

VAAKASUUNTAISTEN KANTAVIEN
BETONIRAKENTEIDEN
KAPASITEETIN ARVIOIMINEN

Lapinlampi Marko

Opinnäytetyö
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus
Insinööri (AMK)

2022

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan
koulutus
Insinööri (AMK)

Tekijä	Marko Lapinlampi	Vuosi	2022
Ohjaaja	Valtteri Pirttinen		
Toimeksiantaja	Ramboll Finland, Markku Raiskila and Antti Juopperi		

Työn nimi	Vaakasuuntaisten kantavien betonirakenteiden kapasiteetin arvioiminen
Sivu- ja liitesivumäärä	79 + 15

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia vaakasuuntaisia kantavia betonirakenteita ja rakenteiden kantokykyarviointiin liittyviä kysymyksiä sekä rakenteiden vaurioita.

Tätä tutkimusta varten haastateltiin asiakasorganisaation asiantuntijoita, jonka tarkoituksena oli kartoittaa yleisimmät arviointityöhön liittyvät ongelma-alueet, käytetyt menetelmät ja ratkaisuperiaatteet rakenteiden korjaamiseksi. Tulosten perusteella tehtävän arviointiprosessi yhtenäistettiin ja arviointityön laadullista osaamista lisättiin.

Tämä opinnäytetyö tarjoaa tilaajalle prosessikaavion, jonka perusteella arvioinnin suorittava suunnittelija saa ohjeet arviointityön suorittamiseen. Opinnäytetyö käsittelee erilaisia vaakasuuntaisia betonirakenteita sekä arviointiin liittyviä laskennallisia teorioita.

Avainsanat

Kantava rakenne, kapasiteetti, rakennemitoitus,
Rakennesuunnittelu, korjausrakentaminen,

Degree Programme in Civil
Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Marko Lapinlampi	Year	2022
Supervisor	Valtteri Pirttinen		
Commissioned by	Ramboll Finland, Markku Raiskila and Antti Juopperi		

Subject of thesis	Assessing the Capacity of Load-Bearing Structures
Number of pages	75 + 15

The aim of this thesis was to investigate horizontal load-bearing concrete structures and issues related to the capacity evaluation of structures, as well as damages to structures.

Experts from the client organization were interviewed for this study with the aim of mapping out the most common problem areas related to the assessment work, the methods used and the solution principles for repairing the structures. Based on the results, the task evaluation process was unified and qualitative competence in the assessment work was increased

This thesis provides the client with a process diagram, based on which the designer carrying out the evaluation will receive instructions on how to carry out the evaluation work. The thesis deals with various horizontal concrete structures as well as computational theories related to evaluation.

Key words

Capacity of structures, calculation of load bearing,

Special remarks

E.g. The thesis includes a multimedia presentation.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	11
1.1	Työn tarkoitus	11
1.2	Yleistä	11
1.3	Opinnäytetyön tavoitteet	12
2	PAIKALLA TEHDYT VAAKASUUNTAISET RAKENTEET	13
2.1	Betonipalkit	13
2.2	Ylä- ja alalaattapalkistot	14
2.3	Betonilaatat	15
2.4	Mitoitusteoriat	17
3	VAAKASUUNTAISET ELEMENTTIRAKENTEET	18
3.1	Elementtipalkit	18
3.2	Ontelolaatat	19
3.3	Kuorilaatta	20
3.4	TT-laatat	21
3.5	Elementti massiivilaatta	21
4	ERI AIKAKAUSIEN SUUNNITTELUOHJEET JA MÄÄRÄYKSET	23
4.1	Suunnitteluohjeiden historiaa	23
4.2	Suunnitteluohjeiden ja määräyksien kehitys	23
4.3	Eurokoodi	25
4.4	Eurokoodin mukaiset betonirakenteen ominaisuudet	26
4.5	Käyttöikäsuunnittelu	26
5	PALKKIEN JA LAATTOJEN MITOITUSPERIAATTEET	27
5.1	Palkkien poikkileikkausmitoitus	27
5.2	Laattojen mitoitus	29
5.3	Rakenteiden kapasiteettien arviointi	32
5.4	Rakenneanalyysi	33
5.5	Betonipalkin analyysit	34
5.5.1	Betonipalkin taivutuskestävyyden analyysi	34
5.5.2	Betonipalkin leikkauskestävyyden analyysi	36
5.5.3	Betonilaattarakenteen analyysin kulku	38
5.6	Ontelolaatan kapasiteetin arviointi	38

6	ARVIOINTITYÖN PROSESSI.....	41
6.1	Arviointityön käynnistäminen	41
6.1.1	Rakenteiden ja suunnitelmien lähtötiedot.....	41
6.1.2	Rakennesuunnitelmat ja rakentamisajankohta.....	42
6.1.3	Kohdekäynti	47
6.2	Tutkittavan rakenteen nykytilanne	48
6.2.1	Tutkimussuunnitelma	48
6.2.2	Lähtötietopuutteet ja epävarmuustekijät.....	49
6.2.3	Kenttätutkimukset.....	50
6.2.4	Tutkimusten dokumentointi	52
6.2.5	Lisätutkimusten tarve	52
6.3	Rakenteiden tutkimusmenetelmät.....	53
6.3.1	Taipuman tarkemittaukset	53
6.3.2	Rakenneavaukset.....	53
6.3.3	Betonin lujuuden määrittäminen	54
6.3.4	Kimovasaran käyttö.....	54
6.3.5	Rakenneterästen määrittäminen	55
6.4	Rakenteiden vauriot.....	56
6.4.1	Vaurioiden syntymekanismit.....	56
6.4.2	Viruminen	57
6.4.3	Halkeamat.....	57
6.4.4	Betonin karbonatisoituminen ja terästen korroosio.....	59
6.4.5	Kloridit	60
6.4.6	Alkalikiviainesreaktio	61
6.5	Rakenteen korjaamisen kannattavuus	61
6.5.1	Tutkimusten tulokset	61
6.5.2	Rakenteen kapasiteetilaskelma.....	62
6.5.3	Päätös rakenteen korjaamisesta	62
6.5.4	Vahvistamissuunnitelma.....	63
7	HAASTATTELUT.....	65
7.1	Haastattelututkimuksen toteutus.....	65
7.2	Haastattelun tulokset	66
7.3	Yhteenvedo haastattelusta	68
8	CASE ESIMERKKI	69

8.1	Rakenteen esittely	69
8.2	Rakennemalli ja lähtötiedot.....	71
8.3	Rakennelaskelmat	71
9	POHDINTA.....	73
10	LÄHTEIDEN MERKINTÄ.....	75
11	LIITTEET	79

ALKUSANAT

Haluan kiittää työnantajaani, jonka kautta sain työn aiheen ja joka mahdollisti tämän opinnäytetyön tekemisen osittain työn ohessa. Kiitän työpaikkani kollegoita ja asiantuntijoita, joita sain haastatella, ja heidän osallistumisestaan tähän työhön ja siitä arvokkaasta tietomäärästä, jota heiltä sain. Erityisesti kiitän työni ohjaajaa Markku Raiskilaa, jonka opastuksella olen saanut arvokasta lisätietoa rakenteiden mekaniikasta ja Mathcad-ohjelman käytöstä. Kiitän myös esimiestäni Antti Juopperia ja toimialapäällikköä Inari Weijoa, joiden kanssa työtä on linjattu.

Kiitän myös vaimoani ja mahdollisuudesta käyttää omaa vapaa-aikaani opiskeluun ja tämän työn tekemiseen. Kiitän myös ystäviäni ja harrastukseni ohjaavia henkilöitä, jotka ovat ymmärtäneet, että opiskelu työn ohessa vie paljon aikaa ja ajankäyttö on rajallista. Tavoitteet on tämän työn valmistuttua saavutettu ja on aika jatkaa uusiin haasteisiin, tosin pienen hengähdystauon jälkeen.

KÄYTETYT TERMIT

Kapasiteetti

Sanalla kapasiteetti tarkoitetaan sitä rakenteelle suunniteltua kuormaa, jonka rakenne kantaa ja kestää sille suunnitelluista kuormista ja kuormien aiheuttamista muodonmuutoksista. Rakennetta mitoitettaessa on otettu huomioon rakenteen materiaalin osavarmuuskertoimet sekä rakenteen kuormia laskettaessa kuormien lisävarmuuskertoimet. Rakenne on suunniteltu niin, että rakenteen kuorman kantokyky on aina suurempi kuin sitä rasittavat kuormitukset.

Rakenne on suunniteltu tietylle käyttöiälle, jonka ajan rakenteen tulee kestää ja olla turvallinen käyttää.

Käyttöaste

Rakennetta suunniteltaessa ja mitoitettaessa myös rakenteen tai rakenneosan käyttöaste valitaan. Kun rakenteita suunnitellaan teknistaloudellisen perusteen mukaan, pohditaan samalla, mille käyttöasteelle rakenne on järkevää suunnitella. Vaikka rakennetta suunniteltaessa huomioidaan suunnittelunormien varmuuskertoimet, ei rakennetta ole aina järkevää eikä tarpeellista suunnitella täydelle käyttöasteelle. Käyttöasteen optimointi perustuu taloudelliseen rakentamiseen, mutta se ei aina ole ainoa ohjenuora rakennemitoitukseen. Rakennekuormien määrittelyssä otetaan huomioon todelliset toteutuvat kuormat ja niiden avulla saadaan määritettyä rakenneosan käyttöaste. Käyttöaste määritellään seuraavanlaisesti.

$\text{Käyttöaste} = (\text{rakenteen kuormat} / \text{rakenteen kapasiteetti}) \times 100 = \text{käyttöaste} \%$

Käyttöasteet suunnitellaan eri rakenteille niiden rakennetarkoituksen mukaan aina tapauskohtaisesti. Yleisin käyttöaste on noin 80–90 % välillä, jolloin epävarmuustekijöille tai kuormamuutoksille jäävä prosenttiosuus ei välttämättä johda rakenteen tai rakenneosan muutokseen. Uudelleenmitoitus on kuitenkin tarpeen tehdä, kun epävarmuustekijät tai kuormat ovat kasvaneet suuremmiksi kuin lähtötilanteessa.

KÄYTETYT SYMBOLIT

A_s = teräspinta-ala

A_{s1} = vetoterästen pinta-ala

A_{s2} = puristusterästen pinta-ala

b tai b_w = palkin leveys

d = palkin korkeus

d_1 = palkin tehollinen korkeus

E_s = teräksen kimmomoduulin arvo

f_{ck} = betonin lujuuden ominaisarvo

f_{cd} = betonin lujuuden laskennallinen arvo

f_{yk} = teräksen lujuuden ominaisarvo

f_{yd} = teräksen lujuuden laskennallinen arvo

M_{Rd} = poikkileikkauksen momenttikestävyys

$M_{Rd,c}$ = betonin puristusvyöhykkeen momenttikestävyys

$M_{Rd,s2}$ = puristusraudoituksen momenttikestävyys

s = hakaväli

v = halkeilleen betonin pienennyskerroin

V_{Ed} = laskennallinen leikkausvoima

$V_{Rd,s}$ = leikkausraudoituksen leikkauskestävyyden arvo

$V_{Rd,max}$ = puristumurtokestävyys

z = sisäinen momenttivarsi

α = leikkaushaan kulman arvo

β = palkin tehollisen puristuspinnan suhteellinen korkeus

β_{bd} = tasapainoraudoituksen raja-arvo teräksellä

ϵ_{si} = vetopuolen raudoituksen venymän arvo

ϵ_{cu} = betonin murtopuristuman vakio

ϵ_{yd} = teräksen myötöjännityksen venymän vakio

η = betonin puristusvyöhykkeen määrittelyparametrin arvo

θ = puristussauvan kaltevuuskulman arvo

λ = betonin puristusvyöhykkeen määrittelyparametrin arvo

μ_c = suhteellinen momentti

σ_{si} = raudoituksen vetojännitys

ω = mekaaninen raudoitussuhde

ω_1 = vetoraudoituksen mekaaninen raudoitussuhde

ω_2 = puristusraudoituksen mekaaninen raudoitussuhde

1 JOHDANTO

1.1 Työn tarkoitus

Tämä opinnäytetyö käsittelee vaakasuuntaisten betonirakenteiden kapasiteettien arviointia. Työssä käydään läpi tasomaisia laatta- ja palkkirakenteita, ja jotka jaotellaan valmistustavan mukaan paikalla tehdyiksi ja elementtirakenteiksi. Selvitystyö alkaa rakenteen nykytilan arvioinnista ja siihen sisältyy rakenteen lähtötietojen selvityksiä ja kenttätöiden asioita. Työssä perehdytään erilaisiin rakenteiden tutkimusmenetelmiin ja rakenteiden vaurioiden todentamismenetelmiin, joiden avulla saadaan tarvittavaa lähtötietoa rakenteen kapasiteetin laskentaa varten sekä tietoutta rakenteen korjaamisen kannattavuuden arviointiin. Työssä käydään läpi eri aikakausien suunnitteluohjeita, esitellään yleisimpiä vaakasuuntaisia rakenteita ja näiden mitoitusteorioita. Työ sisältää esimerkkikohteen arviointityön tekemistä ja kapasiteetin laskennan kulkua.

Työn toimeksiantaja on Ramboll Finland Oy. Kapasiteetin arviointia varten on sovittu tehtäväksi prosessikaavio, jonka tehtävänä on ohjata tehtävää tarkastelua johdonmukaisesti. Kaavio on tarkoitettu Rambollin sisäiseksi ohjeeksi, eikä sitä julkaista työn mukana. Kaavion kulku ja rakenne käydään tässä työssä läpi samalla tavalla, joten lukija saa selville, mitä asioita kapasiteetin arviointia varten täytyy tehdä.

Tämä opinnäytetyö ei käsittele pilareiden eikä konsolien mitoitusta. Työ ei käsittele paikalla rakennettavia jännitettyjä rakenteita, eikä tässä työssä laadita suunnitelmia rakenteiden vahvistamiseksi.

1.2 Yleistä

Rakennukset suunnitellaan rakenteiden oman painon ja hyötykuormien yhteisvaikutusten perusteella niin, että rakennus kestää sille suunnitellut kuormat ja niiden aiheuttamat muodonmuutokset vaurioitumatta sen suunnitellun elinkaaren ajan (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 6).

Rakennuksen elinkaaren aikana voidaan joutua tekemään muutoksia ja peruskorjauksia, joilla voi olla vaikutusta rakenteiden kuormituksiin. Laitelisäykset ja peruskorjaukset aiheuttavat tilanteita, joissa joudutaan tarkastelemaan olemassa olevien rakenteiden kantokykyä ja rakenteiden toimivuutta (Karjalainen; Kurkela, 2022).

Korjaushankkeissa tehdään usein tila- ja käyttötarkoituksen muutoksia. Tilamuutokset voivat aiheuttaa lisääntyvää hyöty- tai rakennekuormaa, joka voi olla pistekuormaa tai tasokuormaa. Rakennekuorma voi olla uusi, sen sijainti voi muuttua tai rakennekuorman vaikutus on erilainen kuin alkuperäistilanteessa, johon rakenne on suunniteltu (Kosti, 2022).

Kuormamuutos voi olla myös tietoinen valinta, jolloin on päätetty tuoda rakenteesseen lisäkuormaa ja tehdä tarkastelu vanhan rakenteen kapasiteetista. Rakenteellinen tarkastelu ja tarkempi rakenneanalyysi tehdään käytettävissä olevien lähtötietojen pohjalta.

1.3 Opinnäytetyön tavoitteet

Tämän opinnäytetyö käsittelee Suomessa käytettyjä vaakasuuntaisia betonirakenteita. Työ kertoo pääperiaatteet, miten palkki- ja laattarakenteiden kapasiteettia voidaan laskennallisesti mitoittaa eurokoodin ohjeiden mukaan. Työssä kerrotaan myös millaisia rakenteiden vaurioita voi olla ja miten niitä voidaan tutkia.

Työ keskittyy siihen, miten eri rakenteiden kapasiteettia lähdetään arvioimaan ja mitä asioita on otettava huomioon, ennen kun varsinaiseen rakennemitoitukseen tai analyysitehtävään ryhdytään.

Työn tuloksena on laadittu prosessikaavio, joiden tarkoitus on ohjeistaa ja opastaa johdonmukaiseen etenemiseen rakenteiden arvioinnin osalla. Kaavion perusteella voidaan tehdä päätös, onko arvioitava rakenne sellainen, että sille on tarkoituksenmukaista suorittaa rakenneanalyysi. Päätös voi riippua lähtötiedoista, kustannustehokkuudesta ja esim. rakenteen vaurioista.

2 PAIKALLA TEHDYT VAAKASUUNTAISET RAKENTEET

Tässä luvussa kerrotaan erilaisista paikalla tehdyistä vaakasuuntaisista betonirakenteista. Tarkastellaan palkki- ja laattarakenteita ja niiden rakenteellista toimintaa rakennemitoituksen näkökannalta. Jaotellaan palkit ja laatat niiden geometrian, kuormitussuunnan ja valmistustavan mukaan.

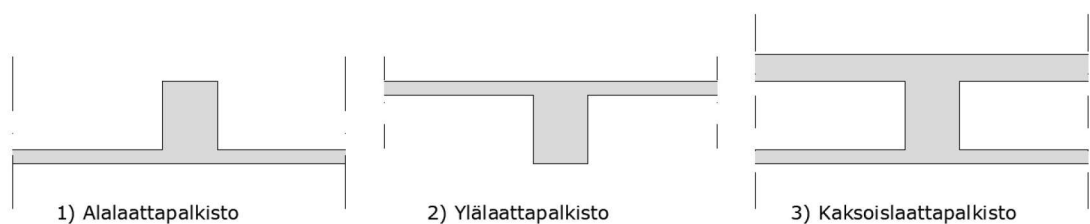
2.1 Betonipalkit

Palkin tunnusmerkkinä on sen sauvamainen muoto. Palkin nimitys on määriteltävissä sen korkeuden ja leveyden suhteen. Jos palkin jännemitta on 3 x suurempi kuin palkin korkeus ja palkin leveys on pienempi kuin 5 x korkeus, puhutaan palkista. Jos palkin jännemitta on pienempi kuin 3 x korkeus, puhutaan tällöin seinämäisestä palkista. Ja jos palkin leveys on pienempi kuin 5 x korkeus, puhutaan tällöin laatasta. Palkin pääasiallinen kuormituksen suunta on palkin akselia vastaan kohtisuorassa suunnassa. Palkkiin voi kohdistua myös palkin sivusta kohdistuvaa voimaa ja palkin päistä puristavaa voimaa (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 83.)

Yleisin helpoiten mitoitettava palkki on suorakaidepalkki. Palkki voi olla yksiaukkoinen tai useampiaukkoinen ja siinä voi olla myös ulokkeellisia osia. Paikalla valettuja suorakaidepalkkeja on käytetty pilari-palkki-laatta-runkorakenteissa, joissa pilarit ja palkit muodostavat jäykkien liitosten kanssa kehärakenteen, joka matalana muutaman kerroksen korkuisena muodostaa jäykän rakenteen. Tällöin puhutaan kehäjäykistyksellä tehdystä (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 78.) Välipohja voi olla tehty elementtirakenteista ja riippuen jännevälisiä palkkien välillä, pidemmissä jänneväleissä on käytetty TT-laattaa ja lyhemmissä jänneväleissä ontelolaattaa tai matalaa kuorilaattaa. Paikalla valettuna suorakaidepalkki on yleensä jäykästi kiinni rakenteessa, johon se tukeutuu. Palkki voi olla kiinnitetty myös nivelellä, joka sallii palkin kiertymän ja tai sen vaakasuuntaisen siirtymän. Palkin rakenteellinen toiminta on täysin riippuvainen palkin tukirakenteista ja palkin voimasuureita laskettaessa nämä tuleekin huomioida.

2.2 Ylä- ja alalaattapalkistot

Suorakaidepalkista seuraava poikkileikkaus on paikalla tehty laattapalkki. Rakente on muuten sama, mutta rakenteeseen on lisätty paikalla valettu raudoitettu laattaosa, joka on rakenteen ylä- tai alaosassa. Laatan sijainti kertoo, onko kyseessä ylä- vai alalaattapalkkisto. Näiden yhdistelmä tunnetaan nimellä kaksoislaattapalkkisto. Ylälaattapalkiston poikkileikkausteoria on T-laattapalkkileikkaus, jossa tarkastellaan laatan yläosan rakenteellista toimintaa ja sen lisävaikutusta suorakaidepalkin kapasiteettiin. Laatan yläosan betonirakenne on pyritty tekemään niin, että sillä saadaan lisättyä laattapalkin puristuskestävyyttä, joka lisää kapasiteettia ja kantavuutta rakenteelle (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 117–123.) Molempien palkkien mitoitusoteoriaa käsitellään luvussa poikkileikkausteoriat.



Kuva 1. Alalaattapalkkisto, ylälaattapalkkisto ja kaksoislaattapalkkiston poikkileikkaukset

Alalaatta- ja kaksoislaattapalkkistoa on käytetty asuinrakennuksissa 1920–50-luvun aikana. Näissä palkkistoissa on laattojen päällä tai välissä käytetty täyteenä kaikkea mahdollista mitä työmaalla on ollut käytettävissä. Täyteenä on voinut olla kutterin purua, sahajauhoa, hiekkaa, masuunikuonaa, sanomalehtiä ja jopa työmaan roskaa. Kaksoislaattapalkkien sisällä on yleensä muottitavaraa, koska niitä ei ole voitu tai haluttu purkaa pois. Rakenteiden sisäpinnoissa on saattanut olla myös haitta-ainepitoisia pikisivelyitä. Aikaa myöten rakenteen täytteenä ovat saattaneet vaurioitua, mikä on voinut johtaa sisäilmaongelmiin. Alalaatta- ja kaksoislaattarakenteita on korjattu paljon mm. poistamalla ja korvaamalla niiden täyteenä olleet materiaalit (Hongisto 2015, 6; Neuvonen 2006, 23.)

Rakenteellisesti molemmissa palkeissa rakenteen pääasiallinen kantava osa on suorakaidepalkin osa. Ajankohdan mukaan, rakenne voi olla rautabetonirakenteinen tai teräsbetonirakenteinen. Laattarakenteet näissä ovat varsin ohuita, vahvuudeltaan noin 40–60 mm, riippuen siitä, onko kyseessä ala- vaiko ylälaatta (Malinen 2015, 5–11). Tyhjentämällä palkkien välinen täyte tai korvaamalla se kevyemmällä materiaalilla, voidaan rakenteen oman painon kuormitusta vähentää. Toisaalta rakenteen täytyy täyttää asuinrakentamisen palomääräykset, joten niiden vuoksi tehtävät toimenpiteet voivat taas lisätä rakennekuormaa palkeille. Tarkasteltavaksi näissä rakenteissa jää rakennekuorman muutos, jonka pohjalta tehdään rakenteen kantokyvyn arviointia ja tarvittaessa kapasiteetin laskentaa.

2.3 Betonilaatat

Betonilaatan tunnusmerkkinä pidetään sen muotoa. Rakenteella on laattamainen tai levymäinen muoto ja sitä kuormittava voima on sen tasoa vastaan. Kun rakenteessa on kaksi sivua ja jonka pienemmän sivun mitta on 5 x suurempi kuin laatan vahvuus, voidaan rakennetta nimittää betonilaataksi. Paikalla valettua tasomaista betonirakennetta voidaan kutsua nimillä massiivilaatta ja arinalaatta, riippuen miten ja millä muottitekniikalla se on tehty. Lisäksi vielä on olemassa liittolaatta, jossa rakenteen muottina toimii itse teräksestä tehty muotoiltu teräslevyrakenne, joka yhdessä kovettuneen betonin kanssa muodostaa kantavan rakenteen. Betonilaatta on raudoitettu rakenne, jonka kantosuunta on riippuvainen rakenteen tuentatavasta. Rakenne voi olla yhteen suuntaan kantava, molempiin suuntiin kantava tai se on kannateltu pilarien avulla, jolloin sitä kutsutaan pilarilaataksi. Betonilaattojen voimasuureita määriteltäessä, tulee tietää, kuinka rakenne on tuettu ja millainen kantosuunta siinä on. Yhteen suuntaan kantava betonilaatta tarkoittaa sitä, että se on tuettu molemmista päistä. Tuet voi olla joko jäykkiä tai vapaasti tuettuja. Ristiin kantavassa betonilaatassa on vähintään kolme tukea, yleensä neljä ja samat periaatteet tukien suhteen kuin yhteen suuntaan kantavassa laatassa. Ristiin kantavassa laatassa tosin yksi tuki voi puuttua, jota kutsutaan silloin vapaaksi reunaksi (Suomen Betoniyhdistys ry, 7–10.)

Betonilaatan muoto voi olla hyvin pitkä ja kun se on tuettu kaikilta reunoilta, sen tarkastelu muuttuu. Pitkän laatan molemmissa päissä tarkastellaan rakennetta

ristiin kantavana, mutta keskialue tarkastellaan vain yhteen suuntaan, joka on laatan lyhempi suunta. Betonilaatta voi olla myös useamman kentän laattarakenne. Näissä käytetään samoja tarkasteluita, kuten edellä. Jos useamman kentän keskituki on jäykkä, tulee yläpinnan raudoitus tarkastella samalla tavalla kuin palkkirakenteissa jäykän tuen kohdalla. Pilarilaattarakenteissa tarkastelu tehdään joka kentässä ristiin kantavana tarkasteluna (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 9.)

Massiivilaatta on yleensä tasapaksu raudoitettu betonilaatta. Pääraudoitus tehdään laatan alapintaan kantosuuntien mukaan, jossa raudoitus ottaa vastaan vetorasitusta. Betonilaatan vahvuuden mukaan paksummat laatat raudoitetaan myös yläpinnasta estämään betonin kutistumahalkeamia. Jatkuva laatta raudoitetaan aina yläpinnasta tuen kohdalla, siihen kohdistuvan yläpinnan vetorasituksen takia (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 15–20).

Suomessa massiivilaattojen käyttö on yleistynyt vasta 1950-luvulla. Tuolloin massiivilaatan vahvuudet olivat riippuvaisia kantosuunnasta ja jännevälillä. Yhteen suuntaan kantavan laatan vahvuus oli 150 mm (Neuvonen, Mäkiö, Malinen 2002, Kerrostalot 1880–1940, 15). Ristiin kantavana laatan vahvuus oli pienempi ja se voitiin tehdä vahvuudella 100–110 mm. Laatan alle ja päälle tehtiin tarvittavat äänen- ja palosuojarakenteet vallinneen normin vaatimusten mukaisesti. Nykyään massiivilaatan vahvuus valitaan suoraan ääneneristävyys ja palomääräysten mukaan ja vahvuus on välillä 260–280 mm riippuen rakennustyyppistä, vaikka laatta kestäisikin ohuempana. Massiivilaatan yksi huono puoli onkin sen oma paino, joten sen käyttö pitkissä jänneväleissä muodostuu rakennepainon kautta ongelmalliseksi (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 7).

Massiivilaatan käyttö on nykyään hyvinkin yleistä, vaikkakin valmisosaelementtejä käytetään paljon rakentamisessa. Pienempiä massiivilaattoja käytetään kohdissa, johon ontelolaattaa ei ole järkevää käyttää joko pituuden tai leveyden suhteen. Myös isompi rakenteellinen kuormitus voi olla syynä massiivilaatan käyttämiseen. Massiivilaattaa käytetään yleensä niihin paikkoihin, joihin valmis elementti ei täysin sellaisenaan sovellu. Esim. välipohjarakenteen liittymä seinään

voi olla muodoltaan kaareva tai vino, johon elementin teettäminen ei olisi tarkoituksen mukaista. Massiivilaattoja käyttämällä täydennetäänkin elementtirakentamista.

Arinalaatta on kennomainen rakenne, jossa laattaan liittyvät ripapalkit jakavat rakenteen neliömäisiin osiin. Arinalaatan korkeus on riippuvainen rakenteen jännevälistä. Arinalaatan yläpinta on tehty yleensä verkkorauδοituksella minimiteräsmäärää käyttäen ja ripapalkeissa on pääraudoitus ja hakaraudoitus. Arinalaattarakenteiden tarkastelua ja mitoitusta on käsitelty Betoniteollisuuden julkaisussa betonirakenteiden suunnittelu eurokoodin mukaan, osa 3: Laatat (Elementtisuunnittelu, 2022a).

2.4 Mitoitusteoriat

Palkkirakenteiden mitoitus ja rakenteellisen kapasiteetin laskentaan käytetään poikkileikkauksen mukaisia laskentateorioita. Teoriat on nimetty poikkileikkauksen mukaan, jotka ovat suorakaidepoikkileikkaus, puristusteräksillä varustettu suorakaidepoikkileikkaus ja laattapalkkipoikkileikkaus (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 15, 107, 117).

Betonilaattojen mitoitus ja kapasiteettilaskentaan on käytössä useampaakin menetelmää. Yhteen suuntaan kantavien laattojen voimasuureet voidaan laskea samalla tavalla kuin palkkien voimasuureet. Ristiin kantavilla laatoilla kuorman siirtyminen laatan eri suunnissa riippuu laatan jännemitasta ja raudoituksesta. Laattojen laskentaa ja mitoitusta varten on kehitetty erilaisia menetelmiä. Näitä ovat MBP menetelmä (massiivilaatta-menetelmä), kaistamenetelmä, myötöviivateoria, kimmoteoria ja numeeriset laskentamenetelmät (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 15–20, 23–28, 32–42). Palkkien ja betonilaattojen laskelmateorioita käytetään tarkemmin läpi luvussa 5 *Palkkien ja laattojen mitoitusperiaatteet*.

3 VAAKASUUNTAISET ELEMENTTIRAKENTEET

Suomessa käytetyt elementtirakenteet

Tässä luvussa kerrotaan ne yleisimmät elementtirakenteet, joita on Suomessa käytetty pääasiallisesti noin 1950-luvulta alkaen. Elementtirakentamista Suomessa on tehty jo 1920-luvulta alkaen, mutta sotien jälkeen valmisosarakentaminen sai kunnolla vauhtia (Elementtisuunnittelu 2022b).

3.1 Elementtipalkit

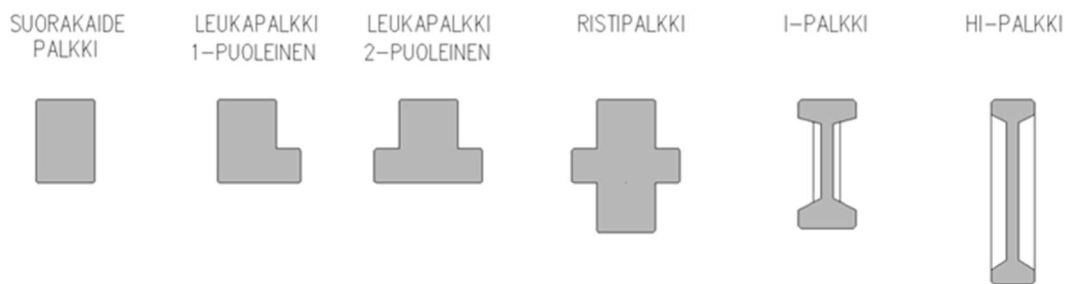
Elementtipalkkeja valmistetaan erilaisilla poikkileikkauksilla ja ne voivat olla tavallisia teräsbetonipalkkeja sekä myös jännitettyjä jännebetonipalkkeja. Suorakaidepalkki on yleisin poikkileikkaus ja siitä seuraava versio on leukapalkki. Palkin leukaosa voi olla palkin yhdellä sivulla tai sitten molemmin puolin palkkia. Leukapalkin tarkoitus on ollut vähentää tukirakenteen rakennekorkeutta, jolloin siihen tukeutuvien elementtirakenteiden yläpinta saadaan pidettyä samassa korkeudessa palkin kanssa. Leukapalkkiin kohdistuu vääntöä siihen tukeutuvasta rakenteesta, joten palkki tulee mitoittaa ja tarkastella väännön osalta. Molemmin puolin olevat leukaosat, jotka ovat kuormitettu, tasoittavat väännön vaikutusta, mutta leukapalkkiin tukeutuvien elementtien asennusvaiheessa on palkin leukaosa tuettava asennuksen ajaksi. Tukia ei voida poistaa ennen kuin liitos on jälkivalettu, kovettunut ja toimii rakenteellisesti, kuten se on suunniteltu (Suikka, 2006).

2-puolisesta leukapalkista on olemassa muunnos, joka on ristipalkki. Siinä palkin keskiosa jatkuu alaspäin leukaosien alapuolella. Ristipalkkia käytetään raskaammin kuormitetuissa kohdissa, kun leukapalkin kapasiteetti ei riitä (Elementtisuunnittelu 2022c.)

I-palkkia käytetään pitkien jänneväljen rakenteissa ja sitä valmistetaan yksiaukkoisena. I-palkki on korkea ja sen uumaosa on kapeampi kuin palkin ylä- ja alaosa. Uudemmissa I-palkeissa palkin muodossa voi olla vinoja osuuksia ja kulmissa pyöristyksiä, mutta vanhemmat palkit koostuvat yleensä suorakaiteen

muotoisista osista, jotka muodostavat yhdessä I-palkin. Tämä johtunee käytetystä työtekniikasta, jossa on pyritty rakenteen yksinkertaisuuteen ja helpommin rakennettavuuteen. Yksiaukkoisena rakenteena palkin alaosaan tulee vetorasitusta ja palkin yläosaan puristusrasitusta. Kavennettu uuma vähentää palkin omaa kuormaa, ja uumaosalle kohdistuvat rasitukset ovat pääasiassa leikkausrasituksia. Leikkausrasituksen minimiarvo on kentän puolivälissä suurimman kenttämomentin kohdalla, ja maksimi leikkausvoimat tulevat tukien kohdille. Tukien kohdalla I-palkki voi olla osan matkaa muodoltaan suorakaidepalkki, joka kestää paremmin leikkausvoimia. Suorakaideosa saadaan helpommin kestämään leikkausvoimia ja lisäksi rakenneterästen ankkuroituminen on paremmin tehtävissä (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 154.)

I-palkista on olemassa vielä korkeampi versio, joka on HI-palkki. HI-palkkia kutsutaan myös harja I-palkiksi ja sen muoto on palkin keskeltä korkeampi kuin palkin päistä. Tämän palkin etuna on se, että sen uumaan on tehtävissä isojakin talotekniikan läpivientireikiä. Reikien sijainti suunnitellaan niin, ettei se osu palkin tehollisen puristusosan kohdalle. Betonipalkkien reikien suunnittelusta on olemassa erillisiä ohjeita yksiaukkoisille palkeille ja erikseen vielä I- ja HI-palkeille (Elementtisuunnittelu 2022d.)



Kuva 2. Erilaisia palkkien poikkileikkauksia (Elementtisuunnittelu 2022e)

3.2 Ontelolaatat

Ontelolaattoja on valmistettu Suomessa jo 60-luvulla, mutta niiden käyttö on yleistynyt vasta 70-luvulla ja 80-luvulla, jolloin niiden käyttö on ollut asuntorakentamisessa jo vallitsevaa. Ontelolaattatyyppejä on erilaisia ja ontelolaatoissa käytetty merkintä kuvastaakin sen käyttökohdetta, käyttötarkoitusta ja ominaisuuksia.

Jokaisella ontelolaatalla on geometriatunnus, joilla laatat erotellaan toisistaan esim. reikien ja varausten osalta. Lisämääreet ontelolaatan tunnuksen edessä kertovat sen käyttötarkoituksesta tai ominaisuudesta. Kirjain E kertoo laatan olevan eristetty, numerot 2 tai 15 kertovat ontelolaatan olevan palolaatta, joilla on eri palonkesto aika. Numero 8 kertoo laatalle olevan normaalia suurempi suunnittelulujuus. Laatta voi olla myös seinärakennetta, jolla on paloseinän ominaisuus, jolloin sen kirjaintunnuksen määre on W (Parman ontelolaatatot suunnitteluohje joulukuu 2018–1, 10.)

Ontelolaatan poikkileikkauksen reikien muoto, niiden määrä ja kannaksien lukumäärä riippuu laattatyypistä. Ontelolaattojen korkeus on välillä 175 mm – 500 mm ja leveys 1200 mm. Myös kavennettuja ontelolaattoja käytetään ja niiden sijainti on yleensä reunakentässä. Ontelolaatan punokset sijaitsevat laatan alapinnan puolella kannaksien kohdalla. Punoksia on kahdenkokoista, 12.5 mm ja 9.3 mm, ja niiden määrä on valittu laatan kantavuuden mukaan. Ontelolaatassa voi olla myös yläpunoksia, jolloin ontelolaatta on suunniteltu ulokkeelliseksi ainakin osan mitastaan. Ulokelaattaosa voidaan suunnitella myös ulokeraudoituksen avulla. Käytetty betonin lujuus on yleensä eurokoodimerkinnällä C50 ja jännepunoksien laatu on st1630/1860 (Parman ontelolaatatot suunnitteluohje joulukuu 2018, 9.)

Ontelolaatat on jaettu kolmeen eri kuormaluokkaan ja, joiden kantokyky on esitetty eri kuormaluokkien mitoituskäyrissä. Mitoituskäyrissä on esitetty reiättömien ontelolaattojen kantokyky sallittuna hyötykuormana ilman osavarmuuskertoimia. Pysyvän kuorman osuus hyötykuormasta on 15 % (Parman ontelolaatatot suunnitteluohje joulukuu 2018, 10.) Ontelolaattojen suunnitteluohjeita löytyy eri valmistajilta esim. Parma, Luja ja Betset. Ontelolaattojen kapasiteettia käsitellään luvussa *5 Palkkien ja laattojen mitoitusperiaatteet*.

3.3 Kuorilaatta

Kuorilaatta on umpilaattaelementti, jonka päälle valetaan työmaalla vielä toinen betonilaatta. Kuorilaatta voi olla esijännitetty tai jännittämätön laattarakenne. Kuorilaatassa olevat ansaat muodostavat valetun betonin kanssa liittorakenteen.

Valettu betoni kiinnittyy kuorilaatan karhennettuun pintaan, ja laatussa olevat ansaat toimivat tehdyn liitoksen leikkausvaaroina. Jälkeenpäin valetun betonin on tarkoitus toimia rakenteessa vallitsevia puristusvoimia vastaan ja kuorilaatta ottaa vastaan rakenteeseen kohdistuvat vetorasitukset. Kuorilaatan kantokykyä voidaan arvioida esim. tuotevalmistajan kantokyky kaaviosta, kun tiedetään rakenteen punostus, jänneväli, kantosuunnat ja tukirakenteet (Pielisen Betoni Oy 2022).

Kuorilaattoja on käytetty asuin- ja liikerakennusten ala-, -väli- ja yläpohjarakenteissa sekä myös teollisuuden ja julkisten rakennusten kohteissa. Koska kuorilaatat ovat pääasiallisesti jännitetyjä rakenteita, ei tässä työssä syvennyttä näiden rakenteiden kapasiteettien arviointiin eikä mitoituksellisiin asioihin.

3.4 TT-laatat

TT-laatat ovat esijännitetyjä teräsbetonielementtejä ja joita on käytetty yleensä pilaripalkki runkoisten rakennusten välipohjissa ja yläpohjissa. TT-laattoja on käytetty pitkien jännevälien rakenteissa esim. teollisuus ja varastorakennuskohdeissa. TT-laattojen mitat vaihtelevat 300 mm – 1200 mm:m välillä ja niiden jänneväli voi suurimmillaan olla 25 m. TT-laatasta on olemassa eri variaatioita, jotka ovat TEK-laatta, STT-laatta ja HTT-laatta. TT-laattojen kapasiteetin arviointia voi suorittaa niitä valmistavien yritysten suunnitteluohjeista esim. kuorma ja jännevälitaulukoista (Elementtisuunnittelu 2022f.)

3.5 Elementti massiivilaatta

Massiivilaattaa voidaan käyttää myös elementteinä ja niitä valmistetaan jännitettyinä ja jännittämättöminä teräsbetonilaattoina. Massiivilaatta voidaan tehdä ristiin kantavina ja niiden vakiopaksuus on 240–280 mm. Elementiksi tehty massiivilaatan suositeltu leveys on 3 m ja pituus 8 m. Yleinen suositus elementtien maksipainoksi on 10 tonnia (Elementtisuunnittelu 2022g.)

Massiivilaatan kapasiteetin arviointia varten tarvitaan laattaan kohdistuvat voimasuureet, jonka jälkeen voidaan laskea kenttä- ja tukimomentit ja rakenteeseen

vaikuttavat leikkausvoimat sekä leikkausvoiman kapasiteetti (Suomen Betoniyhdistys ry, 15–20, 23–28, 32–42).



Kuva 3. Erilaisia laattojen poikkileikkauksia (Elementtisuunnittelu h)

4 ERI AIKAKAUSIEN SUUNNITTELUOHJEET JA MÄÄRÄYKSET

4.1 Suunnitteluohjeiden historiaa

Suomessa on ollut olemassa erilaisia valtion asettamia säädöksiä, määräyksiä ja ohjeistuksia alkaen jo 1800-luvulta. Suomessa teräsbetonista tehdyt rakenteet yleistyivät vasta 1900-luvun alussa. Betonirakenteiden käyttöä ja näiden suunnittelua varten saatiin ensimmäiset määräykset vasta vuonna 1928 ja sen jälkeen ohjeistuksia on jatkuvasti tarkennettu (Suomen Betoniyhdistys 2022, Historiaa.)

1942 perustettiin rakentamistapaohjeet, joka paremmin tunnetaan nimellä RT-kortisto. Vuonna 1958 ympäristöministeriö laati maankäyttö- ja rakennuslain ja 1970-luvulla perustettiin Suomen rakentamismääräyskokoelma. Nyt tässä vaiheessa oli käytössä laki, standardeja ja ohjeita ja niiden avulla rakentamisen laatua sekä käytäntöjä voitiin yhtenäistää ja parantaa. Edellä mainittuja ohjeita on koottu Rakentajan kalentereihin, joita on julkaistu joka vuosi alkaen vuodesta 1917 (Rakentajain kalenteri 2022).

Rakentajan kalenteria on noudatettu eri vuosikymmeninä työmaiden työnjohdon osalla, kun rakennuksia on tehty. Työmailla olleet käytännöt, kuten miten kalenteria on tulkittu, millaiset työtekniikat on valittu, ovat osaltaan vaikuttaneet siihen, miten rakennus on lopulta tehty ja millainen lopputulos on saatu aikaiseksi. Lisäksi on hyvä huomioida ne aikakaudet, kun rakennusmateriaaleista on ollut pulaa (Neuvonen ym. 2002, 38–39). Sota-aika ja lama-ajat ovat vaikuttaneet betonin valmistuksessa käytettävän sementin ja kiviaineksen seossuhteisiin. Myös rakenneteräksiä on voitu käyttää vähemmän.

4.2 Suunnitteluohjeiden ja määräyksien kehitys

Suunnitteluohjeiden kehitys voidaan jakaa kolmeen ajanjaksoon. Sallittujen jännitysten menetelmä, rakennusmääräyskokoelmien ohjeet ja nykyään käytössä oleva eurokoodi. Sallittujen jännitysten menetelmä on ollut käytössä 1970-luvun lopulle asti. 1975 on tullut käyttöön rajatilaohje ja jonka jälkeen on alettu käyttämään rakentamismääräyskokoelman ohjeita. 1980 on otettu käyttöön betoninor-

mien uudistusohjeet (kuva 4) ja 2005 on tullut käyttöön B4 Betonirakenteiden ohjeet. Lisäksi 2011 betonirakenteita koskevat ohjeet ovat sisällytetty rakennusmääräyskokoelmaan osaan B2.

Suomessa käytössä olleita suunnitteluohjeita ja määräyksiä:

Sementti, betoni ja rautabetoni, alkeisoppikirja 1913

Teknillinen käsikirja 1914

Rakentajan kalenteri 1948

Rakenteiden kuormitusmääräykset (RKM1955)

Betoninormit 1965

Betoninormien uudistusohjelma 1974–81,

Betoninormit 1967

1969-> 1978 RIL 59 Rakenteiden kuormitusnormit

Rajatilaohje 1975

Betoninormit 1976 (RakMk määräykset B2/1976)

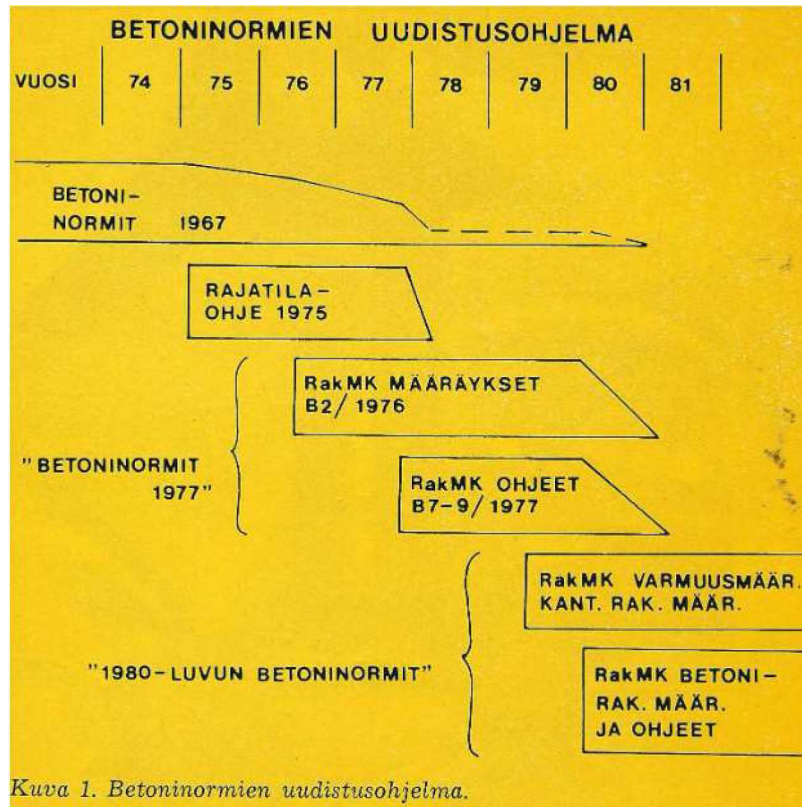
Betoninormit 1977 (RakMk ohjeet B7-9/1977)

1980-luvun betoninormit (RakMk varmuusmääräykset kantavien rakenteiden määräykset/ RakMk betonirakenteiden määräykset ja ohjeet.

1982-> 2002 RIL 144 Rakenteiden kuormitusohjeet

2005 B4 Betonirakenteet

2011 Rakennusmääräyskokoelman B2 Betonirakenteet



Kuva 4. Betoninormien uudistusohjelma, Tauno Hietanen Rakennusteollisuus RT ry

4.3 Eurokoodi

Tämänhetkisen rakennesuunnittelun ohjeet ja määräykset pohjautuvat Eurokoodin eri osiin, jotka on jaoteltu pääasiassa materiaalin mukaan. Ensimmäisen sukupolven eurokoodin suunnitteluohjeet on julkaistu 1984 ja vuosina 1992–1998 niitä on julkaistu yhteensä 62 kpl. Eurokoodin käyttöönotto Suomessa on aloitettu vuonna 2007 ja loput liitteet julkaistiin 2008–2009. Eurokoodia käytettiin Rakentamismääräyskokoelman B-sarjan kanssa rinnan, joka kumottiin vuonna 2014. Eurokoodia on sittemmin päivitetty vuonna 2016 ja täydelliset eurokoodin päivitetty liitteet tulivat käyttöön vuonna 2017 alussa (Rakennustuoteteollisuus RTT ry 2022.)

"Eurokoodi-sarja koostuu tällä hetkellä 58 osasta. Eurokoodit kattavat rakenteiden varmuuden määrittämisperiaatteet kattaen erilaiset kuormitukset kuten hyöty-, lumi- ja tuuli-, lämpö-, onnettomuus- ja nosturikuormat. Eri rakennusmateriaaleille on omat yksityiskohtaiset ohjeensa" (Rakennusteollisuus 2022.)

4.4 Eurokoodin mukaiset betonirakenteen ominaisuudet

Eurokoodiin pohjautuva betonirakenteiden suunnittelu ja betonirakenteen säilyvyys on otettu huomioon eri rasitusluokilla. Betonirakenteen sijainti eri ympäristössä on jaettu eri luokkiin, joiden luokitusperusteina ovat betonirakenteeseen kohdistuva korroosio, karbonatisoituminen, kloridirasitus, jäädytys-sulamismekanismit ja kemialliset rasitukset. Rasitusluokat perustuvat standardiin EN 206 (Suomen Betoniyhdistys ry 2012).

4.5 Käyttöikäsuunnittelu

Rasitusluokat liittyvät suoraan betonin käyttöikäsuunnitteluun, joilla määritetään betonille sen tulevan elinkaaren mukainen suojabetonipeite ja betonilaatu. Tavallisin betonirakenteen käyttöikä on 50 vuotta, mutta se voidaan suunnitella myös 100 ja 200 vuoden käyttöiälle. Korjausrakentamisen kohteissa tuleekin ottaa huomioon tarkasteltavan rakenteen ympäristö ja tehdä sen mukaan tarkastelua rakenteille ja tarkistaa mahdolliset ympäristön altistumiset ja vauriomekanismit. Hyväänä lähtökohtana on tehdä tarkastelua eurokoodin rasitusluokkien mukaan (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 62.)

5 PALKKIEN JA LAATTOJEN MITOITUSPERIAATTEET

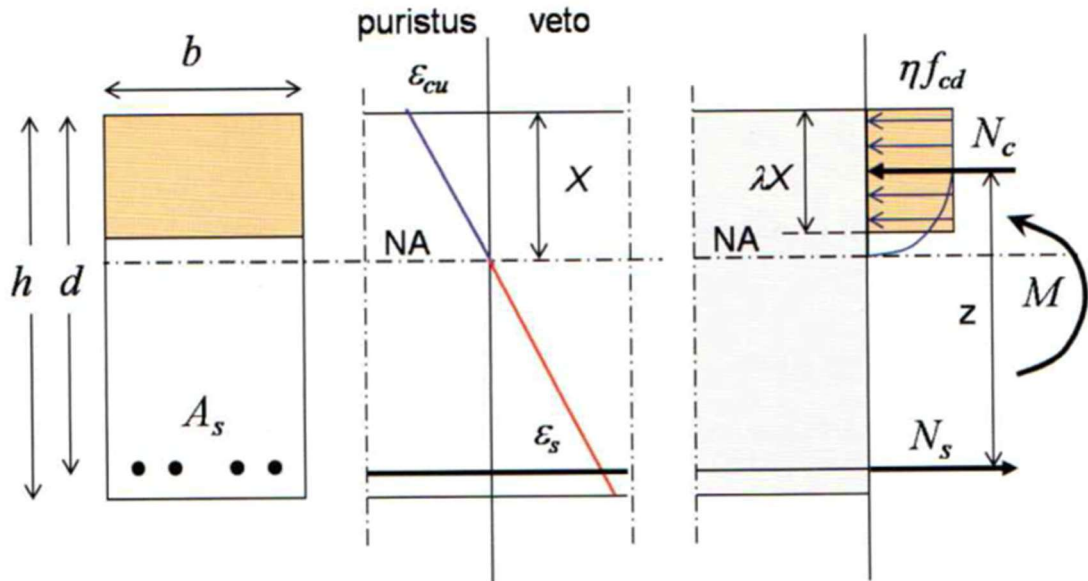
5.1 Palkkien poikkileikkausmitoitus

Betonipalkkien mitoituseriaatteet tulee tietää, kun rakenteiden kapasiteettilaskelmia tehdään. Käydään seuraavassa läpi eri mitoitusten peruseriaatteet.

Betonipalkkien mitoitusta ja analyysilaskentaa varten tulee laatia rakenteen vapaakappalekuvio ja kuormitustiedot. Palkin mitoitus perustuu rakenteen poikkileikkaukseen ja tehtävä tarkastelu riippuu palkkiin vaikuttavasta voimasta ja sen suunnasta. Käsitellään seuraavaksi läpi taivutus- ja leikkausrasitettujen palkkien mitoitus eurokoodin mukaan, joihin vaikuttava voima on kohtisuoraan palkin yläpinnan tasoa.

Suorakaidepoikkileikkauksen tarkastelua varten tarvitaan seuraavat rakenteen tiedot. Poikkileikkausmitat, materiaalien lujustiedot, raudoituksen määrä ja sijainti, betonin suojapeite, toteutusluokka ja materiaalien osavarmuusluvut. Analyysilaskentaa tehdessä tarvitaan lisäksi rakenteeseen vaikuttava kuormitus (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 92.)

Suorakaidepoikkileikkauksessa rakenteen poikkileikkaus jakaantuu kahteen eri osaan palkin neutraaliakselin suhteen. Neutraaliakselilla ei palkissa tapahdu vetoa eikä puristusta. Palkin taivutettu osa, joka on yksiaukkoisessa palkissa poikkileikkauksen palkin alempi osa, joutuu vedetyksi ja siinä tarkastellaan palkin vetoraudoitusta ja sen vaadittua raudoitusalaa. Palkin yläosa puristuu ja siinä tarkastellaan betonin puristusvyöhykkeen kestävyyttä, jota varten määritellään suhteellisen puristuspinnan korkeus. Palkin molemmissa osissa tarkastellaan rakenteeseen kohdistuvia jännityksiä. Nämä ovat laskettavissa, kun tiedetään rakenteen sisäinen momenttivarsi. Momenttivarsi muodostuu palkin suhteellisen puristuspinnan puolen välin ja palkin vetoterästen keskelle väliselle matkalle (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 94.)



Kuva 5. Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 96

Kuvassa 5 on esitetty palkkiin vaikuttavan sisäinen momenttivarsi pääraudoituksen ja betonin puristusvyöhykkeen välillä.

Palkin puristuskestävyydelle on muodostettu lauseke, jota varten tarvitaan puristusvyöhykkeen parametrit λ ja η . Parametreille on määritetty arvot, jotka riippuvat betonin puristuslujuuden f_{ck} arvosta. Parametrit on esitetty Betonirakenteiden oppikirjassa 2013 by 211 osa 1, s. 95 taulukossa 1/5. Betonin puristusvyöhykkeelle ja vastaavasti raudoituksen vetokestävyydelle on laadittu lausekkeet ja momenttivarren avulla voidaan ratkaista rakenteen taivutuskestävyys joko betonin puristusvyöhykkeen tai taivutusraudoituksen kestävyysien lausekkeiden avulla.

Suorakaidepoikkileikkauksesta on olemassa toinen versio, joka on puristettu suorakaide poikkileikkaus. Palkin yläosaan on lisätty puristusteräksset ja sen tarkoituksena on lisätä palkkiin kohdistuvan puristusvoiman kestävyyttä. Puristettuun suorakaidepoikkileikkaukseen päädytään, kun on todettu, että valitun poikkileikkauksen vetoraudoitus ei myötää murtotilassa ilman puristusraudoituksen käyttöä eikä poikkileikkauksen mittoja voida riittävästi kasvattaa (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 107–109).

T-poikkileikkaus eli laattapalkkipoikkileikkaus, on palkin ja laatan yhteistoimintaan liittyvä poikkileikkaus. Laattapalkkipoikkileikkauksesta tarkastellaan mikä osa laatan alueesta katsotaan toimivaksi leveydeksi. Poikkileikkauksen uuma voi myös tulla puristetuksi osan matkaa. Palkin puristuspuolen tarkastelu tehdään laatan toimivan osan leveyden mukaan ja sen vaikutus huomioidaan puristuskaasiteetissa (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 117–123.)

5.2 Laattojen mitoitus

Betonilaattojen mitoitusteorioita sivuttiin jo aikaisemmassa luvussa, jossa esiteltiin erilaisia paikalla tehtyjä ja elementeistä tehtyjä vaakasuuntaisia rakenteita. Mitoitusmenetelmän valintaa varten tulee tietää rakenteen toiminta, joka tarkoittaa betonilaatoissa rakenteen kantosuunnan selvityksen ja siinä vaikuttavien voimien laskennan. Kun tiedetään rakenteeseen vaikuttava hyötykuorma, oma rakennepaino, kantosuunta, tuet, laatan vahvuus ja mitat, voidaan voimasuurelaskenta suorittaa. Tämän jälkeen lasketaan laatan mitoituskuormat ja ratkaistaan kenttien taivutusmomentit ja tukimomentit (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 9, 13.)

Yhteen suuntaan kantavien laattojen voimasuureet ratkaistaan samalla tavalla kuten palkkirakenteissa. Jos laattaan vaikuttava voima on vain tasoa kohtisuoraan vaikuttava tasainen kuorma, tulee laattaan taivutusmomenttia vain laatan pääkantosuunnassa. Jos laattaan vaikuttaa tämän lisäksi pistemäisiä kuormia, tarkastellaan laatan toinen suunta myös (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 9, 13.)

Ristiin kantavissa laatoissa syntyy molempiin kentän suuntiin taivutusrasituksia, kun rakenne on tuettu kolmelta tai neljältä sivulta. Kuormien jakaantuminen riippuu laatan jännemitoista, raudoituksen määrästä ja halkeilutilasta. Koska laattojen osalla kuormien ja taivutusrasitusten määrittely tarkasti on vaikeaa, on tätä varten kehitetty erilaisia ratkaisumalleja, joita käymme seuraavaksi läpi (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 9.)

Massiivilaattamenetelmässä laatan momenttijakautuma saadaan selville valmiiksi laskettujen taulukoiden avulla. Taulukot on laskettu myötöviivateorian mukaan, ja kenttä- ja tukimomenttien suhde on valittu kimmoteorian perusteella. Tämä menetelmä on tarkoitettu tasaisesti kuormitettujen, suorakaiteen muotoisten ja kaikilta reunoilta tuettujen laattojen laskentaan. Käyttö perustuu yksinkertaisten suorakaidelaattojen ratkaisuun (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 15.)

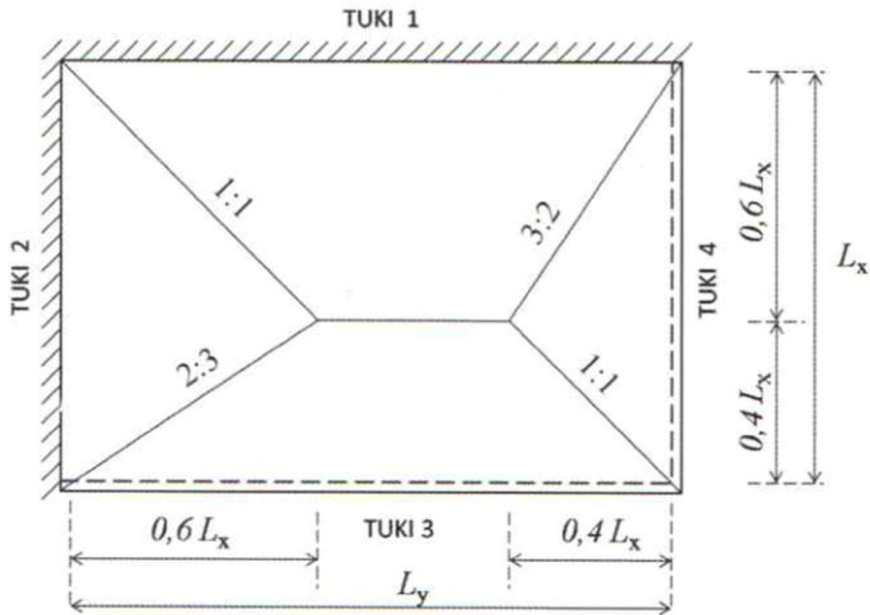
Menetelmää voidaan käyttää myös jatkuvien laatastojen ratkaisussa. Tällöin laatta pilkotaan eri osiin ja tarkastelu tehdään laatan eri osille. Menetelmässä on lisäksi 3 eri tarkkuustasoa ja se sisältää lukuisia taulukkosarjoja.

Laskennan kulku. Ratkaistaan laatan sivusuhte jakamalla pidempi laatan suunta lyhyemmällä laatan suunnalla. Valitaan momenttikertoimet MBP-menetelmän taulukosta laatan tuentatapauksen mukaan. Momenttikertoimet saadaan valittua saadun sivusuhteearvon mukaan, joilla vastaavien taivutusmomenttien lukuarvot kerrotaan (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 14.)

Tuenta- tapaus	1		2			3		
	a_{yf} (1)	a_{xf} (2)	a_{xs} (3)	a_{yf} (4)	a_{xf} (5)	a_{ys} (6)	a_{yf} (7)	a_{xf} (8)
1,0	0,0555	0,0555	0,0575	0,0368	0,0429	0,0575	0,0429	0,0368
1,1	564	628	626	364	471	632	456	435
1,2	564	694	672	355	505	684	472	494
1,3	555	754	714	343	536	728	480	548
1,4	542	807	752	331	560	761	478	597
1,5	526	854	786	320	577	786	469	643
1,6	508	894	816	310	592	800	456	686
1,7	492	928	842	301	602	807	442	726
1,8	478	958	864	293	610	807	430	762
1,9	469	982	884	286	620	804	426	796
2,0	464	996	900	280	632	800	426	828
∞		1250	1250		704			

Kuva 6. Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 207. Liite 1 Momenttikertoimet

Leikkausvoimien jakaantuminen ristiin kantavassa laatasta saadaan kertomalla tarkasteltavan suunnan kenttämomentti jännemitan arvoilla 0.6 (jäykkä tuki) ja 0.4 (vapaa tuki).



Kuva 7. Leikkausvoimien jakaantuminen ristiin kantavassa laaatassa (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 20)

Massiivilaatan mitoitusmenetelmä on selitetty tarkemmin by 211 Betonisuunnittelun oppikirjassa 2014 - osa 2, sivuilla 15–20.

Kaistamenetelmää käytetään, kun laatta on muodoltaan vino, kolmio tai sillä on muu mielivaltainen muoto. Menetelmässä ajatellaan laaatassa olevan yhteen suuntaan olevia kaistoja, jotka voivat olla ristikkäisiä toisiinsa. Risteävien kaistojen ei tarvitse olla kohtisuorassa toisiaan. Kaistojen ajatellaan toimivan yhteen suuntaan palkkien tavoin ja niitä rasittaa vain taivutus- ja leikkausrasitukset. Samansuuntaisten kaistojen välillä ei vaikuta leikkausvoimia (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 23.)

Kaistamenetelmässä on kolme eri tapausta, joista kaksi ensimmäistä on suorakaidelaatan tapauksia. Ensimmäinen on vapaasti tuetun suorakaidelaatan tapaus ja toinen, jossa vain laatan yksi sivu on jäykästi tuettu. Molemmissa tapauksissa suorakaidelaatta on jaettu vyöhykkeisiin, jonka perusteella määritellään kunkin vyöhykkeiden kuormitukset reuna- ja keskikentän alueille. Kolmas tapaus soveltuu laatoille, jossa on esim. aukko kentässä tai kentässä on pilarituki. Aukon ympärille on ns. palkkikaistat, joiden ajatellaan toimivan palkin tavoin. Sama palkkikaistajako oletetaan pilarituen kohdalle. Palkkina toimiva kaista voidaan ajatella

vapaan aukon kohdalle ja palkkikaistat voivat tukeutua myös toisiinsa. Menetelmän idea on sijoittaa raudoitusta sinne, missä se toimii tehokkaimmin. Teräsbetonirakenne toimii siten kuin se raudoitetaan ja se on tämän menetelmän perusajatus (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 23–28.)

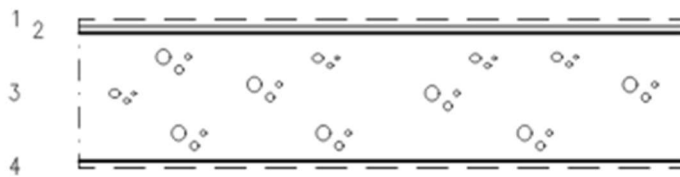
Myötöviivateoria perustuu plastisuusteorian ylärajalauseeseen. Laskentamalli edellyttää myötömekanismin syntymisen ja rakenteella on oltava riittävä muodonmuutoskyky. Tämä tarkoittaa rakenteella olevan alhainen raudoitusaste, jonka perusteella siinä oleva raudoitus myötää. Menetelmällä ratkaistaan laatassa vaikuttava myötökuorma, joka on ns. rajakuorma, jossa laatta on muuttunut mekanismiksi, eikä ota enää vastaan lisää kuormaa. Laatan myötöviivat ovat täysin kehittyneet ja kaikilla myötöviivoilla oletetaan vaikuttavan myötöviivan suuruinen taivutusmomentti. Rajakuormat ratkaistaan virtuaalisen työn periaatteella. Lopputuloksena on ratkaistu laatassa vaikuttavat mekanismit ja sen avulla saatu selville määräävä mekanismi (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 32–42.) Myötöviivateoriaa käytetään reiällisten ja osittain tuettujen laattojen laskentaan. Yleisesti sitä on käytetty väestönsuojien ja pilarilaattojen laskennassa.

Numeeriset laskentamenetelmät perustuvat elementtimenetelmään (Lähtenmäki 2022). Näiden käyttö perustuu ohjelmistoihin, jotka käsittelevät teräsbetonirakenteen epälineaarista käyttäytymistä, joka huomioi betonin halkeilua ja raudoituksen myötäämistä.

5.3 Rakenteiden kapasiteettien arviointi

Rakenteen kapasiteettien arviointia varten tulee tietää tutkittavan rakenteen mitoitusperiaate. Mitoitukset tehdään palkeille ja laatoille ja oleellista on tietää näiden rakenteellinen toiminta, jotta rakenteen voimasuureet saadaan oikeanlaisina tarkastelua varten. Elementtirakenteista ontelolaatta ja TT-laatta tekee kuitenkin eron kapasiteetin arvioimisen osalla, koska rakenneosissa on käytetty esijännitetyjä punoksia.

Rakennekuormia arvioitaessa voidaan rakennekuormia laskea rakennetyyppien pohjalta ja verrata niiden kuorma-arvoja tasosuunnitelmien kuorma-arvoihin. Rakennetyypillä tarkoitetaan sitä kokonaisuutta mistä rakenne koostuu. Esim. alla kuvassa olevan välipohjan rakennetyyppi koostuu pintamateriaalista, kantavasta rakenteesta ja alapinnassa olevasta pinnoitemateriaalista. Materiaalien yhteenlaskettu paino määrittää rakenteen painon ja se määritetään laskelmissa rakenteen neliöpainoksi.



Kuva 7. Kuva välipohjan rakennetyypistä.

Rakennetyypiiä tarkasteltaessa tulee todentaa rakenteen nykytilanne ja todentaa vastaako se suunnitelmaa. Rakennekuormien selvittyä voidaan tehtävä rakenneanalyysi toteuttaa käsin laskemalla tai statiikka- ja mitoitusohjelmia käyttäen.

5.4 Rakenneanalyysi

Rakenneanalyysiä varten tehdään rakennemalli, jonka perusteella saadaan rakenteen laskentakuormat. Kuormatietoa varten tiedetään kuormittavien rakenteiden ominaispainot ja määritetään niiden sijainti sekä määritellään rakenteiden toiminta ja tuet. Rakenteet voivat olla jatkuvia tai yksittäisiä palkkeja ja niiden tukirakenne voi olla kiinteä tai vapaa.

Rakenteen staattisen mallin perusteella laaditaan rakenteen kuormitustapaukset ja lasketaan rakenteen voimasuurelaskelmat. Määritetään määräävin voimasuureyhdistelmä ja tehdään rakenteen analyysilaskelma, kun tiedetään rakennesien materiaalit, lujuudet, raudoitteet, niiden dimensiot ja sijainti rakenteessa.

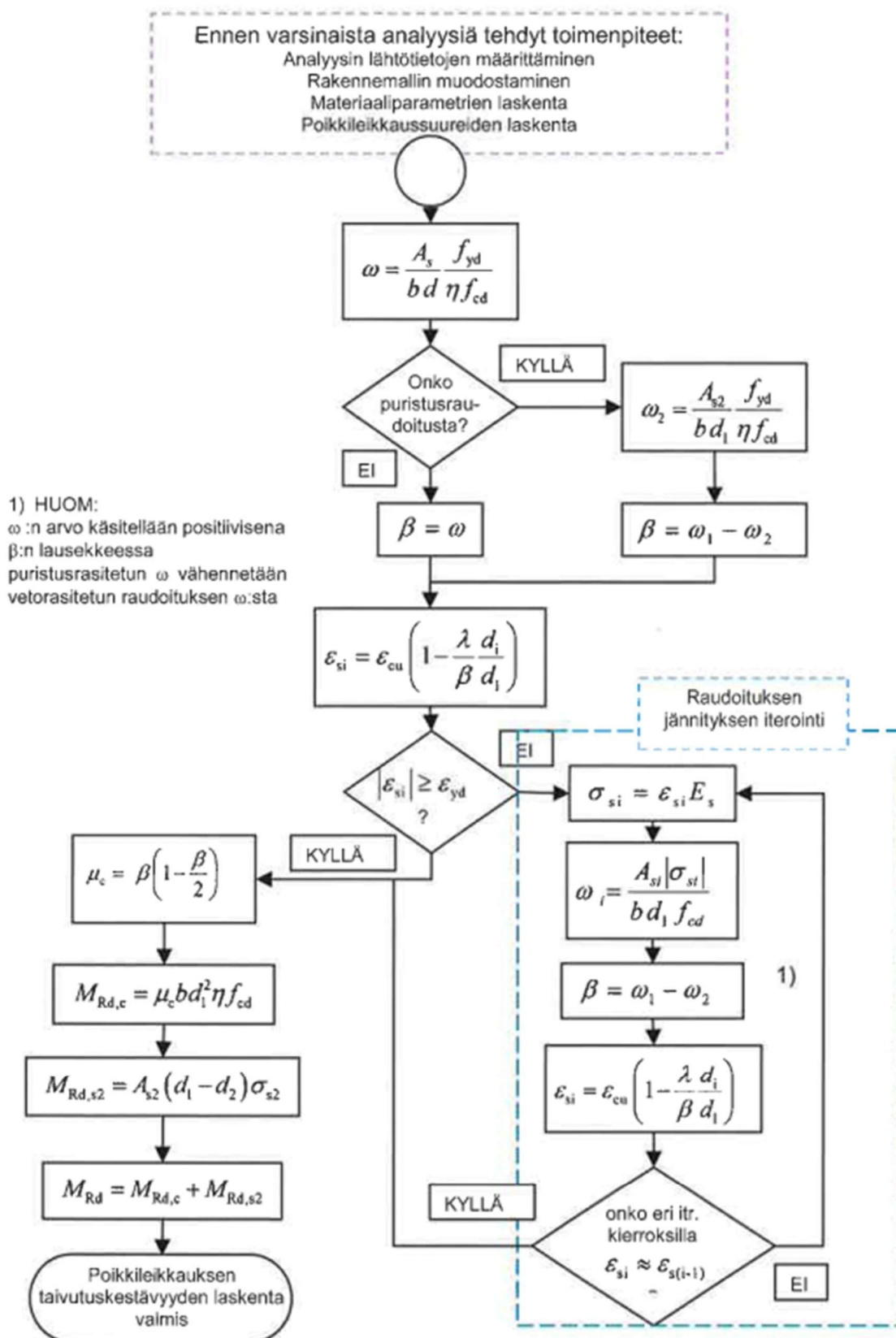
Rakenteiden rakenneanalyysit ovat tehtävissä edellä kerrottujen mitoitusteorioiden pohjalta palkeille ja laatoille. Tässä työssä edellä kerrottuja menetelmiä on käyty läpi vain pintapuolisesti, joten analyysin tekijän tulee syventyä tarkemmin valitun menetelmän käyttöön ja ratkaisukaavoihin.

5.5 Betonipalkin analyysit

Betonipalkkiin kohdistuvat analyysitarkastelut koskevat pääosin rakenteen taivutus- ja leikkauskapasiteettia sekä tukialueen rakenneterästen ankkurointia. Rakenteeseen voi vaikuttaa samanaikaisesti taivutusta, vetoa tai puristusta ja myös vääntöä. Silloin tulee tarkastella näiden voimien yhteisvaikutus rakenteeseen. Tarkastellaan seuraavissa luvuissa taivutus- ja leikkauskestävyyden analyysit eurokoodin mukaisesti.

5.5.1 Betonipalkin taivutuskestävyyden analyysi

Betonipalkkien osalla taivutuskestävyyden analyysitarkastelu voidaan tehdä, kun tiedetään rakennetta kuormittavat voimasuureet, käytetty betoni ja teräslaatu, palkin pituus, poikkileikkaus, tukipituus, poikkileikkaukseen sijoitettujen pääteräksien sijainti, niiden lukumäärä, hakaterästen koko, hakojen suunta rakenteen sisällä ja niiden jakotiheys sekä betonipeite. Seuraavassa kaaviokuvassa on selvitetty taivutuskestävyyden analyysin kulku. Kuvan jälkeen kerrotaan tapahtuva analyysin pääpiirteet sanallisesti (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 104, 120, 129.)



Kuva 8. Betonipalkin analyysitehtävän prosessikaavio. Palkin taivutusmitoitus (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 246)

Betonipalkin taivutuskestävyyden arviointia varten on määritettävä palkin mekaaninen raudoitussuhde (ω). Kun tunnetaan palkin poikkileikkaussuureet ja raudoituksen pinta-ala, voidaan mekaaninen raudoitussuhde ratkaista. Lisäksi tarvitaan palkin puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus (β), joka on tässä tapauksessa sama kuin mekaaninen raudoitussuhde. Palkin puristusvyöhykkeen suhteellisen korkeuden avulla ratkaistaan suhteellinen momentti (μ). Tämän jälkeen taivutuskestävyyden arvo voidaan laskea kertomalla yhteen suhteellinen momentti, palkin leveys (b), tehollisen korkeuden (d_1) potenssitulo, puristusvyöhykkeen parametri (η) ja betoniin lujuuden mitoitusarvo (f_{cd}). Tuloksena saadaan suhteellinen momentti (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 104.)

Jos palkki mitoitetaan tasapainoraidoitettuna, on saadun β -arvon oltava pienempi, kuin sille määritetty raja-arvo β_{bd} . Tällöin rakenteen raudoitus myötää murtotilassa. Tasapainoraidoituksen mukaiset raja-arvot on esitetty by 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirjassa 2013 – osa 1, sivulla 99, taulukko 2/5. Tasapainoraidoituksen raja-arvo riippuu käytetystä osavarmuusluvusta ja teräslaadusta.

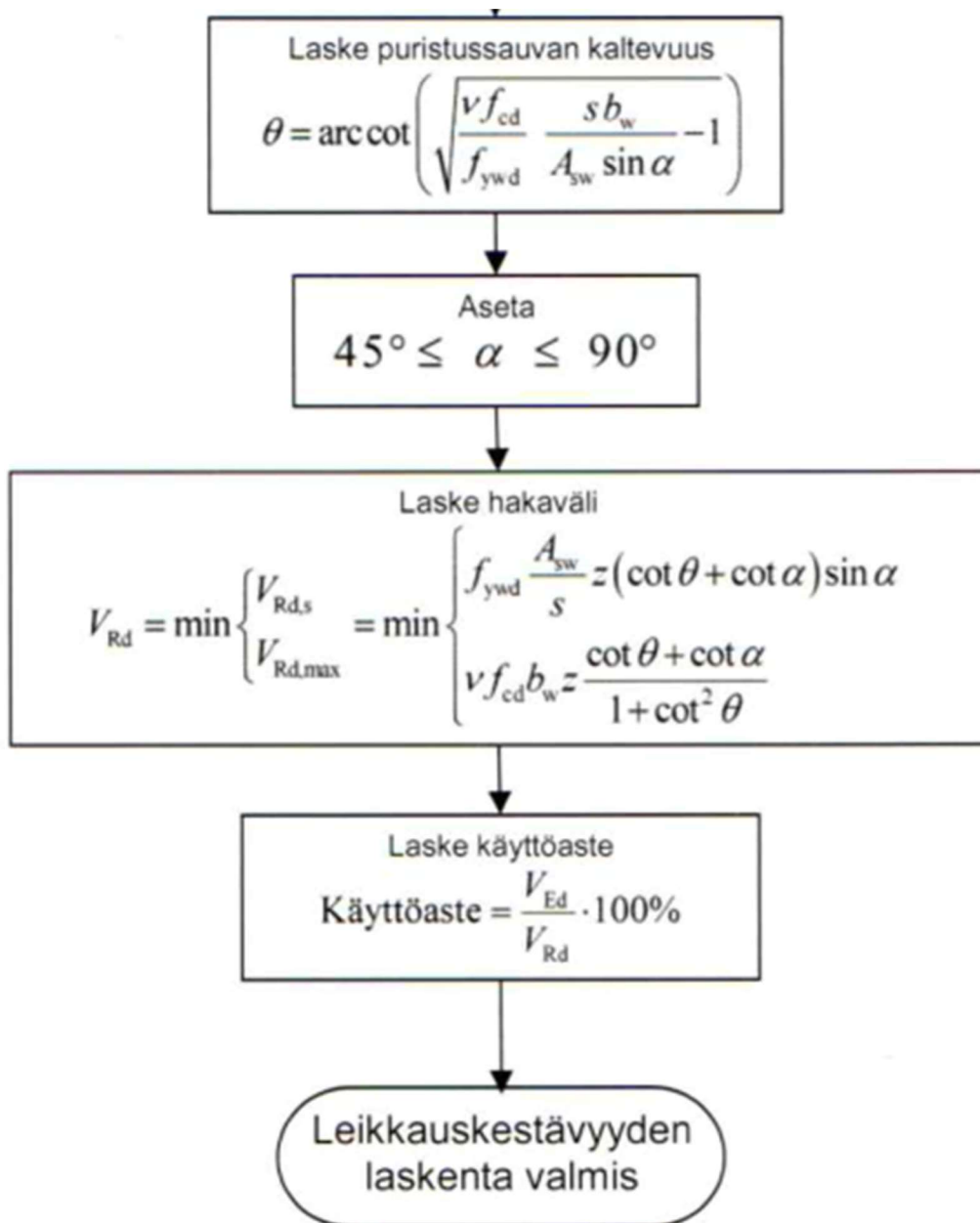
5.5.2 Betonipalkin leikkauskestävyyden analyysi

Betonipalkin leikkausmitoituksen analyysitehtävää varten on tunnettava palkin poikkileikkauksen mitat, palkin leveys ja korkeus, tehollinen korkeus, betonin lujuuden mitoitusarvo, leikkausraudoituksen määrä, laatu ja käytetty hakaväli. Lisäksi pitää tietää käytetyn leikkaushaan kulma (α), joka suoraan asennettuna on 90 astetta. Leikkaushaka voidaan asentaa myös vinoon, jolloin kulma on välillä 45–90 astetta (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 131–144).

Yleensä leikkaushaات asennetaan suoraan, mutta vanhemmissa betonipalkeissa vois leikkaushaka olla vinossa. Vanhoissa palkeissa voi palkin päävetoteräs toimia leikkaushakana, joka on käännetty vinoon tukialueella ja lisäksi teräksen pää on varustettu lenkillä, jonka tarkoitus on parantaa terästen ankkuroitumista rakenteessa (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 161).

Leikkauskapasiteetin analyysitehtävässä määritetään leikkaushaan kulmasta riippuva puristussauvan kaltevuus. Saatujen arvojen mukaan lasketaan palkin leikkauskestävyys, jota verrataan tunnettuun leikkausrasitukseen (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 145.)

Oheisessa analyysikaaviossa on kerrottu, miten betonipalkin leikkauskestävyyden analyysi tehdään. Kuvan jälkeen analyysin pääpiirteet on kerrottu sanallisesti.



Kuva 9. Betonipalkin analyysitehtävä. Palkin leikkausmitoitus (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 248)

Puristussauvan kaltevuus (θ) saadaan määritettyä ensimmäisen kaavan avulla, johon sijoitetaan seuraavat muuttujat. Halkeilleen betonin pienennyskerroin (ν), betonin ominaislujuus (f_{cd}), teräksen laskennallinen lujuus (f_{ywd}), jossa on huomioitu varmuusluku 1.15, hakajakoväli (s), hakojen poikkipinta-ala (A_{sw}), palkin leveys (b_w) ja hakateräksen alfaikulma. Saadun puristussauvan kaltevuuden arvo on oltava välillä 21,8–45 astetta. Jos näin ei käy, on laskennan arvoihin tehtävä muutoksia. (Kuva 9.)

Laskennan tuloksena saadaan leikkauskestävyys, joka on pienempi seuraavista arvoista. Leikkausraudoituksen leikkauskestävyys ($V_{Rd,s}$) tai leikkauskestävyyden yläraja ($V_{Rd,max}$). Leikkauskestävyyden käyttöaste saadaan jakamalla rakenteesseen kohdistuva laskennallinen leikkausvoima (V_{Ed}) leikkauskestävyydellä (V_{Rd}) ja kertomalla se luvulla 100. Tuloksena on rakenteen leikkauskestävyyden arvo prosentteina ilmaistuna.

5.5.3 Betonilaattarakenteen analyysin kulku

Betonilaattarakenteen kuormakestävyyden analyysi voidaan tehdä, kun tiedetään kentän mitat, kantosuunnat, laatan vahvuus, kentässä olevat raudoitukset, tuelle määritettyjen terästen määrä ja rakenteen toiminta tukialueilla. Esim. laatan taivutusmomenttia laskettaessa myöstöviivateorialla, tulee valita ortotropiakerroin ja määrittää tukimomentin ja kenttämomentin suhde. Jos kenttä on vapaasti tuettu, on jälkimmäisen arvo nolla. Ortotropiakertoimen avulla määritetään muunnetut jännemitat, jonka jälkeen kenttä- ja tukimomentit kerrotaan edellisten lukujen arvoilla (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 36.)

5.6 Ontelolaatan kapasiteetin arviointi

Ontelolaattojen mitoitus tapahtuu kahdessa eri vaiheessa. Rakennesuunnittelija määrittää ontelolaatalle kohdistuvan hyötykuorman, laattojen mitat, varaukset, tuennat ja onteloaattoihin tulevat sauma ja rengasteräkset. Nämä tiedot esitetään ontelolaattojen tasopiirustuksessa ja niissä olevista elementeistä laaditaan yksityiskohtaiset kaaviot, joista käytetään myös nimeä ”lappukuvat”. Elementin val-

mistaja, punossuunnittelija, määrittää tarvittavat punosmäärät ontelolaatoille rakennesuunnittelijan elementtisuunnitelman mukaan. Elementeissä voi olla reikävarauksia, koloja ja madalluksia, jotka vaikuttavat rakenteen mitoitukseen (Elementtisuunnittelu 2020i.)

Olemassa olevan ontelolaatan tai niistä muodostuvan kentän kapasiteetin arviointia varten tulee suunnittelijan tietää edellä olevat mitoitusvaiheen arvot. Ilman punostietoja olevista rakenteista on lähes mahdotonta määrittää kapasiteettia. Ontelolaatoissa käyttöaste on hyvin korkea, joten jälkeenpäin tehtäviä kuormamuutoksia tai reikien tekoa ei suositella tehtäväksi ilman tarkkaa tietoa rakenteen punoksista ja niiden määristä.

Ontelolaatan kapasiteetin tarkastelu aloitetaan selvittämällä, löytyykö arvioitavista ontelolaatoista punostussuunnitelmaa. Jos punostussuunnitelma löytyy, voidaan rakennetta tarkastella tekemällä siihen vertailulaskelma rakentamisajan kuormilla. Tarkastelu tehdään ontelolaatan suunnitteluperusteiden mukaan ja saatua tulosta vertaillaan ontelolaatan ajankohdan mukaisiin kapasiteettikäyriin (Elementtisuunnittelu 2020j). Näitä tietoja löytyy ontelolaattojen vanhoista esitteistä ja tarkastelua voi tehdä myös C-Slab ohjelmalla (Elementtisuunnittelu 2020k).

Jos ontelolaatan punostussuunnitelmaa ei ole käytettävissä, selvitetään seuraavaksi rakenteen suunnittelukuormat ja ne voidaan selvittää rakentamisajankohdan mukaan. Mikäli näitä kuormatietoja ei tiedetä, ne tulee määrittää. Lisäksi tehdään tutkimus rakenteen betoniluokasta. Tätä voidaan arvioida rakentamisajankohdan mukaan.

Seuraavaksi arvioidaan ontelolaatan punosmäärät ja niiden pohjalta voidaan tehdä tarkistus joko olemassa olevasta kapasiteettikäyrästä tai tarkistus tehdään Flexibel mitoitusohjelmalla. Punosmäärät voidaan vielä varmistaa tekemällä tutkimus ontelolaatoille, käyttäen tutkaa tai ultraäänitutkimusta.

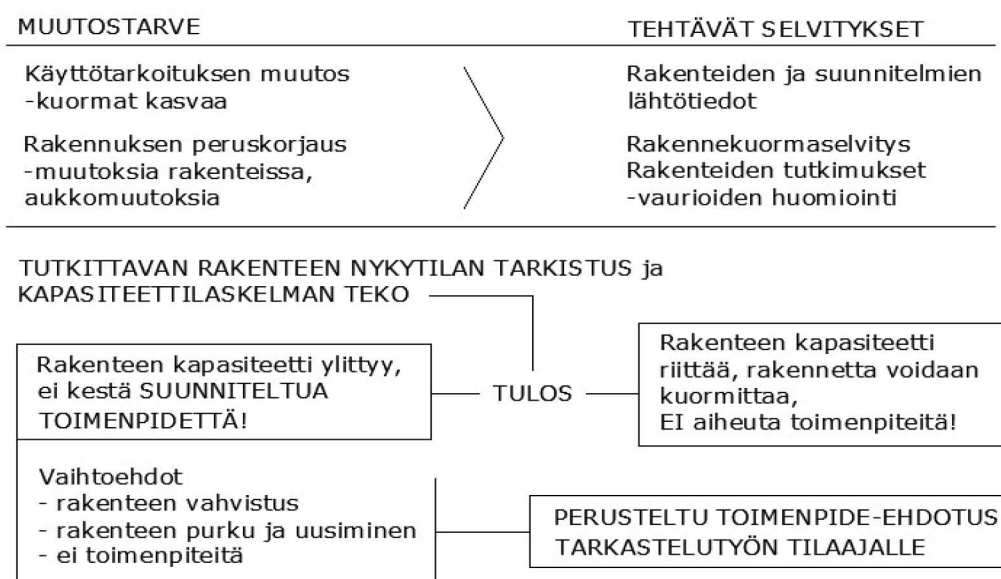
Jos edellä tehtävät tarkistukset eivät lisää rakenteen taivutusrasitusta, tehdään vielä tarkistelu laatan leikkauskapasiteetille. Mikäli leikkauskapasiteetti riittää, on tehty tarkastelu osoittanut ontelolaatan kapasiteetin riittäväksi.

Ontelolaatan leikkausrasituksen lisääntyessä, tulee tarkastella tukeutuvan rakenteen tilanne. Tuki voi olla taipuva tai taipumaton. Taipuva rakenne johtaa itse rakenteen tarkasteluun, jossa selvitetään, onko ontelolaatan päällä pintavalu vai onko siinä laakerikerros. Pintavalun vaikutus lisää ontelolaatalle tulevaa leikkausrasitusta ja se edellyttää lisätarkastelua, joka tehdään betoninormikortin nro 18 mukaisesti. Tämän tarkastelun voi tehdä Flexibel ohjelmalla, joka huomioi tukirakenteina toimivat betoni- ja teräsrakenteiset palkit (Elementtisuunnittelu 2020).

6 ARVIOINTITYÖN PROSESSI

6.1 Arviointityön käynnistäminen

Arviointityö käynnistyy rakenteen muutostarpeesta, joka voi koskea rakenteen kuorman muutoksia tai peruskorjauksen yhteydessä tehtäviä rakenteellisia muutoksia. Alla olevassa kuvassa on lyhyesti selostettu tarkastelun tarve ja siihen liittyvät selvitykset ja edelleen tehtävät toimenpiteet rakenteen osalla.



Kuva 10. Arviointityön prosessikuvaus lyhyesti

6.1.1 Rakenteiden ja suunnitelmien lähtötiedot

Arviointityön tekeminen edellyttää rakenteellisia selvityksiä tutkittavan rakennuksen osalla. Lähtökohtaisesti tulee selvittää, mikä on rakennuksen pääasiallinen rakennusaine ja miten rakennus on tehty. Rakennuksen runko ja sen rakenteellinen toiminta on keskeisessä roolissa, kun perehdytään, miten rakennus siirtää siihen vaikuttavia kuormia rakenteista toisiinsa ja siitä edelleen perustuksille. Tähän olennaisesti liittyy, miten rakennuksen kokonaisjäykistys on suunniteltu. Kun kyse on vaakasuuntaisten rakenteiden kapasiteettien arvioimisesta, joihin kohdistuu tasomaista kuormaa, täytyy samalla ottaa huomioon, siirtääkö tarkasteltava rakenne myös siihen kohdistuvia vaakavoimia. Tätä varten on selvitettävä

rakennuksen lähtötiedot, joista tärkeimmät ovat rakennesuunnitelmat. Lähtötiedoiksi tarvitaan myös muiden suunnittelualojen suunnitelmia, kuten arkkitehtisuunnitelmat ja lvis-suunnitelmat. Lisäksi tarvitaan rakennuksen huolto- ja korjaushistoria, jotta voidaan varmistua jo ennakkoon rakennuksen tai rakenteen nykytilanteesta. Suunnitelmien yhteensopivuus ja niiden paikkansa pitävyys rakennuksen nykytilaan liittyy ns. kokonaistarkasteluun, joka on olennaisen tärkeää arviointityötä tehtäessä.

Lähtötietotarpeet pohjautuvat yleensä vanhan olemassa olevan rakennuksen peruskorjaushankkeen, muun korjaustyön tarpeesta tai vain rakenteen elinkaareen liittyvästä tarkastelusta. Tarkastelu ja korjaustyö voi kohdentua yksittäisen, useamman rakenneosan tai isomman kokonaisuuden rakenteellisen toiminnan tarkasteluun. Tätä varten tarvitaan yksilöityä tietoa, mistä rakennemateriaaleista, miten rakenne liittyy toiseen rakenteeseen ja miten rakenne on tuettu. Lisäksi tulee tietää, onko rakennus tehty paikalla rakentaen, vai onko se koottu esivalmisteista elementeistä. Jos rakennus kuuluu ns. laajarunkoisiin rakennuksiin, tulee näissä tarkasteluissa teettää lopuksi vielä kolmannen osapuolen tarkistus (Finlex 2015/300, 4§).

Eri suunnittelualojen suunnitelmat liittyvät myös rakennesuunnitelmiin. Kantavissa rakenteissa voi olla läpivientejä talotekniikan rakenteiden vuoksi. Läpiviennit pyritään tekemään yleensä väistämällä kantavia rakenteita, mutta aina se ei ole mahdollista. Talotekniikan vaatimat läpiviennit merkitään reikäpiirustuksiin, jonka pohjalla käytetään rakenteen tasosuunnitelmaa.

6.1.2 Rakennesuunnitelmat ja rakentamisajankohta

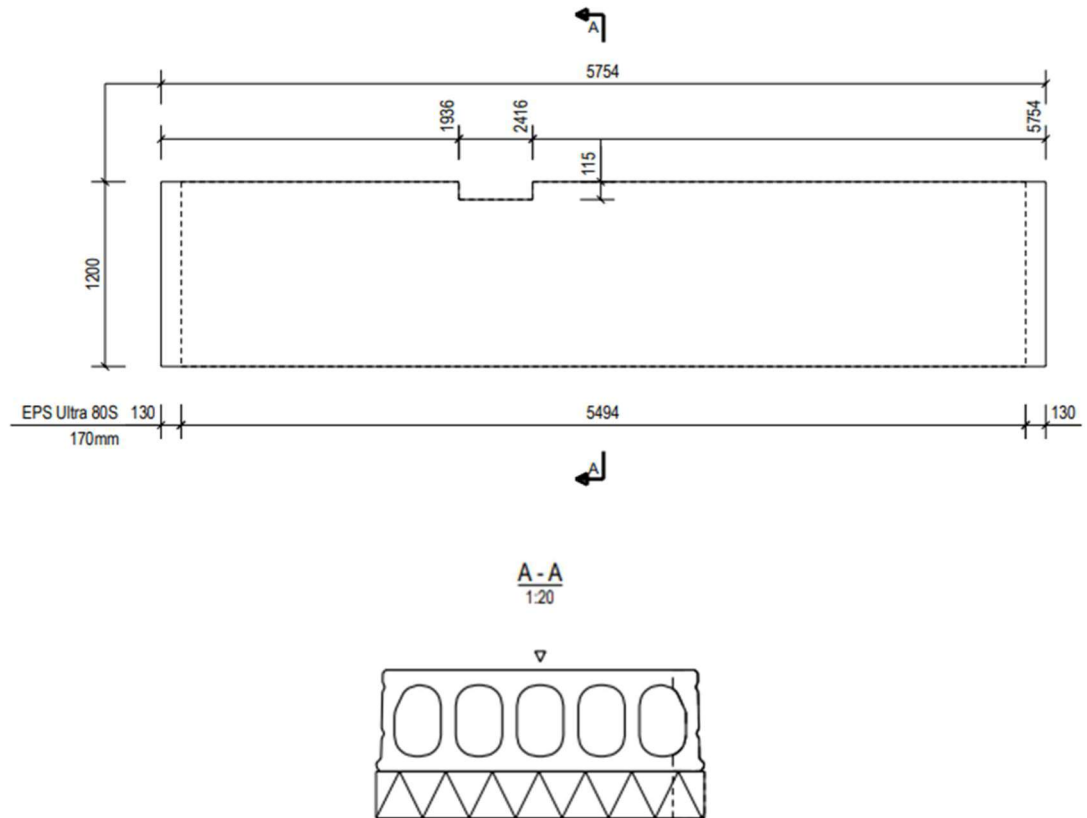
Suomen rakennuslaissa on jo pitkään määrätty, että rakennuksista tulee laatia rakennesuunnitelmat, joiden perusteella rakennus voidaan rakentaa sille määrättyjen vaatimusten mukaan (Finlex, 477/2014). Suomessa rakentamista on ohjannut erilaiset ohjeet ja määräykset, jotka ovat vuosien saatossa muuttuneet paljonkin. Rakennuksien hyötykuormat ovat määräytyneet rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan, ja joiden perusteella kantaville osille kuormat määräytyvät. Kattorakenteiden lumikuormat ovat määräytyneet maantieteellisen sijainnin ja

kattokulman ja muodon mukaan (RIL201-2017, 98, 101–107). Rakennesuunnitelmista tulee löytyä tieto rakenteille määritetyistä hyöty- ja rakennekuormista sekä rakenteissa käytetyistä materiaaleista ja niiden lujuuksista. Täydellinen rakennesuunnitelmasarja sisältää rakennuksen suunnitelmat perustuksista ylöspäin vesikattorakenteisiin saakka. Rakennesuunnitelmissa rakenteet esitetään päämittoineen ja kuormatietoineen.

Tarvittavat suunnitelmat kantavien palkki- ja laattarakenteiden osalta ovat tasopiirustukset ja raudoitussuunnitelmat. Näissä on esitetty rakenteiden neliökuormat, rakenteiden tukilinjat, jako ja tuenta, raudoitusteräokset ja reikätiiedot. Lisäksi tarvitaan yksityiskohtaisempia suunnitelmia kuten palkkikaaviot, rakenneleikkaukset ja rakennedetailit. Rakenteen tuentatavat saadaan selville palkkikaavioista tai rakenteen leikkaussuunnitelmasta.

Laatta- ja palkkirakenteisiin tehdyt läpiviennit on suunniteltu niin, ettei niistä ole haittaa rakenteen kestävyydelle. Suunnittelutyön alkuvaiheessa talotekniikan alan suunnittelijat varaavat rakennuksen tekniikalle reitit ja jos läpivienti osuu palkin tai laatan osalle, on rakennesuunnittelija katsonut, onko reitti mahdollista toteuttaa. Rakennesuunnittelijan tehtävänä onkin ollut huomioida läpiviennin vaikutus rakenteeseen ja mitoittaa rakenne niin, ettei se vaikuta rakenteen kapasiteettiin heikentävästi. Tätä prosessia kutsutaan reikäkierroksi ja se tuottaa rakennesuunnitelman, josta käytetään nimeä reikäpiirustus (Dahlström 2015, 7).

Elementtirakenteisia rakennuksia varten laatii rakennesuunnittelija rakenneta-
soista elementtikaaviot. Elementtikaavioissa merkitään elementin pituus, leveys, tukialueet, reiät, mahdolliset laatan ohennukset, joita tehdään esim. märkätilojen viemärointejä varten ja tärkeimpänä rakenteen hyötykuormat. Elementtisuunnittelun pohjalta tarkentuu rakenteen oma paino, joka sitten huomioidaan rakenne-
laskelmissa, kun tehdään lopullista voimasuurelaskentaa.



Kuva 11. Ontelolaatan elementtikuva (Elementtisuunnittelu 2020m)

Elementtirakenteisiin tehtävät reiät on esitetty samalla tavalla, kuin paikalla tehdyissä rakenteissa, mutta näissä elementin suunnittelija on laatinut reikätietojen ja kuormitusten pohjalta rakenteessa vaadittavat punosteräkset ja punosmäärät vaaditun kantavuuden mukaan. Elementeissä rakenteen käyttöaste on pidetty korkeana, johtuen kovasti kilpailutetusta alasta. Materiaalimenekki on suoraan verrannollinen tuotteen hintaan. Näissä rakenteissa jälkepäin tehtävät reikämuutokset voivat olla erittäin haasteellisia ja ne tuleekin suunnitella erityisen tarkasti. Ontelolaatoista on olemassa suunnitteluohjeita, joiden pohjalta voidaan määrittää kapasiteetit. Elementtirakenteiden tasosuunnitelmista löytyy punosmäärät eri elementeille. Tasosuunnitelmassa on käytetty elementeille tunnuksia, joista selviää elementin tarkemmat tiedot. Alla olevassa kuvassa on esitetty yleisimmät elementtitunnukset.

Laattaelementit	Laattaelementti (massiivilaatta, välipohja)	L
	Alapohjalaatta (massiivilaatta, eristetty)	EL
	Jännitetty laattaelementti	JL
	Ontelolaatta	O (3
	Ontelolaatta (lämpöeristetty)	O (3
	Ontelolaatta (REI190-palolaatta)	15O
	Ontelolaatta (REI120-palolaatta)	2O
	Ontelolaatta (yläpunoslaatta)	YO
	Ontelolaatta (kylpyhuonelaatta)	OK (4
	Kuorilaatta	KL
	TT-laatta	TT
	HTT-laatta	HTT

Kuva 12. Runkorakenteet, elementitunnukset (Elementtisuunnittelu 2020n)

Betonirakenteissa on ehdottoman tärkeää tietää käytetyn betonin ja rakenneteräksien lujuusarvot sekä näiden yhteistoiminta rakenteessa. Palkkirakenteissa tarvitaan lisäksi tieto, onko kyse jatkuvasta palkista vaiko yksiaukkoisesta palkista. Suunnittelijan tulee olla perehtynyt rakenteiden mekaniikkaan, jotta tietää mitä vaatimuksia tuet ja ulokkeelliset rakenteet asettaa rakenteen voimasuureita laskiessa. Palkkirakenteista tehdään palkkikaaviot ja tarvittavat rakenteen poikkileikkaukset, joiden perusteella saadaan selville raudoituksen betonipeite, sijainnit ja pituudet rakenteessa. Poikkileikkausten perusteella voidaan laskea palkin neutraaliakselin paikka, vetoterästen pinta-ala ja määrä, palkin tehollisen puristuksen korkeus ja momenttivarsi (Kuva 5).

Poikkileikkausteoriat palkkirakenteille riippuvat palkin muodosta ja rakenneterästen sijoittelusta. Yleisin poikkileikkausteoria on suorakaidepoikkileikkaus, jossa

pääteräksillä otetaan vastaan palkkiin kohdistuvat vetorasitukset ja betonilla puristusrasitukset (Kuva 5). Suorakaidepalkista on erilaisia poikkileikkausteorian muunnelmia, joita käsitellään luvussa *5 palkkien ja laattojen mitoitusperiaatteet*.

Rakennesuunnitelmat perustuvat rakennelaskelmiin. Tasorakenteissa määritetään rakenteen oma paino, joka lasketaan rakennetyypin mukaan. Tilan käyttötarkoituksen pohjalta saadaan selville rakenteen hyötykuormat, joissa on eroja eri mitoitusnormien välillä. Rakennelaskelmiin huomioidaan kaikki rakennukseen kohdistuvat kuormat, kuten lumi, lumen kinostumat, tuulikuormat ja myös onnettomuuskuormat. Rakennekuormat lasketaan eri tarkasteluita varten, joita ovat rakenteen normaali käyttö, onnettomuustilanteet ja maanjäristystilanne, joka on hieman harvinaisempi tarkastelutilanne. Myös tilapäiset mitoitusilanteet ovat tarpeen, kun tehdään rakenteen korjaamiseen tai vahvistamiseen liittyvää kuormatarkastelua (RIL-201-2017, 31–33.)

Rakenteen kuormia tarkastellaan murtorajatilan tai käyttörajatilatarkastelun mukaan. Murtorajatilassa tarkastellaan rakenteen kestävyyttä, joka voi tarkoittaa rakenteen murtumista tai palautumattomia vaurioita. Käyttörajatilassa tarkastellaan rakenteen taipumaa, siirtymiä tai värähtelyä (RIL-201-2017, 30.)

Rakennuksen lähtötietoja tarkastellessa tulee huomioida myös rakennusajan kohta, sillä rakennusmateriaaleissa ja työtekniikoissa on ollut eroja ja joilla on vaikutusta rakenteiden kapasiteetteihin. Tämän vuoksi on ehdottoman tärkeää, että rakenteen tarkastelussa ei saa käyttää väärää normia tai sekoittaa eri normeja keskenään, tehtäessä rakenteen voimasuureiden ja kestävyyksien laskentaa.

Eri ajan mitoitusnormeissa betonin ja rakenneteräksen lujuuksissa on erilaisia kestävyysarvoja. Tämä tulee huomioida, kun tarkastellaan eri betonilaatujen ja rakenneteräksien lujuusarvoja eri normien välillä. Rakennesuunnitelmista tulee käydä selväksi, millä suunnitteluohjeilla ja suunnittelunormilla kyseinen rakennus on suunniteltu. Suunnitelmiin merkityt tasokuormat määrittävät tarkastelun lähtö-

arvot ja yksittäisen rakenneosan tarkastelu vaatii tarkempia tietoja käytetyistä betonin ja raudoituksen lujuuksista, raudoituksen sijoittelusta ja betonin suojaetäisyyksistä.

6.1.3 Kohdekäynti

Tarkastelun alla olevaan kohteeseen on tarpeen tehdä kohdekäynti, kun halutaan varmistaa esim. suunnitelmien yhteensopivuutta rakennuksen tai rakenteen osalla. Kohdekäynti sovitaan tilaajan kanssa ja sille voidaan asettaa jo alustavia vaatimuksia. Rakenteiden todentamismenetelmistä voidaan sopia tilaajan kanssa ja ensimmäisen käynti voi olla pelkästään visuaalinen tarkastelu rakennukselle. Yleensä tarkoituksena on tutustua kohteeseen ja selvittää rakennuksen nykytilannetta visuaalisesti ja rakenteita rikkomattomilla menetelmillä. Rakennuksen nykytilan arviointi voidaan aloittaa ensin kevyemmällä tarkastuksella ja jonka perusteella voidaan jo arvioida, onko tarpeen tehdä tarkempia tutkimuksia.

Kohdekäynnillä tarkistetaan rakennuksen käytettävissä olevat suunnitelmat ja niiden paikkansa pitävyys rakennuksen kanssa. Päällisin puolin voidaan tarkistaa, vastaako rakennuksen muoto tehtyjä suunnitelmia. Visuaalinen tarkastelu soveltuu myös rakenteiden näkyvillä olevien vauriopaikkojen todentamiseen, kuten halkeamien ja murtumien todentamiseen rakenteissa.

Rakennuksen tarkasteluvaihe voidaan todentaa käyttämällä valokuvausta ja videokuvausta. Mikäli toimeksiantoon on sovittu jo alustavien vaurioiden selvittelyä, voidaan vauriopaikkoja merkitä tasopiirustuksiin ja pitää erillistä tarkastusasiakirjaa, johon kirjataan käynnin aikana tehdyt huomiot.

Kohdekäynnistä on aina syytä tehdä kirjallinen raportti, joka toimii jatkotoimenpiteiden perustana. Tarkoituksena on kertoa alustavasti rakennuksen tai rakenteen nykytila ja tuoda esille ne asiat, jotka esim. vaativat lisätutkimuksia. Tilaajan näkökulmasta saadaan jo selville kustannusvaikuttavia asioita, joiden perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä tarvittaville tutkimus- ja korjaamistoimenpiteille. Hankevaiheissa yleensä varaudutaan tietyille tutkimuksille, joiden perusteella

voidaan tehdä päätöksiä hankkeen eteenpäin viemiseksi. Tilaaja puntaroi yleensä hankkeen kustannuksia ja tekee niiden pohjalta investointipäätöksiä.

Ensimmäinen kohdekäynti on pääasiassa rakennuksen kartoitusta, jolla pyritään saamaan selville rakennuksen kuntoa yleisesti. Riippuen rakennustavasta, ei kaikkia kantavia rakenteita välttämättä voida todentaa ja niiden kuntoa on täten vaikea arvioida. Välipohjarakenteet ovat yläpinnastaan peitossa pintamateriaalien vuoksi ja alapuolella voi olla katon alaslaskurakenteita, joihin rakenteita jää piiloon. Tämä vaatii kartoittajalta merkintöjä, jotka sitten huomioidaan tutkimussuunnitelmaa tehdessä. Kartoituskäynti pitää erottaa varsinaisesta tutkimustyöstä, sillä sen tehtävä on selvittää ne paikat ja rakenteet, jotka eivät selviä vielä rakennuksen lähtötiedoista. Tämän vuoksi kartoittajan tulee tutustua lähtötietoihin ennen kohdekäyntiä ja tehdä selvitystyötä paikan päällä.

6.2 Tutkittavan rakenteen nykytilanne

6.2.1 Tutkimussuunnitelma

Rakenteiden tutkimuksiin lähdetään, kun halutaan varmentaa rakenteellisia asioita tai selvittää rakenteen nykytilaa tarkemmin ja kartoittaa rakenteessa olevia vaurioita. Mikäli rakenteessa on vaurioita, on tutkimusten tarkoitus selvittää, miten ja miksi rakenne on vaurioitunut ja onko se enää kannattavasti korjattavissa. Rakennetutkimuksia voidaan tehdä alkuun pintapuolisesti esimerkiksi kimmovaralla ja betonin peitesyvyysmittarilla. Sen jälkeen rakennetta voidaan tutkia tarkemmin avaamalla rakennetta tai ottamalla näytteitä esim. betonilaadun, lujuuden, karbonatisoitumisen, kloridien tai alkalikiviainesreaktion selvittämiseksi.

Rakenteellinen tutkimus palvelee myös analyysilaskennan tekoa. Alustavaa analyysilaskentaa voidaan tehdä oletetuilla materiaalien lujuustiedoilla sekä poikkeikkauksen mitoilla, mutta kun tarvitaan tarkempi tulos ja on syytä selvittää betonin todellinen puristuslujuus ja käytetty teräslaatu vastaamaan laskennan arvoja, on syytä tehdä perusteelliset rakennetutkimukset.

Tutkimussuunnitelmaa laatiessa tulee ottaa huomioon kaikki rakennuksen kantavat osat ja määritellä tutkimustapa eri rakenneosille, jos kyseessä on koko rakennuksen peruskorjaus. Tutkimukset on syytä ulottaa välille rakennuksen maaperä ja vesikatto, ja huomioida tällä tarkasteluvälillä kaikki kantavat rakenteet, jotka siirtävät rakenteiden välillä kuormia. Myös rakennuksen rakennetyypit tulee sisällyttää tutkimussuunnitelmaan. Tutkimussuunnitelmasta laaditaan virallinen asiakirja, joka palvelee tilaajaa ja kohteen tutkijaa. Tutkimussuunnitelman laatimista kantaviin rakenteisiin voidaan soveltaa julkaisusta Suomen Betoniyhdistys ry Betonijulkisivun kuntotutkimus by 42 2019. Tutkimussuunnitelman laatimista on käsitelty luvussa 5.

6.2.2 Lähtötietopuutteet ja epävarmuustekijät

Kun korjaaminen koskee rakennuksen kantavia rakenteita, tarvitaan vanhat olemassa olevat rakennesuunnitelmat käyttöön. Tämä olisi ideaalitilanne, jolloin rakenteen tarkastaminen olisi vanhojen suunnitelmien pohjalta tehtävissä. Tilanne voi olla myös se, että vanhoja suunnitelmia ei ole, tai ne ovat puutteelliset, jolloin epävarmuustekijät kasvavat.

Rakennukseen suunniteltavat lisäys- ja muutostyöt vaativat yleensä tarkkoja lähtötietoja, jotta tarkastelut voidaan tehdä riittävän hyvin kantaville rakenteille. Tärkeintä on saada selville, miten rakennuksen kantava rakenne on suunniteltu, millaiset kuormat rakenteisiin vaikuttaa ja miten itse yksittäiset rakenneosat on suunniteltu kestävänsä tulevat rasitukset. Vanhojen suunnitelmien yhteensopivuus eri suunnittelualojen osalta tulee tarkastaa ja varmistua, että niissä ei ole ristiriitaa. Parhain tilanne on, kun käytössä ovat rakennuksen loppudokumentit, huoltodokumentit ja jälkeempään tehdyt rakenteelliset muutostöiden suunnitelmat.

Yleisin lähtötietojen ongelma on niiden puute. Toinen yleisin syy on suunnitelmien vähyyys, suunnitelmien huono luettavuus ja myös epäselvät merkinnät suunnitelmissa. Näihin ongelmiin törmätään hyvin monesti korjausrakentamisen projekteissa ja se aiheuttaa paljon epävarmuutta, kun ollaan laatimassa korjaussuunnitelmia kantaviin rakenteisiin.

Vanhemmista rakennuksista olevat suunnitelmat ovat hyvin harvoin täydellisiä sarjoja, joiden perusteella rakennus on suunniteltu ja rakennettu. Suunnittelijan tehtävänä onkin huolehtia, että käytettävissä oleva aineisto on riittävä ja luotettava, kun kapasiteetin arviointia ollaan laatimassa. Jos tämä ei toteudu, on suunnittelijan tehtävänä tuoda esille, että lähtötietoaineisto ei ole riittävä eikä kapasiteetilaskentaa voida suorittaa täydellä varmuudella. Epävarmuustekijöitä voidaan pois sulkea tekemällä rakenteisiin tutkimuksia.

Rakennuksen lähtötietoja tarvitaan jo peruskorjaushankkeen hanke- ja tarjousvaiheessa, joten rakennesuunnittelun toimeksianto varten on jo yleensä suunnitelmia käytettävissä. Jos lähtötietomateriaalia on niukasti käytössä, voi rakennuksen suunnitelmia tiedustella myös maakunta- ja rakennusvalvonnan arkistoista, mikäli niitä ei ole jo tarjousvaiheessa käytössä eikä työn tilaajalla ole niistä tarkempaa tietoa. Lähtötietojen haku ja tiedustelu voidaan sisällyttää annettuun toimeksiantoon, mikäli tilaajan kanssa näin sovitaan.

Vanhoja suunnitelmia läpi käydessä, tuleekin olla tarkkana etenkin eri aikakaudella tehtyjen suunnitelmien piirustusmerkinnöistä ja varmistua niissä käytetystä suunnittelunormista. Suunnitelmien luettavuus ja epätarkkuus voi johtua huonosta kopiolaadusta tai musteen haalistumisesta. Arkistoja onkin alettu siirtämään digitaaliseen muotoon, koska asiakirjat eivät säily ikuisesti. Digitaaliset asiakirjat ovat yleisesti helpommin saatavilla, mutta turvaluokiteltujen hankkeiden osalta käytäntö on eri. Näissä toimitaan turvaluokituksen mukaisesti tilaajan ohjeiden mukaan.

6.2.3 Kenttätutkimukset

Kenttätutkimukset perustuvat tehtyyn tutkimussuunnitelmaan. Kantavien rakenteiden osalla on olennaista selvittää rakenteen todellinen nykytila ja todentaa mm. rakenteiden osalla rakennetyyppien paikkansapitävyys. Kapasiteettien arviointiin liittyy rakenteen oman painon tarkastaminen, joten rakenteen todelliset dimensiot tulee tarkastaa ja todeta vastaavatko ne tehtyjä suunnitelmia.

Kenttätutkimuksilla varmennetaan rakenteen tiedot, betonin rakennelujuus ja käytetty teräslaatu, mikäli mahdollista. Samalla selvitetään rakenteissa olevat vauriot ja niiden laajuus ja laatu (Suomen Betoniyhdistys ry 2019, 65–74). Kenttätutkimusten yleisin toimenpide on rakenneavausten teko. Muut toimenpiteet ovat visuaalinen tarkistaminen, mittaukset ja halkeamien mittaus, joita voidaan mitata luupilla tai rakotulkilla.

Kantavat rakenteet eivät ole aina näkyvissä. Rakenne voi olla piilotettu alaslaskutilaan, joissa on myös rakennuksen talotekniikka piilotettuna. Rakenne voi olla myös verhottu piiloon, eli syynä voi olla arkkitehtuurinen syy. Tutkimustyössä rakenne on kuitenkin pystyttävä tarkistamaan, mutta joskus tarkistusta ennen varsinaista korjaustyötä ei vain voida toteuttaa. Rakenneavauksen teko voi häiritä tilan käyttäjiä tai se voi olla ylimääräinen riski rakenteen varsinainen toimivuuden kannalta tai se on mahdoton tehdä ilman isompia suojauksia, jossa vältetään esim. pölyn leviämistä tai sadeveden pääsemistä rakenteisiin.

Tästä nostan esimerkin opinnäytetyön tarkasteltavasta palkkirakenteesta, joka on verhottu piiloon ja on osa kattorakennetta ja liittyy katon vedenpitävään yläpohjaan. Rakenne on päältä päin pellitetty ja itse tarkasteltava palkki on yläpohjarakenteen sisällä piilossa verhottuna lämmöneristerakenteella. Palkkiin voitaisiin tehdä ulkopuolelta paikallinen rakenneavaus ja tehdä tarvittavat tutkimukset, mutta on kuitenkin päätetty, ettei rakenteen vesitiiveyttä haluta tässä vaiheessa lähteä vaarantamaan. Lopullinen rakenteiden purku ja muutostyöt tehdään sääsuojarakenteen alla korjaustyön aikana. Koska palkin nykytilaa ei voida tarkistaa, se luo epävarmuustekijän, joka voi asettaa hankkeelle suuren kustannusriskin palkkien osalla. Riski voidaan eliminoida tai todentaa vasta kun työvaiheet rakennuksen yläpohjassa käynnistyvät ja työ siirtyy palkkien rakenteiden paljastamiseen. Hankkeeseen tuleekin ottaa huomioon epävarmuustekijä ja sille on asetettava erillinen- tai lisäkustannusvaraus, joka luonnollisesti nostaa hankkeen kokonaishintaa.

6.2.4 Tutkimusten dokumentointi

Tehdyistä tutkimuksista tehdään tutkimusraportti, jonka laajuus voi olla yksittäisen rakenneosan tai isomman kokonaisuuden arviointia ja tutkimista. Raportin tarkoitus on kertoa yksiselitteisesti rakenneosan tai rakennuksen nykytilanne mahdollisimman tarkasti. Tutkimusraportissa kerrotaan tutkittu rakenne, sitä kuormittavat rakenteet, mahdolliset havaitut rakenteiden vauriot ja tehdyt tutkimustoimenpiteet selittäen ne yksityiskohtaisesti. Raportin tarkoitus on olla asiakirja, jota lukeva taho saa selville mitä on tutkittu, mitkä ovat tutkimustulokset ja mitä korjausehdotuksia ja toimenpiteitä raportin laatija suosittaa. Hyvin tehdystä raportista saa sitä lukeva selville riittävän hyvän ja laajan tiedon rakennuksesta ja rakenteista jatkosuunnittelua tai korjauskannattavuuden arviointia varten. Tutkimisraportin pohjalta voidaan laatia uusia suunnitelmia, tehdä arviointia, analyysilaskentaa ja tehdä vielä lisätarkennuspyyntöjä lisätutkimuksia varten (Suomen Betoniyhdistys ry 2019, 117–122.)

6.2.5 Lisätutkimusten tarve

Rakenteiden lisätutkimuksien tarve on yleensä jonkin rakenteen tai rakenneosan varmistamisesta johtuva asia, jota ei ole voitu varmentaa käytettävistä lähtötiedoista eikä tehdyillä tutkimuksilla. Ajankohta saattaa tulla eteen vasta hankkeen jo ollessa käynnissä. Kuten aikaisemmassa luvussa mainittiin piilossa olevien rakenteiden todentamisesta, voi lisätutkimuksien teko tulla mahdolliseksi vasta rakenteiden purkujen jälkeen. Lisäksi ajankohta voi riippua korjaustyön sovitusta etenemisestä, johon liittyy esim. korjaustyön jaksottaminen. Isommissa hankkeissa voi työmaa olla pilkottuna eri hankevaiheisiin, jota sitten toteutetaan laaditun suunnitelman mukaan.

Lisätutkimukset tulee suunnitella etukäteen, jos ne ovat jo ennalta arvattavissa. Riippuen rakennushankkeen aikataulusta ja töiden järjestyksestä, tulee lisätutkimukset suunnitella näihin sopiviksi. Olennaista on kiinnittää huomio niihin paikkoihin, joissa on suuria epävarmuustekijöitä ja joiden osalle voi kertyä suuria kustannusvaikutteita, jos rakenne todetaankin vaurioituneeksi tai se on suuremmassa korjaustarpeessa kuin mitä on suunniteltu.

6.3 Rakenteiden tutkimusmenetelmät

6.3.1 Taipuman tarkemittaukset

Betonirakenteissa tapahtuu muodonmuutosta jo heti rakentamisen aikana ja vielä pitkäänkin sen jälkeen, riippuen olosuhteista ja kuormitustilanteesta. Rakenteiden muodonmuutoksista puhuttaessa tarkastellaan yleensä palkin tai laatan taipumaa (Anttila 2020, 2). Mittausvälineitten mukaan saadaan tarvittava mittaus-tarkkuus valittua hyvinkin tarkaksi, rullamitasta lasermittausvälineisiin. Palkin taipuma on varsin helppo toteuttaa vertaamalla tukialueen korkoa keskialueen korkoon. Kun taipumaerot saadaan kirjattua tehtyyn raporttiin, on kohteen suunnittelijan helppo tehdä vertailua tekemiinsä laskelmiin esim. rakenteen taipumaa arvioitaessa.

6.3.2 Rakenneavaukset

Rakenteiden vahvuuksia voidaan selvittää tekemällä rakenneavauksia, jossa voidaan tarkentaa tietyn rakenteen vahvuutta tekemällä läpiporaus rakenteesta esim. lieriöporalla tai betoniporanterällä. Tätä menetelmää käytetään, kun halutaan saada tarkka mittatieto rakenteen vahvuudesta esim. välipohjasta, jonka dimensio ei selviä muulla mittaustavalla. Rakenneavaukset suunnitellaan ja niitä ennen varmistetaan mahdolliset rakenteissa olevat haitta-aineet.

Rakenneavauksen tulkinta kantavissa rakenteissa on hyvin olennaista, kun määrittellään rakenteen omaa painoa. Rakenneavaus valokuvataan, mitataan syvyys ja eri rakennekerroksien vahvuudet. Tärkeää on osata erottaa missä kohtaa on eri betonikerrokset, jos rakenneavauksessa on mukana välipohjan pintakerrosta ja on porattu kantavan rakenteen kohdalta. Myös rakenneterästen sijainti ja jakotiheys voidaan määrittää, jos lieriössä tai porareistä on löydettävissä leikkaantuneet teräkset. Rakenneavauksen rakenteet numeroidaan alkaen pintarakenteista ja päätetään joko alapinnan pintamateriaaliin tai reiän pohjaan. Aina rakenneavausta ei voida porata läpi ja syy voi olla todella paksu rakenne tai alapuolella olevaa tilaan ei ole pääsyä.

Näytetutkimuksia varten lieriöporauksessa on tarkoitus saada kokonainen ehjä lieriö tehtävään lujuustestiin. Porattaessa ja irroitettaessa lieriötä rakenteesta, tulee varmistua lieriön irti saaminen ehjänä rakenteesta. Betonilieriöille tehtäviä testejä ovat vetolujuus, puristuslujuus, kloriditutkimus, karbonatisoituminen ja ohuthie tutkimukset. Jokaisella tehtävillä tutkimuksella on omat vaatimukset betonilieriölle, joita ovat näytteen puhtaus, koko, pituus ja tutkittavan pinnan suoruus. Vaatimukset varmistetaan tehtävän tutkimuksen ja käytettävän tutkimuslaboratorion mukaan (Suomen Betoniyhdistys ry 2019, 101.)

6.3.3 Betonin lujuuden määrittäminen

Kimmo-vasara on perustyökalu, jolla voidaan arvioida betonin lujuutta. Tarkempi ja varmempi lujuuden arviointi on tutkia porattu betonilieriö, jolle voidaan tehdä puristus ja vetolujuuskokeet (Suomen Betoniyhdistys ry 2021, 27). Lieriö yleensä saadaan rakenneavauksen tuloksena, kun tehdään lieriöporaus rakenteeseen. Jos tutkittavassa kohteessa ei tehdä rakenneavauksia tai betonilieriötä ei porata, on helpointa vasaroida betonia ja päätellä, irtoaako siitä palasia ja kuinka helposti. Jos palasia ei irtoa, voidaan olettaa betonin säilyneen eikä lujuusalenemaa ole tapahtunut. Toisaalta helposti irtoavat betonipalat kertovat betonin haurastumisesta ja todennäköisesti myös betonin karbonisoitumisesta. Betonin karbonisoitumisesta kerrotaan luvussa *6.4 Rakenteiden vauriot*.

6.3.4 Kimmo-vasaran käyttö

Kimmo-vasaran käyttö betonin lujuuden tutkimukseen on käytännöllinen mutta siihen liittyy epävarmuustekijöitä. Laitteen käyttö perustuu betonin pintaan tehtävään iskuun, joka ohjataan kohtisuoraan tarkasteltavaa rakennetta. Saataviin tuloksiin vaikuttaa betonin pinta ja betonin kosteusolosuhteet. Betonin lujuudella on käyttöön rajoittava tekijä ja betonin lujuuden ollessa yli 45 MPa, ei kimmo-vasarointia saa käyttää. Kimmo-vasaraa ei tule käyttää, jos betonin pinta on jäässä tai rakenne on alle 6 kk vanha. Kimmo-vasaran käyttöön on olemassa ohje, joka on liikenneviraston laatima ja ohje on laadittu siltoihin tehtäviä tutkimuksia varten (Liikennevirasto 21/2016, 7–8.)

Kimmo­vasaran antamiin tuloksiin pitää suhtautua varauksellisesti, sillä tutkittavan betonin lujuus voi olla heikompi kuin laitteen antama tulos. Tätä varten kimmo­vasaroinnin yhteyteen on suositeltavaa tehdä betonilieriöiden näytteenottoa ja tutkia rakenne myös laboratoriossa tehtävän puristuslujuuden arvioinnin kautta. Näiden molempien tutkimusten välille voidaan tehdä ns. korjauskerroin kimmo­vasaran antamille arvoille, jonka avulla tutkittavan rakenteen saatuja arvoja korjataan oikeaan suuntaan (Lindman 2022.). Kimmo­vasararointia ei pidä tehdä karbonatsoitunulle betonille, koska karbonatsoituminen muuttaa betonin pinnan kimmoisuutta voimakkaasti ja vääristää saatuja arvoja (Suomen Betoniyhdistys ry 2019, 104).

6.3.5 Rakenneterästen määrittäminen

Rakenneterästen määrittäminen voidaan tehdä kahdella eri tavalla. Perinteisempi tapa on ollut paljastaa rakenteesta teräkset esiin piikkaamalla rakennetta, mutta sen rinnalle on kehitetty tekniikkaa, jolla saadaan tuloksia ilman rakennetta avaamatta.

Rakenneterästen esiin piikkaaminen vaatii yleensä työsuunnittelua, koska betonin työstäminen aiheuttaa ääntä ja pölyongelmia. Kohteissa, joissa on käyttäjiä, tulee tämän tyyppinen tutkimus ajoittaa sellaiseen ajankohtaan, jossa häiriö on vähäisin. Rakenteen rikkominen tarkoittaa lisäksi kohdealueen suojaamista ja osastointia, joka osaltaan nostaa tutkimuskustannuksia.

Tekniikan kehittyessä on kehitetty rakennetta rikkomattomia tutkimustapoja, joista yksi on ultraäänitutkimus. Tällä voidaan selvittää niin uudisrakennuksen kuin myös vanhempien rakenteiden yksityiskohtia. Tutkimus perustuu 3D-ultraäänitutkimukseen ja sillä voidaan tutkia kaikenlaisia betoni- ja kivirakenteita, joiden vahvuus on välillä 50–2500 mm. Rakenteesta luodaan 3D-kuva, jolla saadaan selville rakenteen yksityiskohdat ja jonka avulla saadaan selville rakenteessa käytettyjen terästen dimensiot. Samalla saadaan selville terästen tartunnat betoniin, rakenteen halkeamat, rakenteen tyhjätilat, rakennepaksuudet ja betonirakenteen heikkousvyöhykkeet (Kiwa 2022.) Ultralaitteen lisäksi on olemassa

erilaisia rakenneilmaisimia ja tutkia, joilla rakenteita voi tutkia. Laittevalinta riippuu tutkittavasta kohteesta sekä laitteen ominaisuuksista.

6.4 Rakenteiden vauriot

6.4.1 Vaurioiden syntymekanismit

Rakenteeseen voi syntyä vaurio kahdesta eri syystä tai molempien yhteisvaikutuksesta, jotka ovat rakenteen ylikuormittaminen ja rakenteen vaurioituminen. Rakenteen ylikuormitus voi johtua rakenteeseen kohdistuneesta muutoksesta, jossa rakenteen oma paino on kasvanut. Kasvanutta rakennekuormaa voi kertyä esim. useammasta pintarakenteesta, joita on lisätty vanhan rakenteen päälle ja rakennekerroksia on kertynyt aikaa myöten useampia. Rakenteen ylikuorma voi johtua myös yhden kantavan osan kantokyvyn alenemasta, jolloin viereisten kantavien rakenteiden rasitukset kasvavat. Jos kantavaa rakennetta on muutettu tekemällä siihen reikiä ilman vahvistuksia, voi rakenneosan kapasiteetti olla alentunut oleellisesti ja rakenne ei kykene ottamaan vastaan sitä kuormaa mikä sille on suunniteltu.

Rakenteen hyötykuorman lisäys voi olla jokin laite tai lisärakenne, joka kuormittaa rakennetta joko pistemäisesti tai tasokuormana. Laite voi olla esim. jälkeensä asennettu ilmastointikone tai vesikatolle lisätty aurinkopaneelikenttä. Ilman asianmukaisesti tehtyä kuormatarkastelua, voi rakenteeseen kohdistua ylikuormaa esim. lumen kinostumasta, jota ei ole osattu ennakoida oikein.

Vaakasuuntaisissa rakenteissa liian suuret kuormat näkyvät halkeamina rakenteiden keskikentässä tai tukialueilla. Kasvanut rasitus aiheuttaa erilaisia näkyviä vaurioita rakenteessa ja rakenteen tutkijan on syytä tiedostaa ja erottaa nämä tutkimustöitä tehdessä ja tutkimusraporttia laatiessa. Rakenteita analysoivan suunnittelijan tulee tarkistella rakenteessa olevien vaurioiden taso ja rakennuksen käyttö voidaan tarvittaessa kieltää, jos vaurio aiheuttaa vaaratekijän.

6.4.2 Viruminen

Betonirakenteissa yleisin kapasiteettia alentava tekijä on viruminen, joka aikaa myöten heikentää betonirakenteen kapasiteettia. Virumisen vaikutus voidaan kuitenkin laskea ja arvioida sen vaikutus rakenteen lujuuteen. Vanhoissa betonilaat-tarakenteissa voi olla halkeamia ja syy voi olla väärä tai jopa puutteellinen rau-doitus rakenteessa. Etenkin ennen vuotta 1945 rakennetuissa betonirakenteissa on ollut puutteita reunakentän ja nurkkien raudoituksissa (Jokela 2017, i).

Virumisen vaikutusta voidaan huomioida laskelmin, kun tiedetään ympäristön olosuhteet, rakenneosan mitat ja betonin koostumus. Betonin viruma on muodonmuutos, joka tapahtuu kuormitetussa betonissa ajan funktiona. Viruman suuruu-teen vaikuttavat betonin ikä, betonin lujuusluokka, ympäristön kosteus ja raken-teen mitat (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 45).

6.4.3 Halkeamat

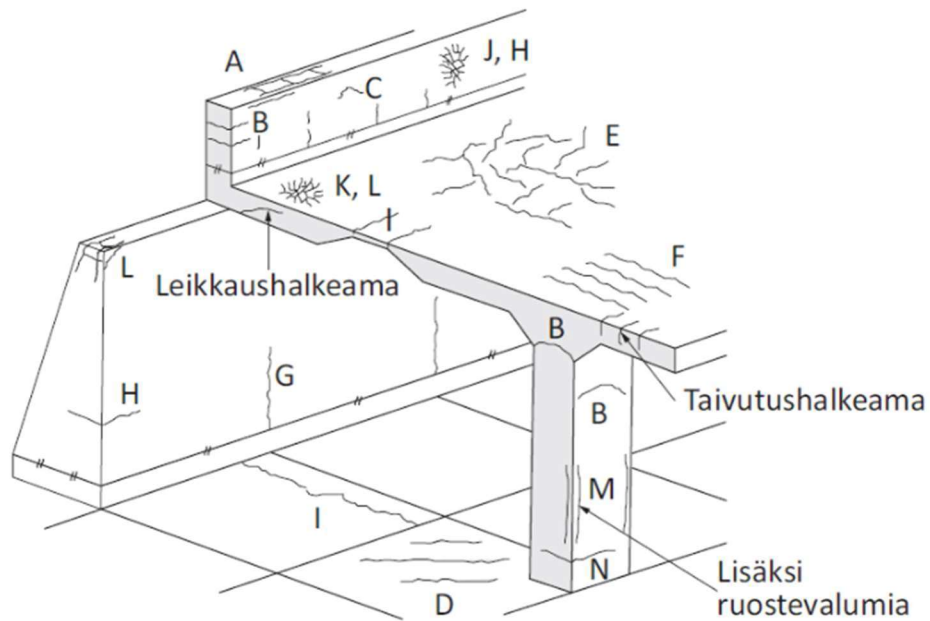
Betonirakenteissa esiintyvät halkeamat voivat johtua ulkoisten kuormien aiheut-tamista rasituksista, betonin kutistumasta, rakenteiden lämpötilaeroista ja pakko-voimista, jotka aiheutuvat tukirakenteen siirtymistä. Rakenteeseen kohdistuva liian iso kuormitus tarkoittaa, että rakenteen kapasiteetti ei ole riittävä ja joka sit-ten ilmenee halkeamina kohdissa, joissa kuormitus on suurin. Taivutetussa ra-kenteessa halkeamat esiintyvät betonin vetopuolella, jossa jännitys ylittää beto-nin vetolujuuden (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 92, 133).

Halkeamat betonirakenteessa voi kertoa rakenteen alhaisesta kapasiteetista. Kapasiteetin alenema voi johtua liian vähäisestä pääraudoituksesta, rakentee-seen jälkeensä tehdyistä aukoista ja rei'istä, katkenneista tai ruostuneista pää- ja hakateräksistä tai yksinkertaisesti rakennetta ei ole suunniteltu sille kuormalle mikä siihen kohdistuu. Myös rakenteen kutistumateräksiset voivat puuttua tai niitä on liian vähän, joka taas viittaa suunnitteluvirheeseen. Palkkirakenteiden hal-keamat, voivat paljastaa myös riittämättömän hakateräsmäärän leikkaukselle ja väännölle. Myös riittämätön rakenneterästen ankkurointi voi näkyä halkeamina tukialueella (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 132).

Uudemmissa betonirakenteissa halkeamat voivat kertoa myös väärästä tai puutteellisesta valutyön jälkihoidosta. Halkeamien syntyyn voidaan vaikuttaa suunnitelmalla rakenteet oikein, valitsemalla kohteeseen oikeanlainen betonimassa, tekemällä valutyö ja betonivalun jälkihoito oikein (Suomen Betoniyhdistys ry 2022c). Alle 10 vuotta vanhempien kohteiden suunnitelmista voidaan varmentaa edellä olevat suunnitelmätiedot. Betonin jälkihoidosta tehtävät kirjaukset jäävät työmaalla pidettävään päiväkirjaan. Jälkihoidossa tärkeimpiä ovat kuivumisai- kana vallinneet ympäristön olosuhteet, joita ovat lämpötila ja ilman kosteus. Li- säksi jälkihoitoon vaikuttaa rakenteen muotissa oleminen ja miten valettu ra- kenne on muotin purun jälkeen suojattu. Onko rakenteen pinta ollut suoran au- ringon paisteen ja tuulen kohdistamana (Suomen Betoniyhdistys ry 2022c.)

Uusien betonirakenteen kovettumiseen liittyvät halkeilun syyt ovat pääasiassa kutistumien aiheuttamia. Kutistumien aiheuttamat halkeamat syntyvät jo ensim- mäisen vuorokauden aikana, mutta kuivumiskutistumista tapahtuu kuukausien ja jopa vuosien aikana, riippuen rakenteen ympäristöolosuhteista. Halkeamien synty ja niiden vaikutus betonirakenteeseen on tunnistettava, jotta voidaan erot- taa keskenään alkuvaiheen halkeamat ja rakenteen kapasiteetin alenemasta joh- tuvat halkeamat. Halkeamien syitä ja esiintymisiä on selitetty tarkemmin opinnäy- tetyössä Olli-Pekka Pelkonen (Pelkonen 2018, 32–40.)

Yleensä halkeamavauriot ovat nähtävissä ja myös mitattavissa. Halkeamalevey- det ovat teoreettisesti laskettavissa ja niitä vertaamalla todettuihin leveyksiin voi- daan todentaa niiden tila tai heikentävä vaikutus rakenteen kapasiteettiin.



HALKEILUTYYPPI	
Plastinen painuma	A B, C
Plastinen kutistuma	D, E, F
Lämpöliike	G, H
Kuivumiskutistuma	I
Pintahalkeilu	J, K
Pakkasrapautuminen	L
Raudoitteiden korroosio	M
Alkali- kiviainesreaktio	N

Kuva 11. Betonirakenteiden tyypillisiä halkeamia (Suomen Betoniyhdistys ry 2022a)

6.4.4 Betonin karbonatisoituminen ja terästen korroosio

Betonin karbonatisoituminen tarkoittaa, että betoni on muuttunut huokoiseksi ja betonissa oleva kalsiumhydroksidi on reagoinut ilman hiilidioksidin kanssa. Aikaa myöten betonin emäksisyys on laskenut ja kun se on saavuttanut pH arvon välillä 8.5–9, voidaan todeta betonin olevan karbonatisoitunut, eikä betoni enää suoja

rakenneteräksiä. Kun betoni on tässä tilassa ja rakenneteräksen ympärillä on riittävä lämpötila, kosteutta ja happea, alkaa rakenneteräs ruostumaan (Suomen Betoniyhdistys ry 2019, 22).

Betonirakenteissa on tarkoituksenmukaisesti rakenteen ulkopinnassa teräksiä suojaava betonipeite (Suomen Betoniyhdistys ry 2013, 73–75; 2021, 50–51). Sen tärkein tehtävä on suojata rakenneteräksiä ruostumiselta. Suojaava betonipeite ja sen vahvuus määräytyy sen mukaan mihin sääolosuhteisiin ja käyttötarkoitukseen mukaan rakenne on suunniteltu (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 6, 26–32). Suojabetonin peitepaksuus on riippuvainen betonirakenteen elinkaarisuunnittelusta. Betonin laadulla ja sen suojapeiteominaisuudella, estetään ja vähennetään betonin karbonatisoitumista. Tämä voi pahimmillaan johtaa siihen, että betoni menettää sen teräksiä suojaavan emäksisyyden. Suojabetonin menettäessä suojaavan ominaisuuden, alkaa teräkset ruostua. Pitkälle edennyt karbonatisoituminen ja teräksien ruostuminen heikentää rakenneteräksiä ja siten koko rakenteen kapasiteettia. Ruostumisvaurioiden päästessä työ- ja hakateräksiin tai pahimmillaan pääteräksiin, voidaan jo ilman laskemista todeta, että rakenteen kantokyky on alentunut.

6.4.5 Kloridit

Betonin alkaalisuus ja betonin suojapeite yhdessä suojaavat rakenneteräksiä. Teräsbetonirakenteeseen vaikuttava kloridirasitus voi kuitenkin aiheuttaa betoniterästen korroosiota (Suomen Betoniyhdistys ry 2019, 21). Kloridilähteitä ovat mm. tiesuola ja merivesi ja yleisimmät rakenteet, jotka altistuvat klorideille ovat kadun vieressä olevat rakenteet esim. pysäköintihallit ja merivedelle altistuvat rakenteet esim. betonirakenteiset laiturirakenteet. Betonirakenteet, jotka altistuvat klorideille, vaurioituvat ennen pitkää ja jos rakenteeseen vaikuttaa riittävä määrä klorideja. Lisäksi betonin karbonatisoituminen edesauttaa kloridien tunkeutumista rakenteeseen. Kloridirasitus on yleensä pistemäistä ja betonirakenteessa esiintyvä kloridivaurio voi edetä rakenteessa pitkälle, ennen kuin siitä on nähtävissä merkkejä rakenteen pinnalla (Pohjonen 2019, 2.) Korroosiovaurioitunut rakenneteräs alentaa rakenteen kapasiteettia.

6.4.6 Alkalikiviainesreaktio

"Alkalikiviainesreaktio (AKR) on kemiallinen reaktio, joka tapahtuu betonin kiviaineksen piipitoisten aineiden, sementin huokosveden sisältämien alkalien ja sekä hydroksidi-ionien välillä" (Valutie 2020, i) AKR reaktion vaikutuksia betonin mekaanisiin ominaisuuksiin kuten lujuuteen ja vetolujuuteen ei voida yksiselitteisesti selittää. Oletus kuitenkin on, että alkalikiviainesreaktiolle altistunut betonirakenne on menettänyt betonin puristuskapasiteettia. Alkalikiviainesreaktion etenemistä ja sen heikentävää vaikutusta betonirakenteeseen voidaan tutkia ohuthienäytteen otannan avulla (Suomen Betoniyhdistys ry 2019, 30). Näytetutkimuksen avulla betonista voidaan tutkia betonin koostumusta, jonka avulla betonin laatu ja siinä olevat vauriot voidaan selvittää.

6.5 Rakenteen korjaamisen kannattavuus

6.5.1 Tutkimusten tulokset

Betonirakenteen tutkimuksissa keskitytään rakenteen nykytilaan, vaurioihin ja rakenteen laadullisiin asioihin. Betonirakenteissa se tarkoittaa, että niihin kohdistuvat vauriot on selvitetty ja niiden vaikutus rakenteen toimintaan on otettu huomioon. Laadulliset asiat kohdistuvat betonin puristuslujuuteen ja rakenteen betoni-teräksiin.

Edellä on kuvattu rakenteissa esiintyviä vaurioita ja niiden vaikutuksia rakenteen kapasiteettiin. Tutkimuksissa huomioidaan rakenteen pääasiallinen toiminta ja ne kriittiset kohdat, joissa vaurioilla on suuri merkitys rakenteen kantavuuteen ja sen elinikään. Rakenteessa voi olla myös suunnittelematonta käyttöä, joka heikentää rakennetta. Tutkimuksissa voi paljastua rakenteelle sallittuja liian suuria kuormituksia tai rakennetta on heikennetty esim. tekemällä reikiä ilman tutkimuksia tai tarkastuslaskelmia (Karjalainen 2022; Kurkela 2022).

Tutkimusten tarkoitus on kertoa rakenteen nykytila ja vastaako se suunnitelma-aiasta tilannetta. Tämä tulee esittää tutkimusraportissa ja se on hyvin tärkeä tieto rakenteen analyysilaskelmaa suorittavalle suunnittelijalle.

6.5.2 Rakenteen kapasiteetilaskelma

Laskelmien teko voidaan jakaa useampaan tarkastelutilanteeseen. Rakenteesta tehtävät laskelmat voidaan kohdentaa alkuperäiseen suunnitteluajankaisen tilanteen tarkasteluun, nykytilanteeseen ja tulevaan uuteen tilanteeseen. Suunnitteluajankainen tilanne tulisi tarkastella ajankohtaan liittyvien normien ja ohjeiden mukaan, mutta jos rakenteeseen on tulossa muutoksia esim. lisääntyvää kuormaa, on rakenne tarkasteltava tämänhetkisen normin mukaan eli eurokoodin mukaan. Pääasia on, että rakenne tarkistetaan laskelmin ja sen kautta saadaan vertailulaskelmat muutokselle (Kurkela 2022.)

Rakenteen kuormamuutosten laskentaa ei ole määritelty suomen lainsäädännössä, mutta isompien kaupunkien rakennusvalvonnat ovat linjanneet, että rakennusten kuormamuutokset edellyttävät eurokoodin mukaan tehtäviä tarkastuslaskelmia. Rakennuksien kuormitusohjeet ovat muuttuneet vuosikymmenien aikana ja kuormat ovat kasvaneet käytettävien tilojen osalla kuin myös lumikuormien osalla. Tämä tarkoittaa, että vanhojen rakenteiden kapasiteetti ei yleensä riitä eurokoodilla tehdyn laskelman mukaan. Tämä johtaa siihen tulkintaan, että tarkasteltava rakenne ei kestä ja sitä pitää vahvistaa (Huurinainen 2020.)

6.5.3 Päätös rakenteen korjaamisesta

Rakenteen korjaamisen kannattavuutta arvioidaan saatujen tutkimusten ja analyysilaskelmien perusteella. Tärkein tieto rakenteessa on sen laadullinen tila ja sen rakenteellinen kapasiteetti. Rakenteen laadullista tilaa betonirakenteissa arvioidaan sen yleiskunnon ja materiaalien kautta. Yleiskunto kertoo mahdolliset vauriot ja sen vaikutusta rakenteelle on selvitetty ja arvioitu tutkimustuloksissa. Jos betonin puristuslujuudessa on suurta alenemaa, niin sitä ei voi korjata, mutta sen kantokykyä voidaan arvioida pienemmällä betonin lujuusarvolla. Jos betoniteräksien osalla on puutteita ja rakenne ei niiltä osin täytä enää laatuvaatimuksia, jää pohdittavaksi rakenteen purku tai sen vahvistaminen. Näiden rinnalle voidaan nostaa vielä yksi vaihtoehto, jossa rakenteelle itselleen ei tehdä mitään, mutta siihen kohdistuvia kuormituksia voidaan vähentää tai ohjata uudella rakenteella pois tarkasteltavasta kohteesta. Kuormavähennystä voi pohtia ja se riippuu siitä,

mikä on ollut tilan käyttö ja mikä on sille vaadittu hyötykuorman arvo. Tilat, joissa on ollut suuri hyötykuorma esim. varastotilat, voidaan muuttaa tilaksi, jossa hyötykuorman osuus on pienempi. Tämä vaatii tilan käyttösuunnittelua ja uusi kuormatilanne on kuitenkin todistettava analyysilaskelmalla, jossa on tehty kuormien vähennys ja joka osoittaa rakenteen kestävänsä pienemmällä hyötykuormalla. Lisäksi tulee vielä tarkistaa, kestävätkö rakenne sen omaa rakennepainoa. Tätä tarkastelua voidaan käyttää rakennuksissa, joilla on suuri historiallinen ja kulttuuriarvo, eikä rakenteita haluta purkaa tai lähteä vahvistamaan (Huurinainen 2020.)

6.5.4 Vahvistamissuunnitelma

Rakenteen vahvistaminen perustuu nykyisen rakenteen kapasiteetin lisäämiseen, jossa hyödynnetään olemassa olevan rakenteen omaa laskennallista kapasiteettia, mikäli sitä on olemassa. Betonilaattarakenteiden vahvistaminen tai niihin vaikuttavien rakennekuormien siirtoa voidaan toteuttaa esim. teräspalkeilla. Rakennetta voidaan vahvistaa myös lisäämällä rakenteeseen uusi kantava osa, joka voi olla esivalmisteinen, paikalla valettava betonipalkki tai teräspalkki. Tasorakenteissa voidaan rakenteen oma paino ottaa olemassa olevalle rakenteelle ja tarkastella se omanaan. Uusi lisäkuorma, joka voi olla hyötykuormaa, ohjataan uuden rakenneosan kautta tukirakenteelle. Tämä vaatii vanhan rakenteen kapasiteetin laskenta-analyysin ja uuden rakenteen mitoittamisen. Lisäksi uusien kuormien siirto vaatii tarkastelut rakennekuormien siirtymisestä ja tukirakenteen tarkastelut sekä mahdollisesti perustuskuormien tarkastelut (Kurkela 2020.)

Palkkirakenteissa rakenteen vahvistaminen käsittää palkin puristetun ja vedetyn osien kapasiteettien lisäämistä. Palkki mitoitetaan taivutus- ja leikkausvoimille ja kun kapasiteetti ei riitä, tarkastellaan laskelmin mikä vahvistustapa palkkiin tarvitaan. Palkin muoto ja rakenteellinen toiminta määrittelee vahvistustavan ja yksi tapa on lisätä palkin rakennekorkeutta ja leveyttä, jotta tarvittavat raudoitteet saadaan lisättyä palkkiin. Palkeissa tulee lisäksi huomioida tukialueille ja kenttään tarvittavien leikkausteräksien määrän arvion ja tilan, sekä tukialueen ankkuroinnin suunnittelun.

Vahvistamissuunnitelmaa varten voidaan tehdä esisuunnittelua ennen varsinaista suunnittelua ja se tehdään yleensä tilaajaa varten. Vahvistamisen kustannuksia varten laaditaan alustavasti rakenteen uusi poikkileikkaus, tarvittava betoniterästys ja betonin tarve. Vahvistusta varten lasketaan paljonko olemassa oleva rakenne kantaa kuormaa ja tarvitseeko rakennetta tukea vahvistustyön aikana. Vahvistettava rakenne vaatii lisäksi muottirakenteita ja se lisää vahvistustyön kuormaa mukaan luettuna työnaikainen henkilökuorma.

Yleisimmät vahvistustavat ovat betonimanttelointi, teräsvahvistaminen erilaisilla teräsprofiileilla, teräs- tai hiilikuitulevy vahvikkeet ja paikallavalu rakenteeseen liittävä jännitettävät teräspunokset. Vahvistusrakenteista ja niiden toteuttamisesta on löydettävissä ohjeita vahvistustavan mukaan. Matti Ojala käsittelee opinnäytetyössään teräsbetonisen palkkirakenteen vahvistamista (Ojala 2020, 29–40).

7 HAASTATTELUT

Tämän opinnäytetyön linjaamiseksi on tehty tilaajaorganisaation asiantuntijoiden haastattelut, joihin on valikoitu pitkän taustan omaavia rakennusalan ammattilaisia. Heidän työhistoriansa ja tausta on pääosin korjausrakentamisen alalta ja heidän pääosaamisensa liittyy rakenteiden tutkimiseen ja rakenteiden suunnitteluun. Osalla on myös näkemyksiä tilaajan puolelta, jolla on suuri merkitys, kun rakenteita ollaan peruskorjaamassa ja valitsemassa korjaustapoja. Kustannustietoisuus, korjaamisen kannattavuus ja työn tehokas ja turvallinen tekeminen ohjaa rakennushankkeita hyvinkin pitkälle ja on sen suhteen arvokasta osaamistietoa. Rakenteiden tutkimustöitä ja niitä suorittavat henkilöt ja rakenteiden analyysilaskelmia suorittavat henkilöt ovat yrityksen organisaatiolle arvokasta henkilökuntaa.

7.1 Haastattelututkimuksen toteutus

Haastattelu toteutettiin Teams ohjelman avulla yksittäisinä haastattelutilaisuuksina. Jokainen haastattelu nauhoitettiin. Kysymykset oli lähetetty haastateltaville ennakkoon, joten asiantuntijoilla oli noin kaksi viikkoa aikaa valmistautua kysymyksiin. Haastattelun tarkoitus oli selvittää asiantuntijoilta, miten he tekevät rakenteiden kapasiteettien arviointia, mitä lähtötietoja tarvitaan ja miten tehtävä arviointi ratkaistaan. Haastattelun kysymysten lopuksi pyysin asiantuntijoilta antamaan vinkkejä asioista, joita opinnäytetyössä voisi käsitellä. Jokaisella oli hyviä nostoja ja olen käsitellyt niitä työssäni.

Haastattelukysymyksiä oli viisi kappaletta ja haastateltavia oli 7 henkilöä. Haastattelun pääfokus pidettiin työn aiheena olevien vaakasuuntaisten rakenteiden tutkimusten, käytettyjen mitoitusnormien ja analyysin jälkeen tehtävän ratkaisun välisellä alueella. Haastattelun kysymykset olivat;

1. Millaisia vaakasuuntaisia betonirakenteita olette työssänne joutuneet arvioimaan?
2. Miten olette selvittäneet rakenteen nykytilaa?

3. Millaisia rakenteellisia muutoksia/ vaurioita rakenteissa on esiintynyt ja miten se on vaikuttanut arviointityön tekemiseen?
4. Miten olette tehneet laskennan/analyysin?
5. Miten olette ratkaisseet arvioitavan kohteen lopputuleman?

7.2 Haastattelun tulokset

Haastattelun tulosten läpikäynti koostettiin erilliseen tiedostoon, josta vastausten yhteneväisyyttä voitiin verrata. Yleisimmät asiantuntijoiden arvioitavat rakenteet olivat betonipalkkeja ja betonilaattarakenteita. Betonipalkeista yleisimmät olivat paikalla tehtyjä suorakaidepalkkeja ja myös leukapalkkeja. Betonilaattarakenteista yleisimmät olivat paikalla valettuja massiivibetonilaattoja, ylä- ja alalaattapalkistoja ja kaksoislaattapalkistoja. Myös jännitettyjä betonirakenteita, TT-laattoja, ontelolaattoja ja alapohjarakenteita, oli arvioitu.

Rakennuksen ja rakenteiden nykytilan arvioimiseen käytettyjä lähtötietoja olivat vanhat rakennesuunnitelmat, ja joihin lukeutui myös muiden suunnittelualojen suunnitelmat. Lähtötietoina oli käytetty myös vanhoja rakennelaskelmia ja lausuntoja, korjaushistoriaa ja hieman uudemmissa rakenteissa betonointipöytäkirjoja. Jos rakennuksen lähtötiedoissa oli ollut puutteita ja rakenteisiin oli jouduttu tekemään tai teettämään tutkimuksia lisätietojen saamiseksi, oli sitä ennen haastateltu tilaajaa ja selvitetty rakennuksen historiaa aiemmin tehdyistä korjaustoista. Tarkoituksena oli ollut rajata uudet tutkimukset ja hyödyntää aikaisemmin tehdyt tutkimustyöt ja niiden tiedot sekä kartoittaa rakenteista ne tehdyt muutokset, joita ei ollut suunniteltu eikä dokumentoitu.

Rakenteiden tutkimusmenetelminä oli käytetty silmämääräistä arviointia, kimmo-vasarointia, rakenneavauksia sekä rakenteellisia tutkimuksia betonin ja teräksien osalla. Tarkasteluissa oli tutkittu betonin suojapeitepaksuutta, betonin puristuslujuutta ja betonissa olevaa karbonatisoitumista ja kloridivaurioita sekä rakenneteräksien olosuhteita ja ruostumisastetta.

Rakenteelliset vauriot olivat jaettavissa olosuhteiden mukaan. Tilat, jotka olivat alttiina kosteudelle, olivat pääasiassa vaurioituneet suolojen ja kloridien vaikutuksesta. Näitä rakenteita olivat pysäköintihallit, pihakannet ja suojaamattomat runkorakenteet. Näissä rakenteissa oli vaurioina pakkasrapautumista, betonin karbonatisoitumista ja kloridivaurioita. Yleisin näihin vaurioihin johtavat syyt olivat kosteustekniset toimivuuspuutteet, väärät kaadot ja puutteelliset suojaPELLITYKSET.

Kuivien tilojen vauriot olivat pääasiassa halkeamat ja taipumat ja joiden pääsyyt olivat liian suuret kuormat ja rakenteisiin tehdyt reikämuutokset. Reikämuutoksien kartoittaminen koettiin usein haastaviksi, koska niistä ei aina löydy dokumentaatiota. Reikämuutoksia on voinut olla useampikin kierros rakennuksen historiassa.

Rakenteiden analyysiin tehtävät esiselvittelyt olivat rakennuksen käyttöhistoria selvitys, tehdyt korjaustyöt ja kuormamuutosten selvittäminen. Rakennekuormien muutokset ja rakenteisiin tehtäviä analyysilaskelmia oli tehty rakentamisajankohdan mukaisilla laskentaohjeilla, joita olivat rajatilamenetelmä ja sallittujen jännitysten menetelmät. Lisäksi rakenteita oli analysoitu myös eurokoodin mukaisilla ohjeilla. Eurokoodilla tehdyt tarkasteluita ei pidetty vertailukelpoisina vanhoihin normeihin. Laskentaa ja analyysiä oli tehty käsinlaskennalla ja mitoitusohjelmia käyttäen.

Rakenteiden lopputulemat tehtyjen selvitysten osalla olivat pääasiassa rakenteiden vahvistamisen suunnittelua ja rakenteen purkua sekä rakenteiden uusimista. Tarkasteluissa päähuomio oli rakenteellisen kokonaistarkastelun huomioiminen, jos rakenteessa oli suuria aukkomuutoksia tai arviointi koski rakenteen jäykistämiseen liittyviä rakenteita. Yleensä ratkaisuja oli tehty huomioiden tilaajan toiveita ja korjaustyön budjettia seuraten. Ylikorjaamisen sijasta oli pyritty etsimään vaihtoehtoisia rakenteita tai jopa tietyn rakenneosan korjaamatta jättämistä. Myös korjaamista, vahvistamista ja uuden rakentamista yhtä aikaa, oli ratkaistu.

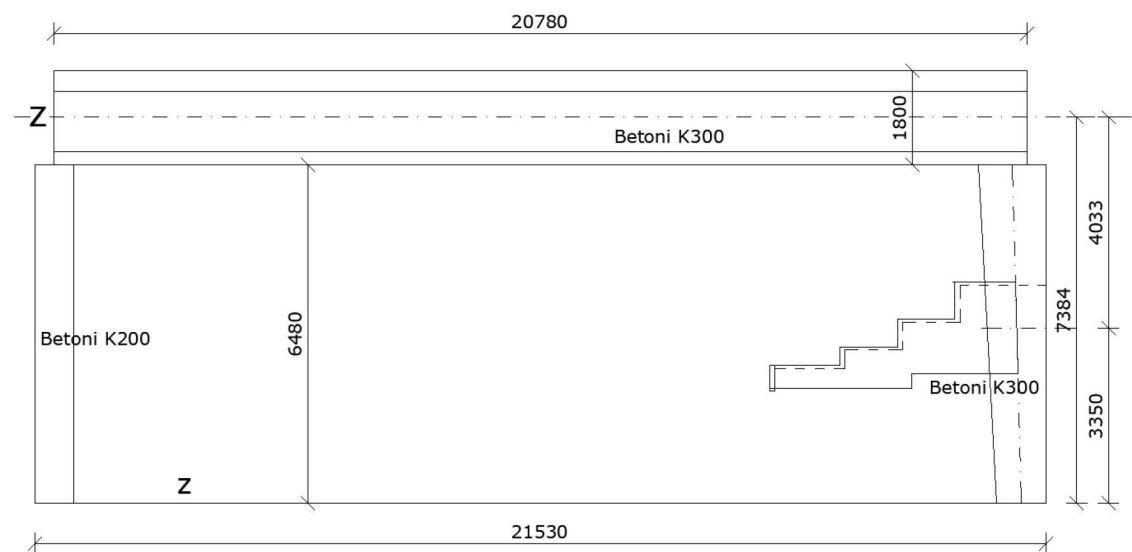
7.3 Yhteenveto haastattelusta

Haastattelukysymykset käsittelivät erilaisia ja eri ikäisiä vaakasuuntaisia betonirakenteita, niiden arviointia varten tarvittavia lähtötietoja, tutkimustapoja, rakenteiden vaurioita, rakenteiden analyysin suorittamista eri menetelmin ja arvioitavan kohteen lopputulemaa. Haastattelun koostetta tehdessä, kävi ilmi, että haastateltavilla oli hyvinkin samanlainen lähestymistapa rakenteen kapasiteetin arviointia tehdessä. Tämä voi hyvinkin johtua siitä, että korjausrakentamisen kohteissa eletään vaihetta, jossa tietynikäiset ja tietyt rakenteet ovat nyt useimmiten korjaus- ja muutostöiden kohteena.

8 CASE ESIMERKKI

8.1 Rakenteen esittely

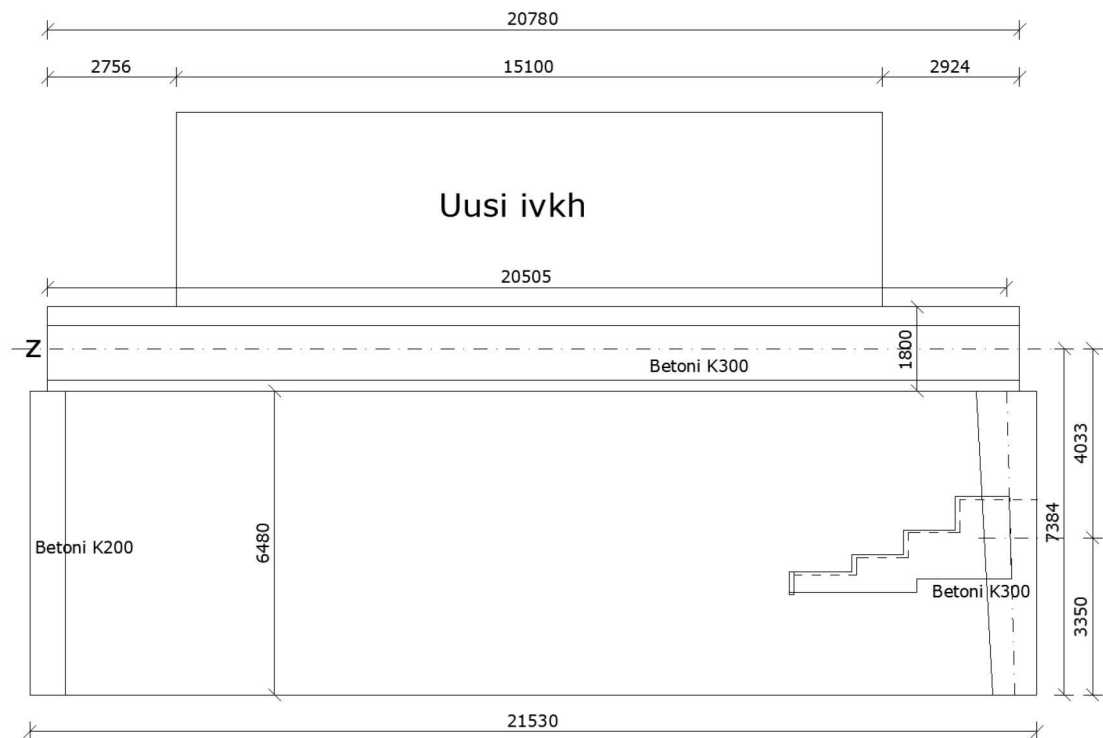
Opinnäytetyön todellinen arvioitavan rakenteen analyysiesimerkki on Helsingissä sijaitsevan peruskorjattavan koulun liikuntasalin kantava yläpohjarakenteen palkkirakenne. Rakennuksen yläpohjarakenteita tullaan korjaamaan ja rakennukseen lisätään uusi ilmastointikonehuone. Uusi rakenne tukeutuu vanhan palkin päälle ja muuten sen alla olevien teräsbetonirakenteiden varaan. Tarkasteltavaan vanhaan palkkiin kohdistuu uutta rakennekuormaa ja hyötykuormaa, ja tehtävänä olikin tarkistaa yläpohjapalkkien nykyinen kapasiteetti sekä uusi kuormitustilanne. Olemassa olevien palkkien kapasiteetti tarkasteltiin nykyisten lumi- ja tuulikuormien varalle ja analyysilaskenta suoritettiin eurokoodin mitoitusnormeilla.



Kuva 12. Rakenteen poikkileikkaus. Puhtaaksi piirretty rakenneleikkaus, Ramboll

Liikuntasalin kehärakenne on kahden pilarin ja palkin muodostama kokonaisuus, joka on tehty paikalla rakentaen ja jossa kehien jakoväli on 4 metriä. Yläpohjan palkkirakenne on samanlainen koko liikuntasalin pituuden matkalla. Liikuntasalin päätyyn kohdistuu rakennemuutoksia, johon on tulossa uusi ilmastointikonehuone. Laajennus on ajateltu tehtäväksi niin, ettei vanhalle tarkasteltavalle palkille kohdistuisi liikaa kuormaa. Tehtävänä olikin tarkastella ja laskea palkkiin kohdistuvat nykyisen yläpohjarakenteen rakenne- ja hyötykuormat, sekä laskea

uuden ilmastointihuoneen rakenteen kuormat ja katon lumikuormat sekä liittymiskohtaan muodostuvat kinoskuormat.



Kuva 13. Rakenteen uusi poikkileikkaus, uusi ilmastointikonehuoneen sijainti

Uusi rakenne katolla aiheuttaa ilmastointikonehuoneen ympärille lumen kinostumaa, joka kuormittaa nykyistä yläpohjarakennetta ja sen kautta palkkia. Lumen kinoskuorma on suurempi kuin aikaisempi lumikuorma katolla. Nykyisen rakenteen kapasiteetti tarkistettiin, jonka perusteella saatiin lähtötieto rakenteen vahvistussuunnitelmalle.

Palkki on muodoltaan I-poikkileikkaus, jonka korkeus on 1,8 m ja pituus 20,8 m. Palkin ala- ja yläosassa on uumaosaa leveämmät suorakaideosat. Palkin alaosan suorakaideosassa on palkin pääraudoitus, jonka tehtävänä on ottaa vastaan palkkiin tulevat vetorasitukset. Palkin yläosa on puristettu rakenneosaa, jossa on hakaraudoitus ja raudoitusteräket neljässä nurkassa. Palkin ns. leikkausteräksinä toimii palkin vetoteräket, jotka ovat taivutettu 45 asteen kulmaan tukialueella ja joihin on terästen ankkurointia varten tehty päihin lenkit. Jäykän nurkan

liittymässä pilarin teräkset ulottuvat palkkiin ja ovat siten ankkuroitu, ja muodostavat kiinteän tukirakenteen. Kiinteän nurkan raudoitus siirtää rakenteessa vaikuttavia sisäisiä voimia pilarin ja palkin välillä.

Jäykän nurkan pilarirakenne on suorakaide, jonka poikkileikkaus leveys kapenee alaspäin pilarin alaosaan kohti, jossa on niveellinen liitos. Pilariin vaikuttaa tuulikuorma ja pistemäinen momentti, joka muodostuu pilarissa olevasta ulokekatso-morakenteen kuormista. Toinen pilari, joka on vastakkaisella ulkoseinällä ja johon tarkasteltava palkki tukeutuu, on pilarin molemmissa päissä nivelet. Pilarin poikkileikkaus on suorakaide ja sillä on sama poikkileikkaus koko sen pituudella.

8.2 Rakennemalli ja lähtötiedot

Arvioitava rakenne muodostuu I-palkista ja kahdesta pilarista. Rakenteen toimintaperiaate on määritetty vanhojen rakennesuunnitelmien mukaan. Palkin toinen pää muodostaa jäykän liitoksen pilarin kanssa, jonka alapäässä on nivel ja joka on kaksiarvoinen tuki. Toinen pilari on molemmista päistään nivelöity, alapäässä on kaksiarvoinen tuki ja yläpäässä yksiarvoinen tuki. Tarkasteltava rakenne muodostaa kehän, jota kutsutaan kolminivelkehäksi. Rakenne on staattisesti määrätty ja se voidaan ratkaista rakenteen tukiehtojen avulla.

Tehtävänä oli tarkastella palkin ja jäykästi palkkiin liittyvän pilarin rakenteellinen toiminta ja ratkaista näihin kohdistuvat rasitukset sekä laskea rakenteen kapasiteetti.

8.3 Rakennelaskelmat

Rakennelaskelmat on tehty PTC Mathcad Prime 7.0.0.0. ohjelmalla ja rakennemalli sekä eri kuormitustilanteet on piirretty Autocad LT 2018 ohjelmalla.

Rakenteeseen vaikuttavien kuormien takia, on eri kuormitustapauksia yhteensä 6 kpl. Laskennan eri kuormitustilanteista on tehty kuvaajat taivutus- ja leikkausvoimille ja kuvaajien avulla on saatu mitoittavimmat tapaukset rakenteen jatko-suunnittelua varten. Rakenteesta on laadittu nykytilanteen poikkileikkaus, jonka perusteella on määritetty neutraaliakselin paikka steinerin säännön avulla. Uusi

poikkileikkaus on tehty vahvistussuunnittelua varten, mutta sitä ei tässä työssä sen enempää käsitellä. Vahvistussuunnittelua varten on kuitenkin laskettu kuormatilanne, jossa on huomioitu muottien, betonin ja raudotteiden määrä, sekä niistä aiheutuvan lisäkuorman vaikutus. Tällä on selvitetty nykyisen rakenteen kapasiteettikestävyys, jotta tiedetään pitääkö rakennetta tukea valutöiden ajaksi.

Rakennelaskelmat on esitetty kohdassa liitteet.

9 POHDINTA

Opinnäytetyön tehtävänä oli tuottaa kapasiteetin arvioimisen prosessikaavio. Kaavio on rakentunut kolmeksi eri kaavioksi, jossa ensimmäinen kaavio käsittelee arviointiprosessia yleisesti. Kaksi muuta kaaviota koskevat palkki- ja laattarakenteiden arviointia ja ontelolaattarakenteiden arviointia lähinnä mitoituksellisista asioista. Ontelolaattarakenteiden arviointi koettiin haastavaksi ja monikaan asiantuntijoista ei ollut niiden osalla operoinut kovin syvällisesti. Työn ohessa tuleva ontelolaattojen arviointiin perustuva kaavio otettiin hyvin vastaan ja sille koettiin tarvetta. Myös muille kaavioille nähtiin tarvetta, lähinnä yhtenäisen arviointiprosessin suorittamisen kannalta.

Vaakasuuntaisten rakenteiden kapasiteettien arvioinnin tekemiseen ei ole yhtä ainoaa tapaa ja ohjetta. Tämän työn tarkoituksena onkin ollut kartoittaa mahdollisimman kattavasti sitä tietoa, mitä arvioitsija arvioinnin aikana tarvitsee. Arviota tekevä henkilö tarvitsee lähtötietoja itse rakenteesta, rakenteen toiminnasta, materiaaleista ja mahdollisista rakenteen vaurioista. Lisäksi tulee tietää rakenteen rakentamisen ajankohta ja ajankohdan mukaiset suunnitteluajankaiset normit ja ohjeet. Arvioinnin tekijä määrittää itse, mitä lähtötietoja tarvitsee ja miten arviointityötään tekee.

Rakenteiden suunnittelun osaaminen, rakenteiden mekaniikan ja mitoitussteorioiden hallinta, on erittäin suuri tietopohja, joita tarvitaan arviointityössä. Myös rakenteiden vaurioiden ja niiden mekanismien tunnistaminen, on hyvä hallita.

Arviointityön tekeminen aloitetaan tutustumalla arvioitavaan kohteeseen, hankkimalla kaikki saatavilla oleva tieto; miten rakenne on suunniteltu, mistä materiaaleista se on tehty ja mitä kaikkea sen valmistumisen jälkeen on tapahtunut tarkasteluhetkeen saakka. Näiden tietojen mukaan voidaan jo heti alkuvaiheessa todeta, onko tarkastelu tehtävissä, onko se kannattavaa ja jääkö jotain epävarmuustekijöitä tehtävään työhön.

Tehtävä arviointityö ja sen onnistuminen palvelee työn tilaajaa. Kokenut arviointityön tekijä pystyy kertomaan jo heti projektin alkuvaiheessa tilaajalle, onko tarkastelu tarpeen ja mitä mahdollisia tutkimuksiin sisältyviä kulueria on tulossa. Rakenteiden tutkimukset ovat oma kustannuserä hankkeissa ja jos niitä tehdään turhaan, se syö hankkeesta turhaan rahaa. On muistettava, että epävarmuustekijät, voivat joka tapauksessa tulla esiin kesken hankkeen. Yllättävät aiemmin tehdyt muutokset, joita ei ole dokumentoitu, voivat olla kohtalokkaita ja kalliiksi tulevia asioita.

Olen tämän opinnäytetyön teossa huomannut, miten tärkeää on yhteistyö eri asiantuntijoiden välillä, kun tehdään tarkkaa rakenteen arviointia. Rakenteita tutkivat henkilöt hallitsevat erilaisia tutkimusmenetelmiä ja he osaavat antaa rakenteesta lisätietoa tai varmuuksia rakennemateriaaleista ja niiden lujuuksista, joita ollaan arvioimassa. Kokeneemmat rakenteiden suunnittelijat ja eri rakenneosiin erikoistuneet henkilöt omaavat tietotaitoa, jota ei löydy oppikirjoista. Rakenteiden suunnittelu vaatii monen asian huomioimista ja tarkkaa teoreettista osaamista ja soveltamista. Vaikka tässä työssä ei käsitelty rakenteiden vahvistamista, tulee vanhan rakenteen toiminta ottaa huomioon ja tehdä ns. kokonaisarviointi uuden rakenneosan kanssa. Tämän tyyppinen arviointi vaatii kokemusta ja syvempää otetta rakenteiden mekaniikan osalla.

Opinnäytetyö tuntui alkuun helpolta aiheelta, mutta mitä enemmän aiheeseen syventyi, sitä enemmän oli etsittävä lisätietoa. Aihe on erittäin mielenkiintoinen ja kuitenkin samalla vaativa. Toivonkin näin loppusanoina, että tämän työn sisältö innoittaa lukijaansa laajentamaan näkemystä ja kehittämään eri rakenteille soveltuvia tutkimus ja arviointimenetelmiä. Ei ole vain yhtä oikeaa tapaa, vaan on monia mahdollisuuksia, jotka johtavat lopussa tulokseen.

10 LÄHTEIDEN MERKINTÄ

Anttila Wiljami 2020. Taivutetun teräsbetonipalkin taipuman laskeminen.

Betoniteollisuus 2019. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan: Osa 3: Laatat. Pdf dokumentti. Viitattu 21.5.2022. https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_3_Laatat.pdf.

Dahlström Jonas 2015. Reikäpiirustuksien suunnitteluohje LVIS-suunnittelijan näkökulmasta.

Elementtisuunnittelu 2022a. Laattarakenteet. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Pdf dokumentti. Viitattu 21.5.2022. https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23183/Leaflet_3_Laatat.pdf.

-2022b. Elementtirakentamisen historia. Viitattu 21.5.2022. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/valmisosarakentaminen/elementtirakentamisen-historia>.

- 2022c, Ristipalkit 29.9.2020. Viitattu 21.5.2022. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/palkit/ristipalkit>.

-2022d, HI- ja I-palkit 1.10.2020. Viitattu 21.5.2022. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/palkit/i-ja-hi-palkit>.

-2022f, TT-laatat 30.9.2020. Viitattu 21.5.2022. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/laatat/tt-laatat>.

-2022e, Palkit. Viitattu 21.5.2022. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/palkit>.

-2022g, Massiivilaatat 30.9.2020. Viitattu 21.5.2022. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/laatat/massiivilaatat>.

-2022h, Laattarakenteet. Viitattu 21.5.2022. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/laatat>.

-2020i, Ontelolaatat 17.2.2022. Pdf dokumentti. Viitattu 21.5.2022. [https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23859/Ontelolaatasto-
jen%20suunnitteluohje.pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23859/Ontelolaatasto-
jen%20suunnitteluohje.pdf).

-2020j, Ontelolaattojen mitoituskäyrät 17.2.2022. Pdf dokumentti. Viitattu 21.5.2022. [https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21882/Ontelolaatto-
jen%20mitoituskayrat_asunnot%20toimistot%20lumikuorma.pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21882/Ontelolaatto-
jen%20mitoituskayrat_asunnot%20toimistot%20lumikuorma.pdf).

-2020k, Suunnitteluohjelmat 29.9.2022. Pdf dokumentti. Viitattu 21.5.2022
<https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23904/121122%20Ontelokoulu-tus%20Cslab%20flexible.pdf>.

-2020l, JCAD hollow core slabs 29.9.2022. Ohjelma. Viitattu 21.5.2022.
<https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23723/Flexibl838.zip>.

-2020m, Suunnitteluprosessi, mallipiirustukset, EO37-1.pdf. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/suunnitteluprosessi/mallipiirustukset>.

-2020n, Elementtitunnukset. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/elementtitunnukset>.

Finlex 2015/300. Laki laajaruonkoisten rakennusten rakenteellisen turvallisuuden arvioinnista. Viitattu 21.5.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150300>.

Finlex 477/2014. Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista. Viitattu 21.5.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140477>.

Hongisto Laura. RTA 2015-2016. Kaksoislaattapalkiston korjausmenetelmät sisäilmanlaadun parantamiseksi.

Huurinainen E. 2022. Ramboll Oyj. Suunnittelupäällikön haastattelu 28.4.2022.

Jokela Aleksis 2017. Teräsbetonilaatan mitoituksen kehittyminen.

Karjalainen J. 2022. Ramboll Oyj. Suunnittelupäällikön haastattelu 12.4.2022.

Kosti M. 2022. Ramboll Oyj. Asiantuntijan haastattelu 21.4.2022.

Kurkela H. 2022. Ramboll Oyj. Yksikön päällikön haastattelu 20.4.2022.

Kiwa 2022. Betonirakenteiden 3D-ultraäänitutkimus. Viitattu 21.5.2022.
<https://www.kiwa.com/fi/fi/palvelumme/betonirakenteiden-3d-ultraaanitutkimus/>.

Liikennevirasto 21/2016, Kimmovasaran käyttäjän ohje. Viitattu 21.5.2022.
https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2016-21_kimmovasaran_kayttajan_web.pdf.

Lindman N. 2022. Ramboll Oyj. Projektipäällikön haastattelu 19.4.2022.

Lähteenmäki Matti 2022. Elementtimenetelmän perusteet. Pdf dokumentti. Viitattu 21.5.2022. https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf.

Malinen Jenni 2015 – Kaksoislaattapalkistorakenteen tutkimus- ja korjausmenetelmät.

Mäkiö Erkki, Malinen Maarit, Neuvonen Petri, Vikström Kari, Mäenpää Risto, Saarenpää Jukka, Tähti Esko, Kerrostalot 1960–1975, Rakennustieto, 15.

Neuvonen, P., Mäkiö, E. & Malinen, M. 2002 Kerrostalot 1880–1940. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Neuvonen, P. 2006. Kerrostalot 1880–2000. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Ojala Matti 2020. Teräsbetonisen palkkirakenteen vahvistaminen.

Parman ontelolaatatot suunnitteluohje joulukuu 2018. Pdf dokumentti. Viitattu 21.5.2022 https://parma.fi/userassets/uploads/2018/12/parma_ontelolaatatot_suunnitteluohje_2018-1.pdf.

Pelkonen Olli-Pekka 2018 - Betonirakenteisten hallien rakenteet ja vauriot.

Pielisen betoni Oy, Kuorilaattojen suunnitteluohje. Pdf dokumentti. Viitattu 21.5.2022. <https://www.pielisenbetoni.fi/wp-content/uploads/2022/05/Kuorilaatta-suunnitteluohje.pdf>.

Pohjonen Joni 2019, Kloridien tunkeutuminen betoniin ja niiden vaikutus raudoitteen korroosionopeuteen.

Rakentajain kalenteri 2022. Viitattu 21.5.2022. <https://login.rakennustieto.fi/kortistot/rk/fi/index.html.stx>.

Rakennustuoteteollisuus RTT ry 2022, Eurokoodit, Historiaa. 21.5.2022. <https://www.eurocodes.fi/historiaa/>.

Rakennusteollisuus 2022, Eurokoodit ohjaavat suunnittelua. <https://www.rakennusteollisuus.fi/Rakennusteollisuus-RT/Maaraykset/Eurokoodit-ohjaavat-suunnittelua/>.

Suikka Arto, DI 2006 – Betonikeskus ry. Matalapalkkien suunnittelu ja asentaminen. Pdf tiedosto. Viitattu 21.5.2022. https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0603_s70-71.pdf.

Suomen Betoniyhdistys ry 2019. By 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Suomen Betoniyhdistys ry 2021. By 65 Betoninormit. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Suomen Betoniyhdistys ry 2007. By 51 Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Suomen Betoniyhdistys ry 2013. By 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Suomen Betoniyhdistys ry 2014. By 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Suomen Betoniyhdistys ry 2022. Historiaa. Viitattu 21.5.2022. <https://www.betoniyhdistys.fi/yhdistys/historiaa.html>.

Suomen Betoniyhdistys ry 2012. Betonin valmistus. Viitattu 21.5.2022. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/07/SFS-EN-206-1-ja-SFS-7022workshop-15-05-2012.pdf>.

Suomen Betoniyhdistys ry 2022 a. Viitattu 21.5.2022. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-halkeilu/halkeilun-syyt-tyypit-ja-valttaminen.html>.

-2022 b, Betonin halkeilu. Viitattu 21.5.2022. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-halkeilu.html>.

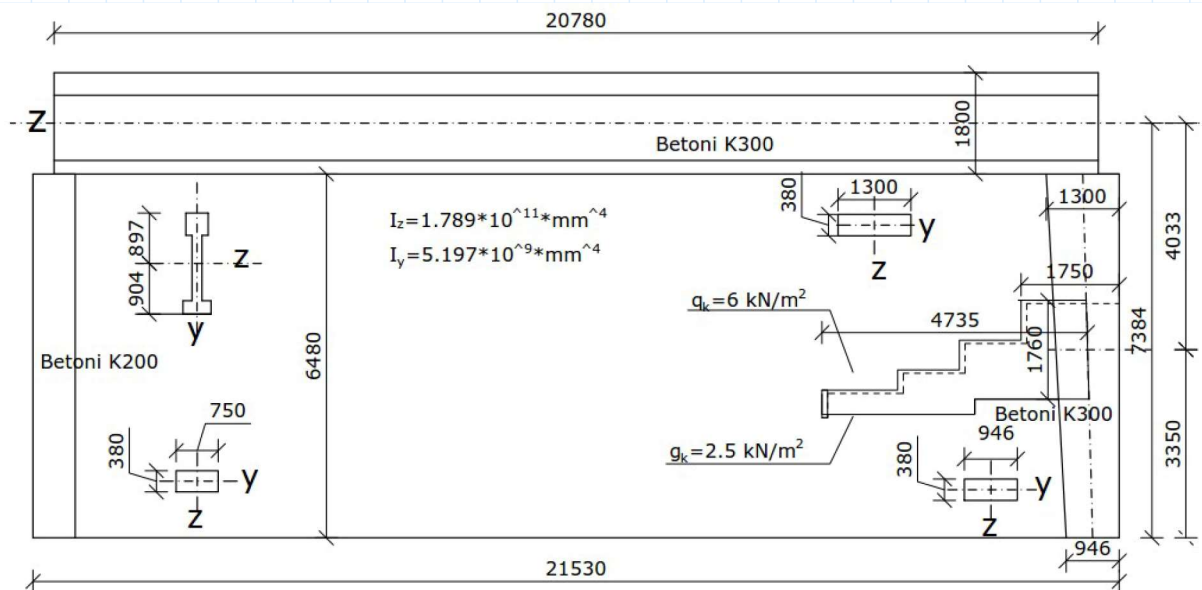
-2022 c. Jälkihoito. Viitattu 21.5.2022. <https://www.betonitieto.fi/tyomaat/betonitoiden-johtaminen-talonrakentaminen/betonityot/jalkihoito.html>.

Valutie Veera 2020 – Alkalikiviainesreaktio ja sen vaikutus betonirakenteisiin, i.

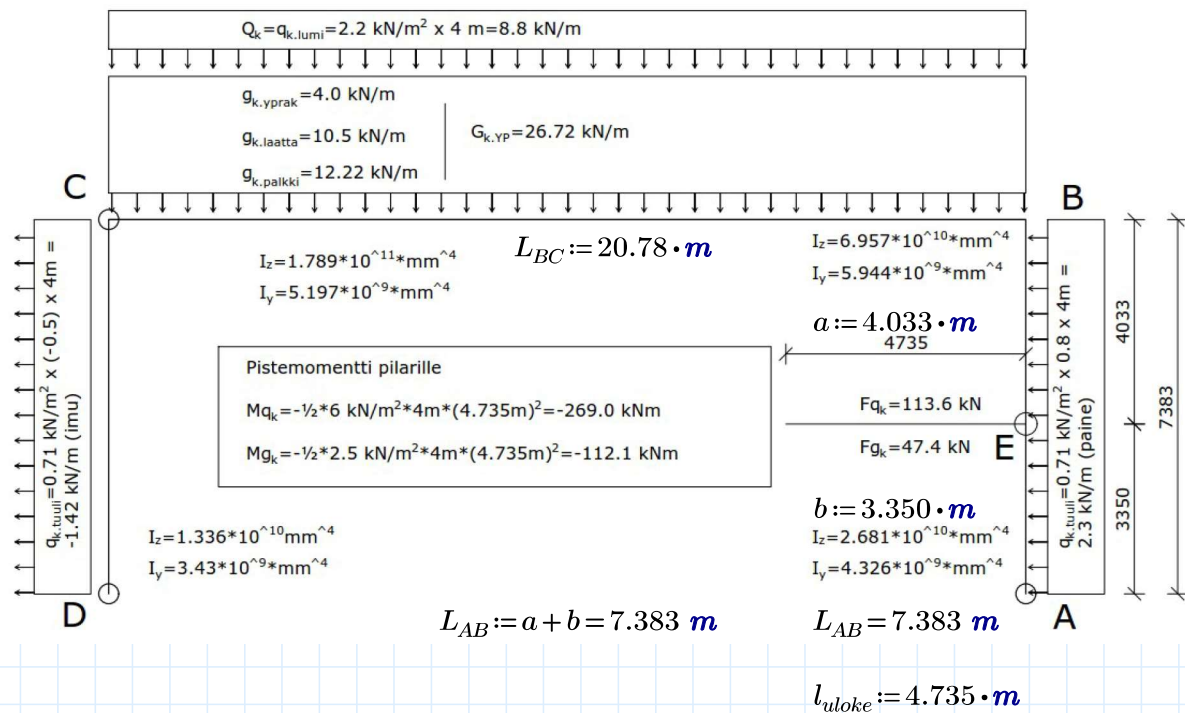
11 LIITTEET

Liite 1 – Esimerkkikohteen laskelmat (sivumäärä 15)

Liikuntasalin rakennepoikkileikkaus ja vaakapalkin rasisusten laskenta.



Kehän rakennemallin poikkileikkaus. Tuulikuorma tässä oikealta.



Tuki A on kaksiarvoinen ja tuki C 1-arvoinen. Tukipisteiden väli A-C on yksi jäykkä rakenne. Rakenteen kertaluku on 0, joten rakenne on staattisesti määrätty. Rakenteeseen vaikuttavat voimat ovat ratkaistavissa tasapainoyhtälöiden avulla. Ratkaistaan rakenteen A-C tukireaktiot, kenttä- ja nurkkamomentti.

Kuormat Pysyvä kuorma (G) ja muuttuva kuorma (Q). Pilarijako $k := 4 \cdot m$

Yläpohjarakenteen rakennekuormat (lasketaan yhden kehän kuormakerääntymät)

$$g_{k.palkki} := 12.22 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$g_{k.laatta} := 10.5 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$g_{k.yprac} := 4.0 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$G_{k.YP} := (g_{k.palkki} + g_{k.laatta} + g_{k.yprac}) = 26.7 \frac{kN}{m}$$

Yläpohjan lumikuorma

$$Q_{k.lumi} := 2.2 \cdot \frac{kN}{m^2} \cdot k = 8.8 \frac{kN}{m}$$

Pilarin oma paino

$$G_{k.PI} := \left(\frac{1.3 \cdot m + 0.946 \cdot m}{2} \right) \cdot L_{AB} \cdot 25 \cdot \frac{kN}{m^3} = 207.3 \frac{kN}{m}$$

Ei vaikuta voimasuurelaskentaan!

Pilariin vaikuttava rakennekuorma, ulokekatsomorakenne, pistemomentti.

Katsomorakenteen rakennekuorma (sis. palkki + betonikannet)

$$g_{k.uloke} := 2.5 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

$$M_{gk} := 0.5 \cdot g_{k.uloke} \cdot k \cdot (l_{uloke})^2 = 112.1 \text{ kN} \cdot m$$

Pilariin vaikuttava pilarin suuntainen rakennekuorma, ulokekatsomorakenne.

Katsomorakenteen paino

$$Fg_k := g_{k.uloke} \cdot k \cdot l_{uloke} = 47.4 \text{ kN}$$

Pilariin vaikuttava hyötykuorma, ulokekatsomorakenne, pistemomentti.

Katsomorakenteen hyötykuorma

$$q_{k.yleisö} := 6 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

$$M_{qk} := 0.5 \cdot q_{k.yleisö} \cdot k \cdot (l_{uloke})^2 = 269 \text{ kN} \cdot m$$

Pilariin vaikuttava pilarin suuntainen hyötykuorma, ulokekatsomorakenne.

$$Fq_k := q_{k,yleisö} \cdot k \cdot l_{uloke} = 113.6 \text{ kN}$$

Pilariin vaikuttava tuulikuorma.

Tuulenpaineen arvo Tuulikerroin paine $C_{piA} := 0.8$

$$q_{k,tuuli} := 0.71 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

imu $C_{piE} := -0.5$

Tuulen kuorma, painepuoli

$$Q_{k,tuuliP} := q_{k,tuuli} \cdot k \cdot C_{piA} = 2.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tuulen kuorma, imupuoli

$$Q_{k,tuuliI} := q_{k,tuuli} \cdot k \cdot C_{piE} = -1.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Yhdistelykuormat

Rakennus kuuluu seuraamusluokkaan CC2 (Liikuntasali ja katsomot)

Luotettavuusluokka RC2 -> $K_{FI} := 1.0$

Varmuuskertoimet

Rakennekuorma (kun ei ole muuttuvia kuormia, tarkastellaan pelkkä rakenne)

$$\gamma_{g1} := 0.9$$
$$\gamma_{g3} := 1.35$$

Rakennekuorma ja lisäksi muuttuvia kuormia.

$$\gamma_{g2} := 1.15$$

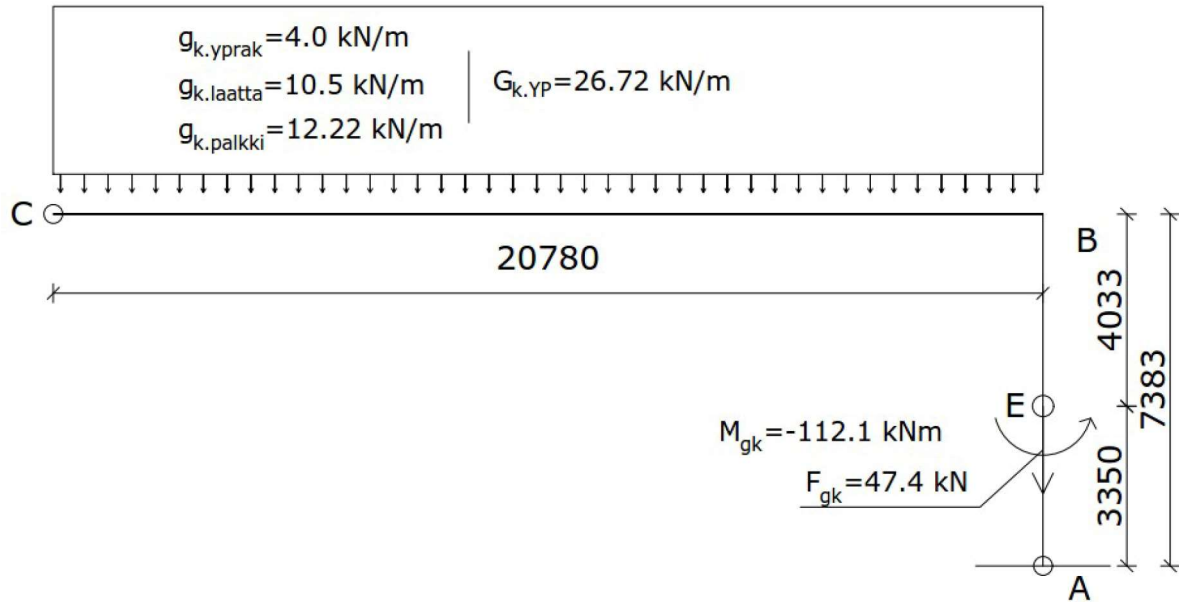
Muuttuva kuorma, lumi ja tuuli

$$\gamma_q := 1.5$$

Laaditaan rakenteen kuormitustapaukset. Perustapaus 0, jossa pelkkä rakennekuorma ja lisäksi muuttuvien kuormien kuormitustapaukset 1-6. Tuulikuormasta johtuvat kuormitustapaukset 1-3 (pilariin vaikuttava tuulenpaine) ja kuormitustapaukset 4-6 (pilariin vaikuttava imukuorma).

Kuormitustaus 0

Vain pelkkä rakennekuorma palkille ja pilarille
YP rakennekuorma ja ulokekatsomon kuorma



1) Yläpohjan kuormat palkille B-C

$$G_{d0} := \gamma_{g3} \cdot K_{FI} \cdot G_{k.YP} = 36.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2) Pilariin A-B vaikuttavat pistekuormat

$$M_{d0} := \gamma_{g3} \cdot K_{FI} \cdot (M_{gk}) = 151.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3) Pilariin vaikuttava tuuli

$$Q_{d0} := 0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

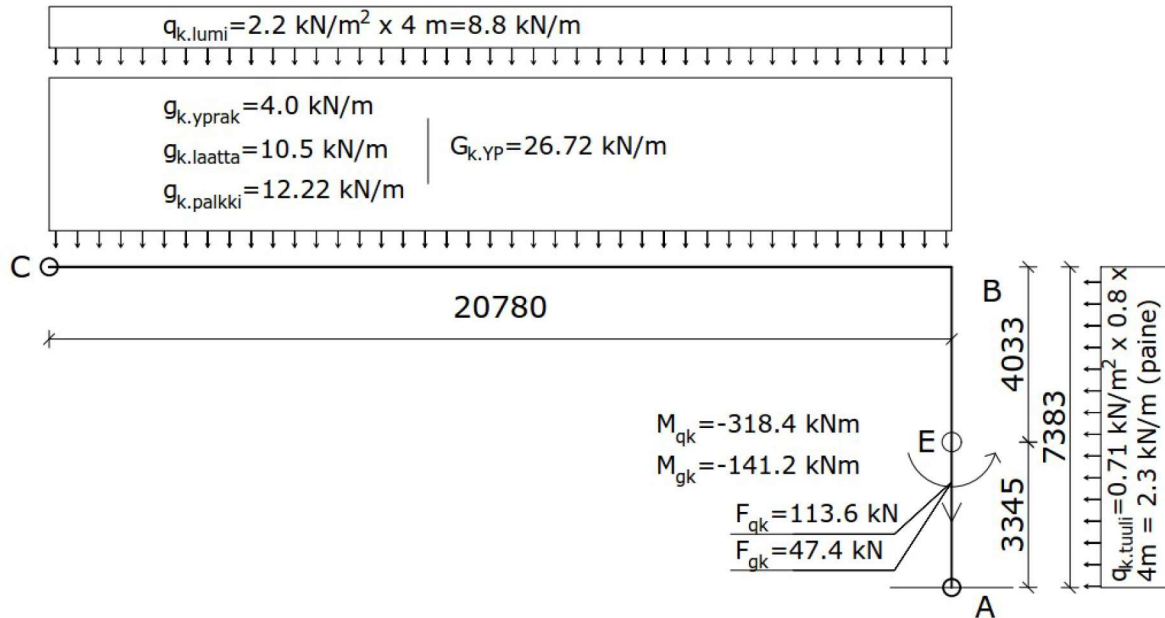
Kuormat palkille B-C = $Fd_{BC} := G_{d0} = 36.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Kuormat pilarille A-B = $Fd_{AB} := Q_{d0} = 0$

Uloke, pistemomentti $Md1 := M_{d0} = 151.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Kuormitustapaus 1

Palkille YP rakennekuorma ja lumikuorma (määrävä muuttuva kuorma)
Pilarille ulokerakenne, yleisökuorma ja tuuli (paine)



1) Yläpohjan kuormat palkille B-C

$$\gamma_q = 1.5$$

$$\gamma_{g2} = 1.15$$

$$\psi_{0,lumi} := 0.7$$

$$\psi_{0,tuuliP} := 0.6$$

$$G_{d1} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot G_{k,YP} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,lumi} = 43.9 \frac{kN}{m}$$

$$\psi_{0,C} := 0.7$$

2) Pilariin A-B vaikuttavat pistekuormat

$$M_{d1} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot M_{gk} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,C} \cdot M_{qk} = 411.4 \text{ kN} \cdot m$$

3) Pilariin vaikuttava tuuli

$$Q_{d1} := \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,tuuliP} \cdot Q_{k,tuuliP} = 2.04 \frac{kN}{m}$$

Kuormat palkille B-C = $Fd_{BC} := G_{d1} = 43.9 \frac{kN}{m}$

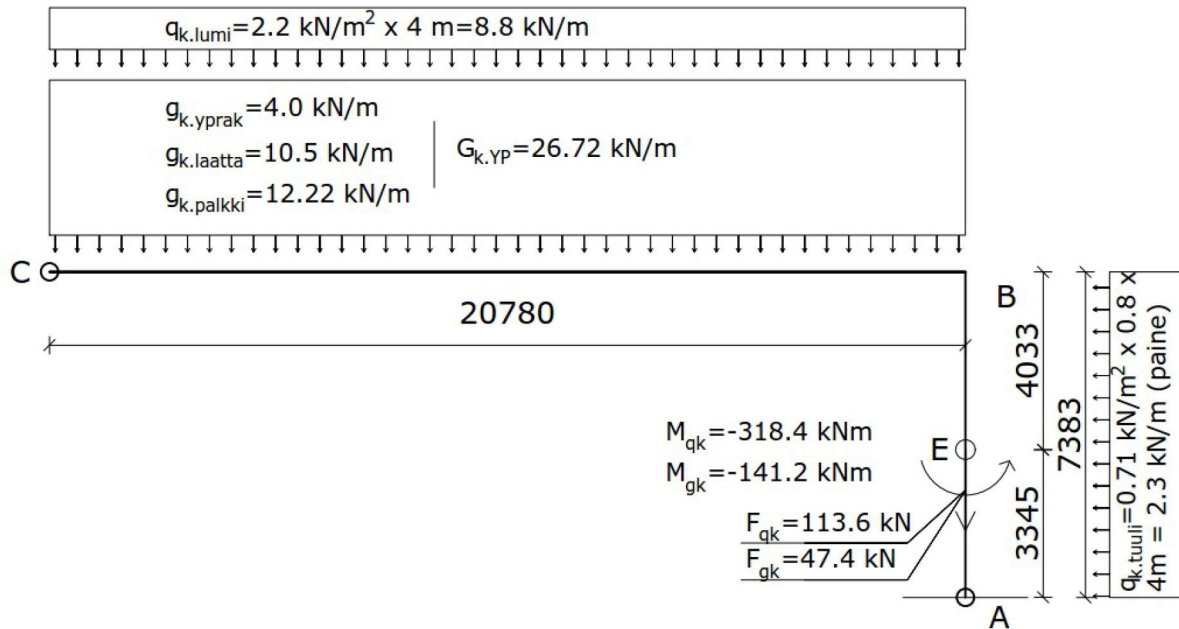
Kuormat pilarille A-B = $Fd_{AB} := Q_{d1} = 2 \frac{kN}{m}$

Uloke, pistemomentti $Md1 := M_{d1} = 411.4 \text{ kN} \cdot m$

Kuormitustapaus 2

Palkille YP rakennekuorma ja lumikuorma

Pilarille ulokerakenne ja tuuli, yleisökuorma määräävä kuorma



1) Yläpohjan kuormat palkille B-C

$$\psi_{0,lumi} = 0.7$$

$$\gamma_{g2} = 1.15$$

$$\gamma_q = 1.5$$

$$G_{d2} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot G_{k,YP} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,lumi} \cdot Q_{k,lumi} = 40 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2) Pilariin A-B vaikuttavat pistekuormat

$$M_{d2} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot M_{gk} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot M_{qk} = 532.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3) Pilariin vaikuttava tuuli

$$Q_{d2} := \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,tuuliP} \cdot Q_{k,tuuliP} = 2.04 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kuormat palkille B-C = $Fd_{BC} := G_{d2} = 40 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

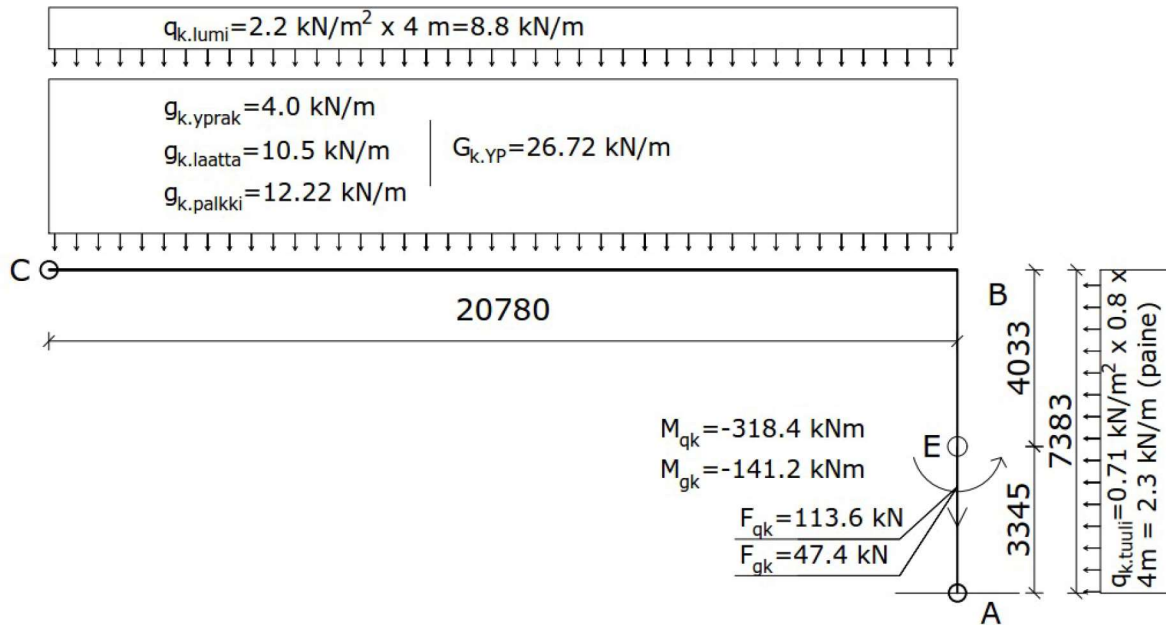
Kuormat pilarille A-B = $Fd_{AB} := Q_{d2} = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Uloke, pistemomentti $Md1 := M_{d2} = 532.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Kuormitustauspaus 3

Palkille YP rakennekuorma ja lumikuorma

Pilarille ulokerakenne ja yleisö, tuulenpaine määräävä kuorma



1) Yläpohjan kuormat palkille B-C

$$\psi_{0,C} := 0.7$$

$$G_{d3} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot G_{k,YP} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,lumi} \cdot Q_{k,lumi} = 40 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2) Pilariin A-B vaikuttavat pistekuormat

$$M_{d3} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot M_{gk} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,C} \cdot M_{qk} = 411.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3) Pilariin vaikuttava tuuli

$$Q_{d3} := \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,tuuliP} = 3.41 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kuormat palkille B-C = $Fd_{BC} := G_{d3} = 40 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

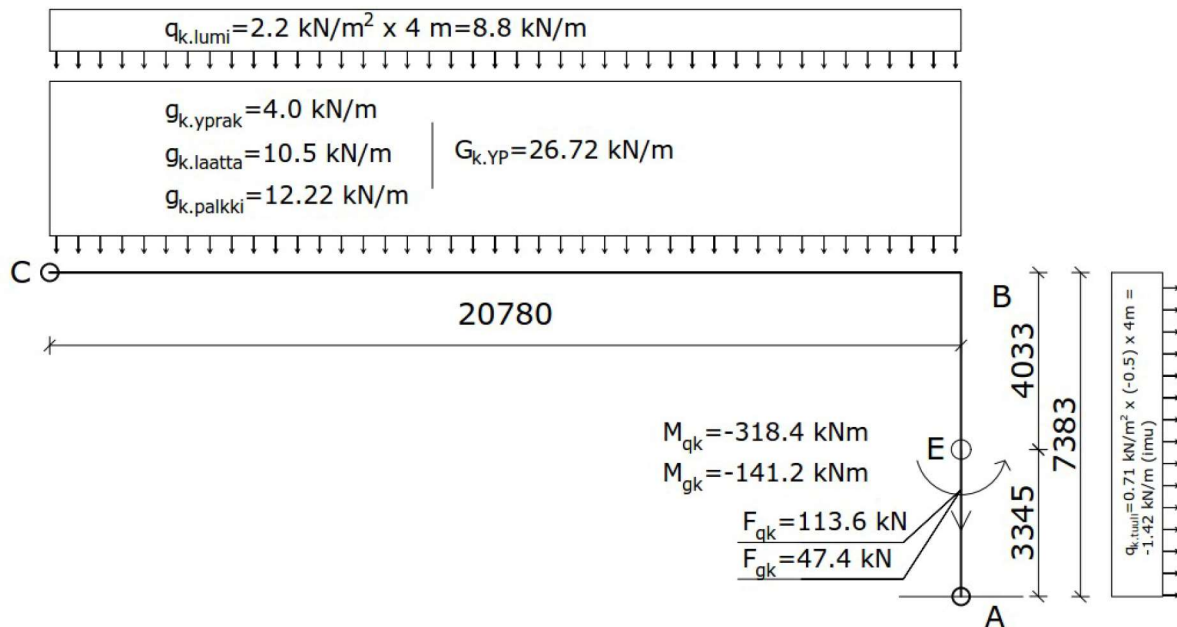
Kuormat pilarille A-B = $Fd_{AB} := Q_{d3} = 3.408 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Uloke, pistemomentti $Md1 := M_{d3} = 411.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Kuormitustapaus 4

Palkille YP rakennekuorma ja lumikuorma (määrävä muuttuva kuorma)

Pilarille ulokerakenne, yleisökuorma ja tuuli (imu)



1) Yläpohjan kuormat palkille B-C

$$\gamma_q = 1.5$$

$$\gamma_{g2} = 1.15$$

$$\psi_{0,lumi} := 0.7$$

$$G_{d4} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot G_{k,YP} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,lumi} = 43.9 \frac{kN}{m}$$

$$\psi_{0,tuuliP} := 0.6$$

$$\psi_{0,C} := 0.7$$

2) Pilariin A-B vaikuttavat pistekuormat

$$M_{d4} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot M_{gk} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,C} \cdot M_{qk} = 411.4 \text{ kN} \cdot m$$

3) Pilariin vaikuttava tuuli

$$Q_{d4} := \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,tuuliP} \cdot Q_{k,tuuli} = -1.28 \frac{kN}{m}$$

Kuormat palkille B-C = $Fd_{BC} := G_{d1} = 43.9 \frac{kN}{m}$

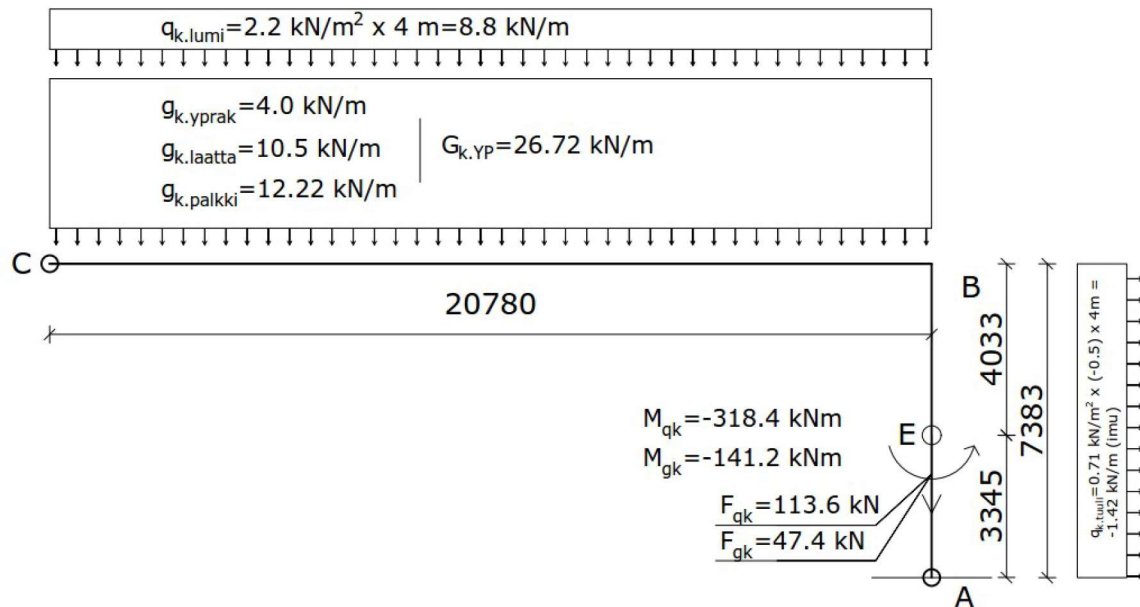
Kuormat pilarille A-B = $Fd_{AB} := Q_{d4} = -1.3 \frac{kN}{m}$

Uloke, pistemomentti $Md1 := M_{d4} = 411.4 \text{ kN} \cdot m$

Kuormitustapaus 5

Palkille YP rakennekuorma ja lumikuorma

Pilarille ulokerakenne ja tuuli (imupaine), yleiskuorma määräävä kuorma



1) Yläpohjan kuormat palkille B-C

$$\psi_{0,lumi} = 0.7$$

$$\gamma_{g2} = 1.15$$

$$\gamma_q = 1.5$$

$$G_{d5} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot G_{k,YP} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,lumi} \cdot Q_{k,lumi} = 40 \frac{kN}{m}$$

2) Pilariin A-B vaikuttavat pistekuormat

$$M_{d5} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot M_{gk} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot M_{qk} = 532.5 \text{ kN} \cdot m$$

3) Pilariin vaikuttava tuuli

$$Q_{d5} := \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,tuuliP} \cdot Q_{k,tuuli} = -1.28 \frac{kN}{m}$$

$$\text{Kuormat palkille B-C} = Fd_{BC} := G_{d5} = 40 \frac{kN}{m}$$

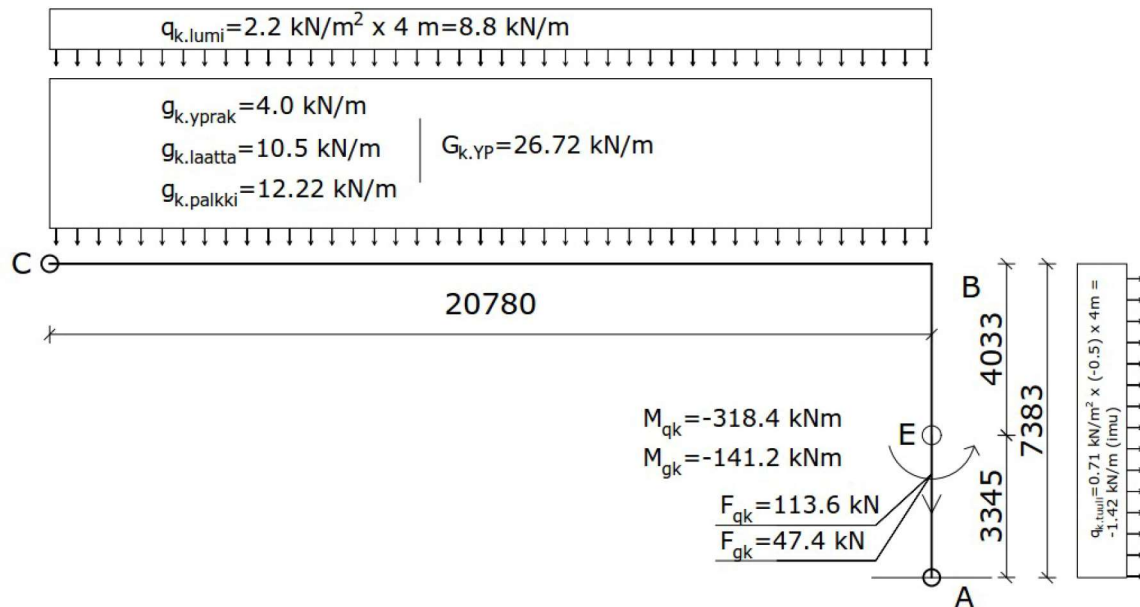
$$\text{Kuormat pilarille A-B} = Fd_{AB} := Q_{d5} = -1.3 \frac{kN}{m}$$

$$\text{Uloke, pistemomentti} = Md1 := M_{d5} = 532.5 \text{ kN} \cdot m$$

Kuormitustapaus 6

Palkille YP rakennekuorma ja lumikuorma

Pilarille ulokerakenne ja yleisö, tuulen (imu) määräävä kuorma



1) Yläpohjan kuormat palkille B-C

$$\psi_{0,C} := 0.7$$

$$G_{d6} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot G_{k,YP} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,lumi} \cdot Q_{k,lumi} = 40 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2) Pilariin A-B vaikuttavat pistekuormat

$$M_{d6} := \gamma_{g2} \cdot K_{FI} \cdot M_{gk} + \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0,C} \cdot M_{qk} = 411.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3) Pilariin vaikuttava tuuli

$$Q_{d6} := \gamma_q \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,tuuli} = -2.13 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kuormat palkille B-C = $Fd_{BC} := G_{d6} = 40 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Kuormat pilarille A-B = $Fd_{AB} := Q_{d6} = -2.13 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Uloke, pistemomentti $Md1 := M_{d6} = 411.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Maksimiarvot yhdistelmäkuormista

$$Fd_{BC} := \max(G_{d1}, G_{d2}, G_{d3}, G_{d4}, G_{d5}, G_{d6}) = 43.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Fd_{AB} := \max(Q_{d1}, Q_{d2}, Q_{d3}, Q_{d4}, Q_{d5}, Q_{d6}) = 3.408 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Md1 := \max(M_{d1}, M_{d2}, M_{d3}, M_{d4}, M_{d5}, M_{d6}) = 532.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tasapainoyhtälö pisteen A suhteen. Ratkaistaan tukireaktio C_y .

$$M_A := -Md1 - Fd_{AB} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} - Fd_{BC} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2} + C_y \cdot L_{BC} = 0$$

$$M_A := -Md1 - Fd_{AB} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} - Fd_{BC} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2} = -C_y \cdot L_{BC}$$

$$C_y := \frac{Md1 + Fd_{AB} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} + Fd_{BC} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2}}{L_{BC}} = 487 \text{ kN}$$

Pystyvoimien tasapainoehto

$$A_y := Fd_{BC} \cdot L_{BC} - C_y = 426 \text{ kN}$$

Tarkistus

$$A_y + C_y = 913 \text{ kN}$$

$$Fd_{BC} \cdot L_{BC} = 913 \text{ kN}$$

Vaakavoimien tasapainoehto

$$A_x + Fd_{AB} \cdot L_{AB} = 0$$

$$A_x := -Fd_{AB} \cdot L_{AB} = -25 \text{ kN}$$

Yhdistelmäkuormien tukireaktiot, ratkaistaan eri tapauksien mukaan tukireaktio C_y .

$$C_{y0} := \frac{M_{d0} + Q_{d0} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} + G_{d0} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2}}{L_{BC}} = 382 \text{ kN}$$

$$C_{y1} := \frac{M_{d1} + Q_{d1} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} + G_{d1} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2}}{L_{BC}} = 479 \text{ kN}$$

$$C_{y2} := \frac{M_{d2} + Q_{d2} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} + G_{d2} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2}}{L_{BC}} = 444 \text{ kN}$$

$$C_{y3} := \frac{M_{d3} + Q_{d3} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} + G_{d3} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2}}{L_{BC}} = 440 \text{ kN}$$

$$C_{y4} := \frac{M_{d4} + Q_{d4} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} + G_{d4} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2}}{L_{BC}} = 475 \text{ kN}$$

$$C_{y5} := \frac{M_{d5} + Q_{d5} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} + G_{d5} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2}}{L_{BC}} = 439 \text{ kN}$$

$$C_{y6} := \frac{M_{d6} + Q_{d6} \cdot L_{AB} \cdot \frac{L_{AB}}{2} + G_{d6} \cdot L_{BC} \cdot \frac{L_{BC}}{2}}{L_{BC}} = 432 \text{ kN}$$

Palkin voimasuureiden laskenta välillä tuki C - B.

$$X := 0, \frac{L_{BC}}{m} \cdot 0.01 \dots \frac{L_{BC}}{m}$$

$$M_{dC0}(x) := C_{y0} \cdot \frac{1}{kN} \cdot x - G_{d0} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x \cdot \frac{x}{2}$$

$$V_{dC0}(x) := C_{y0} \cdot \frac{1}{kN} - G_{d0} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x$$

$$M_{dC1}(x) := C_{y1} \cdot \frac{1}{kN} \cdot x - G_{d1} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x \cdot \frac{x}{2}$$

$$V_{dC1}(x) := C_{y1} \cdot \frac{1}{kN} - G_{d1} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x$$

$$M_{dC2}(x) := C_{y2} \cdot \frac{1}{kN} \cdot x - G_{d2} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x \cdot \frac{x}{2}$$

$$V_{dC2}(x) := C_{y2} \cdot \frac{1}{kN} - G_{d2} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x$$

$$M_{dC3}(x) := C_{y3} \cdot \frac{1}{kN} \cdot x - G_{d3} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x \cdot \frac{x}{2}$$

$$V_{dC3}(x) := C_{y3} \cdot \frac{1}{kN} - G_{d3} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x$$

$$M_{dC4}(x) := C_{y4} \cdot \frac{1}{kN} \cdot x - G_{d4} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x \cdot \frac{x}{2}$$

$$V_{dC4}(x) := C_{y4} \cdot \frac{1}{kN} - G_{d4} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x$$

$$M_{dC5}(x) := C_{y5} \cdot \frac{1}{kN} \cdot x - G_{d5} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x \cdot \frac{x}{2}$$

$$V_{dC5}(x) := C_{y5} \cdot \frac{1}{kN} - G_{d5} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x$$

$$M_{dC6}(x) := C_{y6} \cdot \frac{1}{kN} \cdot x - G_{d6} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x \cdot \frac{x}{2}$$

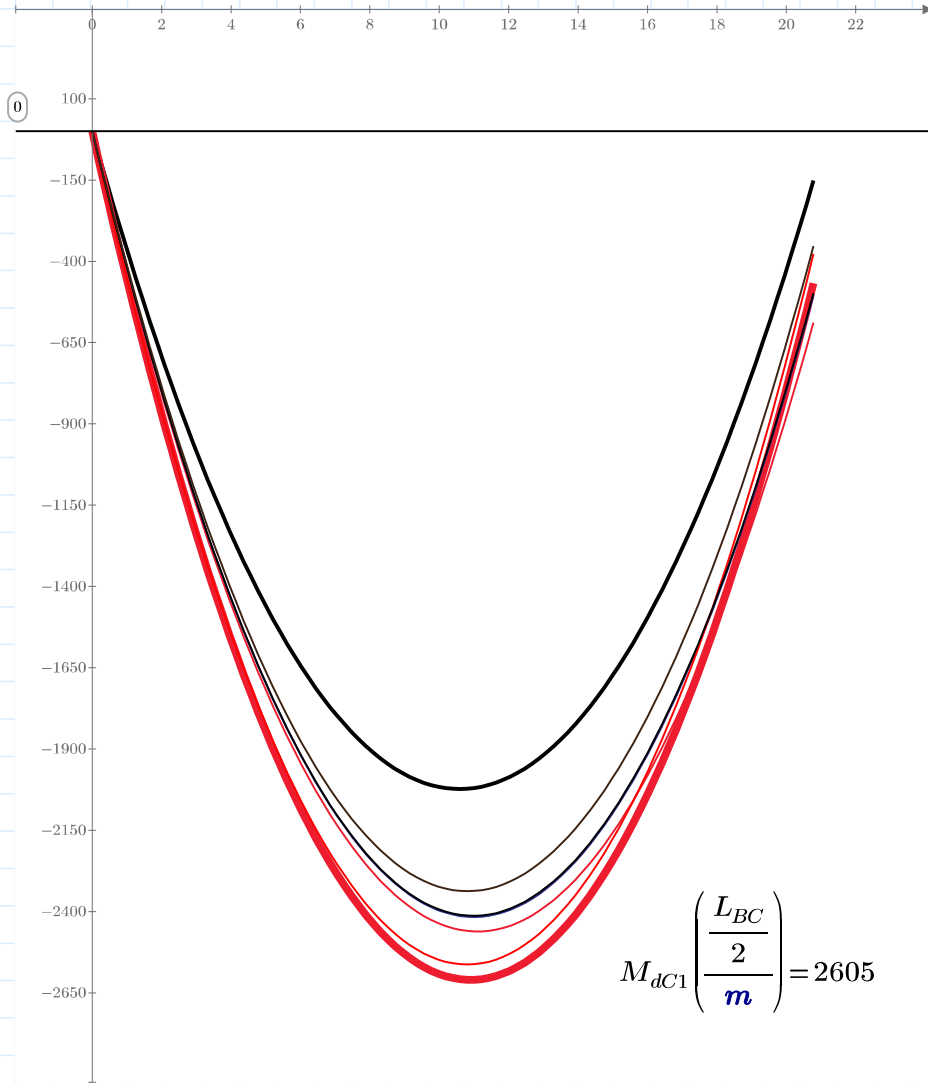
$$V_{dC6}(x) := C_{y6} \cdot \frac{1}{kN} - G_{d6} \cdot \frac{m}{kN} \cdot x$$

Kentän maksimimomentti eri kuormitusyhdistelmillä

$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.208 \\ 0.416 \\ 0.623 \\ 0.831 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad M_{dC1} \left(\frac{L_{BC}}{2m} \right) = 2605 \quad M_{dC2} \left(\frac{L_{BC}}{2m} \right) = 2451 \quad M_{dC3} \left(\frac{L_{BC}}{2m} \right) = 2409$$

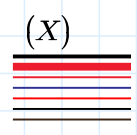
$$M_{dC4} \left(\frac{L_{BC}}{2m} \right) = 2559 \quad M_{dC5} \left(\frac{L_{BC}}{2m} \right) = 2406 \quad M_{dC6} \left(\frac{L_{BC}}{2m} \right) = 2334$$

Palkin taivutusmomenttikuvaaja



- $-M_{dC0}(X)$
- $-M_{dC1}(X)$
- $-M_{dC2}(X)$
- $-M_{dC3}(X)$
- $-M_{dC4}(X)$
- $-M_{dC5}(X)$
- $-M_{dC6}(X)$

$$M_{dC1} \left(\frac{L_{BC}}{2} \right) = 2605$$



$$V_{dC0}\left(\frac{L_{BC}}{m}\right) = -368 \quad V_{dC1}\left(\frac{L_{BC}}{m}\right) = -434 \quad V_{dC2}\left(\frac{L_{BC}}{m}\right) = -387 \quad V_{dC3}\left(\frac{L_{BC}}{m}\right) = -391$$

$$V_{dC4}\left(\frac{L_{BC}}{m}\right) = -438 \quad V_{dC5}\left(\frac{L_{BC}}{m}\right) = -391 \quad V_{dC6}\left(\frac{L_{BC}}{m}\right) = -398$$

Palkin leikkausvoimakuvaja

