



Tietekniikan kurssit –
eräitä yleisiä teorioita, malleja
ja käsitteitä

VEIKKO PEKKALA
HANNA RASI-KOSKINEN
MIKO LUMPO
PEKKA LEVIÄKANGAS
VIRVE MERISALO

TEKNIikka
TECHNICA



Oulun yliopiston oppimateriaalia | University of Oulu study materials 1, 2023

Julkaisija: Oulun yliopisto
Oulu 2023

ISSN 2954-1948 (online)

ISBN 978-952-62-3613-1 (pdf)

URN <http://urn.fi/urn:isbn:9789526236131>

© Veikko Pekkala, Hanna Rasi-Koskinen, Miko Lumpo, Pekka Leviäkangas, Virve Merisalo, Oulun yliopisto 2023



Tämä teos on lisensoitu Creative Commons Nimeä-JaaSamoin
4.0 Kansainvälinen -lisenssillä. Tarkastele käyttö lupaa osoitteessa
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.fi>

**Pekkala Veikko, Rasi-Koskinen Hanna, Lumpo Miko, Leviäkangas Pekka, Merisalo Virve,
Road engineering courses - some underlying theories, models, and concepts**

University of Oulu, Faculty of Technology, Civil Engineering Research Unit Oulun yliopiston
oppimateriaalia | University of Oulu study materials 1, 2023
Oulu, Finland

Abstract

This document contains some of the relevant theoretical foundations, models and concepts used in road engineering. The list is not exhaustive, but far from it. The purpose is to show the road engineering courses students that behind design and engineering principles, standards, and guidelines there is a vast scientific body of knowledge. This booklet is meant to be studied mainly independently by the students attending road engineering courses. Some sections are used as course materials, for example in lecture presentations and demonstrating case examples.

Keywords: road engineering, road design and construction, theory, model, basics of road engineering, road design and construction

Pekkala Veikko, Rasi-Koskinen Hanna, Lumpo Miko, Leviäkangas Pekka, Merisalo Virve, Tietekniikan kurssit - eräitä yleisiä teorioita, malleja ja käsitteitä.

Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkimusryhmä
Oulun yliopiston oppimateriaalia | University of Oulu study materials 1, 2023
Oulu

Tiivistelmä

Tämä kirjanen sisältää Oulun yliopiston tietekniikan perusteet I ja II sekä tien suunnittelu ja rakentaminen -kurssien suorittamista tukevia teoriaosuuksia. Teoriaosuudet on tarkoitettu opiskelijoiden itseopiskeluun ja tähtäävät tietekniikan syvällisempään ymmärtämiseen, erilaisiin teorioihin, malleihin ja käsitteisiin. Kirjaseen on koostettu vain pieni osa tietekniikassa sovellettavista teorioista, malleista ja käsitteistä ja tarkoitus onkin antaa valmiuksia syvällisempiin pohdintoihin ja kysymyksiin. Teoriaosuuksien materiaalia käytetään soveltuvien osien opetusaineistoissa sekä esimerkkilaskelmissa ja -tapauksissa.

Asiasanat: tietekniikka, tietekniikan perusteet I ja II, tien suunnittelu ja rakentaminen, teoria, malli

Kiitokset

Kiitämme lämpimästi Oulun Rakennustekniikan Säätiötä tämän työn rahoittamisesta. Kiitos Esko Ehrolalle osallistumisestasi työn tarkastamiseen. Lisäksi kiitos Viena Ojalalle luvasta käyttää opinnäytetyötäsi Tietekniikan historiaa -kappaleen pohjana.

Maaliskuussa 2023

Tekijät

Veikko Pekkala
Hanna Rasi-Koskinen
Miko Lumpo
Pekka Leviäkangas
Virve Merisalo

Lyhenteet ja symbolit

AASHO	American Association of State Highway Officials
APAS	monikerroslaskentaohjelma
BISAR	Bitumen Stress Analysis in Roads
CBR	California Bearing Rate
CE	Conformité Européenne
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
<i>E</i> -module	Elastic Module
ESAL	Equivalent Single-Axle Load
FEM	Finite Element Method
GTK	Geologian tutkimuskeskus
HCT	High-Capacity Transport
KAIP	Perävaunun kuorma-auto
KAPP	Puoliperävaunullinen kuorma-auto
KAVP	Täysperävaunullinen ajoneuvoyhdistelmä (KAVP1)
KVL	keskimääräinen vuorokausiliikenne
KKL	kuormituskertaluku
MODUULI	Moduuliyhdistelmä (KAVP2)
OKTO	Outokumpu Tornio
pH	potential/power of hydrogen
PLAXIS	Plane strain and axial symmetry
PSI	Present Serveability Index
ROADEX	ROADs Information EXchange
SAE	Society of Automotive Engineers
SP	Segregation Potential
SYKE	Suomen ympäristökeskus
Traficom	Liikenne- ja viestintävirasto
TS	Tube Suction
Symboli	Selitys (kaavanumero/kuvanumero/tekstisivu)
σ'	maan tehokas jännitys (kaava 1)
σ	maan kokonaisjännitys (kaava 1)
u	huokosvedenpaine (kaava 1)
q	lämpövirta alenevan lämpötilan suuntaan (kaava 2)

λ	lämmönjohtavuus lämpövirran suunnassa (kaava 2)
$\frac{dT}{dz}$	lämpötilagradientti lämpövirran suunnassa (kaava 2)
q	lämpövirtaus jäätyneen kerroksen läpi (kaava 3)
q_+	lämpövirtaus jäätymisrintamalle sulasta maasta (kaava 3)
q_f	routarajalla olevan huokosveden jäätyessä syntyvä lämpövirtaus (kaava 3)
q_s	routarajalle virtaavan huokosveden jäätyessä syntyvä lämpövirtaus (kaava 3)
q_c	jäätyneen kerroksen jäähtyessä syntyvä lämpövirtaus (kaava 3)
z_f	routan syvyys maanpinnasta (kaava 4)
F	pakkasmäärä talven alusta lukien (kaava 4)
k	routaantumiskerroin (kaavat 4 & 5)
S	mitoitettava roudansyvyys (kaavat 5 & 6)
F_{mit}	mitoituspakkasmäärä (alueellinen joka toinen vuosi toistuvia) (kaava 5)
P	routaantuvan alusrakennekerroksen paksuus (kaava 6)
R_{red}	eristävyydeltään hiekkaa vastaavan päällysrakenteen laskennallinen paksuus (kaavat 6 & 7)
a_i	kerroksen i materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta (kaava 7)
R_i	rakennekerroksen i paksuus (kaava 7)
$\frac{\partial h}{\partial t}$	routanousunopeus (merkitään myös v ; alkuperäisessä kaavassa v_0) (kaava 8)
SP	routanousukerroin (alkuperäisessä kaavassa SP_0) (kaava 8)
$\frac{\partial T}{\partial z}$	lämpötilan gradientti jäätyneessä maassa routarajalla (merkitään myös $gradT$) (kaava 8)
RN_{lask}	laskennallinen routanousu (kaava 9)
P	routaantuvan alusrakennekerroksen paksuus (kaava 9)
t	alusrakenteen routaturpoama (kaava 9)
E_r	suhteellinen dielektrisyysarvo
p	hetkellinen palvelutasoindeksi (kaava 10)
SV	epätasaisuus (kaava 10)
$C + P$	halkeamat ja paikkaukset päällysteen pinnalla (kaava 10)
RD	urautuminen ajolinjalla (kaava 10)
E	akselikuormituksen ekvivalenttikerroin (vastaavuuskerroin) (kaavat 11 & 12)
N_{st}	standardiakselien määrä, joka aiheuttaa tien vaurioitumisen samalle tasolle kuin N_x (kaava 11)

N_x	tarkasteltavien akselikuormien määrä, joka aiheuttaa tien vaurioitumisen alimmalle hyväksyttävälle tasolle (kaava 11)
P_x	tarkasteltava akselikuorma (kaava 12)
P_{st}	standardi akselikuorma paripyörälle (kaava 12)
KK	ajoneuvon kuormitusvastaavuus (kaava 13)
P_i	tarkastelussa olevan ajoneuvon akselipaino tai telipaino (kaava 13)
P_N	referenssipaino (kaava 13)
X	väsymissuoran kulmakerroin (kaava 13)
F	venytys- tai puristusvoima (kaava 14)
k	jousivakio (jousen jäykkyys) (kaava 14)
x	jousen pituuden erotus tasapainotilanteestaan (kaava 14)
σ	jännitys (kaava 15 & kuva 12)
A	kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala ennen venyttämistä (kaava 15)
Δl	kappaleen pituuden muutos jännityksen suhteen (kaava 15)
l	kappaleen pituus (kaava 15)
ε	kappaleen muodonmuutos (kaava 15, kuvat 12 & 14)
E	Kimmokerroin, kimmomoduuli tai Youngin moduuli (kaava 15)
τ	leikkausvoima (kaava 16)
μ	viskoosikerroin, viskositeetti (kaava 16)
$\frac{\partial u}{\partial y}$	nopeusgradientti (kaava 16)
t	aika (kuva 14)
$\frac{d\varepsilon}{dt}$	leikkausnopeus (kuva 14)
ε_E	elastinen, välitön muodonmuutos (kuva 16)
ε_V	viskoosinen muodonmuutos (kuva 16)
ε_D	myöhästynyt elastinen eli viskoelastinen muodonmuutos (kuva 16)
E_1, E_2	Burgersin mallin kaksi jouta ja niiden kimmokertoimet (kuvat 15 & 16)
t_0	kuormitusvaiheen alkuaika (kuva 16)
η_1, η_2	Burgersin mallin kaksi kaasuvaimenninta ja viskositeetit (kuvat 15 & 16)
t_1	palautumisvaiheen loppuaika (kuva 16)
σ_d	deviatorinen jännitys (kuva 17)
$\Delta\sigma_d$	jännitysten erotus (kuva 17)
σ_1	pääjännitys (kuvat 17 & 20)
σ_3	pienempi jännitys (kuvat 17 & 20)

M_r	sitomattoman materiaalin jäännös/resilient-moduuli (sivut 41 & 49)
E_p	mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (kuva 24 & kaava 17)
E_A	mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (kuva 24 & kaava 17)
h	mitoitettavan kerroksen paksuus (kuva 24 & kaava 17)
E	mitoitettavassa kerroksessa käytettävän materiaalin E-moduuli (kuva 24 & kaava 17)
a	levykuormituslaitteen kuormituspinnan säde (kaava 17)

Sisällys

Abstract	3
Tiivistelmä	4
Kiitokset	5
Lyhenteet ja symbolit	6
Sisällys	10
Johdanto	12
TEORIAOSUUS.....	16
Tietekniikan historiaa	17
Tierakenteiden historiaa	17
Roomalainen tierakenne	17
Ranskalainen tierakenne	17
Englantilainen tierakenne.....	18
Modernit tierakenteet	19
Historiaa Suomen tietekniikan näkökulmasta	19
Myöhäiskeskiaika - 1800-luku	19
1900-1950.....	20
1950-1970.....	20
1980-2000.....	21
2000 - nykyaika	22
Ympäristökuormitus ja routamitoitus	24
Tehokas jännitys	24
Roudan tunkeutumissyvyys	24
Tierakenteen routanousun arviointimenetelmiä	27
Liikennesäätö ja kuormituskestävyyssäätö	31
Palvelutaso ja vauriotyypit	31
Ekvivalentti- eli vastaavuuskerroin ja ”neljännen potenssin” sääntö	32
Tien rakennemateriaalien käyttäytymismalleja	35
Hooken laki, Youngin moduuli ja Poissonin suhde	36

Newtonin laki	38
Bitumilla sidotun materiaalin käyttäytyminen ja Burgersin malli	39
Sitomattoman materiaalin käyttäytyminen	41
Tierakennusmateriaalien ja koko tierakenteen käyttäytyminen	42
Kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmiä	43
Liikkuvan ajoneuvon kuormituksen vaikutuksia tierakenteissa	43
Kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmiä	48
Tasotekantavuusmenetelmä - Odemarkin mitoitussyhtälö.....	49
Monikerroslaskentaan perustuvia menetelmiä.....	50
Elementtimenetelmät	52
ESIMERKKEJÄ.....	54
Liikennesuorat	55
Tien rakennusmateriaalien ja liikennesuoran vaikutusten havainnollistaminen ROADEX-demolaskurilla	55
Raskaiden ajoneuvojen kehitys ja vaikutukset Suomen tiestöön.....	56
Raskaiden ajoneuvojen mitat	56
Liikenteen automaattisen ajamisen riskianalyysiä	59
Ilmastonmuutos	60
Ilmastonmuutos ja sen vaikutukset Suomessa	60
Ilmastonmuutoksen odotetut vaikutukset Suomen tiestöön.....	61
Ilmastonmuutoksen huomioiminen väylärakentamisessa	62
Kaavoitus	62
Tiestö.....	63
Tiestön päällysteen reikiintyminen	64
Lähdeluettelo.....	67

Johdanto

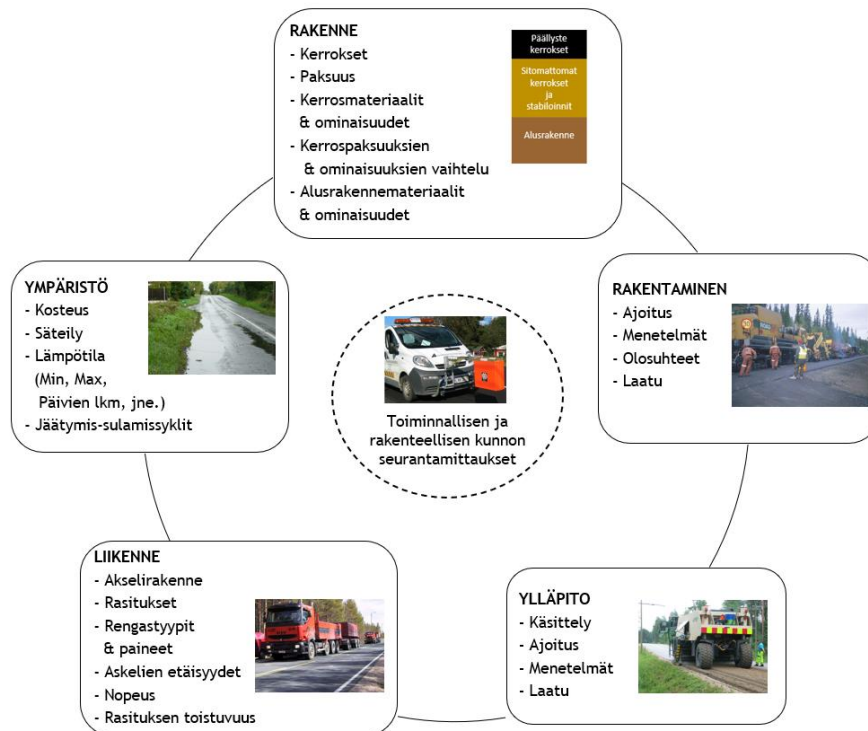
Suomen tieverkko on ollut kasvavien haasteiden edessä. 2000-luvun ensimmäinen neljännes oli suomessa tieverkon korjausvelan kertymisen aikaa. Korjausvelka kattaa koko tieverkkoamme yleisistä pääteistä aina yksityis- ja metsäteihin.

Korjausvelan taustalla on teiden rappeutuminen, joka alkaa heti tien rakentamisen ja käyttöönoton jälkeen (kts. kuva 1). Tien elinkaari saatetaan suunnitella 40 vuoden mittaiseksi, mutta ilman hoito- ja kunnossapitotoimenpiteitä voidaan olla jo muutaman vuoden päästä tilanteessa, jossa tie on ajokelvoton. Suomessa teiden hoidon sekä kunnossapidon merkitys korostuu haastavien talviolosuhteiden takia.

Ilmastonmuutoksen seurauksena odotettavissa oleva ilmastorasituksen lisääntyminen ja raskaiden ajoneuvojen akselimäärien ja kokonaismassojen nostamisen tuoma liikennesäätö- ja turvallisuusongelmien kasvu tulevat kuormittamaan tieverkkoamme yhä enemmän ja niillä arvelaan olevan vaikutusta tieverkon sekä siltojen kunnostus- ja ylläpitotarpeisiin.

Edellä mainittuja tieverkkoamme kohdistuvia haasteita tutkitaan ja pyritään ratkaisemaan mm. liikennetekniikan ja tietekniikan (am./eng. highway/road engineering) keinoin. Tietekniikka on yhdyskuntarakentamisesta haarautuva tekniikan ala, johon sisältyy teiden, siltojen ja tunneleiden suunnittelu, rakentaminen, käyttö, hoito ja ylläpito ihmisten ja tavaroiden turvallisen ja tehokkaan kuljetuksen varmistamiseksi.

Tietekniikassa tiensuunnittelulla tarkoitetaan yksittäisen tien sijainnin ja muodon eli geometrian ja toisaalta tierakenteen yksityiskohtaista suunnittelua. Tavoitteena on löytää mahdollisimman tarkoituksenmukainen tekninen ratkaisu, jota tarkastellaan talouden, turvallisuuden ja ympäristön näkökulmista. Yksityiskohtaisemmin tien suunnittelun tavoitteena on tien pinnan toiminnallisen kunnan eli palvelutason saavuttaminen ja säilyttäminen koko sen ajanjakson, jolle se on suunniteltu. Tien rakenteet pitää mitoittaa kestäväksi siihen kohdistuvia rasituksia, joista merkittävimmät ovat liikenne- ja ympäristörasitukset. Edellä mainittuja rasituksia voidaan tarkastella erikseen, mutta käytännössä tien rakenteen rappeutuminen on seurausta kaikkien kuormitustekijöiden ja tien rakenteen (sisältäen materiaaliominaisuudet ja myös geometrian) yhteisvaikutuksesta ottaen huomioon myös aikatekijän.



Kuva 1. Tien rappeutumiseen ja palvelutasoon sen elinkaaren aikana vaikuttavia tekijöitä. Kuva muokattu lähteistä Haas ym. (2004) ja Mills ym. (2007).

Tien rappeutumiseen vaikuttavat tekijät otetaan huomioon tien suunnittelussa geometrian suunnittelun lisäksi tien poikkileikkauksen ja rakenteen yleis- ja yksityiskohtaisessa suunnittelussa. Rakenteen suunnittelu käsittää alusrakenteen suunnittelun ja päällysrakenteen mitoituksen, joka Suomessa sisältää kuormituskestävyys- ja routamitoituksen. Tien rakenteen mitoittaminen siis on päällysrakenteen suunnittelua siten, että tie kestää siihen kohdistuvat rasitukset murtumatta ja ilman liikennettä haittaavia muodonmuutoksia. Suomessa Väylävirasto (ent. Liikennevirasto) ylläpitää tienpidon suunnitteluohjeita sisältäen mm. tien poikkileikkauksen suunnittelun (Väylävirasto, 2021), tien suuntauksen suunnittelun (Liikennevirasto, 2013) ja tierakenteen suunnittelun (Liikennevirasto, 2018).

Tämä kirjanen alkaa teoriaosuudella, joka käsittää kappaleet 1-4. Kappaleen 1 historiakatsauksella käydään ensin läpi merkittäviä tierakenteiden kehitysaskelia maailmalla ja sen jälkeen tiestön ja tien suunnitteluohjeiden kehitystä Suomen näkökulmasta.

Kuvan 1 tiehen kohdistuvista **ympäristörasituksista** lämpötilan, veden ja roudan vaikutuksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 2 esittelemällä niihin liittyviä teorioita ja malleja:

- Tien sitomattomissa rakenteissa sekä pohjamaassa olevan veden vaikutuksen osalta kuvataan Terzaghin maan tehokkaiden jännitysten periaate ja
- roudan osalta kuvataan määritelmät ja kaavoja roudan syvyydelle sekä Konradin ja Morgensternin esittelemälle routimisherkkyydelle eli segregatiopotentialille.

Kuvan 1 tiehen kohdistuvien **liikennesuoritteiden** vaikutuksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 3 esittelemällä liikennesuoritteisiin ja kuormituskestävyyssuoritteeseen liittyviä teorioita ja malleja:

- Kappaleessa esitellään 1950-luvun lopulla Yhdysvalloissa järjestetty AASHO tiekoe sekä kokeen yhteydessä tehty määritelmä tien palvelutasolle (present serviceability index [PSI]). Lisäksi kappaleessa kuvataan taustat ns. neljännen potenssin säännölle (4th power law) ja esitetään ajoneuvotyyppien ekvivalentti- eli vastaavuuskerroin (load equivalence factor),
- Tiemateriaalien käyttäytymiseen keskittyvässä kappaleessa kuvataan tierakenteen ja sen sitomattomien ja bitumilla sidottujen materiaalien käyttäytymismalleista Hooken laki ja sen yhteydessä kimmomoduulin (E) laskukaava sekä Poissonin suhde. Sitten Newtonin lain kautta siirrytään kuvaamaan bitumisen päällysteen viskoelastista käyttäytymistä kuvaava Burgersin malli.
- Kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmät -kappaleessa käydään ensin läpi mm, liikkuvan ajoneuvon tien rakenteisiin aiheuttamia dynaamisia suoritteita. Lopuksi luodaan yleiskatsaus erilaisiin kuormituskestävyyden laskemis- ja mallinnusmenetelmiin: Odemarkin menetelmä sekä monikerroslaskentaan perustuvat BISAR ja APAS ohjelmat ja elementtimenetelmään perustuva PLAXIS ohjelma.

Kirjasen esimerkkiosuudessa käydään läpi Suomen tiestön rappeutumiseen liittyviä ilmiöitä:

Liikennesuoritteita käsittelevässä kappaleessa:

- esitellään ensin tierasuoritteita graafisesti havainnollistava ROADEX-demolaskuri.
- Sen jälkeen tarkastellaan Suomen tiestöllä liikkuvien raskaiden ajoneuvojen suurimpien sallittujen mittojen kehitystä ja vaikutuksia Suomen tiestön kestävyys.

Ympäristösuoritteita käsittelevässä kappaleessa:

- tarkastellaan ilmastonmuutosta, sen Suomen tiestön rakenteisiin kohdistamien ilmastorasituksen vaikutuksia sekä keinoja, joilla vaikutukset pyritään ottamaan huomioon.
- Ilmastomuutoksen konkreettisten vaikutuksien osalta esimerkissä tarkastellaan Suomen päällystetyn tiestön reikiintymistä, jonka on arvioitu 2000-luvun aikana johtuvan osittain juuri ilmastonmuutoksesta.

TEORIAOSUUS

Tietekniikan historiaa

Tierakenteiden historiaa

Tie on kulkuväylä tai reitti kahden paikan välillä. Aluksi tiekuljetukset suoritettiin ihmisillä tai hevosilla ja härillä, jotka kuljettivat tavaroita usein riistareittejä pitkin. Teiden historia alkaa kauan ennen kristuksen syntymää mutta tien rakenteiden historiassa merkittävimpiä kehitysaskelia tarkastellaan usein arvioimalla Roomalaisten, Ranskalaisten ja Englantilaisten tierakenteiden vaikutuksia moderneihin tierakenteisiin (kts. kuva 5).

Roomalainen tierakenne

Roomalaisen tierakenteen ominaisuuksia olivat alusmaan poistaminen tien rakenteiden sijoituspaikalta, kalkkilaastin käyttö kovan kiviaineksen sitomiseksi kalkkibetoniksi sekä erilaisten raekokojen käyttö useammassa päällekkäisessä kerroksessa. Roomalaisen tiet rakennettiin profiililtaan tasaisiksi maan kaltevuudesta riippumatta ja tierakenteen pohjassa käytettiin raskaita peruskiviä. Rakenne oli paksu (75-120 senttimetriä) ja kestävä mutta kallis ja ylimitoitettu sen aikaiselle liikennesuoritukselle. Tästä huolimatta seuraavat merkittävät ja laajalle levinneet tierakenneratkaisut kehitettiin vasta 1700-luvulla.

Ranskalainen tierakenne

Ranskalaisen tietarkastaja Pierre Marie Jerome Tresaguetin (1716-1796) mukaan nimetty tierakenne sai alkunsa vuonna 1775. Tärkein muutos tierakenteessa oli rakennekerroksen paksuuden merkittävä pieneneminen, tien keskiosassa paksuutta oli vain 30 senttimetriä. Tien rakenteissa käytetyt kivet tiivistettiin kerroksittain ja tien keskiosasta vesi pääsi valumaan selvästi alemmalla tasolla olevia reunoja ja pintaviemäröintiä kohti.



Kuva 2. Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet. Kuva uudelleenjulkaistu lähteestä Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet (ca. 1780).

Englantilainen tierakenne

Englantilainen Thomas Telford (1757-1834) kehitti teiden rakenteiden kuivattamiseen uuden tekniikan, jossa mm. alusmaan päälle perustettavan tien päällysrakenteen alin kerros on paksuimmillaan (35-45 cm) tien keskiosan kohdalla ja ohenee tien reunoja kohti. Se oli tehokas menetelmä tien pohjakerroksen tyhjentämiseen vedestä.



Kuva 3. Thomas Telford. W. Raddonin (1831) muotokuva S. Lanen maalauksesta. CC BY-NC-ND 3.0 lisenssin¹ alainen kuva © National Portrait Gallery.

Skotlantilainen insinööri ja tienrakentaja John Loudon McAdam (1756-1836) keksi, että hyvin jyrätty ja kuivattu tierakenne kestää hyvin kuormituksia 25 senttimetrin paksuisena eikä tien rakenteiden alimmassa kerroksessa aikaisemmissa käytettyjä suuria kiviä tarvittu enää.



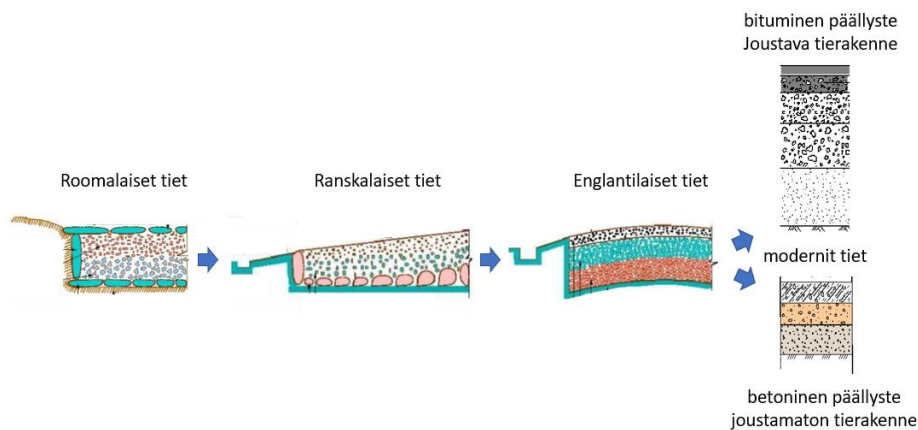
Kuva 4. John Loudon McAdam. C. Turnerin (1825) teos tuntemattoman taiteilijan teoksen pohjalta. CC BY-NC-ND 3.0 lisenssin alainen kuva © National Portrait Gallery.

¹ <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

Modernit tierakenteet

Tiestöä käyttävien ajoneuvojen motorisoituessa ja ajonopeuksien kasvaessa aiheuttivat kumipyörät teiden pinnan kulumista ja pölyämistä. Vastauksena kulumis- ja pölyämisongelmiin aloitettiin tien pinnan kastelu jäteöljyllä ja halvoilla öljyillä tai tervamakadamilla. Myöhemmin yleistyi bitumisella materiaalilla sidotun materiaalin käyttö. Toinen maailmalla yleistynyt rakenne perustui hydraulisesti sidotun materiaalin käyttöön.

Nykyisin teiden rakennekerroksissa käytettävien materiaalien kirjo on kasvanut huomattavasti ja tien rakennemateriaaleihin pyritään yhä enemmän käyttämään mm. teollisuuden sivutuotteita. Yleisimmin Suomessa käytössä olevista päällystetyistä tierakenteista bitumisella aineella sidottujen päällyskerrosten käyttöön perustuvia tierakennetta kutsutaan joustavaksi ja betonilla sidottuja kovaksi tierakenteeksi.



Kuva 5. Tierakenteen historiaa.

Historiaa Suomen tietekniikan näkökulmasta

Myöhäiskeskiaika – 1800-luku

Suomessa tiestön varhaisista kehitysvaiheista mainittakoon 1300-luvun lopun maalaki, joka sisälsi mm. vaatimuksen jokaiseen kylään johtavasta vähintään yhdestä yleisestä tiestä. 1600-luvulla Suomen postilaitos alkoi hyödyntämään teitä ja samalla osaltaan lisäsi tarvetta tieverkon laajenemiselle ja sen toimivuuden varmistamiselle. Vuoden 1734 lain mukaan veden valumisen parantamiseksi tiet tuli muotoilla kuperiksi. Vuodesta 1789 tiet on pitänyt pitää ajokuntoisena ympäri vuoden. 1820-luvulla tielle levitettäviä kiviä alettiin murskaamaan. Teiden makadamointi alkoi Suomessa 1840- ja 1850-luvuilla, jolloin makadamointi-aineena käytettiin pienten kivien ja kostutetun saven sekoitusta.

1900–1950

Tiet rakennettiin Suomessa kokemuksen perusteella vakiopaksuudella pohjamaaolosuhteista riippumatta aina 1920-luvulle asti. 1920-luvulla autojen määrä alkoi kasvamaan ja ohitti vuosikymmenen loppuun mennessä ihmisen ja tavaroiden kuljetusvälineenä hevosen. Vuodesta 1920 valtio alkoi vastaamaan maanteiden rakentamis- ja kunnossapitokustannuksista. Teiden suunnittelun osalta tien päällysrakenteen suunnittelussa alettiin hyödyntää laskennallista mitoitusta, ja tierakenteista alettiin tehdä normaalipiirustuksia. Teiden routiminen aiheutti kuitenkin edelleen ongelmia. 1920-luvulla tien kulutuskerroksessa tienpinnalle (2-5 cm) imeytettiin sideainetta ja menetelmällä rakennettuja teitä kutsuttiin imeytysaineen mukaan terva-, piki-, ja asfalttimakadameiksi. Vuonna 1927 julkaistussa tiekäsikirjassa mainitaan ensimmäistä kertaa jakava kerros. Muutenkin päällysrakenne oli jaettu osiin, joille oli määritetty eri tehtävät.

Suomen autokanta alkoi kasvamaan merkittävästi 1930-luvulla juuri ennen toista maailmansotaa ja sodan aiheuttaman suvannevaiheen jälkeen jatkoi uudestaan kasvuaan vuodesta 1945. Tämä kasvu jatkui 1980-luvulle asti.

Vuonna 1933 kehitettiin standard Proctor-kokeen, jonka avulla pystyttiin paremmin hallitsemaan myös tien kerroksien tasaiseksi tiivistämiseen liittyviä haasteita.

Suunnittelupuolella 1940-luvulla alettiin Suomessa routavaurioiden ehkäisemisessä hyödyntää maaperätutkimuksia. Lisäksi laboratoriossa alettiin tehdä tutkimuksia kapillariteetti- ja routimisnousukokeilla. 1940-luvulla julkaistiin ensimmäiset kahdelle eri mitoituskuormalle tierakenteiden mitoituskuvaajat, jotka pohjautuivat pohjamaalajien kantavuutta kuvaaviin California Bearing Ratio (CBR)-koearvoihin.

1950–1970

1950-luvun alussa Suomen tieverkosto oli huonokuntoinen ja lähes kaikki tiet sorapintaisia. Päätieverkkoa alettiin kestopäällystämään johtuen sorateiden suurista kunnossapitokustannuksista. 1950-luvun lopulla päällystettyjä teitä oli Suomessa noin 80 kilometriä ja kestopäällysteet tehtiin aluksi sementti- ja asfalttibetonista tai kivipäällysteestä. Kevytpäällysteisillä käytettiin aluksi kuumatervaimetytystä tai bitumiliuosoraa.

1950-luvulla Suomessa julkaistiin Suomen maaperän routivuuden mittausohjeet laboratoriokokeille. Toisaalta tutkittiin tarkemmin myös tiepohjan kantokykyä kyllästyneessä tilassa sekä silmämääräisesti että koekuormituksilla tärykojeilla. Materiaalien leikkauslujuus voitiin määritellä siipikairauksella tai laboratoriossa. 1950-

luvulla tierakenteen kuormituskertojen määrään perustuva mitoitus syrjäytti pohjamaan kantavuuteen perustuvan mitoituksen.

Suomessa tierakentamisessa useat työvaiheet tehtiin käsin vielä 1960-luvulle saakka. Esimerkiksi tien kulutuskerroksen tiivistyminen annettiin tapahtua vasta liikenteen vaikutuksesta. 1960-luvulta lähtien koneellistuminen on ollut nopeaa. Louhintatekniikan kehittyminen mahdollisti nopeamman ja laajamittaisemman kallioalueiden hyödyntämisen tieprojekteissa.

1960-luvulla aloitettiin Suomessa laajamittainen päällystäminen. Samalla alkoi ensimmäisten moottoriteiden rakentaminen. Vain päätiet rakennettiin hyvin. Muulla tieverkolla päällystäminen tehtiin tehostettuna kunnossapitona; soratien päälle 20-40 cm soraa + 5 cm öljysoraa, jota alettiin käyttämään kevyenä päällysteenä. Asfalttiasemien lukumäärä kasvoi merkittävästi.

Tien suunnitteluohjeista 1960-luvulla julkaistiin sekä vaiheittaisen rakentamisen että tien poikkileikkauksen suunnitteluohjeita, jotka olivat ainakin osittain voimassa 2000-luvulle asti. Päällysrakenteen luokittelussa alettiin käyttämään kuormituskertalukua. Tierakenteen mitoituksen pohjana alettiin käyttämään vuoden keskimääräistä vuorokausiliikennettä. Kuormituskertaluku laskettiin tien raskaimman kuormitetun ajokaistan kuormituskertaluvun mukaisesti.

1970-luvulla päällysteiden ja päällystystapojen kehitys eteni varsinkin öljykriisin aiheuttaman öljytuotteiden hinnan nousun vuoksi. Vaikka 1970-luvulla aloitettiin Suomessa moottoriliikenneteiden rakentaminen, kokonaisuutena päällystystyöprojektien painopiste oli siirtynyt uusien teiden rakentamisesta teiden kunnossapitoon ja parantamiseen. Kunnossapitotarvetta ja sitä kautta myös päällysteen tutkimustarvetta aiheutti tiestössämme mm. lisääntynyt nastarengaskulutus. Tien päällysrakenteissa otettiin käyttöön ensimmäiset synteettiset suodatinkankaat. Teräsverkko otettiin myös käyttöön vähentämään roudan aiheuttamia tien päällysteen vaurioita.

1970-luvun puoliväliin mennessä muiden päällystetyyppien käyttö oli supistunut ja uudet päällysteet olivat joko asfalttibetonia tai öljysoraa. Tien suunnitteluohjeista julkaistiin uusia ohjeita mm. tien suuntaukselle ja tasoliittymien suunnittelulle.

1980–2000

Moottoriteiden rakentaminen jatkui 1980-luvulla. Raskaiden ajoneuvojen massojen kasvaminen aiheutti tutkimistarvetta teiden kantavuuteen. Vuonna 1985 päällysrakenteen suunnittelussa siirryttiin Odemarkin kantavuusyhtälön käyttöön, tosin mitoituskäyrästä luovuttiin vasta tietokoneiden laskentakapasiteetin paranemisen myötä. Odemarkin

kantavuusyhtälössä päällysrakenteen eri kerroksille on määritetty *E*-moduulit ja kantavuudet. 1980-luvulla julkaistiin ensimmäinen päällysteiden suunnitteluohje.

Laman jälkeen autokanta alkoi taas kasvamaan 1990-luvun puolivälistä ja kasvu on siitä lähtien jatkunut pääsääntöisesti tasaisesti. Kestopäällysteisten asfalttibetonin käyttö on kasvanut viimeisten vuosikymmenien aikana mutta sen käyttö on ollut 1960-luvulta asti vähäisempää kuin kevytpäällysteiden käyttö.

2000 - nykyaika

2000-luvulla moottoriteiden määrä on kasvanut tasaisesti - kahdessakymmenessä vuodessa (2000-2020) niiden määrä on lähes kaksinkertaistunut.

Vuonna 2004 suunnitteluohjeita päivitettiin merkittävästi. Tuolloin Odemarkin mitoitussyhtälön lisäksi päällysrakenne voitiin mitoittaa väsymisteoriaan perustuvana analyttisenä mitoituksena eli monikerroslaskentana, josta tosin luovuttiin yleisten teiden osalta vuonna 2018 suunnitteluohjeiden päivityksen yhteydessä. Suurin uudistus vuoden 2004 ohjeistuksessa oli routanousumitoitus, jolloin päällysrakenteen mitoitukseen vaikutti myös laskennallinen routanousu. Muita eroja aikaisempiin ohjeisiin olivat kelpoisuusluokitus, uudet alusrakenneluokat sekä uudet kuormitusluokat, jotka korvasivat 1964 määritellyt päällysrakenneluokat.

Suomi on koko sen historian ajan ollut harvaan asuttu ja laaja maa, jonka ongelmana ihmisten ja tavaran liikkumisen näkökulmasta on pitkät välimatkat. Viimeisen sadan vuoden aikana maanteiden osalta ongelmaa on pyritty ratkaisemaan kattavalla tieverkolla, lisääntyvällä moottoriajoneuvojen lukumäärällä sekä kasvattamalla raskaiden ajoneuvojen massoja. Suomen maanteitä on nykyään noin 78 000 kilometriä. Moottoriajoneuvojen määrä on kasvanut 1800-luvun lopun ensimmäisten ajoneuvojen tulon jälkeen yli kolmeen miljoonaan. Samassa ajassa raskaiden ajoneuvojen massa on kymmenkertaistunut.

Raskaiden ajoneuvojen suurimpia sallittuja massoja tieliikenteessä korotettiin viimeksi vuonna 2013. Vuoden 2019 alussa kasvatettiin ajoneuvoyhdistelmän ja puoliperävaunuyhdistelmän sallittua maksimipituutta. Vuoden 2019 suunnitteluohjeiden päivityksen yhteydessä kuormituskertaluvun laskentakaavoissa käytettäviä ajoneuvojen vastaavuuskertoimia korotettiin vastaamaan uusia ajoneuvosääntöjä ja vuodelle 2025 ennustettuja ajoneuvomassoja. Myös kuormitusluokkien rajoja, päällysteiden paksuuksia ja tavoitekantavuuksia päivitettiin.

Suunnitteluohjeet kehittyvät sitä mukaan, kun uutta kokemukseräistä tietoa tierakenteen toiminnasta saadaan. Lisäksi ohjeiden päivitystarpeeseen vaikuttaa mm. tierakenteelle aiheutuvan kuormituksen (liikenne - ajoneuvojen massojen kasvaminen, ympäristö -

ilmastomuutoksen vaikutukset ympäristöolosuhteisiin) lisääntyminen, rakennusmateriaalien (esim. päällystemateriaalien korvaaminen uusiomateriaaleilla) kehittyminen ja suunnitteluohjelmistojen kehittyminen. Tierakenteen suunnittelu Suomen tiestölle tehdään suomalaisten suunnitteluohjeiden mukaan. Esimerkiksi suunniteltaessa tietä Saksaan, tulee mitoitus tehdä kyseisen maan kansallisten ohjeistusten mukaisesti. Tien päällysrakenteen mitoituksessa ei siis sovelleta eurokoodeja, kuten esimerkiksi siltojen suunnittelussa tehdään.

Ympäristökuormitus ja routamitoitus

Ehrolan (1996) mukaan Suomen olosuhteissa kolme päätekijää, jotka aiheuttavat ympäristökuormituksia tierakenteissa ovat vuodenaikojen kiertokulkua noudattelevat lämpötila, vesi ja routa. Lämpötilan vaikutukset kohdistuvat lähinnä sidottuihin rakennekerrokseen. Vesi ja kosteus vaikuttavat asfaltilla päällystetyn tien kestävyys- ja toimintaan sekä tien pinnan reikiintymiseen sorateilla. Vaikutukset ovat pääsääntöisesti rakenteiden kantavuuden heikentymistä ja routimisen lisääntymistä. ROADDEX Networkin (2022d) mukaan veden pääsy tiemateriaalien ja pohjamaan huokosiin tekee teistä herkempiä vaurioitumiselle ja sitä kautta palvelukyvyn heikentymiselle.

Tehokas jännitys

Tien alusrakenteen kuivatusolosuhde vaikuttaa tierakenteen kantavuus- ja routamitoitukseen. Maan muodonmuutos- ja lujuusominaisuudet riippuvat nimenomaan maan tehokkaista jännityksistä.

Karl von Terzaghi (1883-1963) oli itävaltalainen mekaniikan ja geotekniikan insinööri sekä geologi, joka tunnetaan "maamekaniikan ja geotekniikan isänä". Terzaghi esitti vuonna 1923 maan tehokkaiden jännitysten periaatteen

$$\sigma = \sigma' - u, \quad (1)$$

missä σ' maan tehokas jännitys, σ on maan kokonaisjännitys ja u on huokosvedenpaine.

Terzaghin kaavan perusteella hydrostaattisessa tilanteessa huokosvedenpaine u kasvaa syvyyden funktiona pohjavedenpinnan alapuolella ja tämä pienentää maan tehokkaita jännityksiä. Tehokkaiden jännitysten pienentyessä maan lujuusominaisuudet heikkenevät. Käytännössä tämä tarkoittaa, että märän alusrakenteen tapauksessa, pohjaveden pinnan ollessa lähellä maanpintaa, karkearakeisen alusrakenteen lujuus ja sitä kuvaava E -moduuli on pienempi.

Roudan tunkeutumissyvyys

Tierakenteen jäätyminen eli routaantuminen alkaa, kun ilman lämpötila tienpinnalla laskee alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Termodynamiikan toisen säännön mukaisesti lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan, jolloin lämpö virtaa korkeammasta lämpötilasta matalamman lämpötilan suuntaan. Mitä suurempi lämpötila ero on, sitä voimakkaampaa virtaus on. Maassa lämmön siirto tapahtuu pääosin johtamalla, mutta joissain tapauksissa myös konvektiivisesti tai

lämpösäteilynä. Jos maaperä routii ja routarajalle virtaa vettä, lämmönsiirtymistä tapahtuu vähäisissä määrin myös konvektiivisesti (Nurmikolu & Kolisoja, 2002).

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) oli ranskalainen matemaatikko ja fyysikko. Fourier'n tärkein teos *Théorie analytique de la chaleur* (Analyttinen lämpöteoria) julkaistiin 1822. Sillä oli suuri merkitys lämpöopille ja siinä esitettiin kuuluisat Fourier'n sarjat. Siinä selitetään, miten lämmön johtuminen kiinteässä kappaleessa voidaan laskea päättymättömän matemaattisen sarjan avulla. Matemaattisen fysiikan voidaan katsoa alkaneen edellä mainitun teoksen julkistamisesta.



Kuva 6. Jean Baptiste Joseph Fourier. A.F.B. Geillen (n.d.) kaiverrus J. Boillyn teoksen pohjalta. Public domain kuva: Wellcome Collection.

Johtumalla tapahtuvaa yksiulotteista lämmön siirtymistä kuvataan Fourierin kaavalla

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz}, \quad (2)$$

missä q on lämpövirta alenevan lämpötilan suuntaan, λ on lämmönjohtavuus lämpövirran suunnassa ja $\frac{dT}{dz}$ on lämpötilagradientti lämpövirran suunnassa.

Maan lämmönjohtavuuteen λ vaikuttaa maan koostumus, tiheys ja vesipitoisuus, sekä maan aineksen mineraalikoostumus ja eloperäisen aineksen pitoisuus.

Roudan tunkeutumissyvyyden määrittäminen perustuu termodynamiikan ensimmäiseen sääntöön. Energian häviämättömyyden lain perusteella energiaa ei voida luoda tyhjästä eikä hävittää. Roudan tunkeutumissyvyyden määräävinä tekijöinä ovat maalajin vesipitoisuus ja lämmönjohtavuus jäätyneessä tilassa. Maan jäätyessä sen routiminen pienentää roudan syvyyden kasvua, sillä jäätyneen maan läpäisevä lämpöhäviövirtaus korvautuu jäätymislämmöllä, joka on huokosveden jäätymisen ja routimisen tuottaman jäätymishäviön summa. Tällöin termodynamiikan ensimmäinen sääntö saa muodon

$$q = q_+ + q_f + q_s + q_c, \quad (3)$$

missä q on lämpövirtaus jäätyneen kerroksen läpi, q_+ on lämpövirtaus jäätymisrintamalle sulasta maasta, q_f on routarajalla olevan huokosveden jäätyessä syntyvä lämpövirtaus, q_s on routarajalle virtaavan huokosveden jäätyessä syntyvä lämpövirtaus ja q_c on jäätyneen kerroksen jäähtyessä syntyvä lämpövirtaus (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry [RIL], 2013).

Yhtälöä voidaan pitää jäätymisprosessin tarkastelun perustana, jota erilaisilla laskentamenetelmillä pyritään mallintamaan (Nurmikolu & Kolisoja, 2002).

Roudan tunkeutumissyvyyden laskentaan on kehitetty useita eri laskentamenetelmiä, joista osa on puhtaasti teoreettisia menetelmiä ja osa perustuu kenttätutkimuksiin. Esimerkiksi 1860-luvulla Neumann on käsitellyt roudan tunkeutumista pyrkien löytämään roudan teoreettiselle laskentamallille mahdollisimman yksiselitteisen ratkaisun. Muita roudan tunkeutumisen arviointimenetelmiä on mm. J. Stefanin menetelmä (1889), A Watzingerin, E. Kindemin ja B. Michelsenin menetelmä (1937 & 1941), W. P. Beggrenin menetelmä (1943), G. Beskowin menetelmä (1935) sekä näiden menetelmien erilaiset yhdistelmät. Joissain tilanteissa roudan syvyyden laskenta voidaan suorittaa myös elementtimenetelmään pohjautuvilla laskentaohjelmistoilla. Yhteistä näille teoreettisille malleille on, että kaikissa menetelmissä esiintyy jossain muodossa maan lämmönjohtavuutta kuvaava termi λ (Nurmikolu & Kolisoja, 2002).

Suomessa käytetään yleisesti kenttämittauksiin perustuvia roudan syvyyden määrittämisen malleja. Kenttämittauksilla on pyritty löytämään roudan syvyyden ja pakkassumman neliöjuuren välistä yhteyttä

$$z_f = k \times \sqrt{F}, \quad (4)$$

missä z_f on roudan syvyys maanpinnasta, F on pakkasmäärä talven alusta lukien ja k on routaantumiskerroin (vaihteluväli on 8-15).

Keroin k riippuu maalajien tyypillisistä kosteuspitoisuuksista. Hienorakeisten maalajien kosteuspitoisuus on pienempi, minkä vuoksi niillä on karkearakeisimpia maalajeja suurempi jäätyislämpömäärä. Vesi siis hidastaa roudan tunkeutumista. Toisin sanoen, mitä karkearakeisempaa maalaji on, sitä suurempi on sen k -arvo ja sitä suurempi roudan tunkeutumissyvyys (Nurmikolu & Kolisoja, 2002).

Tiehallinnon *Tierakenteen suunnitteluohjeen* (2004a) mukainen mitoittava roudansyvyys määritettiin kaavalla

$$S = k \times \sqrt{F_{mit}}, \quad (5)$$

missä S on mitoitettava roudansyvyys, F_{mit} on mitoituspakkasmäärä (alueellinen joka toinen vuosi toistuvia) ja k on routaantumiskerroin (= 12).

Mitoittava roudansyvyys tarkoittaa käytännössä sitä syvyyttä, johon asti routa tunkeutuu mitoitustalven pakkasolosuhteissa pelkästään hiekasta muodostuvassa rakenteessa. Mitoittava roudansyvyys ylittyy noin joka toinen vuosi, Pohjois-Suomessa hieman useammin ja Etelä-Suomessa hieman harvemmin (Liikennevirasto, 2018; RIL, 2013).

Hiekkaa karkearakeisemmissa maalajeissa ja kalliossa routa tunkeutuu hiekkalajitetta syvemmälle, kun taas hienorakeisemmassa maassa (siltti, savi) roudansyvyys on hiekkalajitetta pienempi. Tierakenteen suunnitteluohjeen (Liikennevirasto, 2018) mukaan routaantuvan alusrakennekerroksen paksuus lasketaan kaavalla

$$P = S - R_{\text{red}}, \quad (6)$$

missä P on routaantuvan alusrakennekerroksen paksuus, S on mitoitettava roudansyvyys ja R_{red} on eristävydeltään hiekkaa vastaavan päällysrakenteen laskennallinen paksuus.

Koska edellä kuvatun kaavan mukaan mitoitettava roudan syvyys S on määritetty pelkästään hiekan perusteella, tulee mitoitettavan tierakenteen todelliset kerrospaksuudet (esim. louhe, murske, lämpöä eristävä materiaali) R_i muuttaa ensin hiekkaa vastaaviksi laskennallisiksi paksuuksiksi. Eristävydeltään hiekkaa vastaavan tierakenteen kokonaispaksuus lasketaan kaavalla

$$R_{\text{red}} = \sum_{i=1}^n a_i R_i = a_1 R_1 + a_2 R_2 + \dots + a_n R_n, \quad (7)$$

missä a_i on kerroksen i materiaalin vastaavuus eristävyden kannalta, R_i on rakennekerroksen i paksuus ja n on kerrosten lukumäärä.

Päällysrakennemateriaalien vastaavuus eristävyden kannalta vaihtelee mm. materiaalin lämmönjohtavuudesta sekä jäähtymis-, että jäätymisominaisuuksista riippuen (Liikennevirasto, 2018).

Tierakenteen routanousun arviointimenetelmiä

Routivuudella tarkoitetaan maalajin riskiä routaturpoamiselle maalajin jäätyessä. Erittäin routivalla maalla routimisen todennäköisyys on suuri ja paisuminen voimakasta. Routimaton maa ei roudi ollenkaan, tai routiminen on niin vähäistä, ettei sillä ole rakenteen kannalta merkitystä. Routanousun suuruutta voidaan arvioida useilla eri menetelmillä. Menetelmät voivat perustua joko rakeisuuteen, routanousukokeeseen tai kenttähavaintoihin

Routanousun suuruuden arviointi rakeisuuden tai muun maa-ainesta kuvaavan luokitusominaisuuden perusteella on epätarkkaa. Routivuuden arviointi rakeisuuskäyriin perustuva kuvan perusteella kuvaa ensisijaisesti routanousun riskiä. Routivien ja routimattomien maalajien raja-alueella voidaan routivuutta arvioida lisäksi laboratoriokokeilla määritetyn kapillaarisen nousukorkeuden perusteella (RIL, 2013).

Routanousun voimakkuus ja määrä on tarkemmin määritettävissä routanoususuhteen eli turpoamakertoimen t tai routanousukertoimen eli segregatiopotentiaalin SP avulla. Routanousukerroin SP voidaan määrittää kenttähavainnoilla, laboratoriokokeilla tai luokitusominaisuuksien perusteella.

Routanousunopeuden määrittäminen perustuu J.-M. Konradin ja N. R. Morgensternin (1981) julkaisemaan yhtälöön

$$\frac{\partial h}{\partial t} = SP \times \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (8)$$

missä $\frac{\partial h}{\partial t}$ on routanousunopeus (merkitään myös v ; alkuperäisessä kaavassa v_0), SP on routanousukerroin (segregatiopotentiaali, alkuperäisessä kaavassa SP_0) ja $\frac{\partial T}{\partial z}$ on lämpötilan gradientti jäätyneessä maassa routarajalla (merkitään myös muodossa $\text{grad } T$).

Kentällä tehtyjen routanousuhavaintojen perusteella routanousukerroin SP voidaan arvioida, kun tiedetään routanousun suuruus, pakkasmäärä, routan syvyys ja pohjamaan ominaisuudet. Esimerkiksi RIL (2013) esittää likimääräisiä kaavoja routanousukertoimen määrittämiseksi kenttähavaintojen perusteella. Kenttämenetelmä on työläs, aikaa vievä ja sisältää paljon epävarmuuksia (Ehrola, 1996; RIL, 2013)

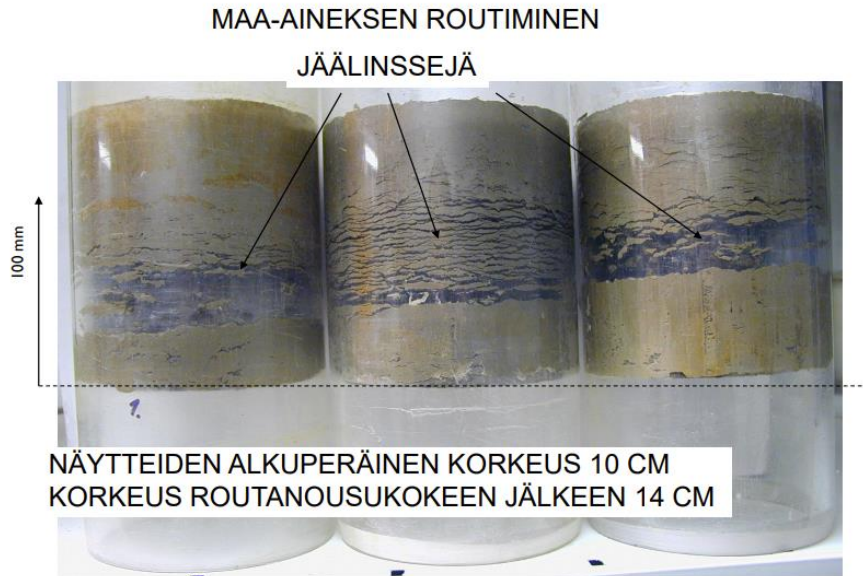
Maalajien luokitusominaisuuksista routanousukertoimen on havaittu olevan verrannollinen etenkin maalajin savipitoisuuteen. Kirjallisuudessa ja osassa suunnitteluohjeista on esitetty taulukoita routanousukertoimen arvoille savipitoisuuksien perusteella.

Maalajiominaisuuksista myös ominaispinta-alan, rakeisuuden, huokoskokojakauman, konsistenssiominaisuuksien, hienoustekijän, kapillaarinen veden nousukorkeuden, vedenpidätyskyvyn, jäätyttömän veden määrän ja vedenläpäisevyyden on havaittu vaikuttavan maalajin routanousuominaisuuksiin. Routanousukerrointa SP voidaan arvioida tarkemmin laboratoriossa suoritettavien routanousukokeiden perusteella.

Laboratoriokokeissa on huomioitava, että näytteiden tulisi edustaa koko routivaa maakerrosta (Ehrola, 1996; RIL, 2013). Oulun yliopiston routanousukokeen etenemistä esitteleviä YouTube-videoita on nähtävissä linkkien takaa:

- [Frost action in silty soil](#)
- [Frost action of wood pile in frost-susceptible silty soil](#)

Routanousukokeen tuloksia esitetään kuvassa 7.



Kuva 7. Routanousukoenäyte laboratoriossa. Kuva julkaistu luvalla © Kujala Kauko.

Tierakenteen suunnittelussa pohjamaan tai muun alusrakenteen routanousuherkkyys ilmaistaan routaturpoama-arvolla t . Se kertoo, kuinka monta prosenttia maakerroksen paksuus kasvaa, kun maakerros jäätyy hitaasti. Suunnitteluohjeiden mukaiset routaturpoamien t taulukkoarvot perustuvat Suomen tiestöllä vuosina 1987-1989 tehtyihin laajoihin routanousun kenttä- ja laborioritotkimuksiin. Taulukkoarvot on määritetty maa-aineksen rakeisuuden ja kuivatusolosuhteiden perusteella. Tierakenteen laskennallinen routanousu määritetään kaavalla

$$RN_{\text{lask}} = P \times \frac{t}{100}, \quad (9)$$

missä RN_{lask} on laskennallinen routanousu, P on routaantuvan alusrakennekerroksen paksuus ja t on alusrakenteen routaturpoama.

Laboratoriokokeiden kuten Tube Suction (TS) -kokeen avulla voidaan tutkia tien rakennusmateriaalien vedenimukykyä ja kosteusherkkyyttä sekä arvioida materiaalin soveltuvuutta eri tierakenteisiin. TS-kokeessa mitataan, imeekö materiaali itseensä vettä, jos sitä on saatavilla. Imeytyneen veden määrää seurataan mittaamalla tietyin väliajoin materiaalin suhteellista dielektrisyysarvoa E_r . Dielektrisyysarvo kertoo materiaalin volumetrisestä vesipitoisuudesta. Sitomattomat materiaalit voidaan luokitella dielektrisyysarvon perusteella. E_r -arvon ollessa alle 9 materiaali on hyvälaatuista kantavan kerroksen materiaaliksi. E_r -arvon ollessa 9-16 materiaali on routivaa ja kyseenlaista kantavan kerroksen materiaaliksi. E_r -arvon ollessa suurempi kuin 16 materiaali ei sovellu lainkaan käytettäväksi kantavassa kerroksessa. Myös näytteen sähkönjohtavuus suositellaan mitattavaksi TS-kokeen yhteydessä. Sähkönjohtavuus kertoo materiaalin

osmoottisen imupaineen määrästä. Tulos kertoo, jos materiaali sisältää esim. klorideja. Näytteen sähkönjohtavuuden ollessa korkea näyte saattaa sisältää suuria määriä suoloja tai haitallisia mineraalien rapautumistuotteita (ROADEx Network, 2022a).

Liikenneserasitus ja kuormituskestävyyssmitoitus

Palvelutaso ja vauriotyyppit

1950-luvun lopulla Yhdysvalloissa suoritettiin AASHO-tiekoe, jonka yksi tavoite oli määrittää riippuvuuksia ajoradan pinnan palvelutason eli toiminnallisen kunnon ja tien rakenteen suunnittelun muuttujien välillä erilaisissa kuormitusolosuhteissa.

AASHO -tiekoe, Ottawa 1958-1960

- eri päällystekerrosrakenteiden käyttäytymisen tutkiminen niiden altistuessa kuormituksille tyypillisessä pohjois-USA:n ilmastossa
- kuusi 7 mailia pitkää kaksikaistaista päällystetietä
- joustava asfaltti- ja jäykkä betonipäällyste, rakennekerrosten paksuus vaihteli
- 126 ajoneuvoa, erilaisia akseliratkaisuja sekä kokonais- ja akselimassoja
- 1 114 000 akselin ylityskertaa 25 kuukaudessa
- riippuvuuksien määrittäminen monimuuttuja-regressio-analyysillä
- tuloksina mm. serveability index, load equivalence factor ja uusia mittausmenetelmiä



Kuva 8. AASHO koetie. Public domain kuva lähteestä The Federal Highway Administration (2020).

Käsite palvelutaso (present serveability) määriteltiin osoittamaan ajoradan pinnan sen hetkellistä kykyä palvella liikennettä, ja ajoradan pinnan suorituskykyä edusti sen palvelutasohistoria yhdessä sen kuormitushistorian kanssa. Erikseen nimetty paneeli arvioi säännöllisesti ajoradan pinnan toiminnallista palvelutasoa subjektiivisesti viisitasoisella luokituksella erittäin huonosta (1) erittäin hyvään (5). Arvioinnit yhdistettiin ajoradan

pinnassa tapahtuviin muutoksiin tien rasitusmäärän kasvaessa tiekokeiden edetessä. Monimuuttuja-regressioanalyysi mahdollisti subjektiivisen palvelutasoluokituksen korrelaation päällysteessä havaitun ja mitatun tien rakenteen vaurioitumisen kanssa. Korrelaation perusteella muodostettiin kaava tien palvelutasoindeksille, joka AASHO-tiekokeessa joustavalle päällysteelle oli

$$p = 5,03 - 1,91 \log(1 - SV) - 0,01\sqrt{C + P} - 1,38RD^2, \quad (10)$$

missä p on hetkellinen palvelutasoindeksi, SV on ajoradan pituussuuntainen kaltevuus, C on halkeilleen päällysteen pinta-ala, P on paikkausten pinta-ala ja RD on urasyvyys ajolinjalla.

Edellä olevan kaavan avulla voidaan tarkastella tierakenteen vaurioitumisen päätyyppejä ja niiden painoarvoa määritettäessä hetkellistä tien palvelutasoon (Highway Research Board, 1962a, 1962b).

Myöhemmin AASHO-tiekoetta vastaavanlaisia mutta pienempimuotoisia kokeita on tehty eri puolilla maailmaa. Pohjoismaissa 1970-luvulla tehtyjen kokeiden perusteella täällä routanousun ja lämpötilamuutosten aiheuttamien halkeamien painoarvo tien palvelutasoon on suurempi kuin AASHO-tiekokeiden perusteella (Ehrola, 1996). Suomessa koko tierakenteen kunnan heikkenemistä kutsutaan tierakenteen rappeutumiseksi. Rappeutuminen näkyy tien käyttäjälle tien pinnan pituus- ja poikittaissuuntaisena epätasaisuutena sekä halkeiluna (RIL, 2006).

Ekvivalentti- eli vastaavuuskerroin ja ”neljännen potenssin” sääntö

Yksi merkittävä tulos AASHO-tiekokeissa oli korrelaatio kuormittavien ajoneuvojen akselipainojen ja tien vaurioitumisen välillä.

AASHO-tiekokeiden perusteella vastaavuuskerroin määriteltiin muodossa

$$E = \frac{N_{st}}{N_x}, \quad (11)$$

missä E on akselikuormituksen ekvivalenttikerroin (vastaavuuskerroin), N_{st} on standardiakselien määrä (aiheuttaa tien vaurioitumisen samalle tasolle kuin N_x) ja N_x on tarkasteltavien akselikuormien määrä, joka aiheuttaa tien vaurioitumisen alimmalle hyväksyttävälle tasolle.

Liikennesäätövaikutuksen vaikutus tien palvelutasoon vaihtelee ajoneuvotyypeittäin. Vaihtelua aiheuttavat mm. ajoneuvojen kokonaispaino, akselien lukumäärä, tyyppi ja akselipainot (myös pyöräpainot), rengastyypit ja rengaspaineet sekä jousitus. Jotta liikenteen tielle

aiheuttamaa rasitusta voidaan ennustaa, pitää erityyppisten ajoneuvojen liikennesäätösäädöksiä saada vertailukelpoiseksi. Siksi liikennesäätösäädöstä kuvataan kuormituskertaluvulla (KKL). Kuormituskertaluvun määrittämissäytälöt sisältävät vastaavuus- eli ekvivalenttikertoimet (ESAL), millä otetaan huomioon ajoneuvotyypin vaihtelu. Suomessa ajoneuvotyypin akselikuormat on suhteutettu standardiakselien (100 kN per yksittäinen paripyöräakseli) ylitysten lukumäärään.

Suomessa käytetään vastaavuuskertoimen laskemisessa ”neljännen potenssin” sääntöä. Sen mukaan akselikuorman tietä rasittava vaikutus kasvaa verrannollisena neljänteen potenssiin. Eksponenttina käytetty arvo 4 on AASHO-tierakokeen perusteella määritettyä keskimääräistä arvoa, jossa erilaiset tierakenteen vauriot ovat mukana yhteisarvona.

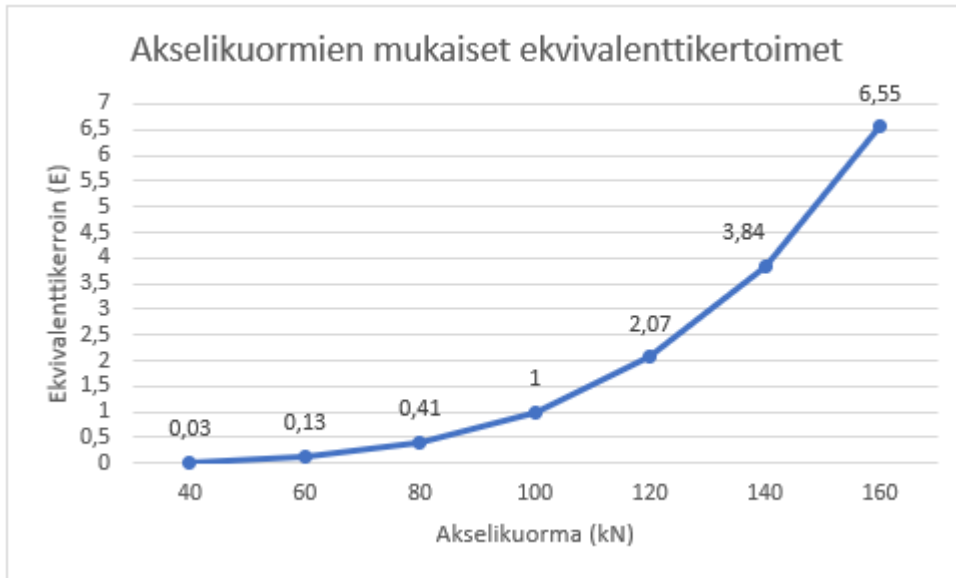
Todellisuudessa eksponentin vaihteluväli on suuri. Maailmalla suoritetuissa tiekokeissa on saatu eksponentille arvoja välillä 2-10. Tutkimusten mukaan päällystekerroksen väsymisturmeltumisen osalta eksponentin arvo on noin 2 ja sitomattomien kerrosten deformaationturmeltumisen eli tien pysyvien muodonmuutosten osalta eksponentin arvo on noin 5. Väsymisturmeltumisen katsotaan soveltuvan paremmin paksupäällysteisille teille ja pysyvien muodonmuutosten aiheuttaman turmeltumisen ohut- ja heikkorakenteisille teille (Ehrola, 1996).

Neljännen potenssin kaava on

$$E = \left(\frac{P_x}{P_{st}} \right)^4, \quad (12)$$

missä E on akselikuormituksen ekvivalenttikerroin, P_x on tarkasteltava akselikuorma ja P_{st} on standardi akselikuorma paripyörälle.

Akselikuormien ekvivalenttiarvot määräytyvät kuvan 9 mukaisesti.



Kuva 9. Akselikuormat ja niitä vastaavat ekvivalenttiarvot.

Neljännän potenssin laskukaavan perusteella henkilöauton akselikuormien rasitusvaikutukset ovat merkityksettömän pieniä verrattuna raskaan liikenteen akselikuormiin. Tästä syystä kuormituskertaluvun laskennassa otetaan huomioon vain raskas liikenne.

Ajoneuvon akselin tierasitukseen vaikuttavat akselikuorman lisäksi akselirakenne, rengastyypit, renkaiden ilmanpaine, dynaamiset kuormitukset ja kuorman jakautuminen akseleille ja renkailla. Nämä tekijät voidaan ottaa huomioon korjauskertoimilla (Ehrola, 1996).

Vuosien 2013-2014 Liikenneviraston akselimassatutkimuksessa (Toikka & Virtala, 2015) selvitettiin raskaan ajoneuvoliikenteen keskimääräisiä akseli-, teli- ja kokonaispainoja sekä niiden jakaumia. Tutkimuksessa mitattiin 2372 ajoneuvon akselimassat ja akselivälit. Lisäksi selvitettiin ajoneuvojen rengastyypit, jousitus, kuormausaste ja tavaralaji. Tulosten perusteella päivitettiin Suomen ajoneuvotyyppikohtaiset kuormituskertalukukertoimet.

Ajoneuvojen kuormitusvastaavuudet laskettiin kaavalla

$$KK = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_N} \right)^X, \quad (13)$$

missä KK on ajoneuvon kuormitusvastaavuus, P_i on tarkastelussa olevan ajoneuvon akselipaino tai telipaino, P_N on referenssipaino ja X on väsymissuoran kulmakerroin (= 4).

Lisää raskaan liikenteen kaluston kehityksestä Suomessa ja sen vaikutuksesta tiestöön käsitellään myöhemmin esimerkeissä.

Tien rakennemateriaalien käyttäytymismalleja

Tierakenteen ja kuormitusten välisessä vuorovaikutuksessa tiehen aiheutuu jännityksiä, jotka puolestaan saavat aikaan muodonmuutoksia. Tierakenteen toiminnan kannalta on keskeistä, miten tierakenteen materiaalit ja tierakenne kokonaisuutena toimii kuormitettuna, eli minkälaisia jännityksiä ja muodonmuutoksia kuormitus aiheuttaa ja miten rakenne sekä materiaalit kestävät niitä. Tämä puolestaan riippuu siitä, minkälaisia ja -suuruisia jännitykset ovat sekä minkälaisia tierakenteen materiaalit ja itse tierakenne ovat ominaisuuksiltaan.

Erilaisia lähestymistapoja tierakenteen ja sen materiaalien jännitys-muodonmuutos-käyttäytymisen tarkasteluun ovat mm. kokemusperäinen sekä kokeellisanalyttinen tarkastelutapa.

Kokemusperäisen lähestymistavan taustalla on erilaisista rakenteista, materiaaleista ja niiden toiminnasta saadut kokemukset ja siten tieto siitä, kuinka kyseiset rakenteet ja materiaalit käyttäytyvät erisuuruisilla liikennemäärillä. Kertyneiden kokemusten ja tiedon avulla on edelleen kehitetty kokemusperäisiä suunnittelumenetelmiä rakenteiden mitoittamiseksi.

Analyttisessä lähestymistavassa rakenteen käyttäytymistä tutkitaan kuormitusten aiheuttamien jännitysten, muodonmuutosten ja taipumien avulla. Kuormituksen aiheuttamien vasteiden analyttinen määrittäminen edellyttää materiaaleihin vaikuttavien jännitysten ja niiden aiheuttamien muodonmuutosten välisten yhteyksien määrittämistä. Näitä yhteyksiä voidaan kuvata **materiaalimalleilla**.

Tyypillisimpiä joustavien tierakenteiden analysoinnissa käytettyjä materiaalimalleja ovat lineaarisesti elastiset, epälineaarisesti elastiset sekä viskoelastiset. Seuraavissa kappaleissa esitellään mallien käyttäytymisen teoriaa selittävät Hooken ja Newtonin lait sekä viskoelastista käyttäytymistä havainnollistava Burgersin malli.

Hooken laki, Youngin moduuli ja Poissonin suhde

Sir Thomas Young (1773-1829) oli englantilainen yleisnero, joka tunnetaan parhaiten työstään optiikan alalla. Hän mm. huomasi valon taipuvan kaksoisraossa, mikä oli todiste valon aaltoluonteesta. Youngin nimi esiintyy kimmokertoimessa, jota kutsutaan myös Youngin moduuliksi, vaikka käsitteen oli jo vuonna 1727 ottanut käyttöön Leonhard Euler.



Kuva 10. Thomas Young. G. R. Wardin (1855) teos Sir T. Lawrencen pohjalta. Public domain kuva: Wellcome Collection.

Siméon Denis Poisson (1781-1842) oli ranskalainen tiedemies, matemaatikko ja fyysikko, joka keksi Poisson-jakauman. Poisson tutki myös kiinteiden aineiden kimmoisuutta, ja hänen mukaansa on nimetty materiaalien kimmoisuuteen liittyvä Poissonin suhde.



Kuva 11. Siméon Denis Poisson. Anonyymin (n.d.) taitelijan litograafi. Public domain kuva: Wellcome Collection.

Hooken laki

Hooken laki on fysiikan laki, joka on nimetty 1600-luvun brittiläisen fyysikon Robert Hooken (1635-1703) mukaan. Hooken lain mukaan voima F , joka tarvitaan jousen venymään jollakin etäisyydellä x , skaalautuu lineaarisesti suhteessa tähän etäisyyteen muodossa

$$F = kx, \quad (14)$$

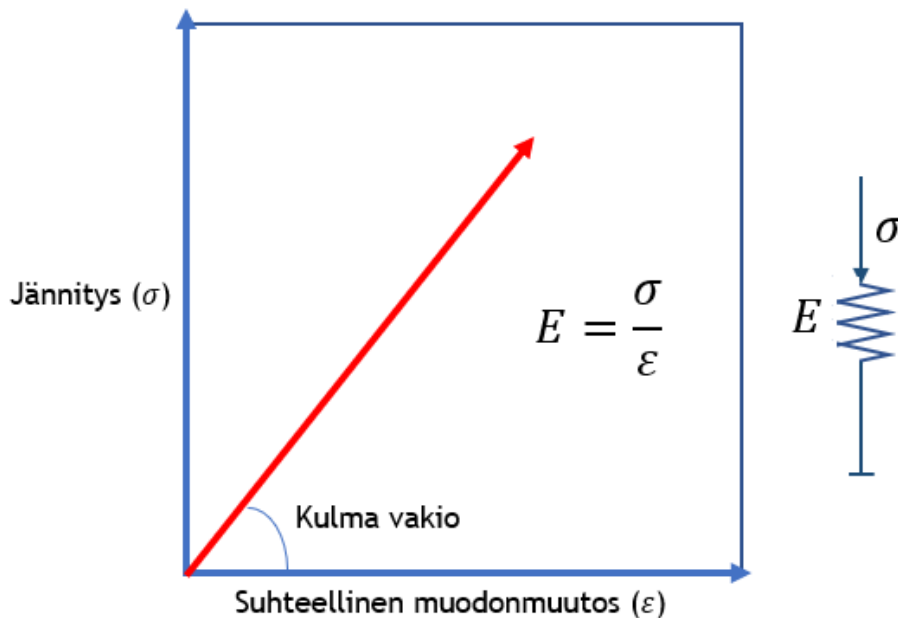
missä F on voima, k on jousivakio (jousen jäykkyys), ja x on jousen pituuden erotus tasapainotilanteestaan.

Materiaaliopissa laki esitetään yleensä muodossa

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \frac{\Delta l}{l} = E\varepsilon, \quad (15)$$

missä σ on jännitys, F on kappaletta venyttävä tai puristava voima, A on kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala ennen voiman vaikutusta, Δl on kappaleen pituuden muutos, l on kappaleen alkuperäinen pituus, ε on kappaleen muodonmuutos ja E on kimmokerroin, kimmomoduuli tai Youngin moduuli, joka on kiinteän aineen jäykkyyttä kuvaava fysikaalinen suure.

Hooken yhtälö pätee (jossain määrin) monissa tilanteissa, joissa elastinen kappale muuttaa muotoaan. Hooken yhtälön mukaisesti käyttäytyvän joustavan kappaleen tai materiaalin sanotaan olevan lineaarisesti elastinen kuvan 12 mukaisesti.



Kuva 12. Lineaarisesti elastinen kappale. Kuva muokattu lähteestä Ehrola (1996).

Hooken laki ei päde, kun voimat ylittävät tietyn rajan (saavutetaan plastinen alue), koska mitään materiaalia ei voida puristaa tietyn vähimmäiskoon ylitse tai venyttää maksimikokoa suuremmaksi ilman pysyvää muodonmuutosta. Monet materiaalit poikkeavat huomattavasti Hooken laista paljon ennen kuin nämä rajat saavutetaan.

Hooken laki on yleistetty myöhemmin koskemaan myös monimutkaisempia kaksi- ja kolmiulotteisia jännitys/venymätilanteita. Yleistetyssä Hooken laissa käsitellään vektoreita jännitys- ja venymäskalaarien sijaan.

Poissonin suhde

Poissonin luku kuvaa kuormituksen aiheuttaman muodonmuutoksen suhdetta kuormitusta vastaan kohtisuoraan tapahtuvaan muodonmuutokseen. Luvun arvo vaihtelee välillä 0-0.5. Tierakenteille käytetään yleensä lukua 0.35 (Belt ym., 2002).

Newtonin laki

Isaac Newton (1642-1726) oli englantilainen fyysikko, matemaatikko, tähtitieteilijä, alkemisti ja filosofi. Newton loi perustan klassiselle mekaniikalle teoksessaan *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* vuonna 1687. *Principiassa* Newton esitteli painovoima- ja liikelakinsa. Newtonia pidetään Gottfried Leibnizin ohella differentiaali- ja integraalilaskennan keksijänä.



Kuva 13. Sir Isaac Newton. T. O. Barlowin teos (1868) pohjautuen Sir G. Knellerin teokseen. Public domain kuva: Wellcome Collection.

Newtonin teorian mukaan leikkausvoiman kohdistuessa kiinteään kappaleeseen kappaleen muoto muuttuu, kunnes muodonmuutos aiheuttaa leikkaavalle voimalle yhtä suuren vastakkaisen voiman. Tällöin saavutetaan tasapainotila. Jos leikkaava voima kohdistetaan nesteeseen, neste jatkaa virtaamista niin kauan kuin kyseistä voimaa kohdistetaan nesteeseen, neste jatkaa virtaamista niin kauan kuin kyseistä voimaa kohdistetaan nesteeseen. Kun ulkoisen voiman vaikutus lakkaa, nesteen virtaus pysähtyy normaalisti sen sisäisen kitkan vuoksi. Mitä suurempi nesteen viskositeetti on, sitä

suurempi on sen vastustus leikkaavaa voimaa vastaan ja sitä nopeammin nesteen virtaus pysähtyy.

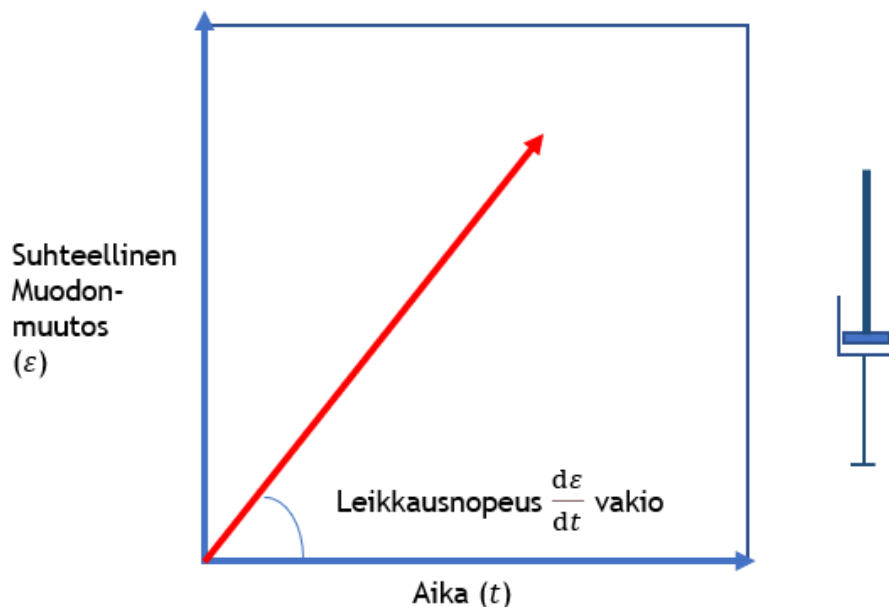
Yleisesti ottaen kaikäntyyppisissä virtauksissa nesteen kerrokset virtaavat eri nopeuksilla ja nesteen "paksuus" syntyy eri kerrosten välillä vaikuttavista leikkausvoimista. Loppujen lopuksi nämä voimat yhteenlaskettuina vastustavat ulkopuolista voimaa.

Isaac Newton esitti, että suoralle, samansuuntaiselle ja yhtenäiselle virtaukselle virtauskerrosten välillä vaikuttava leikkausvoima on suoraan verrannollinen virtauskerroksia vastaan kohtisuorassa vaikuttavaan nopeusgradienttiin muodossa

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (16)$$

missä τ on leikkausvoima, μ on viskoosikerroin (viskositeetti) ja $\frac{\partial u}{\partial y}$ on nopeusgradientti.

Monet nesteet kuten vesi ja useimmat kaasut täyttävät Newtonin ehdon, ja ne tunnetaankin Newtonilaisina nesteinä eli lineaarisina nesteinä kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14. Viskoosinen Newtonlainen neste. Kuva muokattu lähteistä Ehrola (1996) ja Lehtipuu (1983).

Ei-newtonilaisessa nesteessä puolestaan esiintyy leikkaavan voiman ja nopeusgradientin välillä monimutkaisempi suhde kuin yksinkertainen lineaarinen riippuvuus.

Bitumilla sidotun materiaalin käyttäytyminen ja Burgersin malli

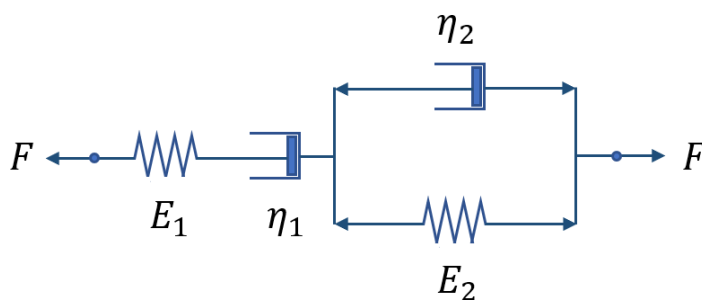
Johannes (Jan) Martinus Burgers (1895-1981) oli hollantilainen fyysikko. Hän on Burgersin yhtälön sekä Burgersin viskoelastisen materiaalin isä.

Asfalttimastiksi, joka on bitumin ja täyteaineen sekoitus, on asfalttibetonin tärkein osa. Se vaikuttaa sekä karkeiden partikkelien väliseen koheesioon ja sitä kautta tiekerroksen kantavuuteen, päällyskerroksen lujuuteen ja jäykkyyteen.

Bitumilla on sekä viskooseja että elastisia ominaisuuksia, eli se on viskoelastinen aine. Viskoelastisuus tarkoittaa sitä, että bitumin ominaisuudet, myös jännitysmuodonmuutokäyttäytyminen, ovat riippuvaisia sekä lämpötilasta että kuormitusajasta.

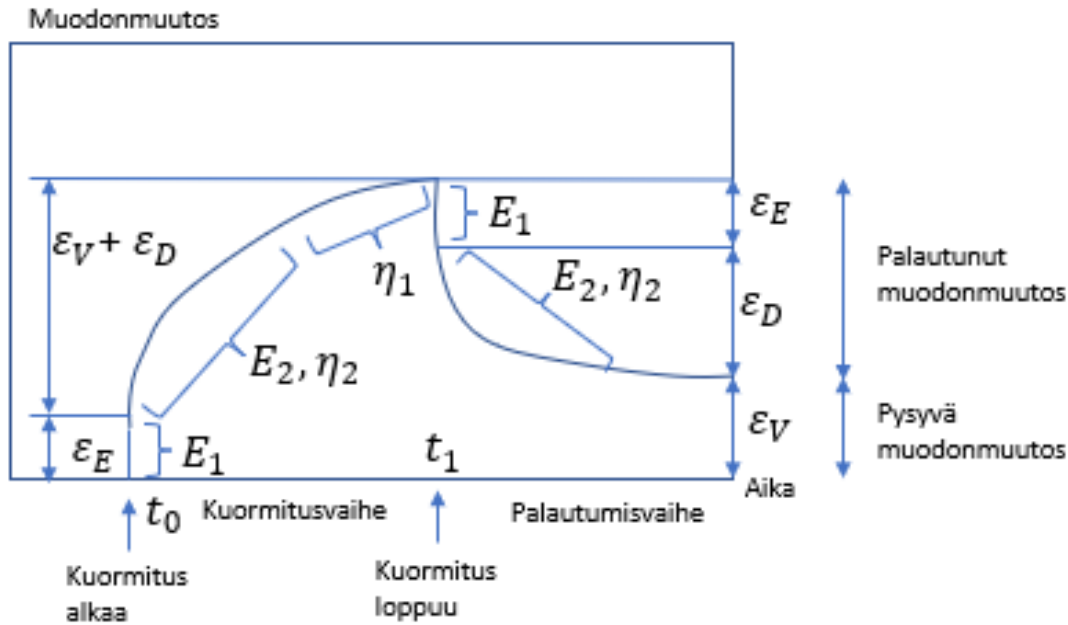
Side- ja asfalttiseosten ominaisuuksia voidaan tutkia lineaarisissa viskoelastisissa olosuhteissa. Kuormitus-palautus-testi (creep-recovery test) soveltuu asfalttimastiksin viskoelastisten ominaisuuksien analysointiin. Yksi yleisimmistä malleista, joka kuvaa viskoelastisen järjestelmän muodonmuutosta kuormituksen ja kuormituksen purkamisen (palautumisen) aikana, on neljän parametrin Burgersin malli.

Burgersin-mallista on olemassa useampia variaatioita, joista yleisimmät ovat Maxwellin ja Kelvinin järjestelmät. Tässä esitettävä Kelvinin järjestelmä koostuu neljästä mekaanisesta komponentista, jotka esitetään kuvassa 15.



Kuva 15. Kelvinin järjestelmävariaatio Burgersin mallista.

Komponenteista kaksi on jousielementtiä (E_1 ja E_2), jotka toimivat Hooken-periaatteen mukaisesti ja kaksi kaasuvaimenninta (η_1 ja η_2), jotka noudattavat Newtonin periaatetta kuvan 16 mukaisesti ensi kuormitusvaiheessa ja sitten palautumisvaiheessa.

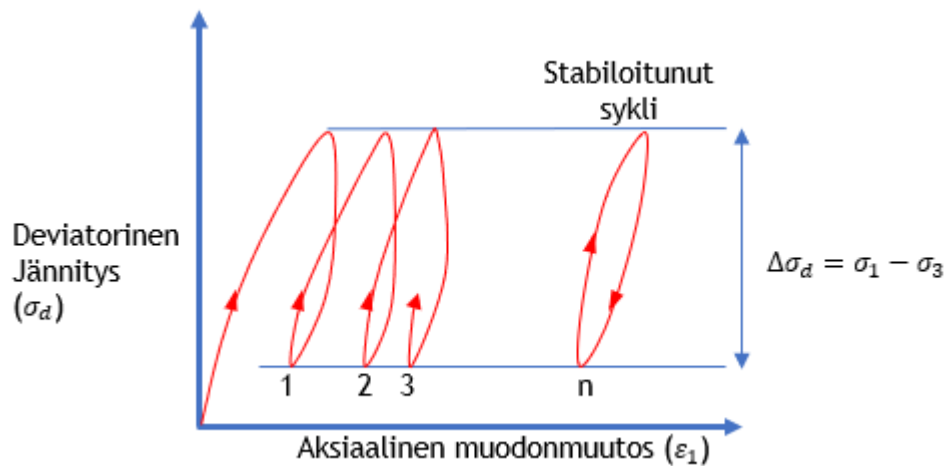


Kuva 16. Burgersin mallin muodonmuutokset kuormitus ja palautumisvaiheissa. Kuvassa ϵ_E on elastinen (välitön) muodonmuutos, ϵ_V on viskoosinen muodonmuutos ja ϵ_D on myöhästynyt elastinen eli viskoelastinen muodonmuutos. Kuva muokattu lähteestä Ehrola (1996).

Sitomattoman materiaalin käyttäytyminen

Toistuva liikennekuormitus aiheuttaa myös tierakenteen sitomattomiin kerroksiin sekä palautuvia että palautumattomia muodonmuutoksia.

Tierakenteen sitomattomille materiaaleille on ominaista, että kuormituskertojen lukumäärän kasvaessa palautumattomien muodonmuutosten osuus vähenee. Kun tien tiettyyn kohtaan on kohdistunut tarpeeksi monta kuormituskertaa, sitomattomien materiaalien jännitys-muodonmuutossykli stabiloituu ja muodonmuutoksesta tulee lähes kokonaan palautuvaa eli materiaalin käyttäytyminen lähestyy elastista käyttäytymistä (kts. kuva 17).

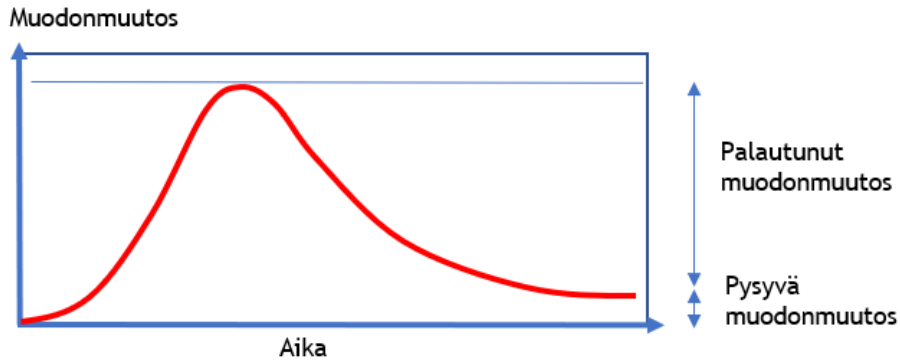


Kuva 17. Tierakenteen sitomattomien materiaalien käyttäytyminen. Kuva muokattu lähteestä Ehrola (1996).

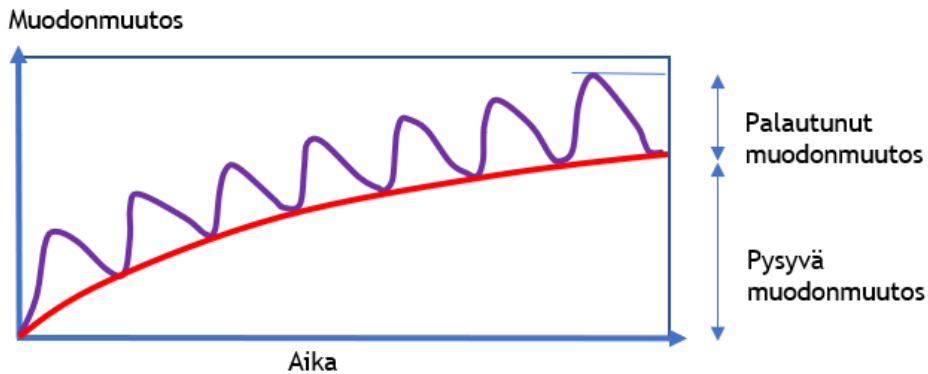
Jännitystason ja materiaalien kimmomoduulin riippuvuuden perusteella sitomattomat materiaalit voidaan jakaa myötölujittuviin ja myötöpehmeneviin materiaaleihin. Karkearakeiset kitkamaalajit ovat myötölujittuvia ja niiden jäykkyys ja vastustus muodonmuutoksiin kasvaa jännitystason kasvaessa. Hienorakeiset koheesiomaalajit ovat taas myötöpehmeneviä ja niiden jäykkyys ja vastustus muodonmuutoksiin pienenee jännitystason kasvaessa. Toistuvien kuormitusten jälkeen vakiintunutta kimmoista kuormituskäyttäytymistä kuvaa jäännös/resilient-moduuli M_r (Ehrola, 1996).

Tierakennusmateriaalien ja koko tierakenteen käyttäytyminen

Useimmilla tienrakennusmateriaaleilla jännityksen ja muodonmuutoksen välinen suhde on epälineaarinen, eli materiaalin kimmomoduuli on jännitystilasta riippuvainen. Toisaalta tienrakennusmateriaalit eivät myöskään ole täysin kimmoisia, vaan niillä on myös plastisia ominaisuuksia. Yksittäisen kuormituskerran aiheuttamista muodonmuutoksista suurin osa on palautuvia, mutta osa jää pysyviksi. Pysyvien muodonmuutosten määrä kasvaa sitä suuremmaksi, mitä useampia kuormituskertoja tiehen kohdistuu (kts. kuvat 18 ja 19).



Kuva 18. Tierakennusmateriaalien kuormitusmuodonmuutoskäyttäytyminen: yksittäisen liikennekuormituksen synnyttämät muodonmuutokset. Kuva muokattu lähteistä Ehrola (1996) ja Brown (1993).



Kuva 19. Tierakennusmateriaalien kuormitusmuodonmuutoskäyttäytyminen: Toistuvan liikennekuormituksen synnyttämät muodonmuutokset. Kuva muokattu lähteistä Ehrola (1996) ja Brown (1993).

Kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmiä

Liikkuvan ajoneuvon kuormituksen vaikutuksia tierakenteissa

Seuraavaksi käydään läpi liikkuvan liikennekuormituksen vaikutuksista ensin kriittiset jännitykset ja pääjännitysten kiertyminen, sitten dynaaminen rasitus, pumppautuminen ja lopuksi peräkkäisten akselien aiheuttama kumulatiivinen rasitus.

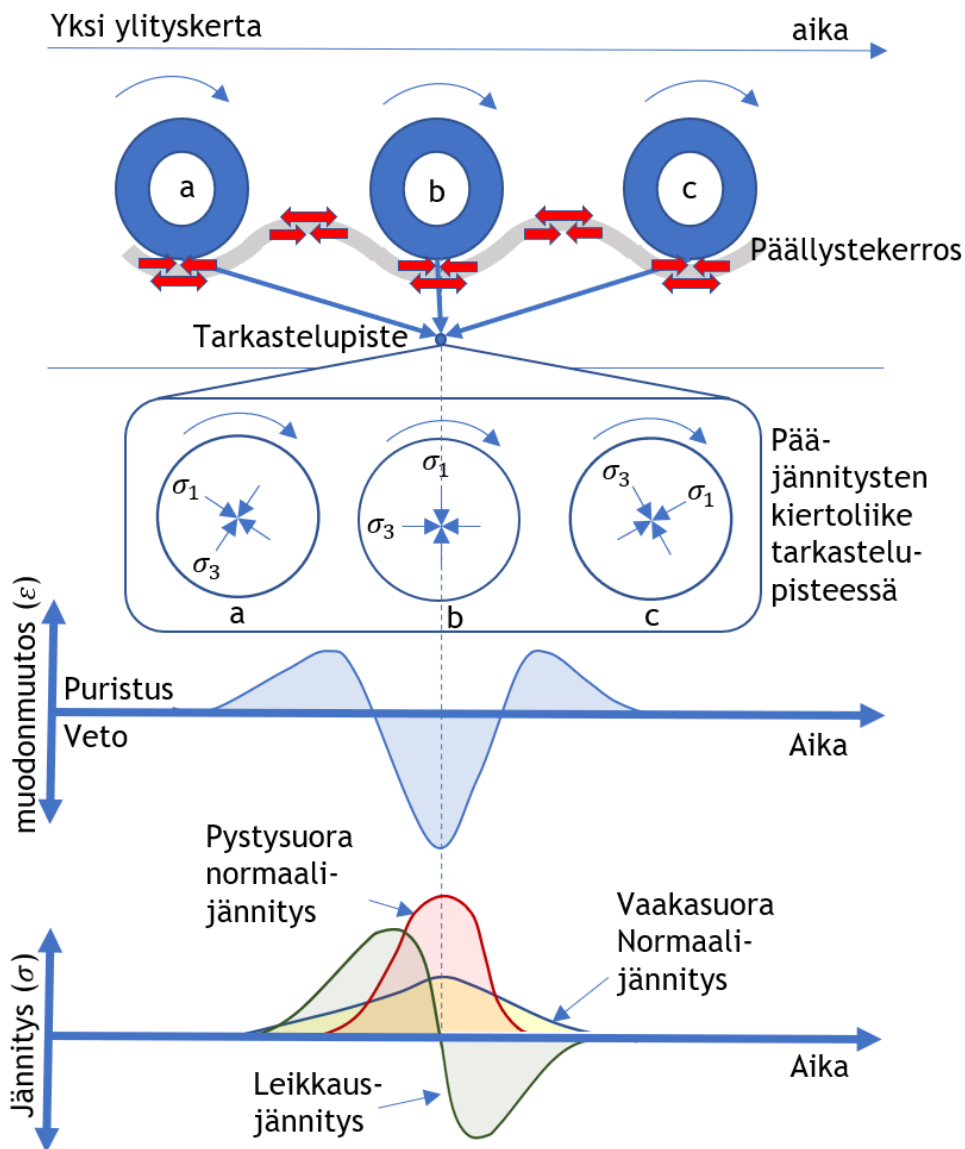
Kriittiset jännitykset ja pääjännitysten kiertyminen

Tavanomaisessa tierakenteessa kuormituskestävyyden kannalta kriittisinä mitoitustekijöinä pidetään yleisesti liikennekuormituksessa sidottujen kerrosten alapintaan muodostuvia vaakatasoisia vetojännityksiä ja -muodonmuutoksia sekä pohjamaan yläpintaan

muodostuvia pystysuuntaisia puristusjännityksiä ja -muodonmuutoksia. Sidotun kerroksen alapintaan kohdistuvat rasitukset ovat yhteydessä saman kerroksen väsymisvaurioitumiseen. pohjamaahan kohdistuvat rasitukset ovat yhteydessä pysyviin muodonmuutoksiin. Päällysteen väsyminen ja halkeilu on kriittinen tekijä paksupäällysteisissä tierakenteissa ja pysyvät muodonmuutokset ohutpäällysteisissä ja päällystämättömissä tierakenteissa (Ehrola, 1996).

Kuvassa 20 näkyy liikkuvan renkaan tarkastelupisteessä aiheuttamat muodonmuutokset ja jännitykset. Jännityksiä ovat vertikaalinen jännitys, horisontaalinen jännitys ja leikkausjännitys sidottujen kerrosten alapinnalla ja jännityksiä ovat sitomattomien kerrosten ja pohjamaan puristus- ja vetojännitykset. Sidottujen kerrosten alapinnassa on puristusjännityksiä pyöräkuormituksen edessä ja takana, kun taas pyöräkuormituksen aikana jännitykset ovat vahvasti vetojännityksiä (ROADEX Network, 2022b).

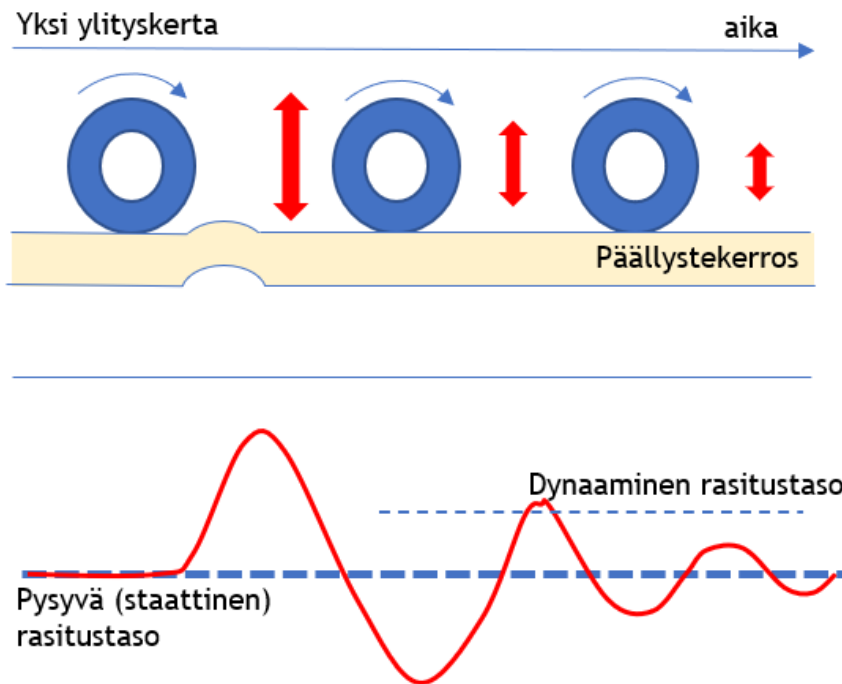
Kuvan mukaisesti pääjännitysten σ_1 ja σ_3 suunta kiertyy ennen pyöräkuormitusta (a), sen aikana (b) ja jälkeen (c). Pääjännitysten kiertymisellä on todettu olevan suuri merkitys tierakenteen pysyvien muodonmuutosten syntymiseen (Ehrola, 1996; Chan & Brown, 1994).



Kuva 20. Liikkuvan renkaan aiheuttamat muodonmuutokset ja jännitykset. Kuva muokattu lähteistä Doré & Zubeck (2008) ja Brown (1978).

Dynaaminen rasitus

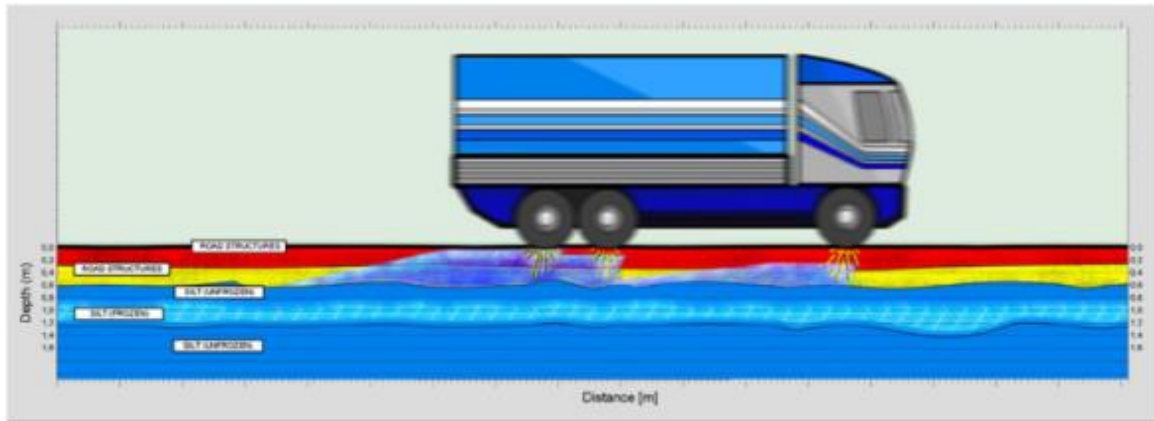
ROADEX Networkin (2022b) mukaan jännitysten ja venymien suuruuteen vaikuttaa myös tien pinnan tasaisuus, koska epätasaiset töyssyt voivat aiheuttaa sysäysmäistä lisäkuormitusta päällysteeseen rekkojen jousituksen vuoksi. Töyssyn jälkeiset jännitykset ja venymät voivat olla merkittävästi korkeampia kuin tasaisella tiellä ja ne nopeuttavat päällysteen vaurioitumista. Kuva 21 esittää töyssyn ylityksestä päällysteeseen aiheutuvaa kuormitusta. Värähtelevä kuormitustaso töyssyn jälkeen voi maksimissaan olla korkeampi kuin teoreettinen kuormitustaso (ROADEX Network, 2022b).



Kuva 21. Dynaaminen rasitus yhden ylityskerran aikana. Kuva muokattu lähteestä Doré & Zubeck (2008).

Pumppautuminen

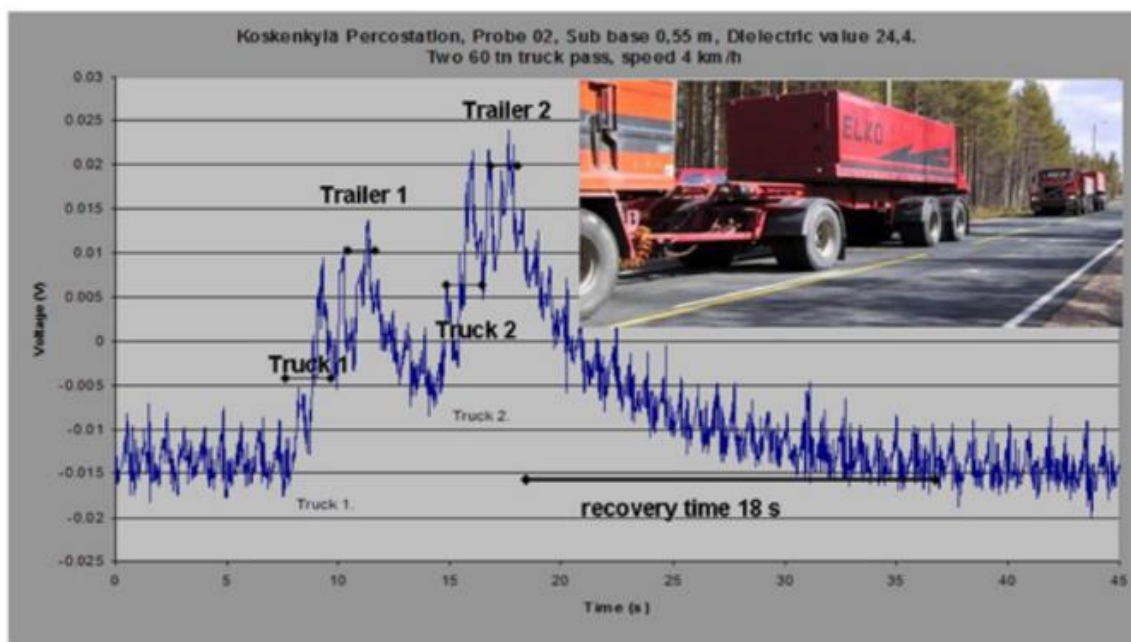
ROADX Networkin (2022c) mukaan pumppautuminen on erityisesti märällä pohjamaalla olevia vähäliikenteisiä ohutrakenteisia teitä koskeva prosessi, joka välillisesti lisää pysyvien muodonmuutosten esiintymistä. Tien rakennekerrokset eivät aina pysty riittävästi jakamaan kuormitusta riittävän laajalle alueelle, mikä nostaa pohjamaahan kohdistuvia jännitystiloja. Raskas liikenne aiheuttaa pohjamaan pintaan kohdistuvia pystysuoria jännityksiä ja leikkausjännityksiä sisältävän jänniteyhdistelmän, jolloin siellä syntyy huokosveden ylipainetta. Jos pohjamaa läpäisee huonosti vettä, huokosvedenpaine voi purkautua ainoastaan pintaa kohti. Toistuva liikennekuormitus aiheuttaa vettä ylös tierakenteisiin puskeva pumppautumisprosessin kuvan 22 mukaisesti.



Kuva 22. Rekan aiheuttama pumppautumisilmiö. Kuva uudelleenjulkaistu luvalla lähteestä ROADEX Network (2022c).

Peräkkäisten akselien aiheuttama kumulatiivinen rasitus

ROADEX Networkin (2022c) mukaan tiemateriaalit ja pohjamaa eivät ole täysin elastisia vaan ne tarvitsevat aikaa palautua raskaan ajoneuvon ylityksen jälkeen. Pohjamaan ollessa heikkoa, kuten silttiä tai turvetta, ja märkää, kuten kelirikkoaikaan, usean perättäisen akselin ylityksen seurauksen rasitus kumuloituu ja rakenteiden vesimolekyylien uudelleenjärjestäytymiseen menee pidempi aika kuin yksittäisen ylityksen jälkeen. Ilmiö on havainnollistettu kuvassa 23, jossa esitetään heikkorakenteisen tien kantavan kerroksen dielektrisyysarvojen muutokset ja palautuminen normaalitasolle kahden rekan peräkkäisen ylityksen yhteydessä.



Kuva 23. Usean akselikuormituksen aiheuttama kumulatiivinen tierasitus. Kuva uudelleenjulkaistu luvalla lähteestä ROADEx Network (2022c).

Kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmiä

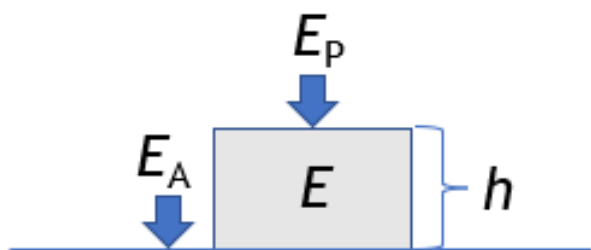
Kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmät voidaan monella tavalla. Tässä kirjassessa jako suoritetaan empiirisiin eli kokemusperäisiin ja analyttisiin menetelmiin sekä näiden yhdistelmiin. Kokemusperäisistä menetelmistä yksi esimerkki on AASHO-tiekokeisiin perustuva AASHO-mitointimenetelmä, jota tosin ei kuvata tässä kirjassessa. Teoreettisia menetelmiä on mm. Odemarkin menetelmä, monikerroslaskentamenetelmät sekä erilaiset elementtimenetelmät (Järvinen, 1991; Kanerva, 2011). Yhdistelmämenetelmät ovat puolikokeellisia menetelmiä, jotka pohjautuvat osittain kokemusperäisen menetelmän kokeisiin ja osittain analyttisen menetelmän kimmo- ja viskoelastisuusteoriaan. Vuoden 2004 tierakenteen suunnitteluohjeissa kuvattu kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmä on tällainen yhdistelmä. Suomessa kuormituskestävyyden mitoituksessa tehdään aina erillinen routamitointi, joten ulkomaiset mitoitusmenetelmät, kuten AASHO, eivät sellaisenaan sovellu hyödynnettäväksi Suomen olosuhteissa (Ylitalo, 2020). Mekanistisesta monikerroslaskentaan perustuvasta menetelmästä luovuttiin vuoden 2018 tierakenteen suunnitteluohjeissa. Elementtimenetelmää on Suomessa käytetty tavanomaisten tierakenteiden mitoitukseen lähinnä tutkimusmielessä. Yhteistä kaikille kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmille on laskemiseen tarvittavat lähtöarvot, joita ovat tieto liikennekuormasta sekä alus- ja päällysrakenteen materiaaliominaisuuksista.

Tasoitekantavuusmenetelmä – Odemarkin mitoitusyhtälö

Sven Nils Odemark (1899-1989) oli ruotsalainen maa- ja vesirakennusinsinööri, joka oli erikoistunut tietekniikkaan. Odemarkia pidetään yleisesti tietekniikan elastisuusteorian tuojana.

Nils Odemark tutki 1940-luvulla joustavien ja jäykkien tienylitysrakennusten kimmoisuutta sekä kitkamateriaaleilla (lähinnä hiekalla) että koheesiomateriaaleilla kuten savella. Odemark totesi, että maa-ainekset käyttäytyivät toistuvan lastin purkamisen ja purkamisen jälkeen pääosin elastisesti, elleivät ne ylikuormitu. Tieainesten kimmoisuutta koskevien tutkimustensa perusteella hän kehitti 1949 teorian tienylirakennusten mitoituslaskennasta.

Tavoitekantavuusmenetelmänä käytetään iteratiivista kantavuusmitoitus-menetelmää, joka pohjautuu Odemarkin 2-kerrosteoriaan (kts. kuva 24). Analyyttinen Odemarkin mitoitusyhtälö perustuu kimmoteoriaan ja elastiseen puoliavaruuteen. Menetelmässä kerrokset yhdistetään laskennallisesti alhaalta ylöspäin yhdeksi kerrokseksi, jonka kimmoiset ominaisuudet ovat samat kuin yhdistettyjen kerrosten yhteiset ominaisuudet. Menetelmässä mitoitusyhtälön kantavuuksia verrataan kokemusperäisesti riittävästi todennettuun päällysrakenneluokan tavoitekantavuuteen, jonka tiedot löytyvät Väyläviraston suunnitteluohjeista, samoin kuin eri materiaalien moduulit. Menetelmää käytetään Suomessa yleisesti sekä teiden että katujen kuormituskestävyyden mitoittamisessa.



Kuva 24. Odemarkin kaavan parametrit. Kuva muokattu lähteestä Ehrola (1996).

Odemarkin kaava on

$$E_P = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+0,81\left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1+0,81\left(\frac{h}{a}\right)^2} \left(\frac{E_A}{E}\right)^{\frac{2}{3}}}}, \quad (17)$$

missä E_p on mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus, E_A on mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus, h on mitoitettavan kerroksen paksuus, E on mitoitettavassa kerroksessa käytettävän materiaalin E -moduuli ja a on levykuormituslaitteen kuormituspinnan säde (= 0.15 m).

Lisäehto 1: Sitomattoman kerrokset $E \leq 6E_A$, jotta kerrosten väliin ei jää epäjatkokokohtaa.

Lisäehto 2: Bitumilla sidotut kerrokset lasketaan yhtenä kerroksena, jonka moduuliksi otetaan kerrosten moduulien paksuuksilla painotettu keskiarvo (Tiehallinto, 2004a).

Ideaalisessa tierakenteessa päällysrakennekerrosten moduulien pitäisi pienentyä ylhäältä alaspäin mentäessä. Tämä siksi, että lähellä pintaa oleviin materiaaleihin aiheutuu pyöräkuormituksen alla suurimmat jännitykset. Jäykemmät materiaalit levittävät kuormitusta laajemmalle alapuolella oleviin kerroksiin. Tämä puolestaan pienentää alempien kerrosten jännityksiä ja venymiä ja näin mahdollistaa heikompilaatuisten materiaalien käytön. Kahden kerroksen moduuliarvojen välinen suhde ei saisi kuitenkaan olla liian suuri, koska tällöin ylemmän kerroksen alapinnalle voi muodostua suuria vaakasuuntaisia jännityksiä (ROADDEX Network, 2022b).

Menetelmän etuna on sen yksinkertaisuus ja nopeus, se on luotettava rakenteen paksuuden määrittämisessä, mutta menetelmän heikkoutena on erityyppisten sidottujen kerrosten vertailun puutteellisuus. Menetelmä perustuu iteratiiviseen tien kokonaisjäykkyuden määrittämiseen eikä ota huomioon rakenteisiin liikennekuormituksen seurauksena aiheutuvia jännityksiä ja venymiä.

Monikerroslaskentaan perustuvia menetelmiä

BISAR

BISAR (Bitumen Stress Analysis in Roads) on Hollantilaisen Shell-yhtiön kehittämä analyyttinen tierakenteiden suunnitteluun käytettävä ohjelmisto.

Lähtökohtaisesti BISAR mitoitusohjelmassa oletetaan mm., että 1) mitoitettava rakenne koostuu isotrooppisista, homogeenisista, vaakasuunnassa äärettömistä kerroksista (joita on maksimissaan 10 kappaletta), 2) kerrokset käyttäytyvät lineaarielastisen käyttäytymismallin mukaisesti, 3) liikennekuormitusta pidetään tasaisesti jakautuneena ympyränmuotoisena kuormituksena, 4) Poisson-luku oletetaan vakioksi rakennekerroksissa.

Ohjelmalla arvioidaan rakenteen kuormituskestävyys laskemalla jännitysten ja venymien arvot ja suunnat eri rakennekerroksissa ja niiden rajapinnoissa.

Tierakenteesta tarvitaan lähtötietoina 1) rakennekerrosten lukumäärä ja paksuudet 2) materiaalien moduuliarvot ja Poisson luvut 3) rajapintojen välillä tapahtuvat muodonmuutokset/liukupinnat 4) kuormitusten määrä ja sijainti 5) kuormituksen määrittäminen käyttäen kahta tietoa kolmesta: pyöräkuorma, kosketuspaine ja kosketuspinnan säde.

Mallintamisessa määritellään aluksi kuormitukset, jonka jälkeen syötetään rakennekerrosten paksuudet, Poisson luvut ja moduuliarvot. Sitomattomien materiaalien osalta moduuliluku on jäykkyys/resilient-moduuli (M_r) joka voidaan määrittää mm. laboratoriossa sykliisellä kolmiaksaalikokeella tai tarkentamalla laskentakierrosten jälkeen iteroimalla.

Mallintamalla saadaan parempia tuloksia suuremmilla päällystepaksuuksilla ja kovemmilla päällystelaaduilla. Heikkorakenteisilla teillä sitä vastoin päällysteen osuus kuormituskestävyydestä on lähes olematon. Samoin analyyseissä käytettävät väsymissuorat ovat käyttökelpoisia vasta kun tien liikennemäärät ovat tarpeeksi isoja.

Esimerkiksi tässä kirjassessa esimerkeissä esiteltävän ROADEX demolaskurin perustana on BISAR ohjelmalla tehtyjä laskelmia, jotka edustavat vähäliikenteisiä ja heikosti rakennettuja teitä.

APAS

Mekanistinen menetelmä pohjautuu liikennekuormituksen (KKL) aiheuttamiin kriittisiin rasituksiin ja siinä kuormituskestävyys määriteltiin tien rakenteeseen syntyvien muodonmuutosten ja vaurioitumismallien perusteella. Mallien perusteella pystytään muodostamaan väsymis- ja deformaatio-suorat.

Kuormituskestävyyden laskenta tapahtuu monikerroslaskentaohjelmilla (esim. Neste Oy:n vuonna 1994 julkaisema APAS, jonka viimeisen version 3.0 VTT julkaisi vuonna 2004). APASin käyttöön liittyy ongelmia, joita mitoituksessa ei voi täysin ottaa huomioon (Lehtonen, 2009). Tästä johtuen menetelmän katsotaan soveltuvan parhaiten paksupäällysteisille rakennetyypeille (yli 120 mm), mutta sen ei katsota soveltuvan väsymistarkasteluissa alle 80 mm päällysteillä.

APAS on päällysrakenteen suunnittelujärjestelmä, joka perustuu monikerroslaskentaan sekä kestoikä-funktioihin. APAS laskee liikennekuormituksesta rakenteeseen aiheutuvat veto- ja puristusjännitykset mekanistisen mallin avulla. Mitoituksessa tierakenteen kriittiset muodonmuutokset ovat sidotun kerroksen alapinnassa tapahtuva vetomuodonmuutos sekä pohjamaan yläpinnan puristusmuodonmuutos. Ohjelmaan on tallennettu Liikenneviraston hyväksymät materiaalien E-moduulit ja kestoikäfunktiot. Kestoikäfunktiot ovat kokemusperäisesti tai laboratoriokokein määritettyjä malleja, jotka

määrittävät erityyppisille materiaaleille veto- tai puristusmuodonmuutosta vastaavan sallitun kuormituskertaluvun (Tiehallinto, 2004b, 2005).

Lähtökohtaisesti APAS mitoitusohjelmassa oletetaan, että 1) mitoitettava rakenne koostuu tasapaksuista, homogeenisista, vaakasuunnassa äärettömistä kerroksista, 2) kerrokset käyttäytyvät lineaarisen kimmoteorian mukaisesti, 3) pohjamaa on ääretön vaaka- ja pystysuunnassa, 4) rakenteet oletetaan isotrooppiseksi ja 5) rakenteiden omaa painoa ei oteta huomioon.

Ohjelman moduulit ja kestoikä-funktiot ovat sovitettuja niin, että rakenteiden paremmuusjärjestys vastaa kenttähavaintoja sekä rakenteiden mitoitusikä on sama kuin Odemarkin yhtälöllä mitoitettujen rakenteiden (Lehtonen, 2009).

Elementtimenetelmät

Numeerisiin analyyseihin perustuvat teoreettiset mitoitusmallit kuten FEM (Finite Element Method) -mallit ovat mekanistisia menetelmiä. FEM-malleja käytetään nykyisin normaalien tierakenteiden yhteydessä vain tutkinnallisista syistä. Tämä johtuu mm. siitä, ettei vielä ole pystytty luomaan sellaista kestävyysmallia, jonka avulla tierakenteen vasteet voidaan muuttaa arvioiksi tierakenteen kuormituskestävyydestä. Toisaalta iteroimalla pystytään tarkastelemaan mitä tahansa kohtaa tierakenteesta. Menetelmän yksi etu on mahdollisuus erilaisten materiaalimallien tarkasteluun.

Ylitalon (2020) mukaan FEM on iteratiivinen laskentamalli, jossa numeerisesti lasketaan elementtien solmupisteissä tapahtuvia siirtymiä, jännityksiä ja kiertymiä. Tarkempi tuloksia saadaan lisäämällä elementtien määrää, mutta toisaalta laskentaan käytetty aika kasvaa. Nykyisillä laitteistoilla pystytään analysoimaan myös tierakenteiden kuormituskestävyyttä. FEM mallinnuksen vaiheita ovat 1) rakenteen jakaminen elementteihin ja niitä yhdistäviin solmupisteisiin, 2) elementtien jäykkyysuhteiden määrittäminen matriisimuodossa. elementin geometria ja materiaaliominaisuudet pitää tässä huomioida. Samoin oletus elementin siirtymäfunktiosta, jonka pitäisi vastata likimain todellisia muodonmuutoksia, 3) elementtien kokoaminen yhdeksi mallia kuvaavaksi jäykkyysmatriisiksi, 4) solupisteiden siirtymien ratkaiseminen ja 5) jännitysten ja muodonmuutosten määrittäminen. Lopullinen jännitysten ja muodonmuutosten määrittäminen riippuu käytettävistä materiaalimalleista.

Mansikkamäen (2009) ja Ylitalon (2020) mukaan elementtimenetelmä etuja ovat mm. 1) vaikeiden geometrinen mallien käsittely, 2) monimutkaiset analyysit epälineaarisesti ja dynaamisesti käyttäytyvistä materiaaleista, 3) monimutkaisten aikariippuvaisten kuormitusten käsittely, 4) rakenteen ei tarvitse olla staattisesti määrätty, 5)

anisotrooppisuuden huomioiminen eri elementtien eri materiaaliominaisuuksilla ja 6) visuaalisten animaatioiden tarkastelumahdollisuus.

PLAXIS

PLAXIS on monikäyttöinen geometrioita soveltava ohjelma. Sitä ei ole varsinaisesti suunniteltu tierakenteiden kuormituskestävyyden mallintamiseen.

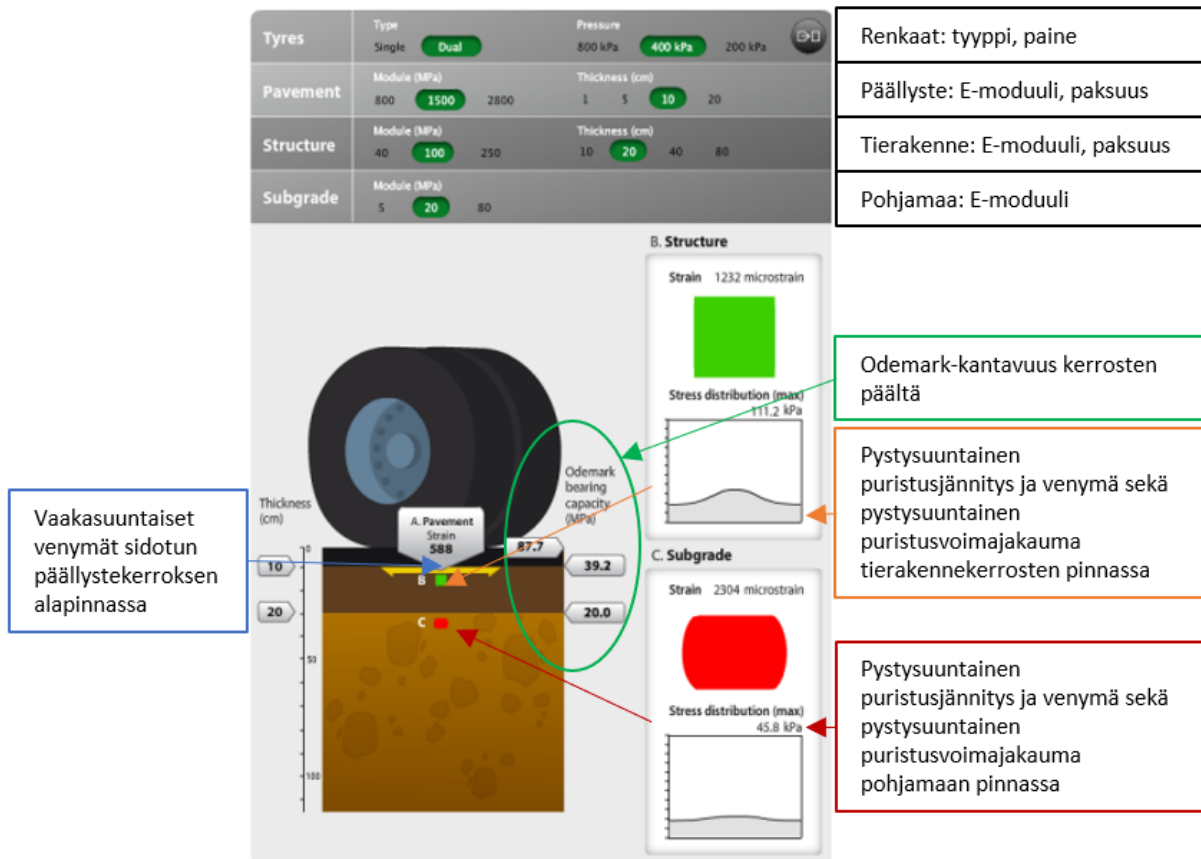
Ylitalon (2020) mukaan PLAXIksen käyttö alkaa tien rakenteen geometrian luomisella. Sen jälkeen lisätään materiaaliparametrit ja materiaalmallit. Liikennekuormitusta voidaan simuloida sekä staattisesti että dynaamisesti. Staattisessa mallintamisessa tierakenteen pinnalle luodaan pintaelementtejä, jotka kuvaavat tien pinnan ja ajoneuvon pyörän välistä kosketuspinta-alaa. Staattisella simuloinnilla voidaan muodostaa dynaaminen simulaatio vuorottelemalla pintojen paikkoja ja niihin kohdistuvia pintakuormituksia. Muodostettu dynaaminen simulaatio kuvaa ajoneuvon tiehen aiheuttamaa kuormitusta. Dynaamista kuormitusta kuvaava simulaatio voidaan luoda myös suoraan. Tällöin pistemäisille kuormituksille määritetään ensin liikeradat, nopeus ja kiihtyvyys. Myös antamalla kuormitukselle jokin taajuus ja amplitudi voidaan pistemäisistä staattisista kuormituksista tehdä dynaamisia. Geometrian ja kuormituksen jälkeen malli pitää jakaa elementteihin ja niitä yhdistäviin solmupisteisiin. Elementtiverkon määrittämisen jälkeen voidaan valita kiinnostuksen kohteena olevat pisteet ja vaiheistaa laskenta. Lopputuloksena saadaan siirtymien, venymien ja jännitysten arvot elementtiverkon solmupisteissä.

ESIMERKKEJÄ

Liikenneerasitukset

Tien rakennemateriaalien ja liikenneerasituksen vaikutusten havainnollistaminen ROADEX-demolaskurilla

ROADEX Networkin (2022b) mukaan osana ROADEX-tutkimusprojektikonaisuutta luotiin ROADEX-demolaskuri ("Pavement Stress and Strain Calculation Demo"), joka havainnollistaa tien rakenteiden ja ajoneuvon renkaiden parametrien muutosten vaikutuksen tien rasitukselle tien rakenteen kriittisissä kohdissa. ROADEX-demolaskurissa tarkastellaan sidottujen kerrosten alapinnan sekä pohjamaan yläpinnan lisäksi rasituksia myös sitomattomien kerrosten yläpinnassa. Jännitykset ja venymät on laskettu lineaarisesti kimmoiseen teoriaan perustuvalla BISAR-ohjelmalla. Kantavuudet on laskettu Odemarkin yhtälöllä. Laskelmat tehtiin käyttäen Pohjoisessa Periferiassa käytössä olevia tyypillisiä kuormitusyhdistelmiä, kerrospaksuuksia ja materiaalien kimmomoduuli (E) arvoja. Parametrit valittiin siten, että ne kattaisivat mahdollisimman hyvin erilaisia tierakenteita heikkolaatuisista korkealaatuisiin. Demolaskurissa tierakenne koostuu kolmesta eri kerroksesta: sidotut päällystekerrokset (Pavement), sitomattomat rakennekerrokset (Structure) ja pohjamaa (Subgrade). Lisäksi jokaisella venymäsuureella on niiden riskitasoa pysyvien muodonmuutosten tai rakenteen vaurioitumisen suhteen kuvaava väri. Väreistä vihreä indikoi alhaista, keltainen lievää, punainen korkea ja musta nopeasti kehittyvää riskitasoa. Kuvassa 25 näkyy esimerkkituloksia eri parametreilla.



Kuva 25. Tierakenteiden rasitus- ja kantavuustuloksia erilaisilla parametreillä. Kuva mukautettu luvalla lähteestä Varin ym. (2010).





[ROADEX-demolaskurin kuvaus](#) löytyy ROADEX Networkin (2022b) e-learning materiaalista Kurssi 1. pysyvät muodonmuutokset -3. pysyvät muodonmuutokset, urautumisen luokittelu - kappale 2.3 ROADEX-demolaskuri (sivulle pääseminen vaatii mm. vastuuvapauden hyväksymisen). [Kokeiluversio ROADEX-demolaskurista](#) on myös saatavilla (ROADEX Network, 2022b).

Raskaiden ajoneuvojen kehitys ja vaikutukset Suomen tiestöön

Raskaiden ajoneuvojen mitat

Raskaan liikenteen mitat ovat kasvaneet läpi historian myös Suomessa ja tarvetta mittojen kasvattamiseen tulee olemaan myös tulevaisuudessa. Mittojen kasvattamisesta on hyötyä teollisuudelle mm. merikonttien kuljetuksissa, metsäteollisuuden kuljetuksissa, kappaletavaliikenteessä ja elintarvike- kuljetuksissa.

Viimeisimmät merkittävimmät muutokset raskaan liikenteen massoissa ja mitoissa on tapahtunut vuosina 2013 ja 2019. Vuonna 2013 ajoneuvoyhdistelmän maksimimassaa nostettiin 60 tonnista 76 tonniin ja korkeutta 4.2 metristä 4.4 metriin. Samalla päivitettiin ajoneuvoryhmien kuormitusvastaavuuksia (ESAL kertoimia), jotka on esitetty kuvassa 26.

Tyyppi	Kuva tyypistä	ESAL kertoimet	
		v. 2014	v. 1999
KAIP		0.88	0.58
KAPP		1.29	1.48
KAVP		2.46	2.63
MODUULI		1.83	-

Kuva 26. Ajoneuvotyyppien kuormitusvastaavuuksia vuosina 1999 ja 2014. CC BY 4.0 lisenssin² alainen kuva lähteestä Toikka & Virtala (2015).

Kuvasta 24 nähdään, että vuonna 2013 muutoksessa yksittäisten akselien aiheuttama kuormitus pienentyi mutta samanaikaisesti sekä ajoneuvoryhmät ja tyypit muuttuivat. Muutos selittää yksittäisten akselien kuormitusvastaavuuksien pienenemisen eli massat jakaantuvat yleensä useammalle akselille kuin aiemmin. Tämä on toisaalta johtanut telimassojen kasvamiseen (Ylitalo, 2020).

Sallittua pitempiä tai raskaampia eli High Capacity Transport (HCT) kuljetuksia on kokeiltu Suomessa vuodesta 2013 lähtien poikkeusluvilla. Raskaiden kuljetusten massojen edelleen korottamista 76 tonnista 84/90 tonniin rajoitetulla tieverkolla suunniteltiin vuosina 2016-2018, mutta asiassa ei ole edetty sen jälkeen. Massojen kasvattamisen sijaan vuonna 2019 ajoneuvoyhdistelmän maksimipituutta kasvatettiin 25.25 metristä 4.5 metriin ja puoliperävaunuyhdistelmän maksimipituutta kasvatettiin 16.5 metristä 22.5 metriin.

Massat ja mitat ovat käytössä koko tieverkollamme, mukaan lukien kunnat ja yksityistiet, mikäli sitä ei ole erikseen rajoitettu. Rajoituksia aiheuttavat sillat ja liittymät. Vuonna

² <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

2020 yleisellä tieverkolla oli painorajoitettuja siltoja noin 400 kpl (3 %), kaikki tosin päätieverkon ulkopuolella. Pitkien yhdistelmien liikennettä haittaavia liittymiä oli noin 50 kappaletta. Vuonna 2020 raskaampia yli 76 t massalla liikennöiviä yhdistelmiä oli liikenteessä 21 kpl. Enintään 76 t massalla liikennöiviä yhdistelmiä oli liikenteessä alle 10 kpl.

Autoalan tietokeskuksen mukaan raskaan kuljetuksen mittojen ja massojen nostolla voidaan saavuttaa noin 5-20 % säästöt kuljetusalasta riippuen. Monet yritykset ovat korostaneet rajatun HCT-massaverkon/käytävien tarvetta kustannustehokkuuden ja päästövähennysten kannalta (Traficom, 2021).

Suurempien kuljetusten yleistyminen maantieverkostossamme tulee aiheuttamaan muutostarpeita liikenneverkolle. Raskaiden kuljetusten mittojen kasvattaminen vaatii joissain tapauksissa esimerkiksi liittymien ja taukopaikkojen laajentamista. Suomen pääteiden siltojen kestävyys on kartoitettu ja nimetty HCT-käytäviä, joissa tierakenteen kantokyky ja kuormituskestävyys ovat riittäviä joiden palvelutaso voidaan varmistaa osana Suomen päätiestön ylläpitorahoitusta.

Toisaalta on esitetty huolia siitä, että ajoneuvoyhdistelmien kokonaismassojen, akseleiden lukumäärän ja ajoneuvojen mittojen suurenemisella olisi negatiivisia vaikutuksia erityisesti alemman tieverkon tiestölle harvaan asutuilla seuduilla, jossa tiestölle on yleisempää heikosti kantava alusmaa ja niin sanotut rakentamattomat tierakenteet, jotka eivät noudata nykyisiä tierakennesuosituksia. Näiden teiden rakenne on erityisen herkkä vaurioitumaan silloin kun siihen kohdistuu raskaan liikenteen aiheuttamaa liikennesäätöä samaan aikaan suuren vesipitoisuuden omaavien vuodeaikojen yhteydessä. Kriittisimmät ajankohdat ovat syys- ja kevätkelirikkoajat, jolloin ongelmatilanteiksi pitää asettaa painorajoitukset.

Pekalan & Haatajan (2018), Vuorimies ym. (2018) ja Venäläisen (2022) mukaan Suomessa tehdyistä tierasituskokeista saadut tulokset näyttävät tukevan edellä mainittuja huolia. Tulosten perusteella näyttäisi siltä, että HCT-ajoneuvoyhdistelmien ja sallittujen mittojen verrokki- ajoneuvoyhdistelmien välillä ei ole eroja urautumisessa valtion paksupäällysteisillä teillä. Sen sijaan valtion ohutpäällysteisillä teillä eroja urautumisen suhteen on todettavissa riippuen päällysteen paksuudesta. Sorateiden osalta tulokset ovat osittain ristiriitaisia ja siksi sorateiden osalta tarvitaan lisätutkimuksia. Jatkossa urautumisen vaikutukset pitää määrittää ja lisäksi tierasitustutkimuksia tarvitaan myös kuntien tiestöllä.

Liikenteen automaattisen ajamisen riskianalyysiä

Raskaiden ajoneuvojen ajamisen automaation kehittymisen odotetaan mahdollistavan rekkojen peräkkäin ajamisen hyvin lyhyillä välimatkoilla. Lähellä toisiaan ajavien raskaiden ajoneuvojen letka voi yksin aiheuttaa merkittävää tuhoa tien rakenteissa. Tierakenne toipuu yksittäisten raskaiden autojen yliajon aiheuttamasta ”pumppaamisesta” vasta yli 10 sekunnin kuluttua eli tällä välin osuudelle tulevat muut raskaat autot voivat vaurioittaa tien rakennetta. Erityisesti riski vaurioitumiselle on pehmeän ja märän alusmaan päällä olevan ohutpäällysteisen tien rakenteissa (Saarenketo, 2018).

Toinen merkittävä tievaurioita lisäävä tekijä voi olla autojen parempi kaistalla pysyminen. Tarkasti kaistan keskellä ajavat autot mahdollistavat kaistojen kaventamisen, mutta myös kasvattavat urautumista jopa viisinkertaiseksi (Saarenketo, 2018). Tämä lyhentää uudelleenpäällystämistäväliä. Jos ongelmaa vähennetään lisäämällä päällysrakenteen kestävyyttä kiviaineksen avulla, päällysteen kustannukset kasvavat. Ratkaisuksi on myös ehdotettu kestävämpiä ”virtuaalisia” raiteita, jotka myös luultavasti lisäävät tienpitäjän kustannuksia (Carsten & Kulmala, 2015). Tienpitäjien kannalta olisi paras, jos autonvalmistajat panevat automaattisen ajoneuvot valitsemaan ajolinjansa satunnaisesti kaistarajojen puitteissa (Saarenketo, 2018).

Ilmastonmuutos

Kappaleen sisältö on pääosin suoraa lainausta Mika Lumpon opinnäytetyöstä (Lumpo, 2018).

Ilmastonmuutos ja sen vaikutukset Suomessa

Ilmastonmuutoksella tarkoitetaan sekä ihmisen toiminnasta aiheutuvaa että luonnollisista tekijöistä johtuvaa ajallista ilmaston muuttumista (Toivonen, 2015). Ilmastonmuutosta pidetään aikakautemme vakavimpana ympäristöuhkana. Globaalilla tasolla ilmastonmuutos on ajankohtainen ja yhteiskunnallinen ongelma, johon tarvitaan ratkaisuja ja päätöksiä, jotta ihmisten toiminnan aiheuttamia vaikutuksia ilmastoon saataisiin vähennettyä (Rummukainen, 2005).

Ilmastonmuutos on globaali ja samalla paikallinen ilmiö, joka aiheuttaa muutoksia esimerkiksi lämpötiloissa, sadannassa ja tuulien voimakkuudessa. Suomessa keskilämpötilan ennustetaan nousevan kahdesta seitsemään astetta ja vuotuisen sadannan kasvavan 5-40 % vuoteen 2080 mennessä. Globaalilla tasolla ilmaston muuttumista ennustetaan erilaisten päästöskenaarioiden ja ilmastomallien avulla.

Alla oleva kuva 27 esittää tarkemmin erilaisten ilmastosuureiden muuttumista ilmastonmuutoksen seurauksena Suomessa vuosisadan loppua lähestyttäessä.

Muuttuja	Alue	XII-II	III-V	VI-VIII	IX-XI	Vuosi	Huomautuksia
Keskilämpötila	Pohjoinen	+	+	+	+	+	Lämpötilan nousu pienintä kesällä.
	Etelä	+	+	+	+	+	
Keskimääräinen sademäärä	Pohjoinen	+	+	+	+	+	
	Etelä	+	+	/	+	+	
Termisen vuodenajan pituus	Pohjoinen	-	/	+	/		
	Etelä	-	+	+	+		
Vuorokauden ylin lämpötila	Pohjoinen	+	+	+	+	+	Lämpötilan nousu pienintä kesällä.
	Etelä	+	+	+	+	+	
Vuorokauden alin lämpötila	Pohjoinen	+	+	+	+	+	Lämpötilan nousu pienintä kesällä.
	Etelä	+	+	+	+	+	
Pakkaspäivien lukumäärä	Pohjoinen	-	-	-	-	-	
	Etelä	-	-	-	-	-	
Nollapistepäivien lukumäärä	Pohjoinen	+	-	-	-	/	Aluksi talven nollapistepäivät yleistyvät myös etelässä.
	Etelä	/	-	-	-	-	
Lumen vesiarvo	Pohjoinen	-	-		-	-	Vähentäminen alkaa etelästä, samoin syksystä ja keväästä.
	Etelä	-	-		-	-	
Lumipeitepäivien lukumäärä	Pohjoinen	-	-		-	-	Vähentäminen alkaa etelästä, samoin syksystä ja keväästä.
	Etelä	-	-		-	-	
Sadepäivien määrä	Pohjoinen	+	+	()	+	+	
	Etelä	+	()	-	()	+	
Rankkasateiden voimakkuus	Pohjoinen	+	+	+	+	+	
	Etelä	+	+	+	+	+	
Sateettomien kausien pituus	Pohjoinen	/	-	()	-	-	
	Etelä	-	()	()	()	()	
Pilvisuus	Pohjoinen	+	/	(-)	/	+	
	Etelä	+	/	(-)	/	+	
Roudan määrä	Pohjoinen	-	-		-	-	Laskelmat tehty lumettomille alueille (tiot, lentokentät, jne.)
	Etelä	-	-		-	-	

- + = Lisääntyy/kasvaa
- + = Lisääntyy/kasvaa huomattavasti
- = Vähenee
- = Vähenee huomattavasti
- / = Säilyy suunnilleen ennallaan
- () = Muutos hyvin epävarma
- Tyhjä = Ei osata sanoa tai merkityksetön

Kuva 27. Suuntaa antava esitys ilmastosuureiden odotettavissa olevista muutoksista Suomen etelä- ja pohjoisosissa eri vuodenaikoina (joulukuuhelmikuuh XII-II: maaliskuuh toukokuuh III-V, VI-VIII: kesä-elokuuh, IX-XI: syys-marraskuu) vuosisadan loppua lähestyttäessä. Kuvan uudelleenjulkaistu luvalla lähteestä Jylhä ym. (2009).

Ilmastonmuutoksen odotetut vaikutukset Suomen tiestöön

Ennusteen mukaan ilmastonmuutoksen aikaansaamat leudontuvat talvet vähentävät tulevaisuudessa routimista ja roudan aiheuttamia vaurioita tien rakenteisiin. Toisaalta roudan väheneminen vaikeuttaa esimerkiksi puunkorjuuta ja -kuljetuksia, kun maan kantokykyä ei voida hyödyntää entisessä määrin. Lisäksi ilmastonmuutos pidentää kelirikkokautta ja syyskelirikot yleistyvät. Sulan kauden pidentyminen ja pakkaskausi muuttaminen lyhemmiksi ja epäsäännöllisemmiksi voi johtaa useampaan erilliseen kelirikkojaksoon talvikauden aikana (Kolisoja, 2019) Talven aikainen veden jäätymispisteen molemmin puolin sahaava lämpötila yhdessä lisääntyvä liikennekuormituksen (akselimäärien sekä ajoneuvo- ja telimassojen kasvaminen) kanssa lisää riskiä päällysteen rapautumiselle ja reikiintymiselle.

Korkeammat lämpötilat ja sateiden ilmeneminen yhä useammin vetenä lisäävät teiden päällysteiden kulumista, sillä paljaat ja märät tienpinnat ovat alttiimpia nastarenkaiden

kuluttavalle vaikutukselle. Etenkin vilkkaasti liikennöityjen teiden kulumisen ja urautumisen arvioidaan lisääntyvän selvästi. Muutokset tulevat olemaan suurimpia Etelä- ja Länsi-Suomessa. Kehitys on jo näkyvissä; keskimääräinen teiden urautumisnopeus on maan etelä- ja länsiosissa kasvanut 30-45 % vuosien 2010-2015 aikana. Osittain muutos johtuu kuitenkin liikennemäärien kasvusta. Itä-Suomessa ja Lapissa teiden urautumiskuluminen on puolestaan pysynyt ennallaan tai hidastunut.

Lämpötilojen nousun lisäksi ilmastonmuutos lisää sekä kokonaissademääriä että rankkasateiden esiintymistä, mikä aiheuttaa ongelmia tiestölle. Pohjavesien pinnan nousu heikentää paikoin teiden kantavuutta, lyhentää niiden elinkaarta ja lisää riskiä tierakenteiden vaurioille. Rankkasateet puolestaan lisäävät tiepenkereiden ja leikkausten sortumisriskiä sekä siltojen maatumakkeilojen eroosiota. Lisääntyvien rankkasateiden ja niistä aiheutuvien vesistötulvien seurauksena kuivatusojien, rumpujen ja silta-aukkojen kapasiteetti voi osoittautua riittämättömäksi. Samalla myös hulevesitulevien riski kasvaa (Ilmatieteen laitos, 2017; Ruotoistenmäki ym., 2009; Toivonen, 2015).

Valtateillä ja kantateillä huolestuttavin ilmastonmuutoksen vaikutus on teiden nopea urautuminen ja vähäliikenteisellä tieverkolla teiden vaurioituminen. Kokonaisuudessaan ilmastonmuutoksen on arvioitu lisäävän maanteiden ylläpidon ja hoidon kustannuksia.

Vaikutukset kustannuksiin vaihtelevat Suomen eri osissa. Kustannusten on arvioitu lisääntyvän eniten sorateiden hoidossa ja tiepäällysteiden ylläpidossa (Toivonen, 2015). Korjaustoimenpiteiden oikea kohdentaminen oikeaan aikaan on edellytys, jotta koko Suomen tiestöllä pystytään tulevaisuudessa ylläpitämään riittävä palvelutaso kustannustehokkaasti.

Ilmastonmuutoksen huomioiminen väylärakentamisessa

Ilmastoriskien tunnistaminen, arviointi ja niiden hallinta on edellytys ilmastonmuutoksen vaikutuksiin varauduttaessa. Kaikki toimenpiteet koskien ilmastonmuutosta tulisi aloittaa riskitarkastelusta. Ilmastoriskejä on monenlaisia ja niitä lähestytään tapauskohtaisesti eri tavoin.

Kaavoitus

Ilmastonmuutokseen varaudutaan väylärakentamisessa lähtien liikkeelle kaavoituksesta. Kaavoituksessa huomioidaan ratarakenteet ja tiestö osana toimivaa infrastruktuuria ja yhteiskuntaa. Teiden tai rautateiden suunnittelun yhteydessä tulee ottaa huomioon jo olemassa olevat rakenteet ja tulevat rakennushankkeet. Kaavoituksen avulla voidaan toisin sanoen liittää yhteen infrarakentaminen, yhdyskuntarakentaminen, olemassa olevat

rakenteet ja ilmastonmuutos. Näin saadaan lähtökohtaisesti paras mahdollinen lopputulos ilmastonmuutokseen varauduttaessa. Kaavoitus jaetaan maakuntakaavoitukseen, yleiskaavoitukseen ja asemakaavoitukseen.

Maakuntakaavoituksessa tärkeintä on ottaa huomioon tulvariski määrittämällä alueet, joilla rakentamista tulisi rajoittaa. Tulvariski tulee huomioida niin yleisten alueiden kaavoituksessa kuin erityiskohteiden kuten sairaaloiden sijoittamisessa. Tulvariski määritetään yhdessä tulvaviranomaisten kanssa. Näin saadaan määrättyä rakentamisen minikorkeus. Kuten maakuntakaavoissa myös yleiskaavoissa voidaan rajata alueita, joille tulee asettaa rakentamisrajoituksia kasvavan tulvariskin vuoksi. Ilmastonmuutokseen varauduttaessa toiminnot tulisi sijoittaa olemassa olevien verkostojen (vesijohdot, viemärit) yhteyteen (Harmaajärvi, 2005).

Asemakaavoituksessa on tärkeää ottaa huomioon pienilmastoa, maastoa ja maaperää koskevat periaatteet. Tuulisuutta voidaan minimoida rakennusten sijoittamisella, muodolla ja suuntauksella. Tämä voidaan tehdä välttämällä pohjois-, koillis- ja luoteisrinteiden käyttöönottoa sekä yleisesti tuulisia alueita ja mäen harjanteita. Sen sijaan suosimalla etelä-, kaakkois- ja lounaisrinteitä ja puuston suojaamia alueita, lisääntyneen tuulen aiheuttamat ongelmat vähenevät. Rakennusmassaa tulee suunnata entistä enemmän etelään muodostamalla rakennuksista toisiaan suojaavia korttelialueita. Välttämällä painanteita rakennusten sijoittelussa alueilla, joilla ei tuule ja joilla lämpötilavaihtelut ovat suuria, voidaan välttää ”kylmän ilman järvien” muodostuminen. Huono maaperä ja vesistöpengerten sortumavaarat ovat ongelma rakennuksia ja verkostoja rakentaessa. Ilmastonmuutoksen vuoksi tuulisuutta ja maaperää koskevien selvityksien tarve tulee lisääntymään (Harmaajärvi, 2005).

Tiestö

Kehittämällä tierakenteen mitoitus ja ottamalla käyttöön vuodenaikajaksotus, varmistetaan erilaisten vauriomekanismien kriittinen kapasiteetti. Tämä on järkevää etenkin korkean pohjavedenpinnan ja roudan sulamisveden aikoihin. Samoin pohjarakenteiden mitoituksessa tulee huomioida kohonneen pohjavedenpinnan ja runsaiden sateiden aiheuttama kapasiteetin pieneneminen. Päällysteiden vedenkestävyyden tulee noudattaa päällystenormeja (Ruotoistenmäki ym., 2009).

Tievalaistuksen tarve tulee lisääntymään ilmastonmuutoksen edetessä. Lumipeitteen ajan vähetessä tievalaistuksen teho heikkenee etenkin alkutalvesta. Vaihtelevat sääolosuhteet tulee lisätä valaistustarpeen arviointiperusteisiin ja valaistustekniikka tulee tehdä entistä vähemmän energiaa kuluttavaksi. Tällöin valaistuksen määrää voidaan lisätä

hankaloituvien olosuhteiden kompensoimiseksi, jolloin näkyvyys paranee (Ruotoistenmäki ym., 2009).

Toimintalinjat sorateiden hoitoon ja ylläpitoon on laadittu vuonna 2008. Näissä toimintalinjoissa on huomioitu vaatimukset, jotka ilmastonmuutos aiheuttaa tienpidolle. Toimintalinjojen mukaan pölyntorjunta tulee tehostaa asiakaslähtöisesti eli pölyn merkittävää leviämistä ei sallita astutuksen ja viljelysten kohdalla. Toimintalinjoissa on esitetty seuraavia suosituksia, joilla pyritään vähentämään kelirikkoa ja kelirikon haittoja: Tien pinnat tulee muokata riittävän sivukalteviksi sekä ylileveät tiet tulee kaventaa 6.0-6.5 metriin. Samalla ojituksen tulee kunnostaa vähintään kymmenen vuoden välein ja useammin kun kyseessä on painorajoitusaltis tie. Tien ollessa pintakelirikkoaltis, lisävaatimuksia tulee asettaa kulutuskerrosmateriaalin laadulle. Lisäksi kelirikkotilanteita tulee seurata ja erilaisten korjaustoimenpiteiden tehokkuutta arvioida kehittämällä ja ottamalla käyttöön pintakelirikon inventointi (Ruotoistenmäki ym., 2009).

Veden pinnan nousu aiheuttaa taloudellisia ja toiminnallisia riskejä liikenneverkolle. Tämän vuoksi terminaalit, erilaiset pysäkit ja liikenneohjauslaitteet tulee sijoittaa tarpeeksi korkealle veden pinnan tasoon nähden, jotta vaurioilta välttyttäisiin (Yrjölä & Viinanen, 2012).

Tiestön päällysteen reikiintyminen

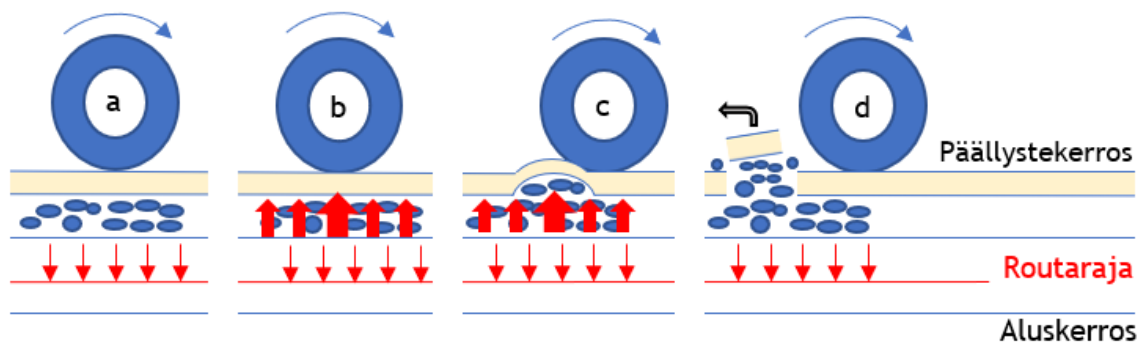
Kappaleen sisältö on suoraa lainausta Veikko Pekkalan opinnäytetyöstä (Pekkala, 2016).

Suomen päällystetyn tiestön kiihtyvä reikiintyminen 2000-luvun aikana myös vilkasliikenteisillä teillä on arvioitu johtuvan osittain ilmastonmuutoksesta (Laukkanen ym., 2012).

Reikiintyminen määritellään Nichollsin (2012) mukaan tien päällysrakenteen pinnan paikalliseksi vaurioksi, missä materiaali rikkoutuu suhteellisen lyhyessä ajassa muodostaen jyrkkäreunaisen painuman. Suomessa teiden asfaltin reikiintymistä on todettu syntyvän pääasiassa leutoina talvina pakkasjakson jälkeen kevättalvella. Reikiintymistä esiintyy pääasiassa vähäliikenteisillä mutta myös vilkasliikenteisillä teillä. Ilmiö on monimutkainen eikä reikiintymisen aiheuttajaa tunneta varmuudella. Laukkanen ym. (2012) mukaan reikiintymisvaurioiden aiheuttaja voi olla vesi, veden ja liikennekuormituksen yhteisvaikutus, veden ja toistuvien jäätymis-sulamis-sykliden yhteisvaikutus, päällysrakenteen puutteellinen kuivatus, liian alhainen sideainepitoisuus, heikkolaatuiset raaka-aineet, työvirheet tai useamman tekijän yhteisvaikutus. Yhteisvaikutus voi syntyä siten, että jokin edellä mainituista tekijöistä heikentää päällysteen kestävyyttä jotain

toista vauriotekijää vastaan. Nichollsin (2012) mukaan on tunnistettu kolmentyyppistä reikiintymistä:

1. Halkeamareikiintyminen (fracture potholes) on seurausta ohiajavien autojen aiheuttamasta jaksottaisesta hydrostaattisesta nosteesta, joka aluksi aiheuttaa halkeamia kulutuskerrokseen ja myöhemmin syrjäyttää halkeaman yhdistyessä syntyneitä lohkaraita. Tämän tyyppinen reikiintyminen etenee kulutuskerroksen pohjasta pintaan päin esiintyen yleensä vain rajoittuneella alueella. Jos kulutuskerroksen alla oleva kerros on suhteellisen vettä läpäisemätön, pysyy kertynyt vesi syntyneessä reiässä. Vaurioitumismekanismien periaatteet on esitetty kuvassa 28. Kuvassa 28a tien asfalttipinnan alla oleva kerros sisältää hienorakeista maalajia ja kyllästyy roudan sulamisen alkuvaiheessa. Kuvassa 28b hetkellinen renkaan aiheuttama kuormitus kohdistuu veteen kyllästyneessä kerroksessa. Korkea huokosvedenpaine tekee kyllästyneen kerroksen epästabiiliksi. Koska sulamisrintaman alla oleva kerros on jäänyt ja siten estää veden poistumisen, huokosvedenpaine synnyttää asfaltin pintaan kohdistuvan ylöspäin suuntautuneen paineen renkaan kohdalla. Kuvassa 28c asfaltin pintakerrokseen kohdistuvat paineen muutokset heikentävät päällystettä ja päällysteeseen alkaa muodostua halkeamia. Kuvassa 28d asfaltinpalasia voi lopulta purkautua ulos tien pinnasta. Purkauskohta voi hajota reunoista ja syventyä reikäksi samalla kun alemman kerroksen materiaali purkautuu pinnalle. Materiaali voi myös siirtyä rakenteissa sivuille purkaumakohdasta ja aiheuttaa siten urautumista ja deformaatiota.



Kuva 28. Halkeamareikiintymisen vauriomekanismien vaiheet. Kuva muokattu lähteestä Simonsen & Isacsson (1999).

2. Väsymisreikiintyminen (Attrition potholes) muodostuu kulutuskerroksen pinnasta alaspäin siten, että tien pintaan muodostuu ensin purkauma. Lopputuloksena olevalla reiällä on yleensä pyöristetyt särmät. Kertynyt vesi voi pysyä sen sisällä.

3. Kausittainen reikiintyminen (Seasonal potholes) etenee pohjasta pintaan kuten halkeamareikiintymisenkin, mutta vaurioitumisen yksi päätekijä on sykliset jäätymsulamisjaksot. Tien pinnan reikiintyminen huomataan yleensä talvea seuraavan kevään

aikana. Sykliset jäätymis-sulamisjaksot puskevat kulutuskerroksen pintaa ylöspäin ja jättävät samalla tyhjää tilaa kulutuskerroksen alle. Jäätymis-sulamisjaksojen ja liikennesuorituksen yhteisvaikutuksesta tien pintakerrokseen alkaa muodostua uusia hiushalkeamia. Halkeamat suurenevät ja tunkeutuvat pintakerroksen läpi ja lopulta pinta antaa periksi. Tien pintaan syntyy reikä, jonka kohdalla pintakerros tunkeutuu pehmenneeseen alempaan kerrokseen. Reiän kohdalla voi nyt tapahtua alempien kerrosten materiaalien sekoittumista. Reikä täyttyy vedellä, jonka jälkeen yli ajavan autonrenkaan aiheuttama paineisku voi pumppauttaa tien alempien kerrosten materiaalia ulos reiästä (Doré & Zubeck, 2008; Orr, 2006; Pothole.info, 2016). Suomessa vähäliikenteisillä teillä reikien muodostumista edesauttaa ohut päällystekerros sekä alla olevan sitomattoman kerroksen runsas hienoaainepitoisuus.

Yleisesti reiän syntymisen mahdollistavat tekijät ovat vaurio päällystekerroksen pinnassa, tien rakenteissa oleva ylimääräinen vesi sekä liikenteen aiheuttama kuormitus. Vesi ei ole välttämätön, mutta tyypillisesti sillä on merkittävä rooli reikien syntymisessä (Doré & Zubeck, 2008). Samoin ilmasto-olosuhteista sykliset jäätymis-sulamisjaksot eivät ole välttämättömiä, mutta asfaltin jäätymis-sulamiskestävyydellä voi olla merkittävä rooli asfaltin reikiintymisen aiheuttajana. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat heikkolaatuiset rakennemateriaalit sekä rakenteellinen virhe. Rakenteellinen virhe tarkoittaa mm. kulutuskerroksen ja kantavan kerroksen heikkoa tartuntaa. Lisäksi erityisen paljon tienpäällysteiden reikiintymistä on todettu asfaltin saumojen läheisyydessä, jossa asfaltin tyhjätila on suurempi kuin muualla päällysteessä. Syyksi arvellaan sitä, että saumakohdissa vesi pääsee tunkeutumaan huokosiin helpommin (Laukkanen & al., 2012). Päällystemassan huono laatu ilmenee heikkona sidoksena sideaineen ja kiviainesrakeiden välillä ja mahdollistaa kiviainesrakeiden irtoamisen päällysteen pinnasta ja purkauman synnyn, joka voi johtaa reikiintymiseen (Belt ym., 2002). Reikiintymisen lähtökohtana voi olla purkauman lisäksi muu epäjatkuvuuskohta kuten halkeama.

Lähdeluettelo

- Anonyymi. (n.d.). *Siméon Denis Poisson* [Litografia]. Wellcome Library no. 7908i. <https://wellcomecollection.org/works/zh9ssb8p>
- Barlow, T. O. (1868). *Sir Isaac Newton* [Kaiverrus Sir G. Knellerin teoksen pohjalta]. Wellcome Library no. 7377i. <https://wellcomecollection.org/works/thhzb9m>
- Belt, J., Lämsä, V.-P., Savolainen, M., & Ehrola, E. (2002). *Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto* (Tiehallinnon selvityksiä 15/2002). Tiehallinto. <https://www.doria.fi/handle/10024/139074>
- Blomberg, T. (1990). *Bitumit*. Neste Oy ja Rakentajain Kustannus Oy.
- Brown, S. F. (1978). Material characterization for analytical pavement design. Teoksessa P. S. Pell (toim.), *Developments in Highway Pavement Engineering* (Vol. 1, s. 41-92). Applied Science Publishers.
- Brown, S. F. (1993). *Introduction to Pavement Design. Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation* (Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 22). Oulun yliopisto.
- Carsten, O. M. J., & Kulmala, R., (2015). Road Transport Automation as a Societal Change Agent. Teoksessa *TRB Conference Proceedings 52: Towards Road Transport Automation: Opportunities in Public-Private Collaboration* (s. 65-76). Transportation Research Board.
- Chan, F. W. K. & Brown, S. F. (1994). Significance of principal stress rotation in pavements. Teoksessa *13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (s. 1823-1826). International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/32/1994_04_0105.pdf
- Doré, G. & Zubeck, H. K. (2008). *Cold regions pavement engineering*. ASCE Press/McGraw-Hill.
- Ehrola, E. (1996). *Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet*. Rakennustieto Oy.
- Federal Highway Administration. (2020). *Aerial view of AASHO Road Test* [Valokuva]. https://www.fhwa.dot.gov/highwayhistory/resultsDisplayImg.cfm?img=il_4_aasho_64_488.jpg
- Geille, A. F. B. (n.d.). *Jean-Baptiste-Joseph Fourier* [Kaiverrus J. L. Boillyn litografian pohjalta]. Wellcome Library no. 3110i. <https://wellcomecollection.org/works/b4qh352u>
- Haas, R., Falls, L. C., MacLeod, D., & Tighe, S. (2004). Climate impacts and adaptations on roads in Northern Canada. Teoksessa *Cold Climate Conference* (18 s).

- Harmaajärvi, I. (2005). Ilmastonmuutoksen haasteet yhdyskuntasuunnittelulle. Teoksessa Ahonen-Rainio, P. & Huhtinen, U. (toim.), *Epävarma maailma* (Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu no 42).
https://www.researchgate.net/publication/46141057_Ilmastonmuutoksen_haasteet_yhdyskuntasuunnittelulle
- Highway Research Board. (1962a). *The AASHO Road Test* (Report 5, Pavement Research, Special report 61E, Publication No. 954). National Academy of Sciences - National Research Council. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr61e.pdf>
- Highway Research Board. (1962b). *The AASHO Road Test* (Report 7, Summary report, Special 61G, Publication No. 1061). National Academy of Sciences - National Research Council. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr61g/61g.pdf>
- Ilmatieteen laitos. (2017). *Ennustettu ilmastonmuutos Suomessa* [Verkkosivu].
<https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/ennustettu-ilmastonmuutos-suomessa>
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S., & Seitola, T. (2009). *Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009* (Raportteja 2009:4). Ilmatieteen laitos. <http://hdl.handle.net/10138/15711>
- Järvinen, L. (1991). *Päällysrakenteen mitoitusmenetelmät*. TKK, Tietekniikka.
- Kanerva, K. (2011). *Rakennemitoitusmenetelmät raskaille pyöräkuormille ja konttikuormille sekä rakennettujen kenttien kokeellinen tutkimus* [Diplomityö, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Liikenne- ja tietekniikka, Aalto-Yliopisto].
<http://lib.tkk.fi/Dipl/2011/urn100440.pdf>
- Kolisoja, P. (2019, 16. toukokuu). *Kasvavat ajoneuvopainot ja sorateiden kuormituskestävyys* [Esitys]. Soratiepäivä, Jyväskylä. <https://docplayer.fi/147006923-Kasvavat-ajoneuvopainot-ja-sorateiden-kuormituskestavyys-soratiepaiva-jyvaskyla-prof-pauli-kolisoja.html>
- Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. (1981). The segregation potential of a freezing soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 18(4), s. 482-491. <https://doi.org/10.1139/t81-059>
- Laukkanen, K., Halonen, P. & Pyy, E. (2012). *Asfalttimassan kestävyys jäätymsulamista sekä veden ja kuormien yhteisvaikutusta vastaan. Asfadur-projekti - loppuraportti* (Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2012). Liikennevirasto.
<https://www.doria.fi/handle/10024/120903>
- Lehtipuu, E. (1983). *Asfalttipäällysteet, suunnittelu - rakentaminen - kunnossapito*. Rakentajain Kustannus Oy.

- Lehtonen, K. (2009). *Tiehallinnon mitoitusmenetelmät: Odemark ja APAS ja niihin liittyvät ongelmat* [Opetusmoniste, Aalto-yliopisto].
- Liikennevirasto. (2013). *Tien suuntauksen suunnittelu* (Liikenneviraston julkaisuja, 30/2013). <https://www.doria.fi/handle/10024/121680>
- Liikennevirasto. (2018). *Tierakenteen suunnittelu* (Liikenneviraston ohjeita 38/2018). <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-632-4>
- Lumpo, M. (2018). *Ilmastonmuutoksen huomioon ottaminen väyläsuunnittelussa ja -rakentamisessa* [Kandintyö, Oulun yliopisto]. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201811093001>
- Mansikkamäki, J. (2009). *Olemassa olevien ratapenkereiden stabiliteetin laskeminen elementtimenetelmällä* (Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2002). <https://www.doria.fi/handle/10024/146442>
- Mills, B.N., Tighe, S. L., Andrey, J., Smith, J. T., Parm, S., & Huen, K. (2007). The road well-traveled: Implications of climate change for pavement infrastructure in Southern Canada: Final technical report. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0970582.pdf>
- Nicholls, J. C. (2012). Definition of the term “pothole” and selection of test and evaluation methods for materials used in their repair. Deliverables No. 1 & 2. Road ERA net. http://www.fehrl.org/?m=32&id_directory=7016
- Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2002). *Ratarakenteen routasuojaus* (Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2002). Ratahallintokeskus. <https://www.doria.fi/handle/10024/146360>
- Ojala, V. (2021). *Tien päällysrakenteen suunnittelun historia Suomessa* [Diplomityö, Tampereen yliopisto]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202102252246>
- Orr, D. P. (2006). *Pavement Maintenance* (CLRP No. 06-5). Cornell Local Roads Program. New York LTAP Center. <https://cornell.app.box.com/clrp-ws-pm>
- Pekkala, V. (2016). *Roudan vaikutus tien rakenteisiin* [Diplomityö, Oulun yliopisto]. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201701121071>
- Pekkala, V., & Haataja, M. (2018). *Tien rasitukset tieverkossa: HCT- ja muiden puunkuljetusyhdistelmien vaikutusten vertailu 2016-2017. Loppuraportti* (Raportti n:o 7). Oulun yliopisto. <http://urn.fi/urn:isbn:9789526221489>
- Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet. (ca. 1780). [Kuva kirjasta]. Mechanical Engineering Image Collection P8/111. <https://www.vads.ac.uk/digital/collection/IMECHE/id/1898/>
- Pothole.info. (2016). *How Do Potholes Form?* [Verkkosivu]. <http://www.pothole.info/2010/07/how-do-potholes-form/>

- Raddon, W. (1831). *Thomas Telford* [Kaiverrus S. Lanen maalauksen pohjalta]. National Portrait Gallery NPG D1381.
<https://www.npg.org.uk/collections/search/portrait/mw35516/Thomas-Telford>
- RIL. (2006). *RIL 165-2 Liikenne ja väylät II*. Suomen rakennusinsinöörien liitto ry.
- RIL. (2013). *RIL 261-2013 Routasuojaus - rakennukset ja infrarakenteet*. Suomen rakennusinsinöörien liitto ry.
- ROADEX Network. (2022a). *Kurssi 1. Pysyvät muodonmuutokset: Tutkimus ja mittaustekniikat* [eLearning paketti]. <https://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/pysyvat-muodonmuutokset/4-tutkimus-ja-mittaustekniikat/>
- ROADEX Network. (2022b). *Kurssi 1. Pysyvät muodonmuutokset: Tierakenteen jännitykset ja muodonmuutokset* [eLearning paketti]. <http://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/pysyvat-muodonmuutokset/2-tierakenteen-jannitykset-ja-muodonmuutokset/>
- ROADEX Network. (2022c). *Kurssi 1. Pysyvät muodonmuutokset: Pysyvien muodonmuutosten hallinta* [eLearning paketti]. <https://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/pysyvat-muodonmuutokset/6-pysyvien-muodonmuutosten-hallinta/>
- ROADEX Network. (2022d). *Kurssi 3. Teiden kuivatus: Johdanto, kuivatuksen merkitys* [eLearning paketti]. <https://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/teiden-kuivatus/johdanto-kuivatuksen-merkitys/>
- Rummukainen, M. (2005). Katsaus Globaaliin ilmastonmuutokseen. Teoksessa J. Riikonen & E. Vapaavuori (toim.), *Ilmasto muuttuu - mukautuvatko metsät* (Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944, 2005; s. 15-20). Metsäntutkimuslaitos. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1978-4>
- Ruotoistenmäki, A., Valkeisenmäki, A., Venäläinen, A., Mäkelä, O., Sipilä, J., Jylhä, K., Savolainen, S., & Laapas, M. (2009). *Ilmastonmuutoksen vaikutus tiestön hoitoon ja ylläpitoon* (Tiehallinnon selvityksiä 8/2009). Tiehallinto.
<https://www.doria.fi/handle/10024/139433>
- Saarenketo, T. (2018, 19. huhtikuu). *Roads for Intelligent Transport* [Esitelmä]. Interactive Symposium on Research & Innovation for Connected and Automated Driving in Europe, Vienna. https://www.connectedautomateddriving.eu/wp-content/uploads/2018/05/Timo-Saarenketo_Roads-for-Intelligent-Transport.pdf
- Simonsen, E., & Isacson, U. (1999). Thaw weakening of pavement structures in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 29(2), 135-151.
[https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(99\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(99)00020-8)

- Tiehallinto. (2004a). *Tierakenteen suunnittelu. Suunnitteluvaiheen ohjaus*.
<https://www.doria.fi/handle/10024/133442>
- Tiehallinto. (2004b). *APAS_3 mitoitusohjelman käyttöohje*. Tiehallinto
- Tiehallinto. (2005). *Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D*. <https://docplayer.fi/20464896-Tietoa-tiensuunnitteluun-nro-71d.html>
- Toikka, J. & Virtala, P. (2015). *Akselimassatutkimus 2013-2014: Projektin loppuraportti* (Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 67/2015). Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. <https://www.doria.fi/handle/10024/120897>
- Toivonen, T. (2015). *Maanteiden kuivatusjärjestelmien ja kuivatukseen liittyvän tiedonhallinnan kehitystarpeet ilmaston muuttuessa* [Opinnäytetyö, Tampereen yliopisto]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201512111823>
- Traficom. (2021). *Raskaan liikenteen erityisasiat* [Verkkosivu]. <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/raskaan-liikenteen-erityisasiat>
- Turner, C. (1825). John Loudon McAdam [Kaiverrus tuntemattoman taitelijan työn pohjalta]. National Portrait Gallery NPG D5165. <https://www.npg.org.uk/collections/search/portrait/mw39514/John-Loudon-McAdam>
- Varin, P., Saarenketo, T., Kolisoja, P., & Juujärvi, E. (2010). *The ROADEX pavement stress and strain calculation demo, v. 1.3 20.10.2010. Introduction and the instruction for use* (ROADEX Publications Reports). https://www.roadex.org/wp-content/uploads/elearning/publications/Demo_instructions.pdf
- Venäläinen, P. (2022, 25. elokuu). *HCT-kokeilut Suomen puukuljetuksissa* [Esitys]. Tiepäivät, Tampere.
- Vuorimies, N., Kalliainen, A., Rossi, J., Kurki, A., Kolisoja, P., Varin, P., & Saarenketo, T. (2018). *Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015-2017* (Liikenneviraston tutkimuksia 63/2018). Liikennevirasto. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-652-2>
- Väylävirasto. (2021). *Tien poikkileikkauksen suunnittelu* (Väyläviraston ohjeita 16/2021). https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2021-16_tien_poikkileikkauksen_web.pdf
- Ward, G. R. (1855). *Thomas Young* [Mezzotinto Sir T. Lawrencen työn pohjalta]. Wellcome Library no. 9804i. <https://wellcomecollection.org/works/xv69yyrp>

Ylitalo, E. (2020). *Heikkorakenteisen tien kuormituskestävyyden laskennallinen mallintaminen* [Diplomityö, Tampereen yliopisto]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202011288293>

Yrjölä, T., & Viinanen, J. (2012). *Keinoja ilmastonmuutokseen sopeutumiseksi Helsingin kaupungissa* (Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 2/2012). Helsingin kaupungin ympäristökeskus. <https://www.hel.fi/static/ymk/julkaisut/julkaisu-02-12.pdf>

www.oulu.fi

Oulun yliopiston oppimateriaalia

Oulun yliopiston julkaisutoimikunta

ISBN 978-952-62-3613-1 (pdf)

ISSN 2954-1948 (pdf)

Oulun yliopisto

www.oulu.fi

Oulu 2023



Sarjatoimittajat

LUONNONTIETEET

yliopistonlehtori Mahmoud Filali

HUMANISTISET TIETEET

yliopistonlehtori Santeri Palviainen

TEKNIikka

yliopistotutkija Antti Kaijalainen

LÄÄKETIEDE

yliopistonlehtori Pirjo Kaakinen

KASVATUSTIETEET

yliopistonlehtori Henri Pettersson

HALLINTO

hallinnollinen koordinaattori Mari Katvala

TALOUSTIETEET

yliopistotutkija Marko Korhonen

ARKKITEHTUURI

apulaisprofessori Anu Soikkeli