

**TIEN PÄÄLLYSRAKENTEN KUORMITUSKESTÄVYYDEN  
MITOITUS SEKÄ KANTAVUUS- JA TIIVIYSMITTAUKSET**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Visamäki, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Syksy, 2019

Ville Neitola

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Visamäki

---

<b>Tekijä</b>	Ville Neitola	<b>Vuosi</b> 2019
<b>Työn nimi</b>	Tien päällysrakenteen kuormituskestävyyden mitoitus sekä kantavuus- ja tiiviysmittaukset	
<b>Työn ohjaaja/t</b>	Hannu Elväs	

---

## TIIVISTELMÄ

Liikennevirasto on julkaissut uuden Tierakenteen suunnittelu -ohjeen vuonna 2018. Onko uuteen suunnitteluohjeeseen tullut muutoksia kuormituskestävyyksimitoituksen näkökulmasta, joilla pyritään vastaamaan tierakenteeseen kohdistuvien ilmasto- ja liikennesäätöjen kasvuun? Opinäytetyö tehdään toimeksiannosta Tähtiranta Infra Oy:lle. Toimeksiannottajan toiveena on saada tietoa uudesta Tierakenteen suunnittelu -ohjeesta sekä erilaisista kantavuus- ja tiiviysmittausmenetelmistä infrarakentamisessa.

Opinnäytetyössä esitellään tien päällysrakenteen kuormituskestävyyksimitoitus sekä selvitetään mitoitusprosessin eroavaisuudet vanhan ja uuden suunnitteluohjeen välillä. Lisäksi kootaan yhteen infrarakentamisen laadunvalvonnan kantavuus- ja tiiviysmittausmenetelmät. Tavoitteet pyritään saavuttamaan kirjallisuustutkimuksella perehtymällä suunnitteluohjeisiin ja yleisiin laatuvaatimuksiin. Lähdemateriaalina käytetään myös geotekniikan alan kirjallisuutta ja tutkimusmateriaalia sekä laitevalmistajilta saatavaa tuotetietoa.

Tien päällysrakenteen kuormituskestävyyksimitoituksen näkökulmasta uudessa suunnitteluohjeessa on reagoitu tierakenteiden säätöjen kasvuun tarkentamalla mitoituksen lähtötiedoksi tarvittavan kuormituskeräilyalueen ja kuormitusluokan määrittämistä. Kuormituskestävyyksimitoitus toteutetaan Odemarkin kaavan avulla. Infrarakentamisessa rakenteelle asetetaan kantavuus- ja tiiviysvaatimukset, joiden täyttyminen todennetaan mittauksin. Mittausmenetelmän valinta tulee tehdä huolellisesti, riippuen tutkittavan maarakenteen ominaisuuksista, jotta mittaustulos on luotettava. Käytetyimmät kantavuus- ja tiiviysmittausmenetelmät ovat levykuormituskoe ja pudotuspainolaitteet.

**Avainsanat** tien päällysrakenne, kuormituskestävyyksimitoitus, Odemarkin kaava, kantavuusmittaus, tiiviysmittaus

**Sivut** 54 sivua, joista liitteitä 13 sivua

Degree Programme in Construction Engineering  
Hämeenlinna University Centre

---

<b>Author</b>	Ville Neitola	<b>Year</b> 2019
<b>Subject</b>	Load durability design and the measurements for bearing capacity and compactness of road structure	
<b>Supervisors</b>	Hannu Elväs	

---

ABSTRACT

The Finnish Transport Infrastructure Agency published a new Road Structure Design manual in 2018. The thesis was commissioned by Tähtiranta Infra Oy. The company wants to get information about the new Road Structure Design manual and the measurement methods for bearing capacity and compactness used in civil engineering. The goal of the thesis was to present the process of load durability design for road structure and to find out the differences in this process between the old and new Road Structure Design manual. The measurement methods for bearing capacity and compactness used in civil engineering were also discussed in the thesis.

Design manuals and general quality requirements were familiarized with. Geotechnical studies and publications in the field were also used including product information from the device manufacturers.

The results of the thesis show that the equivalence factors for the different types of tractor-trailers and trucks used to determine the load factor number for road structure are specified in the new Road Structure Design manual to address the increasing climate and traffic stresses. Some corrections have also been made in the load categories of the road structures concerning the maximum bearing capacity requirements for sub-base and asphalt courses, the thickness for asphalt pavement and the material quality in the sub-base. The load factor number and the load category are the initial data needed to do the final calculation of load durability design with Odemark's method.

**Keywords** road structure, load durability design, Odemark's method, bearing capacity measurement, compactness measurement

**Pages** 54 pages including appendices 13 pages

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	TIEN PÄÄLLYSRAKENTEEN KUORMITUSKESTÄVYYDEN MITOITUS.....	2
2.1	Tien päällysrakenteen empiirinen suunnitteluprosessi .....	3
2.2	Tien päällysrakenteen analyttinen suunnitteluprosessi .....	4
2.3	Suomalainen tien päällysrakenteen mitoitusmenetelmä.....	6
2.3.1	Kuormituskertaluku .....	7
2.3.2	Kuormitusluokka.....	9
2.3.3	Tien alusrakenteen arviointi ja luokittelu.....	10
2.3.4	Tien päällysrakenteen materiaalien E-moduulit .....	12
2.3.5	Kuormituskestävyyshitoitus Odemark-menetelmällä.....	15
3	PÄÄLLYSRAKENTEEN KANTAVUUS- JA TIIVIYSMITTAUS.....	17
3.1	Laatuvaatimukset ja laadunvalvonta .....	17
3.2	Tiiviiden ja kantavuuden määritelmät .....	18
3.2.1	Tiiviys .....	18
3.2.2	Kantavuus .....	19
3.3	Päällysrakenteen tiiviyteen ja kantavuuteen vaikuttavat tekijät.....	20
3.3.1	Jännitystila .....	20
3.3.2	Materiaalin rakeisuus .....	21
3.3.3	Materiaalin vesipitoisuus .....	22
3.3.4	Työmenetelmät ja pohjamaaolosuhteet .....	22
3.3.5	Ympäristöolosuhteet .....	23
3.4	Päällysrakenteen tiivysmittaus.....	23
3.4.1	Proctor- koe .....	24
3.4.2	Vesi- ja hiekkavolyometri .....	25
3.4.3	Troxler.....	28
3.5	Päällysrakenteen kantavuusmittaus .....	30
3.5.1	Levykuormituskoe .....	30
3.5.2	Pudotuspainolaitteet.....	33
4	YHTEENVETO .....	36
	LÄHTEET.....	40

## Liitteet

Liite 1	Tierakenteen kriittiset jännitykset ja muodonmuutokset
Liite 2	Kaistan leveyskerroin kuormituskertaluvun laskennassa
Liite 3	Vuoden 2004 suunnitteluohjeen kuormituskertaluvun laskentakaavat
Liite 4	Teiden kuormitusluokat kuormituskertaluvun perusteella
Liite 5	Kuormitusluokan määrittäminen useampikaistaisilla teillä
Liite 6	Päällysrakennemateriaalien E-moduulit
Liite 7	Sitomattomien päällysrakennemateriaalien jäykkyyden riippuvuus tierakenteen jännitystilasta
Liite 8	Tiivistyskoneiden ohjeelliset jyräskertamäärät

## 1 JOHDANTO

Suomen tieverkko on ollut kasvavien haasteiden edessä jo useita vuosia. Lisäksi jo nähtävillä olevan ilmastonmuutoksen aiheuttama ilmastorasituksen lisääntyminen ja raskaiden ajoneuvojen kokonaismassojen noston tuoma liikennesäätötilan kasvu kuormittavat nykyistä tieverkkoamme yhä enemmän. Liikennevirasto on julkaissut uuden Tierakenteen suunnittelu -ohjeen, joka on astunut voimaan 31.12.2018 korvaten vuonna 2004 laaditun Tierakenteen suunnittelu -ohjeen, joten on syytä selvittää, onko tieverkkojen suunnitteluohjeeseen tullut muutoksia huomioiden tieverkkoon kohdistuvat kasvaneet rasitukset.

Opinnäytetyön päätavoitteena on esitellä tien päällysrakenteen kuormituskestävyyksimitoituksen kulku Suomessa perinteisen Suomalaisen mitoitusmenetelmän näkökulmasta sekä selvittää kuormituskestävyyksimitoituksen eroavaisuudet vanhan ja uuden Tierakenteen suunnittelu -julkaisun välillä. Lisäksi kokoa opinnäytetyössäni yhteen infrarakentamisen laadunvalvonnassa yleisesti käytettävät kantavuus- ja tiiviysmittausmenetelmät.

Vaativien kohteiden, kuten satama-alueiden, tien päällysrakenteiden kuormituskestävyyden mitoitukseen käytettävät monikerroslaskenta- ja elementtimenetelmät sekä Suomessa tien päällysrakenteen mitoitukseen olennaisesti sisältyvät routa- ja painumamitoitukset on rajattu tietoisesti pois tästä opinnäytetyöstä.

Tavoitteet pyritään saavuttamaan kirjallisuustutkimuksella perehtymällä suunnitteluohjeisiin ja yleisiin laatuvaatimuksiin. Lähdemateriaalina käytetään myös geotekniikan alan kirjallisuutta ja tutkimusmateriaalia sekä laitevalmistajilta saatavaa tuotetietoa.

Tämä opinnäytetyö tehdään toimeksiannosta Tähtiranta Infra Oy:lle, joka on yksityinen infrarakentamiseen erikoistunut suunnittelualan konsultti-toimisto. Yrityksen palveluihin kuuluvat mm. alue-, tie-, katu- ja vesihuoltosuunnittelu sekä rakennuttaja- että valvontakonsultin tehtävät. Näiden lisäksi toimintaa on myös maaperätutkimusten sekä infra- että rakennusmittausten parissa.

Toimeksiantajan tavoitteena on saada tietoa nykyisestä Tierakenteen suunnittelu -ohjeesta tien päällysrakenteen kuormituskestävyyksimitoituksen näkökulmasta. Lisäksi toimeksiantajan toiveena on saada tämän opinnäytetyön kautta tietoa erilaisista kantavuus- ja tiiviysmittausmenetelmistä sekä niiden käyttökohteista ja asemasta infrarakentamisessa.

## 2 TIEN PÄÄLLYSRAKENTEEN KUORMITUSKESTÄVYYDEN MITOITUS

Tierakenteet rakennettiin kokemuksen perusteella vakiopaksuudella pohjamaaolosuhteista riippumatta aina 1920-luvulle asti. Varsinainen tierakenteiden mitoitusten menetelmien kehittäminen alkoi 1930-luvulla Yhdysvalloissa perustuen vuonna 1929 julkaistun pohjamaan maajiluokitukseen, Public Roads Soil Classification System. Alussa tierakenteen mitoitusta perustui pelkästään pohjamaaolosuhteisiin, lähinnä pohjamaan kantavuuteen, jota kuvaamaan kehitettiin 1920-luvun lopulla CBR-koetta, California Bearing Ratio. Eri pohjamaalajien suhteelliseen kantavuuteen, CBR-arvoon, pohjautuen California State Department julkaisi ensimmäiset tierakenteiden mitoituskuvaukset 1940-luvun alussa kahdelle eri mitoituskuurmalle. (Kanerva, 2011, s.12; Järvinen, 1991, s. 12)

Tierakenteen kuormituskertojen määrään perustuva mitoitusta syrjäytti pohjamaan kantavuuteen perustuvan mitoituksen 1950-luvulla. Nykyisinkin käytössä oleva kuormituskertojen määrään perustuva mitoitusta pohjautuu kuormituksen tierakenteessa aiheuttamiin jännityksiin ja kriittisiin muodonmuutoksiin. Nämä kriittiset muodonmuutokset voidaan määrittää tähän tarkoitukseen kehitettyjen useiden mitoitusten menetelmien avulla, jotka painottavat tierakenteen ominaisuuksia eri tavoin. (Kanerva, 2011, s. 12)

Mitointimenetelmät jaetaan yleisesti ottaen kahteen ryhmään; empiirisiin eli kokemukseräisiin ja analyttisiin eli teoreettisiin menetelmiin. Kokemukseräisistä menetelmistä mainittakoon Yhdysvalloissa kehitetyt AASHO- ja Asphalt Institute- menetelmät. Teoreettisista menetelmistä voidaan mainita Odemarkin menetelmä sekä Suomessa kehitetyt Nesteen menetelmä ja APAS- monikerroslaskentaohjelma. Näiden menetelmien lisäksi on kehitetty ns. puolikokeellisia menetelmiä, kuten Suomalainen menetelmä ja Shellin menetelmä, jotka pohjautuvat osittain kokemukseräisen menetelmän kokeisiin ja osittain analyttisen menetelmän kimmo- ja viskoelastisuusteoriaan. (Järvinen, 1991, s. 10; Kanerva, 2011, s. 12)

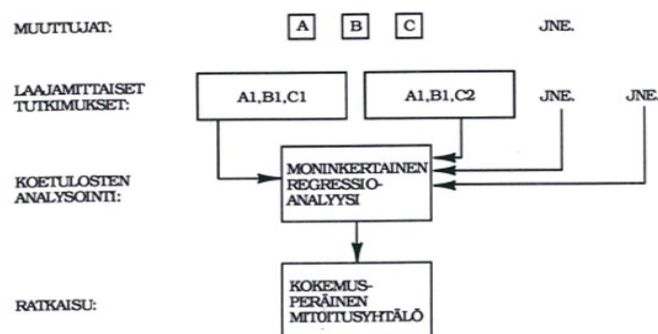
Eri mitointimenetelmät lähestyvät mitointuongelmaa eri näkökannalta mm. lähtötietoparametrien sekä mitoituksen sisällön ja painotuksen suhteen. Mutta huolimatta siitä, mitä mitointimenetelmää tien päällysrakenteen kuormituskestävyyden mitoituksessa käytetään, ovat mitointuun tarvittavat lähtötiedot samat, sillä kaikissa menetelmissä tarvitaan tietoa liikennekuormasta sekä alus- ja päällysrakenteen materiaaliominaisuuksista. Eri menetelmissä lähtötiedot kuitenkin lasketaan ja ilmaistaan eri tavoin, minkä vuoksi eri menetelmillä saatuja päällysrakennekerrospaksuuksia on vaikea verrata keskenään. Lisäksi em. mitointimenetelmistä ainoastaan Suomessa kehitetyissä mitointimenetelmissä tehdään erillinen routamitointu, joten ulkomaiset mitointimenetelmät eivät sovellu parhaalla mahdollisella tavalla suomalaisiin suunnitteluoloihin. (Järvinen, 1991, s. 73-74)

Suomessa tavanomaisen tien päällysrakenteen mitoituksessa käytetään Liikenneviraston ohjeisiin perustuvaa Suomalaista menetelmää, joka on puolikokeellinen menetelmä. Vaativien paksuja bitumilla sidottuja kerroksia sisältävien erikoisrakenteiden, kuten satama-alueiden ja raskaanliikenteen lastauspihojen, mitoitukseen käytetään Suomessa modernimpia analyttisiä mitoitusten menetelmiä, joita ovat mm. Nesteen menetelmä, APAS-monikerroslaskentaohjelma sekä erilaiset elementtimenetelmät. Tässä opinnäytetyössä tien päällysrakenteen kuormituskestävyyden mitoitusta käsitellään tarkemmin ainoastaan Suomalaisen menetelmän näkökulmasta luvussa 2.3. (Järvinen, 1991, s. 48,60; Brax, 2012, s. 16)

## 2.1 Tien päällysrakenteen empiirinen suunnitteluprosessi

Empiiriset eli kokemukseräiset tien päällysrakenteen mitoitusten menetelmät kehitettiin tutkimalla rakennettujen teiden käyttäytymistä kuormituksen alaisena ja yleistämällä tutkimuksista saatua tietoa. Varsinainen kokemukseräisten menetelmien kehittäminen aloitettiin jo 1930-luvulla Yhdysvalloissa, jossa suoritettiin ensimmäiset laajamittaiset tiekokeet. Tiekoekien tulosten perusteella laadittiin taulukoita, joiden mukaan tien päällysrakenteen kerrokset pystyttiin mitoittamaan. Useat nykyisinkin käytössä olevat mitoitusten menetelmät, kuten AASHO ja Asphalt Institute, ovat kokemukseräisiä ja perustuvat nimenomaan laajoihin tiekoekisiin. (Järvinen, 1991, s. 9-12)

Kokemukseräiset suunnitteluprosessit pohjautuvat tien päällysrakenteen kerrosten paksuuteen vaikuttaviin muuttujiin, joita ovat esim. pohjamaan kantavuus, ajoneuvojen paino ja kuormituskertojen määrä. Näiden muuttujien vaikutusta tierakenteen kestävyyteen tutkitaan tiekoekissa ja tuloksia analysoidaan yksityiskohtaisesti jokaisen muuttujan osalta, jotta saadaan selville muuttujan merkitys tierakenteen kestävyyteen. Lopputuloksena saadaan valmis mitoitussyhtälö tien päällysrakenteen mitoitukseen tietyille muuttujien arvoille, kuva1. (Järvinen, 1991, s. 12-13)



Kuva 1. Päällysrakenteen empiirinen suunnitteluprosessi (Järvinen, 1991, s. 13).

Verrattuna analyttisiin suunnittelumenetelmiin kokemukseräisten menetelmien käyttö on suhteellisen yksinkertaista. Mutta kokemukseräisten

suunnittelumenetelmien heikkoutena on, että niillä tehtyä mitoitus ei voida pitää luotettavana kuin niissä olosuhteissa ja niillä muuttujien arvoilla, joiden mukaan mitoitusyhtälö on laadittu. Tämä rajoittaa huomattavasti kokemusperäisten mitoitusmenetelmien käyttöä tien päällysrakenteen mitoituksessa. Kokemusperäisiä tiekokeita onkin nykyisin toteutettu monessa maassa ja erilaisissa olosuhteissa, joten lähes jokaisella maalla on käytössään omat kokemusperäiset mitoitusmenetelmänsä tien päällysrakenteen mitoitukseen. (Järvinen, 1991, s. 11)

Kokemusperäisten mitoitusmenetelmien heikkoutena on myös se, että niissä ei huomioida päällysrakenteeseen kuormituksen alaisena kohdistuvia kriittisiä jännityksiä, joita ovat vetojännitys sidottujen kerrosten alapinnassa ja puristusjännitys alusrakenteen yläpinnassa. Tämän vuoksi kokemusperäisiä mitoitusmenetelmiä täydennetään usein analyyttisten menetelmien teoreettisella tiedolla, jolloin voidaan puhua puolikokeellisista mitoitusmenetelmistä, joissa em. kriittiset jännitykset huomioidaan. (Järvinen, 1991, s. 74; Kanerva, 2011, s. 12)

## 2.2 Tien päällysrakenteen analyyttinen suunnitteluprosessi

Tien päällysrakenteen analyyttisen eli teoreettisen suunnitteluprosessin tavoitteena on yleisesti käyttökelpoisen mitoitusmenetelmän kehittäminen teoreettisen analyysin pohjalta, jolloin tierakenne voidaan periaatteessa suunnitella minkälaisiin olosuhteisiin tahansa. Tien päällysrakenteen analyyttinen suunnitteluprosessi perustuu J. V. Boussinesq laskentateoriaan yksikerrosrakenteen muodonmuutoksista kuormituksen alaisena. (Järvinen, 1991, s. 13; Kanerva, 2011, s. 12)

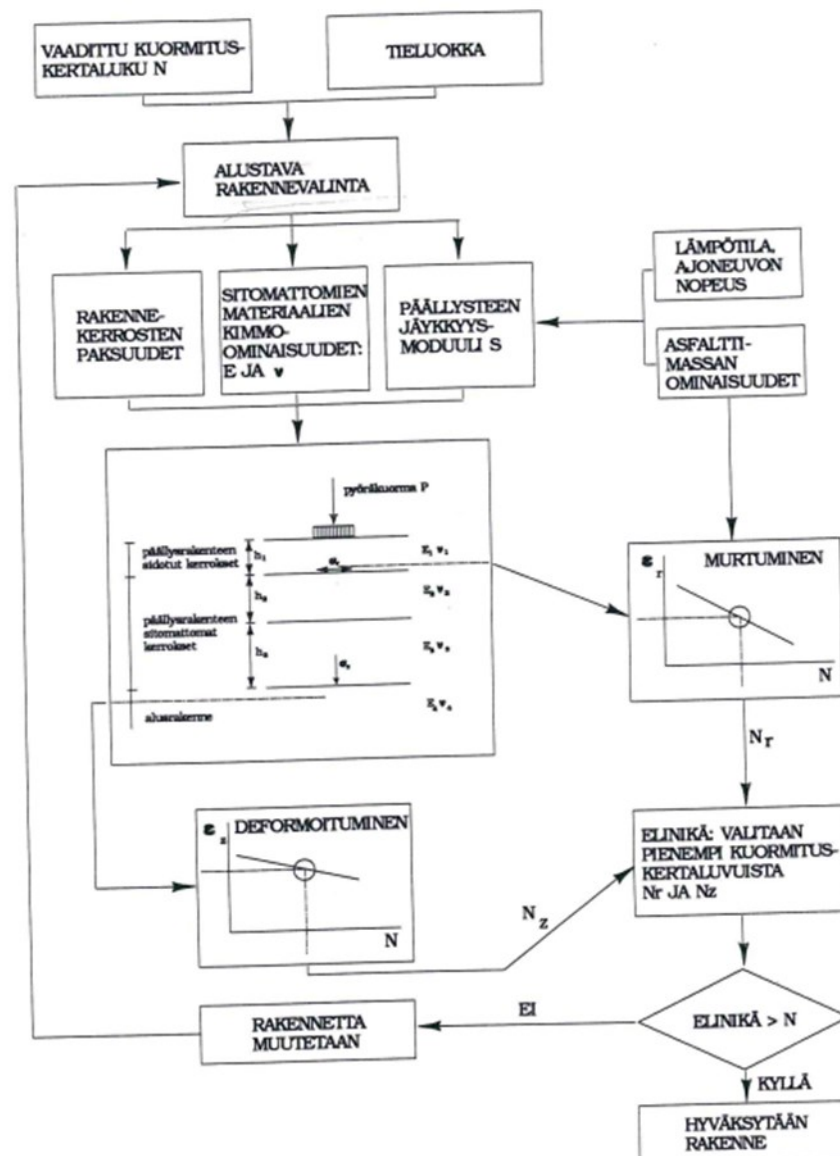
Varsinainen analyyttisten mitoitusmenetelmien kehitys alkoi 1940-luvulla, kun D. M. Burmister kehitti laskentateorian kuormituksen aiheuttamien jännitysten ja muodonmuutosten laskemiselle kaksi- ja kolmikerrosrakenteissa. Vuonna 1949 ruotsalainen Odemark jatkoi analyyttisten menetelmien kehitystä julkaisemalla monikerrosrakentamismenetelmän, jossa monikerrosrakenteen muutettiin Burmisterin kaksikerrosrakenteeksi. Myöhemmin Odemark julkaisi kaavan, jolla laskettavan rakennekerroksen päältä saavutettava teoreettinen kantavuus pystyttiin määrittämään kerroksen paksuuden, kerrosmateriaalin E-moduulin ja alemman kerroksen E-moduulin perusteella. (Järvinen, 1991, s. 13; Kanerva, 2011, s. 12)

Tien päällysrakenteen analyyttinen suunnitteluprosessi perustuu pohjaan ja käytettävien rakennekerrosmateriaalien ominaisuuksien teoreettiseen analysointiin. Suunnitteluprosessin onnistumiseksi on tärkeää valita sopivat materiaalit päällysrakennekerrokseen. Sitomattomien rakennekerrosten materiaaleille määritetään kimmokerroin  $E$  ja Poisson-luku  $\nu$  sekä sidottujen rakennekerrosten materiaaleille määritetään jäykkyyskerroin  $S$  ja Poisson-luku  $\bar{\nu}$ . Lisäksi sidottujen rakennekerrosten osalta tulee suunnittelun lähtötietoina tuntea lämpötila ja ajoneuvojen nopeudet. Teoreettisen analyysin perusteella lasketaan seuraavassa vaiheessa



liikennekuormituksen aiheuttamat liitteen 1 mukaiset kriittiset jännitykset ja muodonmuutokset valitussa tierakenteessa kimmo- ja viskoelastisuusteoriaan perustuvilla yhtälöillä. (Järvinen, 1991, s. 11, s. 13-15)

Laskennan perusteella saatujen kriittisten muodonmuutosten avulla selvitetään tierakenteen kestoikä laskemalla väsymissuorilta sallitut kuormituskertaluvut  $N_r$  ja  $N_z$ , joista pienempi kertoo lopullisen kuormituskertojen lukumäärän, jonka koko tierakenne kestää. Laskettua kuormituskertalukua verrataan lähtötiedoissa liikenne-ennusteen perusteella vaadittuun kuormituskertalukuun  $N$ , jonka jälkeen tarkasteltu tien päällysrakenne joko hyväksytään tai päällysrakennetta vahvistetaan ja toistetaan laskenta, kuva 2. (Järvinen, 1991, s. 11, s. 13-15)



Kuva 2. Päällysrakenteen analyttinen suunnitteluprosessi (Järvinen, 1991, s. 14).

Teoreettisilla mitoitusmenetelmillä saadaan mitoitukseen näennäisesti hyvä tarkkuus. Mutta käytännössä mitoitusmenetelmien teorioihin on kehitysvaiheessa tehty useita yksinkertaistuksia ja oletuksia laskennan helpottamiseksi, mitkä heikentävät mitoituksen tulosten luotettavuutta mm. materiaalit on oletettu homogeenisiksi ja kuormituksen dynaaminen luonne on vaikeaa huomioida. Lisäksi teoreettisen suunnitteluprosessin lähtötietoina on ennusteita, esim. tuleva liikennemäärä, jotka osaltaan lisäävät mitoituksen epävarmuutta. Analyttiset mitoitusmenetelmät ovat hyvin monimutkaisia ja työläitä, minkä vuoksi niiden käyttö on yleistynyt vasta 1980-luvulla, kun tietokoneiden kehitys mahdollisti vaativien laskentaongelmien nopean ratkaisun. (Järvinen, 1991, s. 11-12; Kanerva, 2011, s. 12)

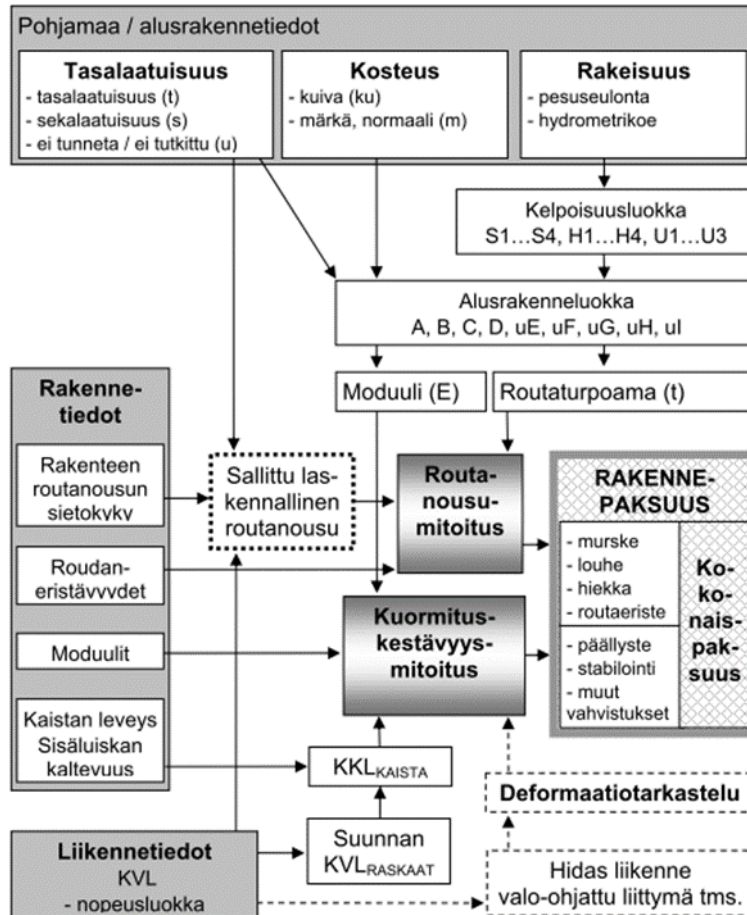
Nykyisin analyttisten mitoitusmenetelmien laskentaohjelmien kehitys mahdollistaa liikennekuormituksen dynaamisen luonteen paremman huomioimisen mitoituksessa sekä useampien vaihtoehtoisten päällysrakennerratkaisujen nopean suunnittelun ja vertailun. Analyttisten laskentaohjelmien kehitys mahdollistaa yhä monimutkaisempien päällysrakennekokonaisuuksien kuormituskestävyyssmitoituksen, ja onkin odotettavissa, että tulevaisuudessa päällysrakenteet mitoitetaan yhä useammin analyttisten laskelmien avulla. (Järvinen, 1991, s. 74-75, s. 78; Kanerva, 2011, s. 12-13)

### 2.3 Suomalainen tien päällysrakenteen mitoitusmenetelmä

Suomessa tien päällysrakenteen mitoituksessa käytetään yleisimmin Suomalaisista menetelmää, joka perustuu ent. Tiehallinnon nyk. Liikenneviraston julkaisuun Tierakenteen suunnittelu, josta uusi versio Tierakenteen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 38/2018 on astunut voimaan 31.12.2018. Suomalainen menetelmä on ns. puolikokeellinen, sillä sen kuormituskestävyyssmitoitus perustuu sekä analyttiseen Odemark-menetelmään että kokemuseräisiin tavoitekantavuuksiin, jotka vastaavat levykuormituskokein eri kuormitusluokkien teiltä määritettyjä kevätkantavuuksia. (Järvinen, 1991, s. 48; Brax, 2012, s. 12)

Suomalainen menetelmä on kehitetty erityisesti Suomen sääolosuhteisiin. Suomen maaperä- ja ilmasto-olosuhteet asettavat suunnittelulle erityisvaatimuksia, sillä maaperä on kantavuusominaisuuksiltaan vaihtelevaa ja usein myös routivaa. Suomessa tien päällysrakenne mitoitetaan liikennekuormituksen, roudan ja sääolosuhteiden aiheuttamia rasituksia vastaan, minkä vuoksi tien päällysrakenteen mitoitusprosessi jakautuu routa- ja kuormituskestävyyssmitoitukseen. Routamitoituksen perusteella määräytyy tien päällysrakenteen kokonaiskerrospaksuus. Eri rakennekerrosten paksuudet saadaan vastaavasti kuormituskestävyyssmitoituksen perusteella. Lisäksi pehmeikölle rakennettaessa tierakenteelle tehdään usein myös painumamitoitus. Tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan perehdytä tarkemmin tierakenteen routa- ja painumamitoitukseen. (Järvinen, 1991, s. 49; Tiehallinto, 2004, s. 24)

Tien päällysrakenteen rakenteelliseen mitoitukseen liittyy vahvasti myös tierakenteen kuivatuksen suunnittelu, sillä osa mitoitukseen tarvittavista lähtötietoparametreista on kosteustilasta riippuvaisia esim. alusrakenneluokka. Suomalaisen tien päällysrakenteen mitoitusmenetelmän kuormituskestävyyden mitoitukseen tarvittavat lähtötiedot esitellään seuraavissa luvuissa sekä kuvassa 3. (Tiehallinto, 2004, s. 24; Liikennevirasto, 2018, s. 18)



Kuva 3. Tien päällysrakenteen kuormituskestävyyden mitoitukseen tarvittavat lähtötiedot (Tiehallinto, 2004, s. 24).

### 2.3.1 Kuormituskertaluku

Kuormituskestävyyden mitoituksen lähtötietona tarvitaan tierakenteeseen mitoitusajanjaksolla kohdistuva liikennesuunnituksen määrä. Liikennesuunnituksen laskentaa varten tarvitaan mitoituskohteen liikennemäärä ja sen koostumus, ajoneuvotyypit ja ajoneuvojen painot, esim. liikenneselvityksen, kaavoituksen, maankäytön suunnittelun tai tierekisterin perusteella. Liikennemäärä ilmoitetaan keskimääräisenä vuorokausiliikenteenä, KVL ajon/vrk, raskaanliikenteen osalta 10 vuoden kuluttua tien avaamisesta. Liikennemäärä on siis ennuste tulevasta tien käytöstä, kuva 3. Raskaanliikenteen määrä jaetaan liikennesuunnituksen laskentaa varten vielä tarkemmin ajoneuvoyhdistelmiin,  $KA_{yhd}$ , ja muihin raskaisiin ajoneuvoihin,  $KA_{muu}$ . (Tiehallinto, 2004, s. 25; Liikennevirasto, 2018, s. 35)

Liikennesuunnitusta kuvataan kuormituskertaluvulla, KKL, joka kertoo standardiakselin ylityskertojen lukumäärän mitoituskohdassa mitoitusajanjakson aikana. Suomessa standardiakselina käytetään 100 kN painoista yksittäistä paripyöräakselia. Vastaavuuskerroinmenetelmän avulla suhteutetaan ajoneuvoyhdistelmien ja muiden raskaiden ajoneuvojen liikennemäärä vastaamaan standardiakselin ylityksiä mitoituskohdassa, jolloin saadaan koko liikennemäärän aiheuttama kuormituskertaluku standardiakseleina. Kun saatu päiväkohtainen kuormituskertaluku kerrotaan ennalta päätetyllä mitoitusajanjakson pituudella, saadaan kumulatiivinen kuormituskertaluku, KKL, jota käytetään kuormituskestävyyksimitoituksen lähtöarvona, kuva 3. Yleisesti ottaen mitoitusajanjaksona käytetään asfalttipäällysteisillä teillä 20 vuotta, pehmeillä asfalttipäällysteillä 15 vuotta ja sora-teillä 10 vuotta. (Tiehallinto, 2004, s. 25; Liikennevirasto, 2018, s. 34; Brax, 2012, s. 12)

Kuormituskertaluku lasketaan ajosuunnittain,  $KKL_{SUUNTA}$ . Laskennassa käytetään laskentakaavaa 1...6 riippuen saaduista liikennemäärätiedoista ja niiden tarkkuudesta. (Liikennevirasto, 2018, s. 35)

Jos  $KVL > 1000$  ajon/vrk ja käytettävissä on luotettava liikennemäärän laskentatulosta, niin  $KKL_{SUUNTA}$  lasketaan kaavalla 1 (Liikennevirasto, 2018, s. 36).

$$KKL_{SUUNTA} = L * (3,2 * KA_{yhd} + 0,9 * KA_{muu}) * 7300 \quad (1)$$

$KKL_{SUUNTA}$  lasketaan kaavoilla 2...5, jos käytössä ei ole luotettavaa liikennemäärän laskentatulosta tai  $KVL < 1000$  ajon/vrk (Liikennevirasto, 2018, s. 36).

$$KKL_{SUUNTA} = 0,22 * L * KVL_{suunta} * 7300 \text{ valta- ja kantatiet} \quad (2)$$

$$KKL_{SUUNTA} = 0,13 * L * KVL_{suunta} * 7300 \text{ seututiet} \quad (3)$$

$$KKL_{SUUNTA} = 0,1 * L * KVL_{suunta} * 7300 \text{ yhdystiet} \quad (4)$$

$$KKL_{SUUNTA} = 0,16 * L * KVL_{suunta} * 7300 \text{ seutu- ja yhdystiet, kun raskaista ajoneuvoista on 20...25 \% täysin kuormattuja} \quad (5)$$

Jos vähäliikenteisellä tiellä on selkeä raaka-ainelähde tai -kohde, jolloin vain toinen kaista kuormittuu, koska kuljetukset tehdään vain toiseen suuntaan täydellä kuormalla, niin  $KKL_{SUUNTA}$  lasketaan erikoistapauksissa kaavalla 6 (Liikennevirasto, 2018, s. 36-37).

$$KKL_{SUUNTA} = L * (5,5 * KA_{yhd, \text{täysi raaka-a}} + 2,1 * KA_{yhd, \text{muu}} + 0,9 * KA_{muu}) * 7300 \quad (6)$$

## Kaavoissa:

L	kaistan leveyskerroin, joka esitetään liitteessä 2
KA <sub>yhd</sub>	raskaiden ajoneuvoyhdistelmien määrä vuorokaudessa
KA <sub>muu</sub>	muiden raskaiden ajoneuvojen määrä vuorokaudessa
KA <sub>yhd, täysi raaka-a</sub>	täysien raaka-ainetta (puu, turve, maa-aines jne.) kuljettavien ajoneuvoyhdistelmien määrä vuorokaudessa
KA <sub>yhd, muu</sub>	muiden täysien ja tyhjien ajoneuvoyhdistelmien määrä vuorokaudessa
KVL <sub>suunta</sub>	raskaan liikenteen keskimääräinen vuorokausiliikenne 10 vuoden kuluttua tien avaamisesta, ajon/ vrk
7300	kuormituskertaluvun mitoitusajanjakso vuorokausina, 7300 vrk = 20 vuotta

Kuormituskertaluvun laskentakaavoihin on tullut muutoksia, kun verrataan nykyisin käytössä olevaa vuonna 2018 julkaistua Tierakenteen suunnittelu -ohjetta vanhaan vuonna 2004 julkaistuuun Tierakenteen suunnittelu -ohjeeseen. Laskentakaavoissa käytettäviä ajoneuvotyyppien vastavuuskertoimia on korotettu uuteen suunnitteluohjeeseen, mikä johtuu vuoden 2013 päätöksestä korottaa tiellä liikkuvien ajoneuvojen ja ajoneuvoyhdistelmien suurimpia sallittuja massoja. Aikaisemmin sallittiin 60 t massa 7-akselisissa yhdistelmissä, mutta uudistuksen jälkeen sallitaan 68 t 8-akselisissa ja 76 t 9-akselisissa yhdistelmissä, kun perävaunu on varustettu paripyörillä. Vertailun vuoksi vuoden 2004 Tierakenteen suunnittelu -ohjeen kuormituskertaluvun laskentakaavat ovat esitettynä liitteessä 3. (Liikennevirasto, 2018, s. 37)

### 2.3.2 Kuormitusluokka

Tien kuormitusluokka, KL<sub>SUUNTA</sub>, määräytyy suoraan kuormituskertaluvun, KKL<sub>SUUNTA</sub>, perusteella. Kuormitusluokan avulla saadaan kuormituskestävyyssmitoituksen lähtötiedoksi tierakenteen tavoitekantavuudet kantavan kerroksen ja päällysteen päältä. Tavoitekantavuudet vastaavat levykuormituskokein eri tierakenteista saavutettuja kevätkantavuuksien arvoja. Lisäksi tien kuormitusluokan perusteella määräytyy käytettävissä olevat päällystetyypit ja kantavan kerroksen materiaalit sekä päällysteen minimipaksuus. (Liikennevirasto, 2018, s. 39-40)

Kuormitusluokkia on yhteensä seitsemän erilaista: 0,3, 0,8, 2,0, 5,0, 10,0, 25,0 ja 60,0 taulukon 1 mukaisesti. Pienin kuormitusluokka, 0,3, antaa mitoituksen kannalta tarvittavat tiedot tielle, jonka KVL ≤ 300 tai 450 ajon/ vrk. Suurimmasta kuormitusluokasta, 60,0, saadaan tiedot tielle, jonka KVL > 35 000 tai 50 000 ajon/ vrk taulukon 2 mukaisesti. Kuormitusluokkien tarkemmat tiedot löytyvät liitteestä 4 ja kuormitusluokan määrittäminen

useampikaistaisilla teillä on esitetty liitteessä 5. (Liikennevirasto, 2018, s. 38-40)

Taulukko 1. Kuormitusluokat (Liikennevirasto, 2018, s. 38).

Peruskaistan kuormitusluokka (KLSUUNTA)	Kuormituskertaluku (KKLSUUNTA)	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
2,0	enintään 2,0	≤ 3 000	≤ 2 000
0,8	enintään 0,8	≤ 1 300	≤ 800
0,3	enintään 0,3	≤ 450	≤ 300

Taulukko 2. Kuormitusluokka 60,0 (Liikennevirasto, 2018, s. 40).

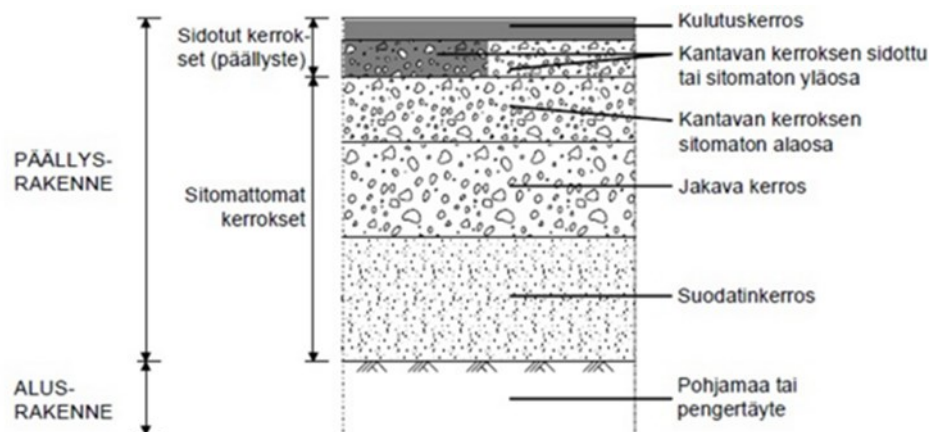
Kuormitusluokka	60,0	
Kantavan kerroksen tyyppi	M, MHST	SST
Viimeistään vuonna 6 tien liikenteelle otosta		
Tavoitekantavuus	540 MPa	545 MPa
Päällysteiden kokonaispaksuus	240 mm	140 mm
Viimeistään vuonna 2 tien liikenteelle otosta		
Päällysteiden kokonaispaksuus	200 mm	
Liikenteelle otettaessa		
Päällysteiden kokonaispaksuus	160 mm	100 mm
Kantava kerros		
Tavoitekantavuus	160 MPa	290 MPa

Kuormituskertaluvun laskentakaavoihin tehdyt muutokset heijastuvat suoraan myös kuormitusluokkien määrittelyyn vuoden 2018 Tierakenteen suunnittelu -ohjeessa. Suurimmaksi kuormitusluokaksi on tullut 60,0 aikaisemman suunnitteluohjeen 25,0 sijaan ja pienin kuormitusluokka on muuttunut 0,1:stä 0,3:een. Kuormitusluokkien tavoitekantavuuksiin ja päällysteiden kokonaispaksuuksiin on tehty sekä pieniä korotuksia että lasuja, riippuen tarkasteltavasta kuormitusluokasta. Kantavan kerroksen materiaalityypeistä bitumistabiloitu kantavakerros, BST, on poistunut valikoimasta.

### 2.3.3 Tien alusrakenteen arviointi ja luokittelu

Tien alusrakenne, kuva 4, koostuu pohjamaasta tai pohjamaan päälle tehdystä pengertäytteestä, joka tehdään tulevan tien tasausviivan ollessa huomattavasti nykyistä maanpintaa korkeammalla. Tien päällysrakenteen mitoittamista varten tarvitaan tien alusrakenteesta lähtötiedoiksi

routaturpoama (t) routamitoitukseen ja alusrakenteen E-moduuli kuormituskestävyyssmitoitukseen. (Liikennevirasto, 2018, s. 18)



Kuva 4. Tierakenne (Brax, 2012, s. 3).

Tien alusrakenne tulee tutkia tien suunnitteluvaiheessa kattavasti maaperätutkimuksin esim. maaperäkairauksin ja maa-aineslaboratoriokokein. Tutkimuksissa tien alusrakenteen maa-aineksesta määritetään rakeisuus, kuivatusolosuhde ja tasalaatuisuus. Lisäksi pohjamaan ollessa hienoraakeista maa-ainesta, tutkitaan myös maa-aineksen leikkauslujuus. Maa-aineksen rakeisuus selvitetään pesuseulonnalla ja tarvittaessa hydrometrikokeella. Määritetyn rakeisuuden ja kuivatusolosuhteen perusteella maa-ainesmateriaalit jaetaan kelpoisuus- ja alusrakenneluokkiin taulukon 3 mukaisesti. Luokittelua tehtäessä otetaan huomioon alusrakenteesta ylin 1 metrin paksuinen maakerros leikkaustason alapuolelta. Kelpoisuusluokalla kuvataan maa-ainesmateriaalin soveltuvuutta tien päällysrakenteeseen tai penkereeseen. Maan kelpoisuusluokkaa hyödynnetään myös kyseisen maa-ainestyyppin tien alusrakenneluokan määrittämiseen sekä erillisen suodatinkerroksen tai -kankaan tarpeellisuuden arviointiin. (Tiehallinto, 2004, s. 34-38; Liikennevirasto, 2018, s. 18, s. 20)



Taulukko 3. Maan kelpoisuus- ja alusrakenneluokat sekä alusrakenteen E-moduuli ja routaturpoama (t) (Liikennevirasto, 2018, s. 21).

Läpäisy- % pesuseulonnessa			Kelpoisuus- luokka	Moduuli E (MPa) Alusrakenneluokka Routaturpoama t (%)		Informatiivisia tietoja	
0,063 mm	2 mm			Kuiva	Märkä	Soveltuvuus 1)	Kuvaus
				E = 280 <b>A</b>	t = 0	Louhe- rakenne	Irtilouhittu kallio tai louhe
				E = 200 <b>B</b>	t = 0	Kantava Jakava	Murske- tai soratäyttöalue
< 7	< 70		S1	E = 100 <b>C</b>	t = 0	Jakava	Sr, srHk (SrMr, srHkMr)
2)	7-15	< 70	S2	E = 70 <b>D</b> t = 0	E = 50 <b>E</b> t = 3	Penger kuivana	SrMr, srHkMr
	16-30	< 70	S3	E = 50 <b>E</b> t = 3	E = 35 <b>F</b> t = 6	Penger kuivana	SrMr, srHkMr
	31-50	< 70	S4	E = 35 <b>F</b> t = 6	E = 20 <b>H</b> t = 12	Penger kuivana	siSrMr, sisrHkMr
< 7	> 70		H1	E = 70 <b>D</b>	t = 0	Suodatin	Hk, (HkMr)
7-15	> 70		H2	E = 50 <b>E</b>	t = 3	Suodatin Penger kuiv.	Hk, HkMr
	16-30	> 70	H3	E = 35 <b>F</b> t = 6	E = 20 <b>H</b> t = 12	Penger kuivana	Hk, HkMr
	31-50	> 70	H4	E = 35 <b>F</b> t = 6	E = 20 <b>H</b> t = 12	Penger kuivana	siHk, siHkMr
<b>0,002 mm</b>	<b>0,063 mm</b>	<b>Leikkaus- lujuus</b>					
< 30	≥ 50		U1	E = 20 <b>H</b> t = 12	E = 20 <b>J</b> t = 16		Si, SiMr, 3) kerrallinen Sa/Si
≥ 30	≥ 50	≥ 40 kPa	U2		E = 35 <b>F</b> t = 6		Jäykkä Sa
≥ 30	≥ 50	< 40 kPa	U3		E = 10 <b>G</b> t = 6		Pehmeä Sa
			U4		E = 10 <b>G</b> t = 6		Lj

1) Kuvaa mahdollista soveltuvuutta. Soveltuvuus päällysrakenteeseen on varmistettava tarkemmillä tutkimuksilla. Kerrosmateriaalien rakeisuuden laatuvaatimukset on esitetty tarkemmin **InfraRYL**:ssä.

2) Kuuluu luokaan s1, jos läpäisyprosentti 0,02 mm kohdalla on alle 3

3) Kerrallinen savi/siltti (Sa/Si) on maata, jossa saven joukossa on ainakin paikoin silttikerroksia tai sitäkin karkeampia (vettä johtavia) kerroksia

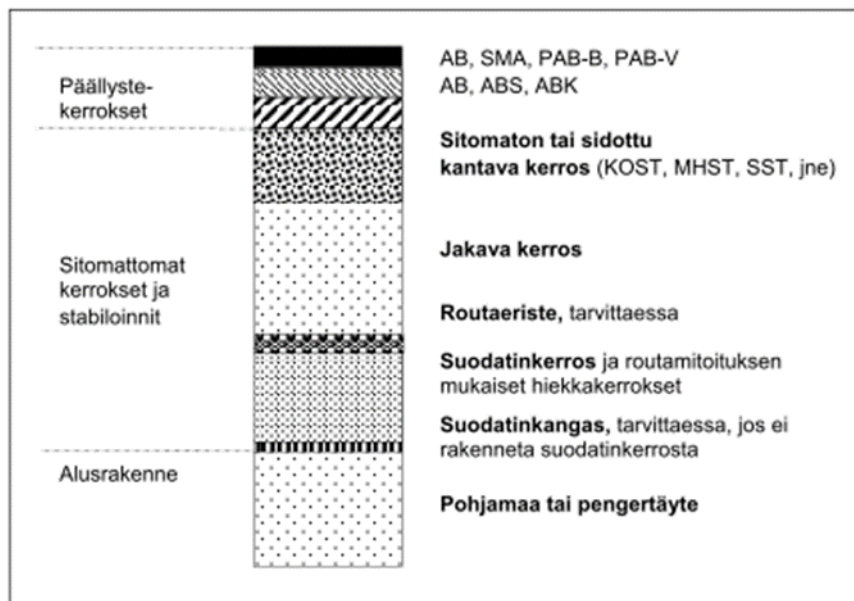
4) Läpäisyprosentit pyöristetään lähimpään kokonaislukuun

### 2.3.4 Tien päällysrakenteen materiaalien E-moduulit

Jotta tierakenteen kuormituskestävyyksimitoitusta voidaan suorittaa, täytyy valitun tien päällysrakenteen eri kerrosmateriaalien kimmomodulit eli E-moduulit tuntea. Tavanomaisessa tierakenteessa päällysrakenne koostuu suodatinkerroksesta, jakavasta kerroksesta, kantavasta kerroksesta ja päällystekerroksesta. Lisäksi päällysrakenne jaetaan sidottuihin ja sitomattomiin kerroksiin, kuva 5. Päällysrakenteen tehtävänä on minimoida



liikenne- ja ilmastokuormitusten aiheuttamia liitteen 1 mukaisia kriittisiä jännityksiä ja muodonmuutoksia tierakenteessa. (Brax, 2012, s. 3-4)



Kuva 5. Tien päällysrakennekerrokset (Liikennevirasto, 2018, s. 11).

Kuormituskestävyysmitoitusta varten päällysrakenteen eri kerroksissa käytettävien materiaalien E-moduulit määritetään tarkemmin kuin alusrakenteen E-moduuli. E-moduulilla kuvataan materiaaliin kohdistuvan jännityksen muutoksen ja sen aiheuttaman materiaalin palautuvan muodonmuutoksen välistä suhdetta. Toisin sanoen E-moduulilla kuvataan materiaalin jäykkyyttä. (Tiehallinto, 2001, s. 15)

Suomalaisessa tien päällysrakenteen mitoitusmenetelmässä kuormituskestävyysmitoitusta tehdään Odemarkin kaavalla. Liikennevirasto ent. Tiehallinto on koontanut yhteen tien päällysrakennekerroksissa yleisesti käytettävien sidottujen ja sitomattomien materiaalien E-moduulit vuonna 2018 julkaistuun ohjeeseen Tierakenteen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 38/2018. Julkaisu korvaa Tiehallinnon vuonna 2005 julkaiseman ohjeen Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D, jossa materiaalien E-moduulit on aikaisemmin esitetty. (Tiehallinto, 2005, s. 1-6; Liikennevirasto, 2018, s. 45-49)

Suunnitteluohjeessa eri materiaalien E-moduulit kuvataan keväällä saatavilla arvoilla, jotka on määritetty takaisinlaskennalla kokemusperäisin levykuormituskokein mitatuista eri tierakenteiden kokonais-E-moduuleista. Näin ollen julkaisussa esitetyt materiaalien E-moduulit ovat staattisia arvoja, jolloin liikennekuormituksen dynaaminen luonne jää huomioimatta. (Liikennevirasto, 2018, s. 45-49; Järvinen, 1991, s. 55-56)

Esitettyjen eri materiaalien E-moduuleiden käyttö Odemarkin yhtälössä edellyttää, että materiaalit täyttävät mm. Asfalttinormeissa, InfraRYL:ssa ja SFS-EN standardeissa niille asetetut vaatimukset. Mikäli materiaali täyttää sille asetetut vaatimukset, voidaan esim. sitomattomaan

päälysrakennekerrokseen käytettävän murskeen E-moduuli määrittää rakeisuusluokan ja raekoon perusteella taulukosta 4. Jos kiviainesta ei ole luokiteltu standardin SFS-EN 13285 mukaisesti, niin esim. murskeen E-moduuli arvioidaan kuvan 6 mukaisesti. ”Rakeisuuskäyrät määritetään pesuseulonnalla ennen kiviaineksen käyttöä otetuista näytteistä” (Liikennevirasto 2018, 46). Kaikkien päälysrakennemateriaalien E-moduulit esitetään liitteessä 6. (Liikennevirasto, 2018, s. 45-47)

Taulukko 4. Odemarkin mitoituksessa käytettävien standardimurskeiden E-moduulit (Liikennevirasto, 2018, s. 46).

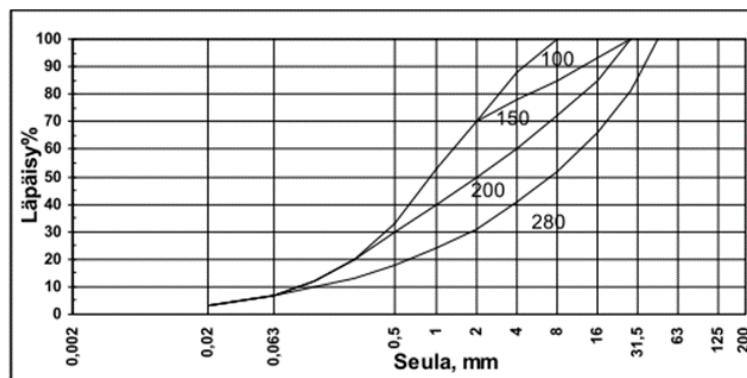
Rakeisuusluokka (SFS-EN 13285 ja InfraRYL)	Moduuli, MPa			
	100	150	200	280
	Raekoko o/D (D = maksimiraekoko), mm			
G <sub>0</sub>	0/8...0/11,2	0/16...0/22	0/31,5	0/40...0/80
G <sub>P</sub>	"	"	0/31,5...0/63	0/80
G <sub>A</sub>	"	"	0/31,5...0/56	0/63...0/80
G <sub>C</sub>	"	"	0/31,5...0/63	0/80
Soratien kulutus.	0/11,2...0/16			
Soratien sidekerros		0/22...0/31,5		

G<sub>0</sub> on vähän hiekkarakeita sisältävä, avoin (eli muodoltaan roikkuva) rakeisuuskäyrä ja siksi hyvin vettä läpäisevä, nopeasti kuivuva ja märkänäkin hyvin kantavuutensa säilyttävä.

G<sub>P</sub> on vastaava rakeisuusluokka, jonka sallittu rakeisuusvaihtelu on suurempi kuin G<sub>0</sub>:lla.

G<sub>A</sub> ja G<sub>C</sub> sisältävät enemmän hiekkaa (0,063...2 mm raekokoja) kuin edellä mainitut.

G<sub>A</sub> ja G<sub>0</sub> kelpaavat **InfraRYL:n** mukaan kantavan kerroksen materiaaliksi.



Moduulit (MPa)	Seulakoko (mm) ja sitä vastaava läpäisy-% enintään									
	0,02	0,06	0,5	1	2	4	8	16	31,5	45
280	3	7	18	24	31	41	52	66	86	100
200	3	7	30	40	50	60	72	85	100	
150	3	7	33	53	70	78	85	93	100	
100	3	7	33	53	70	88	100			

Kuva 6. Murskeen E-moduulin arviointi rakeisuuskäyrän perusteella. Heikoin alue, jolla rakeisuuskäyrä käy, määrää sen E-moduulin. (Liikennevirasto, 2018, s. 47)

### 2.3.5 Kuormituskestävyyssmitoitus Odemark-menetelmällä

Kuormituskestävyyssmitoituksen tarkoituksena on ehkäistä raskaan liikenteen aiheuttama päällysteiden halkeilu sekä pysyvät muodonmuutokset tien päällyste- että alusrakenteessa. Suomessa tavanomaisen tien päällysrakenteen kuormituskestävyyssmitoitus perustuu Odemarkin yhtälöön. Alkuaan Odemarkin kantavuuskaava on suunniteltu kaksikerrossysteemin mitoitukseen, mutta nykyisin sitä käytetään hyvin tuloksin myös useampia rakennekerroksia sisältävän tierakenteen mitoitukseen. Odemark-menetelmä on laadittu teoreettisten tarkastelujen pohjalta, josta saadut tulokset on varmistettu vertaamalla niitä tierakenteista levykuormituskokein mitattuihin kantavuuksiin. (Liikennevirasto, 2018, s. 33; Brax, 2012, s. 12; Järvinen, 1991, s. 56)

Odemark-menetelmässä kuormituskestävyyssmitoituksen lähtötiedoiksi tarvitaan:

- tien päällysrakenteen minimikokonaiskerrospaksuus (routamitoituksen perusteella)
- vaadittu päällystetyyppi ja sen minimipaksuus (kuormitusluokan perusteella)
- tavoitekantavuus päällysteen ja kantavan kerroksen päältä (kuormitusluokan perusteella)
- tien alusrakenteen E-moduuli (alusrakenneluokan perusteella)
- päällysrakennekerrosten materiaalien valinnat ja niiden mitoitus E-moduulien määrittäminen (liitteen 6 perusteella).

Kun lähtötiedot ovat selvillä, niin riittävät kerrospaksuudet etsitään kuormituskestävyyssmitoituksella Odemarkin yhtälöä käyttäen, kaava 7. Mitoitus etenee kerroksittain alhaalta ylöspäin alkaen alusrakenteen pinnalta lisäehtoja 1 ja 2 noudattaen. (Tiehallinto, 2004, s. 32; Liikennevirasto, 2018, s. 43)

$$E_y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{0,15}\right)^2}}\right) \times \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{0,15}\right)^2} \times \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}} \quad (7)$$

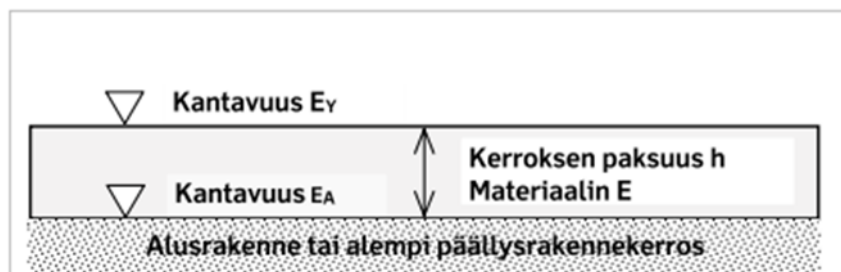
Kaavassa:

$E_A$	mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)
$E_y$	mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa)
$E$	mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuli (MPa)
$h$	mitoitettavan kerroksen paksuus (m)
0,15	kuormittavan pyörän kosketuspinnan laskennallinen säde = levykuormituslaitteen aluslevyn säde (m)

Lisäehto 1: ”Sitomattoman kerroksen käyttökelpoinen E-moduuli on enintään  $6 \times E_A$  ja osittain sidottujen enintään  $n \times E_A$ ” (Liikennevirasto, 2018, s. 44). Kerroin  $n$  saadaan liitteestä 6.

Lisäehto 2: Yhteen liimaantuneet, ehjät bitumilla sidotut kerrokset, joiden  $E > 1500$  MPa, lasketaan yhtenä kerroksena, jonka moduuliksi otetaan osakerrosten moduulien paksuuksilla painotettu keskiarvo. Ehto voi täytyä vain, kun AB-kerrosten bitumipitoisuus on vähintään 3,8 % ja massa on asemasekoitteista. Pelkästään PAB-päällysteitä sisältävissä rakenteissa bitumipitoisuuden pitää olla vähintään 3,1 % ja E-moduulin vähintään 1400 MPa. Samassa rakenteessa olevat PAB- ja AB-kerrokset eivät ole tässä mielessä yhteen liimaantuneita, vaan ne on laskettava erillisinä kerroksina. Vanhentuessaan jäykistynyt, ehjä PAB voidaan kuitenkin laskea yhdeksi yhteen liimaantuneeksi kerrokseksi päälle sen päälle liimatun AB-kerroksen kanssa. (Liikennevirasto, 2018, s. 44)

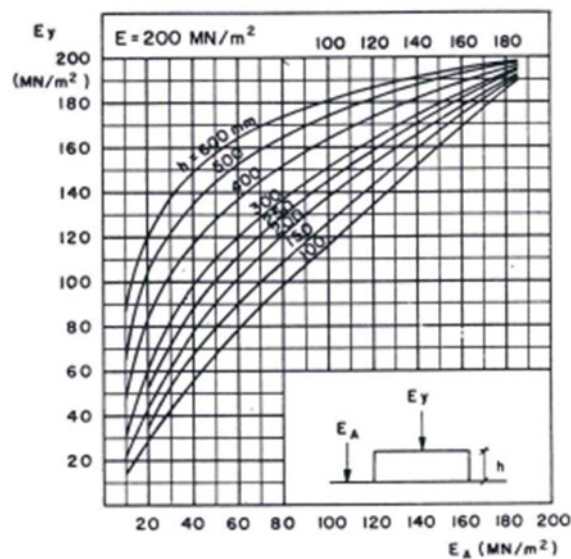
Odemarkin yhtälöllä voidaan siis laskea tietyn paksuisen rakennekerroksen tuottama kantavuuden kasvu tierakenteessa, kun rakennekerroksen materiaalin E-moduuli tunnetaan, kuva 7. Vastaavasti yhtälön avulla voidaan kääntäen laskea halutun kantavuuden kasvun saavuttamiseksi tarvittava rakennekerrospaksuus tietyllä materiaalin E-moduulilla. (Järvinen, 1991, s. 56)



Kuva 7. Odemarkin kantavuuskaavan käsitteet (Liikennevirasto, 2018, s. 44).

Kun kuormituskestävyyssmitoitus Odemarkin yhtälöllä on tehty kerroksittain alhaalta ylös kantavan kerroksen yläpintaan asti, verrataan mitoitukselta saatua kantavan kerroksen kantavuutta mitoituksen lähtötiedoissa annettuun kuormitusluokan tavoitekantavuuteen. Kun kantavan kerroksen päälle tehdään vielä kuormitusluokan vaatima paksuus päällysteitä, niin päällysteen päältä saavutettavaa kantavuutta ei tarvitse laskea, jos kantavan kerroksen tavoitekantavuus täyttyy. Mitoituksessa pyritään löytämään päällysrakenneratkaisu, jonka kokonaispaksuus, routamitoitus huomioiden, on mahdollisimman ohut, mutta täyttää silti kuormitusluokan sille asettaman tavoitekantavuuden ja päällysteen paksuuden. Näin saadaan yleensä selville kustannustehokkain päällysrakenneratkaisu. (Brax, 2012, s. 16; Liikennevirasto, 2018, s. 43)

Odemarkin mitoituskaavan käyttö on työlästä käsin laskemalla, joten tien päällysrakenteessa yleisimmin käytettyjen rakennemateriaalien E-moduuleille on laadittu valmiit mitoituskäyrät, joiden avulla mitoitus saadaan tehtyä nopeammin. Mitoitusnomogrammeja, kuva 8, on yhteensä kahdeksatoista eri E-moduulin arvolle: 30, 50, 70, 100, 150, 200, 280, 350, 1000, 1500 ja 2500 MPa sekä lujitetulle kiviainekselle. Rakennekerroksen mitoittamiseen käytettävä nomogrammi valitaan aina kerroksessa käytettävän materiaalin E-moduulin perusteella liitteen 6 mukaisesti. Mitoitusnomogrammissa ilmenevät suureet;  $h$ ,  $E_A$  ja  $E_Y$  ovat samat kuin Odemarkin kaavassa, kaava 7. Kun näistä suureista kaksi tunnetaan, niin kolmas voidaan laskea. (Järvinen, 1991, s. 57-58)



Kuva 8. Mitoitusnomogrammi materiaalille, jonka E-moduuli on 200 MPa (Järvinen, 1991, s. 57).

### 3 PÄÄLLYSRAKENTEEN KANTAVUUS- JA TIIVIYSMITTAUS

#### 3.1 Laatuvaatimukset ja laadunvalvonta

Infrarakenteiden esim. tien tai kadun rakentamiseen liittyvät laatuvaatimukset tulee esittää vastaavan suunnittelijan toimesta hankekohtaisissa suunnitelma-asiakirjoissa, kuten työselostuksessa ja -piirustuksissa. Eri päällysrakennekerroksien kantavuus- ja tiiviysvaatimukset ilmoitetaan työselostuksessa tiiviysasteella, %, tai kantavuusarvolla,  $E_1$  tai  $E_2$ , ja tiiviysasteella,  $E_2/E_1$ , riippuen mitattavasta kerroksesta. (Kiiskinen, 2013, s. 29)

Suunnittelija määrittää hankekohtaiset laatuvaatimukset ml. kantavuus- ja tiiviysvaatimukset suunnittelua, rakentamista ja laadunvalvontaa ohjaavien yleisten laatuvaatimusten perusteella. Tie ja kadun rakentamisen yleiset laatuvaatimukset esitetään Rakennustietosäätiön julkaisussa InfraRYL

2017, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Päällysteiden osalta yleiset laatuvaatimukset esitetään Asfalttinormit 2017 -julkaisussa. Kantavuus- ja tiiviysvaatimusten osalta suunnittelijan tulee esittää kohteen työselostuksessa: (Kiiskinen, 2013, s. 29)

- kohteen tie-, katu- ja kuormitusluokka
- kantavuus- ja tiiviysvaatimus kerroksittain
- mittaustapa (levykuormituslaite, pudotuspainolaite, troxler tms.)
- mittaustiheys (esim. 1 mittaus 100 m:n välein/ ajorata)
- mittausten dokumentointi.

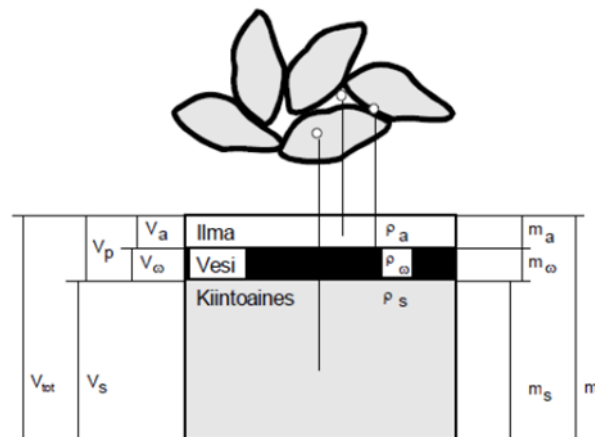
Kohteeseen valitulla urakoitsijalla on päävastuu laadunvarmistuksen toteuttamisesta kohteen työselostuksen laatuvaatimusten tai työselostuksessa viitattujen yleisten laatuvaatimusten mukaisesti. Urakoitsija tai urakoitsijan valitsema konsultti toteuttaa kantavuus- ja tiiviysmittaukset, joilla osoitetaan, että rakenne vastaa näiltä osin suunniteltua. Urakoitsija säilyttää mittausten dokumentit kohteen laatukansiossa, josta tilaaja tai rakennuttaja voi tarkastaa, että mittaukset on suoritettu tarvittavassa laajuudessa ja hyväksytysti. Yleensä tilaaja tai rakennuttaja hyväksyy urakoitsijan työsuorituksen vasta sen jälkeen, kun laatukansio sisältää kaikki vaaditut dokumentit. Liikennevirasto on laatinut omissa kohteissaan käytettävän Urakoitsijan laaturaportointi -ohjeen helpottamaan urakoitsijan laadun raportointia. (Kiiskinen, 2013, s. 12, s. 15)

## 3.2 Tiiviiden ja kantavuuden määritelmät

### 3.2.1 Tiiviys

Tiiviys on tärkeä käsite kaikessa maa- ja pohjarakentamisessa. Maakerrosten lujuus- ja kantavuusominaisuuksia, etenkin karkearakeisissa maakerroksissa ja moreenimaakerroksissa, voidaan luotettavasti arvioida maakerroksen tiiviiden perusteella. Luonnonkosteat maamateriaalit sisältävät kiviaineksen lisäksi ns. huokostilaa, joka koostuu ilmasta ja vedestä, joten maamateriaalin tiiviys määräytyy näiden kolmen komponentin suhteesta, kuva 9. Maarakenteen kiviaineksen osuudella kokonaistilavuudesta on suora vaikutus maarakenteen tiiviyteen. Sitä tiiviimpi maarakenne, mitä enemmän maarakenne sisältää kiviainesta suhteessa kokonaistilavuuteen. Maarakenteen tiiviyttä voidaan kuvata yleisesti ottaen seuraavilla suureilla, joille on määritettävissä tarkat lukuarvot: (Rantamäki, Jääskeläinen & Tamminen, 1997, s. 82)

- tilavuuspaino  $\gamma$
- tiheys  $\rho$
- tiiviysaste  $D$
- suhteellinen tiiviys  $D_r$
- huokosluku  $e$
- huokoisuus  $n$ .



Kuva 9. Maa-aineksen komponentit ja määritelmät tiiviyden määrittämistä varten (Liikennevirasto, 2011, s. 13).

Tiiviyttä kuvaavista suureista tiiviydsaste,  $D$ , on käytännön maanrakennustöissä käyttökelpoisin. Tiiviydsaste määritetään vertaamalla työmaaolosuhteissa maarakenteesta tiiviydsmittauksin saavutettua kuivatilavuuspainoa laboratorio-olosuhteissa Proctor- kokeella maarakenteesta saavutettuun maksimikuivatilavuuspainoon. Tiiviydsaste ilmoitetaan prosenttilukuna kaavan 8 mukaisesti. (Liikennevirasto, 2011, s. 14)

$$D (\%) = \frac{Y_d}{Y_{d \max}} \cdot 100 \quad (8)$$

Kaavassa:

$D$  tiiviydsaste  
 $Y_d$  kuivatilavuuspaino työmaaolosuhteissa  
 $Y_{d \max}$  maksimikuivatilavuuspaino, Proctor- koe

### 3.2.2 Kantavuus

Tarkasteltaessa kantavuuden määritelmää tie- ja katurakenteissa, tulee geotekninen kantavuus ja tien tai kadun rakennustekninen kantavuus pitää erillään toisistaan, koska termillä kantavuus tarkoitetaan näissä tapauksissa eri asiaa. Geoteknistä kantavuutta käytetään geotekniikassa kuvaamaan perustuksen kantokykyä, eli sitä staattista kuormaa, minkä maarakenne kestää ilman murtumatta. Toisin sanoen geotekninen kantavuus on riittävän varmuuden omaava lujuusarvo, jota käytetään erilaisten rakenteiden ja rakennusten mitoituksessa. (Siika, 2006, s. 12)

Tie- ja katurakenteissa termillä kantavuus kuvataan rakenteen kokonaisuusjäykkyyttä, eli rakenteen kykyä vastustaa muodonmuutosten syntymistä kuormituksen alaisena. Kantavuus esitetään yleensä taipumana, jonka tietyn suuruinen kuorma aiheuttaa tierakenteeseen, ja koko tie- tai katurakenteen kimmokertoimen eli E-moduulina. Kantavuusarvoon, E-moduuli, vaikuttaa koko tie- tai katurakenteen jäykkyys sekä pohjamaan

ominaisuudet, etenkin ohuilla tie- tai katurakenteilla. (Siika, 2006, s. 12; Liikennevirasto, 2011, s. 26)

Kantavuus on terminä hieman harhaanjohtava, koska kantavuudella tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia, mutta kuitenkin kantavuusarvo perustuu nimenomaan palautuviin muodonmuutoksiin. Kantavuutta käytetään epäsuorana kuormituskestävyyden mittarina etenkin luonnonmateriaaleilla rakennetuissa tie- ja katurakenteissa. (Liikennevirasto, 2011, s. 26)

Tie- ja katurakenteet ovat kehittyneet ajan myötä. Nykyisin tien tai kadun päällysrakenteisiin käytetään yhä enemmän toisistaan poikkeavia materiaaleja, jolloin eri rakennekerrosten kimmokertoimet, E-moduulit, voivat olla hyvinkin erisuuruisia. Tämän seurauksena yhdellä koko tierakennetta kuvaavalla kimmokertoimen, E-moduulin, arvolla ei ole enää samaa merkitystä kuin aiemmin. On osoitettu, että nykyisten tie- ja katurakenteiden kestävyys vaikuttaa pääosin kuormitusten lukumäärä eikä niinkään yksittäinen maksimikuorma. Tie- ja katurakenteen kantavuuden määritelmästä onkin siirrytty kestävyysmääritelmään, josta käytetään myös nimitystä kestoikä. (Siika, 2006, s. 12; Liikennevirasto, 2011, s. 26)

### 3.3 Päällysrakenteen tiiviyyden ja kantavuuden vaikuttavat tekijät

Työmaaolosuhteissa päällysrakennekerroksien tiivistämisellä saavutetaan päällysrakennekerroksille tietty tilavuuspaino, lujuus ja jäykkyys. Näiden ominaisuuksien kehittymiseen vaikuttavat useat asiat: päällysrakennekerroksessa vallitseva jännitystila, materiaalin vesipitoisuus, rakeisuus ja raemuoto. Päällysrakenteesta saavutettavasta tiiviyydestä ja kantavuudesta puhuttaessa kaikkein merkittävin yksittäinen tekijä on kuitenkin tiivistystyöhön käytetty energia. Tiivistettävään päällysrakenteeseen siirtyvän tiivistysenergian määrään vaikuttavat mm. tiivistyskalusto, pohjamaaolosuhteet, työmenetelmät ja tiivistettävän päällysrakenteen muoto. (Liikennevirasto, 2011, s. 19)

#### 3.3.1 Jännitystila

Päällysrakennekerroksen päältä saavutettava kantavuus ei voi olla käytetyn materiaalin jäykkyyttä suurempi. Materiaalin jäykkyyteen vaikuttaa erityisesti materiaalissa vallitseva jännitystila. Sitomattomat karkearakeiset rakennekerrosmateriaalit, kuten murske ja sora, toimivat sitä jäykemmin, mitä suurempi on vallitseva jännitystila. (Liikennevirasto, 2011, s. 33-34)

Tierakenteessa vallitseva jännitystila koostuu kolmen toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa vaikuttavan pääjännityksen summasta. Pääjännitykset koostuvat ulkoisesta kuormasta esim. liikennekuormasta ja tierakenteen omasta painosta. Tierakenteessa sitomattomiin



päälysrakennekerrokseen kohdistuu kuormitustilanteessa puristusjännitystä ja vastaavasti sidottuihin päälysrakennekerrokseen kohdistuu kuormitustilanteessa vetojännitystä. (Liikennevirasto, 2011, s. 34; Tiehallinto, 2002, s. 32)

Sitomattomien kitkamaamateriaalien jäykkyyden, E-moduuli, jännitystilarippuvuutta kuvataan pääjännitysten summan avulla. Tierakenteessa pääjännitysten summa on suurimmillaan sitomattoman kantavan kerroksen yläpinnassa, minkä seurauksena sitomattomien kitkamaamateriaalien jäykkyys on myös suurimmillaan samassa kerroksessa liitteen 7 mukaisesti. (Tiehallinto, 2002, s. 32-33)

Huolellisella tiivistämisellä voidaan edistää maapartikkeleiden välisten jännitysten muodostumista ja jakautumista tierakenteessa, jonka seurauksena tierakenteen jäykkyys (kantavuus) kasvaa. Myös käytetyn materiaalin kosteus, rakeisuus ja raemuoto vaikuttavat materiaalin jäykkyyteen. (Liikennevirasto, 2011, s. 18, s. 34)

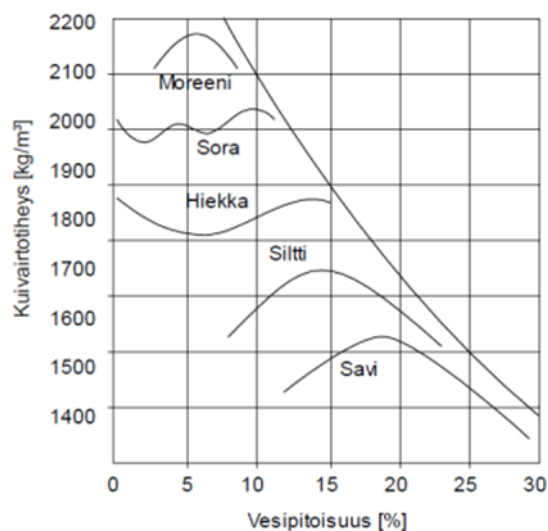
### 3.3.2 Materiaalin rakeisuus

Sitomattomaan päälysrakennekerrokseen käytettävän maa-aineksen rakeisuus, eli raekokojakautuma, on tärkein materiaaliominaisuus, joka vaikuttaa päälysrakenteen tiiviuteen, jäykkyyteen ja lujuuteen. Maa-aineksen raekokojakautumalla on suora vaikutus päälysrakenteesta saavutettavaan kuivatilavuuspainon maksimiarvoon. Maa-ainekset jaetaan seka- ja tasarakeisiin maa-aineksille toteutettavien seulontakokeiden perusteella. Seulonnan tuloksena saatavalta maa-aineksen rakeisuuskäyrältä tulkitaan raekokosuhteen perusteella, onko maa-aines seka- vai tasarakeinen. Raekokosuhte määritetään maa-aineksen rakeisuuskäyrältä läpäisyprosenttien 60 ja 10 kohdalta saatujen raekokojen suhteena,  $C_u = d_{60} / d_{10}$ . Maa-aines on tasarakeista raekokosuhteen ollessa  $\leq 5$  ja sekarakeista, jos  $5 < \text{raekokosuhte} \leq 15$ . Raekokosuhteen ollessa  $> 15$  maa-aines on suhteistunut. (Liikennevirasto, 2011, s. 19-20)

Tiivistyksen kannalta tasarakeinen maa-aines on ongelmallista, sillä tasarakeisessa maa-aineksessa kaikki rakeet ovat samankokoisia, jolloin rakeiden väliin jää paljon tyhjää tilaa. Tämän seurauksena tasarakeisella maa-aineksella tehdyn päälysrakenteen tiiviys ja kantavuus jäävät alhaisiksi. Vastaavasti sekarakeisella maa-aineksella toteutettu päälysrakenne tiivistyy huomattavasti paremmin, sillä isojen rakeiden välit täyttyvät pienemmillä rakeilla, jolloin tyhjän tilan osuus jää pieneksi ja näin ollen päälysrakenteelle saavutetaan korkeampi tiiviys ja kantavuus. (Liikennevirasto, 2011, s. 19-20)

### 3.3.3 Materiaalin vesipitoisuus

Sitomattomaan päällysrakennekerrokseen käytettävän kiviaineksen vesipitoisuudella on suuri vaikutus päällysrakenteesta tiivistyksellä saavutettavaan tilavuuspainoon, etenkin käytettäessä hienorakeista kiviainesta. Veden vaikutus käytännön tiivistystyössä on merkittävä, sillä vesi toimii tavallaan voiteluaineena maarakenteessa maapartikkelien välissä vähentäen maapartikkelien välistä kitkaa, minkä vuoksi tiivistämiseen tarvittava energiamäärä on pienempi. Mikäli päällysrakenteeseen käytettävän maa-aineksen vesipitoisuus on lähellä materiaalin kyllästyspistettä, vesi tehostaa tärytiivistyksen vaikutusta aiheuttamalla huokosveden ylipainetta maarakenteeseen. Huokosveden ylipaineen vuoksi maarakenteen leikkauslujuus heikentyy, sillä maapartikkelien väliset tehokkaat jännitykset pienentyvät. Jokaiselle maa-ainekselle on olemassa ns. optimivesipitoisuus, jossa tiivistystyö onnistuu parhaiten ja saavutetaan mahdollisimman korkea kuivatiilavuuspaino, kuva 10. (Liikennevirasto, 2011, s. 20-21)



Kuva 10. Vesipitoisuuden vaikutus eri maamateriaalien tiivistymiseen (Liikennevirasto, 2011, s. 21).

### 3.3.4 Työmenetelmät ja pohjamaaolosuhteet

Päällysrakenteen tiivistämiseen käytetyt työmenetelmät sekä pohjamaaolosuhteet ovat tärkeitä tekijöitä puhuttaessa päällysrakenteesta saavutettavasta tiiviydestä ja kantavuudesta. Tiivistysenergia siirretään tiivistettävään päällysrakenteeseen staattisen paineen, iskun tai tärytyksen avulla. Näistä yleisimmin käytetään tärytiivistystä, etenkin karkearakeisissa maarakenteissa. Tiivistyksen tarkoituksena on liikuttaa maarakeita niin, että ne asettuvat aikaisempaa tiiviimpään asemaan, jolloin päällysrakenteen jännitystila kasvaa. Tiivistystyössä tulee käyttää mahdollisimman suurta energiamäärää, jonka maarakeet kestävät rikkoontumatta. Päällysrakenteen tiivistämiseen käytettävä tiivistyskalusto tulee valita siten, että koko päällysrakenteen tiivistäminen on kyseisellä laitteella mahdollista. Ennen

tiivistystyön aloitusta tulee tietää eri tiivistyskalustojen ominaisuudet ja soveltuvuus eri päällysrakennekerroksille liitteen 8 mukaisesti. (Liikennevirasto, 2011, s. 22-25)

Tiivistystyön tehokkuuteen vaikuttaa olennaisesti pohjamaaolosuhteet, jotka ohjaavat käytettävien työmenetelmien valintaa. Kantavalla pohjamaalla voidaan tiivistettävän päällysrakenteen kerrospaksuus mitoittaa tiivistyskaluston mukaan. Vastaavasti huonosti kantavalla pohjamaalla tiivistystyössä tulee kiinnittää huomiota pohjamaan häiriintymiseen, joten tiivistystyö toteutetaan joko rakentamalla hyvin ohuita kerroksia ja käyttämällä kevyttä tiivistyskalustoa tai rakentamalla ensimmäinen tiivistettävä kerros mahdollisimman paksuna ja käyttämällä raskasta tiivistyskalustoa. (Liikennevirasto, 2011, s. 25)

Pohjamaaolosuhteet vaikuttavat myös päällysrakenteen tiivistykseen tarvittavien ylityskertojen lukumäärään, liite 8. Tiivistykseen käytettävä energiamäärä kasvaa ylityskertojen lisääntyessä, mutta ylityskertojen lisääminenkään ei paranna päällysrakenteen tiiviyttä loputtomasti, vaan liiallinen tiivistäminen johtaa usein päällysrakenteen pintakerroksen hienonemiseen, jonka vuoksi päällysrakenteen kantavuus ja tiiviys heikentyy. (Liikennevirasto, 2011, s. 25)

### 3.3.5 Ympäristöolosuhteet

Tierakenteen kantavuudelle on ominaista voimakas kausivaihtelu. Keväisin tierakennetta rasittaa kelirikko roudan ja lumen sulaessa, jolloin tierakenteen vesipitoisuus lisääntyy. Kelirikon aikana tierakenteeseen kohdistuva liikennekuormitus aiheuttaa tierakenteessa huokosveden ylipainetta, joka pienentää tien rakennekerroksissa valitsevaa jännitystilaa. Jännitystilan laskun myötä rakennekerros materiaalien lujuus pienenee ja koko tierakenteen kantavuus alenee. Vastaavasti talvella tierakenteen jäätyessä kantavuus on erittäin suuri. Lisäksi päällystetyillä tierakenteilla lämpötilalla on suuri merkitys tierakenteen kantavuuteen, koska tierakenteen taipuma kasvaa ja kantavuus alenee päällysteen lämpötilan kasvaessa. (Liikennevirasto, 2011, s. 35; Terkki, 1992, s. 58)

## 3.4 Päällysrakenteen tiiviysmittaus

Tiiviiden kenttämittausmenetelmät voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin kenttämittausmenetelmiin. Jotta työmaalla suoralla kenttämittausmenetelmällä toteutettavan maarakenteen tiiviysmittauksen tulokset ovat vertailukelpoisia, täytyy ensin määrittää kyseessä olevan maarakenteen kuivatilavuuspainon maksimiarvo. Suomessa kuivatilavuuspainon maksimin määrittämiseen käytetään mm. parannettua Proctor-koetta, joka suoritetaan standardin SFS-EN 13286-2 mukaisesti. (Hämäläinen, 2011, s. 8; Liikennevirasto, 2011, s. 14)

### 3.4.1 Proctor- koe

Proctor- kokeen tarkoituksena on selvittää, millä vesipitoisuudella,  $w$ , tietylle maarakenteelle saadaan mahdollisimman suuri kuivatilavuuspaino, jota kutsutaan maksimi kuivatilavuuspainoksi,  $\gamma_{d \max}$ . Proctor- koe suoritetaan Proctor- sulloimella, jossa mielivaltaisessa vesipitoisuudessa oleva maanäyte tiivistetään koesylinterissä viidessä eri kerroksessa kerralla tiivistettävän kerroksen paksuuden ollessa n. 3 cm. Kutakin kerrosta sullotaan koesylinteriin pudotusvasaralla 25 iskulla, joten iskujen kokonaismäärä yhdessä Proctor- kokeessa on 125 kpl. (Hämäläinen, 2011, s. 12; Rantamäki ym., 1997, s. 88)

Sullonnassa pudotusvasaran annetaan vapaasti pudota halkaisijaltaan 50 mm:n alaisimmalle, jota pidetään paikallaan maanäytteen pintaa vasten. Alasimen paikkaa maanäytteen pinnalla muutetaan jokaisen iskun jälkeen. Sullonnan yhteydessä käytetään varsinaisen koesylinterin yläosan jatkeena n. 50 mm korkeaa jatkorengasta. Kun viidennen maanäytekerroksen sullonta on suoritettu, poistetaan jatkorengas varsinaisen koesylinterin yläosasta ja tasataan sullottu maanäyte koesylinterin yläreunaa sekä tilavuutta vastaavaksi poistamalla ylimääräinen maa-aines koesylinterin pinnalta esim. teräsviivainta käyttäen. (Rantamäki ym., 1997, s. 88)

Ennen koetta koesylinteri punnitaan tyhjänä ja sullonnan jälkeen maatäyteisenä tilavuuspainon laskemista varten. Lisäksi sylinterissä olevan sullotun maanäytteen vesipitoisuus määritetään kuivatus- tai karbidometrime- netelmällä. Näiden mittausten perusteella lasketaan sullotun maanäytteen tilavuuspaino märkänä ja kuivana. (Rantamäki ym., 1997, s. 88)

Mielivaltaisessa vesipitoisuudessa suoritettu Proctor- koe ei suoraan anna tulokseksi tietyn maalajin maksimikuivatilavuuspainoa,  $\gamma_{d \max}$ , koska Proctor- kokeen tulos riippuu siitä, missä vesipitoisuudessa koe suoritetaan. Joten käytännössä Proctor- koe toistetaan samalle maalajille useita kertoja käyttäen jokaisessa kokeessa eri vesipitoisuutta, jotta löydettäisiin ns. optimivesipitoisuus,  $w_{opt}$ , millä Proctor- kokeessa saavutetaan tietylle maalajille maksimikuivatilavuuspaino,  $\gamma_{d \max}$ , taulukko 5. (Rantamäki ym., 1997, s. 89)

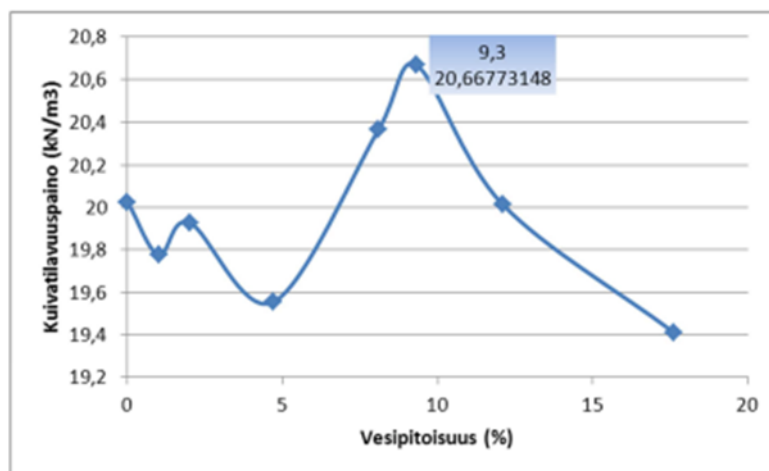
Taulukko 5. Eri maalajien optimivesipitoisuuden vaihtelualueet (Rantamäki ym., 1997, s. 90).

Maalaji	Optimivesipit. $w_{opt}$ (%)	$\gamma_{d \max}$ ( $\text{kN/m}^3$ )
Sr ja SrMr	5...10	20...22
Hk	5...15	17...20
Si	15...25	16...18
Sa	20...30	14...17
HkMr ja SiMr	5...10	20...23

Proctor- kokeiden tulokset kuvataan pisteinä diagrammissa, jossa pystyakselilla on maanäytteen kuivatilavuuspaino ja vaaka-akselilla maanäytteen vesipitoisuus. Koordinaatiston pisteet yhdistetään käyräksi, joka kuvaa

Proctor- kokeissa saavutetun maan kuivatilavuuspainon riippuvuutta ko. maalajin vesipitoisuuteen. Piirretyltä käyrältä havaitaan maalajin ns. optimivesipitoisuus,  $W_{opt}$ , jolla Proctor- kokeessa saavutetaan suurin kuivatilavuuspaino eli maksimikuivatilavuuspaino,  $\gamma_{d\ max}$ , taulukko 6. (Kiiskinen, 2013, s. 18)

Taulukko 6. Esimerkki Proctor- kokeen tuloksista (Hämäläinen, 2011, s. 15).

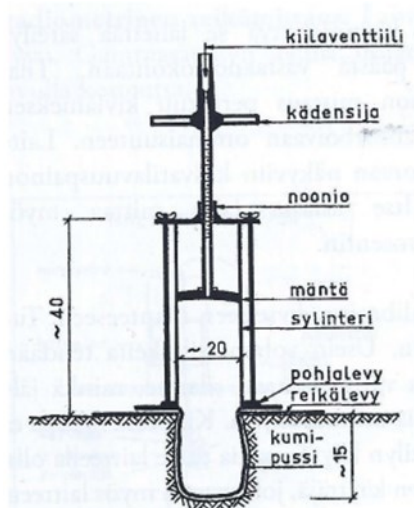


Käytännön maarakennustoiminnan kannalta Proctor- kokeen avulla määritetyt em. suureet ovat hyvin tärkeitä. Optimivesipitoisuus osoittaa sen vesipitoisuuden, missä ko. maalajin tiivistyminen onnistuu parhaiten, joten maarakenteiden käytännön tiivistystyö tulisivin toteuttaa työmaalla aina optimivesipitoisuudessa. Proctor- kokeessa saatua maksimikuivatilavuuspainon arvoa käytetään puolestaan maarakenteille työmaalla toteutettavien käytännön tiiveysmittausten tulosten arvosteluun tiiveysasteen,  $D$ , avulla em. kaavan 8 mukaisesti. Urakkakohtaisiin maarakennuksen työselityksiin sisällytetään maarakenteen käyttö- ja toimintatavasta riippuvia tiiveysasteen vähimmäisarvoja, jotka maarakenteen tulee täyttää, jotta maarakenne on tiiveyden osalta laadultaan kelvollinen. (Hämäläinen, 2011, s. 15)

### 3.4.2 Vesi- ja hiekkavolyometri

Volymetrikokeet ovat työmaalla toteutettavia ns. suorina käytännön tiiveysmittausmenetelmiä, joissa mitataan luonnontilallisen maarakenteen tilavuuspaino ja sitä verrataan laboratorioissa Proctor- kokeella selvitettyyn maksimi kuivatilavuuspainoon, jolloin tutkittavalle maarakenteelle saadaan määritettyä tiiveysaste,  $D$ . Volymetrikokeissa tutkittavaan maakerrokseen kaivetaan kuoppa, josta otetaan talteen kaikki irronnut maa-aines ja mitataan kuopan tilavuus. Kuopan tilavuus mitataan joko vedellä tai hiekkalla, joista tulevat myös menetelmien nimitykset vesi- ja hiekkavolymetrikoet. (Hämäläinen, 2011, s. 8; Liikennevirasto, 2011, s. 14)

Vesivolymetrikokeessa maarakenteeseen kaivettuun kuoppaan sijoitetaan ohutseinämäinen kumipussi, joka täytetään vedellä, jolloin kuopan tilavuuden ilmoittaa kumipussin sisältämä veden määrä. Koe aloitetaan tasamalla maanpinta huolellisesti tutkittavalta kohdalta, jonka jälkeen maanpinnalle asetetaan pohjalevy, jossa on keskellä vesivolymetrille sopiva reikä. Vesivolymetri asetetaan pohjalevyn päälle laitteiston männän ollessa yläasennossa, jonka jälkeen kädensijoista painetaan mäntää alaspäin niin kauan, kunnes painemittarin lukema on 0,2 bar. Tämän jälkeen männän varresta luetaan mitta-asteikolta alkulukema, kuva 11. (Liikennevirasto, 2011, s. 14)



Kuva 11. Vesivolymetri (Rantamäki ym., 1997, s. 283).

Seuraavaksi vesivolymetri nostetaan pois pohjalevyn päältä mäntä yläasennossa ja kaivetaan kuoppa pohjalevyn reiän kohdalle, kuva 12. Kuoppa kaivetaan n. 20 cm syväksi ja kuopasta pyritään ottamaan talteen kaikki liikahantanut maa-aines. Kuopasta otettu maa-aines kuivataan ja punnitaan. Kuopan kaivun jälkeen vesivolymetri nostetaan takaisin pohjalevyn reiän päälle, jolloin kumipussi laskeutuu kuoppaan. Tämän jälkeen kädensijoista painetaan mäntää niin, että sylinteriin muodostuu sama 0,2 bar paine, jolloin mitta-asteikolta voidaan lukea loppulukema. Kuopan tilavuus voidaan nyt laskea männän korkeuslukemien, alku- ja loppulukema, erotuksen avulla. (Liikennevirasto, 2011, s. 15; Kiiskinen, 2013, s. 29)



Kuva 12. Vesivolymetrikoe (Liikennevirasto, 2011, s. 15).

Luonnontilallisen maarakenteen kuivatilavuuspaino saadaan nyt määritettyä jakamalla kuopan sisältämän kuivatun maa-aineksen paino kuopan tilavuudella. Lopuksi saatua kuivatilavuuspainon arvoa verrataan laboratoriossa Proctor- kokeella määritettyyn maksimi kuivatilavuuspainon arvoon ja lasketaan tiivysaste,  $D$ , kaavan 8 mukaisesti. (Liikennevirasto, 2011, s. 15)

Vesivolymetrin heikkouksia ovat pieni näytekooko ja jäykkä kumipussi, jonka vuoksi vesivolymetri soveltuu huonosti karkearakeisten maarakenteiden tiivysasteen mittaamiseen. Sillä jäykkä kumipussi ei tunkeudu kaikkiin kuopassa oleviin koloihin, jolloin mitattu kuopan tilavuus jää todellista tilavuutta pienemmäksi. Tämän seurauksena maarakenteen tilavuuspainon ja tiivysasteen arvot ovat todellisia arvoja suuremmat. Vesivolymetrikoe on monimutkaisempi ja vaatii tehtävään sopivat välineet, mutta on kuitenkin nopeampi toteuttaa kuin hiekkavolymetrikoe. Lisäksi vesivolymetrin käyttö ei ole riippuvainen sääolosuhteista. (Liikennevirasto, 2011, s. 15)

Hiekkavolymetrikokeessa maarakenteeseen kaivettu kuoppa täytetään veden sijaan hiekalla. Käytetyn hiekan tulee olla tasarakeista ja tilavuuspaino ennalta selvitetty. Tutkittavan maarakenteen tilavuuspaino voidaan laskea kuopasta kaivetun maa-aineksen painon ja kuoppaan käytetyn hiekkamäärän perusteella. Hiekkavolymetrin etuna vesivolymetriin nähden voidaan pitää sen soveltuvuutta myös karkearakeisten maarakenteiden tiivysasteen mittaamiseen. Heikkoutena hiekkavolymetrillä on sen riippuvuus sääolosuhteista, sillä koe voidaan suorittaa vain täysin kuivalla säällä. (Liikennevirasto, 2011, s. 15; Hämäläinen, 2011, s. 8-9)

### 3.4.3 Troxler

Työmaalla toteutettaviin suoriin käytännön tiiviysmittausmenetelmiin luokituvat myös erilaiset säteilymittauslaitteet, joilla maarakenteen tilavuuspaino määritetään radiometrisin menetelmin. Säteilymittauslaitteet aiheuttavat radioaktiivista säteilyä maarakenteeseen, jolloin säteily siroaa ja vaimenee eri maa-aineksilla ja tiheyksillä eri tavoin. Näiden tietojen avulla säteilymittauslaite rekisteröi mm. tiiveys- ja kosteustietoja maarakenteesta. Suomessa yleisimmin käytetty säteilymittauslaite on Troxler. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2010, s. 62; Hämäläinen, 2011, s. 9)

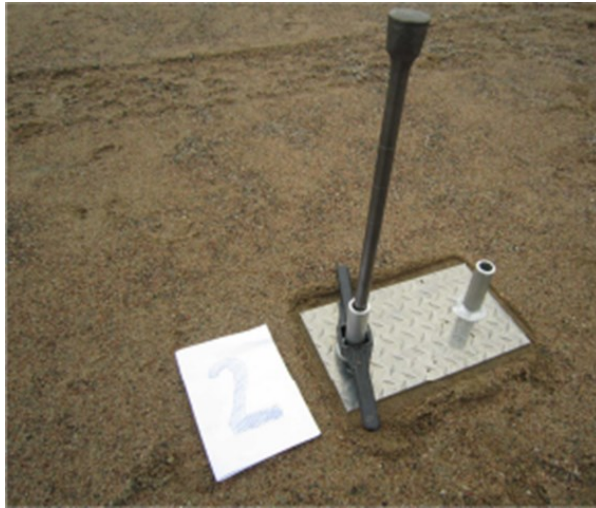
Troxler- säteilymittauslaitteella mittaukset voidaan suorittaa joko heijastusmittauksena maarakenteen pinnalta tai suoramittauksena 50 - 300 mm:n syvyydeltä maarakenteesta. Heijastusmittausta käytetään erityisesti erilaisten pinnoitekerrosten, kuten betoni ja asfaltti, tiiviysmittauksiin. Vastaavasti anturisauvan avulla tehtävät suoramittaukset ovat ihan-teellisiä mitattaessa maarakennetta tai maalajitteita. (Hämäläinen, 2011, s. 16; Kiiskinen, 2013, s. 26)

Ennen mittausta laite tulee kalibroida laitteen mukana tulevan referenssilohkon päällä, kuva 13. Lisäksi tutkittavan maarakenteen pinnan tulee olla huolellisesti tasattu ja hierretty laitteen mukana tulevan hierontolevyn avulla. Suoramittauksessa tehdään poraustangolla vielä reikä maarakenteeseen haluttuun mittaussyvyyteen, kuva 14. Valmistelujen jälkeen mittauslaite asetetaan tarkasti tutkittavaan kohtaan siten, että suoramittauksessa anturisauva menee täsmälleen sille porattuun reikään. Tämän jälkeen suoritetaan itse mittaus, kuva 15. Mittauksen kestoa voidaan muuttaa, mutta 60 sekunnin mittauksella päästään yleensä riittävään tarkkuuteen. (Kiiskinen, 2013, s. 16)

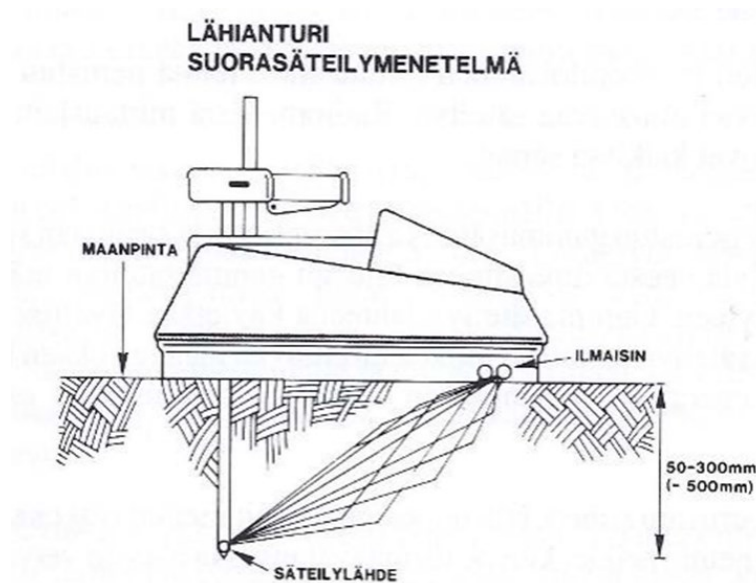


Kuva 13. Troxler 3440- säteilymittauslaite ja referenssilohko (Hämäläinen, 2011, s. 16).





Kuva 14. Hiertolevy ja suoramittauksen poraustanko (Hämäläinen, 2011, s. 18).



Kuva 15. Suoramittausmenetelmän toimintaperiaate (Kiiskinen, 2013, s. 27).

Mittauksessa saadaan selville maarakenteen märkätilavuuspaino ja vesipitoisuus, joiden perusteella laite laskee maarakenteen kuivatilavuuspainon mitatussa kohdassa. Laitteen laskemaa kuivatilavuuspainon arvoa verrataan Proctor- kokeella määritettyyn maarakenteen maksimi kuivatilavuuspainon arvoon, jolloin lopputuloksena saadaan määritettyä maarakenteen tiivysaste,  $D$ . (Kiiskinen, 2013, s. 27)

Troxler- säteilymittauslaitteen etuja ovat mittauksen nopeus ja helppous. Mutta vastaavasti laitteen heikkouksia ovat:

- kerralla mitattavan maarakenteen paksuus voi olla enintään 300 mm, joten paksuilla täyttökerroksilla mittauksia joudutaan tekemään useasti

- mitattavan maarakenteen tulee olla tasarakeista ja mittausta edeltävät maarakenteen pohjatyöt, tasaus ja hierto, tulee tehdä erittäin huolellisesti.

Infrarakentamisessa Troxler- mittaus soveltuukin parhaiten pieni- ja tasarakeisilla maa-aineksilla tehtyjen maarakenteiden tiiviysmittauksiin. Karkearakeisilla maa-aineksilla tehtyjen maarakenteiden mittaus Troxler- laitteella on epäluotettavaa, koska anturisauvan ja vastaanottimen väliin voi jäädä suuria kiviä, jotka vääristävät mittaustuloksen. (Hämäläinen, 2011, s. 26; Kiiskinen, 2013, s. 27)

### 3.5 Päälysrakenteen kantavuusmittaus

Väylärakenteet mitoitetaan yleisesti kevät kantavuuden mukaan, joten kantavuusmittaukset tulisi ajoittaa keväälle, jolloin roudan sulaminen on jo alkanut. Näin saadaan selville tierakenteen heikoin kantavuus. Kantavuusmittauksia voidaan suorittaa myös kesällä, mutta niitä ei saa koskaan suorittaa talvella jäätyneestä rakenteesta. Tie- ja katurakenteiden kantavuusmittauksia voidaan suorittaa useista eri syistä, joita ovat esimerkiksi rakennusaikainen laadunvalvonta, kelirikkorajoitusten määrittäminen, kantavuuden inventointi ja lähtötietojen määrittäminen suunnitteluun. (Terkki, 1992, s. 59, s. 63-64)

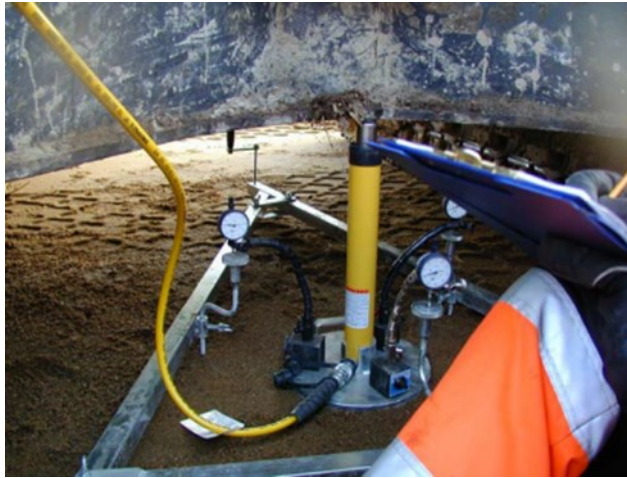
Kantavuusarvojen mittaamiseen tie- ja katurakenteista on kehitetty useita mittausmenetelmiä, joista yleisimmin käytettyjä ovat levykuormituskoe, LKK, sekä erilaiset pudotuspainolaitteet, PPL. Nämä mittausmenetelmät on kehitetty pääosin tie- tai katurakenteen kantavuuden mittaamiseen, koska niissä käytetty kuormitus mallintaa kuorma-auton pyöräkuormaa. (Liikennevirasto, 2011, s. 27)

#### 3.5.1 Levykuormituskoe

Levykuormituskoe on ensimmäinen tierakenteen kantavuuden mittaamiseen kehitetty mittausmenetelmä. Suomessa levykuormituskokeita on suoritettu jo 1950-luvulta lähtien ja nykyään se on yleisimmin käytetty kantavuusmittausmenetelmä Pohjoismaissa. Levykuormituskokeessa tarkastellaan kantavuuden lisäksi myös tierakenteen tiiviyyttä sen kantavuuden kautta, joten levykuormituskoe on myös ns. epäsuora tiiviysmittausmenetelmä. Etenkin tierakenteiden, joissa maa-aineksen raekoko on suuri, tiiviysmittaukset toteutetaan epäsuorin mittausmenetelmin, koska suorilla mittausmenetelmillä, kuten volymetri tai Troxler, ei saataisi luotettavia tuloksia. (Kiiskinen, 2013, s. 20; Hämäläinen, 2011, s. 10)

Levykuormituskoe on luonteeltaan staattinen in situ- mittausmenetelmä, jossa mitataan tierakenteen painumaa halkaisijaltaan 300 mm:ä olevan kuormituslevyn alla. Vanhemmissa levykuormituslaitteissa painumamittaus tapahtuu kolmella mittakellolla, jotka sijoitellaan kuormituslevyn

kehälle 120° välein, kuva 16. Sen sijaan nykyaikaisemmassa levykuormituslaitteessa painumamittaus tapahtuu yhdellä mittakellolla, joka sijoitetaan kuormituslevyn keskelle, kuva 17. (Liikennevirasto, 2011, s. 27; Kiiskinen, 2013, s. 20-21)



Kuva 16. Levykuormituskoe kolmella mittakellolla (Liikennevirasto, 2011, s. 28).



Kuva 17. Levykuormituskoe yhdellä mittakellolla (Kiiskinen, 2013, s. 20).

Kokeessa kuormituslevy asetetaan mitattavan tierakenteen pinnalle, jonka tulee olla vaakasuora ja tasainen. Mahdolliset mittauskohdan epätasaisuudet tulee tasata hiekalla ennen koetta. Asennustyön jälkeen tarvittava kuorma tuotetaan hydraulisella tunkilla, jonka vastapainona toimii esim. kaivinkone tai kuorma-auto. Ensin kuormituslevyyn kohdistetaan 3,5 kN esikuormitus, jotta levyn alla oleva tasaushiekka tai löyhä pintakerros saadaan tiivistettyä. Tämän jälkeen mittakello/ -t nollataan ja kuormituslevyä

kuormitetaan välillä 0...60 kN nostaten kuormitusta aina 10 kN kerrallaan. Mitattavaan rakenteeseen syntyneet painumat luetaan mittakellosta/ -kelloista ja kirjataan muistiin jokaisen kuormituksen noston jälkeen, kun rakenteen painumisnopeus on hidastunut alle 0,01 mm/ min nopeuteen. Maksimikuormituksen, 60 kN, jälkeen syntynyt painuma merkitään muistiin, jonka jälkeen kuormitus alennetaan nolnaan ja koe toistetaan kuten edellä. (Liikennevirasto, 2011, s. 27; Siika, 2006, s. 16)

Vaihtoehtoisesti levykuormituskokeelle on olemassa myös mittausmenetely, jossa kuormitus nostetaan suoraan maksikuormaan, 60 kN, ilman väliportaita, mutta tällöin mitattavan rakenteen eri syvyyksissä tapahtuvien painumien vertailu ei ole mahdollista. Levykuormituskoe toteutetaan aina kaksi kertaa samalle tutkimuskohdalle, jolloin ensimmäisen kuormituskeran kantavuusarvoa merkitään alaindeksillä  $E_1$  ja toisen alaindeksillä  $E_2$ . (Kiiskinen, 2013, s. 21)

Kantavuusarvon, E-moduuli, laskenta perustuu Boussineq'n teorian mukaiseen laskentamalliin ympyränmuotoisen kuormitetun levyn keskipisteen painumasta kaavan 9 mukaisesti (Liikennevirasto, 2011, s. 26-27).

$$s = r(1 - \mu^2) \frac{p \times a}{E} \quad (9)$$

Kaavassa:

s	painuma (mm)
r	kerroin, jonka arvo on $\pi/2$ , kun levy oletetaan jäykäksi
$\mu$	Poisson- luku
p	kosketuspaine (kPa)
a	kuormituslevyn säde (m)
E	kimmomoduuli (MPa)

Ratkaistaessa kimmomoduuli, E, kaavasta 9 saadaan kaavan 10 mukainen levykuormituskokeen kantavuusarvon laskentakaava (Kiiskinen, 2013, s. 21).

$$E = r(r - \mu) \frac{p \times a}{s} \quad (10)$$

$$E = \frac{k \times p \times a}{s}$$

Kaavassa 10 oleva  $r(r - \mu)$  merkitään kertoimella k, johon on sisällytetty Poisson- luku. Kertoimen k-arvo on riippuvainen kuormituslevyn jäykkyydestä sekä Poisson- luvusta. Yleisesti käytännön mitoituksessa kertoimen k-arvona käytetään 1,5:tä, jolloin kaava 10 saa alla olevan lopullisen muotonsa. (Kiiskinen, 2013, s. 22)

$$E = 1,5 \times \frac{p \times a}{s}$$

Mitattavan rakenteen ensimmäisen ja toisen kuormituskerran kantavuusarvot,  $E_1$  ja  $E_2$ , saadaan sijoittamalla kaavan 10 lopulliseen muotoon kosketuspaineeksi,  $p$ , suurimman kuormituksen, 60 kN, aiheuttama paine sekä painuman,  $s$ , arvoksi vastaava painuma. Levykuormituskokeen lopputuloksena käytetään suurimmalla kuormituksella, 60 kN, saatua kantavuusarvoa  $E_2$ . (Siika, 2006, s. 18)

Lisäksi saatujen kantavuusarvojen avulla tarkastellaan mitattavan tierakenteen tiiviyyttä tiiviyssuhteen,  $E_2/E_1$ , perusteella. Mikäli tiiviyssuhde on suurempi kuin annettu raja-arvo, niin levykuormituskokeen ensimmäinen kuormituskerta on tiivistänyt tutkittavaa tierakennettä siten, että voidaan arvioida tiivistämisen olleen puutteellista. Levykuormituskokeessa tiiviyssuhteen raja-arvona käytetään yleisesti lukua 2,2. (Siika, 2006, s. 18)

Levykuormituskoe soveltuu käytettäväksi sitomattomien rakennekerrosten sekä ohuiden päällysteiden päältä tehtäviin kantavuusmittauksiin. Muihin kantavuusmittausmenetelmiin verrattuna levykuormituskokeen etuna on laaja kokemusperäinen tieto mittaustulosten ja erilaisten tierakenteiden käyttäytymisen välillä. Levykuormituskoe tarkastelee koko tierakenteen kantavuutta kokonaisuutena, sillä kuormitus vaikuttaa n. 1 metrin syvyyteen asti. Koko tutkittavan tierakenteen kantavuutta ja tiiviyyttä arvioitaessa käytetään yksittäisten tutkimuspisteiden kantavuusarvoista,  $E_2$ , ja tiiviyssuhteista,  $E_2/E_1$ , laskettuja keskiarvoja sekä keskihajontaa. (Kiiskinen, 2013, s. 22; Liikennevirasto, 2011, s. 28)

### 3.5.2 Pudotuspainolaitteet

Pudotuspainolaitteita on erilaisia, mutta ne kaikki ovat luonteeltaan dynaamisia tie- tai katurakenteen kantavuusmittausmenetelmiä. Pudotuspainolaitteilla voidaan levykuormituskokeen tavoin tarkastella myös rakenteen tiiviyyttä tiiviyssuhteen avulla. Koetilanteessa pudotuspainolaitteella simuloidaan liikennekuormitusta kuormituslevylle tietyltä korkeudelta vapaasti pudotettavan painon avulla. Kokeessa tierakenteen käyttäytymistä liikennekuormituksen alaisena kuvataan tien pinnan palautuvalla painumalla eli taipumalla, jota mitataan geofoneilla tai kiihtyvyyssantureilla. Taipumaa mitataan aina kuormituslevyn keskeltä, mutta tietyillä pudotuspainolaitteilla taipumamittausta tehdään myös kuormituslevyn sivulta eri etäisyyksiltä. (Liikennevirasto, 2011, s. 28; Spoof & Petäjä, 2000, s. 4)

Loadman FWD, Heavy Loadman, on suomalaisen AL-Engineering Oy:n kehittämä pudotuspainolaite, kuva 18. Tavallisimmin laite asennetaan autolla vedettävään peräkärriin ja laitetta operoidaan kannettavan tietokoneen avulla. Laitteen kokonaismassa on 100 kg, josta pudotuspainon osuus on 50 kg. Mittauksessa käytetään 300 mm halkaisijaltaan olevaa kuormituslevyä ja pudotuspainon pudotuskorkeutena 700 mm. Koetilanteessa kuormituslevyyn kohdistuva kuormitusvoima on noin 50 kN ja kuormitusimpulssin kesto noin 25-30 ms. Laitteen mittausperiaatteena on, että

pudotuspainon aiheuttama painuma mitataan kuormituslevyn keskellä olevan kiihtyvyyssanturin avulla. Kiihtyvyyssanturi rekisteröi osumasta aiheutuneen kiihtyvyyden, joka integroidaan taipumaksi, jonka avulla lasketaan tierakenteen kimmomoduuli, E-moduuli. E-moduulin laskemiseen laite käyttää levykuormituskokeen tavoin kaavaa 10. Toistettaessa koe samasta mittauspisteestä, saadaan laskettua tierakenteen tiiviys tiiviyssuhteen,  $E_2/E_1$ , perusteella. (Liikennevirasto, 2011, s. 29; Siika, 2006, s. 19)



Kuva 18. Heavy Loadman -pudotuspainolaite (Siika, 2006, s. 20).

AL-Engineering Oy on kehittänyt myös Kannettava Loadman -kevyt pudotuspainolaitteen, kuva 19. Se on kehitetty erityisesti sellaisiin kohteisiin, joihin muilla mittauslaitteilla ei päästä, kuten tierakenteissa olevat erilaiset putki- ja johtokaivannot. Keveytensä vuoksi laite soveltuu parhaiten ohuiden, max. 300 mm paksujen, ja suhteellisen hienorakeisten rakennekerrosten kantavuus- ja tiiviyssmittauksiin. Kannettava Loadman toimii samaan tapaan kuin Heavy Loadman, mutta pudotuspaino on 10 kg, pudotuskorkeus 800 mm ja kuormituslevyn halkaisija voi olla 132, 200 tai 300 mm. Laitteen yläosassa on mittauselektroniikka, joka laskee automaattisesti rakenteen E-moduulin ja ilmoittaa kuormituksesta aiheutuneen painuman. Mittauksessa mitattavan pinnan tulee olla tasainen ja laite asennetaan pystysuoraan mitattavalle pinnalle. Koe toistetaan samasta kohdasta niin kauan, että saadaan suurin kantavuusarvo,  $E_{max}$ . Tarvittavien pudotusten lukumäärä vaihtelee n. 3..6 pudotuskertaan riippuen maarakenteesta. Mitattavan maarakenteen tiiviyssuhde,  $E_{max}/E_1$ , lasketaan ensimmäisen pudotuskerran kantavuusarvon,  $E_1$ , ja suurimman kantavuusarvon tuottaneen pudotuskerran,  $E_{max}$ , avulla. (Liikennevirasto, 2011, s. 29-30; Kiiskinen, 2013, s. 23-24)





Kuva 19. Kannettava Loadman -kevyt pudotuspainolaite (AL-Engineering Oy, 2016).

Ruotsalaisvalmisteisen KUAB -pudotuspainolaitteen, kuva 20, toimintaperiaate on samanlainen kuin Heavy Loadmanin. Mutta kuormituksen aiheuttaman taipuman mittaus tapahtuu seitsemän geofonin avulla, jotka sijoitetaan yleensä 0, 200, 300, 450, 600, 900 ja 1200 mm:n etäisyydelle kuormituslevyn keskustasta. Geofonien sijainteja voidaan kuitenkin muuttaa vapaasti välillä 200...2500 millimetriä kuormituslevyn keskustasta. Geofonien avulla saadaan kuormituksen aiheuttama ns. taipumasuppilo mitattua, kuva 21. Taipumasuppilo kuvaa tierakenteen kuormituskestävyyttä eli kykyä kestää toistuvia liikennekuormituksia. Taipumasuppilon muodon perusteella pystytään arvioimaan yksityiskohtaisemmin eri rakennekerrosten ominaisuuksia ja ns. takaisinlaskentaohjelmilla voidaan laskea taipumasuppilosta eri rakennekerrosten E-moduulit. (Liikennevirasto, 2011, s. 29; Spoof & Petäjä, 2000, s. 4)



Kuva 20. KUAB -pudotuspainolaite (Siika, 2006, s. 21).



Kuva 21. KUAB -pudotuspainolaitteen taipumasuppilo (Liikennevirasto, 2011, s. 29).

Pudotuspainolaitteita käytetään erityisesti tie- tai katurakenteen parantamisen suunnittelun yhteydessä selvittäessä vanhan tie- tai katurakenteen tilaa kuormituskestävyyden mitoitusta varten. Lisäksi pudotuspainolaitteita käytetään normaalisti rakentamisen laadunvalvonnassa ja kantavuuden inventointimittauksissa. Pudotuspainolaite soveltuu käytettäväksi sekä asfaltti- että sorapintaisten väylien kantavuusmittauksiin. (Liikennevirasto, 2011, s. 28-29; Spooft & Petäjä, 2000, s. 5)

Pudotuspainolaitteen etuja ovat mittausnopeus ja lisäksi mittauksessa ei tarvita erillistä vastapainoa, kuten levykuormituskokeessa. Tämän vuoksi pudotuspainolaite on korvannut osittain levykuormituskokeet teiden ja katu- jen kantavuusmittauksissa. Toisaalta pudotuspainolaitteen kuormituksen nopeus tuottaa tietyissä tilanteissa mittauksessa levykuormituskoe- ta suurempia kantavuuksia, joka tulee tiedostaa kantavuus- ja tiiviysvaati- muksia asetettaessa. Pudotuspainolaitteen kuormitusvaikutus ei myöskään ulotu yhtä syväälle mitattavaan rakenteeseen kuin levykuormituskokeessa johtuen kuormituksen nopeudesta, joten pudotuspainolaitemittauksia joudutaan toteuttamaan useammin ja ohuemmillä kerrosväleillä. (Liikennevirasto, 2011, s. 28-29; Spooft & Petäjä, 2000, s. 5)

#### 4 YHTEENVETO

Suomessa tien päällysrakenteen suunnittelussa noudatetaan Liikenneviraston Tierakenteen suunnittelu -ohjetta, josta uusi painos on tullut voimaan 31.12.2018 alkaen korvaten vuonna 2004 laaditun suunnitteluohjeen. Tien päällysrakenteen kuormituskestävyyden mitoituksen näkökulmasta uudessa suunnitteluohjeessa on reagoitu vuoden 2013 päätökseen korottaa ajoneuvojen ja ajoneuvoyhdistelmien suurimpia sallittuja massoja



tieliikenteessä. Aikaisemmin sallittu 60 t:n massa 7-akselisissa yhdistelmissä on muuttunut uudistuksen jälkeen 68 t:n massa 8-akselisissa ja 76 t:n massa 9-akselisissa yhdistelmissä, kun perävaunu on varustettu paripyörillä.

Päällysrakenteen kuormituskestävyyssmitoituksen osalta suurimmat muutokset uudessa suunnitteluohjeessa koskevat kuormituskertaluvun laskentaa ja kuormitusluokkien määrittämiä. Kuormituskertaluvun laskentakäytössä käytettäviä ajoneuvotyyppien vastaavuuskertoimia on korotettu uuteen suunnitteluohjeeseen vastaamaan uusia ajoneuvosääntöjä ja vuodelle 2025 ennustettuja ajoneuvomassoja. Käytettäviin kuormitusluokkiin on lisätty uusi erittäin raskaasti kuormitettujen teiden kuormitusluokka, 60,0. Lisäksi kuormitusluokkien rajoja, tavoitekantavuuksia ja päällysteiden paksuuksia on tarkennettu.

Muilta osin päällysrakenteen kuormituskestävyyssmitoituksen prosessi määrittämiseen tarvittavine lähtötietoineen on pysynyt ennallaan uudessa suunnitteluohjeessa. Ennen päällysrakenteen kuormituskestävyyssmitoitusta tulee tierakenteelle tehdä routamitoitus, josta saadaan kuormituskestävyyssmitoituksen lähtötiedoksi päällysrakenteen minimikokonaiskerrospaksuus. Muita määrittämiseen tarvittavia lähtötietoja ovat tien alusrakenteen E-moduuli, päällysteen vähimmäispaksuus, tavoitekantavuudet kantavan kerroksen ja päällysteen päältä sekä rakennekerrosmateriaalien E-moduulit.

Kuormituskestävyyssmitoituksen tarkoituksena on ehkäistä raskaan liikenteen aiheuttama päällysteiden halkeilu sekä pysyvät muodonmuutokset tien päällyste- että alusrakenteessa. Uudessa suunnitteluohjeessa tien päällysrakenteen kuormituskestävyyssmitoituksella toteutetaan edelleen Odemarkin yhtälön avulla. Mitoituksessa pyritään löytämään kustannustehokkain päällysrakenneterahtaus, mikä täyttää päällysrakenteelle asetetut vaatimukset kokonaispaksuuden, tavoitekantavuuden ja päällysteen paksuuden osalta.

Odemarkin yhtälöön perustuva tien päällysrakenteen kuormituskestävyyssmitoituksella on osoittautunut toimivaksi Suomen olosuhteissa ja määrittäminen on nopea toteuttaa päällysrakenneterahtauksen eri E-moduuleille laadittuja määrittämisnomogrammeja hyväksi käyttäen. Määrittämismenetelmän heikkouksia ovat:

- määrittämisessä käytettävät E-moduulien arvot ovat staattisia E-arvoja, joten liikennekuormituksen dynaaminen luonne jää huomioimatta
- määrittämisessä ei huomioida liitteen 1 mukaisia päällysrakenteen kriittisiä jännityksiä ja muodonmuutoksia
- määrittämismenetelmä perustuu kokemusperäisiin tavoitekantavuuksiin, joten paksujen bitumilla sidottujen rakennekerrosten viskoelastinen käyttäytyminen jää huomiotta.

Odemarkin yhtälö ei sovellu em. puutteiden vuoksi kuormituskestävyyden mitoitukseen erikoisrakenteissa, kuten satama-alueet ja raskaan liikenteen lastauspihat, vaan niiden mitoitukseen tulee käyttää kehittyneempiä mitoitusmenetelmiä esim. Nesteen menetelmä tai APAS- monikerrosmenetelmä.

Vastaavan suunnittelijan tulee esittää tien tai kadun rakentamiseen liittyvät laatuvaatimukset hankekohtaisissa suunnitelma-asiakirjoissa, kuten työselostuksessa ja -piirustuksissa. Tiiviysvaatimus ilmoitetaan työselostuksessa tiiviysasteella,  $D$ , tai tiiviyssuhteella,  $E_2/E_1$ . Kantavuusvaatimus ilmoitetaan työselostuksessa kantavuusarvolla  $E_1$  tai  $E_2$ . Suunnittelijan on huolehdittava, että hankekohtaiset laatuvaatimukset vastaavat vähintään suunnittelua, rakentamista ja laadunvalvontaa ohjaavia yleisiä laatuvaatimuksia.

Urakoitsijalla on päävastuu laadunvarmistuksen toteuttamisesta kohteen työselostuksen laatuvaatimusten tai työselostuksessa viitattujen yleisten laatuvaatimusten mukaisesti. Urakoitsija tai urakoitsijan valitsema konsultti toteuttaa mm. kantavuus- ja tiiviyssmittaukset, joilla osoitetaan, että rakenne vastaa näiltä osin suunniteltua.

Maakerroksen lujuus- ja kantavuusominaisuuksia arvioidaan sen tiiviiden ja kantavuuden perusteella. Luonnonkosteat maamateriaalit sisältävät kiviaineksen lisäksi ns. huokostilaa, joka koostuu ilmasta ja vedestä, joten maamateriaalin tiiviys määräytyy näiden kolmen komponentin suhteesta. Maarakennustöissä maarakenteen tiiviyttä kuvataan tiiviysasteella,  $D$ . Termillä kantavuus kuvataan tierakenteen kokonaisjäykkyyttä, eli rakenteen kykyä vastustaa muodonmuutosten syntymistä kuormituksen alaisena. Kantavuus esitetään taipumana, jonka tietyn suuruinen kuorma aiheuttaa rakenteeseen, ja koko tie- tai katurakenteen kimmokertoimena,  $E$ -moduuli.

Tien päällysrakenteesta saavutettavaan tiiviyteen ja kantavuuteen vaikuttavat rakennekerroksissa vallitseva jännitystila sekä käytetyn kiviaineksen vesipitoisuus, rakeisuus ja raemuoto. Päällysrakenteesta saavutettavasta tiiviydestä ja kantavuudesta puhuttaessa kaikkein merkittävin yksittäinen tekijä on kuitenkin tiivistystyöhön käytetty energia.

Tien päällysrakenteen tiiviiden mittaukseen on kehitetty useita eri menetelmiä. Tiiviiden kenttämittausmenetelmät voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin menetelmiin. Volymetrikokeet ja erilaiset säteilymittauslaitteet luokituvat suoriin tiiviiden kenttämittausmenetelmiin. Tiiviiden kenttämittaustuloksien vertailua varten täytyy määrittää kyseessä olevan maarakenteen kuivatilavuuspainon maksimiarvo parannetulla Proctor- kokeella, jotta tutkittavalle maarakenteelle saadaan määritettyä tiiviysaste,  $D$ . Tiiviiden kenttämittausmenetelmän valinta tulee tehdä huolellisesti, riippuen tutkittavan maarakenteen ominaisuuksista, jotta mittaustulos on luotettava.

Tie- ja katurakenteiden kantavuusmittauksia suoritetaan rakennusaikaisen laadunvalvonnan, kelirikkorajoitusten määrittämisen, kantavuuden inventoinnin ja tierakenteen parantamisen suunnitteluun tarvittavien lähtötietojen hankinnan vuoksi. Tierakenteet mitoitetaan kevät kantavuuden mukaan, joten kantavuusmittaukset tulisi ajoittaa keväälle, jotta saadaan selville tierakenteen heikoin kantavuus. Kantavuusmittauksia voidaan suorittaa myös kesällä, mutta ei koskaan talvella jäätyneestä tierakenteesta. Tie- ja katurakenteiden kantavuusmittausmenetelmiä ovat levykuormituskoe sekä erilaiset pudotuspainolaitteet, mitkä ovat samalla epäsuoria tiiviydsmittausmenetelmiä ilmoittaen lopputuloksena maarakenteen kantavuusarvon ja tiiviyssuhteen.

## LÄHTEET

- AL-Engineering Oy. 2016. Haettu 29.5.2016 osoitteesta <http://www.al-engineering.fi/fi/loadman.html>
- Brax, J. 2012. *Tierakenteen mitoitusmenettely*. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Haettu 20.5.2016 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201205076629>
- Hämäläinen, H. 2011. *Tiiveyden ja kosteuden mittaus Troxler 3440-laitteella*. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Rovaniemen Ammattikorkeakoulu. Haettu 20.5.2016 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2011053110556>
- Järvinen, L. 1991. *Päällysrakenteen mitoitusmenetelmät*. T46. TKK. Tietekniikka. Otaniemi.
- Kanerva, K. 2011. *Rakennemitoitusmenetelmät raskaille pyöräkuormille ja konttikuormille sekä rakennettujen kenttien kokeellinen tutkimus*. Diplomityö. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Liikenne- ja tietekniikka. Aalto-Yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Haettu 19.3.2016 osoitteesta <http://lib.tkk.fi/Dipl/2011/urn100440.pdf>
- Kiiskinen, T. 2013. *Tierakentamisen laadunvalvontamittaukset*. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Karelia-Ammattikorkeakoulu. Haettu 20.5.2016 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201305138002>
- Liikennevirasto. 2018. *Tierakenteen suunnittelu*. Liikenneviraston ohjeita 38/2018. Helsinki. Liikennevirasto. Haettu 23.9.2019 osoitteesta [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2018-38\\_tierakenteen\\_suunnittelu\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf)
- Liikennevirasto. 2011. *Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. Helsinki. Liikennevirasto. Haettu 26.9.2015 osoitteesta [http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2011-10\\_radan\\_eristys\\_web.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-10_radan_eristys_web.pdf)
- Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. 2017. *Asfalttinormit 2017*. Helsinki. PANK ry.
- Rakennustietosäätiö. 2017. *InfraRYL 2017. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Päällysy- ja pintarakenteet*. Helsinki. Rakennustieto Oy.
- Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 1997. *Geotekniikka*. 464. 16. osin uudistettu painos. Helsinki. Otatieto Oy.

Siika, T. 2006. *Katurakenteiden staattinen ja dynaaminen kantavuus*. Insinööriyö. Kemianteekniikan koulutusohjelma. EVTEK-Ammattikorkeakoulu. Haettu 13.6.2016 osoitteesta [https://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/2006/2006\\_4.pdf](https://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/2006/2006_4.pdf)

Spoof, H. & Petäjä, S. 2000. *Pudotuspainolaitemittaus. TPPT Menetelmäkuvaus*. VTT. Yhdyskuntatekniikka. Espoo. Haettu 13.6.2016 osoitteesta <https://docplayer.fi/5777641-Pudotuspainolaitemittaus-ppl-mittaus.html>

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2010. *RIL 132-2000. Talonrakennuksen maa- ja rakennustekniikka - yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset*. Helsinki. Hansaprint Oy.

Terkki, A. 1992. Tien kunnossapidon mittausmenetelmät. Tietekniikan seminaari 1992. *Kantavuuden mittaus*. T47 Otaniemi 1992. s. 58-69.

Tiehallinto. 2005. *Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D*. Haettu 21.9.2015 osoitteesta <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/tts71d.pdf>

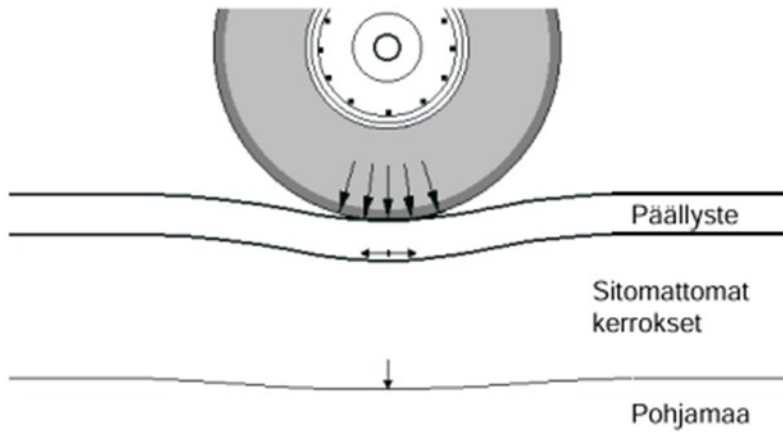
Tiehallinto. 2004. *Tierakenteen suunnittelu*. Helsinki. Edita Prima Oy. Haettu 21.9.2015 osoitteesta <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100029-v-04tierakenteensuunn.pdf>

Tiehallinto. 2002. *Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto*. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Helsinki. Edita Prima Oy. Haettu 16.4.2016 osoitteesta [http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/selv15\\_02.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/selv15_02.pdf)

Tiehallinto. 2001. *Tien rakennekerrosten materiaalit*. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001. Helsinki. Edita Oyj. Haettu 16.4.2016 osoitteesta <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/materiaalit66-2001.pdf>

TIERAKENTEEN KRIITTISET JÄNNITYKSET JA MUODONMUUTOKSET KUORMITUKSEN ALAISENA (Tammirinne 2002, 151).

- vetojännitys/ -muodonmuutos taipuvan sidotun päällysrakennekerroksen alapinnassa
- puristusjännitys/ -muodonmuutos pohjamaan/ alusrakenteen yläpinnassa



KAISTAN LEVEYSKERROIN (L) KUORMITUSKERTALUVUN LASKENNASSA (Liikennevirasto 2018, 35).

Kaistan ja viereisen pientareen yhteisleveys 1), 2), 3)	Tien sisäluiskan kaltevuus 4)	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) Teräskäiteellinen 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.

VUODEN 2004 TIERAKENTEEN SUUNNITTELU- OHJEEN KUORMITUSKERTALUVUN LASKENTAKAAVAT (Tiehallinto 2004, 26).

**Tapa A:** Kun KVL on suurempi kuin 600 ajon/d ja käytettävissä on luotettava liikennelaskentatulos ja -ennuste, saadaan  $KKL_{KAISTA}$  kyseisen suunnan ajoneuvomääristä kaavalla:

$$KKL_{KAISTA} = L \cdot (2,9 \cdot KA_{YHD} + 0,8 \cdot KA_{MUU}) \cdot 7300 \quad (1)$$

**Tapa B:** Jos tarkkaa ja luotettavaa liikennelaskentatietoa ei ole käytettävissä tai jos tien KVL on pienempi 600 ajon./d, käytetään tieluokkakohtaisia kaavoja. Tällöin  $KKL_{KAISTA}$  saadaan kaavoista:

$$KKL_{KAISTA} = 0,20 \cdot L \cdot KVL_{SUUNTA} \cdot 7300 \quad \text{valta- ja kantatiet} \quad (2)$$

$$KKL_{KAISTA} = 0,12 \cdot L \cdot KVL_{SUUNTA} \cdot 7300 \quad \text{seututiet} \quad (3)$$

$$KKL_{KAISTA} = 0,09 \cdot L \cdot KVL_{SUUNTA} \cdot 7300 \quad \text{yhdystiet} \quad (4)$$

$$KKL_{KAISTA} = 0,14 \cdot L \cdot KVL_{SUUNTA} \cdot 7300 \quad \text{seutu- ja yhdystiet, kun raskaista ajoneuvoista on 20...25 % täysin kuormattuja} \quad (5)$$

**Tapa C:** Kun vähäliikenteisellä tiellä on selvä raaka-ainelähde tai -kohde eli kun kuljetukset tehdään vain toiseen suuntaan täydellä kuormalla ja vain toinen kaista kuormittuu, lasketaan  $KKL_{KAISTA}$  kyseisen suunnan ajoneuvomääristä kaavalla:

$$KKL_{KAISTA} = L \cdot (4,6 \cdot KA_{YHD.TÄYSI} + 1,9 \cdot KA_{YHD.TYHJÄ} + 0,8 \cdot KA_{MUU}) \cdot 7300 \quad (6)$$



TEIDEN KUORMITUSLUOKAT KUORMITUSKERTALUVUN PERUSTEELLA (Liikennevirasto 2018, 40-42).

*Taulukko 12. Kuormitusluokan 60,0 tavoitekantavuudet ja päällysteen vähimmäispaksuudet. Kuormitusluokka 60,0 soveltuu, kun leveydellä korjattu kaistan KKL<sub>SUUNTA</sub> on enintään 60 milj. akselia.*

Kuormitusluokka	60,0	
Kantavan kerroksen tyyppi	M, MHST	SST
Viimeistään vuonna 6 tien liikenteelle otosta		
Tavoitekantavuus	540 MPa	545 MPa
Päällysteiden kokonaispaksuus	240 mm	140 mm
Viimeistään vuonna 2 tien liikenteelle otosta		
Päällysteiden kokonaispaksuus	200 mm	
Liikenteelle otettaessa		
Päällysteiden kokonaispaksuus	160 mm	100 mm
Kantava kerros		
Tavoitekantavuus	160 MPa	290 MPa

*Taulukko 13. Kuormitusluokan 25,0 tavoitekantavuudet ja päällysteen vähimmäispaksuudet. Kuormitusluokka 25,0 soveltuu, kun leveydellä korjattu kaistan KKL<sub>SUUNTA</sub> on enintään 25,0 milj. akselia.*

Kuormitusluokka	25,0	
Kantavan kerroksen tyyppi	M, MHST	SST
Viimeistään vuonna 6 tien liikenteelle otosta		
Tavoitekantavuus	470 MPa	520 MPa
Päällysteiden kokonaispaksuus	200 mm	130 mm
Viimeistään vuonna 2 tien liikenteelle otosta		
Päällysteiden kokonaispaksuus	160 mm	
Liikenteelle otettaessa		
Päällysteiden kokonaispaksuus	120 mm	90 mm
Kantava kerros		
Tavoitekantavuus	160 MPa	290 MPa

*Taulukko 14. Kuormitusluokan 10,0 tavoitekantavuudet ja päällysteen vähimmäispaksuudet. Kuormitusluokka 10,0 soveltuu, kun leveydellä korjattu kaistan KKL<sub>SUUNTA</sub> on enintään 10,0 milj. akselia.*

Kuormitusluokka	10,0	
Kantavan kerroksen tyyppi	M tai MHST	SST
Viimeistään vuonna 6 tien liikenteelle otosta		
Tavoitekantavuus	415 MPa	495 MPa
Päällysteiden kokonaispaksuus	170 mm	120 mm
Viimeistään vuonna 2 tien liikenteelle otosta		
Päällysteiden kokonaispaksuus	130 mm	
Liikenteelle otettaessa		
Päällysteiden kokonaispaksuus	90 mm	80 mm
Kantava kerros		
Tavoitekantavuus	160 MPa	290 MPa

**Taulukko 15.** *Kuormitusluokan 5,0 tavoitekantavuudet ja päällysteen vähimmäispaksuudet. Kuormitusluokka 5,0 soveltuu, kun leveydellä korjattu kaistan KKL<sub>SUUNTA</sub> on enintään 5,0 milj. akselia.*

Kuormitusluokka	5,0	
	M tai MHST	SST
Kantavan kerroksen tyyppi	M tai MHST	SST
Viimeistään vuonna 8 tien liikenteelle otosta Tavoitekantavuus Päällysteiden kokonaispaksuus	360 MPa 140 mm	
Viimeistään vuonna 2 liikenteelle otosta Tavoitekantavuus Päällysteiden kokonaispaksuus	100 mm	470 MPa 110 mm
Liikenteelle otettaessa Päällysteiden kokonaispaksuus	60 mm	80 mm
Kantava kerros Tavoitekantavuus	160 MPa	290 MPa

**Taulukko 16.** *Kuormitusluokan 2,0 tavoitekantavuudet ja päällysteen vähimmäispaksuudet. Kuormitusluokka 2,0 soveltuu, kun leveydellä korjattu kaistan KKL<sub>SUUNTA</sub> on enintään 2,0 milj. akselia.*

Kuormitusluokka	2,0	
	M tai MHST	SST
Kantavan kerroksen tyyppi	M tai MHST	SST
Viimeistään vuonna 6 tien liikenteelle otosta Tavoitekantavuus Päällysteiden kokonaispaksuus	285 MPa 100 mm	
Liikenteelle otettaessa Tavoitekantavuus Päällysteiden kokonaispaksuus	60 mm	420 MPa 90 mm
Kantava kerros Tavoitekantavuus	160 MPa	290 MPa

**Taulukko 17.** *Kuormitusluokan 0,8 tavoitekantavuudet ja päällysteen vähimmäispaksuudet. Kuormitusluokka 0,8 soveltuu, kun leveydellä korjattu kaistan KKL<sub>SUUNTA</sub> on enintään 0,8 milj. akselia.*

Kuormitusluokka	0,8			
	PAB-V	PAB-B	AB	AB
Päällyste	M tai MHST	M tai MHST	M tai MHST	SST
Kantavan kerroksen tyyppi	M tai MHST	M tai MHST	M tai MHST	SST
Viimeistään vuonna 6 tien liikenteelle otosta Tavoitekantavuus Päällyst. kokonaispaks.			230 MPa 80 mm	
Liikenteelle otettaessa Tavoitekantavuus Päällyst. kokonaispaks.	145 MPa 40 mm	165 MPa 40 mm	185 MPa 50 mm	400 MPa 80 mm
Kantava kerros Tavoitekantavuus	130 MPa	145 MPa	145 MPa	290 MPa

*Taulukko 18. Kuormitusluokan 0,3 tavoitekantavuudet ja päällysteen vähimmäispaksuudet. Kuormitusluokka 0,3 soveltuu, kun leveydellä korjattu kaistan KKL<sub>SUUNTA</sub> on enintään 0,3 milj. akselia.*

Kuormitusluokka	0,3			
	SOP	PAB-V	PAB-B	AB
Päällyste				
Kantavan kerroksen tyyppi	M	M tai MHST	M tai MHST	M tai MHST
Liikenteelle otettaessa Tavoitekantavuus Päällysteiden kokonaispaksuus	130 MPa	145 MPa 40 mm	165 MPa 40 mm	170 MPa 40 mm
Kantava kerros Tavoitekantavuus	130 MPa	130 MPa	145 MPa	145 MPa

KUORMITUSLUOKAN MÄÄRITTÄMINEN USEAMPIKAISTAISILLA TEILLÄ (Liikennevirasto 2018, 38-39).

### Peruskaista

Useampikaistaisilla teillä ajosuunnan raskaan liikenteen oletetaan käyttävän tien oikeanpuoleista jatkuvaa ajokaistaa, vaikka samaan suuntaan olisi käytettävissä useita kaistoja. Tässä ohjeessa tätä ajokaistaa sanotaan peruskaistaksi.

Peruskaistan kuormitusluokka on siten

$$KL_{\text{PERUSKAISTA}} = KLSUUNTA.$$

Peruskaistan rakenne ulotetaan vähintään 0,25 m viereiselle pientareelle tai ajokaistalle.

### Muut kaistat ja leveät pientareet

Yksi (1) luokkaa peruskaistan kuormitusluokkaa alemmaa kuormitusluokkaa käytetään seuraavilla tien osilla:

- peruskaistan oikealla puolella olevat liittymien väliset sekoittumiskaistat
- vähintään 100 m pituiset tasoliittymän kääntymiskaistat.

Tämä vastaa likimäärin kuormituskertalukua  $0,4 * KKL_{\text{SUUNTA}}$ .

Kaksi (2) luokkaa peruskaistan kuormitusluokkaa alemmaa kuormitusluokkaa käytetään seuraavilla tien osilla:

- 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  $0,2 * KKL_{\text{SUUNTA}}$ .

Alle 2,5 m levyinen piennar mitoitetaan peruskaistan mukaisesti.

Taulukko 11. Esimerkki kaistakohtaisista kuormitusluokista, kun peruskaistan kuormitusluokka 25,0.

Kolmas jatkuva kaista	Toinen jatkuva kaista	Peruskaista eli reunimmainen jatkuva kaista	Sekoittumiskaista	Leveä piennar tai kääntyvä reuna-kaista
KL = 5,0	KL = 5,0	KL = 25,0	KL = 10,0	KL = 5,0

## PÄÄLLYSRAKENNEMATERIAALIEN E-MODUULIT (Liikennevirasto 2018, 45-49).

## 4.5.1 Sidottujen päällysrakennemateriaalien E-moduulit

Sidotuille rakennekerrosmateriaaleille Odemarkin kantavuusmitoituksessa käytettävät E-moduulit on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Odemarkin mitoituksessa käytettävät sidottujen päällysrakennemateriaalien moduulit.

Materiaali ja laatuluokka	Lyhenne	E, MPa <sup>1)</sup>	Huomautukset <sup>2)</sup>
Asfalttibetoni	AB, ABS, SMA	2500	
Pehmeä asfalttibetoni	PAB-B	1650	
Pehmeä asfalttibetoni	PAB-V	1400	
Kantavan kerroksen asfalttibetoni	ABK	2500	
Remixerstabilointi 1	REST 1	900 $E_A \geq 70, n=13$	Laiha tai paksu (140...200 mm)
Remixerstabilointi 2	REST 2	1250 $E_A \geq 70, n=18$	Normaali
Komposiittistabilointi 1	KOST 1	900 $E_A \geq 70, n=13$	Laiha tai paksu (200...250 mm)
Komposiittistabilointi 2	KOST 2	1250 $E_A \geq 70, n=18$	Normaali
Vaahotobitumistabilointi 1	VBST 1	700 $E_A \geq 70, n=10$	Laiha tai paksu (200...250 mm)
Vaahotobitumistabilointi 2	VBST 2	1050 $E_A \geq 70, n=15$	Normaali
Bitumiemulsiostabilointi 1	BEST 1	700 $E_A \geq 70, n=10$	Laiha tai paksu (200...250 mm)
Bitumiemulsiostabilointi 2	BEST 2	1050 $E_A \geq 70, n=15$	Normaali
Masuunihiekkastabilointi 1	MHST 1	600 $E_A \geq 80, n=7,5$	28d:n puristuslujuus $\geq 1,5$ MPa
Masuunihiekkastabilointi 2	MHST 2	1200 $E_A \geq 80, n=15$	Sementillä tai kalkilla aktivoitu, 28 d:n puristuslujuus $\geq 2,5$ MPa
Sementtistabilointi 1	SST 1	1500 $E_A \geq 80, n=18$	7 d:n puristuslujuus $\geq 3$ MPa
Sementtistabilointi 2	SST 2	3500 $E_A \geq 100, n=35$	7 d:n puristuslujuus $\geq 5$ MPa

1) E = Rakenteen mitoituksessa käytettävä materiaalin E-moduuli (MPa), jos stabiloidun kerroksen alustan kantavuus  $E_A$  on vähintään samassa solussa mainittu arvo. Jos  $E_A$  on pienempi, mitoituksessa käytettävä E-moduuli on  $n \times E_A$ . Alustan huono kantavuus huonontaa tiivistystulosta ja suurentaa liikennekuormituksen aikana stabiloidun kerroksen alapinnan vetojännityksiä niin paljon, että E-moduuli jää pieneksi.

2) Laiha = Sideainepitoisuus olittaa joka toisessa näytteessä stabilointiohjeessa vaaditus pitoisuuden noin 1 prosenttiyksikön, mutta kerros on silti routimaton.

Paksu = Kerralla tehtävän kerroksen paksuus suluissa esitetyn mukainen.

Normaali = Stabilointiohjeen mukainen sideainepitoisuus, paksuus pienempi kuin tapauksessa 'Paksu'.

## 4.5.2 Sitomattomien kaupallisten kiviainesten E-moduulit

Sitomattomien kiviainesten on täytettävä InfraRYL:ssä esitetyt vaatimukset. Rakeisuuskäyrät määritetään pesuseulonnalla ennen kiviaineksen käyttöä otetuista näytteistä.

Yleisesti myynnissä oleviin murskeisiin sovelletaan standardeja SFS-EN 13242 (CE-merkki- ja kiviainesvaatimukset, mm. vaatimus kantavan kerroksen murskeen Los Angeles-luvulle) ja SFS-EN 13285 (rakeisuusvaatimukset sitomattomille kiviainesseoksille), kun suurin raekoko D on enintään 80 mm. Niiden moduuli arvioidaan rakeisuusluokan ja raekoon perusteella taulukosta 20.



Taulukko 20. Odemarkin mitoituksessa käytettävät yleisesti myynnissä olevien standardimurskeiden E-moduulit.

Rakeisuusluokka (SFS-EN 13285 ja InfraRYL)	Moduuli, MPa			
	100	150	200	280
	Raekoko o/D (D = maksimiraekoko), mm			
G <sub>0</sub>	0/8...0/11,2	0/16...0/22	0/31,5	0/40...0/80
G <sub>P</sub>	"	"	0/31,5...0/63	0/80
G <sub>A</sub>	"	"	0/31,5...0/56	0/63...0/80
G <sub>C</sub>	"	"	0/31,5...0/63	0/80
Soratien kulutus.	0/11,2...0/16			
Soratien sidekerros		0/22...0/31,5		

G<sub>0</sub> on vähän hiekkarakeita sisältävä, avoin (eli muodoltaan roikkuva) rakeisuuskäyrä ja siksi hyvin vettä läpäisevä, nopeasti kuivuva ja märkänäkin hyvin kantavuutensa säilyttävä.

G<sub>P</sub> on vastaava rakeisuusluokka, jonka sallittu rakeisuusvaihtelu on suurempi kuin G<sub>0</sub>:lla.

G<sub>A</sub> ja G<sub>C</sub> sisältävät enemmän hiekkaa (0,063...2 mm raekokoja) kuin edellä mainitut.

G<sub>A</sub> ja G<sub>0</sub> kelpaavat **InfraRYL**:n mukaan kantavan kerroksen materiaaliksi.

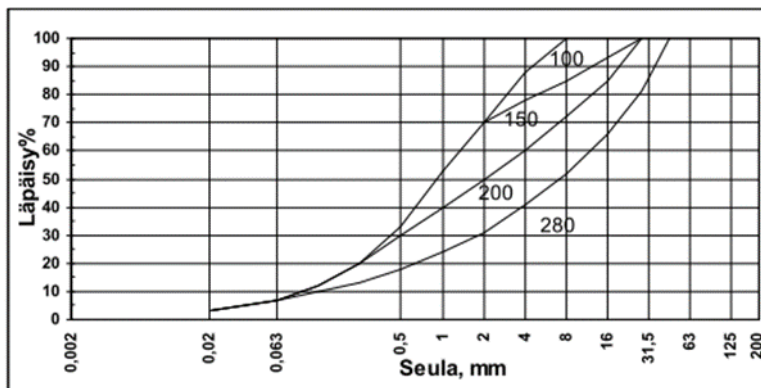
#### 4.5.3 Muut kuin SFS-EN 13285 mukaisesti luokitellut kiviainekset

##### Louhe

Louheen moduuli on 280 MPa. Tätä arvoa sovelletaan myös louhekerroksen yläosassa käytettävään pienlouheesta ja murskeesta tehtyyn kiilauskerrokseen.

##### Murskeet

Jos kiviainesta ei luokitella standardin SFS-EN 13285 mukaisesti, E-moduulit arvioidaan kuvan 7 perusteella.



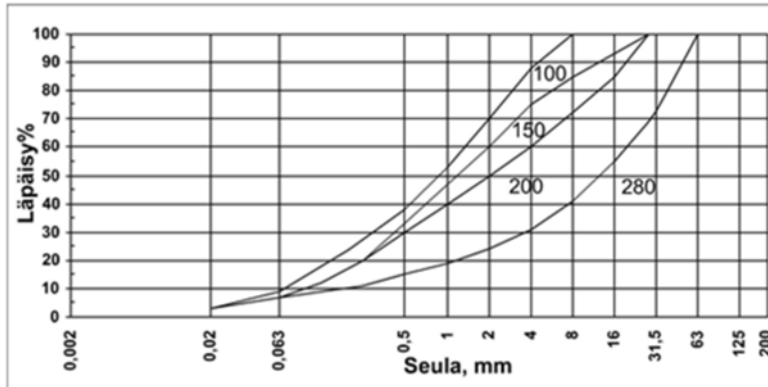
Moduulit (MPa)	Seulakoko (mm) ja sitä vastaava läpäisy-% enintään									
	0,02	0,06	0,5	1	2	4	8	16	31,5	45
280	3	7	18	24	31	41	52	66	86	100
200	3	7	30	40	50	60	72	85	100	
150	3	7	33	53	70	78	85	93	100	
100	3	7	33	53	70	88	100			

Kuva 7. Murskeen moduulin arviointi rakeisuuskäyrän perusteella. Heikoin alue, jolla rakeisuuskäyrä käy, määrää sen moduulin.

### Luonnonsorat

Jakavaan tai kantavaan kerrokseen kelpaavien sorien (ja soraisten hiekkojen) E-moduulit arvioidaan rakeisuuskäyrien perusteella kuvasta 8.

Koko toimituserän moduuli E on arvo, jota suurempia tai yhtä suuria on vähintään 75 % yksittäisnäytteiden moduuleista.

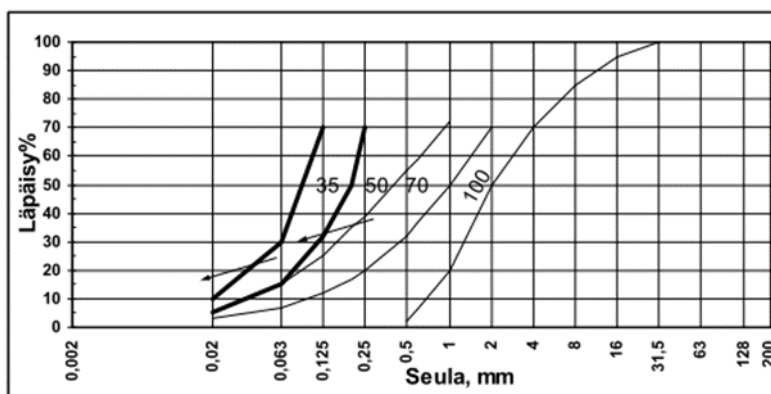


Moduulit (MPa)	Seulakoko (mm) ja sitä vastaava läpäisy-%									
	0,02	0,06	0,5	1	2	4	8	16	31,5	45
280	3	7	15	19	24	31	41	55	73	100
200	3	7	30	40	50	60	72	85	100	
150	3	7	33	47	60	75	85	93	100	
100	3	9	38	53	70	88	100			

Kuva 8. Soran moduulin arviointi rakeisuuskäyrän perusteella. Heikoin alue, jolla rakeisuuskäyrä käy, määrää sen moduulin.

### Suodatinkerroksen hiekka

Suodatinkerrokseen tarkoitetun luonnonhiekan moduuli arvioidaan kuvan 9 perusteella. Kuvaa ei käytetä pohjamaan vastaavien materiaalien moduulin määrittämiseen, vaan ne määritetään taulukon 6 mukaisesti. Koko toimituserän moduuli on arvo, jota suurempia tai yhtä suuria on vähintään 75 % yksittäisnäytteiden moduuleista.



Kuva 9. Suodatinkerroksen hiekan moduulin arviointi rakeisuuskäyrän perusteella. Heikoin alue, jolla rakeisuuskäyrä käy, määrää sen moduulin. Rakeisuuskäyrät eivät saa ylittää paksua rajakäyrää nuolen suunnassa.

On huomattava, että 35 MPa:n alueella oleva suodatinhiekkä on lievästi routivaa ja sitä saa käyttää vain hyvin kuivatetuissa käyttökohteissa ja varmistamalla laadunvalvonnalla sekä materiaalin homogenisoinnilla, että rakeisuuskäyrät eivät ylitä paksua rajakäyrää nuolen suunnassa.

#### 4.5.4 Uusiomateriaalien E-moduulit

Taulukon 21 perusteella arvioidaan siinä esitettyjen uusiomateriaalien moduulit. Lisätietoa uusiomateriaalien käytön edellytyksistä on esitetty ohjeessa **Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa** ja koekäytössä olevasta **Uusiomateriaalioppaasta**, (Liikennevirasto 2014).

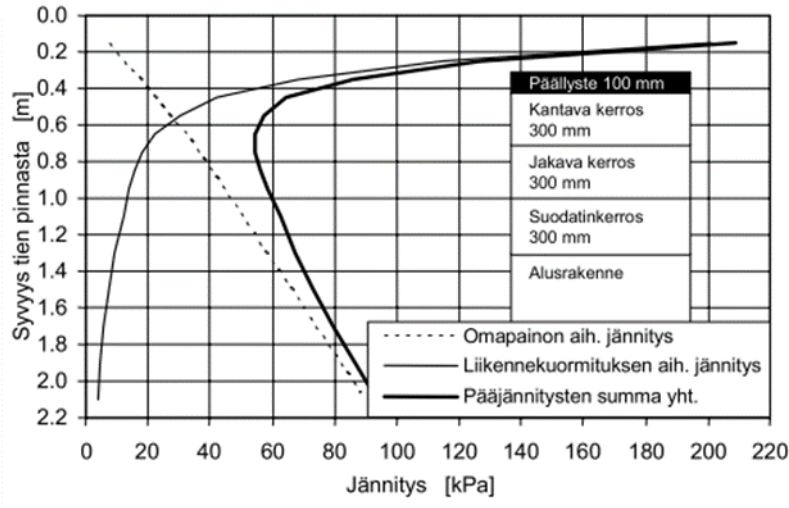
Taulukko 21. Odemarkin mitoituksessa käytettävät uusiomateriaalien E-moduulit.

Materiaali	E, MPa <sup>1)</sup>	Huomautukset
Betonimurske BEM I	700 $E_A \geq 70, n=10$	Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuusvaatimukset. 28d:n puristuslujuus $\geq 1,2$ MPa.
Betonimurske BEM II	500 $E_A \geq 50, n=10$	Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuusvaatimukset. 28d:n puristuslujuus $\geq 0,8$ MPa
Betonimurske BEM III	280 $E_A \geq 47, n=6$	Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuusvaatimukset.
Masuunihiekka MaHk	600 $E_A \geq 60, n=10$	28 d:n puristuslujuus $\geq 1,0$ MPa
Masuunikuonamurske MaKu	430 $E_A \geq 78, n=6$	Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuusvaatimukset.
Kappalekuona KapKu	350 $E_A \geq 58, n=6$	

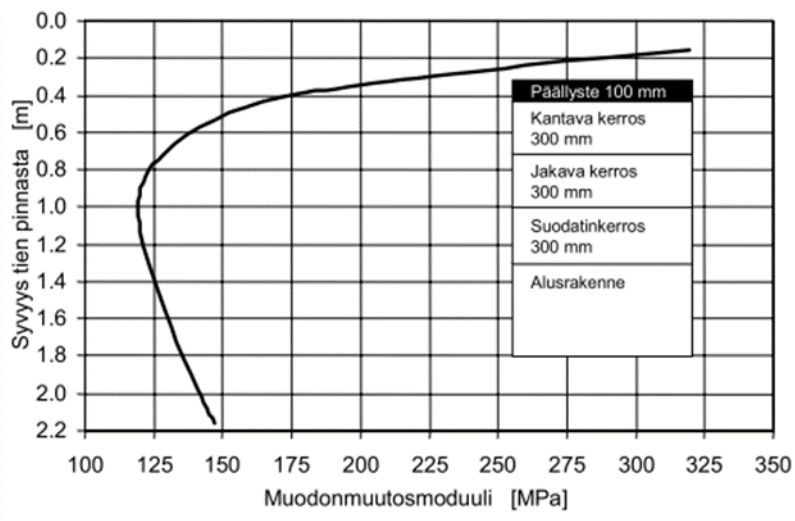
1) E = Rakenteen mitoituksessa käytettävä materiaalin E-moduuli (MPa), jos stabiloidun kerroksen alustan kantavuus  $E_A$  on vähintään samassa solussa mainittu arvo. Jos  $E_A$  on pienempi, mitoituksessa käytettävä E-moduuli on  $n \times E_A$ .



SITOMATTOMIEN PÄÄLLYSRAKENNEMATERIAALIEN JÄYKKYYDEN, E-MODUULI, RIIPPUVUUS TIERAKENTEES SA VALLITSEVAN JÄNNITYSTILAN SUHTEEN (Tiehallinto 2002, 33).



Kuva 19. Pääjännitysten summan muodostuminen tavanomaisessa tierakenteessa.



Kuva 20. Sitomattomien materiaalien muodonmuutosmoduuli tavanomaisessa tierakenteessa.

Liite 8

TIIVISTYSKONEIDEN OHJEELLISET JYRÄSKERTAMÄÄRÄT MAA-AINEKSEN OLLESSA LÄHELLÄ OPTIMIVESIPITOISUUTTA (Liikennevirasto 2011, 36).

Jyrätyyppi	Paino, t	Ylityskertojen ohjearvo												Ratapenger			
		Suodatin-/eristyskerros		Jakava kerros / välikerros		Kantava kerros		Tien tai kadun alusrakenne		Tien tai kadun alusrakenne		Louhe					
		0,25	0,5	0,25	0,4	0,2	0,3	H <sup>1)</sup> ≤ 30		H <sup>1)</sup> > 30		0,8	0,8	1,0	0,4	0,8	
Kerrospak-suus enintään, m																	
Täryjyrät <sup>2)</sup>																	
- vedettävät	> 5	4	7	5	8	5	9	3	6	11	3	7	13	6 <sup>12)</sup>	7 <sup>12)</sup>	5	5 <sup>12)</sup>
- 2 täryvalssia	> 5	3	4	3	5	3	6	2	4	8	2	4	8	—	—	—	—
- 1 täryvalssi	> 5	4	7	5	8	6	9	3	6	11	3	6	11	5 <sup>13)</sup>	7 <sup>13)</sup>	5	5 <sup>13)</sup>
Kumipyöräjyrät <sup>3)</sup>	< 20 <sup>4)</sup>	6	—	8	—	10	—	6	—	—	6	—	—	—	—	—	—
	> 20 <sup>5)</sup>	4	8	6	12	8	12	4	8	14	3	6	11	—	—	10	—
Staatitset vals-sijrat <sup>6)</sup>	> 10	—	—	—	—	10	—	7	—	—	7	—	—	—	—	—	—
Pyöräkuor-maimet <sup>7)</sup>	> 40	—	—	—	—	—	—	4	8	14	3	7	13	—	—	—	—
Puskutraktorit <sup>8)</sup>	> 10	—	—	—	—	—	—	4	—	—	6	—	—	—	—	—	—
Sorkkajyrät <sup>9)</sup>	7...10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10)	10)	—	—	—	—	—
Tärylevyt <sup>11)</sup>	> 0,05	6	—	7	—	6	—	5	—	—	6	—	—	—	—	—	—
	> 0,1	5	—	6	—	6	—	4	—	—	5	—	—	—	—	—	—
	> 0,2	4	—	5	—	5	—	3	—	—	4	—	—	—	—	—	—
	> 0,4	3	—	4	—	4	—	3	—	—	3	—	—	—	—	—	—

<sup>1)</sup> H = hienoainespitoisuus (0,063 mm:n seulan läpäisy-%).

<sup>2)</sup> Eivät sovellu runsaasti koheesioainesta sisältävien maalajien tiivistämiseen. Amplitudi aluksi noin 1,5 mm ja viimeiset ylityskerrat < 1 mm, penkereen ja suodattimen jyräysnopeus 1...3 km/h, jakavan ja kantavan 3...6 km/h. Viivakuorma > 1,5 t/m.

<sup>3)</sup> Eivät sovellu runsaasti koheesioainesta sisältävien maalajien tiivistämiseen, rengaspaine soraisilla maalajeilla 500 kPa ja hiekkaisilla maalajeilla 300 kPa, jyräysnopeus yli 5 km/h.

<sup>4)</sup> Pyöräpaino > 2 t.

<sup>5)</sup> Pyöräpaino > 3 t.

<sup>6)</sup> Eivät sovellu märkien silttien maalajien tiivistämiseen. Viivakuorma > 5 t/m.

<sup>7)</sup> Eivät sovellu märkien silttien maalajien tiivistämiseen.

<sup>8)</sup> Sovelluvat ohuiden kerrosten ja märkien silttien tiivistämiseen.

<sup>9)</sup> Sovelluvat silttien ja savien tiivistämiseen.

<sup>10)</sup> Urakoitsijan on esitettävä käyttämänsä sorkkajyrän tekniset tiedot (myös sorkan pituus, sorkan pään pinta-ala) ja työntekijöille annettavat jyräsohjeet.

<sup>11)</sup> Käytetään yleensä ahtaiden alueiden ja kaivantojen täytössä kitkamaalajien tiivistämiseen. Teho riittää yleensä vain ohuen kerroksen (100...250 mm) tiivistämiseen. Parempaan tiivistystehoon päästään tärylevyillä, joiden pohja on muotoiltu siten, että alkutiivistyksen jälkeen levy tiivistää pienemmällä pinta-alalla ja siten suuremmalla pintapaineella.

<sup>12)</sup> Paino vähintään 8 t.

<sup>13)</sup> Paino vähintään 13 t.