

Lausunto 5.11.2023

prof. TkT Anssi Laaksonen

## **Raudoitteen B500A käyttö tavanomaisessa betonielementtirakentamisessa**

### **Yleistä**

Betoniteollisuus ry:n Elementtisuunnittelun asiantuntijaryhmä on pyytänyt allekirjoittaneen näkemystä raudoitteen sitkeysluokan A käytöstä rakenteissa.

Raportti on laadittu huolellisesti ja se perustuu laatijan käsitykseen betonirakenteiden toiminnasta ja niiden suunnittelussa käytettävistä standardeista.

Raportin laatija ei vastaa mahdollisista virheistä ja niistä aiheutuneista vahingoista. Tämä raportti ei myöskään ole osa rakennesuunnitelmaa, vaan valinnat tulee rakennesuunnittelijan käydä tapauskohtaisesti läpi.

### **Selvityksen rajaus**

On noussut tarve selvittää millä ehdoilla sitkeysluokan A raudoitetta voitaisiin käyttää tavanomaisessa betonielementtirakenteisessa asuinkerrostalossa tai vastaavassa rakenteessa. Tähän tarpeeseen pyritään tällä lausunnolla vastaamaan. Rakenteiden suunnittelua käsitellään tässä eurokoodijärjestelmän [1] mukaan.

Aihepiiri on erittäin laaja ja tässä lausunnossa pyritään nostamaan esiin taustoja ja periaatteita keskeisistä aiheeseen liittyvistä kysymyksistä. Kysymys sisältää paljon rajauksia missä yhteydessä raudoitetta käytetään ja mitä rasituksia niillä on suunniteltu kannettavan. Kysymys sisältää myös paljon itse rakennesuunnittelussa käytettäviä otaksumia.

Aihepiiriin laajuuden vuoksi lausunnon lopuksi esitetään valituista tapauksista missä sitkeysluokan raudoitteen A käyttö olisi mahdollinen ja puolestaan missä ei ole mahdollinen.

### **Taustaa**

#### Yleistä

Betonieurokoodien [2] mukaisessa suunnittelussa raudoitteet jaotellaan sitkeyden osalta kolmeen luokkaan A, B ja C. Näistä luokka C on sitkein materiaali. Luokille on annettu vaatimuksia murto- ja myötölujuuden suhteelle sekä murtovenymälle.

Luokat eivät suoraan määrittele vaatimuksia kylmämuokatulle tai kuumavalssatulle raudoitteelle, vaan raudoitteiden ominaisuuksia verrataan luokkien antamiin vaatimuksiin. Vastaavasti kelalta oikaistulle raudoitteelle ei anneta erikseen ominaisuuksia, vaan ominaisuuksien tulee täytyä kelalta oikaisun jälkeen. Lisäksi tangon hitsaus vaikuttaa selvästi tangon venymäkykyyn.

Lähtökohtaisesti rakennesuunnittelija määrittelee käytettävän raudoitteen sitkeysluokan. Luokkaa ei voi vaihtaa ilman varmistusta rakennesuunnittelijalta. Tulee

ottaa huomioon, että samanlainen rakenne voi olla erilaisissa tilanteissa, joka on rakennesuunnittelijalla tiedossa, esimerkiksi onnettomuustilanteisiin varautumisen osalta.

### Vedetyn teräsbetonisen osan toiminta

Otaksetaan taustaksi ensin yleinen vedetty teräsbetoninen sauva, jossa raudoitettanko on betonisauvan keskellä. Betonin vetolujuuden ylityttyä muodostuu halkeama ja vetovoima välittyy kokonaisuudessaan raudoitteelle. Raudoitteen tartunnan ja vedetyn betonisauvan pinta-alasta riippuen muodostuu halkeamia tietyllä halkeamavälillä. Halkeamat voi muodostua teoreettisesta halkeamavälistä poiketen riippuen sauvan mitoista, rasitusjakaumasta ja betonin vetolujuuden hajonnasta. Halkeamat ja niiden leveydet muodostuvat tämän prosessin, eli nk. vetojäykistysvaikutuksen tuloksena.

Kun raudoitetta vedetään niin paljon, että raudoite myötää, niin sen plastiset muodonmuutokset keskittyvät halkeaman alueelle. Vastaavasti tangon pinnan siirtymäero betoniin kasvaa ja tartuntajännitys lopulta laskee. Tämä tarkoittaa, että vetojäykistysvaikutus voimistuu huomattavasti. Tällöin sauvan keskimääräinen venymä on merkittävästi alhaisempi kuin venymä halkeaman alueella. Kun raudoite ylittää myötörajan, niin sen toimintaan ja venymiskykyyn vaikuttaa raudoitteen sitkeysluokka, eli muokkauslujittumiseen liittyvät ominaisuudet kuten vetolujuuden suhde myötölujuuteen ja vetolujuutta vastaava venymä.

Edellisen yleisen kuvauksen ja esimerkiksi lähteiden [2, 3] perusteella rakenteen myödon jälkeen tapahtuvaan toimintaan plastisella alueella (sitkeyteen) vaikuttaa raudoitteen materiaalin osalta myös sen tartunta. Toki rakenteen sitkeyteen vaikuttaa merkittävästi myös itse rakenteen mitat, rakennesysteemi ja raudoitussuhde, mutta niihin ei tässä kohtaa keskitytä.

On otettava huomioon, että mitoituksessa käytettävät mallit on hyvin tyypillisesti validoitu raudoitteen sitkeysluokkaan B tai C kuuluvilla raudoitteilla. Tällöin sitkeysluokan A raudoitteille ei useinkaan ole tiedossa kattavasti koetuloksia. Lisäksi usein validointi on tehty laajimmin noin lujuusluokan 500 raudoitteille. Yleisesti voidaan sanoa, että sitkeysluokan A raudoitteella tai raudoiteverkolla toteutettu rakenne pyrkii muodostamaan yhden isomman halkeaman kuormitetulle alueelle. Puolestaan sitkeysluokan B ja C raudoitteilla halkeamia pyrkii muodostumaan useampia. Tällöin sitkeysluokan A raudoitteilla toteutetulla rakenteella on alhaisempi muodonmuutoskyky.

### Rakenteen sitkeys [3]

Lähtökohtaisesti teräsbetonirakenteen tulee toimia sitkeästi. Tällöin murtoa lähestyttäessä venymät kasvavat voimakkaasti. Yleisesti rakenteen plastinen muodonmuutoskyky on välttämätön kun:

- Murtuminen on ennakoitavissa suurista siirtymistä ennen lopullista sortumista
- Suunnittelussa käytetään
  - o lineaarista kimmoteoriaa ja todellisen rakenteen jäykkyys poikkeaa kimmoteorian otaksumista, jolloin rasitusjakauma poikkeaa otaksutusta

- ja lisäksi poikkileikkauksen kapasiteetin arvioinnissa käytetään plastisuusteoriaa
- lineaarista kimmoteoriaa hyödyntäen momenttien uudelleenjakautumista
  - kimmo-plastista tai täysplastista mallia, joka otaksuu mitoitettavan ilmiölle rajattoman plastisoitumiskyvyn
  - venymien yhteensopivuuteen ja tasapainotilaan perustuvaa mallia, joka edellyttää jännitysten uudelleenjakautumista kimmoista tilanteesta, joka esimerkiksi nostaa erityisen vaatimuksen leikkausraudoituksen muodonmuutoskyvylle
- Rakenteeseen kohdistuu estettyjä muodonmuutoksia, joita ei ole nimenomaisesti otettu mitoitusrasituksissa huomioon, kuten tukipainumaeroa, lämpötilakuormia sekä kutistumaa ja virumaa
  - Rakenteelta edellytetään vaurionsietokykyä odottamattomille tilanteille, kuten onnettomuustilanteet: jatkuvan sortuman estäminen, törmäyskuormat, sortumakuormat ja räjähdyskuormat, väestösuoja
  - Rakenteen rasitukset jakautuvat uudelleen palotilanteessa, palo voi olla hyvin paikallinen mutta vaikutus paljonkin laajemmin rakennetta koskeva
  - Raudoitusta taivutetaan ja uudelleen taivutetaan
  - Rakenteelta tarvitaan voimakasta energian dissipaatiota toistokuormituksessa, kuten maanjäristystilanteessa

Ottaen huomioon edellä esitetty laaja kirjo aiheeseen liittyviä kysymyksiä, ovat myös raudoitetta koskevat sitkeysvaatimukset olennaisia.

### Rakenneosan toiminta

Rakenneosat ovat toiminnaltaan hyvinkin erilaisia. Laattamaisessa rakenteessa on tyypillisesti rasitusten uudelleen jakautumiskykyä rakenneosan sisällä. Kuormista aiheutuneet rasitukset eivät myöskään tyypillisesti ole tasan jakautuneita ja lisäksi raudoite on usein suunniteltu sijoittamalla suurimman rasituksen mukaan määritettyä taivutusraudoitetta laajemmalle alueelle. Lisäksi raudoitemäärän mitoittaa usein käyttörajatilan vaatimukset.

### Muuta taustaa

Raudoitetangon materiaaliominaisuudet vaikuttavat myös muihin liittyviin kysymyksiin, vaikka kyse ei olisi suoranaisesti rakenteen plastisoitumiskyvystä. Esimerkiksi väsytytkuormitetuissa rakenteissa raudoitetangon teräsmateriaali ja pintakuviointi vaikuttavat saavutettavaan väsymiskestävyyteen ja tangolta edellytetään yleensä vähintään sitkeysluokkaa B väsytykskestävyyden lisäksi.

Tangon hitsaaminen vaikuttaa tangon muodonmuutoskykyyn, esimerkiksi raudoitusverkoissa, jatkohitsauksissa ja muissa hitsaamalla kootuissa teollisissa raudoitteissa. Hitsaustapa ja hitsauksen koko vaikuttavat kuinka paljon venymiskyky alenee. Tuleekin ottaa huomioon, että materiaaliominaisuudet esimerkiksi verkolle tulee tehdä hitsausliitoksen yli. Hitsaaminen vaikuttaa myös verkon taivutettavuuteen, kuten esimerkiksi lähteessä [4] on vaatimuksissa eroteltu.

## Raudoitteen sitkeysluokan A raudoitteiden käyttö valituissa tapauksissa

Edellä esitettyjen ja täydentävien lähteiden pohjalta voidaan tunnistaa raudoitteen sitkeysluokan A raudoitteiden käyttö mahdolliseksi alla esitetyissä tapauksissa. Lisäksi tulee ottaa huomioon jäljempänä esitetty lista ei mahdollisista tapauksista mikä voivat tuoda rajoitteita mahdollisten tapauksien listaan.

- Raudoitteena minkä käyttötarkoitus ei koske rakenteen kantokykyä tai sen toimintaa murtuessa.
  - o pintaraudoitus tai muu raudoite mikä ei osallistu rakenteen murtorajatilan kantokykyyn, kuten ainoastaan halkeilua rajoittava raudoite, kuten esimerkiksi ontelolaataston tukialueen taivutusraudoite, mikäli sitä ei tarvita onnettomuustilanteen, kuten jatkuvan sortuman estämiseen.
  - o Raudoittamattoman seinän rengasteräkset, mikäli ne eivät osallistu rakenteen toimintaan jatkuvan sortumisen estämisessä tai ne eivät mitoituksellisesti myötä elementin kiinnityspisteessä tai rakenteen nostotilanteessa.
- Seuraavissa seinärakenteissa, mikäli raudoitus ei osallistu rakenteen toimintaan jatkuvan sortumisen estämisessä:
  - o Seuraamusluokan CC2-luokan rakenteena, jos seinärakenne ei ole vedetty kun:
    - seinän raudoitussuhde ( $A_s/A_c$ ) molempien pintojen raudoitus huomioon ottaen on enintään 0.02
    - betonipeite tarkasteltavaan raudoitukseen on vähintään kaksi kertaa tangon halkaisija, mutta kuitenkin vähintään 20 mm
    - raudoitetangon halkaisija on enintään 12 mm
    - raudoite ei ole osa työsaumaraudoitetta
  - o Raudoittamattomana seinänä mitoitettun seinäelementin tai seinän kantamattoman kuoriosan seinäelementin verkkoraudoitus
- Leikkausraudoituksena kun:
  - o puristusdiagonaalin loivinta sallittua kulmaa rajoitetaan arvoon  $\cot \theta \leq 2,0$  ja rakenteeseen ei kohdistu aksiaalisia vetorasituksia
  - o vähimmäishakaraudoituksena käytetään 20 % korkeampaa määrää kuin standardit ja ohjeet edellyttävät
- Leukapalkin leuan verkkoraudoituksena, mikäli raudoitus ei osallistu rakenteen toimintaan jatkuvan sortumisen estämisessä kun:
  - o puristusdiagonaalin kulma rajoitetaan arvoon  $\cot \theta \leq 1,5$  ( $a/z \leq 1,5$ )
  - o raudoite on ankkuroitu täyteen vetolujuuteen molemmista päistään
- Palkkien pääraudoitteen ankkurointina tuelle U-lenkeillä silloin kun tuelle ankkuroituvana vetovoimana on suunnittelussa käytetty arvoa  $V_d \cdot \cot \theta$
- TT-laatan kansiverkko, mikäli raudoite ei toimi olennaisena osana jatkuvan sortuman estämistä
- Seinä- ja laattaelementtien reunahakakampa, mikäli raudoite ei toimi olennaisena osana jatkuvan sortuman estämistä
- Teräsbetonisen maanvaraisen alapohjan raudoitteena
- Teräsbetonilaatan tai kuorilaatan pintavalun raudoitteena

Raudoitteen sitkeysluokan A käyttö ei ole mahdollista alla luetelluissa tapauksissa.

- Rakenteen taivutusraudoitus on suunniteltu käyttäen lineaarista kimmoteoriaa hyödyntäen mitoituksessa momenttien uudelleenjakautumista
- Jatkuvaa sortumaa estävänä side-, liitos- tai rengasraudoitteena.
- Jatkuvan sortuman estämiseen osallistuvana raudoitteena
  - o Laskelmin on mahdollista arvioida jäävätkö raudoituksen venymät alle myötörajan myös halkeamien lokalisoituessa, jolloin käyttö on mahdollista. Potentiaalisesti tällainen tilanne voi muodostua seinäelementtien raudoitteiden yhteydessä.
- Staattisesti määräämättömän palkin taivutusraudoitus silloin kun rakenne on suunniteltu käyttäen lineaarista kimmoteoriaa ottamatta rasituksissa huomioon merkittävää tukipainumaeroa, lämpötilakuormia ja muita nk. pakkovoimia aiheuttavia tekijöitä sekä kiertymistarvetta ja -kykyä ei ole rakennekohtaisesti määritetty
- Hakaraudoituksena silloin kun puristusdiagonaalien kulmaa ei ole rajoitettu ja venymien yhteensopivuutta ei ole tarkistettu venymäkyvyn riittämiseksi.
- Kun raudoitetta uudelleen taivutetaan alkuperäisen taivutuksen jälkeen
- Mitoitettaessa rakenne strut-and-tie mallin perusteella silloin kun muodonmuutostarvetta ja -kykyä ei ole rakennekohtaisesti määritetty
- Väestönsuojarakenteissa
- Rakenteissa joihin kohdistuu törmäys- tai muu onnettomuuskuorma
  - o Laskelmin on mahdollista arvioida jäävätkö raudoituksen venymät alle myötörajan, jolloin käyttö on mahdollista. Analyysissä on otettava huomioon, että törmäys- tai onnettomuustilanteen ekvivalenteilla staattisilla kuormilla saadut venymät ovat tosiasiallista törmäystilannetta selvästi pienemmät.
  - o Potentiaalisesti käyttö mahdollistuu esimerkiksi pienten törmäyskuormien tapauksessa, kun törmäyskuorma aiheuttaman rasitus on hyvin pieni verrattuna rakenteen törmäyskuorman keston nähden.
- Väsytytkuormitetuissa rakenteissa
- Silta- ja infrarakenteissa, edellytetään vähintään sitkeysluokkaa B [5]

## **Yhteenveto**

Tässä lausunnossa on otettu kantaa laajaan kysymykseen. Aluksi on esitetty taustaa ja näkökulmia, jonka pohjalta on tehty suosituksia sitkeysluokan A raudoitteen käytöstä.

Suosituksukset eivät ole kattavia aihepiiriin laajuuden vuoksi, vaan on annettu tapauksia mitkä on tunnustettu mahdollisiksi, ja on tunnustettu tapauksia missä käyttö ei ole mahdollista.

5.11.2023 Valkeakoskella

prof. TkT Anssi Laaksonen

## Lähteet

1. SFS-EN 1990 + A1 + AC, Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet, SFS, 2006
2. SFS-EN 1992-1-1, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, SFS, 2015
3. CEB Bulletin 242, Ductility of reinforced concrete structures, CEB-FIP (fib), 1998
4. SFS 1257, Betoniteräksset. Kylmämuokattu harjatanko B500K, SFS, 1996
5. Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2, Liikenneviraston ohjeita 5/2022