

PÄÄKANNATTAJAN LIITOSTEN MITOITUS

Diagonaalien liitos pääkannattajan alapaarteeseen (harjalohkossa)

PUTKIPALKKIEN LIITOKSET - PUTKIPALKKIKÄSIKIRJA									
N-, K- JA KT-RISTIKOIDEN VAPAAYÄLISTEN LIITOSTEN KESTÄVYYDET									
Laskentakohte:		Järvenpää Urheiluhalli							
K-LIITOS		Päärre ja kaksi diagonaalia.		Materiaalin myötöraja on		$f_k =$	355,0	M/mm ²	
				$\gamma_{M1} =$		1,1	$\gamma_{M2} =$	1,1	
Lähtötiedot:									
Päärreputki:		korkeus on	$h_1 =$	100	mm	Suure γ saadaan:			
		leveys on	$b_1 =$	100	mm	$\gamma = b_1 / (2t_1) =$	16,67		
		ainepaksuus on	$t_1 =$	3	mm	$h_1 / b_1 =$	1,00		
		Pinta-ala	$A_1 =$	1141,0	mm ²	$(b_1 + h_1) / t_1 =$	66,67		
		$W_1 =$		35410	mm ³				
Vasen diagonaali:		korkeus on	$h_1 =$	60	mm	Uumasauvojen lukumäärä			
		leveys on	$b_1 =$	60	mm	on $m =$	2		
		ainepaksuus on	$t_1 =$	3	mm	$\beta_1 =$	0,6		
		kaltevuus	$\theta_{11} =$	63,43	ast.	$h_1 / b_1 =$	1,00		
		Pinta-ala	$A_1 =$	661,0	mm ²	$\eta_1 =$	0,60		
						$(b_1 + h_1) / t_1 =$	40,00		
Oikea diagonaali:		korkeus on	$h_2 =$	50	mm	$k_1 =$	1	$\leq 1,0$	
tai uumasauva:		leveys on	$b_2 =$	50	mm	$\beta_2 =$	0,5		
		ainepaksuus on	$t_2 =$	3	mm	$h_2 / b_2 =$	1,00		
		kaltevuus	$\theta_{21} =$	63,43	ast.	$\eta_2 =$	0,50		
		Pinta-ala	$A_1 =$	541,0	mm ²	$(b_2 + h_2) / t_2 =$	33,33		
Diagonaalien vapaa väli on		$g =$	15	mm	$g / b_1 =$	0,15			
						e oltava $< 0,25 h_1$	Virhe!		
Rasitukset:									
		Posit. suunnat kuvasta!							
Rasitukset päärreputkessa:		$N_{1,11} =$	-200,23	kN	ja	$N_{1,12} =$	368,2	kN	
		ja leikkausvoima	$V_{11} =$	0	kN	$M_1 =$	0	kNm	
Aksiaalivoima uumasauvassa 1:		$N_{1,11} =$	122,3	kN	$N_{1,12} =$	213,3	kN		
uumasauvassa 2:		$N_{2,11} =$	141,02	kN	$=> n =$	-0,543761			
Osien muotoilu:									
Suureiden η, β on oltava		$\geq 0,1 + b_1 / (100 \cdot t_1) =$	0,433333						
(pätevyysalue)		Uumasauvoille on lisäksi oltava	$(b_1 + h_1) / t_1 \geq 25$						
Uumasauva (vasen):		$b_1 / t_1, h_1 / t_1 \leq 35$							
(oikea)		- "- -	Muuttujien						
Puristettu uumasauva:		$b_1 / t_1, h_1 / t_1 \leq 1,25 \cdot \sqrt{E / F_{yk}}$	suhteet						
(oikea)		- "- -	aina						
Päärresauva:		$b_1 / t_1, h_1 / t_1 \leq 35$	$> 0,0!$						
Vapaa väli g :		$g / b_1 \geq 0,5(1-\beta);$ ja $\leq 1,5(1-\beta)$	Virhe!						
		$g \geq t_1 + t_2$							
Liitoksen kestävyys									
		$N_{1,Rd} =$	368,2318	kN	OK!				
Pienimmät kestävyysarvot:		$N_{1,Rd} =$	64,89766	kN	EIKESTÄ!				
		$N_{2,Rd} =$	64,89766	kN	EIKESTÄ!				

Kestävyydet eri murtotavoissa:

Paarteen pinnan myötö (Paarteen pintaan muodostuu myötökuvia, mikä saattaa edeltää paarteen pinnan irtileikkautumista. Huom. Taiv.momentti voi vaikuttaa irtoamiseen.)
KT-liitoksissa vapaaväliksi valitaan eniten kuormitettujen uumasauvojen keskinäinen etäisyys.

Uumasauvat: $N_{1,Rd} = 64,89766$ kN
 $N_{2,Rd} = 64,89766$ kN

Paarteen leikkausmyötö

(leikkauslävistyminen)

$\alpha = \sqrt{1 + 4 \cdot g^2 \cdot t_f^2 / 3} = 0,170664$
 $A_s = (2h_f + \alpha \cdot b_f) \cdot t_f = 651,1992$ mm²
Saadaan: $V_{pl,Rd} = f_{yk} \cdot A_s / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2}) = 121,3358$ kN

Uumasauvat: $N_{1,Rd} = 135,6634$ kN
 $N_{2,Rd} = 135,6634$ kN

Paarre: $N_{Rd} = 368,2318$ kN

Uumasauvan murtuminen

Uumasauvat: $N_{1,Rd} = 180,0818$ kN Tehollinen leveys on $b_{eff} = 18$ mm
 $N_{2,Rd} = 148,1318$ kN $b_{eff} = 15$ mm

Huom! KT-liitoksessa tulee tarkistaa eräitä lisäehtoja!

Paarteen leikkauslävistyminen

Jos $\beta = 0,6$ on $\leq 1 - (t_f / \gamma) = 0,94$
=> Paarteen leikkauslävistyminen tulee tarkistaa!

Uumasauvat: $N_{1,Rd} = 132,6031$ kN $b_{rs} = 18$ mm
 $N_{2,Rd} = 110,5026$ kN $b_{rs} = 15$ mm

Huom! K-liitoksen mitoituskaavoissa otetaan muuttujan β arvoa ja siitä laskettavaa k_n -arvoa laskettaessa huomioon molemmat samaan parrelliitokseen tulevat diagonaalit. Niillä voi olla erilainen leveys, mutta liitosta koskeva yhteinen β -arvo (kaava alla) aiheuttaa eri suurille sauvoille näennäisesti saman kestävyysarvon. Kyseessä on kuitenkin liitosta koskeva kestävyysarvo, missä murtotapana on paarteen pinnan myötö.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m b_i}{m \cdot b_0}, \eta = \frac{h_i}{b_0}$$

Alapaarteen ja pilarin jalan liitos

PUTKIPALKKIEN LIITOKSET - PUTKIPALKKIKÄSIKIRJA

T-, Y- JA X-RISTIKOIDEN VAPAÄYLÄLISTEN LIITOSTEN KESTÄVYYDET

X-LIITOS

Päärre ja kaksi diagonaalia.

Materiaalin myötöraja on $f_y = 355,0$ M/mm² $\gamma_{M2} = 1,1$ $\gamma_{M0} = 1,1$

Lähtötiedot:

Paarreputki:	korkeus on	$h_g = 150$ mm	Suure γ saadaan:
	leveys on	$b_g = 150$ mm	$\gamma = b_g / (2t_g) = 11,90$
	ainepaksuus on	$t_g = 6,3$ mm	$h_g / b_g = 1,00$
	Pinta-ala	$A_g = 3485,0$ mm ²	$(b_g + h_g) / t_g = 47,62$
	$W_g = 156500$ mm ³		

Ylempi diagonaali:	korkeus on	$h_1 = 100$ mm	$k_{x1} = 0,671035$
	leveys on	$b_1 = 100$ mm	$\beta_1 = 0,666667$
	ainepaksuus on	$t_1 = 8$ mm	$h_1 / b_1 = 1,00$
	kaltevuus	$\theta_{\theta a1} = 78,69$ ast.	$\eta_1 = 0,67$
	Pinta-ala	$A_1 = 2724,0$ mm ²	$(b_1 + h_1) / t_1 = 25,00$

Alempi diagonaali:	korkeus on	$h_2 = 150$ mm	$k_{x2} = 0,671035$	$\leq 1,0$
	leveys on	$b_2 = 100$ mm	$\beta_2 = 0,666667$	
	ainepaksuus on	$t_2 = 6,3$ mm	$h_2 / b_2 = 1,50$	
	kaltevuus	$\theta_{\theta a2} = 40,91$ ast.	$\eta_2 = 1,00$	
	Pinta-ala	$A_2 = 2855,0$ mm ²	$(b_2 + h_2) / t_2 = 39,68$	

Rasitukset:

Posit. suunnat kuvasta!

Rasitukset paarreputkessa:	$N_{g,sa} = 1179$ kN	ja	$N_{Rd,1} = 1124,7$ kN
ja leikkausvoima	$V_{sa} = 1$ kN		$M_g = 0$ kNm
Aksiaalivoima uumasauvassa 1:	$N_{1,sa} = 1101$ kN		$N_{Rd,1} = 879,1$ kN
uumasauvassa 2:	$N_{2,sa} = 1089$ kN	$= > n =$	$1,048275$

Osien muotoilu:

Suureiden β ; on oltava	$\geq 0,1 + b_1 / (100 \cdot t_g) = 0,338095$
(pätevyysalue)	Uumasauvoille on lisäksi oltava $(b_1 + h_1) / t_1 \geq 25$
Uumasauva (ylempi):	$b_1 / t_1, h_1 / t_1 \leq 35$
(alempi)	- "- -
Uumasauva (ylempi):	$b_1 / t_1, h_1 / t_1 \leq 1,25 \cdot \sqrt{(E / F_{yk})}$
(alempi)	- "- -
Paarresauva:	$b_g / t_g, h_g / t_g \leq 35$
	Muuttujien suhteet aina $> 0,0!$

Liitoksen kestävyys

Pienimmät kestävyysarvot:

Koska	$\beta_1 = 0,666667$	$N_{1,Rd} = 96,48596$ kN	
	$\beta_2 = 0,666667$	$N_{2,Rd} = 211,1878$ kN	EIKESTÄ!

Kestävyydet eri murtotavoissa:

Paarteen pinnan myötö (Paarteen pintaan muodostuu myötökuvia, mikä saattaa edeltää paarteen pinnan irtileikkautumista. Huom. Taiv.momentti voi vaikuttaa irtoamiseen.)

Uumasauvat:	$N_{1,Rd}$ =	96,48596	kN	Interpoloitu, jos β :n arvot välillä 0,85...1,0.
	$N_{2,Rd}$ =	211,1878	kN	

jalkat **Paarteen uuman lomma** Nämä laskelmat tehdään arvolla $\beta = 1,0$

Jos $0,85 < \beta < 1$

	$\beta = 0,85$	$\beta = 1,00$		$\beta =$	
$N_{1,Rd}$ =	169,989	235,1299	=>	0,666667	90,37243 kN
$N_{2,Rd}$ =	402,7871	359,5142	=>	0,666667	402,7871 kN

Paarteen leikkauslävistyminen

Pätee, kun β on välillä $0,85 \leq \beta < 1 - (1/\gamma) =$ 0,916

Uumasauvat:	$N_{1,Rd}$ =	414,1515	kN	b_{eff1} =	42	mm
	$N_{2,Rd}$ =	1075,686	kN	b_{eff2} =	42	mm

Uumasauvan murtuminen

Pätee, kun $0,85 < \beta$

Uumasauvat:	$N_{1,Rd}$ =	604,5327	kN	b_{eff1} =	33,075	mm
	$N_{2,Rd}$ =	729,5056	kN	b_{eff2} =	42	mm

Paarteen leikkausmyötö

Pätee vain tapauksissa: $\beta = 1,0$, missä diagonaalin leveys on = paarteen leveys.

Uumasauvat:	$N_{1,Rd}$ =	359,1316	kN	A_s =	1890	mm ²
	$N_{2,Rd}$ =	537,7494	kN			

RISTIKKORAKENTEIDEN MALLINNUS

1 Rakenteen mallintaminen

Järvenpään Urheiluhallin pääkannattajan laskelmat on tehty siten, että rakenne on mallinnettu ns. ristikkoanalogialla. Sen sauvaelementeissä vaikuttaa vain aksiaalivoimia. Sauvojen taivutusta ei ole otettu huomioon laskelmissa.

⇒ **Kohteen suunnittelijan rakennemalli ei vastannut todellisuutta!**

Ristikkorakenteiden rakenneanalyysissä ja mitoituksessa on otettava huomioon putkipalkkien ja niiden liitosten ominaisuudet ja kyky siirtää rasituksia osasta toiseen. Toisin kuin avoprofiileista kootuissa kehissä, missä liitosten jäykkyys voidaan säätää jäykisteillä ja erilaisilla tukilevyillä, putkipalkkien sisään ei ole mahdollista hitsata jäykisteitä, jolloin palkkien ulkomitat ja sauvojen sijainti pitkälti määrittelevät, mikä on kyseisen liitoksen todennäköinen murtotapa. Liitoksia on kuitenkin myös tarvittaessa mahdollista tukea ulkopuolisilla jäykistelevyillä.

Kriittisten liitosten kestävyyydet tulee tarkistaa rakenteen suunnittelun yhteydessä, ja samalla tulee varmistaa niiden sitkeä toiminta. Käsikirjoissa on kaavoja kuhunkin murtotapaan liittyvän kestävyyyden laskemiseksi. Tämän havainnollistamiseksi on kuvassa 15 esitetty pieni osa kattokannattajasta (kuva 15a), joka voidaan mallintaa ainakin seuraavilla kolmella tavalla:

- 1) **Kehämallinnus** (kuva 15b), joka soveltuu mallinnustavaksi, jos ristikon kaikkien putkipalkkien leveydet ovat yhtä suuret, jolloin diagonaalisauvojen hitsausliitokset paarteina toimiviin putkipalkkeihin ovat mahdollisimman jäykkiä. Kehämallinnuksessa on myös olennaista limittää sauvojen päitä (kuva 15a) jolloin kaikkien liittyvien sauvojen neutraaliakselit leikkaavat toisensa yhdessä pisteessä, ja sauvojen liitoksen jäykkyys on vähintään sama kuin yksittäisen liittyvän sauvan taivutusjäykkyys,
- 2) **Ristikkomallinnus** (kuva 15d), missä kaikki osasauvat on kuvattu joko vetoa tai puristusta välittävänä rakenneosina, ja osien väliset liitosten toimivat mahdollisimman hyvin nivelinä, eli sauvoista toiseen siirtyvät todelliset taivutusmomentit ovat vähäisiä, ja nivellä on riittävä muodonmuutoskyky. Nivelsauvoissa ei saisi olla ripustuksia, kuten esimerkiksi alakattoa kannattavat orret.

Toiminta ristikkona on mahdollista esimerkiksi jos diagonaalisauvojen leveys on sopivasti pienempi kuin paarisauvojen leveys, ja diagonaalisauvojen liittymäkohtien väliin on ilman epäkeskeisyyksiä jätettävissä välys g , jonka minimi arvona käytetään $g = t_1 + t_2$, missä t_1 ja t_2 ovat liittyvien diagonaali/vertikaalisauvojen seinämäpaksuudet. Paarteen pinnan leikkautumisen välttämiseksi välys pitäisi valita riittävän suureksi, mutta se taas johtaa helposti epäkeskeisyyksiin sauvojen mitoituksessa.

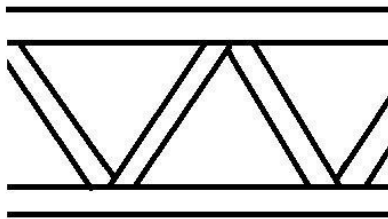
Ristikkomallinnusta suositellaan (esim. J. Wardenier: Hollow sections in structural applications) käytettäväksi tapauksissa, missä pääkannattajan korkeus suhteessa sen jänneväliin on $1/10 \dots 1/16$. Käsiteltävässä tapauksessa kyseinen suhde on $1,5\text{m}/42,5\text{m} = 1/28$, eli rakenne ei sovellu analysoitavaksi ristikkoanalogialla. Lisäksi ristikon paarteiden jatku-

vuus on olennaisella tavalla ristiriidassa nivelliitokselta vaaditun toiminnan kanssa. Käytännön syistä pääkannattajan paarteita ei koota paloista.

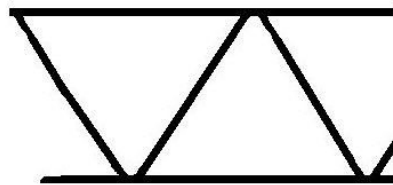
- 3) **Optimaalinen rakennemalli** (kuva 15c), missä otetaan huomioon paarreputkien jatkuvuus, ja diagonaalisauvat voidaan mitoittaa joko nivelellisinä tai jäykkinä riippuen siitä onko niiden leveys sama kuin paarteiden leveys ja limitetäänkö sauvoja kuvan 15a mukaisesti. Jos diagonaalin leveys on pienempi kuin paarteen leveys, liitoksen kestävyys tulee tarkistaa laskemalla kuhunkin mahdolliseen vauriomuotoon liittyvä kestävyysarvo.

Vähemmän kuormitettujen diagonaalisauvojen väliin voidaan jättää välys, jolloin hitsausliitokset voidaan tehdä diagonaalisauvojen ympäri. Välys aiheuttaa sauvojen päihin epäkeskeisyyttä, mistä aiheutuu sauvoihin taivutusta, mutta sen vaikutus on yleensä vähäinen muualla kuin reunimmaisissa eniten rasitetuissa diagonaaleissa (kuva 15c, sauva S1), jotka siksi usein mallinnetaan jäykkänurkkaisina sauvoina.

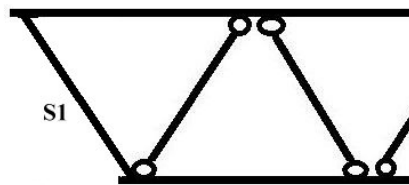
a) Mallinnettava rakenne



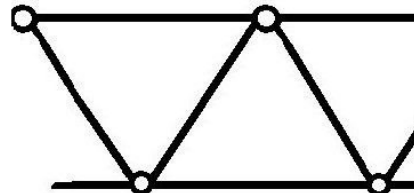
b) Kehämallinnus



c) Optimaalinen rakennemalli



d) Ristikkoanalogia



Kuva 15. Ristikko/kehärakenteiden mallintamisen vaihtoehdot

Onnettomuustutkinnassa tehtiin laskelmia rakennuksen todellisen kestävyys selville saamiseksi. Laskelmat tehtiin mahdollisimman tarkasti suunnittelijan itsensä laatimalla rakennemallilla sekä usealla muulla mahdollisella rakennemallilla, joissa tarkemmin kuvattiin rakenteen eri osien taivutuskestävyyttä ja sen osien ja liitosten jäykkyyksiä.

Laskentatulokset riippui olennaisesti rakennemallista ja edellä kuvatuista seikoista. Paarteiden jatkuvuuden ja taivutuskestävyyden huomioon ottaminen pienensi sauvavoimia, mutta matalilla pääkannattajilla **taivutus ylikompensoi** aksiaalivoiman pienenemisen ja aiheutti sauvojen reunoissa laskelmissa myötörajaa suurempia jännitysten arvoja. Myötörajan saavuttaminen johtaa rakenteessa paikalliseen vaurioitumiseen, ja se voi johtaa rakenteen sortumiseen mikäli voimat tai rasitukset eivät pysty jakautumaan uudelleen.

Huom! Kun rakenteen laskentakuormien suuruusluokka oli sortuneella alueella pääsääntöisesti oikealla tasolla, voitiin todeta, etteivät rakennekuormat tai rakenteen mallinnustapa yksinään riittäneet selittämään tapahtunutta sortumista.