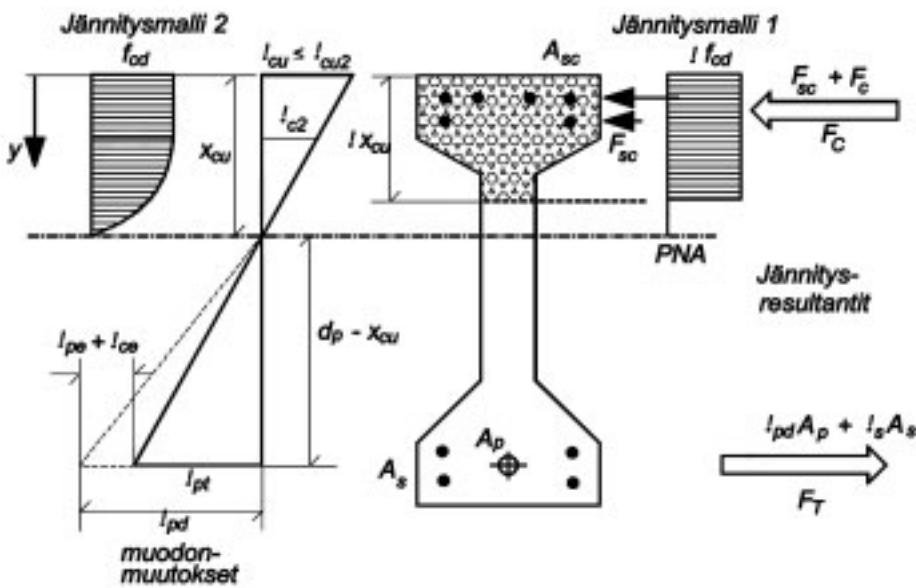
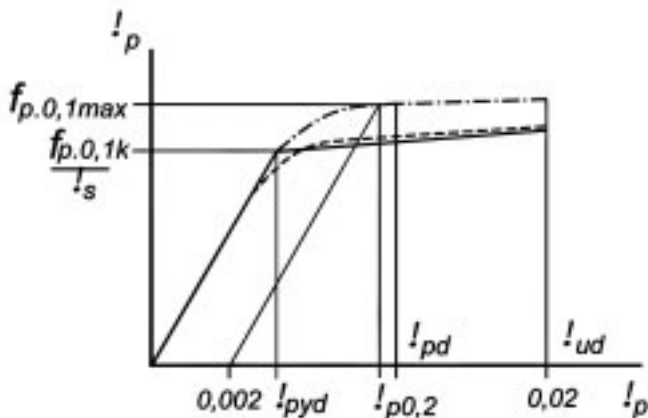


# JÄNNITETTYJEN HI- JA I-PALKKIEN Uudet SUUNNITTELUOHJEET

Matti Leskelä, tekniikan tohtori  
Oulun Yliopisto



1 Muodonmuutosjakautuma poikkileikkauksen murtorajatilassa ja taivutuskestävyyden laskemiseen liittyvät betonin jännitysmallit.



2 Jännepunoksien jännitys-venymäyhteydet.  
Täysi viiva = lujeneva mitoitusmalli, joka perustuu ominaislujuuteen  $f_{p,0,1k}$   
Katkoviiva = ominaislujuuteen perustuva todellinen jännitysmalli  
Pistekatkiiviiva = ylilujuuteen perustuva todellinen jännitysmalli

## YLEISTÄ

Vuosina 2005 ja 2006 sattuneiden HI-palkkien vaurioiden jälkeen ympäristöministeriön *Rakennetun ympäristön osasto* päätti laadituttaa vuonna 2007 HI-palkkien suunnittelua varten erilliset ohjeet. Uudet yksityiskohtaiset suunnitteluohjeet perustuvat betonin Eurokoodi-suunnittelustandardiin (Eurokoodi 2 = SFS-EN 1992-1-1 ja sen kansallinen liite) sekä muuhun tietoon, joka tukee tätä standardia.

Eurokoodia 2 voidaan soveltaa materiaalimallien osalta taivutuskestävyyden laskemisessa, mutta itse taivutuskestävyyden laskemiseen standardissa ei ole ohjeita. Uusissa ohjeissa esitetään yksityiskohtainen menettely taivutuskestävyyden arvioimiseksi jännitettyjen rakenteiden käsikirjoissa osoitettujen periaatteiden mukaisesti.

Eurokoodi 2 sisältää selvät ohjeet leikkauskestävyyden laskemiseksi, jos palkissa ei ole uumareikiä. Samoin jännevoiman siirtoa ja ankkurointikestävyksien tarkastelua varten on selkeät ohjeet. Uumareikien vaikutuksista ei Eurokoodissa esitetä mitään, joten ohjeisiin laadittiin suunnittelusäännöt.

## RAJATILAT

Ohjeissa erotetaan erillisinä rajatiloina:

- Jännevoiman siirto, jolloin palkkien kuormituksen muodostavat elementin omapaino ja alkujännevoima.
- Elementin kuljetus, jolloin elementti on tuettu eri tavalla kuin lopullisessa kohteessa - tarkoituksena varmistaa riittävä stabiilius.
- Valmiin rakennuksen käyttörajatila, jolta osin kiinnitetään huomiota jännityshäviöiden muodostumiseen ja mahdolliseen halkeiluun sekä taipumien arvioimiseen.
- Murtorajatilatarkasteluin varmistetaan, että elementeillä on riittävä taivutus-, leikkaus- ja vääntökestävyys.

### Jännevoiman siirto

Jännevoiman siirto aiheuttaa poikkeuksetta vetoa ylälaippaan eikä elementin omapaino usein riitä estämään vetolujuuden ylittymistä, joka on hallittava riittävällä vetoraudoituksella  $A_{s,top} \geq 1,2 \frac{F_{ct}}{f_{sk}}$

kun  $F_{ct}$  on kokonaisvetovoima laskettuna ehyeen poikkileikkaukseen vaikuttavien vetojännityksien resultanttina. Jos elementin omaa painoa ei oteta huomioon, korostuu vetovoima virheellisesti ja vastaava raudoitus muodostuu ylisuureksi. Vaikka ylälaipan raudoitus jännevoiman siirron yhteydes-



Arto Suikka

3 Eurokoodi 2 sisältää selvät ohjeet leikkauskestävyyden laskemiseksi, jos palkissa ei ole uumareikiä.

sä ja kuljetuksen aikana on vedetty, valmiissa rakennuksessa raudoitus on puristettu ja sen toimivuus perustuu eri periaatteisiin kuin vedetyssä raudoituksessa.

Jännevoiman siirto aiheuttaa myös mahdollisten uumareikien pieliin vetojännityksiä, joiden suurimmat arvot voivat ylittää vetolujuuden  $f_{ctm}$ . Nämä vetojännitykset eivät häviä valmiin rakennuksen käyttöräjätilassa ja edellyttävät reikien pieliin hakarouditusta, jolle vetovoima voi siirtyä betonin vetolujuuden ylittyessä.

Jännevoiman siirron aikana suurin betonin puristusjännitys saa olla enintään 65 % siirron aikaisesta ominaislujuudesta (SFS-EN 1992-1-1 kansallinen liite).

#### Jännityshäviöt ja tehollinen jännevoima

Ohjeissa esitetään lausekkeet kutistumisesta, vierumisesta ja jänneterästen relaksaatiosta aiheutuvan jännityshäviön laskemiseksi, mutta ellei tarkempaa laskemista suoriteta, voidaan riittävällä tarkkuudella olettaa, että loppujännevoima  $P_{\infty}$  on 80 % ennen siirtoa jänneteräksissä vaikuttavasta voimasta,  $P_{\infty} = 0,8A_{p,pp}$ . Loppujännevoimaan verrannollinen venymätila toimii jännepunosten alkuvienymän ( $\epsilon_{pe} + \epsilon_{ce}$  kuvassa 1), joka murtorajatilassa vaikuttaa punosten plastisoitumiseen tai plastisoitumattomuuteen.

## MURTORAJATILOJEN TARKASTELU

### Leikkauskestävyys

Eurokoodi 2 sisältää yksinkertaiset ohjeet teräsbetoni- ja jännitetyn rakenteen leikkauskestävyyden arvioimiseksi, kun rakenteessa ei ole uuma-aukkoja. Aukkojen vaikutus leikkauskestävyyteen riippuu niiden koosta ja sijainnista poikkileikkauksen korkeussuunnassa. Uusissa suunnitteluohjeissa tehdään jako pienten ja suurten uumareikien välillä sen perusteella, voiko reiän kohdalle muodostua ns. Vierendeel-tyyppinen murtumistapa vai ei. Uumareikiä ei missään tapauksessa tule sijoittaa suuren leikkausvoiman vaikutusalueelle.

### Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyys  $M_{pl,Rd}$  lasketaan kuvan 1 mukaan.

Jännitetyn poikkileikkauksen taivutuskestävyys voi perustua sitkeään tai ei-sitkeään murtumistapaan. Tässä yhteydessä ei-sitkeä ei tarkoita varsinaista haurasta murtumista, joka liittyy betonin puristumurtumiseen ennen punosten ja vetoraudoituksen plastisoitumista. Ei-sitkeä murtuminen tarkoittaa betonin murtumista ennen todellista punosten plastisoitumista, vaikka plastisoituminen tapahtuisi suunnittelussa oletetun jännitys-muodonmuutosyhteyden mukaan. Ei-sitkeä murtuminen aiheutuu, jos punoksissa on riittävästi yllilujuutta ja suunnittelutarkastelussa punosten kokonaisvenymän mitoitusarvo  $\epsilon_{pd}$  on vain vähän suurempi kuin mitoituksessa käytettävän jännitys-muodonmu-

tosyhteyden myötövenymä  $\epsilon_{pyd}$ . Kuvassa 2 osoitetaan, että punosten yllilujuus voi aiheuttaa suunnittelussa aiotun sitkeän murtumisen muuttumisen ei-sitkeäksi, kun suunnittelu tapahtuu ominaislujuuteen perustuvan Eurokoodin mukaisen jännitysmallin perusteella ja punosten venymä  $\epsilon_{pd}$  on lähellä myötöarvoa  $\epsilon_{pyd}$ .

On tavallista, että betoniteollisuuden käyttämissä jännepunoksissa 1600/1840 voi esiintyä yllilujuutta niin, että myötöarvoissa  $\frac{f_{p,0,1max}}{f_{p,0,1k}} \approx 1,15$  mutta samaan aikaan

vetolujuusarvoissa  $\frac{f_{pu,max}}{f_{puk}} \approx 1,055$ .

Jotta punosten plastisoituminen todellisuudessa voi tapahtua, venymän  $\epsilon_{pd}$  täytyy olla suurempi kuin  $\epsilon_{p0,2}$ , joka käytännössä vastaa venymää  $1,4\epsilon_{pyd}$ .

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys voidaan arvioida käyttäen betonin jännitysmallina kuvan osoittamia malleja 1 tai 2 ja punoksien jännitysmallina kuvassa 2 esitettyä Eurokoodin 2 mukaista lujuenevaa mallia, jossa punosten kokonaisvenymä rajoitetaan arvoon  $\epsilon_{pd} \leq 0,02$ . Käytännössä suunnittelu voi kuitenkin ohjautua lähelle mallin näennäistä myötövenymää  $\epsilon_{pyd} = f_{p0,1k} / (\gamma_s E_p)$ , joka ei takaa vielä sitkeää murtumista. Kun otetaan huomioon punoksissa esiintyvä todennäköinen yllilujuus, sitkeän murtumisen ehtona on  $1,4\epsilon_{pyd} \leq \epsilon_{pd} \leq 0,02$ .



Arto Suikka

5  
Pääsääntöisesti palkin harjan kohdalle sijoitettavia liian isoja uuma-aukkoja tulee välttää.

Jos venymäehto  $\varepsilon_{pd} \leq 1,4\varepsilon_{pyd}$  ei toteudu, murtuminen voi olla ei-sitkeää ja taivutuskestävyyttä  $M_{pl,Rd}$  pienennetään ottamalla huomioon lisävarmuus  $\gamma_{br}$ , jolla säädelään ei-sitkeään murtumiseen liittyvää kokonaisvarmuutta:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl,Rd}}{\gamma_{br}} \text{ ja } \gamma_{br} = 1,7 \geq 0,5 \frac{\varepsilon_{pd}}{\varepsilon_{pyd}}; 1,2 \geq \gamma_{br} \geq 1$$

kun  $\lambda_{pyd} \approx \lambda_{pd} \lambda 1,4\lambda_{pyd}$

*Jännittämättömän vektorauoituksen käytön rajoitukset*

Jännittämättömyyden vektorauoituksella voidaan käyttää lisäämään taivutuskestävyyttä, mutta sen määrä  $\Sigma A_s$  voi olla syytä rajoittaa niin, että taivutusmurtorajatilassa puristetun poikkileikkauksen korkeus  $x_{cu}$  (kuva 1) mitoittavassa kohdassa on enintään

$$\frac{x_{cu}}{d_e} = 0,42, \quad d_e = \frac{d_p A_{p,fd} + \Sigma d_{si} A_{si,fd}}{A_{p,fd} + \Sigma A_{si,fd}}$$

Tämä sääntö ohjaa myös valitsemaan korkeampia poikkileikkauksia, joissa vältytään liiallisesta puristusraudoituksen suunnittelusta.

### KÄYTTÖRAJATILA

Betonin puristusjännityksiä rajoitetaan käyttörajatilassa niin, että  $\sigma_{c,max} \leq 0,45f_{ck}$ . Tällä varmistetaan, että lineaarisen viruman oletus on voimassa ja ylälaipan puristettujen tankojen jännitykset ovat enintään 90 % ominaislujuudesta.

Taipumien laskemisessa voidaan käyttää palkin tehollisena taivutusjäykkyytenä  $E I_{c,eff}$ , kun  $I_{c,eff}$  on 75 % harjan kohdalla olevan betonipoikkileikkauksen jäyhyysmomentista ja  $E_c$  on betonin kimmokerroin, johon sisältyy virumavaikutukset.

### YLÄLAIPAN RAUDOITTAMINEN

HI-palkeissa oletetaan taivutuskestävyyden kannalta kriittisiksi kohdiksi jänteen 1/3-pisteet, jos palkit ovat keskikohtansa suhteen symmetrisiä. Kuitenkin pääraudoituksen järjestely ja haat ylälaipassa voivat vaikuttaa määrävästi todelliseen murtumiseen.

Suunnitteluohjeissa asetetaan seuraavia vaatimuksia raudoituksen suunnittelulle:

- Ylälaipan tankoraudoitusta ei saa jatkaa erillisillä limityspaloilla. Vedetyt ja puristetut limijatkokset ovat toimintaperiaatteiltaan erilaisia. Puristettujen tankojen limijatkoksissa myös päättyvän tangon pään kautta siirtyä voimaa ja siitä aiheutuua lisääntynyt halkaisutaipumus, kun tangon koko on suuri. Tämä on otettu huomioon Eurokoodin 2 jatkoksia koskeissa säännöissä. Ylälaipan tankojen jatkaminen suunnitellaan puristusraudoituksen sääntöjä noudattaen.
- Palkin harjan kohdalle ei saa asettaa jatkosta.
- Ylälaipan puristusraudoituksen määrälle on asetettu yläraja sen turvaamiseksi, että raudoitus voidaan järkevästi suorittaa ja vältetään liian matalien poikkileikkauksien valitseminen.
- Puristettu raudoitus tulee ympäröidä haoilla, jotka ovat ominaisuuksiltaan umpihakoja vastaavia, jos suurimpien tankojen koko  $\sigma > 16$  mm.

Jännepunosten ja raudoitustankojen sijoittelussa noudatetaan SFS-EN 1992-1-1 sääntöjä ja kansallisen liitteen sääntöjä. Jännittämättömiä tankoja ei saa niputtaa eniten rasitetuilla alueilla ylälaipassa. Raudoitustankojen jatkos- ja ankkurointipituudet ovat erilaiset tarkasteltaessa vedettyjä ja puristettuja tankoja ja tämä otetaan huomioon uusissa

suunnitteluohjeissa.

Ylälaipan eniten rasitetuilla alueilla käytetään umpihakojen vaatimukset täyttäviä hakoja, joista tehtaiden käytössä jo olevia koeteltuja ratkaisuja esitetään suositeltavina hakamalleina:

- a) kaksiosaiset irtohaat, kuva 7a,
- b) umpihaat, joko kierrehakana tai irtohakana, kuva 7b.

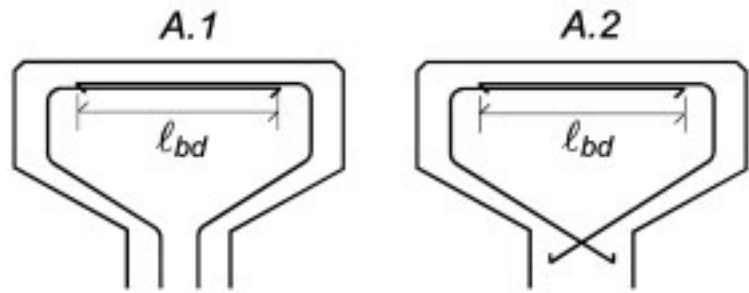
Ylälaipassa haoilta edellytetään samanlaisia ominaisuuksia kuin puristettuja tankoja pilareissa sitovilta haoilta. Seuraavien kuvien hakamallien katsotaan toimivan edellytyksien mukaisesti.

### UUMAREIKIEN SUUNNITTELU

Pääsääntöisesti tulee pyrkiä siihen, että ehjän poikkileikkauksen korkeus reiän yläpuolella,  $h_{c,top}$ , on suurempi kuin reiän alapuolella. Kun  $d_o$  on pyöreän reiän halkaisija, Vierendeel-vaikutusta ei katsota syntyvän jos  $d_o \leq h_{c,top}$  ja tämän ehdon täyttävät aukot luokitellaan pieniksi. Pienten uumareikien kohdalla leikkauskestävyys  $V_{Rd,s}$  voidaan laskea samanlaisista lausekkeista kuin umpiiumaisen rakenteen tapauksessa, kun otetaan huomioon aukon aiheuttama toimivan poikkileikkauksen korkeuden pienennys.

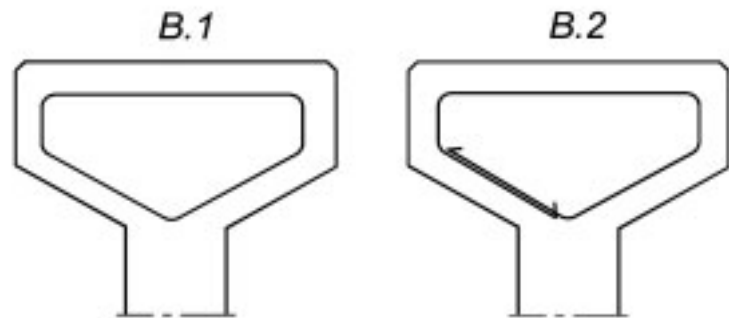
Suurten aukkojen sijoittelussa otetaan huomioon, että peräkkäisten aukkojen vaikutusalueella täytyy voida muodostua riittävän kestävyys omaava ristikkomekanismi ja leikkausvoima täytyy voida siirtää aukon ylä- ja alapuolisina osina tai kokonaisuudessaan aukon yläpuolisen poikkileikkauksen välittämänä.

Pääsääntöisesti palkin harjan kohdalle sijoitettavia aukkoja tulee välttää. Ellei tämä ole mahdollista, aukon yläpuolinen osa tulee suunnitella aina



7a

7a  
Mallit A, kaksiosaiset irtohaavat. Limitspituuden  $l_{bd}$  tulee täyttää vedettyjen tankojen jatkospituuden vaatimukset.



7b

7b  
Mallit B, umpihaat joko kierrehakana (B.1) tai irtohakana (B.2).

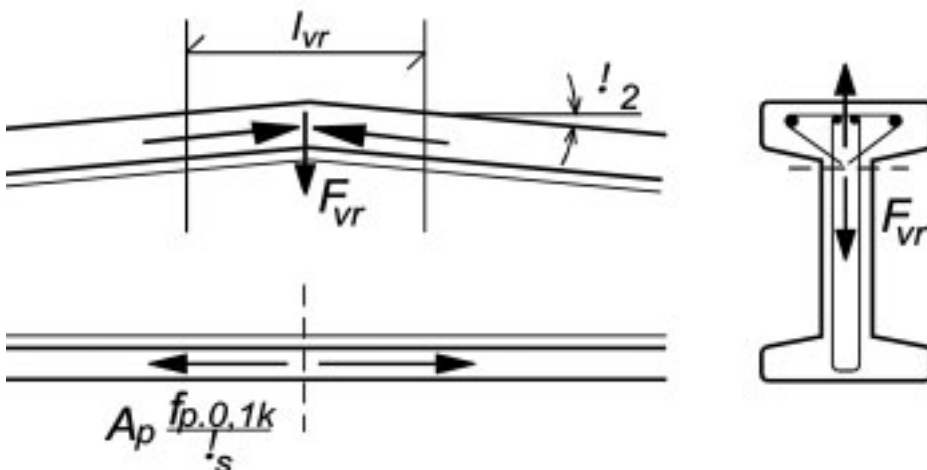
erikseen kyseessä olevaan poikkileikkausosaan vaikuttavan ulkoisesta taivutusmomentista aiheutuvan normaalivoiman ja harjan kohdalla tapahtuvasta normaalivoiman suunnan muutoksesta aiheutuvan taivutusmomentin suhteen.

Aukon ei katsota vaikuttavan taivutuskestävyyteen, jos aukko ei pienennä poikkileikkauksen tehollisen puristetun osan korkeutta (korkeus  $\lambda \lambda_{cu}$  kuvassa 1).

6

Harjan kohdalla tapahtuva ylälaipan suunnan muutoksesta aiheutuva pystysuora nostovoima otetaan kokonaan haoille, joilla sidotaan yhteen uuma ja ylälaippa:

$F_{vr} = 1,8 A_p \frac{f_p \cdot 0,1k}{\gamma_s} \sin \gamma_2$ . Haat voidaan sijoittaa pituudelle  $l_{vr} \approx \min \{d_{pr}/2, 1000 \text{ mm}\}$  kun  $d_{pr}$  on hyötykorkeus harjan kohdalla.



6

### NEW DESIGN GUIDELINES FOR PRE-STRESSED HI AND I BEAMS

After the accidents caused by the collapse of HI beams in 2005 and 2006, the Department of the Built Environment of the Ministry of the Environment decided in 2007 to have separate guidelines prepared for the design of HI beams. The new detailed guidelines are based on the Eurocode design standard (Eurocode 2 = SFS-EN 1992-1-1 and the national Annex to it) as well as on other knowledge, which supports this standard.

Eurocode 2 can be applied to the calculation of the flexural rigidity in terms of material models, but the standard does not provide instructions for the calculation of the actual flexural rigidity. The new guidelines provide a detailed procedure for the evaluation of the flexural rigidity in compliance with the principles presented in the manuals of pre-stressed structures.

Eurocode 2 contains clear instructions for the calculation of the shear strength of beams that have no web holes. Clear instructions are also provided for an analysis of the transmission of tendon force and anchorage strengths. Eurocode does not address the effects of web holes and for this reason design rules were included in the guidelines.