

Opinnäytetyö

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK

Infratekniikka

2019

Panu Salminen

KUPARIVUOREN TUNNELIN KUIVATUSJÄRJESTELMÄ

Panu Salminen

KUPARIVUOREN TUNNELIN KUIVATUSJÄRJESTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli avata liikennetunnelin kuivatusjärjestelmärakenteet, luoda niistä kokonaiskuva ja tutkia vaihtoehtoisia ratkaisuja olemassa olevasta kirjallisuudesta ja tutkimuksista. Toisena tavoitteena oli tuoda esille ulkomailla käytettäviä rakenteita. Kuparivuoren tunneli rakennettiin 1980-luvulla ja se pyrittiin toteuttamaan, niin ettei sen kattoon, seinille tai tielle muodostu jäätä. Vuonna 2019 kyseinen tunneli peruskorjattiin ja tässä työssä käsiteltiin peruskorjauksesta tiivistämiseen liittyvät rakenteet.

Kuivatusrakenteisiin kuuluvat injektointi, pultitus, ruiskubetonointi, salaojitus ja eristys. Injektointi tiivistää kallion ja pultittamisella hallitaan kallion muodonmuutoksia. Ruiskubetonoinnilla kallio lujitetaan, salaojitus vähentää pohjaveden virtausta kalliotilan sisälle ja eristyksellä hallitaan sisäilman laatua.

Tutkimusten pohjalta vertailtaviksi rakenneratkaisuiksi valikoituivat salaojaton rakenne, salaojallinen rakenne ja komposiittivuorausrakenne. Kuparivuoren tunnelin korjaus suoritettiin salaojallisena rakenteena. Vertailtavia asioita olivat asennettavuus, toimivuus, laatu, kustannustehokkuus ja ympäristön säästäminen.

Työn tuloksia voidaan käyttää tulevaisuudessa samantyyppisissä tunnelihankkeissa parhaan kuivajärjestelmärakenteen valinnassa. Näin on mahdollista saada työmaa nopeammin ja laadukkaammin toteutettua, mikä taas saa aikaan kustannussäästöjä. Tulosten pohjalta ei voida määrittää yhtä ainutta ratkaisua tunnelin rakentamiseen, sillä rakennustavan valintaan vaikuttaa aina useampi erillinen tekijä. Kuivatusrakenteet kehittyvät koko ajan kovaa vauhtia ja niissä esiintyvät vuoto-ongelmat, saostumien kertyminen salaojiin, vaikea huoltaminen yms. saadaan tutkimusten perusteella luultavimmin kuriin tulevaisuudessa.

ASIASANAT:

Kuivatusjärjestelmä, ruiskubetoni, salaoja, pultti, injektointi, eriste.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil and construction engineering

2019 | 42

Instructor Pirjo Oksanen, H. Sc. Eng.

Panu Salminen

DRAINAGE SYSTEM OF THE TUNNEL OF KUPARIVUORI

The aim of this thesis was to open the drainage system structures of a traffic tunnel, to provide an overall picture of them and to explore alternative solutions based on existing literature and research. Another aim was to highlight the structures used abroad. The tunnel of Kuparivuori was built in the 1980s and was designed to be ice-free on its roof, walls or road. In 2019, tunnel of Kuparivuori was renovated and this work discusses structures related to compaction from the renovation.

Drying structures include injection, bolting, shotcrete, drainage and insulation. Injection seals the rock, bolting controls the deformation of the rock, shotcrete reinforces the rock, drainage reduces the flow of groundwater inside the rock space and insulation controls the indoor air quality.

Based on the studies, the non-drainage structure, the drainage structure and the composite lining structure were selected as structural solutions. The repair of the Kuparivuori tunnel was carried out as a drainage structure. Comparable subjects included installability, functionality, quality, cost-effectiveness and environmental protection.

The results of this work can be used in the future for similar tunnel projects to select the best dry system design. This enables faster and higher quality construction work, which in turn leads to cost savings. Based on the results, one single solution for tunnel construction cannot be determined, as the choice of construction method is always influenced by several separate factors. Drainage structures are constantly evolving and leakage problems, accumulation of deposits in drainage systems, difficult maintenance, etc. are likely to be controlled in the future.

KEYWORDS:

drying system, shotcrete, drain, bolt, injection, insulation

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	6
2 TUNNELIN KUIVATUSJÄRJESTELMÄ	7
2.1 Injektointi	7
2.2 Ruiskubetonointi ja salaojitus	9
2.3 Pulttaus ja eristys	13
3 KUPARIVUOREN TUNNELIN KUIVATUSJÄRJESTELMÄN KORJAUS	17
3.1 Kuparivuoren tunneli 1980-luvulla	17
3.2 Injektointi	19
3.3 Ruiskubetonointi ja salaojitus	20
3.4 Pulttaus ja eristys	24
4 KUIVATUSJÄRJESTELMÄRATKAISUJEN VERTAILU	28
4.1 Yleistä	28
4.2 Yleisimmät kokonaisrakenteet	29
4.2.1 Salaojaton rakenne	29
4.2.2 Salaojallinen rakenne	32
4.3 Ruiskubetonointi	36
4.3.1 Yleistä	36
4.3.2 Komposiittivuoraus rakenne eli yksikerroksinen rakenne	36
4.4 Kuparivuoren tunneli	39
5 POHDINTAA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	40
LÄHTEET	42

KUVAT

Kuva 1. Poikkileikkaus putkisalaojarakenteesta	11
Kuva 2. Poikkileikkaus solumuovisalaojarakenteesta	12
Kuva 3. Poikkileikkaus salaojajärjestelmästä	12
Kuva 4. Kiinnitysmekanismi	15
Kuva 5. Kiinnitysmekanismi asennettuna	16
Kuva 6. Kuparivuoren tunnelin rakentaminen 1980-luvulla	19
Kuva 7. Vettä vuotava reikä	20
Kuva 8. Asennettu salaoja	23
Kuva 9. Ruiskubetonisalaoja	24
Kuva 10. Pulttaus eristeen kanssa	25
Kuva 11. Kombi-hvelvet	26
Kuva 12. Eriste asennettuna	27
Kuva 13. Tunneliin kohdistuvat rasitukset	29
Kuva 14. Salaojaton rakenne	30
Kuva 15. Salaojallinen rakenne	33
Kuva 16. Viemäriputken saoskertymä	35
Kuva 17. Suihkutettu komposiittivuorausrakenne	38

TAULUKOT

Taulukko 1. Ylläpitotarkastusten keskiarvoprosentit	34
---	----

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä tutkittava hanke sijaitsee Naantalissa maantiellä 189. Kuparivuoren tietunnelin rakenteet ja tekniset järjestelmät uusitaan kokonaisuudessaan vuosien 2018 ja 2019 aikana. Vuonna 1988 rakennettu Kuparivuoren tunneli on pituudeltaan noin 320 metriä ja koostuu kahdesta kalliotunneliosuudesta, joiden välillä on noin 98 metriä pitkä betonitunneliosuus. Tunnelin sisäosan nykyinen palosuoja- ja lämmöneristysrakenne sekä nykyiset tekniset järjestelmät ja valaistus purettiin ja rakennettiin uudelleen nyky-määräysten mukaisina. Myös tierakenteen kuivatusta parannettiin ja tunnelin läpi rakennettiin Naantalın vesihuoltolaitoksen runkovesijohto.

Tunnelien elinikä on yli 100 vuotta, mikä tarkoittaa, että tunnelien rakentamisstandardien, erityisesti tiivistys- ja vedeneristysjärjestelmien, on oltava korkeat. Tunneleihin kohdistuukin monia erilaisia rasituksia, kuten veden tunkeutuminen kalliotilaan, haitalliset kemikaalit, lämpötilan vaihtelut jne. Vanhoissa rakenteissa on ollut paljon ongelmia näiden takia. Salaojarakenteet ovat menneet tukkoon, eristysrakenteet kastuneet ja menneet piloille, mikä yhdessä pakkasen kanssa on aiheuttanut halkeilua ja tämä on vuorostaan aiheuttanut vuotovesiä. Nykyajan rakenteet ovat kehittyneet paljon. On kehitetty erilaisia ruiskubetonointiratkaisuja ja niihin lisättäviä materiaaleja, vuorausmenetelmiä, joissa käytetään erilaisista materiaalista tehtyjä vesitiiviitä levyjä, yhden ja kahden kerroksen vuorausmenetelmätekniikoita jne.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on käsitellä yleisesti kuivatusjärjestelmään kuuluvat rakenteet, kuten injektointi, salaojitus, ruiskubetonointi, pultitus ja lämpö- ja vesieristys. Kuparivuoren tunnelista tutkitaan näitä samoja rakenteita sekä niihin etsitään vaihtoehtoisia rakenneratkaisuja tutkimuksista ja kirjallisuudesta. Tavoitteena on vertailla näitä keskenään ja löytää parhaat rakenneratkaisut tulevia samantyyppisiä hankkeita varten.

2 TUNNELIN KUIVATUSJÄRJESTELMÄ

2.1 Injektointi

Injektoinnin tarkoituksena on tiivistää kallio vesivuotoja vastaan ja sillä voidaan myös tarvittaessa vahvistaa kalliota panostuksen ja lujitustarpeen auttamiseksi (Suomen Betoniyhdistys 2006).

Kalliotilojen injektointitarpeen määrittelevät pääasiassa ympäristö, tilan käyttö ja työnaikeiset, työtä haittaavat vuodot. Ympäristöön vaikuttavia tekijöitä on esimerkiksi pohjaveden pinnan aleneminen, mistä johtuen puupaalujen yläpäät voivat tulla näkyviin, minkä jälkeen ne eivät kestä enää kuormitusta. Tilan käyttöön kuuluvia tekijöitä ovat esimerkiksi vedenpoistokustannukset, kunnossapito ja tippavuodot. (Suomen Betoniyhdistys 2006.)

Injektointiaineen valintaan vaikuttaa pääasiassa rakojen suuruus. Mitä pienempiä rakoja, sitä pienempirakeisempaa sementtiä. Suuremmissa koloissa käytetään laasteja ja polyuretaanivaahtoa. Injektointiaineisiin kuuluvat myös liuokset eli kemialliset injektointiaineet, jotka ovat koostumukseltaan lähes vettä. Niitä voidaan käyttää vaikeisiin jälkiinjektointeihin, joissa tarvitaan lyhyt sitoutumisaika. (Suomen Betoniyhdistys 2006.)

Vedenjohtavuuteen vaikuttaa paljon raon laatu. Ne voivat olla tiiviitä, avonaisia tai täyteisiä. Avoimissa raoissa vesi pääsee hyvin liikkumaan, mutta ne on myös helppo tiivistää. Ja päinvastoin täyteiset raot on vaikea tiivistää, koska ne ovat nimensä mukaan ahtaita. Ne täytyy yleensä tiivistää kemiallisilla injektointiaineilla. Suomen kallioperä on pääasiassa melko tiivistä, mutta yleensä joudutaan silti tiivistämään pienimmätkin raot ympäristöhaittojen tai kalliotilan käyttötarkoituksen vuoksi. (Suomen rakennusinsinööriliitto RIL 1987.)

Kalusto, jolla injektointi tapahtuu, koostuu osa-aineiden annostuslaitteesta, sekoittimesta, välihämmentimestä, pumpusta, injektointiletkuista ja manseteista. Kemiallisissa aineissa tulee noudattaa materiaalivalmistajan ohjetta kaluston suhteen, mutta joihinkin sopii myös normaali kalusto. Työvoimaa injektointiin ei tarvita kovin paljon. Poraukseen ja injektointiin ei kumpaankaan vaadita kuin kaksi työntekijää. Porauksessa on porari ja porakangen vaihtaja ja injektoinnissa on letkunvaihtaja ja aputöitä suorittava henkilö (Suomen Betoniyhdistys 2006.)

Tunneliin virtaavan veden määrän mittaamiseen ja vesimenekkikokeeseen käytetään yleensä tunnustelureikiä. Tarvittaessa ne voidaan myös porata injektointikaavion mukaan niin, että niitä voidaan käyttää injektointireikinä. Injektoinnin jälkeen töitä voidaan jatkaa, jos injektointimassa kestää porauksen ja räjäytyksen aiheuttaman tärinän. Yleensä injektointimassan kuivumisessa kestää noin kuudesta kahdeksaan tuntiin. Siihen vaikuttaa lämpötila, vesi-sementtisuhde, sementti ja mahdolliset kiihdyttävät lisäaineet. Sementtipohjaisen injektoinnin laadunvarmistus tapahtuu erilaisilla mittauksilla ja niihin kuuluu tiheys, Marsh-viskositeetti, sitoutumisaika ja vedenerotus. Tiheyden mittauksella varmistetaan vesi-sementtisuhteen oikeellisuus, ja annostelulaitteiden toimivuus. Paikan päällä mittaus voidaan suorittaa ”mud balance”-vaa’alla. Injektointiaine laitetaan kuppiin ja siihen päälle tulee kansi, josta ylimääräinen aine pursuaa pois. Tämän jälkeen tiheys luetaan asteikosta vastapainon kohdalta astian ollessa tasapainotilassa. Mittalaitteen toimivuus varmistetaan veden kanssa. Jos vaatimukset eivät täyty, massa hylätään. Jos näin käy, tarkistetaan resepti, annostuslaitteet ja vesi-sementtisuhde. Notkistimen annostelu varmistetaan Marsh viskositeetin mittauksella, joka kuvaa massan myötörajaa ja viskositeettiä. Mittaukseen käytetään suppiloa ja mittakuppia. Veden erottuminen saadaan mittalasilta ja litralla injektointiainetta. Injektointiaine kaadetaan mittalasiin ja kahden tunnin kuluttua mitataan aineen korkeus sekä massan pinnalle jääneen veden korkeus. Mittalasin pitää olla rauhallisessa ja tärinättömässä paikassa. Injektointimassa imetään tiheän metalliverkon läpi mitta-astiaan. Näin varmistetaan sekoittimen toimivuus. Sitoutumisaika saadaan työmaalla kuppikokeella. Massa kaadetaan kuppiin ja poraus voidaan aloittaa, jos se pysyy kupissa vaakasuorassa. (Suomen Betoniyhdistys 2006.)

Tiivis kallio vaatii esi-injektointia ja sen jälkeistä jälki-injektointia. Esi-injektointi voidaan tehdä joko koko tunnelille automaattisesti, mitä sanotaan systemaattiseksi esi-injektointiksi, tai tutkimalla kallion laatua tunnusteluporauksilla ja vesimenekkikokeilla. Systemaattinen esi-injektointi on kannattava, jos kallio on vaihtelevan rikkonaista ja ”tutkimalla eteenpäin”-menetelmä, jos kallio on suurimmaksi osin ehjää. Tunnustelureiän täytyy kulkea vähintään 14 metriä tunnelin perän edellä. Jälki-injektoinnilla korjataan esi-injektoinnin jälkeisiä edelleen vuotavia kohtia. (Ritola & Vuopio 2002.)

2.2 Ruiskubetonointi ja salaojitus

Ruiskubetonointia on käytetty kallion erilaisissa rakenteissa jo runsaat 100 vuotta. Se sai alkunsa kuivaseosmenetelmästä, joka kehitettiin Yhdysvalloissa. Kuivaseosmenetelmässä betonin runkoaine ja sementti sekoitetaan keskenään ennen veden sekoittamista. Tarvittavan veden lisääminen tapahtuu vasta ruiskutuskaluston suuttimessa, johon betonin kuiva-aines on ohjattu paineilmalla. Massan ruiskuttaminen lopulliseen kohteeseen tapahtuu paineilmalla. (Suomen Betoniyhdistys 2015.)

Märkäruiskutusmenetelmä kehitettiin USA:ssa 1950-luvulla. Kalliorakentamisessa se yleistyi 1990-luvulla ja se kuuluu vieläkin ykkösmenetelmiin. Nykyään yli 70 % ruiskubetonoinneista tehdään märkäruiskutusmenetelmällä, jossa betonin osa-aineet sekoitetaan keskenään valmiiksi massaksi. Tämän jälkeen ruiskutettava massa ohjataan ruiskubetonointikaluston läpi. Ruiskutettava massa pumpataan suuttimeen mäntä- tai ruuvi-pumpulla, johon paineilma on yhdistetty. Ruiskutus tapahtuu paineilman voimalla. (Suomen Betoniyhdistys 2015.)

Ruiskubetonointia käytetään kalliorakennuskohteissa ensisijaisesti työnaikaisessa ja lopullisessa kallionlujituksessa. Ruiskubetonin tehtävä on estää kallion muodonmuutokset sekä irtokivien tippuminen ja vuotovesien valuminen kalliotilaan. Työnaikaisen ruiskubetonoinnin tehtävänä on luoda turvalliset työskentelymahdollisuudet kalliotilassa. Louhintatyön turvallinen eteneminen onnistuu ainoastaan, jos tarvittava ruiskubetonointi on tehty oikein. Louhituissa kalliotiloissa, joissa on vaarana irtokivien tippuminen heikon kalliolaadun takia, tulisi ruiskubetonointi suorittaa heti rusnauksen jälkeen. Rusnauksella tarkoitetaan irtonaisten kiviaineksen poistamista tunneliperästä. Lopullisen ruiskubetonoinnin tehtävänä on toimia lujituksen lisäksi kallion vedeneristäjänä. Kalliotilan kuivuustason määrittelevät käyttötarkoitus ja työn tilaaja. Kalliotilan ruiskubetonipinnat ovat paremman näköiset kuin louhittu jälki. Kalliorakennuskohteet, jotka tulevat julkiseen käyttöön, ruiskubetonoidaan aina kokonaan systemaattisesti. (Suomen Betoniyhdistys 2015.)

Ruiskubetonoinnissa käytetyt betonimassan raaka-aineet eivät ole muuttuneet vähään aikaan, mutta betonimassaan sekoitettavat lisäaineet sen sijaan ovat kehittyneet paljon. Niihin kuuluvat notkeutta säätelevät lisäaineet, notkistin, tiivistysaineet, muut lisäaineet ja ruiskutusvaiheen lisäaineet. Sitoutumisen alkamista ja massan notkeana pysymistä pystytään muokkaamaan notkeutta säätelevillä lisäaineilla. Yleensä niitä käytetään

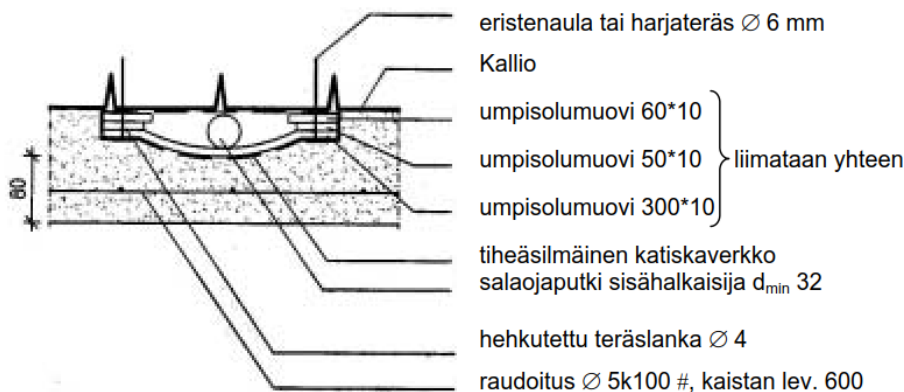
kiihdyttimen kanssa. Ruiskubetonoinnin notkistimina voidaan käyttää samoja aineita kuin normaalissa valubetonissa, mutta siihen on myös kehitetty omia aineita, jotka vähentävät hukkaroiskeita ja pitkittävät betonimassan käsittelyaikaa. Notkistimia käytetään pelkästään märkäseosmenetelmässä. Ruiskubetonin veden ja kaasun läpipääsyn estämiseksi käytetään tiivistysaineita, kuten silikaa. Kiihdyttimiä käytetään pääasiassa nopeuttamaan kovettumista ja sitoutumista, mutta niillä voidaan saavuttaa samoja ominaisuuksia kuin tiivistysaineilla. Veden haihtumiseen voidaan myös vaikuttaa lisääaineilla. Näillä saadaan vähennettyä betonin kutistumista, joka voi aiheuttaa esimerkiksi halkeilua. Märkäseosmenetelmässä voidaan käyttää polymeerejä, millä saadaan tartuntaa parannettua. Huono puoli polymeereissä on, että se voi alentaa betonin puristuslujuutta. Kiihdytin kuuluu ruiskutusvaiheen lisääineisiin. Sitoutumisen nopeuttamisella saadaan aikataulua kurottua, koska pystytään ruiskuttamaan paksumpia kerroksia yhdellä kertaa. Annostuksen pitää olla yhteneväinen betonipumpun syötön kanssa. Kiihdyttimiä voidaan myös käyttää kuivaseosmenetelmässä sekoittamalla niitä suuttimessa syötettävän veden sekaan. (Suomen Betoniyhdistys 2015.)

Seosaineita käytetään ruiskubetonoinnissa hukkaroiskeen vähentämiseen, säilyvyysominaisuuksien parantamiseen, veden pidätyskyvyn parantamiseen, pumppausaineen alentamiseen ja sementin korvaamiseen. Lentotuhkalla parannetaan betonin työstettävyyttä ja koossapysyvyysominaisuuksia, pumpattavuutta, ruiskutettavuutta ja sillä saadaan myös vähennettyä sementtimäärää. Teräksen valmistuksesta syntyvällä masuunikuonalla pystytään parantamaan betonin lujuutta, sulfaatinkestävyyttä ja alkalipiireaktiokestävyyttä. Silikaa saadaan piin valmistuksesta ja se kasvattaa betonin lujuutta sekä parantaa säilyvyysominaisuuksia sekä tiiviyyttä. Ruiskubetonoinnissa sillä on iso merkitys pisyvyyden parantumisen ja hukkaroiskeen vähentymisen takia. Kalkkifilleri parantaa betonin pumpattavuutta ja ruiskutettavuutta. (Suomen Betoniyhdistys 2015.)

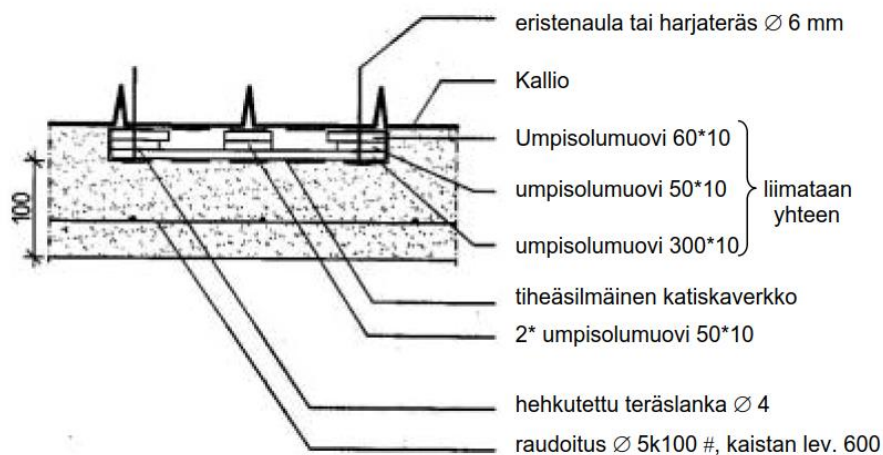
Puristuslujuuteen ja vesitiiveyteen vaikuttavat tekijät kulkevat yleensä käsi kädessä. Näihin lukeutuvat hienoksi jauhettu sementti, silikaatti sekä muut notkistavat ja huokostavat lisääaineet. Vesieristeenä betoni ei ole täydellinen. Sitä voidaan käyttää kuitenkin sillä periaatteella, että läpipääsevän veden määrä on niin pieni, että se haihtuu suoraan ruiskubetonin pinnalta. Tätä edesauttavat tehokkaat ilmanvaihtojärjestelmät ja betonin pintaan ruiskutettava pinnoite. Pinnoitteen ideana on tehdä pinnasta huokoisempi, jotta läpipäässyt vesi levittyy laajalle alalle ja saa näin pidemmän ajan haihtua. Ruiskubetonin vedenpitävyyteen vaikuttavat pohjaveden virtausnopeus, ruiskubetoniin kohdistuva

vedenpaine, ruiskubetonin vedenläpäisevyys, ruiskubetonikerroksen paksuus ja kalliotilan ilman suhteellinen kosteus ja virtausnopeus. (Ritola & Vuopio 2002.)

Salaojituksen ideana on vähentää hydrostaattisen paineen alaisen pohjaveden virtausta kalliotilan sisälle. Se voidaan toteuttaa joko kallion sisäisenä tai rakenteiden salaojitusjärjestelmänä. Sisäinen salaojitus kuivattaa kalliota tilan ympäriltä porareillä, jotka tehdään tilan ulkopuolelle. Sitä käytetään useimmiten kuilujen kuivatukseen ja reiät porataan kuilun ympärille samansuuntaisesti kuilun kanssa. Porareikien on tarkoitus ohjata vesi kuivatusjärjestelmään. Esimerkiksi tuloilmakuiluissa voi esiintyä ongelmia talvella tapahtuvan jäätyämisen takia, kun kallioista läpi pääsevät vedet jäätyvät joko pintavaluntana tai salaojissa. Salaojitusjärjestelmässä vesi ohjataan haluttuun paikkaan esim. ruiskubetonisalaojilla ja lattiarakenteen salaojituksella. On myös mahdollista käyttää jotain muuta rakennetta tilan lujittamissa ja eristämässä kuin ruiskubetonijärjestelmää, jossa veden hallitseminen toteutetaan jotenkin muuten kuin salaojittamalla. Mahdolliset kalliopinnan pistevuodot pyritään ennaltaehkäisemään ruiskubetonisalaojilla, jotka tehdään ennen varsinaista ruiskubetonointia. Pistevuodot voivat aiheuttaa vesivuodon ruiskubetonointiin, kun se ei ole vielä kovettunut. Suomessa yleisimmin käytettävät salaojarakenteet ovat putkisalaoja (kuva 1) ja solumuovisalaoja (kuva 2). (Ritola & Vuopio 2002.)

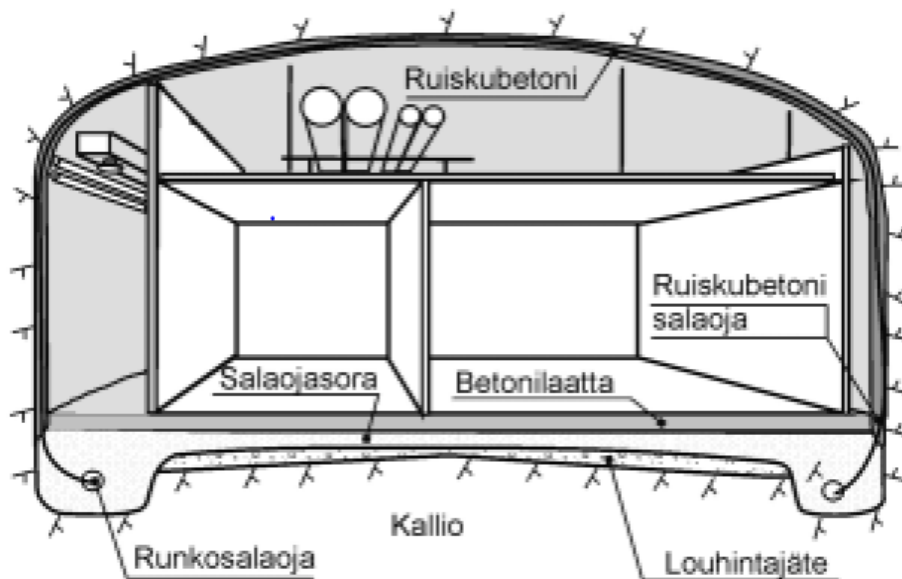


Kuva 1. Poikkileikkaus putkisalaojarakenteesta (Ritola & Vuopio 2002).



Kuva 2. Poikkileikkaus solumuovisalaojarakenteesta (Ritola & Vuopio 2002).

Lattiasalaojituksen on tarkoitus kerätä kaikki tilaan päässyt vesi ja ruiskubetonisalaojien vedet. Suurissa halleissa lattiarakenteen salaojakaivannon tehdään reunoille ja niistä vesi johdetaan kokoomakaivoon. Pienemmissä halleissa ja tunneleissa salaojakaivannon voi rakentaa joko keskelle tai reunaan (kuva 3). (Ritola & Vuopio 2002.)



Kuva 3. Poikkileikkaus salaojajärjestelmästä (Ritola & Vuopio 2002).

2.3 Pulttaus ja eristys

Louhinnassa tapahtuvat kalliotilan muodonmuutokset pyritään pitämään sallituissa rajoissa. Niitä ei missään nimessä yritetä ehkäistä kokonaan, koska siitä voi olla vain enemmän haittaa eikä se useimmiten ole mahdollistakaan. Pultituksella pyritään pitämään kallion palaset kiinni toisissaan ja näin saadaan rajoitettua kallion muodonmuutoksia. Toisin sanoen pultituksen on tarkoitus pitää kallio yhtenäisenä sen sallimissa rajoissa, kuitenkin niin, että se ei estä kokonaan muodonmuutoksia. (Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL 1987.)

Pultit jaetaan staattisen toiminnan perusteella jännitettyihin ja jännittämättömiin sekä toimintaperiaatteeltaan aktiivisiin ja passiivisiin pultteihin. Jännitetty pultti asennetaan niimensä mukaisesti niin, että sen kärki ankkuroidaan kallioon ja se esijännitetään toisessa päässä olevan levyn ja mutterin kanssa. Jännittämättömät pultit juotetaan koko pituudeltaan kallioon kiinni. Aktiiviset pultit tukevat kalliota heti asennuksen jälkeen ja passiiviset päinvastoin vasta, kun kalliossa tapahtuu muutoksia, jotka kuormittavat pulttia. Kalliopultitus voidaan tehdä ennakkopultituksena eli ennen louhintatöiden aloitusta, väliaikaisena kiireellisenä pultituksena töiden aikana tai lopullisena pultituksena louhintatöiden jälkeen riippuen kallionlaadusta ja ympäristöolosuhteista. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014.)

Pulttityyppejä on erilaisia. Näistä yleisimpiin kuuluvat juotospultit ja mekaanisesti kärkiankkuroidut pultit. Suomessa yleisimmin käytetty kalliopultti on harjateräspultti, joka kuuluu juotospultteihin. Niitä on kaksi erilaista, taivutettu harjaterästartunta ja aluslevyllinen harjateräspultti. Mekaaninen kärkiankkuroitu pultti on muuten samanlainen kuin aluslevyllinen harjateräspultti, mutta juottamisen tilalla sen päässä on mekaanisesti toimiva ankkuri. On myös yhdistelmäpultteja, joissa hyödynnetään molempia, kärkiankkuria ja juottamista. Tällä tavalla saadaan välittömän ja lopullisen lujituksen hyöty. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014.)

Pulttien juotosaineena käytetään yleisimmin sementtilaastia, mutta myös hartsia. Sementti ei saa kovettumisen ja sitoutumisen aikana kutistua liikaa, mikä pystytään estämään hiekalla tai kutistumista estävällä lisäaineella. Suunnitelmat määrittävät sementin lujuus- ja rakenneluokan, mutta jos sitä ei ole erikseen määritetty se voi olla alimmillaan C28/35-2. Vedenerottumista laastissa saa tapahtua vain kolme tilavuusprosenttia. Maksimi pientymä laastissa saa olla 2 % ja suureneminen 10 %. Hartsia voidaan

käyttää kahdessa eri muodossa, joita ovat patruuna ja pumpattava. Patruunoissa on polyesterihartsia ja kovetinainetta. Hartsissa on se hyvä puoli sementtiin verrattuna, että se kovettuu todella nopeasti ja lämpötila voi olla paljon alhaisempi. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014.)

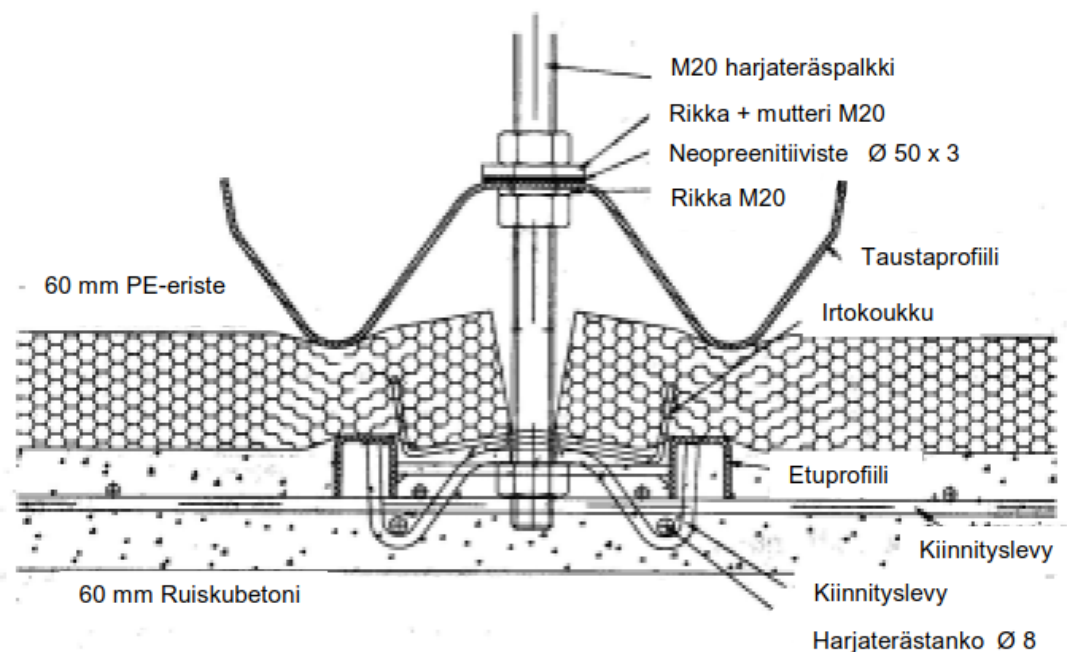
Pultit korroosiosuojataan suunnittelijan tarkoin määrittelemällä tavalla kuumasinkityksellä, märkämaalauksella tai jauhemaalauksella epoksilla. Erittäin vaativissa kohteissa käytetään näiden yhdistelmiä. Pultit asennetaan pääsääntöisesti niin, että ne sitovat kalliolohkareet toisiinsa. Suunnittelija kuitenkin määrittää tarkemmin pulttien koon, suunnan ja sijainnin riippuen kohteesta. Pulttien kuljetuksessa pitää olla varovainen, sillä niiden pinnoitusmateriaali voi olla hyvinkin herkkä mekaanisille vaurioille. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014.)

Pultituksen laadunvalvontaa suoritetaan juotosmassasta otetulla koekappaleella, sitoutumisvaiheessa tehtävällä ulosvetokokeella, vetokokeella, Boltometer-kokeella ja irtikairauksella. 200 pultin välein ja massan reseptin vaihtuessa juotosmassasta otetaan koekappale. Työmailla on aina oltava myös valmius koekappaleiden ottoa varten juotosvaiheessa. Ulosvetokokeella varmistetaan, onko laasti ympäröinyt pultin tasaisesti, eli onko porausreiässä tarpeeksi laastia. Kokeen suoritus ajankohdalla on suuri merkitys. Laastin täytyy olla sellaista, että se ei tahri enää pulttia ulos vetäessä, mutta pultin täytyy tulla vetämällä ulos. Jos laasti on liian löysää, se vaikeuttaa tuloksen tulkitsemista. Kokeen jälkeen pultti asennetaan samaan reikään tai tehdään uusi reikä sen viereen. Vetokokeella mitataan, onko pultitus tarpeeksi vahva eli onko sen kapasiteetti riittävä. Pulttia vetäessä mitataan siihen käytetty voima ja pään liike. Yleensä voima, jota käytetään, on noin 50-70 % pultin myötölujuudesta. Vetokoe tehdään yleensä vain työvirheen sattuessa. Boltometer-laitteella lähetetään ultraääni pulttiin ja tämän avulla saadaan mitattua juotoksen laatu. Menetelmä ei ole kovin yleinen Suomessa, mutta esimerkiksi Ruotsissa sitä käytetään paljon. Irtikairauksessa kairataan irti koko pultti, juotosmassa ja hieinan niiden ympärillä olevaa kalliota. Juotosmassa voidaan näin tarkistaa silmämääräisesti ja pultin korroosio ja pinnoite voidaan määritellä näytteestä. Jos halutaan tehdä irtikairaus, täytyy tietää pultin pituus, sijainti ja suunta. Näytteenotto on todella kallista, mutta myös luotettavaa. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014.)

Kalliotilan tiiviysvaatimukset voidaan saada halutuiksi erilaisilla sisäkattoratkaisuilla ja samalla saadaan poistettua haitalliset tippuvuodot. Koko tilan eristyksellä ja hyvällä ilmastoinnilla saadaan pidettyä sisäilma sellaisena kuin halutaan. Jos ei haluta eristää koko tilaa, niin se voidaan myös tehdä vain kriittisiin paikkoihin, kuten varastoihin- ja

tekniisiin laittiloihin. Erilaisiin eristysrakenteisiin kuuluvat Ekeberghvelvet-sovellukset, betonielementtirakennukset kalliotilan sisällä ja paikallisesti toteutetut PVC-pintaiset polyesterikankaat. (Ritola & Vuopio 2002.)

Ekeberghvelvet-sovelluksia käytettäessä työnaikaisena lujituksena toimivat ruiskubetonointi ja lopullisena pultitus (kuvat 4 ja 5) systemaattisesti tasavälein asennettuna. Eristerakennetta asennettaessa pultteihin kiinnitetään niihin tarkoitettu metalliranka, johon asennetaan polyeteenimuovilevy. Polyeteenimuovilevy toimii lämpö- ja vesieristeenä. Sen päälle pistetään rauditusverkko ja 70 millimetriä paksu ruiskubetonointi, mikä auttaa paloturvallisuudessa ja lujituksessa. (Ritola & Vuopio 2002.)



Kuva 4. Kiinnitysmekanismi (Ritola & Vuopio 2002).



Kuva 5. Kiinnitysmekanismi asennettuna (Ritola & Vuopio 2002).

Kuparivuoren tunnelissa käytettiin yhtä variaatiota Ekeberghvelvet sovelluksista, jonka nimi on Kombi-hvelvet. Se on muuten samanlainen, mutta sen asentamista on yksinkertaistettu. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

3 KUPARIVUOREN TUNNELIN KUIVATUSJÄRJESTELMÄN KORJAUS

3.1 Kuparivuoren tunneli 1980-luvulla

Kuparivuoren alueella suoritettiin kalliotutkimuksia kahdella vaihtoehtoisella tunnelilinjalta. Urheilukentän eteläpuolinen linja olisi ollut lyhyempi kokonaan kalliotunnelina kulkeva tunnelivaihtoehto, mutta se olisi kuitenkin vaatinut Naantalinsalmen ylityksen nykyistä kahta siltää pidemmällä siltavaihtoehdolla. Valitussa vaihtoehdossa tunneli jouduttiin toteuttamaan yhdestä kohdasta betonitunnelina, sillä siinä oli ruhje. Tiiviyteen liitettävien rakenteina käytettiin lämpö- ja kosteuseristeitä sekä maalausta. Vesivuotojen tiivistämisellä pyrittiin sellaiseen rakenteeseen, ettei jäätä muodostuisi kattoon, seinille eikä tielle. (Kuparivuoren maantietunneli 1988.)

Kallion lujitus suoritettiin käyttämällä tavallisia juotettuja harjateräspultteja, joiden pääasiallinen pituus oli 4,0 metriä. Tunneliin ei haluttu suunnitteluvaiheessa määrätä "systemaattista" pulttistusta, koska liikennetunneleissa on pienet jännevälit. Näin haluttiin välttää siltä, ettei ensimmäinen rakennettava maantietunneli muodostaisi ennakkotapausta, jonka suunnittelukriteerejä sovellettaisiin myöhemminkin kalliolaatu- yms. tekijöistä riippumatta. Länsipäädyssä tunneliin suunniteltiin tiheän rakoilun vuoksi louhintatyön edessä toteutettava esipultitus. Louhintavaiheessa kalliolaatu osoittautui kumminkin sellaiseksi, että jouduttiin osittain suorittamaan pultitus 2,5 x 2,5 metrin ruutuun ja osittain 4,0 x 4,0 metrin ruutuun. Osa tunnelista lujitettiin "hajapultituksena" ja kalliotunneli verhoiltiin kauttaaltaan ruiskubetonilla, jonka paksuus vaihteli kalliolaadun mukaan. Ruiskubetonointi suoritettiin pääosin märkäruiskutusmenetelmällä ja seinän verkotus sekä kattoholvin ulompi verkotus tehtiin muovikuiduilla. Työnaikaisena laadunvalvontana suoritettiin ruiskubetonikokeiden lisäksi kokeita kuitubetonille VTT:ssä laaditun koeohjelman mukaisesti. Kuituvahvistetun ja ilman kuituja tehdyn ruiskubetonin ominaisuuksia vertailtiin tutkimalla puristuslujuutta, taivutusvetolujuutta, murtoenergiaa ja kuivumiskutistumista. Tartuntalujuutta ei tutkittu, sillä koejärjestely oli liian hankala ja arvioitiin, ettei kuitujen käyttö ainakaan huononna ruiskubetonin tartuntaominaisuuksia. (Kuparivuoren maantietunneli 1988.)

Tunnelin eristämiseksi vedeltä ja jäätymiseltä laadittiin suunnitteluvaiheessa kaksi rakennevaihtoehtoa. Vaihtoehtoiksi valitut rakenteet ovat muualla Euroopassa ja osittain

myös valtionrautateiden ratatunneleissa käytettyjä rakenteita, joiden todettiin toimivan maantietunnelin olosuhteissa. Verhoussuunnitelman vaihtoehto A sisälsi kallionpinnasta lukien seuraavat kerrokset:

- ruiskubetonilujitus kalliolaadun mukaan
- polyeteenilevy
- palonsuojakerros (RB40+V)
- maalaus (Kuparivuoren maantietunneli 1988.)

Vaihtoehto B sisälsi kallionpinnasta lukien seuraavat kerrokset:

- ruiskubetonilujitus kalliolaadun mukaan
- suodatinkangas
- vesieriste
- raudoitus ruiskutettavaa lämpöeristettä varten
- ruiskutettava lämpöeriste
- palonsuojakerros
- maalaus (Kuparivuoren maantietunneli 1988.)

Suunnitelman vaihtoehtorakenteiden ajatuksena oli, että vesi virtaa vapaasti kallion ja eristeen välissä sulana koko eristettävällä alueella ja vedet johdetaan tunnelin kuivatukseen rakennettuihin kanaaleihin, joihin asennettiin sadevesiviemärit ja salaojat kaivoineen. Hyväksytyn halvemman vaihtoehdon mukaan tunneli kuivatettiin tavanomaisilla ruiskubetonisalaojilla, joiden päälle ruiskutetaan noin 4 metrin leveydellä 100 millimetrin polyuretaanikerros. Rakennetta ei ollut kokeiltu aikaisemmin maantietunneleissa vastaavissa olosuhteissa. Kuvassa 6 nähdään Kuparivuoren tunnelin rakentamista 1980-luvulla (kuva 6). (Kuparivuoren maantietunneli 1988.)



Kuva 6. Kuparivuoren tunnelin rakentaminen 1980-luvulla (Kuparivuoren maantietunneli 1988).

3.2 Injektointi

Kuparivuoren tunnelin korjauksessa lujitusruiskubetonissa olevat, vettä vuotavat raot (kuva 7) tiivistettiin uretaanipohjaisella injektointiaineella, mikäli salaojan rakentaminen ei ollut mahdollista tilanpuutteen vuoksi. Kallion lämpötilan piti olla $+5\text{ °C}$ tai enemmän injektointityön aikana. Tiivistettävän kalliomassan lämpötilaa tarkkailtiin mittaamalla kallion pintalämpötilaa ja lämpötilaa mitattiin myös kallioon poratuista rei'istä. Kemialliseen injektointiin ryhdyttiin vain valvojan erillismääräyksestä ja kaikista injektointitöistä kemiallisilla injektointiaineilla tuli urakoitsijan esittää kohdekohtaisesti yksityiskohtaiset injektointisuunnitelmat. Injektointi suoritettiin niin monta kertaa, että valmis, Injektoitu rako ei vuotanut enää. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)



Kuva 7. Vettä vuotava reikä (Lindroos 2019).

3.3 Ruiskubetonointi ja salaojitus

Lämpö- ja vesieristerakenteen betonin vähimmäisvaatimuksina oli etupinnassa (tunnelin puoli) C34/45 lujuusluokan ruiskubetoni, joka täyttää rasitusluokkien XC3, XC4, XD3 ja XF4 vaatimukset. Pakkas- ja suolarasituskestävyys oli P40. Takapinnassa oli (kallion puoli) C30/37 lujuusluokan ruiskubetonia, joka täyttää rasitusluokkien XC3, XC4 ja XF2 vaatimukset. Pakkas- ja suolarasituskestävyys oli P25. Kerrospaksuuden tuli olla 90 millimetriä. Betoniin lisättiin polypropyleenikuituja lohkeilun rajoittamiseksi palotilanteessa. Kuitupitoisuus määritettiin Liikenneviraston ohjeen 34/2017 liitteen 5 mukaisesti. Runkoaineen suurin raekoko piti olla 8-16 millimetriä ja betonin loppulujuus ei saanut suurimmalla käytettävällä kiihdytinannostuksella pudota yli 20 % verrattuna kiihdyttämättömään betoniin. Kiihdyttimen määrä ei missään tapauksessa saanut ylittää 5 %:a sementin painosta. Ruiskubetonin salaojien sekä lujitusruiskubetonin paikalliseen korjaamiseen ja uudelleen ruiskuttamiseen niissä kohdin, joissa vanhaa ruiskubetonia tai kalliota oli

poistettu, käytettiin Vetonit Ruiskubetoni RB 50/5 K -kuivaruiskubetonia tai ominaisuuksiltaan vastaavaa valmistetta ja sen käytössä noudatettiin valmistajan ohjeita. Vaihtoehtoisesti voitiin käyttää teräskuidulla (pituus 25 mm, hoikkuusluku vähintään 50, 60 kg/m³) vahvistettua märkäruihubetonia. Salaojien päälle ruiskutettaessa ei käytetty teräskuitua. Ruiskutettavan kerrospaksuuden tuli olla vähintään 70 millimetriä. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

Vesi- ja lämpöeristyksen ruiskubetonitöitä ei aloitettu ennen kuin lämpöeristeen tunnelinpuoleisen pinnan sijainti oli tarkemmitattu ja oli varmistettu siitä, että liikennetilän ja eristeen pinnan välissä oli riittävästi tilaa ruiskubetonikerrokselle ottaen huomioon rakenteen mahdollinen ”roikkuminen”. Vesi- ja lämpöeristeen ”roikkumisen” estämiseksi palosuojaruiskubetonin ensimmäinen ruiskubetonointi tehtiin pulttien ripustuskohtiin ankkurikapaleen alueelle verkkojen ankkuroimiseksi sen kohdalta. Toisessa vaiheessa ruiskutettiin pulttilinjat kahdessa kerroksessa noin 1 metrin leveänä kaistana ja viimeisenä ruiskutettiin pulttilinjojen väliset alueet. Ruiskutettavan pinnan lämpötilan oli oltava vähintään +5 °C. Ruiskubetonipinnat kasteltiin vähintään kerran vuorokaudessa kahden viikon ajan. Kiihdyttimiä käytettäessä, kastelu tehtiin tasaisesti vähintään kuuden tunnin välein yhden viikon ajan. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

Valmiin ruiskubetonipinnan tarke mitattiin ja sen tuli kaikilta osiltaan olla piirustuksissa esitetyn liikennetilän ulkopuolella. Lämpöeristerakenteen päälle tehtävän ruiskubetonikerroksen paksuus määritettiin siten, että raudoitusverkon kiinnittimet peittyivät. Alue, joka ei täyttänyt vaatimuksia rajattiin lisänäytteenotoilla. Liian ohuet kerrokset ruiskutettiin vaadittuun paksuuteensa ja liian paksujen kerrosten kohdalla rakennuttaja määrittä jatkotoimenpiteet tapauskohtaisesti. Valmis ruiskubetonipinta skannattiin ja skannauksesta laadittiin värikartta, josta ilmeni valmiin pinnan etäisyys liikennetilasta, tasoleikkaukset reunakaiteen ja liikennetilän yläkulman kohdalta ja poikkileikkaukset 5 metrin välein. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

Valmiin ruiskubetonointipinnan kelpoisuus osoitettiin InfraRYL 2015 tarkastuskategorian 2 mukaisesti. Betonin paksuutta ei mitattu poraamalla, vaan raudoituksen kiinnikkeet toimivat paksuusmittareina. Ruiskubetonoinnista ei otettu erillisiä pakkasen kestävyyskokeita, jos siinä käytettiin valmisbetonia, joka oli jo todettu kelpolliseksi. Lisäksi puristuslujuus piti olla ennakkokokeiden mukainen ja ruiskubetonointi suojattu sekä jälkihoidettu ohjeiden mukaisesti. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

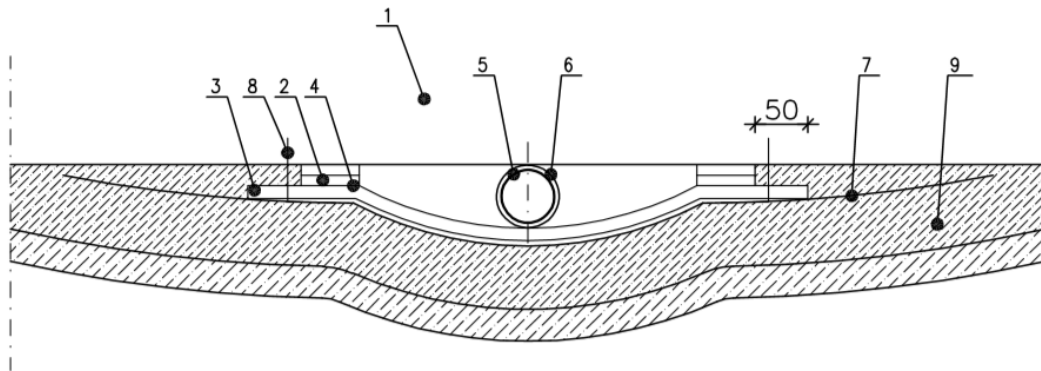
Ruiskubetonin vanhat rikkoutuneet salaojat korvattiin eristerakenteen purkamisen yhteydessä ja tunneleiden suuaukoille sekä keskellä oleviin betonitunneliosuuden päihin betonirakenteen ja kallion saumoihin tehtiin uudet salaojat. Suuaukoilla ne varustettiin sähkösaatolla. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

Salaojat asennettiin (kuva 8) joko vanhan lujitusruiskubetonoinnin tai kallion pintaan. Ruiskubetonipinta tehtiin siten, että koko matkalla oli jatkuva vietto eikä siinä saanut olla notkopaikkoja. Kallion pinnan ollessa niin epätasainen, ettei salaojan asennus sen mukaisesti ollut mahdollista, kallion pinta tasoitettiin ruiskubetonilla. Salaojat kiinnitettiin niin tiheästi ja hyvin pintoihin, etteivät ne irronneet ruiskubetonin voimasta eivätkä suihkusta. Ruiskubetonointi suoritettiin niin, ettei se tunkeutunut salaojituksen ja pinnan väliin. Kiinnikeväli sai olla maksimissaan 250 mm. Epätasaisella kalliopinnalla kiinnitys suoritettiin niin, että salaojarakenteen umpisolumuovi oli kiinni kalliossa koko matkalta. Salaojien alapää kiinnitettiin pohjan salaojituskerroksiin. Salaojan päälle tuleva kuiduton ruiskubetonikerros tehtiin vähintään 30 millimetriä paksuksi ja kokonaiskerrospaksuudeksi tuli 60 millimetriä. Ruiskubetonin leveys salaojan päällä piti olla vähintään 1 metrin tai puretun alueen kokoinen. Salaojien jäätyminen estettiin pitämällä betonin lämpötila työaikana vähintään +1 °C:een lämpötilassa. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)



Kuva 8. Asennettu salaoja (Lindroos 2019).

Valmiissa ruiskubetonisalaojarakenteessa (kuva 9) pituuskaltevuus tehtiin niin, että vesi kulkeutui patoutumatta ja imeytyi pohjakerrokseen (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018).



- | | |
|---|------------------|
| 1. KALLIO/LUJITUSRUISKUBETONI | SOLUMUOVIT JA |
| 2. UMPISOLUMUOVI 2 x 10mm x 50mm n. 30kg/m ³ | TERÄSLANKA |
| 3. UMPISOLUMUOVI 10mm x 500mm n. 40kg/m ³ | |
| 4. HEHKUTETTU TERÄSLANKA Ø 3mm | LIIMATAAN YHTEEN |
| 5. SALAOJAPUTKI Ø 50mm PVC | |
| 6. TUKIRENGAS k500 | |
| 7. TUKIVERKKO Ø 3.4mm, #100mm, LEVEYS 900mm | |
| 8. TERÄSKIINNIKE, VÄLI MAX k250 TAI TARVITTAESSA TIHEÄMPI | |
| 9. RUISKUTUS, KERROSPAKSUUS | |

Kuva 9. Ruiskubetonisalaoja (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018).

3.4 Pulttaus ja eristys

Eristysrakenteen kiinnityspultteina käytettiin kombipultteja (kuva 10) ja juotoslaastina toimi sementtilaasti. Laasti ei saanut itsestään valua ulos reiästä. Laastin valmistuksessa noudatettiin betoninormien rakenneluokan 2 vaatimuksia. Käytettävän muuraushiekan rakeisuuskäyrän tuli täyttää VTT:n pultitusohjeen nro 27 vaatimukset. Myös kemiallinen juotos oli mahdollinen. Kemiallinen juotos tehtiin aineen valmistajan ohjeiden mukaan. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)



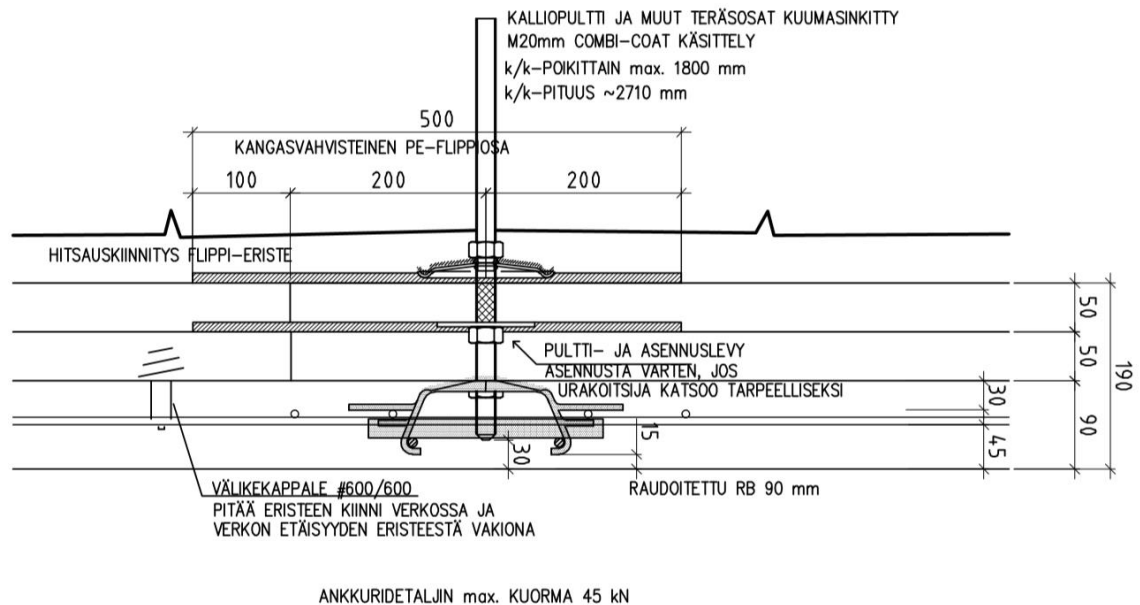
Kuva 10. Pulttaus eristeen kanssa (Lindroos 2019).

Kalliopulttien asennuksessa noudatettiin RIL 266-2014 Kalliopultitusohjetta. Kaikki lämpöeristeeseen kuuluvat ankkuripultit asennettiin tien pituus suunnassa kohtisuoraan teoreettista pituuslinjaa vastaan ja poikkisuunnassa asennuskulmat esitettiin suunnitelmissa. Ennen pulttien poraamista urakoitsija merkitsi kalliotunneleihin suunnitelmien mukaiset pulttien paikat kattoon sekä seiniin ja lisäksi jokaisen pultin kohdalle merkittiin ruiskubetonipinnan ulkopuolelle jäävän pulttiosan pituus. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

Ankkuripultit koevedettiin ja koevetomäärä oli 1 pultti jokaista alkavaa 100 pulttia kohden ja koevetovoima 70 kN. Sementtiä käytettäessä juotosmassasta otettiin yksi koekappale jokaista 200 pulttia kohden ja koekappaleen puristuslujuus todettiin hyväksytyssä koestuslaitoksessa standardin SFS-EN 12930-3 mukaisesti. Jos tulokset eivät täyttäneet vaatimuksia, antoi rakennuttaja ohjeet jatkotoimenpiteistä. Asennuksen jälkeen kannatinpulttien päiden sijaintitieto tarkemmitattiin ja mikäli pulttien paikat oli mitattu ja merkitty

ennen porausta, mitattiin ainoastaan suunnitelmasta poikkeavien pulttien sijainti. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

Kuparivuoren tunnelin lämpö- ja vesieristys toteutettiin Ørsta Stålindustrinin toiselta nimeltään ”Kombi-hvelvet” (kuva 11). Kyseisen rakenteen veden kanssa kosketuksiin joutuvat rakenteet korroosiosuojattiin ja ruiskubetonin piti olla pakkasenkestävää. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)



Kuva 11. Kombi-hvelvet (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018).

Kaikissa eristysrakenteen läpäisevissä pulttiasennuksissa urakoitsija huolehti siitä, että eristerakenteen ruiskubetonin ja PE-eristeen rajapinnasta pultin kannan momenttijäykään kiinnityspisteeseen jäävä pultin varren vapaa, liikkeelle mahdollinen pituus, oli vähintään 400 millimetriä. Erityistä huomiota asiaan tuli kiinnittää tunneleiden suuaukkojen ja liikuntasaumojen läheisyydessä. Osa pulteista jätettiin pidemmiksi. Kaapelihyllypalkkien kannatusta varten varattujen pulttijonojen pulttien alapään sijainnit esitettiin suunnitelmissa. Lämpöeristeen paksuus oli 100 millimetriä ja se tehtiin kahdesta 50 millimetriä paksusta ristiinsilloitetusta umpisoluisesta PE-levystä (tiheys $\sim 30 \text{ kg/m}^3$) ja sen teoreettinen leveys oli 2710 millimetriä (Kuva 12). Tunnelin kaarevuudesta johtuen jouduttiin osassa eristekaistoista käyttämään leveydeltään katon osalta vaihtuvaa patjaleveyttä. Mainitut kohdat mittoineen ja lukumäärineen esitettiin suunnitelmissa. Kaikki lämpöeristeen lävistyksiset tehtiin vesitiiviiksi ja lämpöeristeen lävistyksiset tehtiin työntämällä lämpöeriste kiinnityspultista läpi, kuitenkin niin, ettei patja revennyt. Asennus piti suorittaa niin,

että eristerakenne palosuojaaruiskubetoni mukaan luettuna ei missään kohdissa ulottunut piirustuksissa esitetyn vapaan liikennöintitilan alueelle. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)



Kuva 12. Eriste asennettuna (Lindroos 2019).

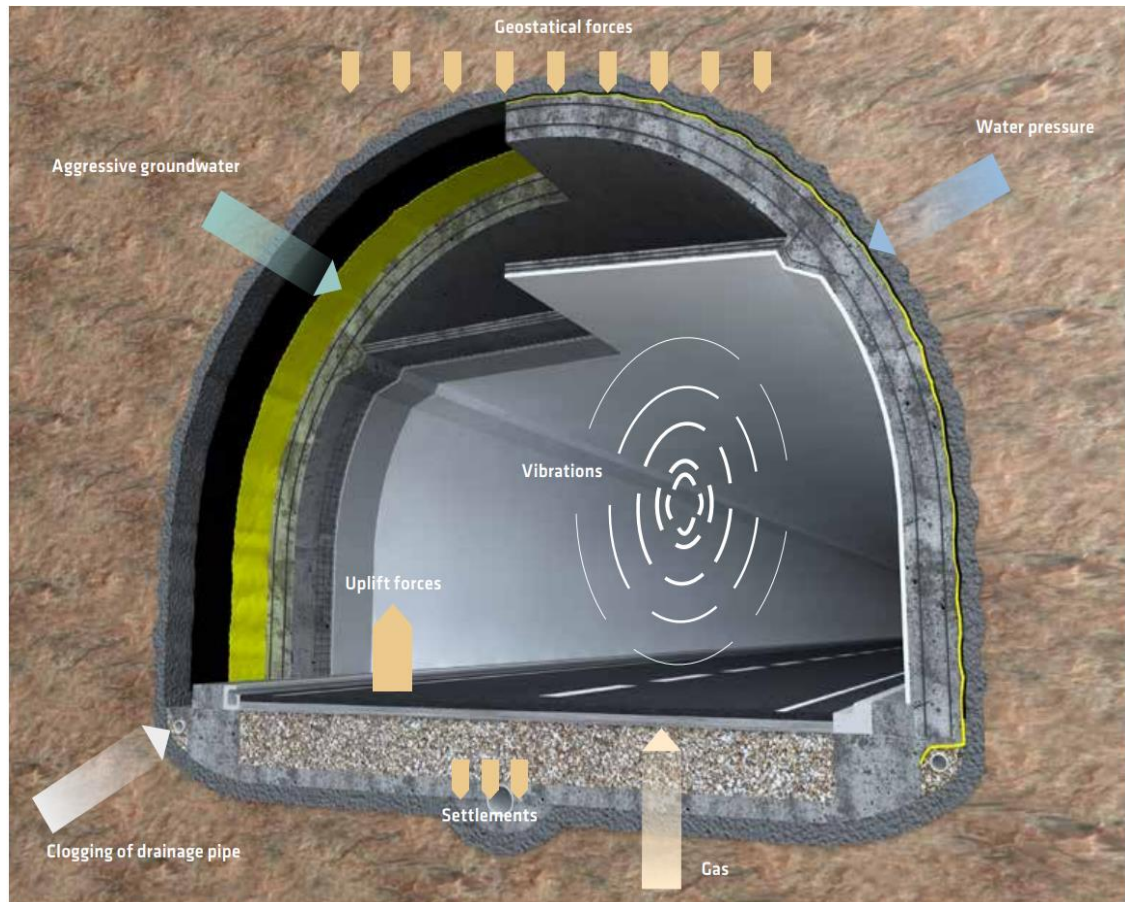
4 KUIVATUSJÄRJESTELMÄRATKAISUJEN VERTAILU

4.1 Yleistä

Tunnelin vedeneristysjärjestelmä koostuu monen eri tekijän yhdistelmästä. Eriste on yksi tärkeimmistä, mutta se ei pärjää yksinään. Siksi vedenpitävyys pitää sisällään toisaalta eristeen ja sen asennuksen sisältäen sen kiinnitystekniikan, geotekstiilin, viemärijärjestelmän, suojakerroksen ja levyt ja toisaalta louhintatuen/alustan valmistelun säätämällä ruiskubetonia, injektointiteknologiaa ja viimeisenä, mutta ei vähäisimpänä, laadun varmistuksen. (Tunneling under difficult conditions 2006.)

Tunneliin kohdistuu monia erilaisia rasituksia (kuva 13), jotka voivat vaikuttaa negatiivisesti tunnelirakenteen käyttöön, vesitiivyyteen ja kestävyys, mikä johtaa rakenteen lyhentyneeseen käyttöikänsä. Näihin kuuluvat

- veden tunkeutuminen, mikä voi aiheuttaa vaurioita johtoihin ja sähkölaitteisiin ja terästukien korroosiota
- haitallisten kemikaalien aiheuttamat betonivauriot sulfaattihyökkäysten takia ja teräsvahvistusten korroosiot kloridihyökkäysten takia
- epätasaiset staattiset- ja dynaamiset voimat aiheuttavat halkeilua
- lämpötilan vaihtelut tuottavat kondensaatio vettä ja betonin halkeilua
- kaasun tunkeutuminen on haitallista tunnelin käyttäjille
- sieni ja bakteerihyökkäykset ovat haitallisia vesieristysrakenteiden pinnoitteille (Sika services Ag 2017.)



Kuva 13. Tunneliin kohdistuvat rasitukset (Sika services Ag 2017).

4.2 Yleisimmät kokonaisrakenteet

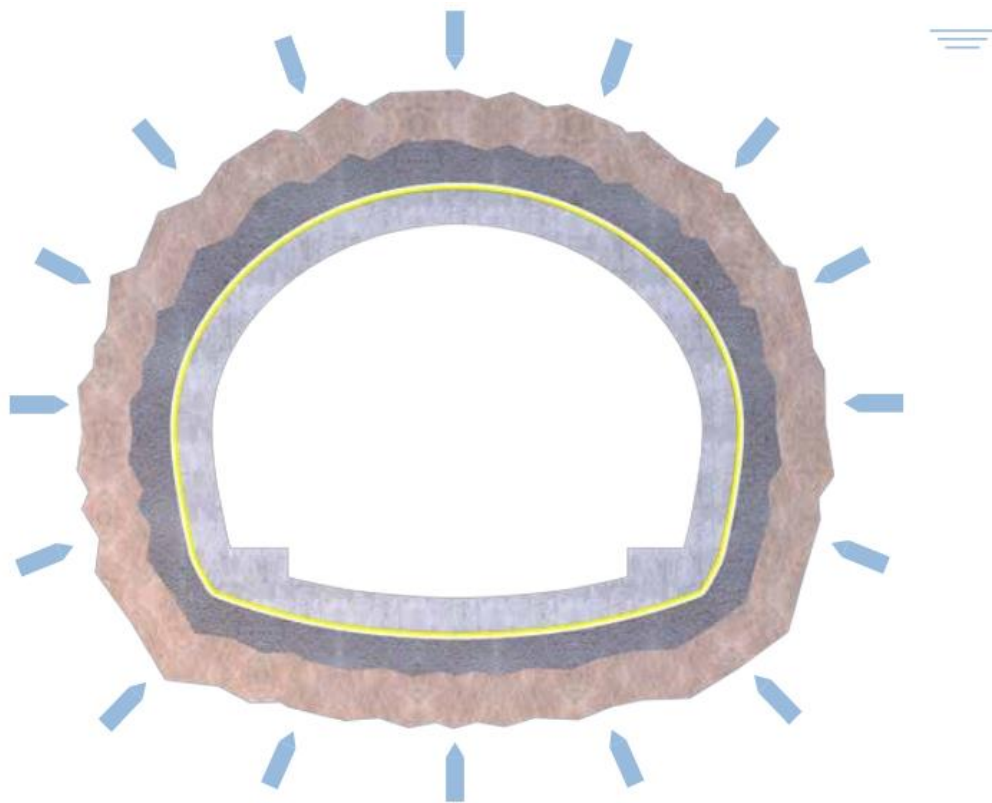
4.2.1 Salaojaton rakenne

Tunneli voidaan rakentaa salaojattomaksi rakenteeksi (kuva 14), joka koostuu vesitiivistä ja monipuolisesta rakenteesta. Tunnelin valmistuttua tarkoituksena on, että pohjavedelle ei tarvitse tehdä mitään, eikä sen korkeuteen tai tasapainoon tapahdu pysyviä muutoksia. Päätös olla johdattamatta pohjavettä viemärijärjestelmään edellyttää, että rakenne ja tiiviste on suunniteltu sekä rakennettu kestäämään korkeaa vedenpainetta. Tämä tarkoittaa useimmissa tapauksissa täysin muutettua kokonaiskonseptia ja siten rakennuskustannusten kohtuullisen suurta nousua. (Tunneling under difficult conditions 2006.)

Toisaalta salaojattomien tunneleiden huolto on erittäin halpaa. Vedeneristysvuoraus suojaa koko betonirakennetta veden tunkeutumiselta ja kemiallisilta iskuilta.

Vedeneristystekniikasta riippuen voidaan perustaa sisäänrakennettu ohjaus- ja injektiojärjestelmä toimivan järjestelmän saamiseksi. Hyviä puolia rakenteessa ovat seuraavat asiat

- vesitasossa ei tapahdu mitään muutoksia rakentamisen jälkeen
- ei kielteisiä vaikutuksia ympäristöön
- maan siirtymien riski vähenee selvästi
- korkeamman luokan vedeneristysjärjestelmä
- vedeneristysjärjestelmiä on helpompi huoltaa
- ei ylläpitokustannuksia
- huonompaa on salaojalliseen rakenteeseen nähden betonirakenteen ja vedeneristysvuorauksen korkea hinta (Sika services Ag 2017.)



Kuva 14. Salaojaton rakenne (Sika services Ag 2017).

Pysyvää viemäriä ei tarvita tunnelissa, joka on rakennettu kestävämmän vettä paineen alaisena. Tällaisissa tapauksissa vuorauksen tiivistys- ja tukilujuusvaatimukset nousevat huomattavasti. Salaojattomat tunnelit, jotka stabiloidaan ruiskubetonilla, asennetaan kalvot ruiskubetonin ja sisäbetonin väliin. Seuraavista rakenteista valitaan yksi vaihtoehto riippuen vedenpaineen suuruudesta ja veden sekä maaperän koostumuksesta:

- yksikerroksinen membraani koko tunnelin ympäri
- yksikerroksinen membraani koko tunnelin ympäri yhdessä vesitiiviin betonivuorauksen kanssa
- tuplakerrosmembraani (Tunneling under difficult conditions 2006.)

Joissain tapauksissa yksikerroksinen membraani asennetaan betonielementtisegmenttien ja sisäisen betonivuorauksen väliin koko tunnelin ympäröykselle (Tunneling under difficult conditions 2006).

Tunnelissa tulee olla väliaikainen viemäröinti, joka pidetään toiminnassa samaan aikaan, kun vedeneristys ja vuoraus asennetaan pitämään työalue kuivana. Pumput asetetaan noin 100 metrin välein pumppauksen toimimiseksi kattavasti koko alueella rakentamisen aikana. (Tunneling under difficult conditions 2006.)

Jos tunneli rakennetaan täysin vesitiiviiksi, asennetaan sekä kääntöön että holviin vedeneristyskalvo. Parempien paikallisten mekaanisten vaurioiden kestävyysparantamiseksi ja varmuuden lisäämiseksi suositellaan 3 millimetrin paksuista muovitiivistekalvoa käytettäväksi korkeassa vedenpaineessa ja 2 millimetrin paksuista membraania vuotavan veden tapauksessa. Vedeneristyskalvo on myös varustettu signaalikerroksella, toisin sanoen erilaisella heijastavalla värillä olevalla ohuella levyllä, joka on kiinnitetty toiselle puolelle. Sillä havaitaan kalvon vauriot helposti joko ennen asennusta tai asennuksen jälkeen. (Tunneling under difficult conditions 2006.)

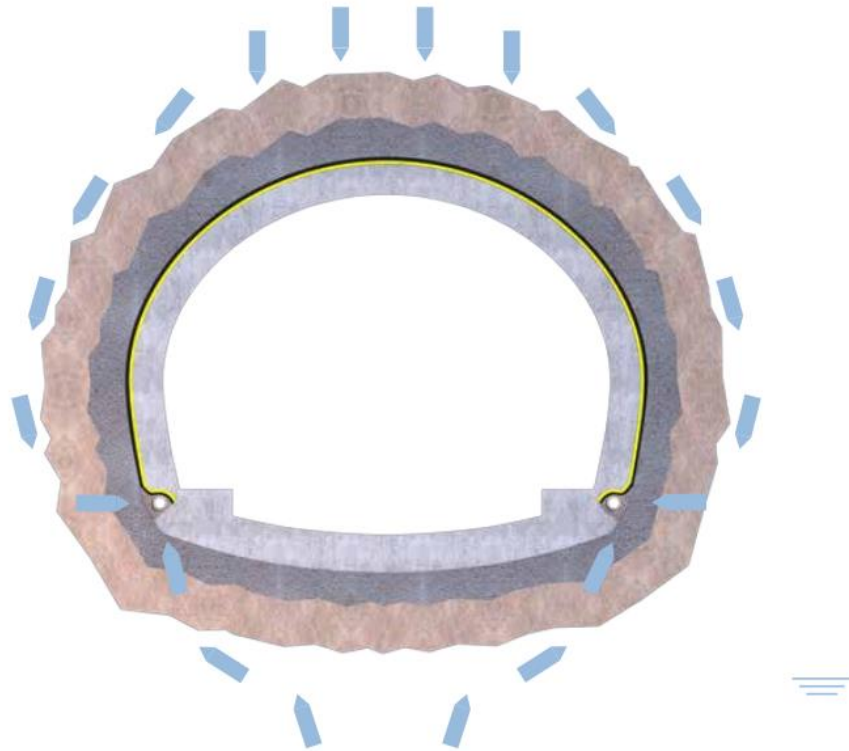
Tunneleissa ongelma on liittynyt lähinnä materiaalin jäykkyyteen ja käsinhitsauksen vaikeuksiin, etenkin märissä ja epämiellyttävissä olosuhteissa tai kapeissa osissa, poikkeileikkauksissa jne. Kalvojen hitsaaminen huolellisesti ja onnistuneesti on todella tärkeää, jotta vedeneristysjärjestelmän jatkuvuus on varmistettu. Mikä tahansa hitsauksen epäonnistuminen aiheuttaa vuodon tunneliin, ja lopputuloksena on todella mittavat vahingot. (Tunneling under difficult conditions 2006.)

4.2.2 Salaojallinen rakenne

Salaojarakenteelliset (kuva 15) tunnelit kuljettavat pohjaveden yleensä keräten sen holvin nurkkiin niin, että tunnelin kuori ei rasitu. Putkeen virtaava vesi voi absorboida liukoisia komponentteja sen kulkiessa kallion ja ruiskubetonin läpi. Huuhtoutuneet komponentit yhdessä ilman ja putken erityisolosuhteiden kanssa voivat luoda sintrausprosessin ja pahimmassa tapauksessa ne tukkivat putken kokonaan. Myöhemmin paine tunnelin seinämään voi kasvaa niin, että se aiheuttaa vakavia vaurioita. On selvää, että viemärin on toimittava täydellisesti, muuten kyseenalaistetaan sen käyttökelpoisuus, sekä tunnelin turvallisuus. Säännöllinen korkeapainehuuhtelu kalsiumkerrostumien poistamiseksi tarvitaan ja se lisää ylläpitokustannuksia. Vaurioitunutta tyhjennysjärjestelmää ei ole ollenkaan helppo korjata. Tästä seuraa korkeita kustannuksia ja esteitä liikenteelle. (Tunneling under difficult conditions 2006.)

Hyviä ja huonoja puolia salaojallisessa rakenteessa ovat seuraavat asiat:

- betonin paksuutta voidaan pienentää, mikä vähentää kustannuksia
- vesitiivis vuoraus on halvempi salaojattomassa rakenteessa
- tunnelin rakentaminen on mahdollista äärimmäisissä olosuhteissa
- korkeammat ylläpitokustannukset kuin salaojattomassa rakenteessa viemäriputkien puhdistamisen takia
- liikenne joudutaan keskeyttämään huoltotöiden takia
- tunnelin yläpuoliset rakenteet ovat mahdollisia salaojien avulla (Sika services Ag 2017.)



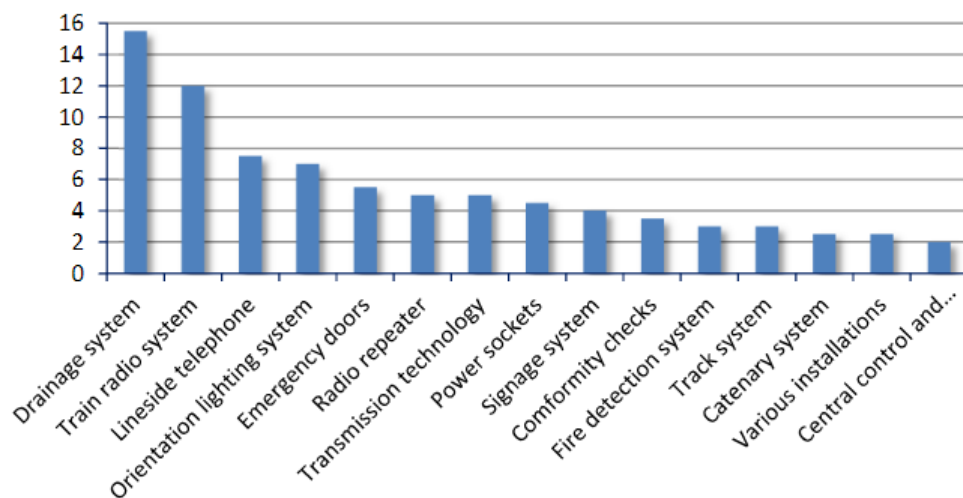
Kuva 15. Salaojallinen rakenne (Sika Services AG 2017).

Merkittävä osa tunnelirakenteiden ylläpitokustannuksista liittyy viemärijärjestelmän tarkastamiseen, ylläpitoon ja korjaamiseen. Tunnelien viemärijärjestelmä on usein tukossa kalsiumsaostumien takia, mikä voi aiheuttaa vakavia ongelmia, koska viemäriputkien poikkileikkaus pienentyy. Tutkimukset ovat osoittaneet, että viemäriliuoksissa liuennut kalsium ja etenkin portlandiitti on peräisin pohjavesistä. Pohjaveden joutuessa kosketuksiin tunnelin ruiskubetonoinnin kanssa ilmenee monimutkaisia kivennäisvesireaktioita. Yksinkertaistettuna, betonin portlandiitti liukenee, mikä johtaa kalsiumpitoisuuden ja pH:n nousuun. Viemäriliuokset voivat ylittää jopa pH-arvoon 13 tai vielä sitäkin suuremmaksi. Toisaalta kalsiumionit voidaan kiinnittää saostamalla kalsiumkarbonaatti- ja sulfaattimineraaleja suoraan ruiskubetonissa. Puhdistus ja veden käsittely ovat todella hintavia toimiville yrityksille. Viemärijärjestelmän tarkastamiseen, kunnossapitoon ja korjaamiseen liittyvien välittömien kustannusten lisäksi aiheutuu epäsuoria kustannuksia, kuten tunnelin tukkeutumisen tarkastus sekä huoltaminen tai korjaaminen. Viemärijärjestelmien sintraus ja tukkeutuminen johtuvat pääasiassa sementtimineraalien liukenemisestä betoniin, mikä vuorostaan johtuu viemärijärjestelmän riittämättömästä suunnittelusta ja

rakentamisen ammattitaidottomuudesta. Pitkäaikaisilla tutkimuksilla ja in situ -kokeilla Itävallan liikennetunnelissa on saatu aikaan erikoisvalmisteista ruiskubetonia, millä voidaan vähentää sintrausmuodostumia merkittävästi. Vastaavanlaista tuotekehitystä pitäisi tehdä myös muille rakennusmateriaaleille, esimerkiksi injektointilaasteille. Rakenteellisilla toimenpiteillä ja kovuusvakaimien avulla voidaan vähentää viemärijärjestelmän sisällä olevia kovia saostumia. Myös hyvin suunnitelluilla virtausreiteillä ja pienentämällä kosketusta maan ilmakehään, voidaan vähentää merkittävästi kalsiumkarbonaatin saostumista. Näiden toimenpiteiden huomioiminen antaa merkittävän panoksen tunnelin viemärijärjestelmien kunnossapito- ja korjaustöiden vähentämiseen, mikä vähentää merkittävästi toimintahäiriöitä ja käyttökustannuksia. Liikennetunnelien arvioinnit ovat osoittaneet, että noin 15–20 % kaikista tarkastus- ja huoltotöistä liittyvät viemärijärjestelmään (taulukko 1). Siksi tunneliprojektin suunnittelun varhaisvaiheista lähtien, on myös pyrittävä löytämään ratkaisuja näiden kustannusten ja negatiivisten häiriöiden minimoimiseksi. (Harer 2017.)

Karbonaatin liukenemisen yhteydessä tunnelin viemärijärjestelmissä kalsiumkarbonaatti saostuvat (kuva 16) pääasiassa vesiliuoksista, jotka muodostuvat paikallisista pohjavesistä ja reaktiosta ruiskubetonin kanssa. Viemäriliuoksen kemiallinen koostumus riippuu siten paikallisen pohjaveden kehityksestä sekä rakentamiseen käytettyjen materiaalien kemiallisesta koostumuksesta ja reaktiivisuudesta. (Harer 2017.)

Taulukko 1. Ylläpitotarkastusten keskiarvoprosentit (Harer 2017).





Kuva 16. Viemäriputken saostertymä (Harer 2017).

Pääasiassa saostumien kertymiseen vaikuttavat pohjaveden koostumus ja tunnelirakenteen materiaalit. Sintrauksen kielteisten vaikutusten vähentämiseksi täytyy jo projektin alkuvaiheessa kiinnittää erityistä huomiota näihin tekijöihin. Kuten edellä on mainittu, pohjaveden kemiallisella koostumuksella ja pohjaveden kyllästymisellä on suuri vaikutus liukenemiskäyttäytymiseen. Siksi on suositeltavaa analysoida vallitsevia pohjaveden olosuhteita myös sintraukseen liittyvien näkökohtien suhteen. Nämä näkökohdat on otettava huomioon jo ensimmäisistä maatulkimuksista alkaen, ja niitä kannattaa jatkaa koko projektin ajan. (Harer 2017.)

Pohjavettä voidaan käsitellä estoaineilla, esimerkiksi polyasparagiinihapolla tai polysukkinimidilla siten, että saostuminen tapahtuu pääasiassa kolloidisessa aineessa, joka ei muodosta kovia saostumia viemärijärjestelmässä. Toisaalta useat esimerkit ovat osoittaneet, että estoaineiden yliannostus tai sopimattomien tuotteiden käyttö voi aiheuttaa kielteisiä vaikutuksia. Tämä saattaa johtaa vesien liian hedelmälliseen kasvuun, mikä johtaa vesipitoisen lian huomattavaan kasvuun. (Harer 2017.)

Karbonaattisaostumien muodostuminen tunneleissa, kuten edellä todettiin, liittyy läheisesti pohjaveden ja betonin vuorovaikutukseen. Saostumien muodostumista voidaan

vähentää merkittävästi sopivalla rakenteella ja räätälöityjä rakennusmateriaaleja käyttämällä. Kokeet osoittavat, että karbonaattisaostumien muodostumisen vähentämiseksi tulisi käyttää ruiskubetonia, jossa on vähäiset portlandiitti ja sulfaattimineraalipitoisuudet sekä alhainen läpäisevyys. (Harer 2017.)

Erityisen korkean ylikuormituksen ja vastaavasti korkean pohjaveden paineen tapauksessa vain viemäroity tunneli voi täyttää staattiset vaatimukset sekä taloudellisista että käytännön syistä. Tämä pätee pääasiassa myös pienempiin ylikuormituksiin, joiden esiintyvyys on vähäinen tai erittäin pieni. Injektointi voi vähentää veden virtausta tunnelin suunnassa. Pysyvän maanalaisen viemärijärjestelmän on toimittava tunnelin koko käyttöajan ajan ja jos tätä tiukkaa vaatimusta voidaan noudattaa, tunnelin kattoa ei tarvitse olennaisesti mitoittaa vedenpaineen suhteen. Jos jostain syystä tätä vaatimusta ei voida taata pitkällä aikavälillä, on todennäköistä, että paine kasvaa lattian alla tai tukialueella. (Tunneling under difficult conditions 2006.)

4.3 Ruiskubetonointi

4.3.1 Yleistä

Ruiskubetonista on tullut olennainen osa modernia tunnelin rakentamista, ja sillä on yhä tärkeämpi merkitys tunnelirakenteiden toimivuudelle. Ruiskubetonitekniikan kehittäminen perustuu kokemukseen, jota yleensä saadaan kokeiluista ja virheistä. Nykyaikaisessa tunnelirakentamisessa on paljon pienempi virhetoleranssi, minkä takia tulee olla tarkat tiedot suunnittelua ja rakennuspäätöksiä varten. Ruiskubetoni on korvannut puurakenteet, jota on ennen käytetty väliaikaisena tukena. (Tunneling under difficult conditions 2006.)

4.3.2 Komposiittivuoraus rakenne eli yksikerroksinen rakenne

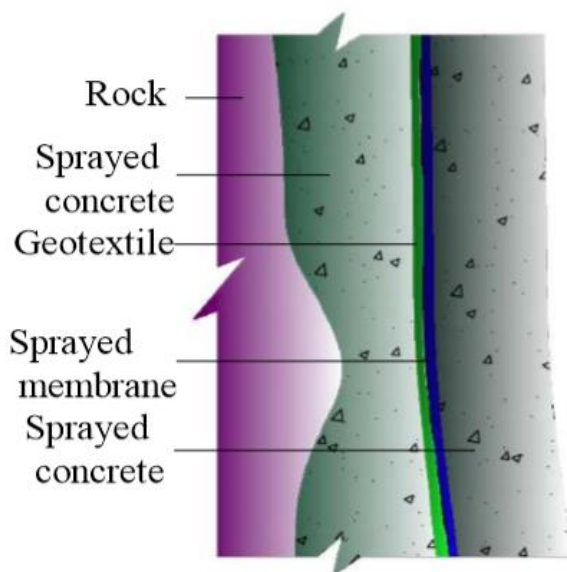
Tyypillisesti tunneleiden vedeneristys suoritetaan asentamalla esivalmistettu levykalvo, joka asennetaan ensisijaisen (ulkoisen) vuorauksen ja toissijaisen (sisäisen) vuorauksen väliin. Kalvo toimii erotus- tai liukuvanakerroksena vuorausten välillä. Levykalvoja on kuitenkin vaikea asentaa osiin, joissa on monimutkaiset geometriat, ja huolimatta siitä, että niille tehdään tehtaalla laadunvarmistuksia, asennetulla kalvolla on usein vuotoja

hitsausaumojen suuren määrän, vahinkojen asentamisen tai vahingoittumisessa aiheutuneiden vaurioiden vuoksi. Samoin kuin huonosti asennetuilla toissijaisilla betonivuorauksilla. (Jung 2017.)

Kahden viimeisen vuosikymmenen aikana on tehty huomattavaa parannusta suihkutettavalle betoniteknologialle edistyneillä lisäaineilla sekä ruiskubetonin levittämiseen erikoistuneilla ruiskutusroboteilla. Sekoitusmallien, sekoitusteknologioiden ja alkalittomien kiihdyttimien viimeisin kehitys on antanut suunnittelijoille mahdollisuuden käyttää ruiskutettua betonia pysyvänä vuorauksena, jonka vaadittu käyttöikä on yli 100 vuotta. (Jung 2017.)

Käytettäessä kaksoissidottua suihkutettua vedenpitävää kalvoa yhdessä pysyvästi ruiskutetun betonin kanssa ensisijaisena ja toissijaisena vuorauksena, näiden kahden vuorauskerroksen välinen yhteys pysyy ja vuorausta voidaan pitää yhtenä komposiittirakenteena (kuva 17). Tämän takia vuorauksen kokonaispaksuutta voidaan vähentää, sillä pysyvä suunnittelukuormitus jaetaan kahden vuorauksen kesken. Näin saadaan aikaan myös tuntuvat kustannussäästöt. Toinen asia, josta tulee säästöä, on materiaalit, sillä betonia kuluu vähemmän. Vaikka ruiskutettu membraani on kalliimpaa, se kompensoituu sen asennusnopeuden avulla. Ympäristön kannalta ajateltuna tällä kaikella saadaan myös hiilijalanjälkeä pienemmäksi. (Pillai 2017.)

Suihkuttava vesieristyskalvo, kuten Masterseal 345 ja 340F, perustuu eteeni-vinyyliasettaattikopolymeeriin, joka on käytännössä sama raaka-aine, jota käytetään PVC-kalvojen valmistukseen. Sekoitettuna pieneen määrään erikoisementtiä siihen saadaan jauhemainen muoto, joka suosii kuljetusta ja käyttöä käytännössä. Se vaatii vain vettä sekoitusaineeksi ja se saadaan levitettyä samalla periaatteella kuin normaali ruiskubetoni. Erityisiä laitteita, erikoiskoulutettua miehistöä ja erityisiä suojarusteita ei tarvita. Ruiskutetun kerroksen tulisi olla 3-5 millimetriä paksua ja tasaista. Oikeassa lämpötilassa se kovettuu muutamassa tunnissa ja muuttuu elastiseksi kalvoksi. (Ma 2010.)



Kuva 17. Suihkutettu komposiittivuoraus rakenne (Ma 2010).

Suihkutettu kalvo voidaan levittää suoraan vain suhteellisen kuivalle pinnalle. Systemaattista tai kohdennettua geotekstiiliä käytetään alueilla, joille vesi tunkeutuu suoraan, jotta voidaan hallita aktiivista vedenvirtausta. Ruiskubetonin ensimmäiseen kerrokseen tarvitaan yleensä hienojakoinen betonisekoitus esimerkiksi alle 8 millimetriä, jotta saadaan sileä pinta ja minimoidaan ruiskutetun kalvon levityspaksuus. (Ma 2010.)

Ensimmäisen ruiskubetonikerroksen tulee olla riittävän sileä, kuiva ja puhdas, jotta vesieristyskalvo saadaan levitettyä onnistuneesti. Testitulosten ja käytännön tapaushistorioiden tulokset osoittavat, että ensimmäisen ruiskutetun betonikerroksen karheudella ei ole suoraa vaikutusta ruiskutetun vesieristyskalvon mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten suihkutetun betonin sidoslujuteen, mutta mitä vähemmän ruiskutetun betonin pinta on sileämpi, sitä paksumpi kerros ja enemmän materiaaleja levitetään määritellyn vesitiivyyden saavuttamiseksi. Toinen epäsuora epäsuotuisa vaikutus vähemmän sileällä betonipinnalla on se, että kuperan osan pullistuneet kohdat altistetaan helposti murtumiselle kovettumisjakson aikana. Halkeamat eivät vain lisää suihkutetun betonin läpäisevyyttä, vaan hyödyttävät myös halkeamien muodostumista suihkutetussa vedeneristyskalvossa. Hiukkaset ja likaantuminen ensimmäisen ruiskutetun betonikerroksen pinnalla voivat aiheuttaa suihkutetun kalvon sidosvaurioita. Levityspuhtaalla ja sileällä betonipinnalla varmistetaan parempi toimivuus suihkutetuille kalvoille. Sopiva pinnan karheus vedenpitävän kalvon, kuten Masterseal 345, levittämiseen voidaan saavuttaa säätämällä ruiskutetun betonivuorauksen ensimmäisen kerroksen sekoitussuhteita. (Ma 2010.)

4.4 Kuparivuoren tunneli

Kuparivuoren tunnelin korjauksessa käytettiin samantyyppistä rakennetta kuin salaojallisessa rakenteessa on kuvattu. Se on norjalaisten kehittämä ja on nimeltään ”Kombihvelvet”. Syynä tähän ratkaisuun on pääasiassa tunnelin yläpuoliset rakenteet, mihin kuuluvat esimerkiksi jäähalli ja urheilukenttä. Toteutustapa oli kallis, mutta myös välttämätön, koska tällä tavalla rakenteeseen saatiin asennettua hyvät salaojarakenteet kuljettamaan yläpuolelta virtaavaa vettä. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

Jos rakenne olisi yritetty tehdä salaojattomana, olisi ollut todella haastavaa saada se kestämään yläpuolisista rakenteista johtuvaa vedenpainetta. Ja kuten on mainittu, salaojallisissa ja salaojattomissa rakenteissa on omat hyvät ja huonot puolensa. Kuparivuoren tunnelissa suunnittelijat kokivat tämän ratkaisutavan parhaaksi. Kyseisen rakenteen rakentaminen sujui pääasiassa mutkitta. Eriste saatiin helposti muotoiltua tunnelin seinämien mukaan, varsinainen kiinnitys sujui hyvin, koska kiinnityspultit oli asennettu tarkasti niille määritettyihin paikkoihin eikä injektoinnissa ilmennyt mitään poikkeavaa. (Työkohtaiset laatuvaatimukset ja työselitykset 2018.)

5 POHDINTAA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tunnelin kuivatusjärjestelmärakenteissa on vielä paljon parantamisen varaa. Vaativat ympäristölliset olosuhteet, korkeat tunnelirakenteiden vaatimukset ja pitkä käyttöikä tuovat omat haasteensa liikennetunneleiden rakentamiseen. Varsinkin Suomessa vuotovesien kanssa on ollut ongelmia ja niihin on mietitty parhaita toteutustapoja sekä rakenteita. Yleisimmät näistä ovat salaojallinen ja salaojaton järjestelmä.

Salaojajärjestelmällä pois johdettavat vedet voivat laskea pohjavesitasoja, mikä vuorostaan aiheuttaa haittaa ympäristölle, vesistöille ja kasvistolle. Toinen viemärijärjestelmän huono puoli on, että sen ylläpito on kallista ja jos kaikkia tekijöitä, kuten pohjaveden koostumusta ei ole otettu huomioon, voi se tulla vieläkin kalliimmaksi. Tämän takia onkin erityisen tärkeää selvittää etukäteen kaikki mahdollinen kalliotilan ympäristöstä. Näin voidaan välttyä isoilta vahingoilta melko pienin kustannuksin. Hyvä puoli salaojissa on se, että niillä ehkäistään korkeat vedenpaineet ja rakenteita kehitetään koko ajan siihen suuntaan, että esimerkiksi salaojien tukkeutuminen vähenisi.

Nykyään yhä useampi tunneli rakennetaan aina vain haastavampiin olosuhteisiin, kuten sellaisille alueille, joissa ollaan tekemisissä pohjavesien kanssa ja se aiheuttaa korkean vedenpaineen. Tällaisilla alueilla tunneli on vaikea rakentaa toimivaksi ja turvalliseksi. Ensimmäinen asia, mitä täytyy miettiä tunnelin rakentamisessa, on että toteutetaanko se täysin tiiviinä ilman salaojajärjestelmää vai salaojajärjestelmällä. Salaojattomat järjestelmät ovat tällä hetkellä ison kehityksen kohteena monissa maissa. Salaojattoman rakenteen hyötynä on, että se ei vaikuta pohjaveden tasoon, eikä näin ollen ympäristöön, ja sen ylläpitokustannukset ovat vähäiset. Jos mennään pohjaveden tason alapuolelle ja paine nousee liian korkeaksi, täysin tiivis rakenne ei kestä. Täysin vesitiivis rakenne olisi ehdottomasti parempi vaihtoehto verrattuna salaojalliseen rakenteeseen, mutta se on vielä kehitysvaiheessa, kun puhutaan haastavista olosuhteista. Vähemmän haastaviin kohteisiin se on hyvä vaihtoehto. Tulevaisuudessa tämä rakenne tulee varmasti olemaan yhä enemmän esillä.

Ruiskubetonoinnilla on myös todella suuri merkitys liikennetunneleiden vedeneristyksessä. Hyvänä esimerkkinä on komposiittivuoraustekniikka, jota on kehitetty jo parin vuosikymmenen ajan, mutta aiheesta ei löydy vielä riittävästi julkaistua teknistä tietoa, joka määrittäisi sen betonin paksuuden vähentämispotentiaalin. Rakenteesta

mielenkiintoisen tekee se, että kun se saadaan enemmän esille esimerkiksi jonkin ison rakennusyrityksen kautta, kaikki muutkin luultavasti huomaavat sen potentiaalin.

Tulevaisuudessa tunnelirakentaminen todennäköisesti lisääntyy. Mitä enemmän materiaaleja, rakennetekniikoita kehitetään, niin sitä mukaa siirrytään aina vaativampiin olosuhteisiin, joissa vuorostaan tunnelin rakentamisen vaatimustasot nousevat entisestään. Ympäristöystävällisyyden suosion lisääntyminen tuo myös omat haasteensa.

Tämän työn perusteella voidaan päätellä, että Kuparivuoren tunnelin peruskorjaus suoritettaisiin samalla tavalla myös tulevaisuudessa. Vaikka salaojaton rakenne tai komposiittivuoraustekniikka kehittyisikin niin paljon, että niillä saataisiin vedenpaine kokonaan ehkäistyä, niin vanhan korjauksessa on varmempi käyttää salaojallista rakennetta. Ensinnäkin Kuparivuorella ei ole pohjavettä niin, että sitä tulisi huomioida. Lisäksi vanhan korjauksessa olisi luultavasti haastavaa ja vähintäänkin kallista muuttaa koko konsepti erilaiseksi niin, että se olisi todellisuudessa kannattavaa.

Tunnelirakentamisesta voidaan kokonaisuudessaan todeta, että jos halutaan tehdä toimiva rakenne riippumatta rakennevaihtoehdosta, se kannattaa aina tehdä mieluummin liian huolellisesti ja kerralla oikein. Jos rakenteista löytyy myöhemmin asennus- tai huolimattomuusvirheitä, se saattaa käydä kalliiksi ja vaarantaa pahimmassa tapauksessa koko liikenteen.

LÄHTEET

- Lemke, S. Aydogmus, T. Aslan, A.T. Tezel, A. 2006. Tunneling under difficult conditions – Waterproofing systems. Istanbul. Flatiron Constructors Inc. <https://www.researchgate.net/publication/321295253> -> Download full-text PDF
- Harer, G. 2017. Measures for the reduction of sinter formations in tunnels. Wals. GEOCONSULT ZT GmbH. Saatavissa <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/236/1/012071/pdf>
- Holter, K. 2015. Properties of waterproof sprayed concrete tunnel linings. Trondheim. NTNU. Saatavissa http://www.stalprotect.ru/d/58871/d/kgholter_properties_of_waterproof_sprayed_concrete_tunnel_linings-compressed.pdf
- Jung, H. Clement, F. Pillai, A. Wilson, C. Traldi, D. 2017. Composite tunnel linings, allowing a more cost effective and sustainable tunnel design. Bergen. Proceedings of the World Tunnel Congress 2017. Saatavissa [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/English%20\(Asia\)/World%20Tunnel%20Congress%202017%20-%20Composite%20tunnel%20linings.%20allowing%20a%20more%20cost%20effective%20and%20sustainable%20tunnel%20design.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/English%20(Asia)/World%20Tunnel%20Congress%202017%20-%20Composite%20tunnel%20linings.%20allowing%20a%20more%20cost%20effective%20and%20sustainable%20tunnel%20design.pdf)
- Ma, J. 2010. Application of spray-on waterproofing membrane in tunnels. Sveitsi. Trans tech publications. <https://www.researchgate.net/publication/272061312> -> Download full-text PDF
- Pillai, A. Jung, H. Clement, F. Wilson, C. Traldi, D. 2017. Sprayed concrete composite tunnel lining – load sharing between the primary and secondary lining, and its benefit in reducing the structural thickness of the lining. Bergen. Proceedings of the World Tunnel Congress 2017. <https://www.researchgate.net/publication/320924891> -> Download full-text PDF
- Ritola, J. & Vuopio, J. 2002. Kalliotilojen vesitiiveyden hallinta. Espoo: VTT. VTT Tiedotteita 2147. Saatavissa <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2147.pdf>
- Sika services Ag. 2017. Sika solutions for watertight tunnel structures. Zurich. Sika. Saatavissa <https://www.sika.com/dms/getdocument.get/68c71ec2-e805-3f91-ac49-eb780d3321d9/Sika%20Solutions%20for%20Watertight%20Concrete.pdf>
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2006. Kalliotilojen injektointi 2006. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2015. Ruiskubetonointiohjeet 2015. Helsinki: BY-Koulutus Oy.
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2014. RIL 266-2014 Kalliopultitusohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL. 1987. RIL 154-1 Tunneli- ja kalliorakennus I. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
- Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL. 1987. RIL 154-2 Tunneli- ja kalliorakennus II. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

