Teräskuitubetonin käyttäminen kantavissa rakenteissa

Jürgen Mandl, Dipl.-Ing.
Martti Matsinen, dipl.ins.

Tämän artikkelin lähtökohtana on Dipl.-Ing. Jürgen Mandlin aiheesta laatima kirjoitus, jonka dipl.ins. Martti Matsinen on kääntänyt suomeksi. Suunnittelu pohjautuu saksalaisiin ohjeisiin ja Eurokoodiin. Vaikka jotkin artikkelin kaavat ja merkinnät saattavat poiketa Suomessa käytetyistä, on tämä mitoitus täysin Eurokoodin mukainen.

Jürgen Mandl on kantavien teräskuitubetonirakenteiden pioneeri maailmassa. Hän oli kuitubetonin valmistajana ja rakennesuunnittelijana toteuttamassa maailman ensimmäistä kantavaa kuitubetonilaattaa Saksassa ja sai tästä projektista Baijerin osavaltion innovaatiopalkinnon. Myöhemmin urallaan hän on toiminut eri teräskuituvalmistajien palveluksessa edelleen kehittäen ratkaisujaan ja vastaa tällä hetkellä suuren teräsvalmistajan, Severstal-metizin teräskuituasioista.

Lähtökohdat ja uudet ohjeet

Teräskuitubetonin käyttäminen lattiarakenteissa on jo nykypäivää. Kirjoittajan pitkäaikaiset kokemukset ja lukuiset tutkimukset ovat osoittaneet, että teräskuitubetoni plastisen käyttäytymisensä ansiosta sopii erinomaisesti myös kantaviin rakenteisiin. Ongelmana on vain ollut suunnitteluohjeiden puute, mikä on estänyt teräskuitubetonin säännöllisen käytön rakenteellisissa kohteissa.

Euroopassa on toteutettu jo kymmenittäin kohteita, joissa teräskuitubetonia on käytetty perustuksissa, kantavissa laatoissa ja muissa rakenteellisissa kohteissa, mutta nämä ovat perustuneet täysimittakaavaisiin kuormituskokeisiin ja tilaajan / loppukäyttäjän luottamukseen. Suomessa lähimmäksi näitä ratkaisuja on päästy paalulaattakohteissa, joita on jo suuressa määriin toteutettu teräskuitubetoniratkaisuina.

Jotta tämä hiljalleen käytännöksi tuleva menetelmä kantavien rakenteiden toteuttamiseksi saisi paremman tuen, on useissa maissa kehitetty ohjeita ja sääntöjä kantavien rakenteiden suunnitteluun. Menetelmä tarjoaa merkittäviä taloudellisia ja ajallisia etuja projektien toteuttamisessa ja siksi nämä uudet ohjeet tulevat varmasti lisäämään teräskuitubetonin käyttämistä kantavissa rakenteissa.

Kaikki valmistuneet ohjeet (ks. viitteet artikkelin lopussa) pohjaavat teräskuitubetonin halkeilun jälkeiseen käyttäytymiseen. Emme tässä artikkelissa tarkemmin käy läpi varsinaisia testimenetelmiä, joita on useita, vaan esitämme saksalaisiin ohjeisiin pohjautuvia suunnittelumenetelmiä.

Saksalaiset ohjeet [4] julkaistiin maaliskuussa 2010 liitteenä DIN 1045:een. Ensimmäinen varsinainen teräskuitubetonistandardi laadittiin normien EN1992-1-1, EN1992-1-2 ja EN206 pohjalta ja julkaistiin lokakuussa 2013. Tämä suunnitteluohje [5] pohjautuu σ-ε -käyttäytymiseen 4 pisteen kuormitustestissä (kuvat 3 ja 4). Tämän saksalaisen ohjeen mukaisesti teräskuitubetonia voidaan käyttää rakenteellisessa betonissa / kantavissa rakenteissa useissa erityyppisissä kohteissa.

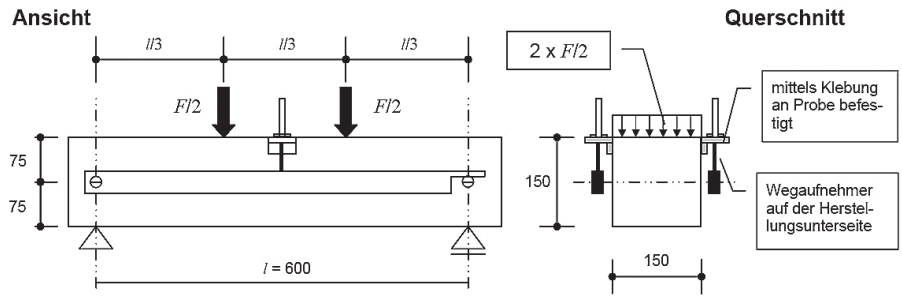
Teräskuitubetonin toimintamekanismi

Teräskuitubetonin toiminta perustuu tilanteeseen, jossa betoni on halkeillut. Tällöin hauras betoni on täysin menettänyt vetolujuutensa. Perinteisesti vetorasitukset otetaan tässä vaiheessa vastaan tanko- tai verkkoraudoituksella, jonka tulee siirtää rasitukset halkeamien yli.

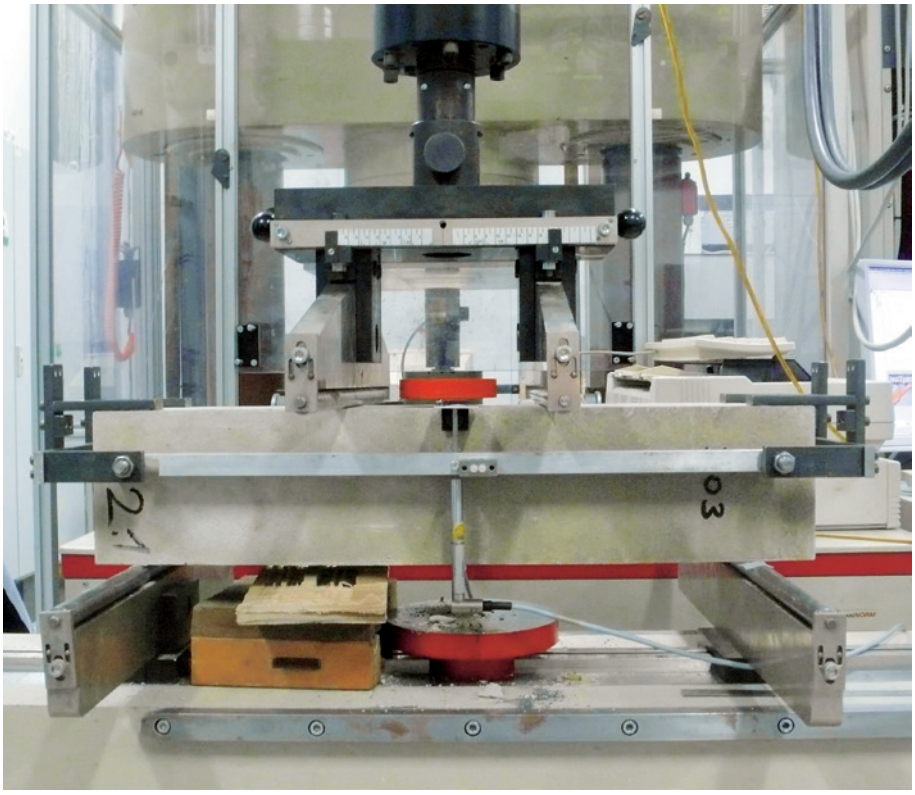
Periaatteessa koukkupäinen teräskuitu (ns. HE-kuitu) toimii samalla tavalla eli siirtää rasi-

1 Kantava laatta teräskuitubetonista kaarevassa toimistotalossa Kotzebue-kadun varrella Tallinnassa.

2 Teräskuitubetoni + APC-raudoitus.



3



4

3 4-pisteen taivutustesti R-arvon määrittämiseen

4 Testilaitteisto R-arvon määrittämiseen (viite 5)

tukset halkeamien yli. Ero on siinä, että teräskuituja on huomattavasti enemmän ja ne ovat tiheämmässä kuin raudoitustangot. Kantavissa rakenteissa teräskuitujen käyttömäärät ovat suuruusluokkaa 50...100 kg/m³ ja esimerkiksi Hendix Prime 75/52 kuidun tyypillisellä 70 kg/m³ annostuksella kuitujen keskimääräinen välimatka on 13,7 mm. Tämä runsas ja tiheä kuitujen määrä takaa sen, että teräskuitubetonimassa on "täynnä" kuituja (kuva 2), jotka siirtävät vetojännityksiä halkeamien yli.

Merkittävin ero perinteisen ja kuituraudoituksen välillä on murtumismekanismi. HE-kuidut vedetään ulos halkeaman kohdalta. Tämä edellyttää, että päätykoukut täytyy suoristaa, mikä vaatii energiaa (kuva 5). Tätä energiavaatimusta voidaan vielä nostaa käyttämällä korkealujuista kuitua (esim. Hendix Primen vetolujuus on yli 1500 N/mm²). Toinen tekijä, joka vaikuttaa tähän energiavaatimukseen on koukkujen muotoilu ja toleranssit, mihin suunnittelijoiden kannattaa kiinnittää huomiota kuituja vertaillessaan. Liian loiva kulma ja/tai vaatimattomat toleranssit heikentävät kuidun laatua merkittävästi.

Kun betoni halkeaa ja kuitu vedetään ulos halkeamasta, alkaa kuitubetoni käyttäytyä plastisesti ja tapahtuu kuormansiirto ehjälle betonille. Kantavissa rakenteissa tulee kuitumäärän ja -tyypin olla sellainen, että jäännöslujuusarvo on suurempi kuin betonin vetolujuus (kuva 6). Tämä vahvistaa kuormien jakaantumista staattisesti määräämättömissä rakenteissa tai yhdistettynä perinteiseen raudoitukseen. Staattisesti määrätyissä rakenteissa kuitujen epätasainen jakaantuminen saattaa aiheuttaa riskin koko rakenteen romahtamiseen. Siksi staattisesti määrätyt rakenteet voidaan toteuttaa kuitubetonilla vain yhdessä perinteisen raudoituksen kanssa.

Teräskuitubetonin momenttikapasiteetti

Teräskuitubetonissa kuituja on erittäin suuri määrä ottamassa vetojännityksiä vastaan. Niinpä momenttikapasiteetin määrittäminen on iteratiivinen prosessi, jossa etsitään tasapaino betonin puristusvyöhykkeen korkeuden kanssa (kuva 7). Kun tasapaino on löydetty, voidaan teräskuitubetonin sekä mahdollisen lisäraudoituksen momenttikapasiteetti summata alla olevan kaavan mukaisesti:

$$m_{Rd} = f_{fd} \times z_f + f_{sd} \times z_s$$

Ulkoisten kuormien aiheuttama taivutusmomentti ei saa ylittää rakenteen momenttikapasiteettia eli

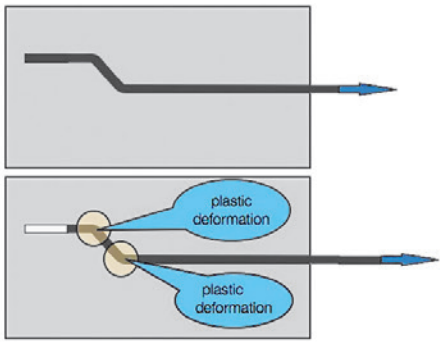
$$m_{Rd} \geq m_{Ed}$$

Ulkoisten kuormien taivutusmomentti voidaan laskea perinteisin menetelmin. Kun puhutaan perustuksista, ei laskentaa voi tehdä lattiamitoitusohjelmilla vaan rakenne pitää tutkia FEM-ohjelmilla ottaen huomioon elastisen alusta, pohjaveden paineen sekä rakennuksesta tulevat kuormat. 8-kerroksisen toimistorakennuksen (kuvat 8–9) perustus toteutettiin

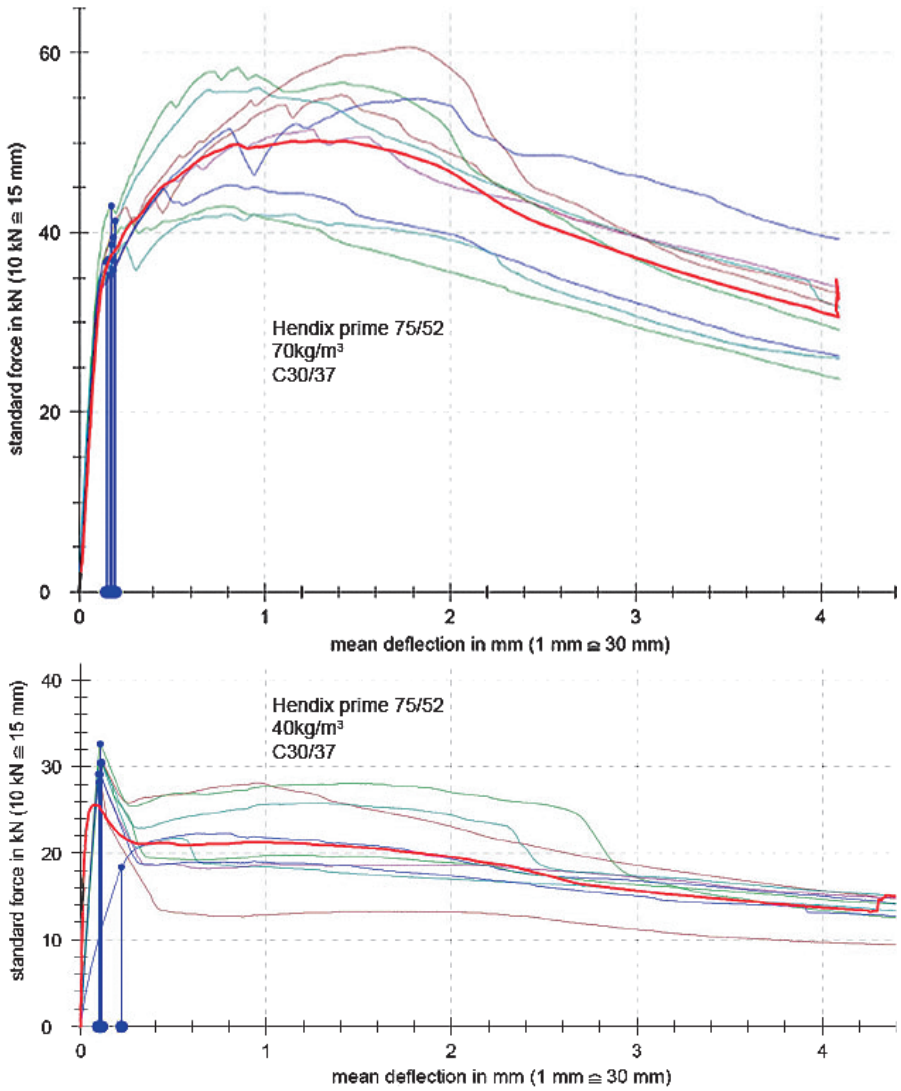
5 Kuidun plastinen muodonmuutos, kun sitä vedetään ulos betonista. Kuidun tulee olla niin lujaa, ettei se katkea. Kuidun muotoilu optimoidaan siten, että sen ulosvetäminen vaatii mahdollisimman paljon energiaa.

6 Hendix Prime 75/52 kuidun koetulokset annostuksilla 40 kg/m³ ja 70 kg/m³, betonimassa C30/37

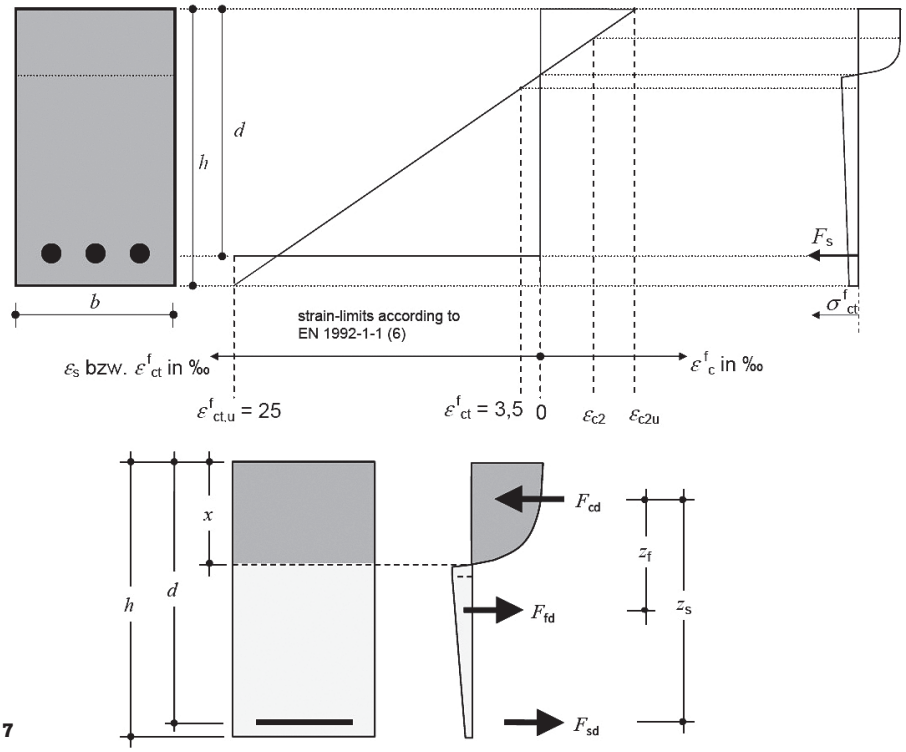
7 Teräskuitubetonin venymät ja jännitykset (viite 5)



5



6



7

8

9

10

8 Toimistorakennus Kreutzwaldi 3 Tallinnassa. Runsaan 2.000 neliömetrin perustus toteutettiin teräskuitubetoniratkaisuna, kuituna 60 kg^3 Hendix Prime 75/52.

9 Kreutzwaldi 3:n perustuksessa käytettiin vain teräkuituja, lukuun ottamatta 4 valualueen välisiä saumakohtia.

10 Viron kansallismuseon perustuslaatan valu Tartossa.

käyttäen 60 kg/m^3 Hendix Prime 75/52 teräskuitua. Tällä määrällä ja perustuksen paksuudella 700 mm hallittiin kaikki rakenteesta tulevat kuormat niin, ettei lisäraudoituksia tarvittu, rakenteen momenttikapasiteetti oli 330 kNm/m. Lisäksi laskennassa saatiin tuloksena maksimi halkeamaleveys 0,1 mm, jolloin ei tarvittu suojaa pohjaveden tunkeutumista vastaan.

Tällä hetkellä työn alla on Viron Kansallismuseo Tartossa. Tässä rakenteessa perustuksen paksuus on vain 250 mm, jolloin kuituraudoituksen lisäksi joudutaan käyttämään jonkin verran tankoraudoitusta suurimpien momenttien kohdalla, kuten paikoissa, joissa on korkea piste- tai viivakuorma pilarien tai seinien kohdalla (kuva 10).

Jatkuvan sortuman estäminen kantavissa laatoissa

Kantavissa laatoissa tarvitaan lisäraudoitus estämään jatkuva sortuma tilanteissa, joissa tuki laatan alla jostain syystä pettää. Tämän lisäraudoituksen suuruus riippuu laatan mitoista (l_x ja l_y) ja voidaan laskea kaavalla:

$$a_{sb} = \frac{0,5 \times w_s \times l_x \times l_y}{0,85 \times f_{yd} \times 1m}$$

jossa

$$w_s = \max \begin{cases} p_{tot} + g_{tot} \\ 2 \times g_{tot} \end{cases}$$

Alueilla, joilla on seinämäinen tuki, jatkuvan sortuman estävä ns. APC-raudoitus on jaettu tasaisesti pitkin seinälinjaa. Pilarilaatoissa APC-raudoitus on sijoitettu pilarikaistoille. Tämä APC-raudoitus voidaan ottaa huomioon suunniteltaessa kantavia kuitubetonilaattoja plastisin menetelmin.

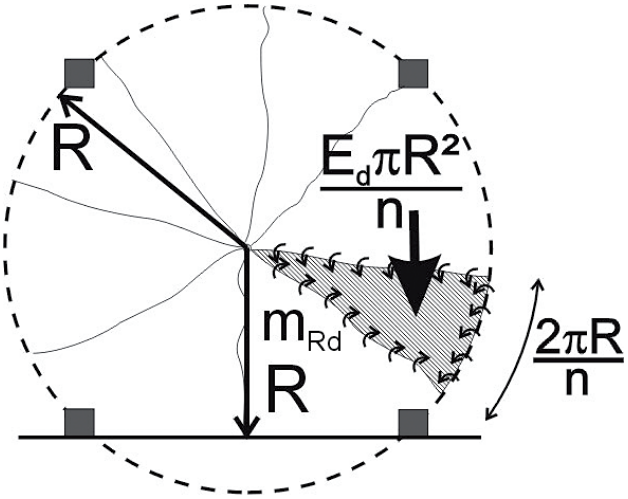
Mitoitus plastisuusteorian mukaan

Koska teräkuitubetonin käyttäytyy plastisesti, on plastisuusteoria helppo ja ihanteellinen mitoitusmenetelmä kantaville kuitubetonilaatoille. Edellä kuvattu APC-raudoitus pilarilta pilarille jakaa laatan useaan pienempään kenttään, joihin syntyy paikallinen murtomekanismi. Oletettu ja testein todistettu murtokuvio on Johansenin ja Timoshenkon mallin mukainen.

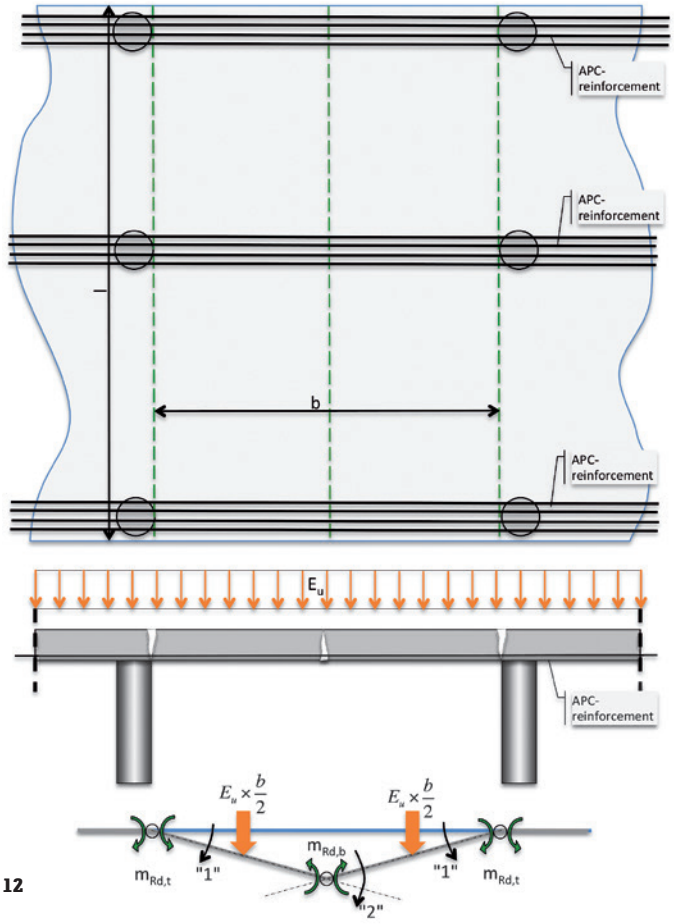
Mallissa halkeamat kulkevat ympyrän muotoisesti tukien yli (kuva 11). Tätä linjaa pitkin kulkee minimi taivutusmomentti mRd,t ja siihen syntyy plastinen nivel. Laatan pohjassa halkeamat kulkevat säteittäisesti laatan keskipisteestä kohti reunaa. Nämä halkeamat jakavat laatan n kappaleeseen segmenttejä ja näihin kohtiin syntyy maksimi taivutusmomentti mRd,b. Lisäraudoitusta käytettäessä maksimi- ja minimimomentit pitää laskea erikseen mutta puhtaalla kuitubetonirakenteella mRd,b = mRd,t.

Rajakuorma E_u voidaan tässä tapauksessa laskea kaavalla:

$$\frac{E_u \cdot \pi \cdot R^2}{n} \cdot \frac{R}{3} = m_{Rd} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n} + m_{Rd} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n} \cdot \kappa_{Rand}$$



11



12

11 Pilarein tuetun kantavan laatan paikallinen murtumismekanismi tasaisella kuormituksella

12 Pilarein tuetun kantavan laatan murtumismekanismi koko rakenteen osalta

13 Rocca-Al-Mare, Tallinna – 18-kerroksinen toimistorakennus, jonka kantavat laatat toteutettiin teräskuitubetonilla

Kaavan oikean puolen ensimmäinen osa kuvaa momenttia säteittäisten nivelten kohdalla ja jälkimmäinen osa kuvaa momenttia ympyränmuotoisen nivelen kohdalla. Lisäkerroin K_{Rand} ottaa huomioon sen, että kulma- ja reunakentissä ei ole tätä negatiivista momenttia, kertoimien arvo reunakentässä on 0,75 ja kulmakentässä 0,5.

Kun edellä oleva kaava lasketaan, saadaan rajakuorma:

$$E_u = 6 \times \left(\frac{m_{Rd}}{R^2}\right) \times \left(1 + K_{Rand}\right)$$

Sallittu kuorma on siis riippumaton segmenttien n määrästä. Seuraavaksi on vain varmistettava, että sallittu kuorma on suurempi kuin kuormituksista tuleva rasitus E_d.

Paikallinen varmuustarkastelu on periaatteessa edellä olevien arvojen vertailu elastisessa tilassa ja lähteen [5] mukaa tällöin riittää pelkkä kuituraudoitus. Koko rakenteen osalta, jolloin halkeamat kulkevat yli useamman kentän, on tehtävä plastisessa tilassa, jolloin lähteen [5] mukaan on käytettävä sekä perinteistä että kuituraudoitusta. Siksi APC-raudoitus on huomioitava myös laskelmassa. Tällöin $m_{Rd,b}$ ei ole yhtä suuri kuin $m_{Rd,t}$. Murtumamekanismissa on tässä tapauksessa kaksi niveltä ja minimimomentit $m_{Rd,t}$ tukilinjoilla sekä yksi halkeama laatan pohjassa muodostaen nivelen ja maksimimomentin $m_{Rd,b}$ (kuva 12). APC-raudoituksen pinta-ala A_y jaetaan halkeamapituudella l, jolloin saadaan raudoitusaste a_{sb}. Joissain kohteissa halkeamalinjat voivat olla eripituiset, mikä tulee tällöin huomioida laskelmissa. Tässä tapauksessa oletamme linjojen olevan yhtä pitkät. Energia kuvan 12 mukaisesti voidaan laskea kaavalla:

$$w_i = l \times m_{Rd,t} \times "1" + l \times m_{Rd,b} \times "2" + m_{Rd,t} \times "1"$$

Sallittu kuorma saavutetaan, kun energia w_i on yhtä suuri kuin rajakuorman E_u aiheuttama energia, joka voidaan laskea kaavalla:

$$w_e = 2 \times \left(l \times \frac{b}{2} \times E_u \times \frac{b}{4}\right)$$

Jos kuormituksen aiheuttama rasitus E_d ei ylitä rajakuormaa E_u, on suunnitelma OK.

Läpileikkautumisen tarkistaminen

[5] edellyttää, että läpileikkautuminen on tarkistettava Eurokoodin [1] mukaisesti käyttäen modifioitua arvoa $V^f_{Rd,s}$. Perinteisen betonirakenteen leikkauslujuus $V_{Rd,s}$ saa siis lisäarvoa teräskuiduista $V_{Rd,cf}$ ja leikkauslujuuden arvo lasketaan kaavalla:

$$V^f_{Rd,s} = V_{Rd,s} + V_{Rd,cf}$$

Kantaville laatoille, joissa ei ole lisäraudoitusta, voidaan leikkauslujuus kriittistä rajaa pitkin viitteen [1] mukaan laskea kaavalla:

$$\nu_{Rd,cf} = 0,85 \times \frac{\alpha^f_c \times f^f_{ctR,u}}{\gamma^f_{ct}}$$

jossa $\alpha^f_c = 0,85; \quad \gamma^f_{ct} = 1,25$

$f^f_{ctR,u}$ on jäännösvetolujuus [5], joka määritellään testien perusteella.

Käyttörajatilatarkastelut

[5] edellyttää myös halkeilun ja taipumien tarkastelun viitteen [1] mukaisesti mutta tätä osaa ei tässä artikkelissa käsitellä.

Toteutettuja kohteita ja taloudellista tarkastelua

Edellä esitetyillä suunnittelumenetelmillä voidaan nykyään suunnitella kantavia kuitubetonirakenteita voimassa olevien normien mukaisesti. Toteutetut kohteet osoittavat, että tällä menetelmättä voidaan saavuttaa suuria taloudellisia ja ajallisia hyötyjä. Esimerkkinä mainittakoon vuonna 2008 Tallinnassa toteutettu 18-kerroksinen toimistotaloprojekti Rocca Al Mare (kuvat 13 ja 14), jossa kuitubetonia käyttäen saavutettiin 9 viikon säästö työajassa. Lisäksi säästettiin torninosturien käytössä ja materiaalissa niin, että hyödyt olivat todella merkittävät. Tämä kohteen kuitubetonimitoituksen laati Jürgen Mandl ja toteutti Betotrade Oü.

Jürgen Mandl on ollut suunnittelemassa ja toteuttamassa kymmeniä projekteja, joissa on käytetty eri valmistajien eri kuitutyyppejä. Viimeisimpiä projekteja vuodelta 2013 ovat aiemmin tässä artikkelissa mainittujen lisäksi mm. toimisto- ja asuinrakennus Kotzebuessa Tallinnassa sekä rivitalokohde Ravila Tallinnassa (kuvat 15 ja 16).

13

14

14 Jatkuvan sortuman estävä raudoitus (APC) Rocca-Al-Maren kantavissa laatoissa

15 Tallinnalainen rivitalokohde, jonka kantavat laatat toteutettiin teräskuitubetonilla.

16 Teräskuitubetoni on pumpattavaa myös isoilla kuituannostuksilla, tässä kohteessa 70 kg/m^3

Yhteenvetoa

Standardien ja suunnitteluohjeiden kehittyessä voidaan teräskuitubetonia käyttäen nykyään suunnitella myös perustuksia, kantavia laattoja ja muita rakenteellisia kohteita. Jo aiemmin on lukuisia kohteita toteutettu koerakennuskohteina ja myös laboratorio- tai täysmittakaavatestien pohjalta.

Uudella menetelmällä on saavutettavissa merkittäviä säästöjä sekä taloudellisesti että työajassa. Lisäksi teräskuitubetonilla voidaan helposti valaa hankalampia rakenteita kuin normaaliraudoitusta ja sen suojabetonivaatimuksia käyttäen.

Tämä on jo nykypäivää Keski-Euroopassa ja Baltiassa – milloin Suomessa.

Kirjallisuutta

[1] EN 1992-1-1-2004 Eurocode 2 – design of concrete structures – general rules and rules for buildings

[2] EN 1990-2002 Eurocode – basis of structural design

[3] DIN 1045 parts 1-3 + DIN EN 206-1

[4] DAfStb-guideline „Stahlfaserbeton" 03/2010 amendments and modifications to DIN 1045 and DIN EN 206-1

[5] DAfStb-guideline „Stahlfaserbeton" 10/2013 amendments and modifications to EN1992-1-1 and EN 206-1 and DIN EN 13670

[6] SIA Recommendations 162/6, Societé Suisse des Ingénieurs et des Architectes, Edition 1999

[7] ÖVBB-guideline „Faserbeton" 07/2008

[8] By56 – Teräskuitubetonirakenteet 2011

Summary

Steel fiber reinforced concrete (sfrc) is meanwhile a wide spread and popular structural material for use in the application of industrial floors. Long term experiences and the results of many research projects show that this composite material is due to its plastic behavior in combination with a high strength all over the collapse mechanism ideal for use in structural applications for a fully plastic design.

The lacking design rules for this material prohibited the regular use of sfrc for structural applications. Only on an experimental level projects for foundation floors, elevated floors or other concrete structures could be realized with sfrc with regardance of the postcrack behavior due to fiber in concrete.

To close this gap the standardisation committees of several countries have developed and published different design guidelines as an amendment to local and national design rules based on experiences and realised projects. Significant economical advantages on job sites as well as time saving effects can now be realized also in projects with structual concrete applications by teh use of steel fiber reinforced concrete.

With the development of standards for the design and application of steel fiber reinforced concrete structures this composite material can be used also for usual structural applications like foundation floors and free suspended elevated floors or other structural applications. Many projects with such applications had been realized in the past on experimental level according to the German draft of this standard as an amendment on EC2 and based on rendered tests in laboratories as well as in 1:1-scale. Today structural applications are being designed in ultimate limit state as well as serviceability limit state according to the meanwhile published standard.

Significant time saving effects at the jobsite as well as reduced investments in material and other resources make this technology an interesting alternative to traditional solutions with mesh and rebar only reinforced concrete structures.

This article explains the principle mechanism of sfrc and the design of structural applications according to newest standards exemplarily at some realized projects.

15

16