



Kuitubetonin käyttö paksuissa siirtolaattarakenteissa

Micael Kjellman

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talorakennustekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talonrakennustekniikka

KJELLMAN, MICAEL:

Kuitubetonin käyttö paksuissa siirtolaattarakenteissa

Opinnäytetyö 93 sivua, joista liitteitä 30 sivua
Toukokuu 2020

Tässä opinnäytetyössä käsitellään kuitubetonin käyttöä paksuissa siirtolaattarakenteissa. Kuitubetonin käyttö on yleistymässä maanvaraisista laatoista kantaviin rakenteisiin, mutta teräskuitubetonin käyttö kantavissa rakenteissa on vielä hyvin vähäistä. Syynä tähän on puutteellinen ohjeistus eurokoodien tasolla.

Työssä esitellään yleisesti kuitubetonin käyttökohteita maailmalla paksujen laattarakenteiden osalta sekä käydään läpi yleiset kuitutyypit ja niiden ominaisuudet. Teräskuitubetonista esitellään mekaaniset ominaisuudet sekä rakennetekninen toiminta. Työssä vertaillaan laskelmin esimerkkikohteen normaalisti raudoitetun ja kuitubetonista tehtyä laattaa, joista saadaan materiaalimenekit sekä niiden tuomat edut ja haitat. Rakenneteknisen toiminnan kannalta tutkitaan, onko kuitubetonin ominaisuuksista apua siirtolaattojen lävistymistarkasteluissa. Lisäksi kuitubetonilaattojen halkeiluun liittyvät ominaisuudet käydään läpi.

Tämä insinöörityö tehtiin Sitowise Oy:n toimeksiannosta tavoitteena kasvattaa suunnittelijoiden osaamista kuitubetonirakenteissa, kertoa kuitubetonin käyttämisen kannattavuudesta sekä auttaa suunnittelijoita tekemään rakenneratkaisuja kuitubetonirakenteissa paksujen siirtolaattojen osalta. Opinnäytetyö perustuu pääosin Betoniyhdistys ry:n kirjaan Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje, joka perustuu lähinnä ruotsalaiseen standardiin SS 812310 (Fibre Concrete-Design of Fibre Concrete Structures). Insinöörityön tietoa on myös koottu väitöskirjoista, kirjallisuudesta sekä suullisista keskusteluista yrityksen asiantuntijoiden kesken.

Asiasanat: teräskuitu, kuitubetoni, paksulaatta

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme of Construction Engineering
Option in structural engineering

KJELLMAN, MICAEL:

Using Steel Fiber reinforced concrete in thick slab structures

Bachelor's thesis 93 pages, appendices 30 pages
May 2020

This bachelor's Thesis reviews steel fiber reinforced concrete usage in thick slab structures. Steel fiber concrete is becoming more common from ground bearing slabs to load bearing structures, but the use is still quite low. The reason for the low usage is the lack of guidance on eurocode standards.

The purpose in this Bachelor's Thesis is to review steel fiber structures globally focusing on thick slab structures as a literature explanation. In addition, the review will focus on different types of fibers and their own features, with a deeper focus on mechanical features and structural behavior of steel fibers. Steel fiber reinforced structures and reinforced structure will be compared using calculations in terms of material consumption. Furthermore, possible enhanced punching resistance achieved through steel fiber usage and features associated with cracking will be reviewed.

This Bachelor's Thesis is made for Sitowise Oy. The aim is to increase designers knowledge on steel fiber reinforced concrete structures, tell the profitability and help designers to make informed decisions when it comes down to using steel fiber reinforced concrete in thick slab structures. This Bachelor's Thesis is based mainly on Finnish guideline BY 66 teräsrakenteiden suunnitteluohje which is based on Swedish guideline SS 812310 (Fiber concrete-Design of Fiber Concrete Structures). Information has also been gathered from many doctoral theses, literatures and spoken interviews with specialists from the company.

Key words: steel fiber, steel fiber reinforced concrete, thick slab

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	9
2	YLEISTÄ KUITUBETONISTA.....	10
	2.1 Erilaiset kuitumateriaalit ja niiden ominaisuudet	10
	2.1.1 Lasikuidut.....	10
	2.1.2 Muovikuidut.....	11
	2.1.3 Teräskuidut	12
3	KUITUBETONI	15
	3.1 Kuitubetonin käyttö laatoissa	15
	3.2 Toteutettuja kohteita Suomesta ja maailmalta	15
	3.2.1 Rocca-Al-Mare-torni, Tallinna.....	16
	3.2.2 LKS toimistorakennus, Mondragon	17
	3.2.3 Ditton Nams kauppakeskus, Daugavspils	18
	3.3 Kuitubetonin käytön hyödyt ja haasteet	18
4	TERÄSKUITUBETONIN TOIMINTAMEKANISMI.....	21
	4.1 Teräskuitubetonin rakennetekninen toiminta	21
	4.2 Teräskuitubetonin mekaaniset ominaisuudet.....	23
	4.2.1 Suora veto ja taivutus.....	24
	4.2.2 Lävistys	26
	4.2.3 Leikkaus.....	28
	4.2.4 Halkeilu	29
	4.3 Kuitubetonisen laatan käyttäytyminen pakkovoimien alaisena	31
	4.3.1 Kuivumiskutistuminen	31
	4.3.2 Lämpötilaeroista aiheutuva taivutusmomentti	31
5	MITOITUSPERUSTEET	33
	5.1 Yleistä.....	33
	5.2 Kutistuminen ja viruminen.....	33
	5.3 Osavarmuusluvut.....	34
	5.4 Jäännöstaivutusvetolujuus.....	34
	5.5 Jäännösvetolujuus	37
	5.6 Rakenneanalyysi ja sitkeys.....	43
	5.7 Murtorajatila.....	44
	5.7.1 Taivutuskestävyys.....	44
	5.7.2 Laatan paksuuden vaikutus taivutuskapasiteettiin	45
	5.7.3 Taivutuskestävyys ilman tankorautoitusta.....	46
	5.7.4 Taivutuskestävyys tankorautoituksen kanssa	47
	5.7.5 Leikkauskestävyys	48

5.7.6	Laatan paksuuden vaikutus leikkauskestävyyteen.....	49
5.7.7	Lävistyskestävyys	50
5.8	Käyttörajatila	51
5.8.1	Halkeamaleveys.....	51
5.8.2	Taipuma	52
5.8.3	Vähimmäisraudoitusala.....	53
6	PAKSUN LAATTARAKENTEEN VERTAILU	55
6.1	Johdanto.....	55
6.2	Laskenta	55
6.3	Tulokset	56
7	POHDINTA.....	58
8	JATKOTUTKIMUSTARPEET	60
	LÄHTEET	61
	LIITTEET	63
	Liite 1. Case 1. Tavanomaisesti raudoitetun paksulaatan mitoitus	63
	Liite 2. Case 2. Kuitubetonisen paksulaatan mitoitus tankoraidoitettuna	63
	Liite 3. Case 3. Kuitubetonisen paksulaatan mitoitus tankoraidoitettuna BY 66:n mukaan	63

LYHENTEET

A_{ct}	poikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala taivutuksessa
A_{sl}	vetoraidoituksen pinta-ala
$A_{s,min}$	vetoalueen raudoituksen vähimmäispinta-ala
CMOD	halkeaman avautuma (Crack Mouth Opening Displacement)
C_i	jäännöslujuuskerroin
$C_{1,Rd,C}$	leikkausraudoittamattomille rakenneosille laskettava kerroin
E_c	betonin kimmokerroin
E_s	teräksen kimmokerroin
F_{cc}	betonin puristusresultantti
F_i	kuormitus [N] tallennetussa kohdassa CMOD
F_{st}	vetoterästen vetoresultantti
F_f	teräskuitujen vetoresultantti
F_x	vaakasuurtaisen tasapainovoiman suuruus
M_{Ed}	mitoitusmomentti
M_j	momentti [Nmm] tallennetussa kohdassa CMOD
M_{Rd}	taivutuskapasiteetti
N_{Ed}	normaalivoima
$V_{Ed,1}$	leikkausvoima
$V_{Rd,c}$	leikkausraudoittamattoman betonirakenteen leikkauskestävyys
$V_{Rd,cf}$	leikkausraudoittamattoman kuitubetonirakenteen leikkauskestävyys
W	poikkileikkauksen taivutusvastus
b	poikkileikkauksen leveys
b_w	laskennassa käytetty laskentaleveys
c_{nom}	betonipeitteen paksuus
d	poikkileikkauksen tehollinen korkeus tai kuidun halkaisija
$f_{bd,f}$	kuitubetonin taivutusvetolujuus
f_{cd}	betonin lieriölujuuden mitoitussarvo
f_{ck}	betonin lieriölujuuden ominaisarvo
$f_{ck,0.05}$	betonin ominaisvetolujuus (5 % fraktiili)
f_{ctk}	betonin ominaisvetolujuus
f_{ctm}	betonin keskimääräinen vetolujuus
$f_{ctm,fl}$	teräsbetonin keskimääräinen taivutusvetolujuus
$f_{R,1}$	luokan R ₁ kuitubetonin jäännöstäivutusvetolujuuden ominaisarvo

$f_{R,3}$	luokan R_3 kuitubetonin jäännöstaivutusvetolujuuden ominaisarvo
$f_{R,4}$	luokan R_4 kuitubetonin jäännöstaivutusvetolujuuden ominaisarvo
$f_{ft,R1}$	luokan R_1 kuitubetonin jäännös vetolujuuden ominaisarvo
$f_{ft,R3}$	luokan R_3 kuitubetonin jäännös vetolujuuden ominaisarvo
$f_{ftd,R1}$	luokan R_1 kuitubetonin jäännös vetolujuuden mitoitusarvo
$f_{ftd,R3}$	luokan R_3 kuitubetonin jäännös vetolujuuden mitoitusarvo
f_{yd}	tankorautoituksen vetolujuuden mitoitusarvo
f_{yk}	tankorautoituksen vetolujuuden ominaisarvo
h_{ct}	poikkileikkauksen vedetyn osan korkeus taivutuksessa
h_{sp}	on standardin SFS-EN 14651 mukainen korkeus loveuksen yläreunasta palkin yläreunaan [mm]
k_c	jännitys jakauma ennen halkeamien muodostumista
k_1	kerroin
k_2	kerroin
l_{cs}	karakteristinen pituus, joka kuvaa halkeaman häiriöalueen pituutta
n	kerroin
n_f	kuitujen orientaation huomioon ottava kerroin
n_{det}	staattisen määräämättömyyden asteen huomioon ottava kerroin
u_0	tuen piiri [mm]
u_1	perustarkastuspiiri [mm]
v_{Ed}	lävistysjännitys tuen juuressa [MPa]
$v_{Ed,0}$	lävistysjännitys perustarkistuspiirillä [MPa]
$v_{Rd,c}$	tankorautoitetun kuitubetonirakenneseosan lävistyskestävyyden mitoitusarvo [MPa]
$v_{Rd,max}$	tankorautoitetun kuitubetonirakenneseosan suurimman lävistyskestävyyden mitoitusarvo [MPa]
x	puristusvyöhykkeen korkeus tai neutraaliakselin sijainti luettuna poikkileikkauksen yläpinnasta [mm]
y	vetovyöhykkeen korkeus [mm]
w_u	halkeaman avautuma [mm]
w_{max}	halkeamaleveyden suurin sallittu arvo [mm]
α_{ct}	kerroin
α_{cf}	kerroin
ϵ_c	betonin puristuma
ϵ_{cu}	betonin reunapuristuma

ε_{ct}	halkeamisvenymä myötörajalalla
ε_{ft}	kuitubetonin venymä
ε_{ftu}	kuitubetonin murtovenymä
σ_f	vetojännitys [MPa]
σ_{ft}	mitoitusvetolujuuden ominaisarvo [MPa]
σ_s	vetotankoraudoituksen jännitys halkeilleessa poikkileikkauksessa huomioiden kuitujen vaikutus luokassa R1 [MPa]
ξ	hoikkuusluvun määrittämä kerroin
ϕ	raudoituksen halkaisija [mm]
γ_c	betonin osavarmuusluku
γ_f	kuitubetonin osavarmuusluku
γ_s	teräksen osavarmuusluku
ρ_k	kuitumäärä [Kg/m ³]
ρ_1	tankoraudoituksen suhde
v	lujuuden pienennyskerroin

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoite on tutkia kuitubetonin käyttöä laatoissa, erityisesti paksuissa paalu- ja siirtolaatoissa sekä käydä läpi yleisiä kuitutyyppisiä ja niiden ominaisuuksia. Opinnäytetyössä tutkitaan kuitubetonin rakenneteknistä käyttäytymistä kuormitustilanteessa sekä sitä, onko lävistyksen kannalta kuitubetonin ominaisuuksista apua paksuissa siirtolaattarakenteissa pilareiden tai paalujen kohdilla. Lisäksi kuitubetonilaattojen halkeiluun liittyvät ominaisuudet käydään läpi.

Teräskuitubetonirakenteiden tuoma etu on raudoitustyön väheneminen sekä valmiin betonin rakenteelliset ominaisuudet, kuten suurempi vetolujuus sekä erityisesti halkeilun jälkeinen jäännösvetolujuus. Rakenteellisten ominaisuuksien tuomat edut vaihtelevat suuresti kuitutyypeittäin. Ongelmana teräskuitubetonirakenteilla on rakenteen heterogeenisuus, johon syynä on itse betoni materiaalina sekä kuitujen orientaatio betonissa. Tämä johtaa tulosten laajempaan hajontaan, jonka seurauksena on yhteisten suunnitteluohjeiden laadinnan haasteellisuus.

Tässä työssä on käytetty kirjallisuuslähteinä muun muassa Betoniyhdistyksen kirjoja BY 56 ja -66. Kirjallisuuslähteiden lisäksi tietoa on koottu internetistä, väitöskirjoista sekä keskusteluista eri asiantuntijoiden kanssa.

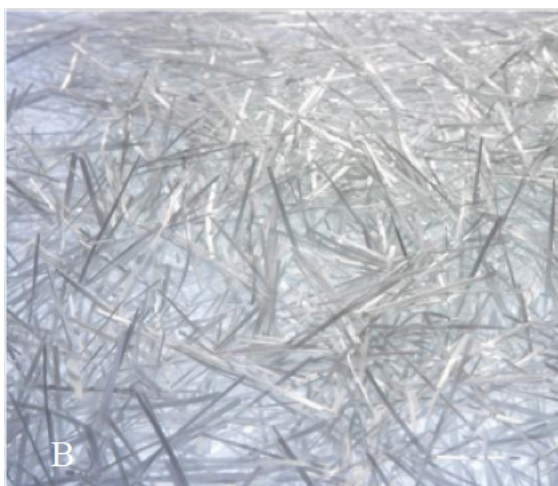
2 YLEISTÄ KUITUBETONISTA

2.1 Erilaiset kuitumateriaalit ja niiden ominaisuudet

Erilaisilla kuiduilla voidaan parantaa betonin mekaanisia ominaisuuksia, muun muassa vetolujuutta, sitkeää murtokestävyyttä, kulutuskestävyyttä sekä palonkesto-ominaisuuksia. (Rakentaja.fi 2019) Betonin lujittamiseen käytetään yleensä teräskuituja, polypropeenikuituja tai lasikuituja. Kuitubetonin tyypillinen käyttökohde on maanvarainen laatta, mutta tässä opinnäytetyössä tutkitaan teräskuiduilla toteutettuja paalu -ja siirtolaattoja.

2.1.1 Lasikuidut

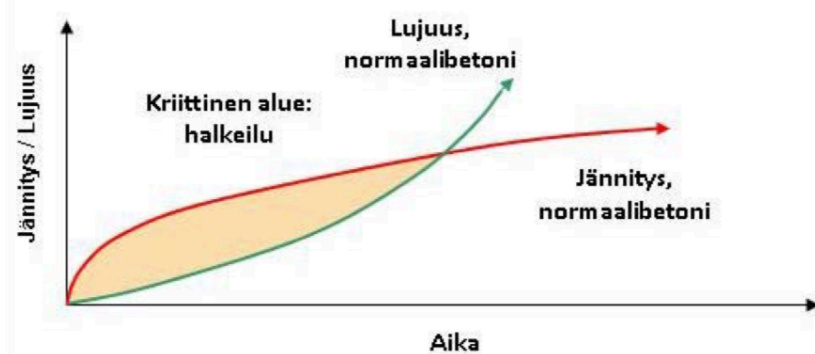
Lasikuidut toimivat betonissa sitkeänä raudoitteena ja sopivat hyvin erilaisiin betonimassoihin. Lasikuidut ovat kuvan 1 mukaisia, noin 13-25 mm pituisia ja halkaisijaltaan muutamia mikrometrejä, joiden tyypillinen annostelumäärä on noin 1 kg/m³, katso kuva 1. Lasikuitujen etuja ovat muun muassa kevyt rakenne, olematon korroosioriski sekä kemiallisten rasituksien kesto. (BY 45 2018; Rudus.fi 2019; Semtu 2019)



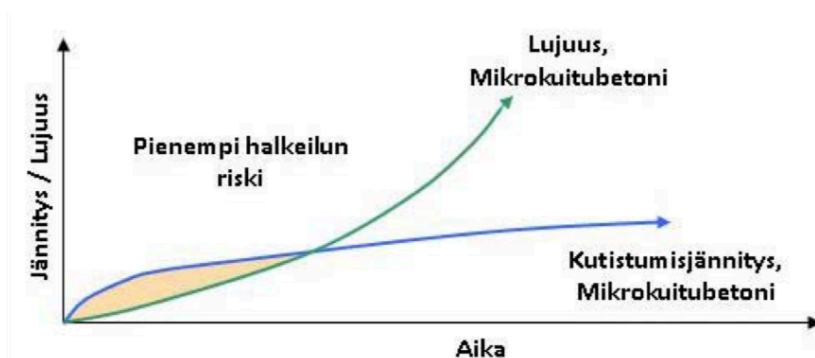
Kuva 1. Lasikuituja (Farid 2017)

2.1.2 Muovikuidut

Synteettiset polymeerikuidut eli muovikuidut jaotellaan mikro- ja makrokuituihin standardin SFS-EN 13889-2 mukaisesti. Mikro- ja makrokuidut ovat lyhyitä sekä hyvin ohuita kuituja, joiden tyypillinen annostelumäärä on 0,9 – 2 kg/m³. Mikro- ja makrokuitujen pääasiallinen käyttötarkoitus on parantaa tuoreen betonin koossapysymistä sekä rajoittaa plastista kutistumahalkeilua, joka syntyy betonipinnan liian nopeasta kuivumisesta ennen massan sitoutumista. Plastisessa kutistumassa mikro- ja makrokuidut toimivat ”raudoituksena” silloittamalla plastisen kutistuman aiheuttamia mikrohalkeamia. Kuidut estävät plastisten halkeamien levenemisen noin 2...4 tuntia valusta, jolloin betonin vetolujuus on käytännössä olematon, mutta eivät silti korvaa hyvää jälkihoitoa työvaiheessa. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty mikro- ja makrokuitujen vaikutus betonin halkeiluriskiin. (BY 45 BLY7 betonilattiat 2018)



Kuva 2. Plastisen halkeilun riski ilman mikro- ja makrokuituja. (BY 45 BLY7 betonilattiat 2018)



Kuva 3. Plastisen halkeilun riski mikro- ja makrokuiduilla. (BY 45 BLY7 betonilattiat 2018)

Makrokuidut ovat paksumpia kierteisesti sidottuja kuituja, jotka parantavat betonin sitkeys- ja lujuusominaisuuksia kovettuneessa betonissa, erityisesti kuivumisen ja lämpöliikkeiden aiheuttamia kutistumia ja halkeiluja, katso kuva 4.



Kuva 4. Makrokuidut (Rudus.fi)

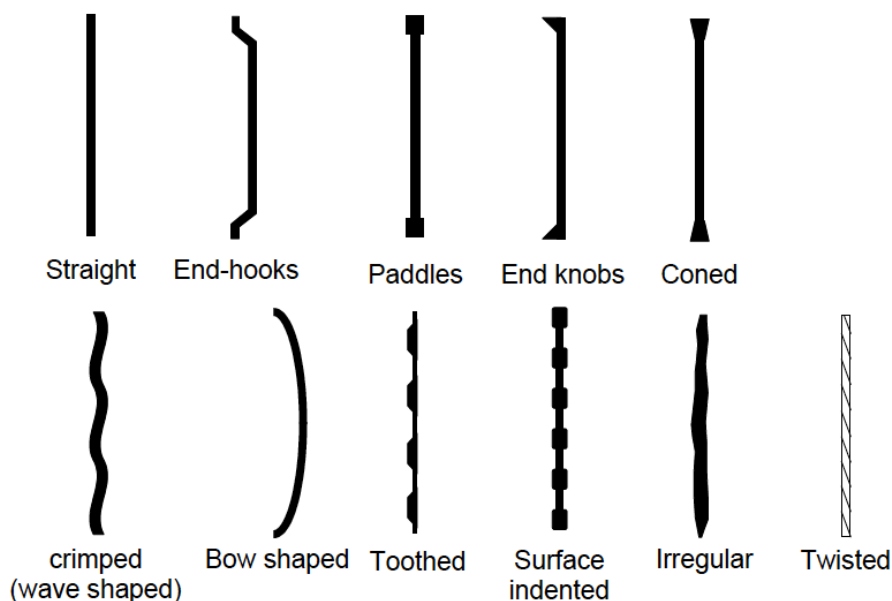
Makrokuitujen pituus on 10...50 mm. Niiden tyypillinen annostelumäärä on 3,0 – 7,0 kg/m³. (Rudus.fi 2019) Annostelumäärästä huomataan, että kuiduilla pyritään parantamaan pakkovoimista aiheuttamia liikkeitä. Makrokuitu viittaa myös teräskuidun tyyppiin koostumuksensa ansiosta. Maanvaraisissa lattioissa olevien muovikuitujen määrä vaihtelee 2,0 – 7,0 kg/m³ ja laatan paksuus 100...200 mm välillä. Makrokuitubetonirakenteiden mitoitus tapahtuu samalla tavalla, kuin teräskuitujen mitoitus, mutta ne mitoitetaan aina tapauskohtaisesti. (Rakentaja.fi 2019; BY 45 BLY7 betonilattiat 2018)

2.1.3 Teräskuidut

Rakenneosissa käytettävien teräskuitujen on täytettävä standardissa SFS-EN 14889-1 esitetyt vaatimukset. Minimikuitumäärä Suomessa maanvaraisissa laatoissa on 25 - 40 kg/m³, mutta kantavissa rakenteissa kuitumäärä voi olla jopa 100 kg/m³. (BY 56 2011) Teräskuidut vaihtelevat geometrian mukaan, jota voidaan myös kutsua hoikkuusluvuksi. Hoikkuusluku ilmoittaa kuidun pituuden sen ekvivalentin hoikkuuden suhteen. Kuitujen geometrialla pyritään parantamaan betonin ja kuidun välistä tartuntaa. Suomen markkinoilla olevien teräskuitujen hoikkuusluvut ovat noin 50...80. Kantavissa rakenteissa kuitujen geometria

eroaa hieman verrattuna maanvaraisissa lattioissa käytettyihin teräskuituihin. (Betonilattiat BY 45 BLY 7 2018)

Teräskuidun geometria vaihtelee käyttötarkoituksen ja tavoiteltujen hyötyjen mukaisesti. Kuvassa 5 on esitetty tyypillisiä kuitumuotoja, joista yleisimmät on koukukupäiset (end-hooks) ja litteä aaltomainen muoto (crimped, wave shaped).



Kuva 5. Tyypillisiä kuitumuotoja (Ingemar 2005)

Kuitujen ollessa normaalia terästä, kuitubetonissa voi esiintyä paikallisesti korroosiota, mutta usein se on vain esteettinen ongelma. Korroosiota voidaan estää kuiduilla, jotka ovat ruostumattomia tai sinkkikäsiteltyjä. Teräskuidut ovat yleensä ruostumatonta terästä, jonka kimmokerroin on noin 210 000 MPa ja vetolujuuden arvo vaihtelee 600 MPa:n...2600 MPa:n välillä. Standardi EN 14889-1 luokittelee teräskuidut valmistusmenetelmiensä mukaan seuraaviin luokkiin:

Ryhmä I: Kylmävedetty teräslanka (cold-drawn steel wire)

Ryhmä II: Leikattuja kaistaleita (cut sheet)

Ryhmä III: sulaerotettuja kuituja (melt extracted)

Ryhmä IV: kylmävedetystä teräslangasta höylättyjä (shaved cold drawn wire)

Ryhmä V: teräspaloista rouhittuja kuituja (milled from blocks)

Kuidut ovat irtonaisia tai pakattuna kampakuiduiksi annostelun ja sekoittumisen helpottamiseksi, mutta yleensä kuituja käytetään irtonaisina. Kampojen liitos su-
laa veden mukana sekoitusvaiheessa, jolloin kuidut erottuvat toisistaan ja jakau-
tuvat betoniin. (Betoniilattiat BY 45 BLY 7 2018; BY 56 2011)

Kun käytetään teräskuituja yhdessä tavanomaisen tankorauoituksen kanssa, on
suositeltavaa pitää yksittäisten yhdensuuntaisten tankojen vapaaväliä vaaka- ja
pystysuuntaan vähintään kuitujen 1,5 -kertaista pituutta. Tällöin varmistetaan kui-
tujen orientoituminen ja tasainen jakautuminen tankorauoituksen alle. (BY 66
2018)

3 KUITUBETONI

3.1 Kuitubetonin käyttö laatoissa

Betonin ominaisuuksia ovat hyvä puristuslujuus ja heikko vetolujuus. Betonirakenteissa käytetään usein tankorauoituksia, joilla pyritään kompensoimaan materiaalien huonoja ominaisuuksia. Kuitujen käyttö rakenteissa on tuhansia vuosia vanha keksintö, tavoitteena kasvattaa materiaalin ominaisuuksia. Teräskuitujen käyttö on yleistynyt ja kehittynyt 1960-luvulta alkaen. (Mäntyranta 2013)

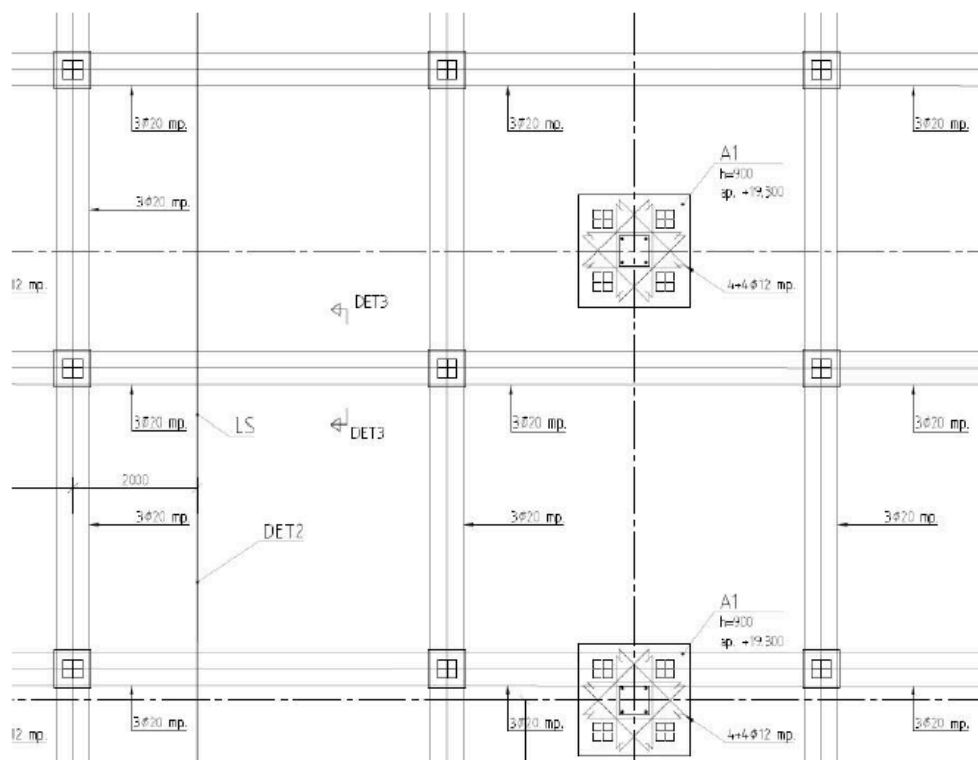
Teräskuitubetonin käyttö perustuu tavallisen tankorauoituksen mahdolliseen korvaukseen teräskuiduilla, jossa teräskuidut ottavat sisäiset rasitukset vastaan tankorauoituksen periaatteen mukaisesti. Teoriassa tämä tarkoittaa teräskuitujen tuovan poikkileikkaukselle oman vetoresultantin, jonka yhteenlaskettu suuruus tankorauoituksen kanssa tai ilman tulisi olla yhtä paljon, kuin betonin puristusresultantti. Tällöin rakenne saavuttaa tasapainotilan kuvissa 24 ja 25 esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Kuitujen käytön suurin etu on halkeilun jälkeisen vetolujuuden kasvu ja tästä seuraava sitkeyden kehitys. Teräskuitujen rakenneteknistä toimintaa kuvaillaan syvällisemmin luvussa 4.

3.2 Toteutettuja kohteita Suomesta ja maailmalta

Maailmalla on käytetty paljon kuitubetonia kantavissa laattarakenteissa ja suoritettu kuitubetonilaattojen täysimittaisia kuormituskokeita, joiden perusteella rakenteille on todettu riittävä kantokyky. 2018 vuonna valmistunut kauppakeskus Granin laajennuksen paalulaatta on toteutettu kuitubetonista tavallisen tankorauoituksen vähentämiseksi. Paalulaatan mitoituksessa sovellettiin BY 56:ta ja Ruotsin standardia SS 812310:201, joka käy ilmi Andreas Petterssonin diplomityöstä. Myös tässä opinnäytetyössä käytetty BY 66 suunnitteluohje perustuu edeltävään suunnitteluohjeeseen ja käytettyyn standardiin. Paalulaatassa käytet-

tiin teräskuitujen lisäksi 3 T20 tankoraidoituksia ylä- ja alapinnassa, sekä puoli-hakoja T10 k300. Lävistykselle alttiiden rakenteiden, kuten pilarien ja kaivojen ympärille lisättiin myös harjateräksiä, katso kuva 6. (Pettersson 2017)



Kuva 6. Ote paalulaatan raudoituspiirustuksesta (Pettersson 2017)

Paalulaatan rakenneratkaisulla saavutetut säästöt olivat yli puolet siitä, mitä työ olisi maksanut tavanomaisilla tankoraidoituksilla. Suomessa viranomaiset suhtautuvat vaihtelevasti kaupungeittain kyseiseen rakenneratkaisuun suunniteluohjeiden puutteellisuuden vuoksi, mutta kyseisessä projektissa lupahakemukset sujuivat ongelmitta. (Pettersson 2017)

3.2.1 Rocca-Al-Mare-torni, Tallinna

Rocca-Al-Mare-torni, kuva 7, on jäykistetty hissi-/porraskuiluilla, joiden välinen alue on raudoitettu tankoraidoiteilla. Vaakavoimien siirron varmistamiseksi hissikuilujen välillä kulkee verkko sekä 5 T20 tankoraidoitukset tukiseinien ja pilareiden välillä. Tornissa käytetty 210 mm paksua kuitubetonilaattaa välipohjara-

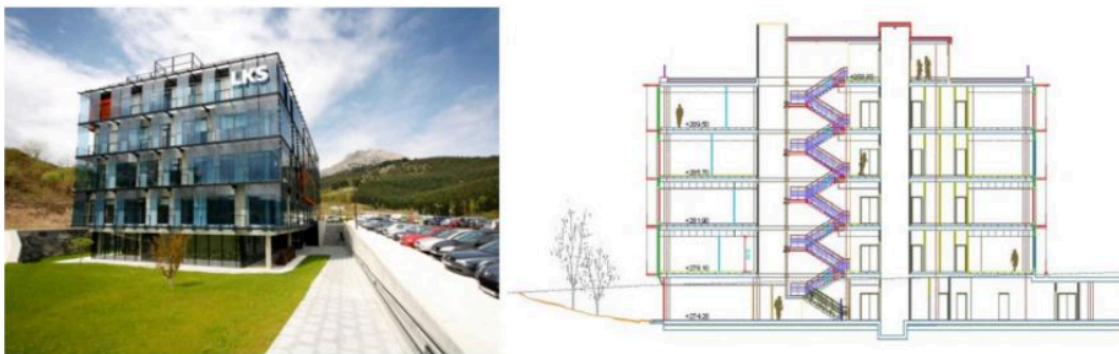
kenteena, jossa kuitumäärä on 100 kg/m^3 . Kuitubetonivälipohjiin päädyttiin rakennuksen hankalan kerrosgeometrian vuoksi, jossa olisi ollut haasteellista käyttää tankorauoituksia. Kerrosnousunopeus kuitubetoni-tankorauoituksella oli kerros viikossa. Kuitubetonisilla välipohjilla päästiin jopa 7 metrin jänneväleihin TABIX 1,3 x 50 mm kuiduilla. Rocca-Al-Maren rakentamisaikataulussa säästettiin 9 viikkoa kuitubetonin käytöllä. (Pettersson 2017; Matsinen 2013)



Kuva 7. Tallinnassa sijaitseva 16-kerroksinen toimistorakennus, jonka välipohjat on valettu kuitubetonilla. (Matsinen 2013)

3.2.2 LKS toimistorakennus, Mondragon

Espanjassa, kuvan 8 mukaisen toimistorakennuksen 280 mm paksut kuitubetonivälipohjarakenteet tukeutuvat $8,3 \text{ m} \times 8,3 \text{ m}$ pilariverkoston, jonka jokaisella jännevälillä on 4 T20 terästangot jatkuvan sortumisen estämiseksi. Tavallista tankorauoitusta on myös käytettynä hissi- ja porraskuilujen ympärillä, laatan alapinnassa ja verkkorauoituksia ulokeparvekkeiden yläpinnassa. Välipohjissa käytettiin TABIX 1,3 x 50 mm teräskuituja, joiden määrä oli 100 kg/m^3 .



Kuva 8. Espanjassa sijaitseva toimistorakennus, jonka välipohjat ovat toteutettu kuitubetonilla. (FRC 2014)

3.2.3 Ditton Nams kauppakeskus, Daugavspils

Daugavspilssin kauppakeskuksen kuitubetonivälipohjat ovat kooltaan 24 m x 42,5 m, joissa on käytetty 1,3 x 50 mm poimutettuja teräskuituja. Käytetty kuitumäärä oli laatussa noin 100 kg/m³, jolloin koekuormituksessa laattaa saavutti 1,9 mm taipuma-arvon 7 kN/m² -suuruisella kuormalla. (Pettersson 2017)

3.3 Kuitubetonin käytön hyödyt ja haasteet

Kuitubetonin käytöllä pyritään raudoitustyön vähenemiseen, joka tarkoittaa rakentamisaikaista työajan säästöä. Tällöin rakenteissa, joissa esiintyy paljon toistoja on viisasta käyttää kuitubetonia tavanomaisen tankoraidoituksen sijaan. Tämänkaltaisia rakenteita ovat etenkin välipohjarakenteet. Jos rakenneosat on vaikea raudoittaa sen geometrian vuoksi, teräskuitubetoni on varteenotettava ratkaisu esimerkiksi terävissä kulmissa, jotka ovat esteettisesti näkyvissä. Suuret ulkoiset rasitukset ajavat rakennepaksuudet suuriin kokoluokkiin. Paksut siirtolaattarakenteet joudutaan raudoittamaan suurilla määrillä tankoraidoitusta. Suunnittelijoiden laatimat raudoitussuunnitelmat ovat vaikeita toteuttaa. Tankoraidoitettulla kuitubetonirakenteella voi vähentää huomattavasti käytettävää tankoraidoitusta, jolloin raudoitustyöstä tulee helpompaa.

Teräskuituja sekoitetaan automaattisesti tietyllä annostelunopeudella sekoittuvaan betoniin. Tällä pyritään varmistamaan teräskuitujen tasainen sijoittuminen betonissa. Käytännön mitoituksessa kuitujen satunnainen orientaatio on myös

otettu huomioon kuitubetonin lujuutta laskiessa kertoimen n_f avulla. Laattarakenteiden osalta kuitubetonin lujuutta voidaan myös nostaa muuntokertoimen n_{det} avulla luvun 5.5 mukaisesti, koska laattarakenteilla on lähtökohtaisesti paremmat mahdollisuudet siirtää rasitukset laajemmalle alueelle, kuin esimerkiksi palkkirakenteilla.

Teräskuitubetonin työstettävyyttä asettaa kuiduille rajoitteita määrän ja hoikkuusluvun suhteen. Teräskuitubetonin valmistuksessa on tavoitteena saada tarpeeksi vahvistuskykyä teräskuiduista sitkeän rakenteen saavuttamiseksi, mutta pidettävä määrä rajoitettuna riittävän työstettävyyden vuoksi. Hoikkuusluvultaan suuremmat kuidut, liian suuri raekoko kiviaineessa tai vääränlainen valmistustapa altistuu herkemmin palloutumiselle. Palloutumisriskin takia pumppausvaiheessa pumpun halkaisijan tulisi olla vähintään kolme kertaa kuidun pituus, jolloin minimoidaan pumpun tukkeutumisen riski. Jos kuidut palloutuvat eivätkä levity tarpeeksi laajasti kuitubetonirakenteeseen, kuitujen tuomaa hyötyä ei päästä hyödyntämään. Palloutumisella on myös riskinä, etteivät kuidut orientoidu esimerkiksi tankorautoituksen alle. BY 66 ohjeessa tätä riskiä pyritään välttämään asettamalla tankorautoitusten minimietäisyydeksi vähintään kuitujen pituuden 1,5-kertainen pituus. (Pettersson 2017)

Myös käytännön suunnittelu tuo teräskuitubetonille haasteita. Liitteiden 2 ja 3 mukainen laskentatapa on suunnittelijalle erittäin työläs verrattuna tavanomaiseen teräsbetonirakenteeseen. Tämän lisäksi suunnitteluohjeiden puutteellisuus tuo suunnittelijoille epävarmuutta teräskuitubetonin käytöstä kantavissa rakenteissa. Suunnitteluohjeiden ja puutteellisuuksien läpikäyntiä on käyty tarkemmin luvussa 7 ja 8.

Kantavien rakenteiden osalla kuitubetonin käyttöä hidastaa eurokoodista puuttuvat laskentamenetelmät. 2017 vuonna tehdyssä Andreas Petterssonin diplomityössä kävi ilmi, että eri kaupunkien suhtautuminen teräskuitujen käyttöön kantavana rakenteena on hyvin vaihteleva. Esimerkiksi Espoo ja Turku eivät hyväksy laattarakenteita edes tavanomaisen tankorautoituksen kanssa, jossa teräskuitubetoni toimii kantavana rakenteena, jos eurokoodeissa ei ole hyväksytyjä laskentamenetelmiä. Helsingin ja Vantaan rakennusviranomaiset sallivat kuitubeto-

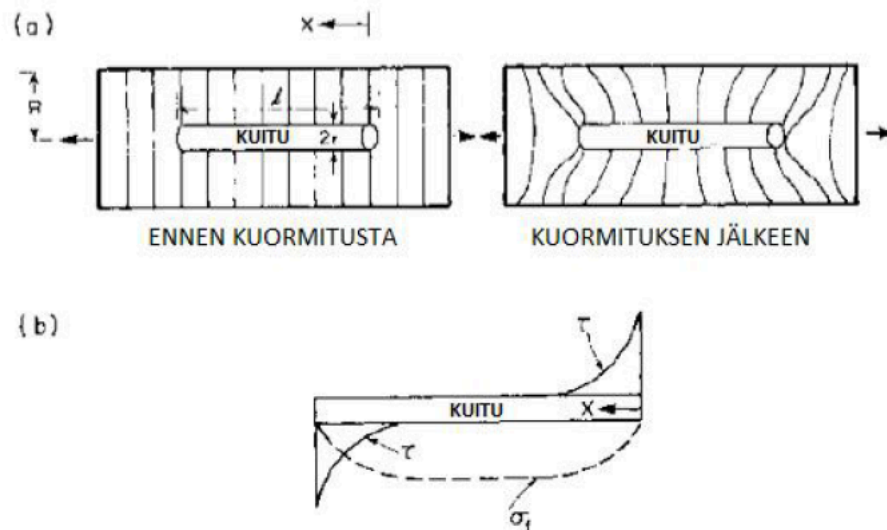
nin käytön paalulaatoissa, joista Vantaa vaatii tavallista tankoraudotusta kuitubetonin lisäksi. Kumpikaan kaupunki ei sallinut kuitubetonin käyttöä kantavana välipohjana. Tampereella kuitubetonin käyttö on taas hyväksyttävää kantavissa paalulaatoissa, mikäli määräykset antavat siihen mahdollisuuden ja lopputulos vastaa perinteistä tapaa. Tampere ei tosin hyväksy kuitubetonin käyttöä kantavana rakenteena välipohjissa. (Pettersson 2017)

Suunniteltaessa kantavia teräskuitubetonirakenteita tulee aina keskustella kaupungin viranomaisten kanssa, mikä on kaupungin ajantasainen linjaus kyseisiin rakenteisiin.

4 TERÄSKUITUBETONIN TOIMINTAMEKANISMI

4.1 Teräskuitubetonin rakennetekninen toiminta

Teräskuitubetoni koostuu kahdesta pääkomponentista, betonimatriisista sekä teräskuiduista. Näiden kahden komponentin välinen sidos perustuu teräskuitujen mekaaniseen käyttäytymiseen rasiustilassa. Teräskuitujen toiminta perustuu vetojännityksien siirtymiseen halkeilujen yli betonimatriisin ja kuitujen rajapinnassa esiintyvän leikkausjännityksen myötä. Muotoiltujen kuitujen tapauksessa myös mekaanisen ankkuroitumiseen kuvan 10 mukaisesti. Vetorasitukset jakautuvat teräskuitujen ja betonin kesken, kunnes betonimatriisin vetokestävyys ylittyy ja tällöin vetojännitykset siirtyvät halkeilurajapinnalta risteäville teräskuiduille. Tämä vetojännitys kasvaa kuitujen päistä, saavuttaen jännityshuippunsa kuidun puolivälissä kuvan 9, kohdan (b) mukaisesti. (BY 66 2018; Mäntyranta 2013)

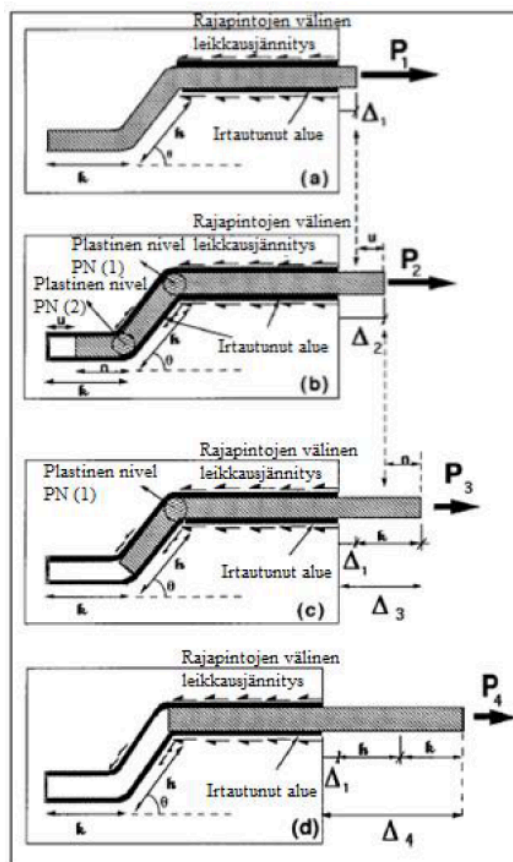


Kuva 9. Vetojännityksien käyttäytyminen kuidun rajapinnalla a) matriisin muodonmuutos b) kuituun siirtyvät leikkausjännitykset τ ja muodostuva vetojännitys σ_f . (Petterson 2017)

Jännitysten siirtymistä ennen halkeilua voidaan pitää elastisena. Kun sidoslujuus ylittyy, jännitykset siirtyvät betonimatriisin ja teräskuidun välisessä rajapinnassa luistokitkan vuoksi muodostuvien leikkausjännityksien kautta.

Kuidun geometrialla ja koukun pään muodolla on merkittävä osuus sidoksen kestävydessä. Teräskuiturakenteita suunniteltaessa olennaista ei ole mahdollisimman suuren tartunnan suunnittelu kuidun ja matriisin välissä tai suuren taivutuslujuuden saavuttaminen, vaan tarpeeksi hyvä mekaaninen ankkurointi. Tällöin taivutussitkeys olisi mahdollisimman suuri ja teräskuidun ulosvetoprosessi on mahdollisimman energiasidonnainen. Taivutussitkeys on perusta kuitubetonirakenteiden analysoinnille ja suunnittelulle, jota kutsutaan luvussa 5.3 jäännöstaiivutusvetolujuudeksi.

Kuidun koukkupää muodostaa matriisiin kanssa mekaanisen sidoksen, joka vastustaa kuidun ulosvetäytymistä ulos matriisista. Koukun suoristumisprosessi alkaa elastisesta vaiheesta tartunnan muodostamiin leikkausjännityksiin, jotka vastustavat ulosvetovoimaa, katso kuva 10, kohta (a). Tämän jälkeen tulee mekaaninen ankkurointivaihe, jolloin tässä tapauksessa koukkupäisen kuidun muutoskohtiin muodostuu plastiset nivelet, katso kuva 10, kohta (b). Kaksi niveltä lopulta muodostuu yhdeksi niveleksi, kuidun ulosvedossa matriisista, katso kuva 10, kohta (c). Lopussa jäljellä on vain kitkainen tartunta, joka vastustaa ulosvetokuormaa, katso kuva 10, kohta (d). (Pettersson 2017)



Kuva 10. Koukkupäisen teräskuidun käyttäytyminen ulosvetoprosessissa. (Andreas 2017)

Kuvan 9 kuitu esittää tyypillistä 3D-kuitua, joka on myös kustannustehokkain ja yleisin suunnittelun näkökannalta. Markkinoilla on myös 4D- ja 5D-kuituja, joissa numero kuvaa koukun suunnanvaihtoa. 4D- ja 5D-kuidut luokitellaan korkealujuuksisiin kuituihin, joita myös käytetään usein sitkeysluokassa e. E-luokassa käytetyt kuidut omaavat normaalia suurempaa vetolujuutta. Suunniteltaessa korkealujuuksisilla kuiduilla tulisi betonin lujuus vastata korkealujuuksista betonia. Tällöin varmistuu kuidun oikeanlainen käyttäytyminen ja tarpeeksi energiasidon-nainen ulosvetoprosessi.

4.2 Teräskuitubetonin mekaaniset ominaisuudet

Tärkein mekaaninen ominaisuus teräskuitubetonille on sen halkeilun jälkeinen käyttäytyminen vedetyssä rakenneosassa, joka perustuu kitkasta muodostuvaan leikkauslujuuteen. Teräskuidut lisäävät betonin taivutusvetolujuutta, leikkauslujuutta ja dynaamisen rasituksen kestävyttä. Teräskuitubetonin mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavimmat tekijät ovat:

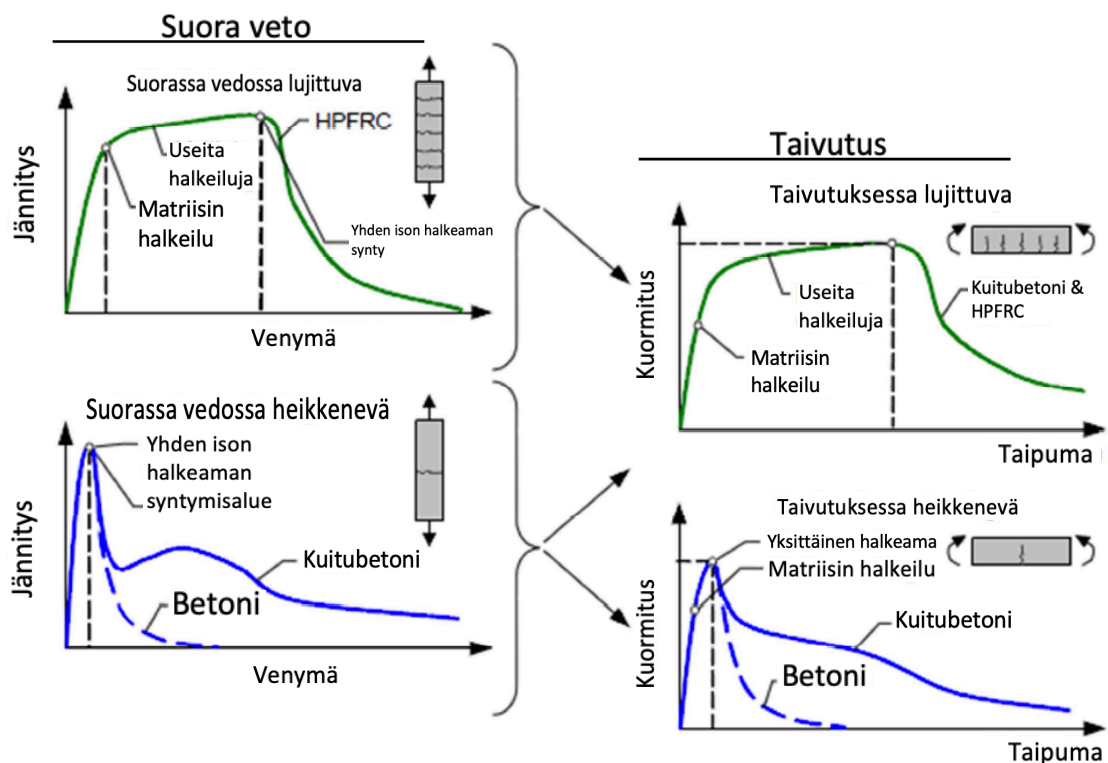
- (1) Kuidut:
 - tyyppi
 - geometria
 - hoikkuusluku
 - tilavuusprosentti
 - suuntautuminen
 - leviäminen
- (2) Matriisi:
 - lujuus
 - runkoaineksen maksimiraekoko
- (3) Näytekappale koko:
 - geometria
 - valmistelu
 - kuormitusnopeus

(Mäntyranta 2013; Semtu 2019)

4.2.1 Suora veto ja taivutus

Teräskuidulla on suurin vaikutus suorassa vedossa kuormitettuun teräskuitubetoniin, joka näkyy halkeilun jälkeisessä käyttäytymisessä. Käyttäytyminen suorassa vedossa muistuttaa hyvin paljon teräsbetonin taivutuskäyttäytymistä.

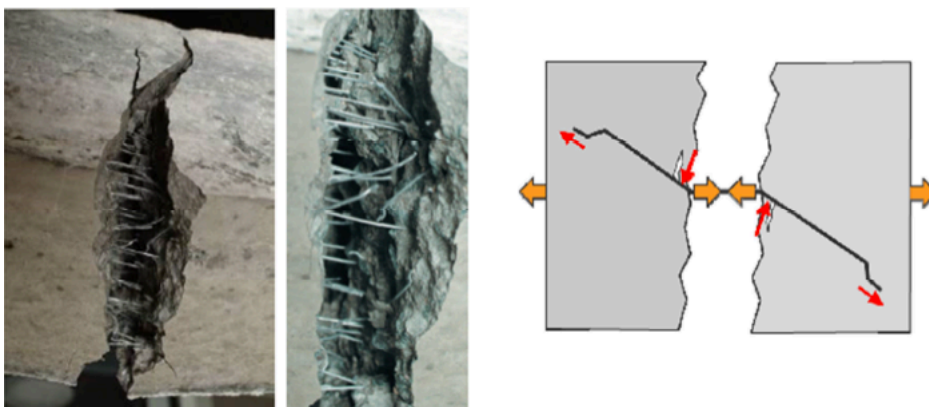
Teräskuitubetoni voi käyttäytyä taivutuksessa joko lujittuvasti tai heikkenevästi. Vaikka materiaali käyttäytyisi suorassa vedossa heikkenevästi, se voi silti osoittaa lujittuvaa käyttäytymistä taivutuksessa. Tällöin halkeilussa yhden ison halkeaman sijaan syntyy useampia pienempiä halkeamia, jolloin kuidut levittävät jännitykset laajemmalle alueelle. Jos kuorman kantokyky on suurempi halkeilun jälkeisessä tilassa, kuin ennen halkeiluja, on kyseessä lujittuva käytös. Materiaalin sitkeys, kappaleen mitat, kuitujen orientaatio, määrä, tyyppi ja jakautuminen määräävät, esittääkö kuitu myötölujittuvaa vai heikkenevää käytöstä. Kuvassa 11 on esitetty myötölujittuva ja myötöheikkenevä kuitubetoni suorassa vedossa ja taivutuksessa. (Ingemar 2005)



Kuva 11. Myötölujittuva ja -heikkenevä kuitubetoni suorassa vedossa & taivutuksessa. (Suomennettu lähteestä Ingemar 2005)

Rakenne kuvaa usein myötölujittuvaa käyttäytymistä yli 40 kg/m^3 kuitumäärällä kuitutyypistä riippuen. Silloin rakenteella on taipumus suurempaan kuormakantokapasiteettiin mikrohalkeilun jälkeisellä ajalla. Kriittinen kuitupitoisuus riippuu kuitutyypistä vedolle ja taivutukselle, vaikka kuormitus pysyisi samana. Suorien kuitujen tapauksessa kriittinen kuitumäärä voi olla jopa 3-6 -kertainen koukkupäisiin kuituihin nähden huonon tartuntalujuuden vuoksi, jonka takia koukkupäiset kuidut soveltuvat paremmin kantaviin rakenteisiin. Täten kuitu, jolla on huono tartuntalujuus, johtaa suurempaan kriittiseen kuitupitoisuuteen, kun taas kuitu, jolla on parempi tartuntalujuus, johtaa pienempään kriittiseen kuitupitoisuuteen. (Karv 2017)

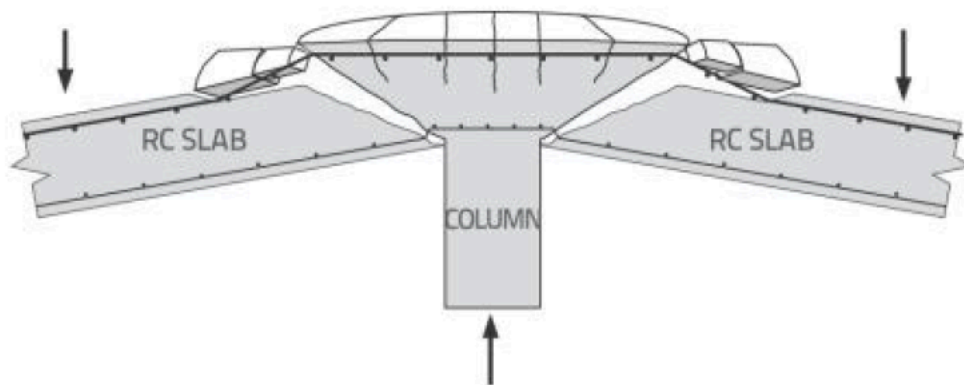
Teräskuitubetonirakenteiden oikeanlaisella suunnittelulla taivutuksessa tapahtuva murtotapa kuuluu sitkeään murtoon. Tällöin teräskuidut liukuvat betonista ulosvetoprosessin mukaisesti suoristuen kuvan 10, kohdan (d) ja kuvan 12 mukaisesti. Suoristuessa kuidut sitovat energiaa, joka vaikuttaa koko rakenteen absorbointikykyyn. Sitkeästi käyttäytyvä kuitubetoni saavutetaan muotoilluilla ja riittävän lujilla teräskuiduilla, jotka vastustavat halkeamien leventymistä. Jos teräskuidun lujuus on taas liian alhainen, voi kuidun katkeamisesta johtuva murto tapahtua hauraasti. Jos taas betonin lujuus ei ole riittävä, eivätkä kuidut suoristu ulosvetoprosessissa kuvan 12 mukaisesti, on betonimatriisilla on suurempi riski lohkeamiseen. (Mäntyranta 2013)



Kuva 12. Teräskuitujen suoristuminen taivutuksessa. (Mäntyranta 2013)

4.2.2 Lävistys

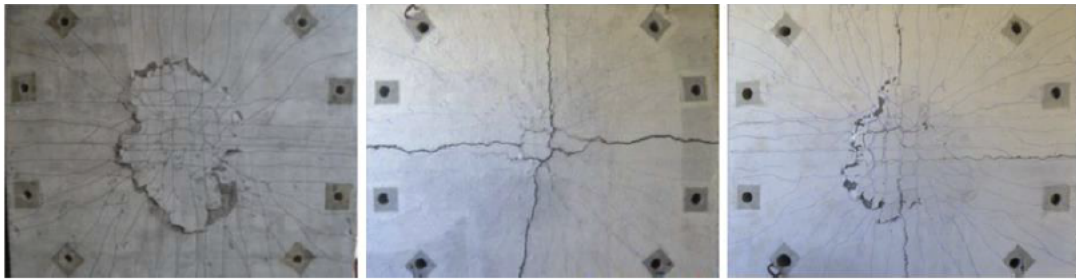
Lävistysmurtuminen on murtorajatilassa laattojen ja pilarien/paalujen liitoskohdissa esiintyvä murtumismekanismi ja luonteeltaan äkillinen eli haurasmurto betonikartion irtileikkautuessa laatasta. Lävistysmurtumisen tapahtuessa leikkauspintaan muodostuu suppilomainen muoto, joka rajautuu alemman tukipinnan reunasta yläpuoliseen rakenteen pintaan n. $1...2d:n$ päähän tuen reunasta kuvan 13 mukaisesti. (BY 210 2008)



Kuva 13. Teoreettinen kuvaus lävistysmurturrosta. (Karv 2017)

Lävistykselle alttiita paikkoja ovat yleensä paalujen ja pilarien kosketuspinnat laattaan. Lävistyminen ja leikkausmurtuminen perustuvat vastaavan tyyppisiin mekanismeihin ja täten voi olla erikoistapauksia, joissa on tulkinnan varaista, onko kyseessä leikkaus- vai lävistysmurtuminen. Betonilaatalla on eri kokeiden perusteella suurempi leikkauskestävyys, kun tuen geometria on sellainen, että sivujen mitat ovat lähellä neliötä ja sivumitta lähellä laatan paksuutta. Kun tuen toista sivumittaa lisätään ja tuen pituus kasvaa, betonin leikkauskestävyys pituusyksikköä kohti vähenee. (Heiskanen 2018)

Kuvassa 14 on esitetty erilaisia murtumismuotoja laattarakenteelle.

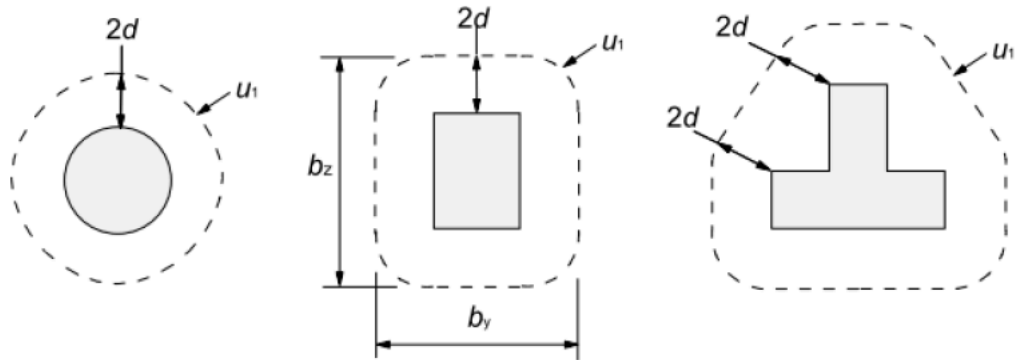


Kuva 14. Erilaiset murtumismuodot. Vasen: Lävistysmurto, keskellä: Taivutusmurto pistekuormasta, oikea: Näiden kahden yhdistelmä. (Suomennettu lähteestä Karv 2017)

Laatat pyritään tavallisesti tekemään ilman leikkausraudoitusta, mutta tarvittaessa kestävyyttä voidaan korottaa leikkausraudoituksen avulla. Laatan raudoitus vaikuttaa lävistysmurtomekanismiin seuraavasti:

- yläpinnan raudoitus rajoittaa halkeaman avautumista ja nostaa leikkauskestävyyttä
- yläpinnan raudoituksen vaikutus ei kuitenkaan ole kovinkaan voimakas, koska betonipeite lohkeaa ja raudoitus pääsee repeytymään irti laatasta
- alapinnan raudoitus estää laatan romahtamisen, jos raudoitus on ankkuroitu hyvin pilarin päähän tai se menee jatkuvana pilarin pään yli
- leikkausraudoitus parantaa lävistyskestävyyttä rajoittamalla lävistyshalkeaman avautumista siirtämällä osan kuormasta halkeaman yli pilarille

Tasapaksussa laatassa, jossa ei käytetä vahvikkeita pilarin kohdalla, käytetään lävistyspiirinä pilarin reunasta $2d$:n päähän rajoittuvaa piiriä. Lisäksi piirin nurkat on pyöristetty säteellä, joka on d . Kuvassa 15 on esitetty tyypillisiä perustarkastuspiirejä.



Kuva 15. Kuormituspinta-aloja ympäröiviä tyypillisiä perustarkistuspiirejä (SFS EN 1992-1-1)

Perustarkastelupiirit soveltuvat hyvin pilarilaattojen lävistysmitoituksen tarkasteluun, jossa tarkastelupiirien pituudet ovat kohtuullisissa rajoissa. Suunniteltaessa paksuja laattarakenteita, lävistysmitoituksessa tarkastelupiirit menevät usein päällekkäin, johon eurokoodi ei ota kantaa millään tavalla. Tarkastelupiirejä voi pienentää, jolloin vertailtava mitoituspääjännitys kasvaa. Saksalaisessa ohjeessa voidaan tarkastella pilarien ryhmälävistymistä, jossa ideana on, että jos kahden tai useamman paalun ympäröivän ulomman tarkastelupiirin pituus on pienempi, kuin yksittäisten paalujen, voidaan käyttää ryhmälävistymistä. Lisäksi, jos paalulaatta on kauttaaltaan hyvin tiheään paalutettu, paaluryhmä lävistyy teoriassa samanaikaisesti laattarakenteen läpi kuormituksen kasvaessa kestävyyttä suuremmaksi.

4.2.3 Leikkaus

Teräskuidut lisäävät teräskuitubetonin leikkauslujuutta kolmella eri tavalla:

- 1) Kuitujen silloittavalla vaikutuksella
- 2) Kuitujen korkeammalla lukituksella
- 3) Kuitujen ulosvetoprosessissa, jolloin kuidut sitovat energiaa

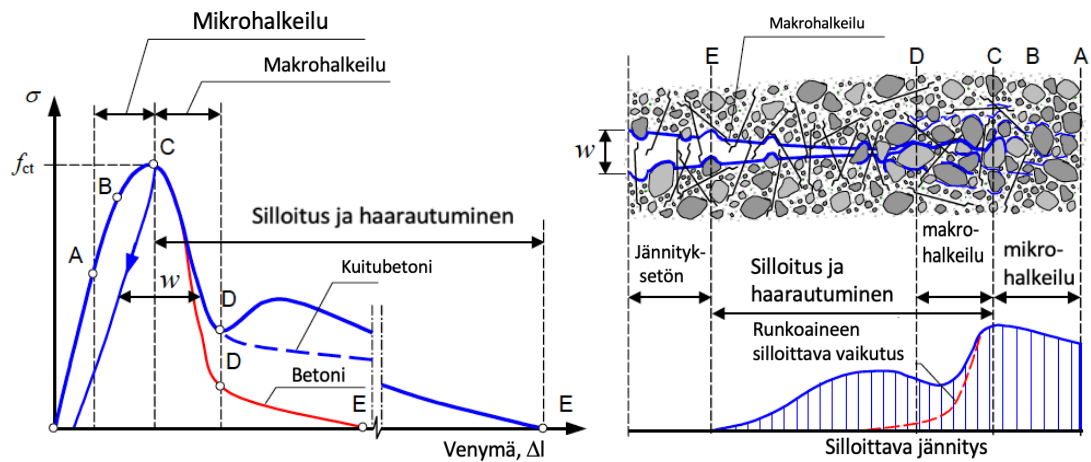
Barragán huomasi push-off shear-testeissä maksimileikkauslujuuden kasvua 30% C30 betoniin ja 80% C70 betoniin teräskuitumäärän ollessa 40 kg/m^3 . (Barragan 2002)

Khanlou ym. huomasivat leikkauskapasiteetin kasvua 70 %:lla kuitumäärän ollessa 80 kg/m³. He myös huomasivat, että leikkauslujuus kasvaa merkittävästi kuitumäärän ollessa yli 40 kg/m³. Tällöin murtumiskäyttäytyminen oli sitkeää, johon kannattaa pyrkiä kuitubetoni rakenteita suunniteltaessa. Kokeissa vertailtujen betoniluokat olivat C35 ja C60. (Australasian Structural Engineering Conference 2012)

4.2.4 Halkeilu

Kuitubetonin yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on sen halkeilun jälkeinen käyttäytyminen. Täten betoni tarvitsee halkeilua, jotta kuidut ovat tehokkaita. Kuten luvussa 4.2.1 todettiin, kuitubetoni voi käyttäytyä suorassa vedossa myötölujittuvasti. Tässä luvussa tarkastellaan kuvan 11, suorassa vedossa heikkenevää kuvaajaa tarkemmin.

Teräsbetonin ja teräskuitubetonin halkeilu ovat hyvin samanlaisia kuvan 16 pisteeseen C asti, jossa rakenne saavuttaa ensimmäiset makrohalkeilut. Tällöin jännitys laskee hyvin jyrkästi pisteeseen D asti, jolloin rakenne alkaa venymään enemmän suhteessa jännityksen laskuun. Oletetaan, että kuvaajassa on käytetty koukkupäisiä teräskuituja, jotka suoristuessaan sitovat mahdollisimman paljon energiaa, katso luku 4.2.1. Kuitujen merkittävimmät ominaisuudet tulevat käytännössä vasta pisteessä D esille, jolloin silloitusefekti alkaa ja jossa teräskuidut alkavat siirtämään jännityksiä laajemmalle alueelle betonimatriisin halkeilun jälkeen.



Kuva 16. Kuitubetonin murtumisprosessi suorassa vedossa. (Suomennettu lähteestä Ingemar 2005)

Raudoitetun kuitubetonin haitalliset halkeamat ja muodonmuutokset katsotaan vältetyiksi, jos kuormien ominaisyhdistelmällä halkeamaleveys on rajoitettu rakenneyypistä ja rasiusluokasta riippuen taulukon 1 mukaisesti. (BY 66 2018)

TAULUKKO 1. Halkeamaleveyden w_{\max} suositusarvot (mm) (SFS-EN 1992-1-1)

Rasitusluokka	Teräsbetonirakenteet ja tartunnattomat ankkurijännerakenteet	Tartuntajännerakenteet ja injektoidut ankkurijännerakenteet
	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä	Tavallinen kuormayhdistelmä
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, $AC > XD3 < AC$, XS1, XS2, XS3		Vetojännityksetön tila
HUOM. 1 Rasitusluokkien X0 ja XC1 yhteydessä halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen, ja tämä raja on asetettu, jotta tavallisesti saavutetaan kelvollinen ulkonäkö. Jos ulkonäköehtoja ei aseteta, tätä rajaa voidaan väljentää.		
HUOM. 2 Näiden rasitusluokkien yhteydessä tarkistetaan myös, ettei vetojännitystä esiinny kuormien pitkäaikaisen yhdistelmän vallitessa.		

Pelkkää kuitubetonia sisältävien rakenneosien halkeamaleveyttä rajoitetaan epälineaarisen virumisrasituksen, haitallisten halkeilun ja – muodonmuutoksien välttämiseksi. Sallituissa halkeamaleveyksissä otetaan huomioon myös säilyvyyteen vaikuttavat tekijät. (BY 66 2018)

4.3 Kuitubetonisen laatan käyttäytyminen pakkovoimien alaisena

4.3.1 Kuivumiskutistuminen

Kuivumiskutistuma on yksi useista muodonmuutoksista, joita tapahtuu merkittävästi ensimmäisen 24 tunnin aikana rakenteen valuhetkestä toisin sanoen varhaisajassa, jolloin lujuuskehitys ei ole vielä alkanut. Varhaisaikaista kutistumaa esiintyy muun muassa autogeenisenä kutistumana.

Kuidut vähentävät kuivumiskutistumisen aiheuttamien halkeamien leveyksiä. Kuitujen vaikutus estetyssä kutistumassa on todettu olevan 15 – 20 %, kun kuitujen tilavuusosuus on 1 %. Teräskuitujen on myös osoitettu pienentävän halkeamien maksimileveyksiä 80 prosentilla ja keskimääräisiä halkeamaleveyksiä 90 prosentilla. (Swamy and Stavrides 1979)

4.3.2 Lämpötilaeroista aiheutuva taivutusmomentti

Betoni halkeilee, kun siinä vaikuttava vetovoima ylittää betonin vetolujuuden. Kuten kappaleessa 3.1 on todettu, teräskuitujen käyttö tuo betonille lisää vetolujuutta halkeilun jälkeisellä ajalla. Täten rasiutilanteessa alueilla, joissa esiintyy taivutusmomentteja teräskuidut ovat vastustamassa halkeamaleveyksien syntymistä. Halkeamaleveydet tulee aina laskea erikseen ja osoittaa olevan taulukon 1 mukaisissa sallituissa leveyksissä.

Betonin varhaisaikaisessa kovettumisessa sementin ja veden hydrataatiossa vapautuu lämpöä, joka on suurimmillaan rakenteen poikkileikkauksen keskiosassa. Kun pituus rakenteen keskeltä rakenteen pintaan on riittävän suuri, ei hydrataatiolämpö pääse poistumaan pinnalle yhtä nopeasti, kuin pinnalta ilmaan. Tällöin rakenteen keskiosan ja pintaosan välinen lämpötilaero kasvaa, josta syntyy taivutusmomenttia. Laattarakenteen reuna-alueella momentit ovat suurempia, kuin keskellä. Reuna-alueilla laatta pääsee tosin liikkumaan vapaammin, eikä lämpötilaerot aiheuta suuria taivutusmomentteja. Paksujen laattarakenteiden osalta syntyvä taivutusmomentti on suurempi ja tällöin tarkastelu tulee tehdä erikseen,

joka otetaan mitoittaessa huomioon lisäämällä lämpötilaerojen aiheuttama taivutusmomentti muiden tekijöiden aiheuttamaan taivutusmomenttiin. (BY 56 2011)

Kriittisin tilanne lämpötilojen kannalta on laatan keskikentässä pistekuorman kohdalla, jossa pistekuorma aiheuttaa laatan alapintaan vetoa ja yläpintaan puristusta, ja laatan yläpinnan matalampi lämpötila kasvattaa alapinnan vetoa. (BY 56 2011)

5 MITOITUSPERUSTEET

Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohjeen BY 66:n mukaan, suunnittelija ei ota kantaa kuitumäärään tai -tyyppiin. Suunnittelija ilmoittaa vaadittavan jäännöslujuusluokan betonitoimittajalle, joka vastaa kuitubetonin vaaditun jäännöslujuuden toteutumisesta oikealla kuitumäärällä. Täten tässä opinnäytetyössä on sovellettu edellistä BY 56 ja uusinta BY 66 suunnitteluohjetta, jotta kuitumäärä ja hoikkuusluku voidaan määrittellä. Laskentamenetelmä perustuu standardiin ASTM C1018-97, jossa päädytään oikeaan kuitumäärään 10...20 % tarkkuudella. Soveltuvuus uuden ja vanhan ohjeen välillä on tarkastettu keskiarvillisesti laskemalla jäännöstäivutusvetolujuuden arvo hakemalla ideaalinen arvo kuitumäärän ja betoniluokan perusteella.

Lopullinen kuitumäärä todetaan ja toimitetaan aina kuitutoimittajan mukaan.

5.1 Yleistä

Suunnitteluohjeen BY 66 mukaan, rakennejärjestelmän stabiliteettitarkastelu tulee varmistaa murtorajatilassa täysin kehittyneiden halkeamien muodostuttua.

- (i) Jännitysten uudelleen jakautuminen on mahdollista staattisesti määräämättömässä rakennejärjestelmässä
- (ii) Tavallista tankoraudoitusta tai jännitettyä raudoitusta käytetään yhdessä kuitubetonin kanssa
- (iii) Ulkoiset normaalivoimat ylläpitävät tasapainoa.

5.2 Kutistuminen ja viruminen

Kuitubetonisen rakenneosan virumaa sekä kutistumaa on tarkasteltava murtorajatilassa joko kimmo- tai plastisuusteoriaa soveltaen.

- (i) Kimmoteoriassa mahdolliset jännitykset estetystä kutistumasta ja virumasta on lisättävä ulkoisen rasituksen aiheuttamiin jännityksiin, tai
- (ii) Plastisuusteoriassa lujuutta on arvioitava kasvaneella venymän arvolla ottaen huomioon kohonnut sitkeysvaatimus, joka aiheutuu kutistumasta ja virumasta johtuvista halkeamista. Pelkillä kuiduilla raudoitettun betonin tapauksessa otetaan huomioon halkeilun vaikutus kuitubetonin lujuusarvoihin eli suunnittelun perustana tulee käyttää $f_{R,1;n}$ sijaan arvoa $f_{R,4}$. Suunnitteluratkaisuissa, joissa on tarvetta tarkastella suuria muodonmuutoksia (venymiä), voidaan $f_{R,4}$:n suuruus määrittää tapauskohtaisesti testaamalla.

5.3 Osavarmuusluvut

Taulukkoon 2 on lisätty standardin SFS-EN 1992-1-1 osavarmuuslukujen lisäksi kuitubetonin ja käyttörajatilatarkastelujen osavarmuusluvut.

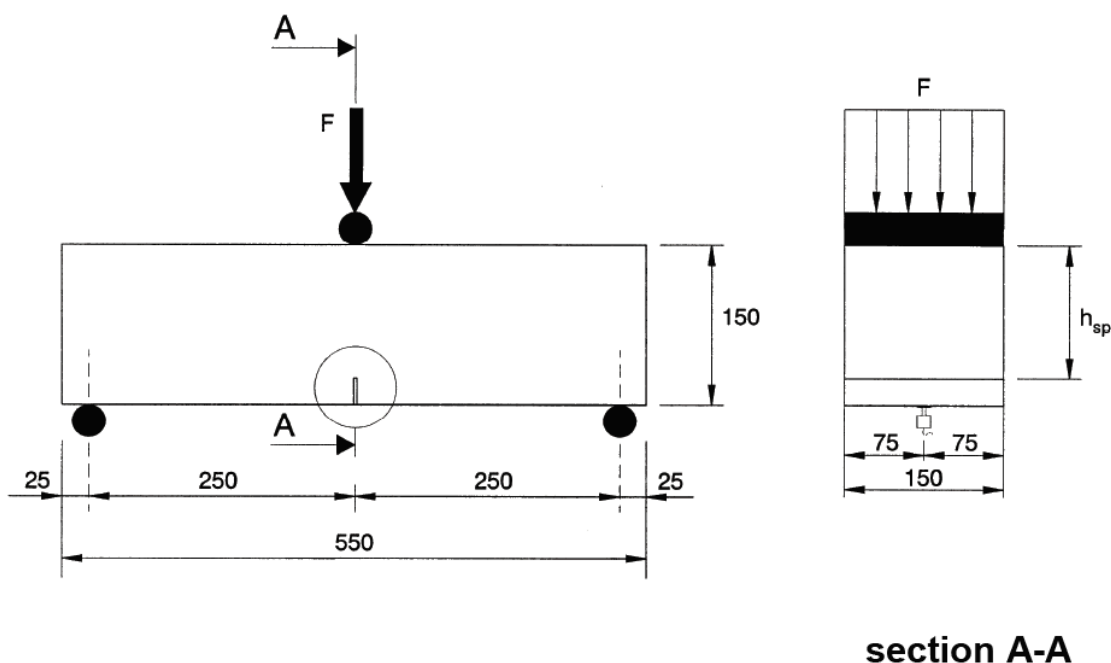
TAULUKKO 2. Materiaaliosavarmuusluvut

Suunnittelutilanteet	Betonin γ_c	Betoniteräksen γ_s	Jänneteräksen γ_s	Kuitubetonin 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

5.4 Jäännöstaivutusvetolujuus

Jäännöstaivutusvetolujuus kuvaa halkeilleen rakenteen kuitujen taivutusvetolujuutta tietyllä halkeamaleveydellä. Vähimmäisjäännöstaivutusvetolujuus ilmaistaan jäännöstaivutusvetolujuuden luokilla, jotka vastaavat jäännöstaivutusvetolujuuden ominaisarvoa $f_{R,i}$. Ominaisjäännöstaivutusvetolujuus määritetään standar-

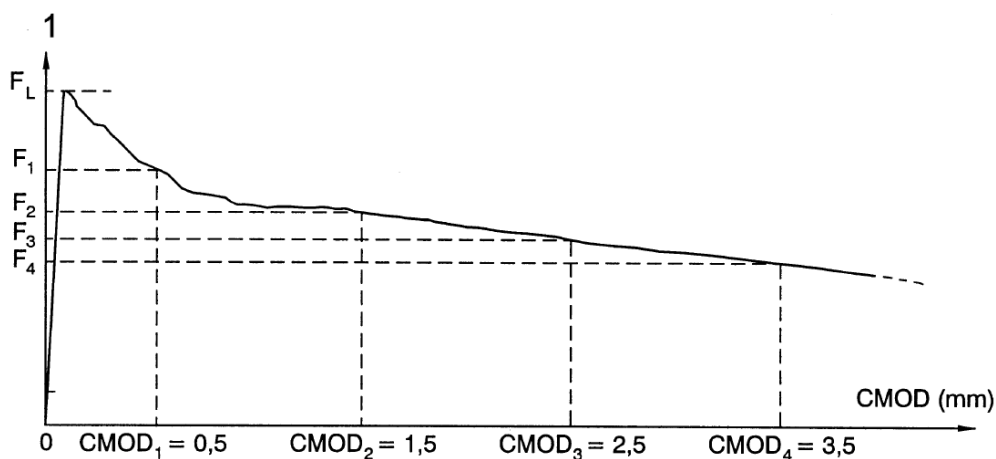
din SFS-EN 14651 mukaisella kolmen pisteen taivutusvetokokeella, jota suositetaan muun muassa Fib:n Model Code 2010:ssä sekä Rilem TC 162-TDF -komiteassa. Kuvan 17 mukainen kolmen pisteen taivutuskoe jäännöstaivutusvetolujuuden määrittämiseksi on tarkoitettu rakenteille, jotka sisältävät enintään 60 mm:n pituisia teräskuituja. (Mäntyranta 2013)



section A-A

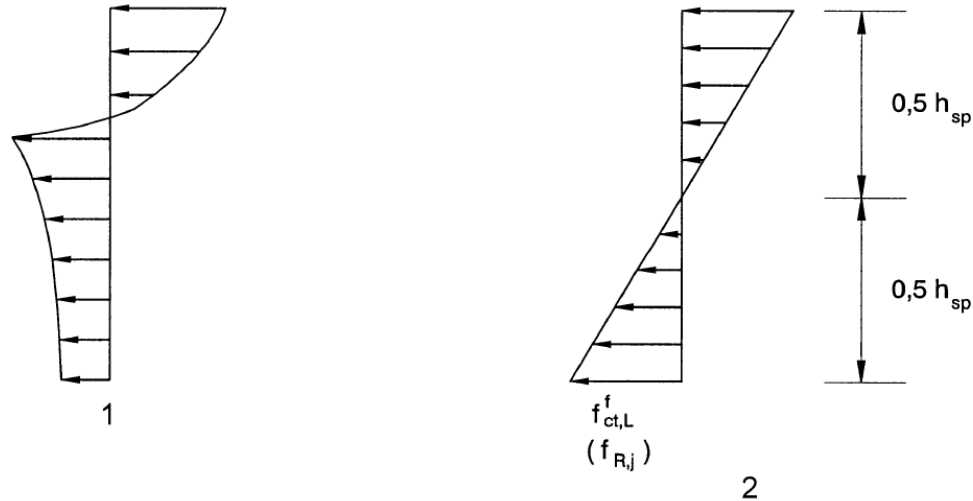
Kuva 17. SFS-EN 14651 mukainen taivutuskoe. (SFS-EN 14651)

Kokeessa kuormitussuureet F_1 - F_4 talletetaan tietyillä halkeamaleveyksillä kuvan 18 mukaisella periaatteella. (SFS-EN 14651)



Kuva 18. SFS-EN 14651 mukainen kuorma-halkeamaleveyden kuvaaja. (SFS-EN 14651)

Kuormitusarvot muutetaan jäännöstaivutusvetolujuuksiksi $f_{R,j}$ ($j = 1,2,3,4$) kaavan (1) mukaisesti olettaen jännitys jakauma lineaariseksi kuvan 19 mukaisesti. (SFS-EN 14651)



Kuva 19. Poikkileikkauksen todellinen jännitys jakauma (1) ja lineaarisesti oletettu jännitys jakauma (2) (SFS-EN 14651)

$$f_{R,j} = \frac{M_j}{W} = \frac{6M_j}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

missä M_j on momentti [Nmm] tallennetussa kohdassa CMOD
 b on koekappaleen leveys [mm]
 h_{sp} on standardin SFS-EN 14651 mukainen korkeus loveuksen yläreunasta palkin yläreunaan [mm]
 F_j on kuormitus [N] tallennetussa kohdassa CMOD
 l on koekappaleen jänneväli [mm]

Jäännöstaivutusvetolujuudet on jaettu kolmeen eri luokkaan, joita käytetään rajatilasta riippuen. Käyttörajatilamitoituksessa käytetään luokkaa R_1 , kun taas murtorajatilamitoituksessa yleensä edellytetään luokkien R_1 sekä R_3 määrittystä. Murtorajatilassa voidaan käyttää myös pelkästään R_3 luokkaa, jos suunnittelutehtävä on tarpeeksi yksinkertainen.

Taulukossa 3 esitetyt R_1 -luokan arvot ovat vaadittavan jäännöstaivutuslujuuden $f_{R,1}$ minimiarvoja. Vasemman puoleisessa pystysarakkeessa esitettyjen sitkeysluokkien a-e viereisessä sulkualueessa oleva lukuarvoväli kuvaa jäännöstaivutusvetolujuuksien $f_{R,3}$ ja $f_{R,1}$ suhdetta (R_3/R_1) halkeamaleveyksillä 2,5 mm ja 0,5 mm kussakin sitkeysluokassa. Vaakariveiltä voidaan lukea vaadittava vähimmäisarvo jäännöstaivutusvetolujuudelle $f_{R,3}$ (CMOD = 2,5 mm) eri sitkeysluokissa jäännöstaivutusvetolujuusluokan R_1 perusteella. (BY 66 2018; Hautajärvi 2017)

TAULUKKO 3. Jäännöstaivutusvetolujuuksien arvot sitkeysluokan perusteella. (BY 66 2018)

R_1 -luokka $f_{R,1}$ [MPa] Sitkeys- luokka (R_3/R_1)	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)	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:
 $R_1 = f_{R,1}$
 $R_3 = f_{R,3}$

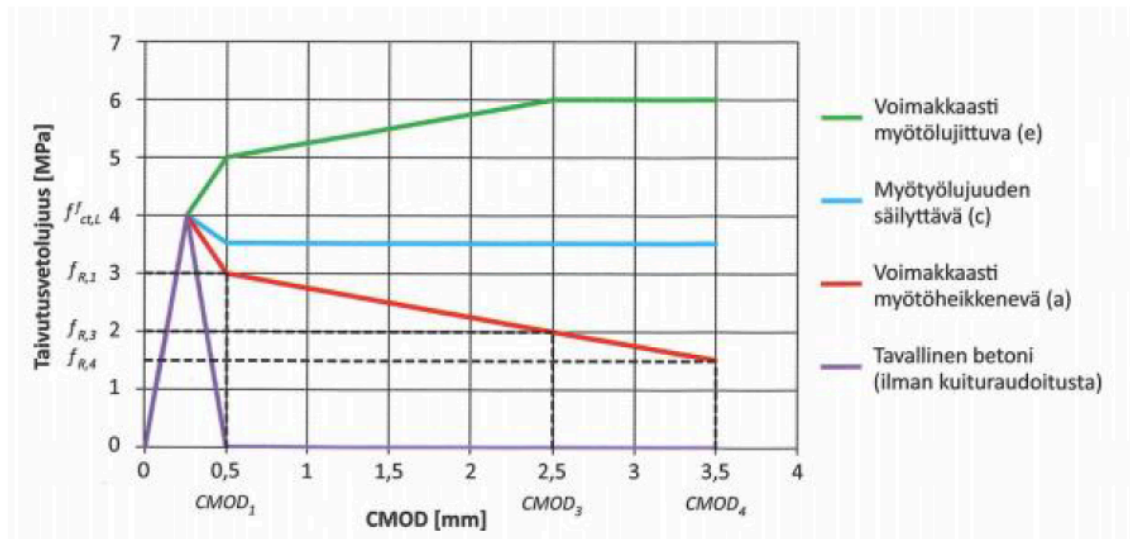
Sitkeysluokat:
 Luokka a: voimakkaasti myötöheikkenevä
 Luokka b: myötöheikkenevä
 Luokka c: myötölujuuden säilyttävä (sitkeä)
 Luokka d: myötölujittuva
 Luokka e: voimakkaasti myötölujittuva

Huomautus 1 Lihavoidulla on merkitty saatavuuden kannalta suositeltavat luokat.
Huomautus 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 $f_{R,4}$, katso kuva 3.1. R_4 -arvoa (= $f_{R,4}$) käytetään tarvittaessa (ks. kappale 2.3.2.2. (ii)).
Huomautus 3 Taulukon arvoja korkeampaa jäännöstaivutusvetolujuuden arvoa voidaan käyttää, jos arvo on vahvistettu standardin SFS-EN 14651 mukaisilla koetuloksilla.
Huomautus 4 Seuraavien ehtojen on täyttyttävä: $C_1 = 100 \cdot f_{R,1} / f_{ck,0.05} \geq 50 \%$ ja $100 \cdot f_{R,3} / f_{R,1} \geq 50 \%$.
 Ehtojen tarkoituksena on varmistaa kuitubetonin tietty minimisitkeys.

5.5 Jäännösvetolujuus

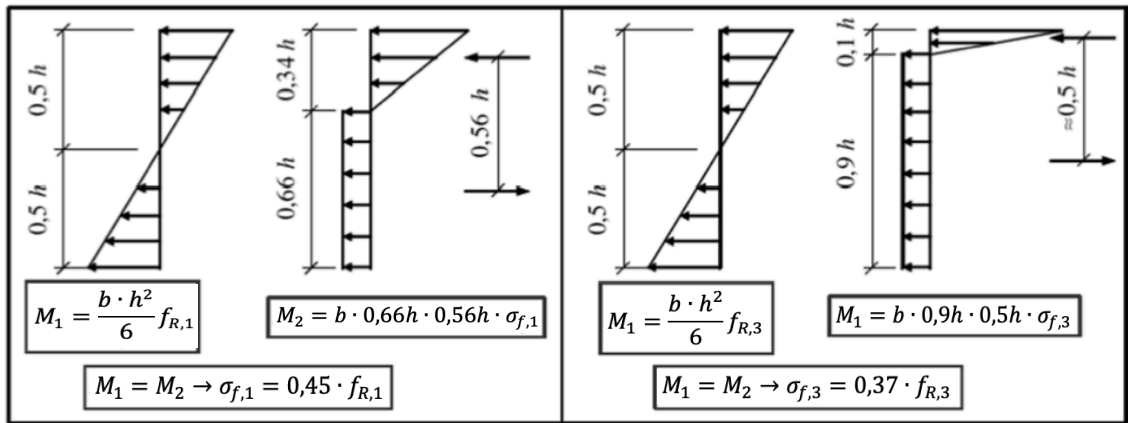
Jäännösvetolujuus kuvaa sitä lujuutta, jonka teräskuitubetoni säilyttää elastisen vaiheen jälkeen halkeilun alettua. Tämän jälkeen teräskuitubetoni voi käyttäytyä

joko lujittuvasti tai heikkenevästi. Lujittuvalla käyttäytymisellä tarkoitetaan jännityksien ja kuormien kasvua ensimmäisen halkeilun jälkeen ja heikkenevällä käyttäytymisellä näiden laskua kuvan 20 mukaisesti. Kuitubetoni, joka lujittuu taivutuksessa, on hyödyllinen rakenteissa, joissa taivutus on hallitseva (esim. laatat ja palkit). Halkeilun alettua raja-arvoa kutsutaan myötörajaksi tai suhteellisuusrajaksi. Tällöin jännitys joko kasvaa tai laskee alemmaksi, kuin betonin alkuperäinen vetolujuus. (Pettersson 2017)



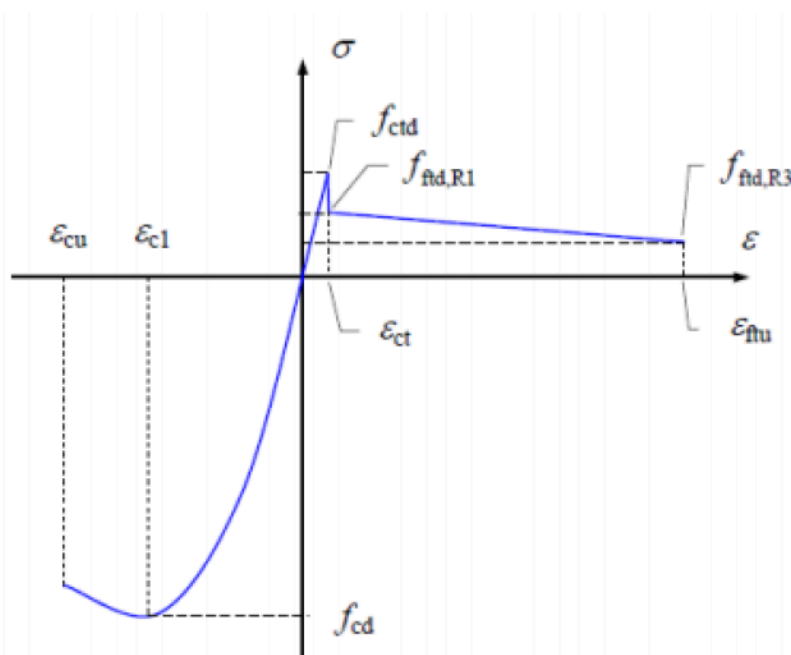
Kuva 20. Kuitubetonin käyttäytyminen eri sitkeysluokissa standardin SFS-EN 14651 mukaisella palkkikokeella. (BY 66 2018)

Mitoitusta varten jäännöstaivutusvetolujuus on muutettava suoraksi jäännösvetolujuudeksi. Kuten luvussa 4.3 esitettiin, jäännöstaivutusvetolujuudet $f_{R,1}$ ja $f_{R,3}$ määritetään standardin SFS-EN 14651 mukaisella kolmen pisteen taivutuskokeella. Kuvassa 21 on esitetty menetelmä, jolla jäännöstaivutusvetolujuudet $f_{R,1}$ ja $f_{R,3}$ muunnetaan jäännösvetolujuuden ominaisarvoiksi $\sigma_{f,1}$ ja $\sigma_{f,3}$, joita merkitään mitoituksessa tunnuksilla $f_{ft,R1}$ ja $f_{ft,R3}$ kaavojen 6 ja 7 mukaisesti. Tällöin oletetaan poikkileikkauksen jännitys jakauma lineaariseksi, vaikka todellisuudessa jännitys jakauma on hieman erilainen halkeilusta johtuen, sekä halkeaman korkeudeksi $0,66h_{sp}$, kun halkeamaleveys on $0,5$ mm käyttörajatilassa ja $0,9 h_{sp}$, kun halkeamaleveys on $2,5$ mm murtorajatilassa.



Kuva 21. Poikkileikkauksen jännitysjaumat halkeamaleveyksillä 0,5 mm ja 2,5 mm. [Muokattu lähteestä Hautajärvi 2017]

Kuvassa 22 esiintyvää lineaarisesti muuttuvaa vetojännitys kuvaajaa voidaan käyttää sovelluksissa, jotka vaativat tarkempia laskelmia. BY 66 ohjelun esittää myös toisen kuvaajan, jossa korkeampaa lujuutta $f_{ftd,R1}$ ei hyödynnetä. Kyseisessä kuvaajassa vetojännitys laskee jäännösvetolujuuden mukaiseen arvoon. Suunnitteluohjeen BY 66 mukaan jännitys kuvaaja voi olla laskeva tai nouseva riippuen siitä, onko teräskuitubetoni myötölujittuva tai myötöheikkenevä. Teräskuitubetonirakenteita tulisi pyrkiä teräskuitujen sitkeään tai myötölujittuvaan käyttäytymiseen vedossa. Kuvassa 22 on esitetty periaate jännitys-muodonmuutosyhteydestä, jossa vetojännitys laskee lineaarisesti. (BY 66 2018)



Kuva 22. Periaatekuva myötöheikkenevästä kuitubetonista, jossa jäännösvetojännitys laskee lineaarisesti. (BY 66 2018)

Teräskuitubetonin murtovenymä ε_{ftu} jännityksen ollessa $f_{ftd,R3}$ määritetään kaavalla 2.

$$\varepsilon_{ftu} = \varepsilon_{ct} + w_u/l_{cs} \quad (2)$$

missä ε_{ct} on halkeamisvenymä [mm]
 w_u on 2,5 mm
 l_{cs} on halkeama-alueen pituus [mm]

$$\varepsilon_{ct} = f_{cta}/E_c \quad (3)$$

missä f_{cta} on halkeilun jälkeinen betonin vetolujuuden mitoitusarvo [MPa]
 E_c on betonin kimmokerroin [MPa]

$$l_{cs} = \min\{s_{rm}, y\} \quad (4)$$

missä s_{rm} on keskimääräinen halkeamaväli [mm] katso kaava 5.
 y on betonin vetojännitetyn alueen korkeus [mm]

$$s_{rm} = \xi \cdot (50 + 25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\emptyset}{\rho}) \quad (5)$$

missä ξ on dimensioton kerroin, jonka arvo on:
 1,0 kun $l_f/d_f < 50$
 $50 \cdot d_f/l_f$ kun $50 \leq l_f/d_f < 100$
 0,5 kun $l_f/d_f > 100$
 \emptyset on tankoraidoituksen halkaisija (jos poikkileikkauksessa käytetään useita eri tankokokoja, voidaan arvona käyttää halkaisijoiden painotettua keskiarvoa)
 k_1 on 0,8 korkean tartunnan omaavilla tangoille ja 1,6 sileille tangoille
 k_2 on 0,5 puhtaalle tai yhdistetylle taivutukselle, kun $y \leq h$; 1,0 kun $y > h$ tai kyseessä on puhdas veto
 ρ on tehollisen vedetyn osan korkeuden y mukaisesti laskettu tankoraidoituksen geometrian raudoitussuhde

Jäännösvetolajuuden ominaisarvo luokissa R₁ ja R₃ saadaan kaavoilla 6 ja 7.

$$f_{ft,R1} = 0,45 \cdot f_{R,1} \quad (6)$$

$$f_{ft,R3} = 0,37 \cdot f_{R,3} \quad (7)$$

missä $f_{R,1}$ on luokan R₁ jäännöstaivutusvetolajuuden ominaisarvo

$f_{R,3}$ on luokan R₃ jäännöstaivutusvetolajuuden ominaisarvo

Jäännösvetolajuuden mitoitusarvo luokissa R₁ ja R₃ saadaan muuttamalla jäännösvetolajuuden ominaisarvot suoriksi vetolajuuksiksi kaavojen 8 ja 9 mukaisesti.

$$f_{ftd,R1} = n_f \cdot n_{det} \cdot f_{ft,R1} / \gamma_f \quad (8)$$

$$f_{ftd,R3} = n_f \cdot n_{det} \cdot f_{ft,R3} / \gamma_f \quad (9)$$

missä n_f on kuitujen orientaation huomioiva kerroin väliltä 0,5...1,0. Rakenteissa, jossa leveys on vähintään viisinkertainen korkeuteen nähden, voidaan käyttää arvoa 1,0.

n_{det} on staattisen määräämättömyyden huomioiva kerroin luokissa c-e. Kertoimet on esitetty taulukossa 4.

$f_{ft,R1}$ on luokan R₁ jäännösvetolajuuden ominaisarvo

$f_{ft,R3}$ on luokan R₃ jäännösvetolajuuden ominaisarvo

γ_f on kuitubetonin osavarmuusluku taulukon 2. mukaisesti

TAULUKKO 4. Eri rakennetapauksille soveltuvia muuntokerroimen n_{det} arvoja. (BY 66 2018)

Tapaus	Rakenneosan tyyppi	Muuntokerroin n_{det}
1	Staattisesti määrätyt palkit	1
2	Staattisesti määräämättömät palkit	1,4
3	Suorakaiteen muotoiset laatat, joiden kaksi vastakkaisista 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

Kuten taulukosta 4 näkee, rakenteet, jotka omaavat suuremman staattisen määräämättömyysasteen, voidaan mitoituksessa korottaa suurempaan jäännösvetolujuuden arvoon muuntokerroimen avulla. Laattarakenteissa korotettua jäännösvetolujuutta suositetaan käytettävän, koska rasitustilanteessa laattarakenteilla on rasituksien uudelleenjakautumiseen enemmän mahdollisuuksia, kuin esimerkiksi palkeilla. Lisäksi todennäköisyys sille, että useassa tarkasteltavassa poikkileikkauksessa esiintyy samanaikaisesti alhainen lujuustaso, on alhaisempi, kuin tarkasteltaessa yksittäistä poikkileikkausta (staattisesti määrätyt rakenteet).

On kuitenkin huomioitava, että suunniteltaessa teräskuitubetonirakenteita, taulukon muuntokerroimen n_{det} arvojen käyttö on sallittua vain c-e sitkeysluokissa.

5.6 Rakenneanalyysi ja sitkeys

Koska teräskuitubetoni käyttäytyy plastisesti, on plastisuusteoria ihanteellinen mitoitusmenetelmä kantaville laattarakenteille murtorajatilassa. BY 66 ohjeessa käytetään plastisuusteorian mukaista analyysia, jonka mukaan rakenne omaa riittävän sitkeyden, mikäli kaikki seuraavat ehdot toteutuvat.

- (iv) Jäännöslujuuskertoimeksi määritellään C_i -kerroin kaavan 10 avulla
- (iiv) Käytettäessä raudoituksena pelkkiä kuituja jäännöslujuuskertoimen C_1 arvon on oltava suurempi kuin 75%. Jos kuitubetoniin kohdistuu estettyä kutistumaa tai lämpöliikettä ja ulkoista kuormitusta, on molempien ehtojen $C_1 \geq 75\%$ ja $C_3 \geq 65\%$ täytyttävä. Rakenteille, joiden paksuus on yli 400 mm on suoritettava tarkempi tarkastelu.
- (iiiv) Tapauksissa, joissa käytetään sekä tavallista tankoraidoitusta ja kuituja, noudatetaan joko SFS-EN 1992-1-1 kohdan 5.6.2 ehtojen (2) i) ja ii) tai edellä mainittuja ehtoja (iv) ja (iiv). Ehtoja (2) i) ja ii) noudatetaan, jos kuitubetonirakenteen tavanomaisen raudoituksen määrä on yli 50% vastaavan rakenteen tarvitsemasta tankoraidoituksesta, mikäli kuituja ei käytetä lainkaan. Muissa tapauksissa noudatetaan ehtoja iv) ja iiv). Standardin ehdon iii) on täytyttävä aina.

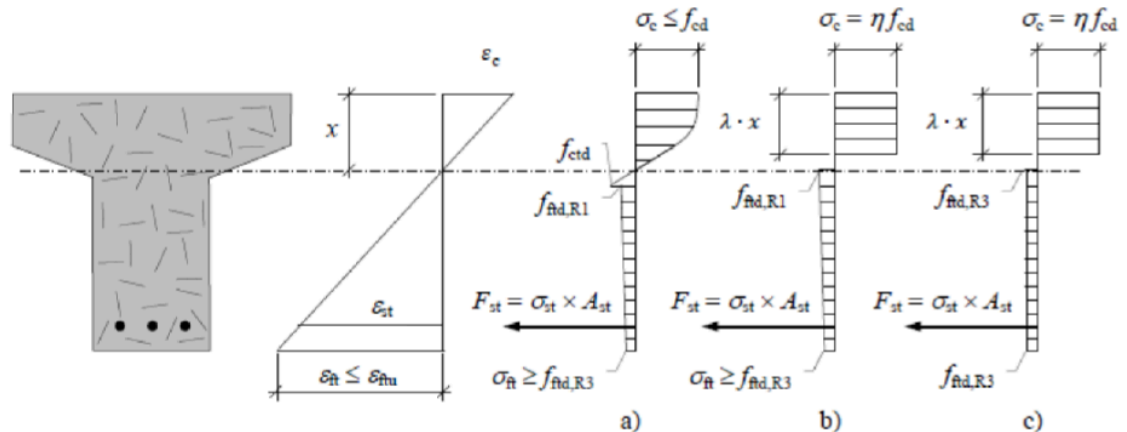
$$C_i = 100 \cdot \frac{f_{R,i}}{f_{ctk,0,05}} \quad (10)$$

missä f_{Ri} on kuitubetonin taivutusvetolujuus siirtymätasolla i ($i = 1$ tai 3) (CMOD _{i} , ks kuva 20).
 $f_{ctk,0,05}$ on betonin ominaisvetolujuus (5 % fraktiili)

5.7 Murtorajatila

5.7.1 Taivutuskestävyys

Murtorajatilamitoituksessa kuitubetonirakenteet mitoitetaan luokkien R1 ja R3 mukaisilla jäännösvetolujuuksilla. Teräskuitubetonin venymä ε_{ft} ei saa ylittää murtorajatilavenymää ε_{ftu} .



Kuva 23. Muodonmuutos- ja jännitys jakaumat halkeilleen betonipoikkileikkauksen mitoitusta varten (Kuitubetoni tankoraidoituksen kanssa/ilman). (BY 66 2018)

Kuvassa 23 kuvaajat edustavat murtorajatilamitoituksen tarkastelua varten a) yleistä jännitys jakaumaa sekä b) ja c) yksinkertaistettua jännitys jakaumaa, jos $\varepsilon_{ft} < \varepsilon_{ftu}$ ja $\varepsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$. Mitoitusvetolujuuden mitoitusarvo saadaan kaavasta 11.

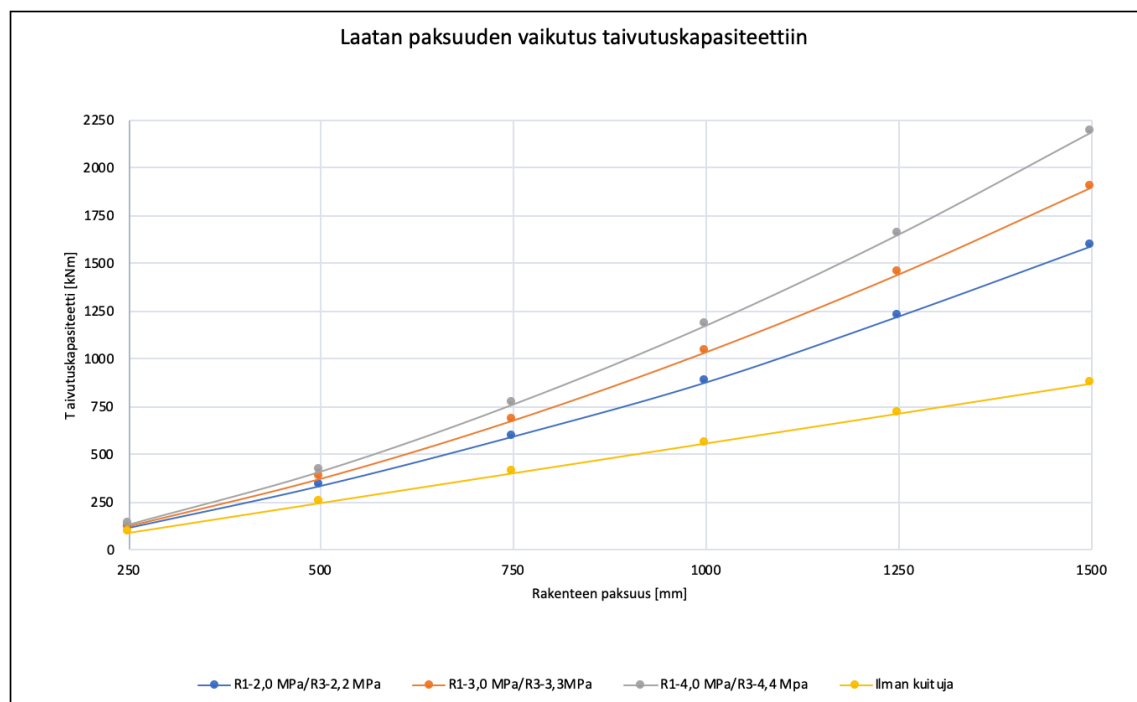
$$\sigma_{ft} = f_{ftd,R1} - \frac{\varepsilon_{ft}}{\varepsilon_{ftu}} \cdot (f_{ftd,R1} - f_{ftd,R3}) \quad (11)$$

missä ε_{ft} on kuitubetonin venymä

ε_{ftu} on kuitubetonin murtovenymä

5.7.2 Laatan paksuuden vaikutus taivutuskapasiteettiin

Kuvaajassa 1 on esitetty taivutuskapasiteetteja eri rakennepaksuuksilla käyttäen yleisimpiä jäännösvetolujuuden arvoja. Tavanomaisesti tankoraidoitettun paksulaatan osalta taivutuskapasiteetti nousee lineaarisesti paksuuden kanssa kuvaajan 1 mukaisesti. Paksulaatassa on käytetty 1000 mm:n paksuisen laatan minimiraidoitusta molempiin suuntiin ala- ja yläpinnassa. Teräskuituja käyttäessä taivutuskapasiteetti nousee paksuuden lisääntyessä, koska teräskuiduista saadun vetoresultantin laskennassa on huomioitu laatan paksuuden vaikutus, jolloin laskettava pinta-ala suurenee vetoresultanttia laskettaessa. Kuitubetonilla vahvistettun laatan taivutuskapasiteetti nousee epälineaarisesti, kapasiteetin nousun ollessa suhteellisesti nopeampaa, kuin paksuuden lisääntyminen. Kapasiteetin nousu prosentuaalisesti kuitenkin hidastuu paksuuden lisääntyessä.

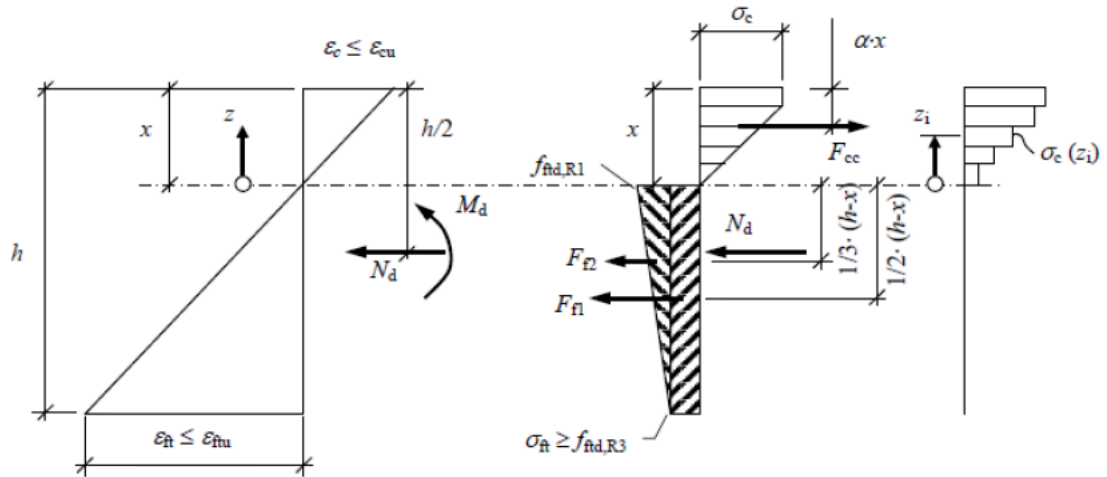


Kuvaaja 1. Laatan paksuuden vaikutus taivutuskapasiteettiin

Kuvaajassa 1 on verrattu kolmea eri jäännöstaivutusvetolujuutta kuiduttoman rakenteen kanssa, josta näkee tietyllä kuidulla saavutettavat taivutuskapasiteetit.

5.7.3 Taivutuskestävyys ilman tankoraidoitusta

Kuvan 24 mukaista periaatetta käytetään silloin, kun kuitubetonirakenteessa ei käytetä tavanomaista tankoraidoitusta.



Kuva 24. Tankoraidoittamattoman kuitubetonin muodonmuutos- ja jännitysjaumat. (BY 66 2018)

Tankoraidoittamattoman kuitubetonipoikkileikkauksen puristusmuodonmuutokset oletetaan olevan enintään murtopuristuman suuruisia. Oletetaan vetoalue halkeilleeksi, jolloin venymä vetopuolella on yhtä suuri tai pienempi, kuin murtovenymä. Taivutuskestävyyden yläraja-arvoa laskettaessa oletetaan puristusalueen x korkeudeksi aluksi $0,1 \cdot h - 0,2 \cdot h$. Kuituvahvistetun poikkileikkauksen halkeilutta tasapainotilaa vastaavat jännitysresultantit ja niiden tasapainotila lasketaan kaavojen 12-19 mukaisesti. (BY 66 2018)

$$F_{cc} = b \cdot \int_0^x \sigma_c(z) \cdot dx \approx b \cdot \sum_0^i \sigma_c(z_i) \cdot dz_i \quad (12)$$

$$\text{kun } \sigma_c(z) = \sigma_c(\varepsilon_c(z)) \text{ ja } \varepsilon_c(z) = \frac{z}{x} \cdot \varepsilon_c \quad (13)$$

$$F_{f1} = b \cdot (h - x) \cdot \left(f_{ftd,R1} - \frac{\varepsilon_{ft}}{\varepsilon_{ftu}} \cdot (f_{ftd,R1} - f_{ftd,R3}) \right) \quad (14)$$

$$F_{f2} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \frac{\varepsilon_{ft}}{\varepsilon_{ftu}} \cdot (f_{ftd,R1} - f_{ftd,R3}) \quad (15)$$

$$\text{kun } \varepsilon_{ft} = \frac{h-x}{x} \cdot \varepsilon_c \text{ ; tarkista, että } \varepsilon_{ft} \leq \varepsilon_{ftu} \quad (16)$$

Vaakavoimien tasapaino:

$$\sum H = 0 \rightarrow F_{cc} = F_{f1} + F_{f2} + N_d \quad (17)$$

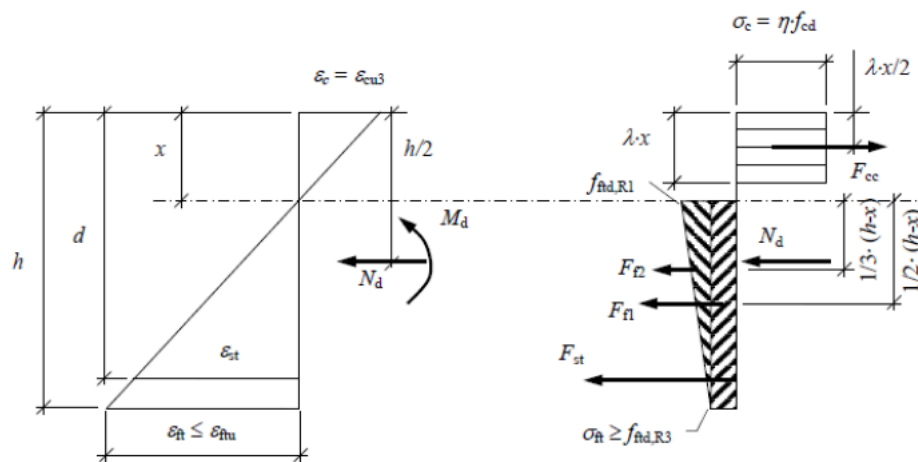
Taivutusmomenttien tasapaino:

$$M_{Rd} = F_{cc} \cdot x \cdot (1-\alpha) + F_{f1} \cdot \frac{h-x}{2} + F_{f2} \cdot \frac{h-x}{3} + N_d \cdot \left(\frac{h}{2} - x\right) \quad (18)$$

$$M_{Rd} = b \cdot \sum_0^i \sigma_c(z_i) \cdot dz_i + F_{f1} \frac{h-x}{2} + F_{f2} \cdot \frac{h-x}{3} + N_d \left(\frac{h}{2} - x\right) \quad (19)$$

5.7.4 Taivutuskestävyys tankoraidoituksen kanssa

Käytettäessä tankoraidoitusta yhdessä teräskuitujen kanssa, tulee käyttää kuvan 25 mukaista periaatetta.



Kuva 25. Yksinkertaistettu jännitys- ja muodonmuutosjakauma tankoraidoitettu kuitubetonipoikkileikkaukselle. (BY 66 2018)

Puristusalueella oleva betoni tankoraidoitettussa kuitubetonipoikkileikkauksessa oletetaan saavuttaneen murtopuristuman. Vetoalue oletetaan halkeilleeksi, jolloin vedetyn osan muodonmuutokset ovat enintään murtovenymän suuruisia. Tankoraidoitusta sisältävän kuituvahvistetun halkeilleen poikkileikkauksen tasapainotilaa vastaavat jännitysresultantit ja niiden tasapainotila lasketaan kaavojen

20-23 mukaisesti. Liitteen 2 ja 3 mukaisissa laskelmissa voimaresultantit on laskettu iteroimalla, paikantamalla puristusvyöhykkeen sijainti, jonka kautta on saatu pinta-alat veto- ja puristusvyöhykkeille.

$$F_{cc} = \lambda \cdot x \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \quad (20)$$

Vetovoimat F_{f1} ja F_{f2} lasketaan kaavojen 14 ja 15 mukaisesti.

$$F_{st} = A_{st} \cdot \sigma_c = A_{st} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{st} = A_{st} \cdot E_s \cdot \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_c \text{ jossa } \sigma_{st} \leq f_{yd} \quad (21)$$

Vaakavoimien tasapaino:

$$\sum H = 0 \rightarrow F_{cc} = F_{st} + F_{f1} + F_{f2} + N_d \quad (22)$$

Taivutusmomenttien tasapaino:

$$M_{Rd} = F_{cc} \cdot x \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{2}\right) + F_{f1} \cdot \frac{h-x}{2} + F_{f2} \cdot \frac{h-x}{3} + F_{st} \cdot (d-x) + N_d \cdot \left(\frac{h}{2} - x\right) \quad (23)$$

5.7.5 Leikkauskestävyys

Jos rakenne ei sisällä tankoraudoitusta, voidaan leikkauskestävyyden minimiarvo $V_{Rd,c}$ laskea pelkälle betonille standardin SFS-EN 1992-1-1 mukaisesti kaavan 24 avulla, jossa ei huomioida kuitujen vaikutusta. (BY 66 2018)

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d \quad (24)$$

missä v_{min} on $0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{f_{ck}}$

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

f_{ck} on betonin kuutiolujuus [MPa]

b_w on poikkileikkauksen leveys vedetyllä osalla [mm]

d on poikkileikkauksen tehollinen korkeus [mm]

Leikkausraudoittamattoman kuitubetonirakenneosan leikkauskestävyyden mitoitussarvo lasketaan kaavalla 25.

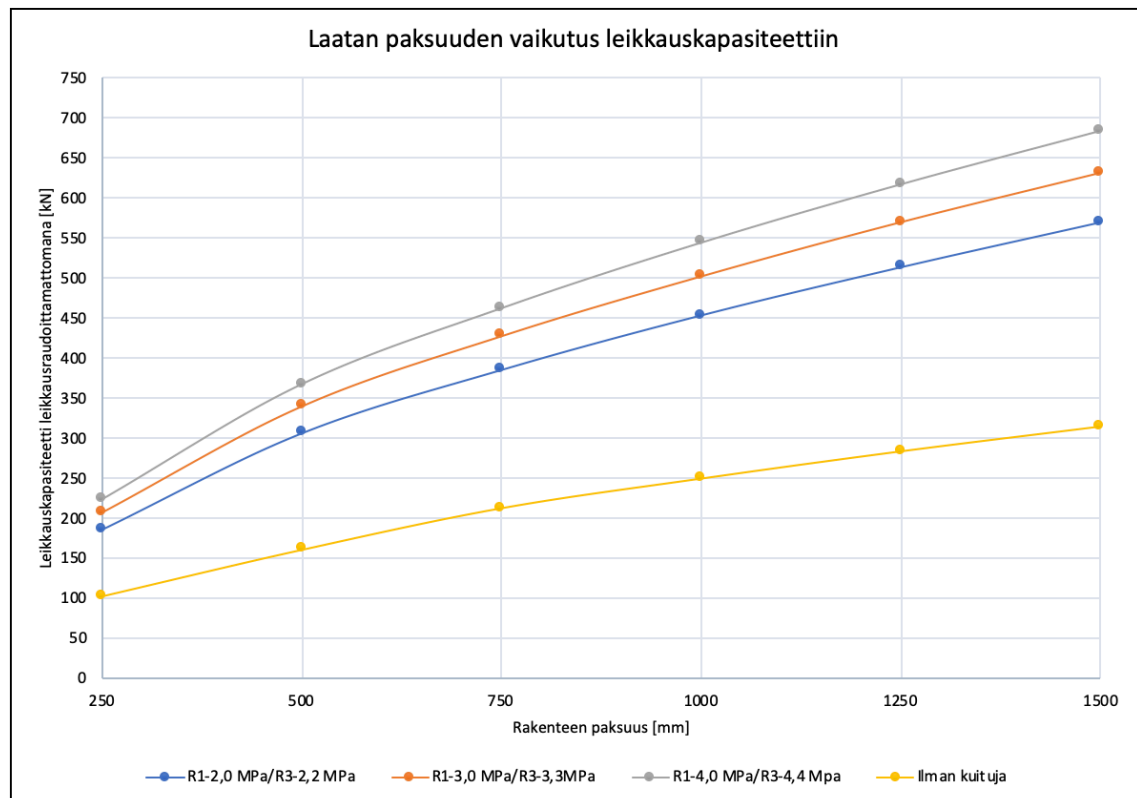
$$V_{Ra,cf} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{ft,R3}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad (25)$$

missä ρ on vetoterästen suhdeluku, $< 0,02\%$

σ_{cp} on betonin puristusjännitys normaalivoimasta tai mahdollisesta jännevoimasta

5.7.6 Laatan paksuuden vaikutus leikkauskestävyyteen

Kuvaajassa 2 on esitetty leikkausraudoittamattoman kuitubetonirakenteen leikkauskapasiteetteja eri rakennepaksuuksilla käyttäen yleisimpiä jäännösvetolujuuden arvoja. Opinnäytetyössä käytetty suunnitteluohje ei esitä mitoitusmenetelmää, jolla kuituja voisi käyttää leikkausraudoituksena. Sen sijaan kuiduilla vahvistettu taivutuskestävyys parantaa myös laatan leikkauskapasiteettia. Paksuihin laattarakenteisiin päädytään usein riittävän lävistyskapasiteetin saavuttamisen vuoksi, jolloin laatta ei lävistyksen osalta tarvitse lävistysraudoitusta. Leikkausraudoittamaton teräskuitubetonin tapauksessa leikkauskapasiteetin nousu ei ole lineaarista, johtuen leikkausraudoittamattoman rakenteen kaavassa olevan k-kertoimen vuoksi, jossa tehollinen korkeus on neliöjuuressa jakajana. Kyseinen ilmiö käy ilmi alla olevasta kuvaajasta 2.



Kuvaaja 2. Laatan paksuuden vaikutus leikkauskapasiteettiin.

Keskiarvillisesti vertailtujen leikkauskapasiteettien prosentuaalinen ero jokaisessa jäännöstaivutusvetolujuusluokassa, kuiduttomaan rakenteeseen on 49 % paksuuden saavuttaessa 500 mm paksuuden, kun taas ensimmäisellä rakennepaksuuden vaihdoksella lujuus kasvoi 52 %. Tämän jälkeen lujuusnousu luontaili lineaarisesta noususta kuiduttomaan rakenteeseen 0,1 % eroavaisuuksilla.

5.7.7 Lävistyskestävyys

Tankorautoitusta sisältävien kuitubetonilaattojen ja -pilarianturoiden lävistyskestävyyden mitoitusarvo $v_{Rd,cf}$ lasketaan kaavan 26 mukaisesti.

$$v_{Rd,cf} = \frac{0,3}{\gamma_c} \cdot \left(\frac{D}{d} + 1,5 \right) \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{ft,R3}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \quad (26)$$

missä D on pilarin/paalun sivumittojen keskiarvo
 d on rakenneosan tehollinen korkeus

Jos rakenneosa ei sisällä tankorauhoitusta, se lasketaan standardin SFS-EN 1992-1-1 mukaisesti kaavalla 27.

$$v_{Rd,cf} = v_{Rd,f} = (k/2) \cdot C \cdot \frac{f_{R3}}{\gamma_f} \quad (27)$$

5.8 Käyttörajatila

5.8.1 Halkeamaleveys

BY 66 mukaisen suunnitteluohjeen mukaan halkeamaleveyden laskennassa käytetään samaa periaatetta, kuin standardissa SFS-EN 1992-1-1, mutta seuraavin muutoksin:

Halkeamaleveys w_k lasketaan kaavalla 28.

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (28)$$

Venymäero ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) voidaan laskea joko kaavalla 29 tai 30. Kaavaa 29 käytetään, kun lasketaan vetorauoituksessa vaikuttava jännitys olettamalla poikkileikkaus halkeilleeksi. Tällöin kuitujen vaikutukset $f_{ftd,R1}$ on otettu huomioon.

Kaavaa 30 käytetään silloin, kun lasketaan venymäero halkeilleessa poikkileikkauksessa, jossa kuitujen vaikutusta $f_{ftd,R1}$ ei oteta huomioon.

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - (k_t + (1 - k_{tf}) \cdot k) \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{s,eff}} \cdot (1 + \alpha_{ef} \cdot \rho_{s,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (29)$$

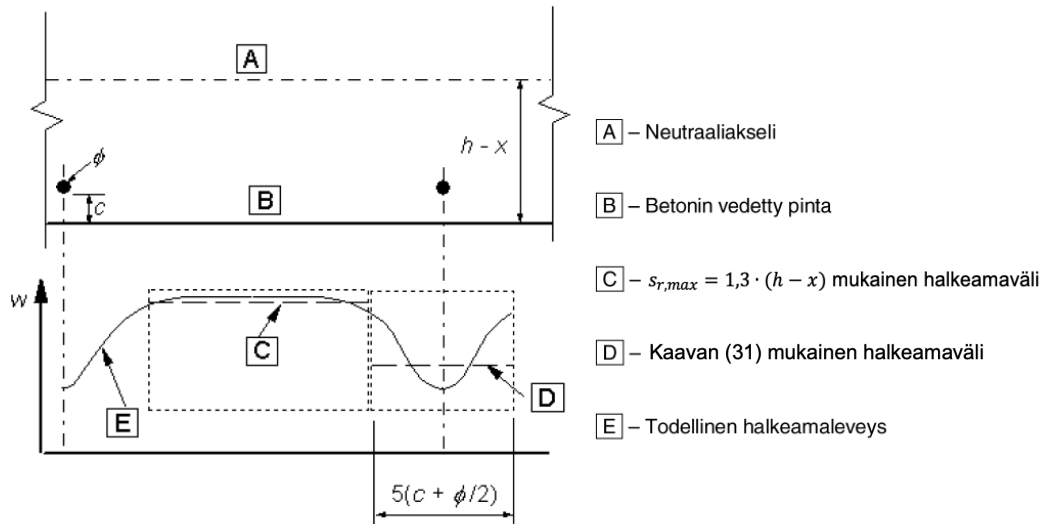
$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{(1 - k_f) \cdot \left(\sigma_{s,flict} - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{s,eff}} \cdot (1 + \alpha_{ef} \cdot \rho_{s,eff}) \right)}{E_s} \geq 0,6 \cdot (1 - k_f) \cdot \frac{\sigma_{s,flict}}{E_s} \quad (30)$$

Suurin lopullinen halkeamaväli $s_{r,max}$ lasketaan kaavalla 31.

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot (1 - k_f) \cdot \frac{\emptyset}{\rho_{s,eff}} \quad (31)$$

Kun tankojen jako on suurempi, kuin $5(c+\phi/2)$ kuvan 26 mukaisesti, tai jos veto-
vyöhykkeessä ei ole tartunnallista raudoitusta, voidaan halkeamaleveyden ylä-
raja laskea olettaen suurin halkeamaväli kaavan 32 mukaan.

$$s_{r,max} = 1,3 \cdot (h - x) \cdot (1 - k_f) \quad (32)$$



Kuva 26. Halkeamaleveys w betonin pinnalla suhteessa etäisyyteen tangosta.
(muokattu lähteestä SFS-EN 1992-1-1)

Halkeamaleveys voidaan myös arvioida kuvassa 26 esiintyvällä kaavalla (C)

5.8.2 Taipuma

BY 66 suunnitteluohje tarjoaa eri menettelytapoja taipuman laskennalle.

Ensimmäinen on standardin SFS-EN 1992-1-1 mukainen lause 7.4.2(2). Kysei-
nen kaava on yksinkertaistus ja varmallalla puolella oleva menettelytapa. (BY 66
2018)

Kun kuitubetonirakenne sisältää tankoraidoitusta ja siitä halutaan tehdä tarkempi
laskennallinen tarkastus taipumalle, tulee edetä standardin SFS-EN 1992-1-1
lauseen 7.4.3(3) periaatteen mukaisesti. Määritettäessä poikkileikkauksen mo-
mentti-kaarevuussuhdetta, kuitubetonin jäännösvetolujuus on otettava huomioon
numeerisella integroinnilla muuttamalla puristusrasitusta asteittain, kunnes ε_{cu}

saavutetaan. Laskennassa määritetään myös jokaisen askeleen kohdalla neutraaliakselin sijainti sekä taivutuskapasiteetti. Tämä tehdään kaavojen 33-39 mukaisesti. (BY 66 2018)

$$F_{cc} = b \cdot \int_0^x \sigma_c(z) \cdot dx \approx b \cdot \sum_0^i \sigma_c(z_i) \cdot \Delta z_i \quad (33)$$

$$\text{kun } \sigma_c(z) = \sigma_c(\varepsilon_c(z)) \text{ ja } \varepsilon_c(z) = \frac{z}{x} \cdot \varepsilon_c \text{ kun } \varepsilon_c = 0 \rightarrow \varepsilon_{cu} \quad (34)$$

$$F_{ft} = b \cdot \int_0^{h-x} \sigma_{ft}(z) \cdot dx \approx b \cdot \sum_0^i \sigma_{ft}(z_i) \cdot \Delta z_i \quad (35)$$

$$\text{kun } \sigma_{ft}(z) = \sigma_{ft}(\varepsilon_{ft}(z)) \text{ ja } \varepsilon_{ft} = \frac{h-x}{x} \cdot \varepsilon_c \quad (36)$$

$$F_{st} = A_{st} \cdot \sigma_c = A_{st} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{st} = A_{st} \cdot E_s \cdot \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_c \text{ kun } \sigma_{st} \leq f_{yd} \quad (37)$$

Vaakavoimien tasapaino:

$$\sum H = 0 \rightarrow F_{cc} = F_{st} + F_{ft} + N_d \quad (38)$$

Taivutusmomenttien tasapaino:

$$M_{Rd} = b \cdot \sum_0^i \sigma_c(z_i) \cdot \Delta z_i \cdot z_i + b \cdot \sum_0^1 \sigma_{ft}(z_i) \cdot \Delta z_i \cdot z_i + F_{st} \cdot (d - x) + N_d \cdot \frac{h-x}{x} \quad (39)$$

5.8.3 Vähimmäisraudoitusala

BY 66 ohjeen mukaan alueilla, jossa esiintyy vetoa, tulisi tartunnallista tanko-raudoitusta olla vähintään tietty määrä halkeilun rajoittamiseksi. Määrä voidaan arvioida betonissa juuri ennen halkeamista vaikuttavan vetovoiman ja kuitubetonissa sekä raudoituksessa sen myötäämisen alkaessa tai tarvittaessa alemmalla jännityksellä vaikuttavan vetovoiman välisestä tasapainosta, jotta halkeamaleveys pysyy enintään ylärajan mukaisena.

Standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdan 7.3.2 ehdossa (1)P esiintyy sama periaate, joka on voimassa seuraavin ehdoin:

(1) Ellei tarkempi laskenta osoita pienemmän alan olevan riittävä, voidaan vaadittava raudoituksen vähimmäispinta-ala laskea kaavan 40 mukaisesti.

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s = k_s \cdot k \cdot (1 - k_f) \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} \quad (40)$$

$$k_f = \frac{f_{ftd,R1}}{f_{ctm}} \leq 1,0 \quad f_{ftd,R1} \text{ (käyttörajatilassa)} \quad (41)$$

Kun käytetään kuitubetonia tai kuitubetonia yhdessä tankoraidoituksen kanssa, tulee rakenteella olla riittävä vetokestävyys taivutuksessa rakenteen haurasmurtumisen estämiseksi ja sitkeän toiminnan saavuttamiseksi. Jännösvelolujuus voidaan ottaa huomioon taivutuskestävyydessä. Vähimmäisraudoitusala laskeaan umpilaatoille kaavan 42 mukaisesti.

Muuntokerroin n_{det} pätee kaavassa 42 vain taulukon 4 tapauksille 1,2 ja 3.

$$A_{s,min} = \frac{A_{c,t} \cdot (k_c \cdot f_{ctm} - n_f \cdot n_{det} \cdot f_{t,R3})}{f_{yk}} \quad (42)$$

missä $A_{c,t}$ on poikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala taivutuksessa, vedetyn osan korkeus $h_{ct} = h/2$
 k_c on jännitysjaakauma ennen halkeamien muodostumista taivutuksessa standardin SFS-EN 1992-1-1 kohdan 7.3.2 mukaisesti

6 PAKSUN LAATTARAKENTEEN VERTAILU

Tässä luvussa on verrattu samaa laattarakennetta kolmella eri raudoitus- ja kuituvahvistuksella. Vertailussa on teoreettisesti tarkasteltu paksulaattaa, johon kohdistuu pistemäinen tukivoima. Kyseessä voisi olla paalu- tai siirtolaatta. Vertailun tarkoituksena on selvittää paksulaatassa teräskuitujen vaikutusta tankoraudoitukseen ja laatan kapasiteetteihin taivutuksen ja lävistyksen suhteen. Esimerkkitapausten laskelmat on esitetty liitteissä 1-3.

6.1 Johdanto

Vertailulaskelmissa käytetty laattapaksuus on 1000 mm ja betoniluokka C35/45. Laskennan tavoitteena on pyrkiä pitämään lävistyskapasiteetti samana sekä esittää kuitujen tuoma vaikutus taivutuskapasiteettiin ja tankoraudoituksen määrään. Vertailulaskelmat on käsitelty kolmella esimerkkitapauksella: Case 1-3, joissa kahdessa on käytetty R-luokalta eroavaa kuitubetonia. Case 2:n kuitubetonilujuus on liitteen 2 mukainen 2,91 MPa sekä case 3:ssa käytetty kuitubetonilujuus on liitteen 3 mukainen 5,5 MPa.

Ensimmäinen vertailulaskenta on tehty tavanomaisesti tankoraudoitettuna, joka on myös yleisin tapa toteuttaa paksuja laattarakenteita. Toinen vertailulaskenta on teräskuitubetonisen paksulaatan laskentasovellus, jossa on arvioitu laskennallisesti käytettävä kuitumäärä. Kuitubetonin yhteydessä on käytetty myös tavanomaista tankoraudoitusta. Kolmannessa vertailulaskennassa on kuitubetonisen paksulaatan mitoitus uusimman BY 66:n ohjeistuksen mukaan, jossa on myös käytettynä tavanomaista tankoraudoitusta vetoalueilla.

6.2 Laskenta

Laskenta on tehty lävistys- ja leikkausraudoittamattomalle laatalle, koska suunnitteluohje BY 66 ei esitä mitoitusmenetelmää, jolla voisi huomioida teräskuitujen

tuomaa etua leikkaus- ja lävistysraudoitetuissa rakenteissa. Laskennassa on selvitetty teräskuidun lisäämisen vaikutus lävistys- ja taivutuskapasiteetteihin.

Case 1:n valittu tankorauδοitus on alapinnassa T20 k150 ja yläpinnassa T16 k125, jolla on saatu taivutus- ja lävistyskapasiteetin arvoiksi taulukossa 6 esitetyt arvot, ks. Liite 1. Case 2:n tankorauδοitus on osittain korvattu kuitubetonilla siten, että kapasiteetit on saatu pidettyä case 1:n tasolla tai korkeampana, ks. Liite 2. Case 3:ssa on käytetty korkeampaa kuitubetonilujuutta, joilla on saatu vielä vähennetty pääraudoitusta ja pidettyä kapasiteetti samana tai korkeampana, kuin case 1:ssä, ks. Liite 3.

Case 2:n laskennan edetessä ilmeni yhteys, jolla kuitumäärän voi arvioida 10-20 % tarkkuudella siten, että taulukon 3 (s.37) mukaisiin suoriin jäännöstaivutusvetolujuuksiin päästään keskiarvillisesti C ja D luokassa R_1 0,014 MPa ja luokassa R_3 0,048 MPa:n tarkkuudella. Case 2:n arvioitu kuitumäärä oli 55 kg/m^3 . Jos case 3:n laskennassa käytettyihin jäännöstaivutusvetolujuuksiin haluttaisiin laskennallisesti päästä, arvioitu kuitumäärä olisi noin 100 kg/m^3 kyseisellä periaatteella. Täytyy kuitenkin huomioida, ettei sovellus ota huomioon käytettävän kuidun ominaisuuksia tai muotoja. Täten kuitumäärä on noin 10-20 % tarkkuudella varmalla puolella. Lopullisen kuitumäärän ja käytettävän kuitutyypin ilmoittaa kuitutoimittaja.

6.3 Tulokset

Tämän teoreettisen paksulaatan vertailulaskelmien perusteella kuidun lisäämisellä saadaan vähennettyä merkittävä määrä raudoitusta taivutus- ja lävistyskapasiteettia menettämättä. Laskennan tulokset sekä käytetyt teräsmäärät ja kuitubetonilujuudet on koottu taulukoihin 5 ja 6. Teräsmäärän vertailua on esitetty taulukossa 7. Taulukon 7 kuitumääräarviot ovat suuntaa-antavia ja eivät vastaa täysin käytettävää kuitumäärää. Käytettävän kuitutyypin ja kuitumäärän ilmoittaa aina kuitubetonitoimittaja.

Tavanomaisesti tankorauδοitetun paksulaatan tankorauδοituksen määrä on noin 60 kg/m^3 . Kun betonin sekaan lisätään case 2:ssa käytettyä teräskuitua noin 55

kg/m³, tankoraidoitus vähenee noin 37 kg/m³ ilman kapasiteettihäviöitä. Jos kuitumäärän nostaa case 3:n teräskuiduilla 100 kg/m³, tavanomainen tankoraidoitus vähenee 45,4 kg/m³. Tällöin laatan lävistyskestävyys kasvaa 17 % sekä taivutuksen osalta taivutuskestävyys kasvaa kentässä 26 % ja tuella 59 %.

TAULUKKO 5. Laattarakenteiden raudoitusvertailu

	Alapinnan raudoitus	Yläpinnan raudoitus	Kuitubetoni
Tavanomaisesti raudoitettu paksulaatta (Case 1)	T20 k150	T16 k125	-
Tavanomaisesti raudoitettu kuitubetonilaatta (Case 2)	T16 k200	T12 k250	R ₁ 2,91/R ₃ 2,91-d
Tavanomaisesti raudoitettu kuitubetonilaatta (Case 3)	T12 k200	T8 k150	R ₁ 5,0/R ₃ 5,5-d

TAULUKKO 6. Laattarakenteiden kapasiteettivertailu

	Case 1	Case 2	Case 3
Taivutuskestävyys kentässä	808 kNm/m	810 kNm/m	1021 kNm/m
Taivutuskestävyys tuella	626 kNm/m	664 kNm/m	995 kNm/m
Lävistyskestävyys lävistysraudoittamattomana	2356 kN	2543 kN	2750 kN

TAULUKKO 7. Laattarakenteiden materiaalivertailu

	Case 1	Case 2	Case 3
Tankoraidoitus	59,9 kg/m ³	22,9 kg/m ³	14,5 kg/m ³
Kuitumäärä	-	~ 55 kg/m ³	~ 100 kg/m ³

Käytettävällä kuitutyypillä on suuri vaikutus kuitumäärään. Case 3:n kuitumäärä on todella suuri, joka kasvattaa kustannuksia sekä vaikeuttaa betonin työstettävyyttä. Kuitumäärän laskentasovelluksessa on oletettu kuitutyyppi markkinoilta helposti saatavilla kuiduilla, joita ovat yleensä 3D-kuidut. Kuitumäärää voi laskea käyttämällä 4D tai 5D-kuituja, joiden vetolujuus on myös suurempi. Käytettävän kuitutyypin ja -määrän ilmoittaa kuitutoimittaja.

7 POHDINTA

Työssä on vertailtu esimerkkeinä teoreettisia laattoja liitteiden 1-3 mukaisilla laskelmilla. Tuloksena on saatu taulukon 5 mukaisella teräskuidulla lävistysraudoittamattoman kuitubetonilaatan osalle lävistyskapasiteetin kasvua noin 17 % vähentämällä tankoraidoitusnoin 45,4 kg/m³ samalla, kun taivutuskapasiteetti kasvaa kentässä 26 % ja tuella 59 % tavanomaisesti raudoitettuun paksulaattaan nähden.

Paksulaatan raudoituksen osalta saavutetaan säästöjä, mutta kuitujen lisääminen kompensoi tätä.

Teräskuitubetonin laskennan merkittävänä tekijänä oli pyrkiä asettamaan kuitumäärä tarpeeksi suureksi, jotta rakenne pyrkisi käyttäytymään sitkeästi lähteissä ilmenneiden kokeiden perusteella. Tämä tarkoitti käytännössä sitä, että kuitumäärän pitäisi olla vähintään 40 kg/m³. Lopullinen kuitumäärä kuitenkin tulee osoittaa standardin SFS-EN 14651 mukaisella palkkitestillä. Koska teräskuitubetoni käyttäytyy plastisesti, on plastisuusteoria ihanteellinen mitoitusmenetelmä kantaville kuitubetonirakenteille. Rakenteessa käytettävä jäännöstaivutusvetolujuus tulisi täten olla suurempi, kuin käytettävän betonin vetolujuus. Tällöin betonin halkeilun alettua, kuidun vetoprosessi käynnistyy ja voiman siirtyminen jakautuu kuitujen avulla laajemmalle alueelle. Kyseistä periaatetta on käytetty case 3:n laskennassa. Kun rakenteen korkeus kasvaa suuremmaksi, kuin 600 mm, laskennassa käytettävä keskimääräinen taivutusvetolujuuden arvo rajautuu eurokoodin mukaisesti käytettävän betonin vetolujuusarvoon.

Teräskuitubetonin käyttö kantavissa laattarakenteissa on potentiaalinen vaihtoehto tavanomaisen teräsbetonin kanssa. Teräskuitubetonin hyviä puolia ovat muun muassa betonin muodonmuutoksien rajoittaminen, betonin lujuusarvot sekä tavanomaisen tankoraidoituksen vähentyminen. Jotta teräskuitubetoni tulisi yleisempään käyttöön Suomessa, tulisi teräsbetonirakenteiden suunnittelusta laatia eurokoodi tasoinen suunnitteluohje, jolloin suunnittelijat saisivat suuremman varmuuden suunnitteluun. Tällöin myös eri kaupunkien viranomaiset suh-

tautuisivat varmemmin teräskuitubetonin käyttöön kantavissa rakenteissa. Teräskuitubetonin käytöllä tavoitellaan raudoitustyön vähentymistä. Teräskuitubetonin hyöty tulisi parhaiten esille rakenteissa, joissa esiintyisi mahdollisimman paljon työ aikaista toistoa, kuten välipohjarakenteissa. Teräskuitubetonin käyttö on soveltuva myös paksummille rakenneosille, kuin standardissa SFS-EN 14651 palkkikokeessa esiintyvälle koekappaleelle, sillä standardin mukainen palkkikoe ei aseta rakenteen koolle minkäänlaisia reunaehtoja. Lisäksi laatoituksen kuorimituksella on valmius jakaantua laajemmalle alueelle, kuin palkeissa, ja tästä syystä on suositeltavampaa käytettäväksi laatoissa. Tämän lisäksi kuiduilla on tapana edesauttaa jännityksien leviämistä laajemmalle alueelle, jolloin molempien yhteys tulee käytettäväksi entistä enemmän.

Teräskuitubetonin hyötyä leikkausraudoitetuissa rakenteissa ei voida tutkia Suomessa olevien nykyisten suunnitteluohjeiden mukaan, koska uusin suunnitteluohje BY 66 pohjautuu ruotsalaiseen SS 812310 -ohjeeseen, joka ei käsittele tapausta, jossa voitaisiin laskea kuitujen tuomaa hyötyä leikkausraudoitetuissa rakenteissa. Mäntyrannan diplomityössä käy ilmi, että saksalainen DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton -ohje omaa virallisen statuksen teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluun, jossa käydään läpi leikkausraudoitetut kuitubetonirakenteet. Tämän lisäksi BY 66:ssa esitetyt jäännöstaivutusvetolujuudet määritetään EN 14651 palkkikokeen avulla, joka eroaa saksalaisessa ohjeessa esiintyvien suorituskykyluokkien määrittämisessä. Täten suunnitteluun tarvittavat lähtöarvot perustuvat eri testimenetelmiin eikä tuloksia voi suoraan verrata toisiinsa, jonka vuoksi tätä ei olla tarkasteltu tässä insinöörityössä.

8 JATKOTUTKIMUSTARPEET

Jatkotutkimuksina suositellaan Suomeen tehtäväksi virallinen suunnitteluohje, joka käsittelisi täysimittaisen kuitubetonirakenteiden mitoituksen ja suunnittelun. Säädösten laatijoiden tulisi teettää täysimittaiset kuormituskokeet lävistys- ja leikkausraudoitetuille kuitubetonirakenteille sekä tutkia kuitubetonirakenteiden paloja pakkovoimista aiheutuvia ominaisuuksia. Suurimmat epäselvyydet teräskuitubetonirakenteiden suunnittelussa nousee esiin lävistys- ja leikkausraudoitettujen rakenteiden tarkastelussa, jonka vuoksi täysimittaista kustannusvertailua ei voi tehdä. Syynä tähän on tämän hetkisen tiedon puutteellisuus kuitujen tuomasta edusta leikkausraudoitetussa rakenteissa. Insinööriyön oleellisin aihe keskittyi paksujen laattarakenteiden tarkasteluun. Paksujen laattarakenteiden myötä rakenteelle nousee erilaisia reunaehtoja verrattuna tavanomaisiin rakenteisiin. Näihin kuuluvat muun muassa massiivisten kuitubetonirakenteiden lämmönkehityksen ja pakkovoimien hallintaan liittyvät asiat, joihin ei löytynyt tutkimuksia tai suunnitteluohjeita. Tämän lisäksi rakenteiden, joiden paksuus on yli 400 mm, tulee tarkastella kuitujen kiertymiskyky, mihin ei myöskään löytynyt reunaehtoja tämän insinööriyön ajankohtana. Täten voidaan todeta, että etenkin massiivirakenteiden osalta teräskuitubetonin suunnitteluohjeet ovat puutteellisia tämän insinööriyön aikana.

Suunnitteluohjeessa tulisi käydä myös ilmi, miten kuitumäärän ja teräskuitujen yksittäiset ominaisuudet voisi ottaa huomioon kuitubetonirakenteiden suunnittelussa. Tällöin suunnittelijalla olisi valmius valita rakenteessa käytettävä kuitutyyppi vapaasti kustannustietoisesti.

Jos rakenteessa käytetään normaalia vetolujuutta suurempia 4D tai 5D -kuituja, tulee käytettävä betoniluokka valita normaalia suuremmaksi. Tällöin kuidut ja betoni toimivat yhdessä paremmin, jolloin kuidun ulosvetoprosessi on mahdollisimman energiasidonnainen. Kyseistä ilmiötä varten tulisi määrittää reunarajat, milloin tulisi käyttää mitään kuitutyyppiä tiettyjen betoniluokkien kanssa. Tämä toteutuisi hyvin jonkin kaltaisena taulukkona, jossa ilmenisi tietyn kuidun vetokesävyden ylä- ja alaraja tietyssä betoniluokassa.

LÄHTEET

Barragán, B. 2002. Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear. Universitat politecnica de catalunya. Barcelona. Doctoral thesis

FRC 2014. ACI-fib International Workshop. Fibre-reinforced concrete: From design to structural applications.

Hautajärvi, S. 2017. Kuitubetonisen paalulaatan mitoitusohjelma. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma. Oulun yliopisto. Diplomityö

Heiskanen, A. 2018. Jälkijännitetyn pilarilaatan lävistysvahvikkeen suunnittelu eurokoodien mukaan. Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Insinööriyö.

Karv, C. 2017. Shear and punching resistance of steel fibre reinforced concrete slabs. Degree Program in Structural Engineering and Building Technology. Aalto University. Thesis submitted for examination for degree of Master of Science in Technology.

Löfgren, I. 2005. Fibre-reinforced concrete for Industrial Construction. Department of Civil and Environmental Engineering. Chalmers University of Technology. Thesis For Degree of Doctor Of Philosophy

Matsinen, M. 2013. Viro kulkee edellämme. Luettu 28.10.2019 https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1304_62-67.pdf

Mäntyranta M. 2013. Kantavien teräskuitubetonirakenteiden mitoitus. Rakennetekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö

Petterson, A. 2017. Kuitubetonin käyttö kantavissa laattarakenteissa. Rakennus- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

Rakentaja.fi/artikkelit/9060/kuitubetonilla_lisaa_lujuutta, luettu 10.10.2019

SFS-EN 14651 + A1 Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (Limit Of Proportionality (LOP), Residual). Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2009.

SFS-EN 14889-1 + A1 Betoniin käytettävät kuidut. Osa 1: Teräskuidut. Määritelmät, vaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2006.

SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto 2015.

Suomentpp.fi/kuidut/teraskuidut/, luettu 04.11.2019

Suomen Betoniyhdistys ry., 2018 BY 47 / BLY 7 Betonilattiat.

Suomen Betoniyhdistys ry., 2011. BY 56 Teräskuitubetonirakenteet.

Suomen Betoniyhdistys ry., 2018. BY 66 Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje.

Swamy, R. ja Stavrides, H. 1979. Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking. ACI Journal proceedings. Vol 76:3. s.443-460.

Ullah, F. 2017. Early Age Autogenous Shrinkage and Long-term Drying Shrinkage of Fibre Reinforced Concrete. Degree program in Structural Engineering and Building Technology. Aalto University. Thesis submitted for partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Structural Engineering and Building Technology.

LIITTEET

Liite 1. Case 1. Tavanomaisesti raudoitetun paksulaatan mitoitus

Liite 2. Case 2. Kuitubetonisen paksulaatan mitoitus tankoraidoitettuna

Liite 3. Case 3. Kuitubetonisen paksulaatan mitoitus tankoraidoitettuna BY 66:n mukaan

Case 1. Tavanomaisesti raudoitettun paksulaatan mitoitus

1 (6)

Lähtötiedot**Rakenteen mitat ja materiaaliominaisuudet**Laatan paksuus: $h := 1000\text{mm}$

Paalujen upotussyvyys: 50 mm

Terästen halkaisija ap: $\phi_{ap} := 20\text{mm}$ Terästen halkaisija yp: $\phi_{yp} := 16\text{mm}$ Betonipeite ap: $c_{\text{nom.a}} := 30\text{mm}$ Tehollinen korkeus x-suuntaan: $d_x := h - 50\text{mm} - c_{\text{nom.a}} - \frac{\phi_{ap}}{2} = 910\cdot\text{mm}$ Tehollinen korkeus y-suuntaan: $d_y := h - 50\text{mm} - c_{\text{nom.a}} - \phi_{ap} - \frac{\phi_{ap}}{2} = 890\cdot\text{mm}$

Teräs: B500B Betoni: C35/45

 $\gamma_s := 1.15$ $\gamma_c := 1.5$ ** Alueet, jossa vaikuttaa keskimääräistä rasitusta suurempi rasitus, on tarkasteltava erikseen***Materiaaliominaisuudet****Taivutusmitoitus murtorajatilassa kentässä x-suuntaan** $M_{Ed} := 808\text{kN}\cdot\text{m}$

Kentässä vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti x-suuntaan

 $b := 1000\text{mm}$

Mitoitetaan 1 metrin kaistana

$$u := \frac{M_{Ed}}{b \cdot d_x^2 \cdot f_{cd}} = 0.049 \quad u_b := 0.358 \quad u < u_b \quad \text{Raudoituksille B500B} \quad \text{Ok}$$

$$z := \frac{d_x}{2} \cdot (1 + \sqrt{1 - 2 \cdot u}) = 887\cdot\text{mm} \quad \text{Sisäinen momenttivarsi}$$

$$A_{s,x} := \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot z} = 2095.1\cdot\text{mm}^2$$

$$\frac{\pi \cdot \phi_{T20}^2}{4} \cdot \frac{1000\text{mm}}{150\text{mm}} = 2094.4\cdot\text{mm}^2$$

Laatan vähimmäisraudoitus

2 (6)

$$A_{s,\min} := 0.26 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot \frac{d_x}{f_{yk}} = 1519 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s,x} \geq A_{s,\min} \quad \text{Valitaan T20 k150 x-suuntaan alapinnassa perusraudoitukseksi; 2094mm}^2/\text{m}$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa kentässä y-suuntaan

$$M_{Ed} := 770 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kentässä vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti y-suuntaan

$$b := 1000 \text{ mm}$$

Mitoitetaan 1 metrin kaistana

$$u := \frac{M_{Ed}}{b \cdot d_y^2 \cdot f_{cd}} = 0.049 \quad u_b := 0.358 \quad u < u_b \quad \text{Raudoituksille B500B} \quad \text{Ok}$$

$$z := \frac{d_y}{2} \cdot (1 + \sqrt{1 - 2 \cdot u}) = 867.6 \cdot \text{mm} \quad \text{Sisäinen momenttivarsi}$$

$$A_{s,y} := \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot z} = 2041.2 \cdot \text{mm}^2$$

$$\frac{\pi \cdot \phi_{T20}^2}{4} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} = 2094.4 \cdot \text{mm}^2$$

$$M_{Rd} := f_{yd} \cdot z \cdot (2094.4 \text{ mm}^2) = 790.068 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Laatan vähimmäisraudoitus

$$A_{s,\min} := 0.26 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot \frac{d_x}{f_{yk}} = 1519 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s,x} \geq A_{s,\min} \quad \text{Valitaan T20 k150 x-suuntaan alapinnassa perusraudoitukseksi; 2094mm}^2/\text{m}$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa tuella x-suuntaan

3 (6)

$$M_{Ed} := 510 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Tuella vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti x-suuntaan

$$u := \frac{M_{Ed}}{b \cdot d_x^2 \cdot f_{cd}} = 0.031 \quad u_b := 0.358 \quad u < u_b \quad \text{Raudoituksille B500B} \quad \text{Ok}$$

$$z := \frac{d_x}{2} \cdot (1 + \sqrt{1 - 2 \cdot u}) = 895.6 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{\pi \cdot \phi_{T16}^2}{4} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{125 \text{ mm}} = 1608.5 \cdot \text{mm}^2$$

$$M_{Rd} := f_{yd} \cdot z \cdot 1608.5 \text{ mm}^2 = 626.367 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Laatan vähimmäisraudoitus

$$A_{s,\text{min}} := 0.26 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot \frac{d_x}{f_{yk}} = 1519 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s,x} \geq A_{s,\text{min}} \quad \text{Valitaan T16 k125 x-suuntaan yläpinnan perusraudoitukseksi } 1608 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa tuella y-suuntaan

$$M_{Ed} := 510 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Kentässä vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti y-suuntaan

$$u := \frac{M_{Ed}}{b \cdot d_y^2 \cdot f_{cd}} = 0.032 \quad u_b := 0.358 \quad u < u_b \quad \text{Raudoituksille B500B} \quad \text{Ok}$$

$$z := \frac{d_y}{2} \cdot (1 + \sqrt{1 - 2 \cdot u}) = 875.3 \cdot \text{mm}$$

$$M_{Rd} := f_{yd} \cdot z \cdot 1608.5 \text{ mm}^2 = 612.147 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\frac{\pi \cdot \phi_{T16}^2}{4} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{125 \text{ mm}} = 1608.5 \cdot \text{mm}^2$$

Laatan vähimmäisraudoitus

$$A_{s,\text{min}} := 0.26 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot \frac{d_x}{f_{yk}} = 1519 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s,y} \geq A_{s,\text{min}} \quad \text{Valitaan T16 k125 y-suuntaan yläpinnassa perusraudoitukseksi; } 1608 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Lävistys

Lähtötiedot

Paalujen poikkileikkaukset

Pystypaalut TB350x350, C45/55
Vinopaalut: RR270x12,5 S440J2H,
betonitäyttö C30/37.

$$c_1 := 350\text{mm} \quad c_2 := c_1$$

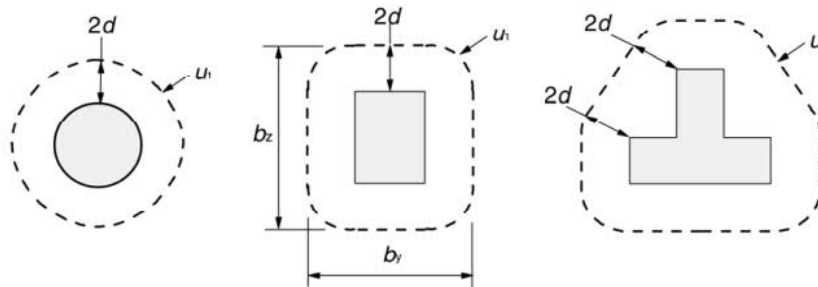
$$D := \sqrt{c_1 \cdot c_2} = 350\text{mm}$$

Laatan poikkileikkaus, mitoitetaan 1 metrin kaistana

$$b := 1000\text{mm}$$

$$h := 1000\text{mm}$$

$$d_{\text{eff}} := \frac{d_x + d_y}{2} = 900\text{mm}$$



Lävistyskestävyys takastellaan tuen reunan ja perustarkastuspiirin u_1 kohdalla.

$$u_0 := 4 \cdot 350\text{mm} = 1400\text{mm}$$

Paalun piiri

$$u_1 := 4 \cdot 350\text{mm} + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d_{\text{eff}} = 12.7\text{m}$$

Paalun perustarkastuspiiri

$$\beta := 1.15$$

Keroin sisäpaalulle

Kuormitukset

$$V_{\text{Ed}} := 1241\text{kN}$$

Suurin tukireaktio pystypaalulle FEM-mallista

$$v_{\text{Ed},0} := \beta \cdot \frac{V_{\text{Ed}}}{u_0 \cdot d_{\text{eff}}} = 1.133\text{MPa}$$

$$v_{\text{Ed},1} := \beta \cdot \frac{V_{\text{Ed}}}{u_1 \cdot d_{\text{eff}}} = 0.125\text{MPa}$$

$$A_{\text{sx}} := 1608.5\text{mm}^2$$

T16 k125 taivutusraudoitus poikkileikkauksen yläpinnassa

$$A_{\text{sy}} := 1608.5\text{mm}^2$$

T16 k125 taivutusraudoitus poikkileikkauksen yläpinnassa

$$\rho_1 := \min\left(\sqrt{\frac{A_{\text{sx}}}{b \cdot d_x} \cdot \frac{A_{\text{sy}}}{b \cdot d_y}}, 2\%\right) = 0.0018$$

$$k := \min \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d_{\text{eff}} \frac{1}{\text{mm}}}}, 2 \right) = 1.47$$

$$\sigma_{\text{cp}} := 0 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{ctk}} := f_{\text{ctk}} \cdot 0.05$$

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{\text{ck}}}{250} \right) = 0.52$$

$$v_{\text{Rd,max}} := 0.4 \cdot \nu \cdot f_{\text{cd}} = 4.1 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{v_{\text{Ed,0}}}{v_{\text{Rd,max}}} \leq 1 \quad \frac{v_{\text{Ed,0}}}{v_{\text{Rd,max}}} = 0.21 \text{ OK}$$

Tarkistetaan, ettei pilarin sivuilla oleva jännitys ylitä suurinta lävistyskestävyyttä

$$C_{\text{Rd,c}} := \frac{0.3 \cdot \left(\frac{D}{d_{\text{eff}}} + 1.5 \right)}{\gamma_c \cdot \left(\frac{D}{d_{\text{eff}}} + 4 \right)} = 0.086$$

Leikkausraudoittamattomille rakennesosille laskettava kerroin RakMk 2019



Lävistysraudoittamattoman rakenteen lävistyskestävyys

$$v_{\text{Rd,c}} := C_{\text{Rd,c}} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} = 0.233 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{v_{\text{Ed,1}}}{v_{\text{Rd,c}}} \leq 1 \quad \frac{v_{\text{Ed,1}}}{v_{\text{Rd,c}}} = 0.53 \text{ OK} \quad \text{Kestää ilman lävistysraudoitusta}$$

$$V_{\text{lävistys}} := A_{\text{u1}} \cdot v_{\text{Rd,c}} = 2356 \cdot \text{kN}$$

Leikkaus

6 (6)

Lähtötiedot

Laatan poikkileikkaus, mitoitetaan 1 metrin kaistana

$$b := 1000\text{mm} \quad \theta := 21.8\text{deg}$$

$$h := 1000\text{mm} \quad \cot(\theta) = 2.5$$

$$V_{Ed} := 1640\text{kN}$$



Leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyys

$$V_{Rd.c} := C_{Rd.c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_{eff} \text{MPa} = 229.3 \cdot \text{kN}$$

Case 2. Kuitubetonisen paksulaatan mitoitus tankoraidoitettuna

1 (12)

Lähtötiedot**Rakenteen mitat ja materiaaliominaisuudet**Rakenteen paksuus: $h := 1000\text{mm}$ Rakenteen leveys: $b := 1000\text{mm}$

Mitoitetaan 1 metrin kaistana

Paalujen upotussyvyys: 50mm Terästen halkaisija ap: $\phi_{ap} := 20\text{mm}$ Betonipeite: $c_{nom} := 30\text{mm}$ Tehollinen korkeus x-suuntaan: $d_x := h - 50\text{mm} - c_{nom} - \frac{\phi_{ap}}{2} = 910\text{mm}$ Tehollinen korkeus y-suuntaan: $d_y := h - 50\text{mm} - c_{nom} - \phi_{ap} - \frac{\phi_{ap}}{2} = 890\text{mm}$ $\gamma_c := 1.5$ $\eta_f := 1$

Kuitujen suunnan huomioiva kerroin

 $\gamma_f := 1.5$ $\eta_{det} := 2$

Muuntokerroin vain luokissa c-e

 $\gamma_s := 1.15$ $\alpha_{ct} := 1$ $n := 2$ $\alpha_{cf} := 0.85$ $f_{yk} := 500\text{MPa}$ $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.8\text{MPa}$ $f_{ck} := 35\text{MPa}$ $f_{cd} := \alpha_{cf} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.8\text{MPa}$

Materiaaliominaisuudet

 $\rho_k := 55 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Kuitumäärä

 $C_1 := 20.7 + \rho_k \cdot 1.27 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 90.5\%$

Paalulaatalle soveltuva jäännöslujuuskerroin

 $C_{i,f} := 100 \cdot \frac{2.91\text{MPa}}{f_{ctk,0.05}} = 129.0\% > 75\%$

Kuitubetonin todellinen jäännöslujuuskerroin

 $f_{bd,f} := f_{bd} \cdot \frac{C_1}{100} = 2.91\text{MPa}$

Kuitubetonin jäännöstäivutusvetolujuus

 $f_{ft,R1} := 0.45 \cdot f_{bd,f} = 1.31\text{MPa}$

Suorien jäännösvetolujuuksien karakteristiset arvot suorituskykyluokissa R1 ja R3

 $f_{ft,R3} := 0.37 \cdot f_{bd,f} = 1.075\text{MPa}$ $f_{ftd,R1} := \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot \frac{f_{ft,R1}}{\gamma_f} = 1.744\text{MPa}$

Suorien jäännösvetolujuuksien suunnittelu-arvot suorituskykyluokissa R1 ja R3

$$f_{\text{ftd.R3}} := \eta_f \eta_{\text{det}} \cdot \frac{f_{\text{ft.R3}}}{\gamma_f} = 1.434 \cdot \text{MPa}$$

2 (12)

$$l_s := h = 1000 \cdot \text{mm}$$

$$\epsilon_c := 0.175\text{‰}$$

Puristuma, SFS-EN 1992-1-1 Taulukko 3.1

$$\epsilon_{\text{ct}} := \frac{f_{\text{ctd}}}{E_{\text{cm}}} = 0.000044 \quad (0.04\text{‰})$$

Halkeamisvenymä

$$w_u := 2.5 \text{ mm}$$

Halkeaman avautuma

$$\epsilon_{\text{ftu}} := \epsilon_{\text{ct}} + \frac{w_u \cdot 1000}{l_s} = 2.5 \text{ ‰}$$

Kuitubetonin murtovenymä

$$\epsilon_{\text{c2}} := 2\text{‰}$$

$$\epsilon_{\text{cu2}} := 3.5\text{‰}$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa kentässä x-suuntaan

$$\sigma_c := \begin{cases} f_{\text{cd}} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{\text{c2}}} \right)^n \right] & \text{if } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{\text{c2}} \\ f_{\text{cd}} & \text{if } \epsilon_{\text{c2}} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{\text{cu2}} \end{cases}$$

$$\sigma_c = 3.32 \text{ MPa}$$

Etsitään neutraaliakselin etäisyys poikkileikkauksen yläpinnasta vaakatasapainoehdon perusteella, jossa $\epsilon_c \leq \epsilon_{\text{cu3}}$



$$A_{\text{sx}} := 1005 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad A_{\text{st.x}} := A_{\text{sx}} \cdot \text{m} = 1005 \cdot \text{mm}^2$$

Taivutusraudoitus kentässä T16 k200

$$-b \cdot \int_0^y \sigma_c \cdot \left(\frac{-\epsilon_{\text{ftu}} \cdot r}{h - y} \right) dr = b \cdot (h - y) \cdot (f_{\text{ftd.R3}}) + A_{\text{st.x}} \cdot f_{\text{yd}}$$

Neutraaliakselin sijainti luettuna poikkileikkauksen yläpinnasta

$$x := \text{Find}(y) = 420.7 \cdot \text{mm}$$

$$F_{\text{cc}} := -b \cdot \int_0^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\epsilon_{\text{ftu}} \cdot r}{h - x} \right) dr = 1267.7 \cdot \text{kN}$$

Puristusresultantin suuruus

$$F_{\text{st}} := A_{\text{st.x}} \cdot f_{\text{yd}} = 437 \cdot \text{kN}$$

$$F_f := b \cdot (h - x) \cdot (f_{\text{ftd.R3}}) = 830.7 \cdot \text{kN}$$

$$F_f + F_{\text{st}} = 1267.7 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{cc}} = 1267.7 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehdon tarkastus, oltava 0 kN

3 (12)

$$F_x := F_f + F_{st} - F_{cc} = 0 \cdot \text{kN} \quad \text{OK}$$

Puristusresultantin etäisyys neutraaliakselista



$$-b \cdot \int_0^k \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (k-r) \, dr = -b \cdot \int_k^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (r-k) \, dr$$

$$x_r := \text{Find}(k) = 280.4 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \frac{x - x_r}{x} = 0.3$$

Tankoraudotetun kuitubetonirakenteen taivutuskapasiteetti x-suuntaan

$$M_{Rd} := F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_f \cdot \frac{h-x}{2} + F_{st} \cdot (d_x - x) = 809963.385 \, \text{N} \cdot \text{m}$$

Kentässä vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti x-suuntaan

$$M_{Ed} := 747 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Käyttöaste (\%)} = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 92 \, \% \quad \text{OK}$$

Minimiraudoitus x-suuntaan sitkeän käyttäytymisen varmistamiseksi taivutuksessa

BY 66 kohta 9.3.1.1 & SFS-EN 1992-1-1 kohta 9.3.1.1

$$h_{ct} := \frac{h}{2} = 500 \cdot \text{mm}$$

Poikkileikkauksen vedetyn osan korkeus taivutuksessa

$$A_{ct} := b \cdot h_{ct} = 5 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

Poikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala taivutuksessa

$$N_{Ed} := 0 \, \text{kN}$$

Poikkileikkaukseen vaikuttava ulkoinen normaalivoima

$$\sigma_c := \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = 0 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} = 3.21 \cdot \text{MPa}$$

$$k_1 = 1,5$$

Kun N_{Ed} on puristava voima

$$k_1 = 2h^*/3h$$

Kun N_{Ed} on vetävä voima

$$k_1 := 1.5$$

Jännitysten uudelleen jaukutumiseen huomioiva kerroin normaalivoiman vaikutuksesta

$$h_- := h = 1000 \cdot \text{mm}$$

$h^*=1 \, \text{m}$, kun $h \leq 1,0 \, \text{m}$ ($h^*=h_-$)

$$k_c := \min \left[0.4 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \cdot \frac{h \cdot f_{ct,eff}}{h}} \right), 1 \right] = 0.124$$

Kerros, jonka avulla otetaan huomioon sisäisen momenttivarren muutos sekä jännitysten uudelleen jakautuminen poikkileikkauksessa välittömästi ennen halkeilua.
(SFS-EN 1992-1-1 kohta 7.3.2)

$$k_c \cdot f_{ctm} - \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot f_{ft,R3} = -1.75 \cdot \text{MPa} < 0$$

Jos edellä mainittu ehto < 0 , niin pelkkien kuitujen käyttö on mahdollista.

HUOM.

Laskennassa on käytetty taivutusraudoitusta taivutuskapasiteetin saavuttamiseksi, joka varmistaa rakenteen sitkeän käyttäytymisen.

$$A_{sx,min} := \max \left[A_{ct} \cdot \left(\frac{k_c \cdot f_{ctm} - \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot f_{ft,R3}}{f_{yk}} \right), 0 \text{ mm}^2 \right] = 0 \cdot \text{mm}^2$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa kentässä y-suuntaan

Etsitään neutraaliakselin etäisyys poikkileikkauksen yläpinnasta vaakatasapainoehdon perusteella, jossa $\epsilon_c \leq \epsilon_{cu3}$



$$A_{sy} := 1005 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad A_{st,y} := A_{sy} \cdot m = 1005 \cdot \text{mm}^2$$

Taivutusraudoitus kentässä T16 k200

$$-b \cdot \int_0^y \sigma_c \cdot \left(\frac{-\epsilon_{ftu} \cdot r}{h - y} \right) dr = b \cdot (h - y) \cdot (f_{ftd,R3}) + A_{st,y} \cdot f_{yd}$$

Neutraaliakselin sijainti luettuna poikkileikkauksen yläpinnasta

$$x := \text{Find}(y) = 420.7 \cdot \text{mm}$$

$$F_{cc} := -b \cdot \int_0^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\epsilon_{ftu} \cdot r}{h - x} \right) dr = 1267.68 \cdot \text{kN}$$

Puristusresultantin suuruus

$$F_{st} := A_{st,y} \cdot f_{yd} = 437 \cdot \text{kN}$$

$$F_f := b \cdot (h - x) \cdot (f_{ftd,R3}) = 830.7 \cdot \text{kN}$$

$$F_f + F_{st} = 1267.7 \cdot \text{kN}$$

$$F_{cc} = 1267.7 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehdon tarkastus, oltava 0 kN

$$F_x := F_f + F_{st} - F_{cc} = 0 \cdot \text{kN}$$



$$-b \cdot \int_0^k \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (k-r) \, dr = -b \cdot \int_k^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (r-k) \, dr$$

$$x_r := \text{Find}(k) = 280.4 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \frac{x - x_r}{x} = 0.3$$

Tankoraidoitun kuitubetonirakenteen taivutuskapasiteetti kentässä y-suuntaan

$$M_{Rd} := F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_f \cdot \frac{h-x}{2} + F_{st} \cdot (d_y - x) = 801224.3 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Kentässä vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti y-suuntaan

$$M_{Ed} := 770 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{Käyttöaste (\%)} = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 96.1 \% \quad \text{OK}$$

Minimiraudoitus x-suuntaan sitkeän käyttäytymisen varmistamiseksi taivutuksessa

BY 66 kohta 9.3.1.1 & SFS-EN 1992-1-1 kohta 9.3.1.1

$$h_{ct} := \frac{h}{2} = 500 \cdot \text{mm}$$

Poikkileikkauksen vedetyn osan korkeus taivutuksessa

$$A_{ct} := b \cdot h_{ct} = 5 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

Poikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala taivutuksessa

$$N_{Ed} := 0 \text{ kN}$$

Poikkileikkaukseen vaikuttava ulkoinen normaalivoima

$$\sigma_c := \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = 0 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} = 3.21 \cdot \text{MPa}$$

$$k_1 = 1.5$$

Kun N_{Ed} on puristava voima

$$k_1 = 2h^*/3h$$

Kun N_{Ed} on vetävä voima

$$k_1 := 1.5$$

Jännitysten uudelleen jakautumiseen huomioiva kerroin normaalivoiman vaikutuksesta

$$h_- := h = 1000 \cdot \text{mm}$$

$h^* = 1 \text{ m}$, kun $h \leq 1,0 \text{ m}$ ($h^* = h_-$)

$$k_c := \min \left[0.4 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \cdot \frac{h \cdot f_{ct,eff}}{h_-}} \right), 1 \right] = 0.124$$

Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon sisäisen momenttivarren muutos sekä jännitysten uudelleen jakautuminen poikkileikkauksessa välittömästi ennen halkeilua. (SFS-EN 1992-1-1 kohta 7.3.2)

$$k_c \cdot f_{ctm} - \eta_f \eta_{det} \cdot f_{ft.R3} = -1.75 \cdot \text{MPa} < 0$$

Jos edellä mainittu ehto < 0 , niin pelkkien kuitujen käyttö on mahdollista.

HUOM.

Laskennassa on käytetty taivutusraudoitusta taivutuskapasiteetin saavuttamiseksi, joka varmistaa rakenteen sitkeän käyttäytymisen.

$$A_{sy.min} := \max \left[A_{ct} \left(\frac{k_c \cdot f_{ctm} - \eta_f \eta_{det} \cdot f_{ft.R3}}{f_{yk}} \right), 0 \text{mm}^2 \right] = 0 \cdot \text{mm}^2$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa tuella x-suuntaan

$$M_{ed} := 510 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Tuella vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti

$$A_s := 452 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Taivutusrajoitus T12 k250

$$\varepsilon_c := -1.75\text{‰}$$

Puristuma SFS-EN 1992-1-1 taulukon 3.1 mukaan

Oletetun kuidun ominaisuudet

$$\varepsilon_{ct} := \frac{f_{ctd}}{E_{cm}} = 0.0000439 \quad (0.04\text{‰})$$

$$\varepsilon_{ftu} := \varepsilon_{ct} + \frac{w_u \cdot 1000}{l_{cs}} = 3.125\text{‰}$$

$$A_{st} := A_s \cdot b = 452 \cdot \text{mm}^2$$

Neutraaliakselin sijainnin määrittäminen

$$-b \cdot \int_0^y \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-y} \right) dr = b \cdot (h-y) \cdot (f_{ftd.R3}) + A_{st} \cdot f_{yd}$$

$$x := \text{Find}(y) = 367 \cdot \text{mm}$$

$$F_{cc} := -b \cdot \int_0^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) dr = 1.1 \times 10^3 \cdot \text{kN} \quad \text{Puristusvyöhykkeen puristusresultantti}$$

$$F_f := b \cdot (h-x) \cdot (f_{ftd.R3}) = 907.6 \cdot \text{kN}$$

Vetoresultantti, kuitujen vaikutus

$$F_{st} := A_{st} \cdot f_{yd} = 196.5 \cdot \text{kN}$$

Vetoresultantti, tankorajituksen vaikutus

$$F_x := F_f + F_{st} - F_{cc} = -0 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehdon tarkastus

Paikannetaan puristusresultantin etäisyys neutraaliakselista

$$-b \cdot \int_0^k \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (k-r) dr = -b \cdot \int_k^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (r-k) dr$$

$$x_r := \text{Find}(k) = 244.7 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \frac{x - x_T}{x} = 0.333$$

$$M_{Rd} := F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_f \left(\frac{h - x}{2} \right) + F_{st} \cdot (d_x - x) = 664122.2 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{Käyttöaste (\%)} = \frac{M_{ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 76 \% \quad \text{OK}$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa tuella y-suuntaan

$$M_{ed} := 520 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tuella vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti

$$A_s := 452 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Taivutusrauoitus tuella T12 k250

$$\varepsilon_c := -1.75\text{‰}$$

Puristuma SFS-EN 1992-1-1
taulukon 3.1 mukaan

Oletetun kuidun ominaisuudet



$$\varepsilon_{ct} := \frac{f_{ctd}}{E_{cm}} = 0.0000439 = 0.044\text{‰}$$

$$\varepsilon_{ftu} := \varepsilon_{ct} + \frac{w_u \cdot 1000}{l_{cs}} = 3.125\text{‰}$$

$$A_{st} := A_s \cdot b = 452 \cdot \text{mm}^2$$

Neutraaliakselin sijainti paikannettuna poikkileikkauksen yläpinnasta



$$-b \cdot \int_0^y \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h - y} \right) dr = b \cdot (h - y) \cdot (f_{ftd.R3}) + A_{st} \cdot f_{yd}$$

$$x := \text{Find}(y) = 367 \cdot \text{mm}$$

$$F_{cc} := -b \cdot \int_0^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h - x} \right) dr = 1.1 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Puristusvyöhykkeen puristusresultantti

$$F_f := b \cdot (h - x) \cdot (f_{td,R3}) = 907.6 \cdot \text{kN}$$

Vetoresultantti, kuitujen vaikutus

9 (12)

$$F_{st} := A_{st} \cdot f_{yd} = 196.5 \cdot \text{kN}$$

Vetoresultantti, tankoraudituksen vaikutus

$$F_x := F_f + F_{st} - F_{cc} = -0 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehdon tarkastus

Paikannetaan puristusresultantin etäisyys neutraaliakselista



$$-b \cdot \int_0^k \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h - x} \right) \cdot (k - r) \, dr = -b \cdot \int_k^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h - x} \right) \cdot (r - k) \, dr$$

$$x_r := \text{Find}(k) = 244.7 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \frac{x - x_r}{x} = 0.333$$

$$M_{Rd} := F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_f \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + F_{st} \cdot (d_y - x) = 660191.8 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{Käyttöaste (\%)} = \frac{M_{ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 78.8 \% \quad \text{OK}$$

Lävistys

10 (12)

Lähtötiedot

Paalujen poikkileikkaukset

Pystypaalut TB350x350, C45/55
Vinopaalut: RR270x12,5 S440J2H,
betonitäyttö C30/37.

$$c_1 := 350\text{mm} \quad c_2 := c_1$$

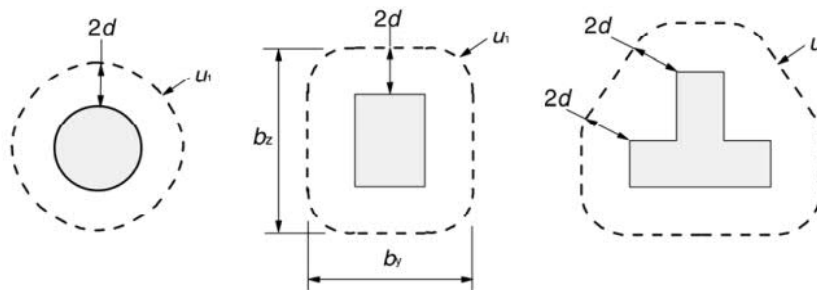
$$D := \sqrt{c_1 \cdot c_2} = 350\text{-mm}$$

Laatan poikkileikkaus, mitoitetaan 1 metrin kaistana

$$b := 1000\text{mm}$$

$$h := 1000\text{mm}$$

$$d_{\text{eff}} := \frac{d_x + d_y}{2} = 900\text{-mm}$$



Lävistyskestävyys takastellaan tuen reunan ja perustarkastuspiirin u_1 kohdalla.

$$u_0 := 4 \cdot 350\text{mm} = 1400\text{-mm}$$

$$u_1 := 4 \cdot 350\text{mm} + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d_{\text{eff}} = 12.7\text{-m}$$

$$\beta := 1.15$$

Kerros sisäpaalulle

Kuormitukset

$$V_{\text{Ed}} := 1241\text{kN}$$

Suurin tukireaktio pystypaalulle FEM-mallista

$$v_{\text{Ed},0} := \beta \cdot \frac{V_{\text{Ed}}}{u_0 \cdot d_{\text{eff}}} = 1.133 \cdot \text{MPa}$$

$$v_{\text{Ed},1} := \beta \cdot \frac{V_{\text{Ed}}}{u_1 \cdot d_{\text{eff}}} = 0.125 \cdot \text{MPa}$$

$$b_{\text{As}} := 3 \cdot d_{\text{eff}} + 350\text{mm} + 3 \cdot d_{\text{eff}} = 5.75\text{ m}$$

Alue, jolta teräsmäärä huomioidaan

$$A_{\text{sx}} := 452\text{mm}^2$$

Taivutusraudoitus poikkileikkauksen yläpinnassa

$$A_{\text{sy}} := 452\text{mm}^2$$

Taivutusraudoitus poikkileikkauksen yläpinnassa

$$\rho_1 := \min \left(\sqrt{\frac{A_{\text{sx}}}{b \cdot d_x} \cdot \frac{A_{\text{sy}}}{b \cdot d_y}}, 2\% \right) = 0.0005$$

$$k := \min\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d_{\text{eff}} \cdot \frac{1}{\text{mm}}}}, 2\right) = 1.47$$

$$\sigma_{\text{cp}} := 0 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{ctk}} := f_{\text{ctk}} \cdot 0.05$$

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{\text{ck}}}{250}\right) = 0.52$$

$$v_{\text{Rd,max}} := 0.4 \cdot \nu \cdot f_{\text{cd}} \cdot \text{MPa} = 4.1 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{v_{\text{Ed},0}}{v_{\text{Rd,max}}} \leq 1 \quad \frac{v_{\text{Ed},0}}{v_{\text{Rd,max}}} = 0.2 \text{ OK} \quad \text{Tarkistetaan, ettei pilarin sivuilla oleva jännitys ylitä suurinta lävistyskestävyyttä}$$

$$C_{1,\text{Rd},c} := \frac{0.3}{\gamma_c} \cdot \frac{\left(\frac{D}{d_s} + 1.5\right)}{\left(\frac{D}{d_s} + 4\right)} = 0.085 \quad \text{Leikkausraudoittamattomille rakenneosille laskettava kerroin RakMk 2019}$$



Leikkausraudoittamattoman kuitubetonirakenteen lävistyskestävyys

$$v_{\text{Rd},cf} := \left[C_{1,\text{Rd},c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{\text{ft},\text{R}3}}{f_{\text{ctk}}} \right) \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\text{MPa}} \right]^{\frac{1}{3}} \right] \cdot \text{MPa} = 0.252 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{v_{\text{Ed},1}}{v_{\text{Rd},cf}} \leq 1 \quad \frac{v_{\text{Ed},1}}{v_{\text{Rd},cf}} = 0.49 \quad \text{Ok, kestää ilman leikkausraudoitusta}$$

Lävistyskestävyyden arvo voimasuureena lävistysraudoittamana

$$V_{\text{lävistys}} := v_{\text{Rd},cf} \cdot A_{\text{lävistys}} = 2543 \cdot \text{kN}$$

Leikkaus

12 (12)

Lähtötiedot

$$h := 1000\text{mm}$$

$$b_w := 1000\text{mm}$$

Laatan poikkileikkaus, mitoitetaan 1 metrin kaistana

$$A_{sI} := 1005\text{mm}^2$$

Kentässä oleva vetoraudotus x- ja y-suuntiin T16 k200

$$\rho := \frac{A_{sI}}{b_w \cdot d_{\text{eff}}} = 0.0011$$

Leikkausraudoittamattoman kuitubetonirakenteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo

$$V_{Rd,cf} := \left[\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{ft,R3}}{f_{ctk}} \right) \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right]^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_w \cdot d_{\text{eff}} \cdot \text{MPa} = 416 \cdot \text{kN}$$

Case 3. Kuitubetonisen paksulaatan mitoitus tankoraidoitettuna BY 66 mukaan

1 (12)

Lähtötiedot**Rakenteen mitat ja materiaaliominaisuudet**Rakenteen paksuus: $h := 1000\text{mm}$ Rakenteen leveys: $b := 1000\text{mm}$

Mitoitetaan 1 metrin kaistana

Paalujen upotussyvyys: 50mm

Terästen halkaisija a_p : $\phi_{ap} := 20\text{mm}$ Betonipeite: $c_{nom} := 30\text{mm}$ Tehollinen korkeus x-suuntaan: $d_x := h - 50\text{mm} - c_{nom} - \frac{\phi_{ap}}{2} = 910\text{mm}$ Tehollinen korkeus y-suuntaan: $d_y := h - 50\text{mm} - c_{nom} - \phi_{ap} - \frac{\phi_{ap}}{2} = 890\text{mm}$ $\gamma_c := 1.5$ $\eta_f := 1$

Kuitujen suunnan huomioiva kerroin

 $\gamma_f := 1.5$ $\eta_{det} := 2$

Muuntokerroin vain luokissa c-e

 $\gamma_s := 1.15$ $n := 2$ $\alpha_{ct} := 1$ $\alpha_{cf} := 0.85$ $f_{yk} := 500\text{MPa}$ $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.8\text{MPa}$ $f_{ck} := 35\text{MPa}$ $f_{cd} := \alpha_{cf} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.8\text{MPa}$

Materiaaliominaisuudet



Suunnittelijan määrittelemä kuitubetonille:

C35/45-R₁5,0/R₃5,5-d

Sitkeysluokka d - myötölujittuva

 $R_1 := 5\text{MPa}$

Kuitubetonin jäännöstäivutusvetolujuus luokassa R1

 $R_3 := 5.5\text{MPa}$

Kuitubetonin jäännöstäivutusvetolujuus luokassa R3

 $C_{i,f} := 100 \cdot \frac{R_1}{f_{ctk,0.05}} = 222.4\% > 75\%$

Kuitubetonin jäännöslujuuskerroin

 $f_{ft,R1} := 0.45 \cdot R_1 = 2.25\text{MPa}$

Suorien jäännösvetolujuuksien karakteristiset arvot suorituskykyluokissa R1 ja R3

 $f_{ft,R3} := 0.37 \cdot R_3 = 2.035\text{MPa}$ $f_{ftd,R1} := \eta_f \eta_{det} \cdot \frac{f_{ft,R1}}{\gamma_f} = 3\text{MPa}$

Suorien jäännösvetolujuuksien suunnitteluvarot suorituskykyluokissa R1 ja R3

$$f_{\text{ftd.R3}} := \eta_f \eta_{\text{det}} \cdot \frac{f_{\text{ft.R3}}}{\gamma_f} = 2.713 \cdot \text{MPa}$$

2 (12)

$$l_s := h = 1000 \cdot \text{mm}$$

$$\epsilon_c := 0.175\%$$

Puristuma, SFS-EN 1992-1-1 Taulukko 3.1

$$\epsilon_{\text{ct}} := \frac{f_{\text{ctd}}}{E_{\text{cm}}} = 0.000044 \quad (0.04\%)$$

Halkeamisvenymä

$$w_u := 2.5 \text{mm}$$

Halkeaman avautuma

$$\epsilon_{\text{ftu}} := \epsilon_{\text{ct}} + \frac{w_u \cdot 1000}{l_s} = 2.5\%$$

Kuitubetonin murtovenymä

$$\epsilon_{\text{c2}} := 2\%$$

$$\epsilon_{\text{cu2}} := 3.5\%$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa kentässä x-suuntaan

$$\sigma_c := \begin{cases} f_{\text{cd}} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{\text{c2}}} \right)^n \right] & \text{if } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{\text{c2}} \\ f_{\text{cd}} & \text{if } \epsilon_{\text{c2}} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{\text{cu2}} \end{cases}$$

$$\sigma_c = 3.32 \text{MPa}$$

Etsitään neutraaliakselin etäisyys poikkileikkauksen yläpinnasta vaakatasapainoehdon perusteella, jossa $\epsilon_c \leq \epsilon_{\text{cu3}}$



$$A_{\text{sx}} := 565 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad A_{\text{st.x}} := A_{\text{sx}} \cdot m = 565 \cdot \text{mm}^2$$

Taivutusraudoitus kentässä T12 k200

$$-b \cdot \int_0^y \sigma_c \cdot \left(\frac{-\epsilon_{\text{ftu}} \cdot r}{h - y} \right) dr = b \cdot (h - y) \cdot (f_{\text{ftd.R3}}) + A_{\text{st.x}} \cdot f_{\text{yd}}$$

Neutraaliakselin sijainti luettuna poikkileikkauksen yläpinnasta

$$x := \text{Find}(y) = 466.5 \cdot \text{mm}$$

$$F_{\text{cc}} := -b \cdot \int_0^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\epsilon_{\text{ftu}} \cdot r}{h - x} \right) dr = 1693.1 \cdot \text{kN}$$

Puristusresultantin suuruus

$$F_{\text{st}} := A_{\text{st.x}} \cdot f_{\text{yd}} = 245.7 \cdot \text{kN}$$

$$F_f := b \cdot (h - x) \cdot (f_{\text{ftd.R3}}) = 1447.5 \cdot \text{kN}$$

$$F_f + F_{\text{st}} = 1693.1 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{cc}} = 1693.1 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehdon tarkastus, oltava 0 kN

3 (12)

$$F_x := F_f + F_{st} - F_{cc} = 0 \cdot \text{kN} \quad \text{OK}$$

Puristusresultantin etäisyys neutraaliakselista



$$-b \cdot \int_0^k \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (k-r) \, dr = -b \cdot \int_k^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (r-k) \, dr$$

$$x_T := \text{Find}(k) = 311 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \frac{x - x_T}{x} = 0.3$$

Tankorauoitettun kuitubetonirakenteen taivutuskapasiteetti x-suuntaan

$$M_{Rd} := F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_f \cdot \frac{h-x}{2} + F_{st} \cdot (d_x - x) = 1021637.68 \, \text{N} \cdot \text{m}$$

Kentässä vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti x-suuntaan

$$M_{Ed} := 747 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Käyttöaste (\%)} = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 73.1 \% \quad \text{OK}$$

Minimiraudoitus x-suuntaan sitkeän käyttäytymisen varmistamiseksi taivutuksessa

BY 66 kohta 9.3.1.1 & SFS-EN 1992-1-1 kohta 9.3.1.1

$$h_{ct} := \frac{h}{2} = 500 \cdot \text{mm}$$

Poikkileikkauksen vedetyn osan korkeus taivutuksessa

$$A_{ct} := b \cdot h_{ct} = 5 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

Poikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala taivutuksessa

$$N_{Ed} := 0 \, \text{kN}$$

Poikkileikkaukseen vaikuttava ulkoinen normaalivoima

$$\sigma_c := \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = 0 \, \text{MPa}$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} = 3.21 \, \text{MPa}$$

$$k_1 = 1.5$$

Kun N_{Ed} on puristava voima

$$k_1 = 2h^*/3h$$

Kun N_{Ed} on vetävä voima

$$k_1 := 1.5$$

Jännitysten uudelleen jakutumiseen huomioiva kerroin normaalivoiman vaikutuksesta

$$h_- := h = 1000 \cdot \text{mm}$$

$h^* = 1 \, \text{m}$, kun $h \leq 1,0 \, \text{m}$ ($h^* = h_-$)

$$k_c := \min \left[0.4 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \cdot \frac{h \cdot f_{ct,eff}}{h}} \right), 1 \right] = 0.124$$

Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon sisäisen momenttivarren muutos sekä jännitysten uudelleen jakautuminen poikkileikkauksessa välittömästi ennen halkeilua.
(SFS-EN 1992-1-1 kohta 7.3.2)

$$k_c \cdot f_{ctm} - \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot f_{ft,R3} = -3.67 \cdot \text{MPa} < 0$$

Jos edellä mainittu ehto < 0 , niin pelkkien kuitujen käyttö on mahdollista.

HUOM.

Laskennassa on käytetty taivutusraudoitusta taivutuskapasiteetin saavuttamiseksi, joka varmistaa rakenteen sitkeän käyttäytymisen.

$$A_{sx,min} := \max \left[A_{ct} \cdot \left(\frac{k_c \cdot f_{ctm} - \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot f_{ft,R3}}{f_{yk}} \right), 0 \text{ mm}^2 \right] = 0 \cdot \text{mm}^2$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa kentässä y-suuntaan

Etsitään neutraaliakselin etäisyys poikkileikkauksen yläpinnasta vaakatasapainoehdon perusteella, jossa $\epsilon_c \leq \epsilon_{cu3}$



$$A_{sy} := 565 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad A_{st,y} := A_{sy} \cdot m = 565 \cdot \text{mm}^2$$

Taivutusraudoitus kentässä T12 k200

$$-b \cdot \int_0^y \sigma_c \cdot \left(\frac{-\epsilon_{ftu} \cdot r}{h - y} \right) dr = b \cdot (h - y) \cdot (f_{ftd,R3}) + A_{st,y} \cdot f_{yd}$$

Neutraaliakselin sijainti luettuna poikkileikkauksen yläpinnasta

$$x := \text{Find}(y) = 466.5 \cdot \text{mm}$$

$$F_{cc} := -b \cdot \int_0^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\epsilon_{ftu} \cdot r}{h - x} \right) dr = 1693.14 \cdot \text{kN}$$

Puristusresultantin suuruus

$$F_{st} := A_{st,y} \cdot f_{yd} = 245.7 \cdot \text{kN}$$

$$F_f := b \cdot (h - x) \cdot (f_{ftd,R3}) = 1447.5 \cdot \text{kN}$$

$$F_f + F_{st} = 1693.1 \cdot \text{kN}$$

$$F_{cc} = 1693.1 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehdon tarkastus, oltava 0 kN

$$F_x := F_f + F_{st} - F_{cc} = 0 \cdot \text{kN}$$

Puristusresultantin etäisyys neutraaliakselista

$$-b \cdot \int_0^k \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (k-r) \, dr = -b \cdot \int_k^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (r-k) \, dr$$

$$x_r := \text{Find}(k) = 311 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \frac{x - x_r}{x} = 0.3$$

Tankorauhoitetun kuitubetonirakenteen taivutuskapasiteetti kentässä y suuntaan

$$M_{Rd} := F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_f \cdot \frac{h-x}{2} + F_{st} \cdot (d_y - x) = 1016724.6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Kentässä vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti y-suuntaan

$$M_{Ed} := 770 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{Käyttöaste (\%)} = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 75.7\% \quad \text{OK}$$

Minimirauhoitus x-suuntaan sitkeän käyttäytymisen varmistamiseksi taivutuksessa

BY 66 kohta 9.3.1.1 & SFS-EN 1992-1-1 kohta 9.3.1.1

$$h_{ct} := \frac{h}{2} = 500 \cdot \text{mm}$$

Poikkileikkauksen vedetyn osan korkeus taivutuksessa

$$A_{ct} := b \cdot h_{ct} = 5 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

Poikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala taivutuksessa

$$N_{Fd} := 0 \text{ kN}$$

Poikkileikkaukseen vaikuttava ulkoinen normaalivoima

$$\sigma_c := \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = 0 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} = 3.21 \cdot \text{MPa}$$

$$k_1 = 1,5$$

Kun N_{Ed} on puristava voima

$$k_1 = 2h^*/3h$$

Kun N_{Ed} on vetävä voima

$$k_1 := 1.5$$

Jännitysten uudelleen jakautumiseen huomioiva kerroin normaalivoiman vaikutuksesta

$$h_- := h = 1000 \cdot \text{mm}$$

$h^*=1 \text{ m}$, kun $h \leq 1,0 \text{ m}$ ($h^*=h_-$)

$$k_c := \min \left[0.4 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \cdot \frac{h \cdot f_{ct,eff}}{h_-}} \right), 1 \right] = 0.124$$

Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon sisäisen momenttivarren muutos sekä jännitysten uudelleen jakautuminen poikkileikkauksessa välittömästi ennen halkeilua. (SFS-EN 1992-1-1 kohta 7.3.2)

$$k_c \cdot f_{ctm} - \eta_f \eta_{det} \cdot f_{ft.R3} = -3.67 \cdot \text{MPa} < 0$$

Jos edellä mainittu ehto < 0 , niin pelkkien kuitujen käyttö on mahdollista.

HUOM.

Laskennassa on käytetty taivutusraudoitusta taivutuskapasiteetin saavuttamiseksi, joka varmistaa rakenteen sitkeän käyttäytymisen.

$$A_{sy.min} := \max \left[A_{ct} \cdot \left(\frac{k_c \cdot f_{ctm} - \eta_f \eta_{det} \cdot f_{ft.R3}}{f_{yk}} \right), 0 \text{mm}^2 \right] = 0 \cdot \text{mm}^2$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa tuella x-suuntaan

$$M_{ed} := 510 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Tuella vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti

$$A_s := 335 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Taivutusrajoitus T8 k150

$$\varepsilon_c := -1.75\text{‰}$$

Puristuma SFS-EN 1992-1-1
taulukon 3.1 mukaan**Oletetun kuidun ominaisuudet**

$$\varepsilon_{ct} := \frac{f_{ctd}}{E_{cm}} = 0.0000439 \quad (0.04\text{‰})$$

$$\varepsilon_{ftu} := \varepsilon_{ct} + \frac{w_u \cdot 1000}{l_{cs}} = 3.125\text{‰}$$

$$A_{st} := A_s \cdot b = 335 \cdot \text{mm}^2$$

Neutraaliakselin sijainnin määrittäminen

$$-b \cdot \int_0^y \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-y} \right) dr = b \cdot (h-y) \cdot (f_{ftd.R3}) + A_{st} \cdot f_{yd}$$

$$x := \text{Find}(y) = 430.7 \cdot \text{mm}$$

$$F_{cc} := -b \cdot \int_0^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) dr = 1.69 \times 10^3 \cdot \text{kN} \quad \text{Puristusvyöhykkeen puristusresultantti}$$

$$F_f := b \cdot (h-x) \cdot (f_{ftd.R3}) = 1544.7 \cdot \text{kN}$$

Vetoresultantti, kuitujen vaikutus

$$F_{st} := A_{st} \cdot f_{yd} = 145.7 \cdot \text{kN}$$

Vetoresultantti, tankorajituksen vaikutus

$$F_x := F_f + F_{st} - F_{cc} = 0 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehdon tarkastus

Paikannetaan puristusresultantin etäisyys neutraaliakselista

$$-b \cdot \int_0^k \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (k-r) dr = -b \cdot \int_k^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h-x} \right) \cdot (r-k) dr$$

$$x_r := \text{Find}(k) = 287.1 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \frac{x - x_T}{x} = 0.333$$

$$M_{Rd} := F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_f \left(\frac{h - x}{2} \right) + F_{st} \cdot (d_x - x) = 994865 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{Käyttöaste (\%)} = \frac{M_{ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 51 \% \quad \text{OK}$$

Taivutusmitoitus murtorajatilassa tuella y-suuntaan

$$M_{ed} := 520 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tuella vaikuttava keskimääräinen taivutusmomentti

$$A_s := 335 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Taivutusraoitus tuella T8 k150

$$\varepsilon_c := -1.75\text{‰}$$

Puristuma SFS-EN 1992-1-1
taulukon 3.1 mukaan

Oletetun kuidun ominaisuudet



$$\varepsilon_{ct} := \frac{f_{ctd}}{E_{cm}} = 0.0000439 = 0.044\text{‰}$$

$$\varepsilon_{ftu} := \varepsilon_{ct} + \frac{w_u \cdot 1000}{l_{cs}} = 3.125\text{‰}$$

$$A_{st} := A_s \cdot b = 335 \cdot \text{mm}^2$$

Neutraaliakselin sijainti paikannettuna poikkileikkauksen yläpinnasta



$$-b \cdot \int_0^y \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h - y} \right) dr = b \cdot (h - y) \cdot (f_{ftd.R3}) + A_{st} \cdot f_{yd}$$

$$x := \text{Find}(y) = 430.7 \cdot \text{mm}$$

$$F_{cc} := -b \cdot \int_0^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h - x} \right) dr = 1690.3 \cdot \text{kN}$$

Puristusvyöhykkeen puristusresultantti

$$F_f := b \cdot (h - x) \cdot (f_{td,R3}) = 1544.7 \cdot \text{kN}$$

Vetoresultantti, kuitujen vaikutus

$$F_{st} := A_{st} \cdot f_{yd} = 145.7 \cdot \text{kN}$$

Vetoresultantti, tankorauoituksen vaikutus

$$F_x := F_f + F_{st} - F_{cc} = 0 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehdon tarkastus

Paikannetaan puristusresultantin etäisyys neutraaliakselista



$$-b \cdot \int_0^k \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h - x} \right) \cdot (k - r) \, dr = -b \cdot \int_k^x \sigma_c \cdot \left(\frac{-\varepsilon_{ftu} \cdot r}{h - x} \right) \cdot (r - k) \, dr$$

$$x_r := \text{Find}(k) = 287.1 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha := \frac{x - x_r}{x} = 0.333$$

$$M_{Rd} := F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_f \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + F_{st} \cdot (d_y - x) = 991952 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{Käyttöaste (\%)} = \frac{M_{ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 52.4 \% \quad \text{OK}$$

Lähtötiedot

Paalujen poikkileikkaukset

Pystypaalut TB350x350, C45/55
 Vinopaalut: RR270x12,5 S440J2H,
 betonitäyttö C30/37.

$$c_1 := 350\text{mm} \quad c_2 := c_1$$

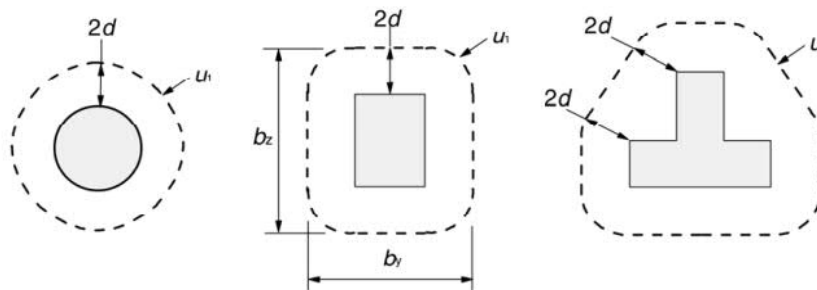
$$D := \sqrt{c_1 \cdot c_2} = 350\text{-mm}$$

Laatan poikkileikkaus, mitoitetaan 1 metrin kaistana

$$b := 1000\text{mm}$$

$$h := 1000\text{mm}$$

$$d_{\text{eff}} := \frac{d_x + d_y}{2} = 900\text{-mm}$$



Lävistyskestävyys takastellaan tuen reunan ja perustarkastuspiirin u_1 kohdalla.

$$u_0 := 4 \cdot 350\text{mm} = 1400\text{-mm}$$

$$u_1 := 4 \cdot 350\text{mm} + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d_{\text{eff}} = 12.7\text{-m}$$

$$\beta := 1.15$$

Kerros sisäpaalulle

Kuormitukset

$$V_{\text{Ed}} := 1241\text{kN}$$

Suurin tukireaktio pystypaalulle FEM-mallista

$$v_{\text{Ed},0} := \beta \cdot \frac{V_{\text{Ed}}}{u_0 \cdot d_{\text{eff}}} = 1.133\text{-MPa}$$

$$v_{\text{Ed},1} := \beta \cdot \frac{V_{\text{Ed}}}{u_1 \cdot d_{\text{eff}}} = 0.125\text{-MPa}$$

$$b_{\text{As}} := 3 \cdot d_{\text{eff}} + 350\text{mm} + 3 \cdot d_{\text{eff}} = 5.75\text{ m}$$

Alue, jolta teräsmäärä huomioidaan

$$A_{\text{sX}} := 335\text{mm}^2$$

Taivutusraudoitus poikkileikkauksen yläpinnassa

$$A_{\text{sY}} := 335\text{mm}^2$$

Taivutusraudoitus poikkileikkauksen yläpinnassa

$$\rho_1 := \min \left(\sqrt{\frac{A_{\text{sX}}}{b \cdot d_x} \cdot \frac{A_{\text{sY}}}{b \cdot d_y}}, 2\% \right) = 0.0004$$

$$k := \min\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d_{\text{eff}} \cdot \frac{1}{\text{mm}}}}, 2\right) = 1.47$$

$$\sigma_{\text{cp}} := 0 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{ctk}} := f_{\text{ctk}} \cdot 0.05$$

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{\text{ck}}}{250}\right) = 0.52$$

$$V_{\text{Rd,max}} := 0.4 \cdot \nu \cdot f_{\text{cd}} \cdot \text{MPa} = 4.1 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{V_{\text{Ed,0}}}{V_{\text{Rd,max}}} \leq 1 \quad \frac{V_{\text{Ed,0}}}{V_{\text{Rd,max}}} = 0.2 \text{ OK} \quad \text{Tarkistetaan, ettei pilarin sivuilla oleva jännitys ylitä suurinta lävistyskestävyyttä}$$

$$C_{1,\text{Rd,c}} := \frac{0.3 \cdot \left(\frac{D}{d_s} + 1.5\right)}{\gamma_c \cdot \left(\frac{D}{d_s} + 4\right)} = 0.085 \quad \text{Leikkausraudoittamattomille rakennesosille laskettava kerroin RakMk 2019}$$



Leikkausraudoittamattoman kuitubetonirakenteen lävistyskestävyys

$$V_{\text{Rd,cf}} := \left[C_{1,\text{Rd,c}} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{\text{ft,R3}}}{f_{\text{ctk}}} \right) \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\text{MPa}} \right]^{\frac{1}{3}} \right] \cdot \text{MPa} = 0.272 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{V_{\text{Ed,1}}}{V_{\text{Rd,cf}}} \leq 1 \quad \frac{V_{\text{Ed,1}}}{V_{\text{Rd,cf}}} = 0.46 \quad \text{Ok, kestää ilman leikkausraudoitusta}$$

$$V_{\text{lävistys}} := A_{\text{u1}} \cdot V_{\text{Rd,cf}} = 2750 \cdot \text{kN}$$

Leikkaus**Lähtötiedot**

$$h := 1000\text{mm}$$

$$b_w := 1000\text{mm}$$

Laatan poikkileikkaus, mitoitetaan 1 metrin kaistana

$$A_{sl} := 565\text{mm}^2$$

Kentässä oleva vetoraudotus x- ja y-suuntiin T12 k200

$$\rho := \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d_{eff}} = 0.0006$$

Leikkausraudoittamattoman kuitubetonirakenteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo

$$V_{Rd,cf} := \left[\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{ft,R3}}{f_{ctk}} \right) \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right]^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_w \cdot d_{eff} \cdot \text{MPa} = 409.6 \cdot \text{kN}$$