



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Ivan Ikhno

Teräskuitubetonisen paalulaatan suunnittelu BY66 ohjeen mukaisesti

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

15.4.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Ivan Ikhno Teräskuitubetonisen paalulaatan suunnittelu BY66 ohjeen mukaisesti 49 sivua + 8 liitettä 15.4.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	rakennetekniikka
Ohjaajat	Osastopäällikkö Eero Virtanen, Sweco Rakennetekniikka Oy Tuntiopettaja Matti Leppä, Metropolia Ammattikorkeakoulu
<p>Työssä tutkittiin teräskuitubetonin ominaisuuksia ja sen soveltamista paalulaattoihin. Kuitubetoni avaa uusia mahdollisuuksia betonirakentamisessa. Sen käyttö mahdollistaa merkittäviä säästöjä työkustannuksissa raudoitustöiden vähentämisen vuoksi. Harjateräksien poisto myös lisää vapautta betonirakenteiden muotojen monimutkaisuudessa.</p> <p>Tällä hetkellä teräskuitubetonin käyttö on hyvin harvinainen Suomessa virallisten ohjeiden puutteen takia. Uusi teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje BY66 2018 antaa suunnittelijalle enemmän ohjeita kyseisten rakenteiden mitoitukseen.</p> <p>Työssä perehdyttiin uusiin ohjeisiin ja sen antamiin uusiin mahdollisuuksiin teräskuitubetonirakenteille sekä ohjeen haasteet, mahdolliset puutteet ja kehitystä vaadittavat osat. Tavoitteena oli luoda selkeää ymmärrystä teräskuitubetonirakenteiden toteutusprosessista suunnittelusta valmistukseen. Opinnäytetyössä tutkittiin suunnittelu- ja toteutusohjeita sekä toteutuneita projekteja Suomessa ja Euroopassa. Asiasta pyrittiin keräämään mahdollisimman paljon käytännöllisiä tietoja haastattelujen ja kirjallisuustutkimuksien avulla.</p> <p>Käytännön arvoa opinnäytetyö saa Excel-laskentapohjan ansiosta, jonka avulla teräskuitubetonisen paalulaatan suunnittelu sekä aiheeseen perehtyminen nopeutuvat.</p>	
Avainsanat	teräskuitubetoni, paalulaatat, BY66

Author Title Number of Pages Date	Ivan Ikhno Design of a Steel Fiber Concrete Pile Slab According to the BY66 Design Instruction 49 pages + 8 appendices 15 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree Programme in Civil Engineering
Professional Major	Professional Major Structural Engineering
Instructors	Eero Virtanen, Team Manager, Sweco Rakennetekniikka Oy Matti Leppä, Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences
<p>The thesis focused on the properties of steel fiber concrete and its applicability to pile slabs. Fiber reinforced concrete offers new opportunities in concrete construction. The potential cost savings from using SFRC are significant due to the reduction in reinforcement installation work. Removing traditional reinforcing bars also increases freedom in the complexity of the shapes of concrete structures.</p> <p>Currently the use of steel fiber reinforced concrete is very rare in Finland due to the lack of official guidelines. The new design instructions for reinforced concrete structures BY66 2018 gives the designer more instructions for calculating such structures.</p> <p>The new guidelines and the new possibilities that it enables for steel fiber reinforced concrete structures, as well as the challenges of the instruction, possible shortcomings and the parts required for the development were studied. The aim was to create a clear understanding of the implementation process of steel fiber reinforced concrete structures from design to manufacture. The design and implementation instructions as well as implemented projects in Finland and Europe were also examined. The purpose was to gather as much practical information as possible through interviews and literature research.</p> <p>The thesis gets practical value from the Excel calculation model, which accelerated the design of the steel fiber reinforced concrete pile slab and the familiarization with the topic.</p>	
Keywords	steel fiber reinforced concrete, pile slabs, BY66

Sisällys

Lyhenteet	7
1 Johdanto	2
1.1 Työn tausta	2
1.2 Työn tavoitteet	2
1.3 Työn rajaukset	3
2 Betoni materiaalina	3
2.1 Yleistä	3
2.2 Betonin käyttö Suomessa	3
2.3 Betonin ominaisuudet	5
2.3.1 Raudoittamaton betoni	5
2.3.2 Teräsbetoni	6
3 Kuitubetoni	8
3.1 Historia	8
3.2 Kuitujen tyypit	9
3.2.1 Teräs	9
3.2.2 Muut	11
3.3 Kuitubetonin käyttö maailmalla	13
3.3.1 Delta Apartments, Belgia	13
3.3.2 Edificio Central LKS Ingenieria, Espanja	14
3.3.3 Ditton nams shopping mall, Latvia	14
3.3.4 Marupe Office, Latvia	14
3.3.5 Triangle office, Estonia	15
3.3.6 Rocca Tower, Estonia	15
3.4 Kuitubetonin käyttö Suomessa	16
3.4.1 Toteutetut projektit	16
3.4.2 Kuitubetonin ajankohtainen asema Suomen rakentamisessa	17
4 Teräskuitubetonin ominaisuudet	18
4.1 Teräskuitubetonin toimintaperiaate	18
4.2 Kuitupitoisuus	20
4.3 Työstettävyys	23

4.4	Kuitujen orientaatio	23
4.5	Teräskuitujen korroosio	26
4.6	Palo-ominaisuudet	27
5	BY66 Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje 2018	30
5.1	Yleistä	30
5.1.1	Suunnitteluohje	30
5.1.2	Vaativuusluokat	30
5.1.3	Materiaaliosavarmuusluvut	31
5.1.4	Jäännöstaivutusvetolujuuden luokitus	32
5.1.5	Jäännösvetolujuuden mitoitusarvo	33
5.1.6	Jännitys-muodonmuutosyhteys	34
5.2	Murtorajatila	37
5.2.1	Taivutuskestävyys	37
5.2.2	Leikkauskestävyys	39
5.2.3	Lävistys	40
5.2.4	Onnettomuusraudoitus	40
5.3	Käyttörajatila	41
6	Muut suomalaiset ohjeet	43
6.1	BY 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011	43
6.2	BY45/BLY7 Betonilattiat 2018	44
6.3	BY 71/RIL 149-2019 Betonirakenteiden työmaatoteutus	44
7	Taloudellinen puoli	44
7.1	Materiaali	44
7.2	Työt	45
8	Vaikutus ympäristöön	45
9	Laskentapohja	46
9.1	Laskentapohjan sisältö	46
9.2	Laskenta	47
9.3	Laskennassa huomioitavat asiat	47
10	Johtopäätökset	48
	Lähteet	50

Liitteet

Liite 1. Hendix Prime 75/52 kuidun koetulokset annostuksilla 40 kg/m³ ja 70 kg/m³, betonimassa C30/37

Liite 2. Kuitubetonin käyttäytyminen standardin SFS-En 14651 mukaisen palkkitestin perusteella.

Liite 3. Yksinkertaistettu menetelmä tavallista tankoraidoitusta sisältävälle kuitubetonille, muodonmuutos- ja jännitys jakaumat.

Liite 4. Yksinkertaistettu menetelmä tankoraidoittamattomalle kuitubetonille, muodonmuutos- ja jännitys jakaumat.

Liite 5. Yleinen menetelmä tankoraidoitetuille tai -raidoittamattomalle kuitubetonille, muodonmuutos- ja jännitys jakaumat.

Liite 6. Esimerkkilaskenta tankoraidoitettuna teräskuitubetonilaatan kapasiteetista murtorajatilassa.

Liite 7. Esimerkkilaskenta tankoraidoittamattoman teräskuitubetonilaatan kapasiteetista murtorajatilassa.

Liite 7. Laskentapohjan yhteenvetovälilehti.

Lyhenteet

AVCP	Assessment and Verification of Constancy of Performance, Suoritustason pysyvyyden arviointi- ja varmennusjärjestelmät.
BY	Suomen betoniyhdistys.
CTOD	Crack tip opening displacement, halkeaman kärjen vastakkaisten pintojen välinen etäisyys 90 °: n leikkauskohdassa.
KRT	Käyttörajatila.
MRT	Murtorajatila.
SFRC	Steel fiber reinforced concrete, teräskuitubetoni.

”Rakentamisen on joustavasti sopeuduttava niihin elämän monimuotoisiin tarpeisiin, joita se on tarkoitettu palvelemaan. Tästä johtuu, että rakennusala on yhtä vaihteleva monimuotoinen kuin inhimillinen elämä itsekin. Ratkaisuissaan se pyrkii, paitsi teknillisen tarkoituksenmukaisuuteen, myös inhimillisen tunteen vaatimaan yksilöllisyyteen”

Mika Waltari
Rakennustaide ja standardi, 1942

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Opinnäytetyön tilaajana toimii Sweco AB konserniin kuuluva Sweco Rakennetekniikka Oy, jonka toimiala on suunnittelu- ja asiantuntiapalvelut rakennesuunnittelussa. Sweco on Suomen konsulttiryhtymien lippulaiva, joka tarjoaa laajan palveluvalikoiman asiakkailleen. Rakennesuunnittelun kehitys on nopea ja Sweco ottaa käyttöön edelläkävijänä uudet ohjeet ja teknologiat mahdollisimman pian. Teräskuitubetonin käyttö oli hyvin rajoitettu, ennen kuin vuonna 2018 julkaistu Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje BY 66 avasi teräskuitubetonirakenteille uusia mahdollisuuksia. Uudet mahdollisuudet tulee tutkia ja ottaa käyttöön yrityksen palvelutarjonnan laajentamisen vuoksi.

1.2 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on tutkia uusia suunnitteluohjeita, niiden tarjoamia uusia mahdollisuuksia, sekä teräskuitubetonisten rakenteiden ajankohtaista roolia Suomen rakentamisessa.

Tutkimus suoritetaan rakennesuunnittelijan näkökulmasta. Työssä selvitetään, miten teräskuitubetonisen rakenteen suunnittelun ja toteutuksen vuorovaikutus poikkeaa perinteisen teräsbetonirakenteen toimintamallista, mikä on suunnittelijan rooli kyseisessä ketjussa ja miten ohjeita hyödynnetään rakenteiden mitoituksessa.

Käytännönläheisyys on työn painopiste. Aiheesta haastatellaan asiantuntijoita. Tuloksena pyritään luomaan selkeä toimintamalli rakennesuunnittelijalle ja rakenteiden mitoitusta helpottava Excel-laskentapohja.

1.3 Työn rajaukset

Tutkimus rajataan teräskuitubetonin hyödyntämiseen paalulaatoissa, joissa käytetään vain onnettomuustapauksia vaadittavaa määrää perinteistä tankorauhoitusta tai laatoissa, joissa käytetään sekä teräskuituja että tankorauhoitusta. Työssä tutkitaan vain teräskuituja.

2 Betoni materiaalina

2.1 Yleistä

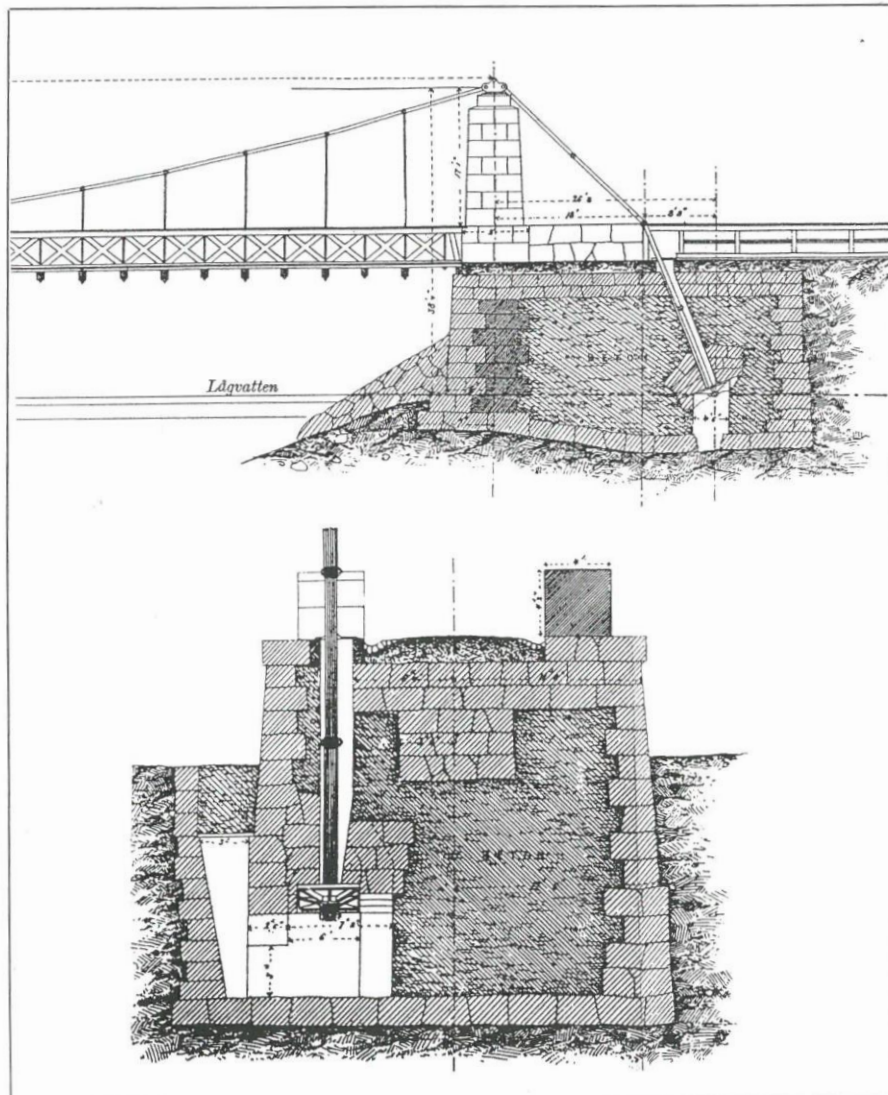
Betoni on hyvin vanha materiaali, vanhin tunnettu betonirakenne on Lepenski Virissä (Serbia) löydetty 25 cm paksu betonilattia, jonka arvioitu rakentamisaika on 5600 eaa. Betoni on hyvin kestävä materiaali ja jotkut betonirakennukset, kuten Pantheon, ovat pystyssä jopa nykyaikana. Lähes koko betonin käytön historian aikana käytetty sementti oli luonnonperäinen, joten betonin käyttö ei ollut yleistä. [1.] Tilanne muuttui, kun vuonna 1824 Joseph Aspdin patentoi portlandsementin valmistuksen ja vuonna 1844 Isaac Johnson vahingossa paransi Portlandsementin valmistusmenetelmän nykyisenkaltaiseen. [2.] Uuden menetelmän potentiaali huomattiin heti ja seuraavien viidenkymmenen vuoden aikana betoni yleistyi lähes kaikkialla.

2.2 Betonin käyttö Suomessa

Suomen suuriruhtinaskuntaan ensimmäinen erä Portlandsementtiä saapui jo 12 vuotta sen keksimisen jälkeen ja yhden epäonnistuneen yrityksen jälkeen, vuonna 1914 oli perustettu Paraisten Kalkkivuori Oy, josta alkoi kotimaan valloittaminen betonilla. [2.]

Suomeen ensimmäiset betoniteknikan tiedot toi Hannoverin polyteknisestä koulusta valmistunut Endre Lekve, kun vuonna 1849 perustettiin Helsingin teknillinen reaalikoulu. Lekve opetti yksinään kaikki rakennusinsinöörien ammattiopinnot, suunnitteli, valvoi ja urakoi lukuisia rakennusprojekteja. Suomen ensimmäinen betonirakenne, josta jäi

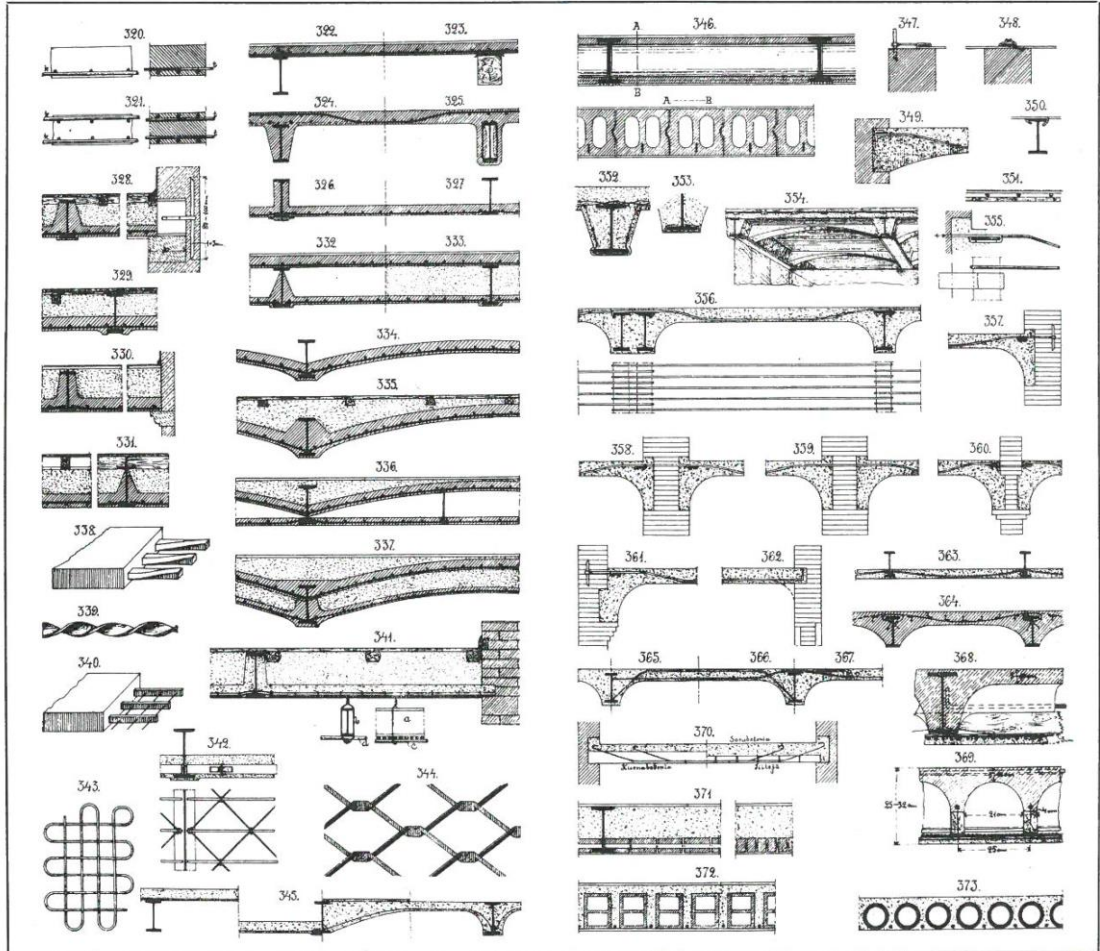
kirjallisia tietoja, on vuonna 1877 valmistunut Kiviniemen riippusilta. Sillan perustukset ovat tehty betonista. [2.]



Kuva 1. Endre Lekven suunnittelema Kiviniemen silta. Valmistunut 1877.

Vuosisadan vaihteeseen asti betoni pysyi ainoastaan perustuksien materiaalina, kunnes betonin ja raudan yhdistäminen alkoi yleistymään (teräsbetoni oli patentoitu vuonna 1867 alun perin kukkaruukkujen valmistusta varten). Raudan käyttö mahdollistaa betonin käyttöä myös taivutetuissa rakenteissa puristettujen lisäksi. Teräsbetoni on löytänyt käyttötarkoituksensa hyvin nopeasti välipohjarakentamisessa ja hieman myöhemmin palkkirakenteissa. Alussa betonivälipohjien suurimpana etuna pidettiin sen hyvää

palonkestävyyttä puuvälipohjiin verrattuna. Rauditusmenetelmät olivat hyvin monenlaisia ratakiskoista spiraaliteräksiin, kunnes standardisointikausi rajasi teräsrakenteet perinteisiin harjateräksiin. [2; 3.]



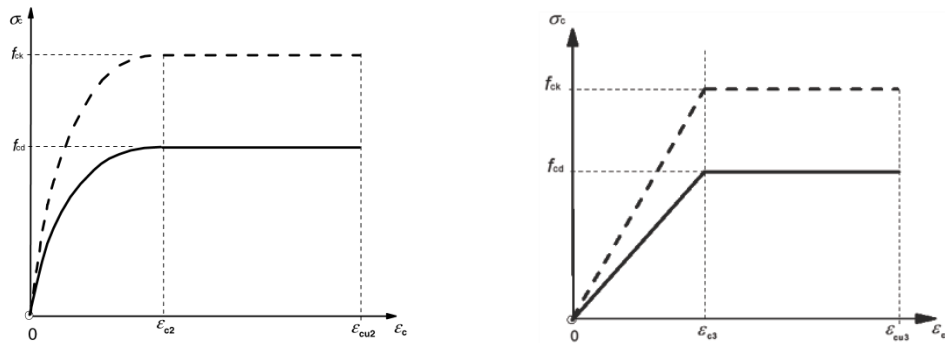
Kuva 2. Vuosisadan vaihteessa käytettyjä teräsbetonisia välipohjarakenteita, 1908.

2.3 Betonin ominaisuudet

2.3.1 Raudoittamaton betoni

Betoni on komposiittimateriaali, joka koostuu sementistä, runkoaineesta, vedestä ja mahdollisista lisäaineista. Reseptiä säätämällä voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, tiiveyteen, pakkaskestävyyteen, työstettävyyteen ja lujuuden kehityksen nopeuteen.

Betonin puristuslujuus on hyvin iso ja vetolujuus on pieni, sen takia raudoittamaton betoni on harvinainen, koska sen käyttö on rajattu puristettuihin rakenteisiin. Betoni on luotettava ja kestävä materiaali, jolle on löytynyt käyttöä monissa rakennusvaiheissa perustuksista kattotiileihin. [4.]

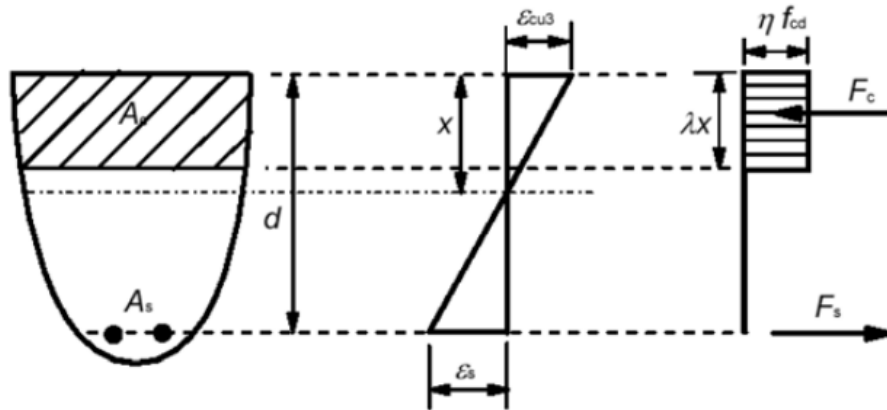


Kuva 3. Puristetun betonin paraabeli-suorakaide-kuvio (vas.) ja bilineaarinen jännitys-muodonmuutosyhteys (oik.). [5.]

Kuvissa 3. ja 4. on esitetty puristetun betonin jännitys-puristumakuvaaja, mistä voidaan havaita, että betonin jännitys kasvaa muodonmuutoksen mukaan, kunnes puristuma nousee betonin maksimilujuuden saavuttamiskohdan vastaavaan ϵ_{c2} -arvoon (ϵ_{c3}). Sen jälkeen betonin jännitys pysyy vakiona, kunnes muodonmuutos ei ylitä betonin murtopuristuman arvoa ϵ_{cu2} (ϵ_{cu3}). Kyseisten periaatteiden mukaiset laskennat antavat varmalla puolella olevat arviot rakenteen mitoituksessa sekä raudoittamattomana, että raudoitettuna.

2.3.2 Teräsbetoni

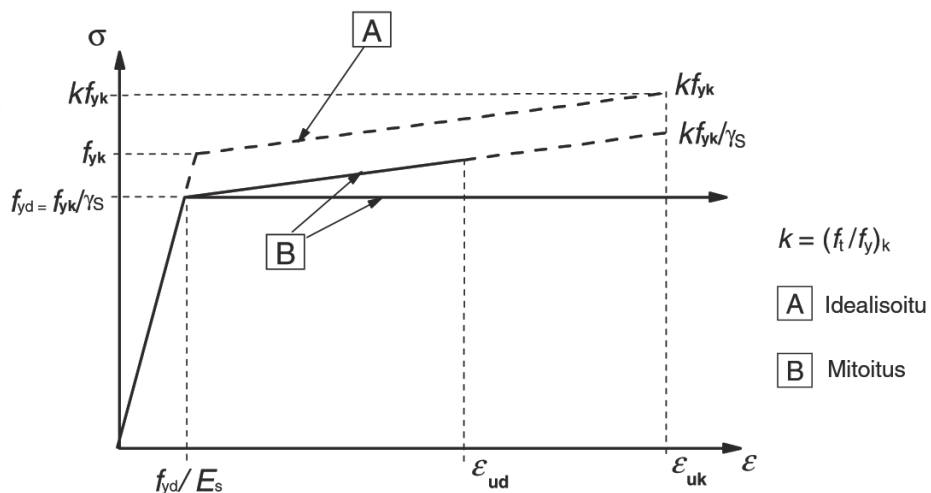
Betonin käyttö taivutetuissa rakenteissa on mahdollinen raudoituksien avulla. Teräsbetoni on rakenne, jossa puristusrasitukset siirtyvät betonille ja vetorasitukset raudoitukselle. (Kuva 4) Kyseisellä yhdistelmällä voidaan saada kestävä massiivinen rakenne. [4; 5.]



Kuva 4. Suorakaiteen muotoinen jännitysjaakauma. [5.]

Yllä olevassa kuvassa on esitetty taivutetun teräsbetonirakenteen jännitysjaakauma, missä x on poikkileikkauksen voimien painopiste. Laskentojen yksinkertaistamiseksi voidaan olettaa, että puristuspuolen jännitys on vakio ηf_{cd} ja vaikutusalue on suorakaide korkeudeltaan λx . Tavallisille betoniluokille ($f_{ck} \leq 50$ MPa) $\eta = 0,8$ ja $\lambda = 1,0$. Betonin pienen vetolujuuden vuoksi koko puristusjännitystä vastaava vetojännitys siirtyy suoraan raudoitukselle. Suurimmaksi puristumaksi oletetaan betonin lujuusluokkaa vastaavaa murtopuristumaa. Tällöin raudoituksen venymän ε_s suhteen toimii yhtälö:

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{d} = \frac{\varepsilon_s}{d-x} \quad (2.1)$$



Kuva 5. Betoniteräksen jännitys-venymäjaakauma [5.]

Betoniteräksen jännitys-venymäjakauma (Kuva 5) on periaatteeltaan sama, kuin betonin jännitys-puristumajakauma. Maksimijännitys voi olla nouseva, jolloin sallittu venymä rajataan arvoon ϵ_{ud} . Raudoituksen pinta-ala on hyvin pieni verrattuna poikkileikkauksen pinta-alaan, joten yleensä käytetään kuvaajaa, jonka maksimijännitys pysyy vakiona välillä $f_{yd}/E_s \leq \epsilon < \epsilon_{uk}$.

3 Kuitubetoni

3.1 Historia



Kuva 6 Savitiilet.

Kuituja sisältävät materiaalit eivät ole uutuus rakentamisessa. Jo muinaisaikoina jouhi ja lanta sekoitettiin saveen tiilien valmistuksessa tai rakenteiden vahvistuksessa. 1900 tienoilla asbesti oli kovassa käytössä rakennusmateriaaleissa. Asbestia lisättiin myös

betoniin sen lujuusominaisuuksien parantamiseksi. Kun asbestin haitallinen vaikutus terveydelle oli todettu ja sen käyttö kiellettiin, rakennusteollisuus tarvitsi korvaavaa materiaalia ja maailmalle ilmestyi teräs-, lasi-, polymeeri-, sekä hiilikuituja ja muita harvemmin käytettyä kuitutyyppejä. Kuitujen käytöllä oli hyvin pitkään vain perinteisen teräsbetonin ominaisuuksia parantava vaikutus, mutta uudella vuosituhannella alkoi yleistymään idea, että teräskuidut voivat korvata harjateräkset. [6.]

3.2 Kuitujen tyypit

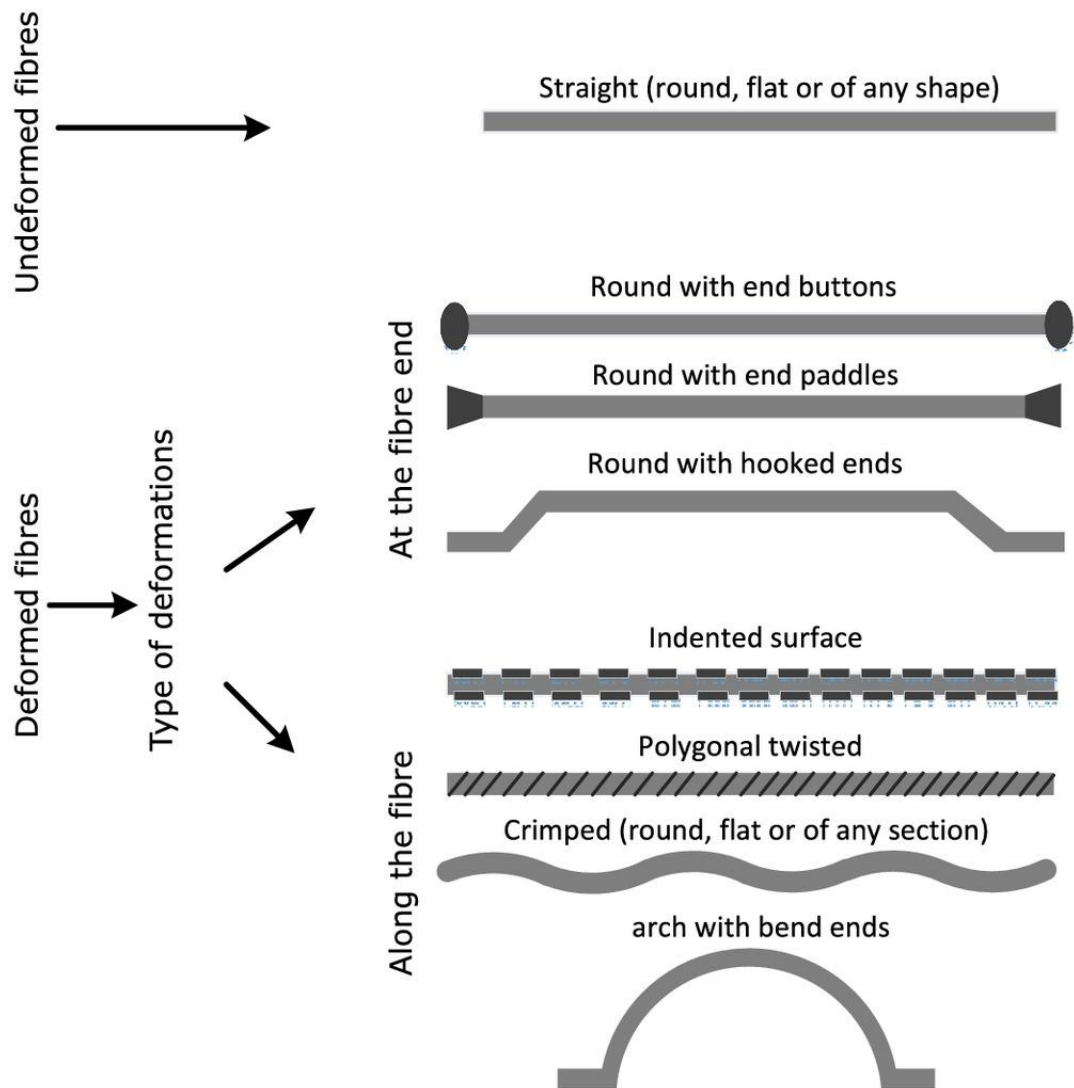
3.2.1 Teräs

Teräskuidut ovat tällä hetkellä ainoa kuitutyyppi, jota on mahdollista käyttää Suomessa toimivien normien mukaan kantavissa betonirakenteissa raudoituksen korvaajana. [7.]

Teräskuitujen valmistustapoja on monenlaisia:

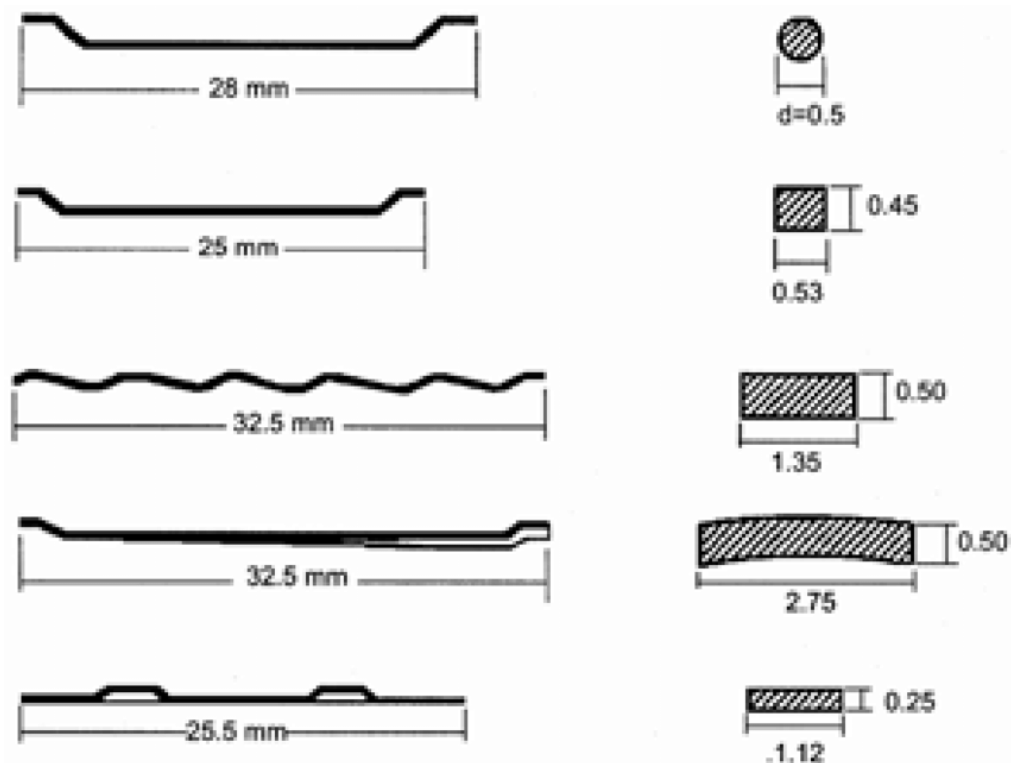
- Kylmävedetystä teräslangasta katkaistuja kuituja (Yleinen Suomessa)
- Leikattuja kaistaleita
- Sulaerotettuja kuituja
- Kylmävedetystä teräslangasta höylättyjä kuituja
- Teräspaloista rouhittuja kuituja

Teräskuidut voivat olla suoria tai muotoiltuja (Kuva 7). Kuitujen muotoilu huomattavasti parantaa kuidun ja betonin kitkaa. Yleisin kuitumuoto Suomessa on langasta kylmävedetty koukkupäinen teräskuitu (Round with hooked ends), mutta muutkin tyypit ovat saatavilla.



Kuva 7. Kuitujen muodot. [9.]

Teräskuitujen poikkileikkaus voi olla myös erilainen, mutta muut, kuin pyöreät ovat harvinaisesti käytössä (Kuva 8).



Kuva 8. Teräskuitujen poikkileikkaukset.

3.2.2 Muut

Kuitujen valmistukseen on käytössä laaja valikoima materiaaleja. Pintahalkeamien rajoittamiseen aktiivisesti käytetään polymeerikuituja (myös muovikuidut). Koon perusteella muovikuidut jaetaan mikro- (Kuva 9 vas.) ja makrokuituihin (Kuva 9 oik.). Mikro- kuitut ovat kooltaan hyvin pieniä, pituus 10-20 mm ja paksuus 20-40 μm , mikro- kuituja käytetään laastin ja ohuen betonikerroksen plastisen kutistuman halkeilun hallintaan sekä parantamaan betonin palonkestoa [22.]. Makrokuidut ovat kaikki mikro- kuituja isompia kuituja ja niiden käyttöalue on laajempi. Makromuovikuituja käytetään ruiskubeto- noinnissa, maanvaraisissa laatoissa sekä muissa rakenteissa, joille on asetettu tiukat vaatimukset halkeamisen suhteen. Makrokuidulla voidaan osittain korvata kutistumis- raudoitusta. Muovikuitujen suuri etu on sen korroosiokestävyys. [10; 11; 12.]



Kuva 9 Mikromuovikuitu vas., mikro- ja makrokuidun sekoitus oik.

Betonin ominaisuuksien parantamiseksi käytetään myös lasi-, hiili- ja basalttikuituja, joiden käyttö on huomattavan muovikuituja kalliimpi. Maailmalla on käytössä myös orgaanisia kuitutyyppjä, kuten bambu, tekstiili, juutti, villa jne. [13.]



Kuva 10 Betonissa käytetty villalanka. [13.]

3.3 Kuitubetonin käyttö maailmalla

3.3.1 Delta Apartments, Belgia



- Käytetty kuitu: TABIX 1.3/50.
- Annostus: 100 kg/m³.
- Laatan paksuus: 230 mm.
- Pinta-ala: 420 m². [14.]

3.3.2 Edificio Central LKS Ingenieria, Espanja



- Käytetty kuitu: TABIX 1.3/50.
- Annostus: 100 kg/m³.
- Laatan paksuus: 300 mm.
- Pinta-ala: 4000 m². [14.]

3.3.3 Ditton nams shopping mall, Latvia

- Käytetty kuitu: TABIX 1.3/50.
- Annostus: 100 kg/m³.
- Laatan paksuus: 200 mm.
- Pinta-ala: 2700 m². [14.]

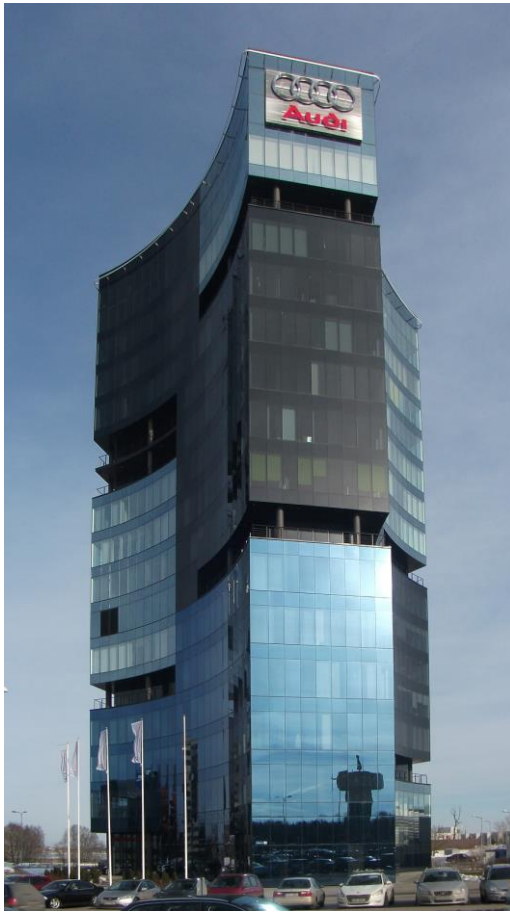
3.3.4 Marupe Office, Latvia

- Käytetty kuitu: TABIX 1.3/50.
- Annostus: 100 kg/m³.
- Laatan paksuus: 250 mm.
- Pinta-ala: 1200 m². [14.]

3.3.5 Triangle office, Estonia

- Käytetty kuitu: TABIX 1.3/50.
- Annostus: 100 kg/m³.
- Laatan paksuus: 220 mm.
- Pinta-ala: 1440 m². [14.]

3.3.6 Rocca Tower, Estonia



- Käytetty kuitu: TABIX 1.3/50.
- Annostus: 100 kg/m³.
- Laatan paksuus: 280 mm.
- Pinta-ala: 13300 m². [14.]

3.4 Kuitubetonin käyttö Suomessa

3.4.1 Toteutetut projektit

3.4.1.1 Motonet-tavaratalon paalulaatta, Tornio



- Käytetty kuitu: Wirefib 80/60.
- Annostus: 35-37 kg/m³.
- Laatan paksuus: 260 mm.
- Pinta-ala: 4303 m².

Rakenne on suunniteltu BY56 ohjeen mukaisesti, jolloin rakennesuunnittelija toimitti kuormitustiedot kuitutoimittajalle. Kuitutoimittaja suoritti laskelmat loppuun. Laatassa perinteistä tankorautoitusta on käytetty vain paalukaistoilla.

3.4.1.2 Kauppakeskus Granin laajennuksen paalulaatta



- Käytetty kuitu: HE 1/50.
- Annotus: 40 kg/m³.
- Laatan paksuus: 220, 270 ja 300 mm.

Rakenne on suunniteltu BY56 suunnitteluohjeen sekä BY66 suunnitteluohjeen luonnoksen mukaan. Suunnittelija teki laskennat yhteistyössä kuitutoimittajan kanssa. Laatassa kenttäraudoitus on korvattu teräskuidulla täysin. Perinteistä tankoraidoitus on käytetty vain reunaraidoituksessa ja paalukaistoilla.

3.4.2 Kuitubetonin ajankohtainen asema Suomen rakentamisessa

Tällä hetkellä Suomessa kantavuusominaisuuksiin vaikuttavien teräskuitujen käyttö betonirakenteissa rajautuu maavaraisiin laattoihin ja paalulaattoihin. Pääkaupunkiseudun Rakennusvalvonta kieltää teräskuitubetonin käytön kantavina rakenteina, kunnes asia tulee eurokoodiin tai Ministeriö antaa ohjeet. [16.]

Teräskuitubetonirakenteiden toteutus poikkeaa perinteisestä betonista. Kuituvalmistajan rooli kyseisessä prosessissa on hyvin merkittävä, toisin kuin terästankojen valmistaja ei osallistu suunnitteluprosessiin lainkaan. Tämä uutuus aiheuttaa monia haasteita vastuun

jaossa ja laadunvarmistuksessa. Kuitujen ominaisuudet ovat hyvin erilaisia valmistajasta riippuen ja valmistajilla on käytössä omat suunnittelumenetelmänsä, jotka perustuvat erilaisiin suunnitteluohjeisiin. Vastaavan suunnittelijan tehtävä on kuitenkin tarkistaa toimitajan laskelmia, joka voi olla haastavaa, kun laskennat perustuvat ulkomaalaisiin suunnitteluohjeisiin. [15; 16.]

Työmaatoteutuksesta ei ole tällä hetkellä teräskuitubetoniin erikoistuneita ohjeita. Valun-aikainen ja valmiin betonin laadunvarmistus toteutetaan tavallisen betonin tapaan. Oikeat toteutusmenetelmät ja betonin koestukset vaativat lisää tutkimuksia. [15.]

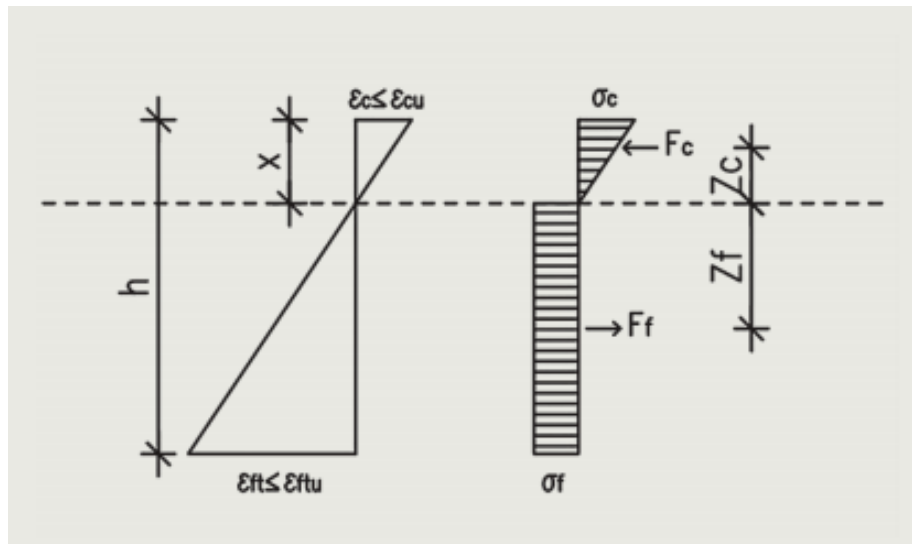
Pääkaupunkiseudun ulkopuolella teräskuitubetonin käyttö on kuitenkin mahdollista, jos rakenteen riskittömyys todetaan. Teräskuitubetonin käyttö välipohjissa ja palkeissa on sallittu vain halkeamien pienentämistä varten. [15.]

4 Teräskuitubetonin ominaisuudet

4.1 Teräskuitubetonin toimintaperiaate

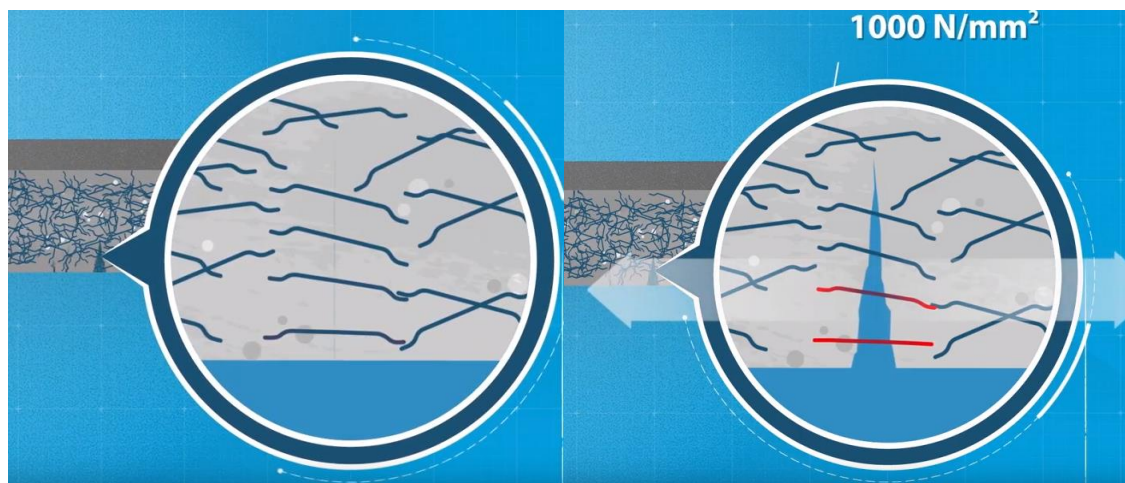
Teräskuitubetoni on betoni, jossa raudoitteena käytetään korkealujuisia teräskuituja. Teräskuituja voidaan käyttää tankoraidoitettun rakenteen kestävyuden parantamiseksi tai korvata tankoraidoitukset kokonaan.

Teräskuitubetonin toimintamekanismi on sama, kuin perinteisellä tankoraidoituksella, se perustuu tilanteeseen, kun betoni on haljennut ja vetorasitukset siirtyvät teräskuiduille. Merkittävä ero on se, että kuidut jakautuvat tasaisesti koko rakenteessa, eli vetorasitukset jakautuvat kuiduille eikä keskity yhteen linjaan, kuin tankoraidoitetuissa rakenteissa. (Kuva 11). Teräskuiduilla raudoitettun betonin käyttäytyminen voi olla ominaisuuksiltaan hyvin erilainen ja sen kestävyysluokitus perustuu koestuksiin, joiden tuloksien hajonta on hyvin suuri (Liite 1.) Teräskuitubetonin luokituksista tarkemmin luvussa 5.1.2 [17.]



Kuva 11. Yksinkertaistettu jännitys-muodonmuutosjakauma pelkän kuidun tapauksessa.

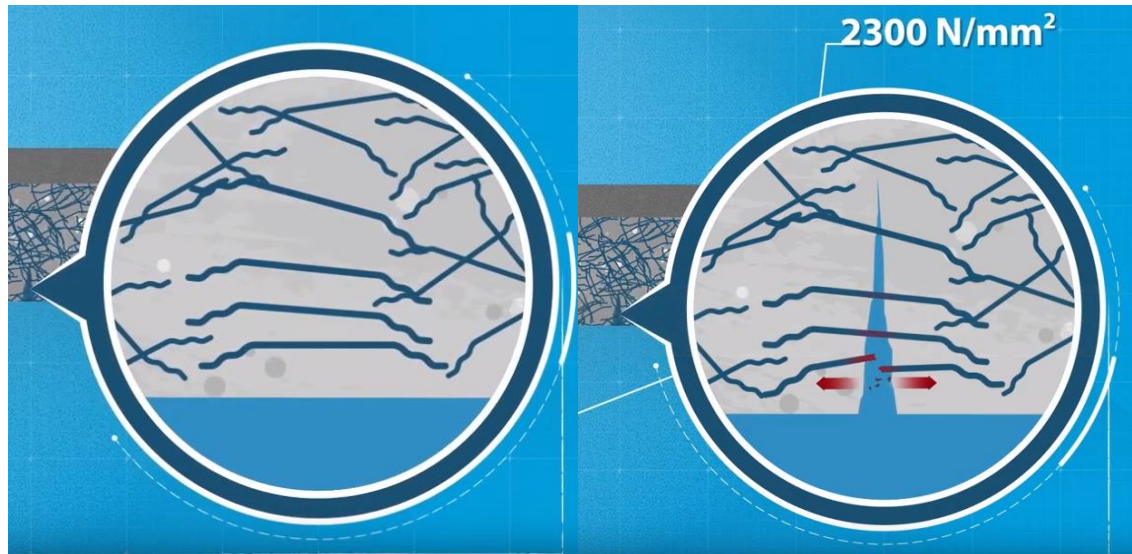
Teräskuidun vetolujuus on 800-3000 MPa (Suomessa yleisesti käytetään 1000-1500 MPa). Kuidun lujuudesta riippuen sen toimintaperiaate muuttuu. Kuidut, joiden lujuus on 1000-1600 N/mm² eivät katkea, niiden toimintamalli perustuu siihen, että ensin päissä olevat koukut suoristuvat rasituksesta ja tämä suoristuminen vaatii energiaa (Kuva 12).



Kuva 12. Vetolujuus 1000-1600 MPa

Kuidut, joiden lujuus on yli 2000 N/mm² toimivat juuri päinvastaisella tavalla. Vahvan kuidun kitka betoniin on oltava riittävän vahva, että vetorasitus siirtyy suoraan kuidun keskipisteelle. Korkealujuisten kuitujen avulla voidaan saada kestävämpiä rakenteita,

mutta niiden laskenta on harvinaisuuden takia hankalampaa ja rakenteet ovat tarkkuusherkkiä betonin lujuudelle ja toteutuksen laadulle (Kuva 13). [17; 18.]



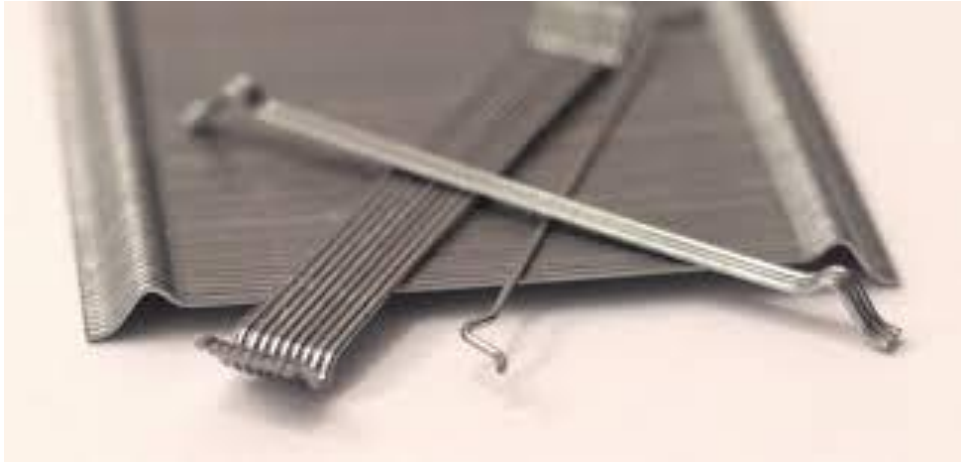
Kuva 13. Vetolujuus 2300 MPa

4.2 Kuitupitoisuus

Kuitujen määrä kantavissa kuitubetonirakenteissa normaaleilla betoniluokilla vaihtelee 30-50 kg/m³ ja se riippuu käytettävän kuidun ominaisuuksista. Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje BY66 ei ohjeista kuitumäärien määrittämistä, toisin kuin vanhentunut suunnitteluohje BY56 (ks. luvut 5.1 ja 6.1). [7.]

Painon lisäksi kuitujen toimittajan kuuluu ilmoittaa käytettävän kuitutyypin hoikkuusluku, joka lasketaan kaavalla l/d , missä "l" on kuidun pituus ja "d" on kuidun halkaisija. Hoikkuusluku kuvaa kuitujen kappalemäärän ja sekoittuvuuden betoniin. Irtonaisten kuitujen suositeltu maksimihoidukkuusluku on 55. Sen ylittyessä teräskuidut alkavat palloutumaan

sekoituessaan betoniin, sen estämiseksi kuidut liimataan kampoihin (Kuva 14). Liima liukenee betoniin, jolloin kuidut leviävät tasaisesti betoniin. [12.]



Kuva 14. HENDIX-kuituja kammoissa

Kuitujen sekoittuvuuteen vaikuttavat myös sen pinnan laatu ja oikea annostelu. Valmistajasta riippuen kuitujen pinta voi olla kuiva tai tahmea, kyseinen ominaisuus selviää yleensä vasta toimituksen jälkeen. Kuitujen valmistaja ilmoittaa betonivalmistajalle oikeat annostelunopeudet ja -tavat käytetyille kuitutyypille. Kuitujen annosteluun käytetään

annostelijaa (ns. ”kuitupata”), joka annostelee kuituja tasaisella vauhdilla betonimyllyyn. Pieniin tilauksiin kuidut annostellaan käsiin. [15.]

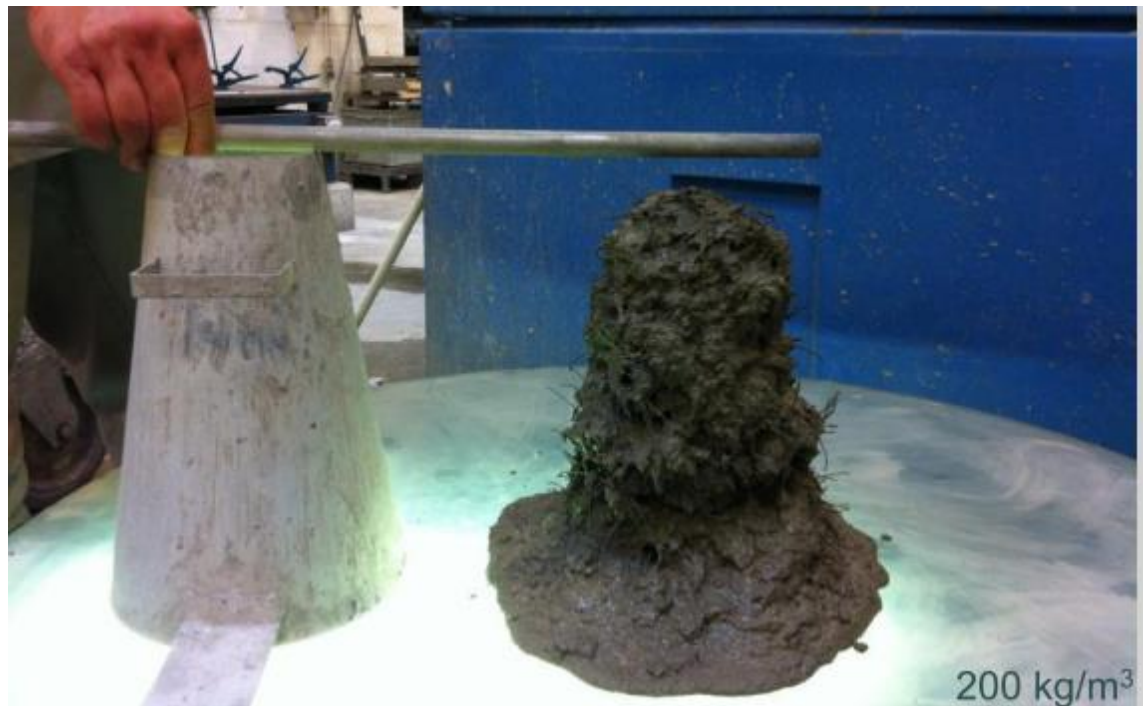


Kuva 15. ”Kuitupata”

Teräskuitujen käyttö ei vaikuta betonin ominaisuuksiin tai reseptiin, kuten ei tavallinen raudituskaan. Vanhat kuitukammoissa käytetyt liimat saattoivat vaikuttaa betonin ilmä määrään, mutta nykyaikaiset liimat ovat inerttejä betonissa. Kuitujen tasainen pitoisuus on erittäin tärkeä rakenneteknisten ominaisuuksien kannalta, sen takia valun aikana on otettava näytteitä kuitupitoisuuden tarkistamiseksi. Valun alussa, puolessavälissä ja lopussa otetaan 3 litran näytteitä. Tuloksien hajonta voi olla varsin suuri, jopa 10 kg/m³, joten tuloksista on ilmoitettava työmaalle mahdollisimman pian. [15.]

4.3 Työstettävyys

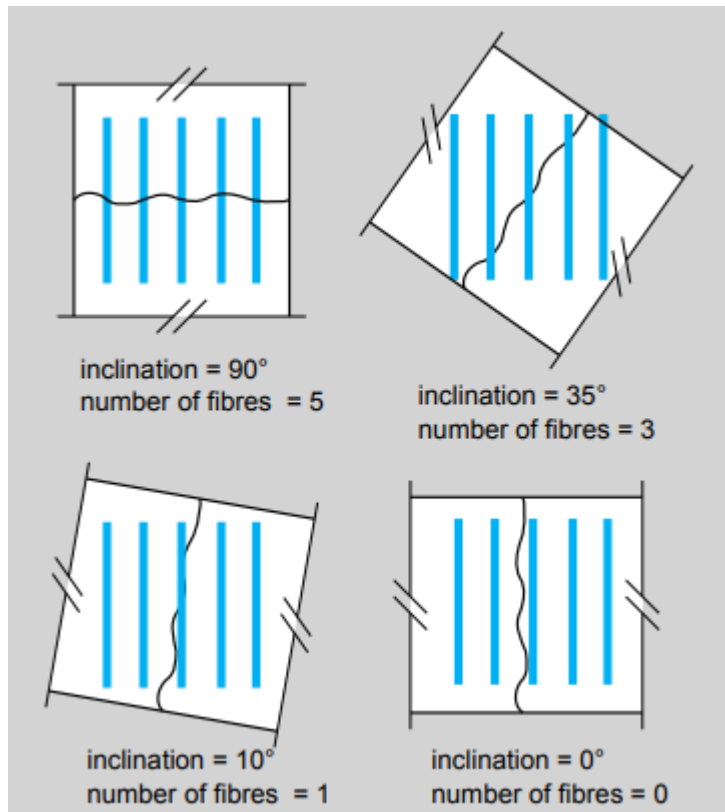
Teräskuitubetonia käyttäessä on otettava huomioon, että betonin notkeus vähenee kuitujen hoikkuusluvun kasvun mukaan. Tästä syystä teräskuitubetonissa aina käytetään notkistinta sen työstettävyyden parantamiseksi. Kuitujen palloutumisen ja pumppauslinjan tukkeutumisen estämiseksi pienin käytettävä letkukoko on 3". Asiasta mainitaan hyvin harvoin, vaikka piittaamattomuus voi johtaa vakavaan betonin lujuuden alentumiseen ja kustannusten kasvuun. [15.]



Kuva 16. Kuitubetonin notkeus suurella kuitupitoisuudella. Kuvassa esitetystä esimerkistä on käytetty 200 kg/m³. [19.]

4.4 Kuitujen orientaatio

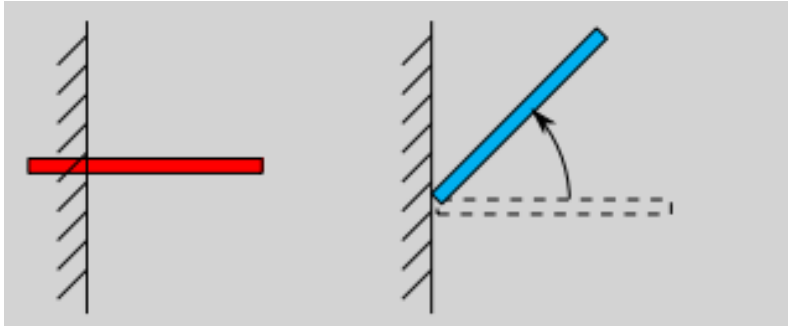
Kuitujen orientaatio on keskeinen asia kuitubetonirakenteille. Se, miten kuidut asettautuvat tulevien halkeamien suhteen, vaikuttaa suoraan rakenteen kestävyYTEEN (Kuva 17).



Kuva 17. Kuituorientaation vaikutus haljenneeseen rakenteen toimivuuteen. [19.]

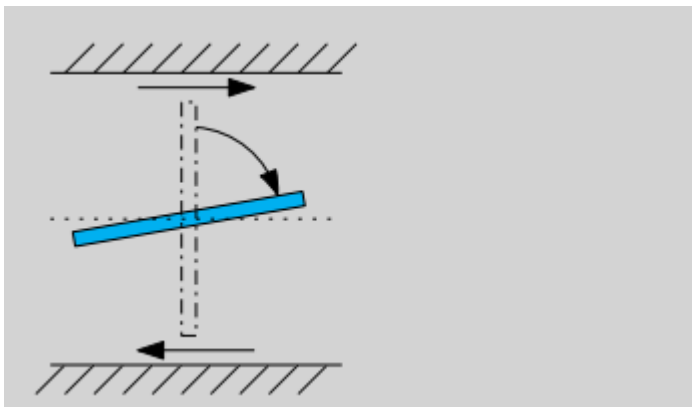
Kuitujen orientaatio betonimatriisissa on mahdollista ohjata oikealla valutekniikalla. Palkkirakenteissa kuitujen paras hyötysuhde saavutetaan, kun kuidut asettautuvat palkin pituussuuntaisesti. Laattarakenteissa kuitujen on asetettava vaakasuuntaan mahdollisimman monisuuntaisesti, jolloin rakenteen kapasiteetti on sama kaikkiin suuntiin. Kuitujen orientoitumista voidaan hallita ottamalla huomioon kolme seuraavaa periaatetta. [19.]

Seinäefekti (Wall effect) on tapa, jolla kuitu käyttäytyy muottipinnan vieressä. Betonimassan noustessa muottipinnan lähellä olevat kuidut pyrkivät kääntymään pystyasentoon. Efektin voimakkuus kasvaa pinnan karheuden mukaan. (Kuva 18) [19.]



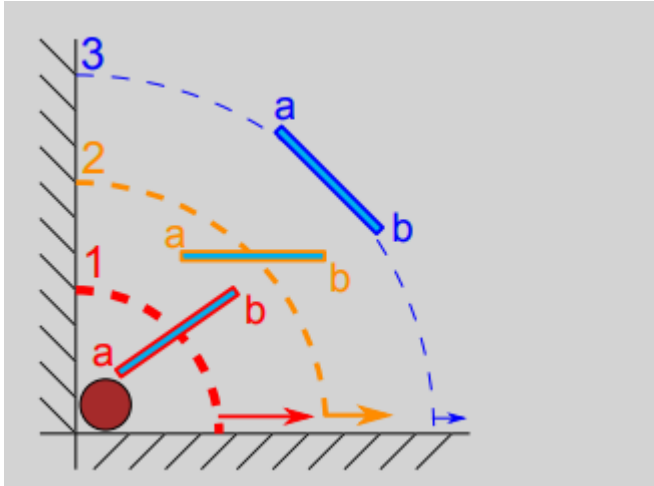
Kuva 18. Seinäefekti. [19.]

Leikkauksen aiheuttama orientoituminen (Shear induced orientation) on kuitujen pyrkimys asettautua samansuuntaisesti vaaka-asentoon valuvirtauksien aiheuttaman leikkauksen vuoksi. Leikkauksen aiheuttama kuitujen asettautuminen kestää 0,5-5 sekuntia, joka on todella lyhyt aika verrattuna valuprosessiin, joten voidaan olettaa, että kuidut asettuvat kyseiseen asentoon heti. (Kuva 19) [19.]



Kuva 19. Leikkauksen aiheuttama orientoituminen. [19.]

Laajennusjännityksen aiheuttama orientoituminen (Extensional stresses induced orientation) on periaate, jolla kuidut käyttäytyvät betonin leviämisen aiheuttama laajennusjännitys pyrkii kääntämään kuituja kohtisuoraan laajenemissuuntaa vastaan. Efektin voimakkuutta voidaan kasvattaa nostamalla betonin notkeutta ja pumppauspainetta, tai käyttämällä itsetiivistyvää betonia. [19.]



Kuva 20. Laajennusjännityksen aiheuttama orientoituminen. [19.]

Ottaen huomioon yllä mainitut efektit, voidaan todeta, että kuitujen orientoitumisen hallintaan toteutuksessa otettava huomioon seuraavat asiat:

- Valumuotin muoto ja pinta
- Betonin reologia
- Valun toteutus
- Kuidun tyyppi ja pitoisuus
- Tankorautoitus

Tanskassa on kehitetty laskentatapoja kuitujen orientaation määrittämiseksi suuntafaktoreiden avulla (α ja κ), joilla voidaan ennustaa kuitujen asettautumista oikealla valuteknologialla. Sen lisäksi laadunvarmistukseen on asetettu selkeitä menetelmiä koekappaleiden ottamiseen sekä koekappaleiden tarkistus tietokonekerroskuvauksen ja tietokonesimulaation avulla. Suomessa ei tällä hetkellä löydy määrityksiä mihinkään yllä mainituista asioista, joten viranomaiset suhtautuvat kielteisesti teräskuitubetonirakenteiden suhteen. [15; 19.]

4.5 Teräskuitujen korroosio

Teräskuidut ovat alttiita korroosiolle samalla tavoin, kuin tankorautoitteet, mutta teräskuitubetonirakenteen altistus korroosiolle on pienempi. Korroosion leviäminen

yleensä johtuu siitä, että tavallisessa teräsbetonirakenteessa raudoitus muodostuu yhtenäiseen verkkoon ja yhden tangon vaurioitumisesta ruoste voi levitä muillekin tangoille. Kuiturakenteissa raudoitteet ovat päinvastoin irtonaisia kuituja, jotka eivät ole kosketuksessa toisiinsa ja jos yksi kuitu ruostuu, vaurio ei leviä muualle. Yhden kuidun menettäminen on olematon koko rakenteelle. Kuitujen palloutuminen voi hieman pahentaa korrosiokestävyyttä. [20.]

Toisin kuin teräsbetonirakenteiden valmistuksessa, teräskuituja ei tarvitse varastoida työmaalla, jolloin voidaan varmistaa, että teräskuidut pääsevät kuivina ja puhtaina sekoitukseen. [21.]

Teräskuitubetonirakenteet ovat kuitenkin hyvin alttiita pintaruosteelle, jolla voi olla merkittävä vaikutus esteettisyyden kannalta (Kuva 21). Kuituja on mahdollista tehdä ruostumattomasta teräksestä, mutta tuotteen hinta nousee silloin kannattavuuden yli. [15; 20.]



Kuva 21. Pintaruoste teräskuitubetonilaatan pinnalla.

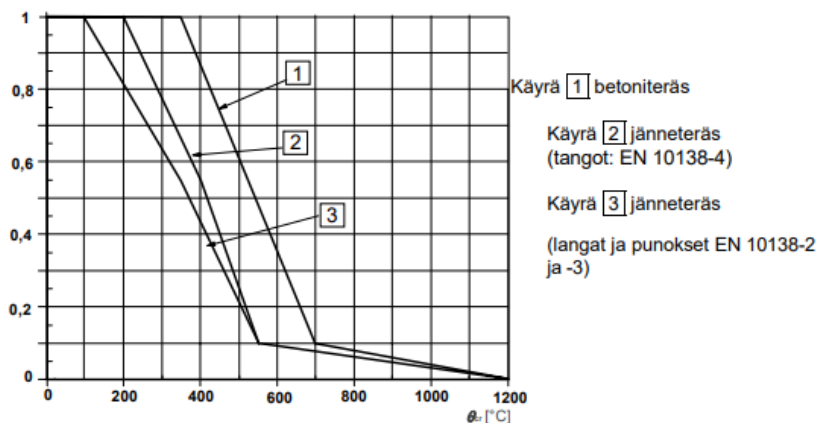
4.6 Palo-ominaisuudet

Eurokoodi 1992-1-2, BY 56 – Teräsbetonirakenteet sekä uudet suunnitteluohjeet BY66 eivät kata teräskuitubetonirakenteiden palomitoitusta. Yleensä

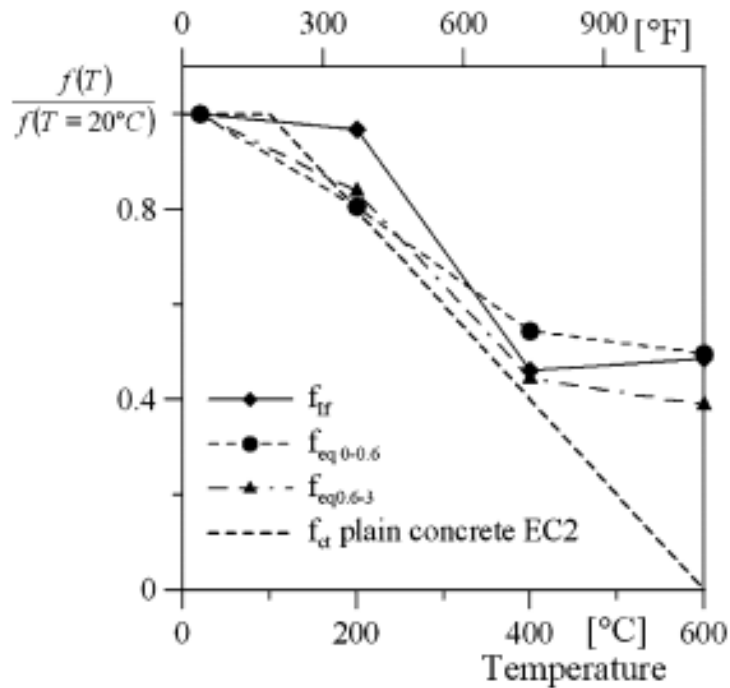
teräskuitubetonirakenteita käytetään rakenteissa, jotka eivät aiheuta riskiä ihmishengille. Toteutetut välipohjalaatat ja palkkirakenteet ovat poikkeuksia ja niiden palomitoitukseen järjestettiin kuituvalmistajan täysmittakaavakokeita. [21.]

Tällä hetkellä Suomessa teräskuitubetonin käyttö rajautuu paalu- ja maanvaraisiin laatoihin, jolloin kuituvalmistajan osoitus rakenteen paloturvallisuudesta on riittävä, jos rakenteella ei ole sortumisen vaaraa. [16.]

Euroopassa on suoritettu kokeita puristettujen teräskuitubetonirakenteiden käyttäytymisestä palotilanteessa, jotka ovat vaikeasti verrattavissa ja jotkut antavat jopa ristiriitaisia tuloksia. Taivutetuissa rakenteissa kuitenkin taivutuskestävyys on olennainen ominaisuus. Alla on esitetty italialaisen yliopiston Politecnico di Milano testitulokset taivutetuista kuitubetonipalkeista. Perinteinen teräsbetoni menettää 15% kestävyyydestä 400°C lämpötilassa ja 65% kestävyyydestä 600°C lämpötilassa (Kuva 22). Teräskuitubetoni on huomattavasti heikompi alkutilanteessa ja se menettää n. 55% kestävyyydestä 400°C lämpötilassa, mutta 600°C lämpötilassa sen kestävyys on edelleen n. 50% normaalilämpötilassa olevan betonin kestävyyydestä, joka on parempi, kuin tankoraidoitettu rakenteella. Kokeessa käytettyjen teräskuidun hoikkuusluku on 45 ja pitoisuus 50 kg/m³. [23.]



Kuva 22. Betoniteräksen heikkeneminen lämpötilan kasvaessa. [5.]



Kuva 23. Teräskuitubetonin heikkeneminen lämpötilan kasvaessa. [23.]

Kuvassa 23 esitetty palkkitestin tulokset teräskuitubetonille lämpötilan kasvaessa, missä:

f_{ct} on betonin vetolujuus

f_{Tf} on kuitubetonin vetolujuus halkeilleessa tilassa, kun $CTOD \leq 25\mu m$

$f_{eq\ 0-0,6}$ on kuitubetonin vetolujuus halkeilleessa tilassa, kun $0,025mm < CTOD \leq 0,625mm$

$f_{eq\ 0,6-3}$ on kuitubetonin vetolujuus halkeilleessa tilassa, kun $0,625mm < CTOD \leq 3,025mm$

5 BY66 Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje 2018

5.1 Yleistä

5.1.1 Suunnitteluohje

BY66 suunnitteluohje ei ole itsenäinen Eurokoodi-standardi, mutta se täydentää standardia SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden Suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suunnittelutyössä on otettava huomioon molemmat asiakirjat.

Ohjeessa käsitellään ainoastaan rakenteellisia teräskuituja. Kantavissa rakenteissa käytettyjen kuitujen suoritustason pysyvyyden arviointi ja varmentaminen suoritetaan AVCP-luokan 1 mukaisesti ja kantamattomissa rakenteissa vastaavasti luokan 3 mukaisesti.

5.1.2 Vaativuusluokat

Kuitubetonirakenteen ominaisuudet muuttuvat riippuen käytettävien kuitujen sitkeysluokasta (Liite 2). Alla olevassa taulukossa 1 ovat esitetty kuitubetonin vaativuusluokat ja vastaavat sitkeysluokat.

Vaativuusluokka	Luokka 1 ^{a)}	Luokka 2a	Luokka 2b	Luokka 3
Rakenteen tyyppi	Ei-kantava (kuormaa jakava)	Kantava	Kantava	Kantava
Raudoitus	Detaljiraudoitus	Kuitu- ja tankoraudoituksen yhdistelmä (yleensä tankoraudoituksena vähintään onnettomuusraudoitus ^{b)})	Kuitu- ja tankoraudoituksen yhdistelmä (tankoraudoituksena vähintään onnettomuusraudoitus ^{b)})	Pelkkä kuituraudoitus
Käytettävän kuitubetonin sitkeysluokka (ks. taulukko 3.1)	a)	b–e	c–e	d–e
Seuraamusluokat	a)	CC2	CC2, CC3	CC2
Rakenneesimerkkejä	Maanvaraiset laatat	Paalulaatat, pääosin puristusrasitetut seinät.	Kuitubetonia ja tankoraudoitusta sisältävät kantavat laatat, palkit yms.	Lyhyen jännävälän kevyesti kuormitetut rakenteet.

^{a)} **Huom.** Luokka 1 ei kuulu tämän ohjeen soveltamisalaan, mutta kestävyysmääritys voidaan suorittaa ohjeessa esitetyillä kaavoilla.

^{b)} Onnettomuusraudoitus, ks. kohta 9.4.

Taulukko 1. Kuitubetonin vaativuusluokat.

5.1.3 Materiaaliosavarmuusluvut

Kuitubetonille on määritetty oma osavarmuusluku. Alla olevaan standardin SFS-EN 1992-1-1 taulukkoon 2.1N on lisätty kuitubetonin osavarmuuskertoimet sekä käyttörajan arvot.

Suunnittelu-tilanteet	betonin γ_c	betoni-teräksen γ_s	jänne-teräksen γ_s	kuitu-betonin γ_f
Normaalisti vallitseva ja tilapäinen	1,5	1,15	1,15	1,5
Onnettomuus	1,2	1,0	1,0	1,2
Käyttörajatila	1,0	1,0	1,0	1,0

Taulukko 2. Materiaaliosavarmuusluvut.

5.1.4 Jäännöstaivutusvetolujuuden luokitus

Kantavien kuitubetonirakenteiden olennaisimmat määritettävät arvot ovat sen jäännöstaivutusvetolujuudet (R_1 ja R_3) sekä sitkeysluokat (ks. luku 5.1.2). R-luokat vastaavat standardin SFS-EN 14651 mukaisella palkkitestillä määritettyä ominaisjäännöstaivutusvetolujuutta $f_{R,i}$. R_1 luokka on tarkoitettu käyttörajatilan suunnitteluun ja R_3 vastaavasti yksinkertaistettuun murtorajatilan suunnitteluun.

Sitkeys- luokka (R_3/R_1)	R_1 -luokka $f_{R,1}$ [MPa]									
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
a (0,5–0,7)	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
b (0,7–1,0)	0,7	1,1	1,4	1,8	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6
c (1,0–1,1)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
d (1,1–1,3)	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3	4,4	5,5	6,6	7,7	8,8
e ($\geq 1,3$)	1,3	2,0	2,6	3,3	3,9	5,2	6,5	7,8	9,1	10,4

Merkinnät: $R_1 = f_{R,1}$
 $R_3 = f_{R,3}$

Sitkeysluokat: Luokka a: voimakkaasti myötöheikkenevä
Luokka b: myötöheikkenevä
Luokka c: myötölujuuden säilyttävä (sitkeä)
Luokka d: myötölujittuva
Luokka e: voimakkaasti myötölujittuva

Huom. 1: Lihavoidulla on merkitty kuitubetonin saatavuuden kannalta suositeltavat luokat.
Huom. 2: Jäännöstaivutusvetolujuus on ominaisarvo, joka määritetään standardin SFS-EN 14651 mukaisella palkkikokeella, kun CMOD (halkeaman avautuma = crack mouth opening displacement) on 0,5, 2,5 ja 3,5 mm luokille $f_{R,1}$, $f_{R,3}$ ja $f_{R,4}$, ks. kuva 3.1. R_4 -arvoa (= $f_{R,4}$) käytetään tarvittaessa (ks. luku 2.3.2.2 (ii)).
Huom. 3: Taulukon arvoja korkeampaa jäännöstaivutusvetolujuuden arvoa voidaan käyttää, jos arvo on vahvistettu standardin SFS-EN 14651 mukaisilla koetuloksilla.
Huom. 4: Seuraavien ehtojen on täyttyvä: $C_1 = 100 \cdot f_{R,1} / f_{ctk,0,05} \geq 50\%$ ja $100 \cdot f_{R,3} / f_{R,1} \geq 50\%$. Ehtojen tarkoituksena on varmistaa kuitubetonin tietty minimisitkeys.

Taulukko 3. Kuitubetonin ohjeelliset jäännöstaivutusvetolujuuden R_3 -luokat ($f_{R,3}$ [MPa]) esitetty R_1 -luokan ($f_{R,1}$ [MPa]) ja sitkeysluokan (R_3/R_1) perusteella.

BY66 ohjeen mukaisesti määritelty betoni ilmoitetaan seuraavasti:

Betonin lujuus – Jäännöstaivutusvetolujuusluokat – Sitkeysluokka

Esimerkki: C35/45-R₁3,0/R₃3,3-d

5.1.5 Jäännösvetolujuuden mitoitusarvo

Jäännösvetolujuuden mitoitusarvo murtorajatilassa määritellään seuraavasti:

$$f_{ftd,R1} = \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot \frac{f_{ft,R1}}{\gamma_f} \quad (5.1)$$

$$f_{ftd,R3} = \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot \frac{f_{ft,R3}}{\gamma_f} \quad (5.2)$$

Jäännösvetolujuuden mitoitusarvo käyttörajatilassa määritellään seuraavasti:

$$f_{ftd,R1} = \eta_f \cdot \frac{f_{ft,R3}}{\gamma_f} \quad (5.3)$$

missä

η_f on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuidun suuntautuminen. $0,5 < \eta_f \leq 1$ (kun poikkileikkauksen leveys > 5 x poikkileikkauksen korkeus $\eta_f = 1$). Kuitujen suuntautumisesta on kerrottu luvussa 4.4, suunnittelijan on mainittava valusuunta suunnitelmissaan.

η_{det} on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon rakenneosan staattisen määräämättömyyden aste. Ks. taulukko 4

γ_f on kuitubetonin materiaaliosavarmuusluku. Ks. taulukko 2

$f_{ft,Ri}$ on kuitubetonin jäännösvetolujuuden ominaisarvo

$$f_{ft,R1} = 0,45 \cdot f_{R,1} \quad (5.4)$$

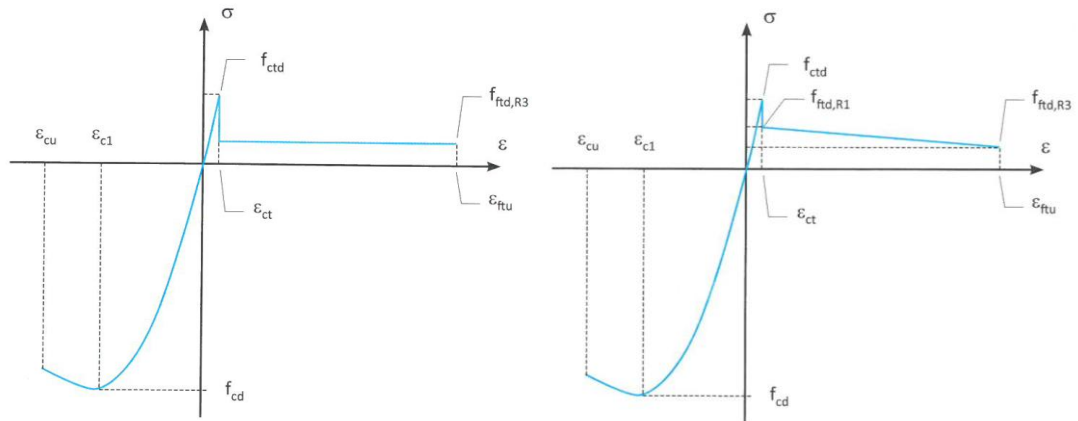
$$f_{ft,R3} = 0,37 \cdot f_{R,3} \quad (5.5)$$

Tapaus	Rakenneosan tyyppi	Muuntokerroin η_{det}
1	Staattisesti määrätyt palkit	1
2	Staattisesti määräämättömät palkit	1,4
3	Suorakaiteen muotoiset laatat, joiden kaksi vastakkaista reunaa ovat vapaasti tuettuja ja kaksi muuta reunaa vapaita/tukemattomia	1
4	(a) Vapaasti tuetut pyöreät laatat (b) Suorakaiteen muotoiset laatat, joiden reunoista vähintään kolme on vapaasti tuettuja.	1,4
5	(a) Pyöreät reunoiltaan jäykästi tuetut laatat (b) Suorakaiteen muotoiset laatat, joiden reunoista vähintään yksi on jäykästi tuettu ja muut reunat ovat vapaasti tuettuja (c) Maanvaraiset laatat (d) Paalulaattojen keskijänteet (e) Pilarilaattojen keskijänteet (f) Vapaasti tuettujen jatkuvien laattojen keskijänteet	2

Taulukko 4. Eri rakennetapauksille soveltuvia muuntokertoimen η_{det} arvoja sitkeysluokissa c-e.

5.1.6 Jännitys-muodonmuutosyhteys

Riippuen kuitubetonin sitkeysominaisuuksista poikkileikkauksen vetojännityskuvaaja voi olla laskeva tai nouseva. Laskentaprosessin yksinkertaistamisen vuoksi voidaan olettaa, että vetojännitys on vakio ja vastaa jäännösvetolujuuden arvoa $f_{ft,R3}$, jolloin korkeampaa lujuutta $f_{ft,R1}$ ei hyödynnetä.



Kuva 24. Periaatekuvat myötöheikkenevän jännitys-muodonmuutosyhteydestä, jossa vetojännitys laskee jännösvetolujuuden mukaiseen arvoon (vas.) ja laskee lineaarisesti (oik.).

missä

f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo

ε_{ct} on halkeamavenymä, jota voidaan määrittää kaavalla 6:

$$\varepsilon_{ct} = \frac{f_{ctd}}{E_c} \quad (5.6)$$

ε_{ftu} on kuitubetonin murtovenymä, jota voidaan määrittää kaavalla 7:

$$\varepsilon_{ftu} = \varepsilon_{ct} + \frac{w_u}{l_{cs}} \quad (5.7)$$

missä

w_u 2,5mm

l_{cs} on karakteristinen pituus. Tankoraidoitusta sisältämättömille teräskuitubetonirakenteille $l_{cs}=h$ (poikkileikkauksen korkeus). Tankoraidoitusta sisältäville teräskuitubetonirakenteille kaavan 7 mukaisesti:

$$l_{cs} = \min\{s_{rm}, y\} \quad (5.7)$$

missä

y poikkileikkauksen vedetyn osan korkeus

s_{rm} keskimääräinen halkeamaväli

Jos betonin kuitumäärä on vähintään 25kg/m³, keskimääräinen halkeamaväli voidaan laskea kaavalla 8:

$$s_{rm} = \xi \cdot \left(50 + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\emptyset}{\rho} \right) \quad (5.8)$$

missä

ξ on 1 kun $l_f/d_f < 50$
 $50 \cdot (d_f/l_f)$ kun $50 \leq l_f/d_f \leq 100$
 0,5 kun $l_f/d_f > 100$

l_f on kuidun pituus

d_f on kuidun halkaisija

k_1 on 0,8 harjatangoille

k_2 on 0,5 kun $y \leq h$ ja 1,0 kun $y > h$

\emptyset on tankoraidoituksen halkaisija

ρ on tankoraidoituksen geometrinen raudoitussuhde

5.2 Murtorajatila

5.2.1 Taivutuskestävyys

Suunnitteluohjeessa on esitetty kolme menetelmää taivutuksesta aiheutuvien muodonmuutosten ja jännitysten laskentaan:

- Yksinkertaistettu menetelmä tavallista tankoraidoitusta sisältävälle kuitubetonille (Liite 3).
- Yksinkertaistettu menetelmä tankoraidoittamattomalle kuitubetonille (Liite 4).
- Yleinen menetelmä tankoraidoitetuille tai -raidoittamattomalle kuitubetonille (Liite 5).

Kolmas menetelmä osoittautui käytännöllisimmäksi, koska betonirakenteesta on hyvä tietää sen kapasiteetti sekä tankoraidoitettuna, että -raidoittamattomana. Yleinen menetelmä on hieman yksinkertaistettuja monimutkaisempi, mutta kun rakennelaskentaan käytetään tietoteknisiä apuvälineitä, saadaan tarkkoja ja helposti muokattavia tuloksia.

Yleisen menetelmän mukaan poikkileikkauksen kokonaistaivutusaste voidaan määrittää numeerisella integroinnilla muuttamalla puristusrasitusta asteittain, kunnes betonin murtopuristuman arvo saavutetaan, ja laskemalla jokaisen askeleen neutraaliakselin sijainti ja taivutuskapasiteetti.

Vaakavoimat määritellään seuraavasti:

$$F_{cc} = b \cdot \int_0^x \sigma_c(z) \cdot dx \approx b \cdot \sum_0^l \sigma_c(z_i) \cdot \Delta z_i \quad (5.9)$$

$$\text{kun } \sigma_c(z) = \sigma_c(\varepsilon_c(z)) \text{ ja } \varepsilon_c(z) = \frac{z}{x} \cdot \varepsilon_c \text{ kun } \varepsilon_c = 0 \rightarrow \varepsilon_{cu}$$

missä

F_{cc} on betoniin vaikuttava puristusvoima

b on poikkileikkauksen leveys (laatoissa 1m kaista)

σ_c on betonin puristusjännitys

ϵ_c on betonin puristuma

$$F_{ft} = b \cdot \int_0^{h-x} \sigma_{ft}(z) \cdot dx \approx b \cdot \sum_0^i \sigma_{ft}(z_i) \cdot \Delta z_i \quad (5.10)$$

$$\text{kun } \sigma_{ft}(z) = \sigma_{ft}(\epsilon_{ft}(z)) \text{ ja } ft = \frac{h-x}{x} \cdot \epsilon_c$$

missä

F_{ft} on kuitubetoniin vaikuttava vetovoima

σ_{ft} on kuitubetonin vetojännitys

ϵ_{ft} on kuitubetonin venymä

$$F_{st} = A_{st} \cdot \sigma_{st} = A_{st} \cdot E_s \cdot \epsilon_{st} = A_{st} \cdot E_s \cdot \frac{d-x}{x} \cdot \epsilon_c \quad (5.11)$$

$$\text{kun } \sigma_{st} < f_{yd}$$

missä

F_{st} on tankoraidoitukseen vaikuttava vetovoima

σ_{st} on tankoraidoituksen vetojännitys

ϵ_{st} on tankoraidoituksen venymä

A_{st} on raidoituksen poikkipinta-ala

Vaakavoimien tasapaino:

$$\sum H = 0 \rightarrow F_{cc} = F_{st} + F_{ft} + N_d \quad (5.12)$$

Taivutusmomenttien tasapaino:

$$M_{Rd} = b \cdot \sum_0^i \sigma_c(z_i) \cdot \Delta z_i \cdot z_i + b \cdot \sum_0^1 \sigma_{ft}(z_i) \cdot \Delta z_i \cdot z_i + F_{st} \cdot (d - x) + N_d \cdot \left(\frac{h}{2} - x\right) \quad (5.13)$$

5.2.2 Leikkauskestävyys

Betonirakenteet, jotka BY66 ohje kattaa oletetaan leikkausraudoittamattomina. Leikkausraudoittamattoman kuitubetonirakenteen leikkauskestävyyden ominaisarvo $V_{Rd,cf}$ määritetään seuraavaksi:

$$V_{Rd,cf} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{ft,R3}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{1/3} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad (5.14)$$

missä

γ_c on betonin materiaaliosavarmuusluku (ks. luku 5.1.3)

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

$$\rho = \frac{A_{st}}{bd} \leq 0,02$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} \leq 0,2f_{cd}$$

A_c on betonipoikkileikkauksen pinta-ala

b_w on poikkileikkauksen pienin leveys vedetyllä korkeudella

d on poikkileikkauksen tehollinen korkeus

Jos rakenne ei sisällä tankoraudoitusta, laskennan yksinkertaistuttamiseksi voidaan jättää kuitujen vaikutus huomioimatta ja laskea rakenteen lävistyskestävyyttä standardin SFS-EN 1992-1-1 kaavan 6.2b mukaan.

5.2.3 Lävistys

Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyyden mitoitusarvo määritellään kaavojen 5.15 ja 5.16 mukaan vastaavasti tavanomaista tankorausoitusta sisältäville kuitulaatoille ja tankorausoitamattomille teräskuitubetonilaatoille:

$$V_{Rd,cf} = \frac{0,3\left(\frac{D}{d}+1,5\right)}{\gamma_c\left(\frac{D}{d}+4\right)} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{ft,R3}}{f_{ctk}}\right) \cdot f_{ck}\right]^{1/3} + 1,5 \cdot \sigma_{cp} \quad (5.15)$$

missä

D on pyöreän pilarin halkaisija. Suorakaidepilarille $D = \sqrt{c_1 c_2}$, missä c_1 ja c_2 ovat pilarin sivumittoja

$$V_{Rd,cf} = \left(\frac{k}{2}\right) \cdot C \cdot \frac{f_{R,3}}{\gamma_f} \quad (5.16)$$

Lävistyskestävyys $V_{Rd,cf}$ saadaan kertomalla lävistyskestävyyden mitoitusarvo $V_{Rd,df}$ lävistyspiirin pinta-alalla. Lävistyspiirin pinta-ala lasketaan standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdan 6.4.2 mukaan.

5.2.4 Onnettomuusraudoitus

Kantavat teräskuitubetonilaatat tulee aina varustaa jatkuvan sortuman estävällä onnettomuusraudoituksella. Onnettomuuseräket sijoitetaan laatan alapintaan ja niiden tulee muodostaa laatussa jatkuva sidejärjestelmä.

Onnettomuusraudoituksen on oltava vähimmissään 3T16 pilaria kohden kukin jänteen suunnassa ja seuraava ehto on täytettävä:

$$A_{s,ac} = \frac{V_{Ed}}{f_{yk}} \quad (5.17)$$

missä

V_{Ed} on laatalta tuelle tulevan kuorman mitoitusarvo

f_{yk} on onnettomuusteräksen poikkileikkausala kunkin jänteen suunnassa

5.3 Käyttörajatila

Tankoraidoitetun kuitubetonirakenteen halkeamaleveydet määritetään soveltamalla standardin SFS-EN 1992-1-1 kaavaa 7.8. Halkeamaleveys lasketaan kaavasta 5.18:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (5.18)$$

missä

w_k on halkeamaleveys

$s_{r,max}$ on suurin halkeamaväli

$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ on venymäero

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - (k_t + (1 - k_t) \cdot k_f) \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{s,eff}} \cdot (1 + \alpha_{ef} \cdot \rho_{s,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (5.19)$$

missä

$\sigma_s = \sigma_{st}$

k_t on kerroin, joka riippuu kuorman vaikutusajasta. 0,6 lyhytaikaiskuormitukselle ja 0,4 pitkäaikaiskuormitukselle

$k_f = \frac{f_{ftd,R1}}{f_{ctm}} \leq 1$ ($f_{ftd,R1}$ ks. kaava 5.3)

$f_{ct,eff} = f_{ctm}$

$$\rho_{s,eff} = (A_s + \xi_{1_1} A_p') / A_{c,eff} \text{ (laskenta esitetty standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdassa 7.3.4)}$$

$$\alpha_{ef} = E_s / E_{cm}$$

Suurin lopullinen halkeamaväli, kun tankojen jakovälit ovat suurempia kuin $5(c+\varnothing/2)$, lasketaan kaavan 5.20 mukaan. Muissa tapauksissa lopullinen halkeamaväli lasketaan kaavan 5.21 mukaan.

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot (1 - k_f) \cdot \frac{\varnothing}{\rho_{eff}} \quad (5.20)$$

kertoimet k_1 - k_4 määritetään standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdassa 7.3.4 sekä Kansallisessa liitteessä. Tavanomaisille tankoraudoitetuille rakenteille suositusarvot ovat:

$$k_1 = 0,8$$

$$k_2 = 0,5$$

$$k_3 = 3,4$$

$$k_4 = 0,425$$

$$s_{r,max} = 1,3 \cdot (h - x) \cdot (1 - k_f) \quad (5.21)$$

Taulukossa 5. ovat esitetty kaavojen 5.20 ja 5.20 mukaan lasketut esimerkkirakenteen (liite 8) halkeamaleveydet. Tuloksista voidaan havaita, että halkeamaleveys voi kasvaa, vaikka raudoituksen määrä kasvaa myös. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan tapahdu. Tuloksiin on suhtauduttava varovasti varsinkin rajatilanteessa, kun tankojen jakoväli on lähellä arvoa $5(c+\varnothing/2)$.

n	Ø	As, mm ²	w, mm
4	T 10	314	0,21
6	T 10	471	0,2
8	T 10	628	0,23
10	T 10	785	0,2
4	T 12	452	0,2
6	T 12	678	0,16

Taulukko 5. Halkeamaleveyden laskenta BY66 mukaan, missä w on halkeamaleveys. Rakenteen dimensiot ovat esitetty liitteessä 8.

Tankoraidoittamattomien teräskuitubetonirakenteiden halkeamaleveys lasketaan kaavan 5.22 mukaan:

$$w_{max} = \varepsilon_{ft} \cdot 2 \cdot (h - x) \quad (5.22)$$

Kyseisen kaavan mukaan tankoraidoittamattoman teräskuitubetonirakenteen halkeamaleveys vaihtelee perustapauksissa arvoissa 4,5-6,5 mm, kun suurin sallittu halkeamaleveys on 0,5 mm.

Ohjeen käyttörajatilamitoituksissa, kuten halkeamaleveyden laskennassa ja taipuman rajoituksessa on kehitettävää, eivätkä sen esittämät kaavat ole laajalti käytössä. Kuitujen käyttäytyminen pitkällä aikavälillä on varmistettava aina kuitutoimittajalta.

6 Muut suomalaiset ohjeet

6.1 BY 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011

Uusi suunnitteluohje teräskuitubetonirakenteille BY66 korvaa vanhan BY56 täysin. Vanhojen ohjeiden mukaisissa laskennoissa käytetään jäännöslujuuskerrointa (R_{10} , R_{20} ja R_{50}) ja ns. virtuaalikuituja. Laskennat antavat hyvin karkeita tuloksia verrattuna uuteen ohjeeseen, jossa käytetään jäännöstaivutusvetolujuuden luokkia (R_1 , R_2 ja R_3), joiden perusteella kuituvalmistaja itse määrittää kuitutyyppin ja annostelun. Ohjeessa ei käsitellä

käyttörajalamitoituksia eikä kantavia teräskuitubetonirakenteita lainkaan. Laadunvalvonnasta kuitubetonitöissä on mainittu vanhoissa ohjeissa lyhyesti, mutta kyseiset ohjeet eivät kata kantavien teräskuitubetonirakenteiden riskejä tarpeeksi. [25.]

6.2 BY45/BLY7 Betonilattiat 2018

Betonilattiat 2018 on kattava opus laattarakenteista, jossa on mm. mainittu teräskuitubetonin käyttö maanvaraisissa laatoissa. Ohje perustuu BY66 ohjeeseen ja teräskuitubetonin osalta keskittyy maanvarasiin ja pintalaattoihin. Betonilattiat-ohjeessa on hyvin selitetty BY66:n peruseriaatteet ja siihen on suositeltava tutustua ennen teräskuitubetonilaattojen suunnittelutöiden alkua. Paalulaattojen osalta ohje viittaa suoraan BY66:een. [26.]

6.3 BY 71/RIL 149-2019 Betonirakenteiden työmaatoteutus

Uudet juuri julkaistut betonirakenteiden työmaaohjeet käsittävät teräskuitubetonirakenteita, mutta vain yleisellä tasolla. Kuitubetonin valumenetelmät, joissa otetaan huomioon kuitujen oikea orientoituminen, pumppaus ja notkeuden säätäminen kuitutyypin mukaisesti, sekä laadunhallinta jäi mainitsematta. Kyseisten ohjeiden puute on tällä hetkellä suurin syy siihen, että teräskuitubetonirakenteiden käyttö kantavina rakenteina on hyvin harvinaista tai jopa täysin kielletty, kuten pääkaupunkiseudulla [16; 27.]

7 Taloudellinen puoli

7.1 Materiaali

Materiaalimenekki on erittäin vaikea arvioida, koska kuitutyypien valikoima on varsin laaja kuten hintajakaumakin. Teräskuidut ovat myös usein tuontituotteita, eli toimituskulut voivat usein vaikuttaa hintaan. Sekä raudoitustankojen, että teräskuitujen määrät ilmoitetaan kilogrammoina. Myös hinnatkin ovat sidottu painoon. Alla olevassa taulukossa

6 esitetty karkea arvio raudoituksen painosta neliometriä kohden. Huomioon on otettu ainoastaan kenttäraudoitus.

		Laatan paksuus: 200mm			
	Raudoitus	kg/m ²	€/kg	YHT	Lähde:
Tankorraudoitus:	MP#T10k150	16,5	1,20 €	19,84 €	Byggmax, verkkokauppa Rudus vakio- kuitu
Kuituraudoitus:	50kg/m ³	10	2,88 €	28,80 €	

Taulukko 6 Karkea arvio materiaalihinnasta neliometriä kohti. [28; 29.]

Arvio on vain suunta-antava, mutta se kuvaa yleisperiaatetta, että teräskuitujen paino on yleensä pienempi kuin harjateräksien paino, tosin kuitujen hinta on yli kaksinkertainen verrattuna harjateräksen hintaan.

7.2 Työt

Suomessa materiaali on kuitenkin pieni tekijä verrattuna kalliiseen työvoimaan. Käyttämällä teräskuituratkaisuja raudoitustöitä voidaan vähentää huomattavasti, kun kenttäraudoituksien asennustyöt eliminoituvat täysin. Toisin suunnittelutyön määrä kasvaa joutuessa siitä, että teräskuitubetonin suunnitteluun tarvitaan myös kuitutoimittajan osallistumista. Esimerkkinä voidaan käyttää Sweco Rakennetekniikka Oy:n suunnittelema ja Fira Oy:n toteuttama kauppakeskus Granin laajennuksen paalulaatta, jossa käytettiin 40 kg/m³ teräskuituja tankorraudoituksen sijaan. Käyttämällä teräskuitubetoniratkaisua, hankkeessa säästettiin yli puolet kustannuksista, mitä olisi käytetty tavallisen raudoituksen sisältämään paalulaattaan. Kulujen arvioinnissa oli otettu huomioon työ- ja materiaalikustannukset. [30.]

8 Vaikutus ympäristöön

Kuitubetonin osuus on edelleen pieni betoniteollisuudessa, joten kuitubetoneihin ei ole vielä kehitetty erikoismenetelmiä kierrätykseen. Teräskuidut on mahdollista erottaa betonista, mutta se ei ole taloudellisesti kannattavaa, eikä mahdollista nykyisen tuotereperuaarin kanssa, jossa suurin osa kierrätettävästä betonimurskeesta valmistetaan

raekokoon 0/45 mm tai 0/90 mm. Mikäli kaikki kuitu haluttaisiin poistaa, pitäisi betoni murskata hyvin pieneen raekokoon ja prosessiin olisi lisättävä seulontaa ja muuta erotelua nykyistä enemmän. Pääosa murskatusta betonista hyödynnetään MARA-asetuksen (VnA 843/2017, Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa) mukaisessa käytössä infrarakentamisessa. Asetuksen mukaan betoni- tai tiilimurske saa sisältää enintään yhden painoprosentin siihen kuulumatonta vedessä kellumatonta ainesta, kuten metalleja. Lisäksi betoni- tai tiilimurskeessa saa olla enintään 10 cm³/kg vettä kevyempiä materiaaleja, kuten muovikuituja. Mikäli betonimurske hyödynnetään betonin runkoaineena, betonituotteissa tai valmisbetonina, niin silloin pyritään mahdollisimman puhtaaseen betoniin ja lähtömateriaalina ei käytetä kuitubetoneja. [24.]

9 Laskentapohja

9.1 Laskentapohjan sisältö

Työn tuloksena on tuotettu Excel-laskentapohja. Liitteessä 6. on esitetty laskuesimerkki tankoraidoitettun teräskuitubetonilaatan kapasiteetista murtorajatilassa ja liitteessä 7. vastaavasti laskuesimerkki tankoraidoittamattoman teräskuitubetonilaatan kapasiteetista murtorajatilassa.

Käytön nopeuttamiseksi osa tiedoista on korostettu väreillä:

- Vihreä: lähtötiedot.
- Sininen: huomioon otettavat väliarvot.
- Keltainen: tulokset.

Laskentapohja kattaa vain murtorajatilan laskentoja. Tulostussivujen ulkopuolelle on lisätty opastava teksti sekä lähtöarvojen taulukot. Tiedostossa on laskentaa ja materiaaliarvoja sisältäviä apuvälilehtiä, joiden muokkaus on estetty, sekä apuvälilehti alustavan voimasuureiden määrittämiseksi. Laskentapohja on tarkoitettu Sweco Rakennetekniikan sisäiseen käyttöön, joten tulostusalueen ulkopuolelle jääneitä laskentoja ja tietoja ei esitetä liitteessä olevissa laskuesimerkeissä.

9.2 Laskenta

Laskun suorittamiseen tarvitaan seuraavat lähtötiedot:

- rakenteen dimensiot
- betonin ominaisuudet
- harjateräksien ominaisuudet
- harjateräksien dimensiot (tankoraidoitettu rakenne)
- teräskuitujen ominaisuudet
- poikkileikkaukseen vaikuttava normaalivoima
- tuen sivumitat (lävistys).

Liitteessä 8 on esitetty ”Yhteenveto”-välilehti, johon lähtötiedon syötetään. Puristusvyöhykkeen korkeus määritetään yleisen menetelmän tankoraidoitetuille sekä -raudoittamattomalle kuitubetonille mukaan ja laskenta suoritetaan käynnistämällä ”solver” toiminto. Muuten laskenta tapahtuu automaattisesti ja tulokset näytetään myös ”Yhteenveto”-välilehdellä.

Laskentapohjan avulla voidaan nopeasti määrittää taivutus-, leikkaus- ja lävistyskestävyys sekä minimiraidoitus sitkeän käyttäytymisen varmistamiseksi taivutuksessa. Rakenteen kapasiteettitiedot ovat korostettu keltaisella värillä. Olennaisin tieto, jota kyseisen laskentapohjan avulla määritellään, on teräskuitujen jäännöstaivutusvetolujuusluokat R_1 ja R_3 sekä sitkeysluokka.

9.3 Laskennassa huomioitavat asiat

Työkalun käytössä on otettava huomioon seuraavat seikat:

- 1) Laskentapohja on tarkoitettu vain MRT-mitoituksiin. KRT-mitoituksen on suoritettava kuitutoimittajan kanssa.
- 2) Pohjan avulla määritetyt voimasuureet ovat tarkoitettu alustavaan suunnitteluun, tarkemmat tiedot on tarkistettava erikseen rakennekohtaisesti.

- 3) Suunnitteluohjeessa ilmoitettuun lävistyskapasiteetin laskentaan on suhtauduttava varovaisesti. Tapauksissa, joissa yläpinnan tankorauδοitus on harva, ohjeen kaavojen 6.3 ja 6.4 mukaan tankorauδοittamattoman laatan lävistyskestävyys on parempi kuin tankorauδοitetun. Lävistyskapasiteetti on tarkistettava kuitutoimittajan kanssa tai tankorauδοittamattoman rakenteen lävistyskapasiteetti voidaan laskea SFS-EN 1992-1-1 kaavalla 6.2b, jolloin kuitujen vaikutusta ei oteta huomioon.

10 Johtopäätökset

Työssä on esitetty teräskuitubetoni materiaalina, sen ominaisuuksia ja soveltuvuus kantaviin rakenteisiin sekä Suomessa, että muualla maailmaa. Teräskuitubetoni on ollut rakennusteollisuuden käytössä jo 70-luvusta lähtien, mutta sen käyttö kantavissa rakenteissa on edelleen kehitysvaiheessa ja alan ammattilaiset suhtautuvat siihen hyvin varovasti.

Euroopassa on useita toteutuneita projekteja, joissa teräskuitubetoni on käytetty paalu- ja välipohjalaatoissa pääraudoituksena. Suomessa kyseisen materiaalin käyttö rajautuu tällä hetkellä rakenteisiin, joilla ei ole hengenvaarallista sortumisvaaraa, kuten paalu- ja maanvaraiset laatat. Työssä on esitetty kaksi esimerkkiä Suomessa toteutuneista teräskuitubetonipaalulaatoista. Hankkeet ovat enemmän poikkeukset, kuin merkki teräskuitubetonin käytön yleistymisestä, koska rakennusviranomaiset suhtautuvat kantaviin teräskuitubetonirakenteisiin hyvin kielteisesti. Yleinen näkemys on se, että teräskuitubetonin käyttö välipohjalaatoissa on ehdottomasti kiellettyä, paalu- ja maanvaraisissa laatoissa käyttö sallitaan vain harvoissa tapauksissa tavanomaisissa rakenteissa ja teräskuitubetonipalkeista ei puhuta ollenkaan. Syyinä on virallisten ohjeiden puute Suomessa. Esimerkiksi Saksassa, Tanskassa ja Ruotsissa on olemassa paikallisia suunnitteluohjeita kantaville teräskuitubetonirakenteille.

Suunnitteluohje BY66 2018 on yritys ottaa askel lähemmäs teräskuitubetonin yleistymiseen, mutta ohje jättää edelleen suuren osan suunnittelutyöstä teräskuitutoimittajan vastuulle. Kantavista teräskuitubetonirakenteista on tutkittava monia asioita, kuten palonkestävyys, korroosiokestävyys ja käyttäytyminen pitkällä aikavälillä sekä luotava

Suomeen soveltuvat toteutus- sekä laadunvalvontaohjeet. Tällä hetkellä Betoniyhdistys Ry on käynnistämässä uutta kehitysprojektia teräskuitubetonin tutkimukseen, joten tilanne todennäköisesti muuttuu lähivuosina radikaalisesti. Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohjeen BY66:n mukaan voidaan mitoittaa rakenteen kapasiteettia murtorajatilassa, mutta käyttörajatilan mitoitukset vaativat kehitystä. Palomitoitus sekä korroosiokestävyys jäivät edelleen mainitsematta.

Työssä on esitetty olennaisia teräskuitubetoniominaisuuksia. Kuitujen tyyppi ja mitta vaikuttavat merkittävästi betonin lopullisiin ominaisuuksiin, joten betonin valmistuksessa on otettava huomioon kuitujen sekoittuvuus palloutumisen estämiseksi. Kuitubetonissa on lähes aina käytettävä notkistinta lisäaineena. Toteutuksessa on noudatettava valuohjeita kuitujen oikean orientoitumisen vuoksi. Tällä hetkellä valmistus ja toteutusohjeet eivät ole yleistyneet Suomessa, joten teknologia jää puutteelliseksi.

Opinnäytetyössä on tutkittu teräskuitubetonin ominaisuuksien lisäksi sen toimintaperiaate, joka poikkeaa perinteisestä tankoraidoitettun betonin toimintamallista, koska teräskuitubetonissa vetorasitukset jakautuvat tasaisesti koko vetoalueelle, toisin kuin tavanomaisessa tankoraidoituksessa vetojännitys keskittyy yhteen linjaan.

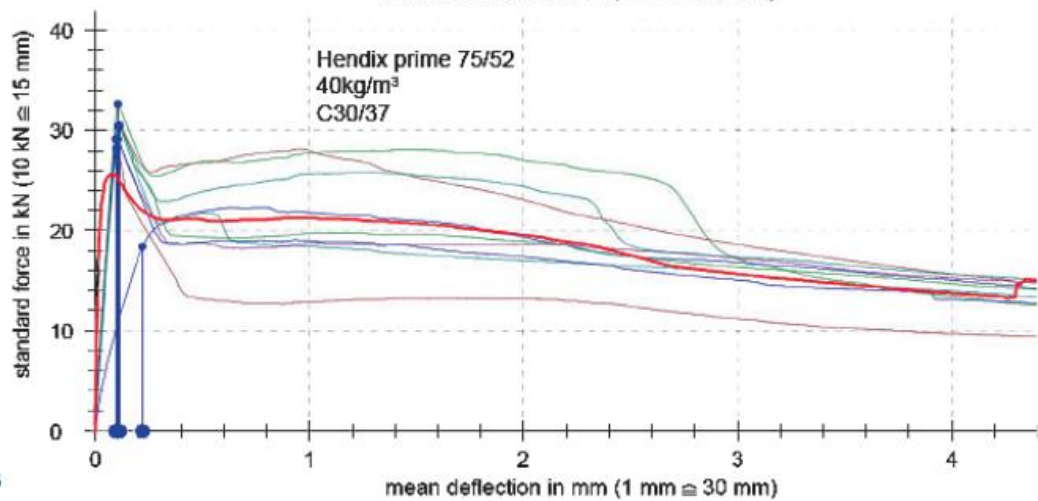
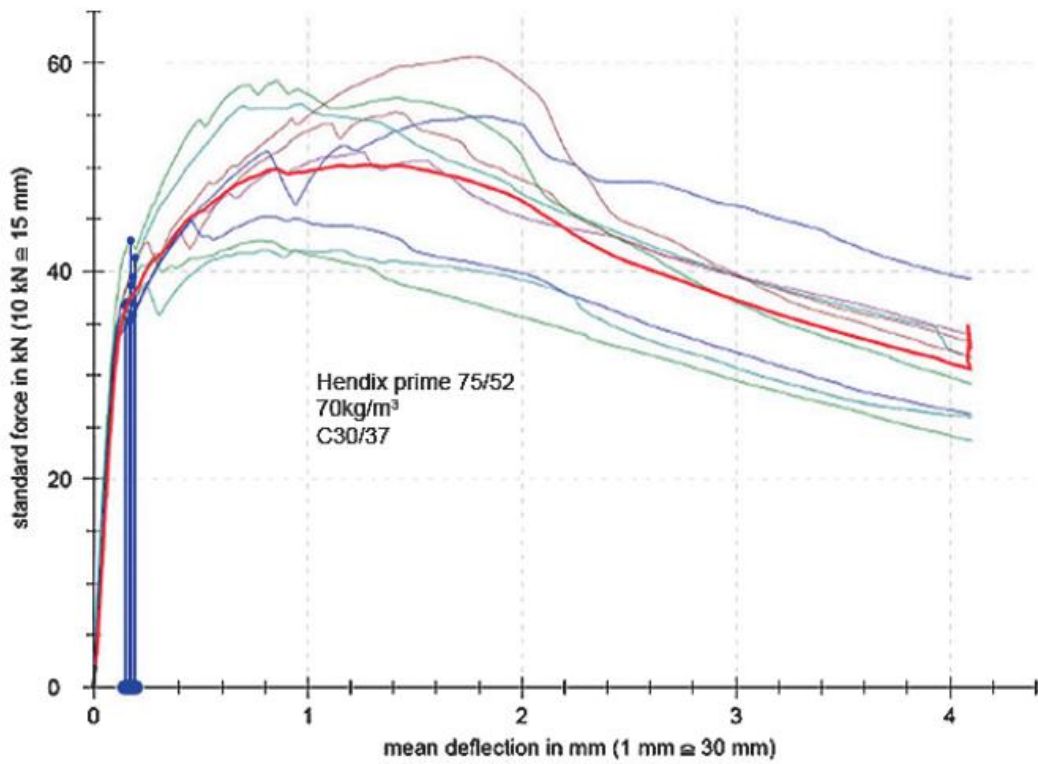
Työn painopiste on käytännönläheisyys ja tavoitteena oli rakentaa selkeää ymmärrystä teräskuitubetonista materiaalina, sen käyttömahdollisuuksia ja niiden edellytyksiä. Työssä on myös esitetty perusinformaatio teräskuitubetonin taloudellisesta kannattavuudesta, vaikutuksesta ympäristöön ja sen asemasta Suomen rakentamisessa. Pää tavoite oli kuitenkin tutustua uuteen suunnitteluohjeeseen ja luoda toimiva työkalu rakenteiden suunnitteluun sen mukaisesti. Excel-laskentapohja on toteutettu MRT:n osin ja siirretty koekäyttöön yrityksen sisällä.

Lähteet

- 1 History Of Concrete: A Very Old And Modern Material, Peter Jahren, Tongbo Sui, 2017.
- 2 Betoni Suomessa 1860-1960, Betoniyhdistys, 1991, s. 8-51.
- 3 Wikipedia, Reinforced concrete, https://en.wikipedia.org/wiki/Reinforced_concrete#History, haettu 28.2.2020.
- 4 BY 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus, 2008.
- 5 SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, Eurokoodi 2: betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
- 6 Fibre reinforced concrete- a case study. S.Ragavendra1, I.Praveen Reddy 2, Dr.Archanaa Dongre, conference paper, 2017.
- 7 BY 66 Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje, 2018.
- 8 <https://www.semtu.fi/fi/tuotteet/kuidut/teraskuidut>, haettu 28.2.2020.
- 9 Bonding Mechanisms and Strength of Steel Fiber–Reinforced Cementitious Composites, Sadoon Abdallah; Mizi Fan; and David W. A. Rees, 2018.
- 10 Rudus, mikrokuidut <https://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/kuitubetonit/5801/mikrokuitubetonit>, haettu 6.3.2020.
- 11 Rudus, mikrokuidut <https://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/kuitubetonit/5800/makrokuitubetonit>, haettu 6.3.2020.
- 12 Semtu mikro ja makrokuidut <https://www.semtu.fi/fi/tuotteet/kuidut/mikro-ja-makrokuidut>, haettu 6.3.2020.
- 13 Structural Concrete, Journal of the fib, volume 20, October 2019, s. 1660.
- 14 Toteutuneita teräskuiturakenteita, https://barsandrods.arcelormittal.com/wiresolutions/steelfibres/applications/structural/tab_slab/EN haettu 6.3.2020.
- 15 Mika Autio, Kehityspäällikkö Rudus Oy, haastattelu.
- 16 Juha Valjus DI, Kehitysjohdaja, Sweco Rakennetekniikka Oy, haastattelu.

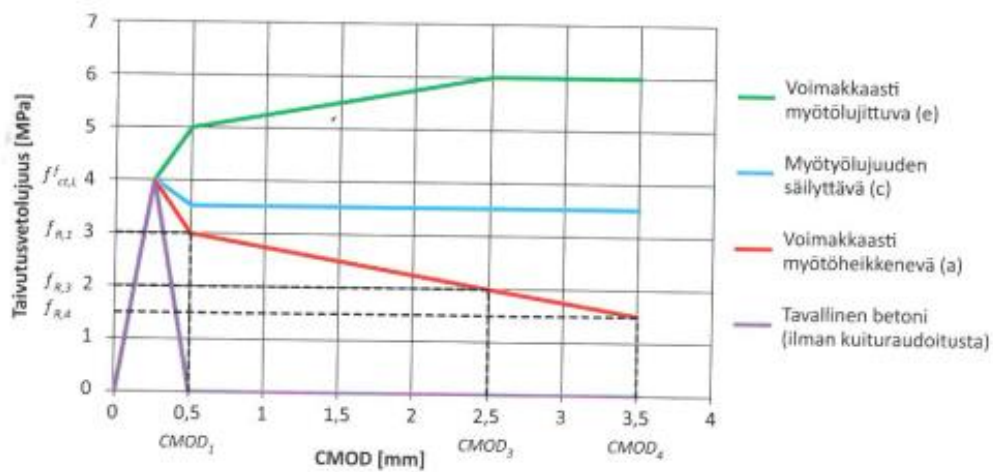
- 17 Teräskuitubetonin käyttäminen kantavissa rakenteissa Jürgen Mandl, DI, Martti Matsinen, DI, Betoni-lehti 1/2014.
- 18 Bekaer Channel, Steel fiber concrete reinforcement – how does it work? <https://www.bekaert.com/en/products/construction/concrete-reinforcement/dramix-steel-fiber-concrete-reinforcement>, haettu 13.3.2020.
- 19 Guidelines for Execution of Steel Fibre Reinforced SCC, Danish Technological Institute, 2013.
- 20 The Concrete Society, <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=908>, haettu 13.3.2020.
- 21 TR63 Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete, 2007.
- 22 SFS-EN 1992-1-2, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus.
- 23 Mechanical properties of steel fibre reinforced concrete exposed at high temperatures. Matteo Colombo. Marco di Prisco, Roberto Felicetti, 2009.
- 24 Jani Pieksemä, Kierrätysliiketoiminnan johtaja, Rudus Oy, haastattelu.
- 25 BY 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011.
- 26 BY45/BLY7 Betonilattiat 2018.
- 27 BY 71/RIL 149-2019 Betonirakenteiden työmaatoteutus.
- 28 Byggmax, verkkokauppa, Harjateräs 10mm, <https://www.byggmax.fi>, haettu 17.3.2020.
- 29 Rudus, betonihinnasto 2020.
- 30 Andreas Pettersson, Rakennesuunnittelija, Sweco Rakennetekniikka Oy, haastattelu.

Liite 1. Hendix Prime 75/52 kuidun koetulokset annostuksilla 40 kg/m³ ja 70 kg/m³, betonimassa C30/37



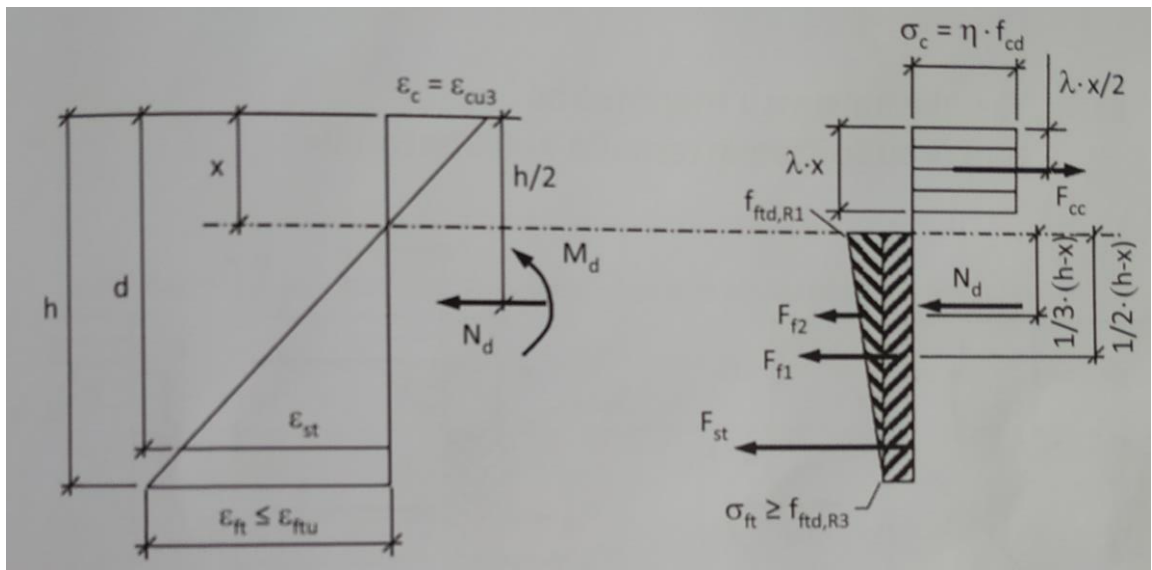
6

Liite 2. Kuitubetonin käyttäytyminen standardin SFS-En 14651 mukaisen palkkitestin perusteella.

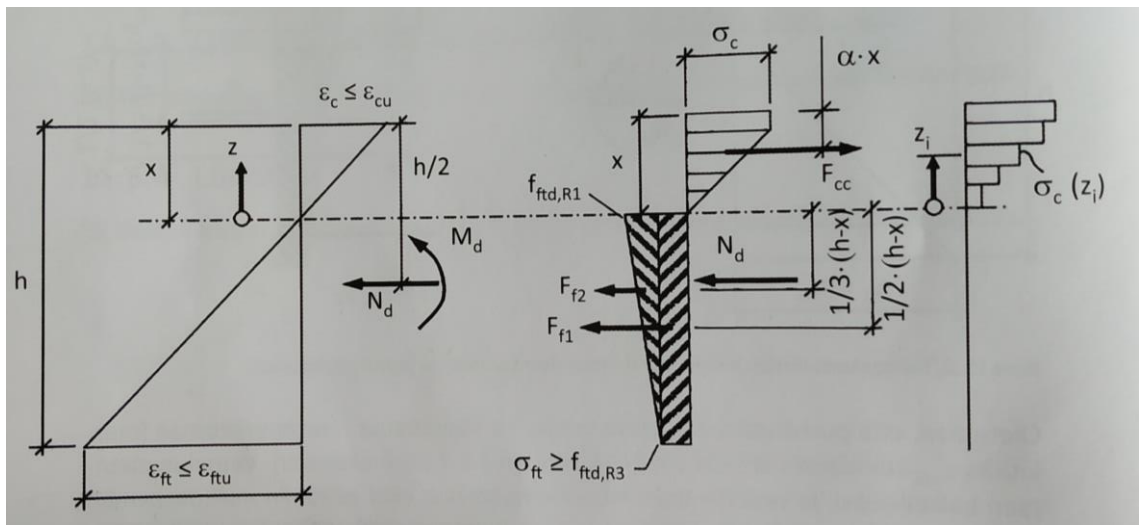


Kuva 3.1. Kuitubetonin käyttäytyminen standardin SFS-EN 14651 mukaisen palkkitestin perusteella.

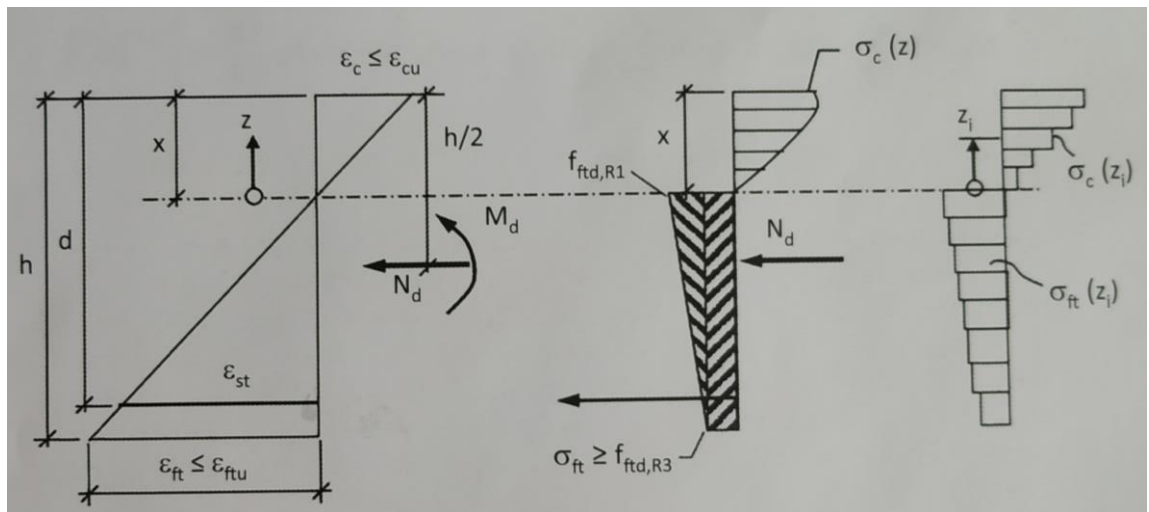
Liite 3. Yksinkertaistettu menetelmä tavallista tankoraudoitusta sisältävälle kuitubetonille, muodonmuutos- ja jännitysjaakaumat.



Liite 4. Yksinkertaistettu menetelmä tankoraidoittamattomalle kuitubetonille, muodonmuutos- ja jännitys jakaumat.



Liite 5. Yleinen menetelmä tankoraidoitetuille tai -raudoittamattomalle kuitubetonille, muodonmuutos- ja jännitysjaakaumat.



Liite 6. Esimerkkilaskenta tankoraidoitetun teräskuitubetonilaatan kapasiteetista murtorajatilassa.

SWECO <small>SWECO Rakennelaitos Oy, Ilmatoritelli 2, 00240 HELSINKI</small> kennuskohde:	Kuitubetonilaatta by 66,2018 mukaan	
	Työ no: xxxxxx	Projekti: FIIVIA Päiväys: 3.4.2020 Sijainti: Paalulaatan mitoitus. Tankoraidoitettu kuitubetoni.
		Sivut: 1(3)

htötiedot

Laatan paksuus h = 300 mm Luokka: 2b Leveys (mitoitetaan 1 metrin levyisenä kaistana) b = 1000 mm Suojaava betoni- ja kuitu-kerros c _{com} = 25 mm	Betonin ominaisuudet Betonilaatu: C35/45 α _{cc} : 0,85 f _{ctd,0,05} : 2,25 MPa f _{td} : 1,50 MPa f _{cm} : 43 MPa f _{ctm} : 3,21 MPa E _{cm} : 34,1 GPa f _{yk} : 35 MPa f _{td} : 19,8 MPa ε _{cu3} : 1,75 ‰ ε _{cu2} : 3,5 ‰ ε _{cu1} : 2,0 ‰ ε _{cu0} : 3,5 ‰ n: 2	Osavarmuusluvut MRT Betoni: γ _c = 1,5 Betoniteräs: γ _s = 1,15 Kuitubetoni: γ _w = 1,5 KRT Betoni: γ _c = 1 Betoniteräs: γ _s = 1 Kuitubetoni: γ _w = 1 Onnettomuus Betoni: γ _c = 1,2 Betoniteräs: γ _s = 1 Kuitubetoni: γ _w = 1,2
Teräs Teräsluokka: B500B E _s : 200000 MPa f _{yk} : 500 MPa f _{td} : 434,8 MPa	Kuitujen ominaisuudet Jännöistäivutusvetolujuus/Luokka R1: f _{R,1} = 3 MPa Sitkeysluokka R3: d myötölujittuva f _{R,3} : 3,3 MPa	

Taulukko 3.1 — Kuitubetonin ohjeelliset jännöistäivutusvetolujuuden R₃-luokat (f_{R,3} [MPa]) esitetty R₁-luokan (f_{R,1} [MPa]) ja sitkeysluokan (R₃/R₁) perusteella.

Sitkeys- luokka (R ₃ /R ₁)	R ₁ - luokka f _{R,1} [MPa]									
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
a (0.5 - 0.7)	0.5	0.8	1.0	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
b (0.7 - 0.9)	0.7	1.1	1.4	1.8	2.1	2.8	3.5	4.2	4.9	5.6
c (0.9 - 1.1)	0.9	1.4	1.8	2.3	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2
d (1.1 - 1.3)	1.1	1.7	2.2	2.8	3.3	4.4	5.5	6.6	7.7	8.8
e (≥1.3)	1.3	2.0	2.6	3.3	3.9	5.2	6.5	7.8	9.1	10.4

Merkinnät:
 R₁ = f_{R,1}
 R₃ = f_{R,3}

Sitkeysvaatimukset: Jännösluokkakerroin, C ₁ = f _{R,3} /f _{cm,0,05} ≥ 50%: 133,5 [%] OK Sitkeyskerroin, f _{R,3} /f _{R,1} ≥ 50%: 110 [%] OK Jännösluokkakerroin, C ₃ = f _{R,3} /f _{cm,0,05} ≥ 65%: 146,9 [%] OK
Ominaisjännöistäivutusvetolujuudet: Suora jännöistäivutusvetolujuus, f _{td,R1} = 0,45 * f _{R,1} = 1,35 MPa BY 66 kaava 3.1 Suora jännöistäivutusvetolujuus, f _{td,R3} = 0,37 * f _{R,3} = 1,221 MPa BY 66 kaava 3.2
Suoran jännöistäivutusvetolujuuden suunnitteluarvot: Valusuunnasta riippuva kerroin η ₁ : 1 BY 66 kohta 3.5.2 Rakenteen staattisesta määrättyydestä riippuva kerroin η _{det} : 2 BY 66 Taulukko 3.2
Murtorajatilassa: f _{td,R1} = η ₁ * η _{det} * (f _{td,R1} /γ _c) = 1,8 MPa BY 66 kaava 3.3 f _{td,R3} = η ₁ * η _{det} * (f _{td,R3} /γ _c) = 1,63 MPa
Käyttöraajatilassa: f _{td,R1} = η ₁ * (f _{td,R1} /γ _{c,kt}) = 1,35 MPa BY 66 kaava 3.4

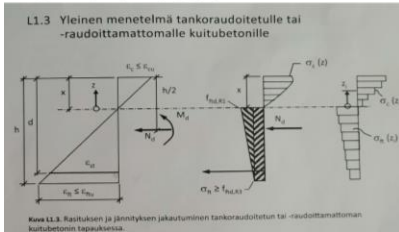
Taivutusmitoitus:

Tankojen halkaisija	ϕ	10 mm	
	A_{s0}	78,5 mm ²	
Lisäraudoituksen pinta-ala	n	5 kpl/m	
	A_{st}	392,7 mm ² /m	
	d	270 mm	
	$\rho = A_{st} / d$	0,001 ≤ 2 %	
Halkeamisvenymä, $\epsilon_{cr} = f_{ctd} / E_c =$	w_u	0,00004	BY 66 kohta 3.5.3 b)
Vakio, halkeaman avautuma murtotilanteessa		2,50000 mm	
Kuidun hoikkusuulu (jos käytetään tankoraidoitusta)	$l/d =$	80	
Karakteristinen pituus	$l_{ct} =$	193,66 mm	BY 66 kaava 3.5
Kuitubetonin murtovenymä, $\epsilon_{tu} = \epsilon_{ct} + w_u / l_{ct}$	ϵ_{tu}	0,01295	BY 66 kohta 3.5.3 b)

Murtorajatila (MRT)

Taivutus ja normaalivoima:

Puristusvyyhykkeen korkeus ratkaistaan excel solverilla. Excel iteroi, jotta tasapainoyhtälö $F_{t,tot} = F_{ct} + F_{st} + N_d$ toteutuu



Puristusvyyhykkeen korkeus, aliraidoitettu poikkileikkaus:

Maksimivetolujuus vetoalueen uloimmissa kuiduissa:

$$\sigma_{s,max} = f_{td,R1} \cdot (\epsilon_{st} / \epsilon_{tu}) \cdot (f_{td,R1} / f_{td,R3}) = 1,628 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_s = (\epsilon_{st} (d-x)) / (h-x) = 0,01122$$

$$\sigma_s = \sigma_s, E_s \leq f_{td} = 434,8 \text{ MPa}$$

$$F_s = \sigma_s A_s = 170,7 \text{ kN}$$

Vetovoima, $F_{st} = 384,90 \text{ kN}$

Voima, teräs, $F_{st} = A_s E_s \epsilon_s ((d-x)/x) = 903,61 \text{ kN}$

Poikkileikkaukseen vaikuttava normaalivoima

Voima puristuspuolella =

Vetopuolen voimat yhteensä $F_{t,tot} = F_{ct} + F_{st} + N_d = 1288,5 \text{ kN}$

Vaakavoimien tasapainoyhtälö $F_{ct} - F_{st,tot} = 0$

x	76,34 mm	
$\epsilon_{st} \leq \epsilon_{tu}$	0,01295	BY 66 kaava L2.5
	1,628 MPa	BY 66 kaava 6.1
	0,01122	
	434,8 MPa	
	170,7 kN	
	384,90 kN	
	903,61 kN	
N_d	0 kN	
F_{ct}	1288,5 kN	
σ_s	4,421 o/oo	
	1288,5 kN	
	0,00	Sulun arvo on oltava 0. Käynnistä solver ja iteroi, jos sulun arvo on eri kuin 0
M_{ed}	98,1 kNm	BY 66 kaava L2.7
Käyttöaste	38 %	

Leikkaus:

$$k = 1,86$$

$$\rho = A_{st} / bh = 0,00$$

$$\sigma_{ct} = N_{ed} / A_c = 0,00 \text{ N/mm}^2$$

$$v_{min} = 0,035 k^{1/2} + f_{ct,k}^{1/2} = 0,53$$

$$V_{ed,cr} = \left[\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(1 + 7,5 \frac{f_{ct,k}}{f_{td,k}} \right) f_{ct,k} \right]^{2/3} + 0,15 \cdot \sigma_{ct} \cdot b_w \cdot d = 206,9 \text{ kN}$$

Käyttöaste

	52 %	BY 66 kaava 6.2
--	------	-----------------

Minimiraudoitus sitkeän käyttäytymisen varmistamiseksi taivutuksessa

vedetyn osan korkeus taivutuksessa, $h_{cr} = h/2 = 150,0 \text{ mm}$

vedetyn osan pinta-ala taivutuksessa, $A_{cr} = h_{cr} \cdot b = 1,5E+08 \text{ mm}^2$

Poikkileikkaukseen vaikuttava ulkoinen normaalivoima $N_{ed} = 0$

Normaalivoimasta aiheutuva jännitys $\sigma_s = N_{ed} / (b \cdot h) = 0$

Jos Ned on puristava voima $k_1 = 1,5$

Jos Ned on vetävä voima $k_1 = 2 \cdot h / 3 \cdot h$

$h^* = h$, kun $h < 1,0m$

$f_{ct,eff} = f_{ct,m}$

$k_2 = \min(0,4 [1 - (\sigma_s / (k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}))], 1)$

Pelkkien kuitujen käyttö on mahdollista jos seuraava ehto toteutuu:

$$k_2 \cdot f_{ct,m} \cdot \eta \cdot \rho_{det} \cdot f_{td,R3} < 0$$

Tarvittava minimimäärä:

$$A_{s,min} = (A_{cr} \cdot (k_2 \cdot f_{ct,m} \cdot \eta \cdot \rho_{det} \cdot f_{td,R3})) / f_{yk}$$

Katastrofiraudoitus:

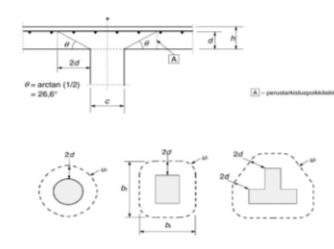
Laatalta tuelle tulevan kuorman mitoitusarvo $V_{ed} = 200 \text{ kN}$

Onnettomuuserästen poikkileikkauksala $A_{s,ac} = \max(V_{ed} / f_{yk}; 3T16) = 603 \text{ mm}^2/m$

kunkin janteen suunnassa

Onnettomuuseräkkeet sijoitetaan laatan alapintaan ja niiden tulee muodostaa laataassa jatkuva sideohjelmistö (käytetään täyttä jatkoospuutta). Minimimäärä pilarilaatan onnettomuuseräksille on 3-T16 pilaria kohden kunkin janteen suunnassa.

Lävistys:			
Tuen sivumitat		$c_1 = 300$ mm $c_2 = 300$ mm	
		$D = (c_1 + c_2)^{0.5} = 300$ mm	
		$C_{k,Ed} = \frac{0.3 \left(\frac{D}{d} + 1.5 \right)}{\gamma_c \left(\frac{D}{d} + 4 \right)} = 0.10$	
		$N_{Ed} = 0$ kN	
		$A_c = b_w \cdot h = 300000$ mm ²	
		$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0.2 \cdot f_{ctd}$	0 MPa
Tehollinen korkeus	$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$	$d = 270$ mm $k = 1.86$ $k \leq 2.0$ $C = 0.450$	SFS-EN 1992-1-1 6.2.2
Lisäraudoitus yläpinnassa (lävistys)	Tankojen halkaisija yläpinnassa Tankomäärä yläpinnassa Lisäraudoituksen pinta-ala yläpinnassa (leikkaus/lävistys)	$\phi_{ylä} = 10$ mm $n = 5$ kpl $A_{ylä} = 392.7$ mm ² /m	$A_{s0} = 78.5$ mm ²
		$\rho_1 = A_{s0} / A_c = 0.13\% \leq 2\%$	
Lävistyskestävyyden mitoitusarvo tavanomaisista tankoraidoista sisätiläville kuitubetonilaatoille ja -pilarianturroille:			
	$V_{Rd,ct} = \frac{0.3 \left(\frac{D}{d} + 1.5 \right)}{\gamma_c \left(\frac{D}{d} + 4 \right)} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_1 \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{tk,ct}}{f_{ctd}} \right) \cdot f_{tk} \right]^{1/3} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}$	$V_{Rd,ct} = 0.543$ MPa	
Leikkaukskapasiteetin minimiarvo EC:n kaavalla 6.2b (EN 1992-1-1) Leveys		$u_1 = 2 \cdot c_1 + 2 \cdot c_2 + 4 \cdot nd = 4592.9$ mm	
Leikkaukskestävyyden vähimmäisarvo EN 1992-1-1 kaava 6.2b		$V_{Rd} = V_{Rd,ct} \cdot d \cdot u_1 = 672.9$ kN	
EN 1992-1-1 kaava 6.3N	$V_{Rd,ct} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$ $v_{min} = 0.035 \cdot k^{2/3} \cdot f_{td}^{1/2}$	$b_w = 1$ m $V_{Rd,ct} = 141.9$ kN/m $v_{min} = 0.53$ MPa	
Lävistyskapasiteetti		$V_{Rd} = 672.9$ kN	
Lävistyskestävyyden mitoitusarvo kuitubetonista valmistetuille maanvaraisille laatoille ja pilarianturroille, jotka eivät sisällä tavanomaisista tankoraidoista:		$V_{Rd,ct} = V_{Rd,ct} = 0.92$ MPa $V_{Rd} = V_{Rd,ct} \cdot d \cdot u_1 = 1142.2$ kN	(by66, 6.4)



Liite 7. Esimerkkilaskenta tankoraidoittamattoman teräskuitubetonilaatan kapasiteetista murtorajatilassa.

 Sweco Rakennustekniikka Oy, Ilmatarpori 2, 00240 HELSINKI	Kuitubetonilaatta by 66,2018 mukaan	
	Tekijä: FIVIA	Sivut: 1(3)
Rakennuskohde:	Työ no: xxxxxx	Päiväys: 3.4.2020
Sisältö: Paalulaatan mitoitus. Tankoraidoittamaton kuitubetoni.		

Lähtötiedot

Laatan paksuus h = 300 mm Luokka: 2b Leveys (mitoitetaan 1 metrin levyisenä kaistana) b = 1000 mm Suojaava betonipeite c _{nom} = 25 mm	Osavarmuusluvut MRT Betoni Yc = 1,5 Betoniteräs Ys = 1,15 Kuitubetoni Yt = 1,5 KRT Betoni Yc = 1 Betoniteräs Ys = 1 Kuitubetoni Yt = 1 Onnettomuus Betoni Yc = 1,2 Betoniteräs Ys = 1 Kuitubetoni Yt = 1,2
Betonin ominaisuudet Betonilaatu: C35/45 α _{cc} = 0,85 f _{ctk,0.05} = 2,25 MPa f _{ctd} = 1,50 MPa f _{cm} = 43 MPa f _{cm} = 3,21 MPa E _{cm} = 34,1 GPa f _{ck} = 35 MPa f _{cd} = 19,8 MPa σ _{c3} = 1,75 ‰/‰ σ _{u3} = 3,5 ‰/‰ σ _{c2} = 2,0 ‰/‰ σ _{u2} = 3,5 ‰/‰ n = 2	Teräs Teräslaatu: B500B E _s = 200000 MPa f _{yk} = 500 MPa f _{yk} = 434,8 MPa
Kuitujen ominaisuudet Jäännöstaivutusvetolujuus/Luokka R1 Sitkeysluokka R3 f _{R1} = 3 MPa d myötölujittuva f _{R3} = 3,3 MPa	

Taulukko 3.1 — Kuitubetonin ohjeelliset jäännöstaivutusvetolujuuden R₁-luokat (f_{R,3} [MPa]) esitetty R₁-luokan (f_{R,1} [MPa]) ja sitkeysluokan (R₃/R₁) perusteella.

R ₁ -luokka f _{R,1} [MPa]	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
a (0,5 - 0,7)	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
b (0,7 - 0,9)	0,7	1,1	1,4	1,8	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6
c (0,9 - 1,1)	0,9	1,4	1,8	2,3	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2
d (1,1 - 1,3)	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3	4,4	5,5	6,6	7,7	8,8
e (≥1,3)	1,3	2,0	2,6	3,3	3,9	5,2	6,5	7,8	9,1	10,4

Merkinnot:
R₁ = f_{R,1}
R₃ = f_{R,3}

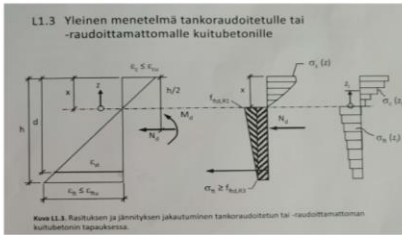
Sitkeysvaatimukset: Jäännöslujuuskertoin, C ₁ = f _{R,3} /f _{ctk,0.05} ≥ 50% = 133,5 [%] OK Sitkeyskerroin, f _{R,3} /f _{R,1} ≥ 50% = 110 [%] OK Jäännöslujuuskertoin, C ₃ = f _{R,3} /f _{ctk,0.05} ≥ 65% = 146,9 [%] OK
Ominaisjäännösvetolujuudet: Suora jäännösvetolujuus, f _{R,R1} = 0,45 * f _{R,3} = 1,35 MPa BY 66 kaava 3.1 Suora jäännösvetolujuus, f _{R,R3} = 0,37 * f _{R,3} = 1,221 MPa BY 66 kaava 3.2
Suoran jäännösvetolujuuden suunnitteluarvot: Valusuunnasta riippuva kerroin η _f = 1 BY 66 kohta 3.5.2 Rakenteen staattisesta määrättyydestä riippuva kerroin η _{det} = 2 BY 66 Taulukko 3.2
Murtorajatilassa: f _{td,R1} = η _f * η _{det} * (f _{R,R1} /γ _f) = 1,8 MPa BY 66 kaava 3.3 f _{td,R3} = η _f * η _{det} * (f _{R,R3} /γ _f) = 1,63 MPa
Käyttörajatilassa: f _{td,R1} = η _f * (f _{R,R3} /γ _{f,URT}) = 1,35 MPa BY 66 kaava 3.4

Taivutusmitoitus:			
Tankojen halkaisija	ϕ	10 mm	
	A_{s0}	78,5 mm ²	
Lisäraudoituksen pinta-ala	n	0 kpl/m	
	A_{st}	0,0 mm ² /m	
	d	270 mm	
	$\rho = A_{st} / d$	0,00004	BY 66 kohta 3.5.3 b)
Halkeamisvenymä, $\epsilon_{cr} = f_{ct,d} / E_c =$	w_u	2,50000 mm	
Vakio, halkeaman avautuma murtotilanteesta	l/d	80	
Kuidun hoikkusuusluku (jos käytetään tankoraudoitusta)	l_{cs}	300,00 mm	BY 66 kaava 3.5
Karakteristinen pituus	ϵ_{tu}	0,00838	BY 66 kohta 3.5.3 b)
Kuitubetonin murtovenymä, $\epsilon_{tu} = \epsilon_{ct} + w_u / l_{cs}$			

Murtorajatilä (MRT)

Taivutus ja normaaliavoima:

Puristusvyöhykkeen korkeus ratkaistaan excel solverillä. Excel iteroi, jotta tasapainoyhtälö $F_{ct} = F_{td} + F_{st} + N_d$ toteutuu



Puristusvyöhykkeen korkeus, aliraidoitettu poikkileikkaus:

Maksimivetoalueen uloimmissa kuiduissa:

$$\sigma_{t,max} = f_{td,s1} - (\epsilon_{tu} / \epsilon_{tu}) * (f_{td,s1} - f_{td,s2}) = 1,628 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_c = (\sigma_c(d-x)) / (h-x) = 0,00740$$

$$\sigma_{cs} = \epsilon_c * E_c \leq f_{ct,d} = 434,8 \text{ MPa}$$

$$F_c = \sigma_{cs} * A_c = 0,0 \text{ kN}$$

$$\text{Vetovoima, } F_{st} = 443,59 \text{ kN}$$

$$\text{Voima, teräs, } F_{td} = A_{st} * E_s * \epsilon_c = ((d-x)/x) = 0,00 \text{ kN}$$

$$\text{Poikkileikkauksen vaikuttava normaaliavoima}$$

$$\text{Voima puristuspuolella} = 0,00 \text{ kN}$$

$$N_d = 0 \text{ kN}$$

$$F_{ct} = 443,6 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = 1,372 \text{ o/oo}$$

$$443,6 \text{ kN}$$

$$0,00$$

Vetovoimien tasapainoyhtälö $F_{ct} = F_{td} + F_{st} + N_d = 0$

$M_{ed} = 68,3 \text{ kNm}$
Käyttöaste 55 %

Solun arvo on oltava 0. Käynnistä solver ja iteroi, jos solun arvo on eri kuin 0

Leikkaus:			
	k	1,86	
	$\rho = A_{st} / bh$	0,00	
	$\sigma_{cs} = N_{ed} / A_c$	0,00 N/mm ²	
	$v_{min} = 0,035k^{1/2} + f_{ct,d}^{1/2}$	0,53	
	$V_{ed} = \left(\frac{0,18}{\gamma_c} k \left[100 \rho \left(1 + 7,5 \frac{f_{ct,d}}{E_s} \right) f_{ct,d} \right]^{1/3} + 0,15 \sigma_{cs} \right) v_{min} d$	157,7 kN	BY 66 kaava 6.2
	Käyttöaste	68 %	

Minimiraudoitus sitkeän käyttötymisen varmistamiseksi taivutuksessa			
vedetyn osan korkeus taivutuksessa, $h_{et} = h/2 =$		150,0 mm	
vedetyn osan pinta-ala taivutuksessa, $A_{et} = h_{et} * b =$		1,5E+08 mm ²	
Poikkileikkauksen vaikuttava ulkoinen normaaliavoima	N_{Ed}	0	
Normaaliavoimasta aiheutuva jännitys $\sigma_c = N_{Ed} / (b * h)$		0	
Jos N_{ed} on puristava voima $k_1 = 1,5$			
Jos N_{ed} on vetävä voima $k_1 = 2 * h / 3 * h$			
$h^* = h$, kun $h < 1,0m$	k_1	1,5	
$f_{ct,eff} = f_{ctm}$	h^*	300 mm	SFS-EN 1992-1-1 kohta 7.3.2
$k_2 = \min(0,4 (1 - (\sigma_c / (k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}))), 1)$	$f_{ct,eff}$	3,21 MPa	
Peikkin kultujen käyttö on mahdollista jos seuraava ehto toteutuu:		0,4	
$k_2 * f_{ctm} * \eta * \eta_{det} * f_{td,s1} < 0$		OK	BY 66 kohta 9.2.1.1 kaava 9.2
Tarvittava minimiteräsmäärä:		0 mm ²	
$A_{s,min} = (A_{et} * (k_2 * f_{ctm} * \eta * \eta_{det} * f_{td,s1})) / f_{yk}$			
Katastrofiraudoitus:			
Laatalta tuelle tulevan kuorman mitoitusarvo	V_{Ed}	200 kN	
Onnettomuuserästen poikkileikkauksala	$A_{s,ac}$	603 mm ² /m	BY 66 kaava 9.3
kunkin janteen suunnassa $A_{s,ac} = \max((V_{Ed} / f_{yk}), 3T16)$			

Onnettomuuseräkkeet sijoitetaan laatan alapintaan ja niiden tulee muodostaa laalassa jatkuva sideojastelma (käytetään täyttä jalkospiutua). Minimimäärä pilarilaatan onnettomuuseräksille on 3-T16 pilaria kohden kunkin janteen suunnassa.

Lävistys:

Tuen sivumitat $c_1 = 300$ mm
 $c_2 = 300$ mm

$D = (c_1 \cdot c_2)^{0.5} = 300$ mm

$\chi_{red,c} = \frac{0.3 \cdot \left(\frac{D}{d} + 1.5\right)}{\gamma_c \cdot \left(\frac{D}{d} + 4\right)} = 0,10$

$N_{Ed} = 0$ kN
 $A_c = b_w \cdot h = 300000$ mm²
 $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0.2 \cdot f_{td}$ MPa

Tehollinen korkeus $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$

Ehto $d = 270$ mm
 $k = 1,86$
 $k \leq 2,0$ OK
 $C = 0,450$

Lisäraudoitus yläpinnassa (lävistys) Tankojen halkaisija yläpinnassa
Tankomäärä yläpinnassa
Lisäraudoituksen pinta-ala yläpinnassa (leikkaus/lävistys)

$\phi_{ls} = 10$ mm
 $n = 0$ kpl
 $A_{ls} = 0,0$ mm²/m

$\rho_1 = A_{ls} / A_c = 0,00\% \leq 2\%$

Lävistykestävyyden mitoitusarvo **tavanomaista tankorauoitus sisältäville** kuitubetonilaatolle ja -pilarianturuille:

$V_{Rd,cf} = \frac{0.3 \cdot \left(\frac{D}{d} + 1.5\right)}{\gamma_c \cdot \left(\frac{D}{d} + 4\right)} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{tk,sl}}{f_{tk}} \right) \cdot f_{tk} \right]^{0.33} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}$

$V_{Rd,cf} = 0,000$ MPa

Leikkauskapasiteetin minimiarvo EC:n kaavalla 6.2b (EN 1992-1-1)
Leveys
Leikkauskestävyyden vähimmäisarvo EN 1992-1-1 kaava 6.2b
 $V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$
EN 1992-1-1 kaava 6.3N $v_{min} = 0.036 \cdot k^{0.2} \cdot f_{ck}^{1.0}$

$u_1 = 2 \cdot c_1 + 2 \cdot c_2 + 4 \cdot nd = 4592,9$ mm

$V_{Rd} = V_{Rd,cf} \cdot d \cdot u_1 = 0,0$ kN

$b_w = 1$ m

$V_{Rd,c} = 141,9$ kN/m
 $v_{min} = 0,53$ MPa

Lävistyskapasiteetti $V_{Rd} = 141,9$ kN

Lävistykestävyyden mitoitusarvo **kuitubetonista valmistetuille** maanvaraisille laatoille ja pilarianturuille, jotka eivät sisällä tavanomaista tankorauoitus:

$V_{Rd,cf} = V_{Rd,c} = (k/2) \cdot C \cdot f_{tk} / \gamma_f$


$V_{Rd,cf} = V_{Rd,c} = 0,92$ MPa
 $V_{Rd} = V_{Rd,cf} \cdot d \cdot u_1 = 1142,2$ kN

(by66, 6.4)

SFS-EN 1992-1-1 6.2.2

As0 $78,5$ mm²

Liite 7. Laskentapohjan yhteenvedövälilehti.

SWECO 			Kuitubetonilaatta by 66,2018 mukaan		
Sw eco Rakennetekniikka Oy, Ilmalanportti 2, 00240 HELSINKI			Tekijä: FIVIA	Sivu: 1(3)	
Rakennuskohde:			Päiväys: 6.4.2020	Sisältö:	
Työ no: xxxxx			Paalulaatan mitoitus. Tankoraidoittamaton kuitubetoni.		
Lähtötiedot			Tulokset		
h=	300	mm	Taivutuskestävyys:	85,1	kNm
Kuitubetonin vaativuusluokka (Taulukko 1):	2b		KA	44 %	OK
b=	1000	mm	Leikkauskestävyys:	197,7	kN
c _{nom} =	25	mm	KA	54 %	OK
Betoni:	C35/45		Tarvittava minimiraidoitus:	0	mm ²
Teräs:	B500B		Katastrofiraidoitus:	603	mm ² /m
Jäännöstaivutusvetolujuus/Luokka R1 [f _{R,1}]:	2,5	MPa	Läivistyskapasiteetti:		
Sitkeysluokka (Taulukko 2):	d myötölujuuttuva		Tankoraidoitettu:	141,9	kN
Valusuunnasta riippuva kerroin [η _d] (Taulukko 3):	1		KA	75 %	OK
Rakenteen staattisesta määrätömyydestä riippuva kerroin [η _{de}] (Taulukko 4):	2		Tankoraidoittamaton:	969,1	kN
Alapinnan tankojen halkaisija:	10	mm	KA	11 %	OK
Alapinnan tankojen lkm.:	3	kpl/m	Solun arvo on oltava 0. Paina nappia 1		
Kuidun hoikkusluku (jos käytetään tankoraidoitusta)	80		0,00		
Poikkileikkaukseen vaikuttava normaalivoima [N _d]	0	kN	Nappi 1		
M _{ed} =	37,4	kNm			
V _{ed} =	106,6	kN			
Paalun sivumitat:					
c ₁ =	300	mm			
c ₂ =	300	mm			
Yläpinnan tankojen halkaisija:	10	mm			
Yläpinnan tankojen tankomäärä:	0	kpl			