Kuormituskestävyysmitoitus
Sami Petäjä, Väylä

Sami Petäjä

12.2.2019

Kuormituskestävyysmitoitus

- Kuormituskestävyysmitoituksen tavoitteena
  - Estää raskaan liikenteen aiheuttama päällysteiden halkeilu
  - Estää pysyvät muodonmuutokset tien rakennekerroksissa ja pohjamaassa
  - Varmistaa tien tasaisuus
- Vilkasliikenteisillä teillä käytetään paksuja useampikerroksisia päällysteitä, jotka ovat melko vesitiiviitä ja jäykkiä.
  - Hyvin toimivassa päällysrakenteessa päällystekerrokset ovat toisiinsa liimautuneita, jolloin ne toimivat yhtenäisenä rakenteena
  - Alemmat rakennekerrokset mitoitetaan riittävän kantaviksi ja alusrakenteen routanousu- ja painumaeroja tasoitetaan tehokkaasti
  - Ylin päällystekerros suunnitellaan riittävän hyvin nastarengaskulutusta kestäväksi.

Kuormituskestävyysmitoitus Vähäliikenteiset tiet

- Vähäliikenteisillä päällystetyillä teillä käytetään ohuita ja muodonmuutoksia hyvin kestäviä päällysteitä, jotka eivät ole yleensä uutenakaan täysin vesitiiviitä
- Päällysteen voidaan antaa halkeilla melko paljonkin ennen seuraavaa kunnostusta. Halkeilu ei huononna ratkaisevasti ohutpäällysteisen tierakenteen kestävyyttä deformoitumista vastaan, koska päällyste on ohut ja sen jäykkyys on ehjänäkin melko pieni
- Halkeilu ja veden lisääntynyt läpipääsy alentaa kuitenkin ylimpien kerrosten jäykkyyttä sen verran, että ajan myötä kuormitusten aikaansaama vaurioituminen alkaa kiihtyä

Kuormituskestävyysmitoituksen osavaiheet

- Kuormituskertaluvun laskeminen
- Kuormitusluokan, päällysteen vähimmäispaksuuden ja tavoitekantavuuden määrittäminen
- Alusrakenteen kantavuuden määrittäminen
- Rakennekerrosten materiaalien valinta ja niiden mitoitusmoduulien määrittäminen
- Päällysrakenteen kerrospaksuuksien mitoittaminen tavoitekantavuuteen Odemarkin kaavan avulla

Kuormituskertaluvun laskenta

- Raskaan liikenteen aiheuttamaa rasitusta kuvataan kuormituskertaluvulla (KKL), joka ilmoitetaan standardiakselien (paripyörillä varustettu 10 tonnin yksittäisakseli) ylityskertojen lukumääränä sovitun laskenta-ajan aikana
- Tierakenteen suunnitteluohjeessa laskenta-aika on 20 vuotta
- Kuormituskertaluvun laskenta-aika ei ilmaise tierakenteen käyttöikää ja kestoikää
- Päällysteille on tehtävä toimenpiteitä vilkasliikenteisillä teillä jo muutaman vuoden kuluttua, mutta rakennekerrokset kestävät kuormia pidemmän ajan (pääteillä 50…100 v)

Kuormituskertaluvun laskenta

- Kuormituskertalukua määritettäessä otetaan huomioon ainoastaan raskaat ajoneuvot
- Erityyppisille ajoneuvoille on määritetty keskimääräiset vastaavuuskertoimet (kuormitusvastaavuus tai kuormitusekvivalentti), jotka ilmaisevat kuinka monen standardiakselin rasitusvaikutusta kyseinen ajoneuvo tai ajoneuvotyyppi vastaa.
- Kuormituskertaluku lasketaan ajosuuntakohtaisesti (KKLSUUNTA). Kaksikaistaisella tiellä raskaan liikenteen otaksutaan jakautuvan yleensä tasan molempiin ajosuuntiin

Kuormituskertaluvun laskenta

- Kuormituskertaluvun määritystä varten on selvitettävä ennusteet liikenteen kokonaismäärästä (KVL) ja raskaan liikenteen määristä (KVLRAS) 10 vuoden kulutta tien liikenteelle otosta
- Jos käytettävissä on tien avaamishetken liikennemäärä ja siitä 20 vuoden päähän ennustettu liikennemäärä, 10 vuoden päähän ennustettu liikennemäärä on näiden keskiverto (tulon neliöjuuri)
- Raskaan liikenteen jakautuminen yhdistelmäajoneuvoihin (KAYHD) ja muihin raskaisiin ajoneuvoihin (KAMUU) on arvioitava

Kuormituskertaluvun laskenta

- **KVL suurempi kuin 1000 ajon/d**

$KKL_{SUUNTA} = L \cdot (3{,}2 \cdot KAYHD + 0{,}9 \cdot KAMUU) \cdot 7300$ (vrk/20 vuotta)

- **KVL pienempi kuin 1000 ajon/d**

$KKL_{SUUNTA} = L \times 0{,}22 \times KVL_{SUUNTA} \times 7300$ d/20 a Valta- ja kantatiet
$KKL_{SUUNTA} = L \times 0{,}13 \times KVL_{SUUNTA} \times 7300$ d/20 a Seututiet
$KKL_{SUUNTA} = L \times 0{,}10 \times KVL_{SUUNTA} \times 7300$ d/20 a Yhdystiet

- **Runsaasti raaka-ainekuljetuksia, usein vain yhteen suuntaan**

$KKL_{SUUNTA} = L \cdot (5{,}5 \cdot KA_{YHD.TÄYSI\ RAAKA\text{-}A} + 2{,}1 \cdot KA_{YHD.MUU} + 0{,}9 \cdot KA_{MUU}) \cdot 7300$

Leveyskerroin

Kaistan ja viereisen pientareen yhteisleveys	Tien sisäluiskan kaltevuus	Leveyskerroin L
2,5 … 3,49 m	1 : 2 … 1 : 2,5	2,8
2,5 … 3,49 m	1 : 3 … 1 : 4	2,0
3,5 … 5 m	1 : 3 … 1 : 4	1,4
yli 5 m		1,0

1) Rampeilla otetaan huomioon pientareista leveämpi. Jos peruskaista on kahden ajokaistan välissä, L = 1

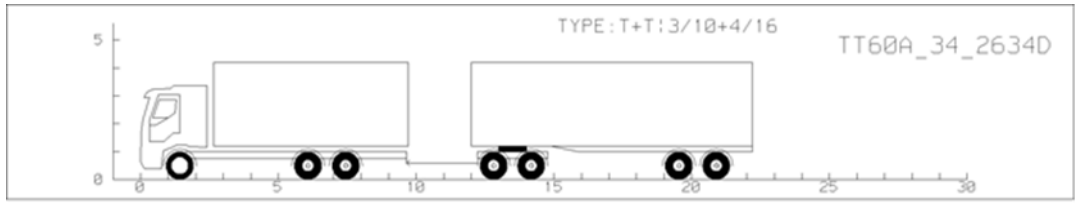
2) Jos keskikaiteen etäisyys ajokaistasta on alle 1,5 m, ajokaistan leveydestä vähennetään 1,5 m - kaiteen etäisyys (esim. keskipiennar 0,75 m, kaista 3,5 m ja ulkopiennar 1,5 m eli yhteisleveys = 3,5 - (1,5 - 0,75) + 1,5 = 4,25 m, josta leveyskertoimeksi L =1,4)

3) Betonisen reunakaiteen yhteydessä pientareen leveydeksi lasketaan pientareen leveys - 1 m

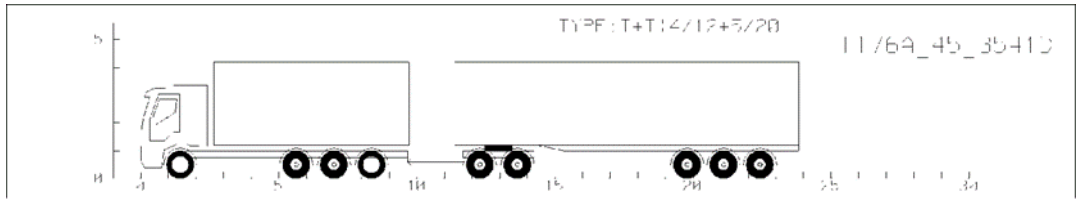
4) Teräskaiteellinen jyrkkäluiskainen (1:1,5) poikkileikkaus, jossa on kaidelevennys (0,25 kaiteen edessä ja 0,50 m kaiteen etupinnan takana), vastaa luiskankaltevuutta 1:3…1:4, mutta 0,25 m kaidelevennystä ei lasketa pientareen leveyteen

76 t yhdistelmien vaikutus

- Ennen vuotta 2013 tarvittiin **100** kpl 60 t yhdistelmää kuljettamaan 4200 t tavaraa. Uusia 76 t yhdistelmiä tarvitaan ainoastaan **78** kuljettamaan sama määrä.



- Vanha: massa 26+34 = 60 t, nettokuorma 15+27 = 42 t, paripyörä , 3,8 ekv. 42/3,8 = 11,0 t/ekv



- Uusi: massa 35+41 = 76 t, nettokuorma 22+32 = 54 t, paripyörä , 4,7 ekv. 54/4,7 = 11,5 t/ekv
- Tierasitus AASHO teorian mukaan
  - 100 ajon. 60 t yhdistelmää vastaa 100x3,8 = **380 ekvivalentti standardiakselia**
  - 78 ajon. 76 t yhdistelmää vastaa 78x4,7 = **365** ekvivalentti standardiakselia

Kuormitusluokka yleissuunnitelmaan

Peruskaistan kuormitusluokka (KL_{SUUNTA})	Kuormitus-kertaluku (KKL_{SUUNTA})	KVL ajon/d, molemmat suunnat yhteensä Leveä tai loivaluiskainen tie	
60,0	enintään 60,0	> 35 000 (1 -ajor.) tai > 50 000 (2 -ajor.)	
25,0	enintään 25,0	≤ 35 000 (1 -ajor.) tai ≤ 50 000 (2 -ajor.)	
10,0	enintään 10,0	≤ 14 000 (1 -ajor.) tai ≤ 20 000 (2 -ajor.)	
		Leveä ja loivaluiskainen tie eikä paljon raaka-ainekuljetuksia	Kapea tai jyrkkäluiskainen tie tai paljon raaka-ainekuljetuksia
5,0	enintään 5,0	≤ 6 700	≤ 5 000 raaka-aineainekuljetuksia
2,0	enintään 2,0	≤ 3 000	≤ 2 000
0,8	enintään 0,8	≤1 300	≤ 800
0,3	enintään 0,3	≤ 450	≤ 300

Kuormitusluokan määrittäminen useampikaistaisilla teillä

PERUSKAISTA

- Useampikaistaisilla teillä ajosuunnan raskaan liikenteen oletetaan käyttävän tien oikeanpuoleista jatkuvaa ajokaistaa (peruskaistaa), vaikka samaan suuntaan olisi käytettävissä useita kaistoja.

- Peruskaistan kuormitusluokka on $KL_{PERUSKAISTA} = KL_{SUUNTA}$

- Peruskaistan rakenne ulotetaan vähintään 0,25 m viereiselle pientareelle tai ajo-kaistalle.

Kuormitusluokan määrittäminen useampikaistaisilla teillä

VÄYLÄ

Muut kaistat ja leveät pientareet

- Yksi (1) luokka peruskaistan kuormitusluokkaa alempaa kuormitusluokkaa käytetään seuraavilla tien osilla:
  - peruskaistan oikealla puolella olevat liittymien väliset sekoittumiskaistat
  - vähintään 100 m pituiset tasoliittymän kääntymiskaistat.
- Tämä vastaa likimäärin kuormituskertalukua 0,4 * KKL_{SUUNTA}

- Kaksi (2) luokkaa peruskaistan kuormitusluokkaa alempaa kuormitusluokkaa käytetään :
  - peruskaistan vasemmalla puolella olevat saman suunnan ajokaistat
  - rampit ja niihin liittyvät erkanemis- ja liittymiskaistat
  - vähintään 2,5 m levyinen "leveä" piennar
  - oikealle kääntymiseen tarkoitettu ajokaista.
- Tämä vastaa likimäärin kuormituskertalukua 0,2 * KKL_{SUUNTA}

Kuormitusluokan määrittäminen useampikaistaisilla teillä

Kolmas jatkuva kaista	Toinen jatkuva kaista	Peruskaista eli reunimmainen jatkuva kaista	Sekoittu-miskaista	Leveä piennar tai kääntyvä reunakaista
KL = 5,0	KL = 5,0	KL = 25,0	KL = 10,0	KL = 5,0

Tavoitekantavuudet ja päällystepaksuudet

Kuormitusluokka	60,0	25,0	10,0	5,0	2,0
Viim. 6v. liikenteelle otosta Tavoitekantavuus Päällysteiden kokonaispaksuus	540 MPa 240 mm	470 MPa 200 mm	415 MPa 170 mm	360 MPa 140 mm	285 MPa 100 mm
Viim. 2v. Liikenteelle otosta	200 mm	160 mm	130 mm	100 mm	
Liikenteelle otettaessa	160 mm	120 mm	90 mm	60 mm	60 mm
Kantava kerros Tavoitekantavuus	160 MPa	160 MPa	160 MPa	160 MPa	160 MPa

- Hydraulisesti sidotuilla rakenteilla tavoitekantavuus on suurempi mutta päällysteen paksuus pienempi

Tavoitekantavuudet ja päällystepaksuudet

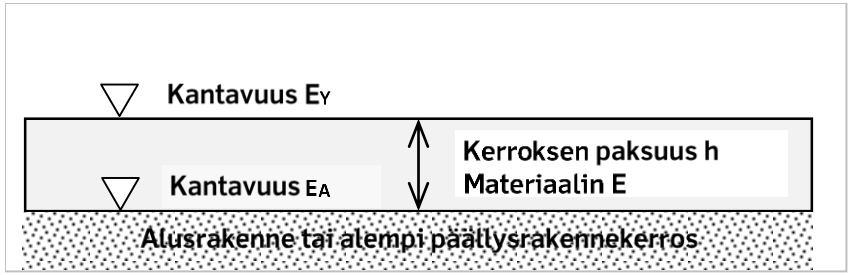
Kuormitusluokka	0,8			0,3			
Päällyste	PAB-V	PAB-B	AB	SOP	PAB-V	PAB-B	AB
Viim. 6v. päästä			230 MPa 80 mm				
Liikenteelle otettaessa Tavoitekantavuus Päällysteiden kok.paksuus	145 MPa 40 mm	165 MPa 40 mm	185 MPa 50 mm	130 MPa	145 MPa 40 mm	165 MPa 40 mm	170 MPa 40 mm
Kantava kerros Tavoitekantavuus	130 MPa	145 MPa	145 MPa	130 MPa	130 MPa	145 MPa	145 MPa

Kantavuusmitoitus

- Riittävät kerrospaksuudet etsitään kantavuusmitoituksella niin, että kohtien laskettu rakenteen laskennallinen kantavuus on vähintään määritetyn tavoitekantavuuden suuruinen
- Tavoitekantavuuden täyttymisen lisäksi päällystekerrosten kokonaispaksuuden on oltava vähintään kuormitusluokan vaatimusten mukainen
- Tavoitekantavuuden saavuttamista ei voi osoittaa valmiin rakenteen päältä pudotuspainolaitteella tehtävillä taipumamittauksilla eikä muilla kuin ohjeen mukaisilla kaavoilla tai mitoitusparametreilla
- Kun rakentamisen jälkeen arvioidaan rakenteen vaatimusten mukaisuutta, on arvioinnissa käytettävä todettuja kerrospaksuuksia ja materiaalien ominaisuuksia sekä laskettava näiden perusteella rakennetun päällysrakenteen kantavuus ja verrattava sitä vaatimukseen

Kantavuusmitoitus Odemarkin menetelmä

- Yksinkertaistettu malli
- Helposti ymmärrettävä



$$E_Y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0{,}81 \cdot \left(\frac{h}{0{,}15}\right)^2}}\right)\frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0{,}81 \cdot \left(\frac{h}{0{,}15}\right)^2 \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}}$$

Kantavuusmitoitus
kerrospaksuuksien ja moduulien rajoitukset

Mitoituksessa käytettävät kerrospaksuudet

- Odemarkin kantavuuskaavaa käytettäessä kerrospaksuus saa olla enintään 300 mm. Paksummat kerrokset jaetaan mitoitettaessa 150…300 mm paksuihin osakerroksiin.
- Rakennekerrosta ei saa jakaa 150 mm ohuempiin osakerroksiin

Rakennekerrosten mitoitusmoduulit

- Sitomattoman kerroksen käyttökelpoinen E-moduuli on enintään 6 · E_A
- Osittain sidottujen kerrosten (esim. REST, KOST, MHST) E-moduuli enintään 7,5 (MHST1) – 35 (SST2) · E_A

Yhteen liimaantuneiden kerrosten mitoituspaksuus ja -moduuli

- Yhteen liimaantuneet, ehjät bitumilla sidotut kerrokset, joiden E > 1500 MPa, lasketaan yhtenä kerroksena, jonka moduuliksi otetaan osakerrosten moduulien paksuuksilla painotettu keskiarvo.
- Ehto voi täyttyä vain, kun AB-kerrosten bitumipitoisuus on vähintään 3,8 % ja massa on asemasekoitteista.
- PAB-päällysteille lisäehtoja

Odemarkin laskentamalli Väylän ohjeluettelossa

Materiaali	Kerros	Paksuus m	Annettu E MN/m2	Ehto nxEa n	Käytetty E MN/m2	Laskettu Ey MN/m2
E-luokka	**Pohjamaa**		50			50
Hiekka	**Suodatin**	0,60	100	6	100	86
Go 0/63	**Jakava**	0,25	280	6	280	157
Go 0/45	**Kantava**	0,25	280	6	280	215
ABK/AB/SMA	**AB**	0,17	2500		2500	**508**

Analyyttiset mitoitusmenetelmät

- Perustuu monikerroslaskentaan
- Ei ole esitetty vuoden 2018 ohjeessa
- Käyttöä voi harkita hankekohtaisesti
- Tilaajalla pitää olla kokemusta käytettävästä mitoitusmenetelmästä, mitoitusparametreistä ja väsymismalleista
- Soveltuu kun päällysteiden kokonaispaksuus yli 80 mm
- APAS ohjelmaa ei ole enää jatkokehitetty

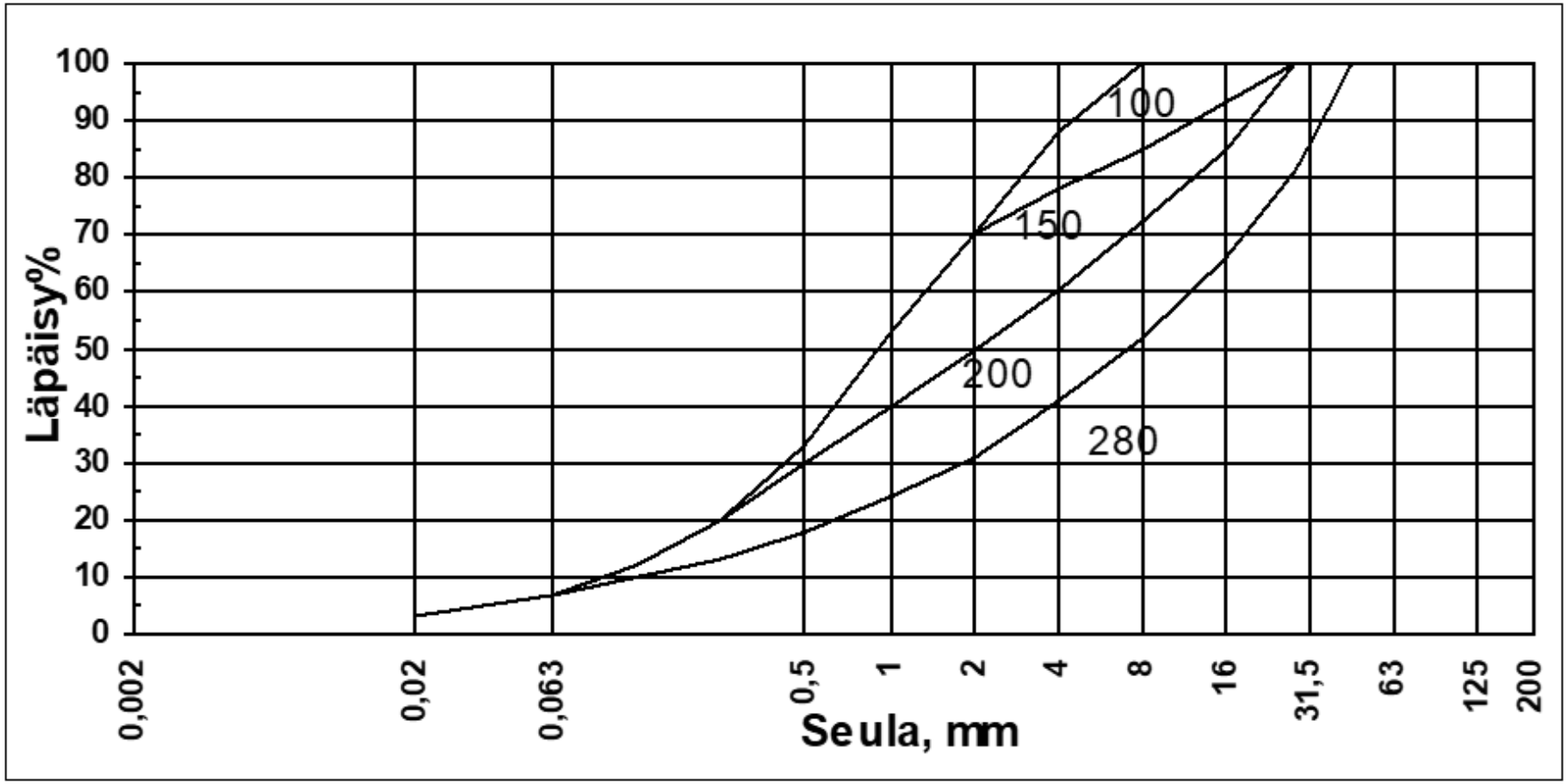
Sidottujen päällysrakennemateriaalien E-moduulit

Materiaali	E-moduuli, MPa	Huom!
AB, ABK, SMA	2500	
PAB-B, 250/330…650/900	1650	
PAB-V, V1500 / V3000	1400	
Bitumistabilointi, laiha tai paksu normaali	700 1050	Max. 10 x E_A Max. 15 x E_A
Sementtistabilointi, > 3 MPa (7d) Puristuslujuus > 5 MPa (7d)	1500 3500	Max. 18 x E_A Max. 35 x E_A

Murskeiden E-moduulit
Max. raekoko 80 mm

Rakeisuusluokka (EN 13285)	Moduuli E (MPa)			
	100	150	200	280
	Raekoko 0/D (D=maksimiraekoko)			
G_O	0/8…11,2	0/16…22	0/31,5	0/40…80
G_P, G_C	0/8…11,2	0/16…22	0/31,5…63	0/80
G_A	0/8…11,2	0/16…22	0/31,5…56	0/63…80

Muiden kuin EN 13285 mukaiset murskeiden E-moduulit



VÄYLÄ