Tampereen yliopisto

Juha-Matti Mannila

TIELIIKENNETUNNELEIDEN LÄMMÖNERISTÄMINEN

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Mika Knuuti
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Juha-Matti Mannila: Tieliikennetunneleiden lämmöneristäminen (Thermal insulation in road traffic tunnels)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2022

Suomen ilmasto aiheuttaa tieliikennetunneleiden kuivanapidolle, ja sitä kautta myös lämmöneristämiselle erityisvaatimuksia. Tieliikennetunnelit ovat niiden rakenteellisten ja Suomen sääolosuhteista riippuvien tekijöiden kautta alttiina etenkin maassa esiintyville pakkasjaksoille. Lämmön- ja vedeneristyksen sekä kuivatusjärjestelmän toimivuudella on tärkeä rooli jäätymis- ja routimisvaurioiden estämisessä. Tunnelia ympäröivässä kalliossa ja tunnelin rakenteissa oleva vesi jäätyessään aiheuttaa vaurioita ja vahinkoja tunnelille, ja sillä on vaikutusta niin tunnelin käytön, huollon ja kunnossapidon kuin myös laitteiden toiminnan kannalta. Tunneleissa ei saa esiintyä vesivuotoja missään kohdissa. Vesivuotojen ja jäätymisen aiheuttamat turvallisuusriskit ja rakennevauriot estetään oikeilla rakennevalinnoilla ottaen huomioon kuivatusjärjestelmän ja lämmöneristämisen kokonaistoimivuus.

Kandidaatintyön tarkoituksena oli selvittää, minkä takia tieliikennetunneleita tarvitsee lämmöneristää, eli mitkä taustatekijät tähän vaikuttavat. Pääasiassa työssä keskityttiin tunnelin kuivatusjärjestelmän lämmöneristämiseen. Lisäksi työssä tutkittiin tieliikennetunneleissa yleisesti käytettyjä lämmöneristemateriaaleja, selvennettiin lämmöneristämisen teoriaa sekä erilaisia rakenneratkaisuja, joilla varmistetaan tunneleiden oikeanlainen toiminta lämmöneristämisen kannalta. Tutkimus toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, jossa aineistona käytettiin pääsääntöisesti rakennusalan tunnettujen toimijoiden, kuten Väyläviraston ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n julkaisuja aiheesta.

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta lämmöneristämisen olevan olennainen osa tieliikennetunneleiden suunnittelua ja rakentamista alueilla, joissa esiintyy pakkasta. Se on yksi tärkeimpiä tekijöitä ottaa huomioon suunniteltaessa oikein, koko suunnitellun käyttöikänsä toimivaa ja yhteiskuntaa palvelevaa tunnelikokonaisuutta. Oikeilla rakenneratkaisuilla ja materiaalivalinnoilla on tässä keskeinen tehtävä. Väärin tai huolimattomasti tehdyt ratkaisut johtavat väärin toimiviin rakenteisiin, jotka hajoavat tai vaurioituvat suunniteltua nopeammin. Tästä koituvat korjauskustannukset sekä vaurioista aiheutuvat haitat tieliikennetunnelin käytölle voivat nousta tämän kautta korkeiksi.

Avainsanat: tieliikennetunneli, lämmöneristäminen, pakkanen, kuivatusjärjestelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. TUNNELIN RAKENNE JA TOIMINTA 3
2.1 Tieliikennetunnelit 3
2.2 Kuivatusjärjestelmä 5
2.3 Ruiskubetonisalaojat 7
2.4 Verhousrakenne 9
2.5 Lämmöneristerakenteet 12
3. PAKKANEN 14
3.1 Tieliikennetunnelin sisälämpötila 14
3.2 Pakkanen Suomessa 15
3.3 Pakkasen aiheuttamat vauriot 16
3.4 Pakkasvaurion ja -rapauman hallintatoimet 20
3.5 Pakkasmäärä 20
4. LÄMMÖNERISTÄMINEN 23
4.1 Lämmön siirtyminen 23
4.2 Lämmöneristeet 23
4.3 Lämmönjohtavuus 24
4.4 Kosteus 25
5. LÄMMÖNERISTEMATERIAALIT 27
5.1 Paisutetut polystyreenisolumuovilevyt (EPS) 27
5.2 Suulakepuristetut polystyreenisolumuovilevyt (XPS) 28
5.3 Polyeteenisolumuovimatot ja -levyt 30
6. LÄMMÖNERISTÄMISRATKAISUT 32
6.1 Lämmöneristerakenteiden suunnittelu 32
6.2 Tieliikennetunnelin suuaukot 32
6.3 Seinä- ja holvirakenteet 34
6.4 Lämmöneristeen paksuuden määrittäminen 35
6.5 Tieliikennetunnelin pohja 36
6.6 Yksittäinen salaoja 39
7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 41
LÄHTEET 44

1. JOHDANTO

Suomen sääolosuhteiden suuren vaihtelevuuden ja etenkin pakkasen vuoksi lämmöneristäminen on tieliikennetunneleiden rakennusteknisen toiminnan kannalta erittäin tärkeää. Pakkanen itsessään ei ole olennaista kalliotunnelin kallioteknisten ratkaisuiden kannalta, mutta ongelma syntyy kalliossa ja tunnelin rakenteissa olevasta vedestä (Liikennevirasto 2018b, s. 137).

RIL 261-2013 (s. 209) mukaan tieliikennetunneleiden lämmöneristämisellä pyritään turvaamaan tunnelin pohjan, seinien ja katon, eli holvin, kuivatusrakenteiden sulana pysyminen kylminä vuodenaikoina. Tunneleiden lämmöneristämisellä voidaan tarkoittaa myös tunnelissa kulkevan ajoradan routasuojausta, mutta tässä kandidaatintyössä keskitytään pääasiassa kuivatusjärjestelmän jäätymissuojaukseen lämmöneristämisratkaisuilla.

Kuivatusrakenteiden jäätyminen ja tukkeutuminen voivat aiheuttaa jään muodostumista, niin sanottua paannejäätä, seiniin, holviin ja poikkileikkauksen pohjaan (RIL 261-2013, s. 209). Jäätyessään laajeneva vesi aiheuttaa tunnelin rakenteissa voimaa, joka rikkoo rakenteita aiheuttaen vaurioita ja vahinkoja. Lisäksi tunnelin vuotokohdat sekä seiniin ja kattoon muodostunut jää tekee runsaassa valaistuksessa epäesteettisen vaikutelman ja rikkoo myös tunnelin pintamateriaaleja (RIL 154-1-1987, s. 236). Poikkileikkauksen pohjaan, mahdollisesti ajoradalle muodostunut jää voi aiheuttaa turvallisuusriskin. Lisäksi tunnelin kattoon syntyneet jääpuikot voivat pudotessaan aiheuttaa vaaratilanteita tunnelissa kulkevalla liikenteelle. Umpeen jäätyneet kuivatusrakenteet eivät toimi suunnitellulla tavalla myöskään lämpötilan noustessa ja jään sulaessa, jolloin niihin syntyy vedenpainetta (RIL 261-2013, s. 209).

Vesi voi myös jäätyä tunnelin ympärillä olevan kallion raoissa. Jäätyessään vesi laajenee ja toistuva sulamis-jäätymissykli aiheuttaa kallioon pakkasrapautumista (Liikennevirasto 2018b, s. 137). Pakkasrapautuminen aiheuttaa kallion rakojen rajaamien lohkareiden siirtymistä ja halkeilua sekä kuormitusta lujitus- ja verhousrakenteille. (RIL 261-2013, s. 209) Kun sulamis-jäätymissykli toistuu useita kertoja se rapauttaa ja heikentää vähitellen kalliomassaa ja voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa tunnelissa sortuman (Liikennevirasto 2018b, s. 138).

Työn tavoitteena on tutkia tieliikennetunneleissa käytettyjä lämmöneristerakenteita ja selvittää, mikä vaikutus niillä on tunnelin rakenneteknisen toiminnan kannalta ja selvittää syitä niiden tarpeellisuuteen. Työssä käydään läpi myös lämmöneristämisen teoriaa, lämmöneristemateriaaleja sekä lämmöneristämisen kannalta olennaisia rakenneratkaisuja. Työ on toteutettu kirjallisuustutkimuksena, jonka lähteinä on käytetty rakennusalan tunnettujen toimijoiden, kuten Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n sekä Väyläviraston julkaisuja.

Työssä käytetty kirjallisuus ja aineisto on laadittu pitkälti Suomessa vallitsevien sääolosuhteiden ja kallioperän perusteella, joten työ rajautuu maantieteellisesti Suomeen rakennettuihin ja rakennettaviin tieliikennetunneleihin, joissa kantavana rakenteena toimii kallio. Perustiedot tunnelirakentamisesta ja lämmöneristämisestä pätevät yleisesti, ja monet työssä esitellyt rakennustekniset ratkaisut pätevät myös muissa maissa, joissa olosuhteet ovat samanlaiset kuin Suomessa.

Työn alussa, toisessa luvussa käsitellään yleisesti tieliikennetunneleiden rakennetta ja toimintaa, minkä tarkoituksena on perehdyttää lukija yleisellä tasolla aiheeseen. Kolmannessa luvussa käsitellään tutkimuksen ongelmaa, eli pakkasen aiheuttamia haasteita tieliikennetunneleille ja pohjustetaan ratkaisuja, eli lämmöneristerakenteita. Neljäs luku kertoo lämmöneristämisen teoriasta yleisesti ja viides luku tunneleissa käytetyistä lämmöneristemateriaaleista. Kuudes luku kokoaa edellä mainitun tiedon yhteen ja kertoo tunneleiden lämmöneristerakenteista eri osissa tunnelia sekä niiden suunnittelusta ja mitoituksesta. Seitsemäs ja viimeinen luku on työn yhteenveto ja sisältää työstä tehdyt johtopäätökset.

2. TUNNELIN RAKENNE JA TOIMINTA

2.1 Tieliikennetunnelit

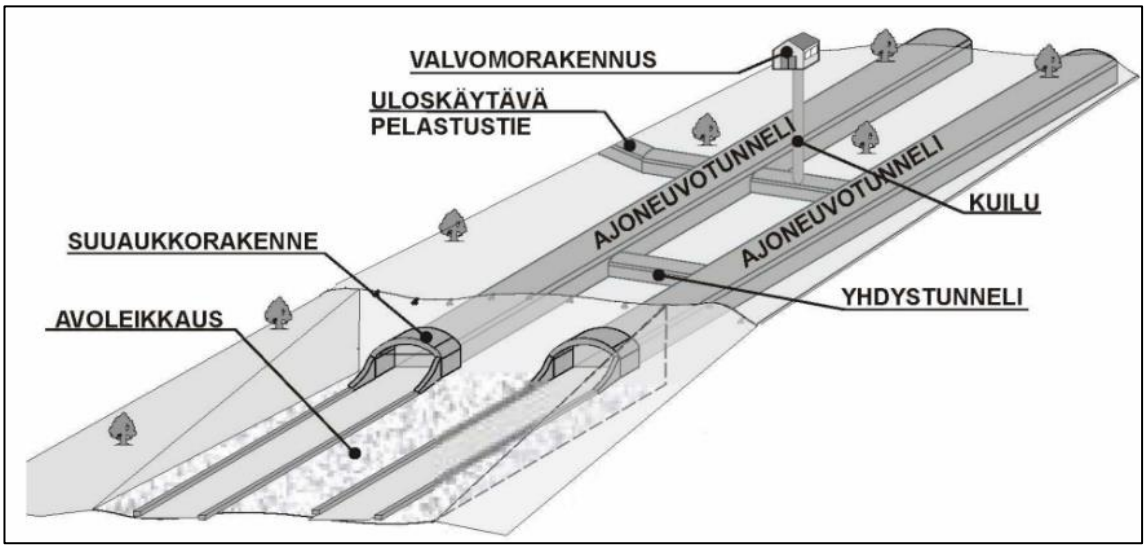
Kalliotunnelilla tarkoitetaan tunnelia, jonka pääasiallisena kantavana rakenteena toimii sitä ympäröivä kalliomassa (Väylävirasto 2019c, s. 11). Kantavana rakenteena toimiva kalliorakenne on kalliotilassa kallioseinä, -katto tai -pilari (Väylävirasto 2019c, s. 10). Suomen pääosin yhtenäinen ja ehjä kallioperä soveltuu erinomaisesti kalliorakentamiseen. Tämän vuoksi lähes kaikki Suomen tunnelit ovat kalliotunneleita, koska kalliotunneleiden rakentaminen on myös yleisesti halvempaa kuin betoni- tai terästunneleiden rakentaminen. Suomeen rakennettavat kalliotunnelit louhitaan lähes aina käyttäen poraus-räjäytysmenetelmää. (Liikennevirasto 2014, s. 13)

Tieliikennetunnelilla tarkoitetaan yhden tai useamman ajoneuvotunnelin eli tunneliputken muodostamaa kokonaisuutta (RIL 165-2-2006, s. 388). Nimensä mukaisesti tieliikennetunneli on tarkoitettu tieliikennettä, eli henkilöiden ja tavaran kuljettamista varten. Väyläviraston (2019a, s. 18) määritelmän mukaan tunneliputki on rakenteellisesti yhtenäinen, molemmista päistään maan pinnalle johtava, sivuilta ja päältä katettu tila. Kallioon rakennetulla tieliikennetunnelilla tarkoitetaan siis kallioperän lävitse louhimalla puhkaistua reikää, joka on molemmista päistään avonainen liikkumiseen tarkoitettu liikenneväylän osa. Tunnelissa liikenne voi olla yksi- tai kaksisuuntaista (Saari 1988, s. 140). Tieliikennetunnelin kokonaisuuden muodostavat:

- ajoneuvotunnelit ja niihin liittyvät muut tunnelit tai kuilut
- suuaukkorakenteet ja avoleikkaukset
- tekniset ja turvallisuustilat
- tekniset järjestelmät ja niiden laitteet. (RIL 165-2-2006, s. 388)

Liikennevirasto (2014, s. 16) luettelee tunneleiden teknisiksi järjestelmiksi muun muassa kuivatuksen ja vedenpoiston, ilmanvaihdon ja savunpoiston, palonsammutuksen ja hätäasemat, sähkönjakelun ja varavoimakoneet, valaistuksen, tele- ja turvajärjestelmät, liikenteen hallintajärjestelmät sekä merkit ja opastimet. Teknisiä järjestelmiä ei ole juurikaan vanhemmissa tunneleissa, ja uusimpien sekä tulevaisuudessa rakennettavien tunneleiden määräykset ja vaatimukset ovat muuttuneet merkittävästi turvallisuuden

osalta. (Liikennevirasto 2014, s. 16) Esimerkki tieliikennetunnelin kokonaisuudesta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. *Kaksiputkisen tieliikennetunnelin kokonaisuus (Liikennevirasto 2014, s. 18).*

Tieliikennetunnelin avulla voidaan nostaa tie- ja katuverkon palvelutasoa ja samalla vähentää liikenteestä aiheutuvaa melua, päästöjä ja muita ympäristöhaittoja sekä säilyttää maisemallisia arvoja (RIL 165-2-2006, s. 371). Teiden sijoittaminen kalliotunneliin tulee Suomessa kuitenkin suhteellisen harvoin kysymykseen, ja kalliotunneliratkaisut ovatkin hyvin poikkeuksellisia rakenteita. Teiden kaarre- ja kaltevuusnormien puitteissa, useimmat maaston esteet voidaan taloudellisemmin kiertää, kuin läpäistä tunneleilla. (RIL 154-1-1987, s. 234)

Pääasiallisen kantavan rakenteen perusteella tieliikennetunneli on joko kallio-, betoni- tai terästunneli (RIL 165-2-2006, s. 388). RIL 165-2-2006 (s. 389) mukaan kantavia rakenteita ovat ne tunnelin kantavan pääjärjestelmän rakenteet, jotka vaikuttavat tunnelin kantokykyyn ja pysyvyyteen tai jotka ovat liikennekuormien kuormittamia. Kantavia rakenneosia ovat myös kallio sekä maa siinä määrin kuin ne vaikuttavat tunnelin kantokykyyn ja pysyvyyteen (Liikennevirasto 2018a, s. 9). Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteena on 100 vuoden käyttöikä (Liikennevirasto 2017, s. 19).

Suuaukkorakenteita ovat ne kantavat rakenteet, joiden välityksellä tunneli liittyy ulkoilmaan (Liikennevirasto 2018b, s. 26). Lujitusrakenteilla tarkoitetaan kantaviin rakenteisiin välittömästi liittyviä rakenneosia, jotka toimivat osana kantavaa rakennetta vahvistaen sitä (Liikennevirasto 2018b, s. 24). Lujitusrakenteet muodostuvat yleisimmin kalliopulteista ja ruiskubetonoinnista. Muita mahdollisia lujitusrakenteita ovat muun muassa kallioverkotus ja erilaiset tuentarakenteet. (Liikennevirasto 2018b, s. 84)

Sisustusrakenteilla tarkoitetaan sellaisia rakenteita, jotka eivät kuulu tunnelin kantavaan pääjärjestelmään. Sisustusrakenteiden kantokyky ja pysyvyys on kuitenkin osoitettava. (Liikennevirasto 2018a, s. 10) Sisustusrakenteisiin kuuluvia rakenteita ovat muun muassa verhousrakenteet, sisäkatto ja -seinärakenteet, laitteiden tukirakenteet, törmäysjohteet ja kaiteet sekä tien päällysrakenne. Alusrakenteeseen kuuluvat tien päällysrakenteen alapuolelle tehtävät rakennekerrokset ja kuivatuslaitteet sekä lämmön- ja tärinäneristeet. (RIL 165-2-2006, s. 389)

2.2 Kuivatusjärjestelmä

Kalliotunnelit sijaitsevat usein pohjaveden pinnan alapuolella, jolloin on mahdollista, että tunneleihin kulkeutuu pohjavettä kallion rakoja ja rakenteita pitkin. Tunneliin kulkeutunut vesi aiheuttaa mahdollisesti haittaa tunnelissa ja muutoksia tunnelin ympäristön pohjavesiolosuhteisiin, kuten korkeusasemaan ja laatuun. (Liikennevirasto 2018b, s. 90) Suomen kallioperän kivilajien huokoisuus ja täten vedenjohtavuus on hyvin pieni, joten kalliomassan vedenjohtavuus perustuu kalliomassan epäjatkuvuuskohtien, kuten kalliorakojen ja rakoryhmien sekä heikkousvyöhykkeiden vedenjohtavuuteen (Liikennevirasto 2018b, s. 90). Tästä syystä kalliomassan rakoilulla ja rakojen laadulla on kalliotunneliin tulevien vesivuotojen kannalta olennainen merkitys.

Vuotovesien hallinnan toimenpiteitä ovat yleisesti kalliomassan tiivistäminen ja tunnelin kuivatus. Tunnelin tiivistäminen perustuu tunnelia ympäröivän kalliomassan kalliorakojen ja ruhjeiden ynnä muiden tyhjien tilojen täyttämiseen vettä läpäisemättömällä aineella. Kallion tiivistämisellä estetään siten vesivuotojen muodostuminen kalliotunneliin. (Liikennevirasto 2018b, s. 90) Tunnelin kuivatuksella taas pyritään ohjaamaan tiivistämisestä huolimatta syntyneet vesivuodot ja tunnelin läpi kulkeva vesi pois tunnelista niin, että vesi tai jää ei aiheuta käyttöhäiriöitä. Veden tuloa tunneliin voidaan estää myös ympäristön pintakuivatuksella, jolloin valumavedet johdetaan poispäin tunnelin suuaukoista ja linjauksesta. (Saari 1988, s. 142)

Täysin kuivan tunnelitilan rakentaminen tarkoittaisi kustannuksiltaan mittavaa tiivistämistä, joten kalliotunnelit harvoin suunnitellaan täysin kuiviksi. Tämän takia kalliotunneleihin suunnitellaan ja rakennetaan kuivatusjärjestelmät, joiden avulla kalliotilaan muodostuvat vuotovedet kyetään ohjaamaan pois kalliotunnelista. (Väylävirasto 2020, s. 31)

RIL 165-2-2006 (s. 396) mukaan kalliotunnelin kuivatusjärjestelmän kokonaisuuden muodostavat:

- kalliopinnoille tehty ruiskubetonointi ja ruiskubetonin salaojat

- verhousrakenteen vedeneristys
- alusrakenteen täytöt, joiden tulee olla hyvin vettä läpäisevää routimatonta materiaalia
- alusrakenteeseen sijoitetut salaojat, kuivatusvesiviemärit ja kaivot
- pumppaamot ja niiden painejohdot
- verkostoliittymät ja/tai purkuputket maastoon tai vesistöön sekä mahdolliset avo-ojat suuaukoilla.

Kuivatusjärjestelmän avulla tulee varmistaa, että tien päällys- ja alusrakenne pysyy kuivana roudattomaan tasoon ja lisäksi se tulee suojata jäätymiseltä (RIL 165-2-2006, s. 396).

RIL 169-1987 (s. 80) mukaan tieliikennetunneleiden kuivanapidolla on estettävä vuoto- ja tippumisvesien jäätyminen koko tunnelin matkalla. Etenkin jäätymiselle alttiissa kohdissa ja ajokaistan yläpuolella ei saa esiintyä lainkaan vesivuotoja (Liikennevirasto 2017, s. 37). Tunnelissa olevien vuotokohtien määrä on riippuvainen niin kalliolaadusta kuin – vedestä. Lopullinen vesieristyksen tarve voidaan arvioida vasta, kun tunneli on louhittu. (Saari 1988, s. 143)

Suomessa tunneleiden vesieristys tehdään pääasiassa salaojitus- ja ruiskubetonirakenteella (Kronlöf et al. 2006, s. 11). Kalliotunnelin vesivuodot kerätään lämpöeristetyn tai lämmitetyn kuivatusrakenteen avulla tien alle rakennettaviin salaojiin (Saari 1988, s. 143). Nykyään käytäntönä on tehdä tunnelin pohjaan yksipuoleinen kuivatus, jossa tunnelin pohjan riittävällä vietolla varmistetaan veden ohjautuminen tunnelin pohjan kuivatusjärjestelmiin (Liikennevirasto 2018b, s. 115). Pohjan kuivatusjärjestelmien kautta vuotovedet voidaan hallitusti johtaa maastoon (Liikennevirasto 2017, s. 38). Tunnelipohjan kuivanapidon lisäksi tulee tunnelin seinien ja katon eli holvin kuivanapito ottaa huomioon (RIL 154-1-1987, s. 235). Tunnelin seinien ja katon lämpöeristetty kuivatusjärjestelmä on suhteellisen kallis rakenne, ja sitä tulee käyttää vain vuotokohdissa. Lämpöeristyksen kustannuksia voidaan pienentää käyttämällä yksittäisten vuotokohtien kohdalla niin sanottua saattolämmitystä eli termostaattiohjattuja lämmityskaapeleita salaojaputkien sulana pitämiseksi. (Saari 1988, s. 143)

Salaojien lisäksi, tietunnelin LVI-järjestelmät, kuten sammutusputkistot, saattolämmitetään tarvittavilta osin. Täynnä vettä olevat putkistot, jotka ovat täten jäätymisvaarassa, pyritään ensisijaisesti sijoittamaan ja eristämään niin, että ne eivät vaadi saattolämmitystä. Kaikki saattolämmityksellä varustetut putkistot joka tapauksessa

lämpöeristetään. Saattolämmityksen ohjaus riippuu ulkolämpötilasta ja saattolämmitykset liitetään tieliikennetunnelia palvelevaan, varavoimalla varmennettuun sähköjärjestelmään. (Väylävirasto 2019a, s. 97)

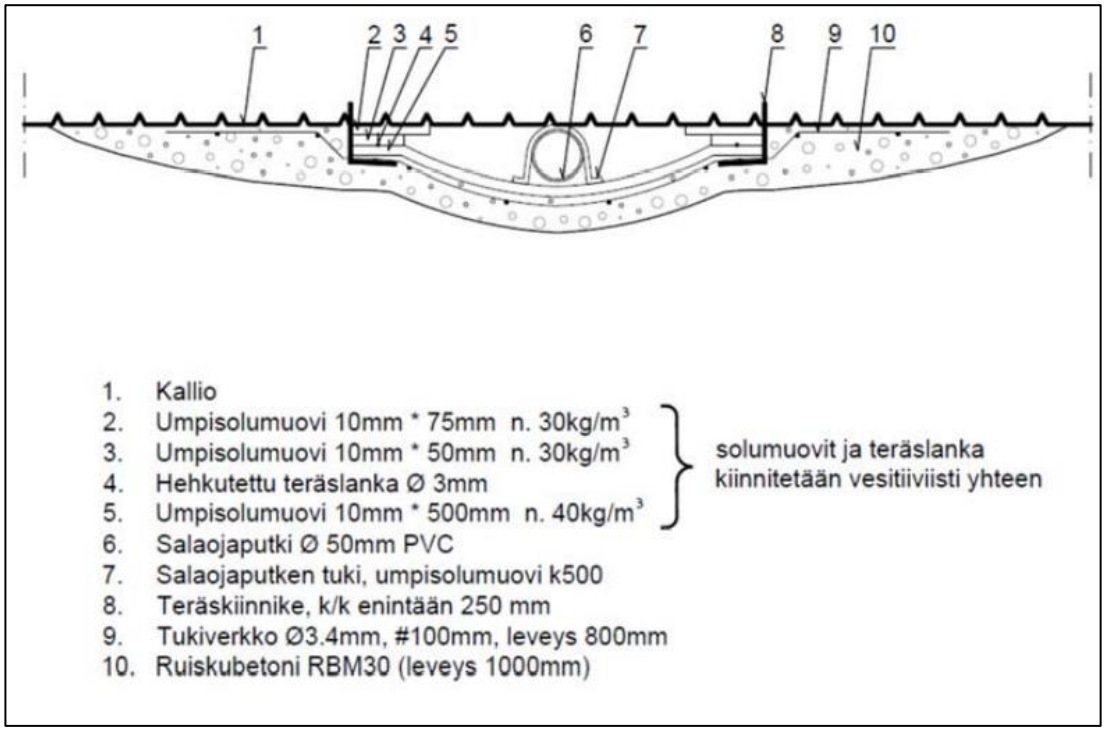
2.3 Ruiskubetonisalaojat

Ruiskubetoni on paineilman avulla ruiskutettua betonia, jota käytetään kallioperän vahvistuksessa. Yleisimpiä käyttökohteita ovat kalliotunneleiden holvien ja seinien vahvistaminen yhdessä kalliopulttien kanssa. (Liikennevirasto 2018b, s. 25) Ruiskubetoni vahvistaa kalliota tunkeutumalla kallion halkeamiin ja koloihin sekä samalla tasoittaa kalliopinnan epätasaisuudet, parantaen näin kalliontunnelin katon holvimaisesta muodosta johtuvaa kantokykyä (Liikennevirasto 2018b, s. 85).

Ruiskubetoni itsessään toimii vedeneristeenä, jos sen kerrospaksuus on riittävä. Tällöin veden virtaus ruiskubetonikerroksen läpi on tarpeeksi hidasta, että vesi haihtuu ruiskubetonin pinnalta suoraan tunnelitilan ilmaan. Ruiskubetonin vesitiiviyttä voidaan parantaa ruiskubetoniin sekoitettavilla lisäaineilla, mutta ruiskubetonointi ei ole kuitenkaan riittävä kuivatuskeino yksinään. (Liikennevirasto 2018b, s. 111) Ruiskubetonia voidaan käyttää myös pelkästään kalliopintaa sitovana ohuempana kerroksena, jolloin vedeneristävyyttä ei saavuteta (RIL 154-1-1987, s. 323).

Kalliotunnelin kattoon ja seiniin muodostuvat vuotovedet johdetaan yleensä kalliotunnelin pohjalle ruiskubetonikerroksen ja kallionpinnan väliin asennettuja, niin sanottuja ruiskubetonisalaojia pitkin (RIL 169-1987, s. 78). Lämmöneristeellä varustettua ruiskubetonisalaojaa on esitetty kuvassa 2. Ruiskubetonisalaojien avulla kalliopinnan vesivuodot voidaan johtaa hallitusti tunnelin pohjan salaojakerroksiin ja lisäksi ne varmistavat, että vesivuodot eivät muodosta lujitusrakenteisiin pohjaveden paineesta johtuvaa rasitusta (Liikennevirasto 2018b, s. 111). Kuvassa 3 on esitetty ruiskubetonisalaojan tyyppisuunnitelma, jossa lämmöneristeenä on käytetty umpisolumuovia. Ruiskubetonisalaojan päälle asennetaan tukiverkko, jonka tarkoitus on pitää salaoja paikallaan ruiskubetonoinnin ajan. Ruiskubetonin kalliota lujittava vaikutus perustuu pääosin ruiskubetonin tartuntaan kallioon. Salaojarakenteen kohdalla kalliota lujittava ruiskubetoni ei ole kuitenkaan kiinni kalliopinnassa, joten tarpeettomien ruiskubetonisalaojien asentamista on vältettävä. (Liikennevirasto 2018b, s. 112) Suositeltavampaa on tiivistää vuotavia kohtia injektoimalla (RIL 169-1987, s. 79). Kuvassa 4 on punaisin nuolin osoitettu ruiskubetonisalaojien sijainteja kalliotilassa.

Kuva 2. *Ruiskubetonisalaojaa rullalla, polyeteenieriste kiinnitettynä (Vehvia 2022).*



Kuva 3. *Ruiskubetonisalaojan rakenne (Liikennevirasto 2018b, s. 111).*

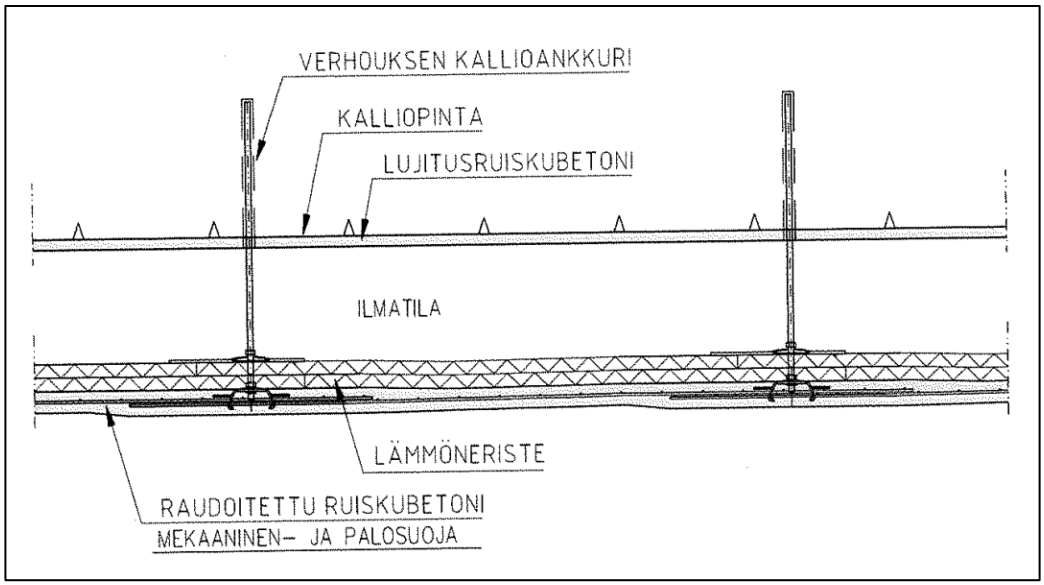
Kuva 4. *Kalliotilaan asennettuja ruiskubetonisalaojia (mukaillen lähteestä Liikennevirasto 2018b, s. 112).*

Erityisesti tieliikennetunneleiden ruiskubetonisalaojien jäätymisriskin hallinta on varmistettava, jotta rakenne ei hajoa sulamis-jäätymisprosessissa tapahtuvan paisumisen takia. (Liikennevirasto 2018b, s. 113). Ruiskubetonisalaojarakenteeseen voidaan suunnitella niin sanotun tarkastusputken avulla huuhteluyhde, jonka avulla ruiskubetonisalaojan toimivuus voidaan varmistaa koko rakenteen käyttöiän ajan (Liikennevirasto 2018b, s. 113) Jos kalliota ei saada käyttötarkoituksen kannalta tarpeeksi tiiviiksi tiivistämällä ja ruiskubetonisalaojien avulla, voidaan tunneli vuorata kosteuseristyksellä. Kosteuseristys rakennetaan tunnelirakenteen sisäpuolelle ja varustetaan pohjaveden paineen vastaanottavalla sisäpuolisella tukirakenteella. (RIL169-1987, s. 80)

2.4 Verhousrakenne

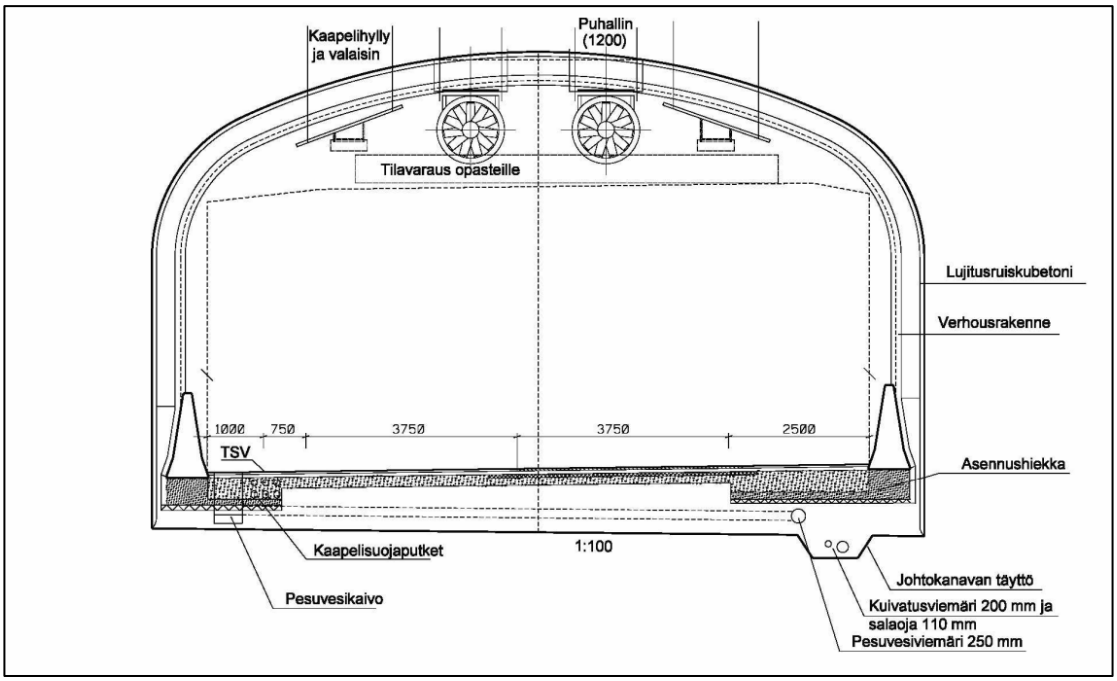
Verhousrakenne on tunnelin kantaviin rakenteisiin, eli tämän työn rajauksessa kalliopintaan, ripustettu tunnelin seinät ja holvin verhoava rakenne, kannatin ja eristysrakenteineen (Liikennevirasto 2017, s. 9). Yleensä verhousrakenteen muodostavat lämmön- ja vedeneriste, eristettä suojaava ruiskubetonirakenne, raudoitus ja ankkurointi (Väylävirasto 2022, s. 44). Kuvassa 5 on esitetty verhousrakenteen

rakennetyyppi. Verhousrakenteen suunnittelun perusteena on 50 vuoden käyttöikä (Liikennevirasto 2017, s. 19).



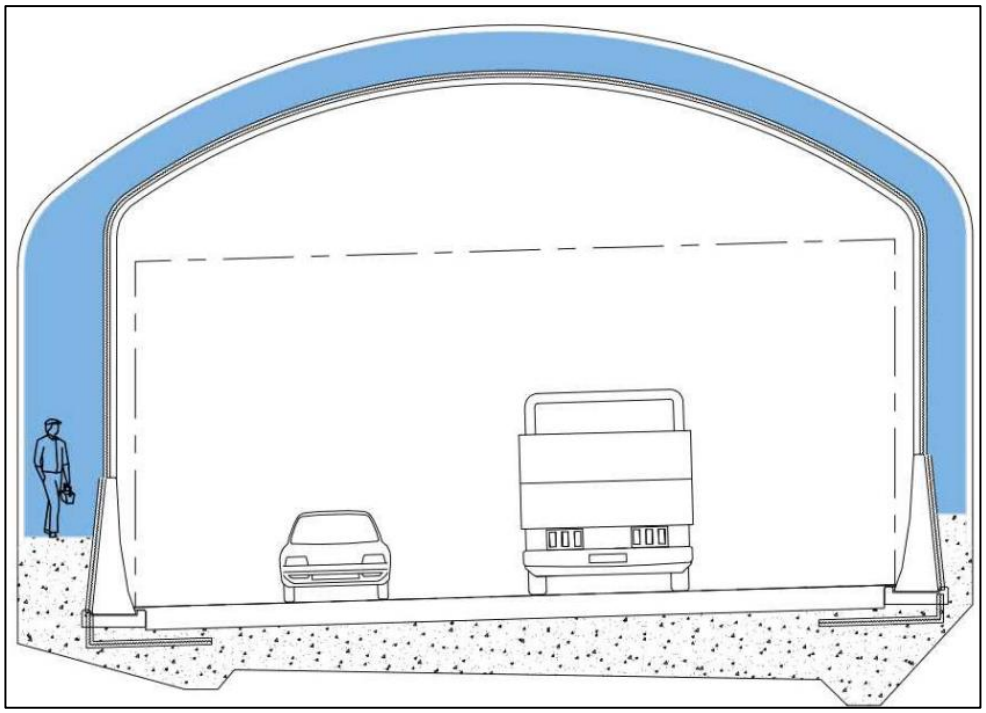
Kuva 5. *Verhousrakenteen rakennetyyppi (RIL 165-2-2006, s. 395).*

Tunneliputkessa verhousrakenne on joko kiinni kallio- tai ruiskubetonipinnassa tai erotettuna tunneliputken lujituksesta välitilalla, jolloin puhutaan erillisverhousrakenteesta (Väylävirasto 2022, s. 44). Verhousrakenne toimii tunnelin veden-, lämmön- ja kaasuneristysrakenteena sekä palosuoja- ja pinnoiterakenteena tai niiden osana (Liikennevirasto 2018b, s. 27). Verhousrakenteen lämmöneriste toimii yleensä myös samaan aikaan vedeneristeenä. Erilaisten kalvojen käyttö osana tunneliverhousta on myös mahdollista. (Liikennevirasto 2017, s. 39) Kuvassa 6 on esitetty erillisverhoillun tieliikennetunnelin poikkileikkaus.



Kuva 6. *Erillisverhoillun tieliikennetunnelin poikkileikkaus ja tunnelin rakenteita (Liikennevirasto 2014, s. 14).*

Nykyään kalliotunneleita suunniteltaessa on kalliorakenteen ja verhousrakenteen väliin jätettävä vähintään 80 cm levyinen tarkastustila, joka mahdollistaa rakenteiden ja teknisten järjestelmien tarkastamisen ja huoltotoimenpiteet. Tarkastustilaan kuljetaan tunneliputken molemmin puolin olevista ovista tai verhousrakenteessa olevasta tarkastusluukusta. Kulkuyhteyksillä on samat lämmön- ja vedeneristysvaatimukset, kuin ympäröivällä rakenteella. (Liikennevirasto 2017, s. 45) Kuvassa 7 on esitetty tarkastustilallisen tieliikennetunnelin poikkileikkaus.



Kuva 7. *Tieliikennetunnelin poikkileikkaus, jossa tarkastustila on merkitty vaaleansinisellä (Väylävirasto 2019a, s. 97).*

Kalliotunneleiden verhousrakenne toteutetaan siten, että tarkastustilan lämpötila ei laske alle 0°C:n. Jos tätä ei pystytä varmistamaan rakenneratkaisuilla, tulee tarkastustila varustaa lämmityksellä. (Väylävirasto 2019a, s. 96) Verhousrakenteet ja niiden kiinnitykset ja ankkuroinnit suunnitellaan siten, että vesivuotojen ja jäätymisen aiheuttamat haitat vältetään. Erityisesti ajoradan yläpuolella vesivuotojen ja jäätymisen estämiseen tulee kiinnittää huomiota. (RIL 165-2-2006, s. 395–396)

2.5 Lämmöneristerakenteet

Lämmöneristerakenteilla voidaan ehkäistä pakkasen pääsemistä tunnelirakenteisiin (Väylävirasto 2019c, s. 73). Jäätymis- ja routimisvaurioiden ehkäisemiseksi tieliikennetunneleiden rakenteet tulee lämpöeristää. Lähtökohtana on rakennevaurioita ja routimista aiheuttavan jäänmuodostuksen estäminen rakenteissa ja rakennekerroksissa, mikä aiheuttaisi haittaa liikenteelle, tunnelin huollolle ja kunnossapidolle sekä laitteille. Ensisijaisesti kuivatus- ja viemärijärjestelmien ja -laitteiden jäätyminen on estettävä. (Liikennevirasto 2017, s. 37)

Vedeneristyksen ja kuivatusjärjestelmän toimivuus on olennainen tekijä jäätymis- ja routimisvaurioiden torjunnassa. Vesivuotojen ja jäätymisen aiheuttamat turvallisuusriskit ja rakennevauriot voidaan estää oikeilla rakennevalinnoilla ottaen huomioon kuivatusjärjestelmän ja lämmöneristerakenteiden kokonaistoimivuus. (Liikennevirasto

2017, s. 37) Yleensä kalliotunneleihin on tarpeen tehdä aiemmin mainittu kalliopinnasta irti oleva vesi- ja lämpöeristetty verhousrakenne, joka mitoitetaan tunnelin sisäilman pakkasmäärän perusteella. (Väylävirasto 2019, s. 73)

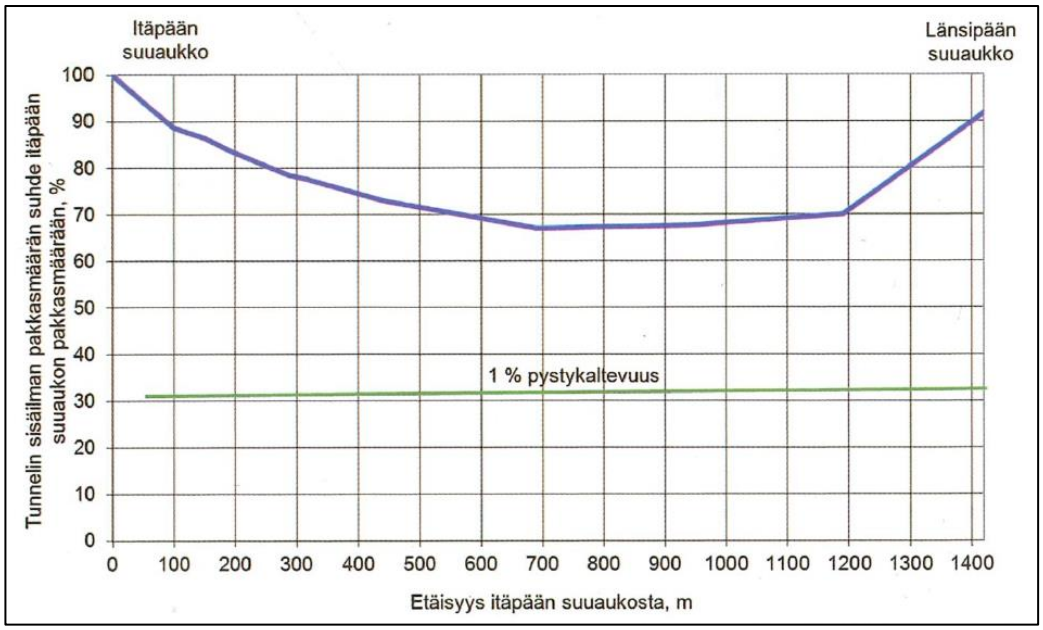
Lämmöneristerakenteet suunnitellaan niin, että jäätä ei pääse muodostumaan verhousrakenteen taakse. Lämmöneristeiden laajuudet ja paksuudet tunnelin holvissa, seinissä ja poikkileikkauksen pohjassa mitoitetaan niin, että verhousrakenteen takana oleva vesi liikkuu sulana kuivatusjärjestelmään (RIL 261-2013, s. 209). Tämä tarkoittaa siis sitä, että lämpötila verhousrakenteen takana ei saa laskea alle 0 ºC:n, jolloin kalliorakenteissa virtaava pohjavesi jäätyisi.

3. PAKKANEN

3.1 Tieliikennetunnelin sisälämpötila

Tieliikennetunnelin sisälämpötiloihin vaikuttavat ilmasto-olot, kuten pakkasmäärä, vuoden keskilämpötila ja keskimääräiset tuuliolosuhteet sekä tunnelin rakenteelliset ominaisuudet (RIL 261-2013, s. 209). Tunnelin ominaisuuksista muun muassa tunnelin pituus, pituuskaltevuus, poikkileikkauskoko ja tuuletus vaikuttavat sisälämpötiloihin (RIL 261-2013, s. 210–211).

Esimerkiksi lyhyissä, poikkileikkaukseltaan suurissa tunneleissa lämpötila tunnelin sisällä on yleensä yhtä suuri kuin tunnelin ulkopuolella (RIL 261-2013, s. 211). Vastaavasti pitkissä tunneleissa, joissa samaan aikaan pystykaltevuus on vähäinen, noin 1–2 %, ja poikkileikkauskoon ollessa pieni, voi talviaikaan tunnelin keskikohdalla lämpötila olla korkeampi, kuin tunnelin suuaukoilla. (RIL 261-2013, s. 210–211) Tämän kaltainen tilanne on esitetty kuvassa 8, jossa on esitetty tyypillisen pitkän, poikkileikkaukseltaan pienen tieliikennetunnelin sisäilman pakkasmääräjakauma talven aikana.



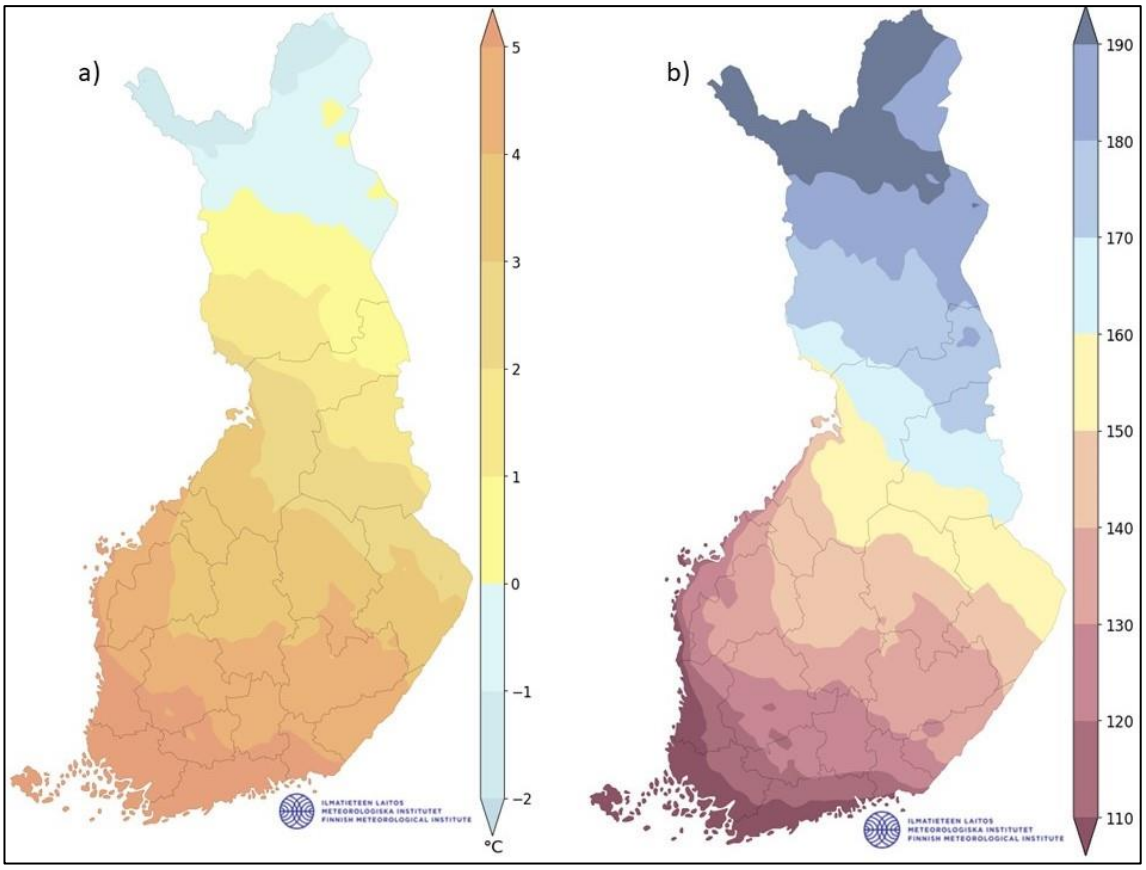
Kuva 8. *Pakkasmääräjakauma talven aikana tunnelissa (RIL 261-2013, s. 210).*

Vastaavasti tunnelin voimakas pituuskaltevuus synnyttää tunneliin niin sanotun hormiefektin eli termisen paine-eron, minkä seurauksena tunnelin ilma vaihtuu

tehokkaasti ja lämpötilaerot tasoittuvat tunnelin ulko- ja sisäpuolella. (RIL 261-2013, s. 211) Niin sanotuissa sukeltavissa tunneleissa, joissa tunnelin suuaukot ovat tunnelin alinta osaa ylempänä (Liikennevirasto 2018b, s. 26), voi hormiefekti olla kaksisuuntainen ja pakkasilma näin kulkeutua tunnelin alimpaan osaan pienilläkin pakkasmäärillä (RIL 261-2013, s. 211). Tuuletuksella ja ilmanvaihdolla on merkittävä vaikutus tunnelin sisälämpötiloihin. Painovoimaisesti tuulettuva tunneli tuulettuu tunnelin rakenteellisista ominaisuuksista riippuen, mutta esimerkiksi pitkissä ja suurien liikennemäärien tunneleissa käytettävien impulssipuhaltimien takia, tunnelin sisälämpötila voi vastata tunnelin ulkopuolella vallitsevaa lämpötilaa. (RIL 261-2013, s. 211) Vastaavasti pitkissä tunneleissa, joissa ei ole koneellista tuuletusta, voi sisäilman lämpötila olla korkeampi kuin ulkoilman lämpötila (Styrofoam 2000, s. 15).

3.2 Pakkanen Suomessa

Suomen ilmasto aiheuttaa tieliikennetunneleiden kuivanapidolle erityisvaatimuksia. Hallitsemattomat vesivuodot muodostavat jäätä tien pintaan ja väärin tehty kuivatusjärjestelmä jäätyy pakkasella aiheuttaen rakennevaurioita. (Saari 1988, s. 142) Tieliikennetunneleiden lämmöneristäminen tulee kyseeseen etenkin alueilla, joissa lämpötila laskee alle 0 ºC:n. Suomen vuoden keskilämpötilat (°C) ja termisen talven pituudet (vrk) alueittain on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. *Suomen vuoden keskilämpötilat (a) ja termisen talven pituudet (b) alueittain kaudelta 1991–2020 (Ilmatieteen laitos 2022a & Ilmatieteen laitos 2022b).*

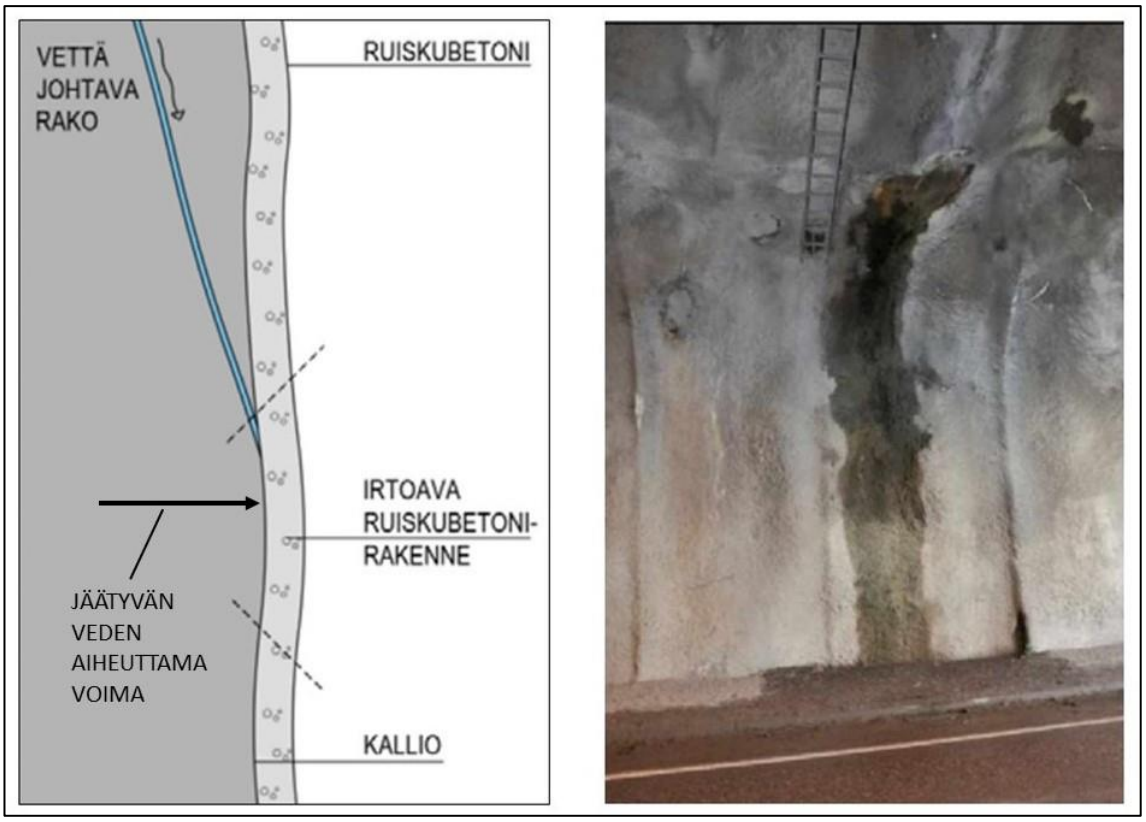
Termisellä talvella tarkoitetaan ajanjaksoa, jonka aikana vuorokauden keskilämpötila laskee pysyvämmin pakkasen puolelle (Ilmatieteen laitos 2022c). Kuten kuvasta 9 huomataan, kaikkialla Suomessa vallitsee ajanjaksoja, joiden aikana lämpötila on pakkasen puolella. Näin ollen tieliikennetunneleiden lämmöneristäminen tulee kyseeseen koko maassa.

3.3 Pakkasen aiheuttamat vauriot

Liikenneviraston (2018b, s. 137) mukaan suurin osa tieliikennetunneleista on alttiina kylmälle ilmalle ja siten riski pakkasen pääsemisestä tunneliin ja sen rakenteisiin on huomattava. Pakkanen ja kylmä ilma pääsevät tunnelin sisälle eri tavoin, esimeriksi tuulen, lämpötilaerojen ja liikenteen aiheuttaman ilmanvaihdon seurauksena (Styrofoam 2000, s. 15). Kalliorakenteiden jäätyminen rakentamisen tai käytön aikana tulee selvittää ja huomioida rakentamisessa. (Väylävirasto 2019c, s. 73) Pakkanen yksinään ei ole aiheuta ongelmia kalliotunnelin kallioteknisten ratkaisuiden kannalta. Ongelmia syntyy kalliossa ja tunnelin rakenteissa olevasta vedestä ja sen jäätymisestä. Pakkasen pääsyä kalliorakenteisiin voidaan estää erilaisilla rakenneratkaisuilla, yleensä verhousrakenteen avulla. (Liikennevirasto 2018b, s. 137)

On tärkeää tunnistaa pakkasen aiheuttamat kaksi erilaista vauriomekanismia kalliotunnelissa: pakkasvaurio ja pakkasrapautuminen. Pakkasvaurio syntyy, kun rakenteen sisältämä tai sen takana oleva vesi jäätyy. Vesi laajenee jäätyessään, mikä synnyttää voiman, joka voi mekaanisesti aiheuttaa rakenteen vaurioitumista. Pakkasrapautumisesta puhutaan silloin, kun esimerkiksi kallio joutuu alttiiksi toistuvalle jäätymis-sulamissyklille. (Liikennevirasto 2018b, s. 137) Pohjavesi esiintyy kallioperässä pääasiassa raoissa ja ruhjeissa ja lisäksi suomen kallioperän kivilajien huokoisuus on yleensä pieni (alle 1 %) (RIL 169-1987, s. 19). Täten kiven huokosiin ei pääse vettä ja siten vesi ei toistuvan jäätymis-sulamissyklin myötä aiheuta kivelle pakkasrapautumista. Kallion pakkasrapautumista syntyy, kun pakkanen jäädyttää kallion raoissa kulkevaa vettä. Jäätyessään vesi laajenee, mikä saa aikaan voiman, joka siirtää tunnelin kalliolohkoja. Jäätynyt vesi voi edelleen saada aikaan kallion halkeilua ja rikkoontumista ja pahimmassa tapauksessa aiheuttaa sortuman. Kalliomassan hyvän lämmönvarauskyvyn vuoksi tunnelin kalliomassa on kuitenkin harvoin kauttaaltaan jäässä. (Liikennevirasto 2018b, s. 138)

Pakkasen aiheuttamat vauriot tunnelissa tapahtuvat yleensä siellä missä vesi virtaa ja pääsee jäätymään (Väylävirasto 2019c, s. 72). Näitä kohtia tunnelissa on ruiskubetonirakenteen takana, kallion ja ruiskubetonin saumoissa, kallioraoissa, ruiskubetonisalaojissa ja tunnelipohjan salaoja- ja viemärijärjestelmissä (Liikennevirasto 2018b, s. 139; Väylävirasto 2019c, s. 72). Ruiskubetonirakenteen pakkasvauriokohdissa betonin ja kalliopinnan välinen tartunta on usein pettänyt (Liikennevirasto 2018b, s. 139). Kuvassa 10 on esitetty ruiskubetonin pakkasvaurioitumisen mekanismi sekä todellinen vaurioituminen tunnelissa.



Kuva 10. *Vasemmalla ruiskubetonin taakse pääsevän veden jäätymisen vaikutuksen periaatekuva (mukaillen lähteestä Liikennevirasto 2018b, s. 139) ja oikealla tunnelin ruiskubetonissa olevasta raosta valuvaa vettä (Liikennevirasto 2014, s. 44).*

Paannejäätä ja jääpuikkoja voi syntyä kalliotunnelin verhousrakenteen pinnalle, jos kallion raossa tai ruiskubetoniin syntyneessä halkeamassa on vesivuoto. Jäätyessään vesi saattaa edelleen rikkoa rakennetta. (Liikennevirasto 2014, s. 44) Paannejäätä voi muodostua myös verhousrakenteen taakse. Tunnelin seiniltä tai katosta valuva vesi voi muodostaa paannejäätä ajoradalle ja saattaa vaurioittaa päällysrakennetta tai tunnelin varusteita. (Väylävirasto 2019b, s. 47) Tunnelin ajoradalle muodostunut paannejää sekä seinille ja holviin muodostuneet paannejäät ja jääpuikot voivat irrotessaan verhousrakenteesta aiheuttaa tunnelissa kulkevalle liikenteelle vaaratilanteita. Jääpuikot ja paannejäämuodostumat ovat myös epäesteettisen näköisiä tunnelissa. Väyläviraston tunnelintarkastuskäsikirjassa (Väyläviraston ohjeita 14/2019) on määritetty vaurioluokitukset sekä annettu ohjeita tunneleiden vesivuotojen ja jäämuodostumien arviointiin ja korjaustarpeisiin. Kuvassa 11 on esitetty paannejäätä ja kuvassa 12 jääpuikkoja tunnelissa.

Kuva 11. *Paannejäätä muodostunut tunnelin seinään (Hindawi 2019).*

Kuva 12. *Tunnelin kattoon muodostuneita jääpuikkoja (NRK 2018).*

3.4 Pakkasvaurion ja -rapauman hallintatoimet

Pakkasvaurioiden estämisellä pyritään siihen, että ruiskubetonikerroksen ja kalliopinnan väliin ei pääse vettä (Liikennevirasto 2018b, s. 139). Tunnelin kohdissa, joissa lämpötila voi laskea alle 0 °C:n, on pakkasvaurioihin varauduttava. Pakkasvaurioiden hallintatoimia ovat muun muassa kalliomassan huolellinen tiivistys esi-injektoimalla, saattolämmitettyjen ruiskubetonisalaojien käyttö, lämmöneristerakenteet, vedenohjauspalkit tunnelin suuaukoilla, vedenohjausreiät tai muut kuivatus- ja vedenohjausratkaisut. (Väylävirasto 2019c, s. 73) Jos pakkasvaurioiden riskiä ei pystytä välttämään, voidaan vaurioista aiheutuvia seurauksia pienentää esimerkiksi vahvistamalla ruiskubetonirakennetta teräsverkolla tai ankkuroimalla se kiinni kallioon käyttäen aluslevyllisiä kalliopultteja (Väylävirasto 2019c, s. 73).

Ruiskubetonin huokoisuus tekee siitä hyvin pakkasta kestävän. Huokoisesta rakenteesta johtuen, suomalaisissa tunneleissa ei käytännössä esiinny ruiskubetonin pakkasrapaumaa, vaan pakkasen aiheuttamat vauriot ovat useimmiten pakkasvaurioita. Pakkasrapautumiseen ei tarvitse tämän takia erikseen varautua ruiskubetonoinnissa, mutta ruiskubetonille voidaan erikoistapauksissa soveltaa XF- eli jäätymis-sulamisrasituksia. (Liikennevirasto 2018b, s. 140) Väyläviraston (2019c, s. 74) mukaan XF-rasitusluokkia ei tule kuitenkaan edellyttää niiltä ruiskubetonoitavilta alueilta, joissa ruiskubetonin pakkasrapauman riski ei ole todellinen. Pakkasen vaikutusta kalliopulteissa ei tarvitse huomioida (Väylävirasto 2019c, s. 74), koska kalliopultit on asennettu kalliomassaan porattuun reikään, joka on juotosmassan ansiosta tiivis. Näin ollen jäätyvä vesi ei pääse vaikuttamaan kalliopultteihin ja pakkasen aiheuttama vaurioitumisriski ei täten ole merkittävä. (Liikennevirasto 2018b, s. 138)

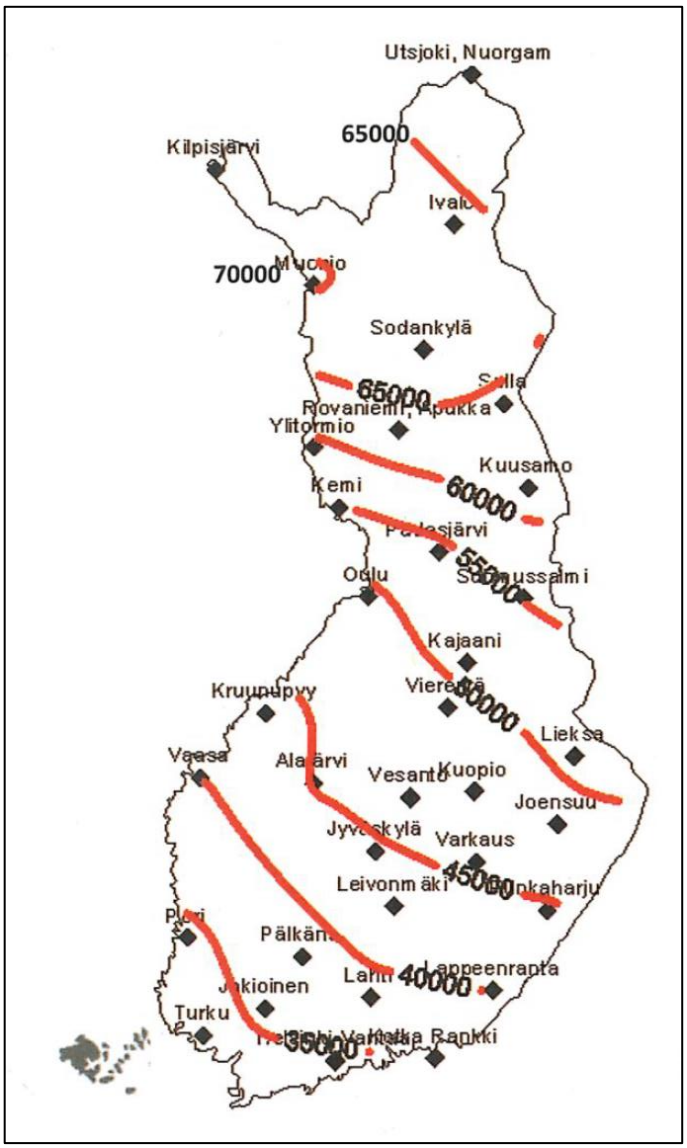
3.5 Pakkasmäärä

RIL 261-2013 (s. 256) määrittelee pakkasmäärän seuraavasti: ”Pakkasmäärä lasketaan ilman vuorokautisista keskilämpötiloista ja sen suuruus on jäätymispisteen ja pakkaskauden aikaisten vuorokausikeskilämpötilojen erotuksen summa (Kh tai h°C)”. RIL 261-2013 (s. 15) mukaan pakkasmäärä on merkittävin tekijä pysyvän routasuojauksen mitoituksessa. Pakkasmäärän lisäksi mitoituksessa on otettava huomioon rakentamispaikkakunnan vuoden keskilämpötila ja keskimääräiset tuuliolosuhteet (RIL 261-2013, s. 15). Pakkasmäärä voidaan määrittää laskennallisesti tai käyttää tilastollisia pakkasmääriä. Analyysien avulla saatuihin pakkasmääriin on arvioitava varmuus hankekohtaisesti (Väylävirasto 2019c, s. 73). Laskennallinen määritys suoritetaan kaavalla 1

$$F = 24 \cdot \sum_{\mathrm{j}} (T_{\mathrm{f}} - T_{\mathrm{d,j}}), \quad (1)$$

jossa F on talven pakkasmäärä (Kh), T_{f} on jäätymispiste (0 ºC) ja $T_{\mathrm{d,j}}$ on vuorokauden keskilämpötila päivälle j (ºC) (RIL 261-2013, s. 15).

Tieliikennetunneleiden lämmöneristyksen mitoituksessa käytetään mitoituspakkasmääränä tilastollisesti keskimäärin kerran 50 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää F_{50} (RIL 261-2013, s. 209). Kyseinen pakkasmäärä on tilastollisesti suurin mahdollinen 50 vuoden ajanjaksolla toistuva pakkasmäärä (RIL 261-2013, s. 254). Luotettaviin selvityksiin perustuen, voidaan tapauskohtaisesti mitoituspakkasmääränä käyttää sisäilman mitoituspakkasmäärää F_{50T}, jos tunnelin sisäilman pakkasmäärä on pienempi kuin ulkoilman pakkasmäärä (Liikennevirasto 2018a, s. 45). Toisin sanoen on siis kyettävä osoittamaan, että tunnelin sisäilman pakkasmäärä on pienempi, kuin tunnelin ulkopuolella oleva pakkasmäärä (Liikennevirasto 2018a, s. 45). Tämä onnistuu käytännössä vain, jos suunniteltavan tunnelin lähistöllä on mittasuhteiltaan ja ominaisuuksiltaan kohtuullisen vastaavanlainen tunneli, jonka sisälämpötiloja voidaan mitata yhden kokonaisen talvikauden ajan. Mittaukset voitaisiin tehdä myös rakenteilla olevassa tunnelissa, jos tunneli on avoinna koko talvikauden ajan. Rakenteilla olevat tunnelit ovat kuitenkin harvoin avoinna koko talvikautta, koska tunnelin suuaukot ovat usein suojattu sisätöiden suorittamista varten ja työpisteillä käytetään lämmittimiä. (RIL 261-2013, s. 209) Kuvassa 13 on esitetty Suomen alueittaiset pakkasmäärien F_{50} arvot.



Kuva 13. *Suomessa tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä F_{50} (RIL 261-2013, s. 18).*

Pakkasmäärien arvot riippuvat talven ankaruudesta ja eri vuosien välillä voi olla huomattavaakin vaihtelua. Tilastolliset pakkasmäärät on laskettu Ilmatieteen laitoksen säähavaintojen perusteella ajanjaksolta 1978–2007. Pakkasmääräkäyrien välillä arvot interpoloidaan suoraviivaisesti. (RIL 261-2013, s. 16)

Todennäköisyys pakkasmäärän F_{50} toteutumiselle tiettynä vuonna on siis 1/50 eli 2 %. Todennäköisyys on hyvin pieni, mutta koska tunnelin sekundäärirakenteet, kuten verhousrakenne, suunnitellaan kestämään vähintään 50 vuotta (Liikennevirasto 2017, s. 19), on pakkasmäärän toteutuminen käyttöiän aikana todennäköinen.

4. LÄMMÖNERISTÄMINEN

4.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektion avulla. Johtumisessa on kyse molekyylien sisältämän liike-energian siirtymisestä molekyylistä toiseen. Lämmön johtumisesta voidaan puhua myös lämmön virtauksena. Säteilyssä energiaa siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, lähettävät jossain määrin säteilyä. (Björkholtz 1997, s. 12) Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana joko luonnollisesti tai pakotetusti. Luonnollinen konvektio perustuu lämpötilaerojen aiheuttamiin tiheyseroihin ja pakotettu konvektio ulkopuolisen voiman vaikutukseen. (Björkholtz 1997, s. 13)

Lämmön siirtymisen edellytyksenä on, että on olemassa lämpötilaero (Fagerholm 1986, s. 255). Lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan, eikä lämpö siirry itsestään kylmemmästä kappaleesta lämpimämpään kappaleeseen (Hemilä & Utriainen 1989, s. 80). Toisin sanoen lämpö siirtyy spontaanisti aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Tieliikennetunneleiden tapauksessa tämä tarkoittaa lämmön siirtymistä verhousrakenteen kallion puoleiselta, lämpimämmältä puolelta, kylmempään tunnelitilaan.

4.2 Lämmöneristeet

Lämmöneriste on rakennusmateriaali tai ainekerros, jota käytetään lämmönsiirtymisen estämiseen rakenteen puolelta toiselle. Lämmöneristeen lämmöneristyskyky voi perustua yhteen tai useampaan tekijään. Yhtenä tärkeimpänä ominaisuutena lämmöneristeillä on eristeessä olevan, paikallaan pysyvän ilman alhainen lämmönjohtavuus. (RIL 255-1-2014, s. 260) Eristemateriaalin lämmönjohtavuuteen vaikuttaa tämän lisäksi sen koostumus ja muiden ainesosien lämmönjohtavuus (RIL 261-2013, s. 62). Lämmöneristeiden hygroskooppisuudessa, eli kyvystä sitoa kosteutta ympäröivästä ilmasta, on lämmöneristetyyppien välillä eroja. Tieliikennetunneleissa käytettyjen solumuovieristeiden hygroskooppisuus on alhainen. (RIL 255-1-2014, s. 261)

Lämmöneristeiden tulee säilyttää ominaisuutensa rakenteen koko rakenteen käyttöiän ajan. Tärkeimmät lämmöneristeiden ominaisuudet, joihin asetetaan vaatimuksia, ovat:

- lämmönjohtavuus

- kosteuden pääsy ja vaikutus eristeeseen
- pakkasenkestävyys
- kuormituskestävyys (staattinen ja dynaaminen kuormitus)
- kestoikä
- ympäristökelpoisuus. (RIL 261-2013, s. 61)

SFS-EN 13163:2013 + A2:2016:en ja *SFS-EN 13164 + A1* -standardeissa on määritelty tarkemmin tieliikennetunneleissa käytetyiltä EPS- ja XPS-eristeiltä vaadittuja ominaisuuksia.

Rakenteissa tulee käyttää sopivia lämmöneristeitä oikealla tavalla, jotta lämmöneristys toimii halutulla tavalla koko suunnitellun rakenteen käyttöiän ajan. Jos lämmöneristeet suunnitellaan ja asennetaan rakenteeseen väärin, voi seurauksena olla arvioitua suurempi lämpövirta eli lämmön siirtyminen rakenteen läpi. (Björkholtz 1997, s. 35) Tästä seurauksena kalliotunneleissa on aikaisemmin mainitut pakkasvauriot ja -rapautuminen. Tunneleissa lämmöneristeet sijaitsevat ruiskubetoniverhouksen takana piilossa, jolloin vaurioista ja lämmöneristeiden uusimisesta aiheutuvat korjauskustannukset voivat nousta suuriksi. Rakenteiden korjaaminen häiritsee myös tunnelissa kulkevaa liikennettä, koska ylimääräistä tilaa korjaamista varten on tunneleissa usein vähän.

4.3 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus kertoo siitä, kuinka hyvin materiaali johtaa lämpöä. Mitä pienempi lämmönjohtavuuden lukuarvo on, sitä parempi eriste materiaali on. (Taloon.com 2022) Tärkein lämmönjohtavuuteen vaikuttava tekijä on eristemateriaalin ilmahuokoisuus eli ilmatäytteisten huokosten tilavuus eristemateriaalin kokonaistilavuudesta. Tämä perustuu ilman alhaiseen lämmönjohtavuuteen, joka on vain noin 0,026 W/mK. Eristemateriaalissa olevan kiintoaineksen lämmönjohtavuudella on myös vaikutusta lämmönjohtavuuteen, jos sen tiheys on suuri. (RIL 261-2013, s. 62) Lämmöneristeiden lämmönjohtavuuteen vaikuttaa myös lämpötilan muutos. Lämmönjohtavuus alenee eli eristyskyky paranee lämpötilan laskiessa. Tämä perustuu siihen, että ilman ja muiden eristeessä olevien kaasujen lämmönjohtavuus pienenee lämpötilan laskiessa. (RIL 255-1-2014, s. 260)

Lämmöneristeen kostuminen aiheuttaa sen huokostilan vedenkylläisyysasteen kasvua ja lämmöneristeen jäätyminen vastaavasti jäänkyllästysasteen kasvua. Veden lämmönjohtavuus on noin 0,56 W/mK ja jään lämmönjohtavuus noin 2,3 W/mK. (RIL 261-2013, 62) Toisin sanoen eristeen ilmatäytteiset, alhaisen lämmönjohtavuuden

omaavat huokoset täyttyvät korkeamman lämmönjohtavuuden omaavalla vedellä ja jäällä. Täten kostuneen ja etenkin jäätyneen materiaalin lämmöneristyskyky on heikompi, kuivaan materiaaliin verrattuna. (RIL 261-2013, s. 62) Liikenneviraston (2017, s. 37) mukaan veden imeytymisen lämmöneristyskykyä alentava vaikutus tulee ottaa huomioon lämmöneristeen mitoituslämmönjohtavuudessa.

Lämmöneristeitä mitoitettaessa käytettävä lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, λ_U (W/mK), voidaan laskea kaavalla 2

$$\lambda_{\mathrm{U}} = \lambda_{\mathrm{Declared}} \cdot F_{\mathrm{T}} \cdot F_{\mathrm{m}} \cdot F_{\mathrm{a}}, \qquad (2)$$

jossa $\lambda_{Declared}$ on lämmöneristeen valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuuden arvo, F_T lämpötilan muuntotekijä, F_m kosteuden muuntotekijä ja F_a vanhenemisen muuntotekijä. (RIL 261-2013, s. 62) Suunnitteluarvoja ja muuntotekijöitä on käsitelty tarkemmin standardissa SFS-EN ISO 10456 + AC.

Valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuuden arvo, $\lambda_{Declared}$, määritetään laboratoriomittauksin. Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvolla, λ_U, tarkoitetaan rakenteessa olevan lämmöneristekerroksen keskimääräistä, tehollista lämmönjohtavuutta käyttöolosuhteissa. Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot riippuvat asennus- ja suojaustavasta sekä eristeen kosteustilasta. (RT 36-11113 2013, s. 3)

Kappaleen paksuuden *d* (m) ja lämmönjohtavuuden *λ* (W/mK) suhdetta, *d/λ*, kutsutaan lämmönvastukseksi *m* (m^2K/W) (Björkholtz 1997, s. 12). Lämmönvastuksen arvoa käytetään tieliikennetunneleiden lämmöneristeiden mitoituksessa. Tätä käsitellään luvussa 6.

4.4 Kosteus

Lämmöneristeiden kuten muidenkin rakennusaineiden lämmönjohtavuus kasvaa eli lämmöneristyskyky heikkenee niiden kosteuspitoisuuden kasvaessa (Björkholtz 1997, s. 35) Kosteus vetenä heikentää täten merkittävästi lämmöneristeiden toimintaa. Kosteusteknisesti väärin suunnitellun ja rakennetun rakenteen lämmöneristyskyky heikkenee ajan mittaan. (Björkholtz 1997, s. 8)

Kosteus liikkuu rakenteissa joko vesihöyrynä tai nesteenä tai samanaikaisesti molemmissa olomuodoissa (Björkholtz 1997, s. 53). Vesihöyryn liikkuminen tapahtuu rakennusfysiikassa joko diffuusiona, jossa vesimolekyylit siirtyvät korkeamman konsentraation eli pitoisuuden puolelta alhaisemman konsentraatioon puolelle tai konvektiona, jossa ilma toimii vesihöyryä siirtävänä aineena (Björkholtz 1997, s. 52). Diffuusion saa aikaan vesihöyrypitoisuuksien ero rakenteen eri puolilla (Björkholtz 1997,

s. 55). Konvektion saa aikaan rakenteen eri puolilla vallitsevat erilaiset ilman kokonaispaineet. Ilmanpaine-eroja aiheuttavat tuuli, lämpötilaerot sekä ilmanvaihtojärjestelmät ja puhaltimet. (Björkholtz 1997, s. 57) Veden liikkumiseen nesteenä vaikuttaa vedenpaine, tuulenpaine sekä kapillaari-imu (Björkholtz 1997, s. 53).

Björkholtzin (1997, s. 52) mukaan rakennusaineen ja sen ympäristön välillä vallitsee aina jokin seuraavista olosuhteista:

- rakennusaine ottaa vettä ympäristöstään. Tätä ilmiötä kutsutaan kostumiseksi eli absorptioksi
- rakennusaine luovuttaa vettä ympäristöönsä. Tätä ilmiötä kutsutaan kuivumiseksi eli desorptioksi
- rakennusaine on tasapainossa ympäristönsä kanssa.

Siirtyviin vesimääriin ja nopeuksiin vaikuttaa rakennusaineen lisäksi ympäristö. Olosuhteet voivat olla kostea ilma, vesi tai toinen aine. Rakennusaineen hygroskooppisuus on määräävä tekijä kosteuden siirtymiseen ensimmäisessä tapauksessa, veden kapillaarisuus toisessa ja kolmannessa tapauksessa vaikuttavat molemmat tekijät. (Björkholtz 1997, s. 52)

Kostea ilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Tietyssä lämpötilassa, niin sanotussa kastepisteessä, ilma voi sisältää enintään tietyn määrän vesihöyryä. Tätä vesihöyry- eli kosteusmäärää kutsutaan kyllästyskosteudeksi. Mitä korkeampi lämpötila, sitä suurempi on myös kyllästyskosteus. (Björkholtz 1997, s. 43) Lämpimämpi ilma voi siis sisältää enemmän kosteutta, kuin kylmempi ilma. Kostean ilman joutuessa kosketuksiin sellaisen pinnan tai huokosseinämän kanssa, jonka lämpötila alittaa ilman kastelämpötilan, tiivistyy pinnalle tai huokosseinämään kosteutta (Björkholtz 1997, s. 64). Toisin sanoen kosteus ei pysy vesihöyrynä vaan alkaa tiivistyä vedeksi. Suomen lämpötilojen suurten vaihtelujen takia, ilman vesihöyrypitoisuuksien vaihtelut ovat myös suuret eri vuodenaikoina: kesällä ulkoilmassa on moninkertaisesti enemmän vesihöyryä kuin talvella (Björkholtz 1997, s. 48). Tästä voidaan päätellä, että pakkasella tunnelitilan alhaisen vesihöyryn paineen takia tunnelin verhousrakenteen takana muodostunut kosteus pyrkii tunnelitilaan päin. Tämän vuoksi talvella tunnelin ruiskubetonin pinnalle voi siten tiivistyä kosteutta vetenä, jos tunnelissa ei ole oikeanmukaista vesi- ja lämmöneristettä.

5. LÄMMÖNERISTEMATERIAALIT

Tieliikennetunneleiden lämmöneristemateriaaleina käytetään yleisesti erilaisia solumuoveja. Solumuovit ovat solumaisen rakenteen omaavia muoveja, joissa solut voivat olla joko avoimia tai suljettuja (RIL 255-1-2014, s. 264). Avoimien ja suljettujen solujen suhteella on vaikutusta muun muassa solumuovin vesihöyrynläpäisyyn ja siten käyttökohteen valintaan. Solumuovien lämmönjohtavuudet muuttuvat niiden tiheyden ja kosteuspitoisuuden mukaan. (RIL 117-1979, s. 162) Tieliikennetunneleiden lämmöneristämisessä käytettäviä solumuovityyppejä ovat erilaiset polystyreenit sekä polyeteeni. Polystyreeni on jalostettu maaöljystä ja sen valmistustapoja ovat muottimenetelmä ja suulakepuristusmenetelmä (RIL 117-1979, s. 162). Polyeteeni on maailman käytetyin kestomuovi, josta voidaan eristeiden lisäksi valmistaa pakkausmateriaaleja ja tiivisteitä (Cellfoam 2022).

Solumuovit kestävät vettä melko hyvin. Vesi ei yleensä pääse tunkeutumaan niihin juuri pintakerrosta syvemmälle. Solumuovieristeet tulee työmaalla kuitenkin säilyttää sadevedeltä suojattuna. Solumuovit eivät myöskään johda vettä kapillaarisesti, joten niitä voidaan käyttää kapillaarikatkoina. (Björkholtz 1997, s. 35) Kapillaarisuudella tarkoitetaan lämmöneristeen kykyä imeä ja siirtää vettä itseensä niiden ollessa kosketuksissa veden kanssa (Björkholtz 1997, s. 53)

5.1 Paisutetut polystyreenisolumuovilevyt (EPS)

Paisutettu polystyreeni (engl. expanded polystyrene, EPS) eli puhekielessä myös styrox, on umpisoluista muovia, jonka raaka-aineena käytetään ponnekaasua sisältäviä polystyreenihelmiä (RIL 255-1-2014, s. 264). Ponneaineena käytetään pentaania, joka valmistuksessa korvautuu ilmalla (RIL 261-2013, s. 66). Polystyreenihelmet paisutetaan vesihöyryn avulla ja helmien kiinnittyessä toisiinsa, muodostuu muotissa kiinteä ja halutun muotoinen kappale. Valmiissa EPS-eristeessä ilmaa on noin 2 % eristeen tilavuudesta ja loput ilmaa. (RIL 255-1-2014, s. 264)

EPS-eristeen tiheys on tuotteen mukaan 15–60 kg/m^3 (RT 36-11113 2013, s. 3). EPS-eristeen lämmönjohtavuus on tuotteesta riippuen välillä 0,033–0,039 W/(mK) (RIL 255-1-2014, s. 265) ja infrarakenteille esitetään EPS-eristeiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoksi λ_U = 0,060–0,065 W/mK (RIL 261-2013, s. 66).

EPS:n lämmöneristyskyky perustuu sen umpisoluiseen rakenteeseen ja sen sisältämän, paikallaan pysyvän ilman alhaiseen lämmönjohtavuuteen. Eristeessä lämpö siirtyy soluseinien kautta johtumalla, huokospintojen lämpösäteilynä ja solujen sisäisten ilmavirtojen konvektoimana. EPS-eristeen lämmöneristävyys paranee lämpötilan laskiessa. (RT 36-11113 2013, s. 3) Lämmöneristävyys paranee myös silloin, kun EPS-eristeen tiheys ja solurakenteen tiiviys kasvaa (RIL 255-1-2014, s. 264). EPS-eristeet ovat kosteusteknisesti kestäviä, mutta eristeen kosteuspitoisuudella on vaikutusta lämmönjohtavuuteen. EPS-eristeiden lämmöneristyskykyä voidaan parantaa sekoittamalla polystyreeniin lämpösäteilyä absorboivia lisäaineita, kuten grafiittia ja nokimustaa. (RIL 255-1-2014, s. 265)

EPS-eristeet ovat väriltään usein valkoisia ja ne ovat hyvin kevyitä ja sitkeän lujia lämmöneristeitä (RIL 117-1979, s. 164). EPS-eristeiden vesihöyrynläpäisevyys on muita muovieristeitä suurempi, jonka takia vesihöyry pääsee liikkumaan eristeen läpi. Tämän takia rakenteissa on käytettävä eristeen lämpimämmällä puolella höyrynsulkua, jos kosteuden poistumista lämmöneristeestä ulospäin ei voida varmistaa. (RT 36-11113 2013, s. 3) Kuvassa 14 on esitetty EPS-levy.

Kuva 14. *EPS-levy (K-Rauta 2022a).*

EPS-eristeet eivät johda vettä kapillaarisesti eivätkä ne lahoa maaperässä. Ne kestävät hyvin maaperässä ja pohjavedessä normaalisti tavattavia suoloja, happoja ja emäksiä, eikä eristeistä haihdu terveydelle tai ympäristölle haitallisia aineita maaperään, pohjaveteen tai ilmakehään. (RIL 261-2013, s. 66)

5.2 Suulakepuristetut polystyreenisolumuovilevyt (XPS)

Suulakepuristettu polystyreeni (engl. extruded polystyrene, XPS) on ekstruusiomenetelmällä eli suulakepuristamalla polystyreenistä valmistettua

polystyreenisolumuovia (RIL 255-1-2014, s. 265). Suulakepuristusmenetelmässä sulaan polystyreeniin liuotetaan korkeassa paineessa paisunta-aineena toimivaa hiilidioksidia (RIL 261-2013, s. 66) tai HFC-kaasua (RT 36-11102 2012, s. 1). Menetelmässä polystyreenin, paisunta-aineen ja muiden lisäaineiden massa paisuu vapaana korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Paineen muuttuessa normaaliin ilmanpaineeseen, paisunta-aine kaasuuntuu paisuttaen polystyreenin, ja samalla massan lämpötila laskee, jolloin rakenne jäähtyessään jähmettyy. Suulakepuristamalla on mahdollista säädellä solumuovin suljettujen kennojen kokoa, suuntaa ja seinämien vahvuutta, ja tätä kautta eristeen ominaisuuksia. (RIL 255-1-2014, s. 265) Suulakepuristetun polystyreenin solurakenne on suljettu, yhtenäinen ja tiivis (RIL 261-2013, s. 66–67). Solujen välissä ei täten ole ilmakäytäviä, joihin kosteus voisi kerääntyä (RIL 117-1979, s. 164). Eristeen pinnalla olevan yhtenäisen polystyreenikerroksen ansiosta vesi ei pääse tunkeutumaan rikkisahattua pintasolukkoa pidemmälle (RIL 255-1-2014, s. 265). Valmistuksessa käytetty paisunta-aine poistuu solumuovista muutaman viikon kuluessa valmistuksesta korvautuen ilmalla (RIL 261-2013, s. 67). XPS-eristeen tilavuudesta ilmaa on noin 97 % ja raaka-ainetta noin 3 % (RIL 255-1-2014, s. 265).

XPS-eristeen tiheys on tuotteen mukaan 25–50 kg/m^3 (RT 36-11102 2012, s. 2). XPS-lämmöneristeen lämmönjohtavuus on välillä 0,033–0,037 W/(mK) (RIL 255-1-2014, s. 265). RIL 261-2013 (s. 67) mukaan infrarakenteissa käytettäville XPS-eristeille esitetään lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoksi λ_U = 0,045–0,055 W/mK.

XPS-eristeet ovat valmistajasta riippuen väriltään joko keltaisia, vihreitä tai sinisiä. Eristeen lämmöneristyskyky perustuu sen umpisoluiseen rakenteeseen ja solujen sisältämään ilmaan tai raskasmolekyyliseen kaasuun. XPS-eristeiden vesihöyrynläpäisevyys on pieni, joten niitä voidaan tiiviisti saumattuina käyttää myös höyrynsulkuna. Tiheyden kasvaessa eristeen kuormituskestävyys paranee. (RT 36-11102 2012, s. 2) Kuvassa 15 on esitetty XPS-levy.

***Kuva 15**. XPS-levy (K-Rauta 2022b).*

Kuten EPS-eristeet, eivät XPS-eristeetkään johda vettä kapillaarisesti, eivätkä ne lahoa maaperässä. Eristeet kestävät myös hyvin maaperässä ja pohjavedessä normaalisti tavattavia suoloja, happoja ja emäksiä, eikä eristeistä haihdu terveydelle tai ympäristölle haitallisia aineita maaperään, pohjaveteen tai ilmakehään. (RIL 261-2013, s. 67)

5.3 Polyeteenisolumuovimatot ja -levyt

RIL 261-2013 (s. 67) mukaan polyeteenisolumuovi valmistetaan solustamalla polyeteeniä siten, että materiaalin silloittuminen tapahtuu jatkuvana prosessina. Silloittumisella tarkoitetaan muovin polymeerien välisten sidosten muodostamista (Plastics Today 2015). Muoviraaka-aineen lisäksi valmistuksessa käytetään muun muassa paisutus- ja silloitusaineita ja mahdollisesti erilaisia lisäaineita. Silloittumisen ansiosta molekyylit sitoutuvat toisiinsa tietyllä tavalla ja lopputuloksena saadaan polyeteenisolumuovi, joka on joustavaa sekä kulutusta kestävää materiaalia, jonka elastisuus säilyy alhaisissakin lämpötiloissa. (RIL 261-2013, s. 67) Kuvassa 16 on esitetty polyeteenisolumuovimattoa, eli niin sanottua pakkasmattoa.

Kuva 16. *Polyeteenimattoa rullalla (Meltex 2022).*

Polyeteenilevyjen paksuus on yleensä enintään 15 mm, mutta laminoimalla polyeteenilevyistä voidaan muodostaa paksumpia. Polyeteenisolumuovin tärkeimmät ominaisuudet ovat hyvä eristyskyky ja vetolujuus, alhainen kosteusabsorptio sekä joustavuus. (RIL 261-2013, s. 67)

Yleisesti polyeteenistä valmistettuja, niin sanottuja routa- tai pakkasmattoja käytetään valueristeenä suojamaan betonivalua pakkaselta ja liian nopealta kosteuden haihtumiselta (Meltex 2022). Tyypillisesti tieliikennetunneleiden seinät ja holvi lämmöneristetään polyeteenisolumuovilevyillä (RIL 261-2013, s. 215). Polyeteenisolumuovimatot soveltuvat lähinnä työnaikaisiin routasuojauksiin, jos niitä ei kuormiteta. Työnaikaisten routasuojausten lämmönjohtavuuden suunnitteluarvona, λ_U, voidaan uusilla polyeteenisolumuovimatoilla käyttää arvoa 0,038 W/mK. (RIL 261-2013, s. 67)

6. LÄMMÖNERISTÄMISRATKAISUT

6.1 Lämmöneristerakenteiden suunnittelu

Tunnelin kuivat osat, joissa ei esiinny vesivuotoja, voidaan periaatteessa jättää lämmöneristämättä. Näiden kohtien kuivana pysyminen myös tunnelin käyttöönoton jälkeisissä olosuhteissa on kuitenkin epävarmaa. Jälkikäteen tehtävät lämmöneristystyöt ovat usein liikenteen takia hankalia ja taloudellisesti kalliita toteuttaa. (RIL 261-2013, s. 211) Lämmöneristämättä jättämiseen tulee tästä syystä olla riittävät tutkimukset ja perustelut, jotta myöhemmin ilmeneviltä ongelmilta vältytään varmasti.

RIL 261-2013 (s. 212) mukaan tieliikennetunneleiden lämmöneristerakenteiden suunnittelu voidaan jakaa seuraaviin osatehtäviin:

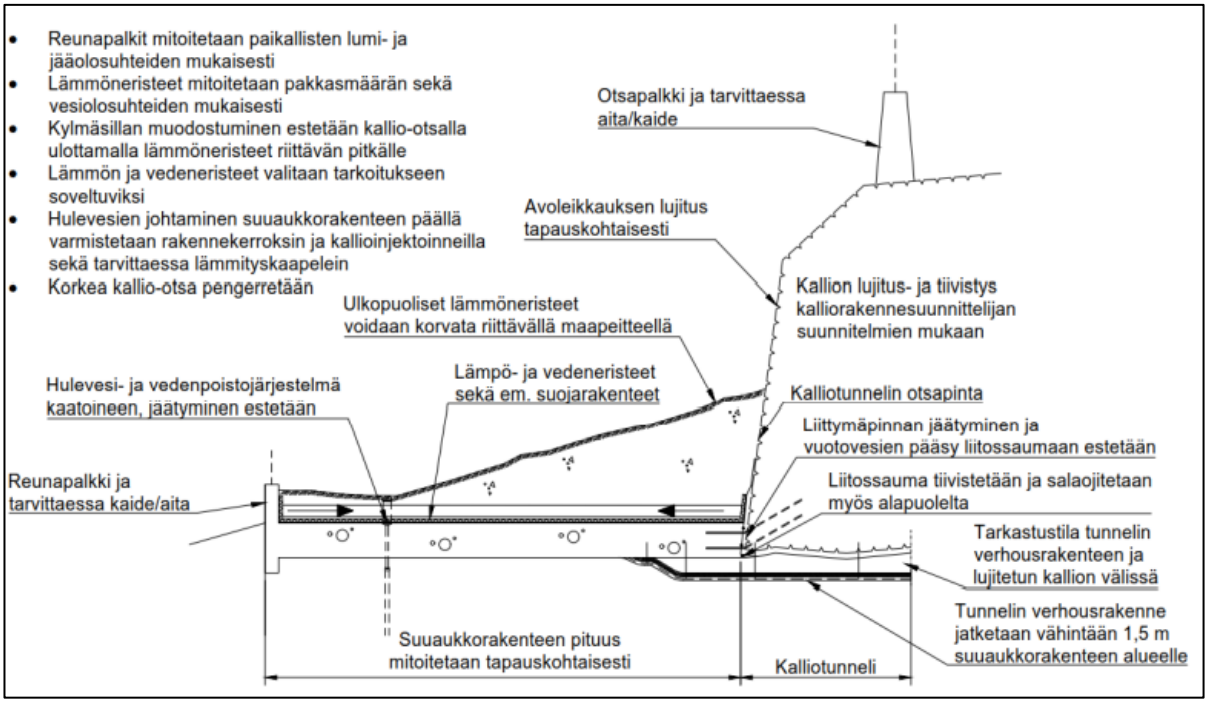
- seinä- ja holvirakenteen lämmöneristeen paksuuden ja laajuuden määrittäminen
- poikkileikkauksen pohjalla sijaitsevien kuivatusrakenteiden lämmöneristeen paksuuden, laajuuden ja leveyden määrittäminen
- muiden rakenteiden, kuten ilmanvaihto- ja savunpoistokuilujen sekä yhdyskäytävien, lämmöneristyksen paksuuden ja laajuuden määrittäminen.

Näiden lisäksi tunnelin suuaukot tulee tarkastella erikseen lämmön- ja vedeneristävyyden näkökulmasta, koska ne ovat eniten alttiina sääolosuhteille, kuten vesi- ja lumisateelle, tuulelle sekä pakkaselle.

6.2 Tieliikennetunnelin suuaukot

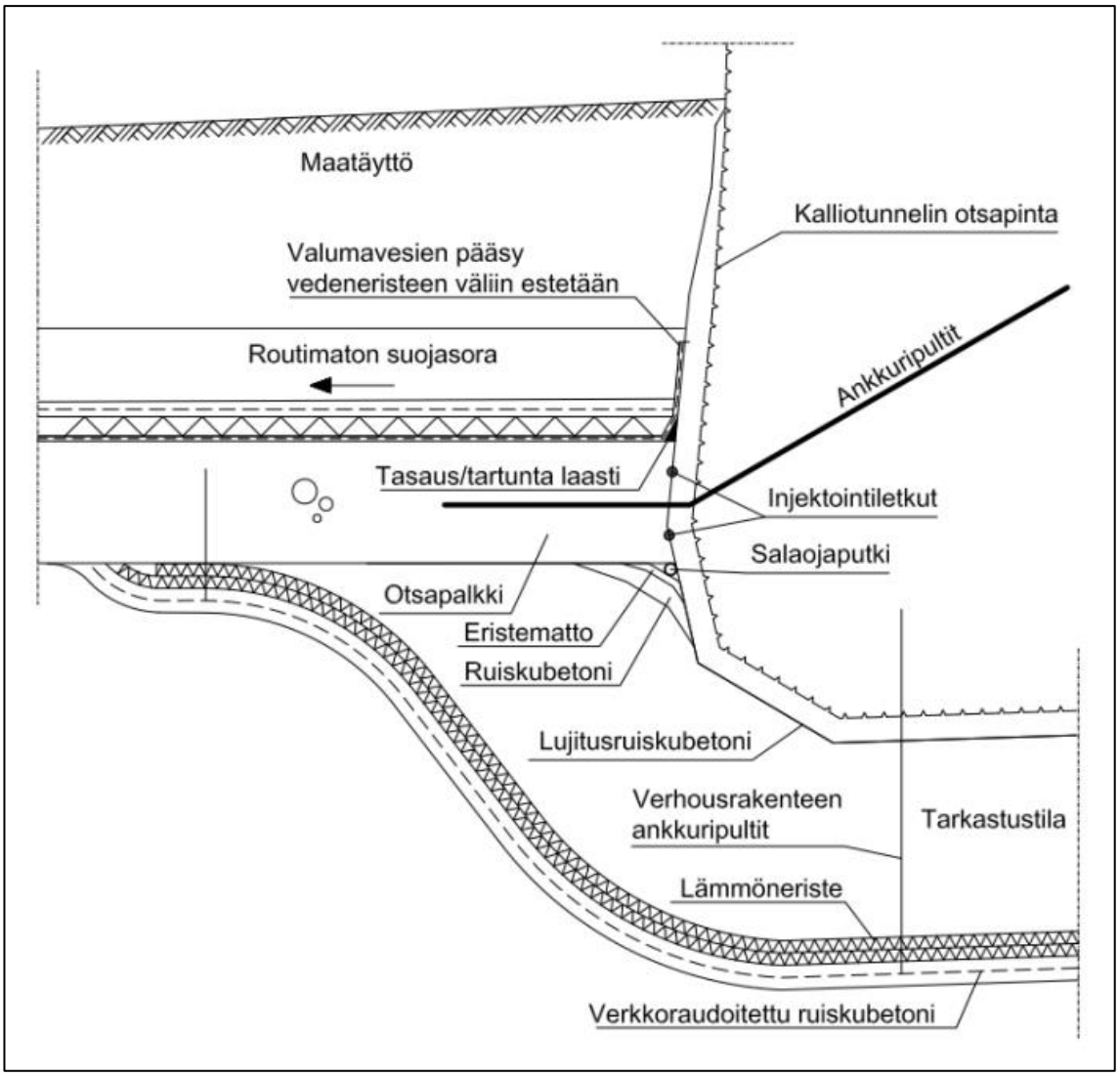
Liikenneviraston (2017, s. 40) mukaan suuaukkorakenteet suunnitellaan sellaisiksi, että niiden avulla estetään maastosta valuvan veden, lumen ja jään pääsy ajoradalle sekä kosketuksiin tunnelin teknisten laitteiden kanssa. Tieliikennetunneleiden suuaukkojen läheisyydessä kalliomassa jäähtyy voimakkaasti myös tunnelin ulkopuolelta otsan, suuaukon viereisen kallion ja tunnelin yläpuolisen kallion kautta. Suuaukkojen lähiympäristöt tulee tarkastella erikseen suunniteltaessa tieliikennetunneleiden lämmöneristysrakenteita. (RIL 261-2013, s. 211)

Kalliotunneleiden suuaukot suunnitellaan ja rakennetaan useimmiten betoni- tai terätunneleiksi (Liikennevirasto 2014, s. 13). Tunneleiden suuaukkorakenteet ovat lähes poikkeuksetta tunnelikohtaisia, eikä tämän takia yleispätevää tyyppipiirustusta voida esittää. (Liikennevirasto 2014, s. 17) Kuvassa 17 on esitetty periaatekuva suuaukkorakenteen mahdollisesta rakenteesta sekä kerrottu suuaukkorakenteen suunnitteluperusteita.



Kuva 17. *Tunnelin suuaukkorakenteen pituusleikkauksen periaatekuva (Liikennevirasto 2017, s. 40).*

Suuaukkorakenteiden pituudet, reunapalkkien ja rakenteiden korkeudet sekä lämmöneristeiden laajuudet ja paksuudet mitoitetaan pakkasmäärien ja paikallisten vesi-, jää- ja lumiolosuhteiden perusteella. Suuaukkorakenteiden ja kallion liitoskohtien vuoto- ja jäätymishaittojen eliminoimiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Liitoskohdat eivät saa jäätyä missään tilanteessa ja liitoksen jäätyminen sekä veden pääsy saumaan tulee estää sauman yläpuolelta. Liitoskohdissa lämmöneristerakenteet tulee ulottaa suuaukkorakenteen puolelle kalliotunnelista tai suuaukkorakenteen sisäpinta varustetaan lämmitysjärjestelmällä. (Liikennevirasto 2017, s. 41) Kuvassa 18 on tarkempi kuvaus suuaukkorakenteen yhtymisestä kalliotunnelin otsaan.



Kuva 18. *Suuaukkorakenteen ja kalliotunnelin otsan yhteenliittyminen (Liikennevirasto 2017, s. 42).*

6.3 Seinä- ja holvirakenteet

Kalliotunnelin verhousrakenteen lämmöneristeet mitoitetaan pakkasmäärän F_{50} tai mahdollisesti F_{50T} mukaan, jos vastaavanlaisen tunnelirakenteen lämpötilaseurantaan perustuvaa analyysiä on saatavilla kokonaiselta talvikaudelta (Liikennevirasto 2017, s. 37).

Tieliikennetunneleiden seinien ja holvin lämmöneristysrakenteeksi suositellaan rakenneratkaisua, jossa kallion ja verhousrakenteen väliin jätetään tarkastustila. Ankarina talvina on mahdollista, että vuorokausikeskilämpötilat saattavat olla muutaman viikon ajan jopa -20 – -35 °C. Tällaisissa olosuhteissa kylmä ilma tunkeutuu paksunkin lämmöneristeen läpi ja jos verhousrakenteen ja kallion välissä on tarkastustila, voidaan

verhousrakenteen takana sallia lyhytaikaisia pakkaslämpötiloja rakenteiden vaurioitumatta. (RIL 261-2013, s. 215)

Seinä- ja holvirakenteen lämmöneristeenä käytetään yleensä polystyreeni- ja polyeteenisolumuovilevyjä. Polystyreenilevyjä käytetään yleensä betonirakenteiden, kuten törmäyssuojien, betoniseinien ja -holvien taustoille liimattuina ja polyeteenilevyjä pulttirakenteiden avulla irti kalliopinnasta tai suoraan kallio- tai lujitusruiskubetonikerroksen pintaan asennettuina. Seinien ja holvien lämmöneristeet tulee suojata palosuojakerroksella, joka on yleensä 80 mm:n paksuinen ruiskubetonikerros. (RIL 261-2013, s. 215) Kuvassa 19 on esitetty tieliikennetunnelin tyypillinen lämmöneristerakenne, jossa törmäyssuojan taakse on asennettu polystyreenilevyt ja seiniin ja holviin on asennettu ilmatilallinen ja palosuojattu polyeteenilevyrakenne (RIL 261-2013, s. 215).

Kuva 19. *Tyypillinen tieliikennetunnelin lämmöneristerakenne (RIL 261-2013, s. 215).*

Tieliikennetunnelin tunneliputkien välinen keskiseinä voi olla tapauskohtaisesti korvattu myös niin sanotuilla kalliopilareilla (Liikennevirasto 2017, s. 26). Rinnakkaisten tunneliputkien välisissä pilarirakenteissa lämpötilat laskevat talvella nopeammin kuin tavallisessa kallioseinässä. Lämmöneristeitä suunniteltaessa on mahdolliset pilarirakenteet tarkasteltava erikseen. (RIL 261-2013, s. 211)

6.4 Lämmöneristeen paksuuden määrittäminen

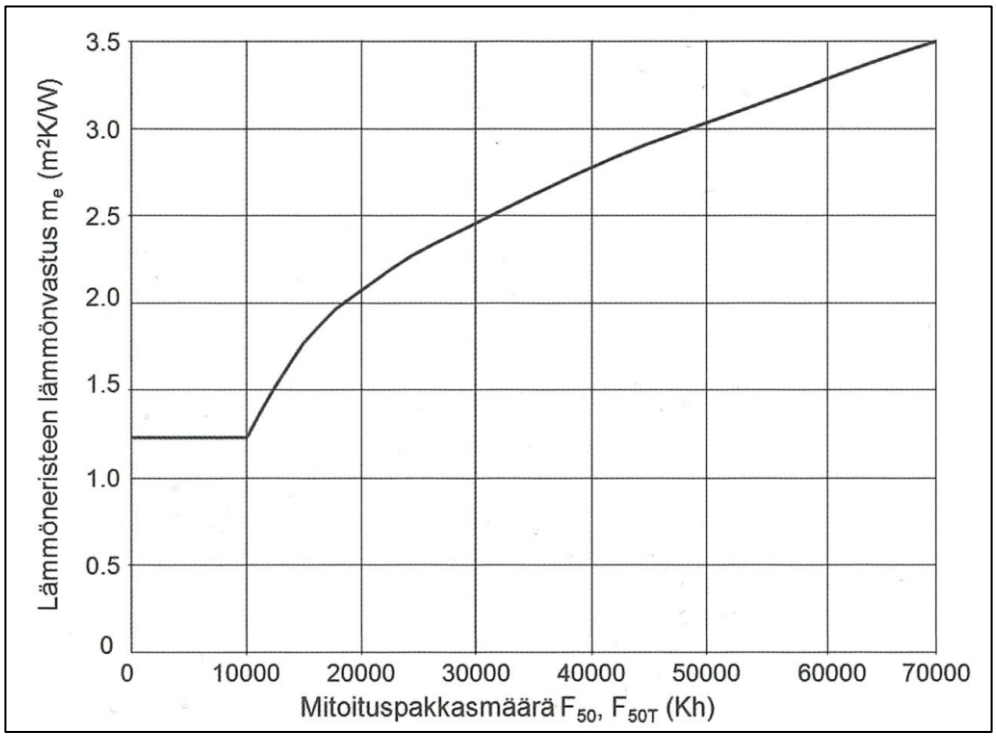
RIL 261-2013 (s. 214–215) mukaan lämmöneristeen paksuus d_e (seinä- ja holvirakenne, mm) tai d_k (pohjan kuivatusrakenne, mm) voidaan määrittää lämmöneristeen lämmönvastuksen m_e (seinä- ja holvirakenne, m^2K/W) tai m_k (pohjan kuivatusrakenne,

m^2K/W) ja lämmöneristeen mitoituslämmönjohtavuuden λ_U (W/Km) perusteella kaavoilla 3 ja 4

$$d_e = 1000 \cdot m_e \cdot \lambda_U \quad (3)$$

$$d_k = 1000 \cdot m_k \cdot \lambda_U \quad (4)$$

Seinä- ja holvirakenteen lämmöneristeen lämmönvastus m_e (m^2K/W) voidaan määrittää mitoituspakkasmäärän F_{50} tai F_{50T} suhteen kuvassa 20 esitetyn kuvaajan perusteella.



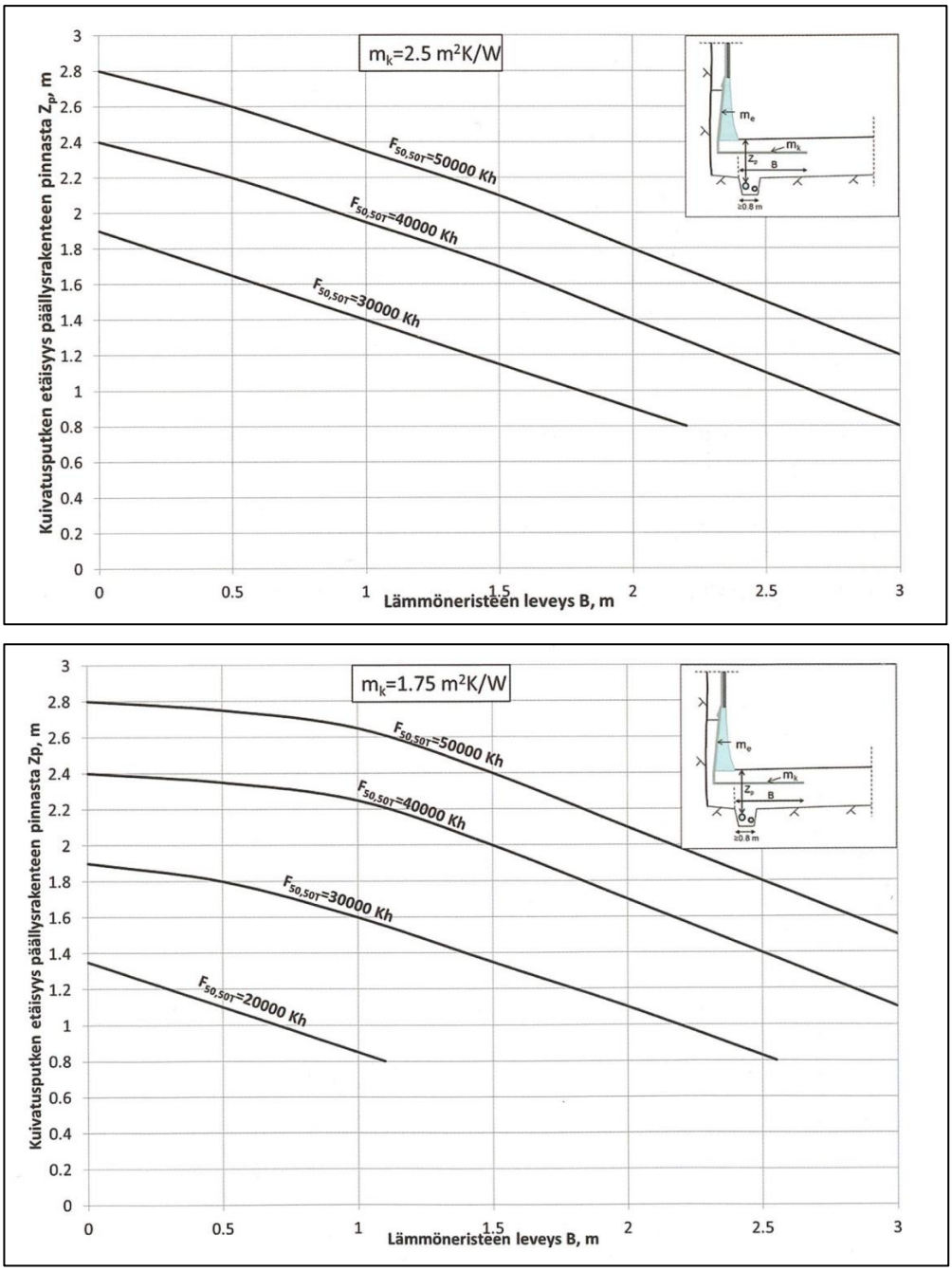
Kuva 20. *Seinä- ja holvirakenteen lämmöneristeen lämmönvastus mitoituspakkasmäärän F_{50} ja F_{50T} suhteen (RIL 261-2013, s. 212).*

6.5 Tieliikennetunnelin pohja

Kallioon rakennetun tieliikennetunnelin pohja tulee louhia riittävän syväksi roudattomaan syvyyteen sekä varustaa massanvaihdolla ja kuivatusjärjestelmällä, jotta tien routiminen voidaan estää (Väylävirasto 2019c, s. 73), koska tierakenteessa käytetyt lämpöeristeet voivat aiheuttaa ongelmia tien pinnan jäätymiskäyttäytymisen suhteen (RIL 165-2-2006, s. 395). Tunnelin seinien alaosan perustukset ja kuivatusjärjestelmä voidaan lämpöeristää tai ulottaa routimattomaan syvyyteen asti (Väylävirasto 2019c, s. 73). Etenkin tunneleissa, joissa on kapea poikkileikkaus, olisi lämpöteknisesti paras ratkaisu lämpöeristää koko tunnelipohja (RIL 261-2013, s. 212–213). Koko tunnelin pohjan laajuista lämpöeristämistä eli niin sanottua routalevyä ei nykyään rakennettaviin

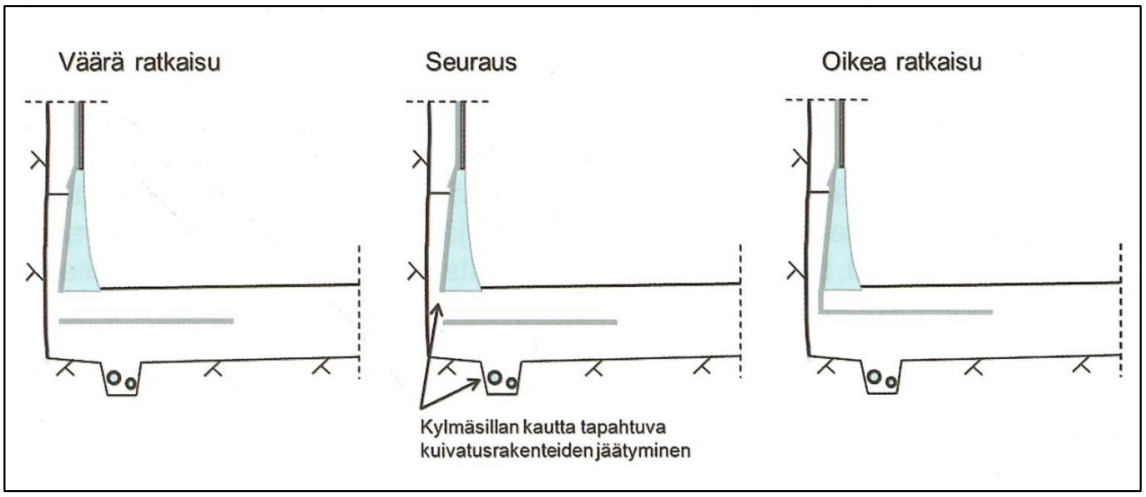
tunneleihin kuitenkaan hyväksytä, koska rakenne on hankala tunnelin kunnossapidon kannalla. Varsinaisen tierakenteen ulkopuolelle on mahdollista tehdä osittainen eristys, jos lämmöneristeiden uusiminen ei vaadi tierakenteen purkamista. (Väylävirasto 2019c, s. 73)

Tunnelin pohjan kuivatusrakenteiden lämmöneristeenä käytetään tyypillisesti polystyreenilevyjä, joiden mitoituksessa tulee ottaa huomioon niiden kuormituskestävyys. Levynpaksuuden tulee olla vähintään 50 mm, jotta työnaikainen rikkoutumisriski voidaan välttää. (RIL 261-2013, s. 215) Kuvassa 21 on esitetty tunnelin pohjan kuivatusrakenteen lämmöneristeen leveys kuivatusputken syvyyden suhteen kahdella eri lämmönvastuksella m_k.



***Kuva 21**. Tunnelin pohjan kuivatusrakenteen lämmöneristeen leveys B (m) kuivatusputken syvyyden Z_p (m) suhteen lämmönvastuksilla m_k = 2,5 m^2K/W ja m_k = 1,75 m^2K/W (RIL 261-2013, s. 213).*

Tieliikennetunnelin kuivatusrakenteen lämmöneristämisessä tulee tunnelin seinän ja pohjan kuivatusrakenteiden lämmöneristeiden yhtyminen huomioida. Tällöin eristerakenne on niin sanotusti jatkuva, eikä kylmäsiltoja pääse muodostumaan. (RIL 261-2013, s. 212) Kuvassa 22 on esitetty väärin ja oikein tehty rakenneratkaisu edellä kuvatussa tilanteessa.

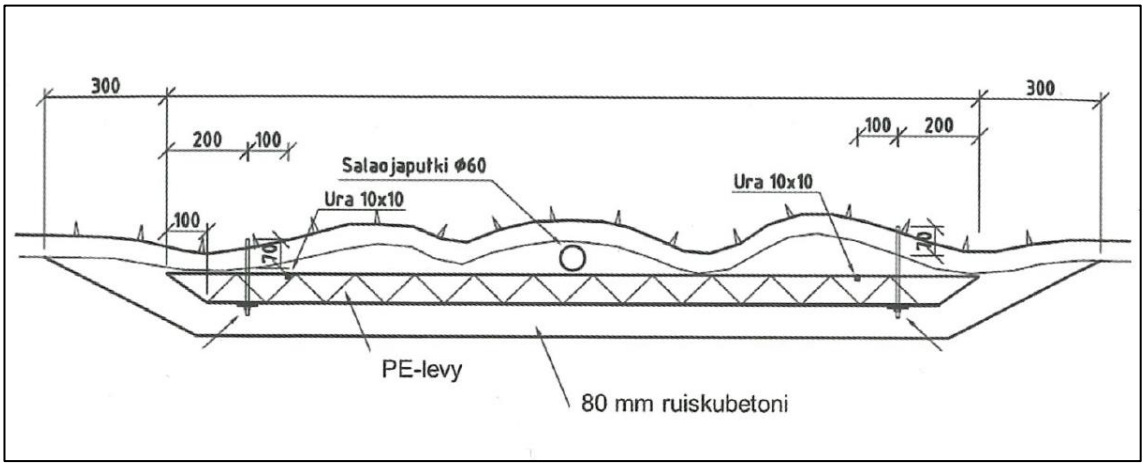


Kuva 22. *Kylmäsillan muodostuminen ja sen estäminen (RIL 261-2013, s. 216).*

Väärässä ratkaisussa törmäyssuojan takana olevaa lämmöneristettä ja kuivatusrakenteiden lämmöneristettä ei ole tehty yhteneväksi ja lämmöneristeiden väliin muodostuu kylmäsilta, jonka kautta routa tunkeutuu kuivatusrakenteisiin ja jäädyttää ne. Oikeassa ratkaisussa kuivatusrakenteiden sulana pitämiseksi on törmäyssuojan ja kuivatusrakenteiden lämmöneriste on tehty yhteneväksi, jolla estetään kylmäsillan muodostuminen. (RIL 261-2013, s. 216)

6.6 Yksittäinen salaoja

Jos lämmöneristämistä ei yksittäisen salaojan tapauksessa tehdä jatkuvana, on pakkasen tunkeutuminen eristerakenteen molemmin puolin vapaan kalliopinnan kautta otettava huomioon. Yksittäinen salaoja vaatii huomattavan laajan lämmöneristerakenteen. (RIL 261-2013, s. 214) Kuvassa 23 on esitetty yksittäisen ruiskubetonisalaojan rakenne ja siihen liittyvä yksittäinen lämmöneriste.



Kuva 23. *Yksittäisen salaojarakenteen ja lämmöneristeen (PE) periaatekuva (RIL 261-2013, s. 214).*

Voidaan arvioida, että yksittäisen salaojan lämmöneristeen tulisi Suomen olosuhteissa ulottua yli 4 metriä salaojan molemmin puolin eli lämmöneristeen leveyden tulisi olla yhteensä yli 8 metriä. Jos vuotokohtia on tunnelissa keskimäärin 10 metrin välein, on kuitenkin järkevämpää käyttää tunnelissa jatkuvaa lämmöneristettä. Yksittäisen salaojan lämmöneristeen paksuus tulee olla suurempi kuin mitä jatkuvan lämmöneristeen mitoituskäyrästön (kuva 20) perusteella laskemalla saadaan. Yksittäisen salaojan toiminta ei edellä esitetyn ratkaisun mitoitusolosuhteissa ole aina kuitenkaan täysin varmaa. Salaojan sulana pitämiseksi tulee varmistaa, että lämpötila lämmöneristeen takana on riittävä, jotta se ei jäädy. Salaojaa voidaan tarvittaessa lämmittää lämmityskaapeleilla tarvittavan lämpötilan takaamiseksi. (RIL 261-2013, s. 214)

7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kallioon rakennettujen tieliikennetunneleiden lämmöneristäminen on ensiarvoisen tärkeää alueilla, joilla esiintyy pakkasjaksoja. Kalliossa ja tunnelin rakenteissa oleva vesi yhdessä pakkasen kanssa aiheuttaa veden jäätyessä ongelmia tunnelin suunnitellulle toiminnalle sekä kunnossapidolle. Erityisesti tunnelin kuivatusjärjestelmän sulana pysymiseen on panostettava oikeanlaisilla rakenneratkaisuilla, joista tärkein on verhousrakenne. Verhousrakenne toimii tunnelissa eristysrakenteena, estäen tunnelissa olevan kylmän ilman pääsyn kalliopinnalle ja tunnelin vettä sisältäviin rakenteisiin. Verhousrakenteen taakse on uusiin tunneleihin suunniteltava tarkastustila. Verhousrakenteen ansiosta sulana pysyvä vesi virtaa kuivatusjärjestelmässä suunnitelulla tavalla pois tunnelista, ja näin tunnelin kuivanapito toimii häiriöittä.

Tieliikennetunnelit ovat Suomen sääolosuhteista ja niiden rakenteellisista ominaisuuksista johtuen alttiina pakkaselle, ja siksi kylmää ilmaa kulkeutuu tunnelin sisälle aina jossain määrin. Kylmän ilman aiheuttama veden jäätyminen tunnelissa aiheuttaa kahdenlaista vaurioitumismekanismia: pakkasrapaumaa ja pakkasvaurioita. Pakkasrapaumaa syntyy kallion raoissa jäätyvän veden vaikutuksesta ja pakkasvaurioita tunnelin rakenteissa olevan, jäätyessään laajenevan, veden aiheuttamasta voimasta. Pakkasen aiheuttamien ongelmien hallintakeinoja ovat muun muassa verhousrakenne sekä kalliopinnan vuotokohtiin asennetut ruiskubetonisalaojat, joita pitkin vedet kyetään ohjaamaan tunnelin pohjan salaojakerroksiin, ja edelleen pois tunnelista. Lämmöneristeiden lisäksi tunneleiden tarkastustiloihin voidaan suunnitella lämmitysjärjestelmät, jos niiden lämpötilaa ei kyetä pitämään rakenneratkaisuin yli 0°C:n. Myös yksittäisiä, erityisen jäätymisvaaran alaisena olevia salaojia tai muita vettä sisältäviä kohtia tunnelissa, voidaan lämmittää lämmityskaapeleilla.

Lämmöneristeiden suunnittelussa ja mitoituksessa merkittävin tekijä on pakkasmäärä. Pakkasmääränä käytetään kerran 50 vuodessa toistuvaa suurinta pakkasmäärän arvoa F_{50} tai tapauskohtaisesti arvoa F_{50T}. Pakkasmäärän lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa lämmöneristeen mitoituslämmönjohtavuus, lämmönjohtavuuden avulla saatava lämmönvastus sekä esimerkiksi tieliikennetunnelin pohjaan sijoittuvien lämmöneristeiden tapauksessa kuivatusputkien syvyys tienpinnasta.

Tieliikennetunneleiden lämmöneristeinä käytetään pääsääntöisesti erilaisia solumuoveista valmistettuja mattoja ja levyjä. Yleisimmät solumuovityypit ovat suulakepuristettu ja paisutettu polystyreeni sekä polyeteeni. Polyeteenieristeitä

käytetään tyypillisesti tunnelin seinissä ja holvissa, kun taas polystyreeniä tunnelin pohjan kuivatusrakenteen lämmöneristeenä sekä betonirakenteiden taustalle liimattuina. Tärkeimmät ominaisuudet, joihin lämmöneristeillä asetetaan vaatimuksia ovat lämmönjohtavuus, kosteusominaisuudet, pakkasenkestävyys, kuormituskestävyys, kestoikä sekä ympäristökelpoisuus. Nämä ominaisuudet tulee huomioida lämmöneristemateriaalia valitessa, jotta oikeanlainen ja haluttu lämmöneristävyys tunnelissa saadaan toteutettua.

Suuaukkojen lämmöneristerakenteita suunniteltaessa, etenkin suuaukkorakenteen ja kalliopinnan liitoskohdan sauman lämmön- sekä vedeneristävyys tulee varmistaa. Tunnelin sisällä verhousrakenteen ja kalliopinnan taakse suositellaan jätettäväksi tarkastustila, jonka lämpötila pyritään pitämään yli 0°C:n. Tunnelin pohja tulee louhia riittävän syväksi roudattomaan syvyyteen sekä varustaa massanvaihdolla ja kuivatusjärjestelmällä, jotta estetään tien routiminen pakkasella. Lisäksi tulee huomioida tunnelin seinärakenteen ja pohjan lämmöneristeiden yhtyminen, jotta haitallisen kylmäsillan muodostuminen estetään, ja pohjan kuivatusputket eivät pääse jäätymään. Yksittäisten salaojien tapauksessa tulee lämmöneristeen leveys ottaa huomioon, jos lämmöneristettä salaojien ympärillä ei tehdä jatkuvana, koko tunnelin pituisena lämmöneristeenä.

Kandidaatintyön tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että oikein suunnitelluilla ja rakennetuilla rakenneratkaisuilla sekä materiaalivalinnoilla tieliikennetunnelit kyetään toteuttamaan lämmöneristämisen näkökulmasta oikein toimiviksi. Tieliikennetunnelit ovat pitkäikäisiä, rakentamiskustannuksiltaan kalliita, yhteiskunnan jokapäiväistä toimintaa tukevia ja jopa kilometrien pituisia kokonaisuuksia. Uusissa ja tulevaisuudessa rakennettavissa tieliikennetunneleissa on ja tulee olemaan paljon erilaisia teknisiä järjestelmiä, eivätkä ne ole pelkästään kallioon puhkottuja reikiä. Näiden tekijöiden takia niiden suunnitteluun ja rakentamiseen tulee panostaa. Yhteiskunnan kehittyminen johtaa myös liikenteen kehittymiseen ja tätä kautta asettaa tunneleille enenevissä määrin lisää vaatimuksia niin tekniikan, turvallisuuden, mukavuuden, ekologisuuden, kuin myös esteettisyyden näkökulmasta. Tieliikennetunneleiden lämmöneristäminen vaikuttaa olennaisesta näiden kaikkien toteutumiseen.

LÄHTEET

Björkholtz, D. (1997). Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka. Rakennustieto Oy. Helsinki. 150 s.

Cellfoam (2022). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.12.2022): https://www.cellfoam.fi/materiaalit/polyeteeni-ja-eva/

Fagerholm, N. (1986). Termodynamiikka. Otakustantamo. Jyväskylä. 382 s.

Hemilä, S. & Utriainen, J. (1989). Lämpöoppi. Fysiikan Kustannus Oy. Jyväskylä. 189 s.

Hindawi (2019). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.12.2022): https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/4978359/

Ilmatieteen laitos (2022a). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2022): https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot

Ilmatieteen laitos (2022b). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.11.2022): https://www.ilmatieteenlaitos.fi/talvitilastot

Ilmatieteen laitos (2022c). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.12.2022): https://www.ilmatieteenlaitos.fi/termiset-vuodenajat

K-Rauta (2022a). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.11.2022): https://www.k-rauta.fi/tuote/eristyslevy-styroplast-eps-100-lattia-100x1200x1000-6m/6430020931017

K-Rauta (2022b). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.12.2022): https://www.k-rauta.fi/tuote/eristyslevy-finnfoam-fl-300-100x585x2485-puolipontattu/6418711190738

Kronlöf, A., Orantie, K. & Ritola, J. (2006). Kalliotilojen ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet. VTT Tiedotteita 2358. Espoo. 158 s. Saatavissa (viitattu 1.12.2022): https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2006/T2358.pdf

Liikennevirasto (2014). Tunneleiden ja kallioleikkausten rakenteiden tarkastustoiminnan kehittäminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2014. Helsinki. 62 s. Saatavissa (viitattu 6.11.2022): https://www.doria.fi/handle/10024/121740?show=full

Liikennevirasto (2017). Tietunnelin rakennetekniset ohjeet. Liikenneviraston ohjeita 34/2017. Helsinki. 67 s. Saatavissa (viitattu 1.11.2022): https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-432-0

Liikennevirasto (2018a). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 18: Rautatietunnelit. Liikenneviraston ohjeita 19/2018. Helsinki. 91 s. Saatavissa (viitattu 3.12.2022): https://www.doria.fi/handle/10024/158669

Liikennevirasto (2018b). Selvitys kalliotunnelin kallioteknisestä suunnittelusta: Esiselvitys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 47/2018. Helsinki. 162 s. Saatavissa (viitattu 1.11.2022): https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-602-7

Meltex (2022). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.11.2022): https://www.meltex.fi/fi/tuote/rakennustarvikkeet/solumuovituotteet/pakkas-ja-routamatot/706810/pakkasmatto-10-mm-2x50-m-100-m#/technicalinfo

NRK (2018). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.12.2022): https://www.nrk.no/vestfoldogtelemark/istapper-bekymrer-bilister-1.13965912

Plastics Today (2015). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.11.2022): https://www.plasticstoday.com/curing-uncertainties-cross-linked-plastics

RIL 117-1979 (1979). Lämmön- ja kosteudeneristys. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 378 s.

RIL 154-1-1987 (1987). Tunneli- ja kalliorakennus I. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 363 s.

RIL 169-1987 (1987). Kalliotilojen rakennusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 97 s.

RIL 165-2-2006 (2006). Liikenne ja väylät II. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 591 s.

RIL 261-2013 (2013). Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 257 s.

RIL 255-1-2014 (2014). Rakennusfysiikka I: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 500 s.

RT 36-11102 (2012). XPS-eristeet. Lämmöneristystarvikkeet. Rakennustietosäätiö. 4 s.

RT 36-11113 (2013). EPS-eristeet. Lämmöneristystarvikkeet. Rakennustietosäätiö. 4 s.

Saari, K. (1988). Kalliorakentamisen mahdollisuudet. Maanalaisten tilojen rakentamisyhdistys. 207 s.

Styrofoam ratkaisut – Maarakenteiden routasuojaus (2000). 28 s. Saatavissa (viitattu 1.11.2022): https://docplayer.fi/2991163-Styrofoam-ratkaisut-maarakenteiden-routasuojaus.html

Taloon.com (2022). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.11.2022): https://www.taloon.com/rakentajan-tietopankki/termisto/lammonjohtavuus

Vehvia (2022). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2022): https://www.vehvia.fi/yhteystiedot.html

Väylävirasto (2019a). Tietunneleiden LVI-suunnitteluohje. Väyläviraston ohjeita 5/2019. Helsinki. 121 s. Saatavissa (viitattu 11.11.2022): https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2019-05_tietunneleiden_lvi-suunnitteluohje_web.pdf

Väylävirasto (2019b). Tunnelintarkastuskäsikirja: Tunnelintarkastuksen suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus. Väyläviraston ohjeita 14/2019 (Luonnos 25.4.2019). Helsinki. 79 s. Saatavissa (viitattu 19.11.2022): https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/luonnos_tunnelintarkastuskasikirja_web.pdf

Väylävirasto (2019c). Kalliotunnelin kalliotekninen suunnitteluohje. Väyläviraston ohjeita 28/2019. Helsinki. 103 s. Saatavissa (viitattu 1.11.2022): https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2019-28_kalliotunnelin_kalliotekninen_web.pdf

Väylävirasto (2020). Kalliotunnelien pohjavesivaikutukset: Taustaselvitys. Väyläviraston julkaisuja 56/2020. Helsinki. 138 s. Saatavissa (viitattu 1.12.2020): https://www.doria.fi/handle/10024/180189

Väylävirasto (2022). Tunnelin standardikuvaus. Taitorakennerekisteri. Helsinki. 58 s. Saatavissa (viitattu 1.11.2022): https://vayla.fi/documents/25230764/35411214/Tunnelin+standardikuvaus_2.5.2022.pdf/4be35777-b4b4-c090-9e62-43e824a693ce/Tunnelin+standardikuvaus_2.5.2022.pdf?t=1652166841013