

Mikko Johannes Vilenius

# Rautatierumpujen taustaselvitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

28.04.2016

Tekijä(t) Otsikko	Mikko Vilenius Rautatierumpujen taustaselvitys
Sivumäärä Aika	76 sivua 28.04.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Infrarakentaminen
Ohjaaja(t)	Lehtori Anne Pietilä Siltaosaston osastopäällikkö DI Pertti Kaista Siltojen korjausrakentamisen osastopäällikkö DI Risto Parkkila Rautatierumpujen suunnittelun asiantuntija DI Vesa Oksanen Silta-asiantuntija TkL Sami Noponen
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Liikenneviraston toimeksiannosta ja toteutettiin Sweco Rakennustekniikka Oy:n siltaosaston alaisuudessa.</p> <p>Vanhimmat rautateillä sallitut rumpumateriaalit kantautuvat rautatierakentamisen historiassa yli sadan vuoden takaa. Kivestä valmistetut ensimmäiset rummut on rakennettu ennen 1900-lukua, betonivalmisteiset rummut vakiinnuttivat asemaansa 1900-luvun puolessa välissä ja massiiviteräs hieman ennen 2000-lukua. Rumpumateriaaleja on kehitelty nykyisten sallittujen materiaalien rinnalle ja vaihtoehtoisten materiaalien käyttöä, kuten muovia suositaan muussa rakentamisessa nykyisin laajalti. Suomen rautatieverkkoa koskevat määräykset periytyvät 1990-luvulta ja niiden päivittämistä uusia vaihtoehtoisia materiaaleja salliviksi olisi syytä selvittää.</p> <p>Työn otsikon mukaisesti tavoitteena on kartoittaa markkinoilla oleviin rumputuotteisiin liittyviä määräyksiä, ohjeita ja standardeja. Työ pohjautuu rautateitä koskeviin Liikenneviraston julkaisuihin, standardeihin, materiaalivalmistajien omiin ohjeisiin, tutkimuksiin sekä henkilöhaastatteluihin tuotevalmistajien, rakentajien ja suunnittelijoiden kanssa. Nykyisiä vaatimuksia ja määräyksiä käytettiin työn pohjana. Uusia rumpumateriaaleja koskevat materiaalitykniset ominaisuudet ja niille tehdyt tutkimukset peilattiin nykyisiin rautatieverkossa sallittujen materiaalien käyttöä koskeviin ja rakenteellisiin ominaisuuksiin.</p> <p>Rumpumateriaaleille asetetut vaatimukset eivät ole tasavertaisessa asemassa nykyisin ja rakentamisessa määräävät lähinnä toteuttamisen kustannukset. Tämän myötä materiaali valitaan rumpupaikkaan asentamisen näkökulmasta ja riittävästä käyttöikästä mitoittamisesta saatetaan tinkiä. Vaikka rakenteilla on 100 vuoden käyttöikävaatimus, niitä on jouduttu uusimaan ja korjaamaan lyhyen käyttöikänsä jälkeen.</p> <p>Insinööritöiden aihe osoittautui erittäin mielenkiintoiseksi ja avasi laajalti käsitystäni rautatierakentamisesta.</p>	
Avainsanat	Rautatierummut, betonivalurummut, betoniputket, teräsputket, aallotetut teräsputket, muoviputket, komposiittiputket

Author(s) Title	Vilenius Mikko Johannes Background report of railway drainage pipes
Number of Pages Date	76 pages 28 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil engineering
Specialisation option	Infrastructural engineering
Instructor(s)	Lecturer Anne Pietilä Department Manager (Bridge eng.) Pertti Kaista, MEng Department Manager (Bridge repair eng.) Risto Parkkila, MEng Railway sewer design specialist Vesa Oksanen, MEng Bridge specialist Sami Noponen, LicEng
<p>This thesis was commissioned by the Finnish Transport Agency Liikennevirasto and implemented under Sweco structural design Bridge Department.</p> <p>The oldest sewerage pipe material have been used for over a hundred years in history of Finnish railway building. Hand crafted stone was first material to be used from 1800's until the middle of the 1900's, when concrete sewerage pipes and bridges became familiar. Steel pipes became common sewerage material in the 1990's. Plastic, corrugated steel and composite reinforced plastic pipes have been developing aside and they have become common alternatives for concrete and steel pipe materials in road building. Finnish regulations for railway building partly lead back to 1990's so the possibility for adopting new materials in to regulations should be investigated.</p> <p>The goal of this thesis is to scan available materials in the market and regulations, brochures and standards affiliated with the products. The material for the research consists of the Finnish Transport Agency's (Liikennevirasto) publications, European standards, brochures from material manufacturers and research documents. Data was also collected by interviewing pipe manufacturers, builders and designers. Current regulations are used as a foundation in this thesis. Technical specifications and the field investigations made for the new drainage pipe products are compared to allowed materials in lifetime design and structural behavior.</p> <p>Requirements set for drainage pipes are not currently in equal position and basically expenses determine the way the sewerage pipe is built in track beds. For this reason the material is chosen for building site from the technical installation point of view affecting the sufficient lifetime expectancy. Many of the sewerage drain pipes have been replaced or repaired although they have lifetime expectancy of 100 years.</p> <p>Subject proved to be very interesting and my understanding of railway building expanded widely.</p>	
Keywords	Railway sewerage drain pipes, concrete sewer pipes, steel pipes, corrugated steep pipes, plastic pipes, composite reinforced pipes

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tausta ja tavoitteet	1
1.2	Tutkimusongelma	2
1.3	Työn rajaus	2
1.4	Tutkimusmenetelmä / tiedonhankintamenetelmät	2
1.5	Insinööriyön tilaaja	2
2	Rumputyypit	3
2.1	Yleistä	3
2.2	Rumpujen asentaminen	7
2.3	Käytössä olevat rumputyypit	10
2.3.1	Kivirummut	10
2.3.2	Betonivalurummut	12
2.3.3	Betoniputkirummut	14
2.3.4	Massiiviteräspuutkirummut	16
2.4	Muut rumpumateriaalit	19
2.4.1	Aallotettu teräsputki	19
2.4.2	Muoviputket	21
2.4.3	Komposiittiputket	24
3	Rautatierumpujen mitoitusperiaatteet	26
3.1	Hydrologinen mitoitus	26
3.2	Hydraulinen mitoitus	26
3.3	Geotekninen mitoitus	28
3.4	Rakenteellinen mitoitus	34
3.4.1	Kuormat	34
3.4.2	Yleiset periaatteet	37
3.4.3	Betonivalurummun rakenteellinen mitoitus	40
3.4.4	Betoniputket	40
3.4.5	Massiiviteräsputki	49
3.4.6	Aallotettu teräsputki	51
3.4.7	Muoviputket	52



3.4.8	Komposiittiputket	54
3.5	Käyttöikämitoitus	55
3.5.1	Yleistä	55
3.5.2	Betoniputket ja betonivalurummut	58
3.5.3	Massiiviteräs- ja aallotetut teräsputket	59
3.5.4	Muovi- ja komposiittiputket	63
4	Johtopäätökset	66
5	Kiitokset	70
	Lähteet	71

## Lyhenteet

Br	Raudoitettu B lujuusluokan putki
DN/ID	Putken sisähalkaisija
Dr	Raudoitettu D lujuusluokan putki
EK-putki	Betoniputki, jossa on esiasennettu kiintotiiviste
FEM	Elementtimenetelmä laskentatapa sovelluksessa
HDPE	Korkean tiheyden omaava polyeteeni
Kuivatus	Tarkoittaa veden johtamista pois rakenteesta
PE	Polyeteeni muoviseos
pH	Happamuusluku (potenz $H^+$ )
Poraus	Putken sujuttaminen maaperään poraamalla
PP	Polypropeeni muoviseos
Ratasilta	Luonnonesteen ylittävä junasilta
Rautatiesilta	Kaikki junasillat
Rengasjäykkyys	Putken kyky sietää säteen suuntaista kuormitusta [ $kN/m^2$ ]
Ratapenger	Koostuu radan rakennekerroksista ja maa-ainestäytteestä
Sujutus	Putken asentaminen vanhan rummun sisään
Tunkkaus	Putken työntämistä hydraulisesti maaperässä

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta ja tavoitteet

Rautatierummuksi määritellään rautatien alapuolinen, korkeintaan 2000 mm halkaisijaltaan radan suuntaa vasten poikittain oleva putkimainen rakenne. Vedenjakajaksi asetettu 2000 mm:n raja jakaa rummut ja sillat omiksi rakennetyypeikseen. Molemmat rakennetyypit luokitellaan erityistä huomiota suunnittelussa, rakentamisvaiheessa ja jatkuvaa tarkkailua vaativiksi taitorakenteiksi. Tyypillisesti rumpu on osa radan kuivatusrakennetta ja sen tehtävänä on johtaa vesioma ratapenkereen läpi. Rakennusmateriaaleina rautatierummuiksi sallitaan ainoastaan kivi, sileä teräs- sekä betoniputki ja betonivaluna toteutettu rumpu. Halkaisijaltaan yli 2000 mm luokiteltujen ratasilltojen rakennusmateriaalina sallitaan lueteltujen rumpumateriaalien lisäksi aallotetusta teräsputkesta valmistetut sillat, joita kutsutaan putkisilloiksi. Rataverkossa ei sallita aallotetusta teräsputkesta valmistettuja rumpuja, eikä muovista tai muovikomposiitista valmistettuja rumpuja ja siltoja. Kivirumpuja ei kustannussyistä enää rakenneta.

Tämän insinööritoimiston tavoitteena on selvittää nykyisten rumpumateriaalien rinnalle vaihtoehtoisten materiaalien kestävyys rakenteellisesti ja käyttöikänsä, sekä selvittää mitoituksellisia eroavaisuuksia niiden välillä. Työn osioissa on huomioitu nykyisellään sallittujen rumpumateriaalien lisäksi markkinoilla saatavilla olevia tierummuiksi ja silloiksi soveltuvia materiaaleja, jotka ovat muovi-, komposiitti- ja aallotettu teräsputki. Työhön on kerätty aineistoa kirjallisuudesta, tutkimuksista, viranomaisilta, materiaali-valmistajilta, suunnittelijoilta ja urakoitsijoilta. Pyrkimyksenä on tuoda esiin rumpumateriaalien ominaisuuksien välillä olevia vaihteluja ja niitä hyödyntämällä löytää tasavertainen kilpailutilanne valinnassa. Työn on tarkoitus nostaa esiin ristiriitoja voimassa olevien määräysten ja säädösten välillä, sekä selvittää rakentamiseen liittyvää käsitteistöä.

Työn luvussa 2 käydään läpi yleistä tietoa materiaaleista. Luvussa 3 käydään läpi rakenteellisia- ja käyttöikämitoituspäätöksiä. Lisäksi selvennetään hydrologista, hydraulista ja geoteknistä mitoittamista rummulle, sekä esitetään rautateillä vaikuttavat junakuormat. Luvussa 4 esitetään johtopäätöksiä ja kehitysehdotuksia.

## 1.2 Tutkimusongelma

Rautatierummuille ei tällä hetkellä ole olemassa yhtenäistä suunnitteluohjetta. Suunnittelu ja toteutus nojaa nykyisellään lähinnä InfraRYL:iin, Rumpujen korjausohje RUM-KO:n, eurokoodeihin ja Liikenneviraston julkaisemaan sillanrakennuksen ohjeistukseen betoni- ja teräsputkisiltojen osalta. Materiaalien kehittyessä tulisi rakentamisen määräysten olla ajan tasalla, jotta uudet markkinoilla olevat materiaalit voitaisiin sallia rakentamisessa ja niille voitaisiin sallia tasavertainen lähtöasetelma.

## 1.3 Työn rajaus

Tämän työn sisällön ulkopuolelle jää rumpujen korjausrakentaminen ja siihen liittyvät vaihtelevat toimenpiteet sekä materiaalivaihtoehdot. Työssä ei myöskään käsitellä radan alle tehtäviä alitusrakenteita, kuten kaasu-, vesi- ja sähköputkia sekä niiden asentamista ja materiaaleja. Rautatien salaojittaminen jää myös työn ulkopuolelle.

## 1.4 Tutkimusmenetelmä / tiedonhankintamenetelmät

Työ on luonteeltaan aineistolähtöinen tapaustutkimus. Työn sisältö pohjautuu rautateitä ja rumpuja koskevaan kirjallisuuteen, rakentamismääräyksiin, säädöksiin, standardeihin, ohjeisiin, tutkimuksiin ja henkilöhaastatteluihin.

## 1.5 Insinööritöiden tilaaja

Insinööritöiden tilaajana on Liikenneviraston taitorakenteiden yksikkö. Liikenneviraston yhteyshenkilönä ja työn ohjaajana silta-asiantuntija DI Sami Noponen.

## 2 Rumputyypit

### 2.1 Yleistä

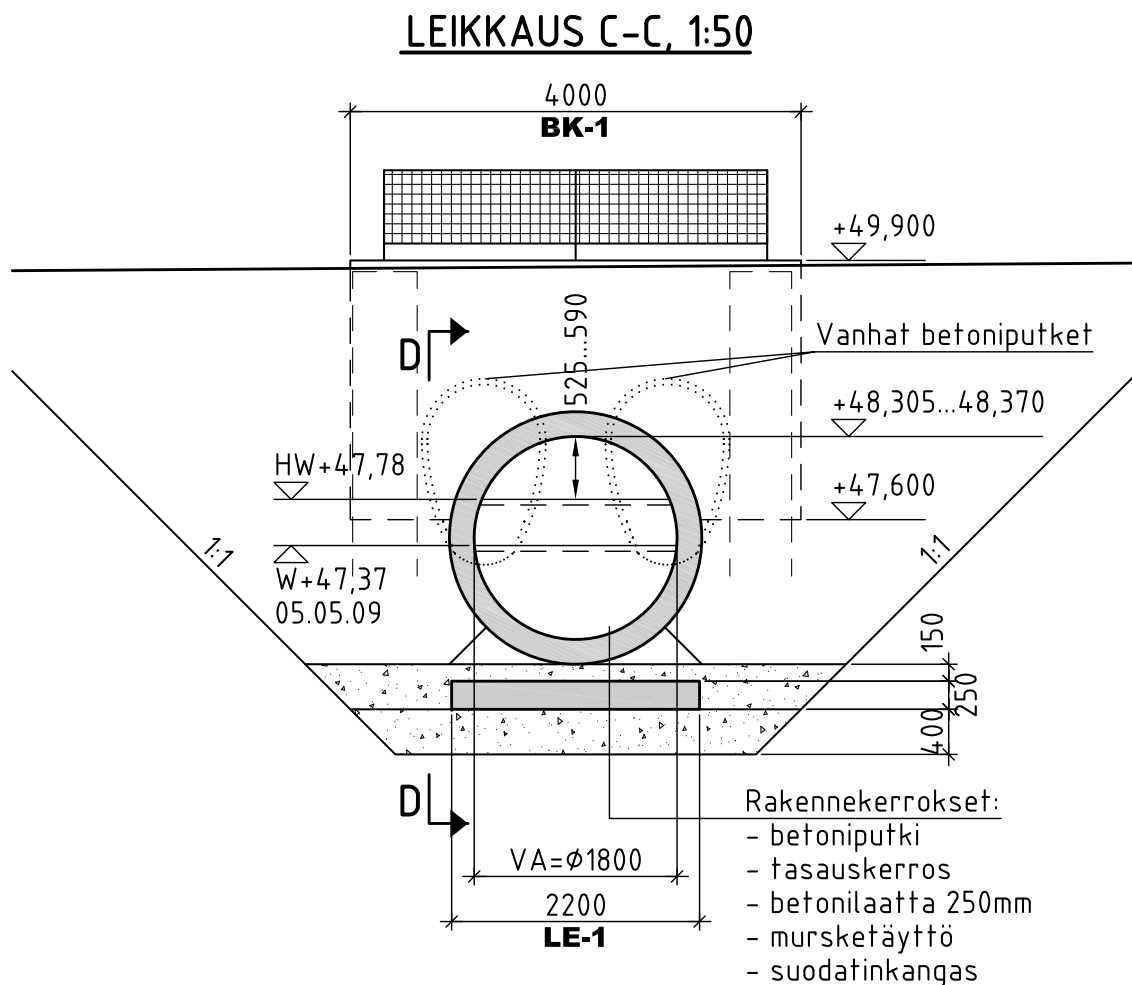
Rautatierummut ovat huomaamattomia ja silmin lähes näkymättömiä rakenteita rata-verkossamme, mutta silti niin merkittäviä radan ylläpidon ja rakenteiden kestävyyskannalta. Rautatierummut ovat osa radan kuivatusjärjestelmää ja niiden tehtävänä on johtaa vesiuomat, sekä valuma-, sade- ja sulamisvedet ratapenkereen läpi hallitusti niin, että penkere itsessään pysyy lähes muuttumattomassa tilassa. Suurin osa rummuista on rakennettu radan rakentamisen yhteydessä uusina rakenteina, mutta rata-verkossamme on myös lukuisia jälkeenkäynnin rakennettuja rumpuja, sekä vanhojen rumpujen vikaantumisen myötä korjattuja rumpuja. Rataverkon vanhimmat rautatierummut ovat vähintään yhtä vanhoja rakenteita kuin itse rata. Ensimmäiset rummut valmistettiin kivistä ja ne toimivat edelleen osana radan kuivatusta. Niiden osuus on noin neljännes kaikista rataverkossa olevista rummuista. Nojaten 1900-luvun alun rakennustekniseen kirjallisuuteen voidaan olettaa, että rumpumateriaalina on käytetty myös puuta. Puusta valmistettuja rumpuja ei enää rataverkossa ole [74].

Järjestyksessä ensimmäinen Suomeen rakennettu rautatie rakennettiin vuonna 1836 Taipaleen kanavan rakennustyömaalle Varkauteen [79]. Iältään vanhin henkilöliikenteelle avattu rata on Helsingistä Hämeenlinnaan vievä rataosuus joka rakennettiin vuosina 1858-1862 [32]. Muita keskeisiä rataosuuksia ovat vuosina 1869-1870 rakennettu Riihimäki-Pietari, Hyvinkää-Hanko (v.1873), Kerava-Porvoo (v.1874), Hämeenlinna-Tampere (v.1876), Turku-Toijala (v.1876), Tampere-Vaasa (v.1883), Simola-Lappeenranta (v.1885), Seinäjoki-Oulu (v.1886), Pännäinen-Pietarsaari (v.1887), Savon rata välillä Kouvola-Kuopio (v.1889), Suonenjoki-lisvesi (v.1889), Kouvola-Kotka (v.1890), Kouvola-Kuusankoski (v.1892), Viipuri-Imatra (v.1892), Antrea-Sortavala (v.1893) ja Sortavala-Joensuu (v.1894). Rautateitä on sittemmin laajennettu ja jatkettu kattamaan Suomea henkilöliikenteen ja teollisuuden tarpeisiin [82].

Rummun suunnittelun lähtökohtana on, että se ei rakentamisen aikana, ja sen jälkeen saa aiheuttaa ympäröivään luonnontilaan muutoksia. Suunnittelussa lähdetään aina liikkeelle ympäristön- ja radan kuivanapidosta.

Uuden rautatierummun sisähalkaisijaksi vaaditaan minimissään 800 mm InfraRYL:in kappaleen 14341 mukaan [31]. Ympäristöviranomaisen ohjeen mukaan ilmastonmuutoksesta johtuvasta tulvimisesta uusien ratarumpujen minimikokona olisi suositeltavaa käyttää sisämitaltaan minimissään 1000 mm putkea, etenkin Pohjanmaan alueella rataverkossa [44][71][20].

Rummun halkaisijan mitoituksessa tulisi aina huomioida rummun käyttöikä. Aukon tulisi olla riittävän suuri hydrologisille muutoksille vesiuomassa ja rakenteellisen käyttöiän näkökulmasta korjausteknisesti, jotta sen seinämät olisi mahdollista tarpeen tullen korjata sisäpuolelta. Vaihtoehtoisesti riittävä aukkomitta mahdollistaisi uuden putken sujutamisen nykyisen rummun sisään. Uudelle rummulle asetettu minimivaatimus perustuukin pitkälti kokemusperäiseen tietoon, koska aikoinaan pienellä aukolla rakennetut rummut saattoivat menettää kykynsä toimia kuivatusrakenteessa tukkeutumisen tai penkereen painumisesta seuranneiden rakenteellisten muodonmuutosten vuoksi. Tämän vuoksi aukkomitaltaan pieniä rumpuja on jouduttu uusimaan kokonaan, mikä on taloudellisesti ratarakenteilta odotetun käyttöiän näkökulmasta huono asia.

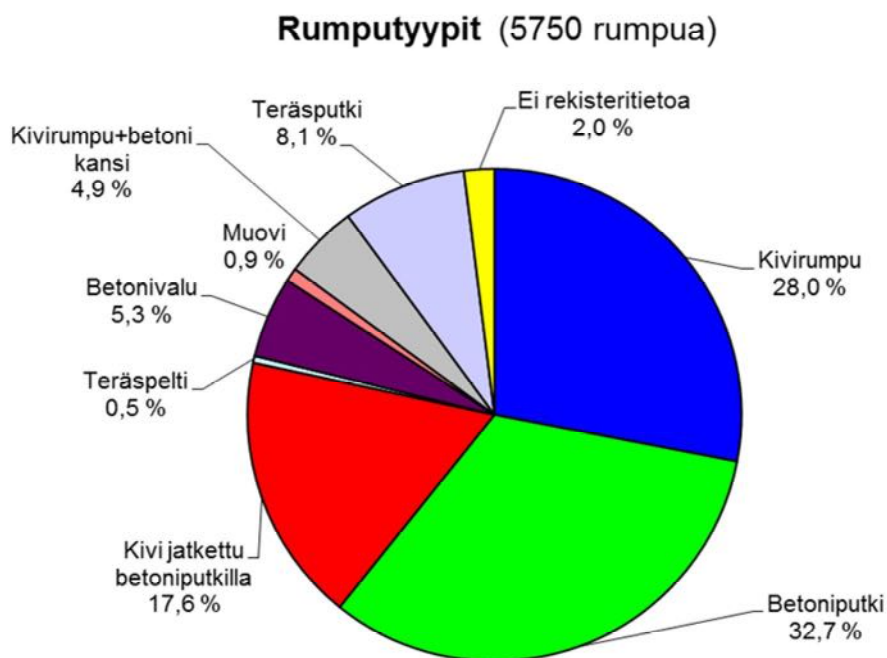


Kuva 1. Yleis- ja mittapiirustuksen poikkileikkaus Rummusta 273+485 Lappeenranta. Luumäki – Vainikkala rataosuuden siltojen ja rumpujen korjaushankkeesta.

Rautatierummun pituuteen vaikuttaa ratapenkereen korkeus, rummun rakentamis- syvyys ja mahdolliset tukirakenteet, kuten esimerkiksi paalulaatat, sekä kaukaloraken- teet rakenteessa. Rumpuputkelle vaadittavasta kallistuskulmasta on tietoa hydraulisen mitoittamisen alla luvussa 3.2 ja painumiseen liittyvistä tekijöistä luvussa 3.3 geotekni- nen mitoitus.

VR Track ylläpitää erillistä rumpurekisteriä rataverkoston rautatierummuista ja niiden kunnosta. Rautatierummuista julkaistaan hallintaraportti rumpurekisterin pohjalta vuo- sittain. Rautatierummut ovat myös listattuna Liikenneviraston ylläpitämään siltarekiste-

riin, koska ne luokitellaan erityistä huomiota vaativiksi taitorakenteiksi suunnittelun, toteutuksen ja seurannan puolesta [41].



Kuva 2. Rumputyyppijakauma koko maassa 31.12.2015. Lähde: Rautatierumpujen Hallintaraportti 2015 [41]

Suomen rataverkossa on viimeisimmän rautatierumpujen hallintaraportin mukaan yhteensä 5740 rumpua. Rataverkkoon rakennetuista rummuista käytetyin materiaali on betoniputkirummut (1883 kpl) ja järjestyksessä seuraavia ovat kivirummut (1612 kpl), kivirumpu jatkettuna betoniputkilla (1012 kpl), teräsputki (467 kpl), betonivalu (306 kpl), kivirumpu+betonikansi (279 kpl), muovirumpuja (51 kpl) ja teräspeltirumpuja (26 kpl). Rekisteriin on kirjattu (114 kpl) rumpua, joista ei ole varsinaista rekisteritietoa olemassa. Ympyrädiagrammiin kirjatut muovirummut ovat kiellettyjä rakenteita lähtökohtaisesti, mutta niitä on sallittu muutamia testirakenteina rataverkkoon vähäliikenteisille radoille. Materiaalien lukumääriin on myös laskettu mukaan suojaputkirakenteet läpiviennille ja rautatierumpujen sisään jälkikäteen sujutut virtausputket. Vuoden 2015 aikana rumpurekisterin rumpumäärä on hieman kasvanut vuodesta 2014. Syynä kasvu on viimeisimmät radoille tehdyt käyttöönotot ja muutokset, kuten pääkaupunkiseudulle avatun kehäradan valmistuminen, sekä hankkeiden itse toteuttamat pienten siltojen korvaamiset rumpurakenteilla [41].



## 2.2 Rumpujen asentaminen

Uusien rautateiden kuivatus suunnitellaan rautatien suunnittelun yhteydessä, ja niiden toteuttaminen tapahtuu rakennettavilla radoilla pohjarakentamisen aikana. Käytössä olevilla radoilla rumpujen asennus radan alle voidaan toteuttaa aukikaivamalla, joka vaatii liikenteen keskeyttämisen kaivantotöiden ajaksi, jos työtä ei voida toteuttaa liikennöinti- ja rata-alueiden sallimissa rajoissa [26]. Jos liikennöinnin keskeyttäminen ei ole työnaikaisesti mahdollista ja kaivantotöiden toteuttaminen on mahdotonta rataliikenteen vilkkauksen vuoksi liikennöinti- ja rata-alueiden rajoissa, voidaan radalle asentaa apusilta mahdollistamaan työnaikainen liikennöinti radalla. Väliaikainen apusilta mahdollistaa kaivantotöiden tekemisen apusillan alapuolella penkereessä [26].



Kuva 3. Sillanrakennuksen asennustöiden aikainen apusilta ratapenkereessä.

Rautatierummun rakennusteknisenä haasteena on myös tarvittavien työkalujen tarvitsemien liikkuva- ja työkalujen huomioiminen radan rakenteisiin nähden. Suurimmalla osalla käytössä olevista radoista on rakenteita kuten sähköjohtimia ja portaaleja radan pengertason yläpuolella. Huomioitava seikka toteutuksen kannalta on myös se, että

rumpujen sijainti on useimmiten rata-alueilla, joissa ei ole mahdollisuutta kuljettaa rakentamismateriaaleja ja työn toteuttamiseen tarvittavia koneita tieteitse, vaan ne on kuljetettava radan huoltokaluston avulla rakentamispaikalle [26].

Rumpu on mahdollista aukikaivamisen lisäksi porata tai tunkata ratapenkereen läpi. Tämä edellyttää materiaalilta lujuusominaisuutta kestää työvaiheesta koituvia vaakasuuntaisia voimia. Tunkkaamalla ja poraamalla on ainoastaan mahdollista toteuttaa työssä luetelluista materiaaleista komposiittilujitetut muovi- ja sileäpintaiset teräsputkirummut. Molemmissa menetelmissä putki asennetaan ratapenkereeseen kaivamatta, jolloin se on kustannuksellisesti ja ajankäytöllisesti edullista hankkeelle. Poraamisen ja tunkkaamisen etuna rakennusteknisesti aukikaivamiseen nähden on se, että se ei häiritse rataliikennettä työnaikaisesti. Porausmenetelmällä voidaan toteuttaa läpivientejä halkaisijaltaan sallituille 800 mm - 1200 mm putkille ja tunkkausmenetelmällä päästään 800 mm - 2000 mm ja sen ylitse. Alituskaluston sallimat aukkokoot läpivienneissä vaihtelevat urakoitsijoittain [22][25].

Porausmenetelmässä sujutettavan putken suulla on terä, joka tunkeutuu maa-aineksessa poraten putkelle sopivan aukon edeltä. Porauksen aikana maa-aines tyhjäntyy pois putkesta. Poraus on tunkkausmenetelmää käytetympää, koska se ei ole kriittinen maa-aineksen lujuudelle ja epähomogeenisuudelle. Porauskalustolla voidaan läpäistä lohkareita ja kalliota ratapenkereessä ja sitä suositaan etenkin, kun penkereen täyttömateriaalia ei tiedetä. Poraamista käytetään myös menetelmänä rumpujen korjausrakentamisessa, jos nykyinen rumpu on tarve uusaa aukikaivamatta. Esimerkiksi valamalla nykyinen kivrumpu betonilla ja poraamalla sileä massiiviteräsputki vanhan rummun sisään betonoinnin lujittumisen jälkeen. Menetelmä tunnetaan myös nimellä vasaraporaus, iskuporaus ja uppovasaraporaus [22][25].

Tunkkaaminen tarkoittaa putken työntämistä maa-aineksen läpi hydraulisesti tai juttaamalla. Tunkkaamisessa maa-aines jää putken sisään ja se sopii rakennusteknisesti menetelmänä ainoastaan pehmeisiin maalajeihin. Tunkkaamista käytetään rumpujen korjausrakentamisessa, jos nykyinen rumpuputki on tarve korvata suurempiaukkoisella putkella, esimerkiksi sujuttamalla sileä teräsrumputki aallotetun teräsputkirummun ulkopuolelle. Tunkkausta käytetään porausmenetelmää vähemmän, johtuen tunkkauksen aikana tapahtuvista mahdollisista muodonmuutoksista ratapenkereessä tilanteessa. Tunkkaaminen tuntemattomassa täyttömateriaalissa voi aiheuttaa äärimmäisessä

tapauksessa muutoksia radan geometriaan, jos tunkattava putki työntää väkisin edellään alusrakennemateriaalia mm. lohkareita ja aiheuttaa liikehdintää ratapenkereessä. On myös mahdollista, että putken suunniteltu suunta muuttuu maa-aineksen ohjaamana työnaikaisesti ja aiheuttaa muodonmuutoksia rummulle. Menetelmä tunnetaan myös nimellä työntöporaus ja teräsputkijunttaus [26][20].

Rumpu asennetaan aina niin, ettei rummun pohjan korkeus ylitä uoman pohjan tasausviivan korkeutta. Rummun uusimisesta nykyisen paikalle ratapenkereeseen ohjeistetaan Rumpujen korjausohjeen RUMKO:n kappaleessa 4.2 [45]. Pohjarakentamisesta ja ympäristäytöistä esitetään vaatimukset InfraRYL luvussa 14340.2 Rumpujen alusta, sekä viitteet rumpumateriaalikohtaisiin täyttöihin luvun 14340 alle jaoteltujen rumpumateriaalikappaleiden alla [31].

## 2.3 Käytössä olevat rumputyypit

### 2.3.1 Kivirummut



Kuva 4. Valokuva kivirummun sisältä.

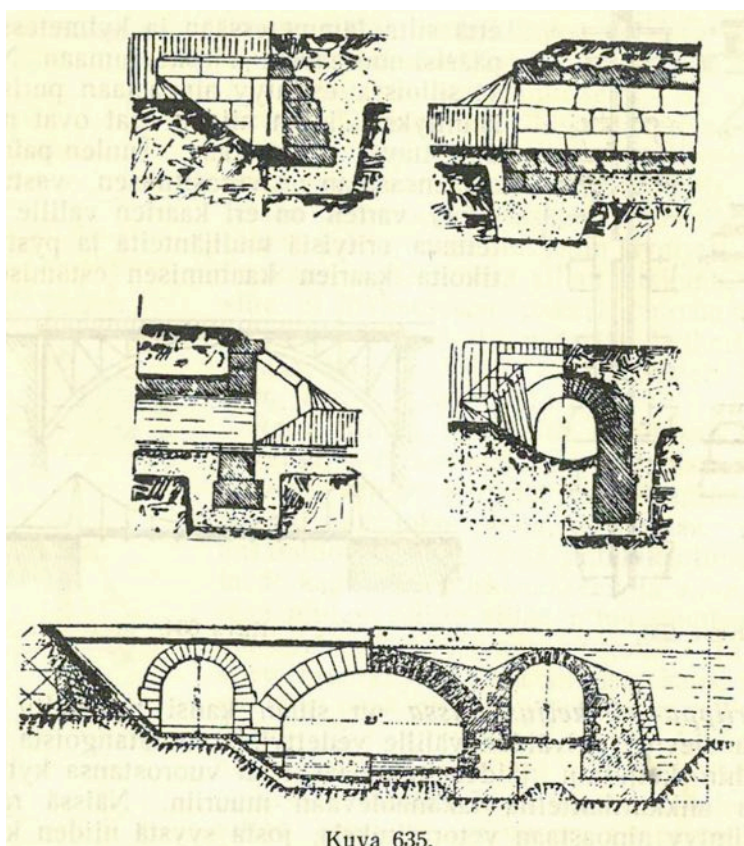
Ensimmäinen raaka-aine, jota käytettiin rumpumateriaalina oli latomalla tai holvaamalla työstetty rakennuspaikkaan sopiva kivi. Kivirummun kansimateriaalina saatettiin myös poikkeustapauksessa käyttää betonia ja hyödyntää ratakiskoja tai I-rautoja rakennusaineena seassa. Entisaikaan rautatierumpuja ei mitoitettu rakennelaskelmien ja paikka-kohtaisten suunnitelmien kautta, vaan ne tehtiin pitkälti kokemuseräisesti ajan saatossa hyviksi todetuin menetelmin [75].

Sillanrakennuksen oppikirjassa vuodelta 1932 ohjeistetaan 1 m rautatierummun kansi-kiven paksuudeksi 0,6 m. Kirjan mukaan 1 metrin aukkokoko määräsi oliko kyseessä rumpu vai silta. Jos yksiaukkoinen rumpuaukko ei ollut riittävä, neuvottiin tekemään 2- tai useampiaukkoinen, jolloin välipilari oli 1,0 m. Rautatierummun pohja on 10 – 20 cm ojan pohjaa alempana pohjan syöpyymisen ja routimisen estämiseksi. Aukon sivut ohjeistetaan tekemään pystysuoriksi ja muuri talttasaumoilla, käyttäen hyvää sammalta saumojen tukkimiseen etenkin muurin maanpuoleisella puolella. Suukiviksi ohjeistetaan



valitsemaan kauneimmat kivet ja saumojen teossa käyttämään apuna piikkiäkin. Rummuissa, jos kiven saanti on huono, ohjeistetaan tekemään rautabetonilaatta kanneksi [70].

Rautatierumpujen rakentaminen kivistä kuitenkin hiipui 1950-luvulla, kun teräksen ja betonin yleistyminen rakentamisessa syrjäytti vanhakantaisen rumpujen rakentamisen kivistä. Kivirummuista ja niiden rakentamisesta ohjeistetaan viimeisen kerran Tekniikan käsikirjassa vuodelta 1952 [42].



Kuva 635.

Kuva 5. Havainnollistavia piirroksia kivisillan rakentamisen suunnitteluohjeistuksen tueksi. (Lähde: Teknillinen Käsikirja 1914 [74])

Rataverkossamme on kuitenkin edelleen käytössä olevia kivirumpuja, joista vanhimmat ovat rataosuuden rakentamisen ajalta. Ajan saatossa rumpuja on korjattu muun muassa sujuuttamalla uusi putki kivirummun sisään, johtuen painumista ja liikehdinnästä ratapenkereessä. Monet taidolla, kokemuksella ja asiantuntemuksella rakennetut kivirummut ovat säilyneet pitkästä iästään huolimatta ratapenkereessä ja ne toimivat edelleen moitteitta osana radan kuivanapitojärjestelmää. Tällaisissa tapauksissa usein kivirum-

pua on jatkettu joko asentamalla betoniputki tai valamalla betonista jatko-osa nykyisen rummun päätyihin. Myös teräsponttiseiniä on lyöty rummun jatkeeksi, jotta radan pengerkorkeutta on päästy kasvattamaan. Valamalla voidaan tehdä myös katto, mutta jatkos ei kestä junakuormia, vaan ainoastaan luiskamassojen massat. Huonokuntoisia kivirumpuja löytyy enää lähinnä vähäliikenteisiltä radoilta, kuten vuosina 1871-1873 rakennetulta Hyvinkää-Karjaa radalta, joka on nykyisin ainoastaan tavaraliikenteen käytössä vähentyneen henkilöliikennetarpeen vuoksi. Pääradoilla olevat kivirummut on yleensä korjattu, jatkettu tai uusittu kokonaan [27].

### 2.3.2 Betonivalurummut



Kuva 6. Kaksiaukkoinen betonivalurumpu.

Suomen uudelleenrakentaminen ja kaupungistuminen toisen maailmasodan jälkeen vauhditti betoni- sekä terästeollisuutta. Betonivalmisteisten rumpujen ja siltojen käyttö rautatierakentamisessa yleistyi 1900-luvun puolessa välissä syrjäyttäen materiaalina

kiven. Betonin käyttöä puolsi sen muovattavuus ja materiaalin siirrettävyys logistisesti verrattuna kiveen.

Betonivalurumpu on paikalla valettava pieni siltamainen betonikehärakenne. Betonivalurumpuja on rakennettu 1950-luvulta saakka aina tähän päivään asti ja nykyisin niiden suunnittelu perustuu betonisiltojen suunnittelussa käytettäviin ohjeisiin sekä määräyksiin. Betonista valmistettavien siltojen suunnittelu tapahtuu eurokoodeilla, sisältäen Suomen kansallisen liitteen, lisäksi suunnittelussa noudatetaan Liikenneviraston NCCI-sarjan ohjeita. Betonivalurumuissa käytetään nykyisin siltabetonia, jonka pakkasen- ja kloridinkestävyys määritellään rakennettavalle rummulle hankekohtaisesti Liikenneviraston NCCI 2-ohjeen mukaan [12].

Betonivalurumpujen suunnittelu on muihin rumpuratkaisuihin nähden työläämpää ja sen valitsemisen edut tulevat esiin vasta, jos on tarve toteuttaa rumpu normaalia alhaisemmalla peitesyvyydellä tai useammalla aukolla. Betonivalurummun rakentamista suositetaan vasta, jos vaadittava vapaa-aukko uomalle on yli 1,30 m. Yli 2 m betonikehärakenteet luokitellaan silloiksi. Betonivalurummun toteuttaminen on myös muihin vaihtoehtoihin nähden työläämpi ja kokonaisuutena kallista [20]. Betonivalurumpu vaatii muihin rumpumateriaaleihin nähden perusteellisemmat pohjarakenteet sen rakenne-painon vuoksi.

Materiaaliominaisuudeltaan betoni luokitellaan epähomogeeniseksi aineeksi. Betoni-seos sisältää itse runkoaineen, sementin, veden sekä mahdollisia lisäaineita. Runkoa-ineena käytettävän kiven raekoolla ja sen määrällä seoksessa voidaan vaikuttaa raken-teen ominaisuuksiin. Sementin ja veden yhteisvaikutus tuottaa kemiallisen reaktion joka aiheuttaa betonin kovettumisen. Betoniin voidaan lisätä lisä- ja seosaineita. Lisä-aineilla voidaan betonissa vaikuttaa sen eri ominaisuuksiin kuten notkeuteen, kovettu-miseen ja pakkasenkestävyyteen. Seosaineilla voidaan puolestaan vaikuttaa työstettä-vyyteen, koossapysyvyyteen ja lujuuteen. Raaka-aineiltaan hyvin suhteitettu betoni-seos jatkaa lujittumistaan vielä vuosienkin jälkeen valmistuksesta. Betonilla on korkea puristuslujuus joten se kestää paljon kuormitusta, mutta heikosti vetoa. Betonissa käy-tetäänkin raudoitusteräksiä ottamaan vastaan rakenteelle kohdistuvaa vetoa ja täten luomaan kestävyyttä sekä sitkeyttä murtumista vastaan.

### 2.3.3 Betoniputkirummut



Kuva 7. Iäkäs betoniputkirumpu sisältä.

Tarve rakennusmateriaaleille kiihdytti sarjavalmistettien elementtien ja putkien valmistusta 1900-luvun puolessa välissä. Ensimmäinen betoniputkien tuotantoa koskeva määräys Betoniputkinormit ilmestyi vuonna 1957 ja betoniputkia on käytetty rautateillä sittemmin. Betoniputkinormeja on julkaistu vuosina 1957, 1962, 1971, 1973, 1982, 1990, 1995 ja 2001 [3]. EU:n myötä virallinen tuotestandardi vahvistettiin 19.5.2003. Vuonna 1.7.2013 astui voimaan rakennustuoteasetus, joka kielsi kansallisten tuotehyväksymisten käytön mukaan lukien Betoniputkinormit ja vaati CE-merkitsemään tuotteet, joille on olemassa harmonisoitu tuotestandardi. Alkuperäisen betoniputkia koskevan tuotestandardin laadinnasta vastanneen CEN:in jäsenjärjestöjen keskuudessa ei kuitenkaan päästy yksimielisyyteen sen kattavuudesta määräyksien ja ohjeistuksien osalta silloiseen voimassa olleeseen Betoninormit 2001 -ohjeeseen nähden, ja 13.10.2014 vahvistettiin EU:n asettaman betoniputkia koskevan tuotestandardin kansalliseksi liitteeksi [52], jolla periyttiin Suomessa hyväksi todetut ja vakiintuneet käytännöt betoniputkien valmistuksessa, sekä materiaaliominaisuudet, kokoluokat ja mittaoleranssit vakiintuneissa muodoissaan [72].



	Ratarumpu	Sivuojarumpu
Materiaali	EK-järjestelmä	EK-järjestelmä
Lujuusluokka	Dr	Br, Dr
Sisähalkaisija	≥ 800 mm	≥ 600 mm
EK = esiasennettu kiintotiiviste		

Kuva 8. Betonisille rata- ja sivuojarummuille asetetut ominaisuus vaatimukset. (Lähde: Infra-RYL, Taulukko 14341:T1 [31])



Kuva 9. Betoniputkien asentaminen ratapenkereeseen Seinäjoki–Oulu välisellä rataosuudella.

Betoniputkirumpujen käyttö tapahtuu pitkälti uusilla rakennettavilla rataosuuksilla. Betonirummun käyttämisen etu tulee materiaalilujuudessa, koska se sietää rakentamisesta työnaikaisia kuormia hyvin. Betoniputkirummun käyttöä rakennetuilla rataosuuksilla hankaloittaa sen asentamiseen vaadittavat toimenpiteet, kuten putkien asentamisessa liitoksien tiiveyden takaaminen ja putken asennuspohjan tasaaminen, sekä mahdollinen tarve tuennalle ratapenkereessä. Jo käytössä olevalla rataosuudella betoniputken asentaminen on mahdollista ainoastaan aukikaivamalla ratapenger ja/tai käyttämällä apusiltaa rataliikenteen esteettömän liikennöinnin takaamiseksi, jos liikennekatko ei ole mahdollista. Betoniputkesta valmistetut rummut ovat painavia ja sen vuoksi alttiita painumille maapohjassa [20].

### 2.3.4 Massiiviteräsputkirummut



Kuva 10. Massiivi teräsputkirummun tunkkausta Oulu-Seinäjoki rataosuudella.

Rautateillä rumpumateriaalina käytettävät massiiviteräsputket ovat samoja putkia mitä käytetään pohjarakentamisessa teräsputkipaaluina [43]. Sileästä teräsputkesta rakennetut rummut ovat olleet käytössä rautatieverkossa 1990-luvulta saakka [20]. Muodoltaan teräsputki on symmetrisesti pyöreä. Teräsputkirummun käyttöä rautatierumpuna puoltaa sen käsiteltävyys ja vaihtoehtoiset asennusmahdollisuudet. Teräsputkirumpu on jäykkä, yhtenäinen putki ilman liitoksia ja se voidaan asentaa joko uuden radan rakentamisen yhteydessä käytössä olevilla radoilla aukikaivamalla penger tai vaihtoehtoisesti poraamalla sekä tunkkaamalla ratapenkereen läpi. Karkeasti halkaisijaltaan 800 mm – 1200 mm sileät teräsputkirummut voidaan porata penkereen läpi ja halkaisijaltaan suuremmat putket tunkataan [22]. Ainevahvuudessa määritetään putken kestäminen maaperässä. Taulukko ainevahvuudesta halkaisijan mukaan on esitetty kapaleessa 3.4.5 [31]. Massiiviteräsputki on yleisin rautatieverkkoon asennettava materiaali [19]. Rataverkkoon on asennettu sujuttamalla kivirummun sisään profiililtaan neliön muotoinen teräskehikkoputki [19].





Kuva 11. Aukikaivamalla ratapenkereeseen toteutettu sileä teräsputkirumpu.



Kuva 12. Massiiviteräsputkirummun tunkkausta ratapenkereeseen. (Lähde: Styrud Boreal Oy)



Kuva 13. Rinnakkain tunkatut massiiviteräspankett ratapenkereessä. (Lähde: Styrud Boreal Oy)

## 2.4 Muut rumpumateriaalit

### 2.4.1 Aallotettu teräsputki



Kuva 14. Aallotettu teräsputkirumpu asennettuna radan alle teräsbetonikehän sisään.

Aallotetut teräsputket, joita kutsutaan myös nimellä kierresaumatut teräsputket ovat hyvin yleisiä rumpuputkia maanteillä. Joitakin on sujutettuina myös rautateillä. Ensimmäinen maininta teräspeltirummuista rakenteina on Teknillinen Käsikirja II -ohjeessa vuodelta 1952 ja ne ovat olleet sallittuja rakenteita tierakentamisessa sittemmin. Ennen eurokoodeihin siirtymistä rakentamisen mitoituksessa teräspeltiputkesta valmistettujen siltojen mitoitus perustui Tiehallinnon 2008 julkaisemaan suunnitteluohjeeseen Teräsputkisillat. Suomessa teräspellistä valmistettujen siltojen mitoitus eurokoodeilla ohjeistetaan ensimmäisen kerran Liikenneviraston 2.2.2012 julkaisemassa Teräsputkisillat, suunnitteluohje LO2/2012. Teräsputkisiltojen mitoitusohje on luotu ruotsalaisen KTH Royal Institute of Technology:n julkaiseman suunnitteluohjeen (Design of soil steel composite bridges, Lars Petterson, Håkan Sundquist, 2007) pohjalta [11]. Ruotsalainen suunnitteluohje on puolestaan luotu Lars Pettersonin väitöskirjaan (Full Scale Tests

and Structural Evaluation of Soil Steel Flexible Culverts with Low Height of Cover, 2007) pohjautuen. Liikennevirasto päivitti 1.3.2014 suunnitteluohjeen versioon LO10/2014 [77], joka on viimeisin versio suunnitteluohjeesta.

Aallotetusta teräsputkesta valmistettavat putket on asennettava penkereeseen auki-kaivamalla. Putken seinämä ei kestä rakenteellisesti tunkkauksesta ja poraamisesta koituvia voimia sekä rasituksia. Vaatimukseltaan teräksestä valmistetun rummun materiaalin on täytettävä standardin SFS-EN 10025-1 [62] mukaiset vaatimukset, sekä oltava lujuusluokaltaan S355J2G4 (Fe510D2) [31]. Lisäksi putken suojaksi on tehtävä sinkitys ja polyeteenipinnoittaminen korroosion ehkäisemiseksi. Putken pinta voidaan myös muovittaa. Aallotetun teräsputken pinnoituksista ja käyttöiästä enemmän luvussa 3.5.3.

Aallotettujen teräsputkirumpujen mitoittaminen tapahtuu kimmokertoimen (E) ja jäyhyysmomentin (I) avulla. InfraRYL:ssä [31] on esitetty taulukko kestävyys- ja peitesyvyysvaatimuksista rummuille tierakenteissa. Aallotetun teräsputken kantavuus perustuu sen aallotettuun profiiliin, joten sitä ei voida mitoittaa rengasjäykkyyden avulla. Rakenteellista mitoittamista käsitellään luvussa 3.4.6.



## 2.4.2 Muoviputket



Kuva 15. Muovirummun asentamisvaiheesta. (Lähde: Virtain Muovityö Oy)

Muovirummut ovat tulleet markkinoille 1970-luvulla ja ne ovat hyvinkin yleisiä tieverkossa tänä päivänä. Tällä hetkellä muovirumpuja saa Suomessa käyttää rataverkossa ainoastaan liittymärumpuina ratarummuille tai sivuojarummuissa, jolloin niihin ei kohdistu rakenteellista rasitusta radasta ja sen tuottamista kuormista. Määräys johtuu poikkeuksellisen raskaista akselikuormista rautateillä verrattuna tieliikennealueisiin. Muovirumpuja on myös sallittu sujutettavina rumpuina esimerkiksi betoni-, teräsputki- tai kivirummun sisään, jos nykyisen rummun sisään on mm. saumoista päässyt valumaan maa-ainesta penkereestä. Tällöin nykyinen rumpu jää edelleen kantavaksi rakenteeksi ja muovirummun tehtävänä on estää rummun tukkeutuminen sekä mahdollistaa estymätön virtaus vesille. Hydrauliset ja korroosio-ominaisuudet siirtyvät sisälle sujutetun putken rakenteelle [31].

Muovi materiaalina jaotellaan kolmeen ryhmään: kestopuovit, kertamuovit ja elastomeerit. Näistä rumpumateriaalina käytetty muovi on kestopuovi. Kertamuovit eivät so-

vellu rumpumateriaaliksi koska ne ovat kyvyttömiä palautumaan takaisin muovattavaan tilaan. Tällaisia ovat polyuretaanit (UP), joita käytetään pinnoitteina mm. betonirummuissa ja epoksit (EP), joita käytetään mm. siveltyinä betonisillan kannen vesieristysenä. Kestomuovit ovat puolestaan muoveja, jotka voidaan toistuvasti pehmentää muovattavaksi lämpötilan avulla. Toistuva pehmentäminen mahdollistaa muovin uudeleen muovaamisen ja hitsaamisen esimerkiksi putken saumoissa. Kestomuovi on ideaali materiaali putkelle. Kestomuoviyhdistelmiä ovat:

- Polyvinyylikloridi (PVC), jota käytetään erilaisissa putkistoissa
- Polyamidi (PA), josta valmistetaan mm. hammaspyöriä
- Polykarbonaatti (PC), josta valmistetaan iskunkestäviä koneenosia
- Polyamidi (PI), josta valmistetaan korkeaa lämpötilaa kestäviä koneenosia

Muoviputken seinämärakenne kestää hyvin ympäröivää maanpainetta maaperässä, jos se on asennettu oikein ja riittävä ympärystytön tiivistäminen on tehty. Muoviputki onkin ylivoimaisesti yleisimpänä rumpumateriaalina tiehankkeissa nykypäivänä, jos putken halkaisija on alle 800 mm. Tiehankkeissa kuivatusrumpuja tarvitaan määrällisesti paljon ja muovirummun kevyt rakennepaino on rakentamisessa käytettävän materiaalogististiikan kannalta edullista. Muoviputki on asennettava penkereeseen väylän rakentamisen yhteydessä tai aukikaivamalla vanha penger. Muovi on materiaalina poikkeuksellisen herkkä vaurioitumaan paikallisesta kuormasta ja seinämä on altis muuttamaan muotoaan jo asentamisvaiheessa. Elastisuutensa puolesta muoviputki voidaan sujuttaa maa-aineksessa suuntaporaamalla, mutta halkaisija voi olla korkeintaan 500 mm. Alituskalusto on urakoitsijakohtaista [80]. Muoviputken oikeaoppinen ja huolellinen ympärystäyttö on kriittisin tekijä putken kestävyuden kannalta maaperässä [17].





Kuva 16. Rinnakkain asennetut DN/ID 1000 mm pituudeltaan 12 m olevat muoviputket ratapenkereessä Ruotsissa. (Lähde: Uponor)



Kuva 17. Rinnakkain asennetut DN/ID 1800 mm pituudeltaan 24 m olevat Rautatierummut Dagefors, Ruotsi. (Lähde: Uponor)



Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa määräykset sallivat muoviputkien käytön rumpurakenteina ratapenkereessä [17].

#### 2.4.3 Komposiittiputket



Kuva 18. Hobaksen valmistaman muovikomposiittivalmisteisen putkisillan DN/ID 3000 mm tunkkaus ratapenkereeseen Cikowice, Puola. (Lähde: Hobas, URL: <http://www.hobas.com/service/reference-database/reference-detail/ref/hobas-cc-grp-culverts-dn-3000-jacked-under-railway.html>)

Materiaalina muovikomposiittia on käytetty rummuissa 1950-luvulta ja niitä on asennettu lähinnä tierummuiksi. Muovikomposiitti koostuu muovin sekä kuidun yhteistoiminnasta, jossa muovi toimii side- että suoja-aineena kuiduille. Kuitujen tehtävä taas on antaa putkelle lujuutta ja kimmoisuutta rakenteessa. Kuidut voivat olla jatkuvia tai katkottuja hiili- tai lasikuituja, ja niiden määrään vaikuttamalla rakenne voidaan mitoittaa kestämään suuriakin kuormia. Komposiittiputki voidaan asentaa penkereeseen aukikaivamisen lisäksi poraamalla tai tunkkaamalla. Asennustavasta riippuen komposiittiputken rakenteellinen mitoittaminen tehdään aukikaivulle [2] tai tunkkaukselle [1] rakennuspai-

kan mukaan. Rakentamistapa tulee huomioida putken suunnitteluvaiheessa, jolloin putken rakenne mitoitetaan kestävänsä asennuksesta koituvat lisäkuormat luetelluin menetelmin. Muovikomposiitin käyttö ratarakentamisessa ei ole tällä hetkellä sallittua. Muovikomposiitista valmistettu silta on pilottikokeilussa Oriveden ja Vilppulan välisellä rataosuudella Juupajoella Alapellon ratasiltana [16]. Muovikomposiitin materiaaliominaisuuksista lisää luvun 3.5.4 Muovi- ja komposiittiputkien käyttöikään vaikuttavien tekijöiden alla.

### 3 Rautatierumpujen mitoitusperiaatteet

#### 3.1 Hydrologinen mitoitus

Hydrologisella mitoituksella määritetään millaiset ja minkä suuruiset valumahuiput sade- ja sulamisvesistä vesiuomassa virtaa. Radan alta johdettava vesiuoma voi esimerkiksi kerätä vesiä pelloilta, metsistä, suoalueilta, lammista tai järvistä, sijainnista riippuen. Veden virtauksen tasaisuus on todennäköisempää uomissa, jotka keräävät vesiä alueilta, joissa vesi pääsee varastoitumaan ja täten tasaisemmin purkautumaan. Tällainen alue on esimerkiksi suo tai allas, kuten järvi tai lampi, johon vesi pääsee vapaasti kerääntymään. Hydrologisen mitoituksen määrittelyä käytetään lähtötietona tarvittavan rummun hydrauliseen mitoittamiseen. Ympäristöviranomaisen on koonnut ohjeen silta- ja rumpalausunnon antamiseen, jonka pohjalta hydraulinen mitoittaminen tehdään. Vesiuomassa virtaavan veden määrän mittayksikkö on kuutiometriä / aikayksikkö [71].

#### 3.2 Hydraulinen mitoitus

Hydraulinen mitoitus tarkoittaa rummulta vaadittavaa kykyä johtaa vesiuoma saumattomasti penkereen läpi aiheuttamatta muutoksia paikalliseen luonnontilaan ja ratapenkereen rakenteisiin mm. veden patoutumia putken suulle tai eroosiota penkereessä. Tavoitteena on, että rummun hydraulinen kapasiteetti kattaa vuoden aikana ilmastosta ja säämuutoksista johtuvat vesimäärien vaihtelut. Rummun hydraulisen mitoituksen lähtötietona käytetään rumpalausuntoa, tai erillistä Hydrologista mitoitusta, joka sisältää kartoituksen ympäristöstä johtuvista vesimääristä. Hydraulinen mitoitus vesiaukon koon ja putken korkeusaseman määrittelemiseksi voidaan tehdä Liikenneviraston julkaiseman Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu mukaisesti [73][77].

Veden virtausnopeus määräytyy tasaisessa virtauksessa uoman poikkileikkauksen ja pituuskaltevuuden mukaan. Silta- ja rumpalausuntojen valmistelu -oppaassa Chezyn virtauskaavan mukaan virtausnopeus on suoraan verrannollinen pituuskaltevuuden ja uoman vesipoikkileikkauksen hydraulisen säteen neliöjuureen. Näin ollen on perusteltua, että vesiaukon mitoituspadotus ja siitä johtuva virtausnopeus vesiaukossa ovat sopivassa suhteessa uoman kaltevuuteen. Vesiaukkojen mitoituspadotus on yleensä

niin pieni, ettei siitä aiheudu tulvimista uomassa. Tulvaan vaikuttavat pääasiassa uoman vedenjohtokyky sekä virtaaman suuruus ja kesto. Aukkomitat määritetään niin, ettei mitoituspadotus ylitä ja veden virtausnopeus kasva liikaa [71]. Vesiaukon suositeltava mitoituspadotus määritellään ylävirranpuoleisen maankäytön sekä uoman kaltevuuden mukaan seuraavassa taulukossa esitetyllä tavalla:

Kaltevuus	< 0,0002	0,0005	0,001	0,002	0,005	> 0,01
Pelto, taajama tai merkittäviä rakennuksia						
Oja	2	2	3	4	6	10
Puro	1	2	3	4	5	5
Joki	1	2	3	4	5	5
Iso joki MQ > 5 m <sup>3</sup> /s	1	2	3	3	4	4
Metsämaa tai luonnonalueet						
Oja	2	3	4	6	8	15
Puro	2	3	4	5	7	10
Joki	1	2	3	4	5	5
Iso joki MQ > 5 m <sup>3</sup> /s	1	2	3	3	4	4

Kuva 19. Mitoituspadotus enintään (cm) maankäytön, uoman ja kaltevuuden mukaan. (Lähde: Silta- ja rumpalausuntojen valmistelu – Ilmastonmuutoksen huomioonottaminen: Taulukko 7 [71])

InfraRYL asettaa rummun pituuskaltevuudelle minimiksi 1%, mutta poikkeustapauksessa voidaan käyttää 0,5% kaltevuutta. Rummun päiden- ja taitepisteiden taso osoitetaan suunnitelma-asiakirjoissa [31].

Rummulle vaadittavan aukon koko voidaan alustavasti mitoittaa RUMKO:n kappaleessa 4 valuma-alueen koon määrittämiseen annettujen ehtojen perusteella [45].

Valuma-alue (ha)	Rumpuaukon koko (mm)
80	600
180	800
420	1200
800	1600
1400	2000

Rummun hydraulinen mitoitus käsittää kaksi osatehtävää: aukon koon ja pohjan korkeuden määrittäminen. Kumpaankin liittyy läheisesti rummun pituuskaltevuus, jonka tulisi olla niin suuri kuin rakennuspaikan olosuhteet sallivat. Rumpujen hydraulinen mitoitus on erisuuntaisten vaikutustekijöiden optimointitehtävä. Rakennuskustannukset ovat sitä pienemmät mitä pienempi rumpu on ja mitä korkeammalle se perustetaan. Liian korkealle perustettu tai liian pieni rumpu aiheuttaa puolestaan vahinkokustannuksia tai muuta haittaa. Toisaalta kunnossapitotarve pienentyy, jos rumpu on väljä ja jos sen kaltevuus on suurehko, mikä vuorostaan edellyttää usein suhteellisen korkealle perustettua rumpua. Kalojen ja muiden vesieläinten kulkumahdollisuudet on arvioitava vesistörumpujen toteutuksessa [73].

Riittävän virtauskapasiteetin saavuttamiseksi alhaisella peitesyvyydellä voidaan rumpu- ja rakentaa rinnakkain. Liikenneviraston teräsputkisilta ohjeessa ohjeistetaan putkien väliseksi etäisyydeksi teräsholvisilloille vähintään 0,6 m ja teräsputkisilloille 1,0 m. Koneellisesti tehtävä tiivistys rummun ympärille ja putken aallotetun rakenteen vaatima ympäristäyttyä kuormia kantavana rakenteena mitoittavat vaadittavan putkien välisen etäisyyden. Etäisyyden minimivaatimusta voidaan soveltaa myös betonirummuille ja massiiviteräsputkille. Muovi- ja komposiittiputkien osalta rakenne tulee tutkia. Rinnakkain olevat rummut voivat olla sallituilla rumpumateriaaleilla erikokoisia [77]. Rumpusuunnittelussa ollaan käytetty putkien välisenä etäisyytenä rumpujen halkaisijaa, jos ne ovat saman kokoisia [19].

### 3.3 Geotekninen mitoitus

Kaikki rautatien alusrakenteet luokitellaan joko hyvin vaativiksi GL3-luokan pohjarakennuskohteiksi, joita ovat mm. pehmeiköille perustettavat rakenteet tai GL2-luokan pohjarakennuskohteiksi. Rakenteen haastavuuden vuoksi suunnittelu edellyttää erityistä geoteknistä osaamista [69][40].

Rummun geotekninen mitoittaminen tarkoittaa rumpurakenteen ja maan stabiiliteetin tarkastelua yhtenäisenä liittorakenteena ratapenkereessä. Geoteknisellä tarkastelulla tutkitaan rakenteen toimivuuden pitkäikäisyyttä, huomioiden ympäröivästä maanpaineesta, maan ominaisuuksista koituvien rasitusten sekä liikenteestä johtuvien kuormitussysäysten ja mahdollisesti muusta fysikaalisesta rasituksesta johtuvien tekijöiden

aiheuttamia vaikutuksia rakenteelle. Rumpurakenteessa ja kaikissa maahan upotetuissa putkissa on kyse maan holvautumisesta putken ympärille ja niiden yhteisestä kyvystä kantaa sille kohdistuvat kuormat. Putkeen kohdistuvan kuormituksen suuruus ja sen jakautuminen rummun ympärille riippuu maan ja putken jäykkyyksien suhteesta. Rummun geotekninen suunnittelu tapahtuu tutkimalla kairauksin alueella vallitseva maaperä ja sen ominaisuudet. Routanousu aiheuttaa rummulle pituuskaltevuuden muutoksia, josta seuraa rummun virtaamamuutoksia, padotuksia ja rumpujen saumojen liikehdintää [27][20].

Pehmeiköille rakennettaessa kriittistä on hallita penkereen painuma. Rakennusteknisesti rummun ympärille tehtävien pohjarakenteiden ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa mm. käyttämällä rakennetta keventävää täyttömateriaalia kuten kevytsoraa sekä jos rummun ympärystäyttö jää pohjaveden alapuolelle käytetään suulakepuristettua polystyreeniä (XPS). XPS:n etu kevytsoraan nähden on sen vähäinen kyky imeä kosteutta maaperästä, kun taas kevytsora imee itsensä kylläiseksi ja aiheuttaa maan routimista ja on sen vuoksi huono materiaali pohjaveden alapuolelle asennettaessa. Maan ja rakenteen muodonmuutoksia maaperässä voidaan myös tarvittaessa hallita stabiloimalla pohjamaa painumien pienentämiseksi. Äärimmäisen haastavissa olosuhteissa rumpu voidaan myös paaluttaa. Sekä stabilointi ja paalutus vaativat siirtymärakenteet rummun molemmiin puolin. Stabiloidulle rummulle tarvitaan siirtymäkiilat tehtynä, joko kevennysrakenteesta tai kiilamaisesti ohenevasta pilaroinnista. Paalutus vaatii siirtymälaatat sekä useimmiten keventämisen rummun kohdalla, jotta voidaan hallita maan painumisen vaikutukset rummun ympärillä [27].





Kuva 20. Keskeltä painunut ja päästään tukkeutunut virtausputkeksi sujutettu muoviputki.

Maan painumisella on suora vaikutus rummulle suunniteltuun korkeusasemaan ja siten putken hydraulisiin ominaisuuksiin. Tyypillisesti rumpu saattaa painua radan alla, jolloin sen päät pysyvät paikoillaan, mutta putken keskiosa sukeltaa. Seurauksena virtauskapasiteetti laskee ja saattaa aiheuttaa rummun suulle tulvimista äkillisissä virtausvaihteiluissa. Tämän vuoksi huolellinen pohjarakentamisen suunnittelu ja rakentamisen yhteydessä rummun ympärille tehtävä täyttö on rakenteen eliniän kannalta tärkeää rumpumateriaalista riippumatta. Painumilla voi myös olla vaikutuksia radan geometriaan [39]. Tyypillisesti rumpu on ratapenkereessä altis seuraaville muodonmuutokseen vaikuttaville tekijöille:

- Rummun tasainen painuma, aiheuttajana penkereen omapaino ja liikennekuorma. Seurauksena ratapenkereeseen muodostuu syvännä ja rummun virtaamataso nousee. Putken suu on useimmiten lievästi tukkiutunut tällaisessa tapauksessa ja sen seurauksena virtauskapasiteetti on heikentynyt. Rummun tasainen painuma penkereen mukana sallitaan, jos virtauskapasiteetti riittää vesiuoman juoksuttamiseen.
- Epätasainen painuma. Aiheuttavia tekijöitä on mm. huolimaton täyttö rummun alla ja sen ympärillä, akselikuorman kasvamisesta johtunut kuormituslisäys maaperään, sekä maan painuminen epätasaisesti rata-kiskojen alla. Penkereen epätasainen painuma voi olla myös seurausta tilanteesta, kun ratapengertä on jouduttu levittämään. Seurauksena penkereen painosta johtunut kuormituslisäys rummun yläpuolella. Tyypillisesti



rumpu on painunut radan kohdalla, mutta rummun suut ovat pysyneet aloillaan. Epätasaisen painuman aiheuttama virtauskapasiteetin aleneminen vaatii toimenpiteitä rakennetulle rummulle. Pohjasuhteiden vaihtelu aiheuttaa suurimmat epätasaiset painumat. Routiminen tapahtuu lähinnä rummun päissä ja aiheuttaa rummun päiden liikehdintää.

- Routiminen maaperässä, jonka aiheuttajana on rakenteessa vallitseva kosteus, aiheuttaa maan nousemista penkereessä. Seurauksena rata-penkereeseen saattaa muodostua äkillisiä nousuja, joka vaikuttaa putken rakenteeseen epätasaisena kuormana ja aiheuttaa muodonmuutoksia putkelle. Rummun muodonmuutoksen aiheuttama virtauskapasiteetin aleneminen vaatii toimenpiteitä rakennetulle rummulle.

Kivirummut ovat arimpia rakenteita routanousuille ja epätasaisesta painumisesta johtuvasta liikehdinnästä penkereessä. Kivirummun saumojen aukeaminen on tyypillistä tällaisissa tilanteissa.

Yhtenäinen jäykkä sileäpintainen teräsputki suhtautuu painumiin tasaisemmin, koska sen aksiaalinen jäykkyys pysty-, sekä pituussuuntaisesti sietää epätasaisista kuormitusta. Teräsputken muodonmuutoksiin voidaan vaikuttaa mitoittamalla putken seinämära-kennevahvuus laskemalla tarvittava jäykkyys kimmokertoimen avulla [18].

Betonista valmistetut rummut kestävät hyvin, jos niihin kohdistuva rasitus jakautuu tasaisesti putkilinjalle ja penkereessä ei tapahdu suuria muodonmuutoksia. Betonivalmistetut rumpuputket ovat kuitenkin erityisen alttiita tapauksissa, jos penkereessä tapahtuu voimakkaita muodonmuutoksia, koska betonirumpujen liitossaumat toimivat nivelinä rakenteessa. Avautunut liitos sallii hienoa-aineen vuotamisen ratapenkereestä putken sisään, josta seuraa rummun hydraulisen ominaisuuden heikentyminen [20].

Aallotetut teräsputket omaavat joustavan profiilin, joka myötää rasituksia ja sallii putken painumisen vaikuttamatta sen rakenteellisiin ominaisuuksiin [21].

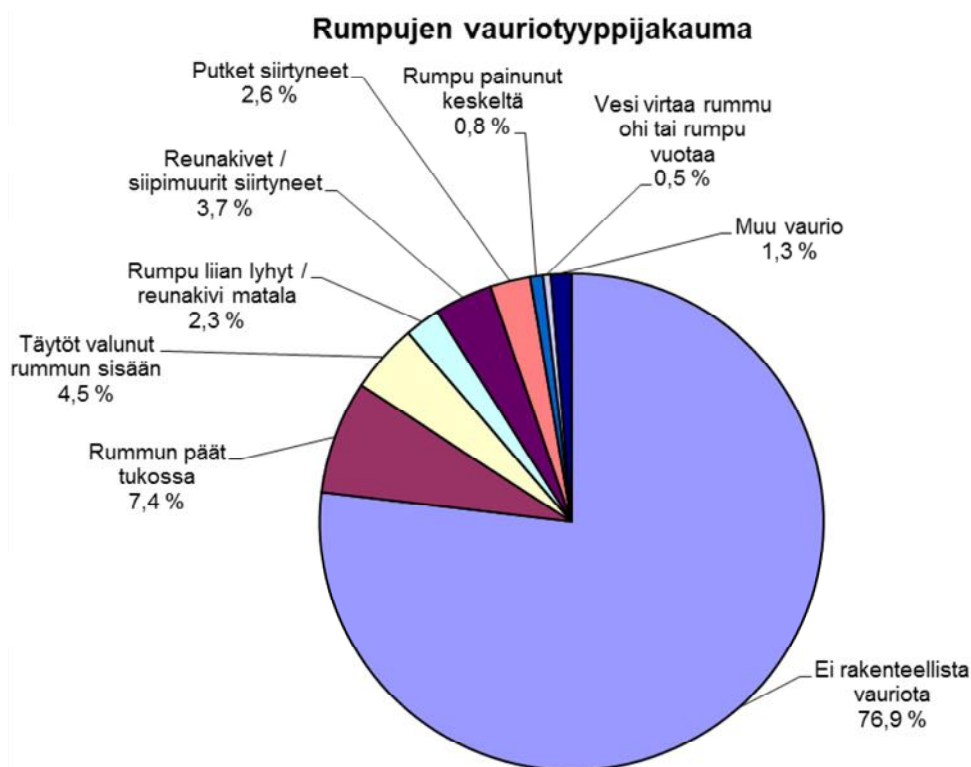
Komposiittiputken yhtenäinen rakenne pituussuuntaisesti sietää kimmoisesti pystysuunnassa tapahtuvia rasituksia ja muodonmuutoksia lujitteena käytetyn kuidun asettamisissa rajoissa. Komposiittiputken materiaaliominaisuuksiin voidaan vaikuttaa mitoittamalla putken seinämä tapauskohtaisesti sietämään muodonmuutoksia [36].

Muoviputki on materiaalina sitkeä sietämään muodonmuutoksia rakenteessa, koska sen ominaisuutena on venyminen. Muoviputken ympärystäyttö on tehtävä aallotetun

teräsputken lailla erityisellä huolellisuudella, jottei täyttömateriaali tai työprosessi täytönaikaisesti aiheuta putkimateriaalille vaurioita. Muoviputken kuormia kestävä rakenne perustuu maan ja putken yhteistoimintaan ja putken rakenteellisen toimivuuden edellytyksenä on tiivis täyttö putken ympärillä [17].

Rautatien alus- ja pohjarakenteiden suunnittelussa sovelletaan määräyksiä ja ohjeita seuraavassa pätemisjärjestyksessä [40]:

- Liikenteen turvallisuusviraston (TraFi) määräykset
- Eurokoodit kansallisine liitteineen
  1. EN 1990 Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet [57]
  2. EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat [58]
  3. EN 1997 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu [61]
- Liikenneviraston antamat hankkeen suunnitteluperusteet
- Liikenneviraston ohjeet
  - NCCI 1 [14]
  - NCCI 7 [13]
  - Ratatekniset ohjeet, RATO [37]
- Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset InfraRYL [31]
- Muut alan yleiset ohjeet, joita ovat julkaisseet esimerkiksi Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. ja Suomen Geoteknillinen Yhdistys SGY r.y

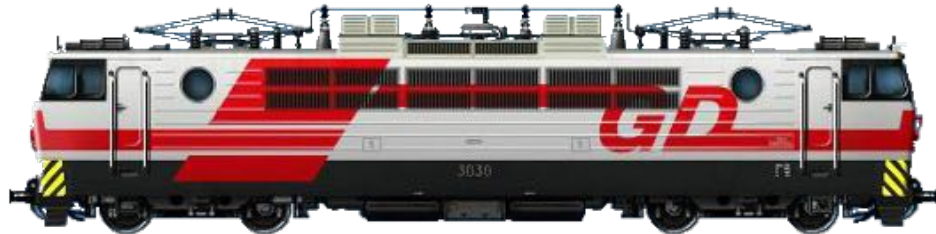


Kuva 21. Rumpujen vauriotyyppijakauma. (Lähde: Rautatierumpujen Hallintaraportti 2015 [40])

Rautatierumpujen hallintaraportin mukaan tyypillisin vauriotyyppi on rumpujen tukkeutuminen suuaukoilta ja täyttöjen valuminen rumpuun. Syynä voi olla liian alhainen perustamissyvyys uomaan nähden, rummun painuminen penkereessä tai veden virtaamamäärän nouseminen tavanomaista korkeammalle tasolle [41].

### 3.4 Rakenteellinen mitoitus

#### 3.4.1 Kuormat



Kuva 22. VR SR1 sähköveturi. Valmistettu vuosina 1973 – 1996. Suurin akselipaino 21,5 tonnia.



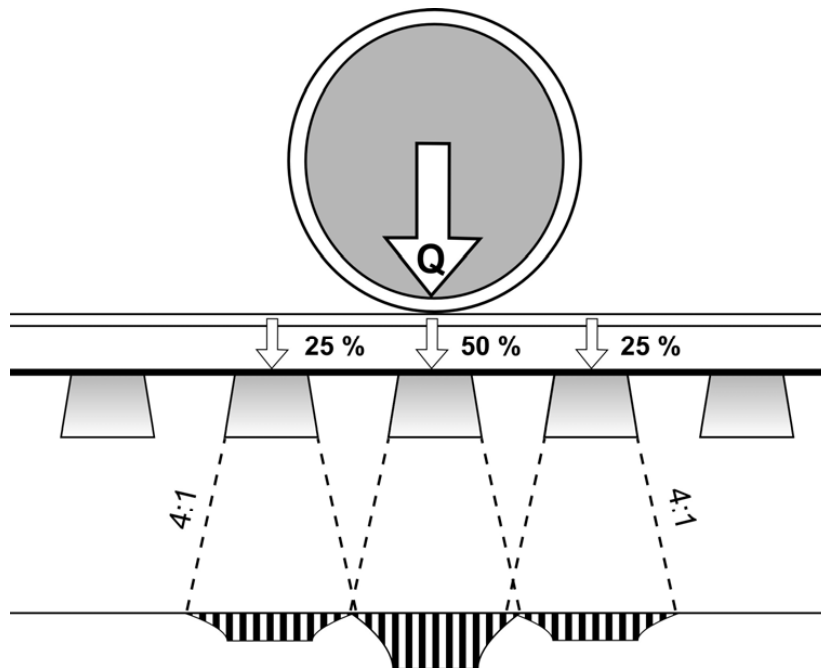
Kuva 23. VR SR2 sähköveturi, valmistettu vuosina 1995 – 2003. Suurin akselipaino 20,8 tonnia.

Rautatierumpuihin kohdistuu kuormia ympäröivästä penkereestä ja rautateillä liikkuvas-  
ta kalustosta. Penkereen päälle asennetut ratapölkyt johtavat kiskoilla liikkuvien junien  
kuormat radan alla oleviin rakenteisiin. Akselipaino jakautuu kahden pyörän kautta mo-  
lemmille kiskoille. Alla olevassa taulukossa on esitetty Suomessa tällä hetkellä käytet-  
tävän veturikaluston massat, akselipainot ja nopeudet. Taulukossa on lisäksi junayksi-  
köiden vastaavat tiedot. Junayksiköt sisältävät koko yksikön massan.

	Tunnus	Massa [t]	Akselipaino [t]	Suurin nopeus [km/h]
Sähköveturi	Sr1	84	21,5	140
	Sr2	83	20,8	210
Junayksikkö	Sm1	96	18,8	120
	Sm2	76	18,8	120
	Sm3	302	14	220
	Sm4	107	12,45	160
	Sm5	132	13,2	160
	Sm6	432	17	220
Dieselveturi	Dr14	86 - 78	21,5 - 19,5	75
	Dr16	84 - 82	21 - 20,5	140
	Dv12	65 - 61	16	125
Moottorivaunu	Dm12	54,5	13,6	120

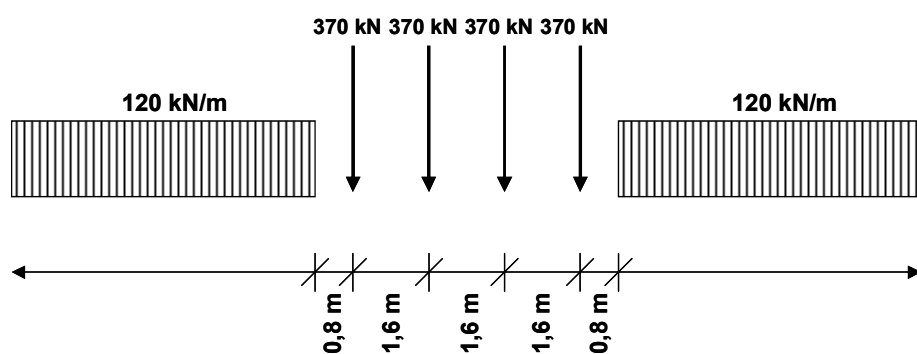
Kuva 24. Akselipainot ja suurimmat nopeudet kalustolle.

Uusien rautateiden suunnittelussa käytettävä akselipaino on 35 tonnia. Nykyinen rautatiekalusto on painavimmillaan 25 tonnia akselipainoltaan. Korotetulla akselipainolla pyritään pidentämään radan käyttöikää silmälläpitäen tulevaisuudessa tapahtuvia kalustopäivityksiä. Aikaisemmin määräävä akselipaino oli veturin akselipaino, mutta nykyisin mitoittava akselikuorma tulee tavaraliikenteen vaunujen akseleista [42].



Kuva 25. Pystysuoran junakuorman jakautuminen ratapölkkyistä ratapenkereeseen. Ratapölkyn pituussuunnassa kuormitus kohdistuu molempiin päihin, runsaalle ratapölkyn kolmasosalle. (Lähde: RATO 3 [40])

Rautatieliikennekuormat ja muut rautatiesiltoja koskevat kuormat on esitetty NCCI 1 kappaleessa B.6 [14]. Rakenteille kohdistuvat kuormat koostuvat junan staattisista kuormista jotka on esitetty kuormakaaviossa, dynaamisista lisäkuormista pysty- ja vaakasuunnassa sekä keskipakokuormasta. Mitoituksessa käytettävä kuormakaavio on LM71-35.



Kuva 26. Luokiteltu kuormakaavio LM71-35. (Lähde: NCCI 1, Kuva B.2 [14])

Kaluston sallittu akselipaino [kN]	Luokitellun kuormakaavion tunnus	Kerroin $\alpha$	Luokitellun kuormakaavion akseli-kuorma $Q_v$ [kN]	Luokitellun kuorma-kaavion nauha-kuorma $q_v$ [kN/m]
350	LM71-35	1,46	370	120
300	LM71-30	1,33	330	106
275	LM71-27,5	1,21	300	96
250	LM71-25	1,10	275	88
225	LM71-22,5	1,00	250	80
170	LM71-17	0,75	188	60

Kuva 27. Kaluston sallittua akselipainoa vastaavan luokitellun kuormakaavion tunnuksien sekä vastaavat staattiset nauhakuormien ja akselikuormien arvot. (Lähde: NCCI 1, Taulukko B.6 [14])

### 3.4.2 Yleiset periaatteet

Maahan asennettavan putken mitoittaminen tapahtuu tyypillisesti tuotestandardien avulla. Tuotestandardeilla ohjatuilla vaatimuksilla tuotannossa taataan putken rasituskestävyys maaperässä ympäröivästä maasta ja siihen kohdistuvista kuormista sallituissa rakennuspaikoissa sallituilla peittosyvyyksillä.

Suomalainen mitoitus ja toteutus perustuu InfraRYL [31] ja RUMKO:n [45] lisäksi standardissa SFS-EN 1295-1 [53] listattuihin teoksiin:

- Suomen kuntaliitto : Vesijohtojen ja viemäreiden suunnittelu, 1979 (Design of water supply and wastewater pipelines).
- Suomen kuntaliitto : Kunnallisteknisten töiden yleinen työselitys, 1990 (General work specification for municipal engineering).
- Suomen rakennusinsinöörien Liitto : Maahan ja veteen asennettavat kestomuoviputket, 1990 (Thermoplastic pipes buried in ground and under water).
- Suomen kunnallistekninen yhdistys : Betoniputkinormit 1990 (2001) (Concrete pipe rules) [3].

Maan alle asennettavan putken käyttäytyminen voidaan tarkastella SFS-EN 1295 standardin mukaisilla menetelmillä. Yleistä kansainvälistä ohjetta ei ole olemassa. Standardissa on koottu yhteen eri valtioissa käytössä olevat käytännöt sekä niiden liitteenä 3 kappaletta teknillisiä raportteja. Liittessä numero 3 on esitetty yleinen metodi, jonka pohjalta tehdään useimmat FEM tarkastelut putkirakenteille [18][21].

Standardin SFS-EN 1295 (Structural design of buried pipelines under various conditions of loading) osat ovat:

- SFS-EN 1295-1 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading. Part 1: General requirements / Yleiset vaatimukset [53]
- CEN/TR 1295-2 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading. Part 2: Summary of nationally established methods of design / Yhteenveto kansallisista menettelyistä [7]
- CEN/TR 1295-3 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading. Part 3: Common method / Yleinen metodi [8]
- CEN/TR 1295-4 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading. Part 4: Parameters for reliability of the design / Parametrejä luotettavaan suunnitteluun [9]

Eri rumpumateriaalien käyttäytymistä maaperässä on tutkittu. Tiehallinnon FEM – selvitys tierumpuja ympäröivästä jännitysjakaumasta [15] käsitellään 1000 mm sisähalkaisijaltaan olevien betoni-, aallotettu teräs- ja muoviputken käyttäytymistä maaperässä.

Kuormitusotaksumina olivat:

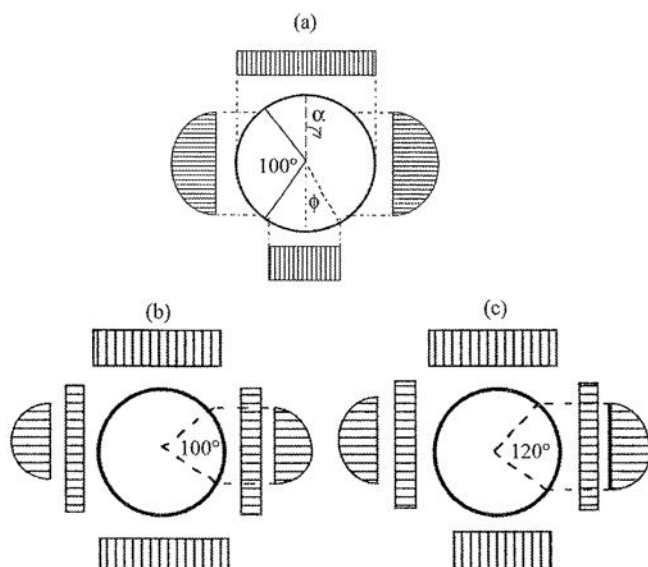
- Pitkäaikainen maan omasta painosta aiheutuva kuormitus.
- Lyhytaikainen pelkästä liikennekuormasta aiheutuva kuormitus.

Rumpua ympäröiväksi maaksi kokeeseen valittiin tiivis sora ja huonosti tiivistetty keskitiivis hiekka. Teräksisille ja muovisille putkille maaparametrit maamateriaalien arvioitiin muodonmuutostason perusteella. Työssä otaksuttiin maamateriaalin olevan kimmoinen kuormituksen ollessa lyhytaikaista. Pitkäaikaisessa kuormituksessa maaparametrien valintaan vaikutti itse maamateriaali eikä rummun materiaali. Pitkäaikaisessa kuormituksessa maamateriaalissa ilmeni kuorman synnyttämiä plastisia muodonmuutoksia. Tutkimuksessa käytettyjen putkien peitesyvyyksinä olivat 0,5 m ja 1,5 m. Liikennekuormana käytettiin silloisen voimassa olleen tielaitoksen julkaisun Siltojen kuormat (TIEL 2172072) mukainen yksiakselinen 260 kN akselikuorma. Kuorman oletettiin jakautuvan tien pituussuunnassa 0,2 m ja poikkisuunnassa 3 m pituiselle alueelle [15].

Työssä käytetyille putkille rakenteellinen mitoittaminen tehtiin:

- Betoniputki: Käsinlaskemalla Betoniputkinormit 2001 mukaisella menetelmällä [3].
- Teräsputki: Aallotetut teräsputket TIEL 2172501 mukaan.
- Muoviputki: Vertailu Oy KWH-Pipe Ab elementtimenetelmään perustuvan mitoitusohjelman ja PLAX-IS elementtiohjelmiston välillä.





Kuva 3.7:3 (a) Spanglerin, (b) Molinin ja (c) ATV maanpainemalli.

Kuva 28. (a) Spangler, (b) Molin ja (c) ATV maanpainemallit. (Lähde: FEM – selvitys tierumpuja ympäröivästä jännitysjakaumasta [15])

Taipuville putkille, kuten teräs- ja muoviputkille on kehitetty laskentamenetelmiä, joissa putkeen kohdistuvaa maanpaineen aiheuttamaa ja maanpäällä vaikuttavia kuormia on pyritty mallintamaan putken ympärille. Spangler-mallissa vuodelta 1941 kuvataan maanpaineen jakautumista kuvan (a) mukaan. Spanglerin mallista on johdettu Ruotsalainen Molinin malli (b) ja kuvassa (c) on Saksalainen ATV-malli [15].

Selvityksessä todetaan, että rumpumateriaalin lisäksi maalle käytettävän moduulin arvo vaikuttaa jännitysten jakautumiseen. Materiaalijäykkyyden kasvaessa maan muodonmuutokset pienenevät ja maan moduuliarvo putken ympärillä kasvaa. Betonista valmistettua rumpua ympäröivä maa toimii perustasona moduuliarvoille tutkimuksessa. Teräksestä valmistettu rumpu sai moduuliarvoksi arvon, joka oli 75% betoniputkea ympäröivän maan moduuliarvosta. Muoviputkella moduuliarvo oli 70% betoniputken moduuliarvosta. Yhteenvedossa lopuksi todetaan, että eri materiaaleista valmistetuille rummuille ei voida käyttää samoja kuormitusotaksumia, koska jännitysjakautuma putkimateriaalilla ja sen ympärillä olevassa maassa riippuu aina niiden jäykkyyksien välisestä suhteesta [15].

### 3.4.3 Betonivalurummun rakenteellinen mitoitus

Betonivalurumpu mitoitetaan rakenteellisesti samoilla periaatteilla, kuin teräsbetonista valmistettu silta. Sillan mitoituksessa käytetään Liikenneviraston julkaisemia Eurokoodin soveltamisohjeita NCCI 1 (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet) [14], NCCI 2 (Betonirakenteiden suunnittelu) [12] ja NCCI 7 (Geotekninen suunnittelu) [13].

Rakenteellisesti silta jaetaan suunnittelussa osien tunnuksilla ryhmiin. Ryhmät jaetaan rasitusluokkiin siltapaikan mukaan. Sillan osan rasitusluokka määrää osan vaatiman betonin lujuusluokan, pakkasenkestävyysvaatimuksen, betonipeitteen nimellisarvon, raudoitustyyppin ja suunnitellun käyttöiän rakenteelle.

Ympäristö-olosuhdeluokaltaan rautateillä käytettävät betonirakenteet ovat Rasitusluokaryhmässä R4 [12]. Lujuusluokaltaan C30/37 korkeammissa massoissa tarvitaan lujuutta kasvattavia lisäaineita, kuten esimerkiksi silikaa. Silika parantaa myös betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä. Pakkasenkestävyysvaatimus betonisilloille on minimissään P20 tai P30 rauteille ja se voidaan saavuttaa betonimassan suhteituksessa vesi-sementtisuhteella [24].

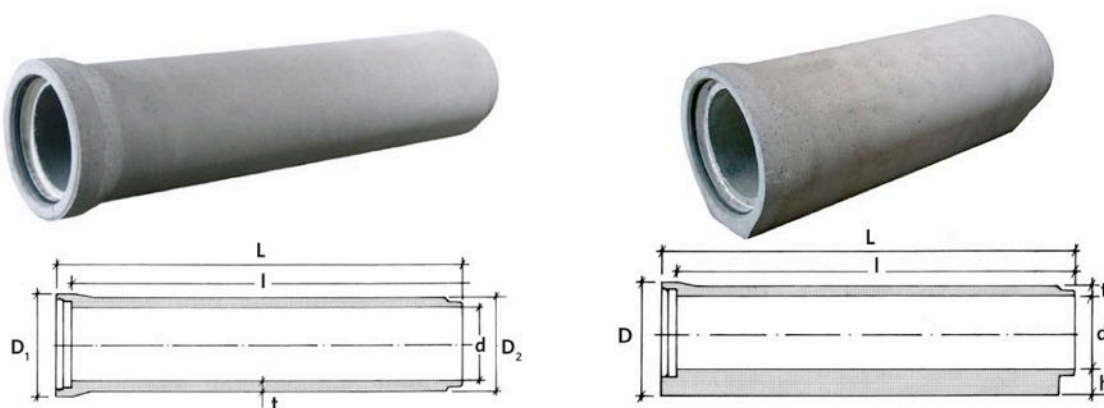
Raudoitusteräksinä valurummuissa sallitaan sillansuunnittelussa sallitut raudoitusteräksset: A500HW (sitkeysluokka B) [46], B500B (Sitkeysluokka B) [47] ja B500C1 (Sitkeysluokka C) [48]. Betonipeitevaatimus on minimissään 40 mm ja määräytyy betonirakenteen rasitusluokan mukaan. Tarkemmat tiedot vaadituille raudoitusteräksille löytyvät eurokoodeilla tapahtuvan sillanrakennuksen suunnitteluohjeen NCCI 2 kappaleesta 3.2 [12].

### 3.4.4 Betoniputket

Betoniputkirumpu mitoitetaan rakenteellisesti kestävänsä rasitusta SFS-EN 1916 + AC (Betoniset putket ja osat, raudoitetut, raudoittamattomat ja teräskuidulla vahvistetut) [56] mukaan. Standardin mitoitusperiaatteet on periytetty SKTY:n Betoniputkinormit 2001 julkaisusta. Betoniputkilla rakenteellisesti mitoittava tekijä on jännitystaso ja taipuma. Betoniputket testataan koekuormittamalla koekappaleita tuotantoerästä. Putkilta vaadittavat särökuorma ja myötökuorma on ilmoitettu Betoniputkinormit 2001 julkaisun kappaleessa 3.2.2.2. [3].

Suomessa betoniputket on aikoinaan jaoteltu lujuusluokkiin A, B, C ja Dr. Pieni r-kirjain D-lujuusluokan putken perässä tarkoittaa raudoitettua putkea. Raudoittamatonta D-luokan putkea ei ole olemassakaan. A-luokitellusta putkesta on maininta viimeisen ker-  
ran Betoniputkinormit 1995 ja C-luokitellusta putkesta Betoniputkinormit 1990. A ja C luokan putkien valmistaminen on lopetettu, koska rakentamisessa ei tarvittu B-luokkaa kevyempiä putkia ja Dr luokkaa suosittiin eniten C ja Dr luokkien välillä. Tästä syystä nykyisin valmistetaan ainoastaan B-luokan raudoittamatonta sekä raudoitettuja Br-luokan ja Dr-luokan putkia. Betoniputkilta vaadittujen kuormituslujuuksien arvot ovat kasvaneet Betoniputkinormien päivitysten yhteydessä. Vaadittu betonipeitteen paksuus raudoitukselle on ollut Betoniputkinormit 1995 vielä 15 mm. Betoniputkinormit 2001 – julkaisussa betonipeitevaatimus raudoitukselle on minimissään 20 mm alle 500 mm putkille ja yli 500 mm halkaisijaltaan oleville betoniputkille 25 mm. Tuotannossa olevien 800 mm – 2000 mm halkaisijaltaan olevien betoniputkien betonipeite on minimissään 30 mm ulko- ja sisäpuolella. Betonipeitteen paksuus vaihtelee putkikokojen välillä ulko- ja sisäpinnassa [23][3].

Radoilla sallitut betoniputket ovat kaikki ainoastaan raudoitettuja Dr-lujuusluokan ja EK-järjestelmän putkia. EK-järjestelmä tarkoittaa putkea, jossa on esiasennettu kiintotiiviste joka mahdollistaa niiden yhteen liitettävyyden rumpuvalmistajasta riippumatta. Rumpujen ulkomitoissa on eroja valmistajien kesken [29]. Jalallisten betoniputkien kestävyysvaatimukset ovat pyöreiden betoniputkien vaatimuksia korkeammat. Betonista tehty putki poikkeaa muihin materiaaleihin nähden myös asennusteknisessä toteuttamisessa, koska asennusperiaatteeltaan betonirumpu koostuu monesta liitoksesta penkereessä. Betoniputkilta vaadittavan puristuslujuuden on oltava vähintään 40 MPa [3].



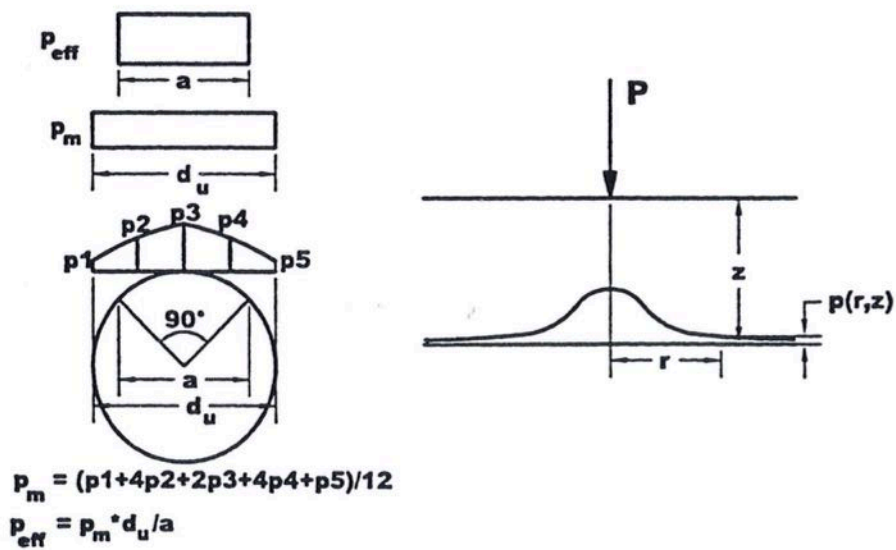
Kuva 29. Betonista valmistettu pyöreä ja jalallinen EK-putki. (Lähde: Rudus Oy)

Rautatierummuiksi soveltuvien raudoitettujen betoniputkien dimensioita:

	<b>Pyöreä</b>	<b>Jalallinen</b>
Sisähalkaisija (mm)	800, 1000, 1200, 1400, 1600	800, 1000, 1200
Hyötypituus (mm)	2000, 2250, (3000)	2000, 2250, (3000)
Lujuusluokka vaihtoehdot	Br, Dr	Br, Dr

Betoniputkinormi 2001:ssa on esitelty täytekerroksen päällä vaikuttavan pistemäisen kuorman putkeen kohdistaman paineen laskemiseksi Boussinesqin kaava, missä  $z$  on syvyys ja  $r$  tutkitun pisteen vaakaprojektion etäisyys kuormasta  $P$  [3]:

$$\text{Boussinesqin kaava: } p_z(z) = \frac{3P}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-\frac{5}{2}}$$



Kuva 30. Putkeen vaikuttava painekuorma ja pistekuorman aiheuttama paine. (Lähde: Betoniputkinormit 2001, Kuva 2/L8 [3])

Betoniputkinormit 2001 otaksutaan liikennekuormien suuruudet RIL 144-1997 mukaan. B-luokan raudoittamattomille betoniputkille liikennekuormaksi on kuitenkin oletettu 200 kN akseli ja niitä ei liikennealueilla käytetä lainkaan. Liikennekuormien suuruudet ovat esitetty seuraavassa taulukossa.



Kuorma	Akselipainot		Sysäyslisä [%]
	Tavallinen	Raskas	
Junakuorma	4 kpl akseleita a'250 kN k/k 1,5 m Pyöräkuormien keskinäinen etäisyys 1,5 m (raideleveys)	4 kpl akseleita a'300 kN k/k 1,5m Pyöräkuormien keskinäinen etäisyys 1,5 m (raideleveys)	$\varepsilon = 11$ (6-h)
Ajoneuvokuorma	Kuormakaavio 2 1 kpl akseleita a'260 kN (sisältää sysäyslisän)  Eli kaksi pinta-kuormaa 0,2*0,6 m, joiden kes- kinäinen etäisyys 2,0 m	Raskas erikoiskuorma 2 kpl peräkkäisiä akselistoja a'300 kN  Eli kaksi pintakuormaa 0,2*2,5 m, joiden väli 1,2 m	$\varepsilon = 16$ (3-h)

Kuva 31. Betoniputkinormi 2001 esitetty liikennekuorma. (Lähde: Betoniputkinormit 2001, Taulukko 2/L8 [3])

Betoniputkinormi 2001:ssa esitetty liikennekuorman laskentamenettely [3]:

Liikennekuorma putkelle lasketaan integroimalla putken laen tasolla vaikuttava paine putken vaakaprojektion yli, kuva 2/L8. Normaalisti riittää laskea paine putken keskellä, ¼-pisteessä ja reunalla sekä laskea keskimääräinen paine Simpsonin kaavalla. Junakuorma voidaan laskea olettamalla junakuorma nauhakuormaksi, jonka leveys on sama kuin ratapölkkyjen pituus. Tavallisen junakuorman määräävä tapaus on 4 kpl 250 kN akseleita, jolloin kuorma 1000 kN vaikuttaa alueella 4,5 m \* 1,5 m. Raskaan kuorman tapauksessa akselit ovat 300 kN, eli kokonaiskuorma on 1200 kN alueella 4,5 m \* 1,5 m. Kuorman jakautuminen maassa junakuorman ja harvinaisen ajoneuvokuorman yhteydessä lasketaan esim. Boussinesqin teorian mukaisella ratkaisulla pystyjännitysten jakautumisesta syvyyden z funktiona tasaisesti kuormitetun suorakaiteen (sivut B ja L) muotoisen taipuisan laatan nurkkapisteen alla:

$$\sigma_z(z) = \frac{p}{2\pi} \left[ \arctan \frac{BL}{zR_3} + \frac{BLz}{R_3} \left( \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) \right]$$

$$R_1 = \sqrt{B^2 + z^2}$$

$$R_2 = \sqrt{L^2 + z^2}$$

$$R_3 = \sqrt{B^2 + L^2 + z^2}$$

Kaavan avulla voidaan laskea jännitys mielivaltaisessa pisteessä myös laatan sisä- tai ulkopuolella superpositioperiaatteen avulla. Menetelmää on selostettu useissa geotekniikan käsikirjoissa (ks. Esim. RIL157-I, Geomekaniikka I 1985)

Vuonna 2002 valmistuneessa lisensiaatintutkimuksessa Raiteen, ratapenkereen ja rummun yhteistoiminta [38] Tampereen teknilliseltä korkeakoululta Erkki Mäkelä todensi, että silloisen voimassa olleen Betoniputkinormit 2001 mukaisella käsinlaskentamenetelmällä saatu tulos verrattuna mitattuihin ja FEM elementtimenetelmällä laskettuihin tuloksiin erosi keskenään huomattavasti toisistaan. Betoniputkinormit 2001 käsinlaskentamenetelmässä betoniputken mitoitus perustuu särökuorman ja murtokuorman laskennalle. Särökuorma tarkoittaa kokonaiskuorman suuruutta, kun putkeen muodostuu ensimmäinen halkeama. Halkeama saa muodostua putkeen aikaisintaan, kun putkeen kohdistuu suurin sallittu kokonaiskuorma. Tästä syystä lisensiaatintutkimuksessa verrattiin pelkästä junakuormasta ja maan painosta itsessään johtuvia rasituksia erikseen. Tutkimuksen mukaan Betoniputkinormi 2001:ssä esitetty junakuorma aiheuttaa huomattavasti suurempia rasituksia rumpuihin kuin todelliset vastaavan akselipainon omaavat junat. Työssään Mäkelällä oli koekohteet Viialan ja Toijalan välisellä rataosuudella sekä Tampereella. Viialan ja Toijalan välisellä osuudella oli halkaisijaltaan 800 mm jalallinen lisalmen sahan valmistama ratarumpu, joka oli asennettu noin 2 metrin peitesyvyyteen. Tampereella sijainneen koekohteen rumpu oli 1400 mm pyöreä Abetoni Oy (nykyisin Rudus Oy) valmistama ratarumpu ja se oli asennettu noin 1,4 m peitesyvyyteen [38].

Yhteenvedossa Erkki Mäkelä toteaa lisensiaattityönsä johtopäätöksissä betonirumpujen käyttöiästä ja sen odotteesta eri peitesyvyyksillä jalallisista betoniputkista seuraavaa [38]:

Suurimmat vetopuolen venymät syntyvät pelkästä junakuormasta samoin kuin junakuorman ja penkereen oman painon yhteisvaikutuksena muodostuvasta kokonaiskuormasta kaikilla akselipainoilla rummun kattoon. Taulukossa 10.3:1 esitetään eri kimmomoduulin omaavien halkaisijaltaan 800 mm jalallisten rumpujen käyttöikäluokitus erilaisilla peitesyvyyksillä, kun vaakajännityssuhteeksi K oletetaan 0,357. Vaakajännityssuhteen ollessa suurempi kuin 0,357 kasvaa esijännityksen suuruus ja sitä kautta rumpujen käyttöikä. Taulukon 10.3.1 perusteella voidaan todeta, että tutkitut halkaisijaltaan 800 mm jalalliset rummut kestävät 100 vuoden laskennallisen käyttöiän vähintäänkin käyttöikäluokituksella todennäköisesti.

Akselipaino	Peitesyvyys							
	1,00 m		1,40 m		1,65 m		1,90 m	
	$E_{bet} = 40\,000$ MPa	$E_{bet} = 35\,500$ MPa	$E_{bet} = 40\,000$ MPa	$E_{bet} = 35\,500$ MPa	$E_{bet} = 40\,000$ MPa	$E_{bet} = 35\,500$ MPa	$E_{bet} = 40\,000$ MPa	$E_{bet} = 35\,500$ MPa
206 [kN]	<i>Varma</i>	<i>Varma</i>	<i>Varma</i>	<i>Varma</i>	<i>Varma</i>	<i>Erittäin tod. näk.</i>	<i>Erittäin tod. näk.</i>	<i>Tod. näk.</i>
250 [kN]	<i>Varma</i>	<i>Varma</i>	<i>Varma</i>	<i>Varma</i>	<i>Erittäin tod. näk.</i>	<i>Erittäin tod. näk.</i>	<i>Erittäin tod. näk.</i>	<i>Tod. näk.</i>
350 [kN]	<i>Varma</i>	<i>Varma</i>	<i>Erittäin tod. näk.</i>	<i>Erittäin tod. näk.</i>	<i>Tod. näk.</i>	<i>Tod. näk.</i>	<i>Tod. näk.</i>	<i>Tod. näk.</i>

Kuva 32. Halkaisijaltaan 800 mm jalallisten rumpujen käyttöikäluokitus. (Lähde: Erkki Mäkelän lisensointityö: Taulukko 10.3:1 [38])

Halkaisijaltaan 800 mm olevista pyöreistä betonirumpuputkista, joiden kimmomoduuli oli 35 500 MPa työssä todetaan seuraavaa [38]:

Suurimmat vetopuolen venymät syntyvät pelkästä junakuormasta ja kokonaiskuormasta kaikilla akselipainoilla rummun kattoon. Taulukossa 10.3.2 esitetään halkaisijaltaan 800 mm pyöreiden rumpujen käyttöikäluokitus. Taulukon perusteella voidaan todeta, että tutkitut halkaisijaltaan 800 mm pyöreät rummut kestävät 100 vuoden laskennallisen käyttöiän vähintäänkin käyttöikäluokituksella todennäköisesti. Jalalliset putket osoittautuivat taulukoiden 10.3:1 ja 10.3:2 perusteella hieman kestävimmiä kuin pyöreät putket.

Akselipaino	Peitesyvyys	
	1,40 m	1,90 m
	$E_{bet} = 35\,500$ MPa	$E_{bet} = 35\,500$ MPa
206 [kN]	<i>Erittäin todennäköinen.</i>	<i>Todennäköinen</i>
250 [kN]	<i>Erittäin todennäköinen.</i>	<i>Todennäköinen</i>
350 [kN]	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>

Kuva 33. Halkaisijaltaan 800 mm pyöreiden rumpujen käyttöikäluokitus. (Lähde: Erkki Mäkelän lisensointityö: Taulukko 10.3:2 [38])

Halkaisijaltaan 1000 mm pyöreistä ja jalallisista työssä todetaan seuraavaa [38]:

Jalallisilla rumpuputkilla suurimmat vetopuolen venymät syntyvät 1,4 m ja 1,9 m peitesyvyyksillä kattoon niin junakuormasta kuin kokonaiskuormastakin kaikilla kolmella tutkitulla akselipainolla. Pyöreällä putkella 1,4 m peitesyvyydellä pelkästä junakuormasta syntyneet vetopuolen maksimivenymät syntyvät kattoon. Kokonaiskuormituksissa suurimmat vetopuolen venymät syntyvät 206 kN ja 250 kN akselikuormilla pohjaan ja 350 kN akselikuormilla kattoon. Taulukossa 10.3.3 esitetään halkaisijaltaan 1000 mm jalallisten ja pyöreiden rumpujen käyttöikäluokitus erilaisilla peitesyvyyksillä, kun vaakajännityssuhteeksi  $K$  oletetaan 0,357.

Akselipaino	Peitesyvyys			
	1,40 m		1,90 m	
	Jalallinen	Pyöreä	Jalallinen	Pyöreä
206 [kN]	<i>Erittäin todennäköinen.</i>	<i>Erittäin todennäköinen.</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>
250 [kN]	<i>Erittäin todennäköinen.</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>
350 [kN]	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>

Kuva 34. Halkaisijaltaan 1000 mm jalallisten ja pyöreiden rumpujen käyttöikäluokitus. (Lähde: Erkki Mäkelän lisensiaattityö: Taulukko 10.3:3 [38])

Halkaisijaltaan 1200 mm olevista jalallisista sekä pyöreistä betoniputkista työssä todetaan laskennallisen 100 vuoden käyttöiän toteutuvan 1,4 m ja 1,9 m peitesyvyyksillä todennäköisesti [38].

Halkaisijaltaan 1400 mm olevista pyöreistä betoniputkista työssä todetaan seuraavaa [38]:

Vetopuolen suurimmat venymät pelkästä junakuormasta syntyvät rummun kattoon kaikilla tutkituilla peitesyvyyksillä ja akselipainoilla. Suurimmat vetopuolen kokonaiskuormituksesta syntyvät 1,9 ja 2,5 m peitesyvyydellä kattoon. 1,0 m peitesyvyydellä kaikilla kolmella tutkitulla akselipainoilla ja 1,4 m peitesyvyydellä 206 kN ja 250 kN akselipainolla syntyvät suurimmat vetopuolen venymät ovat pohjassa. 1,4 m peitesyvyydellä ja suurimmalla tutkitulla akselikuormalla suurimmat vetopuolen venymät ovat katossa. Taulukossa 10.3:4 esitetään halkaisijaltaan 1400 mm jalallisten ja pyöreiden rumpujen käyttöikäluokitus erilaisilla peitesyvyyksillä, kun vaakajännityssuhteeksi  $K$  oletetaan 0,357.

Akselipaino	Peitesyvyys			
	1,00 m	1,40 m	1,90 m	2,50 m
206 [kN]	<i>Varma</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>
250 [kN]	<i>Erittäin todennäköinen.</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>
350 [kN]	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>	<i>Todennäköinen</i>

Kuva 35. Halkaisijaltaan 1400 mm pyöreiden rumpujen käyttöikäluokitus. (Lähde: Erkki Mäkelän lisensiaattityö: Taulukko 10.3:4 [38])

Mäkelä muistuttaa työssään vielä seuraavia seikkoja ratarumpujen käytöstä eri peitesyvyyksillä [38]:

350 kN akselipainoa vastaavia venymiä laskettaessa on oletettu maan käyttäytymän lineaarisen kimmoisasti, kuten muillakin akselipainoilla. TTKK:n pohja ja maarakenteiden laboratoriolle ei ole kuitenkaan omiin mittauksiin perustuvaa tietoa ratapenkereen käyttäytymisestä lineaarisen kimmoisasti näin suurilla akselipainoilla. Tämän takia tässä tutkimuksessa 350 kN akselipainolla esitettyihin rummun venymiin on syytä suhtautua huomattavalla varauksella!

100 vuoden laskennallinen käyttöikä ei tarkoita välttämättä 100 vuoden todellista käyttöikää, koska siinä otetaan huomioon vain tietyt kappaleessa 8.4 esitetyt esitetyt laskennalliset kriteerit. Todellisuudessa rummut voivat halkeilla jopa laskennallisen käyttöiän ollessa varma.

Ratarumpujen nykyistä 1,4 m minimipeitesyvyyttä voidaan pitää hyvänä peitesyvyytenä, jota ei tämän tutkimuksen perusteella ole syytä ryhtyä pienentämään.

100 vuoden laskennallinen käyttöikäluokitus alenee tutkituissa tapauksissa syvemmälle mentäessä. Laskentamalli on kalibroitu toimimaan noin 2 m peitesyvyydellä, joten huomattavasti suurempien peitesyvyyksien kyseenä ollessa laskennan tarkkuus huononee.

Betonin kimmomoduulin suurentaminen eli käytännössä betonin K –arvon suurentaminen vaikuttaa merkittävästi rummun käyttöikään ja suurimpaan sallittuun akselikuormaan. Tämä on varmasti yksi helpoimmista tavoista parantaa rumpujen kestävyyttä niin ajallisesti kuin suurimman akselipainonkin kannalta.

Rummun sivuttaistäytön kimmomoduulilla ei näyttänyt olevan huomattavaa merkitystä rummun venymiin maan omasta painosta ja junakuormasta. Rummun sivustojen merkitys ilmeni lähinnä maanpaineen kautta.



Äärimmäisissä olosuhteissa, joissa putkeen kohdistuu raskaita kuormia kuten rautateillä, betoniputkilta vaaditaan korkeaa leikkauslujuutta. Koska betoni kestää heikosti vetoa, betoniputken seinämien rakennetta vahvistetaan jäykistävillä seinämää kiertävillä ja pituussuuntaisilla raudoitusteräksillä. Raudoitusteräksset kasvattavat putken murtumissitkeyttä pituus- ja pystysuunnassa. Tästä johtuen betoniputkirumpujen rakenteellinen mitoittaminen eroaa muihin materiaaleihin nähden ja niille on luotu tuotenormit, jotka sisältävät vaatimukset betoniputken rakenteelle ja sen kestävyydelle. Rautatierakenteessa käytettäville betoniputkille on asetettu InfraRYL:ssä Betoniputkinormit 2001:een perustuva lujuusluokkavaatimus [31].

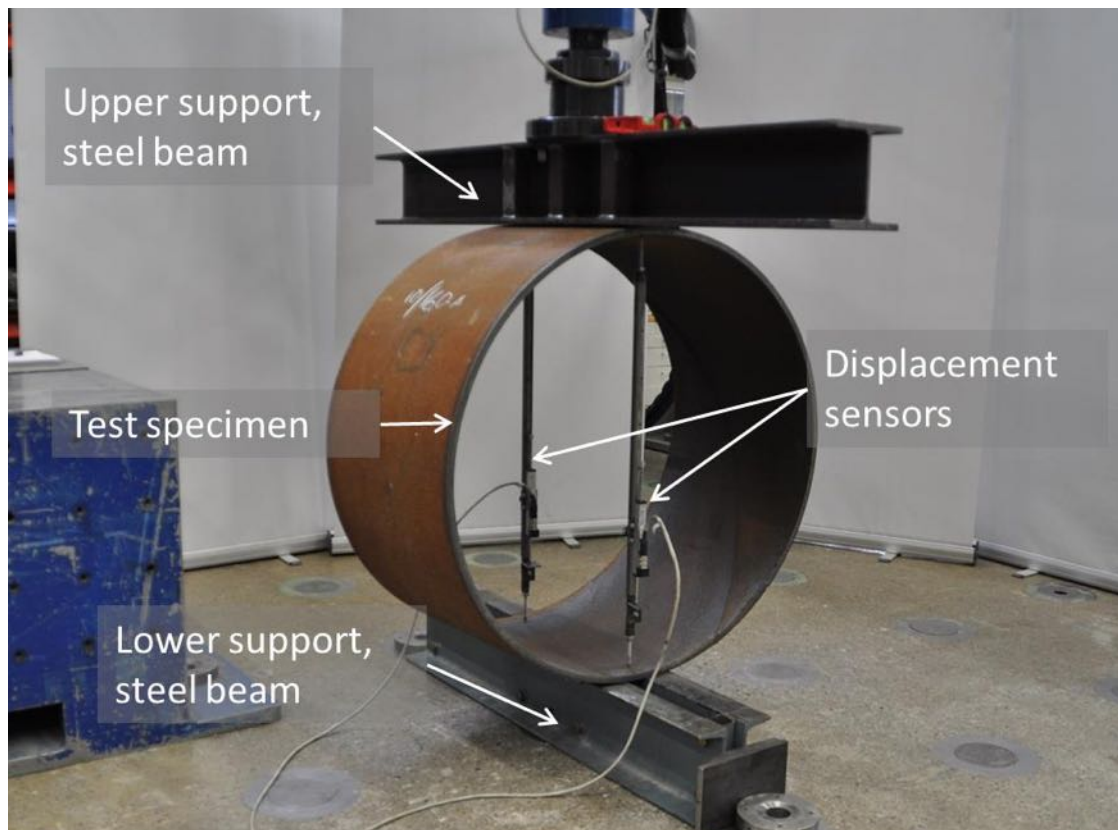
### 3.4.5 Massiiviteräsputki

Sileän massiiviteräsputken mitoittaa jännitystaso ja taipuma. Sileä teräsputkirumpu mitoitetaan rakenteellisesti kokemusperäisesti valitsemalla materiaalivahvuus halkaisijakoon mukaan. Sileän teräsputken materiaalilujuuden vaatimuksena on S355J2G4 (Fe510D2) teräs [31]. Ratapenkereeseen soveltuvan sileän massiiviteräsputken seinämän mitoitusvahvuudet on esitetty seuraavassa taulukossa [42]:

Putken sisähalkaisija (DN/ID)	Putken seinämävahvuus
800 mm	8 mm
1000 mm	10 mm
1200 mm	12 - 14 mm
1200 < X < 2000 mm	Määritellään kohdekohtaisesti

Halkaisijaltaan 800 mm – 1200 mm olevat putket ovat toimittajalla vakiokokoja. Yli 1200 mm halkaisijaltaan olevat putket ovat konepajatyötä ja ne mitoitetaan tapauskohtaisesti FEM ohjelmien avulla [18]. Seinämävahvuus määräytyy korroosiokestävyydessä normaaliolosuhteisessa maaperässä teräsputkipaaluille tehdyn korroosiotutkimuksen perusteella [76].

Teräsputkipaaluja valmistava SSAB on teettänyt putkihalkaisijalle 1016 mm rengasjäykkyyskokeita Tampereen teknillisellä yliopistolla. Mittalaitteistossa putken päällä on I-palkki ja itse putki on asetettuna paikalleen tuetun teräspalkin päälle. Asetelma näkyy kuvassa [10].



Kuva 36. Rengasjäykkyyden testausasetelma 500 mm pitkille koekappaleille. (Lähde: TTY Rengasjäykkyydesti teräsputkille [10])

Rengasjäykkyydestissä käytetyn hydraulisen puristimen puristuskyky oli 250 kN. Rengasjäykkyydestissä puristettiin 3 kpl 12,5 mm ja 3 kpl 16 mm seinämävahvuuksiltaan olevia halkaisijaltaan 1016 mm massiiviteräsputkia. Puristuksessa seurattiin millä voimalla putkeen muodostuu 3% mittapoikkeama [10].

Specimen symbol/nominal wall thickness	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Measured load [kN]	Measured length of the specimen	Load per meter [kN/m]
A/12.5	355	20.9	501	41.7
B/12.5	355	20.7	496	41.7
C/12.5	355	20.4	499	40.9
A/16.0	355	42.6	499	85.4
B/16.0	355	41.5	499	83.2
C/16.0	355	41.4	494	83.8

Kuva 37. Rengasjäykkyydestin tuloksia DN/ID 1016 mm putkille 3% (30,5 mm) mittapoikkeamalla. (Lähde: TTY Rengasjäykkyydesti teräsputkille [10])

Seinämävahvuudeltaan 12,5 mm putki sai 3% mittapoikkeamalle kuormituksesta arvoja 20,9 kN, 20,7 kN ja 20,4 kN. Saadut arvot on jaettu pituudella [mm] ja keskimääräiseksi tulokseksi saatiin 41,4 kN/m [10].

Seinämävahvuudeltaan 16 mm putki sai 3% mittapoikkeamalle kuormituksesta arvoja 42,6 kN, 41,5 kN ja 41,4 kN. Saadut arvot on jaettu pituudella [mm] ja keskimääräiseksi tulokseksi saatiin 85,4 kN/m [10].

### 3.4.6 Aallotettu teräsputki

Aallotetun teräspeltirummun rakenteellinen kestävyys perustuu sen aallotettuun profiiliin muotoon eikä seinämävahvuuteen. Putket valmistetaan kierresaumaamalla spiraalin tavoin ohutta aallotettua teräslevyä, jonka vuoksi sen jäykkyyttä ei voida rengasjäykkyydestillä mitata. Seinämävahvuus on 1,2 – 2,0 mm halkaisijakooltaan 800 mm – 2000 mm välillä. Putken pinta kuumasinkittään ja maalataan epoksihartsimaalilla suojaamaan rummun terästä maaperän happamuudelta ja muilta ulkoisilta rasituksilta. Rumpujen jatkoksissa usein riittää hiekkatiivis jatkos [45].

InfraRYL:ssä neuvotaan maanteillä käytettyjä aallotettuja teräsputkia mitoittamaan kappaleen 14342:T2 taulukon mukaan [31].

Halkaisija DN/D, mm	Kimmoinen taivutusjäykkyys EI, kNm	
	Vähimmäispeitesyvyys 0,3 m	Vähimmäispeitesyvyys 0,5 m
≤ 300	0,8	0,8
400	0,8	0,8
500	0,9	0,9
600	2,3	1,7
800	5,2	3,4
1000	8,0	5,0
1200	—	6,5
1400	—	8,0
1600	—	19
1800	—	30
1990	—	40

Kuva 38. Pääteiden rumpujen teräsputkien kestävyys- ja peitesyvyysvaatimukset tierakenteissa. Teräsputkien alkutäytön on aina oltava tiivistetty. Halkaisijan väliarvoilla teräsputken EI interpoloidaan. (Lähde: InfraRYL, Taulukko 14342:T2 [31])

Taulukossa on esitetty vähimmäispeitesyvyydellä vaadittava kimmoinen taivutusjäykkyys kahdella eri putkikoolla aallotetusta teräsputkesta valmistetuille rummuille [31]. Vuonna 1992 on tehty Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratoriossa maahan upotettujen profiloitujen teräsputkien mitoitus halkaisijaltaan 500 mm ja sen alle oleville aallotetuille teräsputkille [35]. Sisähalkaisijaltaan yli 2 m oleville aallotetusta teräksestä tehdyille silloille on olemassa Liikenneviraston julkaisema Teräsputkisillat - ohje. Viimeisin versio on vuodelta 2014 [77].

Soveltamalla aallotetuille teräsputkisilloille suunnattua Liikenneviraston suunnitteluohjetta alle 2 m halkaisijaltaan oleville aallotetuille teräsputkille ylimitoittaa ne. Profiloitusta teräksestä valmistetuille halkaisijaltaan alle 2 m putkille kerääntyvien voimien määrää maaperässä ei tunneta. Teräsputkisillat-ohjeen avulla mitoitettuja alle 2 m halkaisijalla olevia putkien toimivuutta maaperässä ei ole tutkittu kansallisesti Suomessa eikä Ruotsissa. Ruotsalainen KTH ei ole toteuttanut suunnitteluohjeeseensa pohjautuen tutkimusta alle 2 m halkaisijalla oleville putkille niiden käyttäytymisestä maaperässä, johon Liikenneviraston Teräsputkisillat-ohje pohjautuu. Putkirakenteelle seuraa myötörajan ylittyminen ylimitoitettaessa putkea ja sen seurauksena ei tiedetä millainen muodonmuutos putkelle voi muodostua pitkällä aikavälillä. Halkaisijaltaan 1,5 m oleva Teräsputkisillat-ohjeen mukaisesti mitoitettu teräsputki voi toimia putkirakenteena maaperässä, mutta tulosten loogisuus pitäisi selvittää tapauskohtaisesti [21].

#### 3.4.7 Muoviputket

Muovirumpujen materiaalina käytetään InfraRYL [31] kappaletta 14343.1 noudattaen polyeteeni- ja polypropeenien standardien SFS 5906 [51] ja SFS-EN 13476-1 [65] vaatimusten mukaisesti. Muovirumpujen rakenteellinen kestävyysvaatimus tiealueilla perustuu rengasjäykkyyteen, joka tarkoittaa maan alla putkeen kohdistuvan ulkopuolisen paineen sietokykyä rakenteessa. Rengasjäykkyyden määrittäminen voidaan tehdä vakionopeusmenetelmällä (SFS-EN ISO 9969) [68] tai relaksaatiomenetelmällä (SFS 3433) [49]. Muoviputket jaotellaan asennuskohteiden mukaan rengasjäykkyydeltään ( $S_{tk}$ ) lujuusluokkiin: A, B ja C standardin SFS 5608 mukaan [50].

Luokka	Liikennemäärä	Rengasjäykkyys vähintään	Lujuusluokka
A	Raskas käyttö	$16 \frac{kN}{m^2}$	SN16
B	Keskiraskas käyttö	$8 \frac{kN}{m^2}$	SN8
C	Kevyt käyttö	$4 \frac{kN}{m^2}$	SN4

Kuva 39. Standardin SFS 5608 [50] muoviputkien lujuusluokkien jaottelu.

Rautatierummuiksi soveltuvilla 800 – 2 m halkaisijoilla polyeteenistä voidaan valmistaa halkaisijaltaan 2 m oleva putki joka saavuttaa rengasjäykkyyden SN10. Halkaisijaltaan 3 – 3,6 m halkaisijalla polyeteenistä valmistetulla putkella päästään SN4 rengasjäykkyyteen. Polypropeenista voidaan valmistaa putki, joka pääsee SN12 rengasjäykkyyteen 2 m halkaisijalla. Polyeteenin kimmomoduuli on  $1000 \text{ N/mm}^2$  ja polypropeenilla  $1350\text{--}1700 \text{ N/mm}^2$  [17]. Yleisesti todettuna rengasjäykkyys heikkenee halkaisijakoon kasvaessa. Muovin jäykkyyteen vaikutetaan seinämävahvuudella ja profiilin kennon ulkohalkaisijan koolla [28].



Kuva 40. Rataosuudelle Seinäjoki-Kaskinen pilottikohteena ratapenkereeseen asennettu DN/ID 1600 mm muovista valmistettu rumpuputki. (Lähde: VTT Testaustuoteseloste nro RTE347/02 [81])



Liikennevirasto on sallinut Kaskisten radalla Seinäjoki – Kaskinen välillä muovivalmisteen Oy KWH Pipe Ab (nykyinen Uponor) Weholite 1600 mm halkaisijaltaan olevan muovirummun asennuksen koekohteena. Kaskisten radalla on ainoastaan satunnaista tavaraliikennettä. VTT:n tekemän testaustuoteselosteen mittojen määrittelyllä rumpuputkessa havaittiin lievää epätasaista kasaanpainumista penkereessä. Kuvassa olevan pilottikohteen rumpuputken yläpuolinen täyttö on 1,55 m soratäyttö. Alla oleva taulukko on Oy KWH Pipe:n teettämästä VTT:n raportista vuodelta 2002 [81].

Näyte	Mittauskohta	Korkeus [%]	Leveys [%]	Soikeus [%]
Weholite-putki ID 1600 mm	Pohjoispää	1585	1603	1,1
	Keskellä	1569	1612	2,7
	Eteläpää	1604	1603	0,0

Kuva 41. VTT Weholite DN/ID 1600 mm putken mittaustulokset. (Lähde: Uponor)

#### 3.4.8 Komposiittiputket

Muovikomposiitin rakenteellinen mitoittaminen tapahtuu tapauskohtaisesti määrittelemällä vaadittu jäykkyys putkelle. Muovikomposiitista valmistetun putken etu on sen kuormituskestävyyden tarjoamassa skaalassa. Halkaisijaltaan 2 metriselle muovikomposiitista valmistetulle putkelle voidaan rengasjäykkyydeksi säätää 500 – 1 000 000 N/m<sup>2</sup> välillä, kohteen vaatimusten mukaisesti. Tämä tarkoittaa SN0,5 ja SN1000 rengasjäykkyyttä. Komposiittivahventeinen muoviputki on riittävän luja kestämään tunkkaamisesta koituvia voimia rakenteessa, jos se mitoitetaan kestämään ne rakenteellisessa suunnittelussa. Muovikomposiittiputken mitoittamiseen voidaan käyttää saksalaisia ATV järjestelmän ohjeita aukikaivamalla [2] tai tunkkaamalla [1] toteutettaville komposiittiputkille, tai vaihtoehtoisesti eurooppalaisilla standardeilla.

- EN 1796 Plastics piping systems for water supply with or without pressure – Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) based on unsaturated polyester resin (UP) [55]
- EN 12889 SFS-EN 12889 Trenchless construction and testing of drains and sewers [64]

- EN 14364 Plastics piping systems for drainage and sewerage with or without pressure. Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) based on unsaturated polyester resin (UP). Specifications for pipes, fittings and joints [64]
- SFS-EN 1610 Construction and testing of drains and sewers [54]
- CEN/TR 1046 Thermoplastics piping and ducting systems. Systems outside building structures for the conveyance of water or sewerage. Practices for underground installation [6]
- Amerikkalaisia mitoitusohjeita komposiittiputkille ovat ASTM D3262 (Viemäriputki), ASTM D3517 (Paineputki), ASTM 3754 (Viemärit teollisuuden paineputket) ja ASTM D2997 (Keskিপাকոisoimalla valettu lasikuituputki).

Saksalaiset ATV 127 [2] ja 161 [1] ovat mitoitusapojensa puolesta konservatiivisia verrattuna standardeissa esitettyihin mitoitusmenetelmiin nähden. Muovikomposiitista ATV:llä ja standardeilla mitoitettujen rumpujen laskennallisessa vertailussa ATV mitoitus sisältää suurehkoja varmuuskertoimet verrattuna standardeilla tehtäviin laskelmiin. Lisää standardeja Hobas-tuote-esitteessä [30][16].

### 3.5 Käyttöikämitoitus

#### 3.5.1 Yleistä

Lähtökohtaisesti rautatierummun käyttöikäksi on asetettu 100 vuotta. Vaatimuksella varmistetaan rumpurakenteen toiminnallisuus pitkäikäisenä rakenteena. Suunnittelussa pyritään huomioimaan kuivatusjärjestelmän toiminnallisuus olosuhdevaihteluissa. Rummun käyttöikään vaikuttavia tekijöitä ovat ympäröivä ympäristö, veden ominaisuudet, maaperässä itsessään vaikuttavat tekijät kuten happamuus ja sulfidipitoisuus, sekä rumpumateriaalin rasituskestävyys. Maaperän korkea pH ja sulfidipitoisen savien esiintyminen on mahdollista etenkin Suomen rannikolla vanhalla merialueella. Maaperän happamuus on korroosiota kiihdyttävä tekijä etenkin teräsputkelle. Käytännössä rummun pitkäaikainen kestävyys kuormia kantavana rakenteena ratapenkereessä ja suoriutuminen ympäristöstä koituvista rasituksista on edellytys rumpumateriaalivalinnassa rautatieverkkoon [27]. Maaperän sekä veden pH:ta ei mitata rumpupaikoilla [19].

Kaikki rautatiealueiden maaperät luokitellaan lähtökohtaisesti pilaantuneiksi maiksi. Rataliikenteen aiheuttamat ympäristörasitukset ja kalustosta sekä lastista aiheutuneet

vuodot rata-alueilla ovat perusteena luokitukselle. Pilaantuneiksi maiksi luetut maat esiintyvät harvoin radan pintarakenteita syvemmällä ratapenkereessä rumpujen tasolla, lukuun ottamatta satunnaisia esiintymiä teollisuuden käytössä olevilla rataosuuksilla mutta niissäkin esiintymät ovat olleet vähäisiä. Aikoinaan ratapölkkyinä käytetyt puiset parrut käsiteltiin kreosoottiöljyllä riittävän rasituskestävyyden saavuttamiseksi radan alle. Maahan kaivettuja kreosoottiöljyllä täytettyjä kuoppia on lähinnä löydetty ratapihoilta, joissa radanrakennusmateriaaleja säilytetään [20].

Aggressiivisen maaperän tekijöitä:

- sulfidisavi (pohjanlahden alue, itämeren entinen pohja)
- suoalueet (maaperän happamuus)
- orgaaninen materiaali penkereessä (rummun pintaa vasten)
- pilaantuneet maat

InfraRYL ohjeistaa luvussa 14340.1 eri rumpumateriaaleille korroosionkestävyys vaatimukset vaihtelevissa tie- ja katuolosuhteissa [31].

Taulukko 14340:T1. Rumpujen sallitut korroosionkestävyysluokat eri tie- ja katuolosuhteissa.

Rumpujen korroosiokestävyysluokat		Olosuhteet							
Luokkien määrittely / Olosuhteet N ja H	Luokat	Suolaamaton lievästi muu tie	tai suolattu tai suolaamattoman tai lievästi suolatun pää-tien liittymä	Suolaamaton tie ja katu	pää- katu	Lievästi päätie ja katu	suolattu katu	Voimakkaasti suolattu päätie ja sen liittymät	
		N	H	N	H	N	H	N	H
Sinkityt teräsputket	K1	x		x					
Maalatut tai ohuella polymeerillä pinnoitetut sinkityt teräsputket	K2	x	x	x	x	x			
Paksulla polymeerillä pinnoitetut sinkityt teräsputket	K3	x	x	x	x	x	x	x	x
Muoviputket									
Betoniputket, julkaisu <i>Betoniputkinormit</i>	K4	x	x	x	x	x	x	x	x
Olosuhde S			S		S		S		S
Paksulla polymeerillä pinnoitetut sinkityt teräsputket	K3		(x)		x		(x)		
Muoviputket									
Betoniputket, julkaisu <i>Betoniputkinormit</i>	K4		x		x		x		x

Merkintä x tarkoittaa, että kyseinen putkiluokka hyväksytään. Merkintä (x) tarkoittaa, että putki on toissijaisesti hyväksyttävä putkityyppi ja se on normaalisti sallittu suunnitelma-asiakirjojen mukaisesti.

Olosuhteiden määrittely, jos ei ole kohdekohtaista määrittelyä

- suolaamaton tie: PAB-tiet ja soratiet
- lievästi suolattu tie: muut tiet
- voimakkaasti suolattu tie: kaikki mo- ja mol-tiet sekä Keski- ja Etelä-Pohjanmaan, Pirkanmaan, Päijät-Hämeen, Kymenlaakson ja Etelä-Karjalan ja niiden länsipuolisten maakuntien valta- ja kantatiet, kun KVL > 6000 ajon/vrk
- N = neutraali olosuhde
- H = hapan olosuhde: veden pH < 5 tai veden tai ympäristäytteen sähkönjohtavuus > 50 mS/m
- S = syövyttävä olosuhde: sulfidipitoinen syövyttävä tai teollisuuden syövyttävä vesi tai syövyttävä sivutuoteympäristäyte.

Kuva 42. Rumpujen sallitut korroosionkestävyysluokat tie- ja katuolosuhteissa. (Lähde: InfraRYL, Taulukko 14340:T1 [31])

InfraRYL:in taulukosta voi päätellä, että olosuhtederasitusten puolesta muoviputki ja aallotettu teräsputki soveltuvat radan alle korroosiokestävyytensä puolesta. Äärimmäisen rasituksen putkelle aiheuttaa voimakas suolapitoisuus maaperässä tai vesiuomassa, mutta nämä ovat varsin harvinaisia ongelmia rataverkossa. Suolapitoisuutta on havaittu muutamilla alueilla rannikolla maaperässä [31].

Rumpuputkimateriaaleista ainoastaan aallotettu teräsputki peitetään suodatinkankaalla suojaamaan rummun ulkopintaa rakentamisen aikaisilta vaurioilta penkereessä mm. materiaalikohtaisten pinnoitusten kulumiselta ja seinämän vaurioitumiselta. Muut materiaalit kestävät työnaikaisia kuormia ja niiden seinämää ei pinnoiteta [26].

### 3.5.2 Betoniputket ja betonivalurummut

Betonin lujittuminen jatkuu rakentamisvaiheesta vielä useamman kymmenen vuoden ajan, joka on poikkeuksellista muihin materiaaleihin nähden. Betoni kestää hyvin ympäristöstä koituvia rasituksia, kuten maaperästä ja vedestä johtuvia kemiallisia rasituksia, jos se suojataan oikein. Betoni on pH:ltaan emäksinen materiaali. Betonin emäksisyys on suojaava tekijä betonissa käytetyille teräksille ja toimii niille korroosiolta suojaavana tekijänä. Betonin pinnalla tapahtuu ilmassa olevan hiilidioksidin imeytymistä betoniin ja ajan myötä se aiheuttaa betonin emäksisyyteen vaikuttavan huokosveden pH-arvon alenemista. Betonin alentunut emäksisyys mahdollistaa teräksen korroosion, jossa betonin teräkselle antama kemiallinen passiivikalvoksi kutsuttu suoja on hävinnyt ja rakenteessa vallitsevat otolliset happi- ja kosteusolot [4]. Betonilla on hyvä lämpötilavaihteluiden kestävyys [5].

Vallitsevien betonirakentamista koskevien määräysten ja ohjeiden mukaan suunniteltu betoni on tiivis ja luja rakennusmateriaali. Edellytyksenä kestäväälle betonille on riittävän suojauksen tekeminen rakenteelle. Betonin maan vastaisesta eristämisestä ohjeistetaan InfraRYL 42131.3.2 luvussa. Betonivalurumpujen ja -siltojen vedeneristys tapahtuu kermittämällä kannen pinta. Vedeneristys estää kosteuden ja mikrobien tunkeutumisen betoniin [12][20].

Betonista valmistetuille rakenteille, joissa käytetään lujitteena terästä on asetettu vaatimus betonipeitteelle. Betonipeitteen tehtävänä on suojata raudoitusteräksiä kemialliselta rasitukselta ympäristöstä, esimerkiksi kosteudelta ja suoloilta, jotka aiheuttavat teräksen pinnalla rakenteelle haitallista korroosiota ja betonin rikkoutumista. Vesistösilloille ja betonivalurummuille määrätty rasitusluokka vaatii 50 mm suojabetonin veden kanssa kosketuksissa oleville maatuille ja kansirakenteelle minimissään 40 mm suojabetonin suolaamattomassa ympäristössä. Tavanomaisilla ratasilloilla pakkasenkestävyys vaatimus on P30 [12].

Rakentamispaikan ympäristörasitusten aggressiivisuus jaotellaan XA1, XA2 ja XA3 -luokkiin [12]. Betonin vähimmäislujuusluokka ja vastaavat vähimmäissementtimäärät aggressiivisissa kemiallisissa ympäristöissä on lueteltu NCCI 2 luvussa 4.3 [12]:



	XA1	XA2	XA3
Väh. lujuusluokka	C30/37	C35/45	C40/50
Väh. Sementtimäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	300	320	330

Betonirakenteelle tyypillinen ongelma on pitkäikäisten kuormien aiheuttama viruminen ja halkeilu. Viruminen ja halkeilu tulee tarkastella betonirakenteen suunnittelussa. Betoniputkien suojabetonivaatimus on yli 500 mm sisähalkaisijaltaan olevalle putkelle vähintään 25 mm ulkoreunasta [3].

Maahan upotettuja betoniviemäreitä on kaupunkirakentamisessa saatettu suojata pinnoittamalla betonipinta uretaanilla hankekohtaisten vaatimusten täyttämiseksi [29][23].

Betonista valmistetuille putkille Betoniviemärit 2003 -käsikirja takaa yli 100 vuoden käyttöikää tutkimuksen perusteella [5]. Rautatierumpujen hallintaraportissa 2015 puolestaan todetaan 100 vuotta olevan betonirummulle rataympäristössä liian optimistinen tavoite erikoiskäsiteltynäkin [41].

### 3.5.3 Massiiviteräs- ja aallotetut teräsputket

Massiiviteräksestä valmistetut putket mitoitetaan kestäämään vaadittu elinikä maaperässä kerrospaksuuden avulla. Seinämän rakennevahvuus rautatierummulle on määritetty luvun 2.3.3 taulukossa, joka vaihtelee rummulta vaaditun aukon halkaisijan mukaan. Taulukon arvot on määritelty kokemusperäisen rakentamisen ja empiirisen tutkimustiedon pohjalta. Teräsputkipaalujen korroosiota on tutkittu ja Jouko Törnqvistin kirjoittamassa VTT:n selvityksessä vuodelta 2004 selviää, että sadan vuoden aikana paalun ulkopinnassa tapahtuu tavanomaisessa maaperässä 1,2 – 2,0 mm korroosiota. Teräsputken korrosio on tutkitusti hitaampaa tiivistettyä-, kuin tiivistämätöntä maata vasten. Tiiviissä penkereessä korroosion reaktiotuotteet eivät pääse kulkeutumaan pois putken pinnalta ja ajan saatossa putken korrosio hidastuu. Tutkimuksen ulkopuolelle jäi aggressiivisen humuspitoisen maan vaikutus teräsputkipaalun pinnassa. Tunnetusti runsas eloperäinen maaperä on kaikkein haitallisin teräkselle ja edesauttaa korroosiota putken pinnalla muihin maalajeihin nähden. Ratapenkereen rumpua ympäröivän maa-aineksen aggressiivisuus on vähäistä rakennetuilla radoilla massanvaihtojen vuoksi. Maa-aines ohjeistetaan aukikaivamisen, sekä uuden rummun rakentamisen yhteydes-

sä vaihdettavaksi putken alle ja ympärille [76]. Massiiviteräsputkille on mahdollista tehdä HDPE –pinnoitus [24].

Teräsrakenteiden suunnittelun eurokoodissa SFS-EN 1993-5 + AC [60] on taulukko maahan asennettujen suojaamattomien paalujen ja ponttilevyjen korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemiseen suositeltavat arvot pohjavedenpinnan ylä- ja alapuolella eri olosuhteissa, jota noudattamalla voidaan arvioida korroosiovara seinämän mitoituksessa, kun tiedetään rumpupaikan olosuhteet maaperälle ja virtaavalle vedelle.

Suunnitelmassa edellytetty käyttöikä	5 vuotta	25 vuotta	50 vuotta	75 vuotta	100 vuotta
Häiriintymättömät luonnonmaat (hiekkä, siltti, savi, liuske...)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Pilaantuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiiviset luonnon maat (suo, räme, turve...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Tiivistämättömät ja ei- aggressiiviset kivennäismaatäytöt (savi, liuske, hiekkä, siltti...)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Tiivistämättömät ja aggressiiviset täytemaat (tuhka, kuona...)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75
Huomautukset:					
1) Korroosionopeudet tiivistetyissä täytöissä ovat hitaampia kuin tiivistämättömissä. Tiivistetyissä täytöissä taulukon luvut jaetaan kahdella.					
2) 5 ja 25 vuoden arvot perustuvat mittauksiin, kun taas muut arvot on ekstrapoloitu.					

Kuva 43. Maahan asennettujen suojaamattomien paalujen ja ponttilevyjen korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen suositeltavat arvot [mm], pohjavedenpinnan ylä- tai alapuolella. (Lähde: SFS-EN 1993-5 + AC Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 5: Paalut: Taulukko 4-1 [59])

Rummun läpi virtaava vesi aiheuttaa itsessään hapettumista ja hienoaineksen kulkeutumisesta seuraa kuluttavaa eroosiota putken pinnalla. Sileä suojaamaton teräsputki on myös altis ilmassa olevalle hapelle ja sen aiheuttamalle korroosiolle virtaama-alueen yläpuolella putken seinämässä, jota puolestaan kiihdyttää entisestään vapaa ilman virtaus. Teräsputkisillat, suunnitteluohjeessa on esitetty teräsputkisilloille käytettävistä kulumisnopeuksista eri olosuhdeluokissa. Teräkselle on annettu olosuhdeluokasta riippuen 30 – 120 µm/v. Tämä tarkoittaa sadan vuoden aikana 3 – 12 mm korroosiota. Teräsputkisiltojen käyttöikä perustuu putken sinkitykseen ja lisäpinnoittamiseen.

Olosuhdeluokka	1	2	3	4
Teräksen kulumisnopeus [ $\mu\text{m/v}$ ]	30	45	75	120

Kuva 44. Teräksen kulumisnopeus olosuhdeluokittain. (Lähde: Teräsputkisillat suunnitteluohje [77])

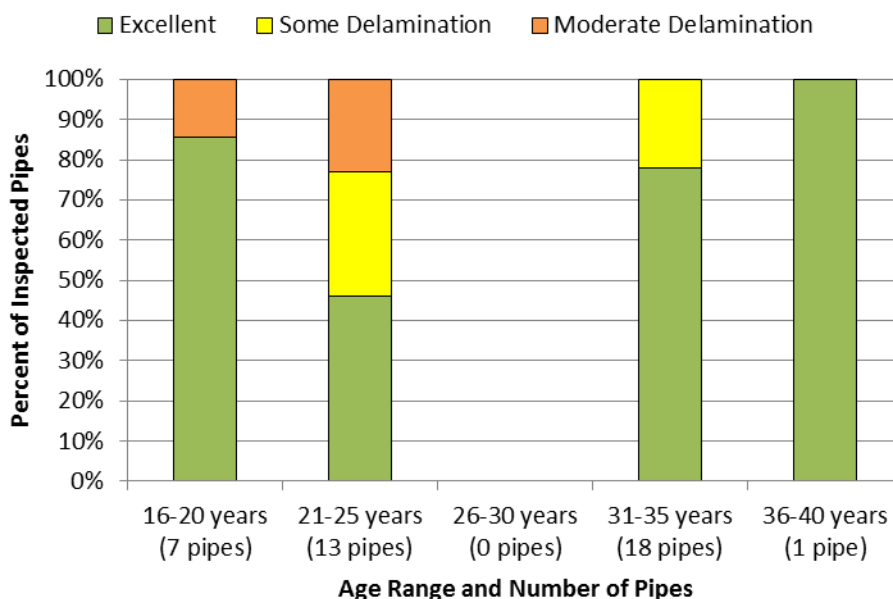
Poraamalla tai tunkkaamalla asennettavan teräsputken ympärille ei voida tehdä uusilta rakennettavilta rummuilta vaadittavaa täyttöä putken ympärille, joka sisältää rummun eristämisen ympäröivästä maaperästä. Massiiviteräsputken sisäpinnan korroosiota ei tarvitse huomioida, jos teräsputki mitoitetaan riittävän suureksi, joka mahdollistaa erillisen virtausputken asentamisen rummun sisään. Tämä onkin hyvin tyypillistä rumpuja rakennettaessa rataverkkoon ja rakentamisessa on suosittu sileän teräsputkirummun sisälle asennettuna sekä teräsputkea, että muovista valmistettua putkea virtausputkeksi. Teräsrummun ja virtausputken väli eristetään pumpaamalla polyuretaania seinämien väliin tulppaamalla rummun toinen pääty estämällä eristeen valuminen ulos. Rummun korjausrakentamisen kannalta tämä on viisasta ja kauaskantoista, koska käytännössä rummun korjaaminen vaatii ainoastaan virtausputken vaihdon aukikaivamisen tai uudelleensujuttamisen sijaan. Toisin sanoen rummun korjattavuus helpottuu vaivattomammaksi ja ylläpidolliset kustannukset pienenevät [26].

Nykyisin aallotetuissa teräsputkisilloissa otetaan huomioon mitoituksessa sujutusvara. Teräsputkisillat ohjeessa [77] aallotetulle teräsputkelle asetetaan materiaali vaatimuksena maaperään asennetun putken pinnan kuumasinkitys jatkuvatoimisella kuumausotusmenetelmällä [63] ja polymeeripinnoitetta suojaamaan putken rakennetta korroosiolta. Pelkällä kuumasinkityksellä ollaan saavutettu aggressiivisessa maaperässä pH-arvon ollessa 3 jopa 40 vuoden käyttöikä. Kuumasinkityillä aallotetuilla teräsputkilla saavutetaan mitoituksellisesti riittävä 50 vuoden käyttöikä pH:lla 6. Pinnoittamalla sinkitetty pinta maan tai virtaavan veden pH voi olla 4 ja muovipinnoitteella 3. Rautateille asennettavat aallotetut teräsputket ovat kaikki muovipinnoitettuja, joten ne kestävät hyvin happamissa olosuhteissa. Teräsputken pinnoittamisen vaatimuksista on säädetty InfraRYL luvussa 14342.1 Teräsrumpujen materiaalit [31]. Penkereeseen asennetulle aallotetulle teräsputkelle tehdyn ympäristäytön tiivistäminen toimii osittain korroosiosuojana [21].

Aallotettu teräsputki on altis veden laadun ja virtauksen aiheuttamalle korroosiolle putkessa. Vedestä aiheutuva korroosio voi sisältää syövyttäviä aineita joko liuenneena tai

hiukkasina. Virtaava vesi ja sen mukana kulkeutuva maa-aines aiheuttaa putken pinnalla kulumista. Putken käyttöiän suunnittelun lähtötiedoksi ja olosuhdeluokan määrittelyyn on selvitettävä virtaavan veden pH ja virtausnopeus. Mitoitusvirtausnopeus lasketaan uoman keskiylivirtaamasta, jonka arvo saadaan (Ympäristökeskuksen) aukkolausunnossa mainitusta ylivirtaamasta (HQ20) ja vastaavasta poikkipinta-alasta vedenkorkeudella HW20 kertomalla näin saatu virtausnopeus luvulla 0,65 [77].

Polymeeripinnoitettujen aallotettujen teräsputkien korroosiota on tutkittu NCSPA:n toimesta Pohjois-Amerikassa. NCSPA:n aallotettujen teräsputkien pitkäaikaiskenttätutkimus Long-term investigation of polymer coated corrugated steel pipe [34] vuodelta 2012 todensi, että polymeeripinnoite toi putkelle elinikää 80 vuotta. 16-40 vuoden ikäisiä putkia seurattiin vaihtelevissa olosuhteissa ja alle 5% putkista oli kärsinyt pinnoitteen irtoamisesta putken pinnalta. Tutkimuksessa seurattiin yhteensä 51 putken käyttäytymistä. Seurannassa olleiden putkien käyttöiät vaihtelivat 16 – 38 välillä.



Kuva 45. Polymeeripinnoitteen kunto putken iän funktiona. (Lähde: NCSPA Long-term field investigation of polymer coated corrugated steel pipe, Kuvaaja 4 [34])

Pylväsdiagrammissa NCSPA:n raportissa seurannassa olleet putket ositetussa pylväskaaviossa. Polymeeripinnoitteen kunto ilmoitettuna putken iän funktiona. Vihreä väri pylväissä kuvaa kunnoltaan erinomaisten putkien osuutta. Keltainen väri kertoo lievästä- ja punainen kohtalaisesta polymeeripinnoitteen irtoamisesta putken pinnalla [34].

### 3.5.4 Muovi- ja komposiittiputket

Muovi- ja komposiittiputkissa käytetyt polymeerimuovit ovat viskoelastisia materiaaleja, joka tarkoittaa lämpötilan ja kuormitusnopeuden vaihtelusta johtuvaa käyttäytymistä. Lämpötilan ollessa alhainen tai kuormitusnopeuden ollessa suuri, polymeeriketjujen on vaikea liikkua rakenteessa toistensa suhteen. Tästä seuraa polymeerin käyttäytyminen ensin elastisesti ja sitten plastisesti, kuten metallit käyttäytyvät. Lämpötilan kasvaessa tai kuormitusnopeuden laskiessa hitaammin polymeerit liikkuvat helposti toistensa suhteen ja käyttäytyvät jähmeän nesteen tavoin, kuten mm. lasit käyttäytyvät. Muovikomposiiteissa lujittamiseen käytetyt lasikuidut ovat käytännössä lähes virumattomia. Komposiittivahvistetun putken viruminen on hartsimatriisin virumista ja sen suuruus riippuu oleellisesti muovimatriisiin kohdistuvasta kuormasta. Suurilla pitkäaikaskuormituksilla osa kasvavista muodonmuutoksista johtuu lisääntyvästä matriisiaineen säröilystä sekä kuitujen ja matriisin välisten sidosten peittämisestä. Standardissa (Kestomuovien pitkäaikaiskestävyyden todentaminen) esitetään kestomuovien pitkäaikaiskestävyyden todentamismenetelmät ekstrapoloimalla [67][33][36].

Muoville käyttöiän kannalta kriittisin tekijä on jännityssäröily rakenteessa, jonka seurauksena putken kantokyky heikentyy. Muoville ominaista on myös vanheneminen ja sen myötä haurastuminen. Haurastumista kiihdyttävä tekijä on auringonvalosta johtuva uv-säteily luonnossa. Rumpuputkena käytetty kestomuovi on altis harsoontumiselle, joka näkyy muovissa värin muuttumisena sameaksi. Harsoontumisesta seuraa materiaaliketjussa kiteisten alueiden suoristuminen, joka tuottaa materiaaliin tyhjiä alueita. Harsoontuminen ei itsessään ole vielä murtuma, mutta sen aiheuttama onkaloiden kasvaminen voi johtaa muovin murtumiseen. Polymeerin termisistä olosuhteista keskeisin on lasimuutoslämpötila jota tarkastellaan materiaalin kimmomoduulin muuttumisena lämpötilan funktiona [33][36].

Muovikomposiitin kemiallinen kestävyys riippuu rakenteessa käytetystä tyydyttymättömän polyesterihartsin tyypistä. Komposiiteissa yleisesti käytetty E-lasi on herkkä happoille ja emäksille. Tyydyttymättömät polyesterit kestävät yleisesti suhteellisen hyvin vettä, vahvoja emäksiä, heikkoja happoja, rasvoja, öljyä sekä monia orgaanisia liuottimia. Lasikuidulla vahvistetun polyesterin veden ja kemikaalien kestävyyttä parannetaan yleensä lisäämällä komposiittirakenteen pinnalle hartsikerros. Säänkestävyyteen perustuvissa tutkimuksissa on havaittu, että pintahartsillisten komposiittien lujuudet eivät muuttuneet 2,5 vuoden aikana normaaleissa ulkoilma olosuhteissa. Pinnoittamattomilla

komposiiteilla tehdyissä kokeissa havaittiin komposiitin lujuuden laskeneen noin 3-5% neljässä vuodessa. Orgaaniset kemikaalit sekä hapettavat ja pelkistävät liuokset vaikuttavat suoraan polyesterihartsin eivätkä hartsin ja lasikuidun välisiin sidoksiin. Hapettavia happoja polyesteri ei kestä lainkaan [33][36].

Kemikaaliryhmät	Tyydyttymättömän polyesteri	Kemikaaliryhmät	Tyydyttymättömän polyesteri
vesi	3	Klooratut hiilivedyt	2
Suolaliuokset	4	Alkoholit	4
Heikot hapot	2	Esterit	2
Vahvat hapot	0	Ketonit	1
Hapettavat hapot	0	Eetterit	2
Fluorihappo	0	Aromaattiset hiilivedyt	0
Vahvat orgaaniset hapot	0	Bensiini	4
Heikot emäkset	4	Voiteluaineseokset	4
Vahvat emäkset	4	Mineraaliöljyt	4
Alifaattiset hiilivedyt	4	Rasvat ja öljyt	4
Tyydyttymättömät klooratut hiilivedyt	0	Terpeenit	2

Kuva 46. Tyydyttymättömän polyesterin kemiallinen kestävyys asteikolla 0-4. 0=ei kestä, 4=kestää. (Lähde: Muovikomposiittien soveltuminen Suomen tieoloihin: Kappale 3, Taulukko 1 [36])

Muovin ja muovikomposiitin käyttöikään vaikuttavia mekaanisia rasituksia ovat viruminen ja väsyminen ja ne tulee huomioida mitoittaessa rakennetta. Viruminen on rakenteessa ajan saatossa tapahtuvaa muodonmuutoksen kasvamista kuorman pysyessä vakiona. Riittävän pitkän ajan kuluessa viruminen aiheuttaa rakenteeseen murtumista. Virumisen kanssa samanlainen ilmiö on jännitysrelaksaatio, jossa kuormitetun kappaleen jännitys laskee ajan funktiona. Alla eräiden polymeerien muodonpysyvyysmuutoslämpötiloja 1,8 MPa:n kuormituksella (sallitaan tietty vakio muodonmuutos) [33][36].



Polymeeri	Muodon pysyvyyslämpötila (°C)
Polyeteeni (UHDPE)	40
Polypropeeni (PP)	60
Polyamidi (PA6,6 + nylon)	90
Polyamidi-imidi (PAI)	280

Mikro-organismit voivat aiheuttaa muovipohjaiselle materiaalille vaurioitumista itsessään tai yhdistettynä useampaan mekanismiin. Mikro-organismeja ovat mm. bakteerit, levät, sienet ja virukset. Mikro-organismit voivat käyttää ravinnokseen muovin sisältämiä aineita tai voivat vaikuttaa kemiallisesti muoviaiaineeseen entsyymien ja aineenvaihduntatuotteina syntyneiden orgaanisten happojen avulla. Tyypillisiä mikro-organismien aiheuttamia happoja ovat rikkihappo, typpihappo ja hiilihappo. Rikkihappoa esiintyy tavallisesti myös happamissa sulfaattimaissa. Tehokkaimmin mikro-organismit toimivat lämpimissä ja kosteissa olosuhteissa. Tyydyttymättömästä polyesteristä valmistetulla muovikomposiitilla on aiemmin esitetyn taulukon mukaan heikko kestävyys happoja vastaan. Tämän vuoksi tyydyttymättömistä polyestereistä valmistettujen muovikomposiittiputkien käyttöä tulee välttää olosuhteissa, joissa maaperästä saattaa löytyä happoja tuottavia bakteereja. Mikro-organismit pystyvät käyttämään ravinnokseen pienimolekyyllisiä muoveja, joiden suhteellinen moolimassa on korkeintaan 500 g/mol. Muovikomposiiteissa käytetty tyydyttymättömän polyesterin keskimääräinen moolimassa on 1000 – 5000 g/mol. Mikro-organismit eivät siis vaikuta komposiitin sisältämään tyydyttymättömään polyesteriin, mutta muovikomposiiteissa käytetyt lisäaineet kuten liukuaineet, stabilisaattorit ja varsinkin eräät pehmitinaineet voivat hajota mikro-organismien vaikutuksesta pitkällä aikavälillä. Tätä hajoamista vastaan voidaan kuitenkin suojautua valitsemalla lisäaineet mikro-organismeja vastustaviksi [33][36].

## 4 Johtopäätökset

Rautatierummulta vaaditaan rautateiden alusrakenteiden vaatimusten mukaisesti 100 vuoden käyttöikää. Nykyisin rakennetaan vain vähän uusia rautatierumpuja, johtuen vähäisestä tarpeesta rakentaa uusia rautateitä. Suurin osa toteutettavista rummuista on korjauskohteita, joissa vanha rumpu korjataan tai se poistetaan käytöstä uusimalla kokonaan. Vanha rumpu saatetaan poistaa käytöstä tukkimalla, jolloin rinnalle toteutetaan tunkkaamalla tai poraamalla uusi rumpu johtamaan vesiuoma penkereen läpi. Rumpumateriaalina käytetyin putki on sileä teräsputkirumpu. Sen käyttöä puoltaa yksinkertaisesti rakentamisen vaivattomuus ratapenkereeseen poraamalla tai tunkkaamalla. Betoniputkien käyttö on vähentynyt. Betonivalurumpuja rakennetaan tapauskohtaisesti tarpeen vaatiessa, mutta muihin materiaaleihin nähden selkeästi vähemmän.

Rumpurakennuspaikalla tehdään haastatteluissa ilmenneen tiedon mukaan liian suppeat pohjatutkimukset ja pH arvoa ei mitata maaperästä eikä virtaavasta vedestä lainkaan. Mitä happamammat ympäristö-olosuhteet, sitä aggressiivisempi korroosio betoni- ja teräsputkelle on. Tämä on kehityskohta etenkin rummulta vaaditun materiaalin käyttökäymäärityksen näkökulmasta. Ympäristö-olosuhteiden tulisi määrittää rumpupaikalle soveltuva putkimateriaali korroosiokestävyydessä käyttöikämitoituksellisesti. Tästä näkökulmasta pintakäsitellyn aallotetun teräsputken, muovin- ja muovikomposiitin käyttö olisi rautatierumpumateriaalivalinnassa perusteltua, koska ne sietävät ympäristön aiheuttamaa korroosiota.

Uuden rummun mitoittamisessa keskeistä on myös huomioida tulevat olosuhdemuutokset aukon koossa. Rummulta vaadittavan 100 vuoden käyttöiän näkökulmasta tulisi rummun aukko mitoittaa sallimaan veden ilmastomuutoksesta johtuvat kohonneet virtausvaihtelut ja mahdollisuus uuden putken sujuttamiselle korjattavuuden näkökulmasta.

Rautatierumpujen yleisimmät vaurioitumistavat ovat rumpujen päiden tukkeutuminen, täyttöjen valuminen rummun sisään saumoista ja rummun siirtymisestä aiheutuneet vauriot rakenteelle. Rautatierumpujen Hallintaraportti 2015 mukaan kivirummut ja betoniputkilla jatkettu kivirummut näyttävät olevan rummuista ongelmallisimpia. Sileäpintaissa teräsputkissa ei toistaiseksi ole havaittu ongelmia mutta raportin mukaan selityk-

senä on niiden verrattain lyhyt ikä rataverkossa käytettyinä rakenteina, verrattuna muihin materiaaleihin.

Betoniputkien liikennekuormana käytetään 250 kN akselikuormaa Betoniputkinormit 2001 mukaan. Betoniputkinormeissa 2001 on maininta 300 kN akselikuormista rautateillä. Erkki Mäkelän lisensiaattityön mukaan nykyisin vaadittu 350 kN akselikuorman kestävyys saavutettaisiin rakenteellisesti teoreettisella tasolla 1,4 m peitesyvyydellä betoniputkille. Lisensiaattityön tutkimuksessa suurin rumpu on 1400 mm halkaisijalla oleva Dr-luokan raudoitettu putki. Sitä suurempia rumpuja tutkimuksessa ei huomioida. Lisensiaattitutkimuksessa todetaan, ettei ole syytä muuttaa 1,4 m peitesyvyytsvaatimusta rummuille. Putken rakenteelliseen kestävyysvaikutusta vaikuttaa rummun seinämä/halkaisija –suhde. Betoniputkirummuille asetettuun 100 vuoden käyttöikään tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti, koska teoreettinen laskeminen ei huomioi kaikkia käyttöikää laskevia osatekijöitä, kuten asennuksen oikeellisuus, mahdolliset routanousut, pohjamaan epäjatkuvuuskohdat, betonin laatuvariaatiot ja muut ennakoimattomat tekijät.

Betonirummut joutuvat uomassa tilanteeseen, jossa ne kastuvat ja kuivavat lukuisia kertoja ympäri vuoden. Tämä aiheuttaa betonissa karbonatisoitumista, joka luo betonissa käytetyille teräksille korroosiovaaraa ja alentaa betonirakenteen käyttöikää. Betoniputkilla on raudoituksen betonipeitteenä 25 mm ja muilta betonirakenteilta vaaditaan rautatieoloissa terästen betonipeitteeksi vähintään 40 mm. Maata vasten tehtävillä valuilla vaatimus on 50 mm. Betonipeitteen vähäisyyden vuoksi betoniputkissa voitaisiin käyttää rosteria raudoitusteräksenä tai erikoistilauksena käyttää paksumpaa peitetä seinämässä. Betoniputkien käyttöikästä voitaisiin tehdä tutkimus empiirisen aineiston ja suunnittelutietojen pohjalta. Empiiristä aineistoa riittää teoreettisen ja rakentamisen aikaisen tiedon lisäksi tierakentamisen puolelta, missä rummut ovat joutuneet mm. suolarasitetuiksi vaihtelevissa kosteusoloissa. Betoniputkirumpujen osalta on syytä varautua 100 vuoden käyttöikään varauksella ulkoisten rasitusten aiheuttamien vaikutusten vuoksi. Betoniputkille ei ole esitetty pakkasrasitusluokitusta. Betoniputkien virtauspinnan pinnoittaminen uretaanilla lisäisi käyttöikää.

Massiiviteräspanputket kohtaavat eriarvoisen ympäristörasituksen lähtökohtaisesti auki-kaivettavana tai tunkkaamalla/poraamalla toteutettavana rakenteena. Auki-kaivettaessa putken ympärillä oleva maa-aines vaihdetaan täytön yhteydessä, mutta penkereeseen

sujutettavan rummun ympärystäytöksi jää penkereen maa-aines. Tämä vääjäämättä vaikuttaa teräsputken saavuttamaan käyttöikään. Rumpujen korjausohjeessa RUM-KO:ssa ei vaadita massiiviteräsputkille minkäänlaista käyttöikäsuojasta, kun sitä vastoin aallotetuille teräsrummuille on annettu määräys kuumasinkityksestä ja pinnoittamisesta. Aukikaivulla toteutettavien sileiden teräsputkien ulkopintaan voitaisiin tehdä pinnoittaminen käyttöiän lisäämiseksi korroosiota vastaan. Massiiviteräsputket voidaan tilata HDPE-pinnoitteella.

Aallotettujen teräsputkien rakenteellinen kestävyys tulisi tutkia. Teräsputkisillat ohjeen mukaisesti mitoittamalla kierresaumatun teräsputken seinämävahvuus ylityttää ja sen käyttäytymistä maaperässä ei näin ollen tunneta. Aallotettu teräsputki on varteenotettava materiaali rautatierummuksi oikein mitoitettuna, ja käyttöiän puolesta se kestää pinnoitettuna aggressiivisissakin ympäristö-olosuhteissa hyvin.

Muovi- ja muovikomposiittiputket ovat sallittuja rumpurakenteita radoilla mm. Norjassa ja Ruotsissa. Laskennallisesti muovista ja muovikomposiitista valmistettu rumpu kestää junakuorman riittävällä peitesyvyydellä. Muoviputken käyttöä puoltaa sen kyky sietää ympäristörasituksia ja rakenteellisesti muovi mukautuu maaperään hyvin. Muoviputkelle kriittistä on täytön ja tiivistämisen tekeminen huolellisesti, kuten aallotetuille teräsputkille, sen rakenteellisen toimivuuden kannalta maaperässä. Muoviputken ongelmana on viruminen ja jännityssäröily, mutta maahan asennettuna riittävällä peitesyvyydellä näiden ei kuitenkaan pitäisi olla käyttöiän näkökulmasta rajoittavia tekijöitä.

Putken sallitulle painumalle ei ole annettu rajoja. Rumpujen kuntotutkimuksessa kerätyistä tiedoista voitaisiin asettaa rummuille jonkin asteinen sallittu painumaraja, jonka ylityttyä pyrittäisiin toimenpiteisiin rummun toimivuuden takaamiseksi vesiuomassa. Rummun toimimattomuutta tarkkaillaan virtauskyvyn heikentymisen mukaan.

Rumpumateriaalin valitsemiseen rumpupaikalle vaikuttaa moni tekijä. Valetut betonirummut ovat järeitä ja pitkäikäisiä rakenteita. Betoniputki on hyvä materiaali uusille radoille, jos maaperä ei ole altis painumille, koska se kestää hyvin työaikaista käsittelyä sekä kuormia penkereessä. Sileää teräsputkea puoltaa sen asentamisen vaihtoehtot ratapenkereen aukikaivamisen lisäksi poraamalla ja tunkkaamalla, sekä sen erinomainen kyky kantaa ympäristöstä koituvia voimia. Aallotettu teräsputki on edullinen, kestää korroosiota riittävällä pinnoittamisella ja tiivistetyllä täytöllä, ja se mukautuu

maaperään muodonmuutostilanteissa profiilinsa ansiosta. Muovi- ja muovikomposiitilla vahvistettu putki on luja, kantaa maaperässä hyvin eikä ole korroosioherkkä materiaali, jos se ei pääse murtumaan.

Eri rumpuputkimateriaalien pitkäaikaista kuormituskestävyyttä ja käyttöiällistä rasituskestävyyttä pitäisi tutkia. Rumpumateriaalien ominaisuuksien välisiä eroavaisuuksia ei voi numeerisesti tulkita rengasjäykkyysskokeella, koska se ei huomioi putken pituussuunnassa johtuvia jännityksiä ja niiden vaikutuksia rakenteelle. Betoniputket voidaan mitoittaa rakenteellisesti standardin avulla. Jäykät massiiviteräspanputket ja komposiittisekä muoviputket on mahdollista mitoittaa rengasjäykkyyden avulla, mutta aallotettuja teräspanputkia taas ei. Jäykkä putki käytännössä kantaa kaikki ympäristöstä kantautuvat kuormat ja joustava putki puolestaan mukautuu maaperään sallien lieviä venymiä rakenteessa menettämättä kantokykyään. Rumpumateriaalien tasavertaisen kohtelun mahdollistamiseksi rautatierummun mitoittamisessa voitaisiin käyttää Tiehallinnon julkaisun (Tietoa tiensuunnitteluun nro 79A) Suurten rumpuputkien rakennemitoitusta koskevat laatuvaatimukset [78] -ohjeen mukaista käytäntöä, jossa rumpuvalmistaja todentaa omalla sovelluksellaan rummun rakenteellisen toimivuuden asennusympäristössä. Rumpumateriaalilta vaadittaisiin ehtona, että se on valmistettu tai tuotu markkinoille muussa Euroopan unionin jäsenmaassa, ja että sen testaukset ja tarkastukset on valmistajamaassa tehty Suomessa voimassa olevien määräysten mukaisesti. Rumpuputkilla tulisi olla CE-merkintä tai ETA eurooppalainen tekninen hyväksyntä.

## 5 Kiitokset

Ensinnäkin haluan kiittää Jumalaa elämän lahjasta, kyvystä opiskella ja mahdollisuudesta työskennellä rakennustekniikan parissa. Tahdon kiittää perhettä ja ystäviä tuesta sekä kannustuksesta opintojeni aikana.

Oli suuri etuoikeus saada toimeksianto insinööriyölle Liikennevirastolta ja päästä toteuttamaan se Sweco Rakennetekniikan siltaosaston alaisuudessa. Tahdon kiittää Liikenneviraston silta-asiantuntija tekniikan lisensiaatti Sami Noposta, Sweco Rakennetekniikan siltaosaston osastopäällikkö diplomi-insinööri Pertti Kaistaa, Sweco Rakennetekniikan sillankorjausosaston osastopäällikkö diplomi-insinööri Risto Parkkilaa sekä työelämästä eläkkeelle siirtynyttä Finnmap Infra Oy:n rumpusuunnittelija diplomi-insinööri Vesa Oksasta insinööriyöni ohjauksesta. Lisäksi kiitos Oy ViaCon Ab:n Jouko Selkämaalle johdattuksesta aiheeseen. Kiitokset myös VR Track Oy:n Janne Wuorenjuurelle rautatierumpujen ylläpitoon liittyvästä informaatiosta. Insinööriyötä Metropolia Ammattikorkeakoulun puolelta ohjanneelle lehtori Anne Pietilälle kiitos sujuvasta kommunikaatiosta ja jouhevasta yhteistyöstä.

Insinööriyössä mukana olleille materiaalivalmistajille edustajineen, rautatierumpujen suunnittelijoille, rumpujen rakentajille ja viranomaiselle teknisen tiedon jakamisesta, sekä hyvästä yhteistyöstä kiitos.



## Lähteet

[1] Arbeitsblatt DWA-A 161 Statische Berechnung von Vortriebsrohren (Tunkattavien putkien staattiset laskelmat)

[2] ATV-DVWK-A 127E Static Calculations of Drains and Sewers (Kanavien ja viemäriputkistojen staattiset lujuuslaskelmat)

[3] Betoniputkinormit 2001, Suomen kuntatekniikan yhdistys (SKTY), Edita Helsinki 2001

[4] Betonitekniikan luentomoniste, Metropolia AMK, Helsinki 2014.

[5] Betoniviemärit 2003 – käsikirja. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 2003, ISBN 952-5075-51-6.

[6] CEN/TR 1046 Thermoplastics piping and ducting systems. Systems outside building structures for the conveyance of water or sewerage. Practises for underground installation

[7] CEN/TR 1295-2 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading. Part 2: Summary of nationally established methods of design.

[8] CEN/TR 1295-3 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading - Part 3: Common method.

[9] CEN/TR 1295-4 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading. Part 4: Parameters for reliability of the design.

[10] Compression load test run of SSAB steel pipes, TTY, Department of Civil Engineering 2015.

[11] Design of soil steel composite bridges, Lars Petterson, Håkan Sundqvist. KTH Arkitektur och samhällsbyggnad. ISSN 1103-4289. ISSRN/KTH/BKN/R-8-SE. TRI-TABKN. Report 112, 4th Edition 2010.

[12] Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu - NCCI 2, Liikenneviraston ohjeita 25/2014, ISBN 978-952-255-484-0. 87 s.

[13] Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu - NCCI 7, 7.11.2013, Liikenneviraston ohjeita 35/2013, ISBN 978-952-255-364-5. 133 s.

[14] Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1, Liikenneviraston ohjeita 24/2014, ISBN 978-952-255-483-3. 111 s.

[15] FEM –selvitys tierumpuja ympäröivästä jännitysjakaumasta, Tiehallinto sisäisiä julkaisuja 39/2002, TIEH 4000350-v

[16] Haastattelu: Aki Litokorpi, Hobas Oy

[17] Haastattelu: Anders Andtbacka, Uponor Oy

[18] Haastattelu: Antti Perälä, SSAB Oy

[19] Haastattelu: Arttu Tuominen, SWECO Oy

[20] Haastattelu: Janne Wuorenjuuri, VR Track Oy

[21] Haastattelu: Jouko Selkämaa, Rumtec / Oy ViaCon Ab

[22] Haastattelu: Lännen Alituspalvelu Oy

[23] Haastattelu: Mika Tulimaa, Rudus Oy

[24] Haastattelu: Pertti Kaista, Sweco Rakennetekniikka Oy

[25] Haastattelu: Tero Hynninen, Styrud Boreal Oy

[26] Haastattelu: Tommi Kämppi, Liikennevirasto

[27] Haastattelu: Vesa Oksanen, Finnmap Infra Oy

[28] Haastattelu: Ville Mäkinen, Virtain Muovityö Oy

[29] Haastattelu: Virpi Liukkonen, Ruskon Betoni Oy

[30] HOBAS Asennusohjeet, HOBAS System Polska Sp. Z o.o. 2011

[31] Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset InfraRYL2010, Infra NET (PDF Versio)

[32] Keksintöjen kirja - Tiet ja maakulkuneuvot, WSOY 1931, s. 241.

[33] Konstruktiomateriaalit luentomoniste, Lappeenranta University of Technology, 2012.

[34] Long-term field investigation of polymer coated corrugated steel pipe, NCSPA Dallas USA 2012. 52 s.

[35] Maahanupotettujen profiloitujen teräsputkien mitoitus, Nro TeRT-92-03 Espoon Teknillinen Korkeakoulu 1992. 22 s. + 3 liitettä.

[36] Muovikomposiittiputken soveltuminen tierummuiksi ja silloiksi Suomen oloihin diplomityö, Aalto Yliopisto 2014. 100 s. + 9 liitettä.

[37] Radanpidon tekniset ohjeet, Sisällysluettelo, Liikennevirasto 16.03.2016

[38] Raiteen, ratapenkereen ja -rummun yhteistoiminta, Erkki Mäkelä lisensoitun tutkimus, Tampereen teknillinen yliopisto. 163 s. + 7 liitesivua.

[39] Ratatekniset määräykset ja ohjeet, RAMO 13, Radan tarkastus, Ratahallintokeskus 27.9.2004

[40] Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3: Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 17/2014. ISBN 978-952-255-454-3.

[41] Rautatierumpujen hallintaraportti 2015, Janne Wuorenjuuri

[42] Rautatierumpujen rakenteellinen kestävyys - Kirjallisuusselvitys Kandityö, Antti Artukka, TTY 2013. 41 s. + 3 liitettä,

[43] RR - ja RD -paalut, suunnittelu- ja asennusohjeet. SSAB, Päivitetty 01/2016

[44] Rumpujen korjausohje (luonnos) RUMKO 1/2011 Ratahallintokeskus

[45] Rumpujen korjausohje RUMKO 1/2006 Ratahallintokeskus

[46] SFS 1215 Betoniteräksiset. Hitsattava kuumavalssattu harjatanko A500HW

[47] SFS 1268 Betoniteräksiset. Hitsattava kuumavalssattu harjatanko B500B

[48] SFS 1269 Betoniteräksiset. Hitsattava kuumavalssattu harjatanko B500C1

[49] SFS 3433 Muoviputket. Jäykkyyden määrittäminen relaksaatiomenetelmällä

[50] SFS 5608 Maahan asennettavat kaapelinsuojukset ja varoitussauhat. Rakenne ja koetus.

[51] SFS 5906 Muoviputket. Paineettomat PE- ja PP- rakenneputket ja -putkiyhteet maahan asennettuun viemärintiin. Nimelliskoko yli 1200 mm

[52] SFS 7033 Betoniputkilta eri käyttöolosuhteissa vaadittavat ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot.

[53] SFS-EN 1295-1 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading – Part 1: General requirements

[54] SFS-EN 1610 Construction and testing of drains and sewers

[55] SFS-EN 1796 Plastics piping systems for water supply with or without pressure – Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) based on unsaturated polyester resin (UP)

[56] SFS-EN 1916 + AC, Betoniset putket ja osat, raudoittamattomat ja teräskuiduilla vahvistetut.

[57] SFS-EN 1990+A1+AC Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet

[58] SFS-EN 1991-2 Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat

[59] SFS-EN 1992-2+AC Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 2: Betonisillat

[60] SFS-EN 1993-5+AC Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 5: Paalut

[61] SFS-EN 1997-1+AC Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt

[62] SFS-EN 10025-1 Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 1: Yleiset tekniset toimitusehdot.

[63] SFS-EN 10346 Jatkuvatöimisellä kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut kylmämuovattavat ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot. 75 s.

[64] SFS-EN 12889 Trenchless construction and testing of drains and sewers

[65] SFS-EN 13476-1 Muoviputkijärjestelmät maanalaiseen paineettomaan viemäröintiin. Pehmittämättömästä polyvinyylikloridista (PVC-U), polypropeenista (PP) ja polyeteenistä (PE) valmistetut rakenneseinämäiset putkijärjestelmät. Osa 1: Yleiset vaatimukset ja toiminnalliset ominaisuudet

[66] SFS-EN 14364 Plastics piping systems for drainage and sewerage with or without pressure. Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) based on unsaturated polyester resin (UP). Specifications for pipes, fittings and joints

[67] SFS-EN ISO 9080 Plastics piping and ducting systems. Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation (ISO 9080:2012)

[68] SFS-EN ISO 9969 Thermoplastic pipes. Determination of ring stiffness (ISO 9969:2016)

[69] Sillan geotekninen suunnittelu, sillat ja muut taitorakenteet, Liikenneviraston ohjeita 11/2012, ISBN 978-952-255-143-6

[70] Sillanrakennuksen oppikirja, Alempaa teknillistä opetusta varten, Urho Palsanen, Helsinki 1932, Otava 106 s. 92 kuvaa

[71] Silta- ja rumpulausunnon valmistelu-, -ilmastonmuutoksen huomioon ottaminen, Suomen ympäristökeskus, OH 2/2010 Luonnos 8.4.2010

[72] Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Betoniputkinormit 2001 korvattu kahdella kansallisella SFS-standardilla, 6.11.2014, URL: [http://www.sfs.fi/ajankohtaista/uutiset/betoniputkinormit\\_2001\\_korvattu\\_kahdella\\_kansallisella\\_sfs-standardilla.2533.news](http://www.sfs.fi/ajankohtaista/uutiset/betoniputkinormit_2001_korvattu_kahdella_kansallisella_sfs-standardilla.2533.news)

[73] Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 5/2013, ISBN 978-952-255-250-1

[74] Teknillinen käsikirja K.J. Gummerus O.Y. Emil Saraoja, Väinö Valkola, Jyväskylä 1914 I painos. 791 sivua.

[75] Teknillinen käsikirja K.J. Gummerus O.Y. Sulo Heiniö, Jyväskylä 1929 III muutettu ja laajennettu painos. 1208 sivua.

[76] Teräsputkipaalujen korroosio, Mitoitus empiiriseen aineistoon pohjautuen, VTT Jouko Törnqvist, Espoo lokakuu 2004. ISBN 952-5004-53-8

[77] Teräsputkisillat suunnitteluohje 25.2.2014 Liikenneviraston ohjeita 10/2014. ISBN 978-952-255-428-4

[78] Tietoa tiensuunnitteluun nro 79A, Suurten rumpuputkien rakennemitoitusta koskevat laatuvaatimukset, Tiehallinto 3.11.2004

[79] Varkauden historia, Suomalaisen kirjallisuuden Kirjapaino, Hannu Soikkanen, Helsinki 1963. 97 s.

[80] Viestra Oy, internetsivusto, lainattu 14.4.2016, URL: <http://www.viestra.fi/palvelut/>

[81] Weholite-rumpuputken mittojen määrittely Kauhajoella, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka 2002, Testaustuoteseloste nro RTE347/02

[82] Yhteisellä matkalla VR 150 vuotta, Seppo Zetterberg, WSOY 2011, ISBN 978-951-0-34742, 544 s.

Työssä käytetyt valokuvat ovat peräisin VR Track Oy:n, Liikenneviraston tai SWECO rakennesuunnittelun arkistoista, jollei toisin ole mainittu.