

Atte Heiskanen

Jälkijännitetyn pilarilaatan lävistysvahvikkeen suunnittelu eurokoodien mukaan

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriytyö

18.06.2018

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Atte Heiskanen Jälkijännitetyn pilarilaatan lävistysvahvikkeen suunnittelu eurokoodien mukaan 47 sivua + 4 liitettä 18.06.2018
Tutkinto	Insinööri (YAMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Timo Leppänen Projektipäällikkö Janne Hanka
<p>Opinnäytetyössä tutkittiin teräsbetonirakenteen lävistysmitoitusta Eurokoodi 2:n ja siihen liittyvän uusimman kansallisen liitteen mukaan. Lisäksi työssä tutkittiin myös joiltain osin muiden maiden suunnittelunormeja, kuten Amerikan ACI 318:a. Työssä keskityttiin tutkimaan tarkemmin jälkijännitetyn pilarilaatan tapausta ja työ rajattiin koskemaan keskipilarin tapausta. Lisäksi työssä selvitettiin, miten laatan lävistysvahvike vaikuttaa lävistysmitoitukseen. Opinnäytetyön oleellisena tavoitteena oli myös tutkia, mitä erityispiirteitä jälkijännitetty laatta tuo lävistysmitoitukseen ja muun muassa raudoitteiden sijoitteluun.</p> <p>Työssä tutkittiin lävistysmitoitusta esimerkkilaskelman avulla sekä vertailemalla tuloksia ennen käytössä olleen Suomen Rakentamismääräyskokoelman RakMk osan B4 mukaiseen lävistysmitoitukseen. Tämän lisäksi työssä hyödynnettiin aikaisempia kokemuksia lävistysmitoituksen suorittamisesta sekä näitä oppeja sovellettiin nykyisiin ohjeisiin ja määräyksiin. Eurokoodi 2:n mukaista lävistysmitoitusta tutkittiin myös jonkin verran muiden maiden normeihin vertaillen ja vertailussa hyödynnettiin mahdollisuuksien mukaan myös näitä ohjeita.</p> <p>Opinnäytetyön tekemisen edetessä huomattiin, että suunnittelunormit ovat monelta osin tulkinvaraisia lävistysmitoituksen suhteen. Ongelmana oli löytää oikeat ja normien mukaiset ratkaisut. Lopputuloksena työstä saatiin laskentaohjelma sekä ohjeistus, miten lävistysmitoitus ja raudoituksen suunnittelu tulee suorittaa. Valmis laskentapohja sekä selkeä ohjeistus tuottavat yritykselle arvoa, sillä suunnittelijoiden työ nopeutuu sekä tulokset ovat luotettavampia. Lisäksi suunnitteluratkaisut ovat parempia, koska hyvän ohjeistuksen avulla esimerkiksi betonin määrässä voidaan säästää tai raudoitusten asennustyötä voidaan helpottaa, mikä tarkoittaa pienempiä asennuskustannuksia.</p> <p>Opinnäytetyön merkitys oli huomattava, koska yleisesti tällä hetkellä ei ole hyviä ohjeita lävistysmitoituksen suorittamiseen. Tämä voi johtua siitä, että uudet ohjeet ovat olleet hyvin vähän aikaa käytössä ja suunnittelijat ovat tehneet lävistysmitoituksen vanhoilla ohjeilla. Tämän työn tarkoituksena oli tuoda hyvät ohjeet ja työkalut yrityksen suunnittelijoiden käyttöön. Tämä ei kuitenkaan poista suunnittelijoiden vastuuta perehtyä huolellisesti eurokoodiin sekä uusiin Rakentamismääräyskokoelman ohjeisiin.</p>	
Avainsanat	lävistysmitoitus, jälkijännitetty, pilarilaatta

Author(s) Title Number of Pages Date	Atte Heiskanen Punching Design in Post-Tensioned Column Supported Slab According to Eurocode. 47 pages + 4 appendices 18 June 2018
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Construction Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Timo Leppänen, Principal Lecturer Janne Hanka, Project Manager
<p>In this thesis concrete structures punching design according to Eurocode 2 and its Finnish national annex are introduced. The study also introduces, to some extent, other countries' design codes like Americas ACI 318. The thesis focuses more closely on a post-tensioned column supported slab case and is limited to include only the middle column case. In addition, the study discusses how slabs drop cap affects punching design.</p> <p>The punching design was studied by making example calculations and comparing the results with the former national design codes. In addition, former experiences from punching design were applied to the new instructions and regulations. The Eurocode punching design was also compared to other countries' design codes.</p> <p>The study indicated that design codes are partly open to interpretation as to punching design. The problem was to find out solutions which are right and in accordance with the design codes. As a result of the study a program was designed as well as instructions on how punching design and reinforcement design are supposed to be done. This is of value to the company because designers' work will become faster and the results will be more reliable. In addition, the design solutions are better because with good instructions saves can be achieved in the amount of concrete. Also installing reinforcement can be made more easily which means lower installing costs.</p> <p>The importance of the present study is remarkable because at the time in general there are no good instructions for making punching design. This might be due to the new national design codes being quite recent and designers have used the old instructions.</p>	
Keywords	punching design, post-tensioned, column supported slab

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	2
1.2	Tavoite	3
1.3	Rajaukset	5
2	Betonin leikkaus- ja lävistymisteoria	6
2.1	Klassinen ristikkoanalogia	6
2.2	Betonin lävistyminen	8
2.2.1	Nimellinen leikkausjännitys	10
2.2.2	Lävistyksen ristikkoanalogia	11
3	Betonirakenteen lävistysmitoitus	12
3.1	Lävistysmitoitus Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan	12
3.2	Lävistysmitoitus Eurokoodi 2:n ja Rakentamismääräyskokoelman ohjeen mukaan	15
3.3	Laskelmien yhteenveto ja vertailu	24
4	Betonirakenteen lävistysvahvikkeen suunnittelu	30
4.1	Laatan dimensioiden suunnittelu	30
4.1.1	Laatan paksuuden määrittäminen	30
4.1.2	Laatan vahvikkeen dimensioiden määrittäminen	31
4.2	Punosten ja raudoituksen suunnittelu	31
4.2.1	Raudoitusmäärän laskenta	34
4.2.2	Raudoitteiden sijoittelu	34
4.3	Lävistysvahvikkeen ja raudoituksen toteutus työmaalla	39
4.3.1	Muottityö	41
4.3.2	Raudoitus- ja betonointityö	42
5	Johtopäätökset	44
	Lähteet	47
	Liitteet	

Liite 1. Laskelmaesimerkkitapaukset

Liite 2. Laskelma Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan

Liite 3. Laskelma Eurokoodi 2:n ja Rakentamismääräyskokoelman ohjeen mukaan

Liite 4. Excel-laskentapohjan tuloste

Lyhenteet

α	Pääraudoituksen ja leikkausraudoituksen välinen kulma
A_{sv}	Leikkausraudoituksen poikkipinta-ala (RakMk B4)
A_{sw}	Leikkausraudoituksen poikkipinta-ala (EC2)
A_u	Lävistyspiirin poikkipinta-ala
β	Epäkeskisyyden huomioiva korjaustermi
c	Pyöreän pilarin halkaisija
c_1	Suorakaidepilarin toinen sivumitta
c_2	Suorakaidepilarin toinen sivumitta
$C_{Rd,c}$	Kansallinen korjaustermi
d	Poikkileikkauksen tehollinen korkeus (RakMk B4)
D	Pyöreän pilarin halkaisija ja suorakaidepilarin ekvivalentti halkaisija
d_{eff}	Poikkileikkauksen tehollinen korkeus (EC2)
e	Kuorman epäkeskisyyden sijainti
f_{ctd}	Betonin suunnitteluvetolujuus
f_{ck}	Betonisylinterin ominaispuristuslujuus
f_{yd}	Leikkausraudoituksen suunnittelumyötölujuus (RakMk B4)
f_{yk}	Raudoituksen ominaismyötölujuus
f_{ywd}	Leikkausraudoituksen suunnittelumyötölujuus
$f_{ywd,ef}$	Leikkausraudoituksen tehollinen suunnittelumyötölujuus
h	Laatan kokonaiskorkeus
h_H	Lävistysvahvikkeen korkeus laatan alapinnasta
k	Betonin tiheydestä tuleva kerroin (RakMk B4)
k	Korjauskerroin (EC2)
k_{max}	Maksimikestävyyden huomioiva korjauskerroin (EC2)
k_1	Ulkoisesta puristusjännityksestä tulevan lisäyksen huomioiva korjauskerroin
l_1	Lävistysvahvikkeen kokonaissivumitta
l_2	Lävistysvahvikkeen kokonaissivumitta
l_H	Lävistysvahvikkeen mitta pilarin reunasta
L_x	Laatan kokonaissivumitta
ρ	Poikkileikkauksen raudoitussuhde (RakMk B4)
ρ_l	Poikkileikkauksen raudoitussuhde (EC2)
P_x	Jännevoima kokonaishäviöiden jälkeen
r_{out}	Lyhimmän leikkausraudoittamattoman piirin etäisyys pilarin keskeltä
r_{cont}	Lävistyspiirin etäisyys pilarin keskeltä

$r_{cont,int}$	Ensimmäisen lävistyspiirin etäisyys pilarin keskeltä
$r_{cont,ext}$	Lisälävistyspiirin etäisyys pilarin keskeltä
σ_{cp}	Poikkileikkauksen keskeinen puristusjännitys
θ	Leikkaushalkeaman kulma
u	Lävistyspiirin pituus (RakMk B4)
u_0	Lyhin mahdollinen pilarin rajoittaman piirin pituus
u_1	Ensimmäisen tarkasteltavan lävistyspiirin pituus
u_{out}	Lyhimmän leikkausraudoittamattoman piirin pituus
v	Maksimilävistyslujuuden korjaustermi
V_c	Betonin lävistyskestävyys (RakMk B4)
V_{Ed}	Lävistävä voima
V_{min}	Vähimmäislävistyslujuus
$V_{Rd,c}$	Leikkausraudoittamattoman betonin lävistysjännityskestävyys
$V_{Rd,c}$	Leikkausraudoittamattoman betonin lävistyskestävyys
$V_{Rd,cs}$	Leikkausraudoitetun betonin lävistysjännityskestävyys
$V_{Rd,cs}$	Leikkausraudoitetun betonin lävistyskestävyys
$V_{Rd,max}$	Betonin maksimilävistysjännityskestävyys
V_s	Leikkausraudoitetun betonin lävistyskestävyys (RakMk B4)
z	Sisäinen momenttivarsi

1 Johdanto

Lävistysmitoitus pilarilaatoissa on merkittävä mitoittava tekijä suunniteltaessa esimerkiksi maanalaisten ja myöskin maanpäällisten pysäköintihallien pihakansia, joissa pinta-kuormat voivat olla suhteellisen suuria. Suomessa uuden Rakentamismääräyskokoelman ohjeiden myötä myös lävistysmitoitus voidaan nyt suorittaa Eurokoodi 2:n mukaan, kun se on ennen sitä tehty Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan B4 betoninormin mukaan. Joulukuussa 2016 julkaistiin Rakentamismääräyskokoelman uusi osa, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Betonirakenteet. Tämä julkaisu korvasi kaikki vanhat kansalliset liitteet, jotka täydensivät Eurokoodi 2:n ohjeita. Käytännössä siis kaikkien rakennuskohteiden, joiden rakennuslupa on tullut voimaan tuon jälkeen, on lävistysmitoitus suoritettava uusien ohjeiden mukaan.

Suomessa paikallavalettujen betonirakenteiden toteutuksen historia ulottuu noin 1900-luvun alkupuolelle. Paikallavalettuja jälkijännitetyjä rakenteita on tehty ensimmäisen kerran maailmalla 1930-luvulla, kun saksalainen Dischhinger ja ranskalainen Freyssinet julkaisivat jännitettyä betonia koskevat keksintönsä [1, s. 22]. Suomessa tartunnattomat jännebetonirakenteet yleistyivät 1980-luvulla.

Sweco Rakennetekniikka Oy ja sitä edeltävät yhtiöt ovat olleet suunnittelemassa useita onnistuneita kohteita Suomessa. Sweco Rakennetekniikka Oy on Suomen johtavia konsulttiyrityksiä rakennesuunnittelun alalla. Swecolla on laaja-alainen asiantuntemus usean eri materiaalien ja erilaisten rakennustyyppien osalta. Myös jälkijännitettyjen paikallavalurakenteiden osalta Sweco Rakennetekniikka Oy:ssä on pitkä kokemus.

Sweco pyrkii olemaan kehityksen kärkipäässä, ja kun rakentamismääräykset sekä ohjeistukset muuttuvat, tarvitaan uutta tietoa ja perehtymistä kirjallisuuteen ja normeihin. Tässä opinnäytetyössä tehdään tehokas työkalu yritystä varten ja tätä työtä helpottavaa työkalua rakennesuunnittelijat voivat käyttää ja soveltaa suunnitellessaan betonirakenteita. Lisäksi laaditaan ohjeistus, joiden avulla suunnitelmista voidaan tehdä laadukkaita sekä hyvin työmaalla toteutettavia.

1.1 Tausta

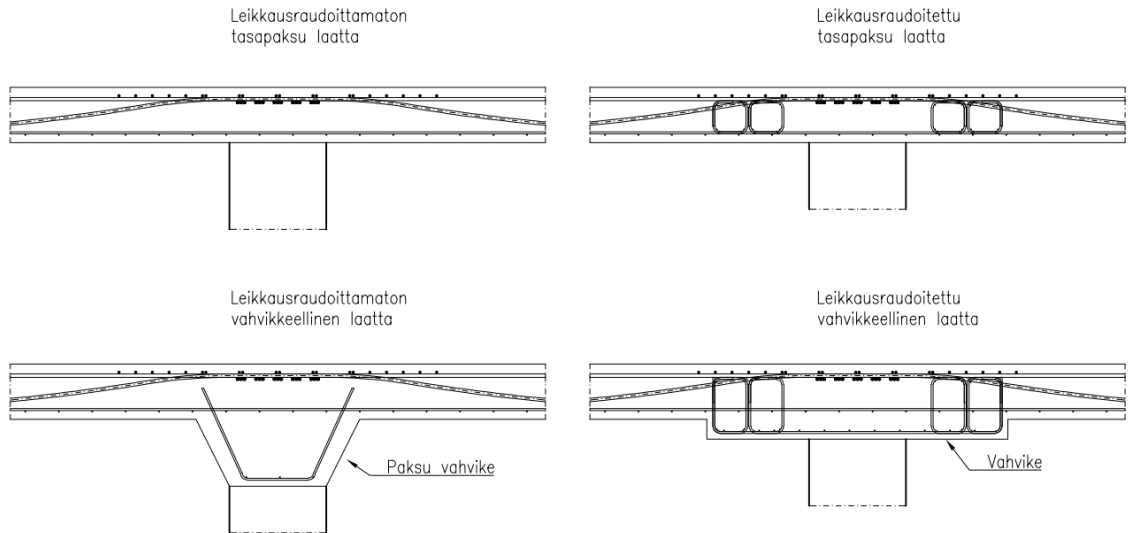
Betonirakenteinen pihakansi on usein taloudellisin tehdä paikallavalettuna ja jälkijännitettynä, jolloin jännevälit voivat olla pidempiä sekä vaakarakenteet voivat olla hoikempia. Näin ollen rakenteet vievät vähemmän tilaa ja alemmat pysäköintihallin kerrokset voivat olla matalampia verrattuna esimerkiksi betonielementeistä tehtyyn pysäköintihalliin. Lisäksi pysäköintihallissa voi olla vähemmän pilareita, mikä parantaa pysäköintihallin käytettävyyttä.

Pihakansilla voi olla suuremmat kuormat johtuen paksuista pintarakenteista ja suurista hyötykuormista. Esimerkiksi pelastustiekäytössä olevalla pihakannella hyötykuorma voi olla jopa 10 kN/m^2 sekä pysyvät kuormat $10 \dots 20 \text{ kN/m}^2$. Tämä johtaa siihen, että pilari-kuormat ovat suuria, koska kuormitusalat ja kuormat ovat tavanomaista suurempia. Tästä seuraa, että laattaa lävistävä voima on suurempi kuin tavallisesti pilarilaatoilla. Yleensä pilarikuormat pysäköintihallien pihakansien keskipilareilla ovat arviolta 2000 - 3000 kN:n suuruusluokkaa, jolloin lävistyskestävyyden vuoksi laatan paksuus tulisi olla vähintään noin 500 mm riippuen pilarin poikkipinta-alasta. Laatan taivutuskapasiteetin vuoksi laatan paksuudeksi voisi riittää 300 mm. Tässä tapauksessa yleensä taloudellisinta on lävistysvahvikkeen lisääminen pilarin kohdalle. Näin ollen betonin kuutiomäärä jää pienemmäksi verrattuna siihen, että tehtäisiin koko laatta lävistysmitoituksen vaatimalle laattapaksuudelle.

Laatan lävistysmitoitus on hyvä ottaa huomioon heti laatan alustavan mitoituksen yhteydessä. Pilareiden kohdalla laatan lävistysmitoitus on usein se, joka määrittää laatan paksuuden. Paras ja taloudellinen ratkaisu saadaan, kun laatan dimensioissa on otettu huomioon lävistysmitoitus heti alkuvaiheessa. Jälkeenpäin laatan paksuuden lisääminen voi olla vaikeaa, koska laatan alla menevä talotekniikka vaatii myös tietyn tilavaruuden.

Pilarilaatan lävistysmitoitus voidaan yleisesti toteuttaa seuraavin tavoin:

- Leikkausraudoittamaton tasapaksu laatta
- Leikkausraudoitettu tasapaksu laatta
- Leikkausraudoittamaton laatta vahvikkeella (mm. ”sienivahvike”)
- Leikkausraudoitettu laatta vahvikkeella.



Kuva 1. Jälkijännitetyn laatan lävistysmitoitus.

Kuvassa 1 on esitetty aiemmin luetellut erilaiset tavat, miten lävistysmitoitus voidaan suunnitella. Jälkijännitetyissä pilarilaatoissa on pihakansilla käytetty usein leikkausraudoitettua vahviketta, mutta esimerkiksi pysäköintihallien välipohjat eivät usein tarvitse vahviketta, koska välitasoilla pintakuormat ovat huomattavasti pienempiä. Tosin usein tarvitaan kuitenkin leikkausraudoitus.

Kokemukset eri projekteissa ovat osoittaneet, että lävistysmitoitus voi koitua ratkaisevaksi tekijäksi projektin mitoistusteknisiin haasteisiin liittyvissä asioissa. Tämä voi johtua siitä, että alustavassa luonnossuunnittelussa ei ole tehty lävistyskestävyyden tarkasteleja tarpeeksi tarkasti. On hyvin tärkeää, että alustavassa suunnittelussa tai esimerkiksi betonin, raudoituksen ja jännepunosten määräärioita laadittaessa betonin lävistymiseen liittyvät seikat on otettu huolellisesti huomioon.

1.2 Tavoite

Tavoitteena tässä työssä on tutkia betonin lävistysmitoituksen etenemisjärjestys sekä tehdä ohjeet laatan ja laatan lävistysvahvikkeen dimensioiden valintaan sekä raudoituksen järjestelyyn. Lisäksi tavoitteena on tehdä työkalu ja ohjeistus yritykselle, jotta lävistysmitoitus voidaan tehdä tehokkaasti, mutta myös luotettavasti.

Luotettava ja tehokas mitoitusprosessi tuo yritykselle lisäarvoa, koska tällä tavalla voidaan säästää käytetyssä suunnitteluajassa sekä hyvän ohjeistuksen avulla saadaan tuotettua laadukkaita suunnitelmia. Laadukkaiden suunnitelmien myötä myös työmaalla voidaan säästää esimerkiksi betonin ja raudoitteiden määrässä sekä raudoitteiden asenusajassa. Hyvät suunnitteluratkaisut säästävät myös työkustannuksissa, kun raudoitteet ja jännepunokset ovat paremmin yhteensovittavissa.

Hyvät ohjeet ja suunnittelutyökalut itsessään eivät kuitenkaan vielä riitä vaan suunnittelijoiden on myös tutustuttava suunnittelunormeihin ja omaksuttava ne. Tässä työssä esitellyt suunnitteluratkaisut edellyttävät, että suunnittelija on jo aikaisemmin tutustunut Eurokoodi 2:n ja Suomen Rakentamismääräyskokoelman uusiin kansallisiin ohjeisiin.



Kuva 2. Pilarin alueen raudoitusta. Valokuva: Atte Heiskanen

Tällä hetkellä yrityksellä on ollut käytössä vuodesta 2015 Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaisilla ohjeilla tehty laskentapohja. Kuvassa 2 on esitetty eräs kohde,

jossa lävistysmitoitus on suoritettu Rakentamismääräyskokoelman osan B4 ohjeiden mukaan. Tavoitteena on luoda uusi laskentapohja, joka ottaa monipuolisemmin huomioon laatan ja sen lisäksi mahdollisen vahvikkeen vaikutukset. Eurokoodi 2:ssa on esitetty ohjeistus, miten esimerkiksi laatan alapuolinen vahvike tulee ottaa huomioon mitoituksessa. Vaikka lävistysvahvikkeita on aikaisemmin myös käytetty useasti, ei erillistä ohjeistusta esimerkiksi dimensioiden valinnasta ole ollut.

Tässä opinnäytetyössä käytetään apuna ensisijaisesti Eurokoodi 2:a ja Suomen Rakentamismääräyskokoelman uusia ohjeita, mutta myös muiden maiden suunnittelunormeista tutkitaan, miten lävistysmitoitusta tulisi tehdä. Lisäksi apuna on muu kirjallisuus, kuten Suomen Betoniyhdistyksen ohjeet sekä opinnäytetyöt ja diplomityöt. Iso osa tiedosta tulee aikaisemmista kokemuksista, miten lävistysmitoitusta on suunniteltu. Esimerkiksi raudoitteiden sijoittelu suunnitelmissa on yksi sellainen asia, johon suunnittelunormeissa ei yleisesti kovin laajasti oteta kantaa.

1.3 Rajaukset

Tämä työ rajoitetaan koskemaan pääpiirteissään jälkijännitettyjä pilarilaattoja ja tässä käsitellään sen suunnitteluun kuuluvia ominaispiirteitä, kuten pilarin kohdan raudoitusjärjestelyitä. Lisäksi tässä työssä keskitytään vahvikkeen lisäämiseen keskipilarin kohdalle. Reuna- ja nurkkapilareihin liittyy lävistysmitoituksessa joitakin erityispiirteitä, mutta ne on rajattu tästä työstä pois. Lävistysmitoitus itsessään ei varsinaisesti kuitenkaan eroa mitenkään siitä oli laatta sitten jännitetty tai jännittämätön. Tämän työn tuloksia voi siis hyvin soveltaa myöskin tavanomaisen paikallavaletun betonirakenteen lävistysmitoituksessa.

Työssä käsitellään tavanomaiseen tasapaksuun laattaan liittyviä mitoitusasioita, mutta siinä keskitytään myös lävistysvahvikkeellisen laatan suunnitteluun. Joskus laattaan voi joutua tekemään yläpuolinen vahvike. Laatan yläpuoliset vahvikkeet rajataan tämän työn ulkopuolelle. Leikkausraudoittamattomia korkeita niin sanottuja sienivahvikkeita sivutaan tässä työssä, mutta niihin ei syvennyttä erityisen tarkasti.

Raudoituksen osalta opinnäytetyössä käsitellään erityisesti harjateräksestä taivutettua hakaraudoitusta. Leikkausraudoitus on myös mahdollista toteuttaa ylös taivutetuilla hakaraudoitteilla, mutta nämä ovat harvemmin käytettyjä, eikä tässä työssä käsitellä niitä.

Leikkausraudoitus voidaan myös toteuttaa niin sanotulla säteittäisellä tyssätappiraudoitteella, jotka ovat yleensä raudoitevalmistajan valmiina toimittamia. Kuvassa 3 esitetty eräs valmis lävistysraudoite.



Kuva 3. Esivalmistettu lävistysraudoite [2, s. 1].

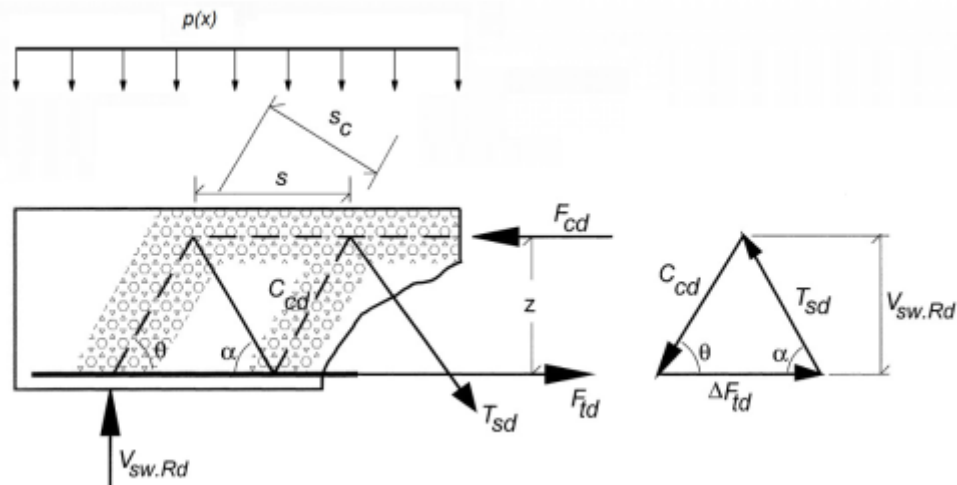
Tässä työssä esiteltävien ohjeiden ja ratkaisujen lisäksi on olemassa myös useita muita tapoja toteuttaa lävistysmitoitus betonirakenteelle. Suunnittelijan on itse valittava kohteeseen sopiva ratkaisu eikä tämä työ välttämättä anna vastausta kaikkiin kysymyksiin, jotka liittyvät lävistysmitoitukseen.

2 Betonin leikkaus- ja lävistymisteoria

2.1 Klassinen ristikkoanalogia

Vuonna 1920 Emil Mörsch esitti ensimmäisen kerran niin sanotun ristikkoanalogian, jolla halkeilleen teräsbetonirakenteen leikkauskestävyyttä voidaan mallintaa laskennallisesti. Mallissa toimintamekanismina on ristikko, jonka vetopaarteena on alapinnan taivutusve-

torauδοitus. Betoni toimii ristikkomallissa niin yläpaarteessa ja diagonaalissa puristus-sauvoissa. Leikkausraudoitus taas toimii pystysuuntaisena vetopaarteena, joka ottaa vastaan vinojen vetosauvojen voiman. Leikkaushalkeaman kulmaa θ voidaan muuttaa, mutta yleensä käytetään kulmaa $\theta = 45^\circ$, jolloin pääraudoituksen vetopaartessa oleva vetovoima on varmalla puolella. Kimmoisessa tilassa muodonmuutokset betonissa ovat pieniä ja ristikkomalli alkaa toimimaan oikealla tavalla vasta, kun lähestytään murtorajatilaa [3, s. 250].



Kuva 4. Ristikkoanalogia leikkausmitoituksessa [3, s.251].

Kuvassa 4 z kuvaa rakenteen sisäistä momenttivartta, ja kulmien α sekä θ avulla voidaan määrittää puristus- ja vetopaarteissa vaikuttavat voimakomponentit. Voimakomponenttien avulla voidaan määrittää tarvittava leikkausraudoitus.

Kuvasta 4 voidaan trigonometrisesti johtaa betoniterästen leikkauskestävyydelle seuraavanlainen kaava (1) [3, s. 251].

$$V_{sw,Rd} = A_{sw} f_{swd} \frac{z}{s} \sin \alpha (\cot \theta + \cot \alpha) \quad (1)$$

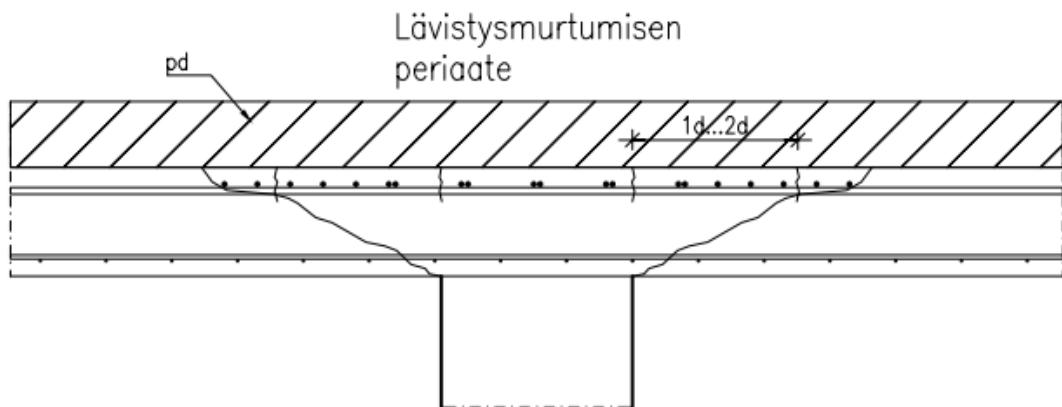
Koko betonirakenteen kokonaisleikkauskestävyys riippuu kuitenkin myös betonin kestävydestä. Betonirakenteen kokonaisleikkauskestävyyden voidaan ajatella olevan summautuva ja koostuvan betonin kestävydestä $V_{c,Rd}$ ja terästen yhteisvaikutuksesta. Kokonaisleikkauskestävyys voidaan siis esittää seuraavalla kaavalla [3, s. 257].

$$V_{Rd} = V_{c,Rd} + V_{sw,Rd} \leq V_{Rd,max} \quad (2)$$

Betonin leikkauskestävyydelle annetaan yläraja $V_{Rd,max}$, joka perustuu betonin murtumiseen [3, s. 260].

2.2 Betonin lävistyminen

Lävistysmurtuminen tarkoittaa sitä, että laatussa betonikartio leikkautuu irti. Kyseessä on siis murtorajatilassa tapahtuva murtumismekanismi ja luonteeltaan äkillinen eli haurasmurto. Betonikartion lävistyminen voi tapahtua suuren kuormakeskittymän alueella. Paikallavaletuissa betonirakenteissa tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi pilarilaatan pilarin alueet, pilarianturat tai teollisuusrakentamisessa suurten laitteiden esimerkiksi säiliöiden tukipisteet [3, s.288]. Kuvassa 5 on esitetty betonin lävistymisen murtumistapa.



Kuva 5. Lävistysmurtumisen periaate.

Lävistysmurtumisen tapahtuessa, laatan leikkautumispinnassa kehittyi suppilomainen muoto. Suppilon muoto rajoittuu alapinnassa pilarin kylkeen ja yläpinnassa tavallisesti n. $1d \dots 2d$ päässä pilarin reunasta. Mikäli murtumista jatkettaisiin maksimikuorman yli, leikkauspinta jatkuisi yläpinnan raudoituksen tasossa vaakasuorasti [3, s.288].

Lävistyminen ja leikkausmurtuminen (engl. *two-way shear* ja *one-way shear*) perustuvat vastaaventyypisiin mekanismeihin. Joissakin erikoistapauksissa voi olla tulkinnanvaraista onko kyseessä niin sanottu one-way shear vai two-way shear.

Erilaiset kokeet ovat osoittaneet, että betonilaatalla on suurempi leikkauskestävyys, kun pilarin geometria on sellainen, että sivujen mitat ovat lähellä neliötä (two-way shear) ja sivumitta on lähellä laatan paksuutta. Kun tuen toista sivumittaa lisätään ja tuen pituus kasvaa, betonin leikkauskestävyys pituusyksikköä kohti vähenee (one-way shear) [4, s.4-138].

Rajalla, jossa pilari niin sanotusti muuttuu seinäksi, laatan leikkauskestävyys on pienimmillään. Amerikkalaisen ACI-normin mukaan betonin pituusyksikköä kohti laskettu leikkauskapasiteetti neliötueella on kaksinkertainen verrattuna esimerkiksi seinämäiseen tukeen.

Leikkausraudoitetun betonin lävistyskapasiteetti pysyy kuitenkin samana siitä huolimatta, minkä muotoinen tuki on kyseessä. Kapasiteetti riippuu yksinkertaisesti pelkästään leikkausraudoituksen poikkipinta-alasta ja leikkausraudoituksen materiaalilujudesta. Oleellinen muutos leikkaus- ja lävistyskestävyyden (one-way shear ja two-way shear) välillä on, että lävistyksessä betonista saatava kapasiteetti on suurempi [4, s.4-139].

Alexander ja Simmonds ovat tehneet kokeita teräsbetonilaatoilla ja he ovat näiden perusteella esittäneet seuraavia asioita, jotka vaikuttavat erityisesti lävistyskestävyyteen [5, s.557-558]:

- Betonin puristuslujuus, jonka myötä määrittyy myös betonin vetolujuus.
- Kuormitusalueen sivun pituuden suhde laatan teholliseen korkeuteen.
- Tuen sivupituuksien suhde. Kuten edellisessä kappaleessa todettua, kun sivusuhte kasvaa, leikkauskestävyys pienenee.
- Betonimassan valinta. Hienoaineisen betonin halkaisuvetolujuus on pienempi.
- Yläpinnan terästen jako ja betonipeite vaikuttavat terästen ankkurointiin, joka vaikuttaa oleellisesti lävistyskestävyyteen.

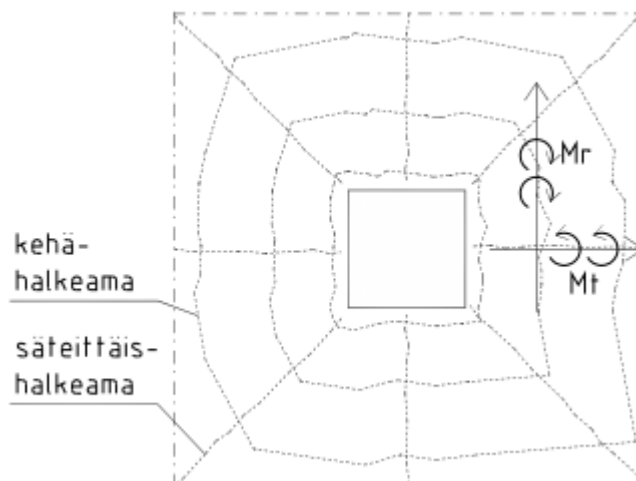
Betonin leikkautumiseen sekä lävistymiseen on kehitetty useita eri laskentamalleja. Luvuissa 2.2.1 ja 2.2.2 on esitetty laskentamalleja, jolla betonin lävistymistä voidaan mallintaa analyttisesti. Suunnittelunormeissa käytetyt laskentakaavat ovat yleensä yksinkertaistettuja, jotta suunnittelijoiden olisi suhteellisen helppo niitä käyttää. Lävistymisen rakenteen teoreettinen mallintaminen on siinä mielessä hankalaa, että ilmiö on kolmiulotteinen. Suunnittelunormeissa onkin useat parametrit kalibroitu esimerkiksi erilaisten

empiiristen kokeiden tulosten perusteella [4, s.4-139]. Laskentamalleja on esitetty useita muitakin, mutta tässä työssä esitetään lyhyesti kaksi erilaista laskentamallia.

2.2.1 Nimellinen leikkausjännitys

Leikkausjännityksiä teräsbetonirakenteessa voidaan määrittää niin teknisen taivutusteorian, kuin nimelliseen leikkausjännitykseen perustuvien teorioiden avulla. Näistä nimelliseen leikkausjännitykseen perustuvaa teoriaa on käytetty monissa laskentanormeissa, kuten Eurokoodi 2:ssa, Rakentamismääräyskokoelman osassa B4 ja amerikkalaisen ACI:n normeissa [6, s.16].

Tässä teoriassa kestävyuden määrittäminen perustuu tiettyyn poikkileikkaukseen määrätyn etäisyyden päässä pilarista [6, s.16]. Kuvassa 6 on havainnollistettu, miten pilarin kohdalla vaikuttavat momentit vaikuttavat laatan halkeiluun.



Kuva 6. Tangentiaalinen ja säteittäinen momentti pilarin kohdalla [6, s.16].

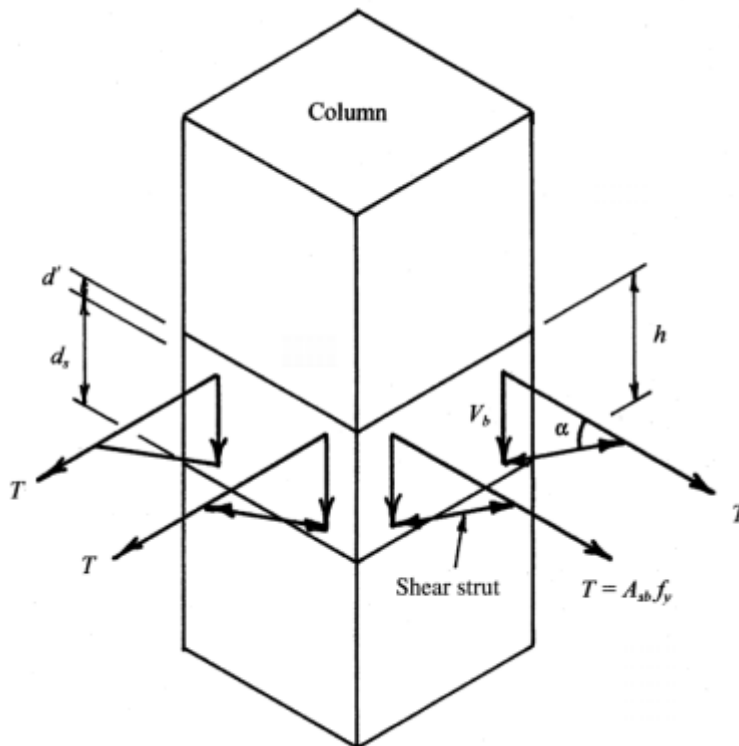
Kun laattaa kuormitetaan, ensimmäinen halkeama syntyy pilarin ympärille negatiivisen säteittäisen taivutusmomentin vaikutuksesta. Tämän johdosta syntyy ensimmäisenä säteittäisiä halkeamia. Lopuksi pilarin ympärille muodostuu kehän muodossa halkeamia. Tästä tangentiaalisesta taivutusmomentista syntyvät halkeamat vaativat kuormituksen kasvamista, koska momentti pienenee jyrkästi siirryttäessä pilarista ulospäin. Pilarilaatan

tapauksessa halkeamat eivät yleensä kasva kovin suuriksi, koska koko ympäröivän laatan jäykkyys pystyy siirtämään kuormituksia. Jos lävistysmurtuminen lopulta tapahtuu, se johtuu yleensä terästen myötäämisestä [5, s.555].

2.2.2 Lävistyksen ristikkoanalogia

Palkkimaisissa rakenteissa on sovellettu luvussa 2.1 esitettyä ristikkoanalogiaa jo pitkään, mutta laattoihin sitä on sovellettu vain lyhyen aikaa [6, s.18].

Kuvassa 7 esitetään yksinkertaistettu malli. Pilarin ja laatan liitoksessa vaikuttaa yläpinnan teräksissä vaakavoima T ja pystykomponentti V_b , joiden yhteisvaikutuksesta liitoksessa vallitsee tasapainotila [5, s.564-565].



Kuva 7. Lävistyksen ristikkoanalogia [5, s. 564].

Kun summataan pilarin ympäri kaikki pystykomponentit V_b , saadaan laatalle lävistyskapasiteetti V_u . Kulmalle α on kokeellisesti pystytty määrittämään kaava, mutta sitä ei tässä työssä selosteta tarkemmin. Yhteenlaskemalla kaikki pystykomponentit, saadaan lävistyskapasiteetille kaava [5, s.564].

$$V_b = A_{bar} f_y \tan \alpha \quad (3)$$

jossa A_{bar} on yläpinnan terästen poikkipinta-ala, f_y terästen myötölujuus ja kulma α puristuspaarteen ja yläpinnan terästen välinen kulma, katso kuva 7.

Kapasiteettiin otetaan mukaan yläpinnan teräksistä pilarin kohdalta laatasssa olevat tangot. Pilarin vierestä voidaan ottaa mukaan myös tietyltä matkalta, mutta näiden terästen vaikutus pienenee lineaarisesti, kun mennään pilarin reunasta kauemmas [6, s.19].

3 Betonirakenteen lävistysmitoitus

3.1 Lävistysmitoitus Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan

Seuraavan kappaleen kaavat ovat lähteestä 7 luvusta 2.2.2.7 sivut 19-20.

Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$V_c = k\beta(1 + 50\rho)udf_{ctd} \quad (4)$$

josta kaavassa olevat termit lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$k = 1,6 - d \geq 1 \quad (5)$$

$$\rho = \sqrt{(\rho_x + \rho_{px})(\rho_y + \rho_{py})} \leq 8\text{‰} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5e}{\sqrt{A_u}}} \quad (7)$$

Kaavassa 5 tehollinen korkeus d annetaan metreissä. Kyseistä kaavaa voidaan käyttää, kun betonin tiheys on suurempi kuin 2400 kg/m^3 . Yleensä näin on, mutta mikäli betonin tiheys on pienempi, tulee k arvona käyttää 1,0.

Raudoitussuhteesta tulevassa termissä ρ , käytetään raudoitussuhteena tuen reunasta $0,5d$:n päässä toisiaan kohtisuorassa olevaa raudoitusta. Vedetyn pinnan eli yläpinnan raudoituksen täytyy ankkuroitua luotettavasti poikkileikkauksen ulkopuolelle.

Varsinaisessa Rakentamismääräyskokoelman osassa B4 ei ole kerrottu, miten jännevoima voidaan huomioida laskennassa. Betoniyhdistyksen julkaisussa BY 27 Tartunnattomat jänteet betonirakenteissa on esitetty, miten jännevoima voidaan ottaa huomioon.

Punosten jännevoima huomioidaan ρ_{px} ja ρ_{py} termeillä seuraavasti.

$$\rho_{px} = \frac{P_x}{L_x h f_{yk}} \quad (8)$$

jossa P_x on jännevoima välittömien ja pitkäaikaisten häviöiden jälkeen. L_x on laatan sivumitta ja h laatan korkeus sekä f_{yk} betoniteräksen ominaismyötölujuus. Toisen suunnan jännevoima huomioidaan vastaavalla tavalla [7, s.4].

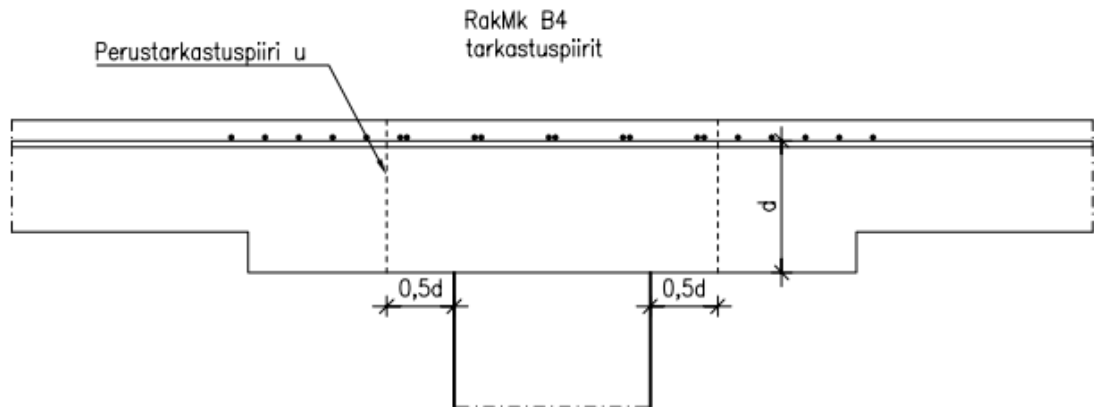
Molempien suuntien huomioonottava kokonaisraudoitussuhde on rajoitettu 8 ‰:n

Betonin vetolujuuden terminä f_{ctd} käytetään betonin vetolujuuden suunnitteluarvoa. Suunnitteluarvossa huomioidaan mahdollinen pienennetty materiaalin osavarmuuskerroin.

β -kerroin sisältää lävistävän voiman epäkeskisyyden huomioon ottavan osuuden. Jos oletetaan epäkeskisyyden olevan nolla, kertoimelle tulee arvoksi 0,4. Mikäli tuen yläpään kiinnitys oletetaan nivelelliseksi, lävistävän voiman epäkeskisyyden on lähellä nollaa. Vertailtavuuden helpottamiseksi esimerkkilaskelmassa liitteessä 2 on epäkeskisyydeksi e valittu nolla.

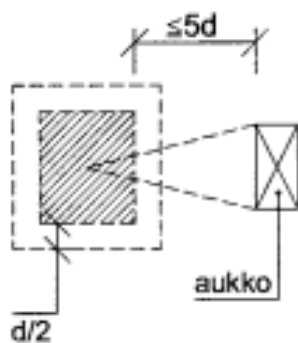
Laatan ja pilarin geometriasta tulevat termit u ja d ovat lävistävän piirin pituus sekä laatan tehollinen paksuus. Keskipilarilla lävistävän piirin pituus on tuen reunasta $0,5 d$:n päähän rajoittuva piiri. Kuvassa 8 on esitetty laatan ensimmäinen perustarkastuspiiri.

A_u on piirin u rajoittaman alueen pinta-ala. Mikäli piirin alueelle rajoittuu reikiä, ne täytyy vähentää koko piirin pituudesta. Laatan tehollinen korkeus lasketaan laatan alapinnasta yläpinnan raudoituksen painopisteeseen.



Kuva 8. Lävistyspiiri rakentamismääräyskokoelma osan B4 mukaan.

Pilarin läheisyydessä olevat reiät, jotka ovat enintään $5d$:n päässä pilarin reunasta tulee vähentää lävistyspiirin tehollisesta pituudesta. Reiän vaikutus lävistyspiirin pituudesta huomioidaan kuvan 9 mukaisesti.



Kuva 9. Reiän vaikutus teholliseen lävistyspiiriin [8, s. 20].

Mikäli laatta ei kestä leikkausraudoittamattomana, voidaan laattaan lisätä raudoituskestävyyden kapasiteettia. Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$(0,25V_c + V_s) \leq 2V_c \quad (9)$$

jossa V_c on kuten aikaisemmin kaavalla 4 laskettu. Leikkausterästen aikaansaama lisäkestävyys lasketaan kaavalla:

$$V_s = A_{sv} f_{yd} \sin \alpha \quad (10)$$

jossa A_{sv} on leikkausraudoituksen kokonaispoikkipinta-ala ja f_{yd} raudoituksen tehollinen myötölujuus.

Raudoitteiden tehollisena suunnittelulujuutena voidaan käyttää korkeintaan 300 MPa. Raudoitus jaetaan tasaisesti koko lävistyvälle alueelle ja raudoituksen sekä tason välinen kulma α tulee olla vähintään 30°. Raudoitteiden sijoitteluun ja raudoitusmäärän tarkempaa määrittelyä on käsitelty luvussa 4. Lävistyskestävyyden maksimiarvo on rajattu korkeintaan kaksi kertaa leikkausraudoittamattoman laatan kestävyYTEEN.

Lävistävää voimaa voidaan pienentää niin, että voimaa laskettaessa ei tarvitse ottaa huomioon kuormia, jotka sijaitsevat d :n etäisyydellä tuen reunasta. Laskennan tarkempi kulku on esitetty liitteessä 2.

Mikäli laatta ei kestä leikkausraudoittamattomana ja se täytyy raudoittaa, täytyy laskennassa tarkastaa myös uloin piiri, jossa leikkausraudoitusta ei tarvita.

3.2 Lävistysmitoitus Eurokoodi 2:n ja Rakentamismääräyskokoelman ohjeen mukaan

Seuraavan luvun kaavat ovat lähteestä 9 luvusta 6.4 sivuilta 95-105 sekä lähteestä 10 sivuilta 19-20.

Laatan lävistyskestävyys leikkausraudoittamattomana lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) \quad (11)$$

Ympäristöministeriön ohjeessa, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Betonirakenteet on esitetty kaavat termeille, joista voidaan kansallisesti poiketa. Kaavalle 12 on annettu eri kaava kuin Eurokoodi 2:ssa. Seuraava kaava on Rakentamismääräyskokoelman kantavien rakenteiden lujuus ja vakaus ohjeesta [10, s. 19].

$$C_{Rd,c} = \frac{0,3 \left(\frac{D}{d} + 1,5\right)}{\gamma_c \left(\frac{D}{d} + 4\right)} \quad (12)$$

jossa d on laatan tehollinen korkeus kaavan 17 mukaan ja D on pyöreän pilarin halkaisija tai suorakaidepilarille:

$$D = \sqrt{c_1 c_2} \quad (13)$$

jossa c_1 ja c_2 ovat pilarin sivumittoja.

Termille k käytetään seuraavaa arvoa, joka on pienempi tai yhtä suuri kuin kaksi:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (14)$$

jossa d on laatan tehollinen korkeus millimetreinä kaavan 17 mukaan.

Raudoitussuhde otetaan huomioon seuraavalla tavalla:

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0,02 \quad (15)$$

Poikkileikkauksen yläpinnan raudoitus lasketaan alueelta, joka on pilarin sivumitta + $3d$ pilarin molemmilta puolilta. Raudoituksen lukumäärä lasketaan keskiarvona koko alueelta ja tässä vaiheessa on hyvä ottaa huomioon, kuinka monta tankoa kyseisellä alueella todella mahtuu olemaan. Yläpinnan raudoituksessa tulee ottaa huomioon, että raudoitus ankkuroituu tarkastuspiirin ulkopuolelle.

Mahdollisesti jännevoimasta tai ulkoisesta kuormasta aiheutuva keskeinen puristusjännitys otetaan huomioon seuraavasti:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{cy} + \sigma_{cz}}{2} \quad (16)$$

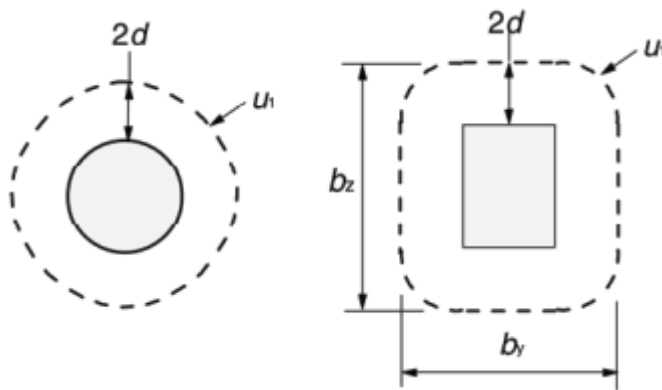
jossa σ_{cy} sekä σ_{cz} ovat poikkileikkauksen alueella vaikuttavia puristusjännityksiä. Keskipilarien osalta puristusjännitykseen lasketaan koko pilarien välisen alueen pituussuuntaiset voimat.

Eurokoodi 2:ssa on mainittu, että suureille k_1 ja v_{min} voidaan kansallisesti antaa arvo. Rakentamismääräyskokoelman ohjeessa on mainittu, että $k_1 = 0,1$ ja $v_{min} = 0$.

Tehollisen korkeutena käytetään toisiaan kohtisuoraan olevien tankojen tehollisen korkeuden keskiarvoa:

$$d_{eff} = \frac{d_y + d_z}{2} \quad (17)$$

Tasapaksussa laatussa, jossa ei ole vahviketta pilarin kohdalla, lävistyspiirinä käytetään pilarin reunasta $2d$:n päähän rajoittuva piiri. Lisäksi piirin nurkat pyöristetään säteellä, joka on d . Kuvassa 10 on esitetty tarkastuspiirien pituuksia perustapauksissa.



Kuva 10. Perustarkastuspiirien pituudet [9, s. 97].

Tasapaksun laatan ensimmäinen tarkastuspiiri lasketaan seuraavasti.

$$u_1 = 2c_1 + 2c_2 + 4\pi d \quad (18)$$

jossa c_1 ja c_2 ovat pilarien sivumitat.

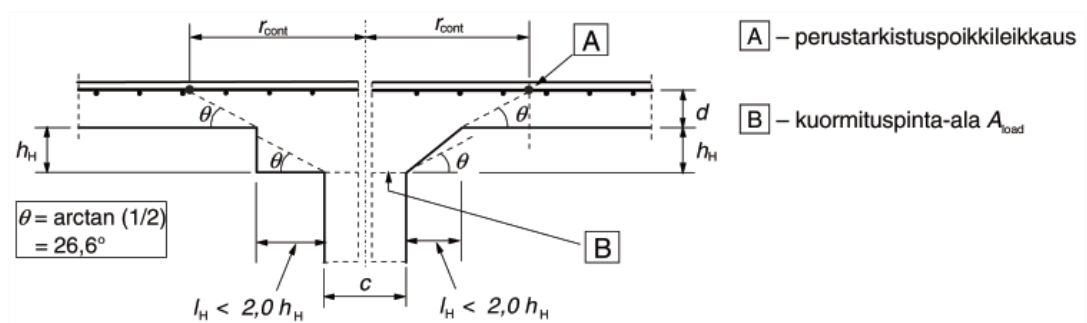
Vastaava piiri pyöreälle pilarille lasketaan seuraavasti

$$u_1 = 2\pi(0,5c + 2d) \quad (19)$$

Kuvassa 11 on esitetty vahvikkeen mitat ja perustarkistuspoikkileikkaukset, kun $l_H < 2,0$ h_H . Tällainen vahvike voi olla suorareunainen tai vinoreunainen ns. sienivahvike. Tämän

vahvikkeen tarkoitus on siirtää ensimmäisen perustarkistuspoikkileikkauksen sijainti kauemmas pilarin reunasta, jolloin lävistyspiirille saadaan pidempi pituus.

Mikäli laatan vahvikkeen paksuudeksi valitaan $l_H > 2h_H$ riittää, että lävistys tarkastetaan vahvikkeen ulkopuolella olevassa tarkastuspiirissä kaavojen 17 - 19 mukaan. Mikäli taas $l_H \geq 2h_H$, täytyy tarkastuspiirin säteen pituus laskea kuvan 12 sekä kaavojen 22 - 23 mukaan. Kuvassa 12 on esitetty vastaavat piirit leveämmän vahvikkeen tapauksille. Tässä tapauksessa on varmistuttava, että vahvikkeen sivumitta on sellainen, että ensimmäinen lävistyspiiri on vahvikkeen sisäpuolella.



Kuva 11. Lävistyspiirin määrittäminen, kun $l_H < 2,0 h_H$ [9, s. 98].

Pyöreälle pilarille r_{cont} lasketaan seuraavasti.

$$r_{cont} = l_H + 2d + 0,5c \quad (20)$$

jossa c on pilarin halkaisija.

Suorakaidepilarin tapauksessa vastaava r_{cont} on pienempi seuraavista.

$$r_{cont} = 2d + 0,56\sqrt{l_1 l_2} \quad (21)$$

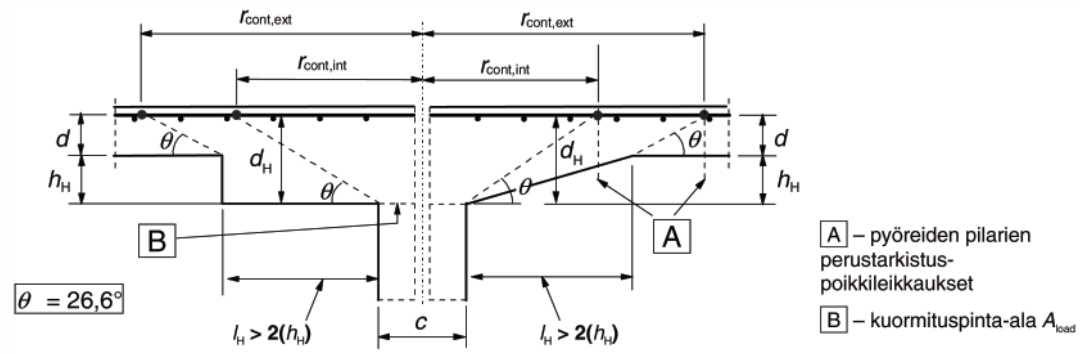
$$r_{cont} = 2d + 0,69l_1 \quad (22)$$

jossa kokonaismitat ovat $l_1 \leq l_2$ sekä

$$l_1 = c_1 + 2l_{H1} \quad (23)$$

$$l_2 = c_2 + 2l_{H2} \quad (24)$$

jossa c_1 ja c_2 ovat pilarien sivumitat sekä l_{H1} ja l_{H2} ovat vastaavat lävistysvahvikkeen sivumitat.



Kuva 12. Lävistyspiirin määrittäminen, kun $l_H > 2,0h_H$ [9, s. 99].

Kun $l_H \geq 2h_H$, tarkastuspiirien säteet lasketaan seuraavasti

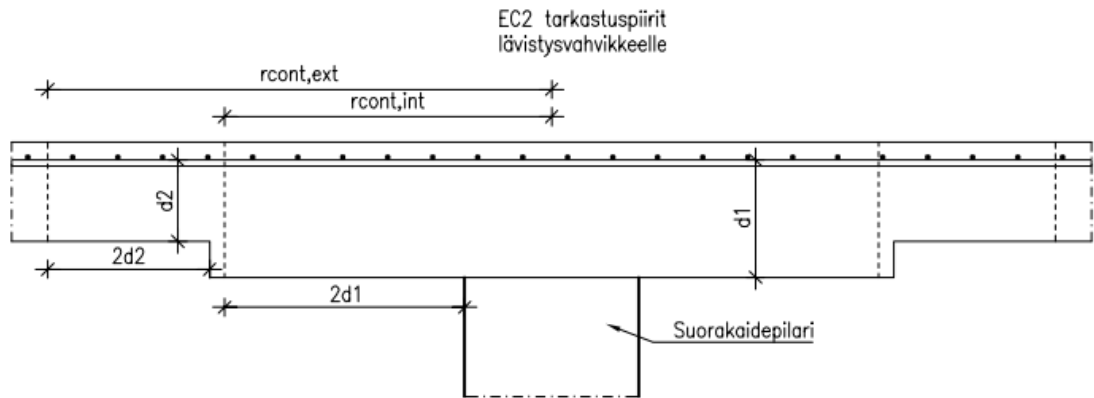
$$r_{cont,ext} = l_H + 2d + 0,5c \quad (25)$$

$$r_{cont,int} = 2(d + h_H) + 0,5c \quad (26)$$

Vastaava tarkastuspiirin pituus kaavoista 17-19 ja 22-23 saaduille säteiden pituuksille voidaan laskea seuraavasti

$$u_1 = 2\pi r_{cont} \quad (27)$$

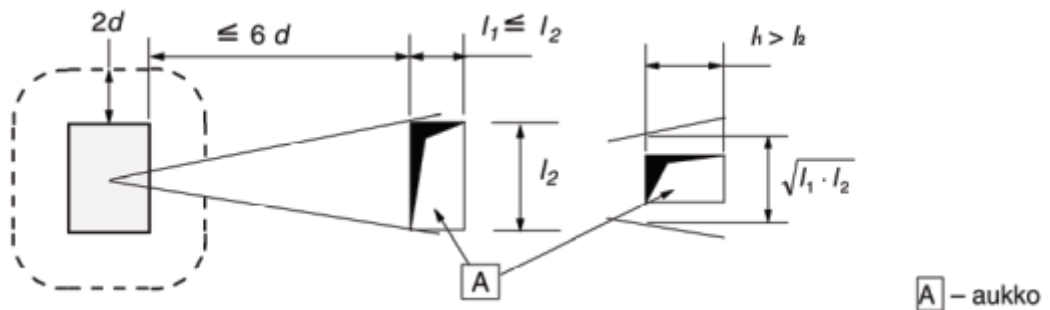
Suorakaidepilarille ei tapaukselle, jossa vahvikkeen mitat ovat $l_H \geq 2h_H$, ei anneta suoraan laskukaavaa, miten tarkastuspiirin pituus pitäisi laskea. Eurokoodia voidaan tässä tapauksessa soveltaa siten, että vastaavat tarkastuspiirit ovat $2d$:n päässä pilarin reunasta ja ulompi tarkastuspiiri $2d$:n päässä vahvikkeen reunasta. Kuvassa 13 on esitetty tarkastuspiirien sijainnit suorakaidepilarin tapauksessa.



Kuva 13. Lävistysvahvikeellisen suorakaidepilarin tarkastuspiirit

Liitteen 3 esimerkkilaskelmassa vahvikkeiden mitat ovat kuten kuvissa 12 ja 13 eli $l_H \geq 2h_H$.

Mikäli pilarin reunasta mitattuna korkeintaan $6d$:n päässä sijaitsee reikä laatussa, se täytyy huomioida lävistyspiirin pituudessa. Kuvan 14 mukaisesti lävistyspiiristä tehdään vähennys.



Kuva 14. Reiän vaikutus lävistyspiirin lähellä [9, s. 97].

Lopuksi kaavasta 11 saatu leikkauskapasiteetti jännityskestävyytenä, voidaan muuntaa voimaksi kertomalla tulos tehollisella korkeudella d_{eff} ja lävistyspiirin pituudella u_1 :

$$V_{Rd,c} = \frac{v_{Rd,c} d_{eff} u_1}{\beta} \quad (28)$$

Jos lävistävä voima jää alle lävistyskestävyyden, voidaan laskenta päättää tähän. Mikäli laatta ei kestä leikkausraudoittamattomana, leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys lasketaan seuraavasti.

$$v_{Rd,cs} = 0,75v_{Rd,c} + A_{sw}f_{ywd,ef} \frac{1}{u_1d} \sin \alpha \leq k_{max}v_{Rd,c} \quad (29)$$

jossa $v_{Rd,c}$ arvon laskemisessa käytetään kaavaa 30 kaavan 12 tilalla:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,3}{4,5\gamma_c} \frac{\left(\frac{D}{d}+1,5\right)}{\left(\frac{D}{d}+4\right)} \quad (30)$$

Kaavaa on kansallisesti muokattu siten, että leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyydelle ei saataisi liian epävarmalla puolella olevia arvoja.

A_{sw} arvona käytetään leikkausraudoituksen kokonaispinta-alaa. Eurokoodissa A_{sw} termin sijalla on termi $1,5(d/s_r)A_{sw}$. Kansallisessa liitteessä kuitenkin mainitaan, että kaava on johdettu säteittäiselle raudoitukselle ja tämän termin sijaan voidaan käyttää leikkausraudoituksen kokonaispinta-alaa [10, s. 20].

Leikkausraudoituksen teholliselle lujuudelle käytetään kaavaa 31.

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd} \quad (31)$$

Tehollisena korkeutena kaavoissa käytetään samaa arvoa, joka saadaan kaavasta 17. Arvo syötetään millimetreinä. Lävistysalueen piiri valitaan, kuten aikaisemmin leikkausraudoittamattoman kestävyuden laskennassa.

Maksimikestävyys on rajoitettu kaavassa ja Rakentamismääräyskokoelman ohjeessa on määritetty arvoksi $k_{max} = 1,6$. Eurokoodi 2:ssa suositusarvoksi on annettu 0,15, mikä vaikuttaa pienehköltä. Jää myöhemmin tarkistettavaksi, onko tässä kohdassa eurokoodissa mahdollisesti sattunut painovirhe.

$v_{Rd,c}$ arvossa käytetään tulosta, joka on saatu leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyyden arvoksi.

Lisäksi täytyy tarkastaa laatan kestävyys pilarin juuressa. Leikkausjännitys pilarin juuressa lasketaan kaavalla 32.

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} \quad (32)$$

Piiri u_0 on keskipilareille pienin piirin pituus, johon pilaripoikkileikkaus mahtuu. $v_{Rd,max}$ voidaan määrittellä Eurokoodi 2:n mukaan kansallisesti, mutta sitä ei ole tehty. Maksimiarvo määritellään eurokoodin mukaan seuraavasti:

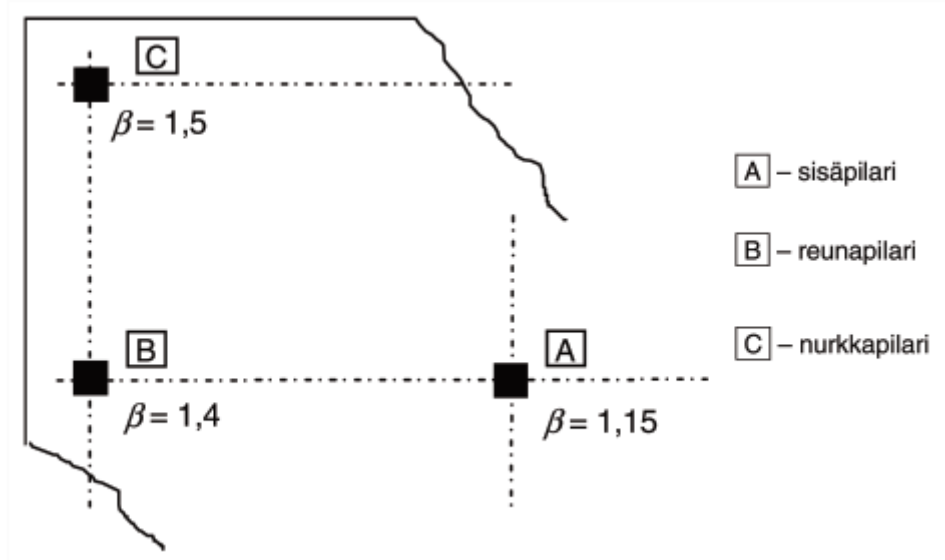
$$v_{Rd,max} = 0,4v f_{cd} \quad (33)$$

jossa v on kaavan 34 mukaan:

$$v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad (34)$$

jossa f_{ck} on betonin ominaispuristuslujuus sylinterilujuutena.

Mahdollinen kuorman epäkeskisyyden huomioidaan Eurokoodi 2:ssa kaavoilla 6.38 - 6.46 [9, s. 100-102]. Suunnittelussa näiden kaavojen käyttöä voidaan yksinkertaistaa, joten suunnittelussa voidaan soveltaa kuvan 15 suositusarvoja kertoimelle β . Suositusarvon käyttämisessä on huomioitava, että rakenne ei saa olla kehäjäykistetty eikä jänneväljen pituudet saa erota yli 25 % toisistaan [9, s. 102]. Näin ollen keskipilarin β arvona voidaan oletuksena käyttää arvoa 1,15.



Kuva 15. β -kertoimen arvot [9, s. 102].

Epäkeskisyyden vaikutuksen huomioiminen on merkittävä asia suunnittelussa. Pilarilaatan rakennemallissa pilarin ja laatan välinen liitos oletetaan usein nivelelliseksi, jolloin laskentamallissa liitokseen ei synny taivutusmomenttia. Todellisuudessa kuitenkin pilarin laatan liitokseen voi syntyä tahaton kiinnitys, josta syntyy taivutusmomenttia. Tästä syystä β kertoimen arvoksi on syytä valita vähintään 1,15. Suunnittelija voi halutessaan laskea Eurokoodi 2:n kaavoilla myös tarkemmin epäkeskisyyden vaikutuksen. Yksi mahdollisuus epäkeskisyyden tarkempaan analyysiin on mallintaa laskentamalliin pilarin ja laatan välinen liitos jäykäksi.

Esimerkilaskelman kulku on esitetty liitteessä 3. Vertailtavuuden helpottamiseksi esimerkilaskelmassa β kertoimen arvoksi on valittu yksi.

Lopuksi leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys voidaan edelleen laskea yksikössä kN seuraavalla kaavalla.

$$V_{Rd,cs} = \frac{v_{Rd,cs} d_{eff} u_1}{\beta} \quad (35)$$

Tämän jälkeen on vielä tarkastettava, että lisätarkastuspiiri u_{out} jää korkeintaan $1,5d$:n päähän leikkausraudoituksen viimeisestä leikkeestä. Lisätarkastuspiiri u_{out} on sellaisen piirin pituus, jossa laatta kestää leikkausraudoittamattomana. Lisätarkastuspiirin pituus lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$u_{out} = \beta V_{Ed} / (v_{Rd,c} d) \quad (36)$$

Kaavasta voidaan johtaa lisätarkastuspiirin sijainti seuraavalla kaavalla.

$$r_{out} = \frac{u_{out}}{2\pi} \quad (37)$$

Leikkausraudoituksen suunnittelu on esitetty tarkemmin luvussa 4.

Kun nämä tarkastukset on tehty, laskenta on valmis.

3.3 Laskelmien yhteenveto ja vertailu

Laskelmia on vertailtu esimerkkitapauksen mukaan, joka esitetään liitteessä 1. Liitteissä 2 ja 3 on esitetty varsinaiset laskelmat.

Laskennan tulokset eroavat tässä kuvatus tavanomaisen pilarilaatan keskipilarin tapauksessa noin 12 % siten, että Eurokoodi 2:n mukaan betonin lävistyskestävyys on enemmän. Suhteellinen ero pienenee hieman, kun verrataan leikkausraudoitettuun laattaa, mutta on silti noin 11 % Eurokoodi 2:n kapasiteetin ollessa suurempi. Tulokset ovat esitetty taulukossa 1. Tämän kapasiteettien eroavaisuuden varsinaisen syyn tutkiminen ja selvittäminen vaatisi usean eri tapauksen laskemista ja siihen ei ole tässä työssä syvennyt.

Laskelmaesimerkissä huomattiin, että Eurokoodi 2:n mukaisessa laskelmassa leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyyden yläraja tuli vastaan. Tämä oli hieman yllättävää, koska leikkausraudoitusta ei ollut kovin paljon ja esimerkiksi Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaisessa laskelmassa leikkausraudoituksella olisi pystynyt vielä lisäämään kapasiteettia.

Taulukko 1. Lävistyskapasiteettien vertailu

	Lävistyskapasiteetti (kN)	Lävistyskapasiteetti leikkausraudoitettu $A_{sw} = 6780 \text{ mm}^2$ (kN)
Eurokoodi 2+ RakMk ohje	1686	2697
RakMk B4	1504	2413
Eurokoodi 2+ RakMk ohje (B4 mukaiset dimensiot)	1247	1995
RakMk B4 (EC2 mukaiset dimensiot)	1504	2413

Lävistysalueen piirit eroavat huomattavasti toisistaan. Rakentamismääräyskokoelman mukaan piiri lasketaan $0,5d:n$ päässä tuen reunasta, kun taas Eurokoodi 2:n mukaan piiri lasketaan $2d:n$ etäisyydellä tue reunasta. Näin ollen esimerkkilaskelmassa Eurokoodi 2:n mukaan laskettua piiri on huomattavasti pidempi. Tämä johtuu siitä, että piiri on perusteiltaan erilainen kuin Eurokoodi 2:ssa ja eroa kompensoi betonin eritavalla määritelty leikkauslujuus [3, s. 293].

Lävistyskalkeaman kulma θ Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan on 45° ja Eurokoodi 2:n mukaan se on noin $26,3^\circ$. Täytyy kuitenkin muistaa, että lävistyskulman valinta ja lävistyvän piirin pituus laskennassa eivät osoita murtumisen paikkaa tositilanteessa [3, s. 289]. Taustasyynä kulman muuttumiselle on siis hieman eri lähtökohdista tehdyt ja kalibroidut laskentakaavat. Lopputulokset ovat kuitenkin melko lähellä toisiaan.

Tavallisessa leikkausmitoituksessa Eurokoodi 2 sallii suunnittelijan valita leikkaushalkeaman kulman θ . Lävistysmitoituksessa tätä valintaa ei sallita tehtävän. Mikäli lävistyskalkeaman kulma valittaisiin jyrkemmäksi, olisi mitoitus lävistyskestävyyden suhteen ns. varmallalla puolella. Mutta jyrkemmin valittu kulma toisi lisäjännityksiä yläpinnan veto-raudoitukseen. Tässä asiassa piilee riski, koska suunnittelijan pitää tällöin varmistaa, ettei pääterästen jännitykset kasva liian suuriksi.

Raudoitussuhde on Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan rajoitettu 8 %:n, kun taas Eurokoodin mukaan sallitaan 2 %:n raudoitussuhde eli huomattavasti suurempi verrattuna Rakentamismääräyskokoelman maksimiarvoon. Toki 2 %:n raudoitussuhde on jo niin suuri, että tankojen sijoittaminen laattaan toteuttamiskelpoisesti voi olla hankalaa. Lisäksi myös teräksen lujuuden suunnitteluarvossa on ero. Rakentamismääräyskokoelman mukaan suurin mahdollinen suunnittelumyötölujuus on enintään 300 MPa. Eurokoodi 2:n mukaan myötölujuus lasketaan kaavalla 31, jossa myötölujuus rajoitetaan enintään 455 MPa:iin. Esimerkilaskelmassa leikkausraudoituksen myötölujuuden ero on noin 15 % Eurokoodi 2:n arvon ollessa suurempi.

Betonin lujuuden huomioonottava termi eroaa niin, että Rakentamismääräyskokoelman osa B4:n kaavassa 4 käytetään betonin suunnitteluvetolujuutta, jossa on jo huomioitu materiaalin osavarmuuskerroin. Eurokoodi 2:n kaavassa 11 käytetään betonin ominaispuristuslujuutta ja materiaalin osavarmuuskerroin huomioidaan Rakentamismääräyskokoelman ohjeesta tulevalla kaavalla 12 ja 30.

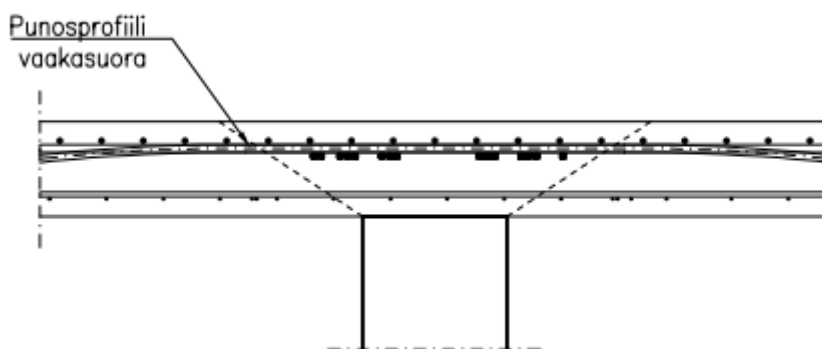
Jännevoimasta saatavaa keskeistä puristusjännitystä voidaan hyödyntää Eurokoodi 2:n mukaisessa laskennassa. Jännevoimasta aiheutuvan puristusjännityksen huomioiva termi kerrotaan kertoimella k_1 , joka on Eurokoodissa 0,1 eli puristusjännityksestä voidaan hyödyntää 10 %. Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan tätä puristusjännitystä ei voida hyödyntää. Betoniyhdistyksen julkaisussa BY 27 Tartunnattomat jänneet betonirakenteissa on selostettu, miten puristusjännitys voidaan ottaa huomioon laskennassa.

Eurokoodi 2:n mukaan jännevoiman pystykomponenttia voidaan hyödyntää mitoituksessa siten, että mitoittavasta lävistysvoimasta voidaan vähentää pystykomponentin arvo [9, s. 103]. Jännevoimasta mukaan saadaan ottaa vain enintään 0,5d:n etäisyydellä pilarin reunasta sijaitsevat punokset. On suositeltavaa kuitenkin jättää ainakin aluksi konservatiivisena otaksumana jännevoima hyödyntämättä. Mikäli jännevoimaa hyödynnetään mitoituksessa, on punokset asennettava tarkasti laskelmien mukaiseen kulmaan. Tässä on riskinä, että työmaalla punoksen asentamista ei voida suorittaa näin tarkasti.

Erityisesti ohuissa laatoissa jännevoiman pystykomponenttia ei tulisi hyödyntää lävistysmitoituksessa. Näissä tapauksissa punoksen profiililla on erityisen suuri vaikutus lävis-

tysmitoitukseen [11, s. 9]. Kuvasta 16 voidaan nähdä, miten matalassa laatasta voi punosprofiili olla lähes vaakasuora kriittisessä poikkileikkauksessa. Tällöin jännevoiman pystykomponentti voi siinä kohdassa voi olla hyvin pieni tai lähes nolla.

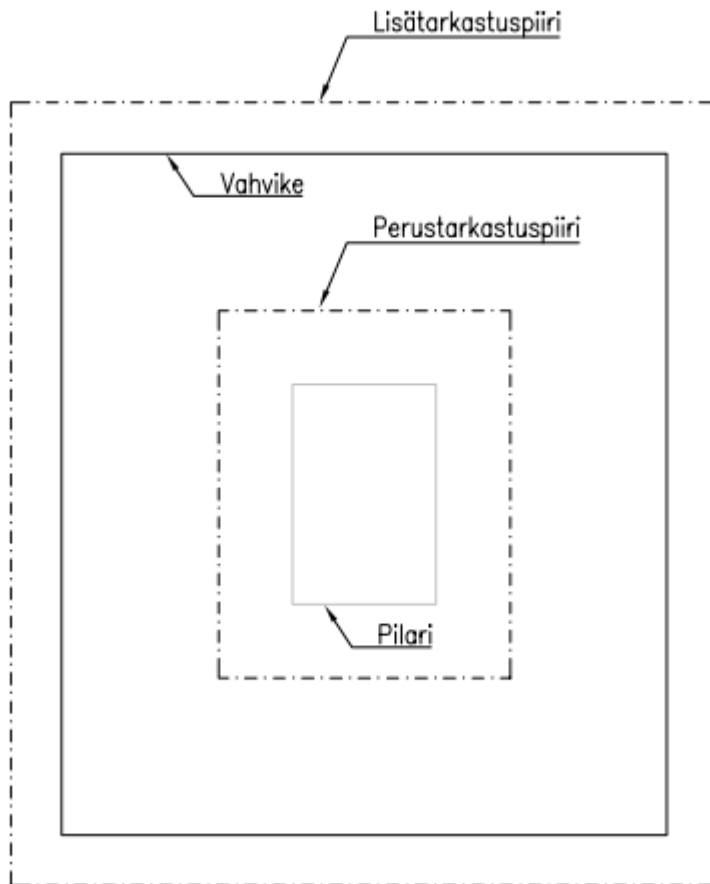
Taulukossa 1 on myös esitetty vertailtavuuden vuoksi tulokset, kun laatan geometria on sama molemmissa laskentatavoissa. Eurokoodi 2:n mukaisessa laskelmassa nähdään, että lävistyskestävyys pienenee huomattavasti, kun vahvikkeen sivumitta on Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukainen.



Kuva 16. Jännevoiman pystykomponentin hyödyntäminen ohuessa laatasta.

Kuten liitteen 1 esimerkistä huomataan, on Eurokoodi 2:n mukaisen laskennan mukaan lävistysvahvikkeen reunan pituus pidempi kuin Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan laskettaessa. Tämä johtuu siitä, että Eurokoodi 2:n mukaan laskettaessa laatan tehollinen korkeus d valitaan luonnollisesti perustarkastuspiirin kohdalta. Perustarkastuspiirin ollessa $2,0 d$:n päässä pilarin reunasta, täytyy vahvikkeen reunan pituus olla vähintään yhtä pitkä.

Perustarkastuspiirin jälkeen suorittavassa seuraavan lisätarkastuspiirin tarkastuksessa on huomattava ero. Rakentamismääräyskokoelman osassa B4 ei varsinaisesti mainita lisätarkastuspiiristä mitään, mutta sen pituuden määrittäminen on tavallisesti suoritettu lävistysvahvikkeen kohdalla kuvan 17 mukaan. Lisätarkastuspiiri on siis tavallisesti valittu $0,5d$:n päähän lävistysvahvikkeen reunasta. Eurokoodi 2:ssa on taas tarkkaan määritetty kaavat, jolla tarkastuspiirien pituudet lävistysvahvikkeellisen laatan tapauksessa lasketaan.



Kuva 17. Lisätarkastuspiiri Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan.

Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan lisätarkastuspiirin kestävyys lasketaan ensin samaan tapaan kuin perustarkastuspiirikin eli ensimmäinen laskelma suoritetaan leikkausraudoittamattoman betonin kestävyuden mukaan kaavalla 4.

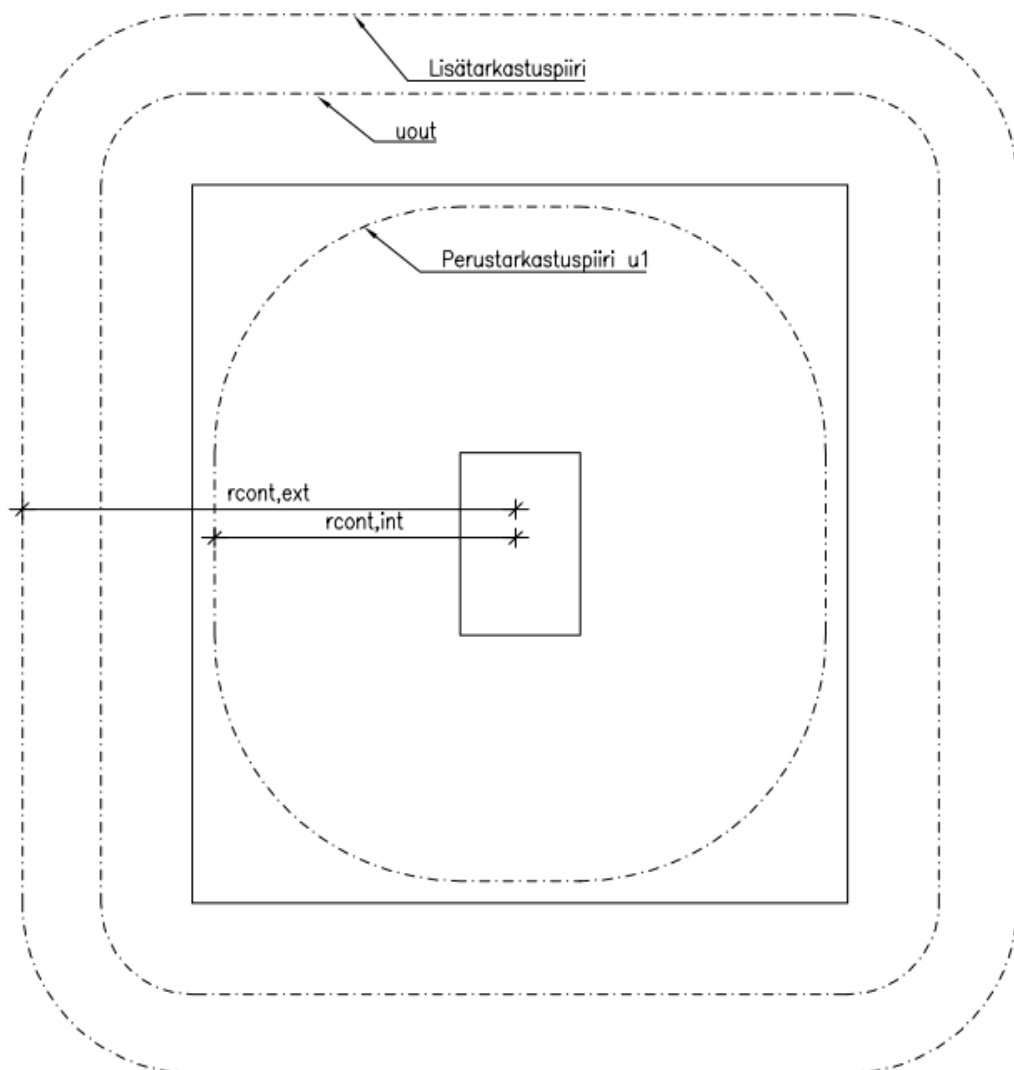
Eurokoodi 2:n mukaan tarkastuspiirien pituuden määrittäminen on hieman työläämpää ja kaavat eivät ole niin yksinkertaisia. Lisätarkastuspiireille on määritetty kaavat 20 - 22 ja 25 - 26, jotka on esitetty tämän työn luvussa 2.

Yleensä lisätarkastuspiirin pituus on niin suuri, että lävistysjännitykset ovat pienempiä kuin lävistyskestävyys. Mikäli lävistysjännitykset ylittävät vielä lävistyskestävyyden, lisätarkastuspiiri täytyy vielä varustaa leikkausraudoituksella.

Lisätarkastuspiirin laskennassa on huomioitava tarkasti kyseisen poikkileikkauksen läpi menevä yläpinnan raudoitus, joka vaikuttaa raudoitussuhteeseen. Raudoitus tulisi olla

jaettuna koko poikkileikkauksen alueelle tasaisesti. Eurokoodi 2:n ohje, että raudoituksesta huomioidaan se osa, joka on $3d$:n päässä tuen reunasta. Tämä ohje tulisi huomioida myös lisätarkastuspiirillä. Suositeltavaa on, että lisätarkastuspiirillä yläpinnan rauditus on korkeintaan d :n päässä poikkileikkauksen reunasta.

Lisätarkastuspiirin tarkastaminen voidaan jättää tekemättä Eurokoodi 2:n mukaan laskehtaessa, mikäli laatan leikkausraudoituksen uloin leike jää korkeintaan $1,5d$:n päähän u_{out} tarkastuspiiriltä. Tämä u_{out} on sen piirin pituus, jossa laatta kestää leikkausraudoittamattomana. Tämä on kuvattu tarkemmin luvussa 4.2.2. Kuvassa 18 on esitetty liitteen 3 esimerkkilaskelmasta otetut Eurokoodi 2:n mukaiset tarkastuspiirit.



Kuva 18. Eurokoodi 2:n mukaiset tarkastuspiirit.

Kuten kuvasta 18 voidaan nähdä, esimerkkilaskelmassa piiri u_{out} on lähempänä pilaria kuin ulompi lisätarkastuspiiri. Tästä voidaan päätellä, että lisätarkastuspiiri kestää leikkausraudoittamattoman eikä sitä tarvitse erikseen tarkastaa.

4 Betonirakenteen lävistysvahvikkeen suunnittelu

Seuraavat ohjeet perustuvat suunnittelunormeihin, kokemuksiin ja hyväksi todettuihin toimintatapoihin. Ohjeissa on erityisesti ajateltu sitä, että laatan dimensiot sekä raudoitteet on sijoitettu siten, että ne toimivat asianmukaisesti. Lisäksi ohjeissa on ajateltu sitä, että pilarin ympäristön raudoitus on työmaalla tehokkaasti toteutettavissa sekä betonointi onnistuu luotettavasti.

4.1 Laatan dimensioiden suunnittelu

Laatan alustavan paksuuden määrittäminen kannattaa aloittaa taivutusmitoituksen vaatimasta laatan paksuudesta. Tämän jälkeen täytyy varmistaa lävistyskestävyys kyseisellä laattapaksuudella, jonka perusteella voidaan tarvittaessa paksuntaa laattaa tai lisätä pilarin kohdalle lävistysvahvikkeet.

Lähtökohtaisesti jälkijännitetyissä rakenteissa voidaan käyttää pienennettyjä materiaalin osavarmuuskertomia, kun rakenteen toteutusluokaksi on valittu 3 ja toleranssiluokaksi 2.

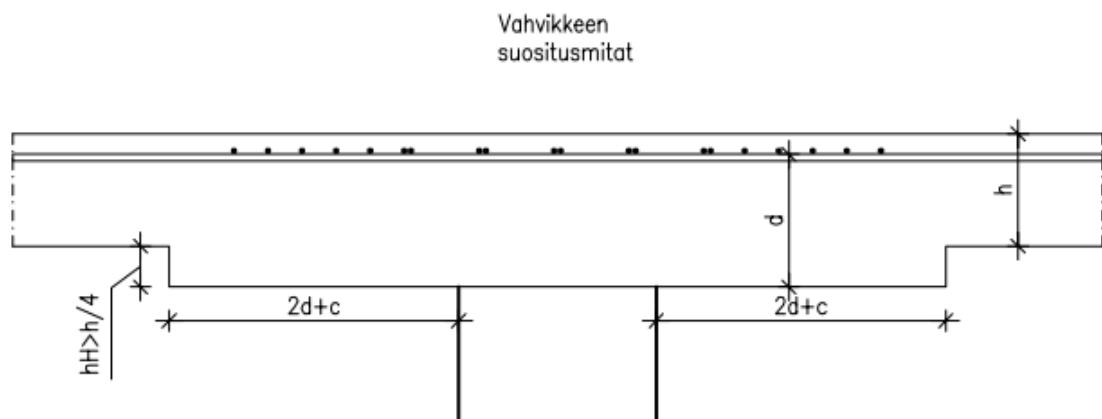
4.1.1 Laatan paksuuden määrittäminen

Jälkijännitetyn pilarilaatan taivutusmitoituksen vaatimalle laattapaksuudelle voidaan pitää sääntönä $L/36$, kun tasoa kuormittaa noin 10 kN/m^2 kokonaiskuorma [4, s. 4-6] ja L on laatan jänneväli. Laatan lävistysmitoitus voi kuitenkin vaatia paksumman laatan. Kannattaa kuitenkin alussa tarkastaa hyvin tarkkaan voiko lävistysmitoituksen saada toimimaan tasapaksulla laattalla.

Usein kuitenkin esimerkiksi vapaasta korkeudesta johtuvista syistä ei voida paksuntaa koko laattaa. Tällöin voidaan laattaan lisätä paikallinen vahvike pilarin kohdalle lisäämään lävistyskapasiteettia. Vahvikkeen mitat kannattaa laskea ja varmistaa jo alustavan suunnittelun aikana.

4.1.2 Laatan vahvikkeen dimensioiden määrittäminen

Mikäli laatta ei kestä tasapaksuna ja leikkausraudoitettuna, täytyy laatan dimensioita muuttaa. Tässä tapauksessa pilarin kohdalle voidaan lisätä lävistysvahvike. Laatan lävistysvahvikkeen dimensioiden määrittämisessä voidaan käyttää apuna kuvaa 19. Lävistysraudoitetun ja matalan vahvikkeen sivumitta valitaan niin, että ensimmäinen tarkastettava lävistyspiiri jää vahvikkeen sisäpuolelle. Laatan vahvikkeen sivumitta tulee tällöin olla noin $2,0 d:n$ etäisyydellä pilarin reunasta. Vahvikkeen leveydessä tulee huomioida raudoituksen suojabetonipaksuus c .



Kuva 19. Lävistysvahvikkeen suositusmitat

Vahvikkeen korkeus valitaan niin, että se on vähintään neljäsosan laatan paksuudesta, joka muuten laatalle on valittu.

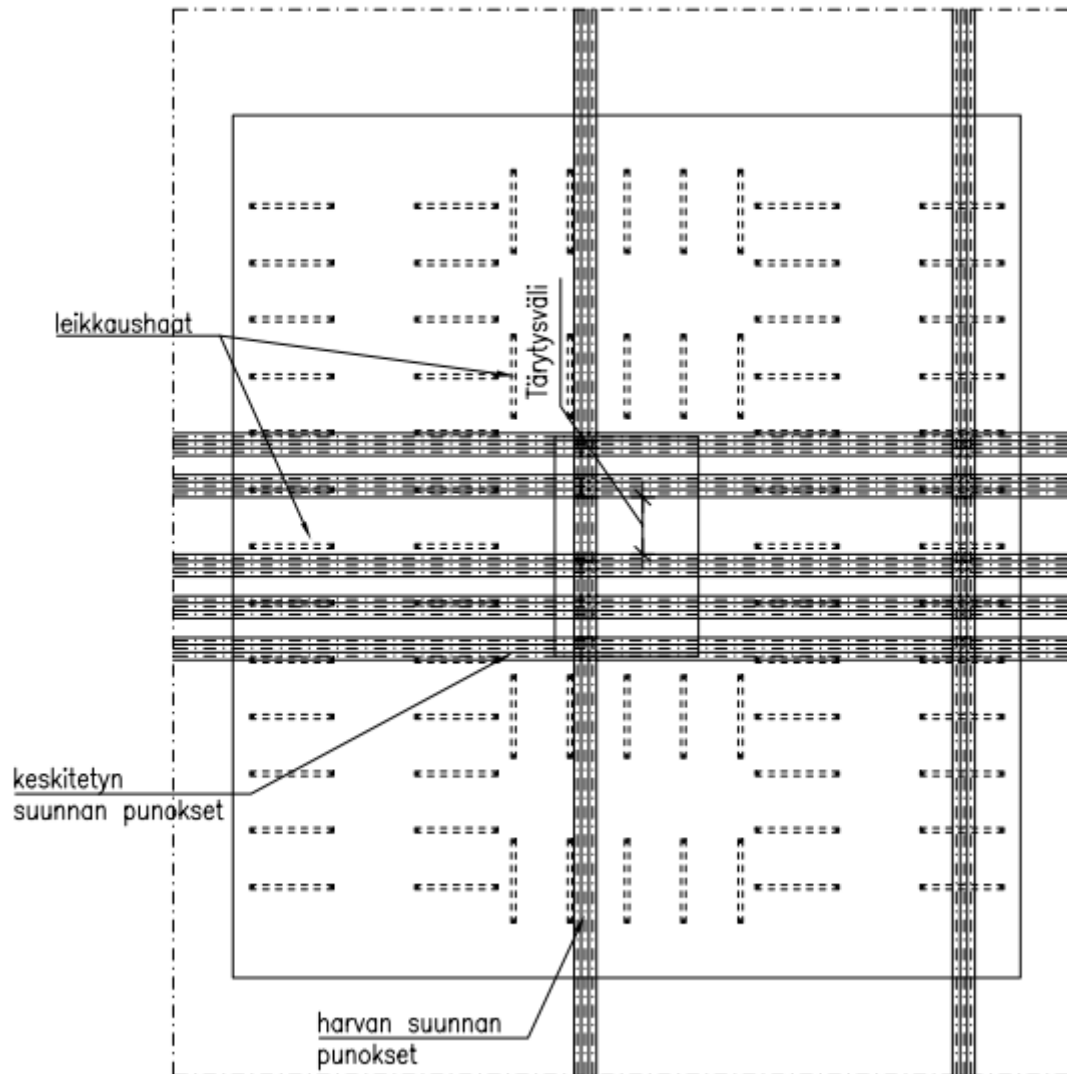
4.2 Punosten ja raudoituksen suunnittelu

Raudoitusten ja punosten sijoittelu vaikuttaa oleellisesti laadukkaan ja toteuttamiskelpoisen suunnitelman laatimiseen. Pahimmassa tapauksessa oikein laskettu lävistysmitoitus voi ilmetä virheelliseksi, jos raudoitus on työmaalla toteuttamiskelvoton tai raudoitteet

ovat sijoitettu suunnitelmissa väärin. Erityistä huomiota on kiinnitettävä esimerkiksi raudoitteiden ja punosten välisiin vapaisiin väleihin.

Jännitetyissä pilarilaatoissa, joissa pilarikuorma on suuri, voi pilarin päällä olla yläpinnassa taivutusmitoituksesta johtuen useita tankoja sekä punosnippuja. Terästen ja punosten keskinäiset välit on asetettava Eurokoodi 2:n vaatimukset täyttäväksi ja lisäksi laatta täytyy olla toteutettavissa ja betonoitavissa luotettavasti.

Pilarin kohdalle kannattaa jättää punos- ja teräsnippujen keskelle n. 100 - 150 mm:n kokoinen vapaa väli kuvan 20 mukaisesti. Tällöin tästä välistä voidaan työmaalla luotettavasti suorittaa massan pudotus sekä betonin täryttäminen. Tämä helpottaa myös alueen raudoittamisen suorittamista, jos esimerkiksi pilarista nousee useita tartuntoja ylöspäin. Kun raudoitteiden sijainnit on etukäteen suunniteltu hyvin, nopeuttaa ja tehostaa tämä myös työmaan toimintaa.



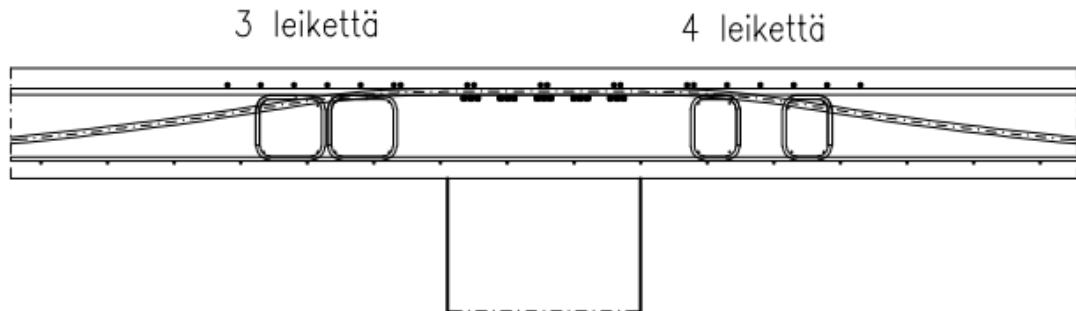
Kuva 20. Punosten sijoittelu pilarin kohdalla.

Punosten sijoittelu tulee suunnitella niin, että keskitetyn kaistan punokset kulkevat kaikki pilarin kohdalta. Punokset voidaan niputtaa enintään neljän punoksen nippuihin ja nippujen väliin tulee jättää vähintään 50 mm väli. Toisen suunnan punokset jaetaan koko laatan leveydelle tasaisesti, mutta kuitenkin niin, että vähintään yksi punosnippu kulkee pilarin kohdalta.

Vahvikkeen, jonka $l_H < 2h_H$, raudoituksen suunnittelu tehdään tapauskohtaisesti. Vahvikkeen on siirrettävä tasolta tulevat kuormat luotettavasti pilarille. Erillistä leikkausraudoitusta ei tässä tapauksessa käytetä.

4.2.1 Raudoitusmäärän laskenta

Raudoitteiden leikkeiden lukumäärä lasketaan siten, että sijoitettaessa esimerkiksi kaksi umpihakaa vierekkäin voidaan vain kolme leikettä käyttää hyödyksi lävistysmitoituksessa. Tähän syynä on se, että raudoitteiden leikkeet tulee olla sijoitettuna tasaisesti koko lävistyvälle alueelle kuvan 23 mukaisesti. Eli esimerkiksi, jos leikkaushaajat sijoitetaan, kuten kuvassa 21, vierekkäisistä leikkeistä molempia ei voida käyttää hyödyksi.



Kuva 21. Hakojen leikkeet sijoitettu vierekkäin.

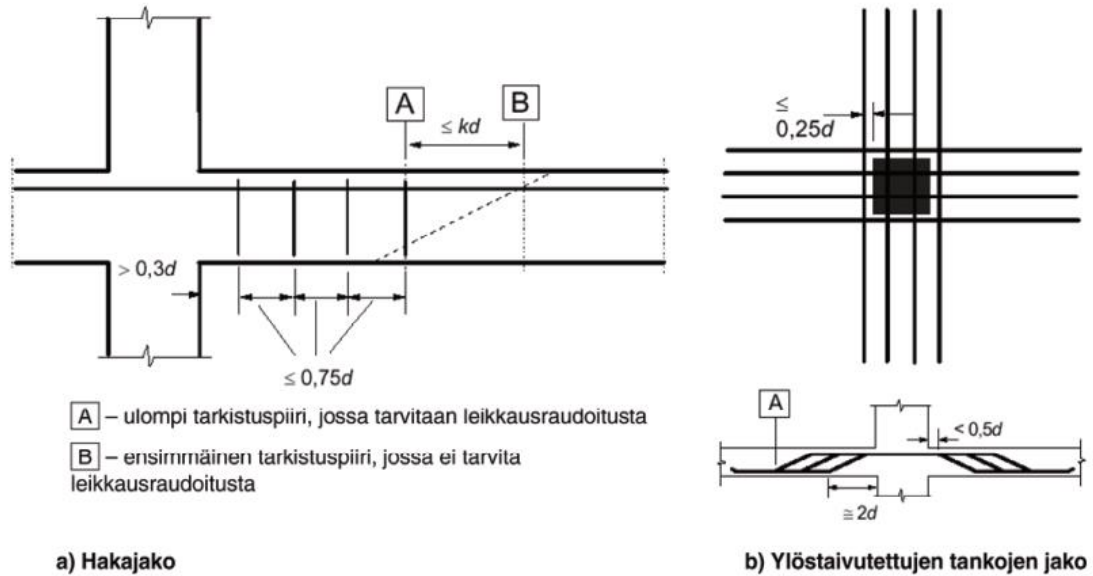
Pääterästen suosituskokona yläpinnassa käytetään 16 mm tai 20 mm tankoja. Raskeammin kuormitetuissa tapauksissa voidaan joutua käyttämään myös 25 mm harjaterästankoja.

Lävistysterästen tankokokona on suositeltavaa käyttää 10 mm:n tai 12 mm:n tankoja, mutta poikkeustapauksissa voidaan käyttää myös 16 mm:n tankoja. Hakojen lukumäärä on suositeltava olla sellainen, ettei raudoitteiden välinen keskiöetäisyys ylitä 100 millimetriä. Mikäli näyttää siltä, että raudoitusmäärä kasvaa liian suureksi, on todennäköisesti laatan paksuus valittu liian matalaksi.

4.2.2 Raudoitteiden sijoittelu

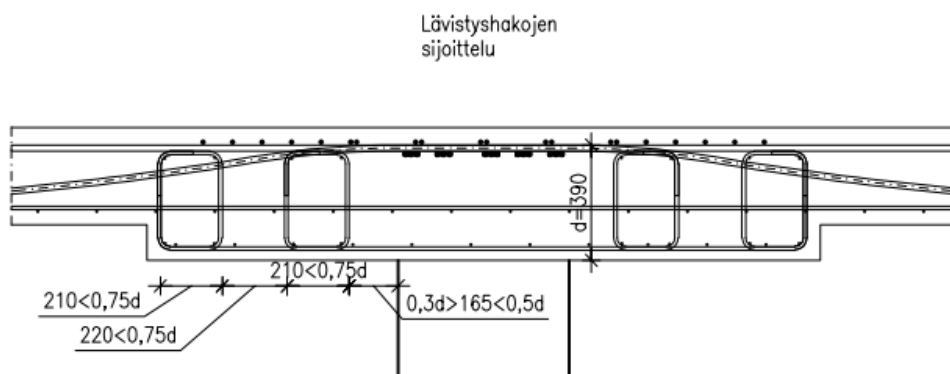
Lävistysraudoitteiden sijoittelu on äärimmäisen tärkeä asia, koska se vaikuttaa oleellisesti lävistyskestävyyteen. Väärin sijoitetut raudoitteet eivät näin toimi rakenteessa oikein.

Eurokoodi 2:ssa on määritetty leikkausraudoitteiden sijoitteluun liittyviä ohjeita. Yleensä jälkijännitetyissä pilarilaatoissa käytetään umpihakoja lävistysraudoitteina, joten tässä työssä ei käsitellä ylös taivutettujen hakojen tai säteittäisten tyssätappien sijoittelua.



Kuva 22. Leikkausraudoituksen sijoittelu rakenteeseen [9, s. 159].

Kuvassa 22 on esitetty, miten hakojen leikkeet tulee sijoitella suhteessa tarkasteltavaan lävistymispiiriin. Haan korkeudessa on huomioitava yläpinnan pääraudoituksen sekä punosien sijoittelu. Kuitenkin haan korkeus on suunniteltava niin, että se ankkuroituu yläpinnan pääraudoituksen tasolle.



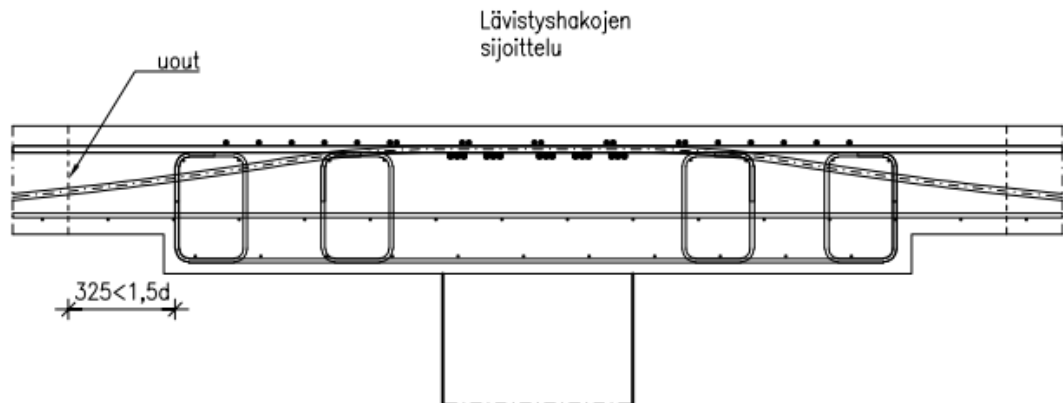
Kuva 23. Esimerkki lävistysraudoitteiden sijoittelusta.

Kuvassa 23 on esitetty esimerkki, miten raudotteet voi sijoitella laatan vahvikkeeseen. Ensimmäinen leike sijoitetaan vähintään $0,3d$:n ja enintään $0,5d$:n päähän pilarin reunasta. Seuraavat leikkeet sijoitetaan niin, että leikkeiden välinen etäisyys on korkeintaan $0,75d$.

Rakentamismääräyskokoelman ohjeessa kerrotaan, että yleensä leikkausraudoitukseen lasketaan mukaan rauditus, joka on enintään $1,5 d$:n päässä pilarin reunasta [10, s. 20]. Muissa lähteissä kuitenkin viitataan, että rauditus voidaan viedä myös $2,0 d$:n päähän pilarin reunasta [3, s. 303].

Leikkausraudoituksen uloin leike on sijoitettava enintään kd :n päähän sen piirin reunasta, jolla laatta kestää leikkausraudoittamattomana. Tarkastuspiiri u_{out} lasketaan aikaisemmin mainitulla kaavalla 36.

Eurokoodissa mainitaan, että kerroin k voidaan määrittää kansallisesti, mutta Suomessa sitä ei ole tehty. Kertoimena tulee siis käyttää eurokoodin suositusarvoa 1,5. Tämä tarkoittaa, että uloimman leikkaushaahan uloin leike tulee sijoittaa enintään $1,5d$:n päähän tarkastuspiiristä u_{out} kuten kuvissa 23 ja 24 on esitetty.

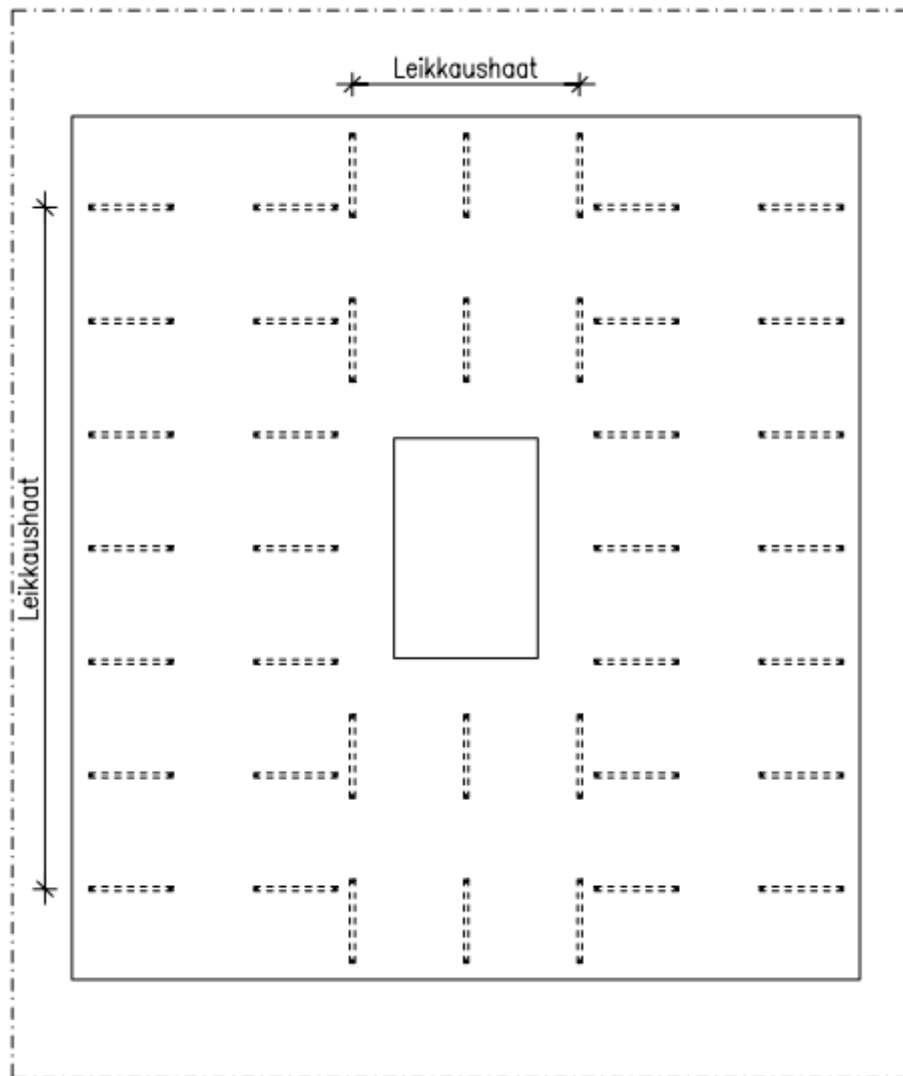


Kuva 24. Uloimman leikkaushaahan sijoittaminen

Leikkaushaajat sijoitetaan tasossa, kuten kuvassa 25 on näytetty. Leikkaushakojen lukumäärä valitaan siten, että leikkeiden kokonaispinta-ala A_{sw} täyttyy. Toisen suunnan haat

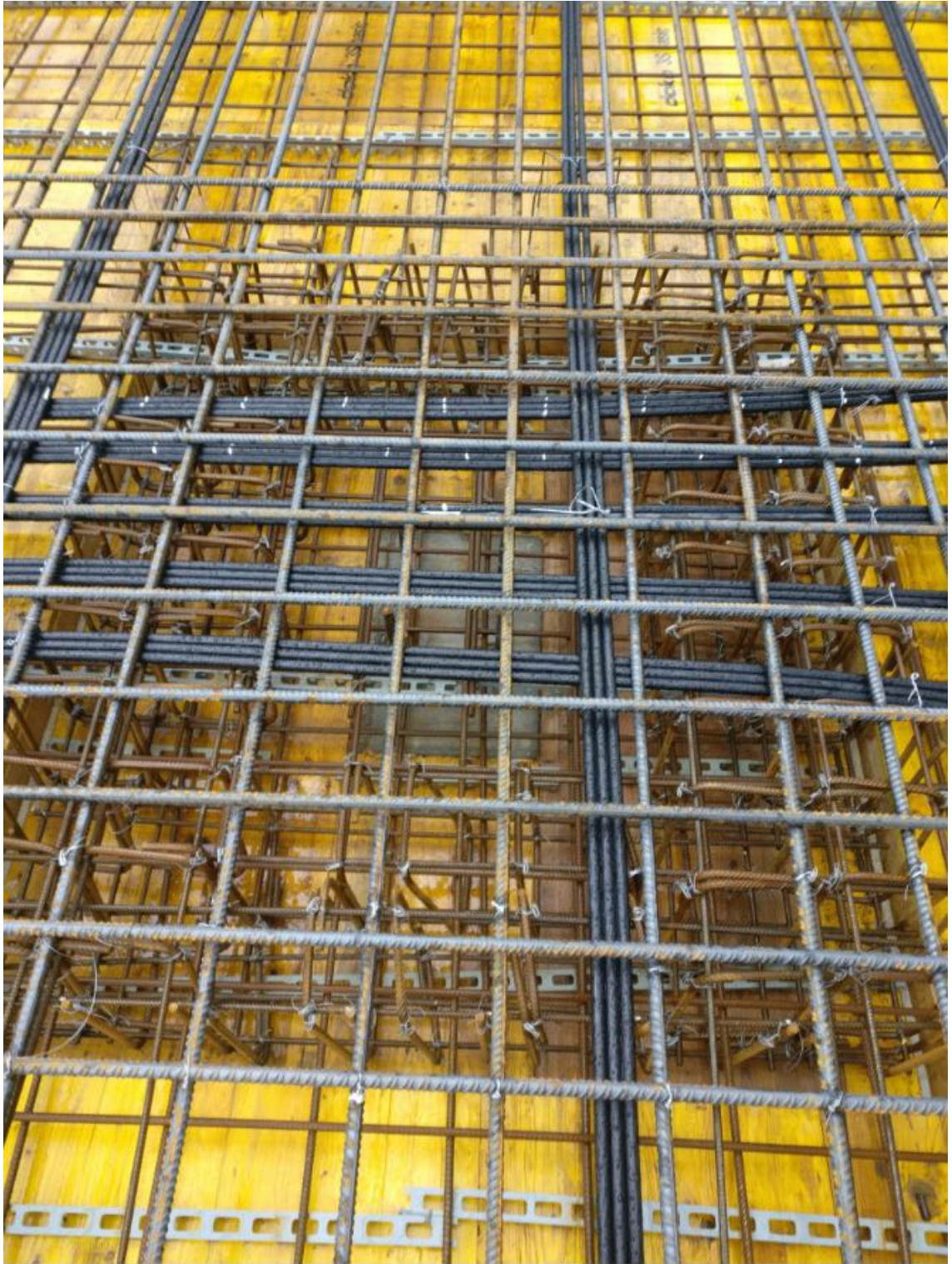
viedään pilarin sivua pidemmälle, jolloin saadaan koko lävistyvälle alueelle leikkausraudoitus. Tällöin ei myöskään tarvitse tehdä vähennystä tehokkaasta lävistyspiiristä

U_{out} .



Kuva 25. Leikkaushakojen sijoittelu.

Leikkaushaan korkeus valitaan siten, että haan nurkkateräksen päälle voidaan suoraan asettaa toisen suunnan yläpinnan teräs. Tässä on kuitenkin huomioitava, että mikäli punosprofiili laskee nopeasti kohti laatan pohjaa, osa leikkaushaan nurkkateräksistä tulee asentaa vasta punosten asentamisen jälkeen.



Kuva 26. Leikkausraudoitettu vahvikeellinen laatta. Valokuva: Jonas Heikkilä.

Kuvassa 26 on esitetty eräs lävistysvahvikkeen toteutus. Kuvasta havaitaan, että raudoitusten välissä on tilaa tärytykselle. Lisäksi haan korkeus on valittu siten, että raudoitus on hyvin ladottavissa suunniteltuun korkoon leikkaushakojen päälle.

4.3 Lävistysvahvikkeen ja raudoituksen toteutus työmaalla

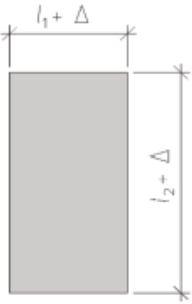
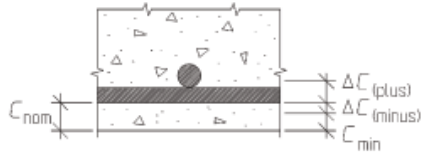
Raudoituksena käytetään standardin SFS 1268 mukaista B500B luokan harjaterästä, jolla on kansallinen tyyppihyväksyntä. Raudoitteet valmistetaan ja taivutetaan standardien mukaisilla menetelmillä.

Jälkijännitetyissä pilarilaatoissa käytetään yleensä eurokoodin mukaista toteutusluokkaa 3 ja toleranssiluokkaa 2. Tämä tarkoittaa sitä, että voidaan käyttää materiaalin osalta pienennettyjä osavarmuuskertoimia.

Tiukempi toteutus- ja toleranssiluokka kuitenkin tarkoittaa myös sitä, että työn toteutus täytyy olla tarkempaa ja huolellisempaa. Kuvassa 27 on esitetty sallitut mittapoikkeamat raudoitteille toleranssiluokassa 1 ja 2. Toteutusluokan 3 ja toleranssiluokan 2 rakenteiden betonoinnin aikana työmaalla on oltava poikkeuksellisen vaativien betonirakenteiden työnjohtajan pätevyyden omaava henkilö.

Raudoitusjärjestys on oleellinen asia, joka vaikuttaa raudoitustyön tehokkuuteen työmaalla. Raudoitusjärjestys on esitetty esimerkiksi kuvassa 23. Seuraavassa lueteltuna esimerkki raudoitusjärjestyksestä laatan vahvikkeen kohdalta:

- Vahvikkeen alapinnan raudoitus
- Laatan alapinnan pääraudoitus
- Leikkaushaajat
- Tiheän suunnan punokset
- Harvan suunnan punokset sekä saman suunnan yläpinnan teräkset
- Tiheän punoskaistan suuntaiset yläpinnan teräkset.

Nro	Poikkeamatyyppi	Kuvaus	Sallittu poikkeama Δ	
			Toleranssi-luokka 1	Toleranssi-luokka 2 Ks. kohta 10.1 (2) Huomautukset
a	 <p>l_i Poikkileikkauksen mitta</p>	<p>Poikkileikkauksen mitat</p> <p>Käytetään palkkeihin, laattoihin ja pilareihin</p> <p>$l_i < 150$ mm ± 10 mm ± 5 mm</p> <p>$l_i = 400$ mm ± 15 mm ± 10 mm</p> <p>$l_i \geq 2\,500$ mm ± 30 mm ± 30 mm</p> <p>Väliarvot saadaan lineaarisesti interpoloimalla</p>		
			<p>HUOM. 1 Perustusten sallitut plus-poikkeamat on määriteltävä toteutuseritelmässä, jos niitä vaaditaan. Miinus-poikkeamat ovat tässä määriteltäviä.</p> <p>HUOM. 2 Tässä standardissa ei ole toleransseja betonista valmistetuille geoteknisille erityisrakenneosille, kuten lieteseinät, porapaalut jne. Kuitenkin tämän standardin soveltamisalaan kuuluvat tavanomaiset maaperän päälle suoraan valettava perustukset (esim. alusbetoni jne.).</p>	
b	 <p>Vaatus:</p> $c_{nom} + \Delta c_{(plus)} > c > c_{nom} - \Delta c_{(minus)} $	<p>Betoniteräsraudoituksen sijainti</p> <p>$\Delta c_{(plus)}$</p> <p>$h \leq 150$ mm +10 mm +5 mm</p> <p>$h = 400$ mm +15 mm +10 mm</p> <p>$h \geq 2\,500$ mm +25 mm^b +20 mm</p> <p>Väliarvot saadaan lineaarisesti interpoloimalla</p>		
			<p>c_{min} = vaadittu betonipeitteen vähimmäisarvo</p> <p>c_{nom} = betonipeitteen nimellisarvo = $c_{min} + \Delta c_{(minus)}$</p> <p>$c$ = todellinen betonipeite</p> <p>Δc = sallittu poikkeama c_{nom}:sta</p> <p>h = poikkileikkauksen korkeus</p>	$\Delta c_{(minus)}$
<p>a Δc_{dev} esitetään standardin EN 1992-1-1 kansallisessa liitteessä. Ellei toisin ole määritetty, $\Delta c_{dev} = 10$ mm. Toteutuseritelmässä voidaan määritellä, sallitaanko tilastollisessa käsittelytavassa tietty prosentuaalinen osuus c_{min}:ä pienempiä betonipeitteen arvoja.</p> <p>b Perustuksissa ja niiden rakenneosissa raudituksen betonipeitteen sallittu plus-poikkeama voidaan nostaa 15 mm:iin. Sallitut miinus-poikkeamat ovat tässä määriteltäviä.</p>				

Kuva 27. Rakenteen ja raudoitteiden sallittu mittapoikkeamat [12, s. 33].

Tarkempi toteutusvaatus työmaalla tarkoittaa myös sitä, että raudoitustyö täytyy tarkastaa huolellisesti. Raudoitustarkastuksia on hyvä pitää vähintään yksi yhtä valualuetta kohti. Tarkastuksessa tarkastetaan koko alueen rauditus huolellisesti ja siitä tehdään tarkastuspöytäkirja. Lävistysalueen raudituksen kohdalla on hyvä ottaa huomioon seuraavat asiat:

- leikkaushakojen sijainti

- leikkaushakojen lukumäärä
- pilarin alueen betonoitavuus
- punosten sijoittelu ja korkoasema hakoihin nähden
- yläpinnan terästen korkoasema
- mahdollinen pilarin tartuntatapin irrotus ja laakerointi.

Raudoitustarkastuksessa on hyvä ottaa valokuvia edellä mainituista asioista. Mikäli raudoitus ei vastaa suunnitelmia, suunnittelija kirjaa puutteet tarkastuspöytäkirjaan. Vastavaa betonityön johtaja kuittaa puutteet korjatuiksi ennen valua. Jos työmaalla on vakavia puutteita raudoitustyössä, voi suunnittelija kirjata työn valukelvottomaksi. Tällöin tehdään vielä uusintatarkastus ennen valua.

4.3.1 Muottityö

Muottityö tehdään yleensä vanerista ja muotin tuenta erillisen tuentasuunnitelman mukaisesti. Muottityö ei eroa juurikaan normaalista paikallavaletun betonirakenteen muottityöstä.



Kuva 28. Lävistysvahvikkeellinen muotti sekä pilarin alueen raudoitusta. Valokuva: Jonas Heikkilä

Kuvassa 28 on esitetty erään kohteen muottityötä ja raudoitusta vahvikkeen kohdalta. Muottityössä tulee huomioida pilarin oikea korko suhteessa laatan alapintaa. Mikäli pilarin valu on jäänyt liian korkeaksi ja pilarin kohdalle on suunniteltu laakerointi ja irrotus, voi olla, ettei irrotus ja laakerointi toimi, kuten on suunniteltu.

4.3.2 Raudoitus- ja betonointityö

Raudoitus- ja betonointityö on suoritettava huolellisesti ja raudoitteiden mittoja ja asennuspaikkoja on noudatettava tarkasti. Tämä sen vuoksi, että suunnitelmissa olevat mitat ja vaatimukset täyttyvät. Raudoitteiden sallitut mittapoikkeamat ovat esitetty kuvassa 27.

Betonointityötä varten on tärkeää, että erityisesti laatan yläpinnan tangot ovat sijoitettu suunnitelman mukaisiin kohtiin ja terästen keskinäiset välit täyttävät vaatimukset. Yleensä betoniluokkana käytetään C30/37 tai C35/45, mutta joskus lävistysmitoituksen

takia pilarin kohdalle voi joutua valitsemaan suuremman lujuuskuokan betonia kuin muualle. Tämä ei kuitenkaan ole suositeltavaa, vaan koko laatan alueella tulisi lähtökohtaisesti käyttää samaa betoniluokkaa.

Betonin huolellinen täryttäminen on tärkeää, jotta varmistutaan, että betoni leviää joka paikkaan eikä esimerkiksi alapintaan jää aukkoja, johon betoni ei ole tunkeutunut. Täryttäminä käytetään 50-80 mm halkaisijaltaan olevaa tärytintä. Suunnitelmissa on huomioitava, että laatan yläpintaan on jätetty noin puolen metrin välein 100 mm leveitä tärytysaukkoja, jossa ei ole tankoja estämässä tärytystä.

Betonimassan valu tulee suorittaa korkeintaan noin 0,3 metrin kerroksina kerrallaan. Betonimassa sijoitetaan kerrallaan oikeaan paikkaan eikä massaa tule siirtää täryttimellä. Muutoin riskinä on massan kiviaineksen erottuminen. Lisäksi massan pudotuskorkeus on pidettävä korkeintaan 1,0 metrissä [1, s. 317-318].

Kuten luvussa 4.3 on todettu, betonoinnin aikana toteutusluokan 3 rakenteissa paikalla on oltava poikkeuksellisen vaativan betonityönjohtajan pätevyyden omaava henkilö. Vastaava betonityönjohtaja laatii jokaisesta valualueesta erillisen betonointisuunnitelman, jonka hän esittää rakennesuunnittelijalle kommentoitavaksi.

Raudoituksen asennusjärjestykseen on kiinnitettävä huomiota ja asennusjärjestys kannattaa määritellä jo suunnitelmissa. Raudoituksen asennusjärjestyksestä on annettu esimerkki tässä työssä luvussa 4.3.

Raudoituksen tuenta on oleellinen asia, jotta raudoitteiden suojabetonietäisyydet täyttyvät sekä ne ovat rakenteellisesti oikeassa paikassa. Raudoitus tuetaan raudoitusvälikkein. Raudoitusvälike valitaan suunnittelijan antaman betonipeitteen nimellisarvon mukaan. Lisäksi välikkeitä on asennettava tarpeellinen määrä alapinnan raudoituksen alle, jotta ne kestävät työnaikaisen kuormat raudoitusverkkojen päällä.

5 Johtopäätökset

Eurokoodi 2:n ja Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaiset lävistysmitoitukset eroavat melko paljon toisistaan. Vanhaa lävistysmitoitustapaa ei voida juurikaan soveltaa eurokoodin mukaisessa, vaan mitoitus on opeteltava tekemään alusta asti uudestaan.

Suunnittelijan on hyvä perehtyä kirjallisuuteen sekä eurokoodiin huolellisesti ennen kuin tekee lävistysmitoitusta ensimmäistä kertaa. Suunnittelun apuna kannattaa käyttää esimerkiksi tätä opinnäytetyötä ja tämän työn lähdeteoksenakin toiminutta by 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus julkaisua.

Esimerkkilaskelmat osoittavat, että kyseessä olevilla pilarin ja laatan dimensioilla sekä leikkausraudoituksella Eurokoodi 2:n mukaan mitoitettaessa saadaan hieman korkeampia lävistyskestävyyksiä. Varsinaisia johtopäätöksiä ei kuitenkaan voida tehdä näiden kahden esimerkkilaskelman perusteella. Tähän tarvittaisiin useamman erilaisen tapauksen laskemista ja analysointia.

Kuitenkin esimerkiksi eurokoodin mukaan mitoitettaessa, joudutaan lävistysvahvikkeen leveys valitsemaan hieman leveämmäksi. Tämä johtuu siitä, että leikkaushalkeaman kulma on loiva ja lävistyspiirin etäisyys valitaan huomattavasti etäämpää pilarista kuin Rakentamismääräyskokoelman mukaan. Suurimmat eroavaisuudet liittyvät muutenkin juuri lävistyspiirien määrittämiseen. Vanhemmassa Rakentamismääräyskokoelman osassa B4 ei otettu kantaa ollenkaan siihen, miten lävistysvahvike tulisi käsitellä mitoituksessa. Tätä asiaa miettiessään rakennesuunnittelijat ovat joutuneet itse soveltamaan mitoituksen kulkua. Eurokoodi 2:ssa on esitetty kuitenkin melko kattavasti lävistysvahvikkeen huomioimista mitoituksessa.

Suurimmat tulkinnanvaraisuudet Eurokoodi 2:n mukaisessa mitoituksessa liittyvät myös tähän lävistyspiirin määrittämiseen. Tavanomaisen tasapaksun laatan tapauksessa ei juurikaan tulkinnanvaraisuutta ole, mutta kun lisätään lävistysvahvike, asia muuttuu hieman monimutkaisemmaksi. Asiasta monimutkaisen tekee se, että lävistyspiirin laskemiseen on tehty useita erilaisia kaavoja ja kaavojen suureiden merkintätavat eivät ole kovin selkeitä. Rakennesuunnittelijan täytyy lukea huolella eurokoodin teksti ja kuvat, jotta eurokoodin merkitys selviää.

Varsinainen tulkinnanvaraisuus liittyy siihen, että suorakaidepilarin tapaukseen, jossa vahvikkeen sivumitta on suurempi kuin kaksi kertaa vahvikkeen korkeus, ei ole minkäänlaista kantaa. Tässä tapauksessa rakennesuunnittelijan on sovellettava olemassa olevaa tietoa. Pyöreän pilarin tapaukseen Eurokoodi 2:ssa on selkeät laskentakaavat. Tosin tässäkin jäi hieman epäselväksi voiko pyöreän pilarin tapauksessa käyttää suorakaiteen muotoista vahviketta. Lävistysvahvikkeen piirin etäisyyden suure r_{cont} viittaisi siihen, että lävistyspiirin muoto olisi pyöreä.

Toinen tulkinnanvarainen asia on leikkausraudoituksen sijoittelu. Eurokoodi 2:ssa ei kerrota kovin suoraan, miten hakaraudoitteilla toteutettu raudoitus tulisi sijoittaa yksiselitteisesti. Eurokoodi 2 ottaa enemmän kantaa siihen, miten niin sanotut tyssätappirauδοitteet tulee sijoittaa. Kuvassa 22 on esitetty eurokoodin ohjeistus siitä, miten hakaraudoitteet tulee sijoitella. Tämän työn tuloksena kuvissa 23 ja 24 on esitetty ohjeet siitä, miten raudoitteet voidaan sijoitella. Työn ohessa huomattiin myös, että raudoitteiden sijoitteluun liittyvissä ohjeissa on ristiriita Eurokoodi 2:n, Rakentamismääräyskokoelman ohjeen ja muiden lähteiden välillä. Rakentamismääräyskokoelman uudessa ohjeessa kerrotaan, että raudoitteet sijoitellaan yleensä $1,5d:n$ päähän pilarin reunasta. Tämä on kuitenkin ristiriidassa esimerkiksi Eurokoodi 2:sta tulevalla ohjeella, joka on esitetty tässä työssä kuvassa 22.

Yhtenä huomioitavana asiana lävistysmitoituksen suorittamisessa voidaan todeta olevan tarkasteltavan poikkileikkauksen raudoitussuhteen huomioonottaminen. Varsinkin lävistysvahvikkeen tapauksissa lävistyspiirien etäisyydet voivat olla melko kaukanakin pilarin reunasta. Siksi on varmistuttava siitä, että laskennassa käytettävä raudoitussuhde varmasti toteutuu myös varsinaisessa rakenteessa. Tavallisesti pilarilaatoissa keskipilarin yläpinnan raudoitus on jaettu noin kahden metrin matkalle. Joissakin tapauksissa lävistyspiiri voi ulottua tuota kahden metrin aluetta leveämmälle, jolloin yläpinnan raudoituksen jakoaluetta tulisi levittää sen verran, että raudoitus on jaettu tasaisesti koko alueelle.

Lopputuloksena voidaan todeta, että tälle työlle oli tarve, koska aikaisempaa tutkimusta varsinkin jälkijännitetyn lävistysvahvikkeellisen pilarilaatan tapauksesta ei ole julkaistu. Jo ennen työn aloittamista oli useita kysymyksiä, jotka liittyivät lävistysmitoitukseen Eurokoodi 2:n mukaan. Työn edetessä ilmaantui joitakin uusia kysymyksiä, ja aihetta lisää tutkimalla löydettiin tärkeimpiin kysymyksiin vastaukset. Joitakin edellä mainittuja epäselvyyksiä jäi vielä tutkimatta tässä työssä, mutta niihin on pyrittävä saamaan vastaus jatkossa rakennesuunnitteluprojektien ohessa.

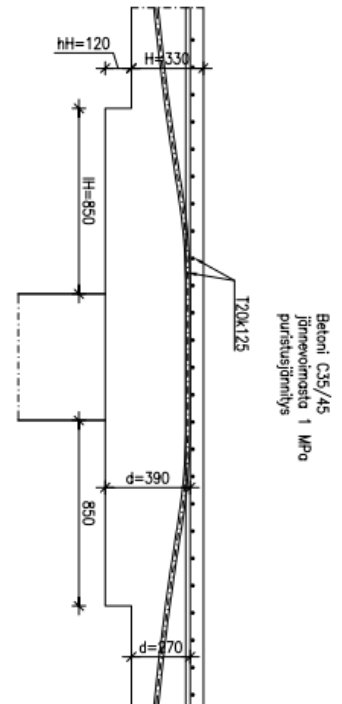
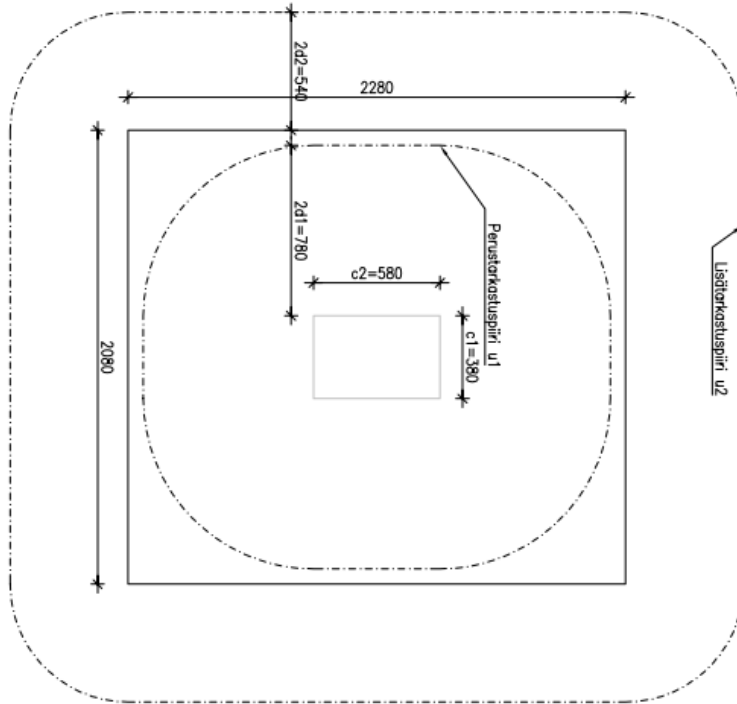
Tätä kirjoittaessa laskentaohjelmasta on julkaistu ensimmäinen versio, jota voidaan käyttää suunnitteluprojekteissa. Laskentaohjelman tekemisessä oli myös hankaluuksia johdun siitä, että lävistysmitoituksessa on hyvin monia erilaisia laskentatapauksia. Näiden yhteensovittaminen yhteen laskentaohjelmaan vaatii hieman lisää aikaa ja tätä laskentaohjelmaa tullaan päivittämään jatkossa työn ohessa.

Lopuksi voidaan todeta, että työ oli onnistunut, vaikka aivan kaikkiin kysymyksiin ei löydetty selkeää ratkaisua. Yrityksen rakennesuunnittelijoille on nyt olemassa työkalu ja ohjeistus, miten Eurokoodi 2:n ohjeita tulee soveltaa. On kuitenkin otettava huomioon, että tämä työ ei poista sitä, että rakennesuunnittelijoiden on itse huolellisesti tutustuttava eurokoodin tekstiin ja Rakentamismääräyskokoelman uusiin ohjeisiin.

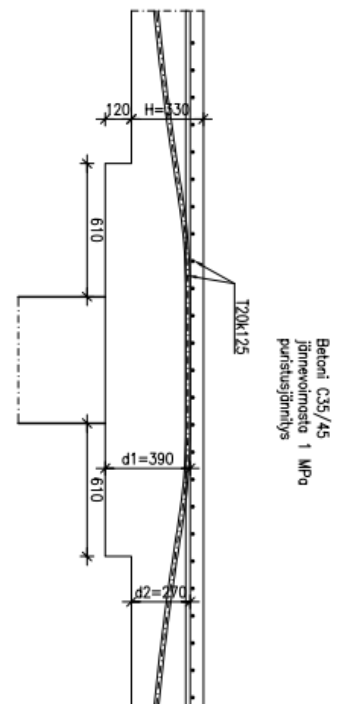
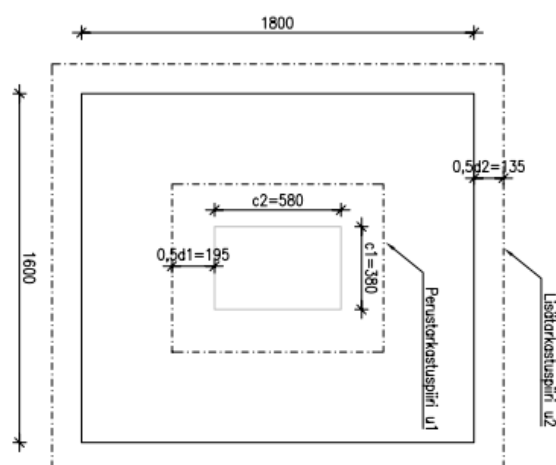
Lähteet

- 1 Suomen Betoniyhdistys 2004. Betonitekniiikan oppikirja 2004 by201. Helsinki: Suomen betoniyhdistys r.y.
- 2 Ancon building products. 2014. Shearfix Punching Shear Reinforcement for the Construction Industry. <https://www.ancon.co.uk/products/punching-shear-reinforcement>.
- 3 Leskelä, Matti V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008 by210. Helsinki: Suomen betoniyhdistys r.y.
- 4 Aalami, Bijan O. 2014. Post-tensioned buildings, Design and construction, International edition.
- 5 Gamble, William L., Park, Robert. 2000. Reinforced Concrete Slabs. 2nd ed. Yhdysvallat: John Wiley & Son, Inc.
- 6 Ceder, Esa. 2009. Normiperusteinen teräsbetonirakenteen leikkaus- ja lävistysmitoitus. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 7 Suomen Betoniyhdistys 1988. Tartunnattomat jänteet betonirakenteissa. Suunnittelu- ja rakentamisohteet sekä pilarilaataston esimerkki. Helsinki: Suomen betoniyhdistys r.y.
- 8 Ympäristöministeriö. 2004 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Betonirakenteet B4, Ohteet 2005. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 9 SFS-EN 1992-1-1. 2005. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat määräykset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 10 Ympäristöministeriö. 2016 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Betonirakenteet. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 11 ACI 423.3R-96. 1996. Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons. Farmington Hills: American Code Institute.
- 12 SFS-EN 13670. 2010. Betonirakenteiden toteutus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 13 ACI 318M-05. 2005 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills: American Code Institute.

Laskelmaesimerkkitaupukset



Esimerkki EC2



Esimerkki RakMK B4

Esimerkkilaskelma Rakentamismääräyskokoelman osan B4 mukaan

$$H := 330\text{mm}$$

$$c1 := 380\text{mm}$$

$$c2 := 580\text{mm}$$

$$hH1 := 610\text{mm}$$

$$hH2 := 610\text{mm}$$

$$hH := 120\text{mm}$$

$$d1 := 390\text{mm}$$

$$d2 := 270\text{mm}$$

$$u1 := 2 \cdot (c1 + c2) + 8 \cdot (0.5 \cdot d1) = 3480\text{mm}$$

$$A_u := u1 \cdot (H + hH) = 1.566\text{m}^2$$

$$k1 := 1.6 - \left(d1 \cdot \frac{1}{\text{m}} \right) = 1.21$$

$$k2 := 1.6 - \left(d2 \cdot \frac{1}{\text{m}} \right) = 1.33$$

$$e0 := 0\text{mm}$$

$$\beta := \frac{0.4}{1 + 1.5 \cdot \frac{e0}{\sqrt{A_u}}} = 0.4$$

$$V_c := k1 \cdot \beta \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot u1 \cdot d1 \cdot f_{ctd} = 1504\text{kN}$$

$$V_s := A_{sv} \cdot f_{yd} \cdot \sin(\alpha) = 2034\text{kN}$$

$$V_{cs} := \min(2 \cdot V_c, 0.25 \cdot V_c + V_s) = 2410\text{kN}$$

Lisätarkastuspiiri

$$u2 := 7880\text{mm}$$

$$V_{c2} := k2 \cdot \beta \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot u2 \cdot d2 \cdot f_{ctd} = 2591\text{kN}$$

$$f_{ck} := 35\text{MPa}$$

$$f_{ctd} := 1.66\text{MPa}$$

$$f_{yk} := 500\text{MPa}$$

$$f_{yd} := 300\text{MPa}$$

$$\gamma_s := 1.1$$

$$\gamma_c := 1.35$$

$$A_{sx} := 6.16 \cdot 314\text{mm}^2 = 1934\text{mm}^2$$

$$A_{sy} := 7.76 \cdot 314\text{mm}^2 = 2437\text{mm}^2$$

$$\rho_x := \frac{A_{sx}}{(c1 + d1) \cdot (H + hH)} = 0.0056$$

$$\rho_y := \frac{A_{sy}}{(c2 + d1) \cdot (H + hH)} = 0.0056$$

$$\rho_{px} := 1 \cdot \frac{\text{MPa}}{f_{yk}} = 0.0020$$

$$\rho_{py} := 1 \cdot \frac{\text{MPa}}{f_{yk}} = 0.0020$$

$$\rho := \sqrt{(\rho_x + \rho_{px}) \cdot (\rho_y + \rho_{py})} = 0.0076$$

Leikkausraudoitus

$$n := 60$$

$$A_{sv} := n \cdot 113\text{mm}^2 = 6780\text{mm}^2$$

$$\alpha := \frac{\pi}{2}$$

Esimerkkilaskelma Eurokoodi 2:n ja Rakentamismääräyskokoelman ohjeen mukaan

$$H := 330\text{mm}$$

$$c1 := 380\text{mm}$$

$$c2 := 580\text{mm}$$

$$IH1 := 610\text{mm}$$

$$IH2 := 610\text{mm}$$

$$hH := 120\text{mm}$$

$$dy1 := H + hH - 50\text{mm} = 400\text{-mm}$$

$$dz1 := H + hH - 70\text{mm} = 380\text{-mm}$$

$$d1 := \frac{dy1 + dz1}{2} = 390\text{-mm}$$

$$dy2 := H - 50\text{mm} = 280\text{-mm}$$

$$dz2 := H - 70\text{mm} = 260\text{-mm}$$

$$d2 := \frac{dy2 + dz2}{2} = 270\text{-mm}$$

$$IH1 > 2 \cdot hH$$

$$u1 := 6821\text{mm}$$

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200\text{mm}}{d1}} = 1.716$$

$$k1 := 0.1$$

$$CR_{dc} := \frac{0.3 \left(1.5 + \frac{D}{d1} \right)}{\gamma_c \left(4 + \frac{D}{d1} \right)} = 0.115$$

Betonin lävistyskestävyys

$$\nu R_{dc} := CR_{dc} \cdot k \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \text{MPa}^2 \right)^{\frac{1}{3}} + \sigma_{cp} \cdot k1 = 0.634 \cdot \text{MPa}$$

$$VR_{dc} := \nu R_{dc} \cdot u1 \cdot d1 = 1686 \cdot \text{kN}$$

$$f_{ck} := 35\text{MPa}$$

$$f_{yk} := 500\text{MPa}$$

$$\gamma_s := 1.1$$

$$\gamma_c := 1.35$$

$$f_{ywd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 454.545 \cdot \text{MPa}$$

$$D := \sqrt{c1 \cdot c2} = 469.468 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sy} := 21.76 \cdot 314\text{mm}^2 = 6.833 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sz} := 23.36 \cdot 314\text{mm}^2 = 7.335 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_y := \frac{A_{sy}}{(c1 + 6 \cdot d1) \cdot (H + hH)} = 0.0056$$

$$\rho_z := \frac{A_{sz}}{(c2 + 6 \cdot d1) \cdot (H + hH)} = 0.0056$$

$$\rho_l := \sqrt{\rho_y \cdot \rho_z} = 0.0056$$

$$\sigma_{cp} := 1\text{MPa}$$

$$f_{ywdef} := 250\text{MPa} + 0.25 \cdot d1 \cdot \frac{1 \cdot \text{MPa}}{\text{mm}} = 347.5 \cdot \text{MPa}$$

Leikkausraudoitettu lävistyskestävyys

$$n := 60$$

$$A_{sw} := n \cdot 113 \text{ mm}^2 = 6780 \cdot \text{mm}^2$$

$$\alpha := \frac{\pi}{2}$$

$$k_{max} := 1.6$$

$$CR_{ds} := \frac{0.3 \left(1.5 + \frac{D}{d1} \right)}{4.5 \cdot \gamma_c \cdot \left(4 + \frac{D}{d1} \right)} = 0.026$$

$$\nu R_{dc1} := CR_{ds} \cdot k \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \text{MPa}^2 \right)^{\frac{1}{3}} + \sigma_{cp} \cdot k1 = 0.219 \cdot \text{MPa}$$

$$\nu R_{dcs} := \min \left(k_{max} \cdot \nu R_{dc}, 0.75 \cdot \nu R_{dc1} + A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot \frac{1 \cdot \sin(\alpha)}{u1 \cdot d1} \right) = 1.014 \cdot \text{MPa}$$

$$VR_{dcs} := \nu R_{dcs} \cdot u1 \cdot d1 = 2697 \cdot \text{kN}$$

Lisätarkastuspiiri

$$u2 := 12113 \cdot \text{mm}$$


$$CR_{dc2} := \frac{0.3 \left(1.5 + \frac{D}{d2} \right)}{\gamma_c \cdot \left(4 + \frac{D}{d2} \right)} = 0.125$$

$$k2 := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d2}} = 1.861$$

$$\nu R_{dc2} := CR_{dc2} \cdot k2 \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \text{MPa}^2 \right)^{\frac{1}{3}} + \sigma_{cp} \cdot k1 = 0.729 \cdot \text{MPa}$$

$$\underline{\underline{VR_{dc2}}} := \nu R_{dc2} \cdot u2 \cdot d2 = 2383 \cdot \text{kN}$$

Excel-laskentaohjelman tuloste

	EC2 lävistys- mitoitus	Työn nro: YAMK opinnäytetyö	Rakennelaskelma
		Tekijä: Atte Heiskanen	Pos.:
		Päiväys: 18.6.2018	Sivu
Rakennuskohde:	Sisältö:		
Esimerkkilaskelma	Pilari 380x580		
Jälkijännitetty pilarilaatta keskipilari	Vahvike h=120mm		
Laatinut: Atte Heiskanen, xx.xx.2017, v0.9			
Materiaalit			
f_{ck} 35 MPa	Osavarmuusluvut	Pienennetyt	f_{ywd} 454.55 MPa
f_{yk} 500 MPa	γ_s 1.1		$f_{ywd,ef}$ 347.5 MPa
	γ_c 1.35		
Geometria			
Laatan paksuus	h	330 mm	
Pilarin muoto	Pilari	Suorakaide	
Pilarin halkaisija tai	c	500 mm	
Pilarin leveys	c_1	380 mm	Piiri u_1 6821 mm
Pilarin korkeus	c_2	580 mm	
Onko vahvike?	Vahvike	Kyllä	Tehoton piiri 0 mm
Vahvikkeen leveys	l_{v1}	850 mm	
	l_{v2}	850 mm	
Vahvikkeen korkeus	h_v	120 mm	
Rauditus			
Lävistysraudoitus	Lävistysraudoitettu		
Vetorausoititus y p kpl y	22	φ_1 20	d_j 400 mm
Vetorausoititus y p kpl z	23	φ_2 20	d_z 360 mm
Lävistysraudoitus	60	φ 12	kulma 90°
			d_{st} 390 mm
			A_{sc} 6836 mm ²
			A_{st} 7339 mm ²
			A_{st} 6786 mm ²
			ρ_{ly} 0.0056
			ρ_{lz} 0.0056
			ρ_1 0.0056
Kuomat			
Mitoittava lävistysvoima	V_{Ed} 2200 kN	β -kerroin 1	
Keskeinen puristusjännitys	σ_c 1.0 MPa	σ_{cp} 1.0 MPa	
Keskeinen puristusjännitys	σ_c 1.0 MPa		
Leikkausjännitys perustarkastus	V_{Ed} 0.827 MPa		
Leikkausjännitys lisätarkastuspi	$V_{Rd,c}$ 0.673 MPa		
Tulokset peru starkastu spiiri			
			$k = \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ $C_{Rd,c} = \frac{0,3 \left(\frac{D}{d} + 1,5\right)}{\gamma_c \left(\frac{D}{d} + 4\right)}$ $v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp})$ $V_{Rd,c} = v_{Rd,c} \cdot u_1 \cdot d$
Lävistysraudoitettu			$C_{Rd,c} = \frac{0,3 \left(\frac{D}{d} + 1,5\right)}{4,5 \cdot \gamma_c \left(\frac{D}{d} + 4\right)}$ $v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp})$ $v_{Rd,cs} = 0,75 \cdot v_{Rd,c} + 1,5 \cdot A_{sv} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \frac{1}{u_1 \cdot d} \sin \alpha \leq k_{max} v_{Rd,c}$ $V_{Rd,cs} = v_{Rd,cs} \cdot u_1 \cdot d$
NA 6.4.5(1)	K_{max} 1.6		
NA 6.4.4(1) kaava (1.2)	$C_{Rd,c}$ 0.0257		
EC2 (6.47)	$V_{Rd,c}$ 0.2186 MPa		
EC2 (6.52)	$V_{Rd,cs}$ 1.014 MPa		
	$V_{Rd,cs}$ 2697 kN		
			Käyttöaste 82 %

Tulokset lisätarkastuspiiri	
Lisätarkastuspiiri <input type="text" value="12113"/> mm	
Rauditus	
Lävistysraudoitus	Lävistysraudoittamaton
Vetoraudoitus yp kpl y	<input type="text" value="22"/> φ_y <input type="text" value="20"/>
Vetoraudoitus yp kpl z	<input type="text" value="23"/> φ_z <input type="text" value="20"/>
Lävistysraudoitus	<input type="text" value="80"/> φ <input type="text" value="12"/>
d_y	<input type="text" value="280"/> mm
d_z	<input type="text" value="260"/> mm
kulma	<input type="text" value="90"/> °
d_{aama}	<input type="text" value="270"/> mm
A_{sc}	<input type="text" value="6836"/> mm ²
A_{st}	<input type="text" value="7339"/> mm ²
A_{st}	<input type="text" value="9048"/> mm ²
ρ_y	<input type="text" value="0.0056"/>
ρ_z	<input type="text" value="0.0056"/>
ρ	<input type="text" value="0.0056"/>
$V_{Rd,c}$	<input type="text" value="2383"/> kN
$V_{Rd,c}$	<input type="text" value="0.729"/> MPa
Käyttöaste	<input type="text" value="92"/> %