



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TUOMAS LINDEN
BETONIMURSKEEN KÄYTTÖ RAITIOTIERAKENTAMISESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
30. lokakuuta 2017

TIIVISTELMÄ

TUOMAS LINDEN: Betonimurskeen käyttö raitiotierakentamisessa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 110 sivua, 6 liitesivua

Maaliskuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Infrarakenteet

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja

Avainsanat: betonimurske, uusiomateriaali, kiertotalous, raitiotie, pikaraitiotie, väylärakenne

Betonimursketta on Suomessa käytetty tie- ja katurakentamisessa jo yli 20 vuoden ajan. Käyttökokemukset ovat olleet hyviä ja betonimurskerakenteista on koerakenteiden seuranta tutkimuksissa mitattu vertailurakenteita suurempia kantavuusarvoja. Laadukas betonimurske on luonnonkiviainesta vastaavaa tai uudelleenlujittumisominaisuutensa ansiosta jopa parempaa maarakennusmateriaalia. Käyttämällä uusiomateriaaleja erilaisissa infrarakentamisen kohteissa säästetään luonnonvaroja ja ehkäistään käyttökelpoisten rakennusmateriaalien päätymistä toisarvoisiin käyttökohteisiin tai kaatopaikoille.

Raitioteiden suosion jälleen lisääntyessä on todettu olevan tarvetta tarkastella betonimurskeen käyttömahdollisuuksia myös raitiotierakentamisessa. Tähän tutkimukseen koottiin kirjallisuusselvityksenä betonimurskeen käytöstä saatuja kokemuksia ja tutkimustuloksia Suomesta ja maailmalta. Tie- ja raitiotierakenteita sekä niihin vaikuttavia kuormituksia vertailemalla pyrittiin selvittämään, voidaanko olemassa olevan tie- ja katurakenteiden tutkimustiedon perusteella tehdä johtopäätöksiä betonimurskeen hyödynnettävyydestä myös raitiotierakentamisessa.

Raitiotierakenteessa vaikuttavia jännityksiä liikennekuorman alla arvioitiin monikerros-laskennan avulla. Kun saatuja arvoja verrattiin aiemmassa tutkimuksessa tierakenteesta raskaan ajoneuvon ylityksen aikana mitattuihin arvoihin, huomattiin raitiotiessä vaikuttavien jännitysten olevan huomattavasti tierakennetta pienempiä. Tämä johtuu pyöräkuorman tasaisemmasta jakautumisesta sitomattomiin rakennekerroksiin raitiotiellä ratapölkkyjen ja varsinkin kiintoraiteen laatan kautta.

Raitiotierakenteeseen kohdistuvat liikennekuormitukset vastaavat alemmissä rakennekerroksissa luonteeltaan tie- tai katurakenteen kuormituksia, joten betonimurskeen voi olettaa olevan teknisesti sopivaa materiaalia tukikerroksen tai kiintolaatan alapuolisiin rakennekerroksiin. Ratapölkkyllisen radan tukikerrokseen kohdistuu tie- ja katurakenteista poikkeavaa hiovaa kulutusta, jonka vaikutuksia betonimurskeeseen tulisi tutkia lisää ennen betonimurskeen käyttöä tukikerroksessa. Lisätutkimuksia tarvitaan myös raideseppelin pitkäaikaiskestävyydestä tukikerroksessa, mikäli betonimursketta käytetään välikerroksen materiaalina.

ABSTRACT

TUOMAS LINDEN: Utilization of Crushed Concrete Aggregate in Light Rail Construction

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 110 pages, 6 Appendix pages

March 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Infrastructure

Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: crushed concrete aggregate, recycled concrete aggregate, reclaimed concrete, circular economy, light railway, tramway

Crushed concrete aggregate has been used in Finland in road and street construction for over 20 years. Experiences have been good. In the follow-up studies of trial sections, higher values for bearing capacity were measured for the structures with crushed concrete aggregate than for the reference structures constructed with crushed rock. As an earth construction material, high quality crushed concrete aggregate is comparable to natural aggregates or even better than them due to its re-hardening properties. By using recycled waste materials in different areas of infrastructure construction, natural resources can be conserved and usable construction materials prevented from being used in secondary applications or taken to a landfill for disposal.

As the popularity of light rail is growing, it has become apparent that there is a need to examine the possibilities of using recycled concrete aggregate in light rail construction as well. In this thesis, experiences and research findings from Finland and other countries were collected as a literature review. Light rail structure was compared with road structure to find out if the research done on utilizing crushed concrete aggregate in road and street construction can be implemented in light rail construction.

The stresses in a light rail track bed caused by traffic loads were calculated by using a multi-layer calculation program. When comparing the results from the calculations and the values measured from a real road structure during a heavy vehicle passage in a previous study, it was discovered that the stress levels in a light rail structure are considerably lower than in a road structure. This is due to the more even load distribution in the light rail structure with sleepers or a slab foundation.

The nature of the stresses in the sub-ballast layers of a light rail structure are similar to the stresses in a road structure. Thus, it can be assumed that crushed concrete aggregate is a suitable material to be used in the unbound layers under the ballast bed in a ballasted light rail track or under the concrete slab of a slab track -type light rail track. Using crushed concrete aggregate in the ballast bed would require additional research, as the traffic loads in a ballasted track cause different, more abrasive wear on the ballast material compared to the stresses in a road structure or the lower layers in a track structure. Additional research is also needed for using crushed concrete aggregate in the layer directly below the ballast layer, as the effects of the hardened crushed concrete aggregate layer on the long-term durability of the ballast material under traffic loads are not yet known.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Ramboll Finland Oy:ssä. Työn tilaajat ovat Helsingin, Espoon ja Tampereen kaupungit sekä Helsingin kaupungin liikenneliikelaitos (HKL).

Työn tarkastajana toimi professori Pauli Kolisoja Tampereen teknilliseltä yliopistolta ja ohjaajina DI Taavi Dettenborn sekä DI Antti Kalliainen Rambollilta. Merkittävässä roolissa diplomityön toteutumisessa oli työn aiheen ideoinut sekä taustajoukon kasannut DI Juha Forsman Rambollilta. Haluan osoittaa erityiset kiitokseni kaikille edellä mainituille saamistani neuvoista, kommentista ja materiaaleista työn aikana.

Edellä mainittujen lisäksi työn ohjausryhmään kuuluivat Mikko Suominen Helsingin kaupungilta, Eleonoora Salminen Espoon kaupungilta, Jori Lehtikangas Tampereen kaupungilta sekä Matti Tauriainen Helsingin kaupungin liikenneliikelaitokselta. Haluan kiittää koko ohjausryhmää asiantuntemuksensa jakamisesta sekä rakentavista kommentista ja mielipiteistä.

Lopuksi haluan kiittää työkavereitani Rambollilla mukavasta työympäristöstä sekä erityisesti opiskelutovereitani Hervannan vuosista. Vaikka opinnot ovatkin nyt takana, jäi matkan varrelta mukaan repun täydeltä huikeita muistoja. Luentosalien penkkien kuluttamisen ja harjoitustöiden parissa hikoilun ohella tuli onneksi toisinaan hieman rentouttuakin. Näiden aikojen muistelu tiiviiksi muodostuneen kaveriporukan kanssa jatkuu vielä pitkään.

Tampereella, 28.03.2018



Tuomas Linden

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	RAITIOTIEN RAKENNE	3
2.1	Tukikerroksellinen rata	3
2.1.1	Tukikerroksellisen radan rakenneosat.....	3
2.1.2	Kisko	4
2.1.3	Kiskon kiinnitys	5
2.1.4	Välilevy	6
2.1.5	Ratapölkky	7
2.1.6	Pohjain	8
2.1.7	Tukikerros	9
2.1.8	Alusrakenne	10
2.1.9	Pohjamaa	12
2.2	Kiintoraiderata.....	13
2.2.1	Kiintoraideradan rakenneosat	13
2.2.2	Kisko	15
2.2.3	Pohjalaatta ja kiskon kiinnitys	17
2.2.4	Alusrakenne	24
2.3	Raitiotien kanssa risteävät rakenteet	25
3.	RAITIOTIERATAAN KOHDISTUVAT KUORMITUKSET	26
3.1	Kuormitusten luonne	26
3.2	Pystysuuntaiset kuormitukset.....	28
3.2.1	Kaluston aiheuttama pystysuuntainen kuormitus	29
3.2.2	Pystysuuntaisten kuormitusten jakautuminen ratarakenteessa	30
3.2.3	Rata- ja tierakenteen toiminnan eroavaisuudet	32
3.2.4	Raitiotierakenteessa vaikuttavien pystysuuntaisten kuormitusten laskennallinen määrittäminen	35
3.3	Poikkisuuntaiset kuormitukset	40
3.4	Pituussuuntaiset kuormitukset.....	41
3.5	Ympäristökuormitukset.....	41
4.	BETONIMURSKE VÄYLÄRAKENTEEN MATERIAALINA.....	44
4.1	Betonimurskeen valmistus ja ympäristövaikutukset	44
4.2	Betonimurskeen saatavuus	51
4.3	Betonimurskeen tutkimus ja käyttö Suomessa.....	52
4.4	Betonimurskeen käyttöön liittyvä lainsäädäntö	53
4.5	Betonimurskeen käyttö muissa maissa.....	59
4.6	Betonimurskeen materiaaliominaisuudet	60
5.	BETONIMURSKEEN KÄYTTÖ RAITIOTIERAKENTAMISESSA.....	71
5.1	Raitiotien ja rautatien eroavaisuudet	71
5.2	Betonimurskeen käyttökohteet raitiotierakenteessa	72

5.3	Betonimurskeen käytön vaikutukset rakentamiseen ja muihin rakenteisiin	81
5.3.1	Rakentaminen betonimurskeella ja vaikutukset väylän kunnossapitoon.....	81
5.3.2	Kemialliset ominaisuudet.....	84
5.3.3	Raitiotien hajavirrat.....	86
5.3.4	Tärinä ja runkomelu	87
5.4	Lisätutkimuksen tarve	88
6.	YHTEENVETO	91
	LÄHTEET.....	96

LIITE A: BISAR-laskennan lähtötiedot

LIITE B: BISAR-laskennan tulokset

LIITE C: Kiviainesten vaatimukset eri käyttökohteissa

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AB	Asfalttibetoni
ABK	Kantavan kerroksen asfalttibetoni
BeM	Betonimurske
BISAR	Bitumen Stress Analysis in Roads, tierakenteen analysointiin käytettävä kerroslaskentaohjelmisto
CCAA	Cement Concrete and Aggregates Australia, australialainen sementti-, betoni- ja kiviainesalojen teollisuusjärjestö
CE	Conformité Européenne
COST	European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research, Eurooppalainen tutkijaverkosto
DOC	Dissolved Organic Carbon, liuennut orgaaninen hiili
EAPA	European Asphalt Pavement Association, Eurooppalainen asfalttipäällystealan yritysten järjestö
ELY-keskus	Elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus
EPS	Expanded polystyrene, paisutettu polystyreeni
FHWA	Federal Highway Administration, Yhdysvaltain liittovaltion tieviranomainen
GTK	Geologian tutkimuskeskus
HKL	Helsingin kaupungin liikenneliikelaitos
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä
MARA-asetus	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa
NGWB	New Generation Wide-Based, uuden sukupolven raskaan kaluston leveä yksikkörengas
PAB	Pehmeä asfalttibetoni
PAB-V	Pehmeä asfalttibetoni, sideaineena bitumi V1500 tai V3000 tai niistä tehty bitumiemulsio tai bitumiliuos BL2K
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt
PCB	Polyklooratut bifenyylit
RAMO	Ratatekniset määräykset ja ohjeet, Ratahallintokeskuksen julkaisema ohjeistus rautateihin liittyen
RATO	Ratatekniset ohjeet, Liikenneviraston julkaisemat ohjeet rautateihin liittyen
RHK	Ratahallintokeskus. Vuodesta 2010 alkaen osa Liikennevirastoa.
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
SMA	Kivimastiksiasfaltti
SRS	Suomen Raitiotieseura ry
TCRP	Transit Cooperative Research Program, Yhdysvaltain liittovaltion liikennehallinnon rahoittama liikenneinfrastruktuurin tutkimus- ja kehitysohjelma
TERA	Tutkimusohjelma elinkaaritehokas rata
TKK	Teknillinen korkeakoulu. Nykyisin osa Aalto-yliopistoa
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
UIC	International Union of Railways, Kansainvälinen rautatieliitto
VNa	Valtioneuvoston asetus

VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Vuosina 1942–1972 Valtion teknillinen tutkimuslaitos ja 1972–2010 Valtion teknillinen tutkimuskeskus
XPS	Extruded polystyrene, suulakepuristettu polystyreeni
YVA	Ympäristövaikutusten arviointimenettely
C_u	Raekokosuhde d_{60}/d_{10}
d_{10}	Rakeisuuskäyrän 10 prosentin läpäisyä vastaava raekoko
d_{60}	Rakeisuuskäyrän 60 prosentin läpäisyä vastaava raekoko
E	Kimmomoduuli [MPa]
E_2	Toisesta kuormituskerrasta laskettu kantavuusarvo [MPa]
E_A	Rakennekerroksen alustan kantavuus Odemarkin menetelmässä [MPa]
H_c	Kapillaarisuus [m]
k	Vedenläpäisevyys [m/s]
M_r	Jäykkyyshmoduuli [MPa]
w_{opt}	Optimivesipitoisuus [%]

1. JOHDANTO

Suomessa syntyy vuosittain noin 1,5 miljoonaa tonnia betonijätettä purkutyömailta ja betonituoteteollisuudesta (Vuorinen 2017). Rakennusjätteen hyötykäytön lisäämiseen on pyritty niin kansallisen jätelainsäädännön kuin Euroopan unionin jätedirektiivinkin avulla. EU:n tavoitteeksi on vuonna 2008 laadittuun direktiiviin kirjattu, että kaikesta rakennus- ja purkujätteestä kierrätetään vähintään 70 painoprosenttia vuoteen 2020 mennessä (Euroopan unioni 2008). Suomessa betoni- ja tiilijätteestä tuotettua mursketta on käytetty infrarakentamisessa jo 1990-luvun alkupuolelta saakka.

Lähes kaikki Suomessa kierrätettävä betonijäte käytetään murskeena maarakentamisessa (Vakkuri 2011). Pääasiallinen käyttökohde betonimurskeelle on teiden ja katujen rakennekerrokset (Saarinen 2014). Lisäksi mursketta käytetään esimerkiksi erilaisten kenttien rakenteissa ja kantavuutta vaativissa täytöissä ja penkereissä. Toteutetuista rakenteista saadut käyttökokemukset ovat olleet hyviä (Dettenborn et al. 2015). Rautateiden tai raitioteiden rakenteissa betonimursketta ei tiettävästi vielä ole kuitenkaan käytetty lukuun ottamatta Tampereen raitiotielle vuonna 2017 rakennettua siltaa, jossa sitä käytettiin pengertäytössä.

Betonimurske sopii maarakentamisessa useissa tapauksissa hyvin luonnonkiviaineksen korvaajaksi. Sen työstettävyyttä ei eroa merkittävästi luonnonkiviaineksestä ja ominaisuuksiltaan se on kiviainesta vastaavaa tai jopa parempaa uudelleenlujittumisominaisuutensa ansiosta. Kasvavilla kaupunkiseuduilla kuljetusmatkat soranottoaikoilta tai kalliolouhoksilta ovat nykyisin varsin pitkiä, kun taas betonimursketta löytyy useimmiten suhteellisen läheltä käyttökohdetta. Esimerkiksi kaupunkiemme betonilähiöiden ikäntyminen lisäänee purkubetonin saatavuutta tulevaisuudessa. Kierrätysmateriaalia käyttämällä säästetään luonnonvaroja ja vältetään laadukkaiden materiaalien päätyminen toisarvoisiin kohteisiin tai kaatopaikalle.

Maailmalla on jo usean vuosikymmenen ajan ollut käynnissä raitioteiden uusi tuleminen. Suomessakin on tehty suunnitelmia ja päätöksiä uusien raitioteiden rakentamisesta. Helsingin raitiotieverkkoa on laajennettu kantakaupungissa ja lisäksi on suunnitteilla useita laajennuksia kauemmas lähiöihin ja uusille asuinalueille. Yksi merkittävimmistä lähivuosina toteutettavista liikennehankkeista pääkaupunkiseudulla on Raide-Jokeri, noin 25 kilometrin pituinen kehämäinen yhteys Itä-Helsingin ja Espoon välillä. Alustavan arvion mukaan Raide-Jokerin rakentaminen alkaa vuonna 2019. Tampereella uuden pikaraitiotien ensimmäisen vaiheen rakentaminen alkoi vuonna 2017 ja jatkoa on jo suunnitteilla. Myös Turussa on tehty suunnitelmia raitiotieliikenteen palauttamisesta kaupunkiin.

Ominaisuuksiltaan betonimurske on hyvin väylärakentamiseen sopivaa ja sitä on saatavilla Etelä-Suomen kasvukeskuksissa, joissa on alkamassa monia uusia raideliikennehankkeita. Betonimurskeen soveltuvuudesta ratarakentamiseen ei kuitenkaan ole maassamme kokemusta tai suomenkielistä kirjallisuutta. Nyt onkin erittäin ajankohtaista tehdä tutkimus, jossa tarkastellaan tie- ja katurakentamisessa betonimurskeesta saatuja kokemuksia raitiotierakentamisen näkökulmasta.

Tässä raportissa käydään ensin läpi raitiotien rakennetyyppejä sekä eri rakenneosien kohdistuvia kuormituksia. Tämän jälkeen käsitellään betonimursketta, sen materiaaliominaisuuksia ja soveltuvuutta raitiotierakentamiseen. Työssä esitellään myös niin Suomessa kuin ulkomaillakin betonimurskeen käytöstä saatuja kokemuksia ja tutkimustuloksia. Tutkimuksessa keskitytään betonimurskeen teknisiin ominaisuuksiin. Esimerkiksi ympäristönäkökulmia ja betonimurskeen käyttöön liittyvää lainsäädäntöä käsitellään vain yleispiirteisesti. Tutkimuksessa käsitellään betonimurskeen käyttöä sellaisenaan rakennemateriaalina, ei erityissovelluksia, kuten murskeen käyttöä betonin runkoaineena.

Työn tavoitteena on tuoda esiin betonimurskeen käyttömahdollisuudet raitiotierakentamisessa. Betonimurskeen käytön laajeneminen myös raitiotierakentamiseen lisäisi rakennusjätteiden kierrätystä ja vähentäisi rakentamisen negatiivisia ympäristövaikutuksia. Betonimurskeen hyödyntäminen kohteissa, joissa sen hyviä materiaaliominaisuuksia voidaan hyödyntää täysimääräisesti, on järkevintä käyttöä tälle laadukkaalle rakennusmateriaalille. Usein betonimursketta käyttämällä voidaan luonnonvarojen säästymisen lisäksi saavuttaa myös taloudellisia säästöjä.

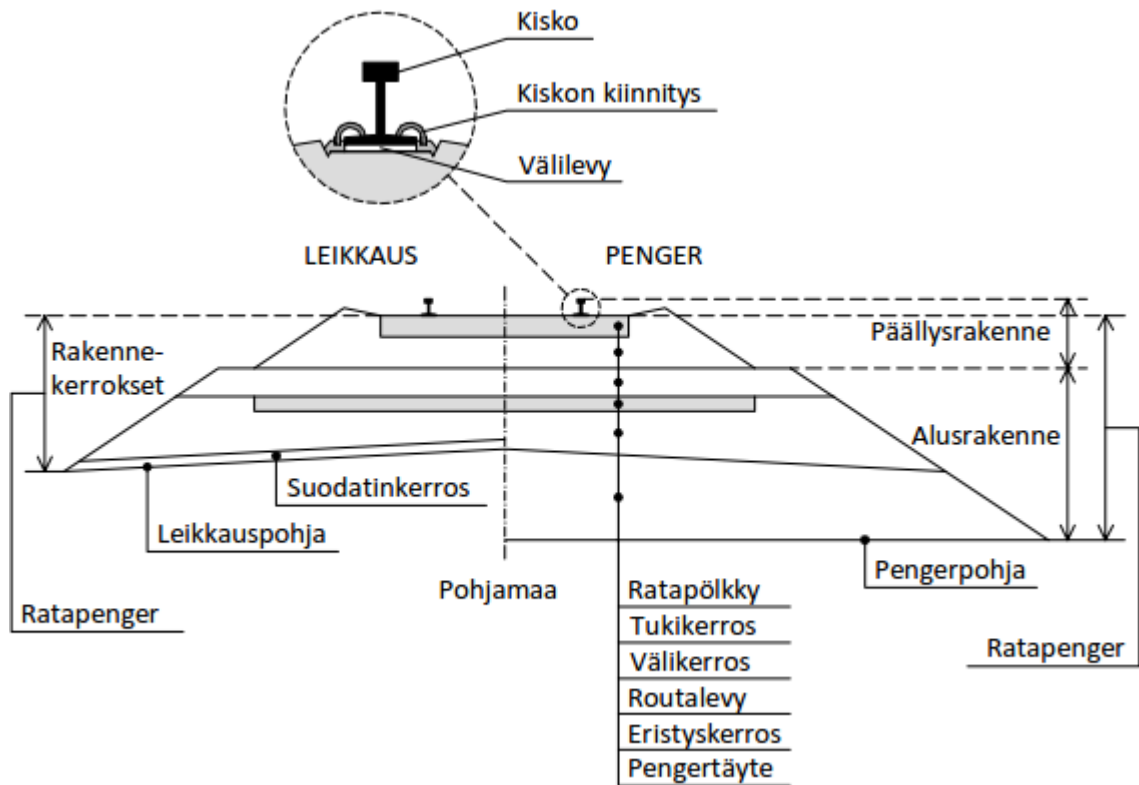
2. RAITIOTIEN RAKENNE

Raitioteiden perinteinen toiminta-alue on tiiviisti rakennetuissa kaupunkikeskustoissa, mutta pikaraitioteiden muodossa ne ovat laajentuneet myös pidemmille, suuremmilla nopeuksilla ajettaville lähiölinjoille. Joillakin kaupunkiseuduilla on päädytty jopa ratkaisuun, jossa raitiovaunuliikennöintiin käytetään erillisten raitioteiden lisäksi rautateitä. Erilaisten liikenneympäristöjen vuoksi raitiotieradoilla on käytössä useita erilaisia rakennetyyppejä. Radat jakautuvat rakenteensa perusteella kahteen päätyyppiin, perinteiseen sepelitukikerroksella varustettuun raiteeseen ja betonilaatan päälle asennettavaan kiintoraiteeseen.

2.1 Tukikerroksellinen rata

2.1.1 Tukikerroksellisen radan rakenneosat

Rautateillä tavallisimmin käytössä oleva ratarakenne koostuu kiviaineksesta tehdystä ratapenkereestä ja sen päälle asennettavista ratapölkyistä ja kiskoista kiinnityskomponentteineen. Raitioteilla rakennetta voidaan käyttää raitiotien ollessa linjattuna erilliselle väylälle rautateiden tapaan. Esimerkiksi Tampereen raitiotien ratapituudesta noin kolmannes tulee olemaan sepeliraidetta (Raitiotieallianssi 2016b). Kuvassa 2.1 on esitetty tukikerroksellisen radan rakenneosat. Kaikkia kuvassa näkyviä komponentteja ei välttämättä käytetä aina ratarakenteessa. Tukikerroksellinen ratarakenne voidaan jakaa päällys- ja alusrakenteeseen kuvan osoittamalla tavalla.



Kuva 2.1 Sepelirakenteisen ratapenkereen osat. Mukailten lähteestä Liikennevirasto 2018.

Rautateillä käytettävässä termistössä päällysrakenteella tarkoitetaan kuvassa 2.1 esitetyn mukaisesti kiskoa, ratapölkkyä, niihin liittyviä komponentteja sekä tukikerrosta. Muut rakennekerrokset pengertäytettä lukuun ottamatta kuuluvat alusrakenteeseen. Tämä eroaa tie- ja katumaailmassa käytettävästä tavasta sisällyttää kaikki rakennekerrokset päällysrakenteeseen ja vain pohjamaa sekä mahdollinen pengertäyte alusrakenteeseen. Raitioiteilla käytetään seplitukikerroksellisella raiteella rautateiden nimityksiä rakennekerroksille. Myös kiintoraiteella laatan alapuolisia rakennekerroksia kutsutaan radan alusrakenteeksi, mutta rakennekerroksista käytetään usein katurakenteen mukaisia nimityksiä. Alusrakenne voidaan toteuttaa samoilla komponenteilla riippumatta siitä, onko raide seplitukikerroksellinen vai kiintoraide.

2.1.2 Kisko

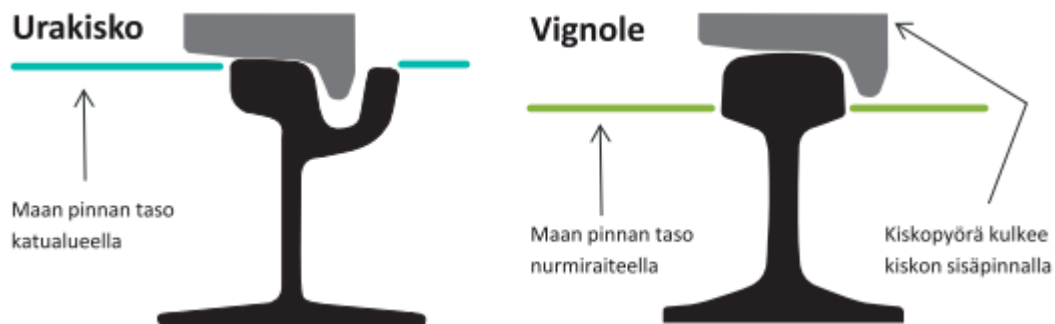
Ratarakenteen päällimmäisin osa on kisko. Se on rakenteen ainoa komponentti, joka on kosketuksessa radalla kulkevaan kalustoon. Täten sillä on erittäin suuri merkitys radan toimivuuteen ja ominaisuuksiin. Kiskon tehtävänä on mahdollistaa raitiovaunun tasainen kulku ratarakenteen päällä ja siirtää niiden kuormitukset alemmille rakennekerroksille.

Kiskoja valmistetaan erityyppisillä profiileilla, joista tukikerroksellisen ratarakenteen yhteydessä käyttökelpoisia ovat leveällä jalkaosalla varustetut Vignole- tai urakiskot.

Kiintoraiteille on lisäksi kehitetty joitakin jalattomia kiskotyyppisiä, jotka asennetaan jatkuvasti tuettuina laattarakenteen päälle. Suomessa rautateillä käytettävät kiskot ovat lähes yksinomaan Vignole-tyyppisiä (Ratahallintokeskus 2002). Urakiskoä käytetään vain poikkeustapauksissa, kuten esimerkiksi kuormauskentillä, joissa raiteiden päällä kulkee muutakin kuin kiskokalustoa.

Vignole-kiskoprofiili voidaan jakaa kolmeen osaan, joista jokaisella on oma roolinsa kiskon toiminnassa. Kiskon yläosassa on massiivinen hamara, jonka muotoilulla pyritään takaamaan mahdollisimman hyvä kontakti pyörän ja kiskon välillä kaikissa tilanteissa. Hamarassa on myös oltava riittävästi kulumisvaraa. Hamaran alapuolella kiskossa on varsi, joka antaa kiskolle taivutusjäykkyyttä pystysuunnassa ja lisää varmuutta kiepahdusta vastaan. Kiskon tyvessä varsi kiinnittyy kiskon jalkaan, jonka tehtävänä on pitää kisko pystyssä raiteella liikkuvan kaluston aiheuttamien kuormitusten alaisena ja jakaa nämä kuormitukset riittävän laajalle alueelle ratapölkyn yläpinnassa. Jalkaosaa antaa kiskolle myös taivutusjäykkyyttä sivuttaissuunnassa. (Esveld 2001)

Urakisko sisältää samat rakenneosat kuin Vignole-kiskokin, mutta siinä on lisäksi hamaran rinnalla vastakisko ja näiden väliin muodostuva laippaura. Kuvassa 2.2 on esitetty Vignole- ja urakiskon poikkileikkausprofiilit. Kuvassa nähtävä Vignole-kiskon asennustapa on Tampereen raitiotiellä nurmiraideosuuksilla käytettävä rakenne, jossa nurmen kasvualusta rakennetaan kiskon hamaraan asti (Raitiotieallianssi 2016b).



Kuva 2.2 Urakiskon ja Vignole-kiskon profiilit (Raitiotieallianssi 2016b).

Nykyisin rautateillä käytetään pääasiassa jatkuvakiskoraidetta, jossa kiskon kappaleet liitetään hitsaamalla kiinteästi yhteen jopa kilometrejä pitkiksi kokonaisuuksiksi (Kauppinen 2011). Jatkuvakiskoraiide yleistyy myös nykyaikaisilla raitiotieillä ja esimerkiksi Tampereen raitiotie toteutetaan kulkutieraideiden osalta täysin jatkuvaksi hitsattuna (Raitiotieallianssi 2016a).

2.1.3 Kiskon kiinnitys

Kiskon asennon säilyttämiseksi haluttuna tulee se kiinnittää ratapölkkyyn. Kiskon kiinnitys tukee kiskon ratapölkkyä vasten ja estää sen sivuttaissiirtymisen tai kaatumisen radalla liikkuvan kaluston aiheuttamien kuormien vaikutuksesta. Kiinnityksen tärkeänä

tehtävänä on myös kiskon lämpötilan muutoksista aiheutuvien kiskon liikkeiden vastustaminen.

Kiskon kiinnittämiseen ratapölkkyyn on olemassa useita menetelmiä. Nykyisin Suomessa käytetään betoniratapölkkyillä lähinnä Vossloh Skl 14 (kuva 2.3) ja Pandrol e-clip -jousikiinnittimiä (Rantala et al. 2013). Näistä Vosslohin malli on pääasiainen kiinnitinmalli uusien betoniratapölkkyjä hankittaessa, kun taas Pandrolia käytetään vain korvattaessa pienehköjä määriä ratapölkkyjä rataosilla, joilla kiskonkiinnitysmenetelmänä on e-clip. Suomessa uusien ratapölkkyjen asennuksessa sallittuja kiskonkiinnityksiä ovat myös Schwihag W 14 900 NT, Pandrol Fastclip (e-clipin seuraaja) ja Vossloh W 21. Tampereen uudella raitiotiellä käytettäväksi kiskonkiinnitysjärjestelmäksi on sepeliraideosuuksilla valittu Vossloh Skl 14 (Raitiotieallianssi 2016a).



Kuva 2.3 Vossloh W 14 -kiskonkiinnitysjärjestelmä, jossa Vossloh Skl 14 -kiinnitinjousi (Vossloh 2017).

Puisten ratapölkkyjen kanssa on useimmiten käytettävä kiskon alapuolelle asennettavaa metallista aluslevyä, jonka tehtävänä on antaa kiskolle oikea kallistus ja jakaa ratapölkkyyn kohdistuvat kuormat riittävän laajalle alueelle (Ratahallintokeskus 2002). Betonipölkkyjen kanssa erillistä aluslevyä ei yleensä tarvita, vaan pölkky itsessään on muotoiltu pitämään kiskot oikeassa kaltevuudessa ja jakamaan kuormat riittävän tasaisesti.

2.1.4 Välilevy

Välilevy on kiskon ja ratapölkyn väliin asennettava joustava levy, jonka tehtävänä on siirtää ja jakaa kiskon jalasta välittyvät kuormitukset pölkylle sekä vaimentaa korkeataajuuksisia dynaamisia voimia (Esveld 2001). Lisäksi välilevy vähentää kiskon jalan ja ratapölkyn välisen kontaktipinnan kulumista, varmistaa riittävän sähköneristyksen ja vähentää radalla liikkuvasta kalustosta ympäristöön aiheutuvaa tärinää (Selig & Waters 1994). Välilevy voidaan valmistaa esim. luonnonkumista, korkkikumista eli korkin ja kumin yhdistelmästä, etyyli-vinyyliasetaatista tai erilaisista polymeereistä (Esveld 2001). Levyn pinnat voidaan kuvioida.

2.1.5 Ratapölkky

Ratapölkky on radan rakenteen osa, jonka välityksellä kiskolta tulevat kuormat siirtyvät tukikerrokseen. Ratapölkyn tulee kestää kiskokaluston kuormitukset ja siirtää ne mahdollisimman tasaisesti tukikerrokselle. Pölkky toimii kiinnitysalustana kiskolle kiinnikkeeseen ja jakaa niiden kuormituksen suuremmalle alueelle. Pölkyn tulee pitää kisko halutussa kaltevuudessa ja säilyttää haluttu raideleveys. Pölkyn on vastustettava kiskon pituus-, sivu- ja pystysuuntaisia liikkeitä ja säilyttävä käyttökuntoisena mekaanisten ja ympäristörasitusten alaisena koko käyttöikänsä ajan. Sähköistetyllä radalla ratapölkky toimii myös osana eristystä kiskon ja tukikerroksen välillä. (Esveld 2001)

Ratapölkkyjen yleisimmät materiaalit ovat betoni ja puu, Suomessa mänty (Rantala et al. 2013). Maailmalla on käytetty suhteellisen vähäisissä määrin myös terästä ja erilaisia synteettisiä materiaaleja. Suomessa esijännitetty betoniratapölkky on nykyisin rautateiden pääasiallinen ratapölkkytyyppi. Vuonna 2016 76 % rataverkosta oli varustettu betonipölkkyraiteella (Liikennevirasto 2017a). Kuitenkin edelleen noin neljännes raiteista on varustettu puisilla ratapölkkyillä ja uusia puuratapölkkyjä valmistetaan yhä VR Track Oy:n Haapamäen kyllästämöllä. Betonisia ratapölkkyjä valmistetaan Suomessa kahdessa paikassa, Parma Oy:n tehtaalla Forssassa ja Lujabetoni Oy:n tehtaalla Siilinjärvellä.

Euroopan unionissa tulee todennäköisesti keväällä 2018 voimaan kreosootin käyttökielto myös ratapölkkyjen kyllästämisessä. Kiellon myötä puisten ratapölkkyjen käyttö Suomessa luultavasti loppuu, sillä kyllästäättöminä täällä käytössä olevien mäntypölkkyjen käyttöikä ratarakenteessa jää huomattavan lyhyeksi. Ratapölkkyjen kreosoottikyllästäminen aloitettiin Suomessa vuonna 1904. Tätä ennen käytetyt kyllästäättömät puuratapölkkyt kestivät käyttökuntoisina soratukikerroksessa alle viisi vuotta, kun kyllästettyjen pölkkyjen suunniteltu käyttöikä raiteessa on noin 35 vuotta. Sepelitukikerroksessa puupölkkyjen käyttöikä on pidempi tukikerroksen suuremman vedenläpäisevyyden ansiosta. Korvaavia kyllästämisaineita ja muita puuratapölkkyjen käsitteilymenetelmiä on tutkittu, mutta kokemukset eivät tähän mennessä ole olleet riittävän hyviä. Mäntyä korvaavat kovapuulajit taas ovat yleensä peräisin sademetsistä eikä niiden käyttö ole kestävien ympäristö- ja eettisyysperiaatteiden mukaista. (Toikkanen & Lilja 2012)

Puisten ratapölkkyjen korvaamista betonisilla vaikeuttavat pölkkytyyppien hyvin erilaiset mekaaniset ominaisuudet. Puinen pölkky on betonista joustavampi ja se kestää toistuvaa taivutusta ilman merkittävää väsymistä (Smith 2007). Tämän takia yksittäisiä puisia tai betonisia pölkkyjä ei yleensä voi vaihtaa ristiin. Korvattaessa yksittäinen puupölkky betonipölkkyllä voi siihen kohdistua liian suuria kuormituksia kiskokaluston ylityksen aikana. Erilaisten pölkkytyyppien käyttö vaikeuttaisi myös raiteen tukemista pölkkyjen erilaisten korkeus- ja leveysmittojen vuoksi (RHK 2002).

Puisten pölkkyjen käytöstä onkin voitu siirtyä betonisiin vain varsin laajamittaisten kunnostustöiden yhteydessä. Viime vuosina on kuitenkin kehitetty betonipölkkyä, jotka vastaavat jousto-ominaisuuksiltaan puupölkkyä. Esimerkiksi Turun ja Uudenkaupungin välisellä rautatiellä on vuodesta 2013 lähtien ollut koekäytössä betoniratapölkkyjä, joissa pölkkyyn tehdyillä säröillä pyritään saamaan sen dynaaminen käytös vastaamaan puupölkkyä (Nummelin 2014). Lupaavia tuloksia puupölkkyä korvaavien betonipölkkyjen käytöstä on saatu myös esimerkiksi Ruotsissa ja Australiassa (Rantala et al. 2013).

Usein puisilla ratapölkkyillä varustetun radan tukikerrosmateriaalina on raidesora. Perinteisten betoniratapölkkyjen ei ole katsottu soveltuvan käytettäväksi soratukikerroksen yhteydessä. Tällä hetkellä Suomen rautateiden suunnittelussa käytettävän ohjeistuksen mukaan sorasta tehdyn tukikerroksen yhteydessä on aina käytettävä puuratapölkkyjä (RHK 2002). Sepeliradalla voidaan käyttää sekä puisia että betonisia pölkkyjä. Puinen ratapölkky ei muotoilunsa ansiosta tunkeudu tukikerroksen rakenteeseen betonipölkyn tavoin ja näin ollen soveltuu betoniratapölkkyä paremmin soratukikerrokselliselle radalle (Rantala et al. 2013). Lisäksi epäilyksiä on aiheuttanut betonipölkyn mahdollinen halkeilu soratukikerroksessa liikennekuormituksen alla tapahtuvien muodonmuutosten vaikutuksesta.

Vanhojen soratukikerroksellisten ratojen parantamista varten betonipölkkyistä on kehitetty erityisesti niille tarkoitettuja, erikoismuotoiltuja versioita. Tampereen teknillisellä yliopistolla (TTY) vuosina 2009–2012 toteutetun Elinkaaritehokas rata (TERA) -tutkimusohjelman yhteydessä käsiteltiin erilaisten betoniratapölkkyjen toimivuutta soraraitella (Kerokoski et al. 2013). Tehtyjen laboratoriotutkimusten ja koekohteen seurannan perusteella saatiin vahvoja viitteitä jopa tavanomaisten betoniratapölkkyjen varsin hyvästä toimivuudesta myös soratukikerroksella.

2.1.6 Pohjain

Ratapölkyn alapintaan on mahdollista asentaa joustoelementti, pohjain, parantamaan päällysrakenteen pysyvyyttä ja runkomelun eristystä (RHK 2008). Pohjain on samantyyppinen tuote kuin kiskon ja pölkyn väliin asennettava välilevy. Se voidaan valmistaa erilaisista materiaaleista, kuten luonnonkumista, polyuretaanista, korkkikumista tai etyyli-vinyylisetaatista (UIC 2009). Pohjain valmistetaan usein komposiittirakenteisena levynä, jossa pölkkyä vasten on pehmeä vaimenninosa ja tukikerroksen teräväreunaisia murskepartikkeleita vasten kova suojakerros. Pohjain voidaan asentaa ratapölkkyyn tehtaalla pölkyn valmistuksen yhteydessä tai vasta valmiiseen pölkkyyn. Kuvassa 2.4 on nähtävissä pohjaimen sijainti ratapölkyn alapinnassa.



Kuva 2.4 Pohjaimen asennuspaikka ratapölkyn alapinnassa (Getzner 2017a).

Pohjaimen vaikutus sepelitukikerroksen pysyvyyden parantamiseen perustuu sen aikaansaamaan pölkyn ja raideseppelin välisen kosketuspinta-alan kasvuun. Normaalisti pölkyn alapinnasta noin 5–9 prosenttia on kosketuksissa tukikerroksen kivirakeisiin. Pohjaimen joustava materiaali lisää kosketuspinta-alaa noin 35 prosenttiin. Kuormituksen jakautuminen suuremmalle pinta-alalle vähentää tukikerroksen jauhautumista ja näin lisää sen käyttöikä. (RHK 2008)

Muita pohjaimen käyttöä puoltavia perusteluja ovat esimerkiksi jäykkyyserojen tasaminen ratarakenteen epäjatkuvuuskohdissa, kiskoon ja pölkkyyn kohdistuvien jännitysten pienentäminen ja kunnossapitotarpeen pienentäminen. Pohjaimen avulla voidaan myös ohentaa tukikerroksen paksuutta ja näin alentaa ratarakenteen vaatimaa korkeussuuntaista tilaa kriittisissä paikoissa tai parantaa radan geometriaa. (UIC 2009)

2.1.7 Tukikerros

Tukikerroksen tehtävänä on nimensä mukaisesti tukea ratapölkky ja kiskot geometrisesti oikeaan asemaan ja asentoon. Se jakaa ratapölkyltä tulevat kuormat alusrakenteelle ja muodostaa raiteelle tasaisen ja kantavan alustan. Tukikerros voidaan tehdä joko sepelistä tai sorasta. Rautateillä suurin osa Suomen päärataverkosta on sepeliraidetta, soran ollessa sallittu tukikerrosmateriaali vain alimmilla rataluokilla. (RHK 2002)

Tukikerros on radan rakennekerroksista päällimmäisin, joten siihen kohdistuu niistä suurimmat kuormitukset radan liikennekuormista. Tukikerroksella on suuri merkitys radan päällysrakenteen toimivuuteen ja ratageometrian pysyvyyteen. Radan tukikerroksen sepelin vaatimustaso onkin maarakentamisessa käytettävistä murskeista korkeimpia. Tukikerroksen materiaalin tulee kestää hyvin iskuja ja hiovaa kulutusta, eikä se saa olla herkkä rapautumaan. Murskeen tulee olla raekooltaan hyvin vettä läpäisevää ja sen huokostilavuuden tulee olla riittävä, jotta siitä irtoava tai siihen kulkeutuva hienoaines voi

valua kerroksen pohjalle. Tukikerroksen on oltava huonosti sähköä johtava ja sen huuspitoisuuden tulee olla vähäinen. (Kolisoja et al. 1999)

Tukikerroksen alapuolella voidaan erikoistilanteissa käyttää myös alusmattoja ylimääräisenä melun- tai värinävaimennuksena. Tukikerroksen alusmaton käytöllä pyritään useimmiten vaimentamaan runkomelua. Siltojen kohdalla maton avulla voidaan alentaa rakenteen jäykkyyttä. Kuvassa 2.5 on esitetty alusmaton sijainti betonikaukalarakenteeseen asennettuna. (Peltokangas et al. 2013)



Kuva 2.5 Tukikerroksen alusmatto (Getzner 2017b).

Tukikerroksen alusmatto voidaan valmistaa esimerkiksi luonnonkumista, polyuretaanista tai polyeteenistä. Mineraalivillapohjaisia materiaaleja on käytetty runkomeluneristyksessä. Myös kappaleisista materiaaleista, kuten kierrätetyistä autonrenkaista valmistetusta rouheesta voidaan tehdä alusmattoja sitomalla kappaleet yhteen sideaineella. Maton paksuus on tyypillisesti 15–40 mm kumi- ja polymeerimatoilla. Mineraalivillamatot ovat paksumpia, jopa lähes 100 mm paksuisia. (Peltokangas et al. 2013; Esveld 2001)

2.1.8 Alusrakenne

Radan alusrakenteen päällimmäinen kerros on välikerros. Sen tehtävänä on muodostaa päällysrakenteelle tasainen ja kantava alusta sekä estää tukikerrosmateriaalin sekoittuminen alapuolisiin rakennekerroksiin. Välikerros on tyypillisesti 300 mm paksuinen. Välikerroksen alapuolella sijaitsevan eristyskerroksen tehtävänä on estää tai vähentää sen alapuolisten maakerrosten routimista, muodostaa välikerrokselle tasainen ja kantava alusta sekä siirtää ja jakaa välikerrokselta tulevat kuormat pohjamaalle tai suodatinkerrokselle. Eristyskerroksen paksuus vaihtelee radan routamitoitusvaatimusten mukaan muutamasta sadasta millimetristä aina kahteen metriin saakka. (Liikennevirasto 2018; Kalliainen et al. 2014)

Väli- ja eristyskerrosten materiaalina voidaan InfraRYL-laatuvaatimusjärjestelmän mukaan käyttää routimatonta hiekkaa, soraa tai kalliomurskettä. Mikäli eristyskerros teh-

dään kalliomurskeesta, on myös välikerros rakennettava samanaikaisesti samasta murskeesta. (Rakennustieto 2017)

Maailmalla on käytössä myös rakenteita, joissa sitomattoman tukikerroksen alapuolella on asfalttibetonista tehty sidottu kerros. Tällaisella ratkaisulla pyritään parantamaan radan kantavuutta ja tasaamaan pohjamaahan kohdistuvia kuormituksia. Sidottu kerros tukikerroksen alla lisää rakenteen pysyvyyttä mahdollistaen kuitenkin sen yläpuolisten kerrosten kunnossapidon tavanomaisin menetelmin. Laajimmin asfalttisella tukikerroksen alapuolisella rakennekerroksella toteutettua rataa on käytössä Italiassa ja Yhdysvalloissa. (Esveld 2001; Lyly 2004)

Suomessakin on tehty joitakin koekohteita tukikerroksen alapuolisella asfalttibetonikerroksella. Asfalttirakenteella on pyritty lähinnä radan kantavuuden parantamiseen. Kohteet ovat olleet esimerkiksi vaihteiden ja vaunuvaakojen pohjarakenteita ratapihoilla sekä rataoikaisuja tai vanhojen ratojen parantamisia. Menetelmä ei ole laajamittaisessa käytössä, mutta esimerkiksi Lyly (2004) on diplomityössään selvittänyt käyttökokeuksia asfalttirakenteesta radan kantavuuden parantamismenetelmänä Suomesta ja maailmalta ja arvioi sen soveltuvan hyvin myös suomalaisiin olosuhteisiin.

Asfalttibetonikerroksen vaikutusta junaliikenteen aiheuttamiin tärinäihin on tutkittu ainakin vuonna 2004 toteutetussa koekohteessa. Lylyn diplomityössä suunnitellussa kohteessa pyrittiin vähentämään pehmeiköllä sijaitsevan radan ympäristöönsä aiheuttamia tärinöitä. Toteutettu rakenne koostuu radan tukikerroksen alapuolelle tehdystä 80–160 mm paksuisesta asfalttibetonikerroksesta ja sen alapuolisesta 400 mm komposiittistabiloinnista. Tällä rakenteella ei kuitenkaan tärinämittauksilla havaittu olevan merkittävää vaikutusta ympäristöön välittyvään tärinään. (Lyly 2004; Hakulinen 2004)

Ratarakenteen alimmainen osa on suodatinkerros, jonka tarkoituksena on estää eristyskerroksen ja pohjamaan sekoittuminen. Suodatinkerros myös katkaisee veden kapillaarisen nousun ratarakenteeseen. Mikäli erillistä suodatinkerrosta ei rakenneta, tulee eristyskerroksen toimia myös suodatinkerroksena. (Liikennevirasto 2018)

Ratarakenteeseen voidaan asentaa routalevytyt välikerroksen alle tai päälle. Routalevyjä käytetään estämään roudan tunkeutumista rakennekerrokseen silloin, kun kerrosten yhteispaksuus ei riitä eristämään routivaa pohjamaata tai pengermateriaalia tarpeeksi. Rautateilla routalevymateriaalina käytetään nykyisin suulakepuristettua polystyreeniä (XPS), mutta vanhoilta radoilta saattaa vielä löytyä aiemmin käytettyjä paisutetusta polystyreenistä (EPS) valmistettuja levyjä (Nurmikolu & Kolisoja 2001). Routalevyjen asentaminen välikerroksen alapuolelle parantaa niiden mekaanista kestävyyttä, sillä tällöin levyjä suojaa hiekkakerros teräviltä murskerakeilta sekä ylä- että alapuolella. Tämä asennustapa ei kuitenkaan ole mahdollinen olemassa olevaa raidetta kunnostettaessa ilman yläpuolisten raiderakenteiden purkamista. Välikerroksen yläpuolelle routalevytyt on mahdollista asentaa raideseppelin seulonnan yhteydessä. Uusilla radoilla routalevyjä

käytetään vain erikoistapauksissa ja niiden käyttö vaatii aina Liikenneviraston luvan (Liikennevirasto 2018). Ensisijaisesti uusi rata perustetaan roudattomaan syvyyteen asti.

2.1.9 Pohjamaa

Radan alapuolella vallitsevilla pohjaolosuhteilla on suuri merkitys radan rakenteeseen ja toimintaan. Radan kokonaisjäykkyyteen pohjamaalla on kaikista radan komponenteista merkittävin vaikutus (Peltokangas et al. 2013). Ratarakenne voi olla perustettu joko pengertäytteen, maakerrosten tai kallion päälle. Pengertäytteen materiaali voidaan uusia ratoja rakentaessa valita, mutta paikalla olevia maalajeja ei. Tarvittaessa pohjamaata onkin vahvistettava tai suoritettava massanvaihtoa liiallisten muodonmuutosten ehkäisemiseksi. Toimenpiteiden tarpeellisuus selvitetään pohjatutkimuksilla, kuten kairauksilla ja maanäytteistä tehtävillä laboratoriokokeilla. Kuormituksia pohjamaahan kohdistuu sekä ratarakenteen omasta painosta että liikenteestä.

Radan geometrian pysyvyys on raideliikenteen turvallisuuden ja matkustusmukavuuden kannalta hyvin tärkeää. Tämän takia painumat ja etenkin niiden tasaisuus on huomioitava radan suunnittelussa. Esimerkiksi Tampereen raitiotiellä sallitaan korkeintaan 0,3 % muutos pituuskaltevuudessa 0–2 vuoden sekä 2–9 vuoden aikana rakentamisesta (Raitiotieallianssi 2016a). Poikkikaltevuudessa suurin sallittu muutos on 0,6 % samoina aikaväleinä. Samat raja-arvot ovat käytössä rautateillä alusrakenneluokan 1 radoilla (Liikennevirasto 2018). Alusrakenneluokkia on tasoilla 0–4, luokan 4 ollessa vaatimuksiltaan korkein. Tiesuunnittelussa Liikenneviraston suosittelemat kaltevuuden enimmäismuutokset 30 vuoden aikana ovat pituussuunnassa 0,4–0,9 % ja poikkisuunnassa 1,0–2,0 % riippuen tien toiminnallisesta luokasta (Tammirinne 2002). Alimpien tasojen teille ei poikkisuuntaiselle kaltevuudenmuutokselle ole asetettu enimmäisarvoa.

Painumien suuruuteen merkittävin vaikutus on radan pohjamaalla. Pohjamaan kantavuus riippuu alueen pohjasuhteista, jotka voivat vaihdella kalliroleikkauksesta aina hyvin pehmeisiin savi- tai turvekerroksiin asti. Riittävän kantavuuden omaavilla pohjamailla rata voidaan perustaa maanvaraisesti, mutta maaperän koostuessa huonosti kantavista maakerroksista voidaan joutua käyttämään erilaisia menetelmiä ratapohjan kantavuuden parantamiseksi. Pehmeän maakerroksen lujutta voidaan lisätä massa- tai syvästabiloinnilla tai se voidaan korvata paremmalla maa-aineksella suorittamalla massanvaihtoa. Ratapohjan painumista voidaan myös saada aikaan hallitusti esirakennusvaiheessa esimerkiksi syvätiivistyksen tai esikuormituspenkereiden avulla. Syvillä pehmeiköillä voi taloudellisin ratkaisu olla paalulaatan rakentaminen radan alle.

Painumien lisäksi pohjamaa vaikuttaa ratarakenteen stabiiliteettiin. Alhainen stabiiliteetti on ongelmana lähinnä penkereelle perustetuilla radoilla, sillä maan pinnan tasossa olevalla radalla ympäröivät maamassat tukevat rakennetta. Suomessa routamitoitus ohjaa käyttämään varsin suuria rakennekerrospaksuuksia, joten yleensä radat ovat pengerrakenteisia.

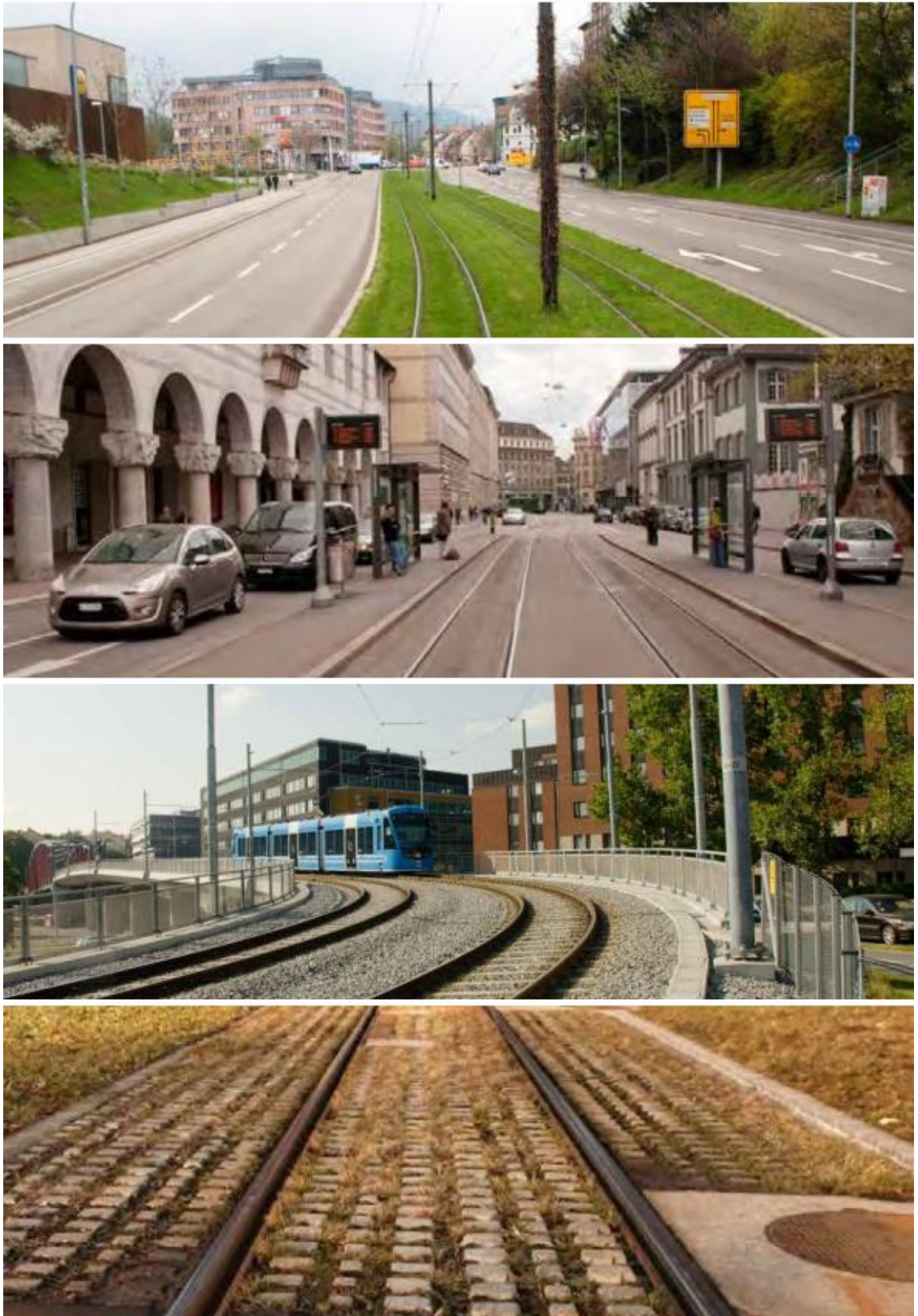
2.2 Kiintoraiderata

2.2.1 Kiintoraideradan rakenneosat

Nykyisen ajattelumallin mukaan raitiotie pyritään erottamaan muusta katuliikenteestä omille väylilleen, mutta tiiviisti rakennetussa kaupunkiympäristössä tilanpuute johtaa usein sekaliikennekaistojen käyttöön. Väylä, jossa kulkee sekä raitiovaunuja että muuta katuliikennettä edellyttää upotettua raiderakennetta. Upotettu raide on mahdollista toteuttaa ratapölkyillä ja tukikerroksella varustetulla rakenteella, mutta tällöin tulisi siihen lisätä jonkinlainen kantava päällyslaatta kumipyöräliikennettä varten (Esveld 1997). Tällaisen rakenteen korjauskustannukset nousisivat varsin suuriksi, joten perinteiset katuraitiotiet onkin tavallisesti toteutettu kiintoraiteisina. Esimerkiksi Helsingin raitioteillä betonilaatan päälle asennettu raide on ainoa suunnitteluohjeessa esitetty rakenne (HKL 2016). Raitioteiden lisäksi maailmalla on käytössä myös kiintoraiteella toteutettuja rautateitä, useimmiten erittäin nopean liikenteen rataosuuksilla tai erikoiskohteissa, kuten tunneleissa tai silloilla (RHK 2008).

Kiintoraiteessa kiskot asennetaan sepelitukikerroksen sijaan betonista valettavan laatan varaan. Asennusmenetelmiä ja rakennetyyppejä on olemassa useita erilaisia. Betonilaatta voidaan toteuttaa joko paikalla valettuna tai valmiista elementeistä kasattuna. Lisäksi maailmalla on tehty kokeiluja myös käyttämällä paksua asfalttibetonikerrosta raiteen pohjalaattana (EAPA 2014).

Eräs raitioteillä yleisesti käytetty raidetyyppi on nurmiraide. Nurmetus vaatii radan päällimmäiseksi kerrokseksi kiskojen ympärille kasvualustan. Kasvualustan toteutus sepelitukikerrokselliselle radalle olisi ongelmallista tukikerrosmaterian ja raidesepelin sekoittumisen vuoksi. Esimerkiksi Tampereen raitiotiellä tullaan nurmiradat rakentamaan kiintoraiteena (Raitiotieallianssi 2016b). Helsingin raitioteillä käytetään eräänlaista nurmiraiteen ja suljetun raiteen välimuotoa, nurmikivipäällysteistä raidetta. Siinä kiintoraiteen päällysteenä on betonikivistä tehty osittain avoin pinta, joka mahdollistaa ruohon kasvun betonikivien välistä. Tällainen rakenne sallii myös raitiotieväylän käytön poikkeustapauksissa kumipyöräisille ajoneuvoille, esimerkiksi hälytystehtävissä oleville pelastusajoneuvoille. Kuvassa 2.6 on esitetty erilaisia raitiotien pintarakenteita.



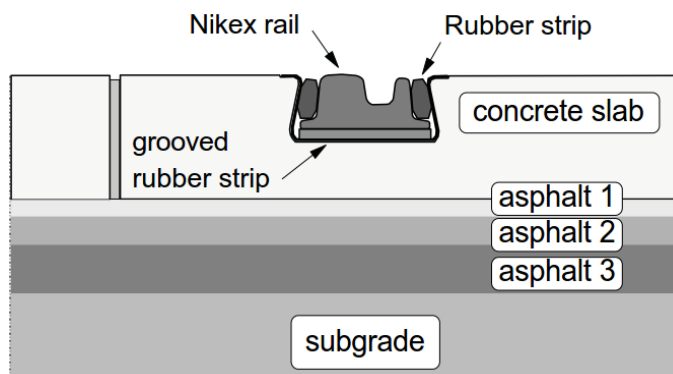
Kuva 2.6 Erilaisia raitiotien pintarakennetyyppejä: nurmetettu rata, asfalttipäällysteinen rata, sepelirata sekä nurmikivetty rata (Turun kaupunki 2015).

2.2.2 Kisko

Raitioteillä yleisin kiskotyyppi on urakisko. Myös Vignole-tyyppistä kiskoa voidaan käyttää, mutta usein katuun upotetun raiteen käyttö ohjaa urakiskon valintaan. Urakiskon uran pohjalle porattavien reikien kautta voidaan kerätä siihen valuvat hulevedet viemäriin ja käyttää sitä osana kadun kuivatusjärjestelmää. Urakiskoilla toteutettu katuun upotettu raide on myös hyvin katuliikenteen kuormitusta kestävä. Kiskojen väliin tehtävä päällyste on helppoa ulottaa suoraan urakiskon reunaan. Vignole-kiskoa käytettäessä tulisi tässä tilanteessa käyttää muotteja laippauran muotoilua varten, mikä lisää rakentamisen kustannuksia. Myös päällysteeseen muodostuvan reunan kestävyys katuliikenteen kuormituksen alaisena olisi kyseenalainen. (TCRP 2012)

Helsingin raitiotieverkko on toteutettu linjaliikenneverkon osalta kokonaan urakiskoilla (SRS 2017b). Tampereen raitiotie tullaan toteuttamaan osittain urakiskoilla ja osittain Vignole-kiskoilla (Raitiotieallianssi 2016b). Urakiskoa käytetään upotetuilla raideosuuksilla päällystettäessä kiskojen ympäristö asfaltilla tai kiveyksellä. Vignole-kiskoa käytetään sepeli- ja nurmiraitteilla. Nurmiraitteella nurmen kasvualustan yläpinta tulee kiskon hamaran alaosaan asti, eli kisko upotetaan lähes kokonaan maan pinnan tason alapuolelle.

Vignole- ja urakiskojen lisäksi maailmalla on kiintoraiteilla käytössä myös aivan erityyppisiä kiskomalleja. Esimerkiksi Unkarissa, Alankomaissa ja Yhdysvalloissa on käytetty jonkin verran urakiskotyyppiä, jossa ei ole lainkaan varsiosaa, vaan kiskon hamara ja jalka ovat yhdistetty kuvan 2.7 mukaisesti (Esveld 1997). Tällä kiskotyypillä ei tietävästi ole suomenkielistä nimeä, englanninkielisessä kirjallisuudessa sitä kutsutaan block- tai Nikex-kiskoksi. Toinen vastaavaa periaatetta hieman erilaisella kiinnitysrakenteella hyödyntävä kiskotyyppi on kuvassa 2.8 esitetty, Isossa-Britanniassa kehitetty LR55-kisko.



Kuva 2.7 Nikex-kiskon asennustapa (Esveld 1997).

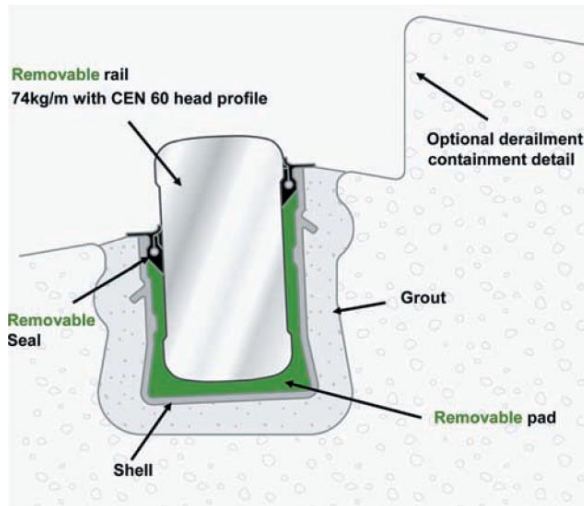


Kuva 2.8 LR55-kisko (Tram Power 2017).

Varrettomat kiskot on kehitetty kaupunkien katuraitioiteita varten, joilla raiteet sijaitsevat sekaliikennekaistoilla ja niiden rakennus- tai kunnossapitotyöt aiheuttavat merkittävää liikenteellistä haittaa. Sekaliikennekaistalla kiskot perustetaan jatkuvasti tuettuina kiintolaatalle. Perinteiset Vignole- ja urakiskot taas ovat alun perin tarkoitettu käytettäväksi epäjatkuvasti tuettuina ratapölkkyjen kanssa. Näin niiden pystysuuntaista taivutuskestävyyttä ei kiintoraiteella saada täysin hyödynnettyä.

Varrettomien kiskojen eduiksi tavallisiin kiskotyyppeihin verrattuna on mainittu niiden nopea asennus ja vaihto, matala asennussyvyys sekä parempi soveltuvuus jatkuvataimaisen ratarakenteen vaatimuksiin. Näiden kiskojen pystysuuntaisen taivutusjäykkyyden ollessa huomattavasti varrellisia kiskoja heikompi, on siirtymärakenteiden teko tavallisilla kiskoilla varustettuun rataan vaikeaa. Perinteisen kiskonkiinnityksen puuttessa varreton kiskotyyppi myös vaatii kaukalarakenteelta sivuttaissuuntaisten voimien vastustamista geometrian pysyvyyden varmistamiseksi.

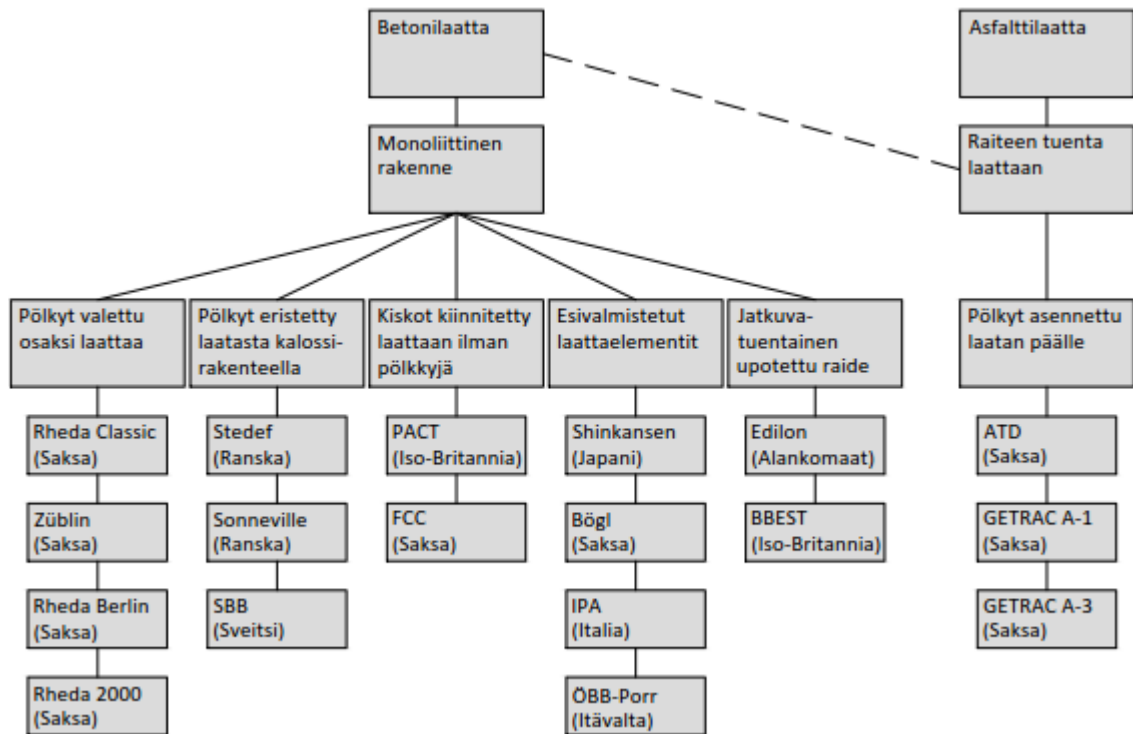
Eräs voimakkaasti tavallisesta poikkeava kiskotyyppi on Isossa-Britanniassa kehitetty Balfour Beattyn upotettuun raidejärjestelmään kuuluva kisko, jossa ei ole lainkaan vartta tai jalkaa. Kiskon ja sen kiinnityksen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 2.9. Tätä kiskojärjestelmää on asennettu testiosuuksille ainakin Ison-Britannian läntiselle pääradalle sekä suurnopeustestiradalle Espanjassa (Balfour Beatty 2017).



Kuva 2.9 Balfour Beattyn valmistama upotettu raide (Esveld 2003).

2.2.3 Pohjalaatta ja kiskon kiinnitys

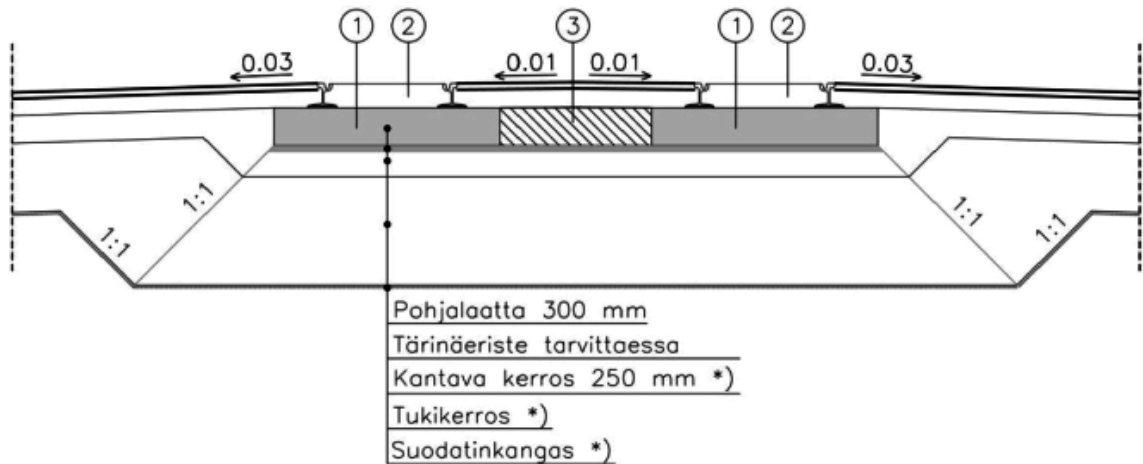
Kiintoraiteilla on maailmalla käytössä useita erilaisia rakennetyyppejä. Useimmissa kiintoraideratkaisuissa kiskot tuetaan betonilaatan varaan, mutta maailmalla on käytössä myös asfalttisella tukikerroksella varustettuja kiintoraiteita. Joihinkin rakennetyyppeihin on yhdistetty sekä asfalttia että betonia. Kuvaan 2.10 on koottu vuonna 2006 käytössä olleet rautateiden kiintoraidejärjestelmät lajiteltuna rakennetyypin perusteella. Raitio- teillä on perinteisesti käytetty raitiotiekaupunkien omia, katurakenteeseen ja paikalla va- lettavaan betonilaattaan pohjautuvia rakenteita, mutta uusilla pikaraitioiteilla käytetään usein rautateiden kiintoraideityypeistä kehitettyjä malleja.



Kuva 2.10 Maailman rautateillä käytössä olevia kiintoraide-tyyppejä jaoteltuna rakennetyypin mukaan. Suomennettu lähteestä Bastin 2006.

Kiintoraidejärjestelmät voidaan jakaa rakenteen perusteella kuvan 2.10 mukaisesti erityyppisiin rakenteisiin. Merkittävin erottava tekijä on, asennetaanko kiskot ja ratapölkkyt kiintolaatan päälle vai onko päällysrakenne monoliittinen. Yhtenäinen päällysrakenne taas voidaan toteuttaa joko ratapölkkyjen kanssa tai ilman. Ratapölkkyt voidaan valaa betonilaatan sisään tai ne voidaan asentaa elastiseen kalossirakenteeseen. Ilman ratapölkkyjä kiskot voidaan kiinnittää betonisen pohjalaatan päälle tai upottaa betonilaattaan muotoiltaviin uriin. Paikalla valettavien laattarakenteiden lisäksi on käytössä myös tehtaalla esivalmistettavista elementeistä koottavia kiintoraiderakenteita. Eri kiintoraide-tyypit voivat olla rakenteeltaan ja asennustavaltaan hyvin erilaisia, mutta ratarakenteessa ne toimivat samalla tavalla, muodostaen kantavan laatan kiskojen alle.

Kuvassa 2.11 on esitetty Helsingin raitioteillä nykyisin käytössä oleva raiderakenne. Varsin yksinkertainen rakenne koostuu pohjalaatasta, jonka päälle asennetaan kiskot, sekä sen alapuolisista murskekerroksista. Lisäksi laatan alle voidaan tarvittaessa asentaa tärinäeriste ja murskekerrosten alle suodatinkangas. Kiintoraiteen laatta valetaan vähintään lujuusluokan K40 kuitubetonista. Suhteellisen yksinkertaisen rakenteen avulla pyritään helpottamaan radan kunnossapitoa ja siten pitämään kunnostustöihin tarvittavat liikennekatkot mahdollisimman lyhyinä.



1. Pohjalaatta 1.80 x 0.30
2. Pintalaatta betonia tai asfalttia
3. Pohjalaatta voidaan toteuttaa myös yhtenäisenä

*) Rakennekerrokset mitoitetaan pohjamaan kantavuuden ja routivuuden perusteella

Kuva 2.11 Helsingin raitioteiden pohjarakenteen tyypipoikkileikkaus (HKL 2016).

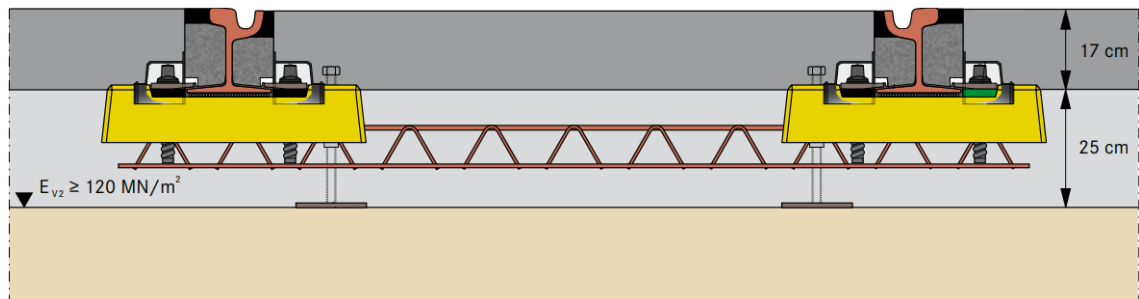
Kuvassa 2.12 nähdään kiintoraiteen rakennustyömaa Helsingin Länsisatamassa. Kun radan murskerakennekerrokset on muotoiltu ja tiivistetty, tuetaan kiskot niiden päälle betonisten tukikappaleiden varaan haluttuun korkeus- ja sivuttaisasemaan. Kiskoja väliin on asennettu metallisia tukia pitämään raideväli oikeana. Kiskoja paikalleen asentamisen jälkeen kiskoja alle valetaan betoninen pohjalaatta. Lopuksi kiskoja väliin tehdään pintalaatta asfaltista tai betonista. Päälysteenä voidaan käyttää myös muita ympäristöön soveltuvia pintamateriaaleja, kuten kiveystä.



Kuva 2.12 Raitiotieradan rakentamista Helsingin Jätkäsaarella vuonna 2016 (Helsingin Satama Oy 2016).

Tampereen raitiotien I-vaiheessa käytetään kahta erityyppistä kiintoraiderakennetta. Sekaliikennekaistoilla ja suuren liikennemäärän risteyksissä käytetään upotettua, jatkuva-tuentaista Pandrol QTrack Jig -järjestelmää ja erillisillä kiintoraideosuuksilla kiintolaat-taan valettavilla ratapölkkyillä toteutettavaa Rheda City -järjestelmää. Myös Rai-de-Jokerista on suunniteltu nykyaikaista pikaraitiotiejärjestelmää, joten on melko to-dennäköistä, että kiintoraiteet tullaan toteuttamaan Tampereen raitiotien tapaisilla tekni-sillä ratkaisulla. Päätöksiä käytettävistä rakennetyypeistä ei vielä tätä tekstiä kirjoittaes-sa ole tehty.

Rheda-järjestelmässä kiskot kiinnitetään tavallisella kiskonkiinnityksellä (Tampereella Vossloh Skl) kaksiosaiseen betoniratapölkkyyn, joka valetaan kiinteäksi osaksi laattara-kennetta. Ratapölkky koostuu kahdesta kiskojen alapuolella sijaitsevasta betonielemen-tistä sekä niitä yhdistävästä poikittaisesta teräsristikkorakenteesta. Laatan alapuolella on routasuojauslevytys. Kiintoraiteen rakennepoikkileikkaus on esitetty kuvassa 2.13.



Kuva 2.13 Rheda City -kiintoraidejärjestelmän rakennepoikkileikkaus. Muokattu läh-teestä PCM RAIL.ONE AG 2017

Rheda-kiintoraidetta asennettaessa kiskot ja ratapölkkyt asemoidaan haluttuun geometri-aan metallisten tukien avulla ennen betonilaatan valua. Valun jälkeen korkeudensäätö-pultit poistetaan rakenteesta. Lujittuessaan laatta sitoo raiteen halutun geometrian mu-kaisesti. Kuvassa 2.14 nähdään Tampereelle asennettuja Rheda City -kiintoraiteita en-nen ja jälkeen pohjalaatan valun. Vasemmanpuoleisessa kuvassa kiskot on kiinnitetty ratapölkkyihin, mutta niitä ei ole vielä tuettu lopulliseen asemaansa. Oikeanpuoleinen kuva on otettu betonilaatan valun jälkeen. Kuten kuvasta nähdään, jää laatan päälle ra-tapölkkyistä näkyviin vain niiden yläpinnat kiskonkiinnityksineen.



Kuva 2.14 Rheda-kiintoraidejärjestelmän asennusta Tampereella. Kuvat: Susanna Lyly (Raitiotieallianssi 2017a) ja Ossi Ahola (Aamulehti 2017).

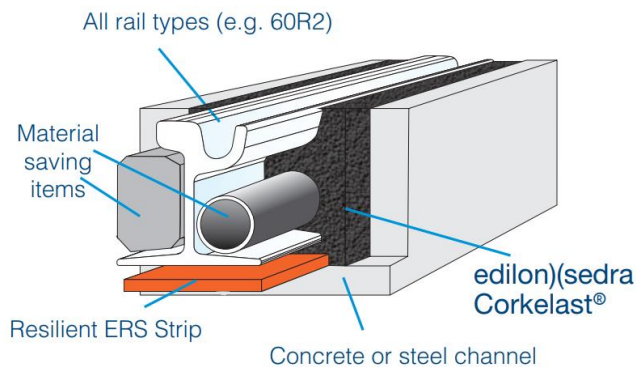
Pandrol-kiintoraiteessa kisko upotetaan teräsbetonilaattaan jätettäviin uriin ja tuetaan paikalleen kiskon ympärille asennettavilla tätekappaleilla. Betonilaatta voi olla joko paikalla valettu tai elementtirakenteinen. Tampereella käytetään paikallavalutekniikkaa. Pandrol-järjestelmässä kisko tuetaan paikalleen erikoisvalmisteisilla tukikehikoilla ja sen ympärille kiinnitetään täyte-elementit. Tämän jälkeen rakennetaan kiintolaatan raudoitukset ja valetaan laatta. Kuvassa 2.15 on kuvattu Tampereen raitiotien Pandrol-raideosuuksien asennustyömaita eri vaiheissa. Vasemmanpuoleisessa kuvassa kiskot on tuettu paikalleen ja varustettu täyte-elementeillä ja betonilaatan raudoitukset on tehty valmiiksi valua varten. Oikeanpuoleisessa kuvassa valu on tehty ja laatta on päällystämistä vaille valmis.



Kuva 2.15 Pandrol-kiintoraidejärjestelmän asennusta Tampereella. Kuvat: Susanna Lyly (Raitiotieallianssi 2017a).

Upotettu kiintoraide voidaan toteuttaa myös asentamalla raide betonilaatan päälle kiinnitettäviin betoni- tai teräsrakenteisiin kanaviin kuvan 2.16 mukaisesti. Raide tuetaan paikalleen ja kanava täytetään juoksevalla, kovettuvalla täyteaineella. Täyteaineen mekin pienentämiseksi osa kiskon ja kaukalon välisestä tilasta voidaan täyttää PVC-putkilla tai erityisillä täytepaloilla. Kiskon alle voidaan asentaa aluslevy. Tämän-

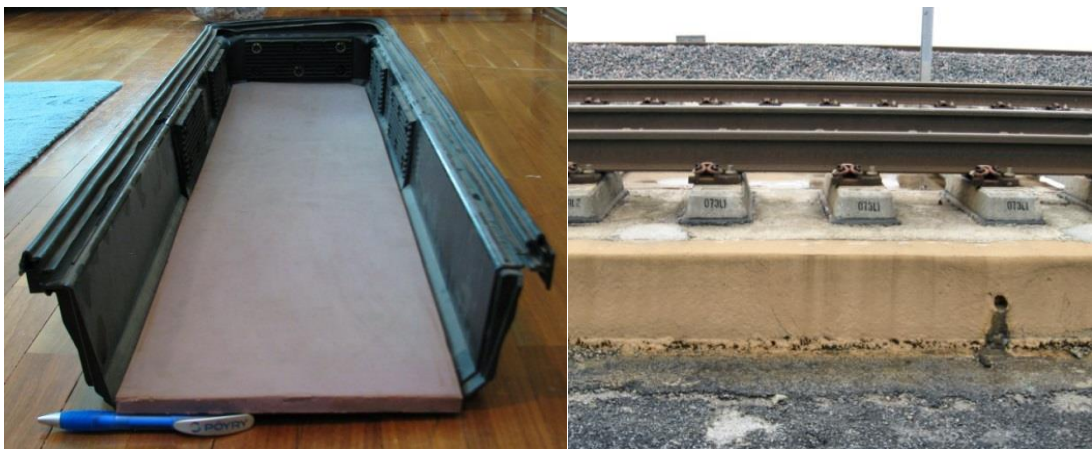
tyyppistä, Edilon Sedran toimittamaa kiskonkiinnitystä on käytetty Helsingissä Pasilan sillalla (Kaupunkiliikenne.net 2016). Erikoisratkaisuu päädyttiin hajavirtojen aiheuttaman korroosion vähentämiseksi sillan raudoituksessa.



Kuva 2.16 Upotettu kiintoraidejärjestelmä kaukalorakenteella (Edilon Sedra B.V. 2017).

Kiskon ympäröinti eristemateriaalilla vähentää raitiovaunun aiheuttamaa melua ja ehkäisee värinän välittymistä ympäristöön, mutta se toimii myös sähköneristysenä. Sähköistetyllä raitiotiellä raitiovaunu saa virtansa vaunun, sähkönsyöttöaseman, ajojohtimen ja kiskojen muodostamasta virtapiiristä. Kiskoa pitkin kulkeva virta voi muodostaa ympärilleen hajavirtoja, jotka ovat haitallisia niistä lähellä kiskoa oleviin rakenteisiin mahdollisesti aiheutuvan korroosioriskin takia.

Eristetty kiintoraiderakenne voidaan toteuttaa myös ratapölkyliseen rakenteeseen asentamalla pölkyn ja laatan väliin kalossielementti. Kiinteästi pohjalaattaan asennettujen ratapölkkyjen yhteydessä värinä- ja meluhaittoja taas voidaan vähentää kiskon alle asennettavalla vaimennuselementillä. Kuvassa 2.17 on esitetty ranskalaisen Sateba SAT S 312 -kiintoraidejärjestelmään perustuvan kiintoraiteen kalossielementti ja valmis rakenne.



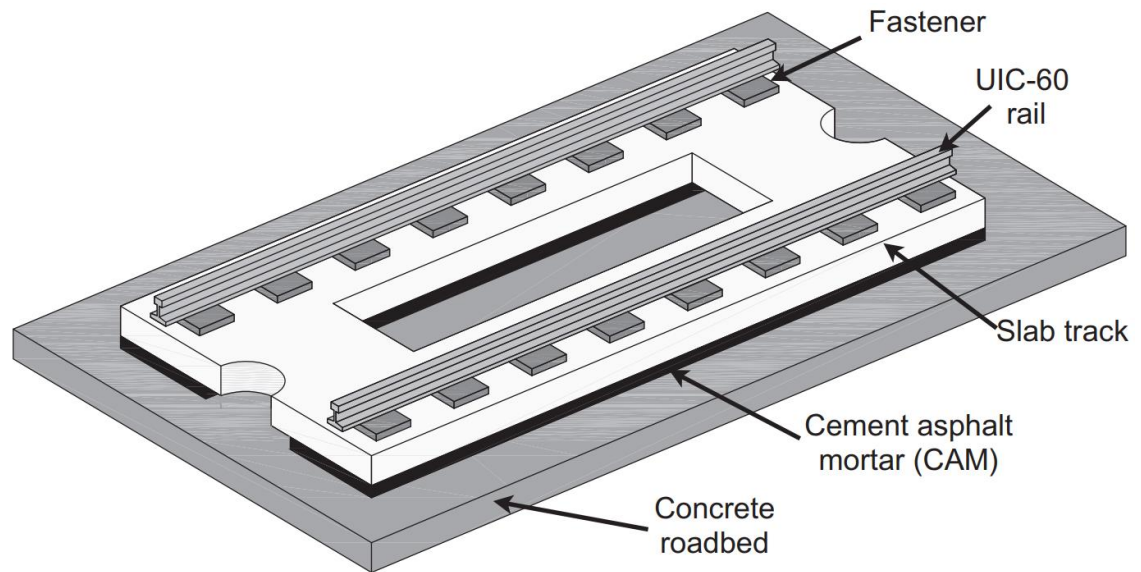
Kuva 2.17 Sateban SAT S 312 -kiintoraidejärjestelmän kalossi ja joustoelementti irrallisena sekä raiderakenteessa (RHK 2008).

Kiintoraiteen laatan toteutukseen on ratapölkkyjen ympärille valettavan laatan lisäksi muitakin vaihtoehtoja. Kuvassa 2.18 on vasemmalla esitetty liukuvaluna tehtävä iso-britannialaisen Balfour Beattyn BBEST-kiintoraideratkaisu, jossa luvussa 2.2.2 esitelty jalaton erikoiskisko asennetaan laattaan muotoiltaviin uriin. Oikealla on kuvattu saksalaisen ATD-kiintoraidejärjestelmän asennusta. Siinä pohjalaatta tehdään asfalttibetonista ja ratapölkkyt asennetaan suoraan laatan päälle.



Kuva 2.18. Vasemmalla Balfour Beattyn BBEST-kiintoraidejärjestelmän laatan liukuvalua (Balfour Beatty 2017) ja oikealla ATD-järjestelmän asfalttibetonilaatan valua sekä kaksiosaisten ratapölkkyjen asennusta laatan päälle (EAPA 2014).

Paikalla valettavan kiintolaatan sijaan kiintoraide voidaan toteuttaa myös elementtirakenteisena. Elementtirakenteista rataa käytetään esimerkiksi Japanin nopean liikenteen Shinkansen-radoilla ja Saksan rataverkon nopeilla radoilla. Kuvassa 2.19 on esitetty niillä käytetyn kiintoraidejärjestelmän komponentit. Järjestelmä koostuu esivalmistetuista betonielementeistä, jotka asennetaan paikalla valetun betonisen pohjalaatan ja asfaltti-sementtilaastikerroksen päälle. Nykyisin monet valmistajat hyödyntävät raideelementtien suunnittelussa on niin kutsuttua tikapuurakennetta, jossa laatta ei ole yhtenäinen, vaan siinä on kiskojen välissä aukkoja. Tämä vähentää betonimenekkiä ja siten valmistuskustannuksia. Raitiotierakentamisessa tällaisella rakenteella voidaan myös toteuttaa nurmiraitteita.



Kuva 2.19 Shinkansen-tyyppisen kiintoraidejärjestelmän osat (Tarifa et al. 2015).

2.2.4 Alusrakenne

Kiintoraideradan alusrakenne voidaan toteuttaa samoilla komponenteilla kuin tukikerroksellisen radan. Kiintolaatan alapuoliset kerrokset tehdään yleensä kiviainesmurskeesta, mutta myös asfalttisia välikerroksia on käytössä. Alusrakenteen tehtävänä on muodostaa radan pohjalaatalle tasainen ja kantava alusta ja siirtää sen kuormitukset tasaisesti pohjamaan. Alusrakenteen tulee myös toimia kapillaarikatkona ja ehkäistä ratapohjan routimista.

Kiintoraiteella liikennekuormat jakautuvat alusrakenteeseen hieman tukikerroksellista raidetta tasaisemmin, joten alusrakenteelta ei vaadita aivan yhtä suurta kantavuutta. Esimerkiksi Tampereen raitiotien suunnittelussa kiintoraiteellisen radan alusrakenteen kantavuusvaatimus on $E_2 = 80$ MPa, kun sepeliraiteella se on 120 MPa (Raitiotieallianssi 2017b).

Mikäli routimattomien rakennekerrosten paksuus ei ole riittävä, voidaan kiintoraideradan routasuojaukseen käyttää routalevyjä. Esimerkiksi Tampereen raitiotiellä käytetään tarpeen vaatiessa kiintolaatan alla XPS-levytystä (Raitiotieallianssi 2017b). Routalevyt ladotaan alapuolisen murskekerroksen päälle ennen betonilaatan valua. Routalevyjen alla tulee olla vähintään 300 mm routimatonta materiaalia. Routakiilat toteutetaan tavallisesti vaahtolasilla. Helsingin raitioteiden suunnitteluohjeistuksen mukaan routasuojaus tehdään mitoittamalla murskerakennekerrokset pohjamaan routivuuden perusteella (HKL 2016).

2.3 Raitiotien kanssa risteävät rakenteet

Raitiotiet rakennetaan useimmiten olemassa olevan kaupunkirakenteen keskelle, jolloin niiden suunnittelussa on huomioitava monia asioita varsinaisen ratarakenteen lisäksi. Kaupunkien katujen alapuoliset täytöt sisältävät paljon erilaisia putkia, johtoja, kaapeleita ja kaivoja. Nämä rakenteet ovat herkkiä raitiotien mahdollisesti aiheuttamille painumille tai ratarakenteen ja muun katurakenteen välisille painumaeroille. Uusia raitioiteitä suunniteltaessa ei yleensä sallita pitkittäissuuntaisten putkien ja johtojen jättämistä ratarakenteen alle, mutta niiden risteäminen radan kanssa on käytännössä väistämätöntä.

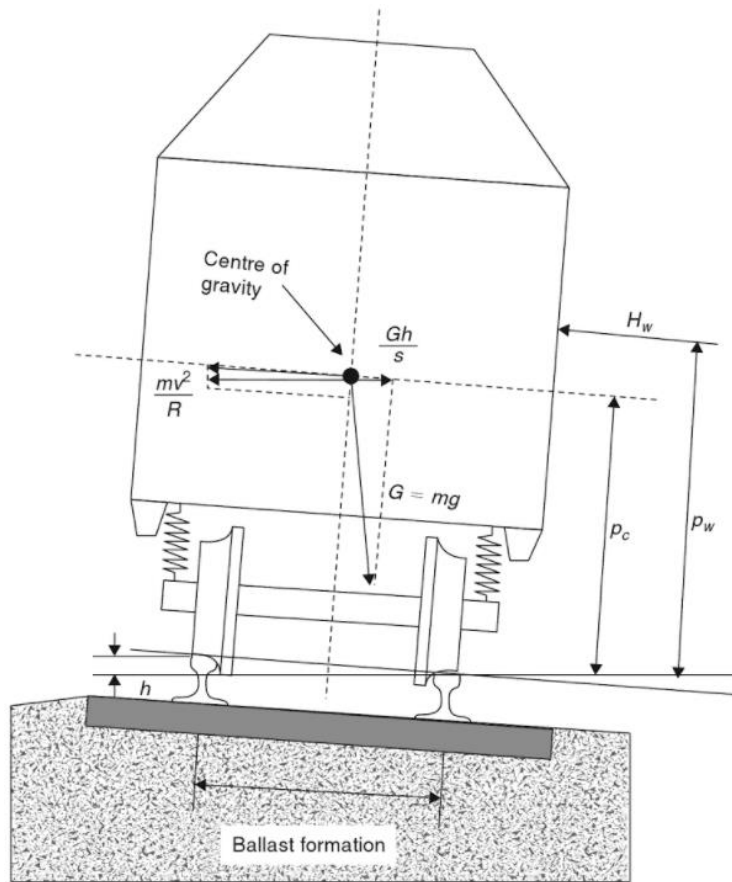
Raitiotien yhteydessä oleva kunnallistekniikka vaatii ajoittain huoltoa tai uusimista. Eri verkostojen kehittyessä saattaa myös ilmetä tarpeita asentaa uusia putkia tai johtoja raitiotien liikennealueelle. Näiden toimenpiteiden aiheuttamien vaatimusten huomiointi on tärkeää myös raitiotieradan rakenteita suunniteltaessa.

Väylän rakenteiden ominaisuuksien muuttuessa tulee erilaisten rakennetyyppien välille yleensä rakentaa siirtymäkiila. Esimerkiksi Tampereen raitiotien suunnitteluperusteissa siirtymäkiilan kaltevuudeksi väylän suunnassa on määritelty 1:30 (Raitiotieallianssi 2016a). Siirtymäkiilaa tarvitaan myös risteävien rakenteiden yhteyteen, mikäli niiden rakenneratkaisut eroavat väylän rakenteesta. Siirtymäkiilalle määritellystä kaltevuudesta riippuen se voi ulottua melko pitkälle risteävän rakenteen kaivantoon.

3. RAITIOTIERATAAN KOHDISTUVAT KUORMITUKSET

3.1 Kuormitusten luonne

Kiskokalustosta kohdistuu rataan sekä kvasistaattisia että dynaamisia kuormia. Kvasistaattiset kuormat ovat liikkuvasta kalustosta tietyllä hetkellä rataan kohdistuvia kuormia, jotka johtuvat kaluston massasta, keskihakuvoimasta ja tuulesta. Kalustosta rataan kohdistuvat kvasistaattiset kuormitukset on esitetty kuvassa 3.1. Kvasistaattisten voimien lisäksi rataan vaikuttaa liikkuvan kaluston aiheuttamia dynaamisia voimia. Näiden määrittäminen on huomattavasti vaikeampaa. Dynaamisia kuormituksia syntyy erilaisista radan ja kaluston epäsäännöllisyyksistä. Esimerkiksi kiskon korkeus- ja sivuttaisaseman muutokset suhteessa kalustoon sekä radan jäykkyyden vaihtelu aiheuttavat dynaamisia kuormia. Myös kiskon pinnan epätasaisuudet sekä jatkokset ja hitsaukset lisäävät dynaamista kuormitusta. Lisäksi kaluston kunnolla on vaikutusta, esimerkiksi lovipyörät aiheuttavat iskevää kuormitusta rataan.



Kuva 3.1 Kaluston kvasistaattiset kuormitukset kaarteessa (Esveld 2001, Indraratna et al. 2011 mukaan)

Raitiotiehen kohdistuu raitiovaunuista samantyyppisiä kuormia kuin junista kohdistuu rautatiehen. Suurin eroavaisuus on kuormien suuruus. Raitiovaunun akselipaino on yleensä alle 10 tonnia, kun henkilöliikenteen junien akselipainot ovat Suomessa tavallisesti 12–19 tonnia (Korkeamäki 2011). Tavarajunissa akselipaino voi olla jopa 25 tonnia, mikä on suurin Suomen rataverkolla sallittu akselipaino. Helsingin uusimpien raitiovaunujen akselipaino täydellä matkustajakuormalla on 7850 kg (Transtech 2014). Samaa raitiovaunutyyppiä tullaan pidempänä versiona ja pienin muutoksin käyttämään myös Tampereen raitiotiellä ja Raide-Jokerilla (Tampereen kaupunki 2016; Raide-Jokeri 2016). Suunnittelun mitoitusakselipainoksi on määritetty Tampereen raitiotiellä 120 kN ja Raide-Jokerissa 12 500 kg (Raitiotieallianssi 2016a; Raide-Jokeri 2015).

Raitiovaunujen akselipainot ovat samaa luokkaa suurimpien teliikenteessä sallittujen massojen kanssa. Suurin sallittu ajoneuvon yksittäiselle akselille kohdistuva massa on 11,5 t, kaksiakseliselle telille kohdistuva massa 21 t ja kolmiakseliselle telille kohdistuva massa 27 t (VNa 407/2013). Perävaunulle suurin sallittu kaksiakseliselle telille kohdistuva massa on 20 t ja kolmi- tai useampiakseliselle telille kohdistuva massa 24 t. Tavallinen kaupunkiliikenteen linja-auton massa ilman kuormaa on noin 10–15 t. ja matkustajien kanssa luokkaa 20 t.

Merkittävä eroavaisuus raitiotien ja rautatien välillä on myös kaluston nopeus. Junat kulkevat huomattavasti suuremmilla nopeuksilla kuin raitiovaunut. Pienempi nopeus vähentää kaluston rataan aiheuttamia pituus- ja poikkisuuntaisia kuormituksia raitiotiellä suhteessa rautatiehen. Toisaalta raitiotien geometria on yleensä rautatietä pienipiirteisempää kaupunkiympäristön aiheuttamien rajoitteiden johdosta, mikä lisää radan poikkisuuntaisia kuormia. Taulukossa 3.1 on vertailtu raitiotien mitoitusta ja siihen kohdistuvia kuormituksia tie- tai katurakenteeseen sekä rautatiehen.

Taulukko 3.1 Raitiotiehen vaikuttavien kuormitusten vertailu tie/katurakenteen ja rautatien kanssa. Perustuu lähteisiin Pihlajamäki 2001; RHK 2002; Tiehallinto 2009; Korkeamäki 2011; Liikennevirasto 2013; VNa 407/2013; Raide-Jokeri 2015; Raitiotieallianssi 2016a & Liikennevirasto 2018.

	Tie / katu	Raitiotie (uudet pikaraitiotiet)	Rautatie
Päällysrakenne	Joustava päällysrakenne	Jäykkä kisko ja pölkyt/laatta	Jäykkä kisko ja pölkyt
Mitoitusakselipaino [kN]	100	120-125	188-370
Todellinen akselipaino tavallisesti [kN]	Yksittäispyörät: max. 70-100 Paripyörät: max. 115	60-80	Henkilöliikenne: 120-190 Tavaraliikenne: 200-250
Suurin nopeus [km/h]	Taajamassa: 60 Taaj. ulkop.: 120	70-80	Henkilöliikenne: 220 Tavaraliikenne: 120
Minimikaarresäde [m]	30 (maantiet)	25	200
Pölkyn pituus [mm]	-	2200	2600
Pölkkyväli [mm]	-	750	610
Kiskotyypit	-	Urakisko 59-60 kg/m Vignole 54 kg/m	Uudet: Vignole 54-60 kg/m Olevat: Vignole 30-60 kg/m

Kiskokaluston aiheuttamien kuormitusten lisäksi raitiotierataan vaikuttaa erilaisia ympäristökuormituksia. Suomessa erityisen merkittävä rasitus ratarakenteisiin aiheutuu ilmastollisista kuormituksista. Kylmien ja lämpimien kausien väliset lämpötilaerot ovat melko suuria, mikä aiheuttaa routaantumisen ja roudan sulamisen kautta muutoksia ratarakenteen kuormituskestävyyteen. Lämpötilan vaihtelu aiheuttaa myös kiskossa vaikuttavia lämpövoimia.

3.2 Pystysuuntaiset kuormitukset

Raitiovaunukalustosta aiheutuu rataan jatkuvasti pystysuuntainen kuormitus. Kuorma välittyy pohjamaahan radan rakennekerrosten välityksellä. Toisaalta myös rakennekerrokset ja päällysrakenteen komponentit aiheuttavat staattisen kuorman alapuolisille rakenteilleen sekä pohjamaalle.

3.2.1 Kaluston aiheuttama pystysuuntainen kuormitus

Kiskoilla liikkuvasta kalustosta rataan pystysuunnassa vaikuttavat voimat voidaan esittää yhtälön 3.1 mukaisesti (Esveld 2001):

$$Q_{tot} = (Q_{stat} + Q_{centr} + Q_{wind}) + Q_{dyn} \quad (3.1)$$

missä

Q_{tot}	on	pyörän ja kiskon välillä pystysuunnassa vaikuttava kokonaisvoima
Q_{stat}		puolet akselipainon aiheuttamasta pystysuuntaisesta voimasta suoralla, tasisaisella radalla
Q_{centr}		pystysuuntaisen voiman lisäys kaarteeseen ulommaiselle pyörälle kompensoimattoman keskihakuvoiman vaikutuksesta
Q_{wind}		pystysuuntaisen voiman lisäys kaarteeseen ulommaiselle pyörälle tuulesta aiheutuvan voiman vaikutuksesta
Q_{dyn}		pystysuunnassa vaikuttavat dynaamiset voimat

Yhtälössä 3.1 sulussa oleva osa kuvaa pystysuuntaisen kuormituksen kvasistaattisia komponentteja. Kuvassa 3.1 esitetyn voimatasapainon perusteella kvasistaattiset komponentit voidaan esittää kiskokaluston staattisen akselipainon avulla yhtälöiden 3.2 ja 3.3 mukaisesti (Esveld 2001):

$$Q_{centr} + Q_{wind} = G \frac{p_c h_d}{s^2} + H_w \frac{p_w}{s} \quad (3.2)$$

$$h_d = \frac{sv^2}{gR} - h \quad (3.3)$$

missä

G	on	kaluston paino yhtä pyöräkertaa kohden
H_w		tuulen aiheuttama kalustoon nähden poikittaissuuntainen voima
s		raideleveys
v		liikkuvan kaluston nopeus
g		maan vetovoima
R		kaarresäde
h		raiteen kallistus
h_d		kallistuksen vajoitus
p_c		pystysuora etäisyys ulkokaarteeseen puoleisen kiskon keskikohdasta kaluston painopisteeseen
p_w		pystysuora etäisyys tuulen aiheuttaman voiman resultanttipisteestä ulkokaarteeseen puoleisen rataiskun keskipisteeseen

Rataan vaikuttavista pystysuuntaisista voimista vaikeimmin määritettävissä ovat kalustosta aiheutuvat dynaamiset voimat. Dynaamisen pyöräkuorman suuruuteen vaikuttavat

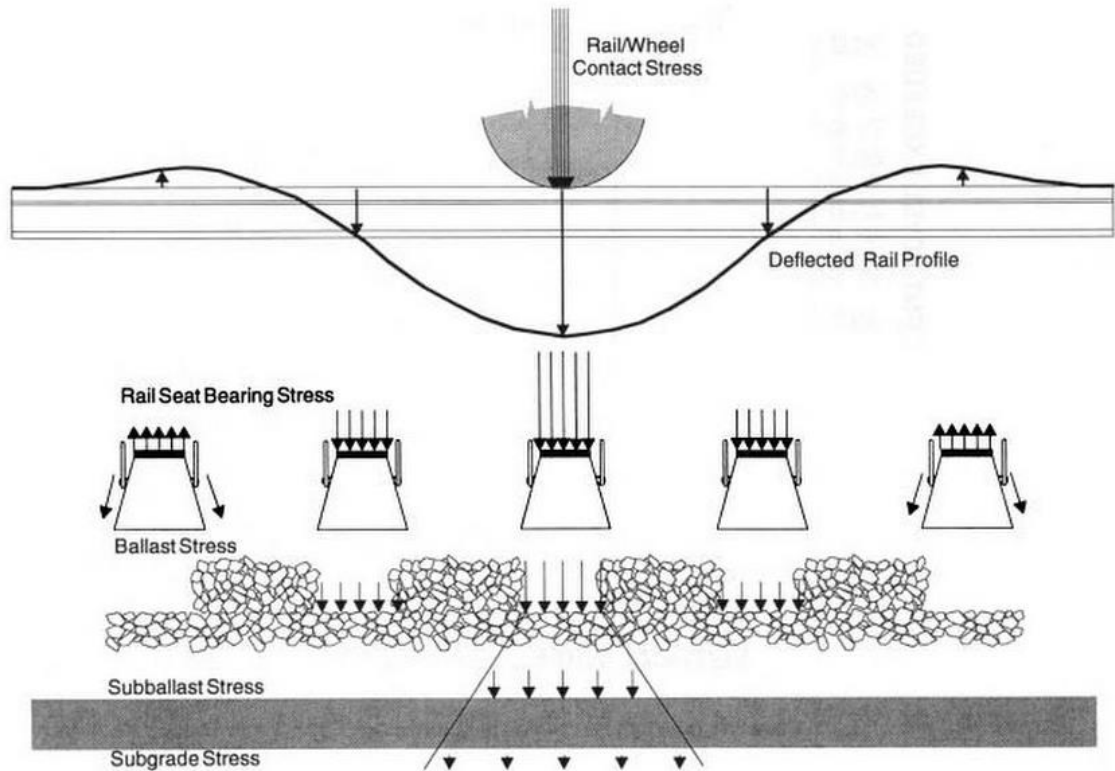
kaluston osalta etenkin sen nopeus, staattinen pyöräkuorma, pyörien halkaisija, jousittamaton massa ja kunto. Lisäksi dynaamisen kuormituksen suuruuteen vaikuttavat radan rakenne ja sen osien ominaisuudet sekä radan kunto mukaan lukien kiskonjatkokset, radan geometria ja ratarakenteen jäykkyys. (Indraratna et al. 2011)

Tukikerroksellisella sepeliradalla dynaamista kuormaa aiheuttaa radan jäykkyyden vaihtelu ratapölkkyjen ja niiden välisten osuuksien välillä. Radan rakenne on jäykempi pölkkyjen kohdilla kuin niiden välissä, mikä aiheuttaa pyöräkuormaan lähes harmonisen värähtelyn. Tästä ei kuitenkaan yleensä aiheudu merkittävää vaikutusta, sillä värähtelyn taajuus ei tavallisesti osu kiskokaluston tai ratarakenteen ominaistajuusalueille. (Levomäki 1999)

Dynaamisten voimien vaikutusta voidaan arvioida karkeasti kertomalla kaluston staattinen akselipaino sysäyslisäksi kutsutulla kertoimella. Sysäyslisän määrittämiseksi on kehitetty useita empiirisiä kaavoja (Indraratna et al. 2011). Dynaamiselle pyöräkuormalle on Suomen rataverkolle asetettu RATO-ohjesarjassa raja-arvoja välillä 120–200 kN riippuen radan päällysrakenneluokasta (RHK 2002). Kuorman oletetaan vaihtelevan hyväkuntoisella radalla välillä $1,5\text{--}2,0 \times$ akselipaino. Raitioteillä dynaamiset kuormat ovat huomattavasti rautateitä vähäisempiä johtuen kaluston pienemmästä painosta. Dynaamisen kuorman suhde staattiseen akselipainoon on alemmasta nopeudesta johtuen oletettavasti hieman rautateitä pienempi.

3.2.2 Pystysuuntaisten kuormitusten jakautuminen ratarakenteessa

Kuvasta 3.2 nähdään pystysuuntaisen kuormituksen jakautuminen ratapölkkyllisen radan päällysrakenteessa. Kuvan tilanteessa kiskoilla kulkevan ajoneuvon pyörä on pölkyn kohdalla, jolloin suurin osa sen pystysuuntaisesta kuormasta välittyy radan alempiin rakennekerrokseen kyseisen pölkyn kautta. Kuormasta noin puolet oletetaan kohdistuvaksi suoraan pyörän alapuolella olevaan pölkkyyn lopun kuormituksen jakautuessa viereisille pölkkyille. Kauempana pyörän ja kiskon kosketuskohdasta pystysuuntainen voima pyrkii kiskon taivutusmomentista johtuen nostamaan kiskoa ja pölkkyä ylöspäin tukikerroksen pinnasta. Tämä lisää dynaamista kuormitusta ja voi aiheuttaa tukikerroksessa pölkyn alapuolella rakenteen toimivuutta haittaavaa veden ja hienoaineksen pumppautumista. (Selig & Waters 1994)



Kuva 3.2 Yksittäisen pyörän aiheuttaman pystysuuntaisen kuormituksen hetkellinen jakautuminen tukikerroksellisen radan päällysrakenteessa (Selig & Waters 1994).

Ratapölkyn alla voi tapahtua pumppautumista, mikäli tukikerroksessa on puutteellisen kuivatuksen seurauksena vapaata vettä, mikä pölkyn liikkeiden aiheuttamien paineenvaihteluiden seurauksena alkaa liikkua rakenteessa. Tukikerroksen huono kuivatus voi johtua liiallisesta hienoaineksen määrästä kerroksessa. Tukikerroksen hienoaines on yleensä lähes kokonaan peräisin itse kiviaineksen rikkoontumisesta kuormitusten alaisena (Kolisuoja et al. 1999). Lisäksi tukikerrokseen saattaa kertyä pieniä määriä hienoainesta tuulen tai kiskokaluston kuljettamana tai raideseppelin sekoittuessa alempiin rakennekerroksiin.

Tukikerroksen sepelin vedenläpäisevyyden heikentyessä lisääntyy siinä vaikuttava huokosvedenpaine dynaamisessa kuormituksessa. Huokosvedenpaineen lisääntyminen pienentää sepelin tehokasta raepainetta alentaen näin rakenteen lujuutta ja jäykkyyttä. Tämän myötä rakenteessa voi syntyä pysyviä muodonmuutoksia, joiden yhteydessä materiaali voi löyhtyä. Rakenteessa paineenvaihteluiden vaikutuksesta liikkuva vesi kuljettaa mukanaan myös hienoainesta, mikä aiheuttaa hiovaa kulutusta tukikerroksen kiviainekseen ja näin hienoaineksen määrän lisääntymistä. Väitöskirjansa yhteydessä asiaa syklisin kuormituskokein tutkinut Nurmikolu (2005) havaitsi vesi-hienoaines -seoksen hiovan vaikutuksen kohdistuvan lähes kokonaan hienorakeisimpiin, raekooltaan noin alle 2 mm lajitteisiin, joista käytännössä kaikki hienontui alle 0,063 mm raekokoon. Pumpautumisen yhteydessä muodostuneen hienoaineksen havaittiin olevan hyvin hieno, yli 90 % siitä oli raekooltaan alle 0,02 mm.

Tukikerrokseen kertyvä hienoaines voi myös aiheuttaa kerroksen jäätyminen talvella tai sementoitumisen kesäolosuhteissa. Näiden myötä tukikerroksen elastisuus häviää, jolloin sen toiminta kuormitusten alaisena muuttuu aiheuttaen mahdollisesti vaurioita muissa radan rakenteissa ja pysyviä muodonmuutoksia sen alapuolisissa rakennekerroksissa. (Kolisoja et al. 1999)

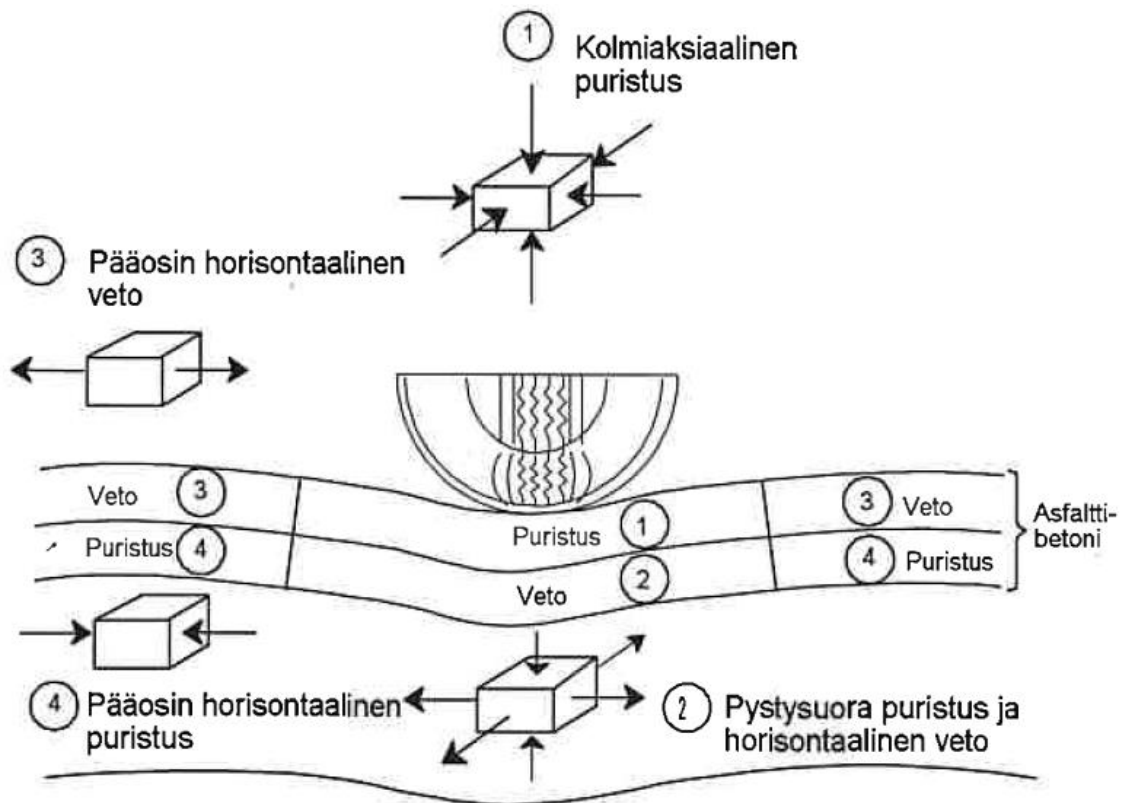
Ratapölkyn pystysuuntaisen liikkeen vaikutuksesta pölkyn ja tukikerroksen väliin voi muodostua tyhjätillaa. Tukeutumistilanteen heikentymisen myötä liikennekuorman rata-rakenteeseen aiheuttamat dynaamiset kuormat voivat kasvaa pölkyn alle muodostuneen tyhjätillan aiheuttaessa toistuvaa iskevää kuormitusta tukikerrokseen kiskokaluston ylitäessä pölkyn. Dynaaminen kuormitus puolestaan lisää tukikerroksen sepelin jauhautumista.

3.2.3 Rata- ja tierakenteen toiminnan eroavaisuudet

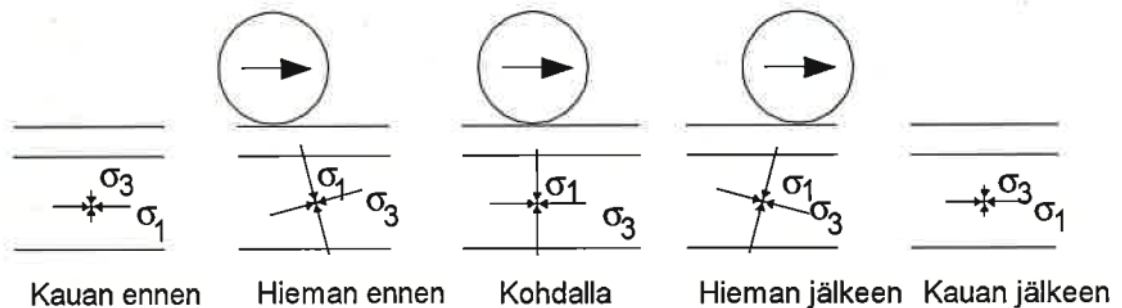
Radalla kulkevan kaluston aiheuttama kuormitus eroaa olennaisesti tiellä liikkuvan ajoneuvon aiheuttamasta kuormituksesta päällysrakenteen erilaisen toimintaperiaatteen takia. Tiet rakennetaan Suomessa tavanomaisesti niin sanotulla joustavalla päällysrakenteella, joka koostuu bitumisella sideaineella sidotusta päällysteestä ja sen alapuolisista sitomattomista rakennekerroksista (Belt et al. 2002). Tällaiseen rakenteeseen muodostuu ajoneuvon renkaan kuormituksen vaikutuksesta sekä veto- että puristusjännityksiä.

Kuvassa 3.3 on esitetty ajoneuvon pyörän aiheuttamat kuormitukset päällysteeseen joustavalla päällysrakenteella varustetulla tiellä Ehrolan (1996) mukaan. Tierakenteeseen muodostuu kuvan mukaisesti erisuuntaisia jännityksiä eri kohtiin päällystettä. Välittömästi renkaan alapuolella päällysteen yläosassa vaikuttaa kolmiaksaalinen puristus. Sen alapuolella päällysteen alaosassa pystysuunnassa vaikuttaa yhä puristusjännitys, mutta poikki- ja pituussuunnissa vetojännitys. Hieman kauempana renkaan kosketuspinnasta kuormitus vaikuttaa päällysteen yläpinnassa horisontaalisena vetona ja päällysteen alapinnassa horisontaalisena puristuksena.

Ajoneuvon liikkeessa tiellä kiertyvät tierakenteessa vaikuttavat pääjännitykset tarkasteltavan maa-alkion kohdalla kuvan 3.4 mukaisesti. Suuren etäisyyden päässä kuormituksesta suurin pääjännitys on vaakasuuntainen. Kuormituksen liikkeessä kohti tarkasteltavaa pistettä jännitykset kiertyvät ja kuorman ollessa tarkastelupisteen kohdalla suurin pääjännitys vaikuttaa pystysuunnassa. Vastaavasti ajoneuvon liikkeessä pois päin tarkasteltavasta pisteestä kiertyvät pääjännitysten vaikutussuunnat jälleen ja kuorman ollessa kaukana on suurin pääjännitys taas vaakasuuntainen. (Ehrola 1996)



Kuva 3.3 Ajoneuvon pyörän aiheuttamat kuormitukset joustavalla päällysrakenteella toteutetussa tierakenteessa (Ehrola 1996).



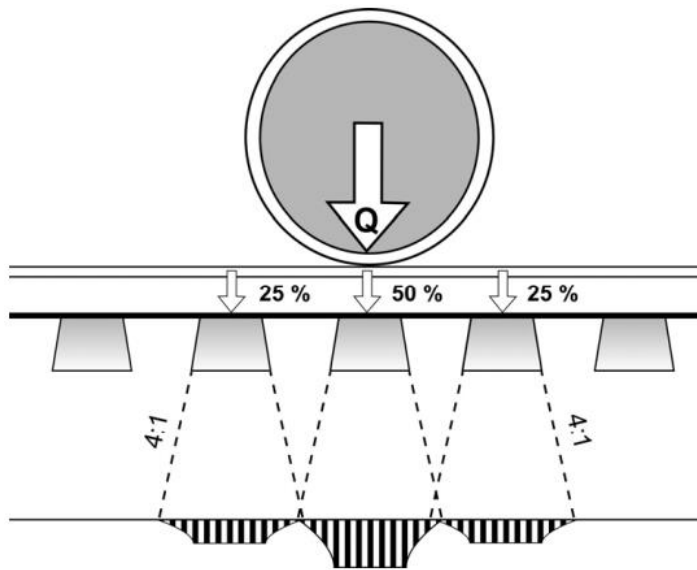
Kuva 3.4 Tierakenteessa vaikuttavien pääjännitysten kiertyminen pyöräkuorman liikkuessa tarkkailupisteen yli (Ehrola 1996).

Teistä ja kaduista poiketen raitiotien päällysrakenne ei ole joustava, vaan siinä on sitomattomien kiviaineskerrosten yläpuolella pystysuunnassa hyvin jäykkiä komponentteja. Tukikerroksellisella radalla kaluston kuormitus välittyy pyörien kautta ensin kiskoon ja siitä ratapölkyn kautta tukikerrokseen ja edelleen alusrakenteeseen. Kiintoraideradalla kuormitus välittyy kiskolta betonilaatan välityksellä alempiin kerroksiin. Kun raitiotie kulkee kadulla muun liikenteen seassa, välittyy ratarakenteeseen kuormia kiskojen lisäksi kadun päällysteen kautta.

Pystysuunnassa jäykät komponentit raitiotierakenteen pinnassa tasaavat alapuolisiin rakenteisiin vaikuttavia kuormia. Varsinkin kiintoraiteisella raitiotiellä murskekerroksiin

kohdistuvat kuormitukset ovat hyvin tasaisia. Tukikerroksellisella radalla kiskokaluston kuorma vaikuttaa ratapölkkyihin vuorotellen, mikä aiheuttaa tukikerroksen sepeliin hiovaa kuormitusta.

Kuvassa 3.5 on esitetty RATO-ohjeistuksessa käytettävä laskennallinen malli junan pyöräkuorman jakautumisesta radan päällysrakenteessa. Sen mukaan puolet pyöräkuormasta oletetaan välittyvän pyörän alapuoliselle ratapölkkyille ja 25 % sen viereisille pölkkyille. Tukikerroksessa pystysuuntaisten jännitysten oletetaan jakautuvan 4:1 kaltevuudella ja muissa maakerroksissa 2:1 kaltevuudella. Sivusuunnassa kuormitus kohdistuu ratapölkkyille reilulle pölkyn kolmasosapituudelle pölkyn päästä. (Liikennevirasto 2018)

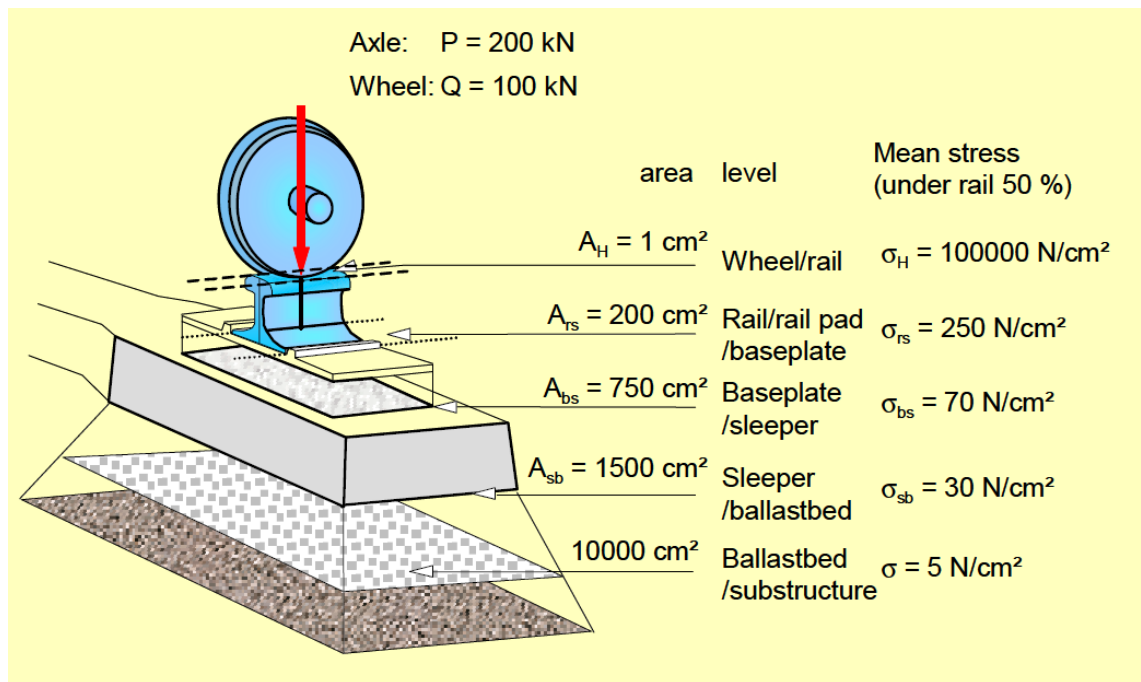


Kuva 3.5 Suomalaisessa rautatiesuunnittelun ohjeistuksessa käytettävä liikennekuorman jakautuminen ratapölkkyjen kautta tukikerrokseen (Liikennevirasto 2018).

Todellisuudessa kuorman jakautuminen ratapölkkyille vaihtelee jonkin verran kuormituksen ja ratarakenteen ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa on havaittu 30 tonnin akselipainoilla jopa 60 % kuormasta kohdistuvan pyörän alapuoliseen pölkkyyn (Holm et al. 2002). Ratapölkkyjen alapuolella myös tukikerroksen sepelin ominaisuudet vaikuttavat kuormien jakautumiseen. Normaalin hyväkuntoisen raideseppelin leikkauskestävyyskulma on keskimäärin noin 40 astetta, mutta se voi vaihdella noin 35–55 asteen välillä (Jernbaneverket 1998; Kalliainen et al. 2014). Vaikka raideseppeli onkin kitkamaata, vaikuttaa sen rakeiden välillä myös näennäistä koheesiota. Esimerkiksi Skoglundin (2002) väitöskirjansa yhteydessä tekemissä staattisissa kolmiaksaalikokeissa raideseppelin koheesio vaihteli noin välillä 30–70 kPa. Koheesio arvo oli suurin, kun leikkauskestävyyskulman arvo oli pienin. Koheesio 70 kPa arvoa vastasi kokeissa varsin pieni, noin 35 asteen leikkauskestävyyskulman arvo. Varsinaisten rakennekerrosten lisäksi kuormien jakautumiseen ratarakenteessa vaikuttaa myös pohjamaan jäykkyys. Mitä joustavampi ratapohja on, sitä enemmän päällysrakenne painuu kuorman alla ja kuormitus jakautuu useammalle ratapölkkyille (Nurmikolu 2005).

3.2.4 Raitiotierakenteessa vaikuttavien pystysuuntaisten kuormitusten laskennallinen määrittäminen

Kuvassa 3.6 on esitetty kuorman jakautuminen tukikerroksellisen radan rakenteessa Esveldin (2001) mukaan. Eri osien väliset kosketuspinnat kasvavat selvästi rakenteessa alaspäin siirryttäessä. Pyörän ja kiskon vuorovaikutus tapahtuu vain noin yhden neliösenttimetrin kokoisella alueella, kun taas radan alusrakenteen alapinnan ja pohjamaan välillä pystyjännitykset ovat jakautuneet jo kokoluokaltaan yhden neliömetrin suuruiselle alueelle. Kuvassa esitetty 200 kN akselipaino on rautateillä esiintyvää kokoluokkaa, raitioteillä tavallinen mitoituskuorma on noin puolet siitä.



Kuva 3.6 Pystysuuntaisen kuorman jakautuminen tukikerroksellisen radan rakenteessa (Esveld 2001). $1 \text{ N/cm}^2 = 10 \text{ kN/m}^2$.

Tämän tutkimuksen yhteydessä tarkasteltiin tukikerroksellisen raitiotien eri rakennekerroksiin kohdistuvia kuormituksia BISAR-laskentaohjelmiston avulla. BISAR on öljy-yhtiö Shellin kehittämä, tierakenteen analysointiin tarkoitettu kerrosrakentamishelmistö. Ohjelmistolla voidaan laskea jännityksiä ja muodonmuutoksia monikerroksisessa rakenteessa lineaarisen kimmoteorian mukaisesti. Rakennekerrosten ominaisuudet määritetään E-moduulin ja Poissonin luvun avulla. Kuormitusten jakautumisen mallinnuksessa käytetään Boussinesqin jännitysjaakamaa ympyränmuotoiselle kuormitukselle. Ohjelmisto sallii enintään kymmenen ympyrän kuormituskonfiguraation mallintamisen.

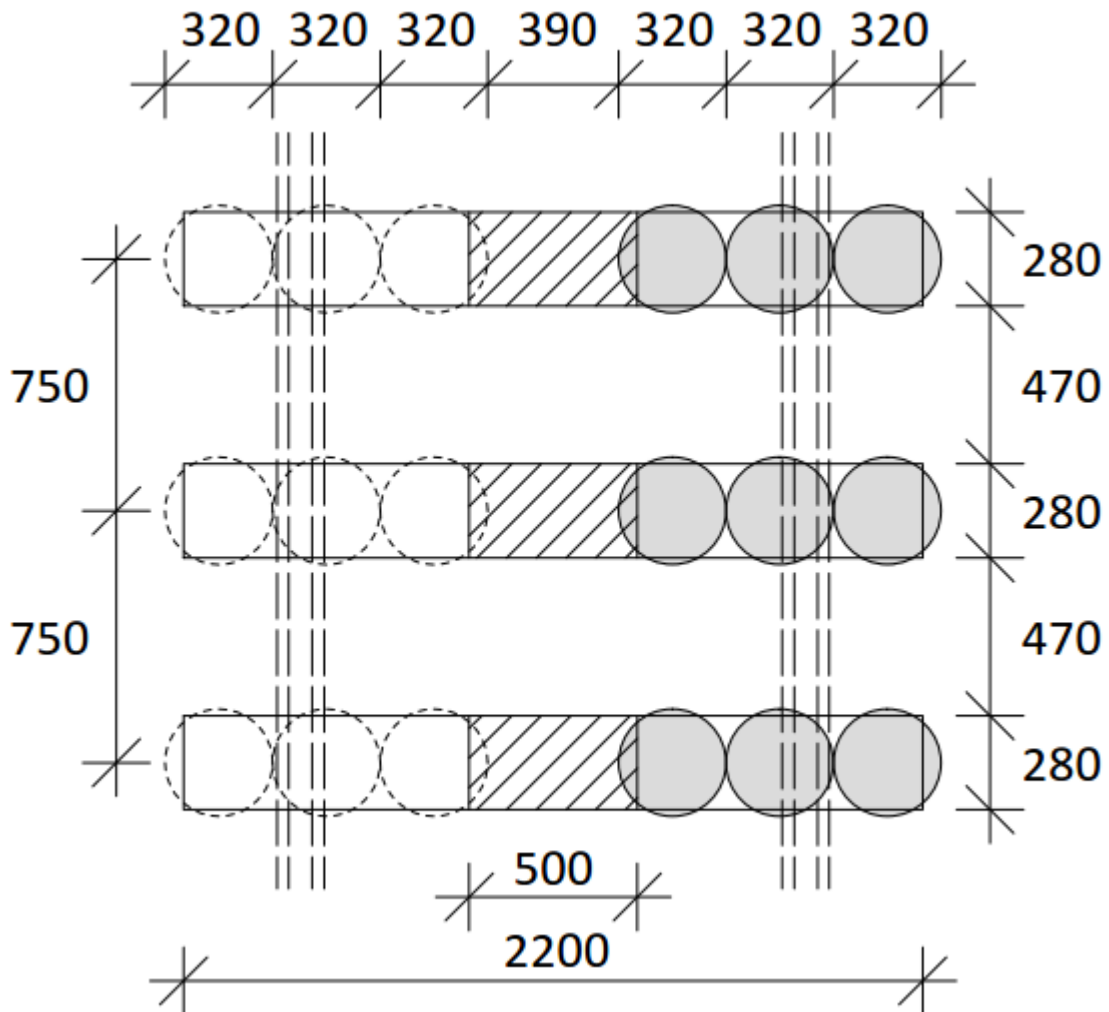
BISAR-ohjelmistoa voidaan hyödyntää myös ratarakenteen toiminnan analysointiin, sillä maamateriaalit käyttäytyvät rakenteessa samalla tavalla riippumatta penkereen käyttötarkoituksesta kuormituksen ollessa samanlainen. Tukikerroksellisessa ratarakenteessa kuormitukset välittyvät penkereeseen ratapölkyltä neliskulmaisen muotoisten pintojen

kautta, mutta tällä on vaikutusta lähinnä tukikerroksessa. Syvemmillä rakenteissa kuormitukset tasaantuvat ja kuormituspinnan muodon merkitys vähenee. Kerrosrakeneohjelmien käytön edellytyksenä on rakenteen lähes täysin kimmainen toiminta toistuvan syklisen kuormituksen alaisena. Tutkimusten perusteella ratarakenteen on todettu saavuttavan lähes täysin kimmoisan tilan jo muutaman sadan kuormitusyökin jälkeen. (Kolisova et al. 2000; Selig & Waters 1994)

Tietokoneiden laskentatehon kehityksen myötä perinteisten analyttisten laskentaohjelmistojen lisäksi myös elementtimenetelmään perustuvan mallintamisen käyttö on yleistynyt ratarakenteiden mekaanisen käyttäytymisen tarkastelussa. Esimerkiksi Liikenneviraston tutkimuksessa 55/2014 (Kalliainen et al. 2014) kehitettiin PLAXIS-ohjelmistoa käyttäen elementtimenetelmään perustuva radan 3D-rakennemalli. Elementtimenetelmään perustuvalla mallintamisella voidaan kuvata tarkasti ratarakenteen geometria ja eri komponentit, mutta varsinkin kolmiulotteisen tapauksen mallintaminen on varsin työlästä.

Tämän tutkimuksen yhteydessä ei mallintamisen vaativuudesta johtuen tarkasteltu raitiotierakenteeseen vaikuttavia kuormituksia elementtimenetelmällä. Monikerroslaskennalla saadaan kuitenkin riittävä varmuus tukikerroksen alapuolisten rakennekerrosten pystyjännitystasojen arviointiin. Vertaamalla näitä tuloksia tierakenteessa vaikuttaviin jännitystasoihin voidaan arvioida olemassa olevan, tie- ja katurakenteisiin keskittyvän betonimurskerakenteita koskevan tutkimustiedon hyödynnettävyyttä raitiotierakentamisessa. Laskelmat suoritettiin vain tukikerroksellisen radan osalta, sillä se on kiintorai-teellista rataa kriittisempi murskekerrosten kuormitusten suhteen.

Tässä tutkimuksessa tehdyissä tarkasteluissa käytettiin kuvan 3.7 mukaista kuormituskonfiguraatiota. Kolmea peräkkäistä ratapölkkyä mallinnetaan yhdeksällä kuormitusympyrällä. Ympyröiden pinta-ala määritettiin laskemalla ratapölkyn tehokas pinta-ala huomioimalla pölkyn keskellä oleva osuus, josta ei välity kuormituksia tukikerrokseen. Laskennassa mallinnettiin vain pölkkyjen toinen pää laskentaohjelman kuormitusympyröiden määrän rajoitteen vuoksi. Kuormituksia määritettäessä mitoitusakselipainoksi valittiin 120 kN ja siitä oletettiin kohdistuvan akselin alapuoliselle pölkylle 50 % ja viereisille pölkylle 25 %. Kuormia laskettaessa huomioitiin liikennekuorman lisäksi ratapölkyn ja kiskon rakenteeseen kohdistama kuormitus. Pölkyn painoksi laskelmissa oletettiin 240 kg ja kiskon metripainona käytettiin arvoa 60 kg/m.



Kuva 3.7 BISAR-tarkasteluissa käytetty kuormituskonfiguraatio.

Mallinnuksessa käytetty rakenne koostui 0,3 m tukikerroksesta, 0,3 m välikerroksesta ja 1,45 m eristyskerroksesta. Tukikerros ja välikerros jaettiin laskennassa kahteen ja eristyskerros kolmeen osaan. Mallintamalla tarkasteltiin tapausta, jossa betonimursketta käytettiin eristyskerroksessa ja välikerroksen alaosassa sekä tapausta, jossa betonimursketta käytettiin vain eristyskerroksessa. Lisäksi kummankin rakenteen osalta tarkasteltiin pohjamaan vaikutusta vertailemalla tavanomaisella ja erittäin pehmeällä pohjamaalla saatuja tuloksia. Betonimurskeen E-moduuliluvun vaikutusta tuloksiin tutkittiin tekemällä laskelmat kolmella eri arvolla: 300, 500 ja 700 MPa. Yhteensä erilaisia yhdistelmiä oli siis 12 kappaletta. Jännitystasoja tarkasteltiin kuudella eri syvyydellä pölkyn alapinnasta: 0, 300, 400, 600, 1200 ja 2050 mm. 300 mm syvyydellä verrattiin lisäksi jännitysten eroa kuormituskonfiguraation keskellä ja pölkyn pään kohdalla.

Laskelmien tuloksina saadut jännitystasot eri syvyyksillä olivat kaikilla rakennetyypeillä hyvin lähellä toisiaan. Verrattaessa mallinnuksesta saatuja tuloksia tierakenteessa esiintyviin liikennekuormituksiin havaitaan niiden olevan huomattavasti pienempiä. Esimerkiksi Haakana (2014) on diplomityönsä yhteydessä tutkinut tierakenteessa liikennekuormituksen alaisena esiintyviä pystyjännityksiä kenttämittauksin. Tutkimukses-

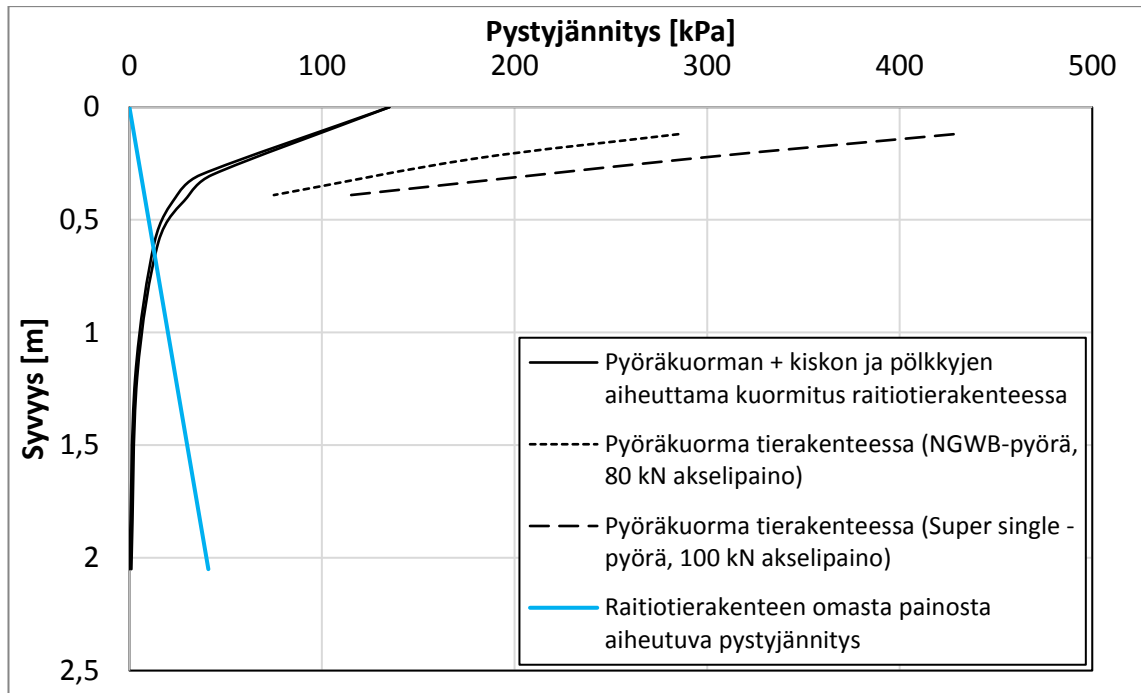
sa instrumentoitiin alemman tieverkon päällystetty tie ja mitattiin eri syvyyksillä esiintyviä jännityksiä 80 ja 100 kN akselipainoilla sekä erityyppisillä rengastuksilla ja rengaspaineilla. Jännityksiä tierakenteessa mitattiin syvyytasoilla 120, 230 ja 390 mm.

Haakanan (2014) diplomityössä instrumentoitu kohde oli asfalttipäällysteinen tie, jonka rakennekerrokset koostuivat 40 mm paksuisesta PAB-V -päällysteestä, 100 mm murskekerroksesta päällysteen alla, 150 mm sekoitusjyrsitystä kerroksesta (vanha PAB + murske) sen alapuolella sekä 200 mm soramurskekerroksesta alimmaisena rakenneosana. Tien pohjamaa koostui kuivakuorikerroksesta, noin metrin paksuisesta silttikerroksesta ja noin kahden metrin syvyydessä alkaneesta silttimoreenikerroksesta. Kova pohja sijaitsi noin kuuden metrin syvyydessä. Suurimmat pystyjännitykset mitattiin super single -yksittäispyörillä ja pienimmät 80 kN akselipainoa lukuun ottamatta pari-pyörillä. 80 kN akselipainolla mitattiin testin pienimmät kuormitukset uuden sukupolven leveillä NGWB-yksikkörenkailla (New Generation Wide Base).

Taulukossa 3.2 ja kuvassa 3.8 on esitetty Haakanan tutkimuksessa saadut mittaustulokset verrattuna tässä tutkimuksessa tehdyistä BISAR-laskelmista saatuihin tuloksiin. BISAR-laskelmien mukaisesti pystyjännityksiin sisältyy kaluston pyöräpainon lisäksi ratapölkkyjen sekä kiskojen aiheuttama kuormitus. Kuvassa 3.8 on lisäksi esitetty raitiotien murskerakennekerrosten oman painon aiheuttama pystykuormitus rakenteessa. Betonimurskeen ja luonnonkiviainesmurskeen tilavuuspainona on käytetty arvoa 20 kN/m³. BISAR-laskelmien lähtötiedot ja tulokset on esitetty tarkemmin liitteissä A ja B.

Taulukko 3.2 BISAR-laskennasta saatujen raitiotierakenteen pystyjännitysten vertailu Haakanan (2014) tutkimuksen tierakenteen kenttämittauksissa saatuihin arvoihin.

Syvyys [mm]	Sijainti rakenteessa (Raitiotie)	Pystyjännitys [kPa]		Sijainti rakenteessa (Tie)
		BISAR	Haakana 2014	
0	Pölkyn alapinta	135		
120			285 - 428	Kantava kerros
230			178 - 290	Sekoitusjyrsitty kerros
300	Tukikerroksen alapinta	37 - 43		
390			75 - 115	Vanha tierakenne
400	Välikerros	24 - 30		
600	Välikerroksen alapinta	13 - 15		
1200	Eristyskerros	3 - 4		
2050	Eristyskerroksen alapinta	0 - 1		



Kuva 3.8 BISAR-laskennasta saatujen raitiotierakenteen pystyjännitysten vertailu tierakenteesta mitattuihin arvoihin.

Kuten taulukosta 3.2 ja kuvasta 3.8 nähdään, ovat tierakenteessa mitatut pystyjännitykset huomattavasti suurempia kuin laskennallisesti raitiotierakenteeseen kohdistuvat pystyjännitykset. Raitiotiellä liikennekuormat välittyvät rakennekerrokseen kiskoja ja rata-pölkkyjen kautta. Tierakenteessa kuormat taas välittyvät ajoneuvon renkaiden ja tien päällysteen välisen kosketuspinnan kautta. Laskelmissa käytetyillä ratapölkyn mitoilla ja kiskokaluston akselipainolla saadaan akselin kohdalla olevan pölkyn rakenteeseen aiheuttaman pintapaineen arvoksi noin 131 kN/m^2 . Laskelmissa käytettiin arvoa 135 kN/m^2 . Kuorma-auton paripyöräasennuksen tai leveän yksittäispyörän ja tien välinen kontaktipinta on kooltaan noin luokkaa $570\text{--}980 \text{ cm}^2$, jolloin pintapaineeksi $80\text{--}100 \text{ kN}$ akselipainoilla saadaan noin $408\text{--}877 \text{ kN/m}^2$ (COST 2001).

Pyöräkuormituksen vaikutus pienenee rakenteessa alaspäin mentäessä. Toisaalta taas väylärakenteen oman painon aiheuttaman kuormituksen suuruus kasvaa. Kuvan 3.8 mukaisesti raitiotien murskerakennekerrosten oma paino on merkittävin eristyskerroksessa vaikuttava kuormitus. Väylärakenteen aiheuttama pystykuormitus on saman suuruinen myös tierakenteessa, jossa betonimurskerakenteet ovat toimineet hyvin.

Vetojännitykset betonimurskekerroksen alapinnassa olivat laskelmien mukaan varsin pieniä. Vetojännitys oli suurimmillaan pehmeällä pohjamaalla noin $4,1 \text{ kPa}$ ja pienimmillään perustapauksessa $1,7 \text{ kPa}$. Betonimurskerakenteen voidaan olettaa kestävän tämän tasoiset vetojännitykset vaurioitumatta. Arvoja voidaan verrata esimerkiksi maabetonin eli sementtistabiloidun maan taivutusvetolujuuteen, jonka arvioidaan olevan noin 10 % sen puristuslujuudesta (Alkio et al. 2002). Liikenneviraston ohjeistuksen mukaan tien päällysrakennetta stabiloitaessa sementtistabiloidun massan puristuslujuuden on

28 vuorokauden iässä oltava välillä 5–13 MPa (Tiehallinto 2007a). Betonimurskeen puristuslujuus 28 vuorokauden iässä on BeM I-luokan murskeilla vähintään 1,2 MPa ja BeM II-luokan murskeilla vähintään 0,8 MPa (Tiehallinto 2005). Vaikka lujittuneen I- tai II-luokan betonimurskerakenteen vetolujuus olisi vain 1 % sen puristuslujuudesta, olisi se silti vähintään luokkaa 8–12 kPa.

Kiintoraiteella kuormituksen jakautuminen alusrakenteeseen on vielä tukikerroksellista rataa tasaisempaa jäykän laattarakenteen ansiosta. Jatkuvan kiskontuennan myötä kiintoraiteella ei myöskään esiinny tukikerroksellisella radalla mahdollisesti vaikuttavaa ratapölkkyjen tukeutumistilanteen vaihteluista johtuvaa dynaamista herätettä. Kiintolaatan omasta painosta voi aiheutua pölkkyrakennetta suurempi staattinen kuormitus alusrakenteeseen. Kiintolaattarakenteita on kuitenkin olemassa useita erilaisia ja siten myös eripainoisia.

3.3 Poikkisuuntaiset kuormitukset

Kaarteessa rataan kohdistuu kvasistaattinen poikkisuuntainen kuorma kaluston tasapainottamatta jäävästä keskihakuvoimasta ja dynaamisia kuormia raiteeseen kohdistuvista sysäyksistä. Lisäksi kalustoon vaikuttaa tuulikuorma. Rataan vaikuttava poikkisuuntainen kokonaisvoima voidaan esittää yhtälön 3.4 mukaisessa muodossa (Esveld 2001):

$$Y_{tot} = (Y_{flange} + Y_{centr} + Y_{wind}) + Y_{dyn} \quad (3.4)$$

missä

Y_{tot} on pyörään poikkisuunnassa vaikuttava kokonaisvoima

Y_{flange} pyörän laipan ja kaarteiden ulkokiskon kontaktista aiheutuva poikkisuuntainen voima

Y_{centr} poikkisuuntaisen voiman lisäys kompensoimattoman keskihakuvoiman vaikutuksesta kaarteissa

Y_{wind} tuulesta aiheutuva poikkisuuntaisen voiman lisäys

Y_{dyn} poikkisuunnassa vaikuttavat dynaamiset voimat

Mikäli oletetaan sekä keskihakuvoimasta että tuulesta aiheutuvien voimien vaikuttavan kokonaan kaarteiden ulommalla kiskolla, saadaan poikkisuuntaiselle kvasistaattiselle voimalle kuvassa 3.1 esitetyn voimatasapainon perusteella yhtälön 3.5 mukainen maksimiarvo (Esveld 2001):

$$Y_{e\ max} \approx G \frac{h_d}{s} + H_w \quad (3.5)$$

Myös poikkisuuntaisten voimien kohdalla vaikeimmin määritettävissä oleva osa on kuormitusten dynaaminen komponentti. Samoin kuin pystysuuntaisten voimien tapauksessa, myös poikkisuunnassa dynaamista voimaa voidaan arvioida sysäyslisän avulla.

Suomalaisessa rautateiden suunnitteluohjeistuksessa radan kallistuksen avulla tasapainottamatta jäävästä keskihakuvoimasta, tuulikuormasta sekä junasta raiteeseen kohdistuvista sykäyksistä aiheutuvan radan poikittaissuuntaisen kuorman oletetaan olevan enintään niin kutsutun Prudhommen kaavan mukaisen (RHK 2002). Kyseisen yhtälön 3.6 mukaan radan poikkisuuntaiset voimat ovat enintään:

$$\Sigma Y_{(2m)} \leq \alpha \left(10 + \frac{P_0}{3} \right) \quad (3.6)$$

missä

$\Sigma Y_{(2m)}$ on suurin raiteeseen kahden metrin matkalla kohdistuva poikittaissuuntaainen voima

α kerroin: vetokalustolle ja henkilövaunuille 1, tavaravaunuille 0,85

P_0 akselipaino (kN)

3.4 Pituussuuntaiset kuormitukset

Pituussuunnassa rataan kohdistuu kuormia kaluston kiihdytyksestä ja jarrutuksesta sekä mäen noususta. Suomen rautateillä käytössä olevan RATO-ohjeistuksen mukaan junan jarrutusvoima tavanomaisella jarrujärjestelmällä on noin 25 % staattisesta painosta (RHK 2002). Ohjeistuksessa ei ole huomioitu uusia suurempitehoisia jarrutyyppejä, kuten esimerkiksi pyörrevirtajarruja. Pyörrevirtajarrujen ja muiden kitkaa tai magnetismia hyödyntämättömien jarrujärjestelmien käyttö on Suomen rataverkolla kielletty (Liikennevirasto 2012b). Rataan kohdistuvien pitkittäisvoimien rajoittamiseksi kalustoyksikön kiihtyvyys ja hidastuvuus on rajoitettu arvoon 2,5 m/s².

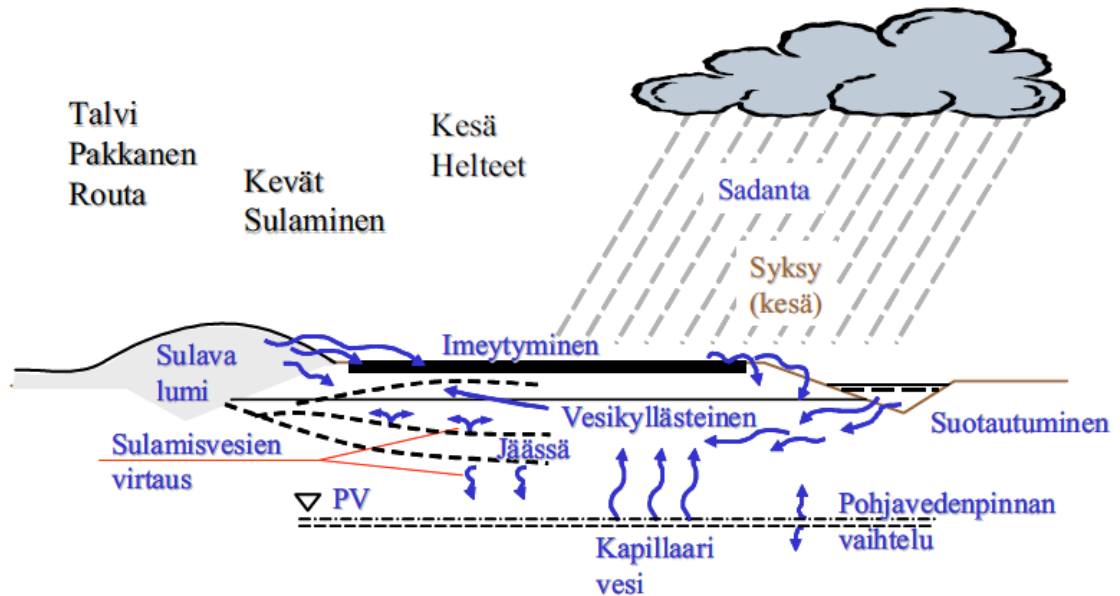
Raitioteillä kaluston aiheuttamat radan pituussuuntaiset kuormitukset ovat rautateitä vähäisempiä kaluston pienemmän painon johdosta. Raitiovaunuilla suurin kiihtyvyys ja hidastuvuus matkustaja-ajossa ovat yleensä noin 1,2–1,3 m/s². Suuremmat kiihtyvyyssarvot ovat vähentäisivät matkustusmukavuutta. Nykyaikaiset raitiovaunut on varustettu usein hydraulisilla levyjarruilla, jarrutusenergiaa talteen keräävillä sähköjarruilla ja lähinnä hätäjarruna käytettävillä magneettisilla kiskojaruilla.

Kaluston lisäksi pituussuuntaisia voimia rataan aiheutuu lämpötilan vaihtelusta kiskoon muodostuvista lämpövoimista. Nämä voivat nousta jatkuvakiskoraiteella hyvinkin suuriksi. Kiskon liikkeitä pituussuuntaisten kuormitusten vaikutuksesta estetään kiskonkiinnityksellä.

3.5 Ympäristökuormitukset

Kiskoilla liikkuvan kaluston lisäksi raitiotierakenteeseen vaikuttavat ympäristöstä aiheutuvat kuormitukset. Tärkeimpiä asioita kaikessa maarakentamisessa on veden hallinta. Vettä pääsee väylärakenteisiin monella eri tavalla ja sillä on huomattava vaikutus ra-

kenteen kuormituskestävyyteen. Kuvassa 3.9 on esitetty tierakenteeseen päätyvän veden mahdollisia lähteitä. Samat reitit pätevät myös ratarakenteeseen. Suomessa erityisen merkittävä ympäristökuormitus aiheutuu lisäksi verrattain suuresta lämpötilan vaihtelusta eri vuodenaikojen välillä.



Kuva 3.9 Väylärakenteen ilmastokuormitukset (Belt et al. 2002).

Ratarakenteen jäätyminen ja sulaminen aiheuttavat sekä suoranaisia että välillisiä muutoksia rakenteessa. Rakenteen jäätyessä sen jäykkyys kasvaa moninkertaiseksi. Lämpötilan muutokset vaikuttavat rataan myös sen rakennekerroksissa ja pohjamaassa sijaitsevan veden jäätyneen ja sulamisen kautta. Mikäli routimisen perusedellytykset täyttyvät, voi rakenteessa tapahtua routanousua. Routiminen edellyttää routivaa rakennemateriaalia, rakenteen jäätymistä ja veden pääsyä rakennekerrokseen. Lisäksi rakenteeseen muodostuvien jäälinssien aiheuttaman routimispaineen tulee ylittää yläpuolisten maakerrosten ja rakenteiden aiheuttama kuormitus. Routimisen myötä radan geometria voi muuttua ja radan komponentteihin aiheutua ylimääräisiä rasituksia. (Ehrola 1996)

Rautateillä roudan vaikutukset näkyvät erityisesti keväisin, kun routaantunut kerros alkaa sulaa yläosastaan ja sulamisesta syntyvä vesi jää vielä sulamattoman routakerroksen yläpuoliseen rakenteeseen tai maakerrokseen. Hienorakeisen maakerroksen joutuessa vedellä kyllästettyyn tilaan heikkenee sen kantavuus huomattavasti. Routapehmenemisen myötä Suomen rataverkolla joudutaan keväisin asettamaan väliaikaisia nopeusrajoituksia ja tekemään korjaustoimenpiteitä, kuten raiteen kiilauksia. Rautateiden routaongelmat johtuvat suurelta osin riittämättömistä rakennepaksuuksista. Routimattoman rakenteen paksuuden lisäys vanhalle radalle vaatisi käytännössä radan uudelleenrakentamista, mikä olisi erittäin kallista. Uusilla radoilla roudan aiheuttamia ongelmia voidaan merkittävästi vähentää riittävillä rakennekerrospaksuuksilla.

Puhtaan veden lisäksi raitiotierakenteeseen voi päästä erilaisia kemikaaleja raitiotien ja katujen kunnossapidosta, liikenteestä ja liukkaudentorjunnasta. Raitioteilla voidaan käyttää kiskojen voitelua esimerkiksi pienisäteisissä kaarteissa kiskojen kulumisen vähentämiseksi. Kiskojen voitelussa käytettävät rasvat ja öljyt ovat nykyisin biohajoavia, eivätkä ne aiheuttane riskiä raitiotierakenteiden pitkäaikaiskestävyydelle. Voiteluaineita ei toisaalta edes pääse radan rakenteisiin merkittäviä määriä voitelun tarkan kohdistamisen sekä suhteellisen vähäisten käyttömäärien vuoksi. Suomessa myös rautateilla on käytetty kiskojen voitelua jo vuosikymmenten ajan (Piiroinen 2010).

Toinen muusta katuymäristöstä poikkeava raitioteilla käytettävä kemikaali on ajolan gan jäätyminenestokäsittelyssä käytettävä glyseroli. Määrät ovat kuitenkin varsin pieniä ja käytön vaikutus raitiotien pohjarakenteisiin oletettavasti merkityksetön. Merkittävin kaupunkiymäristöstä raitiotiehen aiheutuva kemiallinen riski lienee katujen liukkaudentorjuntaan käytettävä suola. Suola pienentää veden pintajännitystä, mikä helpottaa sen pääsyä murskerakenteen huokosiin ja näin lisää routimisen riskiä. Suolan vaikutuksia betonimurskekerroksessa voidaan vähentää peittämällä rakenne riittävän tiiviillä päällysteellä. Esimerkiksi betonimurskeen valmistaja Ruduksen (2017) julkaisemassa suunnitteluohjeistuksessa betonimurskekerros kehoitetaan päällystämään runsaasti suolattavilla tie- ja katualueilla tiiviillä (tyhjätila < 3 %, vedenläpäisevyys < 10⁻⁹ m/s), vähintään 70 mm paksuisella asfalttibetonikerroksella.

4. BETONIMURSKE VÄYLÄRAKENTEEN MATERIAALINA

Betonijätettä syntyy uudisrakentamisessa, betonisten rakennusten ja rakenteiden purkamisessa sekä suoraan betoni- ja betonituoteteollisuudessa. Suurin osa betonijätteestä, arviolta 60–80 %, syntyy purkutyömailla (Siikanen 2009). Purkutyömaiden lisäksi merkittävä betonijätteen lähde on ontelolaattateollisuus, jossa sitä muodostuu tuotannossa rikkoutuneista laatoista sekä katkaisun yhteydessä syntyvistä hukkapaloista (Pajukallio et al. 2011). Uudisrakentamisen sekä elementti- ja valmisbetonituotannon jätemäärät jäävät suhteellisen pieniksi. Suomessa syntyvän betonijätteen kokonaismäärästä ei ole saatavilla tarkkaa tietoa, mutta sen arvioidaan olevan noin 1,5 miljoonaa tonnia vuodessa (Vuorinen 2017).

4.1 Betonimurskeen valmistus ja ympäristövaikutukset

Betonijätettä voidaan kierrättää esimerkiksi käyttämällä elementit uudelleen kokonaisuina tai murskaamalla betonikappaleet betonimurskeeksi infrarakentamiseen tai uuden betonin runkoaineeksi. Kokonaisten betonielementtien uudelleenkäyttö on Suomessa vielä hyvin vähäistä (Vakkuri 2011). Kokonaisten betonielementtien uudelleenhyödyntämisen osuutta betoninkierrätyksestä on hidastanut esimerkiksi purkutyön kustannukset sekä epäilykset vanhojen elementtien soveltumisesta uusiin rakennuskohteisiin (Huuhka 2010). Ympäristövaikutuksiltaan osien uudelleenkäyttö on kuitenkin muita kierrätysmenetelmiä parempi.

Kierrätysbetonin käyttö luonnonkiviaineksen korvaajana betonin runkoaineena taas säästää kiviainesvarantoja, mutta kuluttaa tavanomaisen betonin valmistusta enemmän energiaa suuremman sementintarpeen myötä (Huuhka 2010). Betonimurskeesta täytyy myös seuloa hienoaines pois käytettäessä sitä uuden betonin runkoaineena, mikä voi tarkoittaa lähes puolta betonimurskemäärästä (Siikanen 2009). Betonijätteen suosituin kierrätystapa onkin ollut murskeena maarakentamisessa. Betonin uusiokäytöllä murskattuna voidaan vähentää luonnonkiviainesmateriaalien tarvetta. Betonimurskeella toteutetuista rakenteista voidaan myös tehdä luonnonkiviainesrakennetta ohuempia sen suuremman lujuuden ansiosta. Usein rakennepaksaus tosin määräytyy routamitoituksen eikä kantavuuden perusteella, jolloin betonimurskeen käyttö ei siihen vaikuta.

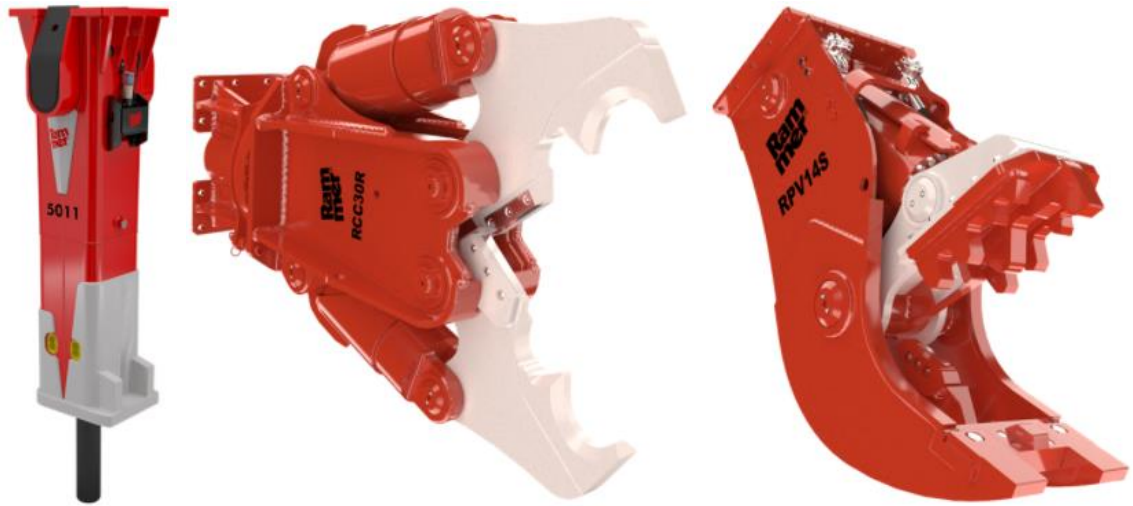
Luonnonvarojen säästymisen lisäksi betonimurskeen käyttö lisää rakennushankkeen ympäristöystävällisyyttä siinä tapahtuvan hiilidioksidin sitoutumisen kautta. Betonin sisältämään sementtiin sitoutuu ympäröivästä ilmasta hiilidioksidia karbonatisoitumisre-

aktion kautta. Karbonatisoitumista tapahtuu jo vielä käytössä olevissa betonirakenteissa, mutta murskattaessa betonin pinta-ala moninkertaistuu ja runsaasti uutta betonipintaa paljastuu, mikä kiihdyttää hiilidioksidin sitoutumista. Sementin valmistus on merkittävä ilmakehään vapautuvan hiilidioksidin lähde, esimerkiksi Suomen hiilidioksidipäästöistä noin 1,3 % syntyy sementin valmistuksesta. Suurin osa hiilidioksidista vapautuu sementin pääraaka-aineesta, kalkkikivestä sen polton yhteydessä ja loput polttoprosessiin tarvittavasta polttoaineesta. Karbonatisoitumisen myötä huomattava osa kalkkikivestä vapautuneesta hiilidioksidista sitoutuu takaisin betoniin. Noin neljännes hiilidioksidista sitoutuu betoniin jo alkuperäisen rakenteen käyttöaikana ja jopa kaksi kolmasosaa betonin murskauksen ja 30 vuoden käyttöään jälkeen uusiorakentamisessa. (Saarinen 2015; *Betoni.com* 2018)

Betonimurskeen tuotanto alkaa vanhan betonirakennuksen purkamisella tai betonituote-teollisuuden ylijäämäkappaleiden keräämisellä. Purkutyön suoritustavalla on suuri merkitys työmailla syntyvän betonimurskeen laatuun. Purettavista rakennuksista löytyy betonin lisäksi monia eri materiaaleja, kuten tiiltä, puuta, lasia ja eristeitä. Suorittamalla purkutyö lajittelevasti ehkäistään erilaisten materiaalilajitteiden sekoittumista ja helpotetaan jätteiden kierrätystä. Näin myös betonimurskeesta saadaan koostumukseltaan mahdollisimman homogeenista, puhdasta ja teknisiltä ominaisuuksiltaan laadukasta maarakennusmateriaalia.

Betonijäte voidaan murskata joko samalla työmaalla jossa se syntyy tai se voidaan kuljettaa erilliseen kierrätyskeskukseen käsiteltäväksi. Työmaalla tapahtuva murskaaminen vaatii murskauskaluston hankkimista paikalle sekä riittävästi työskentely- ja varastotilaa alueella. Se onkin järkevää lähinnä vain suurissa purkukohteissa. Useimmiten jätebetoni toimitetaan vastaanottoalueelle sen käsittelyyn erikoistuneelle toimijalle, joka murskaa sen ja myy edelleen rakennusmateriaaliksi.

Lajittelevan purkutyön yhteydessä betonirakenteiden purkamisessa ja betonikappaleiden pienentämisessä käytetään pääasiassa kaivinkoneeseen kiinnitettäviä lisälaitteita. Perinteisesti purkutöissä on käytetty hydraulista iskuvasaraa. Se on tehokas väline varsinkin massiivisten betonirakenteiden purkamiseen. Iskuvasarointi on kuitenkin meluisaa, eikä sillä pystytä erottelemaan raudoitusteräksiä betonista. Paremmin betonirakenteiden purkuun soveltuvia laitteita ovat leikkurimurskain sekä pulveroija. Suuret, yli 0,5–1 m paksuiset betonikappaleet on kuitenkin paloiteltava esimerkiksi iskuvasaralla ennen käsitteilyä leikkurimurskaimella tai pulveroijalla. Kuvassa 4.1 on esitetty erilaisia betonirakenteiden purkamisessa käytettäviä laitteita.



Kuva 4.1 Betonirakenteiden purkuun käytettäviä kaivinkoneen lisälaitteita: hydraulinen iskuvasara (vas.), leikkurimurskain ja pulveroija (Sandvik Mining and Construction Oy 2018).

Leikkurimurskain ja pulveroija ovat toimintaperiaatteeltaan varsin samanlaisia, mutta leukojen erilaisen muotoilun vuoksi niiden käyttöalueet ovat erilaiset. Leikkurimurskainta käytetään betonirakenteiden leikkaamiseen ja paloitteluun. Se soveltuu hyvin esimerkiksi rakennuksen betonisen rungon purkamiseen. Pulverisoija taas soveltuu erityisesti betonikappaleiden hienontamiseen. Leikkurimurskaimella ja pulverisoijalla saadaan betonimurskeen esikäsittelyn yhteydessä poistettua osa raudoitusteräksistä. Loput teräkset voidaan poistaa murskaamisen yhteydessä magneettierottelulla. Kuvassa 4.2 nähdään kaivinkoneeseen kiinnitetyn pulverisoijan käyttöä purkutyömaalla.



Kuva 4.2 Betonin pulverointia kaivinkoneeseen kiinnitetyllä lisälaitteella. Etualalla betonijätteestä eroteltuja raudoitteita. (NPK Construction Equipment, Inc. 2018)

Pelkällä pulveroinnilla ilman murskausta voidaan valmistaa raekooltaan pienimmillään noin 0/150–200 mm betonilouhetta, joka soveltuu lähinnä erilaisiin täyttöihin. Ylemmissä rakennekerroksissa käytetään yleensä raekooltaan pienempää murskettä. Maarakenteissa ilman ympäristölupamenettelyä hyödynnettävissä olevan, MARA-asetuksen mukaisesti käytettävän betonimurskeen suurin sallittu raekoko on 90 mm. Pulveroinnin kustannukset ovat suhteellisen suuret ja lopputuotteen arvo vähäinen, joten käytännössä jätebetoni on lähes aina järkevintä murskata pienempään raekokoon murskainlaitoksella (Määttänen 2000). Murskaamalla betonijätteestä saadaan tasalaatuisempaa ja laadukkaampaa uusiomateriaalia. Lisäksi raudoiteteräkset ja muut epäpuhtaudet pystytään poistamaan tehokkaammin. Pulverointi on kuitenkin hyödyllinen tai jopa välttämätön esikäsitteilymenetelmä.

Esikäsitteilyn jälkeen betonikappaleet murskataan murskauslaitoksessa haluttuun raekokoon ja loput metallikappaleet erotellaan jälleen magneettisilla erottimilla. Betonijätteen seassa olevia kevyitä epäpuhtauksia, kuten puuta, muovia ja paperia erotellaan betonista käsin tai koneellisesti. Epäpuhtauksien erilaisten ominaisuuksien johdosta samat menetelmät eivät sovellu kaikille lajitteille. Käsiyönä tehtävä erottelu on tehokas menetelmä yksittäisten suurten epäpuhtauksien poistamiseen. Käsiyönä voidaan myös poistaa epäpuhtauksia, jotka ovat ominaispainoltaan lähellä betonia. Koneelliset kuiva- ja märkäerottelumenetelmät perustuvat epäpuhtauksien keveyteen. Kuivamenetelmässä epäpuh-

taudet puhalletaan tai imetään pois betonimurskeesta ja märkämenetelmässä ne erotellaan vesialtaassa. Epäpuhtauksia voidaan myös poistaa betonimurskeesta seulomalla. (Määttänen 2000)

Betonin murskaamisessa käytetään betonille tai pehmeille kivilajeille tarkoitettua murskainta. Toimintaperiaatteeltaan ja ulkomuodoltaan murskaimet vastaavat tavallisille luonnonkiviaineksille tarkoitettuja murskaimia. Yleisimmät murskaintyyppit ovat iskupalkkimurskain, leukamurskain ja kartiomurskain. Kuvassa 4.3 on esitetty erityyppisiä murskaimia. Erilaiset murskaimet tuottavat samasta lähtömateriaalista hieman erilaisia lopputuotteita. Iskupalkkimurskaimella betonimateriaalista tulee raemuodoltaan parhaiten maarakentamiseen soveltuvaa, kuutiomaista murskettä. Enemmän rakeiden puristamiseen perustuvilla murskaimilla rakeet ovat liuskamaisempia. Taulukossa 4.1 on vertailtu erilaisten murskainten ominaisuuksia. Murskainten ominaisuudet vaikuttavat myös syntyvän hienoaineksen määrään. Taulukossa 4.2 on esitetty eräässä tutkimuksessa saatuja karkeita lukuarvoja erilaisilla murskainyhdistelmillä syntyvistä raekooltaan alle 4 mm aineksen määristä.



Kuva 4.3 Erilaisia murskaimia: leukamurskain (vas.), kartiomurskain ja iskupalkkimurskain (Metso Corporation 2018).

Taulukko 4.1 Eri murskaintyyppien ominaisuuksien vertailua uusiokiviaineksia käsitellessä. Suomennettu lähteestä Alaejos et al. 2013.

Ominaisuus	Leukamurskain	Kartiomurskain	Iskupalkkimurskain
Tehokkuus	Korkea	Matala	Keskitasoa
Tuotantokustannus	Matala	Keskitasoa	Korkea
Kuluminen	Matala	Matala	Keskitasoa
Murskeen laatu	Matala	Keskitasoa	Korkea
Hienoainespitoisuus	Matala	Korkea	Korkea
Energiankulutus	Matala	Keskitasoa	Korkea

Taulukko 4.2 Raekooltaan alle 4 mm aineksen määrien suuruusluokkia erilaisilla murskainyhdistelmillä betonia murskattaessa (Määttänen 2000, suomennettu lähteestä Buchner & Scholten 1992).

Murskainten tyypit	Hienoaineksen (< 4 mm) määrä [%]
Leuka / Leuka	10
Leuka / Kartio	20
Leuka / Isku	30
Isku / Isku	40

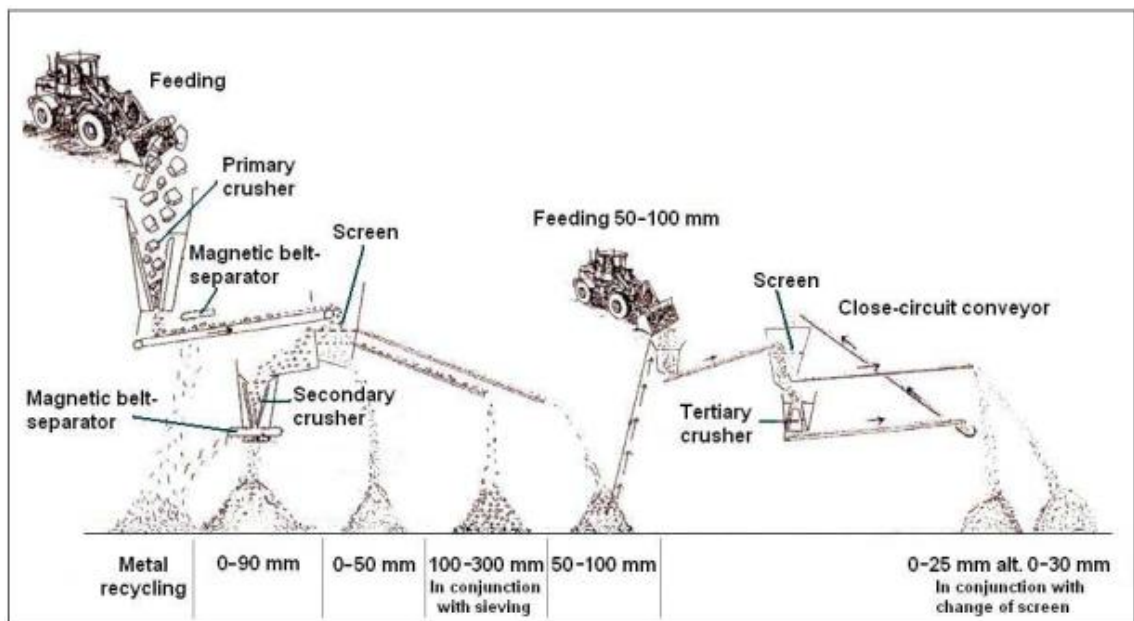
Betonin murskaamiseen käytetään betonijätteen vastaanottokeskuksissa yleensä liikuteltavia murskainlaitoksia. Suurille murskausmäärille tarkoitettujen murskauslaitosten lisäksi betonin murskaamiseen voidaan käyttää myös pieniä, kaivinkoneeseen kiinnitettäviä kauhamurskaimia. Nämä soveltuvat työmaalla tapahtuvaan, suhteellisen pienimuotoiseen murskaamiseen. Kuvassa 4.4 murskataan betonia tela-alustaisella murskainlaitoksella betonijätteen käsittelyalueella ja kuvassa 4.5 kaivinkoneen kauhamurskaimella työmaaolosuhteissa. Halutun raekokojakauman saavuttamiseksi murskausprosessiin voidaan sisällyttää useampia murskaus- ja seulontavaiheita. Kuvassa 4.6 on esitetty esimerkkikaavio murskausprosessista.



Kuva 4.4 Betonijätteen murskausta liikuteltavalla murskainlaitoksella jätteenkäsittelyalueella (Saarinen 2015).



Kuva 4.5 Betonijätteen murskausta työmaalla kaivinkoneeseen kiinnitetyllä kauhamurskaimella (Konepörssi 2013).



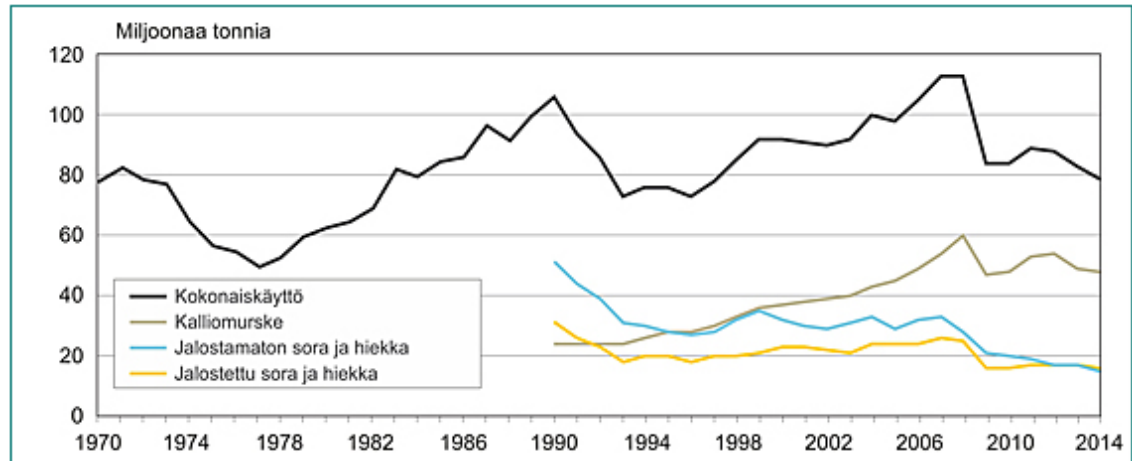
Kuva 4.6 Esimerkki betonijätteen murskaus- ja seulontaprosessista (Arm 2003).

4.2 Betonimurskeen saatavuus

Maaltamuuton vilkkaimpina aikoina 60–70-luvuilla Suomen kaupunkeihin rakennettiin nopeasti suuria lähiöitä betonielementtikerrostaloista. Lähivuosina monet näistä rakennuksista alkavat saavuttaa suunnitellun käyttöikänsä pään. Lisäksi monella paikkakunnalla lähiöiden kerrostalot ovat vajaakäytössä erilaisten yhteiskunnan rakennemuutosten johdosta (Huuhka 2010). Lähiöiden asuinkerrostalojen lisäksi myös julkisia tai liiketöiminnan rakennuksia puretaan uusien tieltä. Nykyisiin tarpeisiin sopimattomia tai huonokuntoisia rakennuksia ja rakenteita puretaan Suomessa eniten siellä, missä uuttakin rakennetaan eli kasvukeskuksissa (Lahdensivu et al. 2015). Käytettävissä olevat luonnonkiviainesvarannot taas ovat suurten kaupunkiseutujen lähistöllä vähenemässä.

Kalliosta louhittavalla murskeella on Suomessa korvattu soran ja hiekan käyttöä jo pitkään. Syinä tähän ovat olleet soravarantojen ehtyminen rakentamisalueiden läheisyydessä, soranoton lupaehtojen tiukentuminen esimerkiksi pohjaveden tai maisemallisten rajoitteiden johdosta, kalliomurskeen hyvä laatu ja soveltuminen väylärakentamiseen soraa paremmin sekä louhinta- ja murskaustekniikoiden kehitys (Betoni.com 2017). Kun 20 vuotta sitten noin kolmannes käytetystä kiviaineksesta oli kalliokiviainesta, on sen osuus nykyisin jo kaksi kolmasosaa. Erityisesti harjukiviainesvarantojen ehtyminen näkyy pääkaupunkiseudun ympäristössä Uudellamaalla. Siellä kalliokiven osuus käytetystä kiviaineksesta oli vuonna 2015 jo 88 %, kun se vuonna 2002 oli vielä 50 % (Ympäristö.fi 2015).

Kuvassa 4.7 on esitetty Suomessa käytettyjen kiviainesten arvioidut määrät vuosina 1970–2014. Määrät perustuvat valtion ympäristöhallinnon ja Infra ry:n tietoihin ja ne sisältävät sekä ottoalueilta että rakentamisen yhteydessä otetun kiviaineksen. Taloudellisen toimintaympäristön vaihtelut näkyvät rakentamisen volyyymien kautta kiviaineksen kysynnässä ja se laskikin voimakkaasti vuosien 2007–2008 huippuvuosien jälkeen. Tämän jälkeen käyttö on pysynyt melko tasaisena. Vuonna 2014 soran ja kalliokiven otomäärä oli yhteensä noin 79 miljoonaa tonnia, eli noin 14,4 tonnia asukasta kohti. Noin 45 % tästä käytetään maarakentamiseen (GTK 2017; Betoni.com 2017).



Kuva 4.7 Kiviainesten arvioitu käyttö Suomessa vuosina 1970–2014 (GTK 2017).

Soraharjut ja kalliot ovat maisemallisesti arvokkaita ympäristöjä. Lisäksi kalliot muodostavat elinympäristön poikkeuksellisen runsaalle määrälle erilaisia eliölajeja. Suomen valtion ympäristöhallinnon tavoitteena onkin lisätä uusiomateriaalien käyttöä näiden alueiden säästämiseksi. Nykyisin uusiomateriaalien osuus kiviainesten kokonaiskäytöstä on arviolta 2–3 %. Tavoitteena on päästä 10 % tasolle lähivuosina. (Ymparisto.fi 2015)

4.3 Betonimurskeen tutkimus ja käyttö Suomessa

Betonin kierrätys Suomessa alkoi vuonna 1989, kun Partek Betonila aloitti Hyrylän tehtaillaan kokeilun ontelolaattatuotannon hukkabetonin murskaamisesta ja kierrätyksestä uuden betonin runkoaineena. Betonimurskeen käytön ei tuolloin todettu olevan taloudellisesti kannattavaa uuden betonin valmistuksessa ja kokeilu jäi lyhytaikaiseksi. Vuonna 1992 betonimurskeen käyttöä alettiin tutkia uudestaan, tällä kertaa maarakentamisessa. Vuosina 1992–1994 tehtiin perustutkimusta materiaalin ominaisuuksista muun muassa Teknillisessä korkeakoulussa (TKK) ja Valtion teknillisessä tutkimuslaitoksessa (VTT). Tutkimushankkeet saivat tukea myös ympäristöministeriöltä. Suomen ensimmäinen betoninkierrätyskeskus perustettiin vuonna 1994 Helsinkiin. Samana vuonna rakennettiin myös ensimmäinen suuren mittakaavan koekohde Tielaitoksen tuella Korson ja Nikkilän väliselle tielle Uudellamaalla. (Määttänen 2000)

Betonimurskeen kehitykseen vaikutti merkittävästi vuosina 1995–1999 toteutettu Teke-sin tukema ympäristögeotekniikkaohjelma. Ohjelmaan sisältyi kaksi betoninkierrätysprojektia ja niiden yhteydessä saatiin runsaasti uutta tietoa betonimurskeen ominaisuuksista ja käyttäytymisestä koerakenteissa. 90-luvun puolivälistä 2000-luvun alkuun toteutettiin useita suuren mittakaavan betonimurskekoerakenteita tie- ja katukohteissa Uudellamaalla ja Tampereen seudulla. Myös uusia kierrätyslaitoksia avattiin ja käyttömäärät kasvoivat, vaikkakin hitaasti. Betonimurskeen käyttö jäi 90-luvulla suhteellisen vaatimattomaksi saavuttaen 100 000 tonnin vuotuisen käyttömäärän vuonna 1998. (Määttänen 2000)

Ensimmäiset betonimurskerakentamista koskevat suunnitteluohjeet julkaistiin vuonna 1996 (Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy Ab 1996) ja mitoitusparametrit vuonna 1999 (Viatek Oy 1999). Vuosituhannen vaihteessa betonimurskeen käyttö alkoi vakiintua ja se alettiin huomioida laajemmin eri tahojen suunnitteluohjeistuksissa, kuten esimerkiksi Tielaitoksen ja Kuntaliiton tie- ja katusuunnitteluohjeissa sekä RIL:n maarakennusohjeissa (Tielaitos 2000; Kuntaliitto 2000; RIL 2000). Samoihin aikoihin julkaistiin myös standardi SFS 5884 ”Betonimurskeen maarakennuskäytön laadunhallintajärjestelmä” (SFS 2001).

Betoniteollisuus ja betonimurskeen valmistajat ovat olleet merkittävässä roolissa betonimurskeen kehitystyössä jo sen alusta lähtien, niin tutkimuksessa ja tuotekehityksessä kuin ohjeistuksen julkaisemisessakin. Vuosina 2000–2002 toteutettiin ympäristöministeriön Ekoinfra-projektin tuella tutkimushanke ”Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikkörakentamisessa”, jonka tavoitteena oli uusiomateriaalirakenteiden tekninen ja toiminnallinen kehittäminen (Matinlauri 2016). Tutkimuksessa testattiin erilaisista uusiomateriaalien yhdistelmistä tehtyjä koerakenteita ja tehtiin seurantamittauksia aikaisemmin rakennetuissa koekohteissa.

2010-luvulla betonimurskeen tutkimus on jatkunut 1990-luvun koekohteiden seuranta-tutkimuksilla sekä uusilla laboratorio- ja kenttäkokeilla. Betonimurskeen käyttö on lisääntynyt tasaisesti. Rakennushankkeissa huomioidaan yhä enenevässä määrin ympäristönäkökulmat, joten painetta myös betonimurskeen käytön lisäämiselle on. Julkiset tahot ovat alkaneet esittää betonimursketta entistä näkyvämmiin yhtenä rakennusmateriaalivaihtoehtona esimerkiksi väylärakentamisessa.

Pääkaupunkiseudulla sekä HSY että seudun kaupungit Helsinki, Espoo ja Vantaa ovat julkaisseet ohjeet betonimurskeen hyödyntämisestä rakentamisessa (HSY 2014; Helsinki et al. 2015). Myös Oulun kaupungin uudessa katurakenteiden suunnitteluohjeessa on huomioitu uusiomateriaalien, mukaan lukien betonimurske, käyttö (Oulu 2017). Uusiomateriaalit hyväksytään luonnonkiviaineiksi korvaaviksi murskeiksi myös uusimmassa InfraRYL-laatuvaatimusjärjestelmässä (Rakennustieto 2017). Vuonna 2017 21 maamme suurinta kaupunkia sitoutui Suomen Kuntaliiton kuntatekniikan kehittämisen Kehtoorumin jäsenenä arvioimaan uusiomateriaalien käyttöä vuosittain merkittävässä infra-hankkeissaan (Suomen Kuntaliitto 2017). Betonimurskeen laadunhallintastandardista julkaistaan päivitetty versio vuonna 2018.

4.4 Betonimurskeen käyttöön liittyvä lainsäädäntö

Betonimurskeen käyttöä maarakentamisessa ohjaavat eurooppalainen ja kansallinen lainsäädäntö sekä eri tahojen tekemä ohjeistus. Euroopan unionin tavoitteena on vuonna 2008 julkaistun jätedirektiivin mukaan päästä vuoteen 2020 mennessä vähintään 70 painoprosentin kierrätysasteeseen rakennus- ja purkujätteen osalta. (Euroopan unioni 2008)

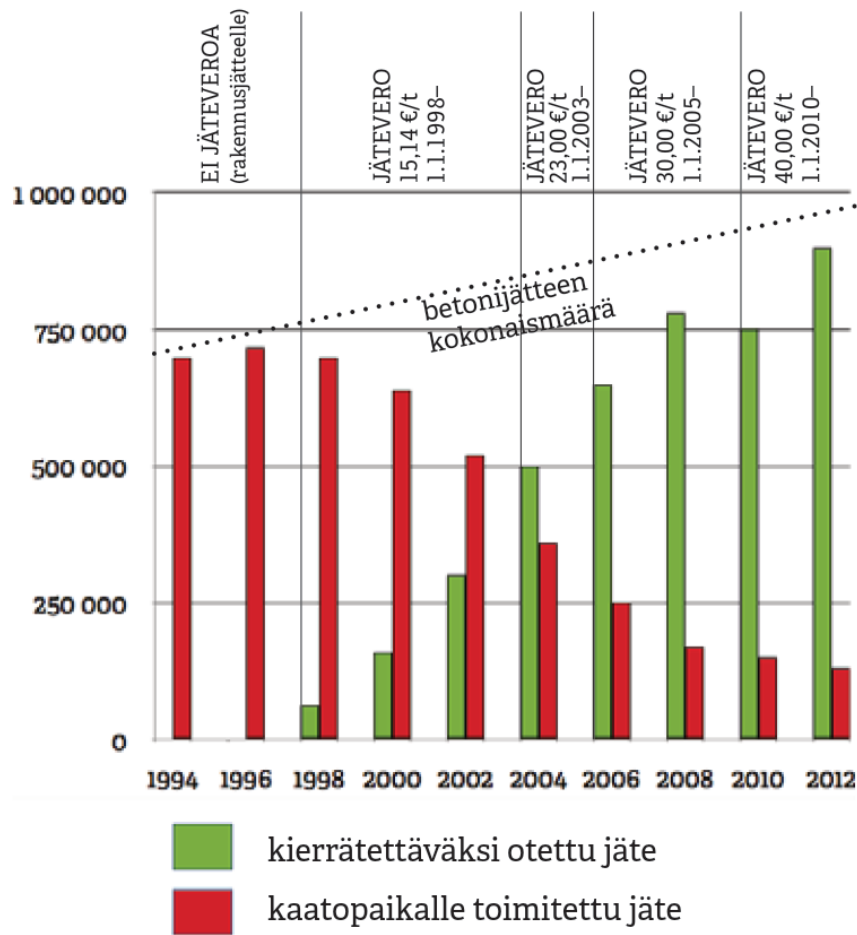
Jätedirektiivissä on esitetty jätteiden syntymisen ehkäisemistä ja jätehuoltoa koskeva jätehierarkia, jonka mukaan jätehuollossa on noudatettava seuraavaa ensisijaisuusjärjestystä:

- a) ehkäiseminen;
- b) valmistelu uudelleenkäyttöön;
- c) kierrätys;
- d) muu hyödyntäminen, esimerkiksi energiana; ja
- e) loppukäsittely.

Betonijätteen osalta ensisijaisia keinoja ovat siis tarpeettomien tai huonokuntoisten rakennusten ja rakenteiden korjaaminen tai muokkaaminen nykyisiä tarpeita vastaaviksi. Myös betonielementtien uudelleenkäyttö on jätehierarkiassa murskaamisen edellä. Usein huonosti nykyisiä tarpeita vastaava rakennus on kuitenkin järkevintä purkaa ja elementtien uudelleenkäyttöön liittyvien haasteiden vuoksi kierrätys murskeena on ollut pääasiallinen betonijätteen käsittelymenetelmä.

Suomessa kaatopaikalle päätyvän betonijätteen määrää on pyritty vähentämään valtion toimesta jo ennen EU:n jätedirektiiviäkin. Rakennusjätteiden hyötykäyttöä on saatu lisättyä asettamalla kaatopaikalle sijoitettavalle jätteelle vero ja toisaalta helpottamalla uusiomateriaalien käyttöä rakentamisessa. Osa kierrätyksestä on kuitenkin ollut siinä mielessä tuhlailevaa, ettei betonimurskeen hyviä maarakennusominaisuuksia ole täysin hyödynnetty. Murskeen käyttökohteet ovat voineet olla ennemmin jätemateriaalista eroon pääsemiseksi keksittyjä täyttöjä kuin hyvää kantavuutta vaativia rakenteita.

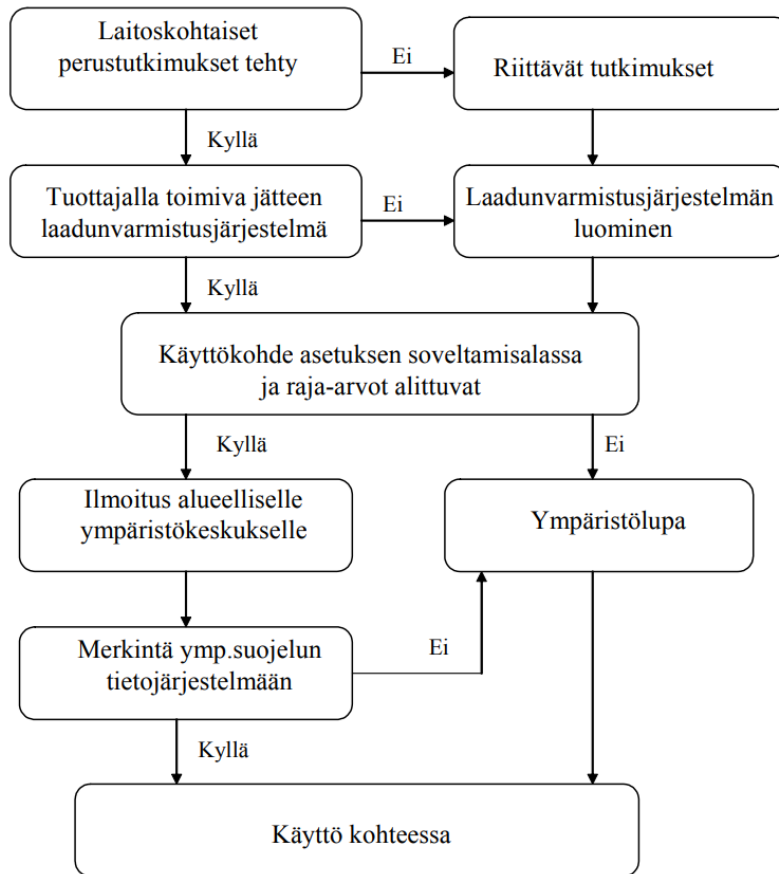
Ensimmäinen jäteverolaki tuli voimaan vuonna 1996, jolloin veroa kaatopaikalle viedyistä jätteistä joutui maksamaan 90 markkaa tonnilta (Jäteverolaki 1996). Vuoden 2017 rahanarvolla tämä on noin 21 euroa tonnilta (Suomen pankin rahamuseo 2017). Jäteveron määrää on nostettu portaittain ja vuoden 2017 alusta lähtien se on 70 euroa tonnilta (Verohallinto 2017). Veroa ei kanneta alle 150 mm kappaleista koostuvasta betonimurskeesta, joka hyödynnetään kaatopaikalla sen perustamisen, käytön tai käytöstä poistamisen kannalta välttämättömissä rakenteissa tai rakennuksissa (Jäteverolaki 2010). Kuvassa 4.8 on esitetty kierrätettävän ja kaatopaikalle toimitetun betonijätteen määrien kehitys vuosina 1994–2012 sekä kulloinkin voimassa ollut jätevero.



Kuva 4.8 Betonijätteen määrän kehitys vuosina 1994–2012. Kuva: Betoniteollisuus ry/Rudus Oy (Saarinen 2014)

Jäteverolakien ohella tärkeä lainsäädännöllinen askel betonimurskeen käytön yleistymisen kannalta on vuonna 2006 voimaan tullut valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, eli niin sanottu MARA-asetus (VNa 591/2006). Asetusta on päivitetty vuonna 2009 (VNa 403/2009; VNa 1825/2009) ja sen uusittu versio tuli voimaan 1.1.2018 (VNa 843/2017). Asetuksen uusimpaan päivitykseen liittyen julkaistiin 1.3.2018 myös asetuksen soveltamisohje (Ympäristöministeriö 2018).

MARA-asetus mahdollistaa tiettyjen ehtojen täytyessä betonimurskeen laitos- tai ammattimaisen hyödyntämisen ilman ympäristönsuojelulain (YSL 527/2014) mukaista ympäristölupaa. Vaatimukset täyttävän betonimurskeen käyttö asetuksen sallimassa kohteessa onnistuu ilmoitusmenettelyllä paikallisen ELY-keskuksen kautta. Pienimuotoinen betonimurskeen hyödyntäminen ei vaadi MARA-asetuksen mukaista ilmoitusmenettelyä eikä ympäristölupaa. Pienimuotoista hyödyntämistä säädellään kunnallisten määräysten avulla ja siihen liittyvät käytännöt vaihtelevat kunnittain. Usein pienimuotoisen käytön ylärajana on pidetty 100–1000 tonnia jätettä (Ympäristöministeriö 2017). Kuvassa 4.9 on esitetty MARA-asetuksen mukainen jätteen uusiokäytön prosessi.



Kuva 4.9 MARA-asetuksen mukaisen jätteen uusiokäyttö (Mroueh et al. 2006).

MARA-asetuksen mukaisia käyttökohteita betonimurskeen hyödyntämiselle maarakentamisessa ovat väylä- ja kenttärakenteet sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteet. Asetusta ei sovelleta vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä annetun lain (1299/2004) mukaisilla 1- tai 2-luokan pohjavesialueilla, asumiseen tai lasten leikkipai- kaksi tarkoitettulla alueella, luonnonsuojelutarkoitukseen osoitetulla alueella, ravinto- kasvien viljelyyn tarkoitettulla alueella eikä sisämaan tulvavaara-alueella. (VNa 843/2017)

MARA-asetuksen mukaisesti hyödynnettävän betonimurskeen suurin sallittu kappale- koko on 90 mm ja murskerakenteen suurin sallittu paksuus 1,5 m. Rakenne on peitettä- vä vähintään 10 cm paksuisella kerroksella luonnonkiviainesta tai päällystettävä asfalttil- la, jonka tyhjätila on enintään 5 % tai muulla materiaalilla, jolla saavutetaan vastaava suojaustaso. Betonimursketta sisältävän rakennekerroksen etäisyyden pohjavedenpinnan enimmäiskorkeudesta on oltava vähintään metri ja rakennuskohteen etäisyyden talous- vesikäyttöön tarkoitettusta kaivosta tai lähteestä vähintään 30 m. Betonimurskeen varas- tointi ja muu toiminta hyödyntämispaikalla ei saa aiheuttaa haittaa ympäristölle. Varas- toinnin saa aloittaa aikaisintaan neljä viikkoa ennen hyödyntämistä materiaalin ollessa suojaamattomana tai kaksitoista kuukautta ennen hyödyntämistä, mikäli se suojataan. (VNa 843/2017)

MARA-asetuksessa on määritetty vaadittavat haitta-ainemääritykset erityyppisille rakenteille sekä eri jätemateriaaleille. Määritykset tehdään materiaalista otettavista kokoomanäytteistä. Yhdellä kokoomanäytteellä voidaan tutkia enintään 10 000 tonnin betonimurske-erä ja sen on koostuttava vähintään 20 osanäytteestä. Taulukossa 4.3 on esitetty MARA-asetuksen mukaiset haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden raja-arvot väylärakenteessa käytettävälle betonimurskeelle. Lisäksi määritetään materiaali- ja epäpuhtaudet ja kelluvat epäpuhtaudet. (VNa 843/2017)

Taulukko 4.3 Väylärakenteessa käytettävästä betonimurskeesta laadunvalvonnan yhteydessä tehtävät liukoisuus- ja pitoisuusmääritykset raja-arvoineen MARA-asetuksen mukaan. Perustuu lähteeseen VNa 843/2017.

Haitallinen aine	Raja-arvo		
	Liukoisuus (mg/kg L/S = 10 l/kg)		Pitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)
	Peitetty rakenne	Päällystetty rakenne	
Antimoni (Sb)	0,7	0,7	
Arseeni (As)	1	2	
Barium (Ba)	40 (80)	100	
Kadmium (Cd)	0,04	0,06	
Kromi (Cr)	2	10	
Kupari (Cu)	10	10	
Lyijy (Pb)	0,5	2	
Molybdeeni (Mo)	1,5	6	
Nikkeli (Ni)	2	2	
Seleen (Se)	1	1	
Sinkki (Zn)	15	15	
Vanadiini (V)	2 (3)	3	
Elohopea (Hg)	0,03	0,03	
Kloridi (Cl ⁻) ¹⁾	3 200 (3 600) ⁵⁾	11 000 (14 000) ⁵⁾	
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻) ¹⁾	5 900 (6 000) ⁵⁾	18 000 (20 000) ⁵⁾	
Fluoridi (F ⁻) ¹⁾	50	150	
DOC ²⁾	500	500	
PAH-yhdisteet ³⁾			30
PCB-yhdisteet ⁴⁾			1
Öljyhiilivedyt C10-C40			500

¹⁾ Raja-arvoa ei sovelleta rakenteeseen, joka täyttää kaikki seuraavat edellytykset: sijaitsee enintään 500 m etäisyydellä merestä, rakenteen läpi suotautuvan veden purkautumissuunta on mereen sekä rakenteen ja meren välillä ei ole talousvedenottoon käytettäviä kaivoja

²⁾ Liuennut orgaaninen hiili

³⁾ Polyaromaattiset hiilivedyt: antraseeni, asenaftteeni, asenaftyleeni, bentso(a)antraseeni, bentso(a)pyreeni, bentso(b)fluoranteeni, bentso(g,h,i)peryleeni, bentso(k)fluoranteeni, dibentso(a,h)antraseeni, fenantreeni, fluoranteeni, fluoreeni, indeno(1,2,3-cd)pyreeni, kryseeni, naftaleeni ja pyreeni (summapitoisuus)

⁴⁾ Polyklooratut bifenyylit kongeneerit 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 (summapitoisuus)

⁵⁾ Käytetään suluissa olevaa raja-arvoa mikäli rakenteen enimmäispaksuus

Vaikka MARA-asetuksen ehdot eivät täyty, voi betonimurskeen käyttö olla mahdollista ympäristöluvalla. Luvan käsittelee aluehallintovirasto, mikäli hyödynnettävän betonimurskeen määrä on yli 50 000 tonnia vuodessa tai kunnan ympäristönsuojeluviranomainen, mikäli määrä on alle 50 000 tonnia (VNa 713/2014). Mikäli betonijätettä käsitellään yli 100 tonnia vuorokaudessa, täytyy toiminnalle lisäksi soveltaa YVA-menettelyä (YVAL 252/2017).

Euroopan unionissa vaaditaan kaikille rakennustarvikkeille CE-merkintä. Vaatimus koskee myös maarakentamisessa käytettävää betonimursketta. Merkintä vaaditaan murskeen valmistajan tuodessa tuotteen markkinoille. Merkintää ei vaadita betonimurskeelle silloin, kun mursketta ei saateta markkinoille, vaan sen omistaja suorittaa tai teettää sekä murskeen valmistuksen että sen rakenteeseen asentamisen. CE-merkinnän piiriin kuuluvat maksimiraekooltaan enintään 90 mm murskeet. 90 mm on myös MARA-asetuksen mukaisesti hyödynnettävissä olevan betonimurskeen suurin sallittu raekoko. (Euroopan unioni 2011)

4.5 Betonimurskeen käyttö muissa maissa

Ympäristönäkökulman korostuminen ja hyödynnettävissä olevien kiviainesvarantojen hiipuminen tiheästi asutuilla alueilla on lisännyt betonimurskeen käyttöä monissa maissa. Euroopassa betonin kierrätys aloitettiin jo toisen maailmansodan jälkeen, kun sodassa tuhoutuneiden kaupunkien rakennusjätteelle alettiin etsiä hyödyntämiskohteita (Buck 1977). Japanissa betonin kierrätyksestä kiinnostuttiin vuoden 1973 öljykriisin myötä (Dosho 2007). Betonia kierrätetään myös esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Australiassa, mutta toimintatavat ja kierrätyksen määrät vaihtelevat suuresti osavaltioittain (FHWA 2018; CCAA 2008). Myös Euroopassa betonin kierrätys on ollut historiallisesti yleisempää Keski-Euroopan maissa, joissa luonnonkiviaineksia on huonommin saatavilla ja toisaalta tilaa rakennusjätteen kaatopaikkasijoittamiselle on vähän (FHWA 2000). Yleisin betonimurskeen hyödyntämismenetelmä useimmissa maissa on murskeena maarakentamisessa. Alueilla, joilla hyvälaatuisesta kiviaineksesta on pulaa, käytetään betonimursketta jonkin verran myös uuden betonin runkoaineena.

Pohjoismaiden ympäristötavoitteet perustuvat Euroopan unionin lainsäädäntöön ja ohjeistukseen. Maiden erilaiset maantieteelliset olosuhteet ovat vaikuttaneet betonimurskeen käyttöhistoriaan: tiheään asutussa Tanskassa betonin kierrätyksessä ollaan oltu Euroopan kärkimaita, kun taas Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa luonnonkiviaineksen runsas saatavuus ja harva asutus ovat hillinneet betonimurskeen käyttöä. Betonin kierrätyksen määrät ovat kuitenkin kaikissa maissa nousseet viime vuosikymmeninä. Esimerkiksi Norjassa betonin kierrätys oli vähäistä aina 2000-luvun alkupuolelle asti, mutta sittemmin se on lisääntynyt huomattavan nopeasti ja kierrätysaste noussut lähes Tanskan tasolle noin 90 prosenttiin. Suomessa ja Ruotsissa betonin kierrätys on kehittynyt varsin samassa tahdissa. Pohjoismaissa lähes kaikki kierrätetty betonimurske käytetään maarakentamisessa sitomattomissa rakennekerroksissa. (Arm et al. 2014; Melhus et al. 2003)

Suomen tapaan myös Ruotsissa, Tanskassa ja Norjassa viranomaiset ovat julkaisseet ohjeistusta betonimurskeen käytöstä tierakentamisessa. Ruotsissa ja Tanskassa on säädetty Suomen MARA-asetusta vastaavat asetukset, jotka kannustavat betonin käyttöön maarakentamisessa. Ruotsissa asetukseen sisältyy Suomen tapaan ilmoitusmenettelyn mahdollistavat kriteerit, mutta myös ilmoitusvelvollisuudesta vapauttavat tiukemmat ehdot. Norjassa betonimursketta koskevat samat ympäristövaatimukset kuin luonnonkiviaineksiakin ja betonimurskeen, joka ei täytä näitä vaatimuksia, ympäristökelpoisuus arvioidaan tapauskohtaisesti. (Arm et al. 2014)

4.6 Betonimurskeen materiaaliominaisuudet

Betoni koostuu runkoaineksesta, sementistä ja mahdollisista lisäaineista. Runkoainekseksi käytetään Suomessa yleensä luonnonkiveä. Runkoaines voi olla mursketta, luonnon-soraa tai luonnonhiekkaa. Myös kierrätettyä betonimursketta voidaan käyttää uuden betonin runkoaineena. Sementin pääraaka-aine on kalkkikivi ja kemiallisesti se koostuu pääosin kalsiumoksidista ja piioksidista (Höynälä & Forsman 2000). Betonin lisäaineet ovat yleensä erilaisia polymeerejä, joilla säädellään betonin ominaisuuksia, kuten esimerkiksi notkeutta, ilmapitoisuutta tai kovettumisen nopeutta (Betoni.com 2018). Lisäaineiden määrä suhteessa muihin betonin ainesosiin on vähäinen.

Purkubetonijätteen seassa voi betonin lisäksi olla muitakin rakennuksesta löytyviä materiaaleja, kuten tiiltä, kipsiä, puuta, muoviva ja eristemateriaaleja. Rakennusjätteen käsittelyn yhteydessä purkubetoniin voi päätyä myös esimerkiksi kasvinosia. Mikromittakaavassa purkubetoni voi sisältää kemiallisia epäpuhtauksia, joita suoraan betoniteollisuudesta tulevassa betonissa ei ole. Tiili ei ole epäpuhtaus samassa mielessä kuin muut rakennusjätelajitteet ja sitä voi olla betonimurskeen seassa suhteellisen paljon. Tiili ei kuitenkaan mekaanisilta ominaisuuksiltaan ole yhtä hyvää maarakennusmateriaalia kuin betoni, joten sen erottelu parantaa betonimurskeen laatua. Betonimurske jaetaan luokkiin I-IV taulukon 4.4 mukaisesti. Luokan I betonimurske on peräisin suoraan betoniteollisuudesta ja luokkien II-IV betonimurske purkutyömailta.

Taulukko 4.4 Betonimurskeluokat ja eri luokkien murskeiden ominaisuuksia. Perustuu lähteisiin Tiehallinto 2005; Tiehallinto 2007b; Helsinki et al. 2015 & Rakennustieto 2017.

Ominaisuus	BeM I	BeM II	BeM III	BeM IV
Raaka-ainelähde	Betoniteollisuus	Betoniteollisuus / purkutyömaat	Betoniteollisuus / purkutyömaat	Betoniteollisuus / purkutyömaat
Uudelleenlujittuminen	Kyllä	Kyllä	Epävarmaa	Epävarmaa
Rakeisuus	1)	1)	1)	Vaihtelee
Routivuus	Routimaton	Routimaton	Routimaton	Vaihtelee
Puristuslujuus (28d), MPa	≥ 1,2	≥ 0,8	-	-
Tiilen maksimiosuus, paino-%	0	10	10	30
Muiden materiaalien maksimiosuus, paino-%²⁾	0,5	1	1	1
Kelluvat ainekset, cm³/kg³⁾	5	5	10	Ei haitallista määrää
E-moduuli, MPa	700	500	280	-
n = E/E_A max⁴⁾	10	10	6	-

1) Murskeen tulee täyttää InfraRYL:n mukaiset käyttökohteen rakeisuusvaatimukset

2) Puu, muovi yms.

3) Esim. solumuovit, mineraalivilla

4) E/E_A = Materiaalimoduulin suhde sen alustan Odemarkin kantavuuteen. Jos suhde E/E_A on suurempi kuin taulukossa esitetty n, mitoituksessa käytetään taulukossa esitetyn moduulin sijasta pienempää moduuliarvoa $E = n \times E_A$.

Kuten taulukosta 4.4 nähdään, heikentävät betonimurskeen sisältämät epäpuhtaudet sen teknisiä ominaisuuksia. Betoniteollisuudesta peräisin oleva I-luokan betonimurske koostuu lähes puhtaasta betonista, kun taas purkutyömailta tulevat murskeet sisältävät tavallisesti pieniä määriä muitakin purettavasta kohteesta peräisin olevia materiaaleja, kuten esimerkiksi tiiltä. Luokkien II-IV betonimurskeet eroavat toisistaan niiden sisältämien muiden materiaalien määrien perusteella. Taulukkoon 4.5 on koottu betonimurskeelle eri tutkimuksissa määritettyjä mitoitusparametreja. Betonimurskeen lämmönjohdavuus on hieman pienempi kuin luonnonkiviainesmurskeen, mutta routamitoituksessa suositellaan käytettäväksi rakeisuudeltaan vastaavan luonnonkiviaineksen lämmönjohdavuutta (Tielaitos 2000).

Taulukko 4.5 Luokkien I, II ja III betonimurskeiden mitoitusparametreja. Perustuu lähteeseen HSY 2014.

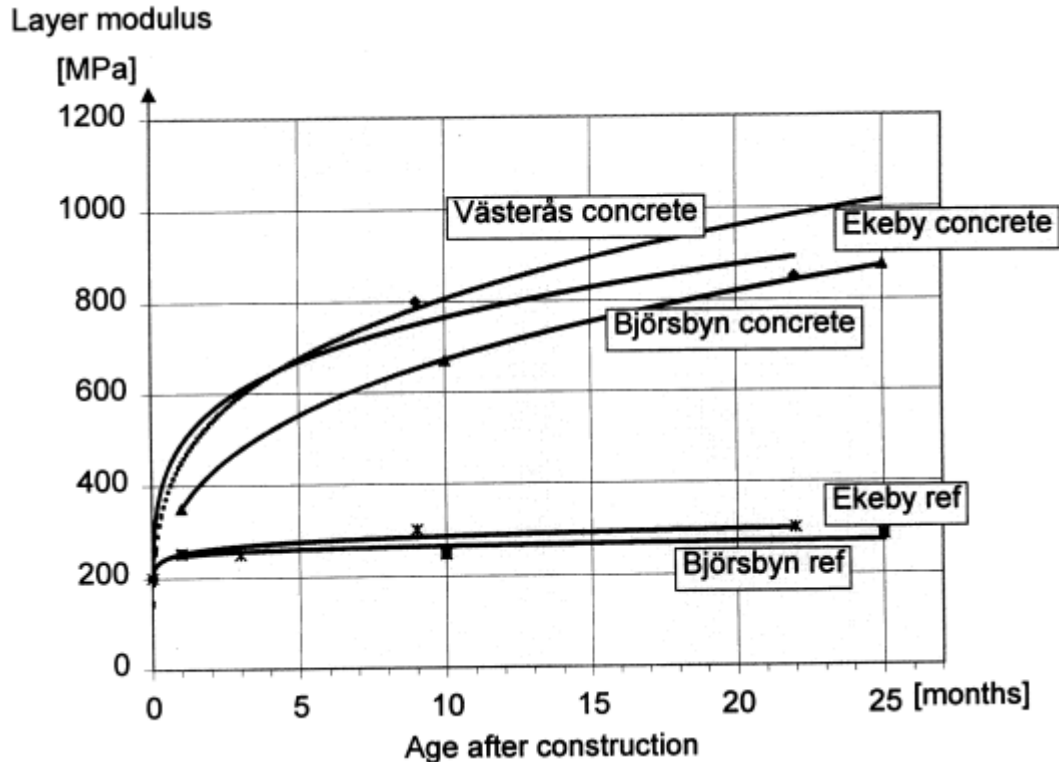
Ominaisuus	Arvo	Yksikkö
Optimivesipitoisuus, w_{opt}	8...12	%
Maksimikuivatilavuuspaino	17,5...20,5	kN/m ³
Minimikuivatilavuuspaino	12,7...14,5	kN/m ³
Kiintotiheys	2,55...2,65	t/m ³
Kapillaarisuus, H_c	0,20...0,25	m
Vedenläpäisevyys, k	10^{-5} ... 10^{-4}	m/s
Happamuus, pH	11...12,5	
Kitkakulma	40	°

Betonimurskeen geoteknisiä ominaisuuksia on tutkittu sekä Suomessa että maailmalla. Suomessa tehtyjen koerakenteiden toimivuutta on voitu seurata jo yli 20 vuoden ajan. Dettenborn (2013) on tutkinut diplomityössään eräiden koerakenteiden pitkäaikaistoi-
mivuutta ja kantavuuden kehittymistä. Tutkimuksen perusteella betonimursketta käyttä-
en rakennettujen tie- ja katurakenteiden on havaittu saavuttavan 13–15 vuoden jälkeen
rakentamisesta noin 15–25 % suuremman kantavuuden päällysteen pinnalta verrattuna
tavallisella luonnonkiviaineksella toteutettuihin vertailurakenteisiin. Kantavuuden kehi-
tyksen tutkimiseen käytettiin rakenteista pudotuspainolaittekokein kerättyä mittaussai-
neistoa. Ensimmäiset työssä tarkastellut koekohteet oli rakennettu vuonna 1995, mikä
mahdollisti jopa 17 vuoden seurantajakson. Koekohteissa tehtiin uudestaan seuranta-
mittauksia vuonna 2017, jolloin havaittiin rakenteiden kantavuuksien olevan lähellä
edellisten mittausten tasoa (Ramboll Finland Oy 2017).

Rakenteen kantavuus kehittyi betonimurskeen sisältämän sementin hydrataation myötä. Suomalaisille koerakenteille tehtyjen mittausten perusteella betonimurskerakenteen lu-
jittumisen on havaittu olevan suurinta ensimmäisten vuosien aikana ja hidastuvan noin
2–5 vuoden jälkeen rakentamisesta (Dettenborn et al. 2015). Ruotsissa tehdyissä labora-
torio- ja koerakennetutkimuksissa on havaittu betonimurskerakenteen jäykkyyden kas-
vavan huomattavan paljon ensimmäisten kuukausien aikana ja kehityksen hidastuvan
tämän jälkeen. Kerroksen E-moduulin havaittiin olevan kaksi vuotta rakentamisen jäl-
keen noin kaksinkertainen verrattuna yhden kuukauden ikäiseen rakenteeseen (Arm
2003). Esimerkiksi betonimurskeesta rakennetun jakavan kerroksen jäykkyyden kol-
minkertaistuminen puolessa vuodessa ei ole epätavallista (Ydrevik 1999). Suomalaisen
käyttökokemusten perusteella betonimurskeen varastointiajalla murskaamisen jälkeen ei
ole ollut suurta vaikutusta sen teknisiin ominaisuuksiin (Viatek Oy 1999).

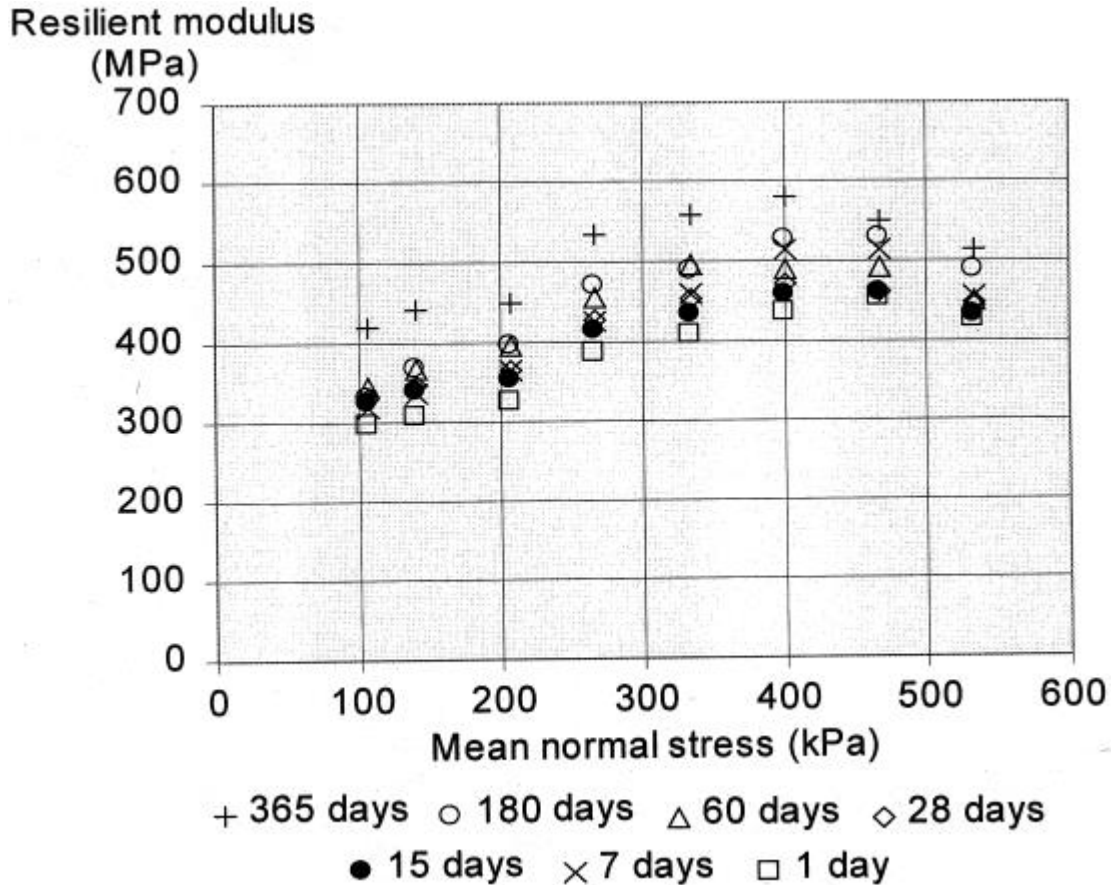
Kuvassa 4.10 on esitetty kolmen ruotsalaisen koekohteen betonimurskekerrosten kanta-
vuuden kehittyminen. Västeråsin koekohteessa betonimursketta on käytetty sekä kanta-
vassa että jakavassa kerroksessa. Muissa kohteissa betonimursketta on käytetty vain ja-
kavassa kerroksessa. Ainakin Ekebyn koerakenteessa kantavan kerroksen paksuus on

varsin ohut, vain 80 mm. Kaikissa kohteissa käytettiin purkutyömailta peräisin olevaa betonimurskettä. Hyödynnetyt betonimurskeet olivat kuitenkin hyvin puhtaita ja sisälsivät kaikissa tapauksissa alle 10 % epäpuhtauksia, kuten tiiltä. (Arm 2001; Ydrevik 1999)

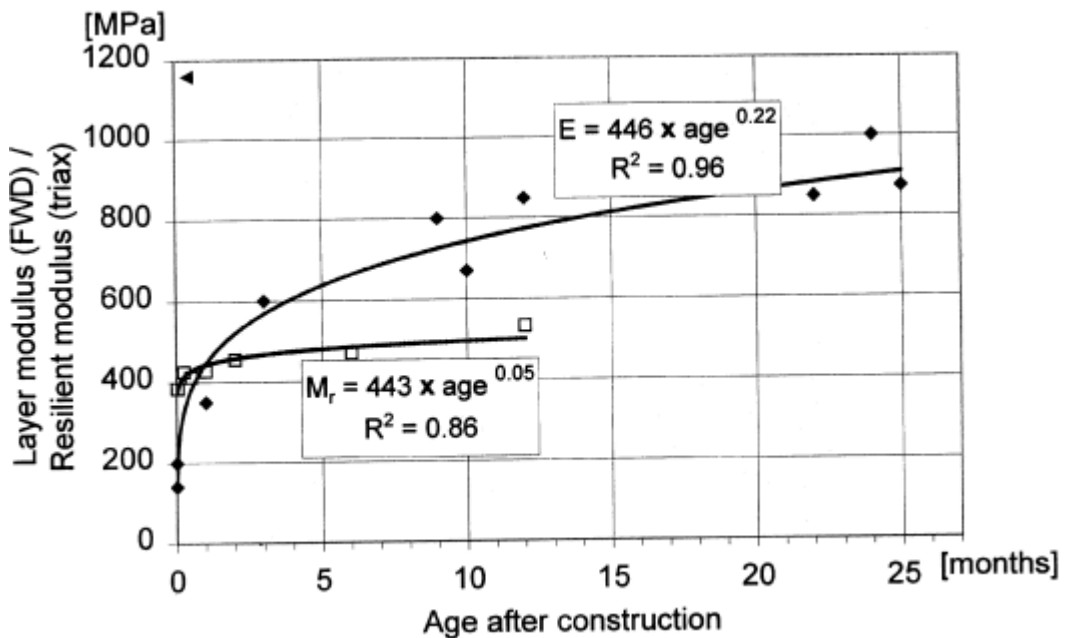


Kuva 4.10 Esimerkkejä betonimurskerakenteen E-moduulin kehityksestä ajan suhteen. Kolme ylintä käyrää kuvaavat betonimurskerakenteita ja kaksi alinta tavanomaisia luonnonkiviainesrakenteita. Kerrosmoduulit on takaisinlaskettu pudotuspainolaitemittausten tuloksista. (Arm 2001)

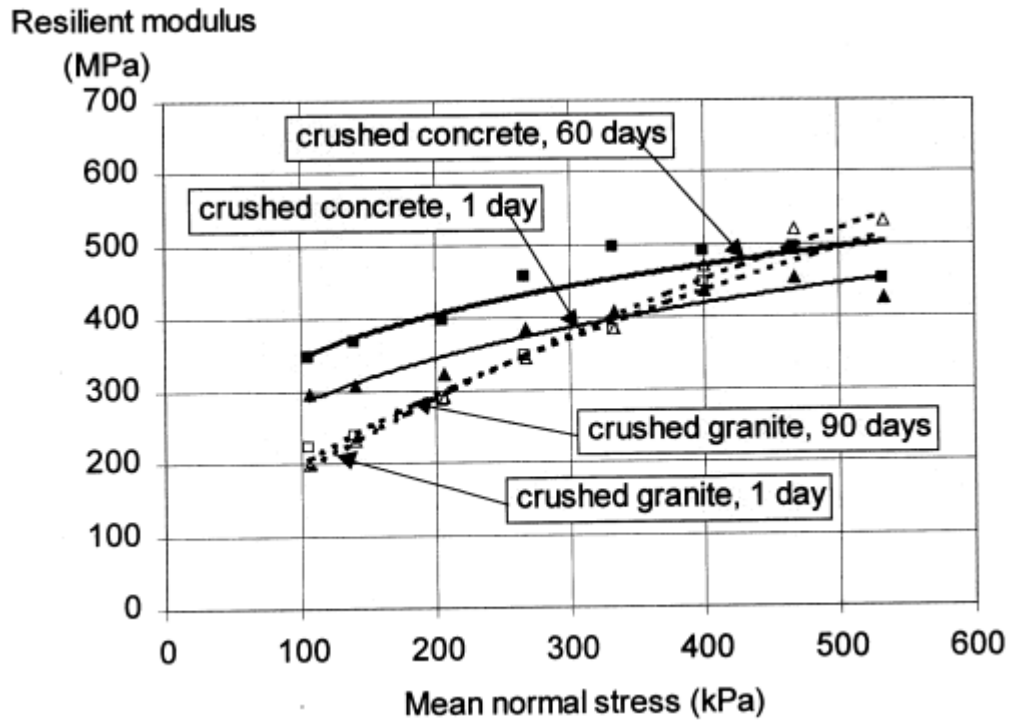
Ruotsalaisissa tutkimuksissa havaittiin betonimurskeen lujuuden kasvun olleen huomattavasti suurempaa koerakenteissa kuin laboratoriotesteissä. Kuvassa 4.11 on esitetty syklisin kolmiaksaalikokein tutkituista betonimurskenäytteistä saatuja jäykkyysmoduulin (M_r) arvoja eri pituisten sitoutumisaikojen jälkeen. Moduulin arvo on selvästi kasvanut vuoden tarkastelujakson aikana, mutta ero koerakenteista mitattuihin rakenteen jäykkyyden kehityskäyriin on merkittävä. Kuvassa 4.12 nähdään selkeästi ero pudotuspainolaitemittausten ja kolmiaksaalikokeiden perusteella määritettyjen jäykkyyskehityskäyrien välillä. Dynaamisilla kolmiaksaalikokeilla määritettyjen betonimurskeen ja graniittimurskeen jäykkyysmoduulien vertailu on esitetty kuvassa 4.13. Tuloksista havaitaan, että betonimurskeella moduuliluku kasvaa selkeästi lujittumisen myötä kaikilla jännitystasoilla, kun taas graniittimurskeella muutosta ei tapahdu. Lisäksi betonimurskeen jäykkyysmoduulin havaitaan olevan vähemmän jännitystasosta riippuvainen kuin graniittimurskeen. (Arm 2001)



Kuva 4.11 Eri pituisten lujittumisaikojen jälkeen tehdyistä dynaamisista kolmiaksaalikoista saatuja betonimurskeen jäykkyysmoduulin arvoja. (Arm 2001)



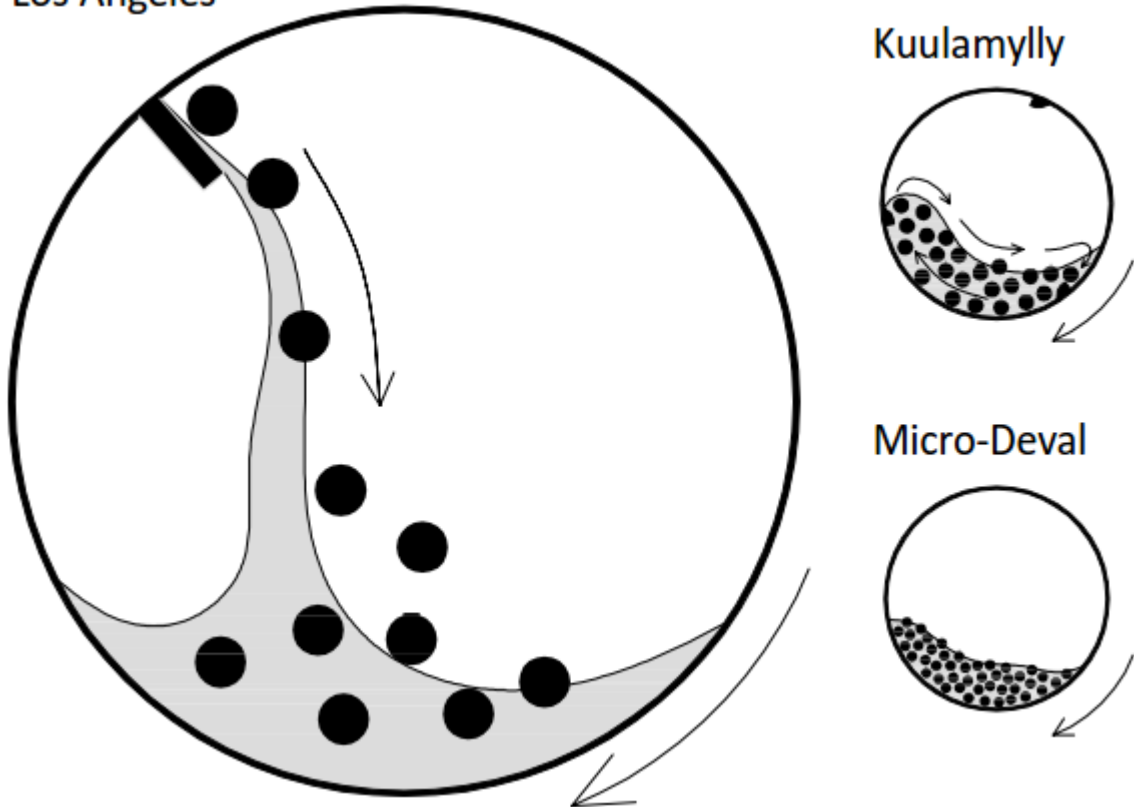
Kuva 4.12 Betonimurskeen jäykkyyden kehitys kenttäkokeina pudotuspainolaitemittauksilla (E-moduuli) ja laboratoriossa kolmiaksaalikoilla (M_r -moduuli) määritettynä (Arm 2001).



Kuva 4.13 Dynaamisilla kolmiakselikokeilla mitattujen jäykköysmoduulien kehityksen vertailua betonimurskeen ja graniittimurskeen välillä (Arm 2001).

Väylärakenteiden materiaalien kulutuskestävyyttä tutkitaan tavallisesti Los Angeles-, kuulamyly- ja micro-Deval -kokeilla. Kokeiden periaatteet on esitetty kuvassa 4.14. Kaikissa kokeissa käytetään pyörivää rumpua, jonka sisällä on kiviainesta hienontavia teräskuulia. Rumpujen erilaisen rakenteen ja mittasuhteiden johdosta testit kuitenkin kuvaavat erityyppisiä kulutuksia. Los Angeles -kokeessa tutkittava materiaali joutuu iskevän kulutuksen kohteeksi, kun kuulamyly- ja micro-Deval -kokeissa kulutus on hiovaa. Kuulamylytestiä käytetään nykyisin vain päällystekiviainesten nastarengaskulutuskestävyyden testaamiseen.

Los Angeles



Kuva 4.14 Los Angeles-, kuulamyly- ja micro-Deval -testien periaatekuvat. Rumpujen halkaisijat samassa mittakaavassa. Mukailten lähteestä Arm 2000.

Taulukossa 4.6 on esitetty Los Angeles -testin, pohjoismaisen kuulamylytestin ja micro-Deval -testien teknisiä tietoja. Los Angeles -testissä rummu ja näytteen seassa rummussa pyörivät teräskuulat ovat mitoiltaan selvästi suurempia kuin muissa menetelmissä. Los Angeles -testissä käytettävän rummun sisäpinnassa on myös testin iskevää kuluusta lisäävä hylly, joka nostaa kuulia ja kiviainesta korkeammalle rummun pyöriessä. Kuulamylytesti ja micro-Deval -testi sen sijaan ovat mitoitukseltaan ja toimintatavaltaan varsin samantyyppisiä. Testien tulokset ilmoitetaan tiettyä raja-arvoa pienemmäksi hienontuneen aineksen prosentuaalisena osuutena alkuperäisen näytteen massasta. Los Angeles- ja micro-Deval -testeissä tämä raja-arvo on EN-standardin mukaan 1,6 mm ja pohjoismaisessa kuulamylytestissä 2 mm.

Taulukko 4.6 Los Angeles -testin, pohjoismaisen kuulamylytestin ja micro-Deval -testien välisiä eroja. Perustuu lähteisiin SFS 2010; SFS 2011 & SFS 2014.

Koemenetelmä	Los Angeles	Kuulamyly	Micro-Deval
Noudatettava standardi	SFS-EN 1097-2	SFS-EN 1097-9	SFS-EN 1097-1
Rummun sisähalkaisija, mm	711	206,5	200
Rummun pituus, mm	508	335	154
Rummun rakenne	Yksi 90 mm nostohylly	Kolme 8 mm nostoripaa	Sileä
Teräskuulien halkaisija, mm	45-49	15	10
Teräskuulien määrä, g	4 690 - 4 860 (11 kpl)	7 000	5 000
Kierroksia	500	5 400	12 000
Pyörimisnopeus, r/min	31-33	90	100
Kiviaineksen määrä, g	5 000	1 000	500
Kiviaineslajite, mm	10/14	11,2/16	10/14
Vettä, l	-	2,0	2,5
Testiseula, mm	2,0	2,0	1,6

Raidesepelille tehtävissä Los Angeles- ja micro-Deval -testeissä käytetään taulukossa 4.6 esitettyä karkeampaa, raekooltaan 31,5/50 mm kiviaineslajitetta. Tällöin testeissä on myös joitakin muita eroavaisuuksia 10/14 -lajitteella tehtyihin verrattuna. Los Angeles -testissä käytettävä näytemäärä on kaksinkertainen, eli 10 kg. Teräskuulien määrä lisääntyy yhdellä, jolloin niitä on yhteensä 12 kpl, yhteispainoltaan 5210 ± 90 g. Lisäksi kierrosmäärä nousee kaksinkertaiseksi 1000 kierrokseen. Micro-Deval -testissä käytetään 31,5/50 mm testilajitteella pituussuunnassa suurempaa, 400 mm pituista rumpua. Testattavan näytteen määrä on Los Angeles -testin tavoin 10 kg. Kierrosmäärä on 14 000 ja testissä käytettävän veden määrä 2 l. Teräskuulia ei 31,5/50 mm -lajitteen kanssa käytetä lainkaan. (Kuula 2015)

Kiviainesten iskunkestävyyden mittaamiseen on Suomessa vielä 90-luvulla käytetty etenkin raidesepelin testaamiseen haurausarvotestiä. 90-luvun lopulla menetelmän käytöstä luovuttiin eurooppalaisten standardien käyttöönoton myötä. Haurausarvotesti perustuu testattavan näytteen kuormittamiseen iskemällä. Haurausarvotestissä raekooltaan 8/12 mm testilajitetta laitetaan sisähalkaisijaltaan ja korkeudeltaan 100 mm terässylinteriin ja sen päälle asetetaan 3,7 kg painoinen teräsmäntä. Männän päälle pudotetaan 25 cm:n korkeudelta 14 kg painava pudotusvasara 20 kertaa. Alkuperäisessä menetelmässä mitattiin kokeen jälkeen raekooltaan alle 8 mm kokoiseksi hienontuneen aineksen määrä. Myöhemmin hienontuneen aineksen määrä alettiin laskea 4 mm raekoon mukaan ja menetelmää kutsua parannetuksi haurausarvokokeeksi. Haurausluku laskeaan hienoaineksen määrän prosentuaalisena osuutena näytteen kokonaispainosta (n. 500 g). (Kuula 2015; TVH 1987)

Taulukossa 4.7 on esitetty eri tutkimuksissa saatuja betonimurskeen kulutuskestävyyden arvoja. Suurimmassa osassa tutkimuksista on havaittu alkuperäisen betonin lujuudella olevan vaikutusta betonimurskeen kulutuskestävyyteen.

Taulukko 4.7 Betonimurskeelle eri tutkimuksissa saatuja mekaanisen kulutuskestävyyden arvoja.

Tutkimus	LA-luku	MD-luku	Hauraus-arvo	Kuulamylly-arvo	Lähtöbetonin laatu, murskeen raekoko	Riippuvuus
Hansen & Narud (1983)	22,4 – 41,4				luja, 16/32 mm – heikko, 4/8 mm	Lujempi betoni -> Pienempi LA-luku
Yoshikane	28,7 27,3 28,0 25,6 22,9 20,1				15 MPa, 5/13 mm 16 MPa, 5/13 mm 21 MPa, 5/13 mm 30 MPa, 5/13 mm 38 MPa, 5/13 mm 40 MPa, 5/13 mm	Lujempi betoni -> Pienempi LA-luku
Richardson & Jordan (1994)	26 27				32 MPa, 0/26,5 mm 80 MPa, 0/19 mm	Betonin lujuuden vaikutus vähäinen
Viatek Oy (1999)	23,4 (22 – 24) 27,8 (27 – 29)		21 (20 – 22) 24,5 (23 – 25)		BeM I Ontelolaatta-BeM, 0/70 mm BeM II Purku-BeM, 0/55 mm 52,5 36,6 25,8 7 MPa, 0/32 mm 30 MPa, 0/32 mm 70 MPa, 0/32 mm	Lujempi betoni -> Parempi kulutuskestävyys
B.C.S.J. (2000)	25,1 – 35,1				15 erilaista, laaja lujuusjakauma	Lujempi betoni -> Pienempi LA-luku
Vägverket (2001)	35	23	63 ¹⁾		10/14 mm	
Ravindrarajah & Tam (2005)	37,2 – 40,8		26 – 31		Luja – Heikko	Lujempi betoni -> Hieman parempi kulutuskestävyys
Aurstad et al. (2006)	27,3 25,7		50 ²⁾		Ontelolaatta-BeM, 10/14 mm Ontelolaatta-BeM, 31,5/50 mm	
Varin (2007)	36	28			Purkubetonimurske, 0/85 mm	
Paalanen (2017)	32,1	44,3 10,3			BeM I, 10/14 mm BeM I, 31,5/50 mm	
Arvot yleensä kiviaineksilla	10 – 30	< 15				

1) Ruotsalainen haurausarvotesti, testiseulan silmäkoko 10 mm.

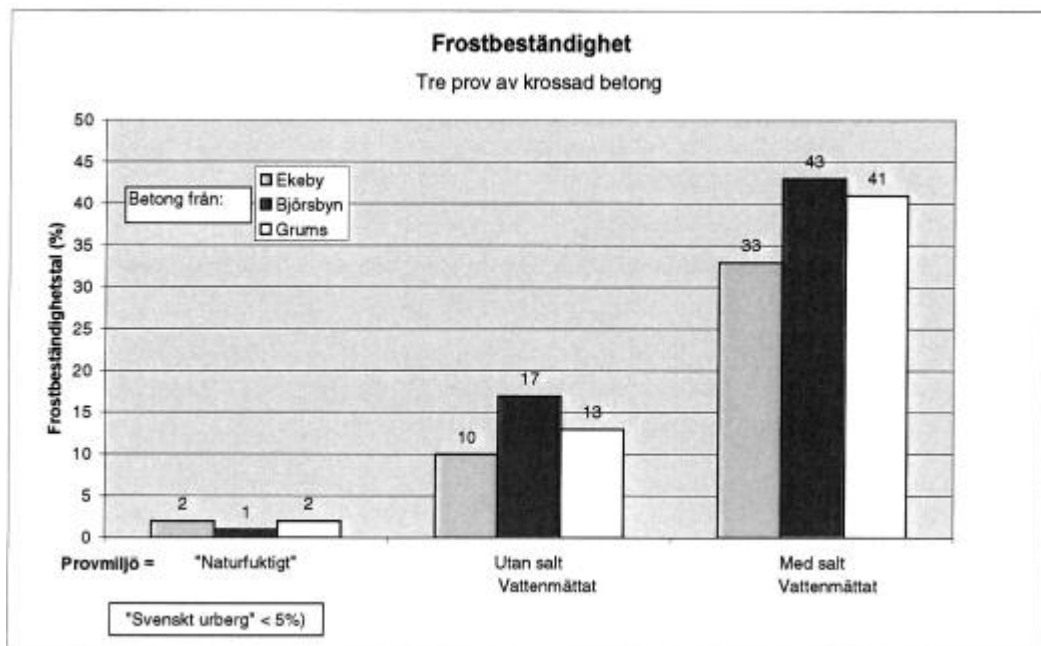
2) Norjalainen haurausarvotesti, testiseulan silmäkoko 8 mm.

Luonnonkiviainesmateriaaleille käytössä olevat mekaanisen kestävyden tutkimusmenetelmät ovat käyttökelpoisia myös betonimurskeelle, mutta niiden vaatimuksien asettamisessa on huomioitava betonimurskeen ja luonnonkiviaineksen eroavaisuudet. Betonimurske on koostumukseltaan erilaista kuin luonnonkiviaines. Sen sisältämä huokoinen sideaine ei kestä mekaanista kulutusta runkoaineksen tavoin, jolloin näillä testeillä saadaan yleensä luonnonkiviaineksia heikompia tuloksia. Tuloksiin vaikuttaa myös betonimurskeen raekoko ja koostumus. Betonimurskeen toiminta väylärakenteessa perustuu koko rakennekerroksen, eikä yksittäisten murskerakeiden ominaisuuksiin.

Murskemateriaalin huokoisuus vaikuttaa kulutuskestävyyden lisäksi myös sen jäätymis-sulamiskestävyteen. Huokoset lisäävät veden imeytymistä murskerakeisiin. Vesi laajenee jäätyessään aiheuttaen rakeiden rapautumista. Pelkkä materiaalin huokoisuus ei kuitenkaan suoraan tarkoita huonoa jäätymis-sulamiskestävyttä, vaan siihen vaikutta-

vat huokosten määrä ja niiden koko sekä rakeiden kestävyys. Suola vähentää veden pintajännitystä, joten suolaa sisältävä vesiliuos tunkeutuu huokosiin puhdasta vettä tehokkaammin.

Betonimurskeen jäätymis-sulamiskäyttäytymistä käsittelevissä tutkimuksissa Suomessa ja Ruotsissa on havaittu betonimurskeen pakkasrapautumisen olevan hyvin vähäistä todellista käyttötilaa vastaavassa kosteustilassa, mutta kasvavan selvästi rakenteen ollessa vedellä kyllästettynä (Ydrevik 1999; Varin 2007). Myös suolan lisääminen veteen lisää pakkasrapautumista merkittävästi. Kuvassa 4.15 on esitetty kyllästysasteen ja suolan vaikutus purkubetonimurskeen jäätymis-sulamiskestävyyteen ruotsalaisen tutkimuksen mukaan. Liikenneviraston ohjeistuksessa suositellaan runsaasti suolattavilla, vilkkaasti liikennöidyillä teillä betonimursketta käytettäessä päällystämään tie avoimen SMA-päällysteen sijasta huomoin vettä läpäisevällä AB-päällysteellä (Tiehallinto 2000). Kyseisessä ohjeessakin kuitenkin todetaan, ettei suola-pakkasrapautumisesta ole havaintoja toteutetuista kohteista.



Kuva 4.15 Purkubetonimurskeiden jäätymis-sulamiskestävyystutkimuksista saatuja arvoja "luonnonkosteassa" tilassa, puhtaalla vedellä kyllästettynä ja 1 % suolaliuoksella kyllästettynä (Ydrevik 1999).

Betonimurskeen vedenimukyky on luonnonkiviaineksia suurempi, mutta kuitenkin melko pieni. Esimerkiksi Varinin (2007) diplomityön yhteydessä tehdyissä laboratoriokeissa betonimurskeen vedenimukyvyksi saatiin noin 3,5–4,0 %, kun se suomalaisilla kalliomurskeilla on tyypillisesti alle 0,5 %. Tiilimurskeelle vedenimukyvyksi mitattiin noin 13–14 %. Samassa tutkimuksessa toteutetuissa routanousukokeissa puhtaan betonimurskeen routanousun havaittiin olevan hyvin vähäistä. Hienoaineksen määrällä ei routanousuun ole merkittävää vaikutusta. Betonimurskeen sisältäessä 10 % tiilimursketta on sen routanousu samaa luokkaa kuin luonnonkiviaineksella. Tiilen osuuden lisää-

minen yli 10 prosentin lisää routimista ja 30 % tiilipitoisuudella se on jo merkittävän suurta.

5. BETONIMURSKEEN KÄYTTÖ RAITIOTIERAKENTAMISESSA

5.1 Raitiotien ja rautatien eroavaisuudet

Raitioteiden suunnitteluun ja rakentamiseen on Suomessa hyvin vähän ohjeistusta, sillä raitiotiejärjestelmä löytyy tällä hetkellä vain Helsingistä. HKL on julkaissut Helsingin raitioteiden suunnitteluohjeen viimeksi vuonna 2016 (HKL 2016). Rautateiden suunnitteluun ohjeistusta sen sijaan on luonnollisesti kirjoitettu varsin paljon. Keskeisin osa ohjeistuksesta on koottu Liikenneviraston Ratatekniset ohjeet (RATO) -sarjaan. Raitiotiet ja rautatiet ovat monella tapaa samankaltaisia järjestelmiä, mutta esimerkiksi nopeudet ja kiskoilla liikkuvan kaluston massa ovat huomattavan erisuuruisia. Nykyaikaiset pika-raiitotiejärjestelmät muistuttavat rakenneratkaisuiltaan usein enemmän rautatietä kuin perinteistä katuraitiotietä. Näin ollen rautateiden suunnitteluohjeistusta voidaan osittain hyödyntää raitioteiden rakennetta pohdittaessa. Periaatteet ovat samat, mutta mittakaava joiltain osin eri luokkaa.

Merkittävimmät erot rautateiden ja raitioteiden välillä ovat niillä liikkuvan kaluston koossa ja nopeudessa. Suomen rataverkolla suurin sallittu nopeus on henkilöjunilla 220 km/h ja tavarajunilla 120 km/h (Liikennevirasto 2017). Suurimmalla osalla rataverkosta sallitaan 22,5 tonnin akselipaino ja osalla 25 tonnin akselipaino. Raitioteilla ja pikaraitioteilla käytettävä maksiminopeus on tyypillisesti luokkaa 60–80 km/h. Esimerkiksi Tampereen raitioteilla käytettävä suurin liikennöintinopeus on 70 km/h ja rata-geometrian mitoitusnopeus 80 km/h (Raitiotieallianssi 2016a). Myös Raide-Jokerin hankesuunnitelmassa on maksiminopeudeksi esitetty 70 km/h (Raide-Jokeri 2015). Raitiovaunun mitoitusakselipaino on Tampereella 120 kN ja Raide-Jokerilla 12 500 kg (≈123 kN) (Raitiotieallianssi 2016a; Raide-Jokeri 2015).

Suuret eroavaisuudet liikennöintiympäristössä ja kaluston nopeudessa saavat aikaan erilaisia vaatimuksia raidegeometrialle raitioteilla ja rautateilla. Kun rautateilla betoniratapölkkyjä käytettäessä pienin sallittu kaarresäde on 200 m, raitioteilla minimi on sekä Tampereen raitioteilla että Raide-Jokerissa 25 m (RHK 2002; Raitiotieallianssi 2016a; Raide-Jokeri 2015). Raitioteilla tuki pyritään mahdollisimman suuriin kaarresäteisiin ajonopeuden ja matkustusmukavuuden kasvattamiseksi.

Vaakageometrialla on vaikutuksia kaluston kulun lisäksi raiteen kuormituksiin. Pienempi kaarresäde lisää kuorman painottumista kaarteiden ulommaiselle kiskolle. Radan rakenteisiin välittyviin kuormiin vaikuttaa myös ratapölkkyjen mitoitus ja niiden välinen etäisyys. Nykyisin rautateilla käytettävät betoniratapölkkyt BP89, B97 ja BP99 ovat

pituudeltaan 2600 mm ja leveydeltään 282–300 mm (RHK 2002). Normaali pölkkyväli on 610 mm. Tampereen raitiotien suunnitteluperusteissa määritetään sepeliraiteella käytettävän pölkyn pituudeksi 2200 mm ja pölkkyväliksi suoralla 750 mm ja kaarresäteeltään alle 400 m kaarteessa 610 mm (Raitiotieallianssi 2016a).

Raitiotiellä voidaan käyttää samantyyppisiä kiskoja kuin rautateilläkin. Esimerkiksi Tampereen raitiotien suunnitteluperusteissa käytettäväksi Vignole-kiskon profiiliksi on määritetty 54 E1 (Raitiotieallianssi 2016a). Urakiskoissa käytettävä profiili on alle 100 m kaarresäteisissä kaarteissa 59 R2 ja muualla 60 R2. Helsingin raitiotieillä käytetään profiilien 59 R1 ja 60 R1 mukaisia kiskoja (SRS 2017a). 59 kg/m kiskoja käytetään sisäkaarteissa. Rautateille uusina asennettavat kiskot ovat nykyisin profiililtaan 54 E1 tai 60 E1 (RHK 2002).

5.2 Betonimurskeen käyttökohteet raitiotierakenteessa

Tiehallinnon ohjeistuksen mukaan I- ja II-luokan betonimurskeet soveltuvat käytettäväksi kantavassa tai jakavassa kerroksessa (Tiehallinto 2007b). III-luokan betonimurske soveltuu jakavaan kerrokseen. IV-luokan betonimursketta voidaan tapauskohtaisen harkinnan mukaan käyttää pengermateriaalina. Betonimurskeet on huomioitu myös infrarakentamisen yleisissä laatuvaatimuksissa (Rakennustieto 2017). InfraRYL:ssä uusiomateriaalit on mainittu mahdollisiksi rakennemateriaaleiksi tien kantavassa, jakavassa ja suodatinkerroksessa, mutta ei radan rakennekerroksissa. InfraRYL:n mukaiset vaatimukset betonimurskeiden käyttöön kantavassa ja jakavassa kerroksessa on esitetty taulukossa 5.1. Teknisten ominaisuuksiensa puolesta betonimurske täyttää esimerkiksi Tampereen raitiotien suunnitteluperusteiden vaatimukset alusrakenteen kerroksille (Raitiotieallianssi 2016a).

Taulukko 5.1 Sitomattoman kantavan kerroksen ja jakavan kerroksen vaatimukset betonimurskeelle sekä suositukset testaustiheydeksi. Perustuu lähteeseen Rakennustieto 2017 (lähteessä liite T18).

Ominaisuus	SITOMATON KANTAVA KERROS		JAKAVA KERROS, kun D ≤ 90 mm		JAKAVA KERROS, kun D > 90 mm	
	Vaatus	Testaustiheys	Vaatus	Testaustiheys	Vaatus	Testaustiheys
Betonimurskeen luokka ¹⁾	BeM I tai BeM II		BeM I – BeM III		BeM I – BeM III	
Raekokojakauma	Luokka G ₀ tai G _A (SFS-EN 13285)	Kerran viikossa tai 1/5000 t	Luokka G _P tai G _C (SFS-EN 13285)	Vähintään kerran viikossa tai 1/5000 t	Taulukko 21210:T3	Kerran viikossa
Hienoainespitoisuus	f ₇	Kerran viikossa tai 1/5000 t	f ₇	Kerran viikossa tai 1/5000 t	f ₇	Kerran viikossa
Iskunkestävyys	Ilmoitettu arvo	Kaksi kertaa vuodessa	-	-	-	-
Litteysluku	Fl ₅₀	Kerran kuukaudessa	-	-	-	-
Kiintotiheys	Ilmoitettu arvo	Kerran kuukaudessa	Ilmoitettu arvo	Kerran kuukaudessa	Ilmoitettu arvo	Kerran kuukaudessa
Vedenimeytyminen	WA _{NR}	-	WA _{NR}	-	WA _{NR}	-
Uusiokiviaineksen luokittelu ³⁾	RC ₉₀ Rb ₁₀₋ X ₁₋ FL ₅₋	Kerran kuukaudessa	Rcug ₉₀ Rb ₁₀₋ X ₁₋ FL ₁₀₋	Kerran kuukaudessa	Rcug ₉₀ Rb ₁₀₋ X ₁₋ FL ₁₀₋	Kerran kuukaudessa
Jäädytys-sulatuskestävyys ⁴⁾	-	-	-	-	-	-
Puristuslujuus 28d	BeM I: 1,2 MPa BeM II: 0,8 MPa	1/10000 t tai 1/murskauserä	BeM I: 1,2 MPa BeM II: 0,8 MPa BeM III: -	Kerran murskauserästä	BeM I: 1,2 MPa BeM II: 0,8 MPa BeM III: -	Kerran murskauserästä
Huomioitavaa	Betonimurske on osittain sitoutuva materiaali. Rakenteeseen tiivistetty ja sitoutunut betonimurske on kuitenkin aukikaivettavissa ja materiaali voidaan myös tiivistää uudelleen takaisin kaivantoihin. Betonimurske ei sovi käytettäväksi vedenpinnan alaisissa täytöissä tai rakenteissa, koska hienoaines saattaa liettyä ja kulkeutua veden mukana. Betonimurskeen pH on luonnonkiviainesta korkeampi. Pinnoittamattomien alumiinisten vesihuollon laitteiden suoraa kontaktia betonimurskeen kanssa on vältettävä. Tarkemmat ohjeet on esitetty materiaalivalmistajien suunnitteluohjeissa.					

¹⁾ BeM I = Raaka-aine peräisin betoniteollisuudesta

BeM II – BeM IV = Raaka-aine peräisin betoniteollisuudesta ja/tai purkutyömailta

²⁾ Vedenimeytymisestä ei sovellu betonimurskeiden laadunarviointiin

³⁾ Standardin prEN 933-11 mukaiset osa-aineluokat:

Rc = Betoni, betonituotteet, laasti, betoniharkot

Rb = Poltetut tiilet, kalkkihiekkatiilet ja -harkot, kellumaton vaahtobetoni

Rcug = Yhteismäärä Rc + Ru + Rg (Ru = sitomaton kiviaines, luonnonkivi, hydraulisesti sidottu kiviaines; Rg = lasi)

X₁₋ = Epäpuhtauksien määrä (savi, maa-aines, metallit, puu, muovi, kumi, kipsilaasti)

FL = Kelluvat ainekset (solumuovi, mineraalivilla yms.)

⁴⁾ Jäädytys-sulatuskestävyys ei sovellu betonimurskeen laadunarviointiin. Betonimurskeen pakkasenkestävyys perustuu routimattomuuteen ja puristuslujuuden kehitykseen (valmistajan osoitettava vaatimusten täyttyminen).

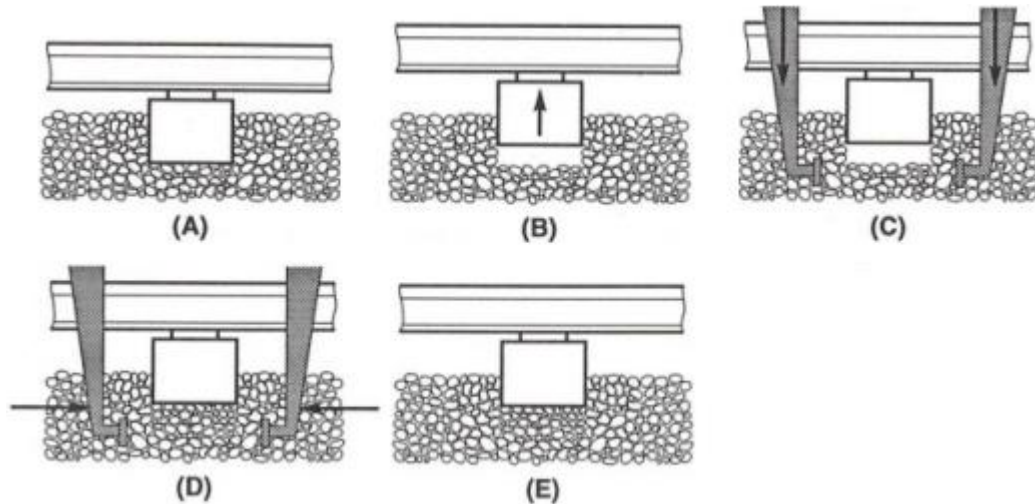
⁵⁾ Testaustiheys 1/murskauserä on riittävä tiheys betonimurskeiden ammattimaisessa valmistamisessa (käsittelykeskukset, joilla on lupa ammattimaiseen jätteen käsittelyyn), muutoin noudatetaan sitä, kumpi ensimmäiseksi täyttyy. Mikäli jätteen laadussa tapahtuu muutoksia, tehdään aina uusi koesarja. Murskauserällä tarkoitetaan betonimurske-erää, joka on tuotettu samalla kertaa olosuhteissa, joita voidaan pitää yhdenmukaisina.

Eri rakennekerroksissa käytettäviltä murskeilta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia. Päälimmäisten kerrosten tulee muodostaa raitiotien kiintolaatalle tai ratapölkylle tarpeeksi kantava alusta ja jakaa kuormitukset riittävän laajalle alueelle alempiin kerroksiin. Alempien kerrosten taas tulee estää rakennekerrosten ja pohjamaan tai pengertäytteen materiaalien sekoittuminen sekä veden kapillaarinen nousu ratarakenteeseen.

Raitiotien murskerakenteista kovimmille kuormituksille altistuu sepeliradan tukikerros. Kiskoliikenne aiheuttaa ratapölkkyjen välityksellä tukikerroksen yläpintaan iskevää ja hiovaa kulutusta. Betonimurskeen toimivuutta tämäntyyppisen kuormituksen alaisena ei ole juuri tutkittu. Tähän mennessä tehdyillä laboratoriotutkimuksilla ja koekohteilla on tutkittu betonimurskeen soveltuvuutta tie- ja katurakenteisiin. Liikennekuormat eivät raitioteilla ole merkittävästi raskasta tieliikennettä suurempia, mutta ne välittyvät päälimmäiseen sitomattomaan rakennekerrokseen eri tavalla. Betonimurskeen käyttö raitiotien tukikerroksessa vaatisikin lisätutkimusta syklisen ja hiovan kulutuksen kestosta.

Tutkimustiedon puutteen lisäksi betonimurskeen käyttöä raitiotien tukikerroksessa rajoittavat raitiotien kunnossapidon toimenpiteet sekä MARA-asetuksen vaatimukset. Asetuksessa vaaditaan betonimurskeen päällystämistä tai peittämistä vähintään 10 cm kerroksella luonnonkiviainesta (VNa 843/2017). Näin ollen betonimursketta ei voida asetuksen puitteissa käyttää tukikerroksen yläosassa, ellei rakennetta peitetä riittävän vedenpitävällä päällysteellä. Vaatimus on huomioitava tukikerroksen lisäksi myös sen alapuolisissa rakennekerroksissa, joissa se luonnollisesti koskee vain betonimurskekerroksen reunaosien peittoa ratapenkereen luiskissa.

Raitiotien kunnossapito eroaa merkittävästi tien tai kadun kunnossapidosta. Radalla epätasaisuuksia ei voida korjata päällystettä lisäämällä. Tukikerroksellisella radalla esimerkiksi raideseppelin hienontumisen johdosta tapahtuvia painumia korjataan raiteen tuennalla. Tukeminen tapahtuu kuvassa 5.1 esitetyn periaatteen mukaisesti nostamalla raidetta ja uudelleentiivistämällä tukikerroksen sepeli ratapölkyn alla (Peltokangas & Nurmikolu 2015). Lujittunut betonimurskekerros ratapölkyn alapuolella todennäköisesti vaikeuttaisi merkittävästi tuennan suorittamista tai estäisi sen kokonaan. Toisaalta on myös mahdollista, että tuennan tarve olisi lujittuneella betonimurskeella vähäisempää.



Kuva 5.1 Raiteen tukemisen periaate. Muokattu lähteestä Selig & Waters 1994.

Raitiotierakenteessa alaspäin mentäessä liikenteen kuormitukset jakautuvat huomattavasti ratapölkkyjen ja tukikerroksen kontaktipintaa laajemmalle alueelle ja niiden luonne muuttuu staattisemmaksi. Betonimurskeen voikin olettaa toimivan väli-, eristys- ja suodatinkerroksissa yhtä hyvin kuin teiden ja katujen rakennekerroksissa. Näihin kerroksiin kohdistuvat kunnostustoimenpiteetkin ovat käytännössä koko rakenteen uusimisia, jotka suoritetaan teiden ja katujen tapaan tavanomaisella maarakennuskalustolla.

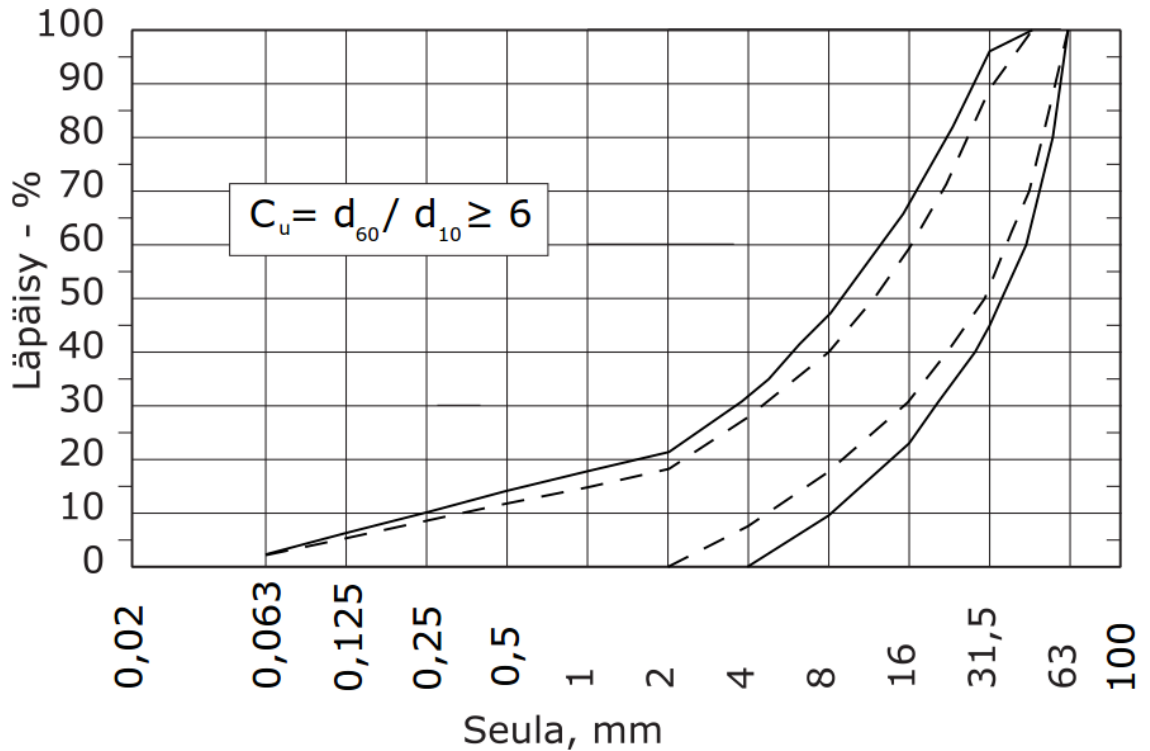
Vaikka betonimurskerakenne sinänsä toimisikin välikerroksessa hyvin, saataisi sen käyttö aiheuttaa tukikerroksen materiaalille tavanomaisista luonnonkiviainesrakenteista poikkeavan kuormitustilanteen. Tukikerroksen yläpuolella on jäykkä kisko- ja pölkkyrakente ja alapuolella tavallisesti joustava murskerakenne. Mikäli välikerroksessa käytetään betonimursketta, muodostuu siitä lujittuessaan laattamainen, jäykkä rakenne myös tukikerroksen alapuolelle. Tukikerroksen sepeli olisi kahden jäykemmän kerroksen puristuksessa sandwich-rakenteessa, mikä saataisi vaikuttaa heikentävästi tukikerroksen sepelin pitkäaikaiskestävyyteen ja näin lisätä raiteen tuennan tarvetta. Toisaalta vastaavia rakenteita löytyy esimerkiksi tukikerroksisilta rautatiesilloilta ja joissakin maissa käytössä olevista asfalttirakenteisista ratapenkereistä.

Alimmissa rakennekerroksissa betonimurskeen käyttöä saattaa rajoittaa pohjavedenpinnan korkeustaso, sillä MARA-asetuksen mukaan betonimursketta sisältävän rakennekerroksen etäisyyden pohjaveden enimmäiskorkeudesta tulee olla vähintään yksi metri (VNa 843/2017). Uusille raitiotieradoille kuitenkin järjestetään kuivatus yleensä vähintään rakenteen alapinnan tasoon, kuten esimerkiksi Tampereen raitiotien suunnitteluperusteissa on määritetty (Raitiotieallianssi 2016a).

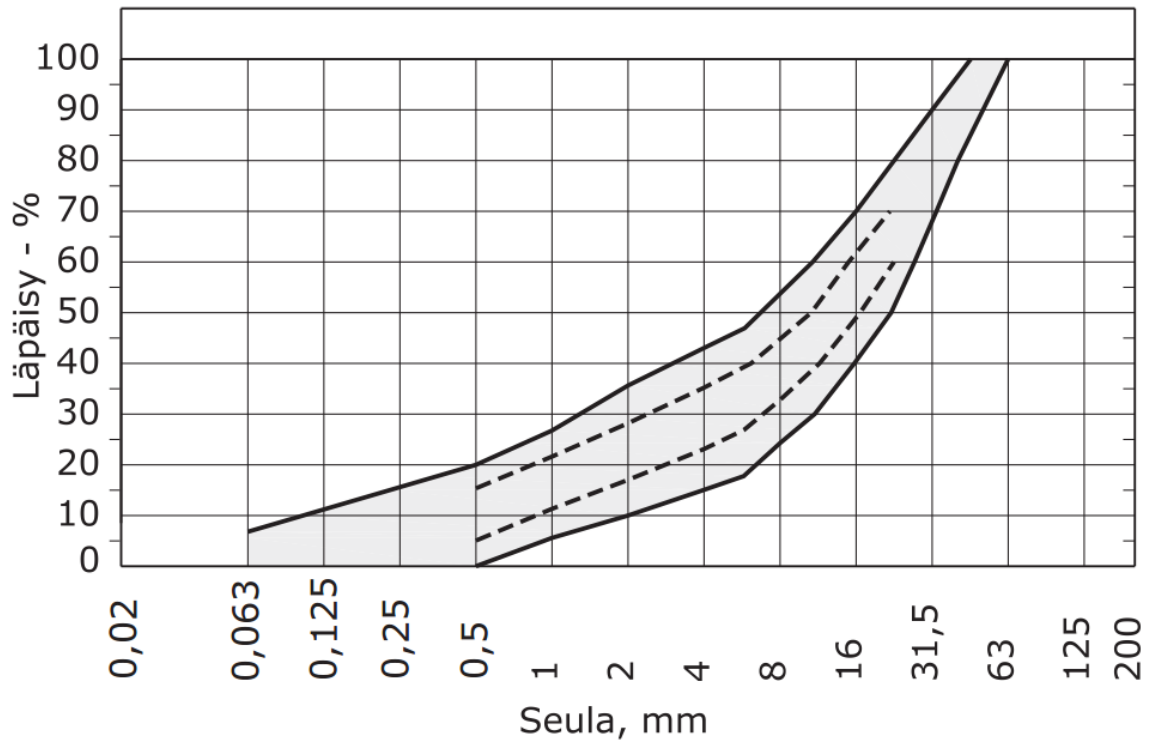
Kiintoraideradalla kiskojen alla oleva betonilaatta jakaa liikenteen kuormitukset ratapölkkyjä laajemmalle alueelle alapuolisessa kerroksessa ja vähentää niiden dynaamista vaikutusta. Toisaalta massiivinen laatta itsessään lisää alapuolisten kerrosten staattista kuormitusta pölkkyrakenteeseen verrattuna. Betonimurskeen voi mekaanisten ominai-

suuksien kannalta olettaa soveltuvan hyvin käytettäväksi myös kiintoraiteellisen raitiotien rakennekerroksissa.

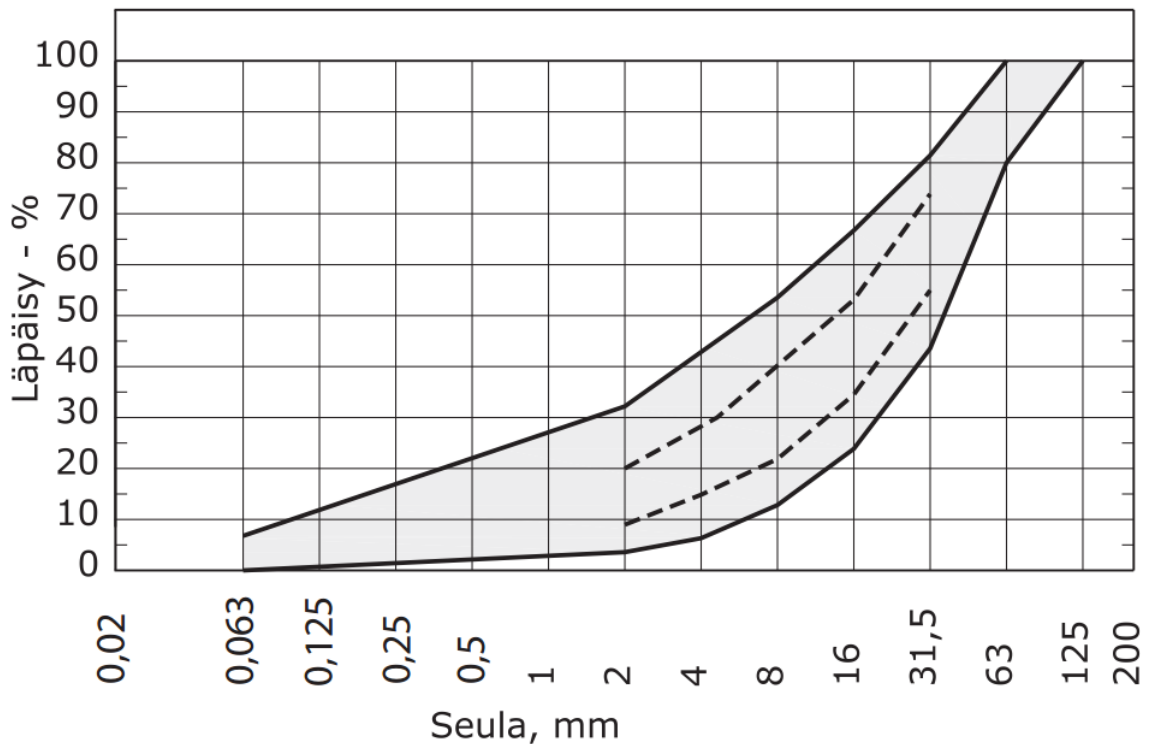
Kuvissa 5.2–5.5 on esitetty esimerkkejä InfraRYL 2017:n mukaisista raekokojakaumista eri rakennekerrosten materiaaleille. Tampereen raitiotien alusrakenneohjeissa sepeliraiteen yhdistetyssä eristys- ja välikerroksessa ja kiintoraiteen kantavassa kerroksessa on ohjeistettu käytettäväksi raekooltaan 0/63 mm mursketta (Raitiotieallianssi 2017b & 2017c).



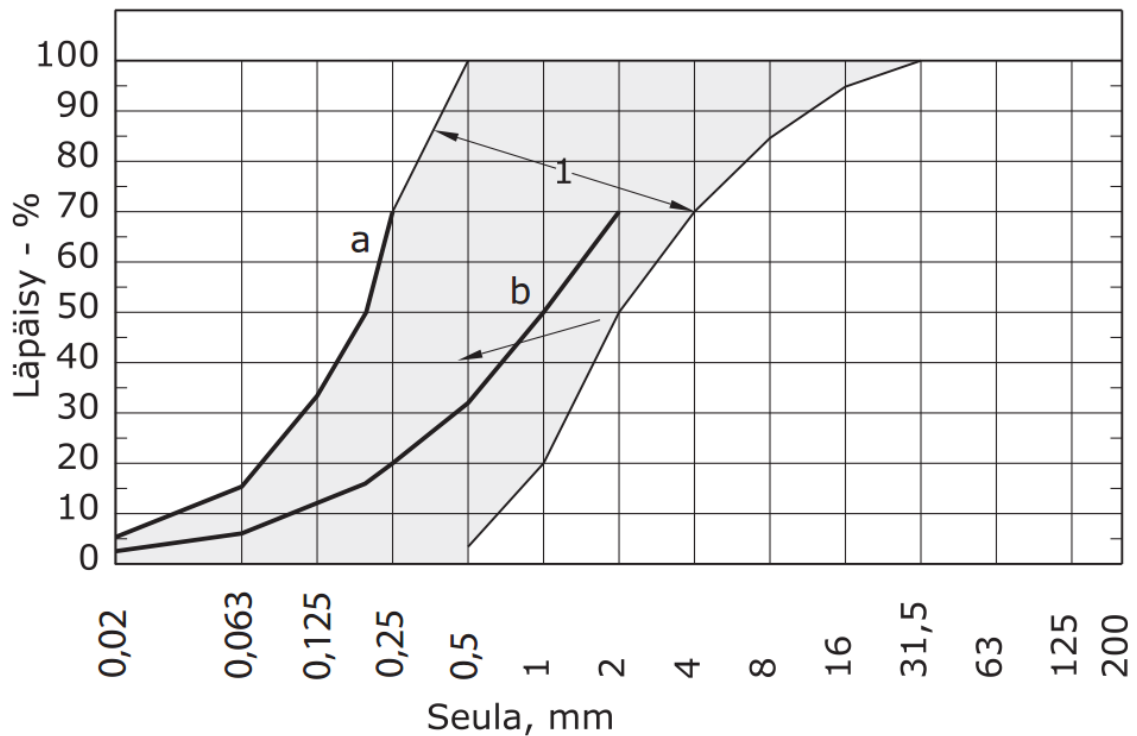
Kuva 5.2 Ratarakenteen eristys- ja välikerroksen kalliomurskeen rakeisuusvaatimukset (Rakennustieto 2017).



Kuva 5.3 Esimerkki kantavan kerroksen kalliomurskeen 0/45 G₀ raekokojakaumasta (Rakennustieto 2017).



Kuva 5.4 Esimerkki jakavan kerroksen kalliomurskeen 0/63 G_p raekokojakaumasta (Rakennustieto 2017).



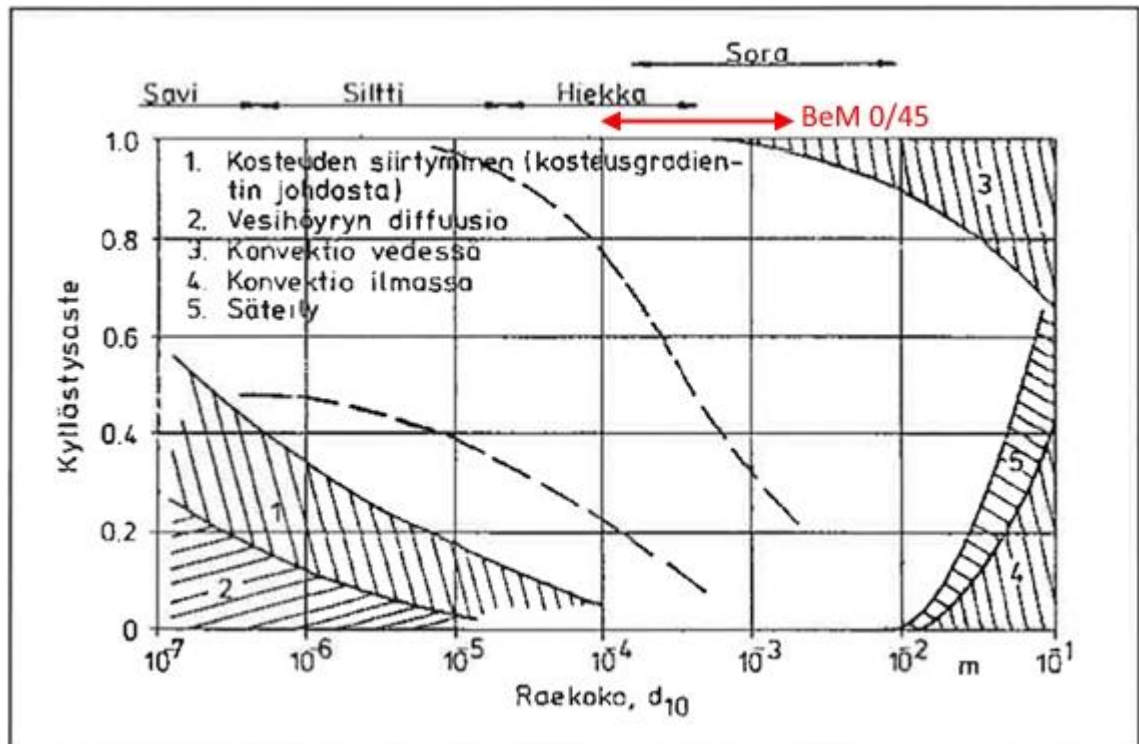
Kuva 5.5 Suodatinkerroksen rakeisuusvaatimukset. Rakeisuuskäyrän tulee normaalisti olla alueella 1. Rakeisuuskäyrä ei saa ylittää paksua viivaa nuolen suunnassa. (Rakennustieto 2017)

Rautateillä kalliomurskettä käytettäessä tulee rakennekerroksien paksuutta lisätä 15 % verrattuna murskaamattoman kiviaineksen käyttöön johtuen vesipitoisuuden ja kuivairtotiheyden vaikutuksesta lämmönjohtavuuteen (Latvala 2014). Lämmön pääasiallinen siirtymistapa maaperässä on johtuminen. Johtumalla siirtyvän lämpöenergian määrä kasvaa maa-aineksen kuivairtotiheyden tai kyllästyneisyyden lisääntyessä. Betonimurskeen lämmönjohtavuus on hieman pienempi kuin luonnonkiviainemurskeen (Tielaitos 2000).

Johtumisen lisäksi lämmön siirtymistä raitiotien rakenteessa voi tapahtua konvektiivisesti tai säteilemällä. Säteilyssä lämpö siirtyy sähkömagneettisena säteilynä ilman välittäjäainetta. Säteilemällä siirtyvän lämmön määrä maa-aineksessa on usein käytännössä merkityksetön, esimerkiksi hiekassa sen osuus kokonaislämmönsiirrosta normaaleissa lämpötiloissa on noin yhden prosentin luokkaa. Karkearakeisemmissa aineksissa säteilemällä tapahtuvan lämmönsiirtymisen merkitys voi olla suurempi. (Latvala 2014)

Konvektiossa lämpö siirtyy kiviainesrakenteessa välittäjäaineen mukana. Välittäjäaine maarakenteissa on ilma tai vesi. Konvektioilmiöön voi liittyä myös veden höyrystymistä tai kondensoitumista. Konvektio voi olla vapaata tai pakotettua. Vapaassa konvektiossa välittäjäaine liikkuu lämpötilaerojen vaikutuksesta. Korkeammassa lämpötilassa aineen tiheys on pienempi, jolloin se kevyempänä nousee rakenteessa ylöspäin viileämmän aineen laskeutuessa alaspäin. Pakotetussa konvektiossa välittäjäainetta liikuttaa rakenteessa jokin ulkopuolinen voima, kuten esimerkiksi tuuli. Maaperässä myös pohjaveden vir-

taus aiheuttaa pakotettua konvektiota. Kuvassa 5.6 on esitetty johtumisen lisäksi muut mahdolliset lämmönsiirtymismenetelmät maalajeissa d_{10} -raekoon ja kyllästysasteen suhteen. (Latvala 2014)



Kuva 5.6 Raekoon ja kyllästysasteen mukaan määritellyt tilanteet, joilla muilla lämmönsiirtymismuodoilla kuin johtumisella on merkitystä maarakenteissa. Luonnollisten maalajien aluetta kuvataan katkoviivoilla. Kuvaan on lisätty betonimurskeen 0/45 kantavan kerroksen raekojakauman G_0 mukainen d_{10} -raekokoalue. Muokattu lähteestä Nurmikolu & Kolisoja 2002, johon muokattu lähteestä Johansen 1975.

Konvektioilmiön esiintyminen vaatii maarakenteelta riittävän avointa rakennetta, joka mahdollistaa välittäjäaineen liikkumisen siinä lämpötilaerojen vaikutuksesta. Maa-aineksen sisäiseen läpäisevyyteen vaikuttaa materiaalin raekoko, raekojakauma, raakoiden muoto sekä niiden huokoisuus (Johansen 1975). Rakenteessa olevan välittäjäaineen konvektiivisen liikkeen syntyminen vaatii myös riittävän suurta lämpötilaeroa rakenteen ala- ja yläpintojen välillä. Rakenteen yläpinnan avoimuus lisää konvektion ilmenemisen todennäköisyyttä ja raitoteilla riski ilmiön syntymiseen on olemassa lähinnä avoimilla sepeliradoilla.

Luonnollista konvektiivista lämmönsiirtoa tapahtuu vain, kun lämpötilagradientti suuntautuu ylöspäin, eli kun rakenteen alaosa on yläosaa lämpimämpi. Käytännössä konvektion esiintyminen raitiotierakenteessa on mahdollista talvella ratarakenteen ollessa lämmin ja ympäröivän ilman kylmää. Tällöin konvektion vaikutus voi näkyä roudan ulottumisena ennakoitua syvemmälle. Murskekerroksen paksuuden kasvattaminen pienentää luonnolliseen konvektioon tarvittavan lämpötilaeron määrää. Näin ollen perinteisen

ajattelumallin mukainen kerrospaksuuden lisäys roudaneristävyyden parantamiseksi voikin konvektion myötä tuottaa päinvastaisen lopputuloksen.

Laadukkaan betonimurskeen rakeisuuskäyrä on kantavan kerroksen ohjealueella, joten tiivistettäessä sen rakeet asettuvat toisiaan vasten ja niiden väliin jäävä tyhjätila on vähäinen. Betonimurskeen rakeet ovat pinnaltaan kalliomursketta huokoisempia, mikä pienentää sen sisäistä läpäisevyyttä. Betonimurskeen lujittumisen myötä rakenteesta myös tulee kalliomurskerakennetta monoliittisempi, mikä haittaa konvektion välittäjäaineen liikkumista rakenteessa. Täten betonimurskeen käyttö raitiotierakenteessa todennäköisesti jossain määrin vähentää konvektion riskiä.

Ratarakenteen tukikerroksen sekä eristys- ja välikerrosten kiviainesten lujuusvaatimukset on määritetty InfraRYL:ssä iskunkestävyyttä kuvaavan Los Angeles -luvun ja hiovan kulutuksen kestoja kuvaavan micro-Deval -arvon perusteella. Tie- ja katurakenteen kantavalle kerrokselle on esitetty vaatimustaso iskunkestävyyden osalta Los Angeles -luku, kun kerros rakennetaan kallio- tai soramurskeesta. Myös uusiomateriaalien Los Angeles -luku on ilmoitettava, mutta sille ei ole vielä asetettu vaatimusta, koska sen vaikutuksesta rakenteen toimivuuteen ja pitkäaikaiskestävyyteen ei ole riittävästi aineistoa. Kallio- ja soramurskeen osalta tilaaja voi hankekohtaisesti vaatia myös micro-Deval -arvon selvittämistä. Arvo suositellaan selvitettäväksi runsaasti pehmeitä mineraaleja sisältäville kiviaineksille. Jakavan kerroksen kallio- ja soramurskeiden sekä uusiomateriaalien osalta on ilmoitettava Los Angeles -luku, mutta vaatimusta niille ei toistaiseksi ole määritetty. Eri rakennekerrosten materiaalien vaatimuksia on koottu liitteen C taulukkoon. (Rakennustieto 2017)

Rakeisuuden ja lujuusominaisuuksien lisäksi väylärakenteiden materiaaleille on asetettu vaatimuksia hienoainespitoisuuden ja jäätymsulamiskestävyyden osalta. Tukikerroksen raidesepeleillä on myös muotoarvovaatimus. InfraRYL:ssä uusiomateriaaleille ei ole määritetty erikseen hienoainespitoisuuden enimmäisarvoa (Rakennustieto 2017). Jäädytys-sulatustesti ei InfraRYL:n mukaan sovellu betonimurskeen laadunarviointiin, vaan sen pakkasenkestävyys perustuu routimattomuuteen ja puristuslujuuden kehitykseen. Betonimurskeen vedenimukyky on hieman luonnonkiviaineksia korkeampi sen sisältämän sementtimassan huokoisuuden takia. Kapillaarikatkoa betonimurskerakenteen ja maapohjan väliin ei kuitenkaan tarvita, sillä vesi edistää betonimurskeen lujittumista.

MARA-asetuksen mukaan betonimurskekerroksen tulee sijaita vähintään metrin etäisyydellä pohjavedenpinnasta. Kiintoraiteella betonimurskekerroksen päällä on lisäksi betonilaatta, mikä estää hulevesien pääsyn rakenteeseen ylhäältä päin. Näin ollen betonimurske säilyy rakenteessa hyvin kuivana eikä routimisen riskiä ole. Sepeliraiteessa betonimurskekerrokseen voi valua sadevettä ylempien murskekerrosten läpi, mutta tämäkin rakenne on käytännössä aina kuivatettu.

5.3 Betonimurskeen käytön vaikutukset rakentamiseen ja muihin rakenteisiin

Betonimurske on maarakennusmateriaalina monella tapaa luonnonkiviainesmurskeen kaltaista. Sen käytössä on kuitenkin huomioitava joitakin luonnonkiviaineksista poikkeavia ominaisuuksia. Betonimurskeen sisältämän sementin ansiosta murskeesta rakennettu kerros lujittuu oikein jälkihoidettuna. Lujittumisen myötä rakenteen kantavuus paranee, mutta sen vaikutukset on otettava rakenteen suunnittelussa huomioon myös muiden asioiden, kuten esimerkiksi melun ja tärinän suhteen. Sementti tekee betonimurskeesta myös luonnonkiviaineksia emäksisempää, mikä estää joidenkin materiaalien käytön betonimurskerakenteen yhteydessä.

5.3.1 Rakentaminen betonimurskeella ja vaikutukset väylän kunnossapitoon

Betonimurskeella rakentaminen ei murskeen lujittumiseksi vaadittavaa jälkihoitoa lukuun ottamatta juurikaan eroa luonnonkiviainesmurskeella rakentamisesta. Ennen rakenteeseen tiivistämistä betonimurske on rakeista mursketta, jonka käsittely onnistuu tavanomaisella maarakennuskalustolla. Murske saattaa tosin sisältää betoninrakenteiden raudoitteiden kappaleita, mikä aiheuttaa rengasrikkovaaran kumipyöräiselle kalustolle. Betonimurskerakenne suositellaankin peitettäväksi noin 50 mm paksuisella kerroksella luonnonkiviainesmursketta ennen lopullista muotoilua. Raudoitteiden määrää murskeessa voidaan vähentää huolellisella metallien poistolla betonia murskattaessa.

Hyödynnettäessä betonimurskeen lujittumisominaisuuksia on rakentamisen yhteydessä huolehdittava rakenteen jälkihoidosta. Sementin hydrataatioreaktio vaatii vettä, joten riittävän kosteuspitoisuuden säilyttäminen rakenteessa on tärkeää murskeen lujittumisen aikana. Betonimurskekerrosta voidaan kastella tai se voidaan päällystää kosteuden haihtumisen ehkäisemiseksi. Lujittumisen tehostamisen lisäksi betonimurskeen kastelu optimivesipitoisuuteen myös nopeuttaa sen tiivistämistä. Kuvassa 5.7 on nähtävissä kadun rakennekerrosten tekemistä betonimurskeesta.



Kuva 5.7 Katurakentamista betonimurskeella. Kuva: Rudus Oy (Saarinen 2015).

Betonimurskerakenteiden aukikaivukokeissa (SCC Viatek Oy 2001; Ramboll Finland Oy 2014) on havaittu lujittuneen betonimurskeen kaivuvastuksen olevan kalliomursketta suurempi, mutta kuitenkin kaivettavissa tavanomaisella kaivinkonekalustolla sekä kesä- että talviolosuhteissa. Miesvoimin lapiolla betonimurskeen kaivu ei onnistu, joten alkutäytön tekeminen luonnonkiviaineksesta putki- ja johtokaivannoissa on tärkeää. Kuvassa 5.8 nähdään aukikaivettu betonimurskerakenne. Betonimurske irtoaa kaivettaessa rakeisena, eikä työskentelyä vaikeuttavia kovia kokkareita muodostu. Erittäin raskaan liikenteen alla lujittuneesta I-luokan betonimurskeesta muodostui aukikaivettaessa kuvan 5.9 mukaisia kokkareita, mutta nekin hajosivat lapiolla lyömällä. II-luokan betonimurskeen kaivuvastus oli I-luokan mursketta pienempi ja siitä ei muodostunut kokkareita.



Kuva 5.8 Aukikaivettu betonimurskerakenne. Kuva: Taavi Dettenborn (Ramboll Finland Oy 2014).



Kuva 5.9 Betonimurskerakenteesta aukikaivettua betonimurskettä. Kokkareet ovat I-luokan betonimurskeesta erittäin raskaan kuormituksen alla muodostuneita. Kuvat: Taavi Dettenborn (Ramboll Finland Oy 2014).

Betonimurskeen tiivistys takaisin rakenteeseen onnistuu kokeilujen perusteella jopa tavallista luonnonkiviainesmurskettä paremmin. Rakenteesta otetuista näytteistä tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella aukikaivettu betonimurske saavuttaa 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen noin 70 % alkuperäisestä puristuslujuudestaan. Betonimurskeen rakeisuus ei olennaisesti muutu aukikaivun myötä. Betonimurskeen seassa oleva rauditusmetalli häiritsee metallinilmaisimen käyttöä betonimurskerakenteen kohdalla, mutta CAT-kaapelitutkan todettiin toimivan normaalisti. Metallinpaljastin reagoi hyvinkin vä-

häiseen määrään metallia, esimerkiksi rautalankaan. (SCC Viatek Oy 2001; Ramboll Finland Oy 2014)

Raitiotien huolto- ja kunnossapitotoimenpiteitä betonimurskeen käyttö tuskin vaikeuttaa. Murskeen kaivu onnistuu tavanomaisella kaivinkonekalustolla. Tukikerroksellisen radan päällysrakenteen kunnossapitotehtävät, kuten raiteen tukeminen erikoiskalustolla voidaan suorittaa normaalisti, mikäli betonimurske sijoitetaan tukikerroksen alapuolelle. MARA-asetuksen mukaisesti betonimurskerakenne on peitettävä vähintään 10 cm kerroksella luonnonkiviainesmursketta, joten aivan ratapölkkyjen alapuolelle sitä ei voida sijoittaakaan. Betonimurskerakenteiden aukikaivukokeiden perusteella betonimurske irta toaa rakenteesta lujittumisen jälkeenkin rakeisena, joten sen kovettuminen kiinni esimerkiksi kiintoraiteen laattaa ei liene merkittävä riski.

Kaupunkiympäristössä erilaiset kunnallistekniset verkostot aiheuttavat oman haasteensa väyläinfrastruktuurin rakentamiselle ja kunnossapidolla. Raitiotien alapuolelle saattaa olla tarpeen tehdä erilaisia putki- tai johtoalituksia radan rakentamisen jälkeen. Tällöin on rakenne joko kaivettava auki tai käytettävä kaivamattomia tekniikoita. Yleisimmät kaivamattomat menetelmät uusia putki- tai johtolinjoja väylärakenteen alle rakennettaessa ovat erilaiset porausmenetelmät. Alitusporaus tosin voi vaatia jopa kymmeniä metrejä tilaa alitettavan väylän poikkisuunnassa, mikä rajoittaa näiden menetelmien käyttökelppoisuutta ahtaassa kaupunkitilassa. (Honkaharju 2016)

Kaivamattomien alitusmenetelmien soveltuvuus erityyppisiin pohjaolosuhteisiin vaihtelee menetelmästä riippuen. Jotkut porausmenetelmät toimivat vain pehmeissä maalajeissa, kun taas joitakin voidaan käyttää myös kivisissä maalajeissa tai jopa kalliossa (Honkaharju 2016). Esimerkiksi vasaraporaus soveltuu muilla menetelmillä ongelmallisen sekamaan tai kivisen maalajin poraukseen. Sitä voidaan käyttää myös kalliossa. Betonimurskeen käyttö raitiotierakenteessa ei siis estä poraamalla tehtävää alitusta, kunhan se huomioidaan porauskaluston valinnassa.

Betonimurskeen vedenläpäisevyys on hieman luonnonkiviainesta pienempi. Lujittuessaan se muodostaa jäätyneitä kiviainesta vastaavan laatan, mikä voi vaikuttaa veden liikkeisiin rakenteessa (HSY 2014). Esimerkiksi putkirikon tapahtuessa betonimurskekerroksen yläpuolella voi lujittunut betonimurskelaatta vaikuttaa veden kulkeutumiseen rakenteessa ja vuotovedet voivat kulkeutua tavallista kauemmas vuotokohdasta.

5.3.2 Kemiaalliset ominaisuudet

Lujittumisen ohella betonimurskeen erottaa tavanomaisesta murskeesta sen emäksisyys. Betonimurskeen sisältämä sementtikivi tekee siitä selvästi emäksisen materiaalin. Tyyppillisestä betonista valmistettavassa betonimurskeessa on keskimäärin noin 300 kg/m³ sementtikiveä ja noin 2000 kg/m³ luonnonkiviainesta sekä materiaalin huokostiloissa olevaa vapaata vettä (TTY 2014). Veden päästessä liikkumaan murskerakenteessa sii-

hen voi liueta sementtikivestä emäksisiä ainesosia, jolloin sen pH-arvo kohoaa. Laboratoriotutkimuksissa on havaittu betonimurskeen läpi suotautuvan veden pH-arvon olevan noin 12,5. Tämä vastaa käytännössä kylläisen kalsiumhydroksidin vesiliuoksen pH:ta, joten arvoa voidaan pitää emäksisyyden enimmäisarvona betonimurskeen käyttöolosuhteissa. Betonimurskerakenteen läpi kulkeutuvan veden pH voi jäädä huomattavasti tätä alhaisemmaksi, riippuen esimerkiksi sen virtausnopeudesta. Happamuusastetta kuvaava pH-asteikko on logaritminen, jolloin yhden yksikön muutos vastaa liuoksen happamuuden kasvua kymmenkertaiseksi.

Betonimurskeen emäksisyys ei estä seostamattomien rautametallien (valurauta ja hiiliteräiset) käyttöä. Mikäli murskerakenteen läpi suotautuvan veden pH nousee riittävästi, se voi jopa saada aikaan rautametallien passivoitumisen, eli pysäyttää niiden korroosion. Rautametallit ovat sähkökemiallisesti stabiileja, kun elektrolyytin, eli metallin kanssa kosketuksissa olevan veden pH ylittää noin tason 10. (TTY 2014)

Sinkki on sähkökemiallisesti stabiili pH-alueella neutraalista noin tasolle 13. Näin ollen betonimurskeen aiheuttama sen läpi suotautuvan veden pH:n nousu noin tasolle 12,5 ei riitä käynnistämään sinkissä merkittävää korroosiota. Sinkkiä käytetään myös suojaamaan betonin raudoiteteräksiä, mikä kertoo niiden hyvästä emäksisyydenkestosta. Tällöin sinkkipinta tulee tosin passivoida esimerkiksi säilyttämällä sinkittyjä kappaleita ulkotiloissa noin neljän viikon ajan. (TTY 2014)

Alumiini on sähkökemiallisesti stabiili noin pH-alueella 4–8, joskin sen seostaminen vaikuttaa korroosionkestävyyteen merkittävästi. Betonimurskerakenne voi aiheuttaa lävitseen suotautuvassa vedessä pH-tason nousun niin korkeaksi, että se syövyttää käytännössä kaikkia alumiinilaatuja. Täten alumiinisia tarvikkeita ei voida käyttää betonimurskerakenteen yhteydessä ilman emäksisyydeltä suojaavaa pinnoitetta. (TTY 2014)

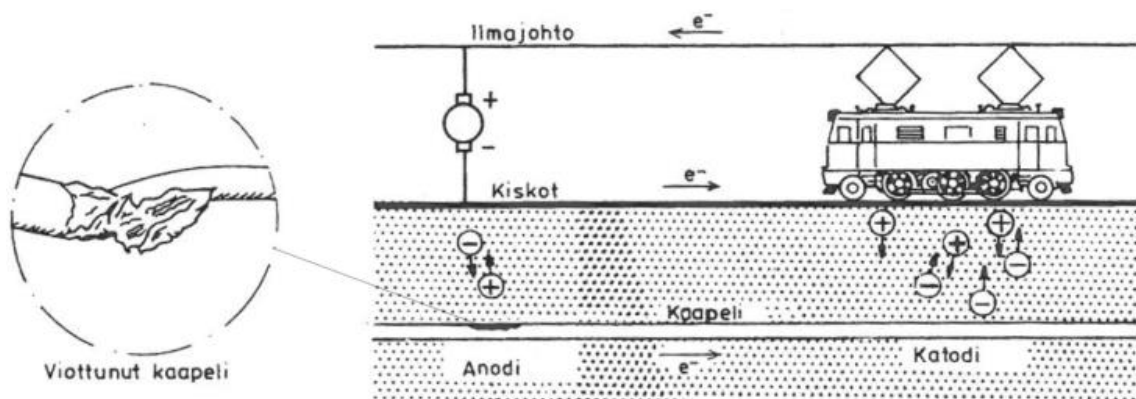
Vesihuoltolinjoja rakennettaessa on betonimurskeen käytön yhteydessä huomioitava varsinaisen putkimateriaalin lisäksi myös sen pinnoite. Esimerkiksi sinkkialumiinipinnoitteisia valurautaputkia käytettäessä on varmistettava, ettei pohja- tai orsiveden pinta ulotu putkien päällä lopputäytössä olevaan betonimurskekerrokseen. Muovi- tai betoniputkien käyttöä betonimurskeen käyttäminen alkutäytön yläpuolella ei rajoita. Putkien asennusaloissa tai alkutäytöissä ei sallita betonimurskeen käyttöä. (HSY 2014)

Joidenkin geolujitteiden sisältämä polyesteri on herkkä emäksien vaikutuksille. Emäksisyys polyesterilujitteen asennusympäristössä heikentää sen lujuutta ja pitkäaikaiskestävyyttä, mikä on huomioitava käytettäessä näitä lujitteita betonimurskerakenteen yhteydessä. (Liikennevirasto 2012a)

5.3.3 Raitiotien hajavirrat

Eräs raitiotierakenteessa esiintyvä riski on raitiotien sähköjärjestelmän ympäristönsä mahdollisesti aiheuttamat hajavirrat ja niistä aiheutuva metallirakenteiden korrosio. Hajavirroiksi kutsutaan sähkövirtoja, jotka kulkevat varsinaiseen virtapiiriin kuulumattomien johtimien kautta. Hajavirtoja syntyy erityisesti tasavirtaa käyttävistä virtalähteistä, kuten raitioteiden ratasähköistyksistä. Raitiotien sähköistysjärjestelmässä virtalähde, ajojohdin, ajokiskot ja raitiovaunu muodostavat virtapiirin. Järjestelmän paluujohtimena toimivista kiskoista saattaa vuotaa sähkövirtaa maahan. Maahan vuotava virta pyrkii poistumaan maaperästä pitkin reittiä, jossa vastus on pienin. Mikäli kiskojen lähellä on metallirakenteita, voi sähkövirta hakeutua niihin. (Aromaa 1996; Rämö 1999; Nikula 2004)

Raitiotien kulkiessa samansuuntaisesti tai pienessä kulmassa risteävästi metallisten putkien, johtojen tai kaapeleiden kanssa voi niihin indusoitua hajavirtoja raitiotien virtapiiristä (Rämö 1999). Putkien lisäksi mahdollisia korrosiokohteita kaupunkiympäristössä ovat esimerkiksi erilaiset maanalaiset säiliöt sekä erilaiset teräs- tai teräsbetonirakenteiset perustukset. Raitiotien hajavirtojen aiheuttaman korroosion periaate on esitetty kuvassa 5.10. Sähköä johtavan kentän elektrolyytissä oleva metallin anodiksi joutunut pinta syöpyy (Nikula 2004). Katodiksi tulleen osan kohdalla elektrolyytti tulee emäksiseksi vetyionien purkautumisen johdosta, mikä voi vahingoittaa emäksisyydelle arkoja metalleja tai suojaainnoitteita, kuten alumiinia tai sinkkiä.



Kuva 5.10 Raitiotien aiheuttama hajavirtakorrosio (Napari 2016, muokattu lähteestä Nikula 2004).

Hajavirrat pääsevät kulkeutumaan parhaiten rakenteissa, joiden sähkönjohtavuus on suuri. Maa-ainesten sähkönjohtavuus vaihtelee hyvin paljon (Oulun yliopisto 2012). Sähkönjohtavuuteen vaikuttaa merkittävästi maalajin vesipitoisuus. Vesi toimii maassa elektrolyyttien liuottimena lisäten sähkönjohtavuutta. Lisäksi maa-aineksen kemiallisella koostumuksella on vaikutusta, esimerkiksi jotkin mineraalit kuten grafiitti ja metalliset sulfidit ovat hyviä sähkönjohteita. Rossin (2013) diplomityön yhteydessä tehdyissä laboratoriotutkimuksissa on havaittu betonimurskeesta uutetun vesinäytteen sähkönjoht-

tavuuden olevan huomattavasti luonnonkiviainesnäytteestä uutetun veden sähkönjohtavuutta korkeampi. Suoraan betoniteollisuudesta saatavan betonimurskeen sähkönjohtavuuden todettiin tutkimuksessa olevan selvästi purkubetonia korkeampi. Betonimurskeesta uutetun vesinäytteen sähkönjohtavuus oli korkeimmillaan noin kaksinkertainen meriveteen verrattuna.

MARA-asetuksen mukaisesti betonimursketta hyödynnettäessä on sen sijainti raitiotierakenteessa pohjavedenpinnan yläpuolella. Murskerakenteen ollessa kuiva on sen sähkönjohtavuus alhainen. Lisäksi betonimurskekerroksen ja raitiotien kiskojen välissä on kiintoraiteissa betonilaatta ja sepeliradalla luonnonkiviaineksesta tehty tukikerros. Raitiotiellä kiskot myös usein eristetään pohjalaatasta hajavirtojen hallitsemiseksi. Vaikka kiskoa ei normaaliolosuhteissa pystytäkään täydellisesti eristämään ympäröivistä rakenteista, betonimurskeen käyttö raitiotien pohjarakenteissa luonnonkiviaineksen sijasta tuskin lisää hajavirtojen esiintymisen riskiä merkittävästi.

5.3.4 Tärinä ja runkomelu

Kiskoliikenteessä sekä kaluston pyörät että väylän päällimmäinen komponentti, kisko, ovat terästä. Tämä saa aikaan selvästi suuremman riskin tärinähaittojen syntymiselle ympäristöön kuin kumipyöräisellä liikenteellä, jossa sekä pyörät että väylä joustavat enemmän. Liikenteen tärinähaitat ovatkin olleet ongelma erityisesti rautateiden yhteydessä. Raitioteillä kaluston massat ja nopeudet ovat huomattavasti pienempiä, mutta toisaalta väylä kulkee useimmiten lähes koko matkalta rakennetussa ympäristössä lähellä asutusta ja muuta tärinälle herkkää toimintaa.

Tärinän välittymiseen raitiotiestä sen ympäristöön vaikuttavat monet asiat, kuten maaperän koostumus, radan rakenne ja kaluston ominaisuudet. Kitkamaalajeissa etenevä tärinä on korkeataajuisista ja se vaimenee suhteellisen nopeasti. Pehmeissä maalajeissa etenevät matalataajuiset tärinät taas vaimentuvat hitaammin ja ovatkin yleensä tärinäongelmien syynä. Radan rakenteella on vaikutus tärinäherätteen syntyyn ja maapohjaan välittyvään tärinään. Mitä jäykempi radan rakenne on, sen tasaisemmin liikennekuormat jakautuvat maaperään ja sitä pienempiä ovat akselikuormien aiheuttamat radan suuntaiset painumaerot maanpinnassa (Levomäki 1999). Painumaerojen pieneneminen vähentää tärinäherätteen syntymistä. Betonimurskeesta tehdyt rakennekerrokset lujittuvat luonnonkiviainekeskerroksia jäykemmiksi, joten niillä voidaan olettaa olevan tärinöitä vähentävä vaikutus raitiotierakenteessa.

Rautatieliikenteen tärinätutkimuksissa on havaittu suhteellisen ohuiden jäykkien rakenteiden vaikutuksen tärinöihin olevan vähäinen. Suomessa on esimerkiksi Sipoon Nikkilässä toteutettu koerakenne, jossa tukikerroksen alapuolelle tehtiin rakennekerrokset asfalttibetonista ja komposiittistabiloinnista (Lyly 2004). Kohde sijaitsee Keravan ja Sköldvikin välisellä rataosuudella. Valtaosa radan liikenteestä on Kilpilahden kemianteollisuuden ja öljysataman raskasta säiliöjunaliikennettä. Pohjaolosuhteiltaan alue on

ongelmallinen paksujen savikerrosten takia ja radan ympäristössä onkin mitattu Suomen suurimpia rautatien aiheuttamia tärinöitä.

Maaperä koekohteessa koostuu 12–14 m paksuisesta savikerroksesta ennen kovaa pohjaa (Kaisanlahti 2004). Asfalttikerroksen (ABK 20) paksuus on 80–160 mm. Tukikerroksen alapuolista sorakerrosta stabiloitiin sementillä ja bitumilla 400 mm paksuudelta. Laboratoriokokeilla asfaltin kimmomoduuliksi määritettiin noin 7 000 MPa ja stabiloinnin kimmomoduuliksi noin 5 000–14 000 MPa. Rakenteen ei todettu radan ympäristön mittauksissa juurikaan vaikuttavan liikennetärinä (Hakulinen 2004). Koerakenteen vähäinen vaikutus radasta syntyviin tärinöihin johtunee jäykkien rakenteiden suhteellisesta ohuudesta. Laskennallisilla analyyseillä on havaittu massiivisten ja etenkin kovaan pohjaan asti ulottuvien jäykistysrakenteiden vähentävän liikennetärinää tehokkaasti.

Tärinän lisäksi raideliikenteestä voi aiheutua ympäristönsä rakennuksiin runkomelua. Runkomelu kulkeutuu kovia rakenteita pitkin. Riski runkomelun aiheuttamien haittojen esiintymiselle on suurin väylärakenteen ulottuessa peruskallioon tai kovaan kitkamaahan. Raitiotieradan alusrakenteen murskekerroksen korvaaminen jäykemmällä betonimurskekerroksella voi joissakin olosuhteissa kasvattaa riskiä runkomelun välittymiselle ympäröiviin rakennuksiin. Raitiotieliikenteen ympäristöönsä aiheuttaman muuhun meluun betonimurskeen käyttö radan pohjarakenteessa tuskin vaikuttaa.

5.4 Lisätutkimuksen tarve

Nykyisin olemassa olevat tutkimukset betonimurskeesta keskittyvät lähinnä sen käyttöön tie-, katu- tai kenttärakenteissa. Ratarakenteiden osalta tutkimusta ei juuri ole tehty. Ratarakenteessa murskerakenteisiin kohdistuvat kuormitukset eroavat tie- tai katurakenteista niiden päällimmäisten rakennekerrosten hyvin erilaisten toimintaperiaatteiden vuoksi. Tie- tai katurakenne on useimmiten toteutettu joustavalla päällysrakenteella, jossa päällyste taipuu kuormituksen alla ja sen alapuolisiin murskekerroksiin muodostuu puristusjännityksiä, joiden vaikutussuunnat kiertyvät kuorman liikkeen mukaan. Ratarakenteen päällimmäinen komponentti, kisko, sen sijaan on hyvin jäykkä pystysuunnassa.

Betonimurskeen pitkäaikaiskestävyyttä tierakenteissa todellisten liikenne- ja ympäristörasitusten alaisena on tarkkailtu Suomessa jo yli 20 vuoden ajan seurantamittauksilla. Väylien ja katujen osana olevien koerakenteiden lisäksi betonimurskeen kuormituskestävyyttä on tutkittu laboratoriotutkimuksissa esimerkiksi yksi- ja kolmiaksisiaalisilla puristuslujuuskokeilla (SCC Viatek Oy 2002; Varin 2007; Paalanen 2017).

Ratapölkkyillä ja tukikerroksella varustetussa ratarakenteessa on otettava huomioon, että lähellä rakenteen pintaa murskeen rakeisiin kohdistuu hiovaa kulutusta johtuen kuormien välittymisestä murskekerroksiin ratapölkkyjen kautta. Tämä vaikutus ei tule esiin kolmiaksisiaalikokeessa, eikä merkittävässä määrin tie- tai katukoerakenteessakaan. Betonimurskeen pitkäaikaista rasituskestoa tukikerroksellisella radalla voitaisiin testata labo-

ratoriossa esimerkiksi koejärjestelyllä, jossa kolmea peräkkäistä ratapölkkyä kuormitaan vuorotellen tunkeilla ja näin simuloidaan liikkuvaa kuormaa.

Tällaista koejärjestelyä viidellä peräkkäisellä kuormitustunkilla on käytetty esimerkiksi TTY:llä vuosina 2008–2009 ratapenkereiden geometriaa käsittelevässä tutkimuksessa (Kalliainen & Kolisoja 2013). Tutkimuslaitteisto on esitetty kuvassa 5.11. Kyseinen koejärjestely oli toteutettu pienoiskoossa suhteessa 1:4 todelliseen penkereeseen. TTY:llä on toteutettu myös täyden mittakaavan laboratorioskokeita ratapölkkyjen ja raidesepelin yhteistoiminnasta. Vuosina 2009–2012 toteutetun Elinkaaritehokas rata (TE-RA) -tutkimusohjelman yhteydessä tutkittiin esimerkiksi betoniratapölkkyihin kohdistuvia rasituksia erilaisilla tukikerroksilla laboratorioskoejärjestelyllä, jossa yksittäistä ratapölkkyä kuormitettiin dynaamisesti hydraulisynterillä (Kerokoski et al. 2013).



Kuva 5.11 TTY:n peräkkäisten kuormitustunkkien koejärjestely (Kalliainen & Kolisoja 2013).

Tie- ja katurakenteista saatujen hyvien käyttökokemusten perusteella betonimursketta voitaisiin käyttää sen mekaanisen kestävyuden kannalta myös tukikerroksen alapuolisissa rakennekerroksissa. Betonimurskeen käytöllä välikerroksessa saattaa kuitenkin olla haitallinen vaikutus tukikerroksen raidesepelin pitkäaikaiskestävyyteen. Sepelin sijainti jäykkien rakenteiden, eli ratapölkyn ja lujittuneen betonimurskekerroksen välissä voi lisätä sen hienontumista ja näin raiteen tuennan tarvetta. Raidesepelin pitkäaikaiskestävyyttä tämänkaltaisissa olosuhteissa tuleekin tutkia tarkemmin ennen betonimurskeen käyttöä ratarakenteen välikerroksessa. Uusilla raitioteilla käytettävän sepelin vaatimukset kuitenkin ovat usein rautateitä vastaavia ja liikennekuormat taas huomattavasti pienempiä, joten sepelin hienontuminen ei välttämättä ole raitioteilla merkittävä ongelma. Lisäksi rautateilla vastaavan kaltaisia rakenteita on käytössä esimerkiksi tukikerroksisilla rautatiesilloilla sekä joissakin maissa yleisissä asfalttirakenteisissa ratapenkereissä.

Kiintoraiteella laatan alapuolisen murskeen jauhaantuminen ei todennäköisesti ole ongelma kuorman tasaisen jakautumisen vuoksi. Myös kiintoraiteen yhteydessä erityistä huomiota tulee kuitenkin kiinnittää betonilaatan ja betonimurskekerroksen väliin mahdollisesti sijoitettavan materiaalin toimintaan. Betonimurskeen lujituksessa siitä muodos-

tuu jäykähkö laattamainen rakenne. Mikäli betonilaatan ja betonimurskekerroksen väliin sijoitetaan sitomaton kerros, tulee sen materiaalin kestävä kuormitukset jäykempien kerrosten puristuksessa. Erityistä tarvetta sijoittaa betonimurskeen ja kiintoraiteen laatan väliin luonnonkiviainesta ei kuitenkaan ole. Aukikaivukokeissa on myöskin todettu betonimurskeen irtoavan lujittuneesta rakenteesta rakeisena, joten sen kovettuminen kiinni kiintoraiteen laattaan haitaten rakenteen mahdollisia kunnostustoimenpiteitä on epätoivottavaa. Emäksinen betonimurskekerros suoraan laatan alapuolella on myös eduksi laatan raudotteiden korroosiota ajatellen.

Eräs kirjallisuudessa esitetty betonimurskeen käyttöön liittyvä riski on betonimurskerakenteen mahdollinen haurastuminen sen ikääntyessä. Murskeen pitkään jatkuneen lujittumisen myötä rakenteesta saattaa tulla liian jäykkä ja hauras, jolloin sen vaurioitumismekanismi voi muuttua (Batmunkh et al. 2010). Haurastumisen myötä vaarana on betonimurskerakenteen rikkoontuminen etenkin lähellä rakenteen pintaa, jossa kuormitukset ovat suurimmillaan. Suomalaisissa tie- ja katukohteissa liiallista jäykkyyden kasvua tai haurastumista ei ole vielä 20 vuoden käytön jälkeenkään havaittu. Maabetoni- eli sementtistabiloiduilla rakenteilla halkeilu on tyypillistä (Rahiala 1988). Syitä halkeilulle ovat rakenteen kutistuminen kovettumisen yhteydessä, lämpötilan vaihtelusta aiheutuvat jännitykset sekä dynaamisen liikennekuorman aiheuttamat taivutus-vetojännitykset.

6. YHTEENVETO

Rakentamisen jätteiden hyödyntäminen on nykyisten ympäristötavoitteiden saavuttamisen kannalta tärkeää ja betonin osalta onkin jo päästy varsin korkeaan kierrätysasteeseen. Betonijätteen murskaaminen ja betonimurskeen käyttö luonnonkiviainesten korvaajana maarakentamisessa säästää luonnonvaroja ja vähentää kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrää. Betonimurskeen käyttö toisarvoisissa kohteissa vain jätteen loppusijoittamisena on kuitenkin hyvän rakennusmateriaalin tuhlausta. Maarakennusmateriaalina betonimurske on joiltakin ominaisuuksiltaan jopa luonnonkiviaineksia parempaa. Uudelleenlujittumisominaisuutensa ansiosta laadukkaalla betonimurskeella voidaan saavuttaa huomattavasti luonnonkiviaineksia suurempia kantavuuksia väylärakenteissa.

Betonimurskerakenteiden hyvien teknisten ominaisuuksien lisäksi betonimurskeen käyttö on usein edullista myös rakentamisen logistiikan kannalta. Betonimursketta syntyy pääasiassa samoilla alueilla, joille infrarakentaminenkin keskittyy, eli kasvavilla kaupunkiseuduilla. Raitiotiet ovat Suomessa suurimpien kaupunkien liikennemuoto, joten niiden rakentamisessa luonnonkiviainesten murskeiden kuljetusmatkat muodostuvat usein pitkiksi. Käyttämällä kaupungin sisäisistä kohteista saatavia uusiomateriaaleja säästetään kaupunkiseutujen luonnonkiviainesvaroja.

Aikaisemmin tehtyjen tutkimusten ja tie- ja katurakenteista saatujen käyttökokemusten perusteella voidaan olettaa betonimurskeen soveltuvan hyvin myös raitiotierakentamiseen. Sepeliradan tukikerrosta lukuun ottamatta raitiotien rakennekerrokseen vaikuttavien kuormitusten luonne ei merkittävästi eroa tie- tai katurakenteesta. Ratapölkkyt ja varsinkin kiintoraiteen betonilaatta jakavat kuormituksia rakenteeseen joustavaa asfalttipäällysterakennetta tasaisemmin, jolloin liikenteen kuormitusten vaikutukset rakennekerrokseen ovat raitiotiellä tie- tai katurakennetta vähäisempiä. Tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyissä monikerroslaskennoissa havaittiin raitiotierakenteessa esiintyvien pystyjännitysten olevan huomattavasti tierakenteesta mitattuja arvoja pienempiä.

Tie- ja katurakenteissa betonimursketta on teknisesti mahdollista käyttää kaikissa rakennekerroksissa kantavasta kerroksesta suodatinkerrokseen ja pengertäytteeseen saakka (Tielaitos 2000). Tukikerroksellisessa ratarakenteessa betonimurskeen voidaan olettaa soveltuvan teknisten ominaisuuksiensa puolesta ainakin tukikerroksen alapuolisiin rakennekerrokseen. Tukikerroksessa betonimurskeen MARA-asetuksen mukaista käyttöä vaikeuttaa asetuksen vaatimus betonimurskerakenteen peittämisestä tai päällystämisestä (VNa 843/2017). Lisäksi kerroksen kuormitukset heti ratapölkkyjen alapuolella eroavat merkittävästi tie- tai katurakenteessa esiintyvistä kuormituksista. Liikennekuormituksen aiheuttama kisko-pölkkyrakenteen pumppaava liike aiheuttaa tukikerrok-

seen syklistä, hiovaa kuormitusta. Tämäntyyppisen kuormituksen vaikutuksia betonimurskerakenteeseen tulee tutkia lisää, mikäli halutaan laajentaa betonimurskeen käyttöä myös tukikerrokseen.

Välikerrokseen tultaessa liikenteen kuormituksen vaikutus on jo tasoittunut vastaamaan luonteeltaan tie- tai katurakenteen kuormituksia. Teknisiltä ominaisuuksiltaan betonimurske soveltuu käytettäväksi välikerroksessa. Ratapenkereen muodon takia betonimurskekerros tulee penkereen reunoilla peittää vähintään 10 cm paksuisella luonnonkiviaineskerroksella tai päällystää riittävän tiiviillä päällysteellä MARA-asetuksessa esitetyn vaatimuksen täyttämiseksi. Betonimurskeen vedenläpäisevyys on vastaavaa luonnonkiviainesmurskettä alhaisempi, joten käytettäessä betonimurskettä välikerroksessa on huolehdittava riittävästä välikerroksen yläpinnan kallistuksesta.

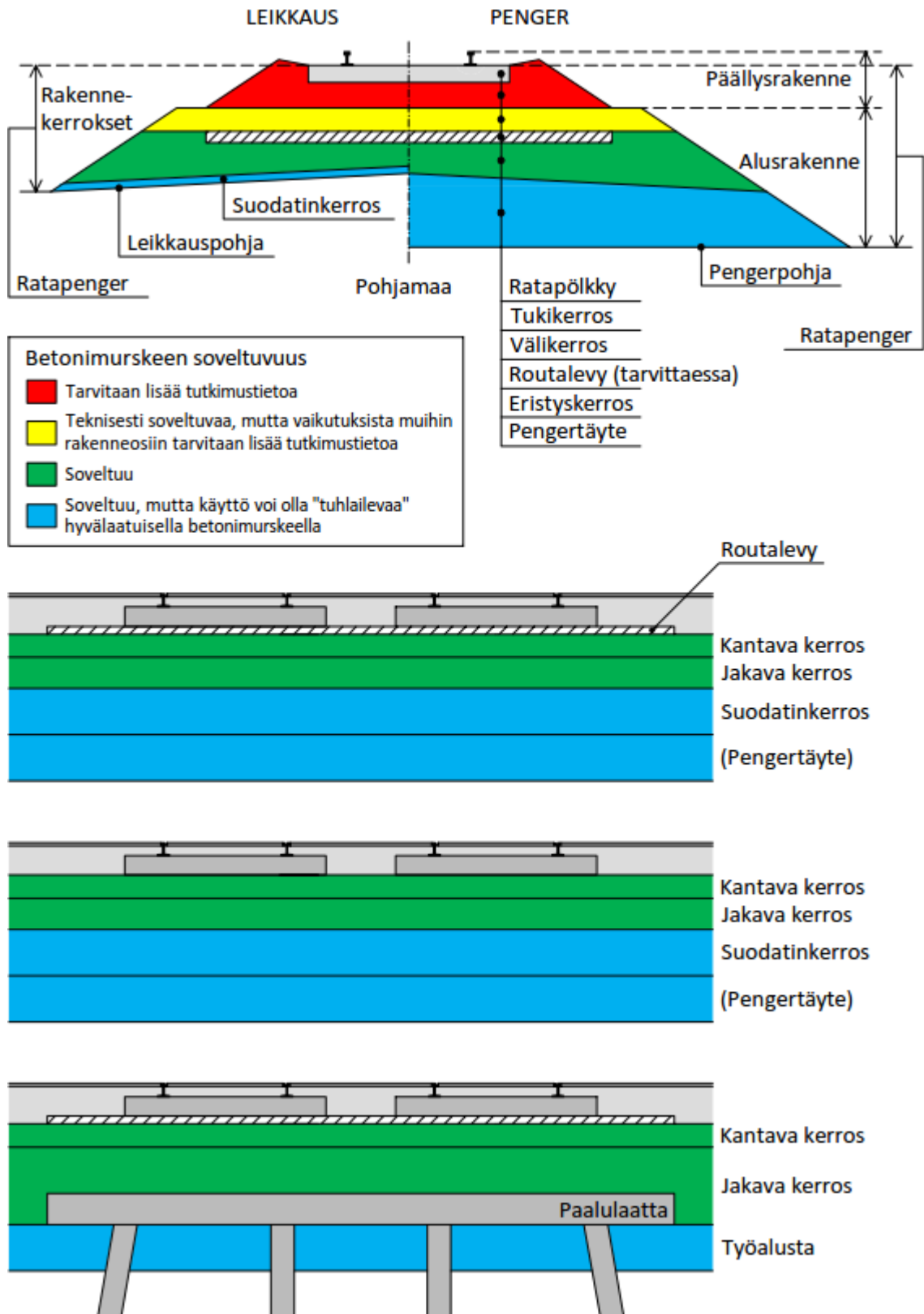
Lujittuvan betonimurskeen sijoittaminen välikerrokseen aiheuttaisi tilanteen, jossa tukikerroksen raidesepeli sijaitsee kahden jäykemmän kerroksen, ratapölkyn ja lujittuneen betonimurskekerroksen, välissä. Kiviaineksen pitkäaikaiskestävyyttä tällaisessa rakenteessa tulisikin tutkia ennen betonimurskeen käyttöä välikerroksessa. Samanlainen tilanne voi syntyä myös kiintoraiteella, mikäli raiteen betonilaatan ja betonimurskekerroksen väliin sijoitetaan luonnonkiviaineskerros. Luonnonkiviaineskerroksen asentaminen laatan alle ennen betonimurskekerrosta ei kuitenkaan ole välttämätöntä. Mikäli betonimurske on lujittumatonta, ei rakenne tältä osin eroa perinteisestä.

Betonimurskettä voidaan teknisten ominaisuuksiensa puolesta käyttää raitiotierakenteen alimmissa kerroksissa, suodatinkerroksessa ja mahdollisessa pengertäytössä, mutta tällöin sen hyviä lujuusominaisuuksia ei täysin hyödynnetä. Taulukkoon 6.1 ja kuvaan 6.1 on koottu betonimurskeen mahdollisia käyttökohteita raitiotierakenteissa sekä eri rakennesien kohdalla huomioitavia asioita.

Taulukko 6.1 Betonimurskeen mahdolliset käyttökohteet raitiotierakenteessa.

Käyttökohte	Betonimurskeen soveltuvuus	Huomioitavaa
Tukikerroksellinen rata		
Tukikerros	Tarvitaan lisää tutkimustietoa	BeM-rakenne peitettävä/päällystettävä
Välikerros	Teknisesti soveltuvaa, vaikutus tukikerrokseen vaatii lisää tutkimustietoa	BeM-rakenne peitettävä penkereen sivuilla
Eristyskerros	Soveltuu	BeM-rakenne peitettävä penkereen sivuilla
Suodatinkerros	Soveltuu*	BeM-rakenne peitettävä penkereen sivuilla
Pengertäyte	Soveltuu*	BeM-rakenne vähintään 1 m pohjavedenpinnasta
Kiintoraiderata		
Kantava kerros	Soveltuu	
Jakava kerros	Soveltuu	
Suodatinkerros	Soveltuu*	
Pengertäyte	Soveltuu*	

* Käyttö voi olla "tuhlailevaa" hyvälaatuisella betonimurskeella



Kuva 6.1 Raitiotien rakenneosat tukikerroksisella, kiintoraiteellisella ja paalulaattarakenteisella raitiotieradalla. Rakenneosien värit taulukossa 6.1 esitettyjen betonimurskeen mahdollisten käyttökohteiden mukaan.

Luonnonkiviaineksille kehitetyt testausmenetelmät sopivat sinänsä myös betonimurskeiden testaamiseen, mutta niiden tulokset eivät välttämättä ole täysin vertailukelpoisia luonnonkiviainesten kanssa. Betonimurskeen toimivuus väylärakenteessa perustuu betonin uudelleenlujittumiseen ja murskekerroksen toimivuuteen yhtenäisenä rakenteena. Yksittäiset betonimurskerakeet ovat luonnonkiviainesta huokoisempia ja esimerkiksi kuulamyly-tyyppisissä kokeissa niistä irtoaa enemmän hienoaainesta kuin luonnonkiviainesmurskeesta. Tämä on tarpeen huomioida rakennekerrosten materiaalien vaatimuksissa.

LÄHTEET

Aamulehti (2017). Raitiotie rakennetaan Tampereelle – Tämä kaikki tiedetään ratikka-hankkeesta. Uutinen. Julkaistu 27.9.2017. Saatavissa (viitattu 26.10.2017): <https://www.aamulehti.fi/uutiset/raitiotie-rakennetaan-tampereelle-tama-kaikki-tiedetaan-ratikkahankkeesta-200419299/>

Alaejos P., de Juan M. S., Rueda J., Drummond R., Valero I. & Vázquez E. (ed.) (2013). Chapter 6 – Quality Assurance of Recycled Aggregates. Progress of Recycling in the Built Environment: Final Report of the RILEM Technical Committee 217-PRE. RILEM State-of-the-Art Reports 8. pp. 229–273.

Alkio R., Pihlajamäki J. & Pienimäki M. (2002). Kehä III. Kohderaportti. TPPT 25. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 35 s. + liitt. 11 s.

Arm M. (2000). Egenskaper hos alternativa ballastmaterial – speciellt slaggrus, krossad betong och hyttsten. Licentiatavhandling. Kungliga Tekniska Högskolan, Institutionen för anläggning och miljö, Avdelningen för mark- och vattenresurslära. Stockholm. 302 s. + liitt. 50 s.

Arm M. (2001). Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. Waste Management 21 (2001). pp. 235–239

Arm M. (2003). Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials – experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag. Doctoral thesis. Kungliga Tekniska högskolan, Land and Water Resources Engineering. Stockholm. 66 p. + app. 106 p.

Arm M., Wik O., Engelsen C. J., Erlandsson M., Sundqvist J.-O., Oberender A., Hjelmar O. & Wahlström M. (2014). ENCORT-CDW – Evaluation of the European recovery target for construction and demolition waste. Report. Nordic Council of Ministers. 181 p. Saatavissa (viitattu 1.3.2018): <http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:724760/FULLTEXT01.pdf>.

Aromaa J. (1996). Katodinen suojaus maaperässä – Perusteita. Materiaalitekniikka Oy, Espoo. 10 s.

Aurstad J., Aksnes J., Dahlhaug J. E., Berntsen G. & Uthus N. (2006). Unbound crushed concrete in high volume roads – A field and laboratory study. Proceedings of

the 5th International Conference on Research and Practical Applications Using Wastes and Secondary Materials in Pavement Engineering. Held 22–23 February 2006. Liverpool, UK. 12 p.

Balfour Beatty plc (2017). Embedded Rail Slab Track. Esite. Saatavissa (viitattu 20.12.2017): <https://www.balfourbeatty.com/media/29022/embedded-rail-system-datasheet.pdf>

Bastin R. (2006). Development of German non-ballasted track forms. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 159, February 2006 Issue TR1. pp. 25–39.

Batmunkh N., Siripun K., Jitsangiam P. & Nikraz H. (2010). Sustainable Use of Crushed Concrete Waste as a Road Base Material. Proceedings of the 4th International Conference on Sustainability Engineering and Science. Auckland, New Zealand.

Belt J., Lämsä V.P., Savolainen M. & Ehrola E. (2002). Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Tiehallinto. Helsinki. 72 s.

Betoni.com (2017). Kiviaines. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.11.2017): <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/kiviaines/>

Betoni.com (2018). Lisäaineet. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.2.2018): <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/lisaaineet/>

Betoni.com (2018). Sementti ja kasviuonekaasupäästöt. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.1.2018): <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>

B. C. S. J. (2000). Study on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. Building Contractors Society of Japan, Committee on Disposal and Reuse of Concrete Construction Waste. Summary in Conc J, Japan – 16(7). pp. 18–31.

Buchner S. & Scholten L. J. (1992). Demolition and Construction Debris: Questionnaire about an EC Priority Waste Stream. European Demolition Association. The Hague, The Netherlands. 20 p.

Buck A. D. (1977). Recycled Concrete as a Source of Aggregate. Journal of the American Concrete Institute, 5. pp. 212–219.

CCAA (2008). Use of Recycled Aggregates in Construction. Report. May 2008. Cement Concrete & Aggregates Australia. 25 p. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 7.3.2018):

http://www.ccaa.com.au/imis_prod/documents/Library%20Documents/CCAA%20Reports/RecycledAggregates.pdf

COST (2001). COST 334. Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres. Final Report of the Action. Version 29. European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research. European Commission, Directorate General Transport. Brussels, Belgium. 170 p.

Dettenborn T. (2013). Betonimurskerakenteiden pitkäaikaistoimivuus. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 110 s. + liitt. 36 s.

Dettenborn T., Forsman J. & Korkiala-Tanttu L. (2015). Crushed concrete in road structures – two decades of experience. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Paper 1500005. ICE Publishing. 8 p.

Dosho Y. (2007). Development of a Sustainable Concrete Waste Recycling System – Application of Recycled Aggregate Concrete Produced by Aggregate Replacing Method. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5, No. 1, February 2007. pp. 27–42.

EAPA (2014). Asphalt in Railway Tracks. EAPA Position Paper. European Asphalt Pavement Association, Brussels. 22 p.

Edilon Sedra B.V. (2017). edilon)(sedra ERS Embedded Rail System. Esite. Saatavissa (viitattu 27.10.2017): https://www.edilonsedra.com/wp-content/uploads/2014/01/Brochure_edilonsedra-ERS-LR-Embedded-Rail-System-Light-Rail_EN.pdf

Ehrola E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy, Tampere. 365 s.

Esveld C. (1997). Track Structures in an Urban Environment. Symposium KU Leuven. TU Delft. 21 p.

Esveld C. (2001). Modern Railway Track. Second Edition. MRT-Productions, Zaltbommel. 654 p.

Esveld C. (2003). Recent developments in slab track. European Railway Review, Issue 2, 2003. pp. 81–85

Euroopan unioni (2008). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>

Euroopan unioni (2011). Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus N:o 305/2011. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0305&from=FI>

FHWA (2000). Recycled Materials in European Highway Environments – Uses, Technologies, and Policies. International Technology Exchange Program. October 2000. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 19 p. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 7.3.2018): <https://international.fhwa.dot.gov/pdfs/recycolor.pdf>

FHWA (2018). Recycled Concrete Aggregate Usage in the US. Summary Report. January 2018. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 19 p. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 7.3.2018): http://www.intrans.iastate.edu/research/documents/research-reports/RCA_US_usage_summary_w_cvr.pdf

Geologian tutkimuskeskus (2017). Kalliokiviaines. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.11.2017): http://www.gtk.fi/_system/print.html?from=/geologia/luonnonvarat/kalliokiviaines/index.html

Getzner Werkstoffe GmbH (2017a). Sleeper pads. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.9.2017): <https://www.getzner.com/en/products/rail-products/sleeper-pads>

Getzner Werkstoffe GmbH (2017b). Under ballast mats. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.9.2017): <https://www.getzner.com/en/products/rail-products/under-ballast-mats>

Haakana V. (2014). Raskaiden ajoneuvojen rengastuksen vaikutus tierasitukseen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampere. 89 s.

Hakulinen M. (2004). Nikkilän tärinämittaukset. Raportti kesän 2004 tärinämittauksista 21.9.2004. Työ 258. Geomatti Oy. 13 s. + liitt. 5 s.

Hansen T. C. & Narud H. (1983). Strength of Recycled Concrete made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. Concrete International – Design and Construction – 5(1). pp. 79–83.

Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungit (2015). Betonimurskeen hyödyntäminen infrarakentamisessa pääkaupunkiseudulla. Ohje. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/ohjeet/betonimurske.pdf>

Helsingin kaupungin liikenneliikelaitos (2016). Raitioteiden suunnitteluohje. 32 s. Saatavissa (viitattu 26.10.2017): http://www.e-julkaisu.fi/hkl/raitioteiden_suunnitteluohje/mobile.html#pid=1

Helsingin Satama Oy (2016). Työn alla loistavat liikenneyhteydet. Tiedote. Saatavissa (viitattu 26.10.2017): <http://www.portofhelsinki.fi/uudistamme-satamaa/lansisataman-kehittaminen/tyon-alla-loistavat-liikenneyhteydet>

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (2014). Betonimurske. Käyttöohje suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon. 8 s. Saatavissa: <http://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/2014--HSY-Betonimurskeohje.pdf>

Holm G., Bengtsson P.-E., Carlsten P., Johansson L. O. & Larsson R. (2002). Befintliga banker vid ökad tåglast och högre tågastighet. Statusbestämning av befintliga banker. Förbättringsoch förstärkningsåtgärder under driftförhållanden. "State of the art". (Upgrading of existing railway lines for increased axle loads and speed. Diagnosis and improvement methods. State of the art). Swedish Geotechnical Institute, SGI. Linköping. Varia 520. 102 p.

Honkaharju R. (2016). Kaivamattomat tekniikat kunnallISRakentamisessa. Diplomityö. Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Oulu. 103 s.

Huuhka S. (2010). Kierrätys arkkitehtuurissa. Betonielementtien ja muiden rakennusosien uudelleenkäyttö uudisrakentamisessa ja lähiöiden energiatehokkaassa korjaus- ja täydennysrakentamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 141 s.

Höynälä H. & Forsman J. (2000). Betonimurske. Teoksessa: Mäkelä H. (toim.) & Höynälä H. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa – Materiaalit ja käyttökohteet. Teknologiakatsaus 91/2000. Tekes. Helsinki. s. 33–38.

Indraratna B., Salim W. & Rujikiatkamjorn C. (2011). Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track. CRC Press, The Netherlands. 432 p.

International Union of Railways (UIC) (2009). Under Sleeper Pads – Summarising Report. Wien. 40 p.

Jernbaneverket (1998). Regler for prosjektering og bygging, Underbygning. JD 520. Oslo.

Johansen Ø. (1975). Thermal Conductivity of Soil and Rock. Frost i jord nr. 16, October 17. Oslo. pp. 13–22.

Joutsenoja T. (2012). Betoroc –murskeet. Seminaariesitys, Materiaalitehokkuudella parempaa tulosta rakennusteollisuudessa (18.10.2012), Lahden ammattikorkeakoulu. Rudus Oy. Saatavissa (viitattu 7.11.2012):

<http://www.lamk.fi/projektit/cleantech/koulutukset/Documents/Tuomo%20Joutsenoja.%20Betoroc%20-murskeet.%20Rudus%20Oy.pdf>

Jäteverolaki (1996). L 28.6.1996/495. Annettu Helsingissä 28.6.1996.

Jäteverolaki (2010). L 17.12.2010/1126. Annettu Helsingissä 17.12.2010.

Kaisanlahti M. (2004). Loppuraportti. TEKES-projekti ”Asfaltin käyttö rautatien rakenteissa”, Sipoon Nikkilän koekohteen stabilointi ja asfaltointi. Lemminkäinen Oyj, Päälystysyksikkö. 20 s. + liitt. 9 s.

Kalliainen A. & Kolisoja P. (2013). Ratapenkereen leveys ja luiskakaltevuus. Loppuraportti. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2013. Liikennevirasto, Infra- ja ympäristöosasto. Helsinki. 85 s. + liitt. 2 s.

Kalliainen A., Kolisoja P. & Nurmikolu A. (2014). Radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. Liikennevirasto, Kunnossapito-osasto. Helsinki. 174 s.

Kauppinen M. (2011). Ratakiskon elinkaari. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2011. Liikennevirasto, Väylätekniikkaosasto. Helsinki. 118 s.

Kaupunkiliikenne.net (2016). Helsingin raideliikenteen historiaa. Verkkosivu (viimeisin päivitys 4.7.2017). Saatavissa (viitattu 1.11.2017): <http://www.kaupunkiliikenne.net/Helsinki/hehistoria.html>

Kerokoski O., Rantala T., Köliö A. & Nurmikolu A. (2013). Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Ratapölkyn mekaanisen toiminnan ja rapautumisen kokeellinen ja laskennallinen arviointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37/2013. Liikennevirasto, Infra- ja ympäristöosasto. Helsinki. 248 s. + liitt. 5 s.

Kolisoja P., Levomäki M., Mäkelä E. & Niskanen P. (1999). Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 6/1999. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki. 135 s.

Kolisoja P., Järvenpää I., Mäkelä E. & Levomäki M. (2000). Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 5/2000. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki. 137 s. + liitt. 5 s.

Konepörssi (2013). Deleten Hartl-kauhamurskain jauhaa purkubetonia. Uutinen. Julkaistu 5.12.2013. Saatavissa (viitattu 13.2.2018): <http://www.koneporssi.com/uutiset/deleten-hartl-kauhamurskain-jauhaa-purkubetonia/>

Korkeamäki S. (2011). Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 04/2011. Liikennevirasto, Väylätekniikkaosasto. Helsinki. 98 s.

Kuula P. (2015). Tien ja radan sitomattomissa rakennekerroksissa käytettävien kiviainesten lujuuden ja hienontumisen tutkiminen. Kirjallisuusselvitys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 68/2015. Liikennevirasto, Tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki. 115 s. + liitt. 5 s.

Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä (2004). L 30.12.2004/1299. Annettu Helsingissä 30.12.2004.

Lahdensivu J., Huuhka S., Annala P., Pikkuvirta J., Köliö A. & Pakkala T. (2015). Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet. Tutkimusraportti 162. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tampere. 78 s.

Latvala J. (2014). Konvektiivinen lämmönsiirtyminen ratapenkereessä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampere. 127 s.

Levomäki M. (1999). Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 3/1999. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki. 37 s. + liitt. 2 s.

Liikennevirasto (2012a). Geolujitetut maarakenteet. Tiegeotekniikan käsikirja. Liikenneviraston oppaita 2/2012. Liikennevirasto, Hankesuunnitteluosasto. Helsinki. 159 s. + liitt. 58 s.

Liikennevirasto (2012b). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 21 Liikkuva kalusto. Liikenneviraston ohjeita 21/2012. Liikennevirasto, Väylätekniikkaosasto. Helsinki. 64 s.

Liikennevirasto (2013). Tien suuntauksen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 30/2013. Liikennevirasto, Suunnittelun ohjausyksikkö. Helsinki. 59 s. + liitt. 11 s.

Liikennevirasto (2017a). Rautatietilasto 2016. Liikenneviraston tilastoja 9/2017. Liikennevirasto. Helsinki. 56 s.

Liikennevirasto (2017b). Rataverkko. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.11.2017): <https://www.liikennevirasto.fi/rataverkko#.WhV1dlu0PmE>

Liikennevirasto (2018). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3 Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 13/2018. Liikennevirasto, Tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki. 39 s. + liitt. 54 s.

Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy Ab (1996). Betoroc-ohjeet.

Lyly P. (2004). Asfaltin käyttö rautatierakenteissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Rakennetekniikan laitos, pohja- ja maarakenteet. Tampere. 98 s. + liitt. 2 s.

Matinlauri S. (2016). Vaihtoehtoisia maarakennusmateriaaleja sisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 156 s.

Mehus J., Petkovic G., Engelsen C. J., Karlsen J. & Lillestøl B. (2003) Recycled Aggregates a Viable Alternative for the Norwegian Building and Construction Industry. WASCON 2003. Saatavissa (viitattu 1.3.2018): https://www.vegvesen.no/_attachment/110360/binary/192279

Metso Corporation (2018). Kivenmurskaus. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.2.2018): <https://www.metso.com/fi/tuotehaku?industry=Kivenmurskaus#/Kategoriat/Murskaimet>

Mroueh U.-M., Wahlström M., Laine-Ylijoki J. & Mäkelä E. (2006). Tausta-aineistoa ”Valtioneuvoston asetuksen eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa” valmistelua varten. VTT, projektiraportti PRO3/P3013/05. 19 s. + liitt. 12 s.

Määttänen A. (2000). Betonin kierrätys ja betonimurskeen käyttö maarakenteissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Rakennetekniikan laitos, rakennusgeologia. Tampere. 124 s. + liitt. 5 s.

Napari M. (2016). Pääkaupunkiseudun energiantuotannon tuhkien korroosiovaikutus. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 108 s. + liitt. 11 s.

Nikula A. (2004). Korroosion torjuntakeinoja korroosion estämiseksi esiintymismuodoittain. Teoksessa: Kunnossapitoyhdistys ry. Korroosio käsikirja. 2nd ed. Rajamäki: KP-Media Oy. s. 165–220. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 12.

NPK Construction Equipment, Inc. (2018). U31JRA Concrete Crusher. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.2.2018): <http://www.npkce-photos.com/Construction-Equipment/Concrete-Crushers/U31JRA/>

Nummelin M. (2014). Ratatekniikan pilottikohteita. Rautatietekniikka 3-2014. s. 12–14. Rautatiealan Teknisten Liitto RTL ry.

Nurmikolu A. (2005). Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in structural layers of railway track. Doctoral dissertation. Tampere University of Technology Publication 567. Tampere University of Technology. Tampere. 235 p. + app. 65 p.

Nurmikolu A. & Kolisoja P. (2001). XPS-routalevyeristeet ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/2001. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki. 97 s. + liitt. 17 s.

Nurmikolu A. & Kolisoja P. (2002). Ratarakenteen routasuojaus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2002. Ratahallintokeskus, Kunnossapitoyksikkö. Helsinki. 101 s. + liitt. 14 s.

Oulun kaupunki (2017). Katurakenteiden suunnitteluohje. 37 s. + liitt. 22 s. Saatavissa (viitattu 13.11.2017): https://www.ouka.fi/documents/64248/17062568/Oulun+kaupunki_Sunnitteluohje.pdf/55f8f719-9623-488b-a623-83965ab42778

Oulun yliopisto (2012). Sähköiset ja sähkömagneettiset menetelmät. Verkkosivu. Päivitetty 7.2.2012. Saatavissa (viitattu 26.1.2018): <http://www.oulu.fi/fysiikka/node/520>

Paalanen T. (2017). Betonimurskeen puhtauden tunnistaminen ja mekaaniset ominaisuudet. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 72 s. + liitt. 15 s.

Pajukallio A.-M., Wahlström, M. & Alasaarela, E. (toim.) (2011). Maarakentamisen uusiomateriaalit. Ympäristökelpoisuuden osoittaminen ja tuotteistaminen. Ympäristöministeriön raportteja 11/2011. Ympäristöministeriö. Helsinki. 93 s. + liitt. 13 s.

PCM RAIL.ONE AG (2017). Rheda City Ballastless Track System. Esite. Saatavissa (viitattu 26.10.2017): https://www.railone.com/fileadmin/daten/05-presse-medien/downloads/broschueren/en/Rheda_City_EN2011_ebook.pdf

Peltokangas O., Luomala H. & Nurmikolu A. (2013). Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2013. Liikennevirasto, Rakennuttamisosasto. Helsinki. 190 s. + liitt. 12 s.

Peltokangas O. & Nurmikolu A. (2015). Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2015. Liikennevirasto, Kunnossapito-osasto. Helsinki. 132 s. + liitt. 10 s.

Pihlajamäki J. (2001). Liikennesuunnituksen laskeminen. TPPT Menetelmäkuvaus. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 - 2001. VTT, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 18 s. + liitt. 4 s.

Piironen T. (2010). Sijaintiin perustuva liikkuvan kaluston pyörän laipan voitelu. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 03/2010. Liikennevirasto, Rautatieosasto. Helsinki. 102 s. + liitt. 2 s.

Rahiala J. (1988). Maabetoni ja betonipäällysteet ... käytössä maailmalla, sopivatko Suomeen? Betonitieprojekti. TVH 723867. Rakennusteollisuusyhdistys, Tie- ja vesirakennushallitus. Helsinki. 275 s.

Raide-Jokeri (2015). Hankesuunnitelma. 82 s. + liitt. 5 s. Saatavissa: raidejokeri.info/wp-content/uploads/2016/01/hankesuunnitelma.pdf

Raide-Jokeri (2016). HKL:lle oikeus tilata Transtech Oy:ltä Raide-Jokerin raitiovaunut. Tiedote. Julkaistu 1.11.2016. Saatavissa (viitattu 26.10.2017): <http://raidejokeri.info/?p=690>

Raitiotieallianssi (2016a). Tampereen raitiotien suunnitteluperusteet. 91 s. + liitt. Saatavissa: <http://tampere.cloudnc.fi/download/noname/%7B5541dd98-40fc-477e-9616-b042b20d9ce0%7D/144390>

Raitiotieallianssi (2016b). Tampereen raitiotien toteutussuunnitelma. 80 s. Saatavissa: https://www.tampere.fi/tiedostot/t/xOxdPt2ot/Raitiotieallianssi_toteutussuunnitelma_osa1_20160905.pdf.

Raitiotieallianssi (2017a). Kuvapankki. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.10.2017): <http://raitiotieallianssi.fi/tietoa/kuvapankki/>

Raitiotieallianssi (2017b). Raitiotiehankkeen alusrakenneohje, Kiintoraiteen alusrakenne. Versio 2.0. 13.6.2017.

Raitiotieallianssi (2017c). Raitiotiehankkeen alusrakenneohje, Sepeliraiteen alusrakenne. Versio 3.0. 21.12.2017.

Rakennustieto (2017). InfraRYL 2017 Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. 20000 Päällyys- ja pintarakenteet. 413 s.

Ramboll Finland Oy (2014). Betonimurskeen kenttä- ja laboratoriotutkimukset. Raportti 24.10.2014. 16 s. + liitt. 23 s.

Ramboll Finland Oy (2017). Betoroc koerakenteiden seurantamittaukset 2017. Raportti. 11 s. + liitt. 6 s.

Rantala T., Kerokoski O. & Nurmikolu A. (2013). Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismi. Kirjallisuusselvitys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 36/2013. Liikennevirasto, Infra- ja ympäristöosasto. Helsinki. 156 s. + liitt. 13 s.

Ratahallintokeskus (2002). Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), osa 11, radan päällysrakenne. Ratahallintokeskus. Helsinki. 87 s. + liitt. 26 s.

Ratahallintokeskus (2008). Kehäradan kiintoraideselvitys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 17/2008. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2008. 92 s. + liitt. 31 s.

Ravindrarajah R. & Tam C. T. (2005). Properties of Concrete made with Crushed Concrete as Coarse Aggregate, Magazine of Concrete Research – 37(130). pp. 29–38.

Richardson B. J. E. & Jordan D. O. (1994). Use of Recycled Concrete as a Road Pavement Material within Australia. Proceedings 17th ARRB Conference, Part 3. pp. 213–228.

Rossi M. (2013). Mineraalisen rakennusjätteen hyötykäyttö maarakentamisessa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Ympäristötekniikan koulutusohjelma. 87 s. + liitt. 83 s.

Rudus Oy (2017). Betoroc-murskeohje 1/2017. Käyttöohje rakentamiseen ja suunnitteluun. Saatavissa (viitattu 26.2.2018): <http://www.rudus.fi/Download/24032/Betoroc-murske%20ohje.pdf>.

Rämö P. (1999). Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen korroosioselvitys. Teknologiatiedekeskus 71/99. Tekes. Helsinki. 18 s. + liitt. 6 s.

Saarinen S. (2014). Betoni kiertää purkurakenteesta rakennusmateriaaliksi. Betoni 4/2014. s. 48–51.

Saarinen S. (2015). Kiertotalous toimii betonirakentamisessa. Betoni 3/2015. s. 42–47.

Sandvik Mining and Construction Oy (2018). Rammer Products. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.2.2018): <https://www.rammer.com/en/products/>

SCC Viatek Oy (2001). Betonimurskerakenteen aukikaivaminen. Raportti 9.11.2001. Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy Ab. 12 s. + liitt. 4 s.

SCC Viatek Oy (2002). Ekoinfra-projekti: ”Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikkörakentamisessa”. Loppuraportti 31.10.2002. 38 s. + liitt. 13 s.

Selig E. T. & Waters J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management. Thomas Telford Publications, London. 407 p.

SFS (2001) SFS 5884. Betonimurskeen maarakennuskäytön laadunhallintajärjestelmä. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki. 16 s.

SFS (2010). SFS-EN 1097-2. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Iskunkestävyyden määrittämismenetelmät. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki. 31 s.

SFS (2011). SFS-EN 1097-1:en. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval). Finnish Standards Association SFS. Helsinki. 15 p.

SFS (2014). SFS-EN 1097-9. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 9: Nastarengaskulutuskestävyyden määrittäminen. Pohjoismainen testi (kuulamylymenetelmä). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki. 13 s.

Siikanen U. (2009). Rakennusaineoppi. Rakennustieto Oy. Helsinki. 328 s.

Skoglund K. A. (2002). A Study of Some Factors in Mechanistic Railway Track Design. Eng.D. Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Faculty of Engineering and Technology, Department of Road and Railway Engineering. 160 p. + app. 37 p.

Smith S. T. (2007). A cost-benefit analysis of creosote-treated wood vs. non-treated wood materials. January 2007. p. 8.

Suomen Kuntaliitto (2000). Betonimurske kadun päällysrakenteessa 2000. Suunniteluohje, työselostus.

Suomen Kuntaliitto (2017). Kaupungit edistävät uusiomateriaalien käyttöä infrahankkeissaan. Tiedote. Saatavissa (viitattu 21.11.2017): <https://www.kuntaliitto.fi/ajankohtaista/2017/kaupungit-edistavat-uusiomateriaalien-kayttoa-infrahankkeissaan>

Suomen Raitiotiesseura ry (2017a). Helsingin raitioteiden rataverkko. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.12.2017): <http://www.raitio.org/ratikat/helsinki/radat/radat.htm>

Suomen Raitiotiesseura ry (2017b). Raitioliikennesanasto. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.9.2017): <http://www.raitio.org/ratikat/sanasto/sanasto.htm>

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (2000). RIL 132-2000 Talonrakennuksen maarakenteet – Yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. Helsinki. 123 s.

Suomen Pankin rahamuseo (2017). Rahanarvolaskuri. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.11.2017): <http://apps.rahamuseo.fi/rahanarvolaskin#FIN>

Tammirinne (2002). Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus. Tiehallinnon selvityksiä 7/2002. Tiehallinto. Helsinki. 206 s.

Tampereen kaupunki (2016). Tampereen raitiotien kalustotoimittajaksi Transtech Oy. Tiedote. Julkaistu 3.10.2016. Saatavissa (viitattu 18.9.2017):

https://www.tampere.fi/tampereen-kaupunki/ajankohtaista/tiedotteet/2016/10/03102016_5.html

Tampereen teknillinen yliopisto (2014). Betonimurskeen vaikutus maassa olevien metallien korroosioon. Rakennustekniikan laitos, lausunto TRT/2306/2014. Tampere. 3 s.

Tarifa M., Zhang X., Ruiz G. & Poveda E. (2015). Full-scale fatigue tests of precast reinforced concrete slabs for railway tracks. *Engineering Structures* 100 (2015). pp. 610–621.

TCRP (2012). Track Design Handbook for Light Rail Transit, Second Edition. TCRP Report 155. Washington D.C.

Tie- ja vesirakennushallitus (1987). Tiepäällystekiviaineksien kulutuskestävyydestä ja testaamiseen soveltuvista koemenetelmistä. TVH 743952. Tie- ja vesirakennushallitus. Helsinki. 92 s. + liitt. 28 s.

Tiehallinto (2005). Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D. Tien päällysrakenteen mitoituksessa käytettävät moduulit ja kestävyysmallit. Tiehallinto, Tie- ja geotekniikka. 13 s. Saatavissa (viitattu 16.11.2017): <https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/tts71d.pdf>

Tiehallinto (2007a). Päällysrakenteen stabilointi. 19.12.2007. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Tiehallinto, Tekniset palvelut. Helsinki. 53 s. + liitt. 14 s.

Tiehallinto (2007b). Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut. Helsinki. 80 s.

Tiehallinto (2009). Nopeusrajoitukset. 16.12.2009. Suunnitteluvaihteen ohjaus. Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut. Helsinki. 56 s. + liitt. 18 s.

Tielaitos (2000). Betonimurskeen käyttö tien päällysrakennekerroksissa. Mitoitus- ja työohjeet. Tielaitoksen selvityksiä 5/2000. Tielaitos, Tie- ja liikennetekniikka. Helsinki. 25 s. + liitt. 9 s.

Toikkarinen S. & Lilja V.-P. (2012). Kreosootin korvaaminen puuratapölkyissä. Liikenteen suunta – Liikenneviraston T&K -lehti 1/2012. s. 38–39.

Tram Power Ltd. (2017). LR55 Track. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.10.2017): <http://www.trampower.co.uk/track.html>

Transtech (2014). Helsinki's New Tram. Esite. Saatavissa (viitattu 18.9.2017): http://www.transtech.fi/media/ladattava_materiaali

Turun kaupunki (2015). Turun raitiotie, yleissuunnitelma. 132 s. + liitt. 2 s. Saatavissa (viitattu 27.11.2017): https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/raportti_turku_lowres.pdf

Vakkuri R. (2011). Purkubetoni hyödynnetään, mutta vielä yksipuolisesti. *Betoni* 2/2011. s. 46–51.

Varin P. (2007). *Betoni- ja tiilimurskeet maarakenteiden materiaaleina*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Maa- ja pohjarakenteiden laitos. Tampere. 83 s. + liitt. 8 s.

Verohallinto (2017). *Jätevero*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.11.2017): <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotuksesta/valmisteverotus/valmisteverolajit/jatevero/>

Viatek Oy (1999). *Betonimurskeen mitoitusparametrit*. Betonimurskeen ohjeistamisprojekti 1998–1999. Moniste. Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy Ab. 29 s. + liitt. 26 s.

VNa 591/2006. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Annettu Helsingissä 28.6.2006.

VNa 214/2007. Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista. Annettu Helsingissä 1.3.2007.

VNa 403/2009. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa annetun valtioneuvoston asetuksen liitteiden muuttamisesta. Annettu Helsingissä 4.6.2009.

VNa 407/2013. Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta. Annettu Helsingissä 6.6.2013.

VNa 713/2014. Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta. Annettu Helsingissä 4.9.2014.

VNa 843/2017. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Annettu Helsingissä 7.12.2017.

Vossloh Fastening Systems (2017). System W 14. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.9.2017): https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_11018.html

Vuorinen P. (2017). Miksi kierrätysbetoni ei kierrä? Pääkirjoitus. *Betoni* 4/2017. s. 7.

Vägverket (2001). *Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad – Undersökning av rosteldad kolbottenaska, slaggrus och krossad betong*. Publ 2001:34. Vägverket, Vägavdelningen. Borlänge. 60 s.

WBCSD. 2009. *The Cement Sustainability Initiative*. World Business Council for Sustainable Development. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 7.3.2018): <http://www.wbcd.org/contentwbc/download/2410/29973>.

Ydrevik K. (1999). Återvägen – Råd och vägledning för återvinning av krossad betong som ballast i gator och vägar. VTI notat 67-1999. Väg- och transportforskningsinstitutet. Linköping. 38 s. + liitt. 7 s.

Ymparisto.fi (2015). Kallion murskaaminen korvaa soranottoa. Verkkosivu (viimeisin päivitys 14.10.2015). Saatavissa (viitattu 21.11.2017): [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Ympariston_tilan_indikaattorit/Luonnonvarat/Kallion_murskaaminen_korvaa_soranottoa\(27946\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Ympariston_tilan_indikaattorit/Luonnonvarat/Kallion_murskaaminen_korvaa_soranottoa(27946))

Ympäristöministeriö (2017). Ehdotus valtioneuvoston asetukseksi eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Muistio 29.11.2017. Saatavissa (viitattu 23.1.2018): <http://valtioneuvosto.fi/delegate/file/35220>

Ympäristöministeriö (2018). Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Soveltamisohje. Versio 1.3.2018. Saatavissa (viitattu 15.3.2018): <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B5925E94C-828D-42BC-8023-BBABC7E03AFE%7D/135698>

YSL 527/2014. Ympäristönsuojelulaki. Annettu Naantalissa 27.6.2014.

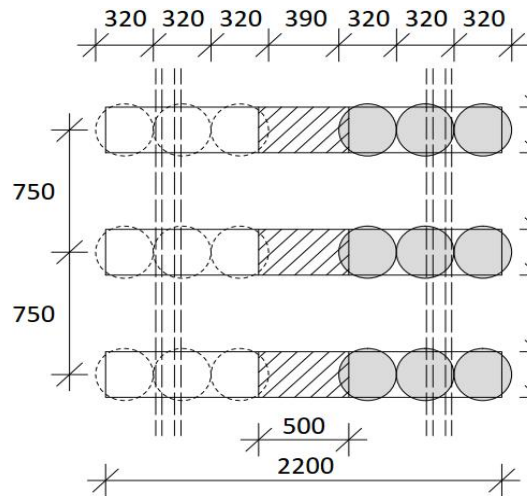
Yoshikane T. Present Status of Recycling Waste Cement Concrete in Japan. Private Cir. Taiyu Kensetsu Co Ltd. Japan.

Tarkastellaan pölkyn toista päätä
Kuormien jakautuminen 25-50-25 %

Rakennekerrokset:

Tukik. yläosa	0,2	Tukikerros
Tukikerros	0,15	yhteensä
	0,15	0,5
Välikerros	0,1	
	0,2	
Eristyskerros	0,48	EV-kerros
	0,48	yhteensä
	0,48	1,74
Yhteensä	2,24	

Akselipaino:	120 kN
Pyöräpaino:	60 kN
Kuormien jakautuminen (puolikas pölkky)	
Keskimmäinen pölkky:	30 kN
Viereiset pölkkyt:	15 kN
Pölkkyväli:	750 mm
Pölkyn pituus:	2200 mm
Pölkyn leveys:	280 mm
Mitta pölkyn keskellä, josta ei välity jännityksiä:	500 mm
Pölkyn tehollinen pinta-ala:	476000 mm ²
Tehollinen pinta-ala pölkyn toisessa päässä:	238000 mm ²
Laskentaympyrän halkaisija:	320 mm
Kolmen laskentaympyrän yhteispinta-ala:	241274 mm ²



Liikennekuorma ympyrää kohden:	
Keskimmäinen pölkky	10 kN
Viereiset pölkkyt	5 kN

Jännitys:	
	124,34 kN/m ²
	62,17 kN/m ²

Kiskon paino:	60 kg/m
Pölkyn paino:	240 kg
Kiskon ja pölkyn kuormitus ympyrää kohden:	0,54 kN

Jännitys:	
	6,71 kN/m ²

Liikenteen + rakenteen kuorma ympyrää kohden:

Keskimmäinen pölkky	10,54 kN
Viereiset pölkkyt	5,54 kN

Jännitys:	
	131,05 kN/m ²
	68,88 kN/m ²

Käytetään:	Keskimmäinen:	135,00 kN/m ²
	Viereiset:	70,00 kN/m ²

Tapaus 1

Kerros	Paksuus	E-moduuli [MPa]	Poissonin luku
Tukikerros	0,15	400	0,3
	0,15	250	0,3
Välikerros	0,1	200	0,3
	0,2	200	0,3
Eristyskerros	0,5	300 / 500 / 700	0,3
	0,5	300 / 500 / 700	0,3
	0,45	300 / 500 / 700	0,3
Pohjamaa		50	0,3

Tapaus 2

Kerros	Paksuus	E-moduuli [MPa]	Poissonin luku
Tukikerros	0,15	400	0,3
	0,15	250	0,3
Välikerros	0,1	200	0,3
	0,2	200	0,3
Eristyskerros	0,5	300 / 500 / 700	0,3
	0,5	300 / 500 / 700	0,3
	0,45	300 / 500 / 700	0,3
Pohjamaa		15	0,4

Tapaus 3

Kerros	Paksuus	E-moduuli [MPa]	Poissonin luku
Tukikerros	0,15	400	0,3
	0,15	250	0,3
Välikerros	0,1	200	0,3
	0,2	300 / 500 / 700	0,3
Eristyskerros	0,5	300 / 500 / 700	0,3
	0,5	300 / 500 / 700	0,3
	0,45	300 / 500 / 700	0,3
Pohjamaa		50	0,3

Tapaus 4

Kerros	Paksuus	E-moduuli [MPa]	Poissonin luku
Tukikerros	0,15	400	0,3
	0,15	250	0,3
Välikerros	0,1	200	0,3
	0,2	300 / 500 / 700	0,3
Eristyskerros	0,5	300 / 500 / 700	0,3
	0,5	300 / 500 / 700	0,3
	0,45	300 / 500 / 700	0,3
Pohjamaa		15	0,4

Raitiotierakenteen omasta painosta aiheutuva pystyjännitys:

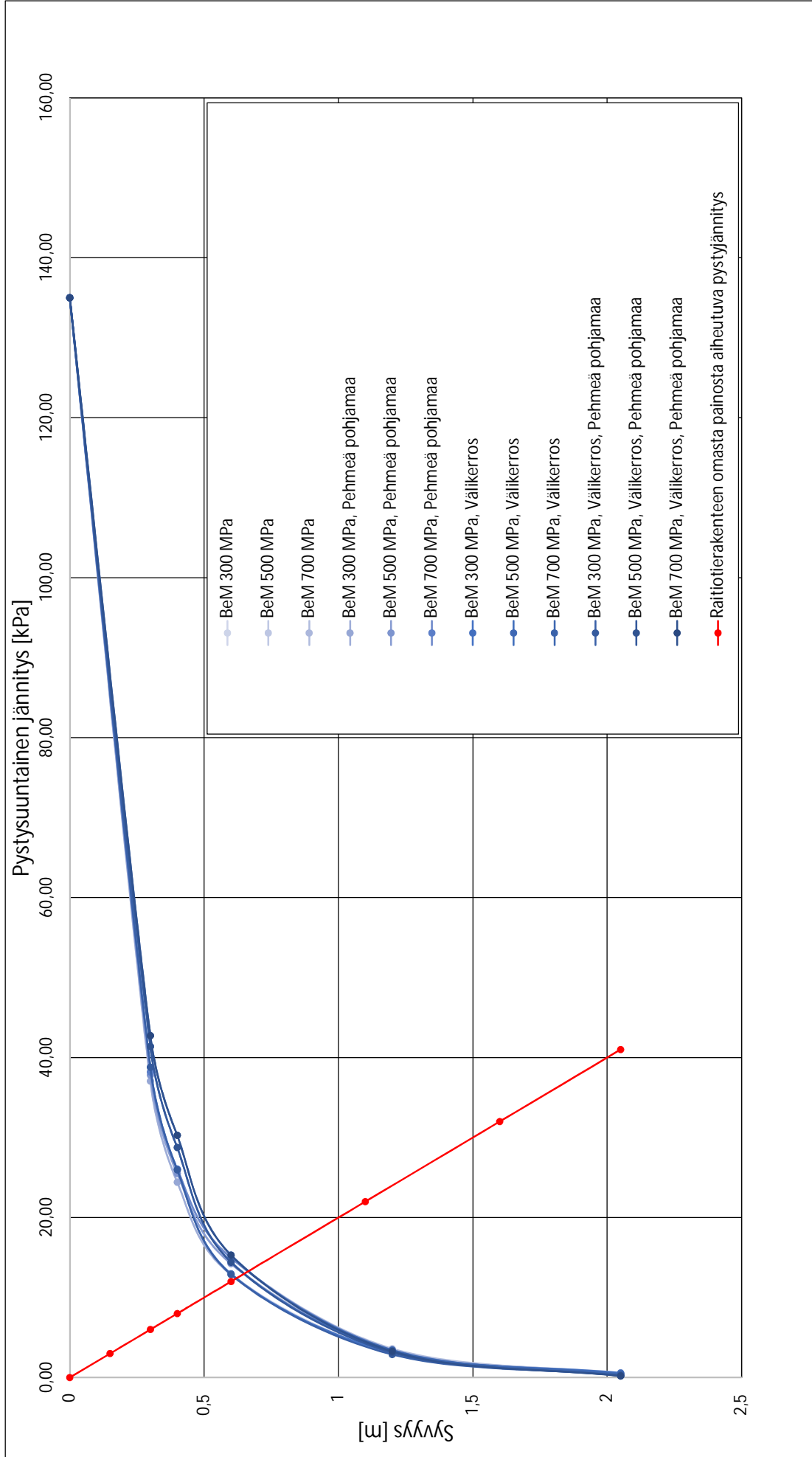
Kerros	Syvyys [m]	Kerrospaksuus [m]	Tilavuuspaino [kN/m ³]	Pystyjännitys [kPa]
Pinta	0			0
Tukikerros	0,15	0,15	20	3
	0,3	0,15	20	6
Välikerros	0,4	0,1	20	8
	0,6	0,2	20	12
Eristyskerros	1,1	0,5	20	22
	1,6	0,5	20	32
	2,05	0,45	20	41

Pystyjännitykset:

Syvyys [m]	Sijainti	Jännitys [kPa]													
		BeM eristyskerroksessa				BeM eristyskerroksessa ja välikerroksen alaosassa				BeM eristyskerroksessa ja välikerroksen alaosassa					
		Normaali pohjamaa		Pehmeä pohjamaa		Normaali pohjamaa		Pehmeä pohjamaa		Normaali pohjamaa		Pehmeä pohjamaa			
BeM 300	BeM 500	BeM 700	BeM 300	BeM 500	BeM 700	BeM 300	BeM 500	BeM 700	BeM 300	BeM 500	BeM 700	Min.	Max.		
0	Pölkyn alapinta	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135	135	
0,3	Tukikerroksen alapinta	37,08	37,83	38,21	37,05	37,81	38,20	38,82	41,39	42,74	38,79	41,38	42,73	37	43
0,4	Välikerros	24,45	25,53	26,09	24,41	25,50	26,07	25,99	28,78	30,29	25,95	28,75	30,27	24	30
0,6	Välikerroksen alapinta	12,94	14,28	15,00	12,86	14,23	14,96	12,97	14,46	15,33	12,89	14,41	15,29	13	15
1,2	Eristyskerros	3,17	3,44	3,61	2,94	3,26	3,46	3,10	3,30	3,43	2,88	3,13	3,28	3	4
2,05	Eristyskerroksen alapinta	0,60	0,50	0,43	0,29	0,23	0,20	0,59	0,47	0,40	0,28	0,22	0,18	0	1
0,3	Keskellä	37,08	37,83	38,21	37,05	37,81	38,20	38,82	41,39	42,74	38,79	41,38	42,73	37	43
0,3	Pölkyn päässä	2,89	3,00	3,06	2,87	2,99	3,05	2,63	2,46	2,37	2,61	2,44	2,36	2	3

Vetojännitykset BeM-kerroksen alapinnassa:

Syvyys [m]	Sijainti	Jännitys [kPa]													
		BeM eristyskerroksessa		BeM eristyskerroksessa ja välikerroksen alaosassa											
		Normaali pohjamaa	Pehmeä pohjamaa	Normaali pohjamaa	Pehmeä pohjamaa	Normaali pohjamaa	Pehmeä pohjamaa								
BeM 300	BeM 500	BeM 700	BeM 300	BeM 500	BeM 700	BeM 300	BeM 500	BeM 700	Min	Max					
2,05	BeM-kerroksen alapinta	1,69	2,36	2,84	2,83	3,59	4,10	1,66	2,28	2,71	2,82	3,45	3,88	1,66	4,10



Kalliomurske	Raaka-aine	Ominaisuus	Raakokko	Rakeisuus	Raemuoto	Raemuoto	Kiintoiteys	Iskunkestävyys	Kuuluskestävyys	Hienoainespitoisuus	Jäälymis-sulamiskestävyys
Ratarakenne	Standardi	Testimenetelmä	Suolonta	SFS-EN 933-1	SFS-EN 933-3	SFS-EN 933-4	Pyknometri	Los Angeles -testi	Micro-Deval -testi	SFS-EN 933-1	Vedenimeytyminen, tarvittaessa jäädytys-sulautustesti
Tuotteen	Tulos	Standardi	Nimike d/D	Rakeisuusluokka	Luokitus	Muotoarvo	Kiintoiteys	Los Angeles -luku	Micro-Deval -luku	Hienoainesluokka	Vedenimeytyminen
Ratarakenne	vaatimukset perustuvat	SFS-EN 13450	31, 5/50 tai 31,5/63	C, E tai F	S ₂₀	Ilmoitettu arvo	LA _{agg12} , LA _{agg16} tai LA _{agg20}	MDE _{agg11}	WA _{agg0,5}	B	WA _{agg0,5}
Tuotteen	SFS-EN 13242	SFS-EN 13242	0/63	InfrarYL 2017 kuva 21220:K2	21220:K2	MD ₁₅	LA ₂₅ ¹⁾	MD ₁₅	WA _{2,0} 0,5 (lajikkeesta 4/31,5 mm)	f ₂	WA _{2,0} 0,5 (lajikkeesta 4/31,5 mm)
Tuotteen	SFS-EN 13242	SFS-EN 13242	0/63	InfrarYL 2017 kuva 21220:K2	21220:K2	MD ₂₀	LA ₃₀ ²⁾	MD ₂₀	WA _{2,0} 0,5 (lajikkeesta 4/31,5 mm)	f ₂	WA _{2,0} 0,5 (lajikkeesta 4/31,5 mm)
Tuotteen	SFS-EN 13242	SFS-EN 13242	2/4	G ₀ -85-15	G ₀ -85-15	f ₂					
Tierakenne	SFS-EN 13285 (Rakeisuus), SFS-EN 13242 (Kivaines)	0/32, 0/40, 0/45, 0/56 tai 0/63	G ₀ tai G _A	G ₀ tai G _A	F ₁₅₀	Ilmoitettu arvo	LA ₃₀ ³⁾	MD ₂₅ ⁴⁾	WA _{2,1} (lajikkeesta 0,063/D), jos WA _{2,1} > 1 %, jäädytys-sulatus ≤ 4 % (SFS-EN 1367-6)	f ₇	WA _{2,1} (lajikkeesta 0,063/D), jos WA _{2,1} > 1 %, jäädytys-sulatus ≤ 4 % (SFS-EN 1367-6)
Tierakenne	SFS-EN 13285 (Rakeisuus), SFS-EN 13242 (Kivaines)	0/32, 0/40, 0/45, 0/56, 0/63, 0/80 tai 0/90 ⁵⁾	G ₀ tai G _A	G ₀ tai G _A	F ₁₅₀	Ilmoitettu arvo	Ilmoitettu arvo				WA _{2,1} (lajikkeesta 0,063/D), jos WA _{2,1} > 1 %, jäädytys-sulatus ≤ 4 % (SFS-EN 1367-6)
Betonomurske	SFS-EN 13242	0/31,5 ⁶⁾	InfrarYL 2017 kuva 21110:K1	InfrarYL 2017 kuva 21110:K1							
Tierakenne	SFS-EN 13285 (Rakeisuus), SFS-EN 13242 (Kivaines)	0/32, 0/40, 0/45, 0/56 tai 0/63	G ₀ tai G _A	G ₀ tai G _A	F ₁₅₀	Ilmoitettu arvo	Ilmoitettu arvo			f ₇	WA _{NIR} (ei soveltu betonomurskeelle)
Tierakenne	SFS-EN 13285 (Rakeisuus), SFS-EN 13242 (Kivaines)	0/32, 0/40, 0/45, 0/56, 0/63, 0/80 tai 0/90 ³⁾	G ₀ tai G _A	G ₀ tai G _A	F ₁₅₀	Ilmoitettu arvo	Ilmoitettu arvo			f ₇	WA _{NIR} (ei soveltu betonomurskeelle)

1) Hankekohtaisesti tilaaja voi hyväksyä myös luokan LA₃₀
2) Hankekohtaisesti tilaaja voi hyväksyä myös luokan LA₃₅
3) Hankekohtaisesti tilaaja voi hyväksyä myös luokat LA₃₅ ja LA₄₀
4) Tutkimuksen tarpeellisuus hankekohtainen
5) Jakavassa kerroksessa voidaan käyttää myös normaalia suurempia rakeisuuksia 0/125...0/250, jos siitä ei ole hallittavaa tyonaikaisen liikenteen hoidolle tai valmiin kerroksen laatuvaatimusten saavuttamiselle ja kerrospaksuus on riittävä
6) Mikäli suodatinkerroksen paksuus on yli 0,5 m sallitaan myös 31,5...200 mm rakeita enintään 5 paino-%