

Joonas Koskimies

Ristikkomenetelmä (Strut-and-tie modeling)

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinööriytyö

28.4.2014

Tekijä(t) Otsikko	Joonas Koskimies Ristikkomenetelmä (Strut-and-tie modeling)
Sivumäärä Aika	54 sivua + 3 liitettä 28.4.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Aki Kemppainen, Projektipäällikkö Timo Leppänen, Lehtori
<p>Tämän opinnäytetyön toimeksianto saatiin Wise Group Finland Oy:ltä. Opinnäytetyössä perehdyttiin ristikkomenetelmään ja sen soveltamiseen rakennesuunnittelussa talonrakennuskohteissa. Tavoitteena oli luoda työ, joka esittelee ristikkomenetelmän teorian ja menetelmän soveltamiskohteita teräsbetonirakenteiden mitoittamiseen. Osana työtä myös tehtiin laskelmat ja toteutettiin kuormituskoe yhdenmuotoisille aukollisille seinämäisille palkeille, joiden mitoituksessa käytettiin ristikkomenetelmän mukaisia erilaisia ristikkomalleja.</p> <p>1980-luvulla varsinainen ristikkomenetelmä kehitettiin perustana Mörschin (1920) ristikkokanalogia. Ajatuksena oli kehittää menetelmä, jonka avulla voidaan mallintaa teräsbetonirakenteen sisäiset voimasuureet kaikenlaisista rakenteista yhtäläisellä tavalla. Ristikkomenetelmässä teräsbetonirakenne mallinnetaan murtorajatilan ulkoista kuormaa siirtävien raudoituksesta koostuvien vetosauvojen ja betonisten puristussauvojen muodostamien yksinkertaisten voimamonikulmioiden avulla.</p> <p>Ristikkomenetelmää voidaan hyödyntää erityisesti betonirakenteiden yksityiskohtien suunnittelussa, epäjatkuvuuskohdissa, joissa rakenteen jännitys jakaumat ja muodonmuutokset eivät ole lineaarisia. Kuitenkin ristikkomenetelmällä pystytään yhtenäisesti mitoittamaan koko rakenne eli myös rakenteen osat, joissa jännitys jakaumat ja muodonmuutokset ovat lineaarisia.</p> <p>Kuormituskokeen tavoitteena oli saada käytännön kokemusta ristikkomallien valitsemisesta ja ristikkomenetelmän käyttämisestä mitoituksessa. Seinämäinen palkki on tyypillinen esimerkki suuresta epäjatkuvuusalueesta.</p>	
Avainsanat	Ristikkomenetelmä, strut and tie malli

Author(s) Title	Joonas Koskimies Strut-and-tie modeling
Number of Pages Date	54 pages + 3 appendices 28 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Aki Kemppainen, Project Manager Timo Leppänen, Senior Lecturer
<p>The thesis was commissioned by Wise Group Finland OY. The thesis studies the strut-and-tie modeling and its application in structural design of the house building projects. The goal was to introduce the theoretical background on strut-and-tie modeling and applications of the method in designing reinforced concrete structures. As a part of the thesis, calculations and the loading tests for deep beams with an opening were done, using the Strut-and-tie method.</p> <p>In the 1980s Strut-and-tie modeling was developed based on the Morsch (1920) truss analogy. The idea was to develop a method that could be used in the designing of all kinds of concrete structures consistently. STM is a design method that idealizes reinforced concrete structure as a truss that resists the applied forces. The strut-and-tie models consist of concrete struts which resist compressive stress and reinforcing steel ties which resist tensile stress.</p> <p>Strut-and-tie modeling is an appropriate design method for specific concrete structure details, where stress distributions and deformations are not linear. However, with the strut-and-tie method it is possible to design the whole structure consistently, also the parts of the structure where deformations are linear.</p> <p>The goal of the loading test was to gain practical experience in using the method and selecting an appropriate strut-and-tie model. The deep beam is a typical large discontinuity region.</p>	
Keywords	Strut-and-tie modeling, STM

Sisällys

Käsitteet

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ristikkomenetelmä	4
2.1	Rakenteen erottaminen B- ja D-alueisiin	6
2.2	Mallin muodostaminen	9
2.3	Puristussauvat	14
2.4	Vetosauvat	18
2.5	Solmukohtat	19
2.5.1	Solmu, johon liittyy vain puristussauvoja (CCC)	21
2.5.2	Solmut, joissa puristus- sekä vetosauvoja (CTT, CCT)	21
2.5.3	Solmukohtien mitoituslujuudet	24
2.6	Käyttörajatilatarkastelu	24
2.7	Yhteenvedo mallin muodostamisesta ja suunnittelun kulusta	25
2.7.1	Vaihe 1: Tunnistetaan rakenteen B- ja D-alueet	25
2.7.2	Vaihe 2: Erotetaan D-alueet muista rakenteista ja selvitetään niihin kohdistuvat jännitysjaakaumat	25
2.7.3	Vaihe 3: Kuormitusreittien analysointi sopivan ristikkomallin valitsemiseksi	26
2.7.4	Vaihe 4: Ristikkomallin valinta	26
2.7.5	Vaihe 5: Laskenta	27
2.7.6	Vaihe 6: Raudoitusjärjestelyt	27
3	Esimerkkejä soveltamiskohteista	28
3.1	Paaluanturat	28
3.2	Pilariperustus	29
3.3	Palkit, joiden poikkileikkaus muuttuu	30
3.4	Seinämäiset palkit	32
3.5	Konsolit	33
3.6	Kehänurkat	34
3.7	Jäykistävät seinät	35
4	Aukollisen seinämäisen palkin kuormituskoe	37
4.1	Kuormituskokeen tavoite ja tausta	37
4.2	Koekappaleet	38

4.3	Koejärjestelyt ja tutkimuksen kulku	41
4.4	Tulokset	43
5	Yhteenveto	52
	Lähteet	54
	Liitteet	
	Liite 1. Aukollisen seinämäisen palkin mitoituslaskelmat (Vain tilaajan käyttöön)	
	Liite 2. Teräksen vetolujuuskoepöytäkirja (Vain tilaajan käyttöön)	
	Liite 3. Betonin puristuslujuuskoepöytäkirja (Vain tilaajan käyttöön)	

Käsitteet

FEM-analyysi	(<i>Finite Element Method</i>) Elementtimenetelmän avulla suoritettava rakenneanalyysi. Tyypillisesti FEM-analyysin muodostavat laskentaohjelmat tarkastelevat lineaarisia kimmoisan tilan rakenteen perusmalleja, joissa ei oteta huomioon betonirakenteen jäykkyyden muodonmuutoksia ja muuttamista halkeilleessa tilassa.
Kimmateorian mukainen rakenneanalyysi	Rakenneanalyysillä tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla etsitään rakenteen mitoitusvoimasuureet. Kimmateoriaan perustuvat menetelmät ovat lineaarisia, sillä voimasuureiden ratkaiseminen tapahtuu aina lineaarisen yhtälöryhmän avulla. Rakenne oletetaan joko tasajäykäksi tai rakenteen jäykkyyden muuttuvan pituusakselin suhteen.
Palkkiteoria	(Tekninen taivutusteoria eli ns. Euler-Bernoullin otaksuma). Sen mukaan poikkileikkauksen venymä jakautuu lineaarisesti sauvan poikkileikkauksen korkeussuunnassa ja poikkileikkaustasot säilyvät tasoina taivutuksen aikana, ts. leikkausmuodonmuutosta ei tapahdu
Plastisuusteorian alarajateoreema	Kun tarkasteltavalle rakenteelle löydetään ulkoisten kuormien kanssa tasapainossa oleva voimasysteemi, eikä materiaalien plastisen käyttäytymisen alarajaa ylitetä, sitkeästi käyttäytyvä rakenne ei murru.
Ristikkomenetelmä	(Engl. <i>Strut-and-tie modeling</i> eli puristus-vetosauvamalli, käytetään myös lyhennettä STM) Ristikkomenetelmässä teräsbetonirakenteelle muodostetaan staattinen tasapaino rakenteen sisälle ajateltavien puristus- ja vetosauvojen avulla. Rakenne mitoitetaan ristikkomallin voimasuureiden voimien perusteella.

St. Venantin periaate

D-alueet eli epäjatkuvusalueet ulottuvat suurin piirtein rakenteen sivumitan pituiselle matkalle epäjatkuvuuskohdasta.

Lyhenteet

Latinalaiset isot kirjaimet

A_s	Raudoituksen poikkileikkausala
C	Puristussauva; Puristusvoima puristussauvassa
F	Kuorma
L	Pituus
T	Vetosauva; Vetovoima vetosauvassa

Latinalaiset pienet kirjaimet

a	Mitta; Solmun reunan leveys
b	Mitta; Rakenteen leveys
d	Poikkileikkauksen tehollinen korkeus
f_{cd}	Betonin puristuslujuuden suunnitteluarvo
f_{ck}	Betonin puristuslujuuden ominaisarvo
f_{ctk}	Betonin vetolujuuden ominaisarvo
f_{yk}	Raudoituksen myötölujuus
f_{yd}	Raudoituksen mitoituslujuus
h	Mitta; Rakenteen korkeus
l	Mitta; Rakenteen pituus
l_b	Mitta; Rakenteen jänneväli
u	Raudoitusvyöhykkeen leveys
s	Mitta

Kreikkalaiset pienet kirjaimet

θ	Sauvojen kaltevuuskulma
----------	-------------------------

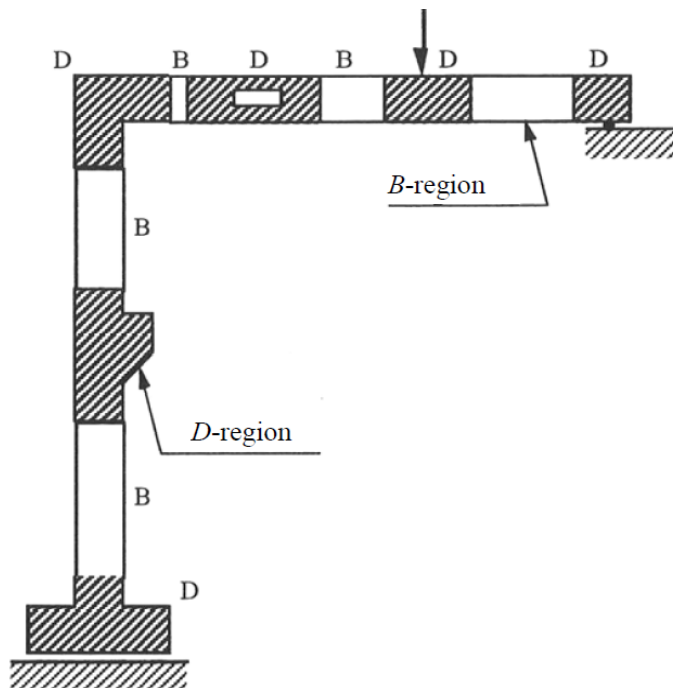
Alaindeksit

d	Mitoitusarvo
eff	Efektiiivinen, Tehollinen
k	Ominaisarvo

1 Johdanto

Ristikkomenetelmä on eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 mukainen suunnittelumenetelmä, jota voidaan hyödyntää erityisesti rakenneteknisiin erikoiskohtiin. Menetelmän käyttäminen on talonrakennuskohteissa Suomessa melko vähäistä. Sitä hyödynnetään lähinnä paaluperustusten ja konsoloiden mitoituksessa. Työssä on tarkoituksena perehtyä menetelmään ja sen soveltamismahdollisuuksiin tutkimalla alan kirjallisuutta. Osana työtä toteutetaan myös laskelmat aukolliselle seinämäiselle palkki-rakenteelle ristikkomenetelmällä. Laskelmien pohjalta tehdään betoniset koekappaleet, joille tehdään kuormituskoet. Insinööriyön toimeksianto saatiin Wise Group Finland Oy:ltä

Suurimassa osassa betonirakenteiden mitoituksessa voidaan soveltaa perinteisesti käytettyä palkkiteoriaa, joka perustuu siihen, että rakenteen poikkileikkaukset pysyvät tasoina kuormitettunakin eli muodonmuutos on lineaarista ja leikkausmuodonmuutosta ei otaksuta tapahtuvan. Rakenteiden epäjatkuvuuskohtissa (kuvio 1) oletus ei kuitenkaan pidä paikkaansa. Usein näiden epäjatkuvuusalueiden mitoitus pohjautuu koetulojen tai kokemusten synnyttämiin yleisesti hyväksytyihin sääntöihin. [6, s.1.]



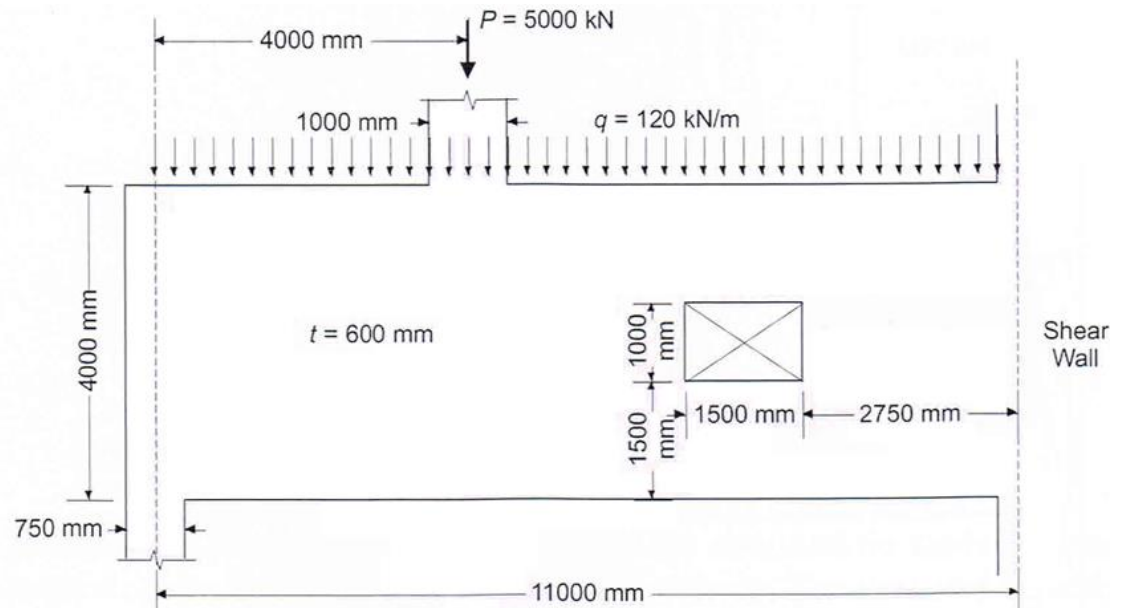
Kuvio 1. Kehärakenteen epäjatkuvuusalueita (D-region) [6]

Esimerkkejä tyypillisistä epäjatkuvusalueista ovat kehänurkat, konsolit, seinämäiset palkit, lovipääpalkit, aukolliset palkit, tukien sekä pistemäisten kuormien vaikutuskohdat, paaluanturat ja jännebetonin ankkurointialueet. Kuviossa 1 tummat alueet ovat esimerkkejä epäjatkuvusalueista ja vaaleat ovat alueita, joissa muodonmuutokset tapahtuvat lineaarisia.

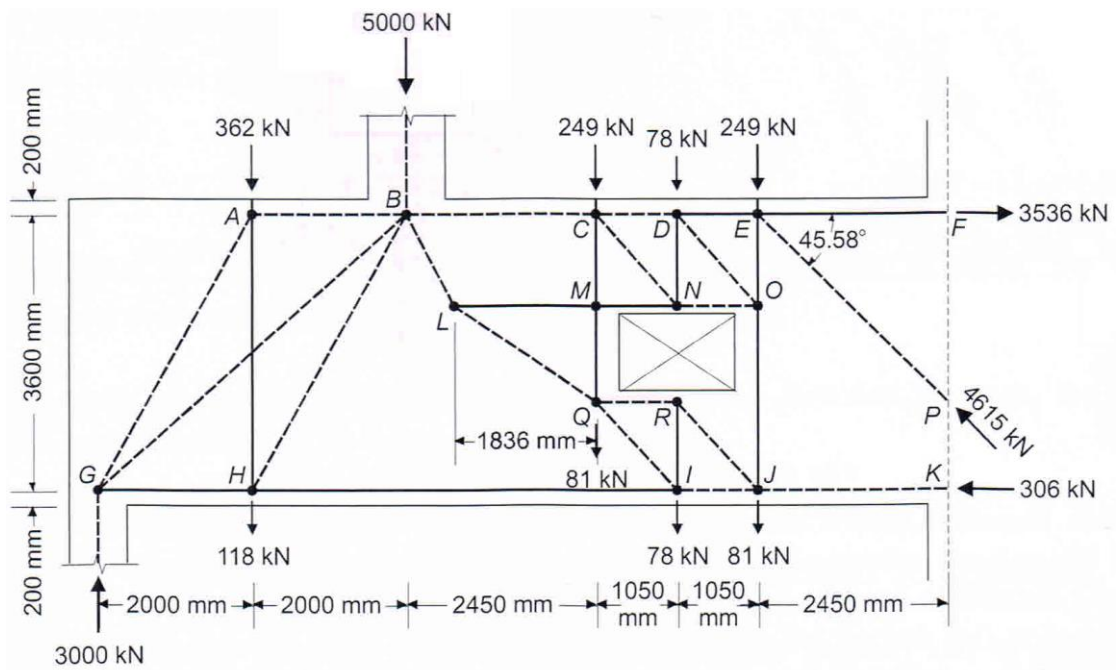
Ristikkomenetelmän juuret ovat Mörchin klassisessa ristikkoanalogiassa, jonka Mörch (1920) loi kuvaamaan leikkausraudoitetun rakenteen toimintaa. 1980-luvulla Marti (1985) sekä Schlaich, Schäfer ja Jennewein (1987) kehittivät ristikkoanalogiaa eteenpäin ja loivat varsinaisen ristikkomenetelmän, jonka avulla voidaan kuvata lähes kaikenlaisien teräsbetonirakenteiden sisäisiä voimasuureita. [8, s. 46.]

Ristikkomenetelmä on suunnittelijan työkalu, jonka avulla voidaan melko yksinkertaisesti ja yhdenmukaisesti mitoitaa sekä rakenteiden epäjatkuvusalueet (D-alueet) sekä myös alueet, joissa voidaan soveltaa palkkiteoriaa (B-alueet). Menetelmä sopii erityisesti apuvälineeksi haljenneen tilan epäjatkuvusalueiden mitoitukseen. [7, s.197 - 198.]

Mitoitettaessa ristikkomenetelmän avulla teräsbetonirakenteen sisäisiä voimasuureita käsitellään muodostamalla voimamonikulmio rakenteen sisään. Voimamonikulmio eli ristikkomalli muodostuu rakenteen betonikaistoista, jotka toimivat puristussauvoina, ja vetoraidoituksista, jotka toimivat vetosauvoina. Kuviossa 2 on rakennemalli aukollisesta seinämäisestä palkista, joka on tyypillinen suuri epäjatkuvusalue, ja kuviossa 3 on esitetty ristikkomenetelmän mukainen ristikkomalli tälle rakenteelle. Ristikkomenetelmän suurin etu mitoitustyökaluna on sen monipuolisuus, ristikkomalleja pystytään käyttämään apuna kaikenmuotoisissa rakenteissa ja kuormitustilanteissa. Toisaalta taas useat vaihtoehdot ristikkomallia valittaessa ja vain yhden oikean ratkaisun puuttuminen on osaltaan myös menetelmän heikkous. Ristikkomenetelmän hyödyntäminen vaatiikin suunnittelijalta kokemusta ja perehtymistä menetelmään. Eri suunnittelijat voivat päätyä erilaisiin ristikkomalleihin samalle epäjatkuvusalueelle tai rakenteelle. Joissain tapauksissa eri ristikkomallit voivat johtaa merkittäviin eroihin raudoitusmäärissä. Erilaisten mallien mahdollisuus ja yhden oikein ratkaisun puuttuminen saattaa aiheuttaa hämmennystä ja joskus jopa johtaa epäluottamukseen ristikkomenetelmää kohtaan. Ristikkomenetelmää hyödynnettäessä suunnittelukokemus onkin tärkeää [7, s.199.]

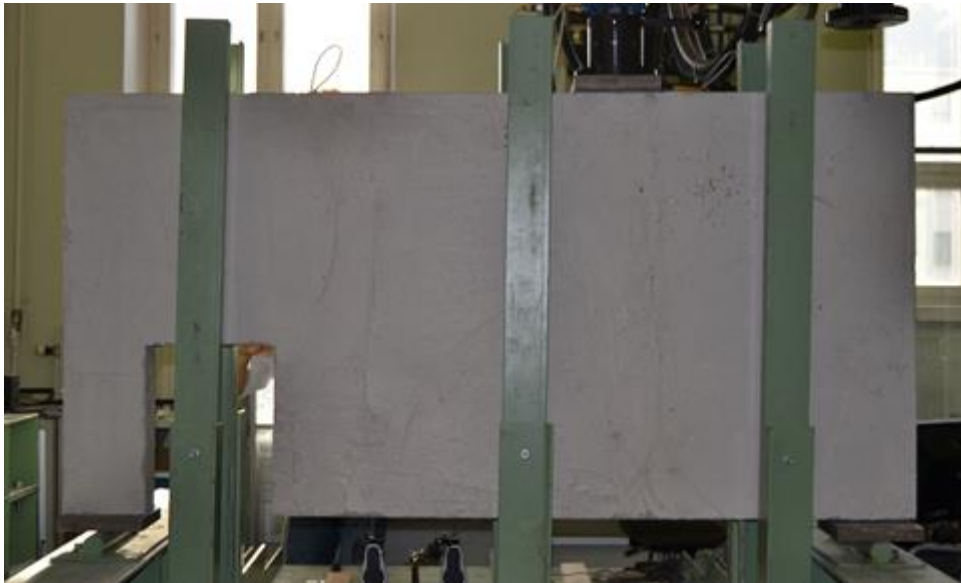


Kuvio 2. Aukollinen seinämäinen palkki [7, s. 67]



Kuvio 3. Ristikkomalli seinämäiselle palkille (Puristussauvat on esitetty katkoviivalla ja veto-sauvat jatkuvalla viivalla.) [7, s.69.]

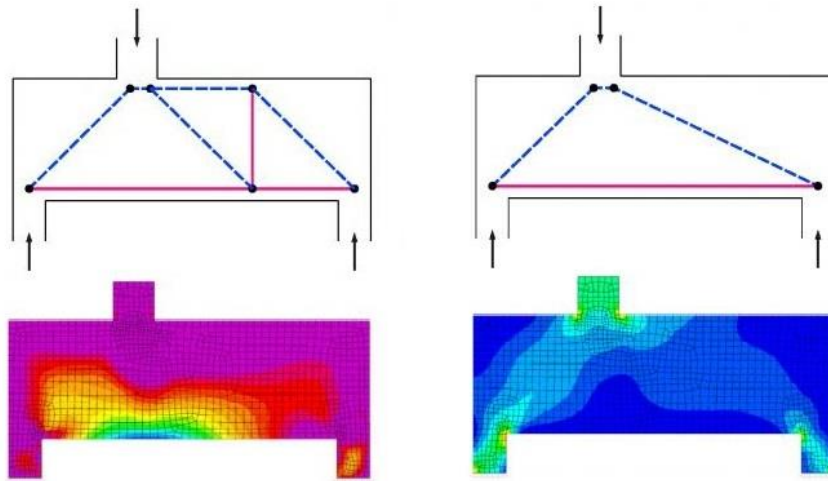
Kuormituskokeen aukollinen seinämäinen palkki on esitetty kuvassa 1. Tavoitteena kokeessa on tutustua ja saada kokemusta ristikkomenetelmän soveltamisesta käytännössä ja vertailla erilaisten ristikkomallien toimivuutta yhdenmuotoisissa koekappaleissa, jotka kuormitetaan samalla tavalla ja pyritään mitoittamaan yhtä suurille murto-kuormille. Kuormituskokeessa ristikkomallien toimivuutta vertaillaan halkeamien muodostumisen ja rakenteiden murtumiskuormien avulla.



Kuva 1. Kuormituskoe seinämäiselle aukolliselle palkille

2 Ristikkomenetelmä

Ristikkomenetelmässä rakenteen sisäisistä voimista luodaan ristikko kimmoteorian mukaisten jännitysjakaumien perusteella. Ristikön vetosauvat ovat yleensä vetoteräksiä ja puristussauvat betonisia puristuskaistoja. Sauvat vastaavat rakenteen jännitysten veto- ja puristusresultanteja. Veto- ja puristussauvojen liitosalueita kutsutaan solmuiksi. Puristussauvoja kuvataan katkoviivoilla ja vetosauvoja yhtenäisillä viivoilla, kuten kuviossa 4.



Kuvio 4. Ylhäällä seinämäiselle palkille on esitettyä kaksi ristikkomallivaihtoehtoa. Alapuolella on esitetty kimmoteorian mukaiset jännityskentät, vasemmalla vetojännityskentät ja oikealla puristusjännityskentät. [11]

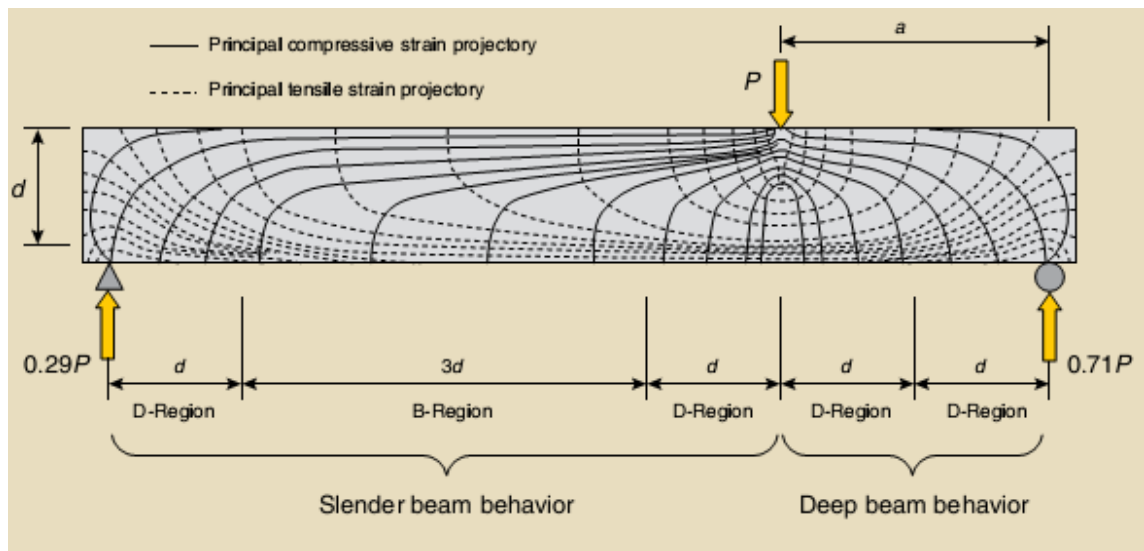
Ristikkomallin puristussauvojen, vetosauvojen ja solmujen pitää olla voimatasapainossa, ja ottaa vastaan rakenteeseen kohdistuvat kuormat. Plastisuuden alarajateoreeman mukaan ristikkomallin kapasiteetti ei ylitä todellisen rakenteen kapasiteettia, kun seuraavat ehdot täyttyvät:

- Ristikko on voimatasapainossa.
- Rakenteella on riittävä muodonmuutospotentiaali, jotta jännitykset voivat jakautua suunnitellun ristikkomallin mukaisiksi veto- ja puristussauvoille.
- Mallin sauvoihin ja solmuihin kohdistuvat rasitukset eivät ylitä sauvojen ja solmujen materiaalien kestävyksiä. [1, s.156 – 157.]

Sisäiset voimat rakenteessa jakautuvat ristikkomallin mukaisiksi plastisten muodonmuutosten kehittyessä murtorajatilaa kohti mentäessä. Malli ei saa poiketa merkittävästi kimmoteorian mukaisista jännitysten jakautumisesta, muuten rakenteen muodonmuutospotentiaali saatetaan ylittää, joka voi johtaa suuriin halkeamiin ja rakenteen sortumiseen. Ristikkomallia muodostettaessa onkin saatava taustatietoa kimmoteorian mukaisen rakenneanalyysin jännitysjakautumista eli ns. jännitystrajektorit esimerkiksi FEM-analyysin avulla. [2, s.159, 431.]

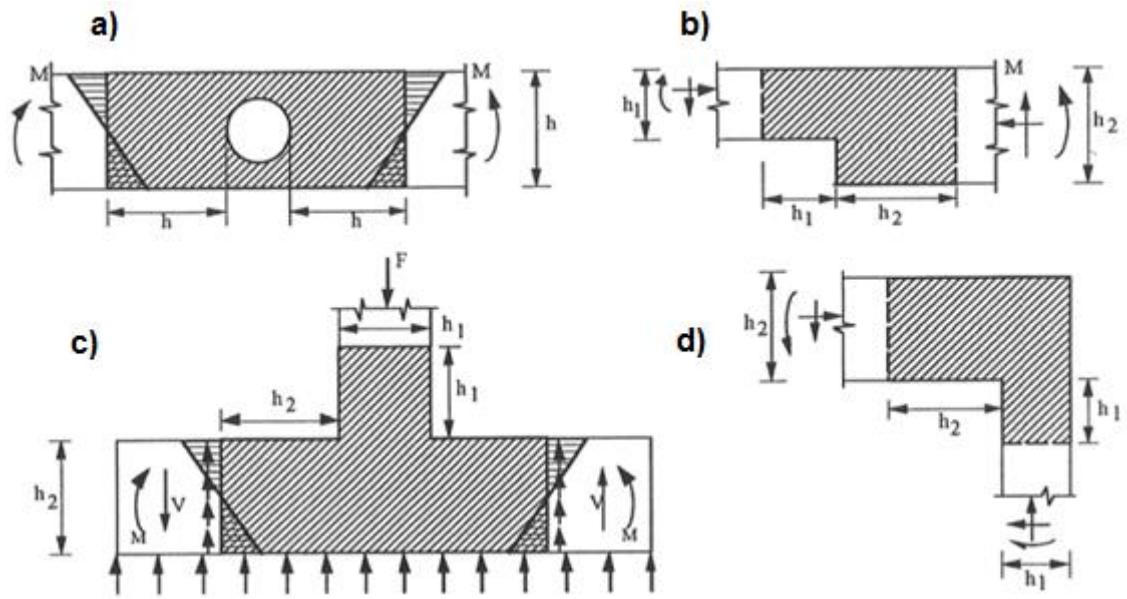
2.1 Rakenteen erottaminen B- ja D-alueisiin

Kaikki rakenteet voidaan jakaa B- ja D-alueisiin, kuten palkkirakenne kuviossa 5. Rakenteet tai rakenteiden osat joissa Bernoullin otaksuma on voimassa, kutsutaan B-alueiksi. Bernoullin otaksumassa (palkkiteoria) rakenteen poikkileikkauksen tasot pysyvät tasoina myös kuormitettuna, toisin sanoen leikkausmuodonmuutosta ei tapahdu, ja muodonmuutosjakauma on lineaarinen aina murtoon saakka. B-alueet voidaan mitoitaa palkkiteorian mukaan. [3. s. 14-2.]

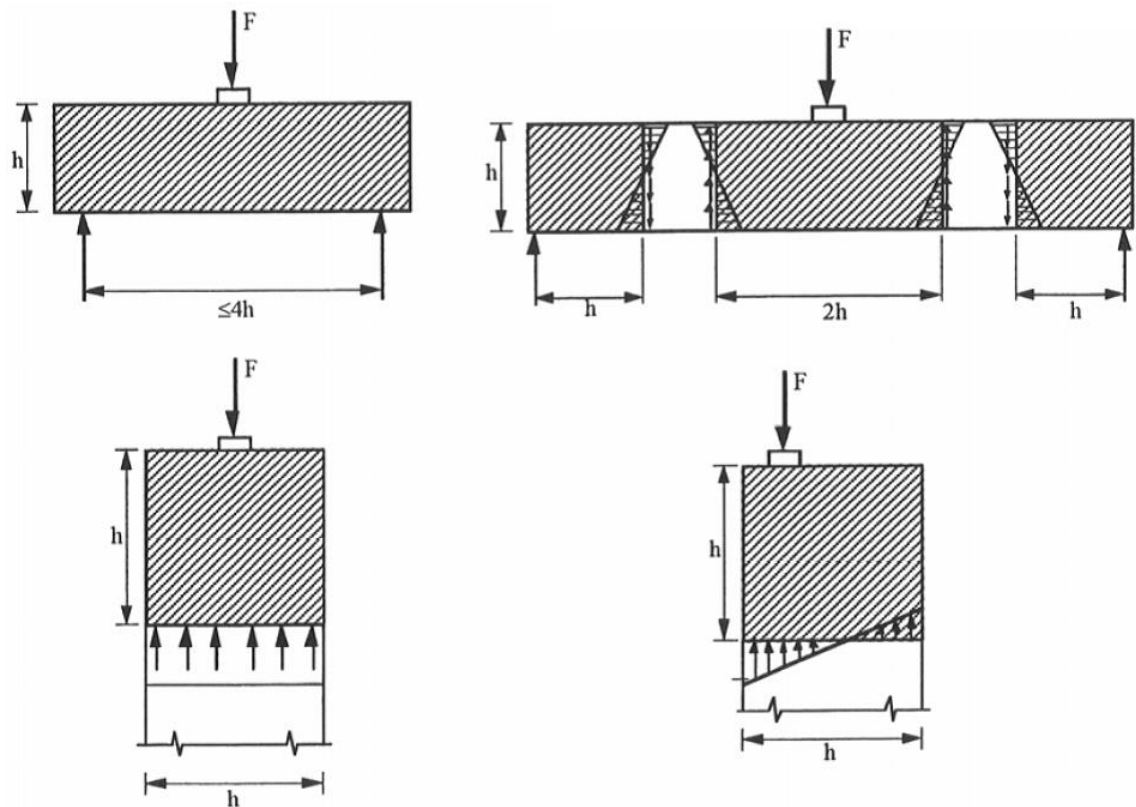


Kuvio 5. Tässä kuviossa esitetään rasitusjakaumat, joiden perusteella rakenteesta saadaan selville epäjatkuvusalueet. Lyhenteet: P = pystykuorma; d = tehollisen poikkileikkauksen korkeus.[1]

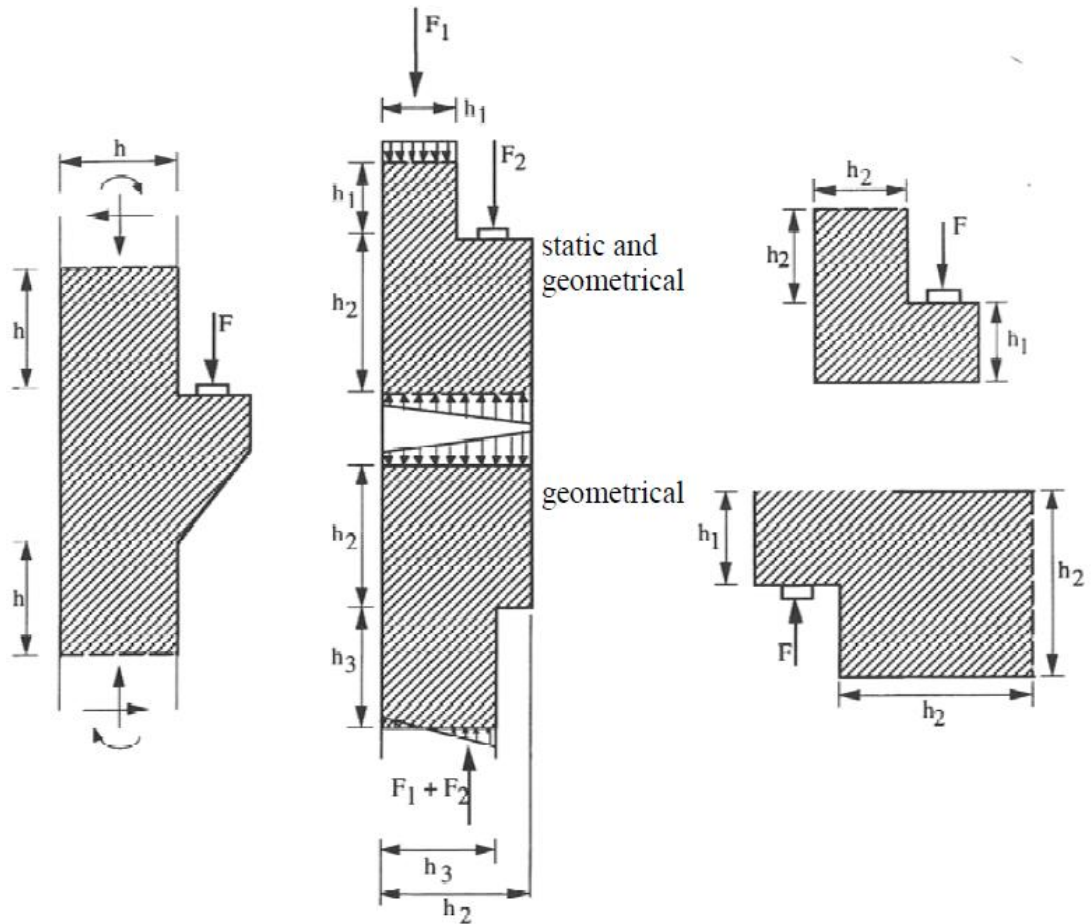
D taas tulee sanasta "discontinuity" joka tarkoittaa epäjatkuvuutta. D-alue vastaa rakenteen osia, joissa Bernoullin otaksuma ei ole voimassa. Näillä alueilla on geometriasta (kuvio 6) tai kuormituksesta (kuvio 7) aiheutuvia epäjatkuvuuskohtia eli jännitysten häiriöalueita, joissa muodonmuutosten ja jännitysten jakautuminen ei ole lineaarista. Niitä ei voida mitoitaa palkkiteorian mukaan. Tällaisten alueiden mitoitamiseen ristikkomenetelmä on käytännöllinen työkalu. St. Venantin periaatteen mukaan häiriöalueen voidaan olettaa päättyvän noin rakenteen sivumitan etäisyydelle epäjatkuvuuskohdasta, kuvioissa 6, 7 ja 8 sivumittaa kuvattu kirjaimella h . [3. s. 14-2.]



Kuvio 6. Esimerkkejä geometrisen epäjatkuvuuden aiheuttamista D-alueista a) aukko palkissa, b) muutos palkin poikkileikkauksessa c) antura d) kehänurkka. [3]



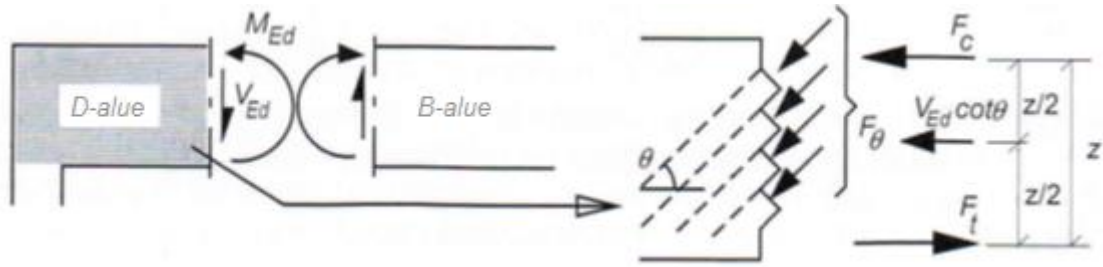
Kuvio 7. Esimerkkejä D-alueista, joiden epäjatkuvuus aiheutuu kuormituksista. [3]



Kuvio 8. Esimerkkejä D-alueista, jotka aiheutuvat kuormituksista ja geometrisista epäjatkuvuksista. [3]

Erottamalla D-alueet omiksi osikseen, näitä rakenteen osia voidaan tarkastella omina kokonaisuuksinaan. D-aluetta kuormittaa ulkoiset voimat, tukireaktiot ja viereisten B-alueiden ja D-alueen rajakohdan lineaariset reunajännitykset (rakenteen momentin ja leikkausvoiman aiheuttamat), jolloin alue on ulkoisesti tasapainossa. Esimerkki D-alueen erottamisesta on esitetty kuviossa 9, jossa kehänurkkaan liittyvä palkki- tai laattarakenne on jaettu B- ja D-alueisiin. Kuvion 9 voimasuureet voidaan määrittää leikkausvoima huomioiden seuraavasti (kaavoissa θ on oletettu halkeamakulma):

- $F_C = \frac{M_{Ed}}{z} + \frac{V_{Ed}}{2} * \cot(\theta)$
- $F_T = \frac{M_{Ed}}{z} - \frac{V_{Ed}}{2} * \cot(\theta)$
- $F_\theta = \frac{V_{Ed}}{\sin(\theta)}$ [2, s. 431]



Kuvio 9. D-alueen erottaminen ja voimatasapainon edellyttämät rajavoimat. [2, s.431]

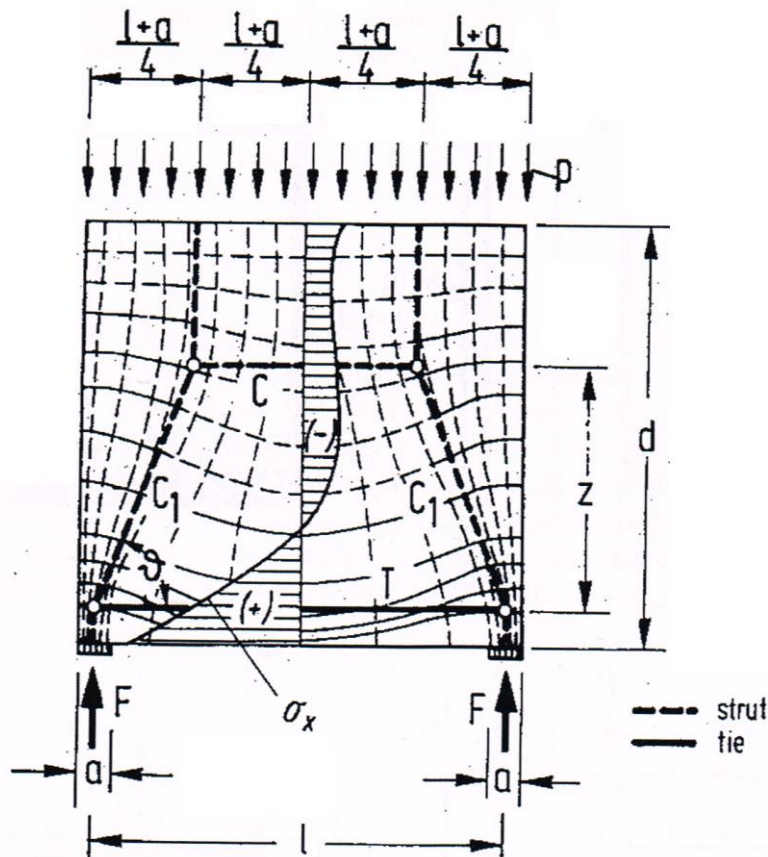
2.2 Mallin muodostaminen

Mallia muodostettaessa tulee olla taustatietoa kimmoteorian mukaisista jännityksistä ja jännityskeskittymistä. Jos mallin sauvat poikkeavat huomattavasti rakenteen kimmoteorian mukaisista jännitysjakaumista, rakenteessa syntyy suuria muodonmuutoksia sisäisten voimien jakautuessa ristikkomallin mukaisiksi [2, s. 430 - 431]. Mitä suurempia muodonmuutoksia rakenteeseen syntyy, sitä todennäköisempää on suurien halkeamien muodostuminen. Pahimmassa tapauksessa epäonnistunut malli voi johtaa solmujen, veto- tai puristussauvojen kapasiteettien ylittymiseen, josta seurauksena voi olla rakenteen sortuminen. [1, s.157.]

Mallia luodessa on hyvä ymmärtää, että kuormat pyrkivät siirtymään reittiä, joka aiheuttaa pienimmät sisäiset voimat ja vähiten muodonmuutoksia, toisin sanoen vaati vähiten energiaa muodonmuutokseen. Vähiten vetosauvoja sisältävä ristikkomalli on usein paras, koska raudoitettut vetosauvat ovat paljon alttiimpia muodonmuutoksiin kuin betonikentistä muodostuvat puristussauvat. Kuitenkaan yleensä ristikkomallia valittaessa ei ole olemassa vain yhtä optimaalista ratkaisua. [4, s.9 - 10.]

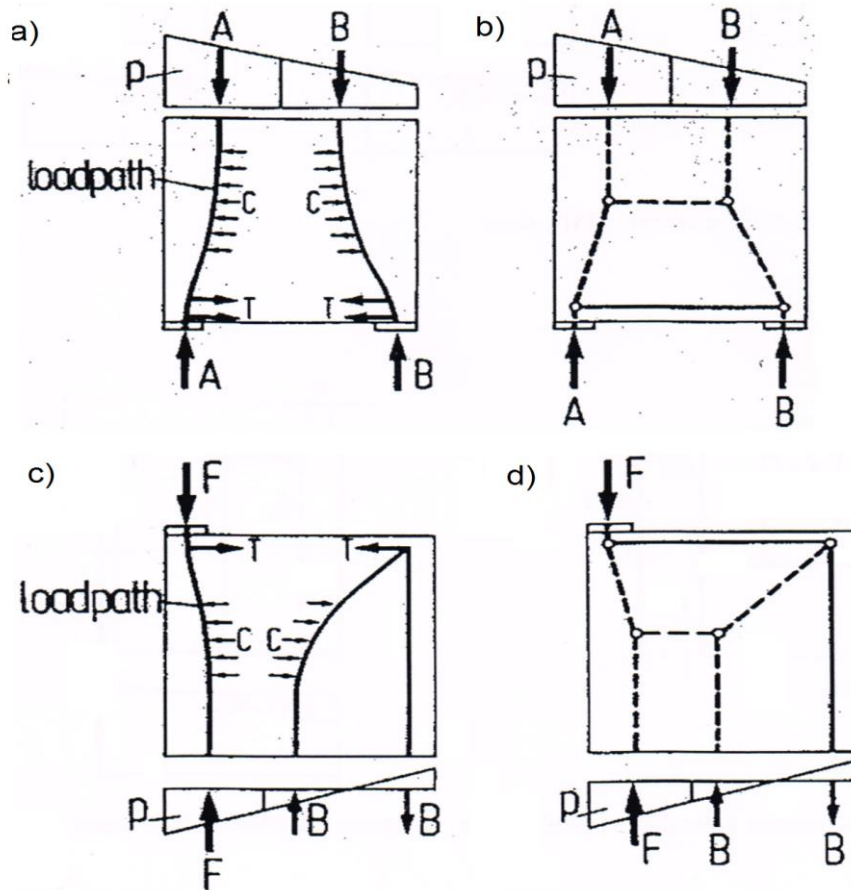
Mallin vetosauvoja määritettäessä on syytä huomioida myös raudoitustyön mielekkyys. Yleensä vetosauvat pyritäänkin sijoittamaan joko pysty- tai vaakasuuntaan. [6 s.4.]

FEM-analyysin avulla mallia muodostettaessa puristussauvat asetetaan puristavan pääjännityskentän resultantin kohdalle ja vetosauvat vastaavasti vetävän pääjännityskentän kohdalle. Ristikkomallissa sauvat ovat aina suoria ja jännityskenttien kaarevuudet keskitetään sauvojen välisiin solmukohtiin (kuvio 10). Kun mallin sauvat valitaan jännityskenttien perusteella, on mallin muodonmuutoskyvyn riittävyys varmistettu. [6 s.4]

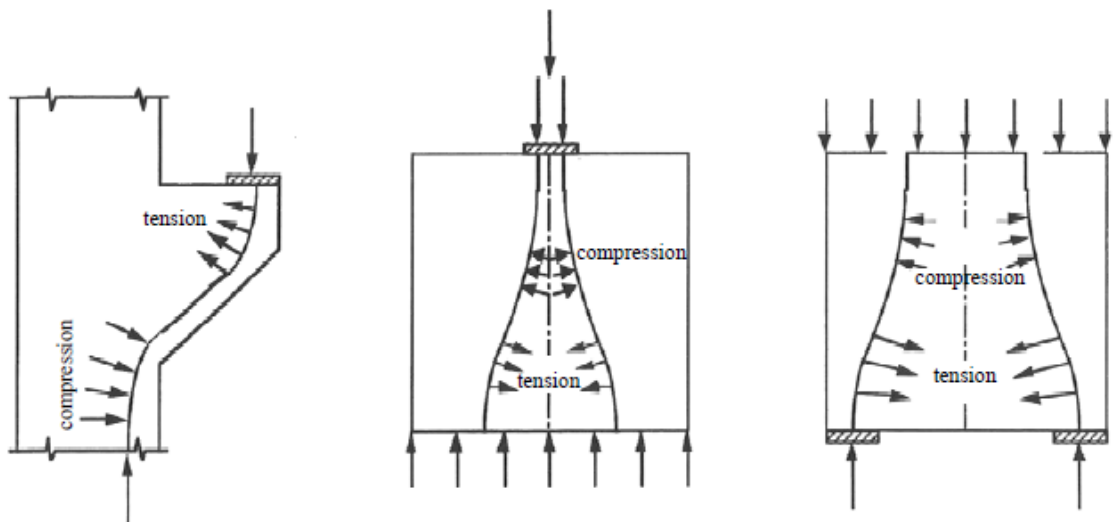


Kuvio 10. Seinämäinen palkki kuvaa tyypillistä D-aluetta. Kuviossa on esitetty FEM-analyysin mukainen pääjännitysten kulku, jännitysjaakauma ja jännityksiä vastaava ristikkomalli. [6]

Useissa tapauksissa toimiva malli voidaan johtaa myös niin kutsutulla kuormapolkumetelmällä (*load-path-method*), vaikka tarkka kimmoteorian mukainen jännitysjaakauma ei ole tiedossa (kuviot 11 ja 12). Menetelmässä D-alue irrotetaan muusta rakenteesta ja kuormitetaan sen reunoilla vaikuttavilla lineaarisilla jännityksillä eli rajajännityksillä, kuten aikaisemman luvun 2.1 lopussa ja kuviossa 9. D-alue on tällöin ulkoisesti tasapainossa siihen vaikuttavien kuormien ja tukireaktioiden suhteen. Rajajännitys jaetaan osiin siten, että osien resultanteilla on vastavoimat rakenteen vastakkaisella puolella, kuten kuviossa 11. Rajajännitysten osien resultantit yhdistetään vastavoimaansa kuormapolulla, niin että kuormat kulkevat lyhintä mahdollista "virtaviivaista" polkua, eivätkä polut mene ristiin. Kuormapolun kaareutumiskohdassa eli suunnanmuutokohdassa on vastavoima suunnanmuutokselle, kuten kuvioissa 11 a ja c. Nämä voimat kuvattu nuollilla, jotka on kuvaan merkitty C kirjaimella eli puristuksena ja T kirjaimella eli vetona. Kuviossa 11 c on esimerkki, jossa kuormapolkukuvio tekee "u-käännöksen" tasapainottaakseen rajajännitykset. [6, s. 7.]

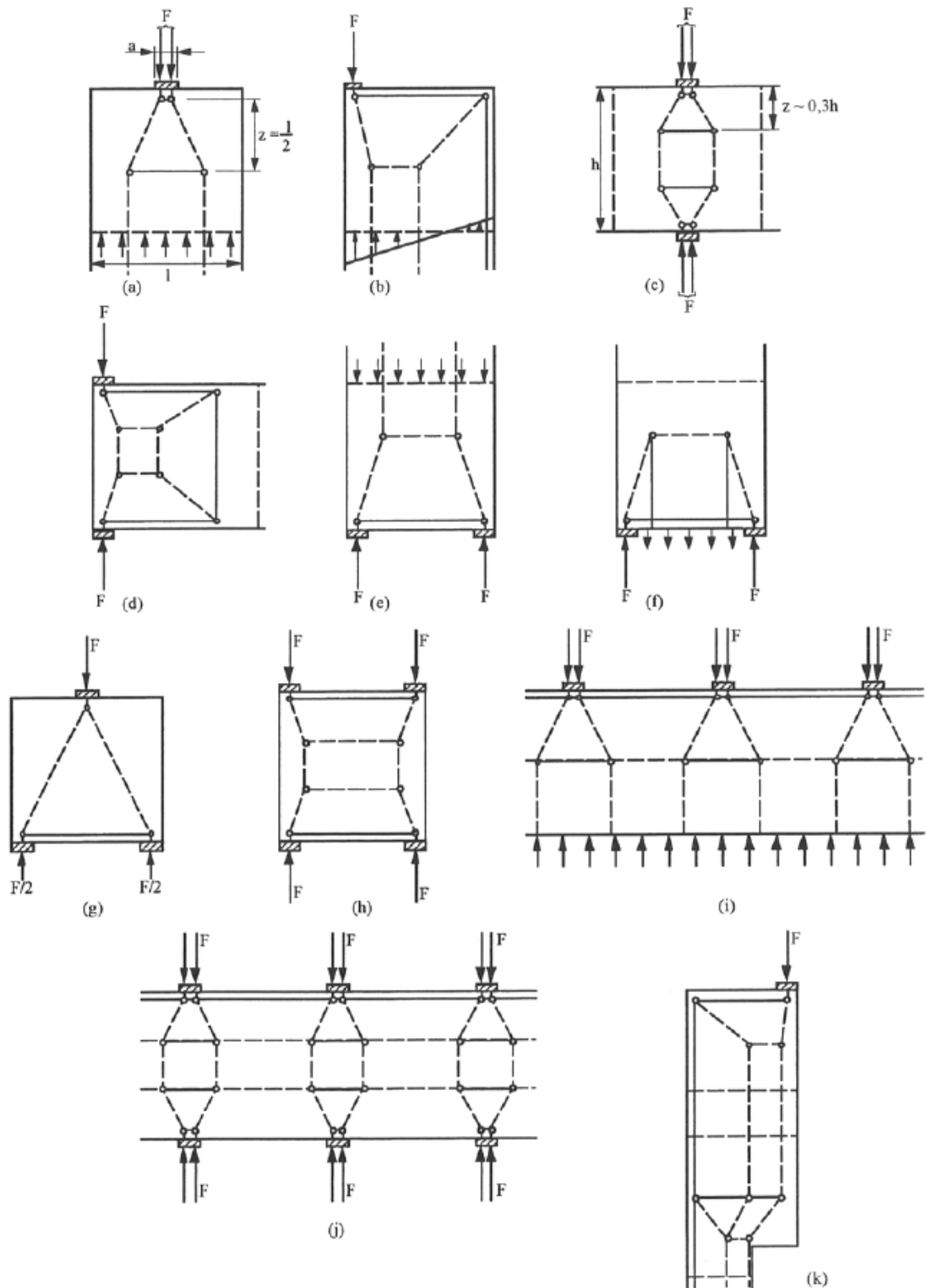


Kuvio 11. a) rakenne ja sen kuormitus ja rakenteen kuormapolut, b) ristikkomalli, c) rakenne ja sen kuormitus ja kuormapolut, d) ristikkomalli [6]



Kuvio 12. Esimerkkejä kuormituspoluista erilaisissa rakenteissa [3]

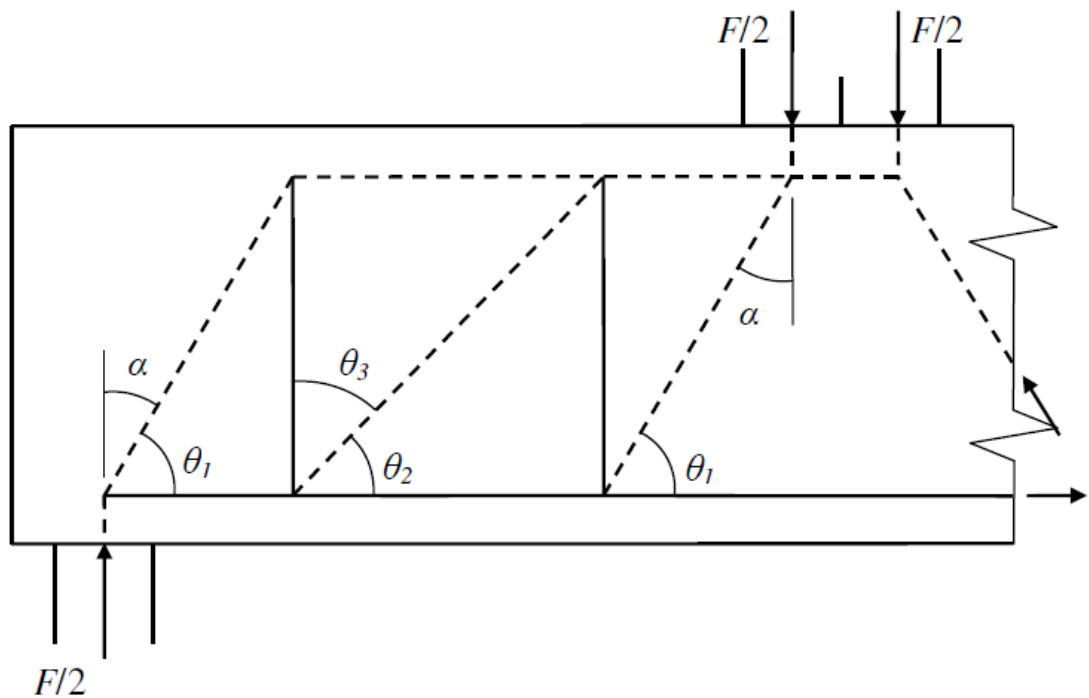
Ristikkomalleja muodostaessa voidaan tyypillisille rakenteille käyttää myös apuna valmiita tyyppimalleja. Kuviossa 13 on esitetty muutamia esimerkkejä. [6, s.5].



Kuvio 13. Tyypillisiä ristikkomalleja

Jotta riittävä muodonmuutoskapasiteetti voimien uudelleen jakautumiseksi ristikkomallin mukaiseksi varmistetaan, ei puristussauvojen ja vetosauvojen väliset kulmat (kuviossa 10: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$) saa olla liian pieniä. Eikä toisaalta keskitetyltä kuormalta lähtevän puristussauvan kulma (kuviossa 14: α) saa olla liian suuri. Suositusarvot kuvion 14 mukaisille puristussauvojen suuntakulmille (alkuperäinen lähde: *fib bulletin 3*) [8, s. 48 - 49]:

- $\alpha \approx 30^\circ, \alpha < 45^\circ$
- $\theta_1 \approx 60^\circ, \theta_1 > 45^\circ$
- $\theta_2 \approx 45^\circ, \theta_2 > 30^\circ$
- $\theta_3 \approx 45^\circ, \theta_3 > 30^\circ$

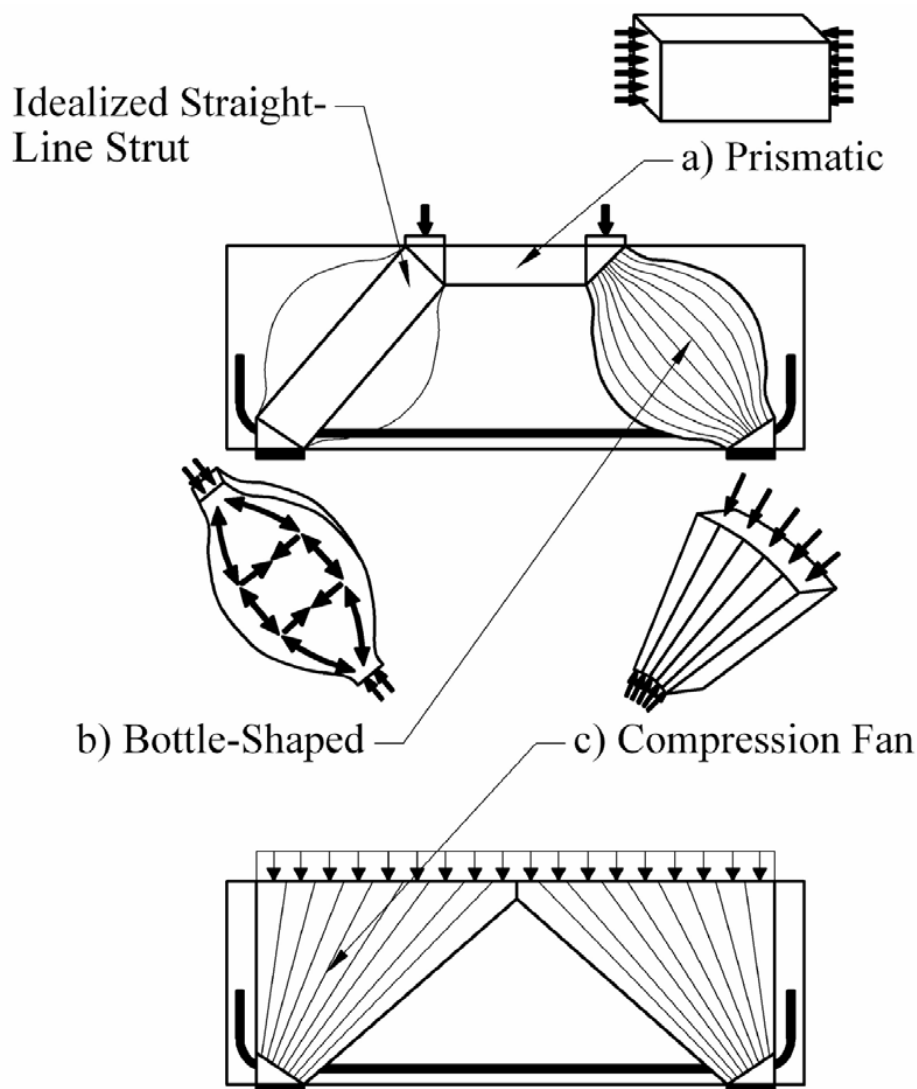


Kuvio 14. Esimerkki puristussauvojen suuntakulmille seinämäiselle palkille, jota kuormittaa keskitetty kuorma. [8]

Ristikkomallia luodessa on syytä huomata, etteivät puristussauvat voi limittyä tai risteytyä mallissa muualla kuin solmukohtissa. Kuitenkin vetosauvat voivat risteytyä puristussauvan kanssa tai vetosauvan kanssa. [8, s.52].

2.3 Puristussauvat

Ristikomenetelmässä puristusjännitykset siirretään betonisilla puristussauvoilla, ristikkomalleissa puristussauvat ovat suoria viivoja ja ne kuvaavat todellisen rakenteen puristuskaistan resultanttia. Puristussauvojen kestävyteen vaikuttaa sauvan poikittaiset voimat. Mikäli puristussauvassa on poikittaisia vetovoimia, betoniin muodostuu halkeamia ja betonin puristuslujuus heikkenee. Ristikkomallien puristussauvojen jännityskenttien muodot voidaan jakaa kolmeen ryhmään: (a) prismaattisiin eli suorakaiteen muotoisiin, (b) pullomaisiin ja (c) viuhkamaisiin jännityskenttiin. Niiden muodot on esitetty kuvion 15 kahdessa seinämäisessä palkissa. [8, s. 50].



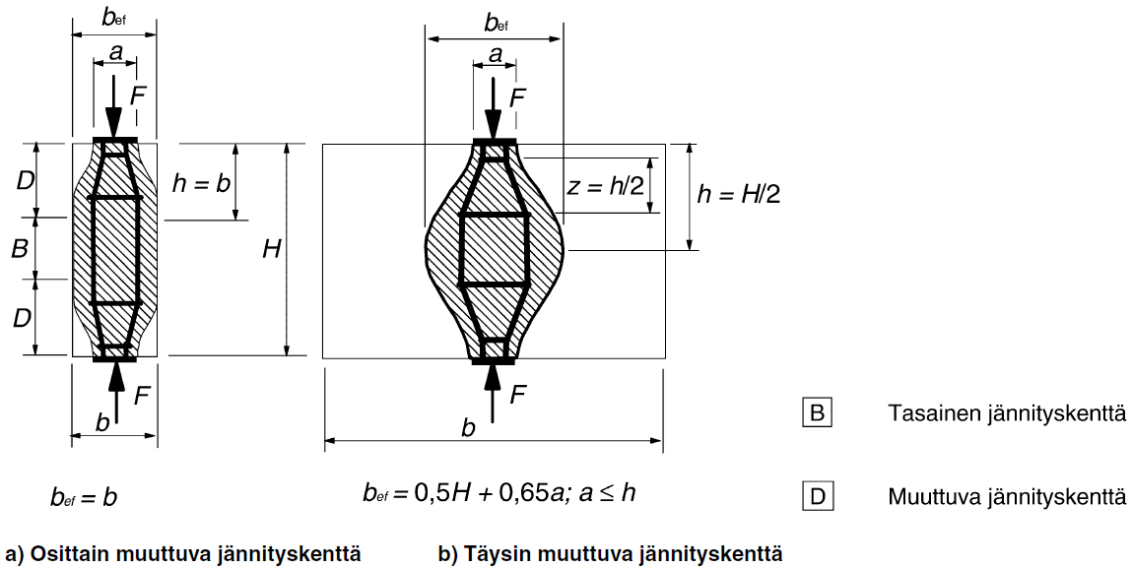
Kuvio 15. Puristusdiagonaalien perusmuodot 2-ulotteisessa mallissa (a) prisma, (b) pullomainen ja (c) viuhka. [9]

Prismaattisia jännityskenttiä esiintyy usein B-alueilla, mutta esimerkiksi kuvion 15 ylemmässä seinämäisessä palkissa kahden pistemäisen kuorman välissä oleva seinän yläreunan suuntainen puristusjännityskenttä oletetaan suorakaiteen muotoiseksi. Prismaattisissa sauvoissa ei esiinny poikittaisjännityksiä. [9, s.2].

Jos kahden keskittyneen solmun eli pienelle alueelle keskittyneen solmun välisellä puristussauvalla on tilaa levitä poikittaissuunnassa, muodostuu jännityskentistä pullomaisia. Pullomaisten puristussauvojen ”pullon kaulojen” kohdalle jännitysten suunnanmuutokset aiheuttaa poikittaisia vetovoimia, joista seurauksena voi muodostua pitkittäis-suuntaisia halkeamia sauvaan, jotka heikentävät betonin puristuskestävyyttä. Poikittaiset vetovoimat otetaan vastaan halkaisuraudoituksella, jottei ennen aikaista sortumista pääse tapahtumaan. Seinämäisissä palkeissa usein halkaisuraudoitukseksi riittää euron mukainen minimiraudoitus. [9, s.2]. Kuitenkin puristussauvojen puristuskestävyyden mitoituksessa niiden tehollinen leveys määräytyy niiden kapeimman kohdan mukaan eli solmujen reunoilla.

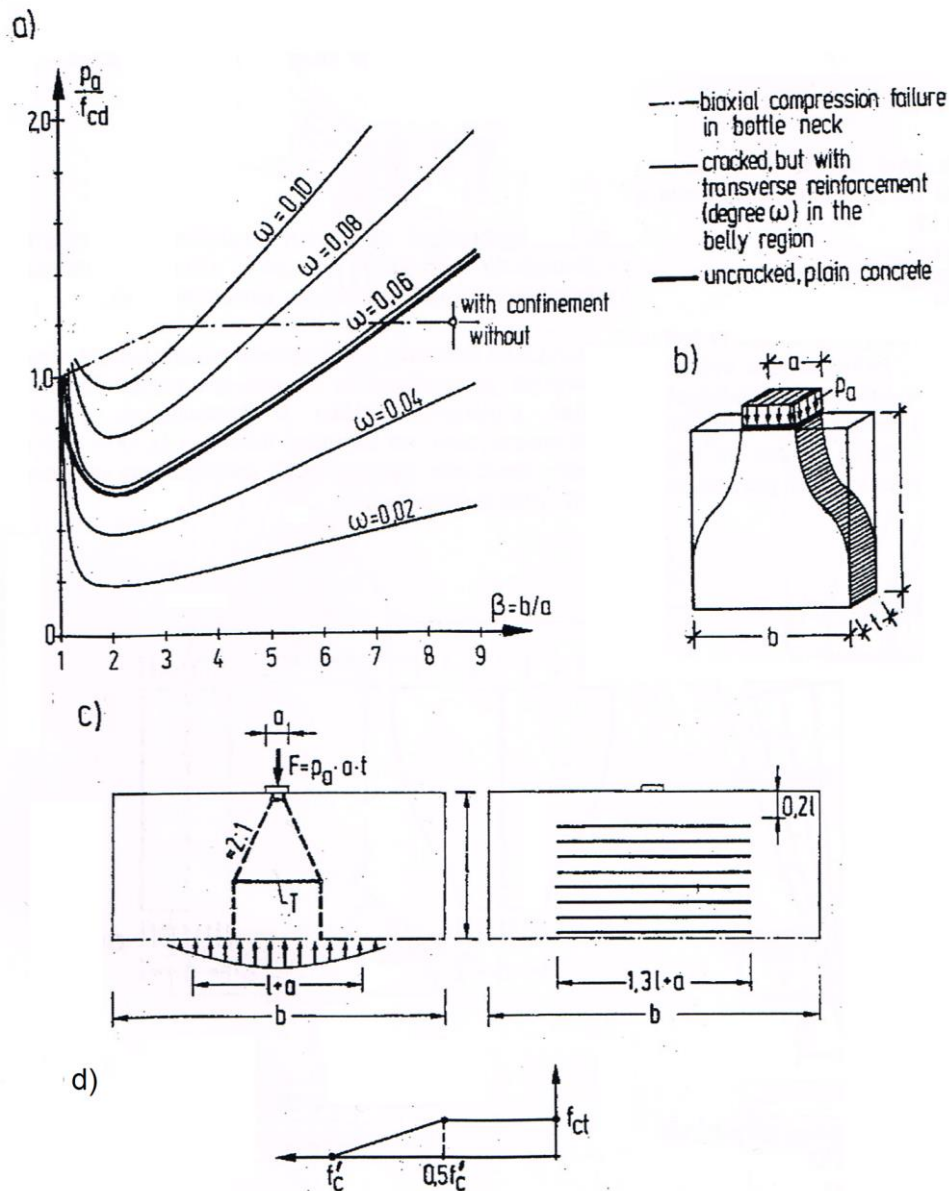
Poikittainen vetovoima voidaan määrittää muodostamalla pullomaiseen puristussauvan jännityskenttään tarkennettu ristikkomalli, kuten kuviossa 16. Pullomaisten puristuskaisojen leveydet ja poikittaiset vetovoimat T voidaan määrittää seuraavilla kaavoilla (SFS-EN 1992-1-1 mukaan):

- Osittain muuttuvassa jännityskentässä alueille joissa $b \leq H/2$. (Parametrit esitetty kuviossa 16 a): $T = \frac{1}{4} * \frac{b-a}{b} * F$
- Täysin muuttuvassa jännityskentässä alueille joissa $b > H/2$. (Parametrit esitetty kuviossa 16 b): $T = \frac{1}{4} * \left(1 - 0,7 * \frac{a}{H}\right) * F$



Kuvio 16. Parametrit poikittaisten vetovoimien määrittämiseksi puristus kentässä, jota hallitaan jakaantuneella raudoituksella

Pullomaisten puristusauvojen mitoitukseen voidaan myös hyödyntää kuvion 17 mukaan, jossa a on keskittyneen kuorman tai solmun reunan sivumitta, b jännityskentän suurin leveys ja l on matka, jonka alueella jännitykset tasaantuvat takaisin resultantin suuntaiseksi. Mitoituskäyrästäön lihavoitu käyrä kuvaa raudoittamatonta puristusvyöhykettä, jonka kestävyys perustuu kimmoteorian mukaiseen ratkaisuun ja betonin vetolujuuden arvoon $f_{ctd} = \frac{f_{cd}}{15}$ sekä betonin kaksi-akseliseen puristus- ja vetolujuuden yhteisvaikutuksen murtoehtoon. Käyrästäön on varmallalla puolella koetuloksiin verrattuna [6, s.22].



Kuvio 17. Pullomaisen jännitysvyöhykkeen mitoitus. a) mitoituskäyrästä b) jännityskenttä c) ristikkomalli halkaisuraudoitukselle ja rauditusesimerkki d) yksinkertaistettu kaksiakselinen murtoehto samanaikaiselle vedolle. (alkuperäinen lähde: Towards of Consistent Design of Reinforced Concrete Structures, PCI Journal, Vol. 32 No. 3, Schlaich, Schäfer, Jennewein) [8, s. 22]

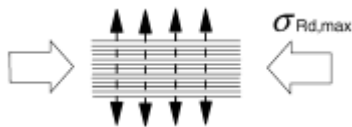
Viuhkamaisia jännityskenttiä esiintyy puristussauvoissa, jotka tuovat kuormat laajoilta kuormitusaloilta paljon kapeammille tuille. Tasaisesti kuormitettu seinämäinen palkki on tyypillinen rakenne, jossa esiintyy viuhkamaisia puristuskenttiä, kuten kuvion 15 alemmassa seinämäisessä palkissa. Viuhkamaisissa jännityskentissä kenttien kaarevuus on niin merkityksetöntä, että puristussauvoissa ei oleteta esiintyvän poikittaisvetojännityksiä. [9, s.2].

Eurokoodin mukaan betonisten puristuskaistojen mitoituslujuutena voidaan käyttää betonin mitoituslujuutta f_{cd} , kun puristussauvassa ei vaikuta poikittaisia vetojännityksiä ja kaista voidaan olettaa halkeilemattomaksi eli prismaattiset ja viuhkamaiset jännityskentät (kuvio 18). Moniakselisesti puristetuissa kaistoissa voidaan olettaa tätä suurempi puristuskestävyys. [5 s.105 - 106].



Kuvio 18. Puristuskaistan mitoituslujuus on $\sigma_{Rd,max} = f_{cd}$, kun kaistassa ei esiinny poikittaista vetoa. [5]

Kun puristuskaistassa on poikittaisia vetovoimia, tulee mitoituslujuutta pienentää halkeilleilla puristusalueilla eli pullomaiset jännityskentät (kuvio 19). Tämä voidaan laskea EN-1992-1-1 mukaan kaavalla $\sigma_{Rd,max} = 0,6 * v' * f_{cd}$, jossa $v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}}$, mikäli tarkempaa menettelyä ei käytetä.



Kuvio 19. Puristuskaistan mitoituslujuus tulee kaavasta $\sigma_{Rd,max} = 0,6 * v' * f_{cd}$, kun kaistassa esiintyy poikittaista vetoa. [5]

Myös puristusraudoituksia voidaan hyödyntää puristussauvoissa, kun niiden nurjahtaminen on estetty esimerkiksi haotuksilla [6, s.23].

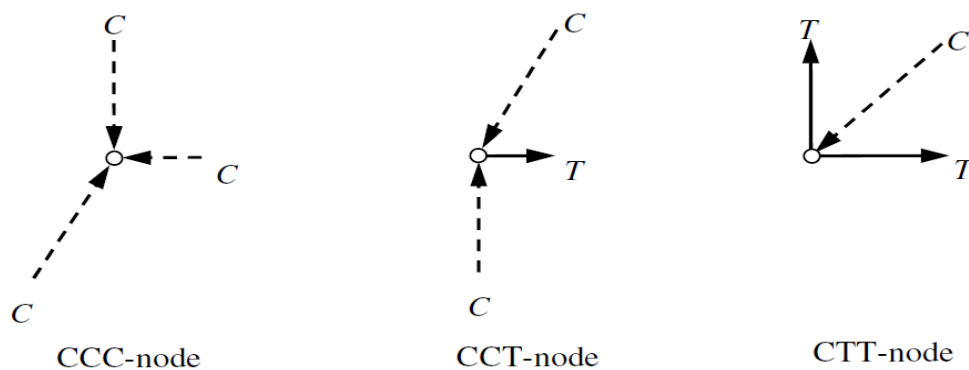
2.4 Vetosauvat

Yleensä vetosauvoissa ei betonille oleteta vetokestävyyttä, vaan raudoitukset tai jännerätket ottavat vastaan kaikki vetorasitukset. Raudoituksen tulee olla jaettu niin, että sen painopiste on vetosauvan vaikutusviivalla. Vaadittava poikkileikkauksen raudoitusala saadaan yksinkertaisesta mitoitusyhtälöstä: $A_s \geq \frac{T}{f_{yd}}$. [8, s.50.]

Yksi ristikkomenetelmän eduista on se, että menetelmän avulla saadaan suoraan ankkuroitava voima sauvan vetovoimasta T , jolle ankkuroinnin riittävyys voidaan tarkastella tavanomaisia ankkuroinnin mitoitusperiaatteita käyttäen (SFS-EN 1992-1-1 luku 8). Raudoituksen ankkurointi voidaan toteuttaa suorilla tai taivutetuilla teräksillä, lenkeillä, poikittaisilla hitsatuilla ankkurointitangoilla tai ankkurointilevyillä. Ankkuroinnin katsotaan alkavan solmun reunalta eli siitä kohdasta, jossa vetoteräs kohtaa puristusjännitykset. On suositeltavaa, että ankkurointi ulottuisi vähintään solmualueen toiseen reunaan, mutta aina se ei ole mahdollista (Esimerkiksi tuella, joka on aivan rakenteen reunassa). [8, s.50.]

2.5 Solmukohtat

Solmut ovat puristus- ja vetosauvojen yhtymäkohtia, joissa sauvavoimien suunnanmuutokset tapahtuvat. Solmupisteet (engl. *nodes*) ovat sauvojen leikkauspisteitä, joiden tulee olla voimatasapainossa. Voimatasapainon ansiosta solmupisteestä voidaan ratkaista loput sauvavoimat, kun sauvojen suuntakulmat ovat tiedossa ja vähintään yksi sauvavoima on tunnettu. [8, s.52.]



Kuvio 20. Tyypillisiä solmupisteitä [8]

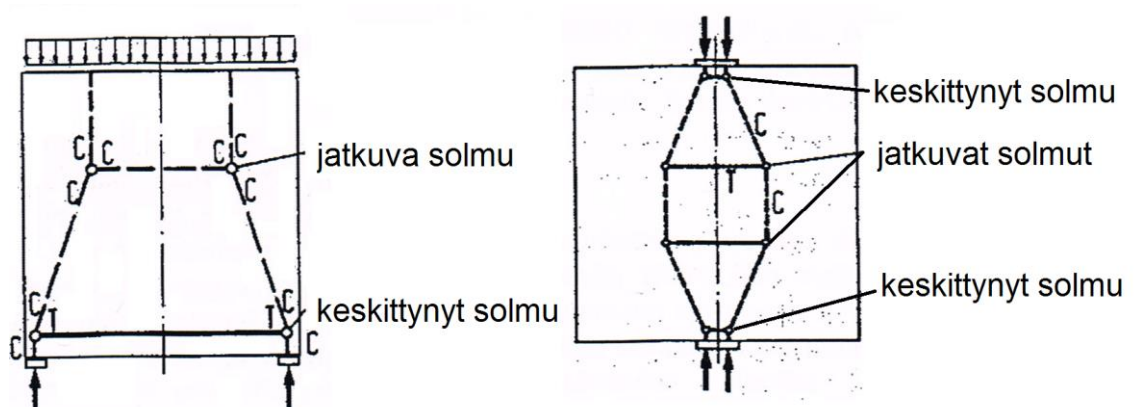
Mitoitettaessa solmuja, niitä käsitellään alueina (engl. *nodal zone*). Solmuun liittyvien sauvavoimien ajatellaan jakautuvan tietylle poikkileikkaukselle eli solmun reunalle. Solmualue on jännityskenttä, jossa sauvavoimien suunnanmuutokset tapahtuvat. Solmun reunajännitykset eivät saa ylittää kohdassa 2.5.3 esitettyjä mitoituslujuuksia. [8, s. 52.] Solmukohtien lujuustarkastelulla varmistetaan, että sauvojen kuormat voivat siirtyä sauvasta toiseen ja samalla tarkistetaan, onko malliin tehtävä korjauksia. Solmujen

mitoitus voidaan jakaa kolmeen osaan: solmun geometria, betonin puristusjännitystarkastelu ja raudoituksen ankkurointitarkastelu. [6, s. 12.]

Solmukohtien yleinen nimeämistapa on seuraava:

- CCC: Solmukohta, joka sitoo kolme puristussauvaa.
- CCT: Solmukohta, joka sitoo 2 puristussauvaa ja yhden vetosauvan.
- CTT: Solmukohta, joka sitoo 1 puristussauvan ja 2 vetosauvaa.
- Sama periaate pätee, mikäli solmuun yhtyy enemmän sauvoja. C tulee puristussauvasta (engl. *compression*) ja T vetosauvasta (engl. *tension*) [1]

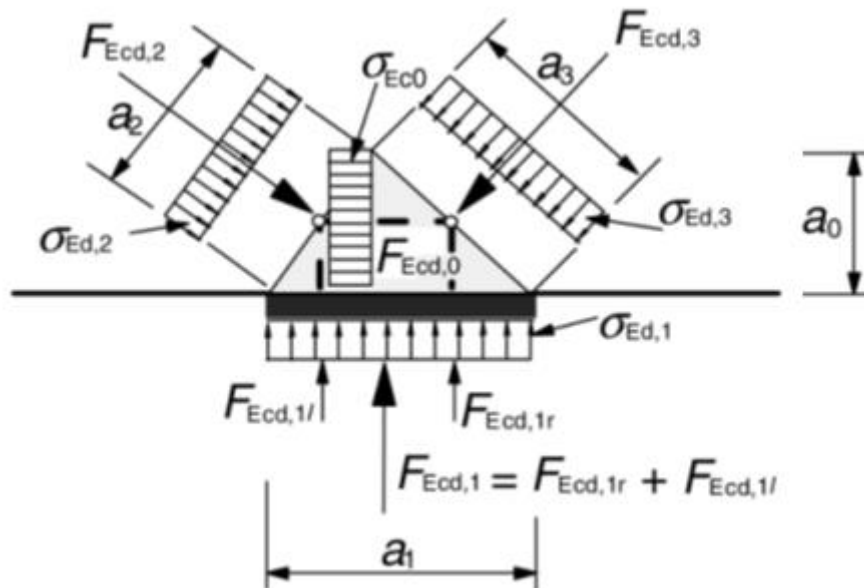
Solmut jaotellaan usein kahteen ryhmään: jatkuviin (engl. *continuous*) ja keskittyneisiin (engl. *concentrated*), kuviossa 21 esimerkki solmuista. Keskittyneiden solmujen sauvavoimien suunnanmuutokset tapahtuva pienellä alueella, ja jatkuvien solmujen jännitykset jakaantuvat taas suurille alueille. Keskittyneet solmut ovat yleensä mitoituksen kannalta kriittisiä ja niille tulee tehdä lujuustarkastelut, kun taas jatkuvia solmuja ei tarvitse tarkastella kuin raudoitusten ankkuroinnin riittävyyden osalta. Jatkuvia solmuja ovat esimerkiksi rakenteen keskellä olevat CCC-solmut, kuten kuvion 21 vasemmanpuoleisessa ristikkomallissa. Jatkuvia solmuja ovat myös solmukohdat, joissa rauditus jaetaan suurelle alueelle, kuten kuvion 21 oikeanpuoleisessa mallissa. Jatkuvat solmut eivät sijaitse rakenteen reunoilla. Keskittyneitä solmuja esiintyy usein esimerkiksi keskittyneiden kuormien tai tukien kohdalla. [8, s. 52.]



Kuvio 21. Esimerkissä on ristikkomallien solmut jaettu jatkuviin ja keskittyneisiin. [6]

2.5.1 Solmu, johon liittyy vain puristussauvoja (CCC)

Pelkästään puristussauvoja liittäviä solmuja esiintyy usein esimerkiksi pistemäisten kuormitusten sekä jatkuvien tukien kohdalla. Solmun korkeus määritetään sauvojen geometrian ja tukipinnan piteuden (kuviossa 22 a_1) mukaan. Kun solmukolmion sivut valitaan kohtisuoriksi sauvavoimaa kohtaan, jännitykset kaikissa solmualueen rajapinnoissa ovat yhtä suuria, toisin sanoen tasojännitystila on hydrostaattinen. Hydrostaattisessa tai sitä korkeammassa solmussa mitoittava reunajännitys on tukipaineen aiheuttama (kuviossa 22 jännitys $\sigma_{Ed,1}$). Jos solmulle valitaan tätä pienempi korkeus mitoittavaksi jännitykseksi, tulee kuvion 22 jännitys $\sigma_{Ed,0}$. [2 s.438 - 439.] Solmun korkeuden valinta vaikuttaa siihen liittyvien sauvojen suuntakulmiin ja suuntakulmien valinta vaikuttaa sauvan toisessa päässä liittyviin sauvavoimiin ja näin rauditusmäärään.



Kuvio 22. Solmu, johon liittyy vain puristussauvoja CCC [5]

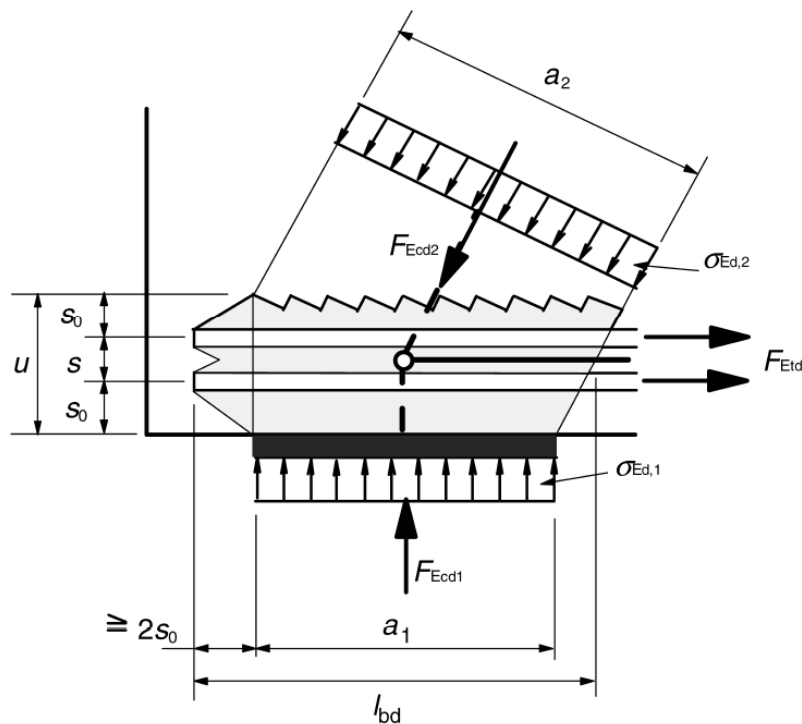
2.5.2 Solmut, joissa puristus- sekä vetosauvoja (CTT, CCT)

Puristus-vetosolmuissa päävetorauδοitukset ankkuroidaan solmuun tai vetorauδοituksen suunta muuttuu.

Solmualueen määrittelemiseksi vetosauvojen leveyttä u tarkastellaan kuvion 23 mukaan. Terästen jakaantuessa usealle riville on solmun jännitykset pienempiä kuin terästen ollessa yhdellä rivillä, jolloin solmuvoimat keskittyvät pienemmälle alueelle. Mitta u

riippuu raudoituksen ankkuroitumisesta ja raudoituksen jakautumisesta useampaan kerrokseen:

- $u = 0$, jos yhdessä kerroksessa oleva rauditus ei ankkuroidu solmun alueen taakse.
- $u = 2 * s_0$, jos yhdessä kerroksessa oleva rauditus ankkuroituu solmun taakse vähintään mitan $2 * s_0$ verran solmun taakse.
- $u = 2 * s_0 + (n - 1) * s$, jos n kerrosta käsittävä rauditus ankkuroituu vähintään mitan $2 * s_0$ verran solmun taakse. [2 s.439].

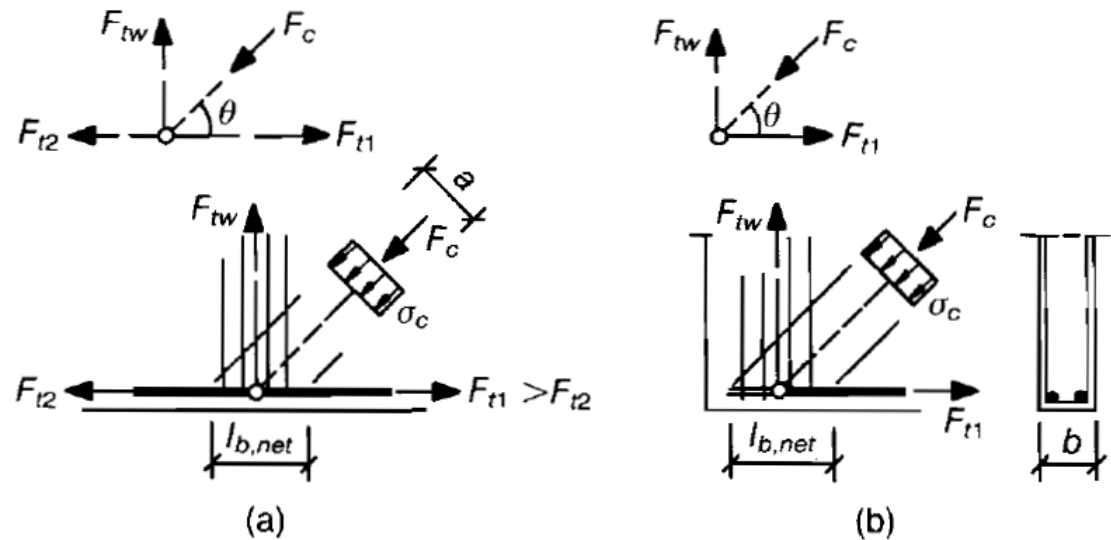


Kuvio 23. Puristettu ja vedetty solmu, johon liittyy yhden suunnan vetorauditus CCT [5]

Kuvion 23 mukaisessa solmussa puristusdiagonaalin leveys a_2 voidaan määrittää, kun diagonaalin suuntakulma, tuen leveys ja vetosauvan korkeus u on tiedossa kaavalla: $a_2 = a_1 * \sin\theta + u * \cos\theta$. Solmussa tulee vetoraudituksen ankkurointipituuden lisäksi tarkastella jännitykset $\sigma_{Ed,1}$ (tukipaine) ja $\sigma_{Ed,2}$ (diagonaalin aiheuttama puristusjännitys).

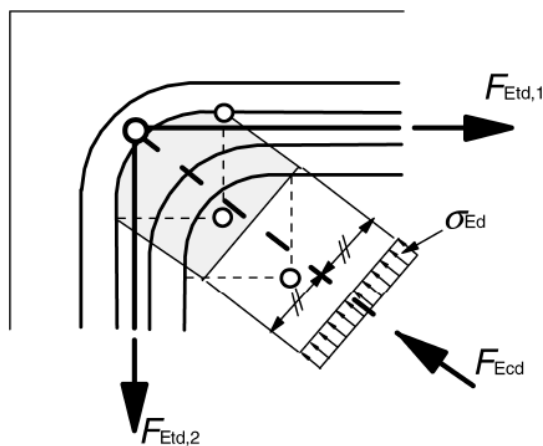
Koska kuvion 23 mukaisessa solmussa on raudoitusta vastaan kohtisuoraa puristusjännitystä, voidaan raudoituksen ankkurointipituudessa huomioida SFS-EN1992-1-1 mukainen ankkurointipituuteen liittyvä kerroin $\alpha_5 = 0,7$.

Solmut, joissa esiintyy vetovoimia kahdessa toisiaan kohtisuorassa suunnassa ovat tyypillisiä esimerkiksi lovipääpalkeissa ja muissa rakenteissa, joissa pääraudoitus ankkuroituu vapaalle reunalle. Pääraudoituksen vetovoima ankkuroituu puristusdiagonaalin ja hakojen tai muun poikittaisen raudoituksen avulla, joka on taivutettu kuvion 24 mukaan pääraudoituksen ympäri. [2, s. 442.]



Kuvio 24. Solmuissa a ja b vetovoimia toisiaan kohtisuorissa suunnissa CTT [12]

Taivutettujen terästen solmuissa (kuvio 25), puristusdiagonaalin maksimileveys solmun reunalla määräytyy raudoituksen taivutetun osan mukaan. Haat tai lenkit on laitettava taivutuksen alkamis- ja päättymiskohtiin estämään raudoituksen leviämisen poikittais-suunnassa. [12, s.224.]



Kuvio 25. Puristettu ja vedetty solmu, johon liittyy kahden suunnan vetoraudoitus CTT [5]

2.5.3 Solmukohtien mitoituslujuudet

Puristetussa solmussa (CCC, CCCC, kuvio 22) puristuskestävyys saadaan kaavasta:

$$f_{cd1} = k_1 * v' * f_{cd},$$

jossa $v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}}$ ja eurokoodin suositusarvo kertoimeksi $k_1 = 1,0$.

Puristettu ja vedetty solmu, jossa vetoa vain yhteen suuntaan (CCT, kuvio 23):

$$f_{cd2} = k_2 * v' * f_{cd},$$

Jossa $v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}}$ ja eurokoodin suositus kertoimeksi $k_2 = 0,85$.

Puristettu ja vedetty solmu, jossa vetoa kahteen suuntaan (CTT, kuvat 24 ja 25):

$$f_{cd1} = k_3 * v' * f_{cd},$$

jossa $v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}}$ ja eurokoodin suositusarvo kertoimeksi $k_3 = 0,75$.

Eurokoodi antaa mahdollisuuden kasvattaa edellä mainittuja mitoituslujuuksia 10 %, mikäli seuraavista ehdoista vähintään yksi on voimassa:

- kolmiakselisen puristus- ja vetosauvojen kehittyminen on varmistettu
- kaikki puristus- ja vetosauvojen väliset kulmat ovat $\geq 55^\circ$
- tuilla tai pistekuormien kohdalla vaikuttavat jännitykset jakautuvat tasaisesti, ja solmussa on laajenemista estävä haoitus
- rauditus on jaettu useaan kerrokseen
- solmun laajeneminen on estetty luotettavasti laakerijärjestelyin tai kitkan avulla. [5, s.109.]

2.6 Käyttörajatilatarkastelu

Ristikkomenetelmän avulla voidaan suorittaa myös käyttörajatilatarkasteluja, kuten esimerkiksi teräs- ja betonijäntysten ja halkeamaleveyden suuruuden tarkistus. Tällöin erityisesti kriittisissä kohdissa ja tärkeiden puristus- ja vetosauvojen tulee sijaita ja olla samansuuntaisia kuin lineaarisen kimmoteorian mukaiset jännityskentät. [5, s.63.] Tarkalla yksityiskohtien suunnittelulla ja minimiraudoitusten käytöllä saavutetaan parempi tulos halkeilun suhteen kuin laskennallisilla halkeamaleveydestarkasteluilla [6, s.21].

Sauvavoimien perusteella voidaan suoraan määrittää rakenteen muodonmuutokset. Betonisten puristussauvojen muodonmuutokset ovat yleensä pieniä verrattuna vetosauvoihin, ja riittävään tarkkuuteen päästään käyttämällä puristussauvan keskimääräistä pinta-alaa, vaikka pinta-ala vaihtelisikin. Vetosauvojen muodonmuutoksia mitoittaessa voidaan huomioida betonin vastaanottamat vetojännitykset halkeamien välillä käyttämällä eurokoodien keskimääräistä teräsvenymää. [6, s.21.]

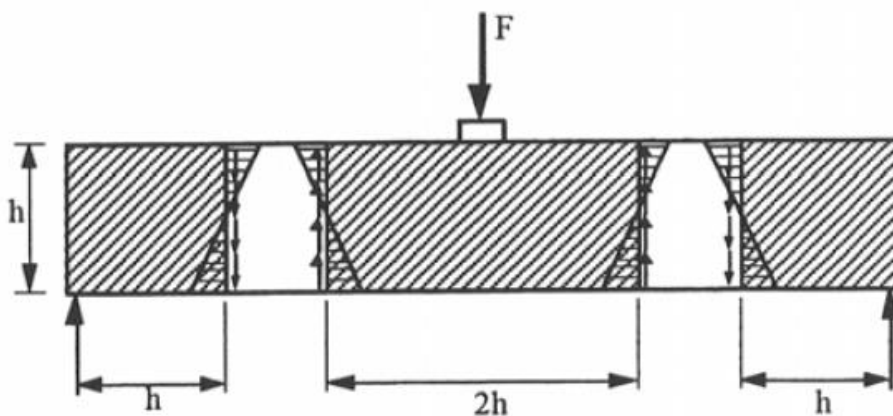
2.7 Yhteenveto mallin muodostamisesta ja suunnittelun kulusta

2.7.1 Vaihe 1: Tunnistetaan rakenteen B- ja D-alueet

Erotellaan rakenne B-alueisiin joissa poikkileikkauksien venymien aiheuttamat jännitykset lineaarisia, sekä D-alueisiin joissa staattisia tai geometrisia epäjatkuvuuksia. D-alueiden voidaan olettaa päättyvän rakenteen sivumitan etäisyydelle epäjatkuvuuskohdasta St. Venantin periaatteen mukaan. [3, s.11.]

2.7.2 Vaihe 2: Erotetaan D-alueet muista rakenteista ja selvitetään niihin kohdistuvat jännitysjaakaumat

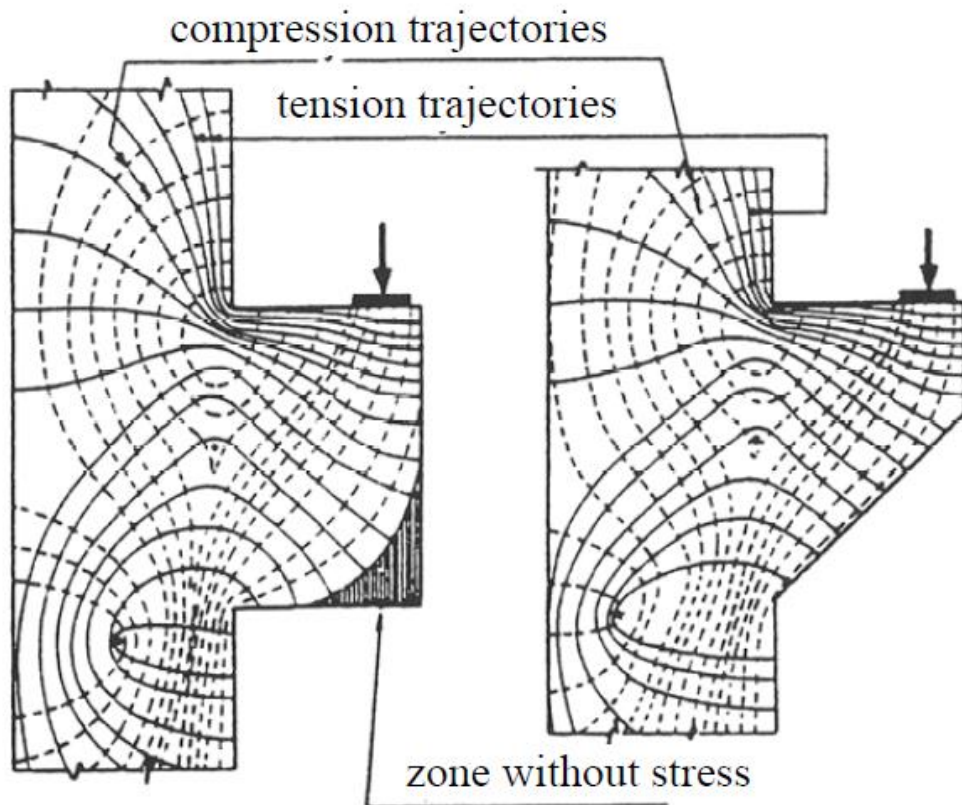
D-alueet voidaan erottaa muista rakenteista ja selvittää niiden reunoihin kohdistuvat kuormitukset, jotka aiheutuvat suoraan ulkoisista kuormista, sekä B- ja D-alueiden reunalla vaikuttavasta jännitysjakautumasta, kuten kuviossa 26 on esitetty. [3, s.13.]



Kuvio 26. Pistemäisesti kuormitetun yksiaukkoisen palkin jakaminen D-alueisiin ja näihin alueisiin vaikuttavat jännitykset. Vinoviivoitetut osat ovat D-alueita.

2.7.3 Vaihe 3: Kuormitusreittien analysointi sopivan ristikkomallin valitsemiseksi

Sopivan ristikkomallin löytämiseksi sauvojen tulee mukailla kimmoteorian mukaisia jännityksiä, jotta vältetään liian suurilta halkeamilta, siksi parhaimman mallin löytämiseksi olisi hyvä olla jännitystrajektorit tiedossa (esim. FEM-analyysin tulokset). Jännitystrajektoreista nähdään, kuinka jännitykset kulkevat rakenteessa. Kuitenkin monissa tapauksissa on mahdollista arvioida toimiva kuormituspolku, tietämättä tarkkoja kimmoteorian mukaisia jännitystrajektoreita. [3, s.13.]



Kuvio 27. Kaksi esimerkkiä konsolien jännitystrajektoreista [8]

2.7.4 Vaihe 4: Ristikkomallin valinta

Edellisen vaiheen avulla tulee pystyä valitsemaan ristikkomalli, jossa rakenteen sisäinen tasapaino on varmistettu. Tarkoituksena on luoda ristikko, joka on staattisesti määrätty, jonka myötä kaikki sauvavoimat voidaan määrittää solmujen tasapainoyhtälöiden perusteella. Valitaan ristikkomalli niin, että sauvat ovat suoria, ja ne ovat todellisten jännityskenttien resultanttien kohdalla. Jännityskenttien kaarevuudet keskitetään sol-

mukohtiin. Vetosauvoja sijoittaessa tulee huomioida myös raudoitustyön mielekkyys. [3, s.15.]

2.7.5 Vaihe 5: Laskenta

Lasketaan sauvavoimat solmujen tasapainoyhtälöistä, ja mitoitetaan veto- sekä puristussauvat ja solmukohdat. Tässä vaiheessa voidaan todeta, onko käytetty malli sopiva vai tuleeko sitä korjata. Yleensä puristussauvojen puristuskestävyys ei kuitenkaan tule määrääväksi vaan solmukohtien kestävyudet. [3, s.18.]

2.7.6 Vaihe 6: Raudoitusjärjestelyt

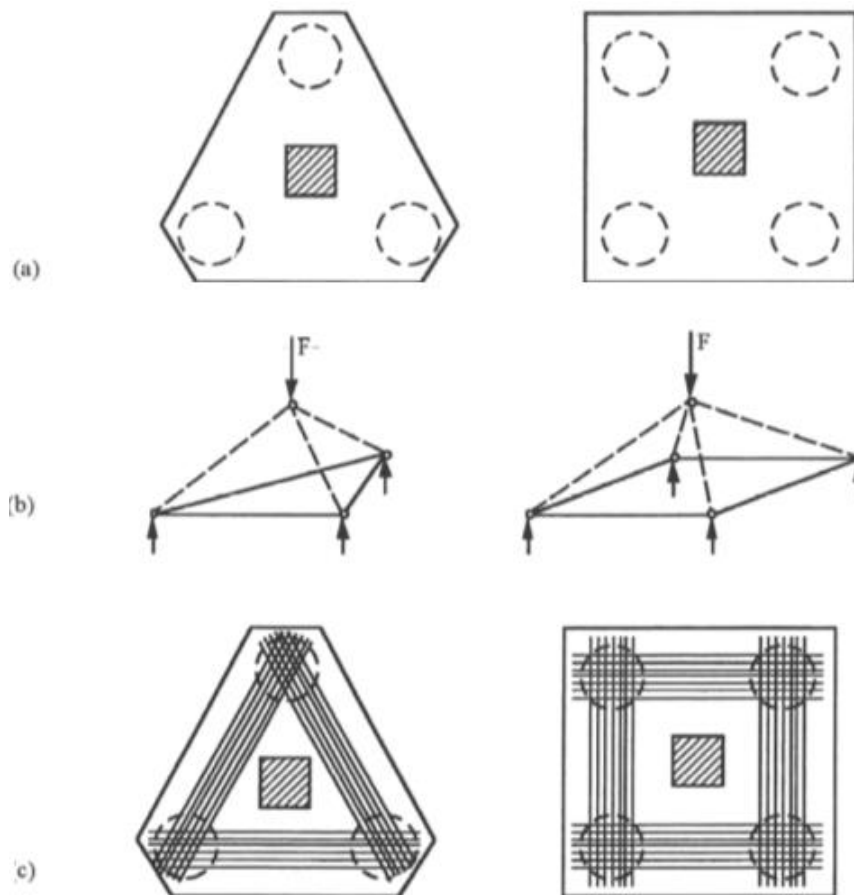
Vetovoimat otetaan vastaan vetoraudoituksella. Raudoitus voi koostua useista tangoista, joiden painopisteen tulee sijaita mallin vetosauvan kohdalla. Vetoraudoituksen ankurointi alkaa solmun etureunasta. Raudoituksia määritettäessä tulee myös huomioida eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 mukaiset rakenteelle määritetyt minimiraudoitukset [3, s.18.]

3 Esimerkkejä soveltamiskohteista

Tähän lukuun on kerätty muutamia esimerkkejä kirjallisuudesta ristikkomenetelmän hyödyntämisestä rakenteiden suunnittelussa.

3.1 Paaluanturat

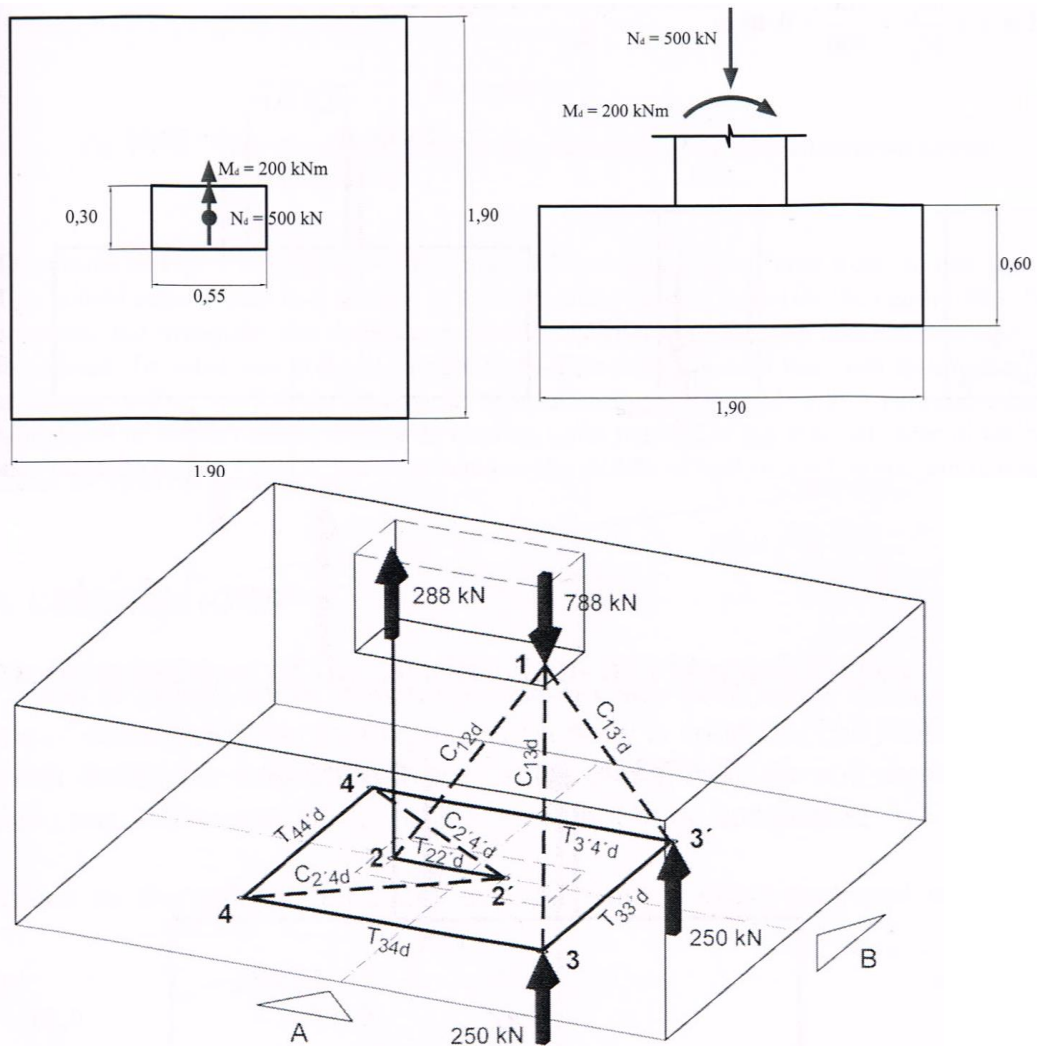
Paaluanturat tehdään yleensä niin korkeiksi suhteessa paalujen keskiöväleihin, että ne toimivat koko rakenteen osalta D-alueen tavoin ja voimasuureiden tarkastelussa on kannattavaa hyödyntää ristikkomenetelmää. [4, s.454.]



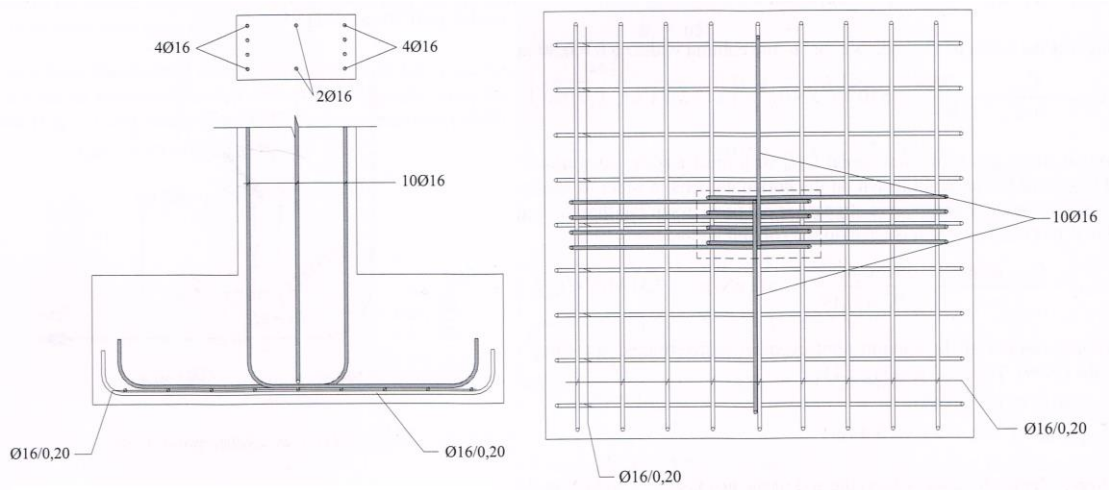
Kuvio 28. a) paalupilarianturat b) 3-ulotteiset ristikkomallit c) rauditus-esimerkki [3]

3.2 Pilariperustus

3-ulotteista ristikkomallia voidaan hyödyntää esimerkiksi taivutusjäykän pilariperustuksen mitoituksessa.



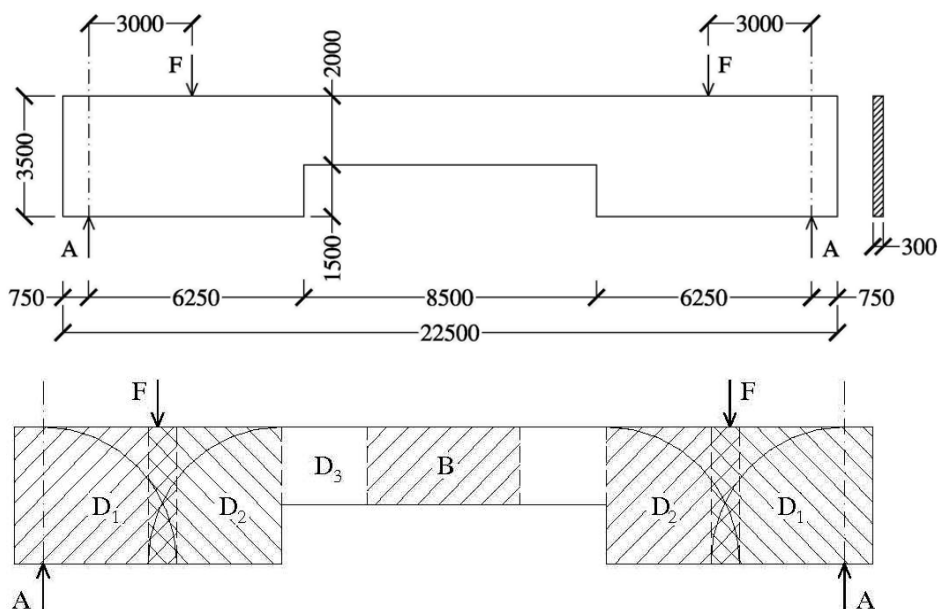
Kuvio 29. Esimerkki taivutusmomentin ja normaalivoiman kuormittamasta pilariperustuksesta. Alapuolella esitetty 3-ulotteinen ristikkomalli rakenteelle.[7]



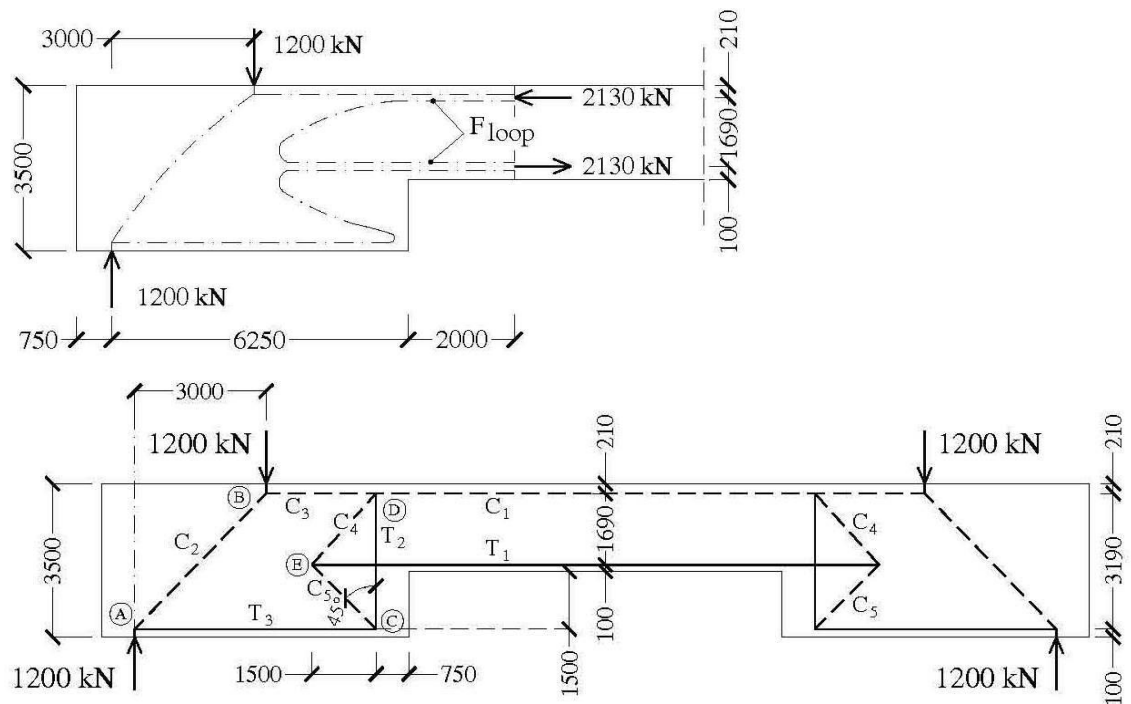
Kuvio 30. Rauditus edellisellä sivulla esitetylle rakenteelle [7]

3.3 Palkit, joiden poikkileikkaus muuttuu

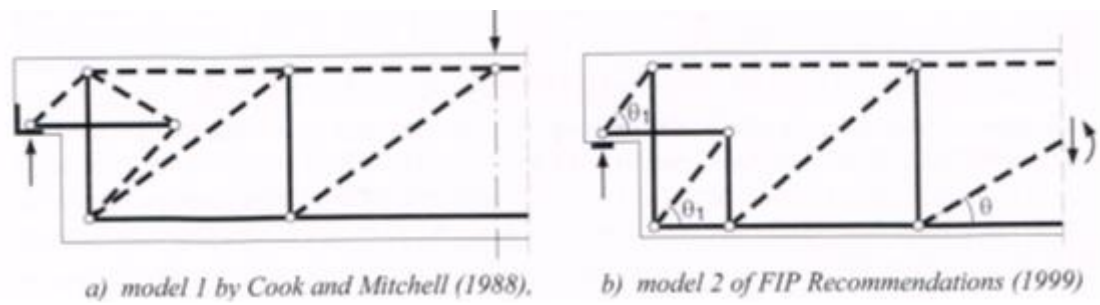
Kun palkeissa on aukkoja tai poikkileikkaukset muuttuvat, muodostuu niiden geometriin epäjatkuvuuskohtiin D-alueita. Kuviossa 31 esitetty ristikkomalli reunoista keskitetysti kuormitetulle palkkirakenteelle, jonka poikkileikkaus on matalampi palkin keskellä.



Kuvio 31. Ylempänä palkkirakenne, jonka poikkileikkaus muuttuu. Alempana rakenne jaettu B- ja D-alueisiin. [13]



Kuvio 32. Edellisen sivun palkkirakenteen kuormituspolku ja ristikkomalli. [13]



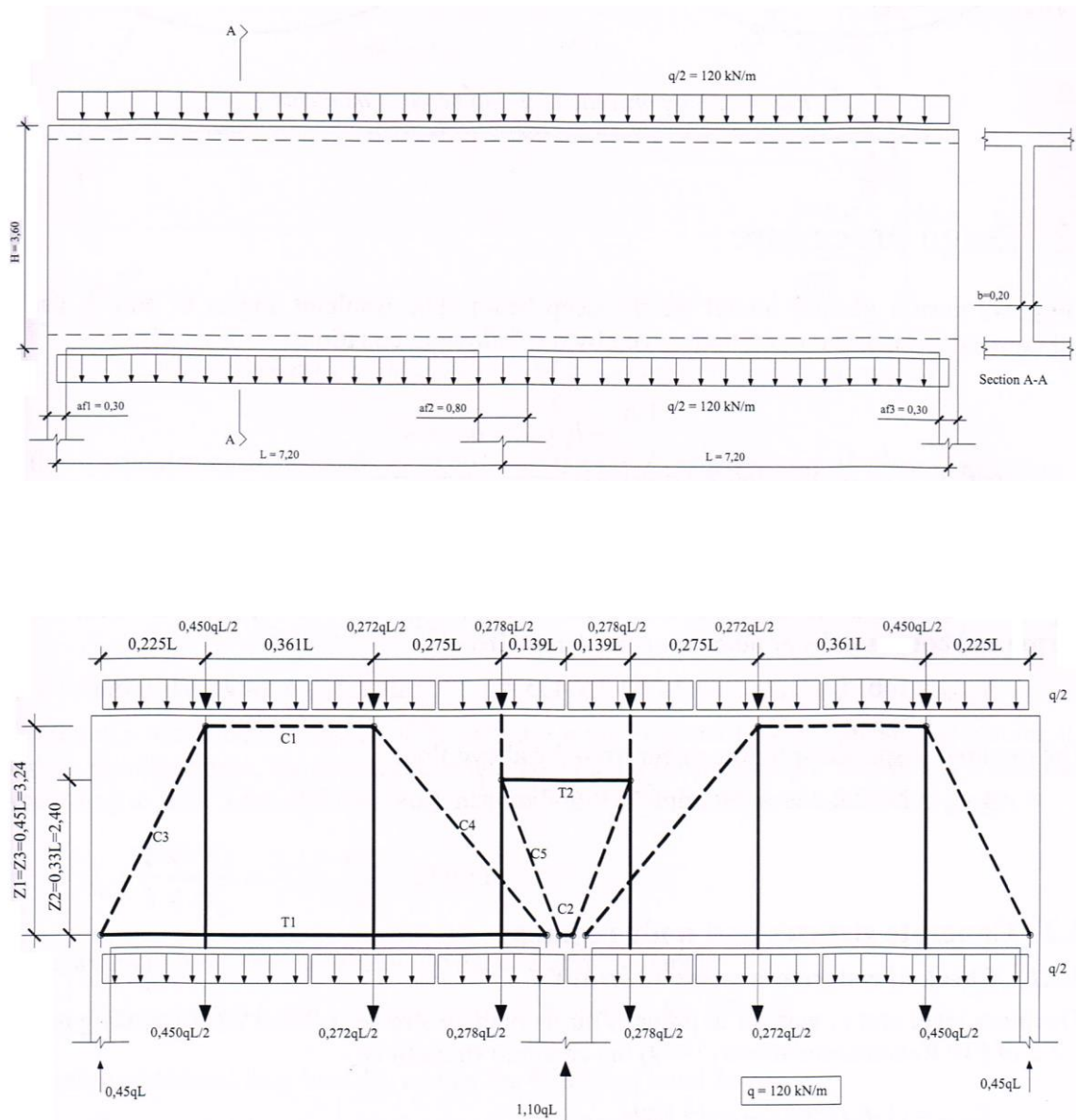
Kuvio 33. Kaksi erilaista ristikkomallia lovipääpalkille [13]



Kuvio 34. Tasoero laatassa tai palkissa [8]

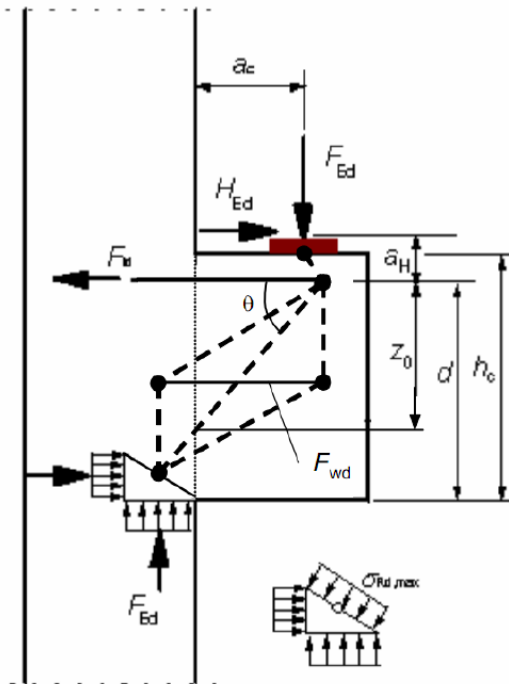
3.4 Seinämäiset palkit

Seinämäisiä palkkeja ovat sellaiset palkit, joissa poikkileikkauksen korkeus on yli kolme kertaa jännevälin [2, s. 429]. Kuvion 35 esimerkissä esitetty ristikkomalli jatkuvalle seinämäiselle palkkirakenteelle, jota kuormittaa yläpuolelta tasainen kuorma ja alapuolelta tasainen ripustuskuorma.



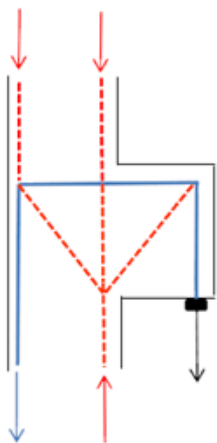
Kuvio 35. Ylhäällä on esitetty jatkuva seinämäinen palkki, jota kuormittaa ylä- ja alapuoliset laatat. Alapuolella on ristikkomalli rakenteelle. [7]

3.5 Konsolit

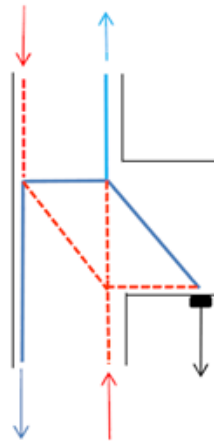


Kuvio 36. Ristikkomalli korkeussuunnassa lyhyelle konsolirakenteelle [3]

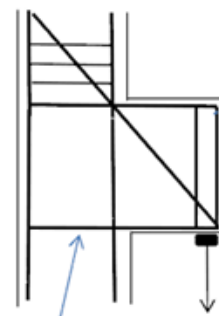
Pilarin yläosa
puristettu ennen
konsolia



Pilarin yläosa
taivutettu ennen
konsolia



Mahdollinen
periaatteellinen
raudoitus

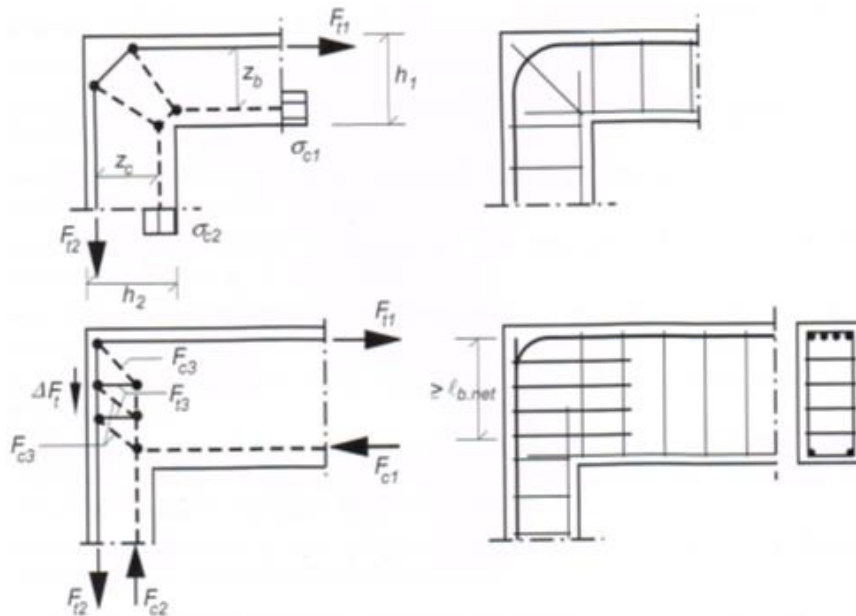


Raudoite tarvitaan hakojen
sitomiseksi. Kuormalla on usein
myös vaakakomponentti

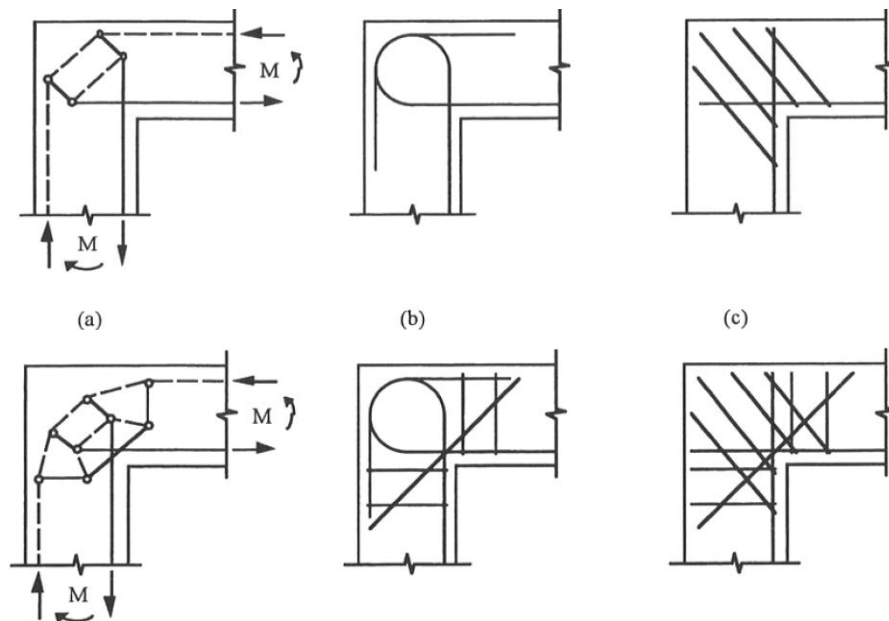
Kuvio 37. Kaksi ristikkomallia ja raudoitus konsolirakenteille, jossa ripustuskuorma. [14]

3.6 Kehänurkat

Kehänurkkarakenteiden jännitykset riippuvat palkin ja pilarin tai seinän ja laatan poikkileikkausten korkeuksista. Kuvion 38 ylempää yksinkertaista ristikkomallia voidaan hyödyntää jos pilarin ja palkin poikkileikkausten korkeudet ovat samaa luokkaa.



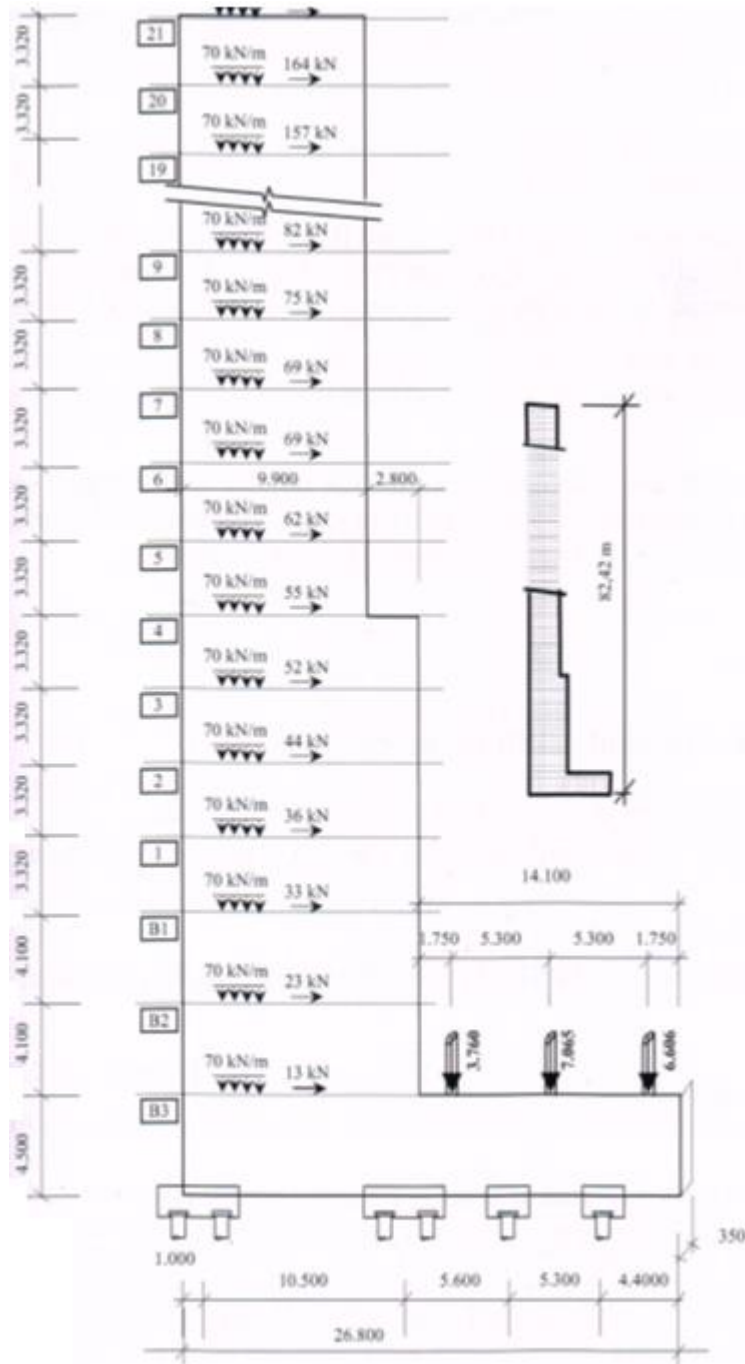
Kuvio 38. Kehänurkan ristikkomallit ja rauditus ("positiivinen momentti") [2]



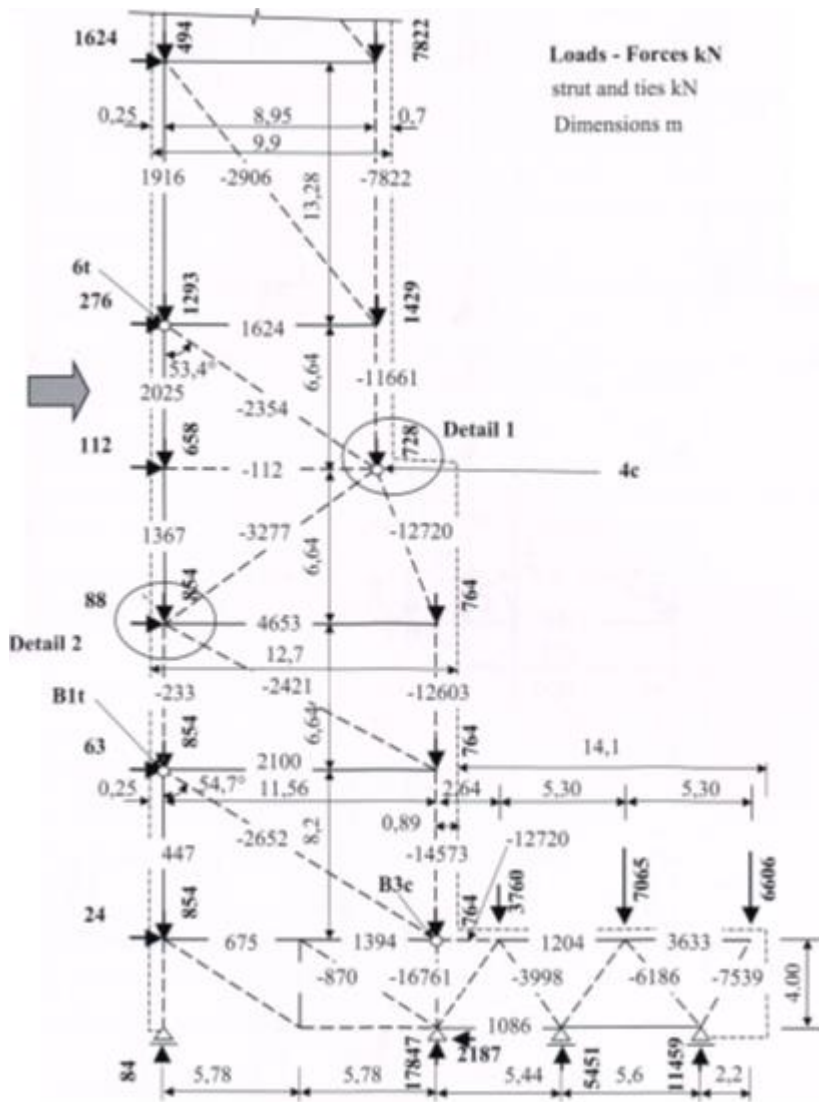
Kuvio 39. Kehänurkan ristikkomalleja, joissa "negatiivinen momentti". Ristikkomallien vieressä on kaksi erilaista rauditusvaihtoehtoa. [7]

3.7 Jäykistävät seinät

Ristikkomenetelmää voidaan myös hyödyntää mitoittaessa jäykistäviä seinärakenteita. *Fib Design examples for strut-and-tie models* -kirjassa on esitetty esimerkki 21-kerrosta korkean toimistorakennuksen jäykistävälle seinälle (kuvio 40). Kyseisessä esimerkissä rakennetta kuormittavat seismiset vaakakuormat.



Kuvio 40. Jäykistävä seinä [7]



Kuvio 41. Ristikkomalli edellisen sivun jäykistävälle seinälle [7]

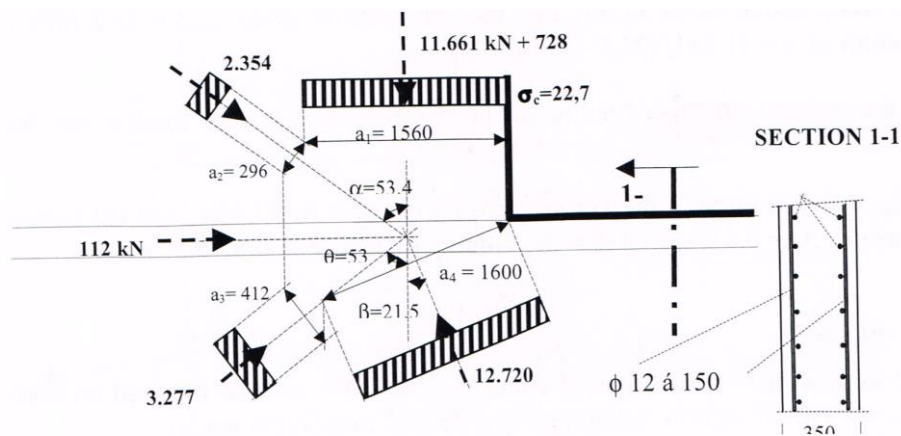
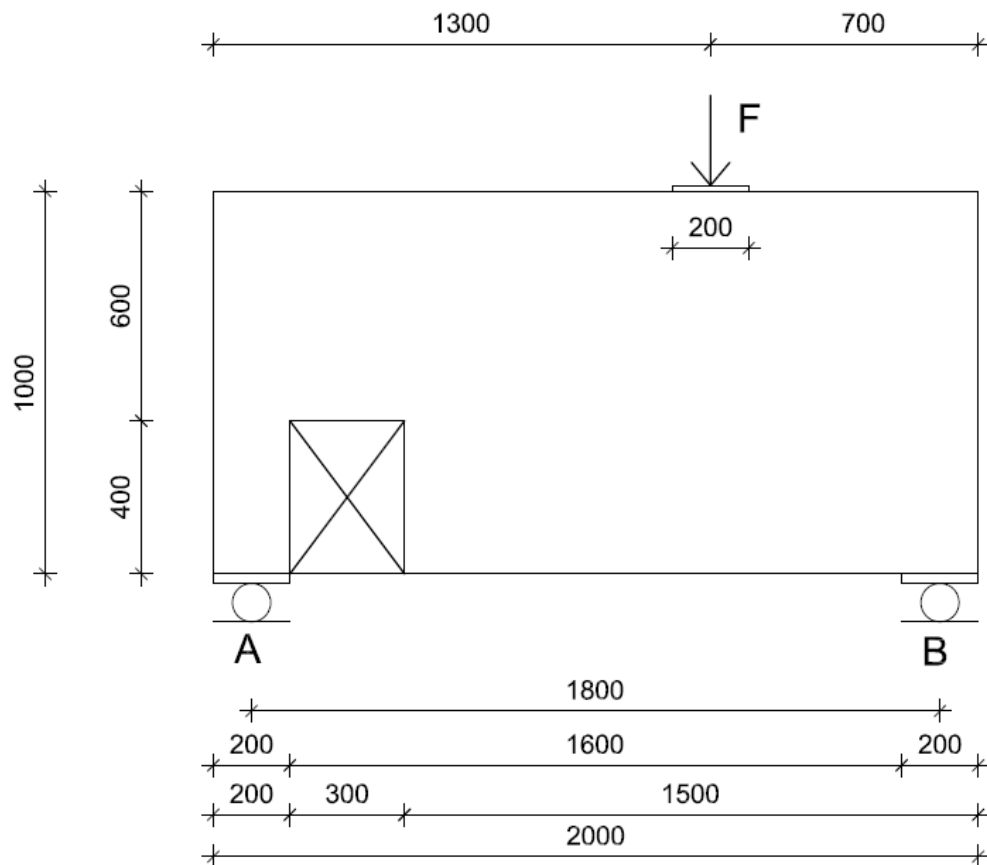


Fig. 5-6: Detail 1

Kuvio 42. Jäykistävän seinän ristikkomallin solmukohta (Detail 1) [7]

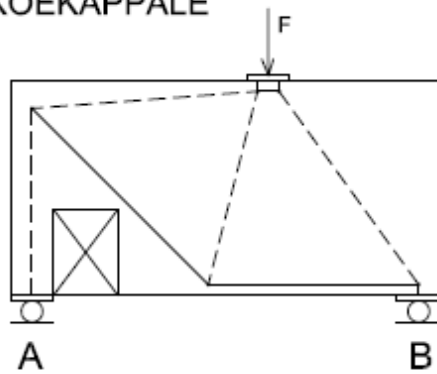
4.2 Koekappaleet

Koekappaleina käytetään kuvion 44 mukaisia kolmea yhdenmuotoista teräsbetoniseiniä. Koekappaleet muotit, rauditus ja valu tehtiin Metropolian ammatikorkeakoulun laboratoriossa.

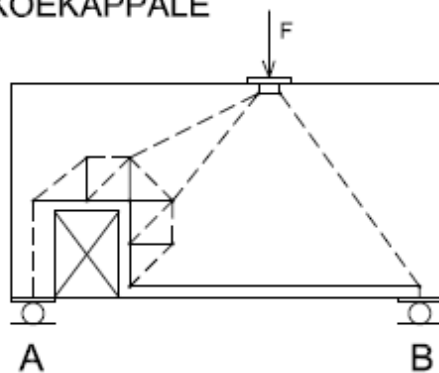


Kuvio 44. Koekappaleen mitat; paksuus 100 mm.

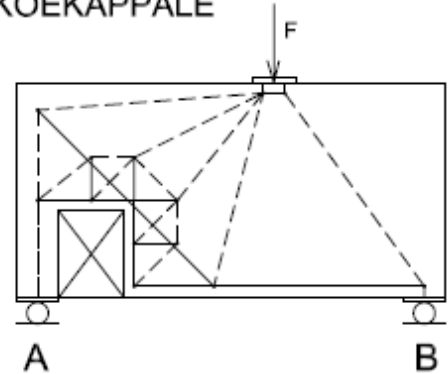
1. KOEKAPPALE



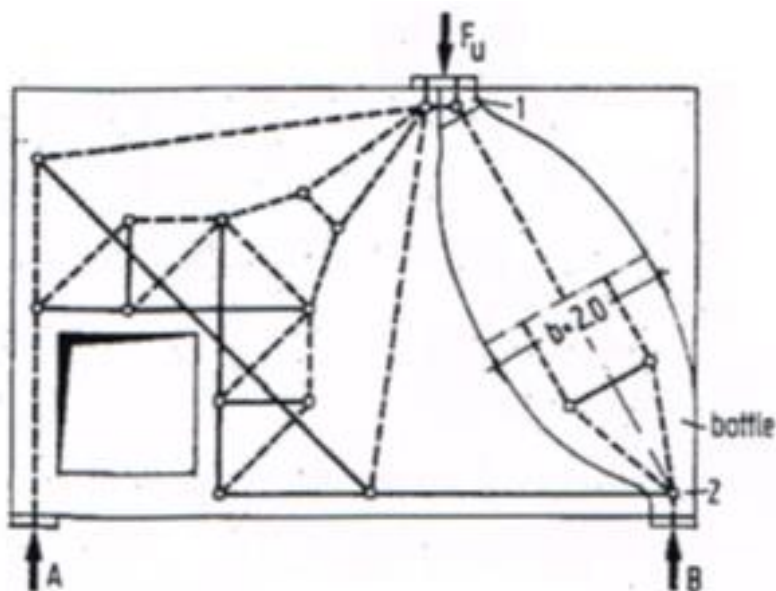
2. KOEKAPPALE



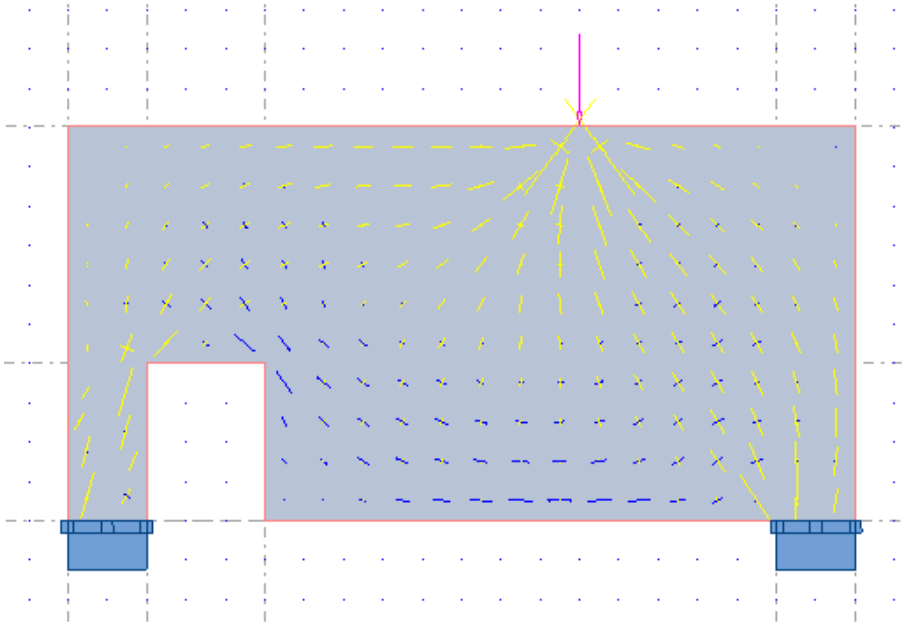
3. KOEKAPPALE



Kuvio 45. Koekappaleiden mitoituksessa sovellettavat ristikkomallit, joissa mustat viivat veto-sauvoja ja violetit katkoviivat puristussauvoja.



Kuvio 46. Koekappaleiden ristikkomalleille esimerkkinä toiminut tyyppinen ristikkomalli [6]



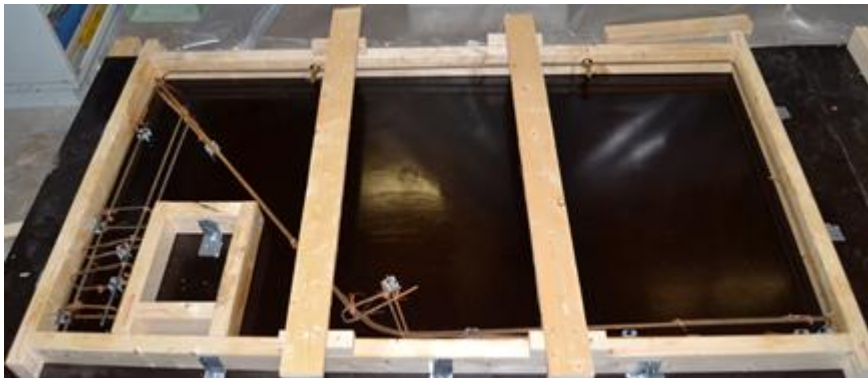
Kuvio 47. Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011-ohjelmalla luodun rakennemallin kimmoteorian mukaiset jännitystrajektorit. Keltaiset kuvaavat puristusjännityksiä ja siniset vetojännityksiä. Viivan pituus on verrannollinen jännityksen suuruuteen.

Koekappaleet mitoitettiin kuvion 45 mukaisien ristikkomallien mukaan. Mallien valinnassa hyödynnettiin kuvion 46 mukaista tyypillistä aukollisen seinämäisen palkin esimerkkiristikkomallia ja Robotilla tehdyn FEM-analyysin tuloksia, kuviossa 47 nähdään koekappaleen kimmoteorian mukaiset jännitystrajektorit. Sinisistä vetojännitystrajektorista voidaan huomata alareunan vetojännitysten kaareutuvan noin 45 asteen kulmassa reiän yläpuolelle ja siellä jännitykset kääntyvät puristusjännityksiksi aukon toiselle puolelle ja tuelle A. Suurimmat vetojännitykset esiintyvät aukon oikeassa yläkulmassa. Ensimmäisessä mallissa alapinnan vetorauskoitus käännetään 45 asteen kulmassa aukon oikean yläkulman vierestä kohti rakenteen vasenta yläreunaa, jossa se yhdistyy tuelta A tulevan puristuskentän kanssa. Toinen ristikkomalleista on raudoitusteknisesti helpompi toteuttaa, sillä siinä on vain pysty- ja vaakasuuntaisia vetosauvoja. Siinä aukon päällä kulkee vaakasuuntainen vetorauskoitus, joka muodostaa aukon yläpuolelle ”korkean palkin”. Alapinnan pääraudoitus ripustetaan pystysuuntaisella raudoituksella tämän ”korkean palkin” yläpuolelle. Ensimmäisen ristikkomallin mukaisen vinorauskoituksen voidaan olettaa rajoittavan halkeamia tehokkaammin kuin toisen ristikkomallin pysty- ja vaakasuuntaisten raudoitusten, sillä se mukailee tarkemmin kimmoteorian mukaisia jännityksiä. Kolmas ristikkomalleista on kahden edellisen mallin yhdistelmä. Malli muodostetaan siten, että molemmat mallit kantavat puolet edellisten mallien kuormista. Tällöin koejärjestelyä ajatellen molempien edellisten mallien vetosauvojen raudoituksesta kolmanteen malliin tulee puolet.

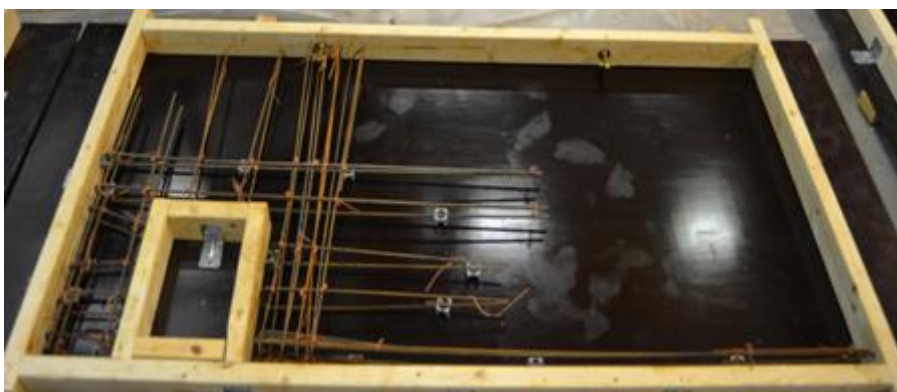
4.3 Koejärjestelyt ja tutkimuksen kulku

Koekappaleet pyrittiin mitoittamaan noin 150 kN kuormalle, jossa on huomioituna omapaino n. 5 kN. Rauditusjärjestelyiden takia kappaleiden laskennalliset murtokuormat hieman tästä vaihtelevat. Laskelmat esitetään liitteessä 1. Kuormituskokeen jälkeen laskelmat tarkennettiin betonin lujuuden osalta, kun betonin puristuslujuus koestettiin betonilaboratoriossa.

Koekappaleet valettiin 11.2.2014, ja ne kuivuivat kuivissa sisätiloissa kuormituskokeeseen asti. Kappaleiden rauditus pyrittiin toteuttamaan niin, että kappaleisiin tulisi mahdollisimman vähän ylimääräistä raudoitusta, jotta sisäiset voimat kulkisivat ajatellun ristikkomallin mukaan. Siirtojen ja nostojen takia yläpintaan laitettiin yksi 8 mm reunateräs, joka taivutettiin alaspäin sivuille, kuten kuvassa 2. Koekappaleet valettiin betonitehtaalta tilatusta C25/30 betonista.



Kuva 2. Koekappaleen 1 muotti ja rauditus



Kuva 3. Koekappaleen 2 muotti ja rauditus (Kuvasta puuttuu yläpinnan reunateräs).



Kuva 4. Koekappaleen 3 muotti ja raudoitus (Kuvasta puuttuu yläpinnan reunateräs).



Kuva 5. Valetut koekappaleet.

4.4 Tulokset

Kuormituskokeet suoritettiin Metropolian rakennetekniikan laboratoriossa 12.3.2014.

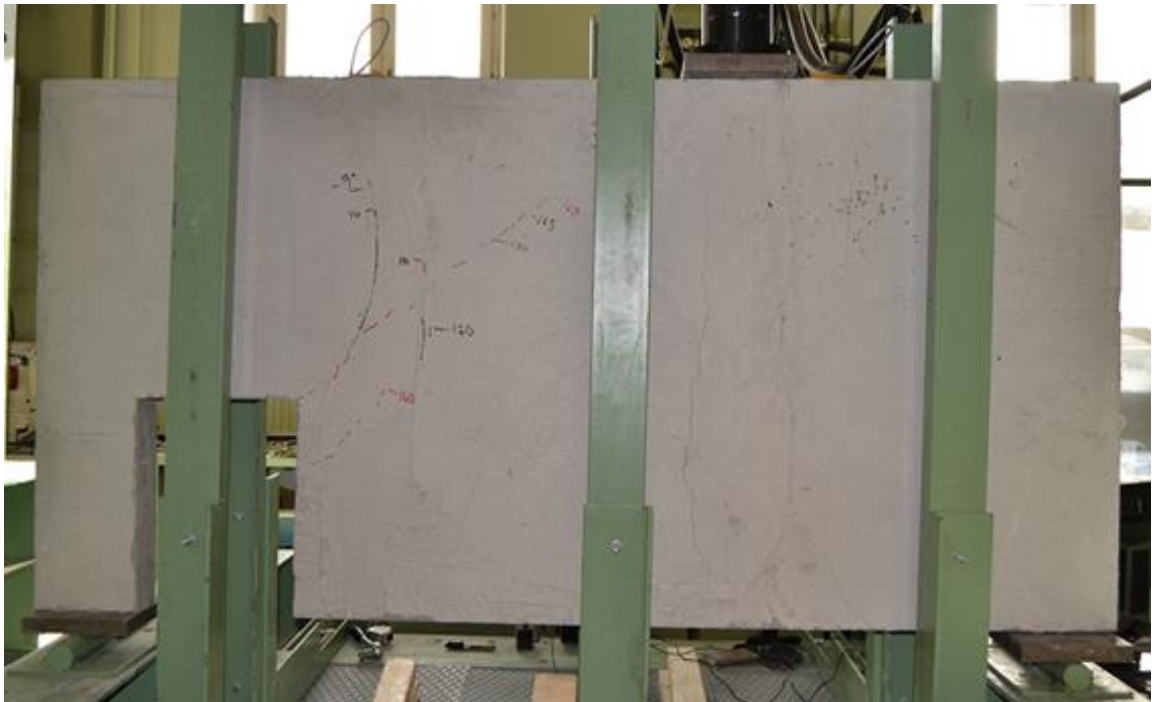
Kuormittaminen tehtiin pykälittäin samalla seuraten halkeamien muodostumista silmämääräisesti. Halkeamia muodostuessa, niitä mitattiin luupein ja ne merkittiin tusseilla, niin että eri aikaan muodostuvat halkeamat erotettiin eri värein. Kuormitusta kasvatettiin pykälittäin niin kauan, että rakenne menetti kantokykynsä ja saatiin selville sen todellinen murtoraja.

Ensimmäisen ristikkomallin mukainen koekappale kaatui ja murtui jo sitä siirrettäessä kovettumaan, sen tuennan pettäessä, joten ensimmäistä mallista ei saatu koetuloksia.

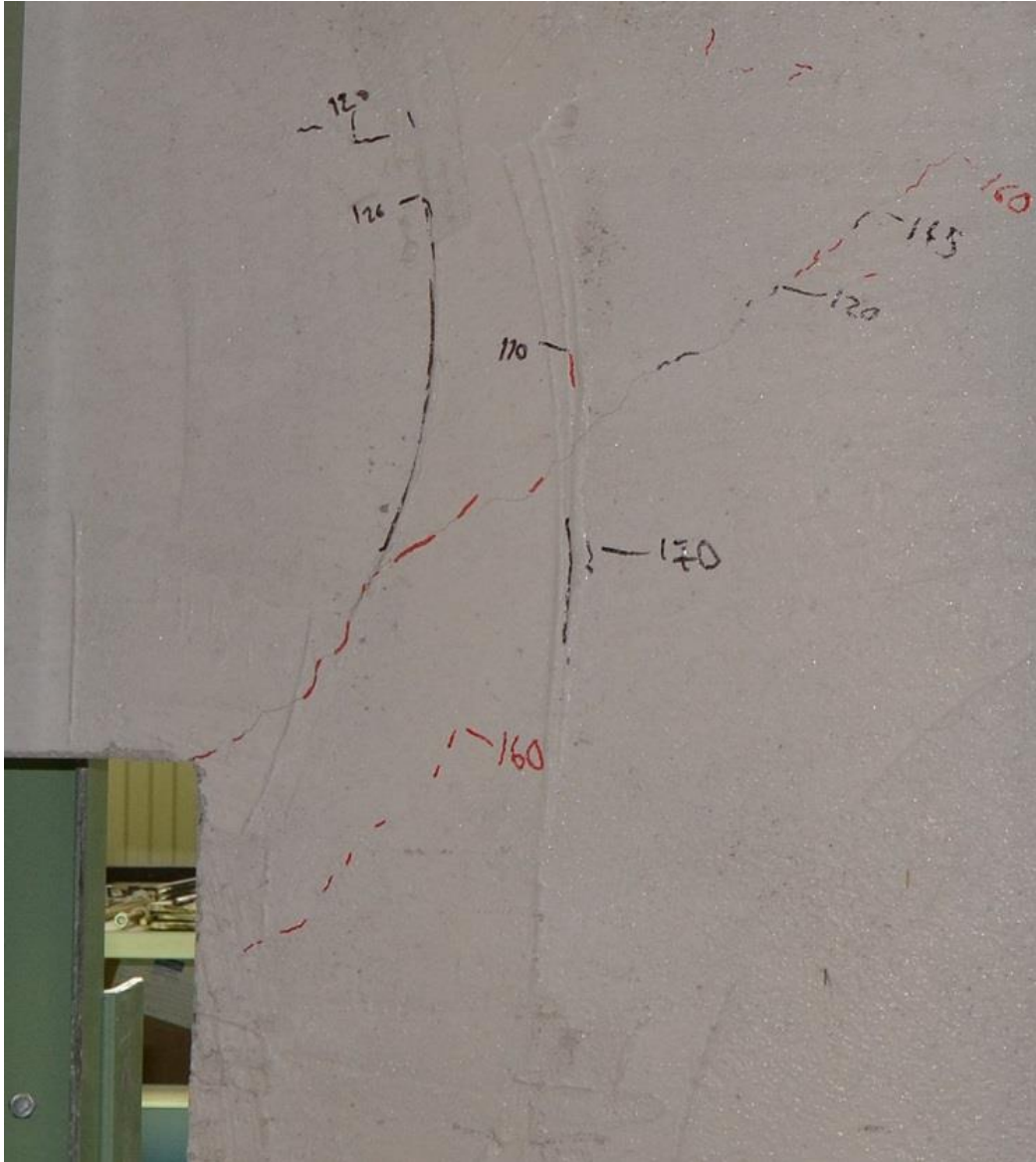


Kuva 6. Siirrettäessä kaatunut koekappale nro 1.

Kuormituskokeet aloitettiin koekappaleesta nro 3. Ensimmäiset halkeamat erottuivat vasta 100 kN kuormituksesta. Halkeamat muodostuivat aukon oikeanpuoleiseen kulmaan, jossa myös kimmoteorian mukaiset suurimmat vetojännitykset sijaitsivat. Rakenteeseen muodostui 173,6 kN kohdalla suuri halkeama (yli 1 mm) suoraan kuormituskohdasta alaspäin, ennen tätä rakenteessa ei ollut halkeamia muualla kuin rakenteen aukon oikeassa yläkulmassa. Vaikka halkeama oli suuri seinän keskellä, rakenne pysyi kuorman silti kannattamaan.



Kuva 7. Koekappale 3: 173,6 kN kuormitus, jolloin suuri halkeama muodostui



Kuva 8. Koekappale 3: Aukon oikeaan yläkulmaan muodostuneet halkeamat (173,6 kN)



Kuva 9. Koekappale 3: Keskelle muodostunut halkeama (173,6 kN)

Rakenteen kuormitusta jatkettiin aina 201,2 kN, jolloin rakenne halkesi ja menetti täysin kantokykynsä. Kuvien 10 ja 11 murtumasta voidaan huomata alapinnan raudoituksen pysyneen katkeamattomina ja ankkuroinnin pettäneen B-tuella.



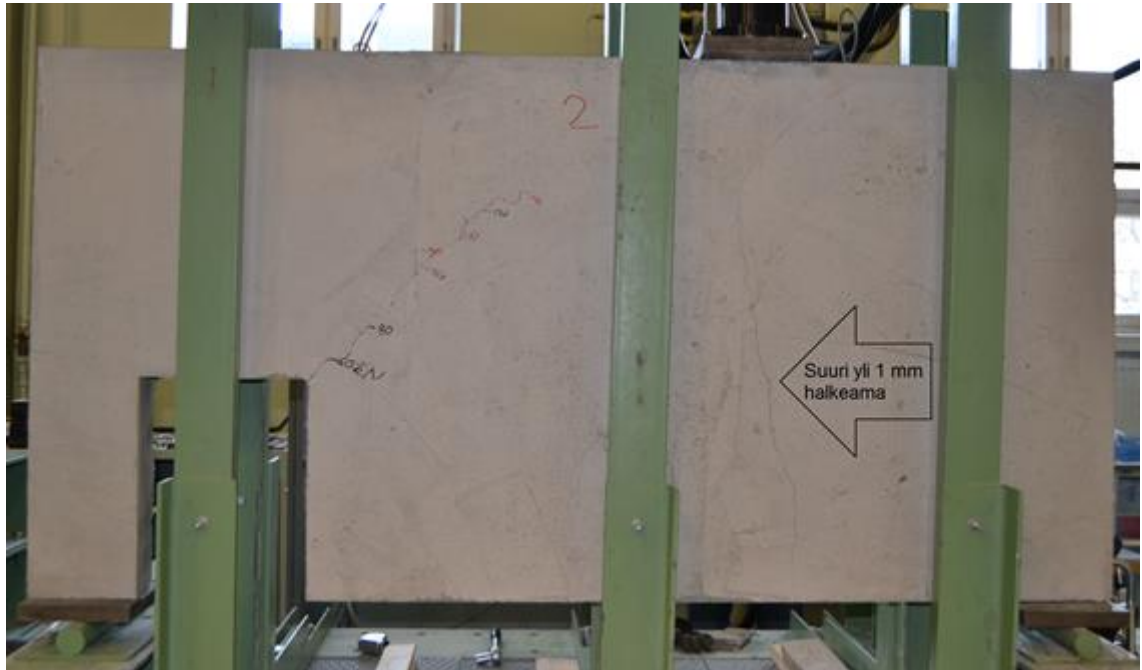
Kuva 10. Koekappale 3: Haljenneena



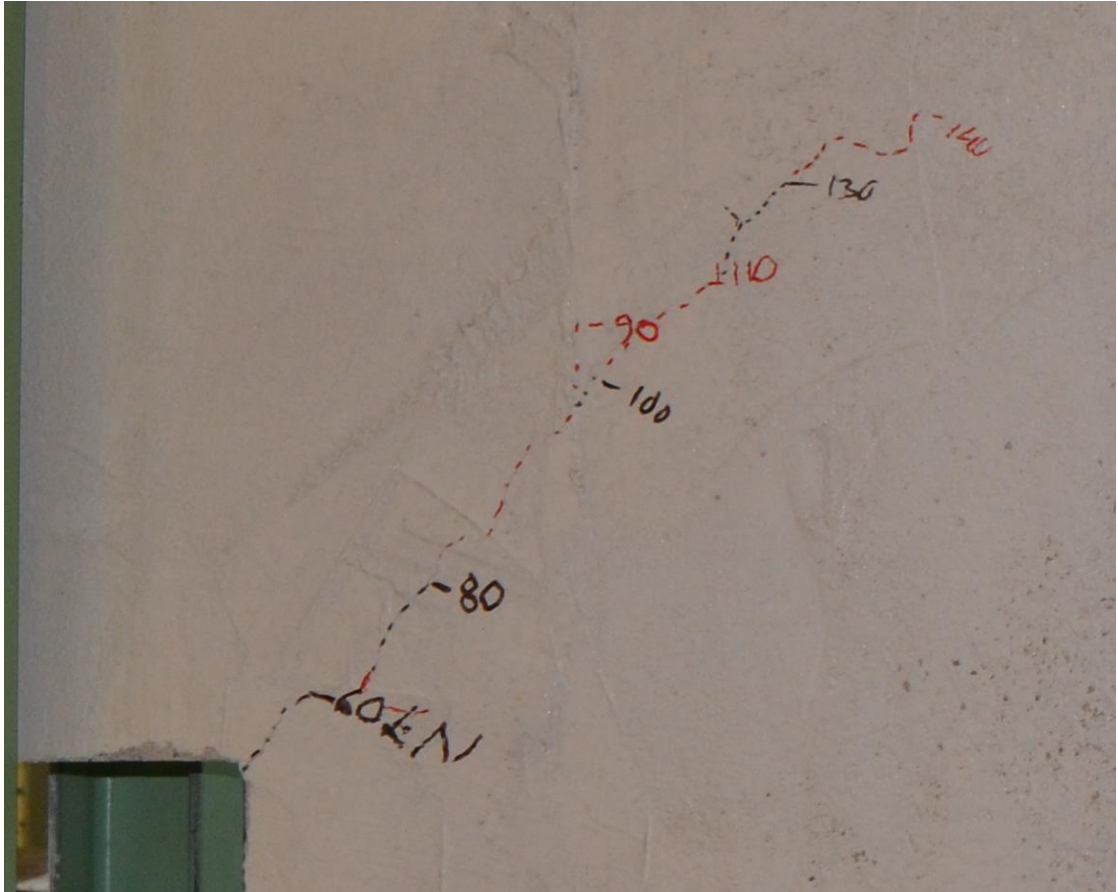
Kuva 11. Koekappale 3: Alapinnan teräkset eivät katkenneet tuella B

Kuormitettaessa koekappaletta nro 2 ensimmäiset mikrohalkeamat oli mahdollista silmin erottaa aukon oikeanpuoleisesta kulmasta 60 kN kuormituksessa. 90 kN kuormituksesta halkeamat olivat jo selkeästi erottuvat ja suurimmillaan noin 0,1 mm levyisiä. 130 kN kuormituksessa halkeamat 0,3 mm suuruisia. 168,3 kN kuormituksesta rakenteeseen syntyi suuri yli 1 mm kokoinen halkeama rakenteen keskelle. Vaikka halkeama

oli suuri seinän keskellä, rakenne pystyi kuormaa silti kannattamaan. Toisen koekappaleen kuormitus lopetettiin 168,3 kN.



Kuva 12. Koekappale 2, 168,3 kN kuormituksessa, jolloin rakenteeseen muodostui suuri halkeama nuolen osoittamaan kohtaan kuormituskohdasta alaspäin. Aukon oikealla puolelle on tussilla merkitty silmin erotettavat halkeamat.



Kuva 13. Koekappale 2: 168,3 kN kuormituksessa, aukon oikean yläkulman halkeamat

Molemmat koekappaleet kantoivat yli laskennallisen murtokuorman. Näillä koejärjestelyillä koekappaleiden murtoa voidaan pitää sitkeänä, sillä ennen kantokykyänsä pettämistä koekappaleisiin syntyi jo selkeitä ja suuria yli millimetrin kokoisia halkeamia, koekappaleessa 2 kuorman 168,3 kN kohdalla ja koekappaleessa 3 kuorman 173,6 kN kohdalla. Molempiin koekappaleisiin nämä suuret halkeamat syntyivät samoille seuduille kuormituspisteen alapuolelle.

Taulukko 1. Kuormituskokeen tulokset taulukossa

	Laskennallinen murtokuorma [kN]	Kuormitus, jolloin ensimmäiset halkeamat muodostuivat [kN]	Kuormitus, jolloin keskelle muodostui suuri halkeama [kN]	Kuormitus, jolloin koekappale halkesi [kN]
Koekappale 2	158	60	168,3	-
Koekappale 3	153	100	173,6	201,2

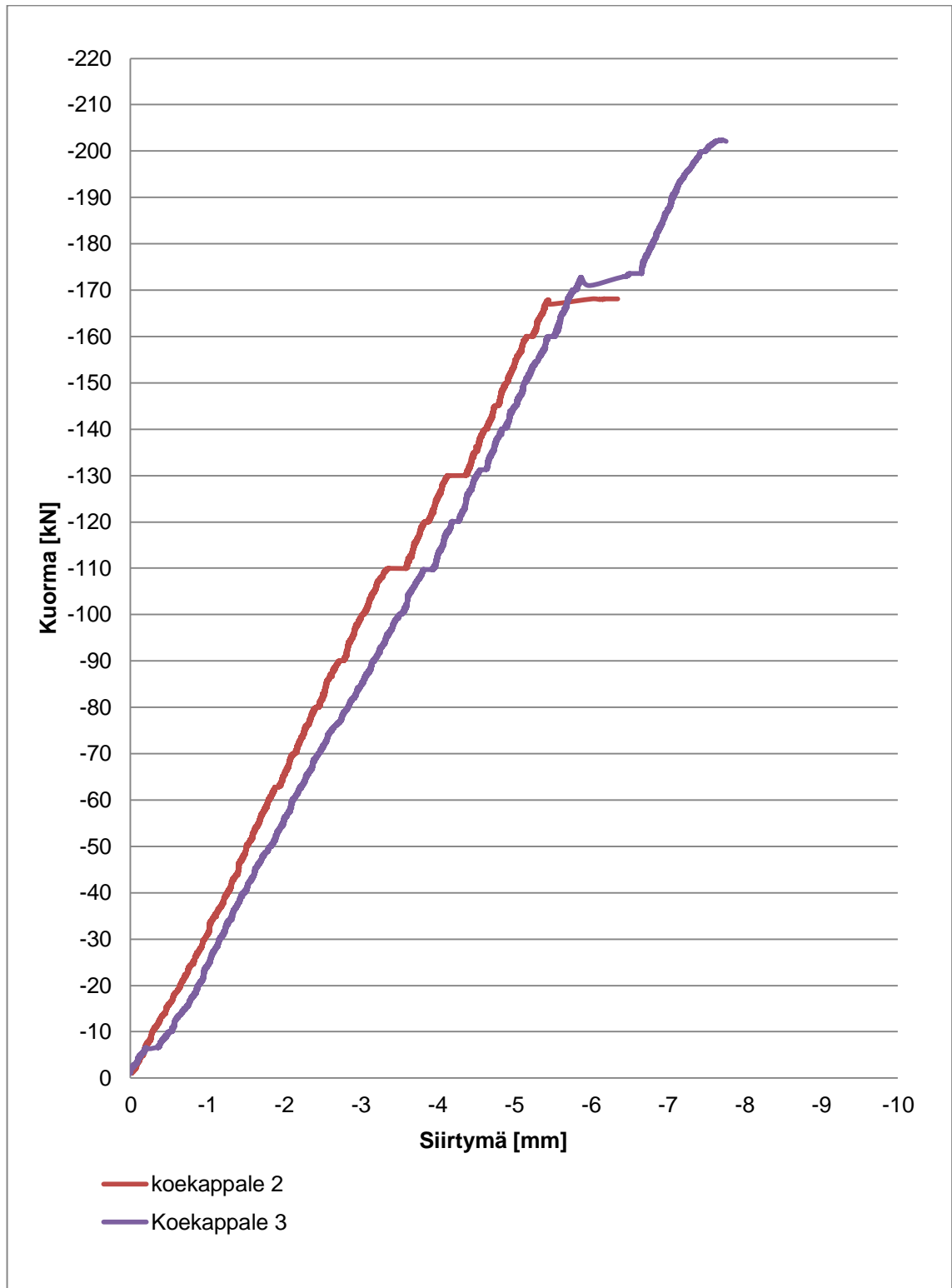
Kuormituskokeen tuloksiin vääristymiä mahdollisesti aiheutti molempien koekappaleiden tukipintojen vinous, joka aiheutui puumuottien käyryyksistä (kuvat 14 ja 15). Tämä vaikutti todennäköisesti halkeamaleveyksiin, sillä molemmissa rakenteissa halkeamat olivat hieman pienempiä muottipinnan puolella, ja molemmista koekappaleista pystyi silmin erottamaan pientä kaareutumista suurien halkeamien muodostumisen jälkeen. Tukipinnan vinoudella oli todennäköisesti vaikutusta myös koekappaleen 3 lopulliseen murtumiseen tuella B. Koska tukipinta oli vino, ankkuroinnin ei voida olettaa enää alkavan tuen reunalta sillä puolella seinää, joka on irti tukipinnasta.



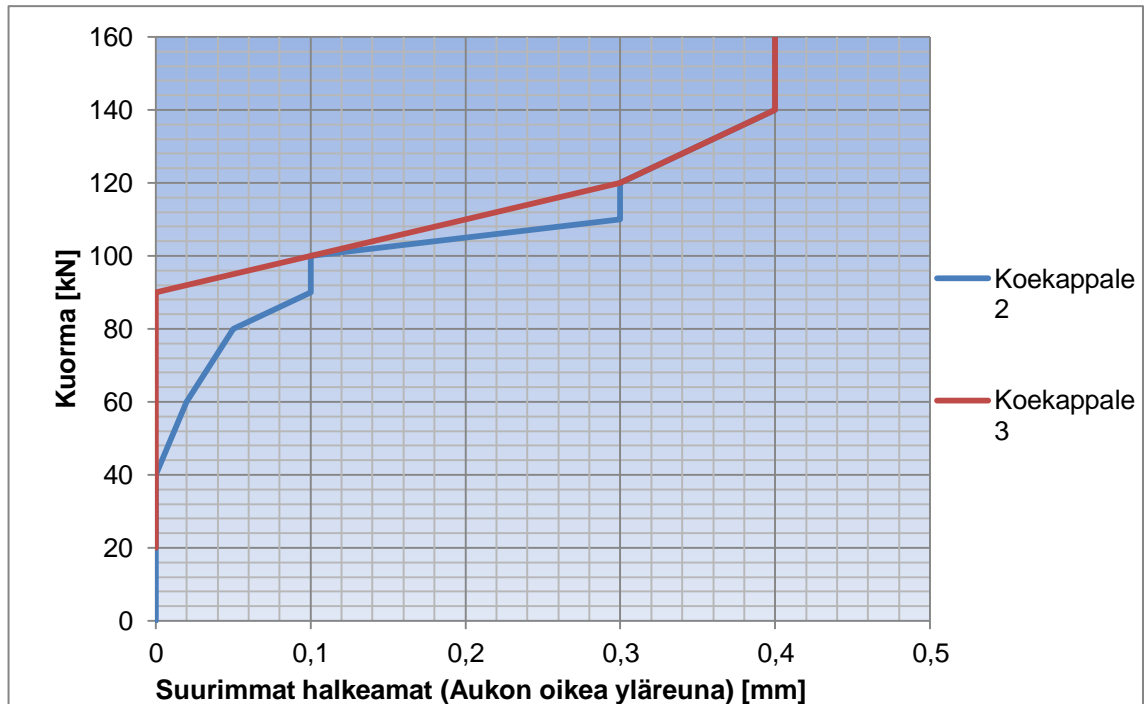
Kuva 14. Koekappale 3: Tuki B (Ei vielä kuormitusta)



Kuva 15. Koekappale 2: Tuki B (Ei vielä kuormitusta)



Kuvio 48. Kuorman ja kuormitusylinterin siirtymän kuvaaja



Kuvio 49. Kuorman ja suurimpien halkeamien kuvaaja aukon oikean yläreunan kohdilla, jossa suurimmat kimmoteorian mukaiset vetojännitykset.

5 Yhteenveto

Työ tehtiin kirjallisuustutkimuksena perehtymällä aiheeseen kansallisia normeja ja kotimaisia sekä ulkomaisia alan julkaisuja tutkimalla.

Ristikkomenetelmän avulla voidaan suunnitella samalla yhtenäisellä menetelmällä kaikki teräsbetonirakenteet ja rakenteiden osat. Ristikkomenetelmää voidaan hyödyntää erityisesti D-alueiden osilla, mutta myös B-alueiden. Ristikkomenetelmää voidaan hyödyntää myös pelkästään jonkin rakenteen osan esimerkiksi paikallisen epäjatkuvuuskohdan mitoituksessa.

Rakenteen voimasuureiden ratkaiseminen kimmoteorian mukaisiin jännityskenttiin perustuvan ristikkomallin avulla saadaan yleensä melko yksinkertainen ratkaisu vaikeantuntuiseenkin rakenteelliseen erikoiskohtaan. Ristikkomenetelmän avulla suunniteltaessa selvitetään rakenteen sisäisten voimien kulku, jolloin kaikki rakenteen tasapainon vaatimat voimat tulevat otetuksi huomioon.

Ristikkomenetelmän avulla mitoitettujen koekuormitettujen aukollisten seinämäisten palkkien laskennallinen murtokuorma oli pienempi kuin todellinen murtokuorma. Koe-kuormitettujen laskennalliset murtokuormat olivat 158 kN ja 153 kN ja molempien mallien osalta päästiin noin 170 kN kuormitukseen ennen kuin suuria halkeamia alkoi muodostumaan, joten ristikkomenetelmää voidaan pitää turvallisena mitoitusmenetelmänä.

Työssä perehdyttiin yleisesti ristikkomenetelmään ja sen laskuesimerkissä voimasuureet on laskettu mathCAD-ohjelmalla, kuitenkin ristikkomenetelmän avuksi on tehty useita mitoitusohjelmia (esimerkiksi CAST), helpottamaan ristikkomenetelmän käyttöä ja sauvavoimien ratkaisemiseksi. Laskelmissa ei myöskään esitetty käyttörajilatarkasteluja, kuten halkeamaleveyksien laskemista rakenteelle ristikkomenetelmän avulla. Mitoitusohjelmien hyödyntäminen ristikkomallien luomisessa ja mitoituksessa sekä käyttörajilatarkastelujen tekeminen ristikkomenetelmän avulla ovat mielestäni merkillepantavia jatkotutkimuskohteita.

Lähteet

- 1 Strut-and-tie model design provisions PCI-Journal/Winter 2011
- 2 Leskelä, Matti V, BY 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008
- 3 Strut and tie courses EC2, Chapter 14 Design with Strut and tie models
- 4 Tuchscherer, Robin, Strut-and-tie Modeling of Reinforced Concrete Deep Beams Experiments and Design Provisions, Dissertation The University of Texas 2008
- 5 SFS-EN 1992-1-1, Eukoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2004
- 6 Häyrinen, Pekka, AA-betonirakenteiden suunnittelijakurssi, Strut-and-tie Menetelmä 19. - 20.3.2013
- 7 Fib bulletin 61: Design examples for strut-and-tie models 2011
- 8 Chantelot, Gautier ja Mathern, Alexandre, Strut-and-tie modelling of reinforced concrete pile caps, Chalmers University of Technology Göteborg, Master's Thesis 2010
- 9 Verification and Implementation of Strut-and-Tie Model in LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials
- 10 Anderson, Robert, Behavior of CTT-nodes in reinforced concrete strut-and-tie models, Master's Thesis 1988
- 11 Note of Studying Structural engineering -sivut, <http://studystructural.wordpress.com/2012/12/03/stm-a-to-z/>, luettu 10.1.2014
- 12 CEB-FIP Model Code 1990, Comite Euro-international du beton, 1993
- 13 Eurocode 2 worked examples, European Concrete Platform ASBL 2008
- 14 Aalto-yliopisto, teräsbetonirakenteet-luentomateriaali 19.11.2013