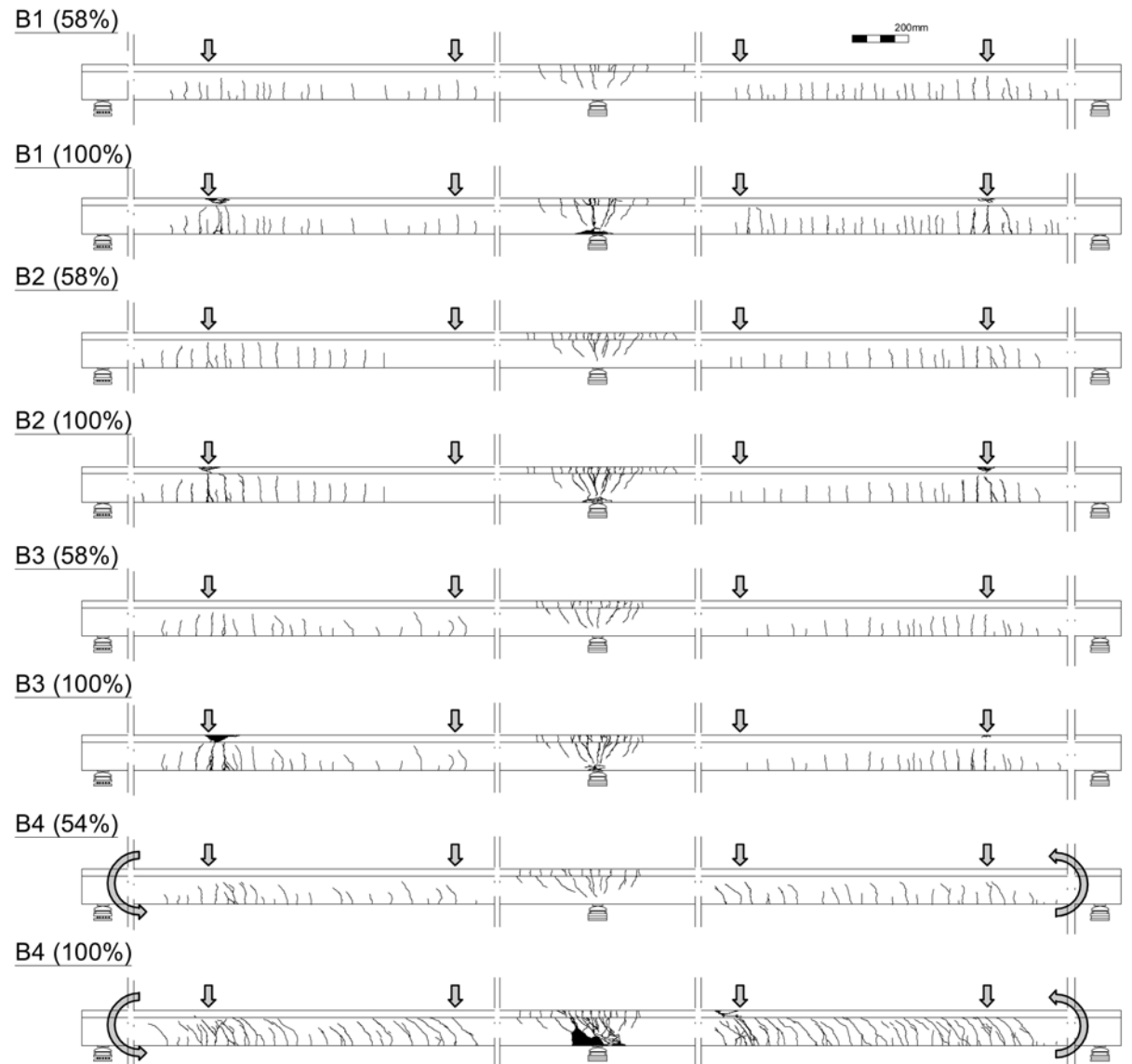
# Palkkien kuormitusjärjestely

- Rakennetta kuormitettiin 4:llä pistekuormalla jännevälän kolmannespisteistä
- Kuormitusportaat
  - Pitkäaikainen yhdistelmä, kaksi kuormitusyhtiä
  - Tavallinen yhdistelmä, kaksi kuormitusyhtiä
  - Ominaisyhdistelmä
- Kuormaportailta piirrettiin rakenteen halkeamat. Myös halkeamaleveyksiä seurattiin kentässä ja välituella
- KRT yhdistelmien jälkeen murtoa lähestyttiin n. 10...60kN/tunkki kuormalisäyksillä
- B4 palkilla lisättiin myös vääntökuormitus tavallisen yhdistelmän kuormaportaalta eteenpäin



# Halkeamien muodostuminen ja palkkien taipuma

- Ensimmäiset halkeamat syntyivät kaikkiin palkkeihin keskituen yläpintaan
- Kuormaa hitaasti kasvatettaessa myös kenttään uloimman kuormakehän kohdalle alkoi muodostua halkeamia kuormatasolla 27...34% murtokuormasta
- Ensimmäisillä kuormaportailta kuorma poistettiin, jolloin halkeamat umpeutuivat
- Kuormatasolla 41...44% murtokuormasta oli muodostunut selkeä halkeamaverkosto, halkeamien väli oli n. 200...300mm.
- Palkin taipuma oli KRT-kuormilla pieni. Taipumat alkoivat selkeästi kasvamaan vasta plastisten nivelten muodostuttua. Ennen murtoa taipumat olivat suuria kaikilla palkeilla, 150...200 mm.
- Kuormituksen lopussa palkin muodonmuutokset palautuivat kun kuorma tunkeista poistettiin.

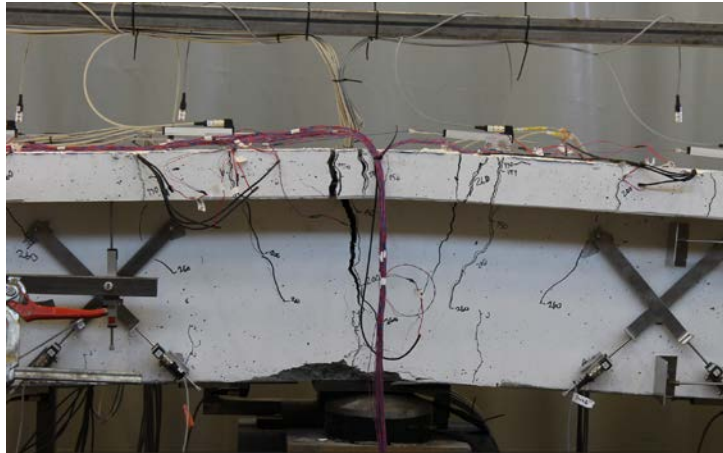




# Tukialueen halkeilu

- Keskitekialueen halkeamakartassa koepalkki B1 erosi muista palkeista. Siinä oli yksi leveä halkeama murtotilassa. Muissa palkeissa halkeamia oli enemmän ja ne olivat kapeampia.

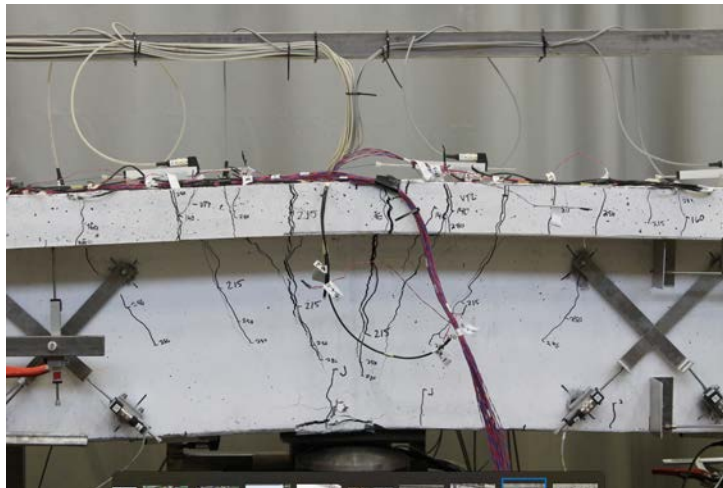
B1



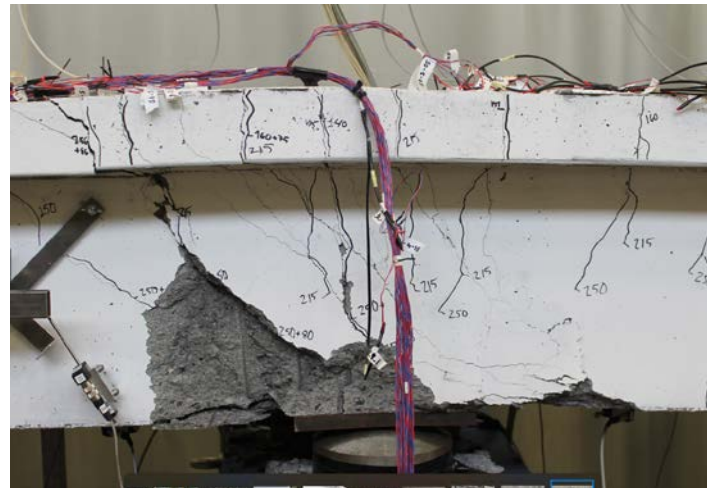
B2



B3



B4



# Tuloksia venymäliuskoista

## PURISTUS:

- Ensimmäisiä silmämääräisiä merkkejä puristuspuolen murtumisesta esiintyi kuormatasolla 73...85% murtokuormasta
- Tukialueen alapinnan teräksistä mitatut suurimmat puristumat olivat 6,1...7.9‰. Palkilla B3 luokkaa 3‰. Osa puristuspuolen mittaliuskoista vaurioitui kuormituksen loppupuolella.

## VETO:

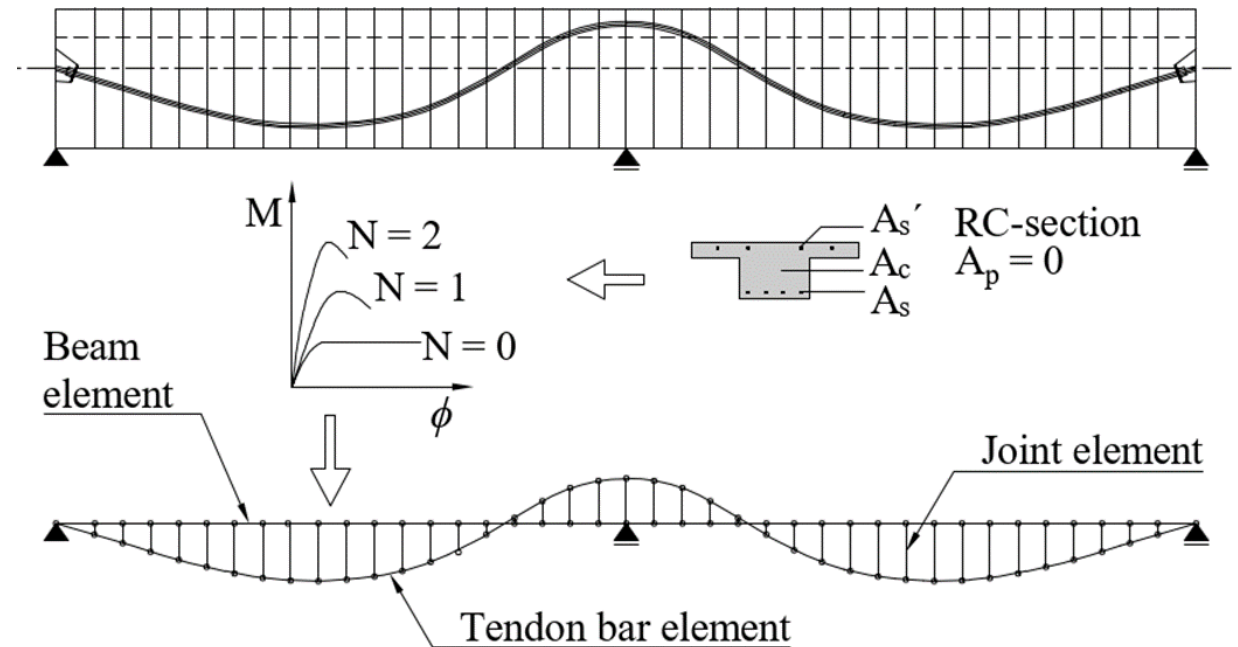
- Keskituella yläpinnan teräkset myötäsivät kuormatasolla noin  $F_{tot} = 800 \text{ kN}$  (n. 51% murtokuormasta). Venymä teräksissä 7...17‰
- Kentässä alapinnan teräkset myötäsivät kuormatasolla  $F_{tot} = 900...1100 \text{ kN}$  (70...75% murtokuormasta). Venymä teräksissä 3...7‰



# Vertailulaskenta epälineaarilla analyysillä

- Koetulosten vertailulaskentaa tehtiin momentti-käyristymäyhteyteen perustuvalla epälineaarilla analyysillä.
- Koepalkkien erilaisten teräsbetonipoikkileikkausten momentti-käyristymäyhteydet laskettiin eri normaalivoiman arvoilla ja syötettiin LUSAS-laskentaan.
- Lisäksi laskettiin momentit eri kuormaportailta tuella ja kentässä lineaarisen kimmoteorian mukaan.
- Momentin uudelleen jakaantumista on arvioitu sekä epälineaarisen laskennan tuloksista että koetuloksista alla olevan mukaisesti:

$$\delta(\%) = \frac{M_u^e - M_u^c}{M_u^e} * 100$$



# Momentin uudelleen jakaantuminen

- Tartunnattomat jänteet ovat usein elastisella alueella murtotilanteessa. Tästä syystä tartunnattomilla jänteillä jännitetyillä rakenteilla on erilaiset jäykkyysominaisuudet kuin tartunnallisilla jänteillä jännitetyillä rakenteilla.
- vaikuttaa momentin uudelleen jakaantumiseen
- Eurokoodissa momentin uudelleen jakaantumista on käsitelty lyhyesti. Tartunnattomilla jänteillä jännitetyille paikallavalurakenteille ei ole annettu mitään erillisiä ohjeita tähän liittyen.
- EN 1992-1-1 mukaan sallittu momentin uudelleen jaon määrä murtorajatilassa riippuu
  - Raudoitussuhteesta/puristuspinnan korkeudesta
  - käytetyn teräksen sitkeydestä
  - Rakenteella tulee olla riittävä sitkeys/kiertymäkyky, jotta plastiset nivelet pääsevät muodostumaan
- Suomen kansallisissa liitteissä momentin uudelleen jako on rajoitettu murtorajatilassa taloissa 30% ja silloissa 15%
- ACI318:een on ehdotettu momentin uudelleenjakaantumisen laskemiseksi empiirinen laskentakaavaa, joka ottaa huomioon kentän ja tuen raudoitussuhteet. Raudoitussuhteissa on otettu huomioon myös tartunnattomat jänteet. (Teräsvenymälle käytetty arvoa 7,5‰)

$$\delta \geq k_1 + \frac{k_2 x_u}{d} \quad \text{for } f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$$

$$k_1 = 0.44, k_2 = 1.25(0.6 + 0.0014/\varepsilon_{cu2})$$

$$\delta(\%) = \lambda_p (1000\varepsilon_t)$$

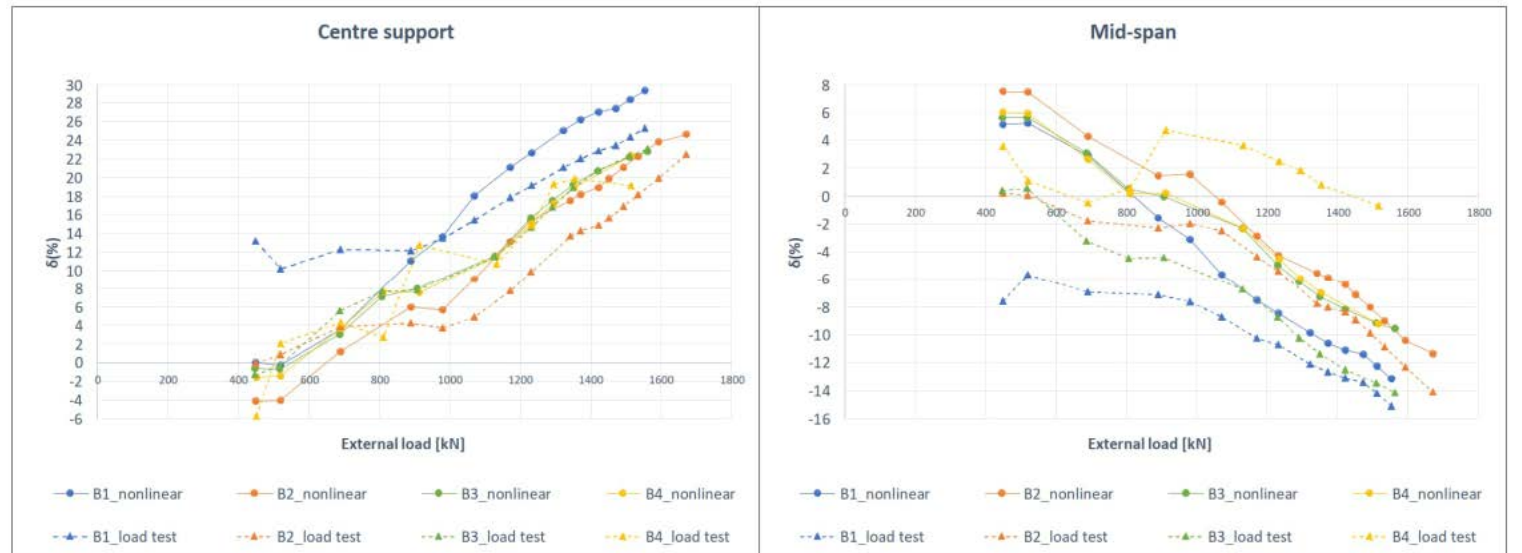
$$\lambda_p = 1.0 + 4.7 \ln \left( \frac{\omega_{q1}}{\omega_{q2}} \right) - 5.0 \ln^2 \left( \frac{\omega_{q1}}{\omega_{q2}} \right) + 3.6 \ln^3 \left( \frac{\omega_{q1}}{\omega_{q2}} \right)$$

$$\omega_q = \frac{A_p \sigma_{p0} + A_s f_y}{b d_p f_{ck}}$$

# Momentin uudelleen jakaantuminen

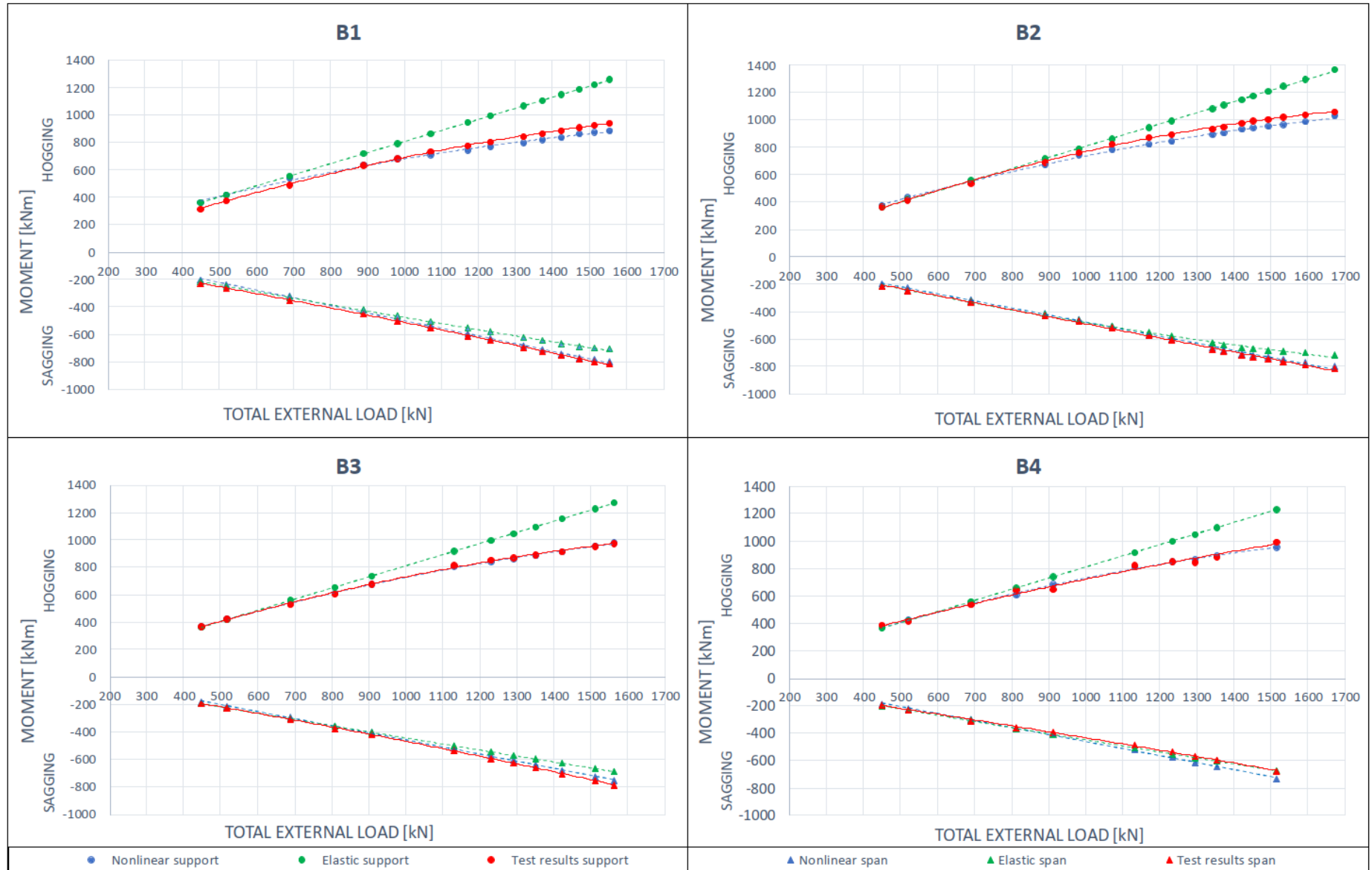
- Taulukossa on momentin uudelleen jakaantuminen laskettu kolmella kuormatasolla
- Momentin uudelleen jakaantumisesta ilmeni selkeästi kaikilla koekuormituspalkeilla. Vääntökuormitus ei vaikuttanut tähän heikentävästi.
- **Momentti alkaa siirtyä tuelta kenttään vasta kun harjateräsraudoitus on myötänyt sekä tuella että kentässä.**
- Koepalkkien momentin uudelleenjakaantumisen aste vastasi hyvin epälineaarisen laskennan tuloksia sekä melko hyvin myös Eurokoodilla laskettuja prosentteja. Palkilla B3 tulokset vastasivat toisiaan parhaiten. Tässä palkissa myös betonin materiaalimalli sopi hyvin yhteen venymäliuskoista saatujen puristuma-arvojen kanssa.

Test beam	External load F [kN]	Mechanical reinforcement ratio $\omega_s$	Test result Mu [kNm]	Nonlinear analysis Mu [kNm]	Elastic Me [kNm]	$\delta$ (%)			
						Load test	Nonlinear analysis	Proposed equation ACI318	EN 1992-1-1
B1	890	0.0229	631	639	719	12.2	11.1	6.7	
B1	1230	0.0229	804	770	995	19.2	22.7	11.4	
B1	1550	0.0229	940	889	1259	25.4	29.4	19.7	28.6
B2	890	0.0415	689	676	719	4.2	6.0	15.6	
B2	1230	0.0415	897	842	994	9.8	15.4	99.7	
B2	1670	0.0415	1059	1029	1366	22.5	24.6	99.7	26.8
B3	907	0.0470	680	679	738	7.8	8.0	14.1	
B3	1230	0.0470	853	844	1000	14.7	15.6	48.4	
B3	1560	0.0470	977	981	1271	23.1	22.8	48.4	28.1
B4	910	0.0458	647	686	742	12.8	7.5	15.4	
B4	1230	0.0458	853	852	1003	14.9	15.0	62.6	
B4	1515	0.0458	997	957	1233	19.1	22.4	62.6	25.5



# Koepalkkien kuorma-momentti kuvaajat

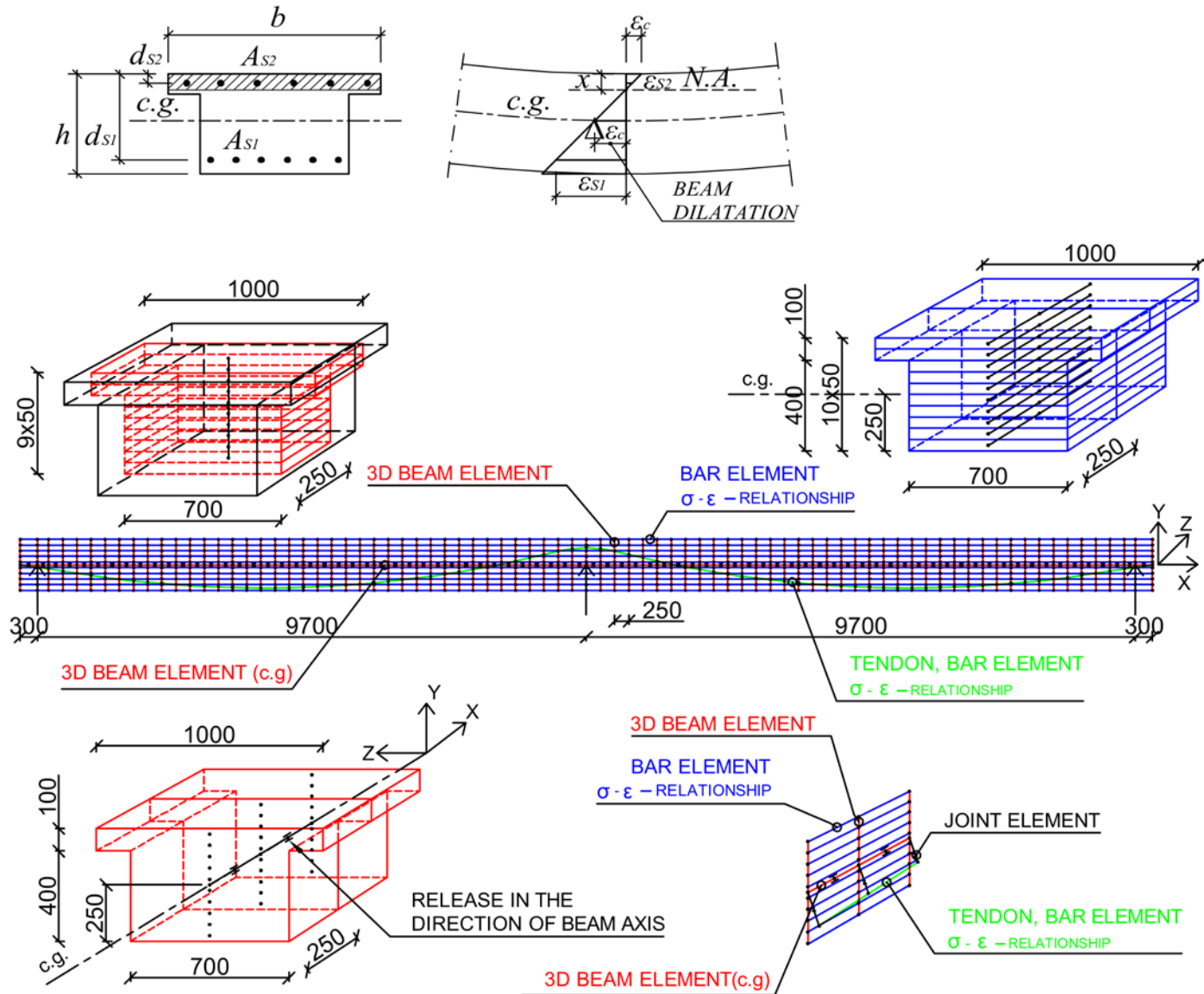
- Koepalkin taivutusmomenttikuvaaja kuormituksen edetessä voidaan määrittellä mitattujen tukireaktioiden sekä pistekuormien avulla.
- Kuvaajissa on esitetty koepalkkien kuorma-momenttikuvaajat kuormituksen edetessä (omanpainon, kuormituskehien ja pakkovoimien vaikutus poistettu, nämä olivat luokkaa -58kNm tuella ja -118kNm kentässä)





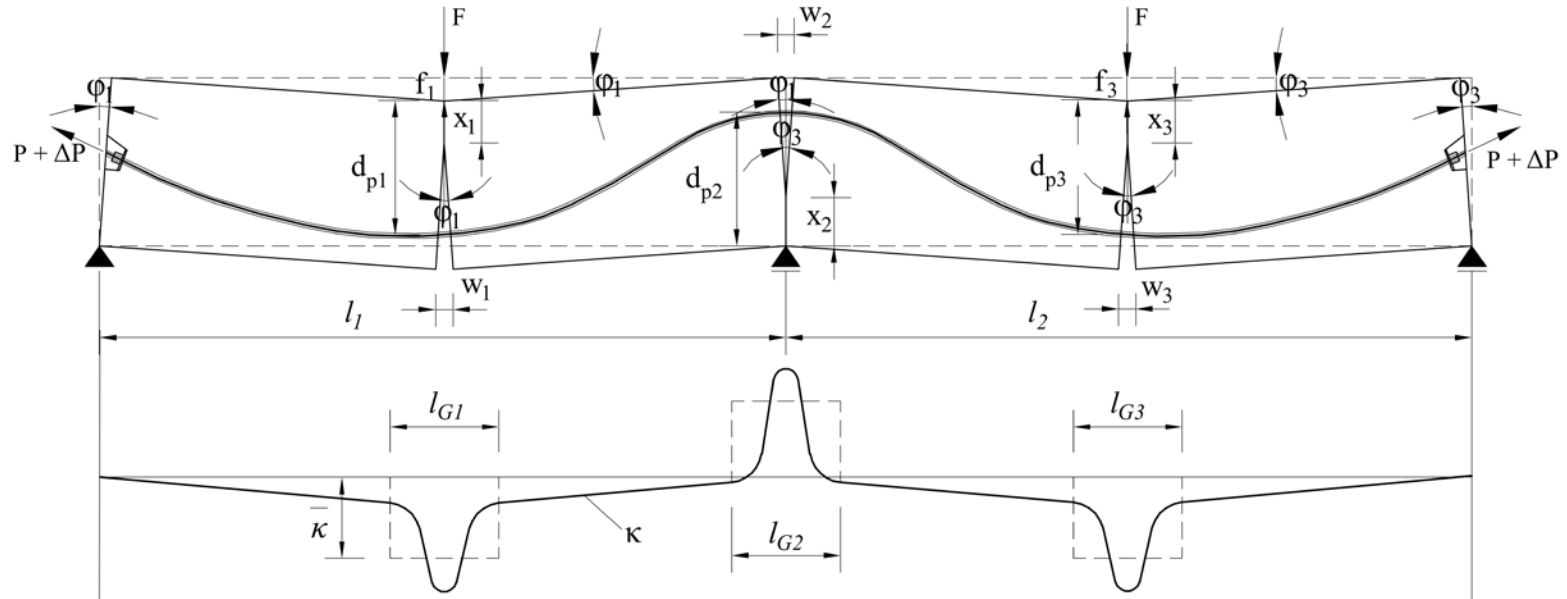
# Palkin painopisteakselin laajeneminen (dilataatio)

- Neutraaliakselin sijainti muuttuu kuormituksen kasvaessa. Tästä syystä palkin taipuessa palkin painopisteakseli laajenee. Tämä vaikuttaa myös jänteen lisävenymään ja siten jännityslisän suuruuteen.
- Jänteen jännityslisän tarkempaan analysointiin on kehitetty uusi epälineaarinen FEM-laskentamalli "kalanruotomalli", joka pystyy ottamaan huomioon myös palkin dilataation vaikutukset



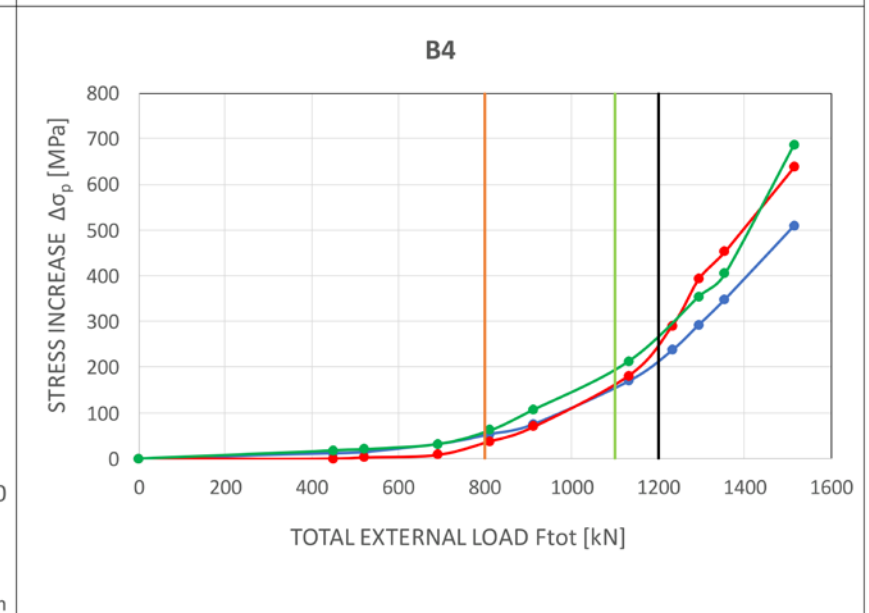
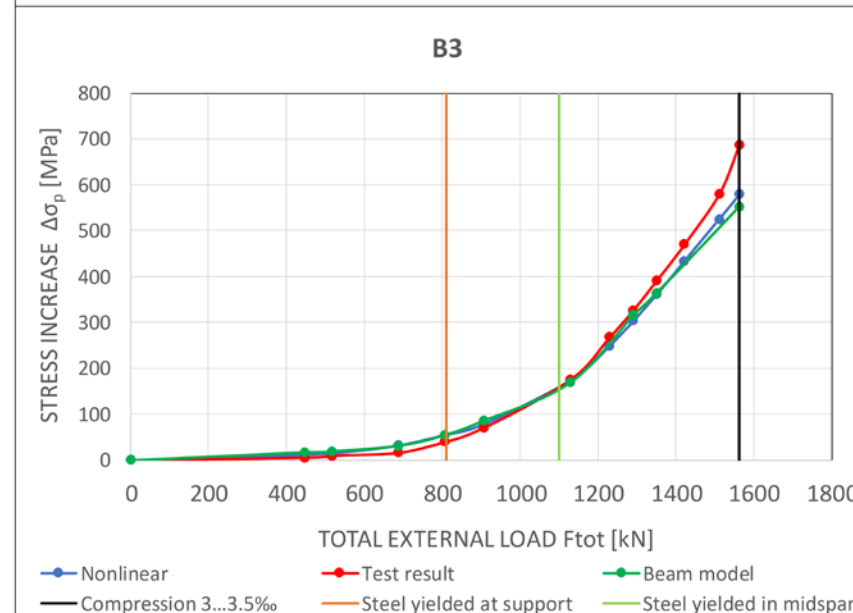
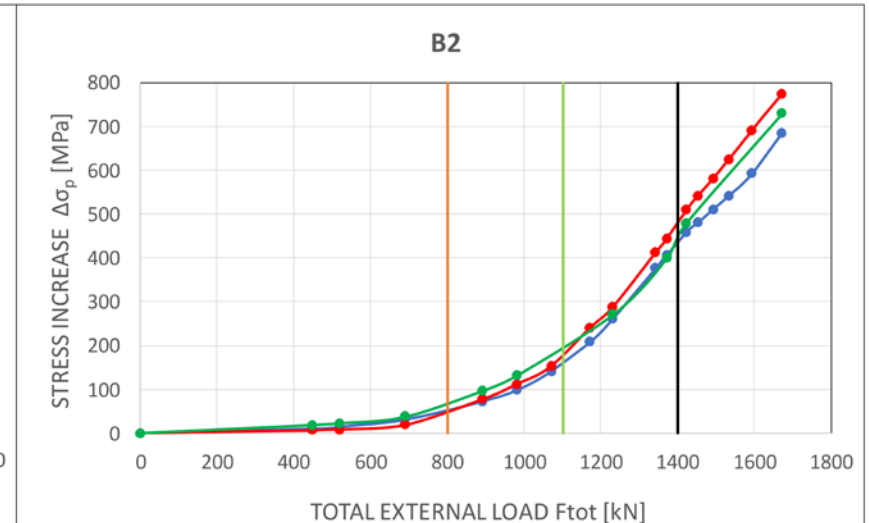
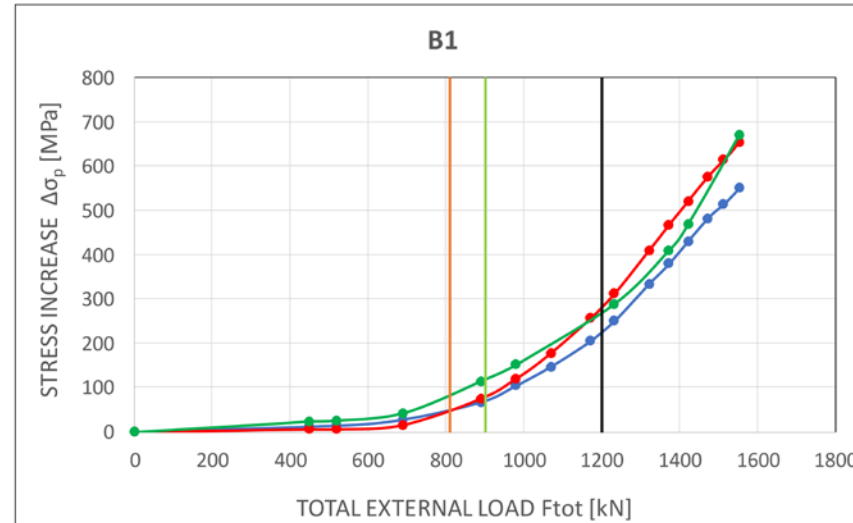
# Vertailulaskenta yksinkertaisella palkkimallilla

- Jänteen jännityslisän vertailulaskenta tehtiin myös yksinkertaisella palkkimallilla.
- Malli olettaa, että plastinen nivel muodostuu palkin maksimirasituksen kohtiin eli keskituella ja kenttiin. Suurin osa tartunnattoman jänteen jännityslisän kasvusta muodostuu näissä plastisen nivelen kohdissa. Menetelmä olettaa, että palkki muodostuu jäykistä osista, jotka kiertyvät plastisten nivelten kohdilla. Myös halkeamat keskittyvät näihin nivelkohtiin.



# Jänteen jännityslisän kehittyminen

- Tartunnattoman jänteen voimaa mitattiin jokaisesta koepalkista kahdesta jänteestä molemmista päistä palkkia
- Jännityslisä oli kaikilla palkeilla huomattavan suuri, vaihdellen välillä 638...775MPa
- Vääntörasituksella ei ollut juuri vaikutusta jänteen jännityslisään
- Kun palkeilla B1, B2 ja B4 oli saavutettu 3,5‰ tukialueella, noin puolet jänteen jännityslisästä oli muodostunut. Jännityslisä lähes tuplaantui vielä tämän jälkeen. B3 palkilla puristusraudoitus vaikutti puristuman suuruuteen.
- Yksinkertainen palkkimalli näyttäisi soveltuvan hyvin jännityslisän arvioitiin palkeilla.



# Jänteen pituuden muutos / lisävenymä



- Palkin laajenemisen (dilataation) vaikutus jänteen lisävenymään oli suurilla kuormatasoilla noin puolet koko lisävenymän suuruudesta.
- Esitetty mallinnusmenetelmä osoitti, että dilataatiolla on huomattava merkitys tartunnattoman jänteen jännityslisän suuruuteen.

Test beam	External load F [kN]	Initial pre-stress $\sigma_{p0}$ [MPa]	From test results		Nonlinear analysis		Beam model
			Average of force increase in tendons [kN]	Tendon elongation [mm]	Tendon elongation [mm]	Beam dilatation [mm]	Tendon elongation [mm]
B1	690	961	3.8	2.5	2.7	1.2	4.2
B1	890		13.3	8.9	6.8	1.5	11.3
B1	1230		48.5	32.8	30.0	13	28.6
B1	1553		98.8	66.7	68.0	33	66.6
B2	690	835	4.3	2.9	2.0	0.6	3.8
B2	890		13.0	8.8	7.4	2.1	9.6
B2	1230		45.3	30.6	31.4	14.5	26.9
B2	1671		116.2	78.5	86.0	45.9	72.4
B3	687	816	3.6	2.4	2.0	0.6	3.1
B3	907		12.7	8.6	6.8	2.4	8.6
B3	1230		41.9	28.3	29.8	13.3	24
B3	1562		103.2	69.7	72.0	34.9	54.8
B4	690	834	3.0	2.0	2.2	0.7	3.2
B4	912		13.2	8.9	7.7	2.3	10.6
B4	1230		55.1	37.2	28.4	12.4	28.1
B4	1515		106.7	72.1	63.4	30.8	68.1



# Lisätietoa

- Aiheesta julkaistuja artikkeleita:
- **Determination of the Stress Increase of the Unbonded Tendon in a Continuous Concrete Beam at Ultimate Capacity Using Nonlinear Analysis**

[10.2478\\_ncr\\_2021\\_0004.pdf](#)

- **Experimental study of moment redistribution in continuous concrete beams prestressed with unbonded tendons**

[Experimental study of moment redistribution in continuous concrete beams prestressed with unbonded tendons](#)

