

Anna-Sofia Aaltonen

RASKAASTI KUORMITETTUJEN LAA- KEREIDEN OMINAISUUKSIA

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Nina Lindberg
05/2022

TIIVISTELMÄ

Anna-Sofia Aaltonen: Raskaasti kuormitettujen laakereiden ominaisuuksia
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
5/2022

Rakenteille suunnitellaan nykyään paljon suurempia kuormia, mutta jännevälejä ei haluta kuitenkaan pienentää. Tämä johtaa siihen, että taipumien arvot kasvavat, ja palkin pää kiertyy enemmän. Palkin pään kiertymä siirtää tukireaktion vaikutuspistettä, ja tämä synnyttää pilariin ylimääräistä momenttia. Pilareita ei ole suunniteltu vastaanottamaan momenttirasitusta, joten ylimääräinen momentti on vain haitaksi rakenteen kestävyydelle. Momenttia voidaan pienentää asentamalla palkin ja pilarin väliin laakeri, jonka tehtävänä on tasata tukireaktiota pilarille, ja samalla sallia rakenteiden liikkumista.

Tämän tutkimuksen tarkoitus on perehtyä markkinoilla oleviin laakereihin, jotka on tarkoitettu suurille kuormille ja jännityksille. Tutkimuksessa on oletettu, että laakeri tekee liitoksesta täysin nivelellisen, vaikka todellisuudessa se ei aivan näin ole. Tarkoituksena on tutkia ja vertailla olemassa olevien laakereiden ominaisuuksia, ja miten ne soveltuvat esimerkkitapauksessa käyttöön. Sitä ennen tarkastellaan hieman teoriaa laakerin toiminnan takana. Tässä tutkimuksessa käydään myös läpi hieman taipuman ja kiertymän laskentaa. Lopuksi tutkitaan hieman laakerin lämpötilansietoa ja käyttöikää materiaalin näkökulmasta. Tämä tutkimus suoritetaan teorian osalta kirjallisuus tutkimuksena, ja markkinoilla olevien laakereiden tietoja etsitään suoraan valmistajien internetsivuilta.

Laakerin toiminta perustuu siihen, että sen kimmokerroin eroaa huomattavasti betonin kimmokerroimesta, jolloin kaikki nivelessä tapahtuvat muodonmuutokset kohdistuvat laakeriin. Tällöin betoni säästyy ylimääräiseltä halkeilulta. Laakeri sallii palkin pään kiertymistä tiettyyn pisteeseen asti, ja siksi onkin tärkeää tietää suunnitteluvaiheessa millaiset kuormat, taipumat ja kiertymät palkkiin syntyvät. Laakereille ei ole olemassa yhtenäistä mitoitusohjetta, vaan eri maissa käytetään hieman eri menetelmiä. Tässä työssä esitellään yksi mitoitusmenetelmä, mutta ongelma on, että mitoitusohjeet eivät ole yleisesti tarkoitettu suurille kuormille, vaan sallittua jännitystä on rajattu. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa tarkastelluille laakereille ei voida soveltaa mitoitusohjeita, koska tässä keskitytään nimenomaan suuriin kuormiin.

Tähän tutkimukseen otetaan kolmen eri valmistajan kaikki laakerit, jotka on suunniteltu suurille kuormille. Näihin laakerityyppeihin kuuluu tavallisen kumilevy-laakerin lisäksi raudoitettuja laakereita. Laakereiden ominaisuuksista tutkitaan sallittua puristusjännitystä, sallittua kiertymää sekä valmistettavia kokoja. Laakereita tutkimalla saadaan selville, että raudoitetut laakerit kestävät isompia puristusjännityksiä verrattuna kumilevy-laakereihin. Tutkimuksessa tehdään myös esimerkkilasku, josta käy ilmi, että suurilla kuormilla, laakerin koon vaihtelu merkitsee suuresti, mitä laakereita voidaan käyttää. Laakereiden lämpötilavaihtelunsieto riippuu kumilaadusta, mutta yleisesti liian suuri lämpötilan vaihtelu vahingoittaa kumia, ja tällöin laakerin toiminta heikkenee.

Avainsanat: laakeri, suuri kuorma, palkki-pilariliitos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. YLEINEN TEORIA LAAKERIN TOIMINNASTA.....	3
2.1 Laakerien toimintaperiaate liitoksissa	3
2.2 Laakerin mitoitus.....	6
2.3 Palkin pään kiertymän laskenta.....	10
2.4 Esimerkkilasku	11
3. MARKKINOILLA OLEVIA LAAKERITYYPPEJÄ.....	16
3.1 Laakerin valintaperiaatteita	16
3.2 Laakerityyppejä.....	17
3.2.1 Leschuplast GLT type N 20.....	17
3.2.2 ESZ Type 200.....	18
3.2.3 ESZ Type C-20-E.....	18
3.2.4 Calenberg Compact Bearing S70.....	18
3.2.5 Calenberg Perforated™ Bearing Type Z	19
3.2.6 Calenberg Sandwich Bearing Q.....	19
3.2.7 ESZ Fosta sliding bearing HP	19
3.3 Esimerkkilasku	19
3.4 Laakerien kestävyysominaisuudet.....	21
4. YHTEENVETO.....	23
LÄHTEET	24

1. JOHDANTO

Rakenteet suunnitellaan nykyään kestävämmän entistä suurempia kuormia, mutta silti tilat halutaan avariksi, joten rakenteiden välillä on yleensä melko suuria jännevälejä. Tämä johtaa siihen, että liitoksilta vaadittavat rasiustasot ovat kasvaneet. Suuremmat jännevälit johtavat taipumien arvojen kasvuun suuremmiksi. Suuret taipuman arvot puolestaan kasvattavat palkin päiden kiertymäarvoja, jolloin jäykässä tai osittaisen kiinnityksen omaavassa liitoksessa syntyy momenttia pilarille. Pilareita ei yleensä kuitenkaan suunnitella kestävämmän suuria momenttirasituksia, joten syntyvä momentti on vain haitaksi rakenteille ja niiden kestävyydelle. Siksi pilarin ja palkin väliseen liitokseen asennetaan laakeri. Laakerit tasoittavat pilarille tulevan tukireaktion paremmin koko pilarin pinta-alalle ja pienentävät pilarille kohdistuvaa momenttia.

Tutkimuksessa perehdytään eri laakerityyppeihin, jotka soveltuvat korkeille puristusjännityksille ja merkittäville kiertymävaateille. Etsitään siis vastausta kysymykseen, mitä laakereita on tarjolla, kun vaaditaan suuren pystykuorman kestävyys sekä tietty kiertymävaatimus. Tämän lisäksi tutkimuksessa selvitetään, millaisia palonkesto-ominaisuuksia laakereilla on. Rakenteen palonkestovaatimus voi olla R120 tai jopa suurempikin, mikä on todella pitkä aika. Minkälaiselle palonkestolle laakerit on testattu säilyttäen ominaisuutensa? Lisäksi etsitään tietoa laakereiden käyttöiästä. Onko niiden suunniteltu käyttöikä yhtä pitkä kuin itse rakenteiden? Talonrakennuksessa laakereita ei suunnitella vaihdettaviksi, joten käyttöiän tulisi olla suunnilleen samaa luokkaa kuin ympäröivän rakenteen.

Tutkimusta tehtäessä tehdään muutama oletus nivelen toiminnasta. Ensimmäiseksi oletetaan palkin ja pilarin liitoksen olevan ideaalinivel, jolloin niveleen ei synny momenttia. Lisäksi oletetaan, että pilari on täysin jäykkä eikä se taivu. Tällöin kaikki tarkasteltava kiertymä menee laakerille. Tarkoituksena on tutkia laakereita, joiden sallittu jännitys on suurempaa kuin 15 MPa. Kiertymäedellytys laakereille saadaan laskettua käyttämällä normin mukaista taipuman raja-arvoa pitkäaikaisille kuormille $L/250$, jossa L on palkin jänneväli. Tutkitaan siis laakereiden toimintaa vain pitkäaikaisilla kuormilla. Huomioitavaa on, että hetkellisesti kuormat voivat olla suurempiakin ja tällöin taipuman arvo saattaa ylittää kyseisen arvon.

Laakereiden toimintaperiaate perustuu laakerin pinta-alaan. Mikäli palkin ja pilarin välillä on raudoituksia, jotka menevät laakerin läpi, tarvitsee laakeriin tehdä reikiä. Tämä puolestaan pienentää laakerin pinta-alaa ja kasvattaa jännitystä. Oletetaan tässä tutkimuksessa kuitenkin, että kyseisiä raudoituksia ei ole. Rajataan tutkimuksessa käsiteltäviä laakereita vielä siten, että tutkitaan vain talonrakennuksen pilarilaakereita. Jätetään siis seinälaakerit ja siltalaakerit pois.

Luvussa 2 tarkastellaan palkin taipumaa, laakereiden ominaisuuksia sekä laakereiden mitoitusta. Lisäksi tarkastellaan hiukan laakerin toimintaperiaatetta. Lopuksi tehdään laskentaesimerkki palkin pään kiertymän laskennasta. Luku 2 toteutetaan kokonaan kirjallisuustutkimuksena. Luvussa 3 käydään läpi markkinoilla myynnissä olevia laakereita, jotka täyttävät edellä mainitut jännitysvaatimukset. Tätä lukua varten tutkitaan laakerivalmistajien ja jälleenmyyjien internetsivuja. Luvussa 4 tutkitaan laakerien kestävyysominaisuuksia materiaalien näkökulmasta. Tämäkin osuus toteutetaan kirjallisuustutkimuksena.

2. YLEINEN TEORIA LAAKERIN TOIMINNASTA

2.1 Laakerien toimintaperiaate liitoksissa

Laakereita käytetään liitoksissa, jotta liitos saadaan toteutettua nivelellisenä. Laakeri sallii siis rakenteille muodonmuutoksia ja estää palkin ja pilarin halkeilun. Tämä ominaisuus perustuu siihen, että laakeri jakaa tukireaktion tasaisesti tietylle pinta-alalle. On olemassa työnaikaisia ja pitkäaikaisia laakereita. Työnaikaiset laakerit eivät kuitenkaan toimi samalla tavalla, kuin pitkäaikaiset, joten jätetään ne pois tarkastelusta.

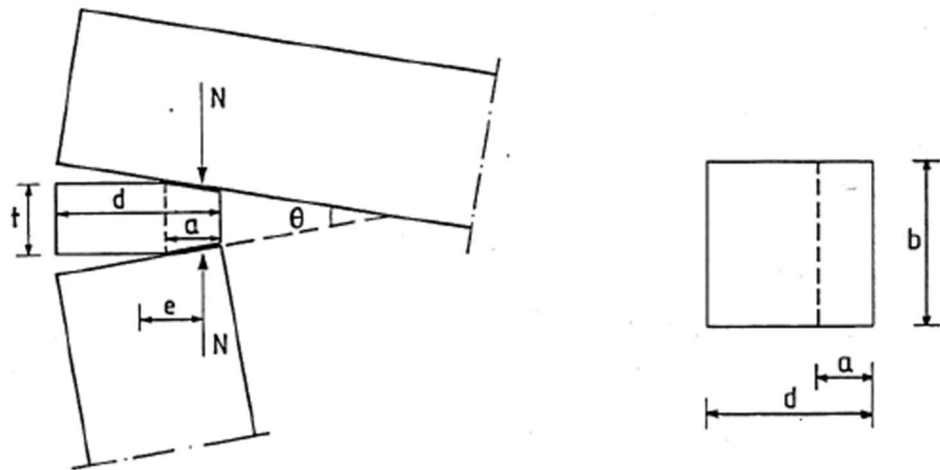
Pitkäaikaiset laakerit ovat yleensä elastomeerista kumia, sekä joskus niissä on myös teräksisiä vahvikelevyjä. Elastomeeristen ominaisuuksien vuoksi kumi palautuu melko hyvin alkuperäiseen muotoonsa. Kumi on materiaalina hyvin lujaa ja, se on tilavuudeltaan lähes kokoon puristumatonta. Laakerin toiminta perustuu useihin eri tekijöihin, joista tärkeimpiä ovat betonipintojen suoruus, aika, lämpötila, laakerin kimmo-ominaisuudet ja paksuus sekä muotoluku (Vinha & Lindberg 1994, s. 3).

Muotoluku S on suhdeluku laakerin kuormituspinta-alan ja laakerin reunan pinta-alan välillä. Laakerit ovat yleensä suorakaiteen muotoisia, joten niiden muototekijä saadaan laskettua kaavalla (Vinha & Lindberg 1994, s. 3)

$$S = \frac{ab}{2t(a+b)}, \quad (1)$$

jossa a on suorakaiteen leveys, b on suorakaiteen pituus ja t suorakaiteen paksuus. Kaava (1) soveltuu vain ehjälle suorakaiteen muotoiselle laakerille. Mikäli laakerissa on reikiä, muotoluvun kaava on hieman erilainen. Ei kuitenkaan esitetä tuota kaavaa tässä työssä. Muotoluku vaihtelee yleensä arvojen 5 ja 30 välillä. Silloin neopreenikumista valmistetun laakerin kimmokerroin E on 50–1 000 MPa. (Vinha & Lindberg 1994, s. 3) Koska laakerin kimmokerroin on paljon pienempi kuin betonilla, tapahtuu liitoksen muodonmuutokset pääasiassa vain laakerissa.

Palkin taipuessa sen päähän syntyy kiertymää, joka aiheuttaa laakeriin muodonmuutoksia. Tällöin tukireaktion vaikutuspiste siirtyy ja samalla liitokseen muodostuu momenttia. Kuvassa 1 on havainnollistettu tätä ilmiötä.



Kuva 1. Tukireaktio N siirtyy laakerin muodonmuutoksen takia (Vinha & Lindberg 1994, s. 3)

Tekemällä oletuksen, että laakerin jännitykset jakaantuvat kosketuspinnassa lineaarisesti, saadaan kuvan 1 merkinnöillä kaava (Vinha & Lindberg 1994, s. 4)

$$e + \frac{a}{3} = \frac{d}{2}, \quad (2)$$

silloin, kun

$$\frac{d}{6} \leq e \leq \frac{d}{2}. \quad (3)$$

Kaavasta (2) saadaan muodostettua laakerin kosketuspinnan lauseke

$$a = \frac{3}{2}d - 3e. \quad (4)$$

Kaavalla (4) saatavan kosketuspintakaistaleen a voidaan olettaa toimivan palkkina, jonka kiertymä on puolet pilarin ja palkin välissä tapahtuvasta kiertymästä. Tällöin kiertymän arvo saadaan kaavasta (Vinha & Lindberg 1994, s. 4)

$$\frac{\theta}{2} = \frac{Mt}{EI_n}, \quad (5)$$

jossa $M = N \cdot c$, $c = a/6$ ja $I_n = b \cdot a^3/12$.

Kun kiertymä on

$$\theta > \frac{2Nt}{EAd}, \quad (6)$$

voidaan pilarin ja palkin kiertymän sekä normaalivoiman epäkeskisyyden välille johtaa yhteys. Tällöin epäkeskisyyden e saadaan laskettua kaavalla (Vinha & Lindberg 1994, s. 4)

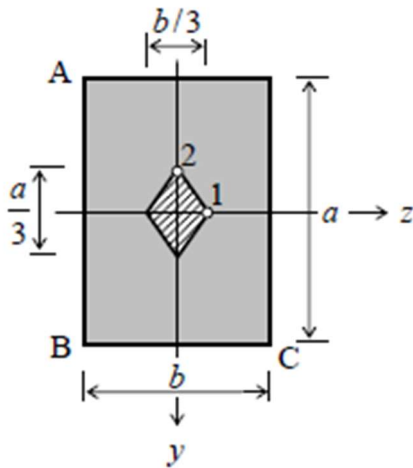
$$e = d \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \sqrt{\frac{8Nt}{EAd\theta}} \right), \quad (7)$$

jossa d , N ja t ovat kuvan 1 osoittamat suureet, E on laakerin kimmokerroin ja A on laakerin pinta-ala. Laakerilla on sisällä niin kutsuttu sydänalue, joka rajautuu epäkeskisyydellä katsottuna alueeseen $0 \leq e \leq d/6$. Kuvassa 2 on esitetty suorakaiteen muotoisen pilarin nelikulmion muotoinen sydänalue. Mikäli normaalivoiman N vaikutus pysyy sydänalueella, kaava (7) voidaan esittää seuraavasti:

$$e = \frac{EAd^2\theta}{12Nt}, \quad (8)$$

kiertymän ollessa (Vinha & Lindberg 1994, s. 5)

$$\theta \leq \frac{2Nt}{EAd}. \quad (9)$$



Kuva 2. Suorakaidepoikkipinnan sydänalue (Aalto, s. 179)

Vinhan ja Lindbergin (1994, s. 5) mukaan liitokseen muodostuu epäkeskisyyttä e/d pienilläkin kiertymän θ arvoilla ja sen arvo kasvaa todella voimakkaasti verrattuna kiertymän arvon kasvuun. Epäkeskisyyys muodostaa liitokseen stabiloivaa momenttia, jolloin pilarin ja palkin välinen liitos on osittain jäykkä. Stabiloivan momentin suuruuteen voidaan parhaiten vaikuttaa lisäämällä laakerin paksuutta, koska muihin arvoihin, kuten laakerin pinta-alaan tai kimmokertoimeen, ei yleensä pystytä vaikuttamaan yhtä helposti (Kankaanpää 2020, s. 50).

2.2 Laakerin mitoitus

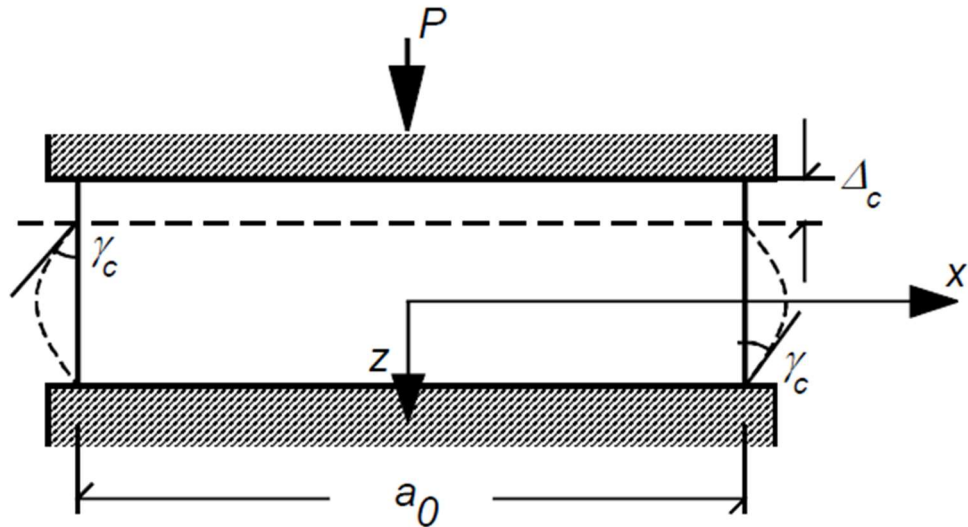
Laakereille ei ole olemassa mitään yhtä yksiselitteistä mitoitushjettä, mistä johtuu, että laakereiden käytössä on esiintynyt puutteita ja väärinkäyttöä (Leskelä 2009, s. 1). Ongelmana mitoituksessa on laakerin kumin mekaanisten ominaisuuksien vaihtelevuus sekä niiden seurannaisvaikutukset. Mikäli kumin kovuus vaihtelee $\pm 10\%$, niin liukukertoimen G arvo vaihtelee $\pm 25\%$ (Leskelä 2009, s. 1). Nämä parametrit ovat oleellisessa osassa laakerin toiminnan kannalta, ja niiden vaihtelu vaikuttaa voimakkaasti laakerin kokoonpuristuvuuteen.

Laakereihin liittyvät teoriat ovat yleensä osittain tai kokonaan empiirisiä. Tämä johtaa siihen, että laakereissa käytetyn kumin epälineaariset ja vaihtelevat ominaisuudet vähentävät teorioiden paikkansapitävyyttä. Näiden lisäksi lämpötila, käyttöikä ja laakerin kuormitushistoria vaikuttavat kumin ominaisuuksiin. Käyttöiän kasvaessa kumista tulee kovempaa.

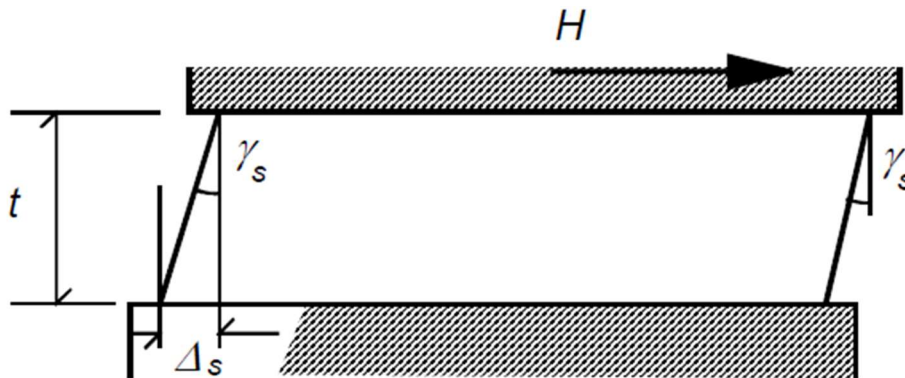
Kumi on kuitenkin tilavuudeltaan lähes kokoon puristumatonta. Suppeumaluku ν on siis likimääräisesti 0,5. Tämä tarkoittaa sitä, että kimmokerroin E on $3G$. Kyseinen suppeumaluku johtaa siis tilavuuskertoimen $K = \frac{E}{3-6\nu}$ äärettömyyteen. Vaikka suppeumaluku ei ole tarkalleen 0,5, sen pienetkin muutokset vaikuttavat huomattavasti laakerin ominaisuuksiin. (Leskelä 2009, s. 2)

Kun laakeria kuormitetaan, se painuu jonkin verran ja tällöin syntyy kokoonpuristumaa Δ_c . Laakerin tilavuus ei kuitenkaan muutu sitä kuormitettaessa, joten laakerin vapailla pystypinnoilla tapahtuu pullistumaa. Kuvassa 3 nähdään, miten puristuma aiheuttaa pullistumaa ulkoreunoilla. Ulospäin tapahtuva pullistuma johtuu laakerin sisällä tapahtuvista leikkausmuodonmuutoksista. Samaan aikaan laakerin sisällä muodostuu leikkausjännityksiä. Näitä jännityksiä ei kuitenkaan tarvitse erikseen tarkastella, koska suppeumaluku on pieni. Kokoonpuristuman lisäksi laakerin kontaktipinnoissa esiintyy liukumaa. Liukuma vaikuttaa kokoonpuristuman suuruuteen, mutta välillä työn helpottamiseksi kontaktipinnat oletetaan liukumattomiksi. Tämä ei kuitenkaan ole oikea tapa.

Laakereiden tehtävänä on siis sallia rakenteiden kiertymä sekä sallia vaakakuormien aiheuttama sivuttaisliike Δ_s , kuten kuvassa 4 on esitetty. Raudoittamattomien yksikerroksisten laakereiden oletetaan usein kuitenkin vain tasaavan tukireaktioita tasaisemmaksi kontaktipinnoille. Toimivuudessa on kuitenkin ilmennyt ongelmia, sillä laakerit ovat ryömineet eli liikkuneet sivusuunnassa vaakakuormien vaihdella, ja tämä vaikuttaa kokoonpuristuvuuteen.



Kuva 3. Kokoonpuristuma ja leikkausmuodonmuutos kuormasta P (Leskelä 2009, s. 3).



Kuva 4. Leikkaussiirtymä ja leikkausmuodonmuutos vaakakuormasta H (Leskelä 2009, s. 3).

Laakerin jännitystilat eri kohdissa laakeria ovat erilaiset. Jännitysten $\sigma(x, y, z)$ suuruus siis vaihtelee eri kohdissa, mutta niitä ei kuitenkaan tarkastella erikseen, vaan käytetään keskimääräistä puristusjännitystä $\sigma_c = P/A$ ja leikkausjännitystä $\tau_s = H/A$, jossa $A = ab$ (Leskelä 2009, s. 3). Näiden lisäksi tarkasteluun otetaan huomioon leikkausjännitykset ja niitä vastaavat leikkausmuodonmuutokset, jotka muodostuvat pystykuorman ja kiertymäkulman vaikutuksesta syntyvästä pullistumasta.

Laakerit käyttäytyvät eri tavoin staattisissa kuormituksissa verrattuna dynaamiseen kuormitukseen. Ominaisuudet ovat myös ajasta riippuvaisia. Tämä tarkoittaa sitä, että kumin jäykkyys on paljon suurempi, kun kuormitus on nopeaa ja lyhytaikaista verrattuna staat-

tisen ja pitkäaikaisen kuorman tapaukseen. Kumi myös viruu ajan myötä. Vaikka virumisella on suuri vaikutus todellisten muodonmuutosten kannalta, sitä ei kuitenkaan oteta yleensä huomioon.

Laakerin kumin liukukerroin riippuu kumin kovuudesta. Yksi tapa liukukertoimen laskeamiseen kovuuden avulla on seuraava kaava (Leskelä 2009, s. 4)

$$G(h) = 0,07 \cdot 1,045^h. \quad (10)$$

Jos kumin kovuus h on 50, liukukertoimeksi G saadaan 0,63 MPa ja kovuudella 70 saadaan liukukertoimen arvoksi 1,52 MPa. Näille kovuuksille viruman vaikutus näkyy, kun pitkäaikainen painumalisä on 25 % ja 45 % (Leskelä 2009, s. 4).

Laakerin mitoitukselle on olemassa erilaisia ohjeita ja näissä ohjeissa käytettävät parametrit vaihtelevat. Ohjeissa käytetään analyttisen kimmo-opin kautta johdettuja jännitystarkasteluja tai yksinkertaisia pienten muodonmuutosten kimmoteorian mukaisia malleja. Suurin osa mitoitustavoista on tarkoitettu dynaamisesti kuormitetuille siltalaakereille, mutta Leskelä (2009, s. 4) on poiminut ohjeista soveltuvia osia staattisesti kuormitettujen laakereiden mitoitukseen. Ohjeissa on kaikissa puristusjännitys rajattu melko pieneksi. Tämä johtuu siitä, että ohjeet on tarkoitettu homogeenisille kumilevyalaakereille, joita ei ole yleensä tarkoitettu suurille puristusjännityksille. Toisin sanoen tämä mitoitusmenetelmä ei sovellu tässä työssä myöhemmin esitettävälle laakereille, koska esiteltävät laakerit ovat nimenomaan tarkoitettu suurille jännityksille. Suurille jännityksille tarkoitetuille laakereille ei kuitenkaan löydy juurikaan mitoitusmateriaalia, joten esitellään yleispiirteisesti pienemmän jännityksen kestävien laakereiden mitoitusta. Myöhemmin esiteltävistä laakereista muutamat ovat homogeenisia kumilevyalaakereita, joten seuraavaksi esiteltävää mitoitushjetta voisi soveltaa niihin, mikäli puristusjännitystä rajataan mitoitusehtojen mukaisesti.

Vaikka ohjeita on useampia erilaisia, tarkastellaan tässä tutkielmassa vain yhtä eli Runko-BES ohjetta. Runko-BES perustuu Ruotsin tie- ja vesirakennusmenetelmään ja siinä esitetään seuraavat ehdot (Leskelä 2009, s.6):

- keskimääräinen puristusjännitys $\sigma_c \leq 10 \text{ MPa}$,
- kokoonpuristuma $\Delta_c \leq 3 \text{ mm}$ kokonaiskuormasta ja
- kokoonpuristuma $\Delta_c \leq 1,5 \text{ mm}$ muuttuvasta kuormasta.

Suhteelliselle kokoonpuristumalle on olemassa seuraavanlainen kaava (Leskelä 2009, s. 6):

$$\varepsilon_c = C_t \frac{P_k}{GA} \left(\frac{t}{a_0} \right)^2, \quad (11)$$

jossa C_t on levyn sivumittojen a ja b funktio

$$C_t(a, b) = \frac{\pi^4}{96 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)^4} \left(1 - \frac{2}{(2k-1)\pi} \frac{a}{b} \tanh \frac{(2k-1)\pi b}{2a} \right)}. \quad (12)$$

Kaavasta (11) saatavan kokoonpuristuman arvo ei kuitenkaan saa ylittää arvoa $\varepsilon_c \leq 0,15$. Puristava kuorma aiheuttaa laakeriin leikkausjännitystä ja sen suurin arvo on (Leskelä 2009, s. 7)

$$\tau_c = C_p \frac{t P_k}{a A}, \quad (13)$$

jossa kerroin C_p on levyn sivumittojen a ja b funktio $C_p = C_t C_{p2}$. C_t on kaavan (12) mukainen ja C_{p2} on puolestaan seuraavanlainen:

$$C_{p2}(a, b) = \frac{24}{\pi^4} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{(2k-1)^2} \left(1 - \frac{1}{\cosh(2k-1) \frac{\pi b}{2a}} \right) \sin(2k-1) \frac{\pi}{2}. \quad (14)$$

Keskimääräinen leikkausjännitys vaakakuormasta H on

$$\tau_s = \frac{H}{A}. \quad (15)$$

Tämän lisäksi pätee $\tan \gamma_s = \frac{\tau_s}{G}$. Kulmanmuutos lyhytaikaisista kuormista on $\tan \gamma_s \leq 0,3$ ja kaikki vaikutukset, eli rakenteen esijännitys, viruma, kutistuma ja lämpöliikkeet, mukaan lukien kulmamutokseksi tulee $\tan \gamma_s \leq 0,7$. Suurin leikkausjännitys τ_r aiheutuu levyn pintojen välisestä kiertymäkulmasta α , ja se voidaan laskea kaavalla (Leskelä 2009, s. 7)

$$\tau_r = C_\alpha \frac{G}{2} \left(\frac{a}{t} \right)^2, \quad (16)$$

missä kerroin C_α on levyn sivumittojen a ja b funktio

$$C_\alpha(a, b) = \frac{3}{\pi^2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \cosh \frac{n\pi b}{a}} \right). \quad (17)$$

Kaavoista (13) ja (16) saatujen leikkausjännityksien τ_c ja τ_r summa saa olla enintään $\tau_c + \tau_r \leq 2,5 \text{ MPa}$. Runko-BES:iin ei sisälly vaatimusta kiertymäkulman ($\alpha \geq 0,01 \text{ rad}$) huomioonottamista, mutta se olisi hyvä huomioida, sillä se vaikuttaa mitoitukseen oleellisesti. (Leskelä 2009, s. 7)

2.3 Palkin pään kiertymän laskenta

Laakerien yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on kiertymäkyky. Laakeri ei kuitenkaan, pysty kiertymään mahdollisia määriä, joten valmistaja asettaa sille maksimikiertymäarvon ominaisuuksien ja mittojen perusteella. Tämä kertoo kuinka paljon palkin pää voi kiertyä ilman, että laakeri menettää täydellisen toimintakykynsä. Todellisuudessa kiertymä ei aiheudu pelkästään palkin pään kiertymästä. Pilarin pään vinous sekä pilarin taipumat ja liikkeet lisäävät laakerin kiertymää palkin pään kiertymän lisäksi, ja ne voivat aiheuttaa merkittävänkin lisän laakerin kiertymään. Tässä työssä pilari on kuitenkin oletettu äärettömän jäykäksi ja betonin pinnat suoraksi. Laakeri tulee siis valita sen mukaan, mikä palkin pään kiertymä tulee olemaan. Tarkastellaan seuraavaksi siis hieman palkin pään kiertymän laskentaa.

Oletetaan, että palkki on suora ja sen korkeus on pieni jänneväliin verrattuna. Tällaiselle palkille pätee seuraavat kaavat (Rakennustekniikan käsikirja 1970, s. 751)

$$\frac{dQ_x}{dx} = -q_x \quad (18)$$

$$\frac{dM_x}{dx} = Q_x \quad (19)$$

$$\frac{d^2M_x}{dx^2} = -q_x \quad (20)$$

$$y'' = -\frac{M_x}{EI_x}, \quad (21)$$

jossa q_x on kuorman suuruus kohdassa x , Q_x on leikkausvoima kohdassa x , M_x on momentti kohdassa x , y on taipuma ja EI_x on kimmokertoimen ja jäyhyysmomentin yhteisvaikutus kohdassa x .

Silloin, kun palkin tuenta estää palkin sivuttaisliikkeet, palkin kiertymälle pätee seuraavat lausekkeet (Rakennustekniikan käsikirja 1970, s. 752):

$$\varphi_A = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{M_x}{EI_x} (L - x) dx \quad (22)$$

$$\varphi_B = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{M_x}{EI_x} dx, \quad (23)$$

jossa φ_A on palkin vasemman pään kiertymä ja φ_B palkin oikean pään kiertymä. Palkin taipumaviivan kaltevuus y' missä tahansa pisteessä C saadaan laskettua vasemman pään kiertymän avulla seuraavasti (Rakennustekniikan käsikirja 1970, s. 752):

$$y' = \varphi_A - \int_0^{x_c} \frac{M_x}{EI_x} (x_c - x) dx. \quad (24)$$

Vastaavasti taipuma y pisteessä C saadaan (Rakennustekniikan käsikirja 1970, s. 752)

$$y = \varphi_A x_c - \int_0^{x_c} \frac{M_x}{EI_x} (x_c - x) dx. \quad (25)$$

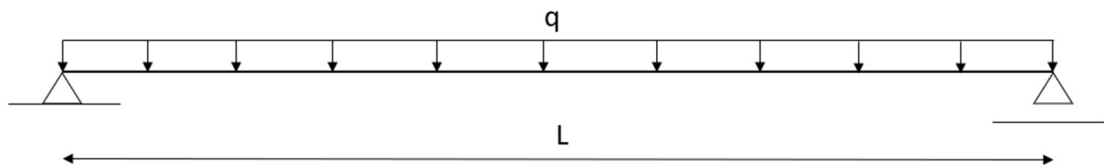
Palkkien mitoituksessa taipumalle asetetaan aina maksimi arvo, jota se ei saa ylittää. Pitkäaikaisilla kuormilla tämä arvo on $L/250$. Mikäli palkille halutaan asettaa jokin tietty maksimi taipuman arvo, palkin pään kiertymä voidaan arvioida yksinkertaistetulla mitoitusmenetelmällä, joka perustuu siihen, että kiertymä palkin päässä vastaa palkin keskellä kaksinkertaista taipuman arvoa. Kiertymän arvio norjalaisen mitoitusmenetelmän mukaan saadaan kaavalla (Jussila 2014, s. 27)

$$\alpha \approx \frac{k_n f_0}{L}, \quad (26)$$

jossa α on kiertymän arvo palkin päässä, k_n on erikseen määrätty kerroin, f_0 on palkin taipuma ja L on palkin jänneväli. Tasaisella kuormalla kerroin k_n on 3,2 ja taipuman arvolla $L/250$ kaavalla (26) kiertymän arvoksi saadaan $\alpha \approx 0,0128$ rad (Jussila 2014, s. 27).

2.4 Esimerkkilasku

Tarkastellaan kiertymän laskentaa kuvan 5 esimerkki tilanteessa, jossa yksiaukkoinen palkki on tuettu päistä nivelellisesti ja palkkia kuormittaa tasainen kuorma. Merkitään tasaista kuormaa kirjaimella q ja palkin pituutta kirjaimella L .



Kuva 5. Tasaisesti kuormitettu palkki

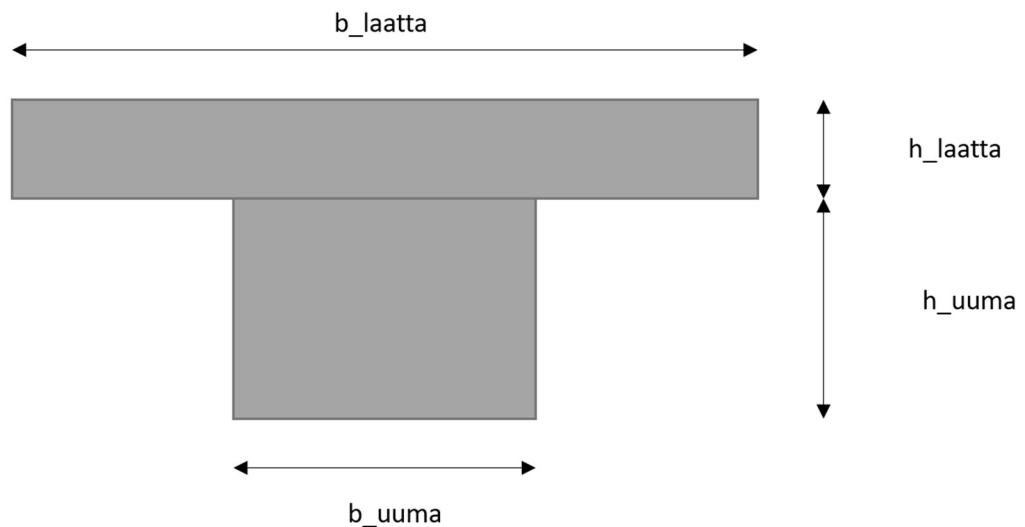
Pitkäaikaisilla kuormilla suurin sallittu taipuma on $L/250$. Todellisuudessa tämä taipuman ääriarvo ei välttämättä toteudu, koska halkeamaleveys voi myös tulla rakennetta määrittäväksi tekijäksi. Tätä varten pitäisi siis tehdä myös mitoitus halkeamaleveyden suhteen, mutta jätetään se pois tästä esimerkistä. Halkeilun lisäksi palkki viruu pitkäaikaisilla kuormilla. Halkeilu ja viruma heikentävät palkin poikkileikkauksen ominaisuuksia, ja ne pitää

ottaa taipuman laskennassa huomioon. Todellisuudessa taipuman arvoon vaikuttaa myös betonin kutistuma, eli $L/250$ ei ole kokonaan kuorman aiheuttamasta taipumasta vaan myös kutistuman aiheuttamasta taipumasta, mutta ei oteta kutistumaa tässä laskussa huomioon. Lasketaan siis palkin pään kiertymän arvo, kun palkki on taipunut $L/250$ verran, eli jätetään halkeamaleveyden mitoitus pois, mutta otetaan halkeilun ja viruman vaikutukset kimmokertoimeen huomioon. Lisäksi oletetaan, että kaikki taipuma tulee pitkäaikaisesta kuormasta.

Valitaan käytettäväksi betoniksi C35/45. Tällöin puristuslujuus on $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$. Tästä saadaan keskimääräiseksi puristuslujuudeksi $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 43 \text{ MPa}$. Tällä arvolla voidaan laskea betonin lyhytaikainen kimmokerroin

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} = 22 \left(\frac{43}{10} \right)^{0,3} = 34\,077 \text{ MPa}. \quad (27)$$

Tarkasteltavan palkin poikkileikkaus on kuvan 6 mukainen laattapalkki. Palkissa on raudoituksena 10 kappaletta T32 pääteräksiä, joiden laatu on B500B. Teräksen kimmokerroin E_s on $200\,000 \text{ MPa}$. Palkin jänneväli L on 9500 mm , jolloin $L/250 = 38 \text{ mm}$.



Kuva 6. Palkin poikkileikkaus

Laatan toimivaleveys toimii puristuspintana ja palkin poikkileikkausmitat ovat seuraavallaiset:

$$h_{uuma} = 520 \text{ mm}$$

$$h_{laatta} = 280 \text{ mm}$$

$$b_{uuma} = 700 \text{ mm}$$

$b_{laatta} = 3600 \text{ mm}$.

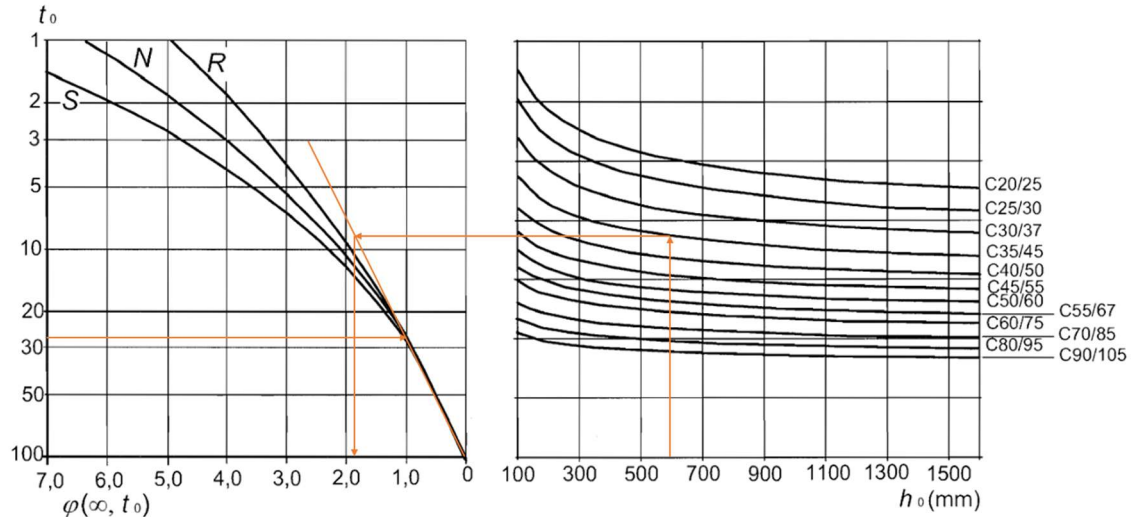
Palkin viruman huomioonottamista varten täytyy määrittää betonin pitkäaikainen kimmo-kerroin $E_{c,eff}$. Tätä varten täytyy määrittää betonille virumaluku $\varphi(\infty, t_0)$. (EN 1992-1-1 2004, s. 130) Virumaluvun voi määrittää joko laskemalla tai kuvaajasta määrittämällä. Kuvaajasta määrittäminen on epätarkempaa, mutta se on nopeampaa. Määritetään tässä siis virumaluku kuvaajasta. Tätä varten täytyy laskea poikkileikkauksen muunnettu paksuus, mikä voidaan laskea kaavalla (EN 1992-1-1 2004, s. 33)

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}, \quad (28)$$

jossa A_c on palkin poikkileikkauspinta-ala ja u on poikkileikkauksen piirin yhteenlaskettu pituus, josta kuivumisista voi tapahtua. Jos oletetaan, että palkki voi kuivua vain alaspäin, muunnettu paksuus lasketaan kaavalla (28) seuraavasti:

$$h_0 = 2 \cdot \frac{520 \text{ mm} \cdot 700 \text{ mm} + 280 \text{ mm} \cdot 3600 \text{ mm}}{700 \text{ mm} + 2 \cdot 520 \text{ mm} + 2900 \text{ mm}} = 591 \text{ mm}.$$

Oletetaan, että käytetty sementti on normaalia sementtiä, jolloin kuvan 7 vasemmassa kuvaajassa katsotaan *N* käyrää. Virumaluvun määrittämiseen tarvitaan myös palkin kuorimituksen alkamisajankohta t_0 . Valitaan alkamisajankohdaksi 28 vuorokautta.



Kuva 7. Kuvaaja virumaluvun määrittämiseen (EN 1992-1-1 2004, s. 31)

Virumaluvun määrittäminen lähtee siitä, että kuvan 7 vasemmassa kuvaajassa piirretään t_0 kohdalta suora viiva *N* käyrään asti. Tähän kohtaan piirretään viiva, joka lähtee kuvaajan oikeasta alakulmasta. Seuraavaksi piirretään oikealla olevaan kuvaajaan muunnetun paksuuden kohdalta viiva, joka nousee oikean betonin käyrälle asti. Tästä pisteestä piirretään viiva vasempaan kuvaajaan piirrettyyn viivaan asti, minkä jälkeen leikkauskoh-

dasta voidaan piirtää viiva kuvaajan x-akselille ja saadaan virumaluku. Tässä tapauksessa virumaluvuksi saadaan $\varphi(\infty, t_0) = 1,9$. Seuraavaksi voidaan laskea betonin pitkäaikainen kimmokerroin (EN 1992-1-1 2004, s. 130)

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)} = \frac{34\,077\text{ MPa}}{1 + 1,9} = 11\,751\text{ MPa}. \quad (29)$$

Neutraaliakselin korkeutta tarvitaan jäyhyysmomentin laskemiseen. Sitä varten täytyy laskea ensin kimmokerroinsuhde $\alpha_{e,eff}$, palkin tehollinen korkeus d ja raudoitussuhde ρ_1 . Kimmokerroinsuhde lasketaan seuraavasti (BY 211 2013, s. 204):

$$\alpha_{e,eff} = \frac{E_s}{E_{c,eff}} = \frac{200\,000\text{ MPa}}{11\,751\text{ MPa}} = 17,0. \quad (30)$$

Palkin tehollinen korkeus arvioidaan siten, että palkin korkeudesta vähennetään peitepaksuus, hakaraudoituksen paksuus sekä puolet pääteräksen paksuudesta eli $d = 800\text{ mm} - 25\text{ mm} - 8\text{ mm} - 32\text{ mm}/2 = 751\text{ mm}$. Raudoitussuhde saadaan laskettua kaavalla (BY 211 2013, s. 213)

$$\rho_1 = \frac{A_s}{bd} = \frac{10 \cdot 804\text{ mm}^2}{3600\text{ mm} \cdot 751\text{ mm}} = 0,0030, \quad (31)$$

jossa A_s on pääterästen yhteenlaskettu poikkipinta-ala, b on puristuspuoleisen pinnan leveys ja d on tehollinen korkeus. Seuraavaksi voidaan laskea neutraaliakselin korkeus x kaavalla (BY 211 2013, s. 205)

$$\begin{aligned} x &= \alpha_{e,eff} d \rho_1 \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_{e,eff} \rho_1}} \right) \\ &= 17,0 \cdot 751\text{ mm} \cdot 0,0030 \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{17,0 \cdot 0,0030}} \right) = 205\text{ mm}. \end{aligned} \quad (32)$$

Neutraaliakselin avulla voidaan laskea palkin jäyhyysmomentti I seuraavasti (BY 211 2013, s. 206):

$$\begin{aligned} I &= \frac{bx^3}{3} + \alpha_{e,eff} \cdot A_s (d - x)^2 \\ &= \frac{3600\text{ mm} \cdot (205\text{ mm})^3}{3} + 17,0 \cdot 10 \cdot 804\text{ mm}^2 \cdot (751\text{ mm} - 205\text{ mm})^2 \\ &= 5,108 \cdot 10^{10}\text{ mm}^4. \end{aligned} \quad (33)$$

Luvussa 2.3 esitetty tapa laskea kiertymän ja taipuman arvo on melko työläs tehdä käsin, ja tässä esimerkissä lasketaan kiertymän arvo sen mukaan, mikä taipuman arvo on, eli lasku suoritetaan käänteisessä järjestyksessä. Käytetään siis tässä esimerkkilaskussa

lujuusopista tuttuja valmiita kaavoja. Salmen ja Pajusen (2018, s. 442) Lujuusoppi-kirjan takaa löytyvistä taulukoista löytyy tasaisesti kuormitetun nivelellisen palkin taipuman kaava

$$v = \frac{5qL^4}{384E_{c,eff}I}. \quad (34)$$

Kaavasta (34) voidaan ratkaista kuorma q , joka on siis tässä esimerkkitapauksessa pitkäaikainen kuorma,

$$q = \frac{384E_{c,eff}Iv}{5L^4} = \frac{384 \cdot 11\,751 \text{ MPa} \cdot 5,108 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \cdot 38 \text{ mm}}{5 \cdot (9500 \text{ mm})^4} = 215 \frac{\text{N}}{\text{mm}}.$$

Kiertymälle v' löytyy myös valmis kaava Salmen ja Pajusen (2018, s. 442) taulukoista, jossa kiertymä on laskettu taipuman derivaattana. Kun kuorma on ratkaistu, kiertymän arvoksi saadaan

$$v' = \frac{qL^3}{24E_{c,eff}I} = \frac{215 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (9500 \text{ mm})^3}{24 \cdot 11\,751 \text{ MPa} \cdot 5,108 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4} = 0,0128 \text{ rad} = 12,8 \text{ mrad}, \quad (35)$$

joka vastaa siis kaavalla (26) saatua arviota.

Tässä esimerkissä siis jätettiin halkeamaleveyden mitoitus pois, sekä kutistuman vaikutus jätettiin myös huomioimatta. Todellisuudessa sallittu taipuma ei muodostu pelkästään kuorman aiheuttamasta taipumasta vaan $L/250$ arvo sisältää myös kutistuman vaikutuksesta tapahtuneen taipuman osuuden. Tällöin kuorman aiheuttama taipuman arvo on hieman pienempi, ja täten myös taipuman aiheuttaman kuorman suuruus on pienempi. Kiertymän arvo on kuitenkin sama, vaikka taipuma olisi muodostunut pitkäaikaisen kuorman ja kutistuman summasta, mikäli taipuman summa rajataan arvoon $L/250$.

3. MARKKINOILLA OLEVIA LAAKERITYYPPEJÄ

3.1 Laakerin valintaperiaatteita

Laakerin valintaa tehdessä tulee ottaa huomioon monia tekijöitä, joita yleensä ovat: kuormat, liikevarat, kiertymä, kitkakerroin, palonkesto, käyttölämpötila, käyttöikä, mitat ja tuotehyväksyntä (Naulankanta 2019). Kuormia laskettaessa ei käytetä murtorajatilän varmuuskertoimia vaan tarkastellaan kuormia ominaisyhdistelmien avulla. Laakeriin saattaa kohdistua hyötykuormaa useammasta hyötykuormaluokasta, jolloin kuorman laskentaan käytetään suunnittelunormin kuormien yhdistelysääntöjä. Pilarilaakereille kohdistuva kuorma ilmoitetaan yleensä yksikössä kN.

Liikevaroja ja vaakasuuntaista liikettä ei ole tässä tutkimuksessa käyty tarkemmin, mutta käydään tässä läpi niihin vaikuttavat tekijät lyhyesti. Liikevaroissa otetaan huomioon laakeriin kohdistuvat liikkeet, jotka muodostuvat rakenteiden kutistuman, viruman, kimmoisen kokoonpuristuman ja lämpötilan vaihtelun muodonmuutoksista. Tämä liike voi syntyä laakeriin joko poikki- tai pituussuunnassa. Kutistuman suuruus on yleensä paikallavaletun betonin kohdalla välillä 0,3–0,5 mm/m, riippuen siitä onko kyseessä sisä- vai ulkotilan betoni (Naulankanta 2019). Suhteellinen kosteus ja lämpötila ovat siis määrääviä tekijöitä kutistuman kohdalla. Viruma vaikuttaa laakerin liikevaroihin lähinnä rakenteen pituussuuntaisen viruman kautta. Virumaa aiheuttaa rakenteeseen vaikuttava puristusvoima, joka voi olla esimerkiksi maanpaine tai jännitysvoima. Mikäli rakenteessa ei ole puristusvoimaa, ei pituussuuntaista virumaa tapahdu. Jännitetyissä rakenteissa viruman suuruus on yleensä 0,05–0,1 mm/m (Naulankanta 2019). Maanpaine tai jännitysvoima aiheuttavat myös betonin kimmoista kokoonpuristumaa.

Koska laakerin tarkoituksena on sallia rakenteille muodonmuutoksia aiheuttamatta ylimääräisiä rasituksia, laakerin kitkakerroin olisi hyvä saada mahdollisimman pieneksi. Liukulaakerien kitkakertoimet vaihtelevat 5–20 % välillä, kun taas kumi-betoniliitoksen kitkakerroin on luokkaa 80 % (Naulankanta 2019). Mitä suurempi kitkakerroin, sitä suurempia rasituksia syntyy rakenteisiin.

Laakeri tulee valita siten, että se kestää sekä työnaikaiset että käyttötilanteen lämpötilavaihtelut. Esimerkiksi Pohjois-Suomessa ulkotiloissa oleville laakereilla tarvittava lämpötilasieto vaihtelee välillä -42 - +34 °C (Naulankanta 2019). Etelämpänä pakkasensieto ei tarvitse olla niin paljon, mutta puolestaan helteen sieto pitää olla parempi. Nämä lämpötilat ylittyvät kuitenkin palotilanteessa. Laakerin voidaan olettaa olevan samaa palonkes-

toa kuin siihen liittyvät rakenteet (Naulankanta 2019). Niille on myös yleensä tiukat rajoitteet paloon osallistumiseen liittyen. Pysäköintirakennuksissa laakerit eivät yleensä saa osallistua paloon ollenkaan tai voivat osallistua hyvin vähän. Myös savuntuotto ja palavien pisaroiden synty pitää olla vähäistä.

Kumilevylaakereille ei ole mahdollista saada CE-merkintää, koska niille ei ole olemassa harmonisoitua standardia. Laakerit voidaan kuitenkin CE-merkitä ETA-hyväksynnän kautta. Myöskään tyyppihyväksyntä ei ole mahdollista. Tuotehyväksyntä saadaan valmistuksen laadunvalvonnan varmennuksella tai rakennuspaikkakohtaisella hyväksynnällä. (Naulankanta 2019)

3.2 Laakerityyppejä

Laakerityyppejä on olemassa useampaa erilaista. Tavallisen kumilevylaakerin lisäksi on olemassa teräslevyillä vahvistettuja levylaakereita sekä liukulaakereita. Levylaakereiden etu tavallisiin kumilevylaakereihin on parempi puristusjännityksen kesto. Liukulaakereilla puolestaan saadaan parempi sieto sivuttaisliikkeelle. Myös muita erilaisia laakerityyppejä on olemassa, mutta niitä ei tarkastella tässä tutkielmassa.

Suomessa laakereita ei valmisteta, mutta esimerkiksi Saksassa on useampi yritys jotka, ovat erikoistuneet laakereihin. Calenberg, ESZ ja Leschuplast GLT valmistavat kaikki erilaisia laakereita, ja jokaiselta löytyy muutamia, jotka on tarkoitettu suuremmille jännityksille. Laakerivalmistajia on olemassa edellä mainittujen lisäksi muitakin, mutta kaikilla valmistajilla ei ole laakereita, jotka soveltuisivat suurille kuormille. On siis tärkeää tietää suunnitteluvaiheessa, millaisia kuormia rakenne tulee vastaanottamaan ja millaisia taipumia ja kiertymiä rakenteille syntyy. Laakerin vaihtaminen rakentamisen jälkeen ei onnistu helposti eikä halvalla. Käydään seuraavaksi läpi joitakin laakereita, jotka kestävät suuria kuormia.

3.2.1 Leschuplast GLT type N 20

Leschuplast GLT:n valmistamista kumilevylaakereista vain yksi soveltuu yli 15 MPa jännityksille ja loput soveltuvat maksimissaan tasan 15 MPa tai sitä pienemmille jännityksille. Leschuplast GLT type N 20 on nimetty suoraan sen mukaan kuinka suuren jännityksen se kestää eli 20 MPa. Kyseinen laakeri on raudoittamaton elastomeerinen laakeri ja se on suunniteltu staattisen kuormituksen käyttöön. Sen tarkoituksena on siis puhtaasti tasata kuormitusta rakenteissa. Type N 20 laakeria valmistetaan 5, 10, 15 ja 20 mm paksuisina. Suurin sallittu kiertymän arvo on 0,03 rad. Sallittua kiertymää ei kuitenkaan ole eritelty tarkemmin eri kuormitusarvoille tai eri kokoisille laakereille. (Leschuplast

GLT 2012) Koska laakerin kiertymäkyky heikkenee puristusjännityksen kasvaessa, on hyvä olettaa, että 0,03 rad kiertymä ei toteudu suurimmilla kuormien arvoilla.

3.2.2 ESZ Type 200

Myös ESZ valmistaa raudoittamattomia laakereita, joista ESZ Type 200 kestää saman 20 MPa jännityksen. Myös valmistus paksuudet ovat samat kuin Leschuplast GLT:n valmistamassa laakerissa. ESZ Type 200 laakerin esitteessä mainitaan, että sallittu kiertymä vaihtelee 0,0 radiaanista jopa 0,05 radiaaniin. Esiteessä mukana olevista taulukoista nähdään kuitenkin, että mikäli laakerille sallitaan 0,05 rad kiertymä, niin sallitut jännitykset tippuvat 11 MPa:iin ja sen alle. 20 MPa jännityksiin päästään silloin kun kiertymän arvo on noin 0,01 rad tai sen alle. Sallitun jännityksen suuruus riippuu myös laakerin sivujen mitoista a ja b . Mitä isompi laakeri on kyseessä, sitä isompia kuormia se kestää samalla kiertymän arvolla. (ESZ Type 200)

3.2.3 ESZ Type C-20-E

ESZ valmistaa myös toista raudoittamatonta kumilevylaakeria, joka kestää 20 MPa jännityksen. ESZ Type C-20-E valmistetaan kolmessa paksuudessa: 10 mm, 15 mm ja 20 mm. Laakerin esitteestä nähdään, että sallittu kiertymä vaihtelee 0 rad ja 0,04 rad välillä. Kuten aikaisemmin mainituilla laakereilla, sallittu kiertymän arvo riippuu suuresti, minkä paksuinen laakeri on ja mikä on kuorman suuruus. (ESZ Type C-20-E)

3.2.4 Calenberg Compact Bearing S70

Calenbergin valmistava vastaava kumilevylaakeri (Compact Bearing S70) on suurin piirtein samanlainen. Kuten ESZ Type C-20-E, Calenberg valmistaa laakeria pääasiassa vain 10, 15 ja 20 mm paksuisina. Esitteessä toki lukee myös paksuudet 5 mm ja 8 mm, mutta näille paksuuksille ei ole vielä viranomaisten hyväksyntää. Compact Bearing S70 on myös mitoitettu 21 MPa asti, mutta samaan tapaan kuin edellä esitellyissä laakereissa, laakerin koko ja sallittu kiertymä vaikuttaa kuinka suuren jännityksen se kestää. Calenberg ilmoittaa kiertymän maksimi arvoksi 0,04 rad. Taulukoiden mukaan tähän kiertymään päästään isommilla laakereilla myös sinne 21 MPa:iin, mutta tuohon 0,04 radiaanin kiertymään on otettu mukaan vinoudesta aiheutuva 0,01 radiaanin lisä sekä epätasaisuudesta aiheutuva lisä. Epätasaisuuden lisä lasketaan kaavalla $625/a$, jossa a on laakerin lyhyemmän sivun mitta. Toisin sanoen suurilla jännityksen arvoilla ei kuitenkaan saada niin suurta kiertymävaraa palkin kiertymälle. (Calenberg 2020a)

3.2.5 Calenberg Perforated™ Bearing Type Z

Mikäli halutaan päästä vielä suurempiin jännityksiin, ei tavallinen kumilevy-laakeri enää riitä. Calenbergiltä löytyy pari teräksellä raudoitettua laakeria, joista toinen on Perforated™ Bearing Type Z, mikä kestää 25 MPa jännityksen. Perforated™ Bearing Type Z on rei'itetty laakeri, joka koostuu 6 mm paksuisista elastomeeri kerroksista ja 3 mm paksuisista teräskerroksista. Se on myös mahdollista saada liukulevyllä, jolloin sivuttaisliikkeiden sieto paranee huomattavasti. Kuten aikaisemmin esitettyssä Calenbergin laakerissa, myös tässä sallituksi kiertymän arvoksi on merkitty 0,04 rad. Type Z laakeria valmistetaan 2-kerroksisesta 6-kerroksiseen laakeriin, joissa kerrosten lukumäärä kertoo elastomeerien lukumäärän ja niiden välissä on sitten teräslevyt. Vastaavasti liukulevyillä varustetuissa laakereissa liukulevy korvaa yhden elastomeerikerroksen. (Calenberg)

3.2.6 Calenberg Sandwich Bearing Q

Sandwich Bearing Q on toinen Calenbergin valmistama raudoitettu laakeri, ja Perforated™ Bearing Type Z laakeriin verrattuna se on rei'ittämätön ja sitä valmistetaan 10, 20, 30 ja 40 mm paksuisina. Sandwich Bearing Q kestää jännitystä jopa 28 MPa, ja sallittu kiertymä on 0,04 rad silloin, kun laakerin paksuus t on 10 mm, ja 0,043 rad silloin, kun $t > 10$ mm. Calenbergin laakereiden tapaan kiertymänsä sisältää vinoudesta ja epätasaisuudesta huomioon otettavat kiertymänsä. (Calenberg 2020b)

3.2.7 ESZ Fosta sliding bearing HP

Myös ESZ valmistaa raudoitettuja liukulaakereita. ESZ Fosta sliding bearing HP kestää 25 MPa puristusjännityksen ja ilmoitettu kiertymänsä on 0,02 rad. Tietysti tässäkin tapauksessa laakerin koko ja paksuus vaikuttaa todelliseen sallittuun kiertymään. Kyseistä laakeria tehdään vain 14 mm ja 20 mm paksuisina. (ESZ Fosta sliding bearing)

3.3 Esimerkkilasku

Tutkitaan luvussa 2.3 käytyä kiertymän esimerkkiä ja lasketaan millaisia kuormia rakenne aiheuttaa pilarille, jos pilarin koko on 300 mm x 300 mm. Salmen ja Pajusen (2018, s. 422) Lujuusoppi-kirjasta voidaan ottaa tukireaktion kaava nivelellisesti tuetulle palkille ja laskea pilarille tulevan kuorman suuruus. Otetaan luvun 2.3 esimerkistä laskettu kuorman suuruus sekä jännevälin mitta. Näin voidaan laskea

$$F = \frac{1}{2}qL = \frac{1}{2} \cdot 215 \frac{N}{mm} \cdot 9500 \text{ mm} = 1\,021,3 \text{ kN}, \quad (36)$$

jossa F on tukireaktion ja samalla pilarille tulevan kuorman suuruus. Laakeri tulee valita pilarin kokoon nähden siten, että laakerin reunat ovat pilarin hakaraudoituksen sisäpuolella. Tällöin laakerilta tuleva kuorma ei aiheuta betonin suojapeitteen halkeilua. Pilarin koko on nyt 300 mm x 300 mm, ja luvun 2.3 esimerkissä betonipeitteen paksuus oli 25 mm ja hakaterästen paksuus 8 mm. Laakeri tulisi mitoittaa niin, että se on mahdollisimman pieni, jolloin kuorma saadaan keskitettyä (Jussila 2014, s. 23). Ei kuitenkaan tehdä tarkkaa mitoitusta tässä työssä vaan oletetaan, että se riittää, kun laakeri mahtuu pilarin hakaraudoituksen sisäpuolelle. Näin ollen laakerin sivun pituus voi maksimissaan olla 234 mm. Nyt voidaan laskea laakerille tuleva puristusjännitys

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1\,021,3 \text{ kN}}{234 \text{ mm} \cdot 234 \text{ mm}} = 18,7 \text{ MPa}. \quad (37)$$

Valmistajat eivät kuitenkaan valmista juuri tämän kokoisia laakereita, vaan taulukoista löytyvien laakereiden koko vaihtelee. Saatavat koot ovat yleensä 200 mm tai 230 mm. Etsitään kaikkien edellä esitettyjen laakereiden tiedoista sopivan kokoiset laakerit ja listataan ne taulukkoon 1. Taulukkoon 1 on myös laskettu puristusjännitys, joka syntyy 1 021,3 kN kuormasta valittuun laakerin kokoon.

Taulukko 1. Esimerkki laakerit

Laakerityyppi	Laakerin mitat [mm x mm]	Puristusjännitys σ [MPa]	Paksuus t [mm]	Sallittu jännitys σ [MPa]	Sallittu kiertymä α [rad]
Leschuplast GLT type N20	200 x 200	25,5	20	20,0	0,02
ESZ Type 200	230 x 230	19,3	20	17,9	0
ESZ Type C-20-E	230 x 230	19,3	15	20,0	0,013
ESZ Fosta sliding bearing HP	200 x 200	25,5	20	25,0	0,01
Calenberg Compact bearing S70	200 x 225	22,7	20	18,5	0,04 (0,027)
Calenberg Sandwich Q	200 x 200	25,5	20	28,0	0,035 (0,022)
Calenberg Perforated™ Bearing Type Z	200 x 200	25,5	33	25,0	0,024

Taulukosta 1 nähdään, että kaksi ensimmäistä laakeria eivät kelpaa, sillä sallittu jännitys jää alle laskettuun arvoon nähden. Huomioitavaa ESZ Type 200 laakerissa on, että 20 MPa arvoon ei päästä näin pienellä laakerilla, vaikka kiertymää ei sallita yhtään. Mikäli tälle laakerille sallitaan kiertymää, sallittu puristusjännitys tippuu vielä enemmän. ESZ Type C-20-E puolestaan kestää puristusjännityksen, ja sallittu kiertymä on myös yli lasketun arvon (0,0128 rad). ESZ Fosta sliding bearing HP laakeri ei myöskään sovellu

jännityksen tai kiertymän puolesta. Calenbergin Compact bearing S70 puristuskestävyys jää myöskin tämän kokoisella laakerilla alle vaaditun arvon. Jotta puristusjännitys saataisiin tarpeeksi korkeaksi, tarvitsee laakerin kokoa kasvattaa. Raudoitetuista laakereistakin vain Calenbergin Sandwich Q laakeri käy. Vertailuun on otettu 15 mm paksuinen laakeri, mutta tätä laakeria valmistetaan myös 20 mm paksuisena, ja myös tämä olisi sopiva. Toisen raudoitettun laakerin (Calenberg Perforated™ Bearing Type Z) puristuskestävyys jää myös alle, koska valmistettava laakeri on vain 200 mm leveä.

Vertailusta nähdään, että vain kaksi laakeria kelpaa tämän laskelman mukaan. Huomioitavaa on, että toinen kelpaavista laakereista on raudoittamaton kumilevy-laakeri (ESZ Type C-20-E) ja yksi kelpaamattomista laakereista on raudoitettu laakeri (Calenberg Perforated™ Bearing Type Z). Vaikka raudoitettu laakeri kestää yleisesti isomman puristusjännityksen, tässä tapauksessa saatavilla olevat laakerin koot vaikuttavat asiaan. Hyvin suurilla kuormilla laakerin koon vaihtuminen vaikuttaa hyvin nopeasti laakerin puristusjännityksen kestävyteen.

On kuitenkin syytä ottaa huomioon, että laskelma on melko suurpiirteinen. Todellisuudessa tukireaktio on suurempi, sillä tässä kuorma laskettiin ottaen huomioon vain pitkäaikainen tilanne. Ominaiskuorma on todellisuudessa suurempi, jolloin myös tukireaktio on suurempi. Pitkäaikainen kuorma tosin ei ole niin suuri laskussa tehtyjen yksinkertaistuksien vuoksi. Kuitenkin puristusjännitystä aiheuttava tukireaktio on ominaisyhdistelmällä suurempi, sillä hyötykuorma otetaan kokonaisuutena eikä vain pitkäaikaisosuu-
tena.

3.4 Laakerien kestävyysominaisuudet

Laakereiden palonkestävyydestä ei ole paljon tietoa, mutta esimerkiksi Calenberg ilmoittaa laakereiden olevan palonkestoluokassa R90 tai R120 (Calenberg 2020a) ja ESZ ilmoittaa paloluokasta R90 (ESZ Fosta sliding bearing). Lämpötilan kestävyyttä voidaan kuitenkin tarkastella hieman tutkimalla materiaaleja ja niiden ominaisuuksia. Laakereissa käytettävät kumit ovat yleensä joko luonnonkumia (NR, Natural Rubber) tai CR-kumia (Cloroprene Rubber), joka tunnetaan myös nimellä neopreenikumi (Jussila 2014, s. 2), mutta myös muita kumilaatuja käytetään. Esimerkiksi Calenbergin Compact Bearing S70 on valmistettu EPDM kumista.

Vaikka kumilajeja on erilaisia, niillä on kuitenkin samoja piirteitä kestävyiden kannalta. Lämpötilan noustessa osa mekaanisista ominaisuuksista muuttuvat huomattavasti. Esimerkiksi luonnonkumin vetolujuus huoneen lämmössä on 30 MPa, mutta pienenee 23 MPa:iin 80 °C:ssa ja 140 °C:ssa vetolujuus on jo vain 5 MPa (Ciesielski 2000, s. 13).

Vaikka kumille on ilmoitettu, että se kestää lämpötilannousua tiettyyn pisteeseen asti, ei voida olettaa, että kumin laatu pysyy samanlaisena pidempään tässä lämpötilassa (Ciesielski 2000, s. 12). Mikäli kumi on korkeammassa lämpötilassa pidempään, sen ominaisuudet heikkenevät nopeammin verrattuna siihen, että kumi altistuu korkealle lämpötilalle vain hetken.

Toinen asia mihin lämpötilannousu vaikuttaa, on kumin kemiallinen kestävyys. Esimerkiksi laakereille oleellinen haittatekijä on ilmakehän otsoni. Monille kumeille lämpötilannousu heikentää otsonin sietokykyä huomattavasti, ja sietokyky heikkenee sitä nopeammin, mitä enemmän lämpötila nousee. Jotkin kumit kestävät otsonia hyvin huoneen lämmössä, mutta esimerkiksi luonnonkumilla on huono otsonin sietokyky huoneen lämmössä (Ciesielski 2000, s. 12). Tämä pitää ottaa huomioon laakereiden ikääntymisen kannalta. EPDM on kuitenkin puolestaan hyvin sään ja otsonin kestävä (Ciesielski 2000, s. 20), joten tästä kumista valmistetut laakerit ovat kestävämpiä.

Korkeiden lämpötilojen lisäksi laakereiden käytössä tulee mahdollisesti huomioida myös lämpötilan aleneminen varsinkin, jos rakenteet ovat lämmittämättömiä ulkorakenteita. Esimerkiksi neopreenikumi jäykistyy lämpötilan ollessa noin -18 °C ja -40 °C :ssa siitä tulee haurasta (Ciesielski 2000, s. 17). Näihin ominaisuuksiin pystytään kuitenkin hieman vaikuttamaan erilaisilla lisäaineilla. Luonnonkumilla kylmän lämpötilan sieto on parempaa, sillä sen jäykkyys nousee huomattavasti vasta -57 °C :ssa (Ciesielski 2000, s. 16). Jos laakerin jäykkyys nousee, se tarkoittaa, että kiertymäkyky heikkenee. Tällöin laakeri ei pysty tasaamaan tukireaktiota yhtä hyvin, eikä liitos pysy enää nivelellisenä.

Kaikki edellä mainitut tekijät vaikuttavat kumin (laakerin) käyttöikään. Mitä enemmän kumia rasitetaan erilaisissa epäsuotuisissa olosuhteissa, sitä pienempi sen käyttöikä tulee olemaan. Laakerivalmistajat ovat kuitenkin laskeneet, että olosuhteet, joissa laakereita käytetään, ovat sen verran suotuisat, että laakerin käyttöikä on vähintään yhtä pitkä, kuin ympäröivän rakenteen. Siksi useimmat valmistajat mainostavat laakereiden olevan huoltovapaita ja kestäviä. Tästäkään ei kuitenkaan ole sen varmempaa eikä tarkempaa tietoa.

4. YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa käsiteltiin pilarilaakereita ja niiden ominaisuuksia. Laakereita käytetään palkki-pilariliitoksissa tasaamaan tukireaktiota ja estämään momenttirasitusten syntyä pilarille. Se, kuinka suuria jännityksiä laakeri kestää, riippuu laakerin koosta, paksuudesta ja kovuudesta. Toinen tärkeä ominaisuus on laakerin kiertymäkyky, jolla kerrotaan kuinka paljon palkin pää saa kiertyä, jotta se ei aiheuta ylimääräistä momenttia. Laakerin kiertymäkyky heikkenee, mitä suurempi puristusjännitys on.

Laakerin mitoitukselle ei ole olemassa tarkkaa ohjetta, ja mitoitusmenetelmiä on monia erilaisia. Laakereilla ei myöskään ole olemassa harmonisoitua standardia, joten laakereille ei saada CE-merkintää. Toisin sanoen laakereiden käyttö ei ole tarkkaan ohjattua. Laakerit ovat kuitenkin erittäin hyödyllisiä, joten yhtenäiset mitoitusohjeet ja standardit olisivat tarpeen, sillä tällä hetkellä joka maassa on omat menetelmät.

Markkinoilla on nykyään monia erilaisia laakereita tarjolla. Kumilevy-laakerit kestävät parhaimmillaan puristusjännitystä 21 MPa asti, mutta laakereista saadaan kestävämpiä, kun niitä vahvistetaan teräslevyillä, jolloin saadaan levy-laakereita. Parhaimmillaan laakerit kestävät siis jopa 28 MPa jännityksen. Toisaalta mitä suurempi puristusjännitys, sitä pienempi kiertymäkyky. Siksi suurilla kuormilla kannattaa suosia niin pieniä jännevälejä kuin mahdollista, jotta taipuma ja sen myötä palkin pään kiertymä ei kasva liian suureksi.

Olosuhteet vaikuttavat laakereissa käytettävän kumin säilyvyyteen. Vaikka valmistaja sanoo laakereiden kestävän korkeampia lämpötiloja, ei laakerit todellisuudessa välttämättä pysy hyväkuntoisina pidempään. Laakereiden tulisi siis altistua korkeille lämpötiloille vain hetkellisesti. Laakereiden palonkestävyydestä ei ole sen enempää tietoa, kuin se, mitä laakerivalmistajat ilmoittavat. Lämpötilan vaihtelun lisäksi ilma-kehan otsoni vaikuttaa säilyvyyteen, ja tässä vaikuttaa paljon se, mikä kumilaatu on kyseessä. Käytännössä talonrakennuksessa olosuhteet ovat yleensä kuitenkin suotuisat, ja siksi valmistajat lupaavat laakereiden olevan huoltovapaita koko rakenteen käyttöajan ajan.

LÄHTEET

- Aalto, J. Rak-54.1300 Rakenteiden mekaniikan perusteet. Luentomoniste. Rakenteiden mekaniikan seura ry. Saatavissa (viitattu 20.2): <http://rmseura.tkk.fi/opetusmonisteita/index.html>
- BY 211 (2013). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. Suomen betoni-yhdistys. Helsinki
- Calenberg. (2020a). Compact bearing S70 Technical Datasheet. Saatavissa (viitattu 31.3.2022): <https://www.naulankanta.fi/files/s70-tekniset-tiedot-en.pdf>
- Calenberg. (2020b). Sandwich Bearing Q. Technical datasheet. Saatavissa (viitattu 31.3.2022): <https://www.naulankanta.fi/files/sandwich-q-tekniset-tiedot-en.pdf>
- Calenberg. PerforatedTM bearing, Type Z. Saatavissa (viitattu 31.3.2022): <https://www.naulankanta.fi/files/perforated-type-z-esite-en.pdf>
- Ciesielski, A. (2000). An Introduction to Rubber Technology. Rapra Technology.
- EN 1992-1-1 (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. The European Union.
- ESZ Fosta sliding bearing. ESZ Wilfried Becker GMBH. Saatavissa (viitattu 31.3.2022): <http://www.mjanhunen.com/images/docs/ESZ%20Fosta%20ja%20ESZ%20Fosta%20HP%20laakerit.pdf>
- ESZ Type C-20-E. ESZ Wilfried GMBH. Saatavissa (viitattu 21.4.2022): <https://esz-becker.de/type-c-20-e.html>
- ESZ Type 200. ESZ Wilfried Becker GMBH. Saatavissa (viitattu 31.3.2022): <http://www.mjanhunen.com/images/docs/ESZ%20200%20laakeri,%20tekniset%20arvot.pdf>
- Jussila, S. (2014). Raudoittamattomien kumilevyllaakereiden mitoitus talonrakentamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Kankaanpää, P. (2020). Jälkijännitetyn betonipalkin pilariliitoksen toiminta pysäköintirakennuksissa. Diplomityö. Tampereen yliopisto.
- Laakerien valintaohje (2019). Naulankanta. Saatavissa (viitattu 10.3.2020): <https://www.naulankanta.fi/materiaalimyynti/talonrakentaminen/laakerit/pilarilaakerit/>
- Leschuplast GLT (2012). Sliding- and bearing technology. Muottikolmio. Saatavissa (viitattu 29.3.2022): http://www.muottikolmio.fi/wp-content/uploads/2018/03/Rakennuslaakerit_en.pdf
- Leskelä, M. (2009). Kumilevyllaakerien mitoittaminen. Oulun yliopisto.
- Rakennustekniikan käsikirja (1970). 1. Yleiset perusteet osa 2. Kustannusosakeyhtiö Tammi, Helsinki.
- Salmi, T. & Pajunen, S. (2018). Lujuusoppi. Pressus Oy, Tampere.

Vinha, J. & Lindberg, R. (1994). Mastopilari kehärakenteessa (suunnitteluohje). Tampereen teknillinen korkeakoulu.