

# TEKNINEN NURKKA: – KUMILEVYLAAKERIEN MITOITTAMINEN RTL 0105 -MUKAAN

Matti V. Leskelä, tekniikan tohtori



Kuvassa neopren-laakeri.

## 1 JOHDANTO

Vahvistamattomia neopren-kumilevylaakereita käytetään yleisesti elementtien välisissä liitoksissa niveltoiminnan ylläpitämiseksi. Kumilevyn tarkoituksena on jakaa siihen kohdistuva kuorma mahdollisimman tasaisesti ja sallia taipuvan elementin tuella tapahtuva kiertymä.

Kumilevyjen mitoittamisesta ei ole olemassa yhtenäisiä ja ajan tasalla olevia ohjeita ja olemassa olevat ohjeet eivät sisällä taustatietoja kumin mekaniikasta. Eri maissa on lisäksi toisistaan poikkeavia ohjeita ja niiden antamat mitoitus tulokset voivat poiketa merkittävästi. Kumin ominaisuuksia luokitellaan pintakovuuden perusteella.

Todellinen ongelma kumilevyissä on kumimateriaalin mekaanisten ominaisuuksien vaihtelevuus ja siitä aiheutuvat seurannaisvaikutukset. Oleellinen parametri kumiosissa on liukukerroin  $G$  ja sen riippuvuus kumin kovuudesta. Tyypillinen kumin kovuuden vaihtelu on  $\pm 10\%$  nimellisarvostaan, mikä toisaalta merkitsee, että vastaavasti liukukertoimen arvo vaihtelee  $\pm 20 \dots 25\%$ .

Vaikka kumille yleensä määritellään kolme nimellistä kovuusluokkaa, 50, 60 ja 70 ShoreA, toimit-

tajat myyvät itse asiassa keskimääräistä kumin kovuutta 60 ShoreA ja samasta materiaalista koetaan kovuutta mittaamalla valita haluttua luokkaa. Kokeiden ja mittausten perusteella on todettu, että kumin kovuus kasvaa kumin paksuuden kasvaessa.

Kumilevyjen mitoitusohjeen ja toimivuusselvityksen RTL 0105 on laatinut tekn. tri Matti V. Leskelä ja sen on tarkastanut Betonikeskuksen Elementtisuunnittelun asiantuntijaryhmä. Kokonaisuudessaan ohje löytyy osoitteesta [www.betoni.com](http://www.betoni.com).

## 2 KOKEISIIN JA KIRJALLISUUSTUTKIMUKSEEN PERUSTUVA MITOITUSMALLI

Seuraava mitoitusmalli ja siihen sisältyvät ehdot on koottu kumin mekaniikan kirjallisuustutkimuksen ja eri suunnitteluohjeissa esitettyjen vaatimusten perusteella vertaamalla niitä levyjen kuormituskokeissa todettuun toimintaan.

1. Kumin liukukerroin lyhytaikaisessa kuormituksessa on ShoreA-kovuuden  $h$  funktio:  
 $G(h) = 0,07 \times 1,045^h$ . Kovuutta  $h = 60$  vastaavana liukukertoimena voidaan käyttää  $G(60) = 1$  MPa. Kovuutta  $h = 55$  vastaava liukukerroin on  $G(55) = 0,8$  MPa.

2. Kumilevyn mitat ovat kuvan 1 mukaiset:  $a_0$  = levyn pienempi sivumitta,  $b_0$  = levyn suurempi sivumitta ja  $t$  = levyn paksuus. Kumilevyn muotoluku on  $S = \frac{a_0 b_0}{2t(a_0 + b_0)}$ . Levyn nimellispinta-ala on

$$A = a_0 b_0.$$

Yleensä kumilevyn muodolle asetetaan ehdot  $5 \leq a_0/t \leq 15 \dots 20$ . Tämän perusteella 8 mm paksuisen levyn pienempi sivumitta olisi enintään 120 ... 160 mm. Tässä mallissa ehdotetaan, että kumilevyn muodon tulee toteuttaa ehdot  $5 \leq a_0/t \leq 20$ . Levyn suuremmalle sivumitalle  $b_0$  ei aseteta ehtoja levyn paksuuden  $t$  suhteen. Kuitenkin aina  $a_0/b_0 \leq 1$ , kun  $a_0$  on tuettavan rakenteen suuntainen sivumitta.

3.  $P$  = laakeriin kohdistuva pystyreaktio ja  $H$  = laakeriin kohdistuva vaakareaktio. Näistä aiheutuva muodonmuutos- ja leikkausjännitystilä määrittelee osaltaan levyn kuormitettavuutta. Tuen kiertymäkulma  $\alpha$  vaikuttaa myös muodostuvaan jännitystilään ja otetaan huomioon levyn kuormitettavuutta arvioitaessa.

4. Keskimääräinen puristusjännitys  $\sigma_c = P/A$ , ja mitoitusehto ominaiskuormien vaikuttaessa on  $P_k \leq 2G(h)AS$ , jos tapaukseen ei liity kiertymä.

5. Samanaikaisen nimellisen puristuman  $d_c = \epsilon_c t$  ja kiertymäkulman  $\alpha$  vaikutus: nimellinen puristuma on  $d_c = \frac{t \sigma_c}{10GS + 2\sigma_c} \leq 0,15t$ . Tämä ehto voi-

daan muuttaa muotoon  $P_k \leq 2,14G(h)AS$ , eli se ei ole määräävä. Lisäksi tarkistetaan, että tukireaktion kokonaisarvo toteuttaa ehdon

$$P_k \leq \frac{2G(h)AS}{1 + \frac{a_0 \alpha}{4d_c}} \quad \text{kun tuen kiertymäkulma on } \alpha.$$

Elementtipalkkien tuilla otetaan aina huomioon kiertymäkulma, jonka suuruus on vähintään  $\alpha = 0,01$  rad. Tukireaktion tarkistusehtona voi-

$$\text{daan silloin käyttää rajaa } \frac{P_k \leq \frac{2G(h)AS}{1 + \frac{a_0 \alpha}{4d_c}} \text{ mikä on aina pienempi kuin } 2G(h)AS,$$

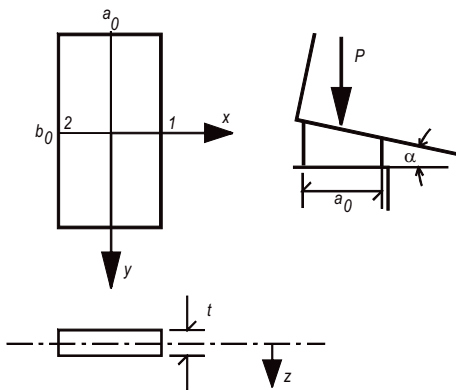
koska lausekkeen nimittäjä on suurempi kuin 1.

6. Leikkausjännityksien rajoittaminen: tuen painumasta ja kiertymästä aiheutuvien leikkausjännityksien summa saa olla enintään  $\tau_c + \tau_r \leq 2,5G$ ,

$$\text{missä } \tau_c = C_p \frac{t}{a_0} \frac{P_k}{A} \text{ ja } \tau_r = \alpha C_\alpha \frac{G}{2} \left( \frac{a_0}{t} \right)^2 \\ = 0,005 C_\alpha G \left( \frac{a_0}{t} \right)^2.$$

Kertoimien  $C_p$  ja  $C_\alpha$  arvot esitetään taulukkona 1.

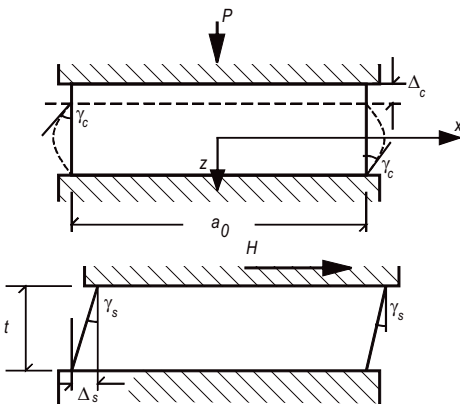
7. Vaakasiirtymistä ja vaakavoimasta  $H_k$  aiheutuva kokonaisleikkausmuodonmuutos  $\gamma_{max} \leq 0,7$  ja vastaava pintojen välinen suurin vaakasiirtymä



Kuva 1: Merkinnät

Kumilevyn sivumitta on  $a_0$  jätteen suunnassa ja  $b_0$  kohtisuorassa suunnassa. Yleensä  $a_0 < b_0$ . Kumilevyn nimellispaksuus =  $t$  ja koordinaatti paksuussuunnassa on  $z$ .  $x$  = rakenteen pituus-suunta.

Rakenteen taipumasta aiheutuva kiertymäkulma tuella on  $\alpha$  = levyn yläpinnan tason oletettu kallistuma vaakatasoon nähden.



Kuva 2 :

Kokoonpuristuma tai painuma  $\Delta_c$  ja leikkausmuodonmuutos  $\gamma_c$  kuormasta  $P$

Leikkausliirtymä  $\Delta_s$  ja leikkaus-muodonmuutos  $\gamma_s$  vaakakuormasta  $H$

$\Delta_s \leq 0,7t$ .  $\gamma_s = \frac{H_k}{GA}$  ja  $\gamma_{max} = \gamma_l + \gamma_s$ , missä  $\gamma_l$  = tuettavan rakenteen alapinnan vaakasiirtymistä (= pituuden muutos esijännityksestä, virumasta, kutistumasta ja lämpötilojen muutoksesta) aiheutuva leikkausmuodonmuutos.

8. Levyn liukumattomuusehto (= kitkan riittävyys estämään vaakavoiman  $H_k$  aiheuttama merkittävä liukuma kontaktipinnoissa): tukeutuvan rakenteen oman painon ominaistukireaktion  $P_{gk}$  perusteella vaaditaan, että  $P_{gk} \geq 7H_k - 4GA$  tai  $H_k \leq (P_{gk} + 4GA)/7$ . Tämä ehto perustuu siihen, että kumin kitkakerroin pienenee, kun pystysuora kuorma  $P$  kasvaa. Kitkakerroimen  $\mu$  suuruus voidaan esittää kuorman  $P$  funktiona muodossa  $\mu = \frac{1}{7} \left( 1 + 4 \frac{GA}{P} \right)$

9. Kumilevyn nimellinen kokoonpuristuma  $d_c$  on pienempi kuin todellinen kokoonpuristuma  $\Delta_c$  (kuva 2). Tarvittaessa kuorman  $P$  aiheuttama välitön todellinen kokoonpuristuma tarkistetaan lausekkeesta:

$$\Delta_c = \frac{tk_{slip}P}{8G_r(h)AS + 2k_{slip}P}$$

missä  $G_r(h) = G(h)s_f(S)$ ,  $s_f(S) = \left( \frac{S}{4,7} \right)^{0,3}$

ja  $k_{slip} > 1$  riippuu kontaktipintojen ominaisuuksista.  $\Delta_c$  on lyhytaikaiskuorman aiheuttama painuma, johon lisätään pitkäaikaisvaikutus, koska kumin viruminen on merkittävää. Levyn pystysuora kuormitus rajoitetaan niin, että  $\Delta_c \leq \Delta_{c,lim}$ .

### KUMILEVYJEN KUORMITETTAVUUS

Ehdotetun mallin mukaan kumilevyn kuormitettavuus  $P_k$  voidaan arvioida ehtojen (e.1) perusteella, kun  $5 \leq a_0/t \leq 20$  ja lisäksi käytetään oletusarvona  $\alpha \geq 0,01$  rad.

$$P_k = \min \{P_{k1}, P_{k2}, P_{k3}\}$$

$$P_{k1} = \frac{2G(h)AS}{1 + 1,7\alpha \frac{a_0}{t}}; P_{k2} = \frac{G(h)A a_0}{C_p t} \left[ 2,5 - 0,5\alpha C_\alpha \left( \frac{a_0}{t} \right)^2 \right]; \alpha \geq 0,01 \quad (e.1)$$

$$P_{k3} = \frac{8\Delta_{c,lim}G_r(h)AS}{(t - 2\Delta_{c,lim})k_{slip}}$$

missä kertoimet  $C_p$  ja  $C_\alpha$  ovat taulukon 1 mukaisia.  $P_{k1}$  rajoittaa kuormitettavuutta painumaehdon  $d_c < 0,15t$  mukaisesti,  $P_{k2}$  määrittelee kuormitettavuutta rajoittamalla leikkausjännityksiä  $\tau_c + \tau_r < 2,5G$  ja  $P_{k3}$  rajoittaa kuormitettavuutta todennäköisen maksimipainuman  $\Delta_{c,lim}$  mukaisesti. Runko-BES ohjeessa on käytetty  $\Delta_{c,lim} = 3$  mm, ja tätä painumarajaa käytetään edelleen.

### KUMILEVYJEN LAAJENEMINEN KUORMAN P VAIKUTTAESSA

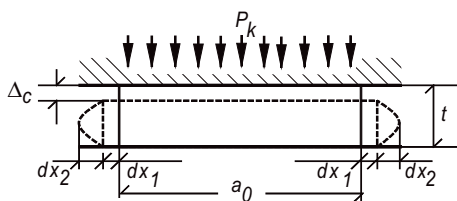
Kumimateriaalien suppeusluku on likimain 0,5, mikä tarkoittaa että tilavuuskerroin  $K = E/(3 - 6\nu)$  menee äärettömäksi ja kumi käyttäytyy tilavuuden muutoksen suhteen kuten nesteet (tilavuuden muutos  $\approx 0$ ). Tästä seuraa, että kumin painumisesta aiheutuu levyn ulkomittojen huomattava muutos, josta erotetaan kaksi osaa, pituudenmuutos  $dx_1$  ja sivun pullistuma  $dx_2$  kuvan 3 mukaisesti.

Kuvassa 4 pystyakselilla on laajeneminen  $s_b = dx_1 + dx_2$  ja vaaka-akselilla on levyn pienempi sivumitta ( $x = a_0$ ). Levyn paksuus kussakin tapauksessa on  $t =$  pienempi sivumitta  $x$  jaettuna 20:lla. Painumaehto tulee määrääväksi kun  $t > 16,5$  mm, eli kun levyn pienempi sivumitta on  $20 \times 16,5 = 330$  mm. Laajeneminen  $sb$  kasvavasi rajoituksetta, ellei painumaa  $\Delta_c$  rajoiteta kuormaa rajoittamalla.

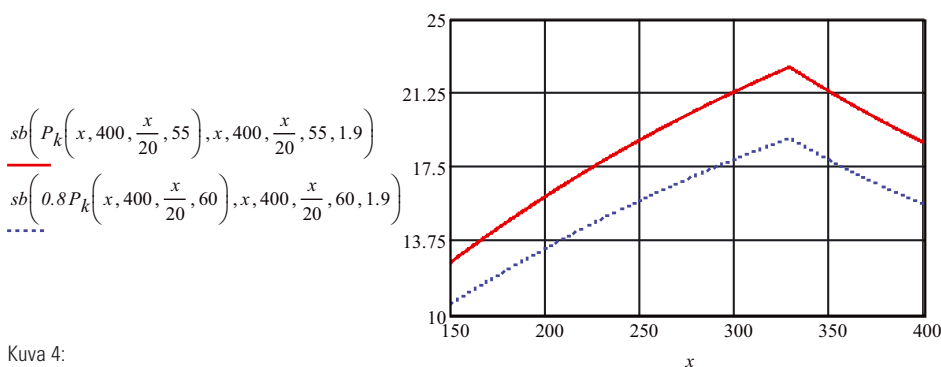
Kuva 4 osoittaa, että laajenema  $sb$  yhdellä sivulla on suurimmillaan noin 22 mm, kun levyn pienempi sivumitta kasvaa. Ohuiden levyjen (esim.  $t = 8$  mm) tapauksessa laajenema  $sb$  ei ole kovin suuri, mutta tuen kiertyessä jompaankumpaan suuntaan levyn eniten puristuva reuna voi kuormittaa tukirakenteen betonia suojabetonipaksuuden ulkopuolelta, jossa betoni on raudittamaton ja voi lohjeta paikallisesti. Tämä voidaan ottaa

Taulukko 1. Kumilevyjen leikkausjännityksien kertoimet  $C_p$  ja  $C_\alpha$

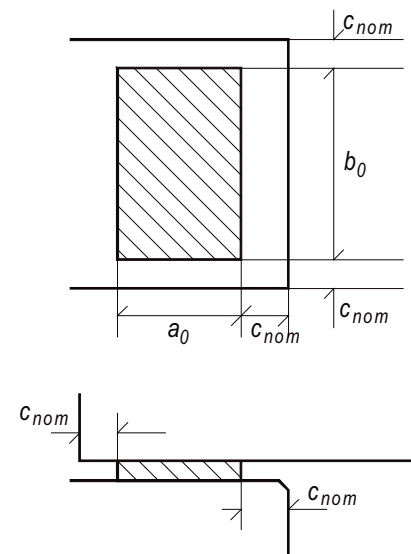
$b_0/a_0$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	10
$C_p$	4,73	4,28	4,02	3,84	3,70	3,60	3,51	3,45	3,40	3,35	3,32	3,15
$b_0/a_0$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2	3	> 3			
$C_\alpha$	0,464	0,471	0,476	0,48	0,483	0,485	0,489	0,49	0,49			



Kuva 3:  
Levyn tilavuuden muuttumattomuudesta aiheutuvat deformaatiot (laajeneminen) ovat suurimpia pienemmän sivumitan  $a_0$  suunnassa, eli pitemmät sivut  $b_0$  laajenevat  $dx_1 + dx_2$  verran.



Kuva 4:  
Kumilevyn laajeneminen  $sb$  kuormitettaessa kahta kovuutta, 55 ja 60 ShoreA olevia kumilevyjä samalla kuormalla.  $P_k(55)/P_k(60) = 0,8$ .  $x$  = levyn pienempi sivumitta  $a_0$  ja levyn paksuus  $t = x/20$ .



Kuva 5:  
Levyn nimelliskokoa  $a_0 \times b_0$  suunniteltaessa otetaan huomioon levyn laajeneminen siten, että levyn reuna jää tukipinnan reunan sisäpuolelle tukirakenteen suojaabetonin  $c_{nom}$  verran.

huomioon käyttämällä etäisyytenä levyn reunasta tukirakenteen reunan suojaabetonin paksuutta  $c_{nom}$  (kuva 5).

### 3 YHTEENVETO

#### KUMILEVYN KUORMITETTAVUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Suoritetun selvityksen mukaan kumilevyn kuormitettavuuteen vaikuttavat kolme esitettyjen yhtälöiden (e.1) mukaista kuormaa  $P_{k1}$ ,  $P_{k2}$  ja  $P_{k3}$  joista:

- $P_{k1}$  varmistaa, että levyn nimellinen keskimääräinen puristuma on enintään 15 %, mutta kyseinen puristuma ei tarkoita todellista painumaa. Lisäksi ehto rajoittaa tuella tapahtuvan rakenteen kiertymän 0,01 radiaaniin.
- $P_{k2}$  varmistaa, että levyssä pystysuorasta kuormasta ja tuen kiertymästä syntyvät leikkausjäntitykset toteuttavat ehdon  $\tau_c + \tau_r \leq 2,5G$ .
- $P_{k3}$  rajoittaa levyn kokonaispainuman enintään 3 mm arvoon.  $P_{k3}$  lausekkeesta näkyy, että ehdolla on merkitystä vain levyksuukien  $t > 6$  mm tapauksissa. Lausekkeen nimittäjä menee nolaksi, kun  $t = 6$  mm, jos painumarajana pidetään 3 mm.

#### LEVYN PAKSUUDEN VAIKUTUS

Levyn paksuutta ei tule valita pienemmäksi kuin 6 mm, vaikka kaavat osoittaisivat, että ohuemmalla levyllä saataisiin suurempi kuormitettavuus. Levyn muoto (sivusuhte  $a_0/b_0$ ) vaikuttaa selvästi kuormitettavuuteen ja paksuus alkaa rajoittaa kuormitettavuutta, kun  $t \geq 16$  mm. Paksuusraja on riippuvainen levyn suurimmasta sallitusta painumasta, joksi on valittu 3 mm. Tämän perusteella raudoitettavien levyjen käyttöalue rajoittuu levyihin  $t < 16$  mm.

Selvityksen RTL 0105 liitteessä A esitetään käyriä erilaisten levyjen kuormitettavuuksia, kun kumin kovuuden oletetaan olevan  $h = 55, 60$  tai  $65$  ShoreA. Niiden perusteella levyn paksuus  $t = 8$  mm ei ole aina soveltuvin ja toisaalta levyissä, joiden  $t > 8$  mm, muoto vaikuttaa kuormitettavuuteen eri tavoin.

#### KUMIN KOVUUDEN VAIHTELU JA SEN VAIKUTUS SUUNNITTELUUN

Kumilevyn toimittajat ilmoittavat kumin toimituskovuudeksi 60 ShoreA, mutta on huomattava, että samalla ilmoitetaan kovuuden voivan vaihdella  $\pm 5$  ShoreA, eli käytännössä kovuus voi olla 55 ShoreA.

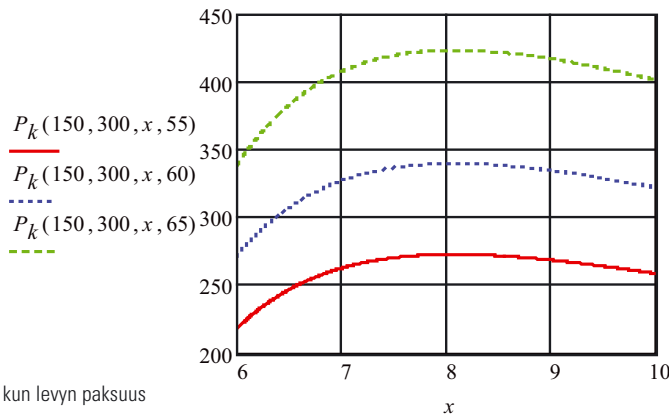
Epäedullisia vaikutuksia tarkasteltaessa on silloin syytä käyttää suunnittelukovuutena ko. alarajaa, koska kumilevyn toimittaja ei takaa, että ilmoitettua nimelliskovuutta ei aliteta.

#### KUMILEVYN LAAJENEMISEN HUOMIOON OTTAMINEN

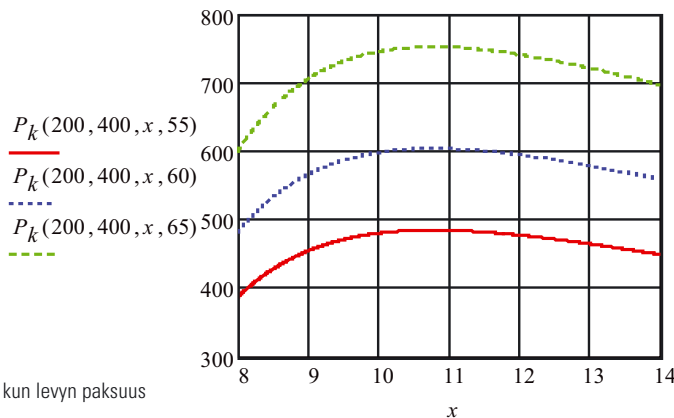
Kumilevyn pysyminen tukipintojen välissä varmistetaan kuvan 5 mukaisella järjestelyllä, joka myös ehkäisee tukirakenteen lohkeamisriskiä.

#### LEVYN PAIKALLAAN PYSYMISEN VARMISTAMINEN

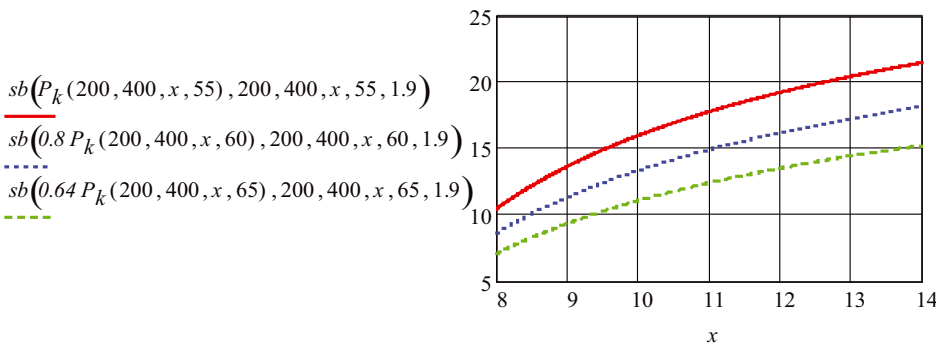
Levyn paikallaan pysyminen on varmistettava, jotta levy ei liiku vähitellen tukipintojen välissä. Kitkan riittävyys estämään vaakavoiman  $H_k$  aiheuttama merkittävä liukuma kontaktipinnoissa tarkistetaan tukeutuvan rakenteen oman painon ominais-tukireaktion  $P_{gk}$  perusteella. Tuettavan rakenteen pysyvä kuorma  $P_{gk}$  riittää estämään vaakavoiman  $H_k$  aiheuttaman liukuman, kun  $P_{gk} \geq 7 H_k - 4GA$  tai  $H_k \leq (P_{gk} + 4GA)/7$ .



Kuva 6:  
Levyn 150 x 300 kuormitettavuus, kun levyn paksuus  
 $6 \text{ mm} \leq x \leq 10 \text{ mm}$



Kuva 7:  
Levyn 200 x 400 kuormitettavuus, kun levyn paksuus  
 $8 \text{ mm} \leq x \leq 14 \text{ mm}$



Kuva 8:  
Kumilevyn 200 x 400 laajeneminen  $sb$  (mm) levyn paksuuden  $x$  muuttuessa, kun kuormana on 55 ShoreA kovuutta vastaava ehtoyhtälöiden (e.1) mukainen levyn sallittu kuorma.

9  
Kuvassa olevassa rakennuksessa on ollut rajua tulipalo. Neopren-laakeri on säilynyt tulipalotilanteesta yllättävän hyvässä kunnossa.

Vaakavoimana  $H_k$  otetaan huomioon seuraavat vaikutukset:

- Tuettavan rakenneosan kutistuman ja viruman aiheuttamat vaikutukset; kutistumaa ja virumaa tarkastellaan rakenneosan asentamisesta muodonmuutosten loppuarvoihin.
- Asennustilanteen ja käyttöolosuhteiden välisestä lämpötilaerosta aiheutuva vaakavoima; lämpötilaerona voidaan käyttää  $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ , ellei rakennuksen erikoiskäyttö edellytä tällaisesta poikkeavaa arvoa.
- Tuulikuorman vaikutukset: jos rakennuksen ulkovaippaan vaikuttava tuulikuorma voi välittyä laakereille, sen täydestä ominaisvaikutuksesta otetaan huomioon 75 %. Tuulikuormaa ei tarvitse ottaa huomioon laakereihin kohdistuvana kuormana, kun on osoitettu, että kuorma voi välittyä muuten kuin laakerin välityksellä (esimerkiksi välipohjarakenteissa).

### ESIMERKKEJÄ KUMILEVYJEN KUORMITETTAVUUDESTA JA LAAJENEMISESTA

Kuvissa 6 ja 7 esitetään käytetyn teorian (ehdot (e.1)) perusteella laskettuja kumilevyjen kuormitettavuuksia.  $P_k(a_g, b_g, t, h)$  (kN) = kumilevyn ominaiskuorma, kun levyn paksuus  $t = x$  vaihtelee. Käyrät osoittavat, kuinka paljon kovuuden  $h$  vaihtelu  $60 \pm 5$  ShoreA vaikuttaa ominaisuuksiin.

Kuvassa 8 esitetään kolme saman kuorman aiheuttamaa kumilevyn laajenemistrendiä (=  $sb$ , mm, pysty akselilla), kun levyn paksuus muuttuu ja kovuus on 55, 60 tai 65 ShoreA. Kuvassa  $x$  = kumilevyn paksuus, 8... 14 mm. Kovuuden kasvaessa laajeneminen vähenee, jos kuorma on sama. Kuvassa kaikki käyrät perustuvat samaan kuormaan,  $P_k(200, 400, x, 55) = 0,8 P_k(200, 400, x, 60) = 0,64 P_k(200, 400, x, 65)$ , mutta kovuus on muuttuva. Jos kukin käyrä edustaisi kovuutensa mukaista suurinta kuormitettavuutta, käyrät olisivat yhtenevät.