

Jouko Ritola & Jaakko Vuopio

Kalliotilojen vesitiiviyyden hallinta

Kallioiden vesitiiviyyden hallinta

Jouko Ritola & Jaakko Vuopio
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-6058-2 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6059-0 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät,
Lämpömiehenkuja 2, PL 1800, 02044 VTT, puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Byggnadsteknik, Konstruktioner och husteknik,
Värmemansgränden 2, PB 1800, 02044 VTT, tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Building and Transport, Structures and Building Services,
Lämpömiehenkuja 2, P.O.Box 1800, FIN-02044 VTT, Finland,
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Toimitus Maini Manninen

Kansikuva: Kluuvin pysäköintilaitos, yhdyskäytävä Aleksanterinkadulle

Otamedia Oy, Espoo 2002

Ritola, Jouko & Vuopio, Jaakko. Kalliotilojen vesitiiviyyden hallinta [Management of watertightness in rock spaces and tunnels]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2147. 124 s.

Avainsanat rock caverns, underground spaces, groundwater, leakage, drainage, sealing, waterproofing, watertightness

Tiivistelmä

Kalliotiloissa esiintyvät tippavesivuodot aiheuttavat haittaa tilojen rakenteille, laitteistoille ja käyttäjille. Kuivatusjärjestelmistä pois johdettava vesi puolestaan saattaa muuttaa pohjavesitasapainoa ja aiheuttaa haittaa maanpäällisille rakenteille, kasvistolle ja vesistöille kalliotilojen ympäristössä. Viime vuosina rakennetuissa uusissa kalliotiloissa on yhä useammin tullut ongelmaksi lukuisat tippavuodot, joiden syistä ja syntytaivoista vallitsee erilaisia näkemyksiä. Tämä onkin synnyttänyt tarpeen tutkia vuotoilmiöitä ja kehittää vesitiiviyyden hallintamenetelmiä sekä parantaa vesieristysratkaisuja.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kalliotiloissa esiintyvien vesivuotojen todelliset syyt sekä esittää priorisoidut toimenpide-ehdotukset kalliotilojen vesitiiviyyden hallitsemiseksi ja parantamiseksi. Tutkimus koostui kirjallisuusselvityksestä sekä kohde- ja seurantatutkimuksista. Kohteissa suoritettujen mittausten ja tulosten analysoinnin perusteella havaittiin vesivuotojen syiden kohdistuvan kalliotilan kuivatusjärjestelmään ja vesieristysrakenteisiin injektioonin puutteellisuuden lisäksi. Tutkimustulokset analysoitiin kalliorakentamiseen sovelletulla RES-menetelmällä (Rock Engineering System).

Vesitiiviyyden hallintaan liittyviä toimenpide-ehdotuksia tehtiin kaikkiaan 65 kpl ja ne priorisoitiin kustannustehokkuuden, aikataulun, tutkimustarpeen ym. tekijöiden mukaan joko välittömästi tai myöhemmin pitemmän ajan kuluessa toteutettaviksi. Erittäin tärkeiksi priorisoiduista toimenpide-ehdotuksista suositellaan välittömästi rakentamisessa käyttöön otettavaksi 25 kpl ja 9 kpl katsotaan edellyttävän välittömästi tutkimus- ja tuotekehityshankkeiden käynnistämistä. Muut toimenpide-ehdotukset, noin 50 %, on otettava huomioon ja toteutettava rakennushankekohtaisesti käytössä olevien resurssien (aika, kustannukset, tekijä) puitteissa.

Yksittäisistä toimenpide-ehdotuksista tehokkaimmiksi arvioitiin esi-injektioonin lisääminen tilaa ympäröivän kallion tiivistämiseksi, louhinnan optimointi kallion vesitiiviyyden kannalta, ruiskubetonin paksuuden lisääminen, ruiskubetonirakenteen vesitiiviyyden parantaminen sekä tilan kuivatusjärjestelmien kehittäminen. Koko kalliorakentamisen tuotantoketjua koskien ehdotettiin kalliotiloille käyttötarkoituksenmukaisen vesitiiviysluokituksen sekä siihen liittyvien toiminnallisten ja teknisten laatuvaatimusten ja laadunvalvonnan kehittämistä.

Ritola, Jouko & Vuopio, Jaakko. Kalliotilojen vesitiivyyden hallinta [Management of watertightness in rock spaces and tunnels]. Espoo 2002. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Research Notes 2147. 124 p.

Keywords rock caverns, underground spaces, groundwater, leakage, drainage, sealing, waterproofing, watertightness

Abstract

Water seepage leakage into rock caverns causes problems for the structures, equipment and users of such facilities. Furthermore, the disposal of water from drainage systems installed in these underground spaces can alter the equilibrium of groundwater conditions, thereby causing damage to surface structures, vegetation and nearby water-courses. Numerous instances of seepage damage have been observed in underground rock facilities built in recent years, and there are a number of differing opinions about the causes and mechanisms involved in this problem. This has given rise to the need to study seepage phenomena, to develop new methods of controlling watertightness, and to improve waterproofing solutions.

The aim of this study is to clarify the real causes of water seepage into rock caverns and to present a prioritised list of proposed measures to control and improve the watertightness of such spaces. The research consists of a literature study as well as site and follow-up investigations. Analysis of on-site measurements and results indicates that the causes of the seepages were related to the drainage system and waterproofing structures of the rock caverns and also to deficiencies in the grouting work. The research findings were analysed by applying the RES method (Rock Engineering System).

Altogether 65 watertightness control measures were proposed and they were prioritised according to cost effectiveness, scheduling, the need for further research and other factors for implementation either immediately or in the longer term. Of the prioritised proposed measures, twenty-five were considered extremely important and thus recommended for immediate introduction into construction practice, and nine were seen as requiring the immediate start-up of research and product development projects. The remainder of the proposed measures, i.e. about 50 %, should be taken into consideration and implemented site-specifically within the framework of available resources (time, costs, labour, etc).

The most effective of the proposed measures were regarded as more pre-grouting to seal the rock surrounding the cavern, optimising the excavation work from the standpoint of watertightness, increasing the thickness of shotcrete, improving the watertightness of the shotcrete structure, and developing the draining systems used in underground rock caverns. It was also proposed that the entire production chain of rock engineering should be covered by a watertightness classification of underground rock facilities designed for different purposes as well as its associated functional and technical standards and quality control.

Alkusanat

Kalliotilojen vesitiiviyyden hallintaprojekti toteutettiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkimusyksikössä yhteistyössä useiden kalliorakennusalan toimijoiden kanssa. Tutkimuksen rahoitukseen osallistuivat Tekesin ja VTT:n lisäksi sisäasiainministeriö, Puolustushallinnon rakennuslaitos, Tiehallinto, Helsingin energia, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Helsingin kaupungin pelastuslaitos, Rakennus Oy Lemminkäinen sekä YIT Rakennus Oy. Rahoittajien lisäksi useat kalliorakennusalan toimijat erityisesti suunnittelutoimistot panostivat projektiin omarahoitteista työtä varsinkin kohdetutkimuksiin liittyvän aineiston tuottamisessa ja hankinnassa. BBK Rock Design Oy, Mikael Rinne osallistui alihankintasopimuksella vesitiiviyyden hallintaan liittyvän RES-analyysisovelluksen (Rock Engineering System) kehittämiseen.

Tutkimusta ohjaava ja valvova johtoryhmä kokoontui projektin aikana 11 kertaa ja siihen kuuluivat seuraavat henkilöt:

Juha Salmelainen, Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd, puheenjohtaja

Tom Warras, Tekes

Pekka Rajajärvi, sisäasiainministeriö

Olli Niskanen, Tiehallinto

Raimo Viitala, Helsingin kaupungin geotekninen osasto

Erkki Holopainen, Rakennus Oy Lemminkäinen 31.12.2000 saakka

Vesa Vaaranta, Rakennus Oy Lemminkäinen 1.1.2001 alkaen

Jouko Ritola, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, projektipäällikkö

Projektia valvomaan ja ohjaamaan perustettiin myös seurantaryhmä, johon osallistui yhteensä 15 rahoittaja- ja yhteistyöorganisaatioiden edustajaa. Seurantaryhmä kokoontui projektin aikana kuusi kertaa.

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan projektiryhmään kuuluivat erikoistutkija Jouko Ritola, tutkija Jaakko Vuopio sekä tekniikan ylioppilas Tuomas Laamanen, joka teki projektiin kuuluvana työnä kohdetutkimuksiin liittyvän diplomityön ”Kalliotilojen vesivuotojen syyt”. Tämän julkaisun ovat laatineet tutkija Jaakko Vuopio ja erikoistutkija Jouko Ritola. Projektin kohdetutkimusten osalta on käytetty diplomityössä analysoitua aineistoa.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
2. Kalliotilojen vesivuodot ja niiden estäminen.....	11
2.1 Vesivuotojen aiheuttamat haitat.....	11
2.1.1 Vuotojen haitat tilan käytölle.....	11
2.1.2 Vuotojen haitat louhinnassa.....	14
2.2 Kalliotilojen ja tunneleiden vesitiiviysvaatimukset.....	14
2.3 Suomessa ja Pohjoismaissa käytettävät vesieristysratkaisut.....	16
2.3.1 Kallion tiivistäminen.....	16
2.3.2 Salaojitus.....	17
2.3.3 Ruiskubetonointi.....	20
2.3.4 Sisäkatot.....	21
3. Kalliotilojen vesivuototutkimukset.....	28
3.1 Kohdetutkimukset.....	28
3.1.1 Kohteiden valinta.....	28
3.1.2 Tutkimuskohteet.....	29
3.1.3 Tutkimusmenetelmät.....	30
3.2 Tutkimustulokset ja vuotosyiden analysointi.....	32
3.2.1 Rakennerratkaisujen ja työmenetelmien vaikutus vuotoihin kenttähavaintojen perusteella.....	32
3.2.2 Vuotojen syyjakaumat.....	46
3.2.3 Ruiskubetonitutkimukset.....	53
3.2.4 Yhteenveto vuotojen syistä.....	58
3.3 Seurantakohdetutkimukset.....	61
3.3.1 Kohteet ja seuranta.....	61
3.3.2 Tutkimustulokset.....	64
3.3.3 Yhteenveto seurantatutkimuksista.....	71
4. Vesitiiviiden hallinta-analyysi.....	72
4.1 Hallinta-analyysi.....	72
4.2 RES-analyysi.....	72
4.2.1 RES-analyysin soveltaminen.....	72

4.2.2	Analysoitavat prosessit ja vuorovaikutusmatriisit	75
4.2.3	RES-analyysin tulokset	77
5.	Toimenpide-ehdotukset vesitiiviuden parantamiseksi	78
5.1	Toimenpide-ehdotusten perusteet	78
5.2	Kalliorakentamisen toimintaprosesseihin liittyvät toimenpide-ehdotukset	78
5.2.1	Vesitiiviystason määrittäminen	78
5.2.2	Vesitiiviysvaatimusten vaikutus rakennusaikatauluun ja kustannuksiin	79
5.2.3	Vesitiiviuden varmistus ja laadunvalvonta	83
5.3	Tuotantoprosesseihin liittyvät toimenpide-ehdotukset	85
5.3.1	Hankkeen valmistelu ja suunnittelu	85
5.3.2	Rakentaminen	89
5.3.3	Tilan vastaanotto ja käyttö	106
6.	Toimenpide-ehdotusten priorisointi ja toteutus	108
7.	Jatkokehitystarpeet	111
7.1	Tekninen ohjeistus	111
7.1.1	Injektointi	111
7.1.2	Salaojitus- ja kuivatusrakenteet	111
7.1.3	Ruiskubetonointi	112
7.1.4	Pultitus ja tartuntarakenteet	112
7.2	Tutkimus- ja tuotekehitys	112
7.2.1	Vesitiiviysluokitus	112
7.2.2	Salaojitus- ja eristysrakenteet	113
7.2.3	Louhinnan optimointi vesitiiviuden kannalta	113
7.3	Koerakentaminen ja rakenteiden tuotehyväksyntämenettely, auditointi	114
7.3.1	Vesitiiviuden hallintamenetelmien toteutus vaativan mallikohteen suunnittelussa ja rakentamisessa	114
7.3.2	Mallikohde-ehdotus ja sen valintakriteerit	115
8.	Yhteenveto	116
	Lähdeluettelo	121

1. Johdanto

Kalliotiloissa esiintyvät vesivuodot ovat jo pidemmän aikaa herättäneet keskustelua vuotojen syistä, niiden haitoista ja vaihtoehtoisista vesieristysrakenteista. Sekä kalliorakennusalalla että tilojen käyttäjien keskuudessa on havaittu ongelmaksi varsinkin uusissa kalliotiloissa esiintyvät vesivuodot. Vesivuotojen mahdollinen vaikutus ympäristön pohjaveden tasoon ja tippavuodot itse tilaan eivät anna positiivista kuvaa kalliotilasta vaihtoehtoisena ja kilpailukykyisenä ratkaisuna maanpäälliseen rakentamiseen verrattuna. Tämä onkin synnyttänyt tarpeen parantaa kalliotilojen vesitiiviyttä.

Kaksivuotisen tutkimushankkeen ”Kalliotilojen vesitiiviyden hallinta” tavoite oli selvittää kalliotiloissa esiintyvien vesivuotojen syyt ja niiden merkittävyys syyjakaumien ja vesitiiviyden hallinta-analyysin perusteella sekä esittää priorisoidut toimenpideehdotukset kalliotilojen ja tunneleiden vesitiiviyden hallitsemiseksi ja parantamiseksi lyhyen ja pitkän ajan kuluessa. Tutkimushanke oli kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa paneuduttiin vuotojen syiden tutkimiseen ja tutkimustulosten analysointiin. Vuotoja aiheuttavien merkittävimpien syiden ollessa selvillä voitiin hankkeen toisessa vaiheessa kehittää toimenpide-ehdotukset, joilla pyritään estämään vuotojen syntyminen kalliorakentamisen eri tuotantovaiheissa.

Tutkimushankkeen alkuun sisältyi perehtyminen Ruotsissa ja Norjassa käytettäviin vesieristysratkaisuihin ja Pohjoismaissa tehtyihin vuototutkimuksiin ja asiaa koskevaan kirjallisuuteen. Tähän osioon sisältyi myös tutustumiskäynti Ruotsiin ja Norjaan. Pohjoismaissa vesitiiviyden hallintaan käytetyt menetelmät eroavat jonkin verran toisistaan. Suomessa ruiskubetoni ja salaojitus ovat pääasiallisin vesieristysratkaisu. Ruotsissa on tutkittu paljon injektointia ja siirrytty sen käyttöön yhdessä ruiskubetonin kanssa ensisijaisena vesieristysmenetelmänä. Norjassa käytetään injektointia ja ruiskubetonia, mutta vaativissa kohteissa, etenkin liikennetunneleissa, myös erillisiä lähes standardoituja verhourakenteita.

Projektin tutkimusvaiheeseen kuuluvana työnä tehtiin diplomityö (Laamanen 2000), joka liittyy vesivuotojen tutkimusmenetelmien ja edustavien tutkimuskohteiden valintaan, tutkimusten suoritukseen ja tutkimusaineiston käsittelyyn ja analysointiin.

Projektin alkuvaiheessa voitiin jo todeta, että kalliotilojen ja tunneleiden vesitiiviyteen vaikuttavia tekijöitä on lukuisia ja niiden vaikutus vesitiiviyteen ja keskinäinen merkittävyys tulee kyetä todentamaan. Injektoinnin tärkeä merkitys tiedostettiin, mutta sitä ei kohdetutkimuksissa päästy yksityiskohtaisesti tarkastelemaan sen vähäisyyden ja puutteellisen dokumentoinnin takia. Vastaavasti vuotoalueiden kallion rakennetta ja vedenjohtavuutta ei voitu myöskään riittävän yksityiskohtaisesti määrittää pelkästään tilan rakentamisvaiheen kalliotutkimusten perusteella, jolloin tutkimusten pääpaino jouduttiin keskittämään tilan rakenteissa ilmenevien vuotojen syiden selvittämiseen. Kohdetutkimuksissa suoritettujen mittausten ja tulosten analysoinnin perusteella havaittiin vesi-

vuotojen syiden kohdistuvan injektoinnin puutteellisuuden lisäksi kalliotilan kuivatusjärjestelmään ja vesieristysrakenteisiin

Kaikkien tutkittujen kohteiden kalliotilan lujitus- ja vesieristerakenteena toimivan ruiskubetonirakenteen laatua tutkittiin myös laboratoriossa mikrorakennetutkimuksissa. Tutkimuskohteista otettiin kohdetutkimuksien aikana erilliset näytteet betonin ohuthietutkimusta ja puristuslujuuden määrittämistä varten. Betonitutkimuksiin sisällytettiin myöhemmin vuoden 2001 keväällä kaksi vanhempaa 1970–80-luvulla kuivaseosmenetelmällä ruiskubetonoitua kohdetta. Ohuthietutkimuksessa analysoitiin betoneiden koostumus, hydratoitumisaste, karbonisoituminen, vesi-sementtisuhte, tiivistyshuokosten määrä, tiivistyneisyys, homogeenisuus, halkeamat ja säröt.

Vesivuotojen syiden ja niiden merkittävyyden analysoinnissa käytettiin apuna kalliorakentamisessa jonkin verran käytettyä Rock Engineering System analyysiä, RES-analyysiä. Analyysi antoi systematiikan, jonka perusteella voitiin esittää priorisoituina kalliotilojen vesitiiviiden parantamiseen liittyvät toimenpide-ehdotukset.

2. Kalliotilojen vesivuodot ja niiden estäminen

2.1 Vesivuotojen aiheuttamat haitat

Vesivuodot tunneleihin ja kalliotiloihin aiheuttavat yleisesti teknillisiä ongelmia maanalaisessa rakentamisessa samoin kuin ympäristöllisiä ongelmia tilaa ympäröivissä pohjavedellä kyllästyneissä maaperän kerrostumissa. Suuremmat vuotovesimäärät louhinnan aikana nostavat rakennuskustannuksia ja rakentamisen jälkeen vuotamaan jääneet tilat aiheuttavat haittaa kalliotilojen käytölle ja pitkällä aikajänteellä vahinkoja maanpäällisille rakenteille. Sen vuoksi rakennusurakoitsijoille ja rakennuttajille on tullut entistä tärkeämmäksi ja välttämättömämmäksi optimoida ja paikantaa mahdollisille vuodoille ja niiden haitoille riskialttiit alueet jo ennalta.

Vesivuotojen aiheuttamia teknillisiä ongelmia ja haittoja rakentamisessa ovat mm. pumppaustarve louhinnan aikana ja vesieristerakenteiden asennuksen aiheuttamat. Vuotavat pisteet taas aiheuttavat mm. jälkikorjauskustannuksia, esteettisiä haittoja tilassa ja mahdollisia korvauksia vuotojen aiheuttamista haitoista tilan käyttäjille. Ympäristölle aiheutuvia haittoja ovat mm. pohjavesi- ja orsivesipinnan aleneminen, rakennusten puupaalujen lahoaminen, maan tiivistyminen, rakennusten painumat ja maaperän ja kasvillisuuden kuivuminen. Ympäristöhaittojen huomiointi on usein jäänyt tiedostamatta rakennettaessa maanalaisia tiloja, mutta nykyään varsinkin herkillä pohjavesialueilla ympäristövaatimukset yhä useammin asettavat tilalle tiukkoja tiiviysvaatimuksia käyttövaatimusten sijasta.

2.1.1 Vuotojen haitat tilan käytölle

Kalliotilojen vedeneristyksen tarkoituksena on estää kosteuden pääsy sisätiloihin. Vedeneristysmateriaalin tai -rakenteen rikkoutuessa vuoto ilmenee useimmiten tippavuotona holviosuudella tai valumana seinäpinnoilla. Jatkuvaa vuotoa esiintyy harvoin, sillä nämä kohdat on useimmiten paikattu jo työn vastaanottotarkastuksen yhteydessä. Vuotojen aiheuttamia fyysisiä haittoja kalliotiloissa ovat metallien korrosio, sähkölaitteiden oikosulut, homeen muodostuminen, ruiskubetonin rapautuminen. Lisäksi ilmenee esteettisiä haittoja, kun vesi on aiheuttanut ruiskubetoniin tai sen pinnoitteeseen värimuutoksia, kalkkisaostumia ja pinnan rapautumista (Kuva 1).

Ruiskubetonikerroksen läpi tulevassa vedessä on mukana betonista liuennutta kalkkia. Tämä ilmenee holviosuuksilla kalkkitikkuina ja seinäosuuksilla vaaleampina kalkkisaostumina vuodon kohdalla (Kuvat 2 ja 3). Varsinkin pysäköintihalleissa kalkkivesi aiheuttaa vaurioita pysäköityjen ajoneuvojen maalipinnalle. Samaan kohtaan tippuva kalkkivesi syövyttää ajan myötä maalipinnan. Tippavuotoja estämään on kehitetty erilaisia haihdutuspeltejä (Kuva 4), joissa tippuva vesi pääsee haihtumaan laajalta pinnalta. Kohteissa, joissa on ollut paljon vuotopisteitä, ne ovat jääneet ainakin osittain asenta-

matta tai asentaminen on suoritettu virheellisesti pellin toiminnan jäädessä puutteelliseksi. Pysäköintihalleissa tippuvuotojen kalkkivesi on johtanut mm. ajoneuvojen maalauskorvauksiin.

Usein vuoto liittyy kallio- tai ruiskubetonipinnan epätasaisuuteen. Kalliopinnan epätasaisuutta aiheuttaa kallion rakoilu tai väärä louhinta, ruiskubetonoinnin epätasaisuus johtuu yleensä ruiskutuksen puutteellisuudesta, kun ruiskutusta ei ole kyetty suorittamaan tasaisesti eri suunnista, ks. Kuva 3.



Kuva 1. Vesivuotojen aiheuttama pinnoitteen kellertyminen ja rapautuminen.



Kuva 2. Kosteaa aluetta seinäpinnalla. Vaalea alue on kalkkisaostumaa.



Kuva 3. Tyypillinen vuoto epätasaisella kalliopinnalla. Vesi tulee 'kielekkeen' alta.



Kuva 4. Haihdutuspeltiripustuksia Kluuvin kalliopysäköintilaitoksen katossa.

2.1.2 Vuotojen haitat louhinnassa

Pohjaveden virtaus kalliotilaan louhinnan aikana aiheuttaa monenlaisia teknisiä sekä ympäristöllisiä ongelmia. Pääosa teknillisistä ongelmista johtuu veden vuoksi hidastuneista louhintatöistä ja vaikeutuneista työskentelyolosuhteista.

Louhintatöiden hidastuminen on seurausta lisätöistä, joita vesivuodot aiheuttavat. Yleensä esi-injektointia varten on suoritettava vesimenekkiprobeja. Tarvittaessa joudutaan tekemään jälki-injektointia tai asentamaan salaojitusta louhinnan vielä ollessa meneillään. Louhittavan perän kuivanapito vaatii yleensä pumppausta ja pumppauslaitaiden rakentamista. Työskentely-olosuhteiden vaikeutuminen hidastaa myös osaltaan louhintaa. Kosteat olosuhteet asettavat omat vaatimuksensa sekä työntekijöille että kalustolle. Panostustyö vaikeutuu varsinkin alaspäin suuntautuvissa ns. alakätisissä rei'issä, kun reiät on puhallettava paineilman avulla kuiviksi.

Vesivuodoista aiheutuvien teknisten ongelmien on laskettu lisäävän louhintakustannuksia keskimäärin 12–15 %, kohteesta ja vesimäärästä riippuen (Casale et al. 1988). Vesi-ongelmien kustannuksista on tehty vertailu kolmella eri tunnelityömaalla, joissa vallitsivat erilaiset kallioperäolosuhteet (Janson 1978). Kokonaislouhintakustannukset nousivat 25 %:lla Linköpingissä Ruotsissa tunneliurakassa, joka sijaitsi ns. kovan kiven alueella. Ranskassa, Laverassa kalkkikivialueella kustannukset nousivat 35 % ja Vexinissä liitukivialueella 60 %:lla. Myös Italian ja Itävallan välillä olevan alppitunnelin kokonaiskustannusten on laskettu nousseen noin 20 % pohjaveden aiheuttamien ongelmien takia (Casale et al. 1988).

Pääasiallinen syy korkeisiin suhteellisiin kustannuksiin on systemaattisen esi-injektoinnin tarve. Esi-injektointi vaatii lisätyövuoron sekä oman kalustonsa ja työvoimansa. Suomessa ei ilmeisesti yhdessäkään kohteessa ole laskettu vuotoveden aiheuttamia lisäkustannuksia. Injektoinnin osuuksia louhintakustannuksista on kylläkin arvioitu. Ne liikkuvat Suomessa, jossa injektointia ei yleensä ole tehty systemaattisesti, alle 10 %:ssa koko louhintaurakan kustannuksista. Ruotsissa ja Norjassa pelkän systemaattisen esi-injektoinnin osuus on ollut jopa 50 %, mutta yleisemmin 0–30 % välillä kohteesta riippuen.

2.2 Kalliotilojen ja tunneleiden vesitiiviysvaatimukset

Kalliotilojen vesitiiviysvaatimukset määräytyvät kahden erilaisen kriteerin perusteella:

- 1) kalliotilan ympäristön asettamat ulkoiset vaatimukset
- 2) kalliotilan sisäiset vaatimukset.

Ympäristö, lähinnä kalliotilan yläpuolinen maaperä ja rakennettu ympäristö asettavat vaatimukset pohjaveden osalta. Vesitasetarkastelun perusteella voidaan arvioida, kuinka paljon pohjavettä voi virrata tilaan, ettei pohjaveden taso merkittävästi alene maakerroksissa. Jos käytössä on riittävästi laskentaparametreja, voidaan pohjavedenvirtaus maaperässä mallintaa laskennallisesti. Tiukat ulkoiset vaatimukset täytetään ainoastaan tiivistämällä tilaa ympäröivä kalliomassa injektioinnilla.

Kalliotilan sisäiset tiiveysvaatimukset määräytyvät tilan käyttötarkoituksen mukaan. Suomessa rakennetaan korkeatasoisesti varusteltuja kalliotiloja yhä vaativampiin ja monipuolisempiin käyttötarkoituksiin. Tämän seurauksena kalliotilojen laatusoatimukset, erityisesti vesitiiviysvaatimukset kasvavat, sillä osaan tiloista, käyttötarkoituksesta riippuen, ei sallita lainkaan vesivuotoja.

Suomessa kalliotilat voidaan jakaa karkeasti käyttötarkoituksen mukaan seuraavasti:

- yleisötilat
- pysäköintilaitokset
- liikennetunnelit
- tekniset tilat
- varastotilat.

Tämä jako noudattaa pääpiirteissään myös vesitiiviydelle asetettuja vaatimuksia. Näistä voidaan yleisötiloja ja joitakin teknisiä tiloja pitää kaikkein vaativimpina. Osa tiloista toimii poikkeusaikana väestösuojana. Väestösuojamääräykset eivät kuitenkaan tällä hetkellä aseta erityisvaatimuksia vesitiiviyden osalta. Suomessa vesitiiviysvaatimukset määritetään tapauskohtaisesti yhdessä rakennusviranomaisten ja suunnittelijoiden kesken, yleisiä vesitiiviysvaatimuksia ei ole.

Tiiveysvaatimus asetetaan sallitun vuotovesimäärän esim. l/min 100 m, l/min ja m³/h tai vuotojen määrän perusteella kpl/100 m² ja kpl/m³ eriteltynä vuodon laadun perusteella, kosteat ja tippuvat. Teknisissä varasto- ja yleisötiloissa voi olla niinkin, ettei tippuvuotoja sallita lainkaan. Joissakin tiloissa vaaditaan vain sisäilman kosteus- ja lämpötilaolosuhteet tietylle tasolle, ja mahdolliset vuodot estetään käyttämällä erilaisia eristerakenteita esim. kalvoja tai onpa jopa rakennettu kalliotilan sisään vesikatolla varustettu rakennus (vrt. Yliopiston kirjavarasto).

2.3 Suomessa ja Pohjoismaissa käytettävät vesieristysratkaisut

2.3.1 Kallion tiivistäminen

Kallion tiivistämisen, injektoinnin historian katsotaan alkaneen jo 1800-luvun alussa, jolloin Ranskassa käytettiin muurien korjaamiseen savi-kalkkiseosta (Andersson 1995). Sieltä asti injektointi on kehittynyt sementtipohjaisten ja kemiallisten aineiden myötä myös osaksi kalliorakentamista. Suomessa kallion esi- ja jälki-injektointia tehdään muhinkin Pohjoismaihin verrattuna vähän. Tosin kalliontiiviyys sekä kalliotilojen tiiviysvaatimukset poikkeavat ainakin osittain kohteesta riippuen.

2.3.1.1 Esi-injektointi

Esi-injektoinnilla tarkoitetaan ennen louhintaa tapahtuvaa kallion injektointia, joko louhittavasta perästä tai maanpinnalta käsin. Siinä pyritään tekemään tilaa ympäröivästä kalliorakenteesta tiivis, yhtenäinen massa, jottei vesi tulisi kalliotilaan.

Injektointitulokseen ja -tiiviyteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. (Brantberger et al. 1998):

- kallion rako-ominaisuudet
- geohydrologia
- injektointireikien geometria
- injektointipaine
- injektointiaine ja sen koostumus.

Suomessa tavallisimmin käytetty injektointiaine on ollut Rapid-sementti. Viime aikoina on enenevässä määrin siirrytty käyttämään mikrosementtejä, kuten Injekterings-, Ultrafin- tai Rheocem-sementit. Nämä injektointilaastit vaativat myös notkistimen ja mahdollisesti kiihdyttimien käyttöä. Kasvatavat tiiviysvaatimukset edellyttävät kuitenkin vielä hienojakoisempien aineiden käyttöä. Siten hienompijakoiset sementti-injektointilaastit kilpailevat erityyppisten kemiallisten injektointiaineiden kanssa. Kemiallisilla aineilla saavutetaan yleensä parempi tunkeutuvuus. Niiden reaktioista ja mahdollisesta liukeneemisesta kallion raoissa ei ole tarkkaa tutkimustietoa ja siten niiden käyttöä on rajoitettu tietyillä alueilla (Särkkä & Satola 2000).

Ruotsissa on tutkittu injektointimenetelmän ja -massan valintaan liittyviä kysymyksiä paljon, koska siellä injektointikustannukset ovat yleisesti suurin kustannuserä kohteen louhintakustannuksista (Brantberger 2000). Valittaessa injektointimassaa tulee ennen

kaikkea tietää kohteen geologinen ympäristö kokonaisuutena. Kalliosta otetuista laboratoriotestauksista ei välttämättä saada todellisia tuloksia injektointimassan virtauksesta kallioraoissa, mikä johtuu injektointimassan homogeenisuudesta (vesi-sementtisuhde) ja sementtipartikkeleiden koon suhteesta rakojen leveyteen (Eriksson et al. 1999). Laboratoriomittauksissa on todettu mm., ettei hienompi sementtiaines välttämättä paranna massan tunkeutuvuutta. Kuitenkin injektointisementin tunkeutuvuudelle on määritetty useita laskentamenetelmiä (Janson 1998). Ne perustuvat kenttäkokeisiin eräänlaisen verkkomallin pohjalle.

Myös aikatauluseikat lisäävät kustannuksia esi-injektoinnissa. Etenkin kohteissa, joissa ei voida toteuttaa useamman perän ajoa samanaikaisesti, tulee ylimääräinen katkos injektoinnin vuoksi. Systemaattisesti esi-injektoiduissa kohteissa on esi-injektoinnin todettu vievän n. 20 % louhinnan kokonaisajasta; 20 % työajasta, + 2–4 tunnin odotus ennen porausta (Liljestränd 2000). Yleisesti perän esi-injektointi pyritään suorittamaan yhden erillisen työvuoron aikana. Tätä ovat edesauttaneet kehittyneet kalustot (korkeampi paine) ja menetelmät.

2.3.1.2 Jälki-injektointi

Jälki-injektoinnilla tarkoitetaan louhitussa tilassa tapahtuvaa yksittäisten vuotopisteiden injektointia. Jälki-injektoinnin heikkoutena on, että yleisesti se vain siirtää vuotopistettä toiseen paikkaan eikä näin ollen välttämättä tuki vuotoa kokonaan.

Injektointiaine voi olla sementtipohjainen, mutta yleisemmin käytetään kemiallisia injektointiaineita. Käytetyt aineet ovat polyuretaaneja, 1-komponenttisia injektointiaineita, jotka reagoivat veden kanssa ja paisuvat noin 20-kertaisiksi. Näiden aineiden käyttö edellyttää erillisen katalysaattorin käyttöä (Särkkä & Satola 2000). Kalustona voi olla sama kalusto kuin esi-injektoinnissa mutta myös erityyppisiä käsin käytettäviä jälki-injektointilaitteita on olemassa, kuten paineprässä.

2.3.2 Salaojitus

Salaojituksella estetään tai ainakin vähennetään hydrostaattisen paineen alaisen pohjaveden virtausta sisään kalliotilaan. Salaojitus voidaan toteuttaa joko kallion sisäisenä, jossa tilan ulkopuolelle sijoittuvilla kallioaporareillä kuivatetaan kalliota tilan ympäriltä, tai tilan rakenteiden salaojitusjärjestelmällä, jossa vesiä hallitaan esimerkiksi ruiskubetonisalaojilla ja lattiarakenteen salaojituksella. Tilan lujitus- ja eristerakenteena voidaan käyttää ruiskubetonirakenteen sijasta muita rakenteita (vrt. kappale 2.3.4), joissa vedenpaineenkestävyys tai vesien keruu ja ohjaus on ratkaistu muulla tavoin kuin salaojittamalla.

2.3.2.1 Kallion sisäinen salaojitus

Tilan ympäröivään kallioon voidaan sijoittaa porareikiä, joihin ohjataan kalliossa virtaavat pohjavedet. Kallion salaojitusta on käytetty esim. kuilujen kuivatukseen, jossa kuilu ympäröidään kuilun suuntaisilla porarei'illä. Porareikien pohjalta vedet johdetaan tilan kuivatusvesijärjestelmään. Varsinkin tuloilmakuiluissa voi talvella esiintyä veden jäätymiseen liittyviä ongelmia, kun kuiluun kallioista purkautuvat vedet pääsevät jääty-
mään joko ruiskubetonirakenteiden salaojissa tai pintavaluntana.

Kallion sisäistä salaojitusta voidaan hyödyntää myös tilan vuotavien kallio-osuuksien lujitustöissä. Kuivattamalla kallio tilapäisesti porarei'illä mahdollistetaan pulttien onnistunut juotos ja kallion ruiskubetonointi. Kuivatusporareiät on myöhemmin erikseen injektoitava umpeen.

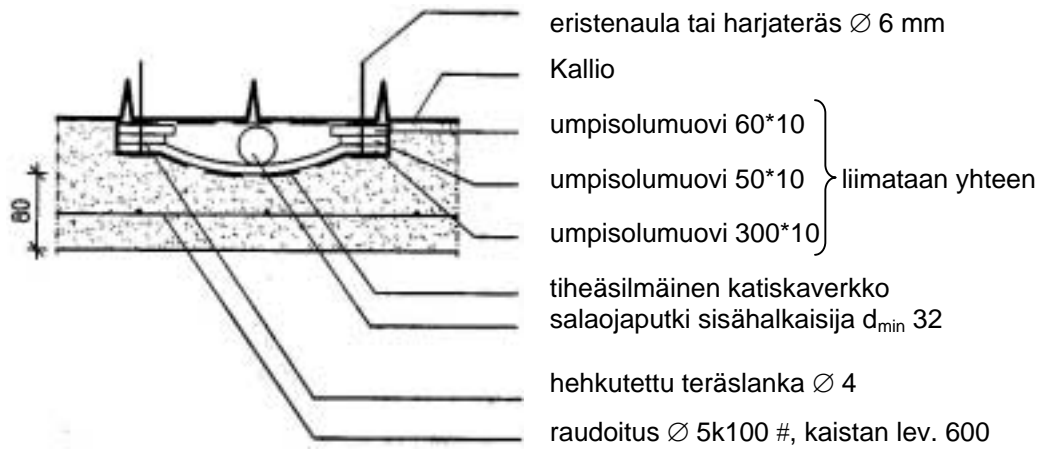
2.3.2.2 Ruiskubetonisalojitus

Kalliopinnan pistevuodot, jotka voivat aiheuttaa vesivuodon heti ruiskutuksen jälkeen vielä kovettumattomaan ruiskubetoniin, poistetaan kallion pintaan ennen ruiskubetonointia asennettavilla ruiskubetonisalojilla.

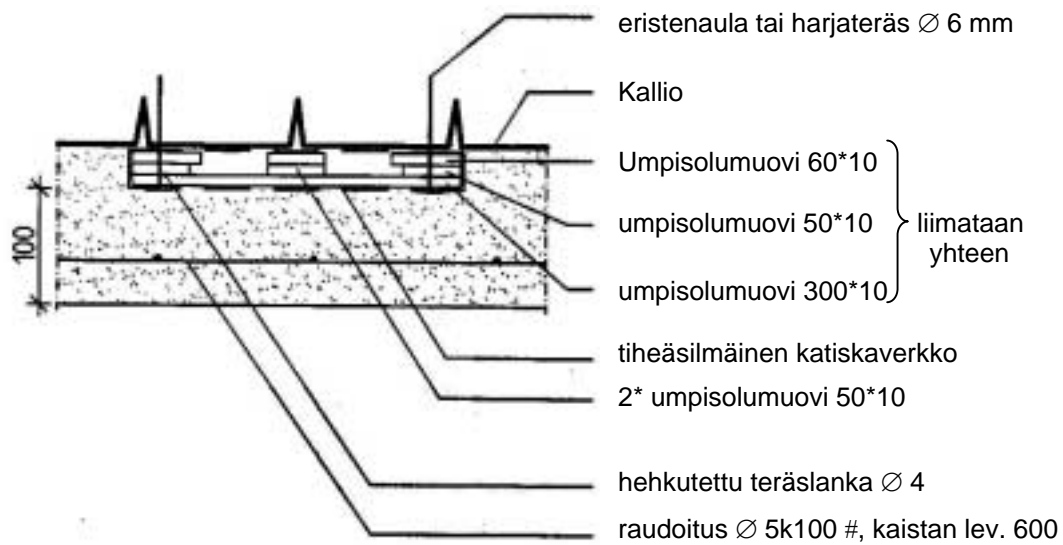
Viime aikoina keskustelua on synnyttänyt juuri salaojan asentamisvaihe. Yleensä louhinnan jälkeen havaittavat vesivuodot kalliopinnassa ovat jonkinlaisessa kalliorakenteen muutoskohdassa; kivilaji, kalliorako, ruhje yms. Kun tällaiseen kallion heikkouskohtaan asennetaan salaoja, jää kohdalta, mihin juuri lujitusta tarvittaisiin, ruiskubetonin ja kallion kontakti puuttumaan kokonaan. Usein salaoja asennetaan vielä vuotamattomaan rako- tai ruhjevyöhykkeeseen, koska ajatellaan, että se voi myöhemmässä vaiheessa alkaa vuotaa. Kyse on lähinnä rakennustöiden kiireellisistä aikatauluista, sillä mikäli aikaa olisi, niin ensin kalliopintaan ruiskutettaisiin tietyn paksuinen (esim. 20–40 mm) ruiskubetonikerros ja tämän jälkeen seurattaisiin vuodon kehittymistä. Muutamien päivien seuranta riittäisi, sillä n. viikon mittainen aikajakso riittää veden kulkeutumiseen 100 mm:n ruiskubetonikerroksen läpi (ks. luku 2.3.3, kaava 1). Mikäli vuotoja esiintyy, niin näihin kohtiin voitaisiin vielä ennen lopullista ruiskutusta asentaa salaojitus. Toistamalla tämä toimenpide niin useasti kunnes vuotoja ei enää esiinny saadaan ruiskubetonilla ja salaojilla täysin vesitiiviitä kalliotiloja. Lisäksi tällä menetelmällä, riippuen kohteesta, on mahdollista päästä huomattaviinkin kustannussäästöihin salaojamateriaalien osalta. Toisaalta lisääntyneet työtunnit ja työmaalle sidottu kalusto muodostavat omat lisäkustannuksensa sekä mahdollisesti lisääntyneet ruiskutuskerrat nostavat myös kustannuksia. Mm. Ruotsissa on jo siirrytty järjestelmällisesti tähän käytäntöön.

Keskeisimmät tällä hetkellä Suomessa ja tutkimuksessa mukana olleissa kohteissa käytettävät salaojarakenteet ovat putkisalaoja (Kuva 5) ja solumuovisalaoja ns. Paajantisalaoja (Kuva 6). Paajanti rakenne on kehitetty Helsingin kaukolämpötunneli -hankkei-

den yhteydessä ja on yleistynyt myös muissa kohteissa. Kohdetutkimuksessa on tarkasteltu molempiin rakenteisiin sekä salaojien sijoittamiseen ja asennukseen liittyviä ongelmia.



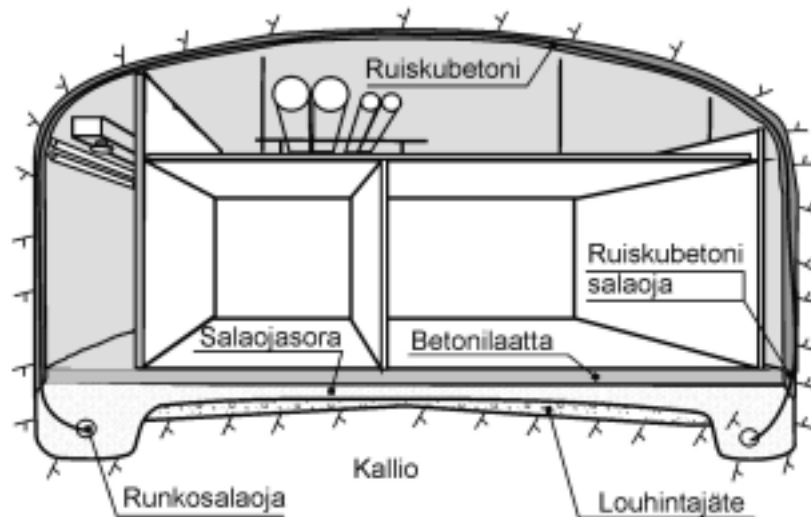
Kuva 5. Poikkileikkaus putkisalaojarakenteesta.



Kuva 6. Poikkileikkaus Paajanti-salaojarakenteesta.

2.3.2.3 Lattiasalaojitus

Lattiasalaojitus vastaanottaa kaikki tilaan purkautuvat vedet, sillä lattiaosuuden lisäksi lattiarakenteeseen johdetaan myös ruiskubetonisalaojien vedet. Suurten jännevälien halleissa lattiarakenteen reunoilla sijaitsevat runkosalaojakaivannot (Kuva 7), joissa vesi johdetaan salaojaputkilla (väh. Ø 100 mm) vesien kokoomakaivoon. Pienen jännevälän halleissa ja tunneleissa runkosalaoja voi olla sijoitettu tunnelin keskelle tai sen toiseen laitaan veden kulkeutuessa salaojaputkiin lattian salaojasorakerroksessa.



Kuva 7. Tyypillinen poikkileikkaus hallin salaojajärjestelmästä, jossa ruiskubetonisala-
ojat on liitetty lattian reunoilla sijaitseviin runkosalaojiin.

2.3.3 Ruiskubetonointi

Ruiskubetonin eräs tarkoitus, lujituksen lisäksi, on toimia myös eräänlaisena vesieristeenä. Betoni ei kuitenkaan ole täydellinen vesieriste, mutta veden kulkeutuminen on hidasta tiiviin betonin läpi. Teoreettisesti tarkastellen betonissa oleva kapillaariverkosto sulkeutuu vesitiiviiksi esimerkiksi vesi-sementtisuhteen 0,50 omaavalla betonilla noin kuukauden iässä. Käytännössä näin ei kuitenkaan tapahdu, vaan vettä kulkeutuu betonin kapillaariverkostossa. Veden kapillaarista kulkeutumista ehjän betonin kapillaariverkostossa voidaan arvioida kaavalla (Syrjänen & Heikkilä 1993):

$$t = mz^2 \quad (1)$$

jossa

t	on	aika s
m	on	vastusluku s/m^2
z	on	veden kulkema matka m

Vastusluvun arvoja ei ole kirjallisuudessa kovin paljon esitetty. Joka tapauksessa vastuslukujen vaihteluvälit ovat suuret. Halkeilemattomalle vesi-sementtisuhteen 0,50 omaavalle betonille voitaneen käyttää suuruusluokkatarkasteluissa vastuslukua 50×10^6 s/m^2 . Sijoittamalla kaavaan betonipeitteen paksuudeksi z esimerkiksi arvo 0,1 m, saadaan veden läpimenoajaksi vajaa viikko.

Ruiskubetonin vesitiiviyyttä parantavat yleensä samat tekijät kuin puristuslujuuttakin; hienoksi jauhettu sementti, silikaatti sekä muut notkistavat ja huokostavat lisäaineet (Syrjänen & Heikkilä 1996). Tämän työn kohdetutkimuksissa ei puristuslujuuden suoraanaisesti todettu vaikuttavan ruiskubetonin vesitiiviyyteen.

Vesieristeenä ruiskubetonia voidaan käyttää periaatteella, että sen läpi kulkeutuvan veden määrä olisi niin pieni, että vesi ehtii haihtua ruiskubetonin pinnalta suoraan sisäilmaan. Kalliotilan ruiskubetonipinnoista haihtuvan kosteusmäärän on havaittu vaihtelevan välillä 1,5–11 g/h/m² (Leino 1996). Tätä haihtumista auttavat kalliotiloissa tehokkaat ilmanvaihtojärjestelmät. Toinen ratkaisu haihtumisen tehostamiseksi on ruiskubetonin pintaan ruiskutettava pinnoitekerros. Sen tarkoituksena on muodostaa betonin pintaan betonia huokoisempi kerros, jossa betonin läpi kulkeutuva vesi leviää laajalle alueelle haihdutuspinnan kasvaessa.

Ruiskubetonoinnissa on siirrytty kuivamenetelmästä pääosin märkämenetelmään. Suomeen märkämenetelmä on tullut vuonna 1988, Norjassa sen käyttö alkoi jo 10 vuotta aikaisemmin ja Ruotsissa vähän myöhemmin kuin Suomessa. Märkämenetelmän työtehokkuus on parempi sen mekanisoinnin vuoksi. Kuivamenetelmässä sementtimassan ja veden sekoittuminen tapahtuu vasta ruiskutus päässä ja ruiskun ohjaus käsin.

Ruiskubetonin vedenpitävyyteen vaikuttavat tekijät ovat (Syrjänen & Heikkilä 1996):

- pohjaveden virtausnopeus kalliossa
- ruiskubetoniin kohdistuva vedenpaine
- ruiskubetonin vedenläpäisevyys
- ruiskubetonikerroksen paksuus
- kalliotilan ilman suhteellinen kosteus ja virtausnopeus.

Näitä kaikkia on pyritty tarkastelemaan kohdetutkimusten yhteydessä ja hakemaan niitä yhdistäviä tekijöitä, jotka ovat johtaneet vesivuotoihin kohteissa.

2.3.4 Sisäkatot

Erilaisilla sisäkattoratkaisuilla saadaan kalliotilan sisäiset tiiveysvaatimukset halutuiksi. Niillä saadaan poistettua tilan käyttöä haittaavat tippuvuodot, joko paikallisesti tai koko tilaa ajatellen. Lisäksi eristettäessä koko tila tai osa siitä saadaan esim. ilmankuivaimen avulla pidettyä sisäilman olosuhteet haluttuina, kuten erilaiset varasto- ja tekniset laitetilat.

Suomessa on toteutettu seuraavanlaisia sisäkattorakenteita:

- liikennetunneleissa Ekeberghvelvet-sovelluksia, esim. Kehä II:n Hiidenkallio ja Pönttövuoren rautatietunneli
- betonielementtirakennukset kalliotilan sisällä, esim. Helsingin Yliopiston kirjavarasto

- paikallisesti toteutetut PVC-pintaiset polyesterikankaat, esim. Vuosaari–Pasila- kaukolämpötunnelissa pumppuasemien suojaus ja tuloilmakuilun eristys jäähaittojen poistamiseksi (vrt. Kuva 8).

PVC-kankaiden paksuutta voidaan vaihdella rasituksesta riippuen 0,8–4,2 mm:iin. Kankaat voivat olla useampikerroksisia ja lasikuituverkolla vahvistettuja. Niiden laskettu elinkaari tunneleissa on 50 vuotta.

Suomessa kangasrakenteen käyttöä on osittain hidastanut epäselvyydet sen käytön sallimisesta kalliotiloissa paloturvallisuutta ajatellen. VTT:llä on hiljattain määritetty erään tunnelikangasmateriaalin syttymisherkkyys sekä palonlevittämis- ja savunmuodostusominaisuudet (VTT Rakennustekniikka 1999). Tulosten mukaan syttymisherkkyysluokka on I ja palonlevittämisluokka II eli käytännössä tämä tarkoittaa, ettei kangas ole herkkä syttymään eikä siten levitä paloa ja on näin hyväksyttävissä kallioiloihin.

Norjassa on useita tunnelikankaita ja niiden kiinnitysrakenteita valmistavia yrityksiä, esim. WG Giertsen. Norjassa kankaiden käyttö on sallittu myös vähäliikenteisissä tunneleissa, joissa ajonopeuksia voidaan rajoittaa. Norjassa on toteutettu myös useita koko kalliotilan eristysratkaisuja (Kuva 9). Näissä tiloissa sisäilman suhteellista kosteutta säädetään ilmankuivaimella. Suomeen toimitettuna ja asennettuna tunnelikankaan kustannukset ovat n. 250 FIM/m² (>1 000 m², hintataso 2000).

Norjalainen Ørsta Stålund AS on kehittänyt vesieristerakenteet, jotka on nimetty niiden ensimmäisen käyttökohteen mukaan, Ekeberg-tunneli Oslossa. Ekeberg sovelluksia on periaatteessa kahta erityyppistä rakennetta, Ekeberghelvet ja ØS-lining (Kuvat 10–14). ØS-lining on rakenteeltaan kevyempi ja taipuisampi ohuemman polyeteenieristevyn ja erilaisen tukirakenteen ansiosta. Lisäksi sen vesitiiviyyttä levyjen liitosten kohdalla on parannettu. ØS-lining soveltuukin parhaiten tunneleiden liitoskohtiin sekä alueille, joissa tunneliprofiili vaihtelee. Rakenne voidaan toteuttaa betonisten seinäelementtien kanssa tai kevyenä rakenteena ilman seinäelementtiä (Kuva 13).

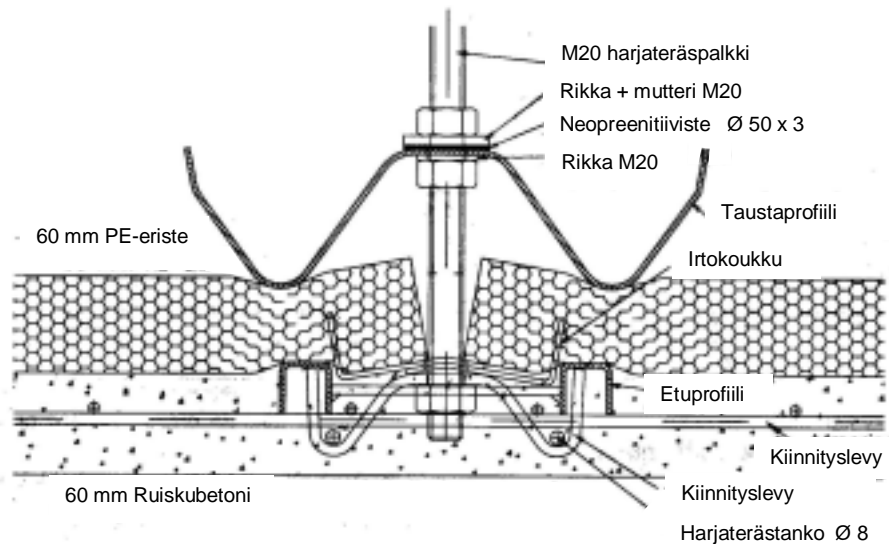
Tunneleiden työn aikainen lujitus tehdään ruiskubetonilla ja lopullisena lujituksena on systemaattinen pultitus tasavälein. Erikseen eristerakennetta varten asennettuihin pultteihin kiinnitetään verhoilurakenteen metalliranka. Metallirankaan asennetaan vesi- ja lämpöeristeenä toimiva polyeteenisolumuovilevy, joka kiristetään pulttien kohdilta puristuslevyillä paikalleen (Kuvat 10, 12). Lämpöeristeen päälle asennetaan raudoitusverkko ja 70 mm:n ruiskubetonikerros lujituksen ja paloturvallisuuden takia. Ruiskubetonikerrokseen tehdään liikuntasaumat n. 50–100 m:n välein estämään betonin kuivumiskutistumasta johtuvaa halkeilua.



Kuva 8. Norjan Bergenissä kaukolämpötunnelissa toteutettu paikallinen kangasverhous-rakenne. Vastaavia rakenteita Vuosaari–Pasila kaukolämpötunnelissa.



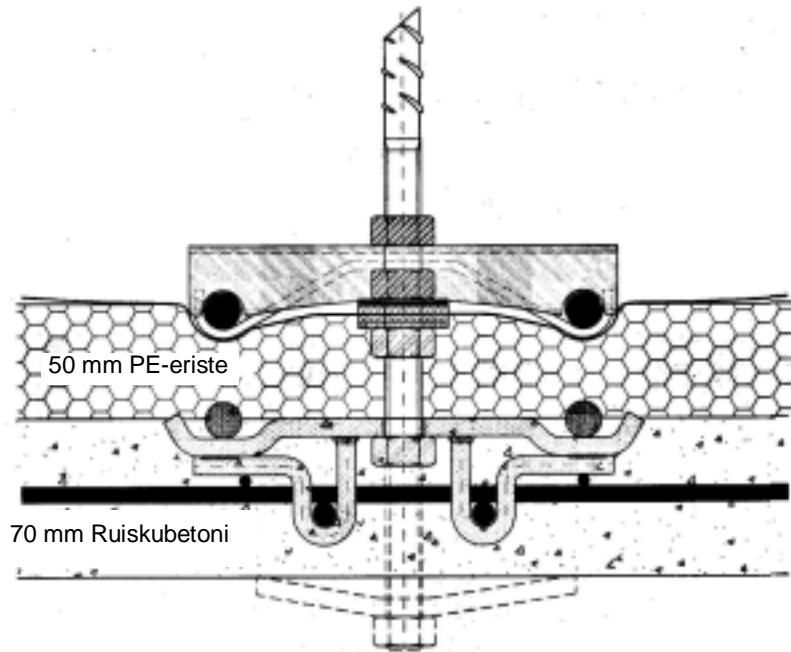
Kuva 9. Bergenissä, Høyehallen urheiluhallissa toteutettu PVC-kangaseriste. Pieni ilmankuivain riittää pitämään suhteellisen ilmankosteuden haluttuna.



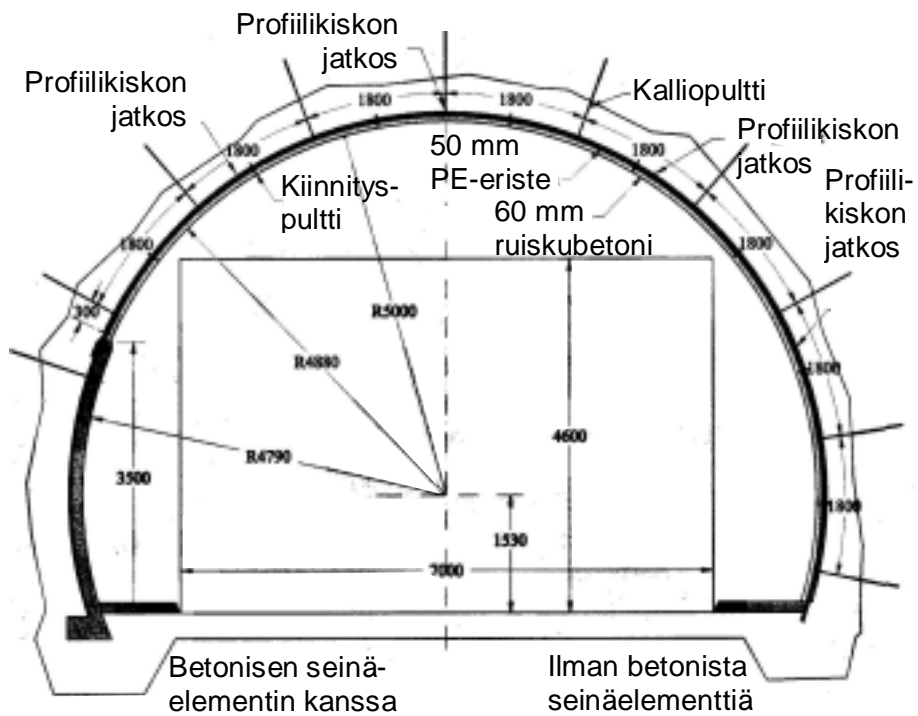
Kuva 10. Ekeberghvelvet rakenteen kiinnitysmekanismi.



Kuva 11. Ekeberghvelvet kiinnitysmekanismi asennettuna .



Kuva 12. ØS-lining rakenteen kiinnitysmekanismi.

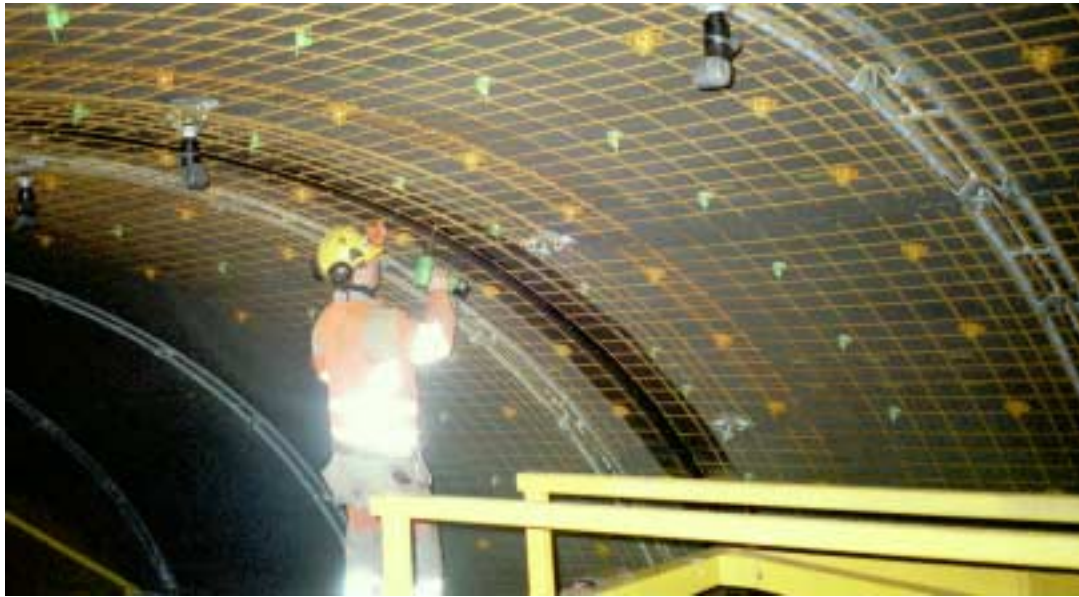


Kuva 13. Poikkileikkaus ØS-lining rakenteesta T9-tunneliprofilissa (standardi poikkileikkaus Norjassa). Ekeberghvelvet-rakenne on vastaava.

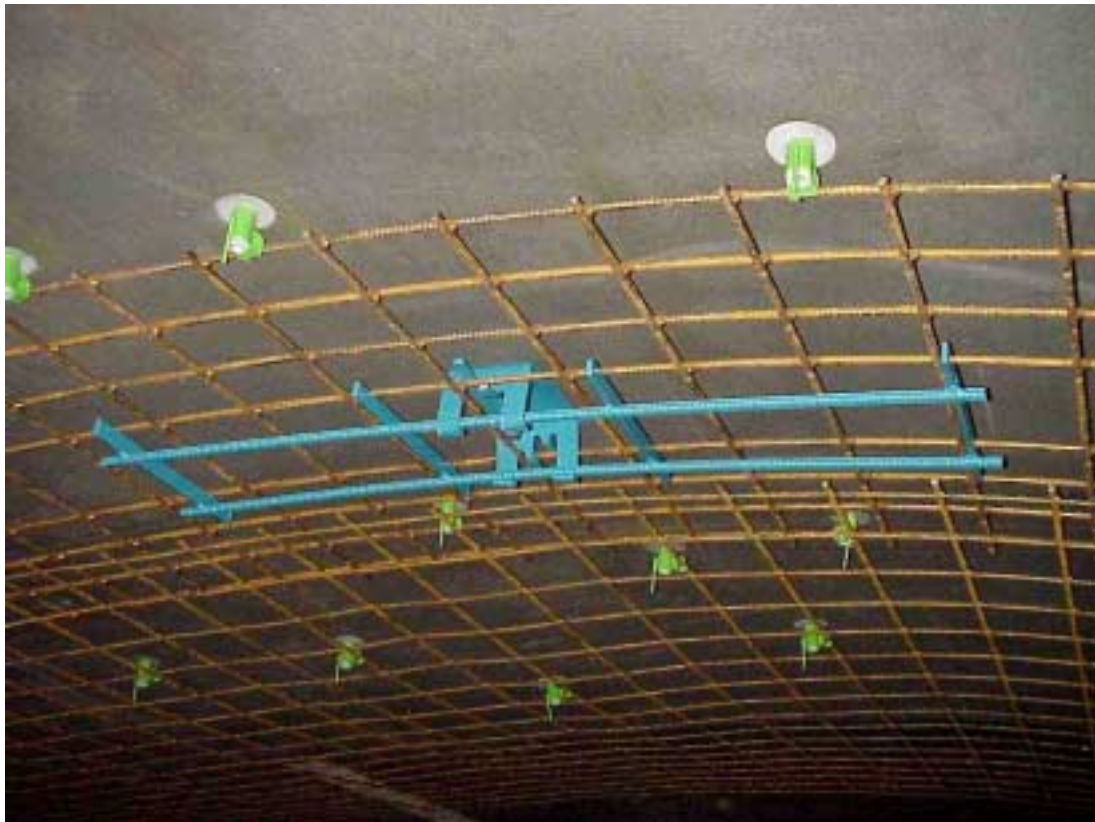
Ekeberg-menetelmän kustannukset ovat asennettuna Norjassa n. 700–800 NOK/m² eli n. 500–600 FIM/m² (hintataso 2000). Suomessa Paraisten kalkkikivilouhoksella tehdyn ØS-lining koerakenteen kustannukset olivat n. 650 FIM/m² (hintataso 1998), mutta eristettävän alueen kasvaessa 1 000–10 000 m²:iin kustannukset laskevat ja ovat n. 400–500 FIM/m² (Heino 1998).

Kosteissa olosuhteissa korroosion estämiseksi verhoilurakenteen teräsrakenteet voidaan pinnoittaa ns. Combi-Coat-menetelmällä (kuumasinkittyä 10 % kalliimpi). Parhaillaan Ørsta Stålindustrilla on kehitteillä systeemi, jossa palonkestävyys ja vesieristys turvataan ruiskubetonin sijasta lasikuitulevyillä. Levyt ovat valmiiksi tunneliprofiiliin mukaan muotoiltuja ja ne asennetaan mahdollisen lämpöeristeen päälle.

Valtatien 1:n Salo–Muurla välille rakennettavan Isonkylän moottoritietunnelin eristerakenteeksi on valittu Ekeberghvelvetin variaatio Kombi-hvelvet (Kuva 15), jonka asentamista on yksinkertaistettu mutta joka on rakenteeltaan muutoin vastaava kuin Ekeberghvelvet. Valintaan päädyttiin rakenteen riittävän routaeristyksen, asentamisen nopeuden, profiilin joustavuuden ja Norjassa saatujen hyvien vesieristyskokemusten perusteella. Rakenne on täysin vedenpitävä. Paloturvallisuus saavutetaan tekemällä rakenteeseen palosulkuja määräväleihin ja suojaamalla rakenne 70 mm:n ruiskubetonilla.



Kuva 14. Ekeberghvelvet-rakenteen asennus käynnissä tunnelityömaalla Norjassa.



Kuva 15. Kombi-hvelvet rakenne asennettuna. PE-mattojen jälkeen asennettavat raudoitusverkot kiinnitetään pultteihin erillisillä ankkureilla. Raudoitus peitetään 70 mm:n ruiskubetonilla. Ørsta Stål, Kombi-hvelvet.

3. Kalliotilojen vesivuototutkimukset

3.1 Kohdetutkimukset

Tutkimushanke aloitettiin keväällä 2000 valitsemalla tutkimuksiin 12 edustaa kalliorakennuskohdetta. Kohdevalinnan kanssa samanaikaisesti selvitettiin millä menetelmillä ja laitteistoilla vuotoja voidaan tutkia. Vuotovesitutkimuksia suoritettiin touko–heinäkuun aikana pääkaupunkiseudulla sijaitsevissa kalliotiloissa ja tunneleissa.

Vuodelle 2001 ajoittuvaan tutkimusohjelmaan sisällytettiin myös 3 rakenteilla olevaa seurantakohtetta. Näissä kohteissa seurattiin erityisesti vuotojen kehitystä rakentamisen edetessä, jolloin syy-seurausilmiöt voidaan havaita tuoreeltaan kohteessa suoritettavissa vuotokartoituksissa ja mahdollisissa vuototutkimuksissa. Rakentamisen yhteydessä tehdyillä havainnoilla pyrittiin saamaan lisätietoja vuotoja aiheuttavista tekijöistä.

3.1.1 Kohteiden valinta

Tutkimushankkeessa mukana olevia suunnittelutoimistoja pyydettiin esittämään tutkimuskohteiksi suunnittelemaansa kalliotiloja ja tunneleita, joista on käytettävissä dokumentoidut tutkimus-, suunnittelu- ja rakentamistiedot. Tutkittavien kalliotilojen valinnassa käytettiin apuna seuraavia suunnittelijoita:

- Helsingin kaupunki, Geotekninen osasto (HKKV/GEO)
- Kalliosuunnittelu Oy (KSOY)
- Maa ja Vesi Oy (MVOY)
- Insinööritoimisto Saanio & Riekkola Oy (SROY)
- Suoraplan Oy
- Insinööritoimisto Virpiö Oy.

Kohteiden valinnassa oli myös merkittävä rooli rakennuttajina toimivilla organisaatioilla, erityisesti Helsingin Pelastuslaitoksella ja Helsingin Energialla.

Seurantakohteiden valinnassa oman panoksensa antoi Tielaitos (nyk. Tiehallinto) rakennuttajana tarjoamalla VT 1:n Isokylän liikennetunnelikohteen tutkimuskäyttöön. Kohteen suunnittelijana toimi Fundus Oy.

Suunnittelutoimistoja pyydettiin esittämään tutkimuskohteiksi eri kalliotiloja, alustavasti ehdotuksia tuli 23 kohteesta. Valinnassa pyrittiin kiinnittämään huomioita seuraaviin seikkoihin;

- kohteista on kattavasti tutkimus- ja suunnittelutietoja
- louhinnan jälkeen suoritettu kallio- ja vuotokartoitus

- rakentamisen (esi-injektointi, louhinta, lujitus, salaojitus, ruiskubetonointi
- jälki-injektointi, yms.) toteutum tiedot on dokumentoitu
- märkä- ja kuivamenetelmällä ruiskubetonoituja kohteita
- kohteissa eri urakoitsijoita (ei saman yrityksen tuotantoa)
- kohteilla erilaisia käyttötarkoituksia/-olosuhteita (kosteus-, lämpötilavaatimukset, jne.) sekä tiiveysvaatimuksia
- kohteessa voidaan tarvittaessa tehdä ainetta rikkovia tutkimuksia (esim. poraus, näytteenotto)
- kohteet sijaitsevat pääkaupunkiseudulla ja lähinnä dokumentoinnin keräämisen kannalta ovat mahdollisimman uusia tiloja.

Näiden kriteerien perusteella VTT valitsi yhdessä suunnittelijoiden kanssa tutkimukseen 12 kohdetta. Valituilla kohteilla on eri käyttötarkoituksia (pysäköinti, yhteiskäyttötunneli, varasto, jäähalli, väestönsuoja). Lisäksi kaikki kohteet ovat suhteellisen uusia, 1990-luvulla valmistuneita. VTT:n oma tutkimushalli valittiin ns. pilottikohteeksi, jossa testattiin tutkimusmenetelmiä ja -välineitä.

3.1.2 Tutkimuskohteet

Seuraavassa on listaus tutkituista kohteista ja samalla esitetty kohteen suunnittelija ja urakoitsija:

- *Kluuvin pysäköintilaitos ja väestönsuoja*; Kalliosuunnittelu Oy (KSOY), Rakennus OY Lemminkäinen (ROYL)
- *Herttoniemenrannan pysäköintilaitos ja väestönsuoja*; KSOY, ROYL
- *Marian sairaalan yhdyskäytävä*; Insinööritoimisto Suora Oy (nyk. KSOY), Polar-Rakennus Oy (nyk. Tekra-Yhtiöt)
- *Hartwall Areenan harjoitusjäähalli*; KSOY, ROYL
- *Mellunmäen pysäköintilaitos ja väestönsuoja*; Maa ja Vesi OY (MVOY), Kalliorakennus Vyyryläinen & Co Oy
- *Pasilan pysäköintilaitos (YLE)*; MVOY, YIT-Rakennus Oy (YIT)
- *Yliopiston kirjavarasto*; Insinööritoimisto Saanio & Riekkola Oy (SROY), ROYL
- *Leppävaaran pysäköintilaitos ja väestönsuoja*; SROY, ROYL
- *Agroksenmäen varasto ja väestönsuoja*; Insinööritoimisto Virpiö Oy, YIT
- *Vuosaari–Pasila kaukolämpötunneli Metsälä UO5*; Helsingin kaupungin geotekninen osasto (HGEO), YIT
- *Vuosaari–Pasila kaukolämpötunneli Vallila UO6*; HGEO, ROYL
- *Salmisaari–Lauttasaari yhteiskäyttötunneli*; HGEO, YIT

Vesitiiviyyden hallinta kohteissa

Tutkimuskohteina on käyttötarkoitukseltaan ja siten myös tiiviysvaatimuksiltaan hyvin erilaisia tiloja. Näissä tiloissa kuitenkin esiintyy vaihtelevasti haitallisia pistemäisiä tippuvuotoja. Kaikissa kohteissa vesiongelmat liittyvät tilan käyttöä haittaaviin tippuvuotoihin. Varsinaisia kalliotilan ympäristöä ja maanpäällistä rakennetta haittaavia esim. pohjavedentason alentumiseen liittyviä ongelmia ei kohteissa havaita.

Kaikissa tutkimuskohteissa on vedeneristys pyritty järjestämään pääosin ruiskubetonilla ja salaojituksella, vain muutamassa kohteessa kallion tiiviyttä on parannettu injektoinnilla. Ruiskubetonikerrosta ei ole välttämättä suunnitelmallisesti pyritty tekemään vesitiiviiksi rakenteeksi, vaan suunniteltu ruiskubetonipaksuus on lähinnä määräytynyt perinteisen lujituskäytännön mukaan. Poikkeuksena ovat kuivamenetelmällä betonoidut tilat (Marian sairaala, Mellunmäki ja Agrokseenmäki), joissa tilan käyttötarkoituksen perusteella on suunnitelmallisesti pyritty kuivempaan lopputulokseen valitsemalla kuivamenetelmä. Lisäksi Yliopiston kirjavarasto on käytännössä vesitiivis, sillä itse varasto on kalliotilan sisään rakennettu betonielementtinen vesikattoinen rakennus. Varastoa ympäröivästä kalliotilasta on myös pyritty ympäristön pohjavesiolosuhteiden vuoksi tekemään tiivis.

Esi-injektointia ei systemaattisesti ole käytetty vesieristeenä tutkimuskohteissa Salmisaari–Lauttasaari yhteiskäyttötunnelia lukuun ottamatta. Esi-injektointia on suoritettu paikallisesti joissakin kohteissa ja lisäksi yleensä kuilujen alueella. Monessa kohteessa on suunnittelussa kuitenkin ollut mukana esi-injektointin tarve ja siten louhintaurakoihinkin sisällytetään kuuluvaksi ennalta arvioitu määrä injektointia. Usein rakennusvaiheessa ei ole kuitenkaan ollut tarvetta injektointiin vesimenekikokeiden perusteella.

Kaikissa kohteissa on jouduttu turvautumaan erilaisiin vesivuotojen jälkikorjausmenetelmiin (jälki-injektointi, haihdutuspellit, lisäsalaojat, ruiskubetonin paikkausmassat jne.). Nämä ovat muodostuneet osaksi tilan vesivuotojen hallintaa, johon ei kuitenkaan pitäisi turvautua vaan pyrkiä jo suunnittelu- ja rakennusvaiheessa pysyviin ja toimiviin vesieristysratkaisuihin.

3.1.3 Tutkimusmenetelmät

Vastaavaa tutkimustyötä vesivuotojen syistä ei ole aikaisemmin Suomessa tehty, joten referenssejä ja kokemuksia tutkimukseen soveliaista menetelmistä ei ollut saatavilla. Tietoa ei ollut myöskään tarjolla kansainvälisesti.

Vesivuotojen tutkimisessa primaarisyyt jaettiin kahteen ryhmään:

- 1) Kalliorakenteeseen ja kallioympäristöön liittyvät syyt
- 2) Kalliotilan lujitus-/vesieristysrakenteeseen liittyvät syyt.

Jakomenettelyä voidaan kuvata siten, että ensimmäiseen ryhmään kuuluvat ne asiat, jotka ovat jo olemassa, kun tilaa ryhdytään suunnittelemaan kallioon. Kalliorakenteesta johtuvat vuotojen syyt on usein helppo kohdentaa kallion rikkonaisuuteen ja siitä johtuvaan kallion vedenläpäisevyyteen. Yleisesti kallioympäristöön liittyvät muut asiat, kuten lähistön rakentaminen tai jo rakennettu ympäristö sekä pohjavesiolosuhteet ovat tekijöitä, jotka jäävät monesti huomioimatta puhuttaessa tilojen vesitiiviyydestä. Toiseen ryhmään voidaan katsoa kuuluvaksi ne vesivuotojen syyt, jotka realisoituvat tilan suunnittelussa ja rakentamisessa. Tällöinkin kalliorakenteen tarkentuminen voi lopulta määrätä, millaisia eristerakenteita tilaan rakennetaan ja millaisia vuotovesien hallintakeinoja käytetään, jotta ympäristöön liittyvät asiat tulevat huomioiduksi rakentamisessa. Ryhmäjako ei siis ole yksiselitteinen, vaan ongelmaa ratkottaessa joudutaan ottamaan huomioon samanaikaisesti molempiin ryhmiin kuuluvia asioita.

Tutkimuksessa kalliorakenteeseen ja kallioympäristöön liittyviä asioita tarkasteltiin kohteen dokumenttien perusteella. Nämä tiedot olivat käytettävissä analysoitaessa kohteen vuotoja. *Kohdetutkimuksissa* havaituissa vuotoilmentymissä pyrittiin selvästi osoittamaan syy, miksi vesi tulee lujitus-/vesieristysrakenteen läpi juuri tutkitusta vuotopisteestä. Tämä johti väistämättä ruiskubetonirakenteen tarkempaan tutkimiseen ja laadun arvioimiseen. Laadun vertailu vuotamattoman ruiskubetonin kanssa ei tämän tutkimuksen osalta ollut mahdollista rakennetutkimusten korkeiden kustannusten takia.

Ruiskubetonin laatua arvioitiin osin VTT Rakennustekniikan betonilaboratoriossa suoritetuilla mikrorakennetutkimuksilla (ks. 3.2.3) sekä kohteessa paikan päällä suoritetuilla mittauksilla ja havainnoilla. Seuraaviin laatutekijöihin kiinnitettiin erityistä huomiota:

- tiheys
- huokoisuus
- puristuslujuus
- eheys
- paksuus
- pintakosteus ja rakennekosteus
- kontakti kallioon.

Näistä tiheys, huokoisuus ja puristuslujuus ovat laboratoriossa näytteistä määritettäviä ominaisuuksia. Muiden ominaisuuksien selville saamiseksi "haravoitiin" läpi menetelmiä ja laitteita, joilla ruiskubetonia on mahdollista tutkia kohteessa in situ.

Tutkimusmenetelmien valinta on pitänyt sisällään tutustumisen alalla käytettyihin mittalaitteisiin ja menetelmiin. Eri mittalaitteita on kokeilu pilottikohteessa, VTT tutkimushallissa. Kokeilujen perusteella valittiin kohdetutkimuksissa käytettävät mittalaitteet ja työkalut.

Kohdetutkimuksissa käytetyt mittausmenetelmät ja mittalaitteistot sekä kohteissa tehdyt tutkimustoimenpiteet on esitetty tutkimusten yhteydessä tehdyssä diplomityössä (Laamanen 2000).

3.2 Tutkimustulokset ja vuotosyiden analysointi

Seuraavassa kappaleessa on käsitelty tutkimuskohteiden kallio- ja lujitusrakenteessa havaittuja vesivuotoihin vaikuttavia tekijöitä. Tekijät voivat liittyä rakenteiden materiaaleihin, niiden laatuun ja toimivuuteen, tai työsuoritukseen. Tällaisia ovat kalliolaatu, injektointi, louhinta, salaojitus, lujitus, pinnoitteet ja jälkikorjaukset.

Kohteissa suoritettavat mittaukset keskittyivät pääosin tilan lujitus- ja vedeneristysrakenteen tutkimiseen. Kaikkien tutkimuspisteiden tuloksia on tulkittu yhdessä, ei kohteittain. Kohdekohtaiset syyjakaumat on esitetty kohdekorteissa (Laamanen 2000).

3.2.1 Rakeneratkaisujen ja työmenetelmien vaikutus vuotoihin kenttähavaintojen perusteella

Kalliorakenteen ominaisuudet ja niiden huomioiminen tilan rakennusvaiheessa vaikuttavat osaltaan saavutettavaan vesitiiveystasoon. Seuraavaksi käsitellään tilan tiiveyteen liittyviä havaintoja ja tulkintoja, joita on tehty tarkastelemalla kohteiden dokumentteja sekä haastatteleamalla ja kuulemalla kommentteja ja mielipiteitä tilojen suunnittelijoilta, urakoitsijoilta, rakennuttajilta ja käyttäjiltä tilojen rakennusvaiheista sekä tekijöistä, jotka ovat vaikuttaneet tilan tiiveyteen.

3.2.1.1 Kalliolaatu

Suomen kalliooperässä esiintyvä ns. vapaa vesi, kallion rakoilu ja rakojen vedenjohtavuuskyky mahdollistavat veden virtauksen kalliossa. Rakojen vedenjohtavuuteen vaikuttavat niiden avoimuus ja täytteisyys. Kalliotilaan vesi virtaa kalliorakoja ja ruhjevöhykkeitä pitkin sekä mahdollisesti huolimattomasti tiivistetyistä tutkimus- ja pultti-rei'istä.

Kohteissa tehdyt pohjatutkimukset ja niiden määrät on kirjattu kohdekortteihin (Laamanen 2000). Taulukossa 1 on esitetty vajaa 10 metrin etäisyydelle vuotopisteestä sijoittuvat kalliotutkimukset, joista joidenkin perusteella voidaan arvioida vuotopisteen ja sen lähiympäristön kallion rakennetta ja osin myös vedenjohtavuutta. Esimerkiksi vesimennekkikokeita on tehty noin kolmanneksessa tutkituista pisteistä. Näistä 80:stä pisteestä 16:ssä (20 %) on tehty esi-injektointia ja 17:ssä vielä jälki-injektointia (vrt. Taulukko 3). 80 % pisteistä vesimennekkikokeiden alueella on kuitenkin jätetty esi-injektoimatta. Esi-

injektioinnin "laukaisee" vesimenekikokeen tuloksen ylittäessä ennalta määrätyn vesimenekkiarvon esim. 0.5–1 Lugeon. Vuotojen laaja esiintyminen vesimenekikokeilla testattujen kallioiden alueilla herättää kuitenkin kysymyksen, ovatko injektioinnin laukaisukriteereinä käytetyt vedenjohtavuusarvot liian korkeita.

Taulukko 1. Tutkittujen vuotopisteiden prosentuaalinen jakauma alle 10 m:n etäisyydellä eri kallioperätutkimuksista.

Tutkimusmenetelmä	Vuotopisteiden osuus, joissa tutkimusmenetelmää on käytetty alle 10 m:n etäisyydellä vuotopisteestä
Kallionäytekairaus	25,4 %
Vesimenekikoe, kairareiässä	32,5 %
Laboratoriokokeet	13,3 %
Seisminen luotaus	17,1 %
Maatutkaus	19,6 %
Reikäutka	0 %
Videokuvaus, kairareiässä	1,3 %

Kairareiän videokuvaus on vakiinnuttanut asemansa melko uutena tekniikkana korvaten useasti kallionäytekairauksen. Vaikeudet kuvauksessa liittyvät kuvan erottelukykyyn vaativissa olosuhteissa sekä kuvan suuntaamiseen. Videokuvauksella on mahdollista saada tarkka kuva kallion rakenteista ja niiden vedenjohtavuudesta. Kalliotilan vesitiiveyden hallintaa ajatellen merkittävimmät kenttäkäyttöön soveltuvat tutkimusmenetelmät ovat vesimenekikokeet ja videokuvaus. Tutkimuskohteista ainoastaan kahdessa oli suoritettu videokuvausta.

Rouhiaisien virtausmittari ilmaisee kairareiässä virtaavan veden nopeuden ja suunnan, mutta sen soveltaminen kalliorakennushankkeissa eräänä tutkimusmenetelmänä on nykyisin poissuljettu sen korkeiden kustannuksien takia. Virtausmittari palvelee tällä hetkellä ydinjätetutkimusta.

Tutkituissa kohteissa louhinnan jälkeinen rakennusgeologinen kartoitus oli tehty liian suurpiirteisesti tätä tutkimusta silmällä pitäen. Vuotopisteiden kohdalta voitiin paikantaa vain suurempia ruhjeita ja joitakin yksittäisiä rakoja. Rakennusgeologisen kartoituksen kalliolaatu ja joissakin kohteissa tehty kallioluokituksen Q-luokitus kirjattiin vuotoalueilla. Luokitukset sinällään eivät kuvaa todellista kalliorakenteen vedenjohtavuutta. Erikseen suoritettu vuotokartoitus määrittää yksittäisen vuotopisteen sijainnin ja laadun.

Kohteen tutkimusalueen vallitsevan kalliolaadun ja vuotopistemäärien välillä ei ollut havaittavissa selvää yhteyttä. Vuosaari–Pasila ja Salmisaari–Lauttasaari kaukolämpö-

tunneleissa tutkimusalueet sijoituivat rikkonaisen kallion osuuksille, joka vaikuttaa osaltaan vuotojen suureen lukumäärään (Taulukko 2).

Taulukko 2. Kohteiden tutkimusalueiden vallitseva kalliolaatu sekä keskimääräiset vuotopistemäärät.

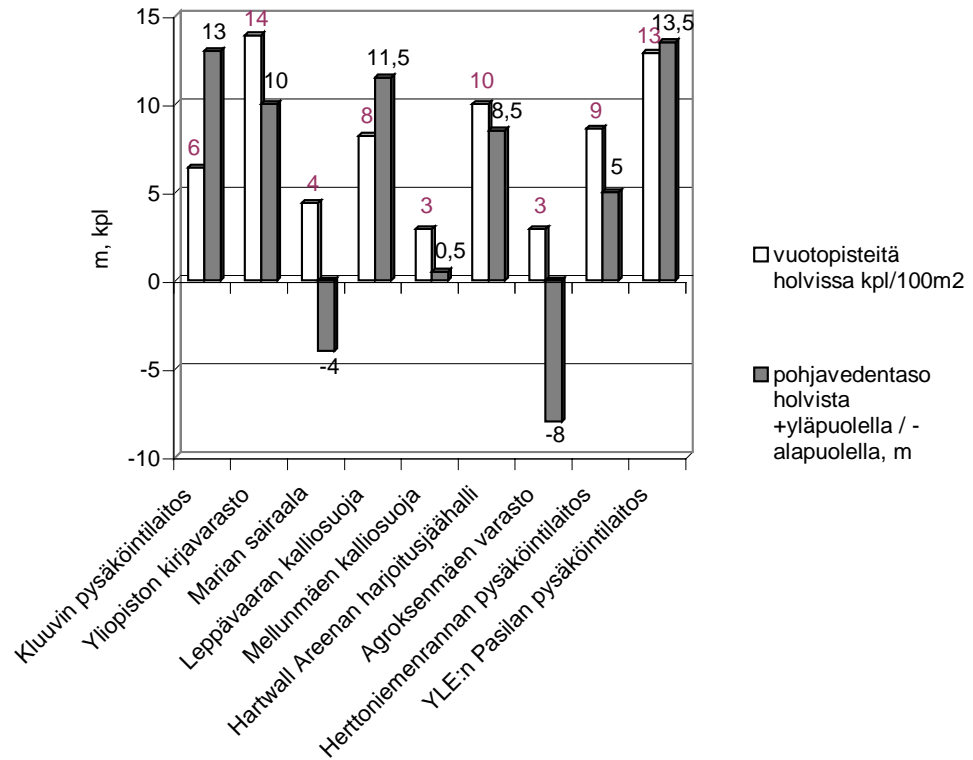
Kohde	Vallitseva kalliolaatu	Vuotopistemäärät, kpl/100 m ² ⁽¹⁾
Kluuvin pysäköintilaitos	Se3	7
Yliopiston kirjavarasto	Se3	14
Marian sairaalan yhdyskäytävä	Se3 / Ma1	6
Leppävaaran pysäköintilaitos	Ma1	6
Mellunmäen pysäköintilaitos	Se 2	2
Hartwall Areenan harj. jäähalli	Ma1-2	12
Salmisaari–Lauttasaari		41 ⁽²⁾
Vuosaari–Pasila UO5	Se3-Ri IV	91 ⁽²⁾
Vuosaari–Pasila UO6	Se3-Ri III	73 ⁽²⁾
Agroksenmäen varasto		2
Herttoniemen pysäköintilaitos	Ma2-3	8
Pasilan pysäköintilaitos, YLE	Se	13

⁽¹⁾ Keskimääräinen vuotopistemäärä teoreettista pinta-alaa kohden. Vuotopisteiksi laskettu jatkuvat, tip-puvat, kosteat ja kuivat (aikaisemmin vuotaneet) kohdat. Luku ei suoraan selitä, miten kostea tila on.

⁽²⁾ Tutkimusalueeksi valittiin tunnelijakso, jossa oli keskimääräistä enemmän vuotoja.

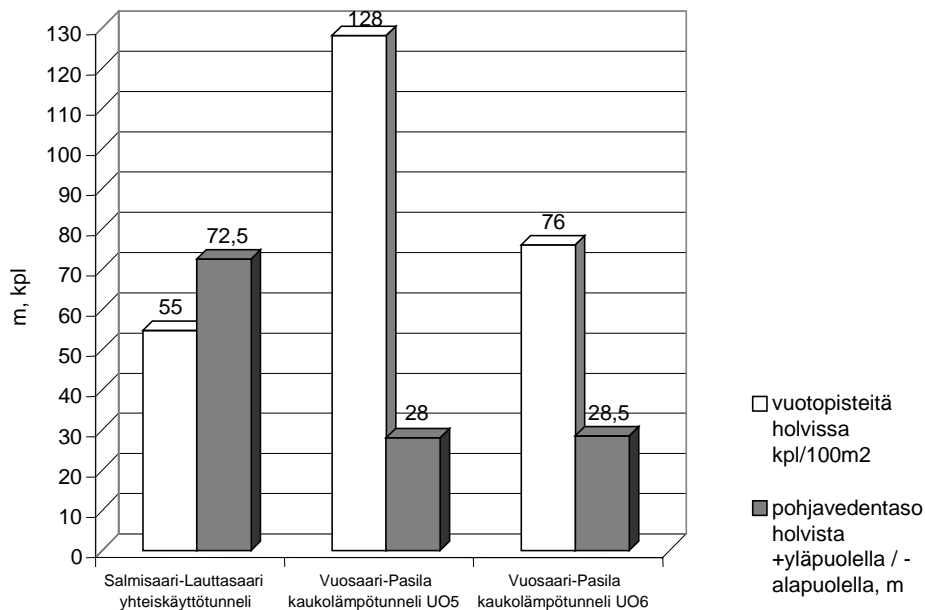
Taulukon 2 tuloksia arvioitaessa on huomioitava tilan ympäristön vallitseva pohjavedentaso (Kuva 16), joka sijaitsee vähävuotoisten Marian, Agroksenmäen ja Mellunmäen kohteiden holvitasossa tai sen alapuolella, ts. tilat sijoittuvat ympäristön topografiasta poikkeaviin kalliomäkiin vuotovesien ollessa pääosin kallioon varastoituvia vajovesiä.

Kuvasta 16 havaitaan vuotovesimäärien noudattelevan karkeasti pohjaveden painetasoa. Mitä suurempi vedenpaine kohdistuu tilan vesieristysrakenteisiin, sitä enemmän esiin-tyy vuotoja. Kuvasta havaitaan selkeästi, kuinka kaikissa kuivaruiskutusmenetelmällä betonoiduissa kohteissa, Marian sairaalassa, Mellunmäen kalliosuojassa ja Agroksenmäen varastossa, pohjaveden paine on alhainen. Sattuma on harmillinen, kun tutkimuk-sissa haluttaisiin arvioida ruiskutusmenetelmän vaikutusta tilan vesitiivyyteen.



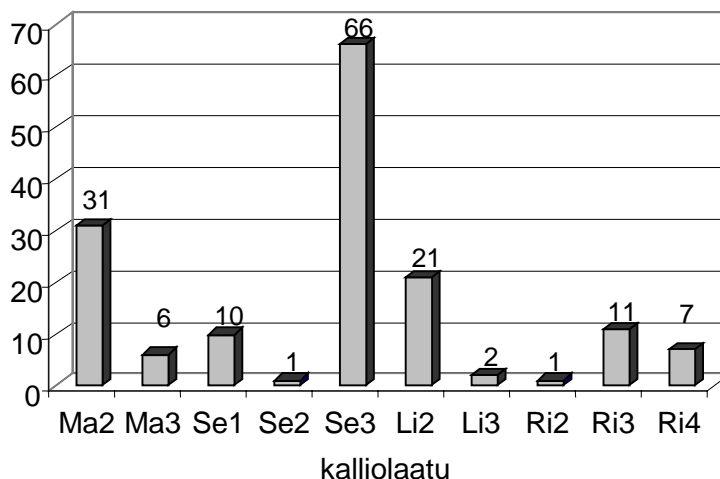
Kuva 16. Pohjavedentaso suhteessa vuotopistemääriin kalliotiloissa.

Kuvan 17 tunnelikohteista Salmisaari erottuu vähävuotoisimpana, vaikka vedenpaine on kohteista suurin. Salmisaarella on suoritettu laajamuotoisesti injektointia, joka on rajoittanut merkittävästi louhinnan aikana havaittuja vuotoja.



Kuva 17. Tunnelikohteiden pohjavedentaso suhteessa vuotopistemääriin.

Kuvassa 18 on esitetty kalliolaatu niissä vuotopisteissä, missä se oli määritetty. Rakoilu oli runsasta 46 %:ssa ja kallio rikkonaista 12 %:ssa pisteitä. Kuvasta voidaan päätellä vuotojen selkeästi keskittyvän rakoilleeseen ja rikkonaiseen kallioon.



Kuva 18. Rakennusgeologisen kartoituksen mukainen kalliolaadun jakauma tutkituissa vuotopisteissä, yhteensä 156 pistettä.

Kohteen alueellinen vuotovesimäärän seuranta kertoisi enemmän kallion paikallisista vedenjohtavuusominaisuuksista ja pohjavesiolosuhteista, kallion laatu ei aina korreloi kallion vedenjohtavuuden ja vuotojen kanssa. Vuotovesimäärien mittaaminen ei kuitenkaan onnistunut kaikissa kohteissa, koska käytön aikana sitä ei seurata tai jos seurataan, se tapahtuu ainoastaan koko tilaa koskien.

3.2.1.2 Injektointi

Kallioinjektointia on suoritettu sekä esi- että jälki-injektointina Kluuvin pysäköintilaitoksessa, Vuosaari–Pasila kaukolämpötunnelin UO6:ssa, Salmisaari –Lauttasaari yhteiskäyttötunnelissa, Marian sairaalan yhdyskäytävässä ja Agrokseenmäen varastossa. Neljässä kohteessa tutkimuspisteitä oli esi-injektoidulla alueella. Muissa kohteissa esi-injektointia ei ole suoritettu itse tilan kohdalla, kuitut ovat tutkimuksen ulkopuolella. Vastaavasti jälki-injektointia on suoritettu kaikissa kohteissa vaihtelevassa mittakaavassa. Tutkittujen vuotopisteiden alueella oli myös suoritettu sekä esi- että jälki-injektointia (Taulukko 3). Injektoinnin onnistumisen arviointi oli vaikeaa vertailutiedon puuttuessa. Tutkituista pisteistä 77,5 %:n läheisyydessä ei ollut injektointia suoritettu, mutta kysymys, olisiko injektoinnilla estetty vuotoja, jää tämän tutkimuksen osalta selvittämättä.

Taulukko 3. Injektoinnit tutkittujen (240 kpl) pisteiden läheisyydessä.

Esi-injektoitu vuotopiste esi-injektointi- viuhkan alueella	Jälki-injektoitu jälki-injektointireiän etäisyys alle 2 m	Yhteensä injektoitu tutki- tuista pisteistä
36 kpl	27 kpl	63 kpl
15,0 %	11,3 %	22,5 %

Injektoinnin vaikutukseen liittyviä tutkimuksia on tehty paljon Ruotsissa (Andersson 1995, 1998, 1999, Brantberger et al. 1998; Dalmalm et al. 2000; Eriksson et al. 1999; Janson 1998; Hässler 1991; Lindblom et al. 1999). Näissä tutkimuksissa on lähes kaikissa tutkittu injektioinnin vaikutuksia vertailemalla erityyppisiä injektointisementtejä. Suomessa merkittävin injektointitutkimus on ollut Kalliorakentaminen 2000 -teknologiahankkeessa tehty kallion injektointimenetelmien kehittämiseen liittynyt hanke (Riekkola et al. 1996).

Tutkittujen kohteiden kokonaisinjektointimenekit ja osittain injektointireikämäärät on kirjattu kohdekortteihin niiltä osin kuin dokumentoitua tietoa oli saatavilla. Esi-injektioinnissa on käytetty sementtipohjaisia injektointiaineita. Perinteistä Rapid-sementtiä on käytetty kaikissa muissa lukuun ottamatta Salmisaari–Lauttasaari yhteiskäyttötunnelia, jossa esi-injektoitiin mikrosegmentillä, tiittävästi ensimmäistä kertaa Suomessa. Karkeampia sementtejä ei saatu injektoitua kalliorakoihin lähinnä korkean hydrostaattisen paineen ja tiiviiden rakojen vuoksi. Injektointilaastissa käytettiin myös notkistinta ja kiihdytintä. Jälki-injektointiin Salmisaareissa on käytetty sementtipohjaista injektointilaastia. Yleisemmin käytetään kemiallisia injektointiaineita jälki-injektointiin. Käytetyt aineet ovat polyuretaaneja, 1-komponenttisiä injektointiaineita, jotka paisuvat reagoiessaan veden kanssa. Ruotsissa kemiallisten injektointiaineiden käyttö kiellettiin, ainakin esi-injektioinnissa, Hallandsåsissa tapahtuneen virheellisen käytön jälkeen (Banverket 1998). Kemiallisten injektointiaineiden käytölle voi saada erillisluvan, jos riskinarvioinnin perusteella aineesta ei aiheudu ympäristölle haittaa.

Tutkimuskohteissa injektointipaineet ovat olleet varsin alhaisia, esi-injektioinnissa 10–30 bar ja jälki-injektioinnissa 10–20 bar. Norjassa ja Ruotsissa käytetään jopa 70–90 baa-ria. Ero johtuu varsinkin Norjassa paksummista kalliokatoista, jolloin paineen mahdollisesti aiheuttama noste katossa ei ole ongelma. Suomessa ei ole injektointikalustoa, jolla päästäisiin vastaaviin paineisiin. Injektointimenekit vuotopisteiden kohdalla ovat vaihdelleet esi-injektioinnissa 1–17 kg/porometri (pm) ja jälki-injektioinnissa jopa 2–60 kg/pm. Korkeiden jälki-injektointimenekkien kohdalla olisi hyvällä esi-injektioinnilla päästy parempaan lopputulokseen.

3.2.1.3 Louhinta

Louhinnan vaikutus vesivuotoihin ilmenee lähinnä kalliotilan *holvin profiilin* muodossa. Louhintajäljestä johtuvat vesivuodot on kirjattu kohdetutkimuksissa työnlaatuun liittyviksi (ks. luku 3.2.2.2). Holviosuudelle jää usein ns. kalliopiikkejä ja mahoja, joihin kalliosta tuleva vesi kerääntyy ja tulee ajan myötä ruiskubetonikerroksen läpi. Näihin voidaan vaikuttaa vielä louhinnan jälkeen ns. kovien poistolla ja rusnauksella. Räjähdyksessä tapahtuneisiin ns. ryöstöihin eli ylimääräisen kiven liikalouhintaan ei jälkikäteen yleensä voida vaikuttaa. Ryöstö voi jättää myös ympärilleen kalliopiikkejä ja mahoja. Ryöstön lisäksi porauksessa tulevat ns. pistot ovat porausteknisiä ongelmia, jotka voidaan minimoida ennalta, mutta jälkeensä niiden korjaaminen ei onnistu. Louhintakatkosten pituudet ovat kasvaneet jopa 6 m:iin. Tällöin piston aiheuttama poikkeama teoreettisesta profiilista kasvaa. Kaiken kaikkiaan suunnitellun, teoreettisen louhintaprofiilin saavuttaminen käytännössä on vaikeaa nykyisellä poraus- ja panostusmenetelmällä, mikä riippuu osaltaan myös kallion laadusta.

Toinen vaikutus louhinnalla, etenkin panostuksella, on tilaa ympäröivän *kallion rikkoaisuuteen*. Räjähdyksellä voi muodostaa uusia halkeamia kallioon (lohkaroituminen) ja avata olemassa olevia rakoja, jotka saattavat yhdistyä vettä johtaviin rakenteisiin. Räjähdyksen vaikutusetaisyys kallioraoissa vaihtelee olosuhteista riippuen. Yleisesti räjähdyksellä voi avata ja sulkea rakoja lähietäisyydellä. Raot saattavat avautua myöhemminkin jännitystilasta tasaantuessa louhitun kalliotilan ympärillä ja aiheuttaa vuotoja tilaan. Näiden ennakoiminen ja huomioon ottaminen ennen vedeneristysrakenteen asentamista on käytännössä mahdotonta.

Kohdetutkimuksissa ominaispanostuksen tietoja ei ollut käytettävissä. 240:n vuotopisteen kohdalla louhitun katkon ominaispanostustiedot antaisivat valmiuden tarkastella tilastollisesti räjähdyksen vaikutusta vuotoihin. Tämä on toteutettavissa myöhemminkin.

Tutkimuskohteissa louhintaa on tehty louhintaprofiilin koosta riippuen eri menetelmillä. Pienet profiilit (20–30 m²), lähinnä tunnelikohteissa, on tehty päätylouhintana. Laajemmat profiilit on louhittu pilottitunnelia avartamalla ja korkeammat tilat (yli 10 m) katto-perä-pengerlouhintana. Pengerlouhinnassa poraus on yleensä vaakaa, joissakin kohdissa pystyyn penkereen päältä. Näissä kohteissa holvin lujitus ja ruiskubetonointityö on tehty penkereen päältä ennen sen louhintaa. Penkereen louhinta on osaltaan voinut vaikuttaa ruiskubetonin eheyteen holviosuuksilla. Kaikissa kohteissa on käytetty ns. tarkkuuslouhintaa. Reunareiat on räjäytetty erikseen kevyemmällä panostuksella.

3.2.1.4 Salaojitus

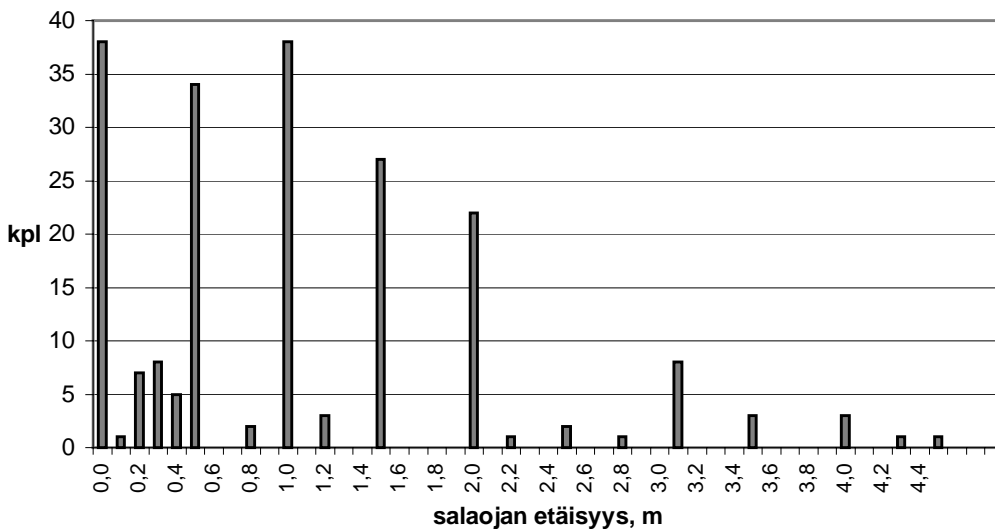
Ruiskubetonikerroksen ja kallion väliin asennettavien salaojiin kohdistuvat vesivuodot liittyvät niiden sijoitukseen, asennukseen ja ruiskubetonointiin salaojan kohdalla. Koh-

detutkimuksissa havaitut salaojaan liittyvät vesivuotojen syyt, tukkeuma ja toimimattomuus kirjattiin työnlaatuun omana vuodon syynä (ks. luku 3.2.2.2). Ruiskubetonin halkeamia salaojien kohdalla on käsitelty kappaleessa 3.2.2.1.

Louhintaurakan työselityksessä on määrätty tietyllä tiheydellä salaojia, kohteesta riippuen yleensä 3–5 m välein. Salaojien paikan määrittäminen louhinnan jälkeen tapahtuu yleensä kohteen suunnittelijan toimesta. Urakoitsija asentaa salaojat suunnittelijan määräämiin paikkoihin lukuun ottamatta hankkeita, joissa urakoitsijalla on vastuu vesitiiveydestä. Näissä kohteissa urakoitsija voi tarpeen vaatiessa omatoimisesti asentaa lisäsalaojia.

Kohdetutkimuksissa mitattiin lähimmän salaojan etäisyys tutkittuun vuotopisteeseen (Kuva 19). Asennettujen salaojien dokumentointi tarkekuvina on tutkimuskohteissa tehty usein suurpiirteisesti, käsivaralla. Salaojien paikantaminen kohdetutkimuksissa oli paikoin hankalaa. Tarkekuvien käytön merkitys kasvaa jatkossa, kun kallio-tiloissa alkaa ilmetä saneeraustarpeita, jolloin esim. salaojien uusimisen vuoksi tarvitaan tarkkaa tietoa niiden sijainnista. Puhumattakaan ruiskubetoniin suoritettavista porauksista, joita ei haluta tehdä salaojia lävistäen.

Karkean mittaustarkkuuden vuoksi kuvassa näkyy piikkikohdat 0:n, 0,5:n, 1:n, 1,5:n ja 2:n m:n kohdilla. Etäisyyden 0–0,2 m salaojan molemmin puolin voidaan katsoa osuvan salaojan kohdalle. Diagrammi kuvaa käytännössä vesien keskittymistä salaojien ympärille, ts. 77 % vuotopisteistä sijoittuu alle kahden metrin etäisyydelle salaojasta.



Kuva 19. Jakauma vuotopisteen ja lähimmän salaojan etäisyydestä.

Salaojien paikan määrittämisessä on huomioitava vuodenaikat vajoavesimäärien vaihtelun vuoksi. Yleensä kesäkuukaudet ovat kuivempia vähäisempien sateiden vuoksi ja talviaika vastaavasti roudan vuoksi. Kohdetutkimuksissa salaojituksen asennuksen ja ruisku-

betonoinnin ajankohta huomioitiin. Tämä ei kuitenkaan antanut lisäinformaatiota siitä, että kesällä tai talvella olisi asennettu suhteessa vähemmän salaojia ja siten vuotoja olisi enemmän. Paikan määrittämisessä on huomioitava myös kalliopinnan kosteus. Pinnan tulisi olla pesty, jotta kalliolaadun tulkinta olisi helpompaa. Pesty kalliopinta saattaa kuitenkin pysyä pitkiä aikoja kosteana, jolloin vuotojen paikannus vaikeutuu. Tämä sama asia on huomioitava myös rakennusgeologisen kartoituksen aikana. Rakennusurakan aikataulullisista syistä tähän on usein vaikea vaikuttaa.

Nykyisellä käytännöllä salaojia määrätään asennettaviksi varmuuden vuoksi kuiviinkin rakovyöhykkeisiin ja kivilajien muutoskohtiin. Näistä lujitusta tarvitsevista kohdista jää tällöin pois kalliokontaktin muodostaman ruiskubetonin lujitusvaikutus ja siten kallion mahdollinen liikunta voi halkaista ruiskubetonin salaojan kohdalta. Puolustushallinnon kohteissa on salaojien kohdalle syntyviä halkeamia estämään asennettu kaksinkertainen verkko.

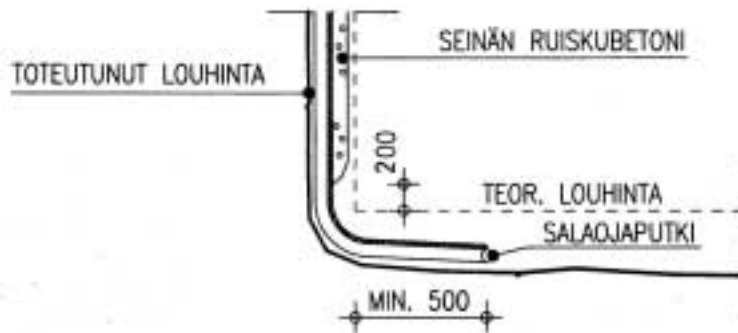
Parempaan lopputulokseen vuotojen kannalta päästäisiin paikantamalla salaojien kohdat vasta ensimmäisen ruiskutuskerran jälkeen. Todelliset vuotokohdat olisivat havaittavissa, samoin asennus olisi teknisesti helpompaa tasaiseen pohjaan. Määrällisesti salaojia tulisi luultavasti vähemmän, kun vältetään 'turhat' asennukset ja siten saavutettaisiin myös kustannussäästöjä. Toisaalta tämä vaatii yhden ruiskubetonikerroksen lisää, mutta ruiskutustekniikan kehityksen ja nykyisin alhaisen materiaalikustannuksen vuoksi ruiskubetonoinnin prosentuaalinen osuus louhintaurakan kustannuksista on alhainen.

Salaojien asennuksen ongelmat ilmenevät varsinkin holviosuuksilla. Salaojaan on saatava vietto, jotta vesi virtaa patoutumatta. Tämä ongelma liittyy läheisesti louhintajälkeen ja siihen on vaikea vaikuttaa enää salaojan asennusvaiheessa. Kalliopiikkeihin ja holvin tasaisille osuuksille on käytännössä mahdoton asentaa toimivaa salaojaa. Ruiskubetonitöillä tosin voidaan parantaa tilannetta tasoittamalla salaojan asennuspohja. Ruiskutusmäärät saattavat tällä menetelmällä nousta suuriksi. Eräänlaisena ratkaisuna on käytetty kalliopiikin alareunasta johdettua putkea lähellä olevaan salaojaan, tai kalliopiikin lävistystä putkella ja sen yhdistämistä normaaliin salaojaan. Ongelmana on putken tukkeuma ajan myötä, puhumattakaan ratkaisujen epäesteettisyydestä. Suurempien ryöstökohtien ohitukseen on käytetty ylimääräistä järeää raudoitusta tukemaan ja suoristamaan salaojalinjoja. Nämä ovat halvempia ratkaisuja kuin täyttöruiskutukset tai 'kovien' pois räjäyttäminen, mutta eivät pidemmän päälle varmasti ole toimivia ratkaisuja.

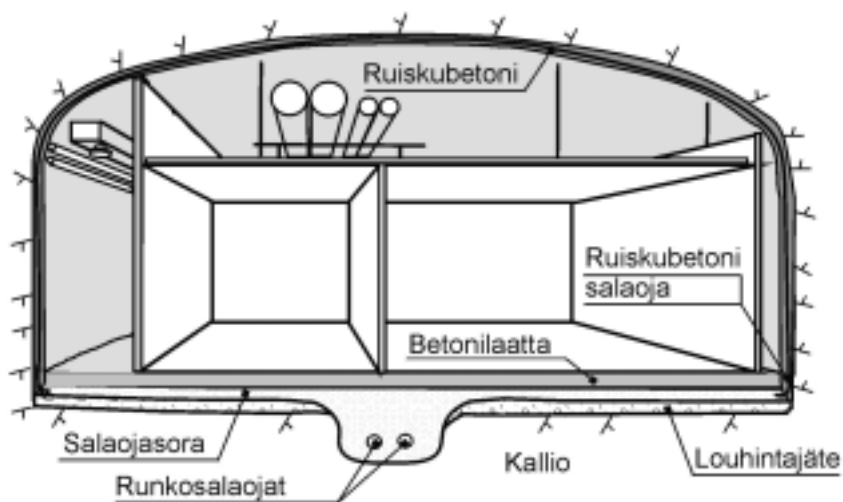
Toinen ongelma asennuksessa ovat salaojien alapäätsien seinän ja lattian rajassa. Tutkimuskohteista tunneleissa alapäätsien on jätetty lattiasta n. 0,5 m:n korkeudelta auki, jolloin niiden toiminta ja toimivuuden tarkkailu on varmempaa. Kalliotiloissa tämä ei ole ehkä esteettisyyssyistä mahdollista, joten salaojien päät vedetään n. 0,5 m lattian alle salaojakerrokseen (Kuvat 20 ja 21). Vesi imeytyy lattian louhe- ja sorakerrokseen kulkeutuen tilan keskellä tai reunoissa oleviin lattiasalaojaputkiin ja edelleen kokoomakairoihin. Lattian alla oleva louhe on louhinnassa pohjalle jätetty tasoituskerros, jossa on hienoai-

nesta mukana ja jonka vedenjohtavuus voi olla heikko. Tämä voi tukkia ja patouttaa lattiasalaojia ja vaikuttaa haitallisesti myös ruiskubetonisalaojien toimintaan. Toinen ongelma on salaojien päiden rikkoontuminen ja tukkeutuminen lattiaa tehdessä. Lattian rakennusurakka on yleensä eri urakkaa kuin louhinta, jolloin salaojien toimintaan ei osata kiinnittää huomiota. Ratkaisu ruiskubetonisalaojien alapäiden ongelmaan voisi olla niiden vetäminen suoraan kalliotilan reunoilla oleviin kokoomaputkiin. Näin ratkaistaisiin myös niiden tarkistettavuus ja huollettavuus salaojakaivojen kautta. Tämä tosin vaatii erillisten kanaalien louhintaa tilan reunoille.

Vaikka lattia usein salaojitetaan tai rakennetaan salaojasorakerros, pitäisi lattiarakenteen ylin maakerros rakentaa tiiviistä hienoaineksesta tai käyttää suodatinkangasta, jotta betonilattian valussa sementti ei erottuisi runkoaineesta ja menisi salaojakerrokseen, vaan ainoastaan vapaa vesi.



Kuva 20. Ruiskubetonisalaojan liittymä lattiarakenteeseen.



Kuva 21. Tyypillinen poikkileikkaus tunnelin lattian salaojakerrosrakenteesta, jossa vedet johdetaan salaojasorassa lattian keskellä sijaitseviin runkosalaojiin.

Ruiskubetonointi salaojien kohdalla voi irrottaa salaojan kalliopinnasta, ja väliin menevä betoni tukkii salaojan. Tutkimuskohteissa on joissakin rakennusselityksissä määrätty ensimmäisen betonikerroksen ruiskutus tehtäväksi käsinruiskutuksena. Tällöin päästään ohjaamaan ruiskua tarkemmin ja varovaisemmin. Käytännössä tämä tarkoittaa ruiskutuksen suorittamista kuivamenetelmällä. Kohdetutkimuksissa tämän toteuttamisesta ei ollut dokumentointia käytettävissä.

3.2.1.5 Lujitus

Tutkimuskohteissa kallion lujittamiseen on käytetty *pulttusta, verkotusta sekä ruiskubetonointia*. Pultituksesta johtuvat vesivuodot kirjattiin heikoksi työnlaaduksi (ks. luku 3.2.2.2). Ruiskubetonista ja sen ominaisuuksista johtuvia vesivuotoja tutkimuspisteissä on käsitelty syvällisemmin tutkimuksiin liittyvässä diplomityössä (Laamanen 2000). Tässä käsitellään yleisesti lujitukseen liittyviä vuototekijöitä.

Tutkimuskohteiden yleisin pulttityyppi on ollut juotettu harjateräspultti. Juotosmassana on yleisesti käytetty jäykkää vesi-sementtilaastia, johon on voitu lisätä hiekkaa. Pulttireiät juotetaan normaalisti, mikäli ne eivät vuoda. Vuodon esiintyessä reiän ympäristö voidaan ensin injektoida ja tämän jälkeen juotetaan pultti. Yleensä vuotava reikä kuivataan poraamalla apureikä viereen, johon vuotovesi ohjautuu. Apureikä injektoidaan myöhemmin. Kohdetutkimuksissa kirjattiin 4 kpl vuotopisteitä pulttien kohdalla, joissa pultin pää oli jäänyt esille ruiskubetonoinnin jälkeen. Oletettavasti pulttireikä on näissä jäänyt vajaaksi juotosmassasta ja siten vesi pääsee purkautumaan pulttia pitkin. Toisaalta vuotovesi voi myös kerääntyä ympäriltä ruiskubetonipinnasta ulos tulevaan pulttiin, jonka suojaruiskubetonikerros on jäänyt vajaaksi. Yleisesti ruiskubetonikerroksen alle jääneet pultit eivät olleet havaittavissa, joten muita pulttien kohdalle osuvia vesivuotoja ei pystytty todentamaan.

Lujituksessa käytettävän verkotuksen on pääosin korvannut ruiskubetonissa käytettävät kuidut. Verkotusta käytetään edelleen lähinnä salaojien kohdalla, kallion heikkousvyöhykkeissä ja ruiskubetonoinnin kuivamenetelmässä, jossa ei käytetä kuituja. Kohdetutkimuksissa havaittiin kaksi vuotopistettä, joissa verkko oli jäänyt lähelle ruiskubetonipintaa. Verkon alla ruiskubetonikerroksen paksuus oli kuitenkin riittävä, joten oletettavasti vesi tulee kauempaa verkon rautoja pitkin. Vastaavat vuodot ovat vältettävissä asentamalla verkko kallion pintaan kiinni pitävästi ja ruiskuttamalla päälle riittävä suojaruiskubetonikerros.

Kalliopinnan pesemisestä ja kastelemisesta ennen ruiskubetonointia ei ollut saatavilla dokumentoitua tietoa. Ruiskutuksen tulee tapahtua kosteaan ja puhtaaseen pintaan, jolloin betonin tarttuvuus paranee. Varhaisvaiheen kuivuminen ja kutistuminen hidastuvat jälkihoidon avulla. Tutkimuksissa joissakin ruiskubetoninäytteissä oli havaittavissa epä-

puhtauksia kallion ja betonin rajapinnassa, mutta kyseisissä kohdissa tällä ei todettu olevan vaikutusta betonin tartuntalujuuteen.

Ruiskubetonissa pääosa vuodoista johtuu betonin sisäisistä ominaisuuksista. Suurena osuutena on myöskin heikkoon työnlaatuun kirjattu epätasainen ruiskubetonointi. Tällä tarkoitetaan lähinnä työsuorituksessa tapahtuneita virheitä ja puutteita. Tutkimuskoh-teista kolme oli ruiskutettu käsin ja yhdeksän koneellisesti. Koneellinen ruiskutus tapah-tuu yleensä kopista ruiskutuspuomia ohjaten, jolloin ollaan aika etäällä ruiskutettavasta kohdasta. Lisäksi puomi on jäykkä taipumaan. Koneellisesti ruiskutetuissa kohteissa on-kin kahdessa pyritty ruiskutus tekemään kahdesta suunnasta eli edetty ensin yhdestä suunnasta ja tilan toisessa päässä käännetty takaisinpäin. Tätä menetelmää rajoittaa ruiskubetonointikaluston tekniikka eli kun ruiskutuspuomi on etupäässä konetta niin uuden betonin täyttö tapahtuu koneen takapäässä. Tällä yhdistelmällä voi olla pituutta n. 20 metriä. Edestakaisella ruiskutussuunnalla saadaan tasaisempaa ruiskubetonipintaa. Prosentuaalisesti eniten epätasaisesta ruiskutuksesta johtuvia vuotojen syitä oli juuri tunnelikohteissa, 60 %:ssa 30 tutkitusta vuotopisteestä. Tunneleissa ruiskutus tapahtuu yhdestä suunnasta ja ahtaassa tilassa.

Tutkimuspisteissä mitattiin ruiskubetoninpaksuus poraamalla reikä betonikerroksen lä- vitse, \varnothing 12 mm. Salmisaari–Lauttasaari yhteiskäyttötunnelissa tähän ei saatu lupaa suu- ren hydrostaattisen paineen vuoksi (~80 m merenpinnan alapuolella). Lisäksi muissakin kohteissa mittausta ei paikoin suoritettu jonkin yksittäisen syyn vuoksi, kuten paikka- kohta ja salaoja. Tutkimuskohteiden rakennuslutyösuorituksissa on määrätty ruiskubetonointi- työn jälkeen suoritettavaksi paksuuden tarkistusmittaukset rakennuttajan osoittamista kohdista n. 50 m²:n ruutuun. Mikäli paksuus ei täytä vaadittua arvoa, tehdään viereen uusintamittaus. Riippuen vajaiden pisteiden kokonaismäärästä ja paksuuden alituksen määrästä voi rakennuttaja määrätä lisäruiskutuksen. Ruiskutuksessa pyritään keskimää- rin saavuttamaan vaadittu paksuus, eli paikoin betonia tulee paksummalti (kalliopiikkien juuret, ryöstökohdat) ja paikoin ohuemmalti (kalliopiikit).

Tutkituissa 240 vuodossa ruiskubetonin paksuus mitattiin 74 %:ssa pisteessä, n. 60 %:ssa täytyy vaadittu betonin paksuusarvo. Massamenekkiä ajatellen täytyy vaadittu pak- suus keskimäärin, mutta keskimääräistäminen ei tule kyseeseen lujituksessa, jos sen mitoitus on sidottu määrättyyn ruiskubetonipaksuuteen. Tutkittaessa erikseen seinä- ja holviosuuksilla olleita pisteitä on niiden välillä havaittavissa selvä ero. (Kuvat 22 ja 23). Holviosuudella alle puolet pisteistä täyttää vaaditun paksuuden. Holvi on huomattavasti vaikeampi ruiskuttaa kuin seinäpinnat, jolloin vajauttakin jää vastaavasti helpommin.

Tunnelikohteissa vaadittu 20 mm kerrospaksuutta on käytännössä vaikea toteuttaa. Ruiskutuksena tämä tarkoittaa pinnan “kevyttä pyyhkäisyä”, urakoitsijat suosittavat paksuuden kasvattamista 40 mm, jolloin kerros voidaan ruiskuttaa huolella kerralla ja mahdolliset “möksyt”, pudonneet massat, korjataan myöhemmin.



Kuva 22. Ruiskubetonin paksuus seinä-
osuuksilla mitatuissa pisteissä, yhteensä
68 kpl.



Kuva 23. Ruiskubetonin paksuus holvi-
osuuksilla mitatuissa pisteissä, yhteensä
110 kpl.

Ruiskubetonin jälkihoidolla on suuri merkitys vesivuotojen syihin. Sillä pyritään estämään betonin liiallinen kuivumiskutistuma ja halkeamien muodostuminen. Kohdetutkimuksissa ei ollut käytettävissä dokumentoitua tietoa suoritetuista betonin jälkihoitotoimenpiteistä, sillä yleensä näitä ei kirjata ylös, vaan työsuoritus tapahtuu työselityksessä annettujen ohjeiden mukaan. Lisäämällä työselitykseen tarkat ohjeistukset toimenpiteistä helpotetaan ja selkeytetään työn suoritusta ja siten parannetaan myös lopputulosta.

3.2.1.6 Pinnoitteet

Ruiskubetonin pintaan levitettäviä tai ruiskutettavia pinnoitteita käytetään ensisijaisesti maalina antamaan valoisuutta ja viihtyvyyttä kalliotilaan. Saatavilla on useampia eri värejä. Toissijaisesti maalipinnoitetta käytetään vesieristeenä estämään ja hidastamaan tippuvuotojen syntymistä kalliotilaan. Pinnoite muodostaa joko eristävän pinnoitteen tai huokoisen kerroksen betonin pinnalle. Eristävän pinnoitteen periaate on estää kosteuden siirtyminen ruiskubetonin läpi huoneilmaan ja ohjata kosteus ruiskubetonisalojiin. Eristävän pinnoitteen ongelma on sama kuin kaikilla ruiskubetonin pinnoitteilla: karkea ruiskubetonipinta on vaikea pinnoittaa tasaisesti ja aukottomasti. Puutteellinen pinnoitekerros mahdollistaa vuodot siinä missä usein havaitut pinnoitteen halkeamatkin. Huokoisen pinnoitteen toiminta taas perustuu kosteuden läpäisyyn ja pinnoitteen kykyyn vastaanottaa betonin läpi kulkeutuvaa vettä. Vesi leviää pinnoitteessa laajalle alueelle, jolloin haihdutuspinna kasvaa ja tippuvuodon riski pienenee. Pinnoitteen eristävä vaikutus riippuu vuodon määrästä ja laadusta. Suuret vesimäärät tulevat vuotoina läpi, vähäiset vesimäärät ilmenevät vain ruiskubetonin kostumisena. Maalipinnoitteille on yhteistä, että ne voidaan levittää kosteaan pintaan, mutta vettä vuotavassa kohdassa niiden tarttuvuus on huono.

Tutkimuskohteista kuudessa oli valkoinen ja yhdessä holviosuudeltaan harmaa eristävä Aquella-maalipinnoite. Yhteen kohteeseen tullaan myöhemmin ruiskuttamaan huokoisen maalipinnoite. Harmaassa pinnassa vesivuodot ja etenkin kalkkisaostumat olivat

hyvin havaittavissa. Valkoisissa pinnoissa taas erottui vuotoveden hienoaainesosien (rauta, humus) aiheuttamat värin muutokset. Kohdetutkimuksissa havaittiin vajavai-suuksia pinnoitekerroksissa, vaikka ruiskutus on yleensä tapahtunut 2–3 kerroksena. Onnistunut eri kerroksina suoritettu pinnoittaminen voidaan varmistaa käyttämällä ker-roksissa eri värisiä maaleja. Tällöin havaitaan helposti, peittääkö uusi kerros kauttaal-taan vanhan kerroksen. Hankalissa profiilin poikkeamissa (seinäpinnoissa kielekkeiden katveet) tämäkään ei välttämättä varmista työn onnistumista, vaan pinnoite jää usein puutteelliseksi (samoin kuin ruiskubetoni). Näissä kohdissa ilmeni usein myös vesi-vuotoja, joita pinnoitteenkaan eristävä vaikutus tuskin olisi estänyt.

3.2.1.7 Jälkikorjaukset

Tutkimuskohteissa oli käytetty vesivuotojen jälkikorjauskeinoina haihdutuspeltejä, jäl-ki-injektointia, paikkausmassoja, pinnoitteita ja salaojia. Nämä kaikki ovat usein väliai-kaisia korjaustoimenpiteitä, jotka yleensä vain hidastavat vuotoa tai siirtävät vuodon toisen paikkaan, puhumattakaan korjausten epäesteettisyydestä. Kallio tilaa suunnitelta-essa ja rakennettaessa tulisikin pyrkiä pysyviin vesieristeratkaisuihin, eikä laskea näiden jälkikorjausmenetelmien varaan.

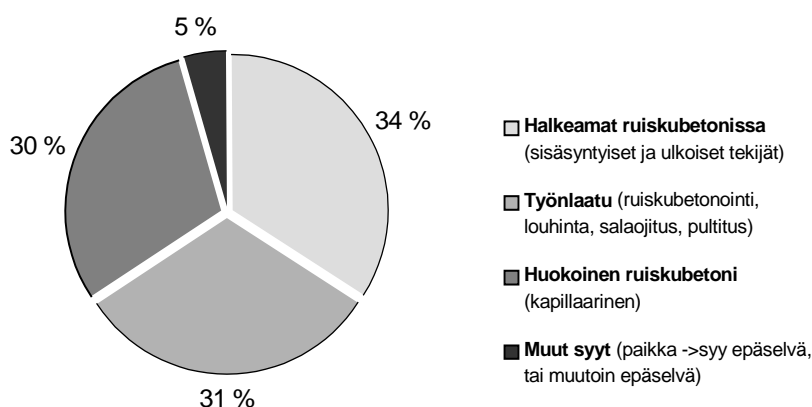
Kohdetutkimuksissa oli mukana 7 paikattua vuotopistettä. Näissä kaikissa vesivuoto oli ns. siirtynyt paikasta kohdasta sen viereen (ks. luku 3.2.2.4). Varsinainen vuodon syy jäi näissä kohdin epäselväksi. Jälki-injektointia oli kohteissa suoritettu paikoin vielä ruiskubetonoinnin jälkeen. Injektointi oli tehty polyuretaaneilla, ei sementtipohjaisilla aineilla. Pääosin injektointi oli tehty prässikalustolla, käsin pumpaamalla. Näistäkin oli havaittavissa vuodon siirtyminen viereen tai sitten injektointi ei ollut vaikuttanut vuo-toon lainkaan. Prässillä ei saada korkeaa, pidempiaikaista painetta, joka tarvittaisiin in-jektointiaineen tunkeutumiseen vuotaviin rakoihin. Tällaisia ruiskubetonoinnin jälkeen injektoituja vuotopisteitä ei tutkimuksessa ollut mukana.

Jälkiasennettuja salaojia oli monessakin tutkimuskohteessa. Tunnelikohteissa, jotka ei-vät ole yleisessä käytössä, salaojat tai solumuovit on vedetty vuotokohdasta tunnelin reunoille ja kiinnitetty ruiskubetonin pintaan peittämättöminä. Yleisötiloissa on sala-ojien päälle ruiskutettu suojabetoni sekä pinnoite. Tällainen ratkaisu on toimiva ja es-teettisesti huomaamaton, kunhan salaojat saadaan johdettua lattian salaojakerrokseen. Kaiken kaikkiaan korjausmenetelmät vaativat kehittelyä, sillä niitä tullaan aina tarvitse-maan jatkossakin, vaikkakin jo rakennusvaiheessa pyritään kuivaan tilaan.

3.2.2 Vuotojen syyjakaumat

Vuodon syy pyrittiin toteamaan jo kohteessa paikan päällä. Syyn selvittämiseen käytettiin vuotoalueeseen kohdentuvia toteumatietoja sekä vuotopisteessä suoritettuja mittauksia. Kahdessatoista tutkimuskohteessa tutkittiin yhteensä 240 vuotopistettä. Tässä käsiteltävät syyjakaumat edustavat kaikkia tutkimuspisteitä kohteesta riippumatta. Kohdekohtaiset jakaumat on esitetty kohdekorteissa (Laamanen 2000). Jakaumia ei ole käsitelty tekstiosuudessa kuin joidenkin kohteiden pääsyyden osalta.

Tutkittujen vuotopisteiden syyt jaettiin alustavasti neljään toisistaan selkeästi erottuvaan ryhmään (Kuva 24). Halkeamat ruiskubetonissa johtuvat sisäsyntyisistä (mm. betonin ominaisuudet) tai ulkoisista (mm. kallion liike) tekijöistä. Työnlaatuun sisältyvät ruiskubetonointityö, louhinta, salaojat ja pultit. Huokoinen ruiskubetoni käsittää betonin huokoisuudesta johtuvat kapillaariset vuodot. Muita syitä ovat paikatut kohdat sekä syyn osalta epäselväksi jääneet. Näistä jokaista käsiteltiin jatkossa tarkemmin ja pyrittiin osoittamaan selkeä syy niiden esiintymiselle.



Kuva 24. Vuotojen syiden jakautuminen, yhteensä 240 pistettä.

Taulukossa 4 on esitetty kohteissa tutkittujen vuotopisteiden laatu. Taulukko ei suoraan esitä kohteissa esiintyvien vuotojen jakautumista, koska tutkittavien vuotopisteiden valinta suoritettiin tutkijoiden toimesta. Kuitenkin siitä voidaan todeta, että jatkuvat vuodot ovat kohteissa harvinaisia, ne useimmiten tiivistetään jo rakennusvaiheessa jälkinjektioinnilla. Tippavuotojen esiintyminen vaihtelee ajallisesti ja ne ovat usein suoraan yhteydessä ulkoilman sääolosuhteisiin. Kuivunut aikaisempi vuoto ilmenee kuivana kalkkitikkuna tai väriläikkänä ruiskubetonin pinnalla. Vuodon kuivumiseen voi johtaa ruiskubetonin halkeaman tai huokosten umpeen saostuminen, tai yksinkertaisesti vedenvirtauksen muutokset kalliossa tai ruiskubetonirakenteessa.

Taulukko 4. Tutkittujen pisteiden vuodon laatu.

Vuodon laatu	Kpl	%
Jatkuva vuoto	8	3
Tippavuoto	153	64
Kostea	65	27
Kuiva , aikaisemmin vuotanut	14	6
Yhteensä	240	100

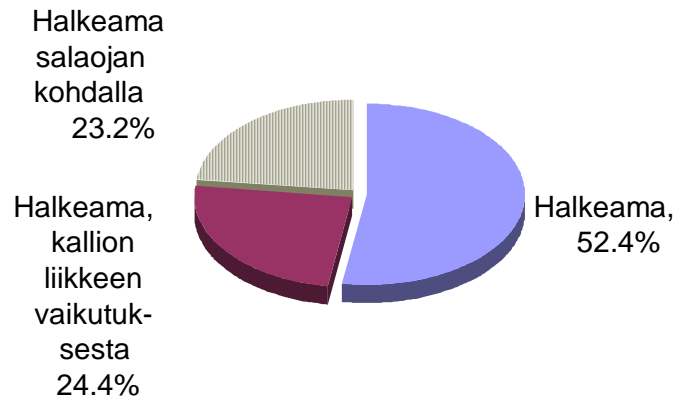
3.2.2.1 Halkeamat ruiskubetonissa

Tutkituissa pisteissä 34 %:ssa (82 kpl) todettiin vuodon syyksi halkeama ruiskubetonissa. Ruiskubetonin halkeamiin ovat syynä joko *sisäsyntyiset tai ulkoiset tekijät*. Sisäsyntyisiksi nimitetään tässä yhteydessä betonin ominaisuuksista johtuvia syitä halkeamiin. Tällaisia ovat mm. betonin puristuslujuus, vesi-sementtisuhde, homogeenisuus ja betonin lisäaineet. Nämä kaikki vaikuttavat omalla tavallaan betonin kutistumiskäyttäytymiseen sen kuivuessa. Siten näiden kuivumiskutistumahalkeamien ehkäisemisessä merkittävimmäksi tekijäksi nousevat ruiskubetonin laadulliset tekijät sekä jälkihoidon merkitys.

Ruiskubetonin kutistumaa ja kuivumishalkeilua on käsitelty laajemmin Tuomas Laamasen diplomityössä Kalliotilojen vesivuotojen syyt vuodelta 2000. Siinä on pyritty esittämään selitys ruiskubetonin halkeamille, joiden todellisia syitä ei saatu esille tutkimuksessa.

Ulkoiset tekijät, kuten louhintatärinät ja kallion jännitystilän muutokset, voivat synnyttää kallioon liikettä, joka ilmenee ruiskubetonissa pidempinä, puolesta metristä useaan metriin, ja usein avaumaltaan leveämpinä rakennemurtumina. Tällaisiin halkeamiin saattaa liittyä useampikin vuotopiste. Yhden tutkimuskohteen läheisyydessä oli suoritettu jälkilouhintaa, jonka on jo aiemmin oletettu aiheuttaneen ruiskubetoniin halkeilua. Etäisyys louhintapaikan ja kalliotilan välillä oli ollut noin kymmenen metriä. Tätä etäisyyttä käytettiin myös muissa kohteissa ohjeellisena arvona, eli jos alle kymmenen metrin läheisyydessä ruiskubetonin halkeamasta oli suoritettu jälkilouhintaa, kirjattiin halkeamisen syyksi louhintatärinä (yleisesti louhintatärinäkatselemuksissa 10 m:n etäisyydellä tilasta suoritettu louhinta vaatii tilan ruiskubetonin kunnan tarkkailua). Muista syistä johtuvan kallion liikkeen todentaminen osoittautui mahdottomaksi. Tämän olisi voinut toteuttaa tulkitsemalla louhinnan aikaisten ekstensometri- ja konvergenssimittausten tuloksia, mikäli mittapistet olisivat osuneet vuotopisteiden läheisyyteen. Tarkkuus todettiin kuitenkin liian epävarmaksi, eikä näin ollen sen pohjalta voitu tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Rakennemurtumia oli havaittavissa varsinkin kalliotiloissa, joissa on suuri jänneväli ja siten myös suuremmat muodonmuutokset.

Ruiskubetonisalaajien kohdalla olevat halkeamat kirjattiin erilleen muista halkeamista (ks. Kuva 25), koska niiden voidaan todeta johtuvan betonin nopeammasta kuivumisesta ja kutistumasta salaajan kohdalla. Siten halkeiluun salaajan kohdalla vaikuttaa betonin alentunut vetolujuus herkemmin kuin muualla. Ruiskubetonissa käytettävät kuidut lisäävät vetolujuutta. Tämä on nähtävissä kuiduttomassa betonissa, jossa esiintyy suhteellisesti enemmän halkeamia kuin kuidullisessa (Kuvat 29 ja 30).



Kuva 25. Ruiskubetonin halkeamien jakaantuminen tutkituissa pisteissä.

3.2.2.2 Työnlaatu

Työnlaadun eli työsuorituksen puutteellisuuden liittyvien tekijöiden osuus vuotojen syynä nousi varsin suureksi; 75 kpl tutkituista pisteistä, eli 31 %. Työnlaadun valvomisen ja parantamisen olettaisi olevan helposti korjattavissa oleva asia ja näin ollen se vähentäisi osaltaan kallio-tiloissa esiintyviä vuotoja merkittävästi, pienin panoksin. Seuraavassa on tarkasteltu eri osatekijöitä tarkemmin (ks. Kuva 26).

Epätasainen ruiskubetonointi / ruiskubetoni

Epätasainen ruiskubetonointi ilmenee selvinä koloina, katvealueina, vajavaisuuksina (< 30 mm) ja epätasaisena pintana ruiskubetonikerroksessa. Tässä ruiskubetonointityön suorittajan ammattitaito nousee esiin. Epätasaiseen ruiskubetonointiin voidaan yhdistää myös havainnot ruiskubetonikerrosten puutteista ja irtoamisista kalliopinnasta, ns. kopo. Tähän liittyy usein pesemättä ja kostuttamatta jätetty pinta, johon uusi betonikerros ei ole tarttunut riittävän hyvin. Ruiskubetonin epätasaisuuteen liittyy mikrorakenneanalyysissä todettu betonin runkoaineen ja sideaineen keskinäinen jakautuminen. Ruiskutus-paineen säätö ja betonimassan lopullinen sekoittuminen vaikuttavat tähän. Nämä työvaiheet tapahtuvat ruiskutustyön aikana. Epähomogeenisuutta todettiin seitsemässä näytteessä kahdestatoista (Taulukko 8).

Louhintajälki

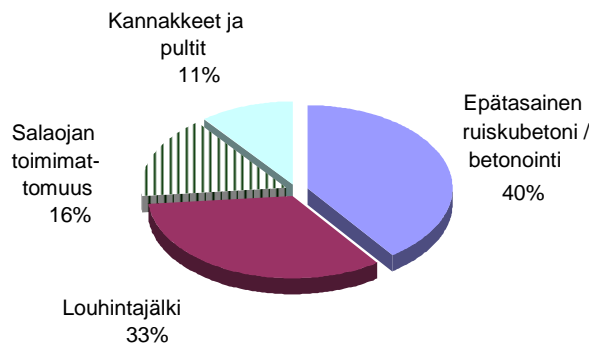
Louhintajäljen aiheuttamiin vuotoihin liittyvät epätasainen louhintajälki (kalliopiikit, "mahat") sekä kallion ja rakoilun (esim. kuutiorakoilu) aiheuttamat geometriset ongelmat lähinnä holviosuuksilla. Louhintajälkeen vaikuttavat reunareikien poraustarkkuus, panostustyö ja louhintatyön viimeistelynä rusnaaminen eli irtolohkojen poisto.

Salaojan toimimattomuus

Ruiskubetonisalaojiin liittyviä ongelmia ovat halkeamien lisäksi niiden toimivuuteen liittyvät ongelmat. Näitä ovat huolimattomalla ruiskubetonoinnilla aiheutetut tai ajan myötä hienoaineksesta tapahtuvat salaojien tukkeumat sekä salaojien asentaminen väärään viettoon epätasaisen louhintajäljen takia. Salaojan toimimattomuus ilmenee veden tulona ruiskubetonin läpi salaojan kohdalta, jopa seinäosuuksilla havaittiin tällaisia vuoto pisteitä. Salaojan huollettavuus on eräs ratkaisu näihin ongelmiin.

Kannakkeet ja pultit

Asennuskannakkeiden ja lujituspulttien kohdalla ilmenevät vuodot johtuvat lähinnä porareikien tiivistämättä jättämisestä tai epäonnistuneesta juottamisesta. Kannakkeiden porausta salaojaan ei havaittu.



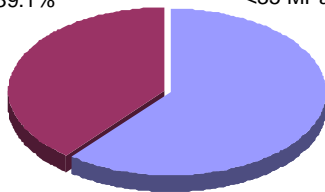
Kuva 26. Työnlaadun jakaantuminen tutkituissa pisteissä.

3.2.2.3 Huokoinen ruiskubetoni

Ruiskubetoni on kirjattu tutkittujen pisteiden kohdalla huokoiseksi, jos vuoto ilmenee rakenteellisesti ehjässä betonissa ja vesi tulee kapillaarisesti betonin läpi. Vaikeutena oli määrittää ero huokoisen ja mikrosäröilleen ruiskubetonin välillä. Mikrosäröily todettiin mikrorakenneanalyysissä (ks. luku 3.2.3.1) yhdeksi pääsyyksi vuotoihin. Tutkimuksessa nämä vuodot merkittiin johtuvaksi huokoisesta ruiskubetonista. Kimmovasaran tulokset tukevat näillä kohdin betonin heikkoa tiivistyneisyyttä (Kuva 31). Kuvassa on käytetty raja-arvona useimmissa kohteissa vaadittua ruiskubetonin vähimmäispuristuslujuutta 35

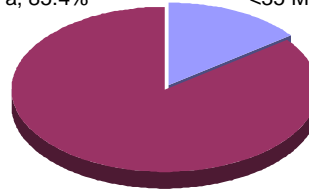
MPa. Kimmovasaran keskiarvotuloksen käyttö on varauksellista (ks. luku 3.2.3.2). Vertaattaessa kapillaarisen vuodon kohdalta mitattuja kimmoarvoja halkeamien kohdalta mitattuihin kimmoarvoihin on arvojen jakaantumisessa havaittavissa selkeä ero (Kuvat 27 ja 28). Tästä voidaan päätellä kapillaarisella vuodolla olevan yhteys betonin alhaiseen puristuslujuuteen, joka taas on seurausta huokoisuudesta ja heikosta tiivistyneisyydestä. Kimmoarvoltaan yli 35 MPa:n vuotopisteissä kapillaarisuus voi johtua osittain mikrosäröilystä, vaikkei ruiskubetonin mikrorakennetutkimuksessa puristuslujuuden todettukaan korreloivan vesi-sementtisuhteen tai mikrosäröilyindeksin kanssa.

Huokoisuus,
kimmoarvo
>35 MPa, 39.1%



Huokoisuus,
kimmoarvo
<35 MPa, 60.9%

Halkeamat,
kimmoarvo
>35 MPa, 85.4%



Halkeamat,
kimmoarvo
<35 MPa, 14.6%

Kuva 27. Kimmoarvot huokoisen ruiskubetonin kohdalla.

Kuva 28. Kimmoarvot ruiskubetonihalkeamien kohdalla.

Huokoisuus on vallitsevana vuotojen syynä neljässä kahdestatoista tutkitusta kohteesta.

3.2.2.4 Muut syyt

Vuotojen muita syitä ovat lähinnä epäselviksi jääneet kohdat. Kaikista 240 tutkitusta pisteestä seitsemässä oli ruiskubetonin paikattu erilaisilla paikkausmassoilla, useimmiten Aquellan Pikatulpalla. Vuodot ilmenivät paikkojen vieressä. Vuodot osoittautuivat kuitenkin olevan peräisin paikan alueelta, joten niiden todellinen syy jäi todentamatta, koska paikkakohtia ei haluttu rikkoa. Toisaalta nämä voitaisiin lukea myös heikkoon työnlaatuun, koska paikkaus on epäonnistunut. Vuotoja ei ollut injektoitu.

Neljässä pisteessä ei saatu selville vuodon syytä eli ne jäivät myös epäselviksi. Mikrorakennäytteen ottaminen ja analyysin tekeminen olisivat voineet antaa lisäselvitystä epäselvien pisteiden kohdalla. Pisteet jakautuivat tasaisesti eri kohteisiin ja analyysit teetettiin periaatteessa samanlaisista epäselvistä kohdista yksi kappale tutkimuskohdetta kohden.

3.2.2.5 Koneellinen ja käsinruiskutus

Vuotojen syiden jakautuminen on esitetty myös ruiskubetonointimenetelmien mukaan (Kuvat 29 ja 30). Tutkimuskohteiden betonointimenetelmät on mainittu kappaleessa

3.1.2. Märkämenetelmä on täysin koneellistettu. Kuivamenetelmässä ruiskutusta ei ole vielä koneellistettu, joten ruiskun ohjaus tapahtuu käsin.

Kuiva- ja märkäruiskutuksen eroista on tässä tutkimuksessa turha lähteä tekemään pitkälle vietyjä johtopäätöksiä, sillä kohteet eroavat niin tiiveysvaatimusten kuin pohjavesiolosuhteidenkin perusteella toisistaan. Kuivamenetelmällä tehdyt kolme kohdetta sijoittuvat paljaisiin kalliomäkiin, jolloin tila on pääosin ympäristön pohjaveden pinnan yläpuolella (Kuva 16).

Koneellisesti ruiskutettuja kohteita oli yhteensä yhdeksän, joissa tutkittuja pisteitä oli 207 kappaletta. Loput kolme kohdetta olivat käsin ruiskutettuja, joissa tutkittiin yhteensä 33 vuotopistettä. Määrä jäi vähäiseksi, koska vuotopisteitä oli vähän tai niihin pääsy oli vaikeasti järjestettävissä.

Halkeamat

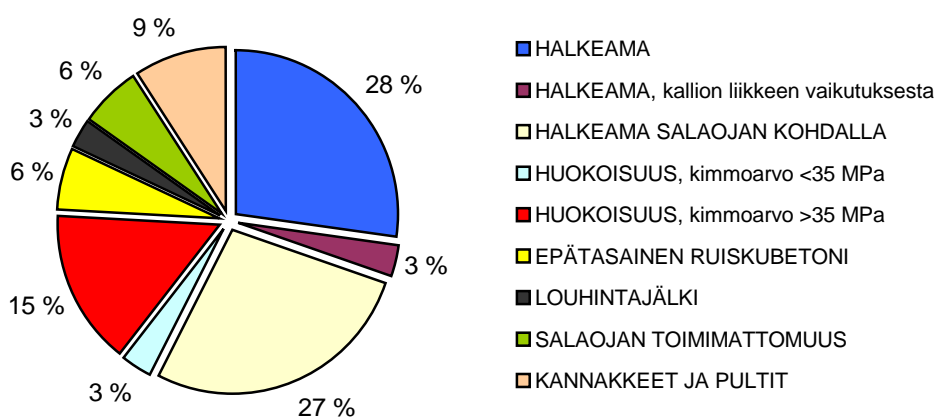
Ruiskubetonin halkeamien suhteellinen osuus vuodon syynä on huomattavasti korkeampi käsin ruiskutetuissa kohteissa, 58 %, kuin koneellisesti ruiskutetuissa kohteissa, 31 %. Varsinkin salaojien kohdalla olevien halkeamien osuus oli merkittävä käsin ruiskutetuissa. Näissä kohteissa ei ruiskubetonissa ole käytetty kuituja, joten betonin vetolujuus on myös alhaisempi. Kuten mikrorakenneanalyysissä todettiin, on kuivamenetelmällä mahdollista päästä alhaisempaan vesi-sementtisuhteeseen, mutta tämä lisää riskiä halkeiluun ja korostaa betonin jälkihoidon merkitystä.

Huokoisuus

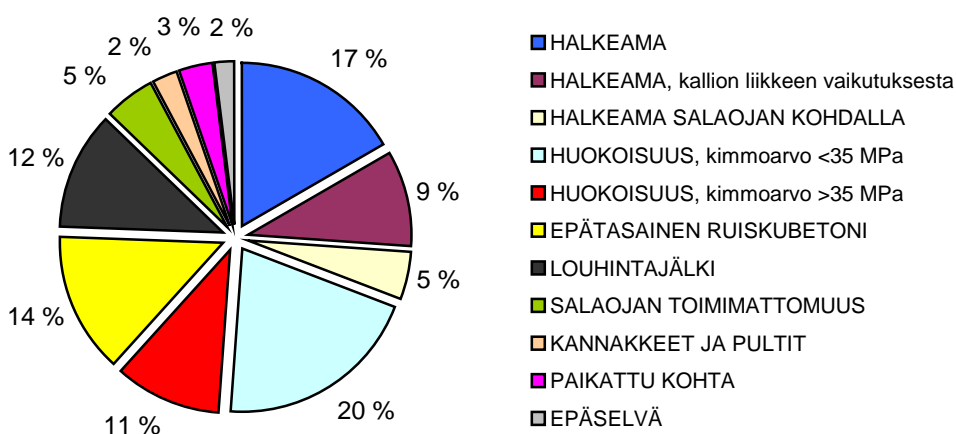
Ruiskubetonin huokoisuus on selkeästi koneellisesti ruiskutettujen kohteiden ongelma. 31 %:ssa tutkituista pisteistä oli kyse ruiskubetonin huokoisuudesta ja alhaisesta kimmoarvosta, < 35 MPa. Kuivamenetelmällä tehtyjen kohteiden huokoisiksi määriteltyjen vuotopisteiden (18 %) kimmoarvot ovat huomattavasti suurempia, vain yhdessä pisteessä saatiin arvoksi alle 35 MPa.

Heikko työnlaatu

Huokoisuuteen vaikuttaa osaltaan epätasainen ruiskubetonointityö, jonka osuus vuotoihin vaikuttavana tekijänä on myös suurempi koneellisesti ruiskutetuissa kohteissa. Merkittävimpana tekijänä tähän voidaan edelleen pitää märkäruiskutuskaluston tuomia rajoituksia, joilla ei päästä tasalaatuisen ruiskubetonin laatuun ja työnjälkeen. Louhintajälkeen liittyvät ongelmat ja paikatut pisteet liittyvät myös märkämenetelmäkohteisiin. Kaiken kaikkiaan merkittävin vuodon syy koneellisesti ruiskutetuissa kohteissa on heikko työnlaatu, 33 %, kun sen osuus käsin ruiskutetuissa kohteissa on 24 %, tosin kohteita on huomattavasti vähemmän, (Taulukko 5).



Kuva 29. Vuotojen syiden jakaantuminen käsini ruiskutetuissa kohteissa (kuiduton ruiskubetoni).



Kuva 30. Vuotojen syiden jakaantuminen koneellisesti ruiskutetuissa kohteissa (kuidullinen ruiskubetoni).

Taulukko 5. Vuotojen pääsyiden jakaantuminen käsini- ja koneellisesti ruiskutettuihin tiloihin tutkituissa pisteissä.

Ruiskutusmenetelmä	Halkeamat ruiskubetonissa, %	Huokoinen ruiskubetoni, %	Heikko työnlaatu, %	Muut syyt, %
Käsin, 33 pistettä	58	18	24	0
Koneellisesti, 207 pistettä	31	31	33	5

3.2.3 Ruiskubetonitutkimukset

3.2.3.1 Mikrorakennetutkimukset

Ruiskubetonin laatua tutkittiin laboratoriossa mikrorakennetutkimuksissa. Tutkimuskohteista (11 kpl) otettiin kohdetutkimuksien aikana erilliset näytteet betonin ohuthietutkimusta ja puristuslujuuden määrittystä varten. Tutkimusohjelmaan sisällytettiin myöhemmin vuoden 2001 keväällä Puolustushallinnon Rakennuslaitoksen (PLM) kaksi kohdetta, joissa ruiskubetonointi on suoritettu 1970–80-luvulla kuivaseosmenetelmällä. Myös näistä kohteista (181 ja 300) otettiin näytteet ohuthietutkimuksia ja puristuslujuuden määrittystä varten (VTT Rakennustekniikka 2000 ja 2001).

Ohuthietutkimuksessa analysoitiin betoneiden koostumus, hydratoitumisaste, karbonisoituminen, vesi-sementtisuhde, tiivistyshuokosten määrä, tiivistyneisyys, homogeenisuus, halkeamat ja säröt (Taulukot 6 ja 7).

Näitä tekijöitä kuvattiin kohdetutkimuksien osalta VTT Rakennustekniikan tutkimusselostuksessa nro. RTE2640/00 ja PLM:n kohteiden osalta tutkimusselostuksessa RTE2780/01 ns. *mikrorakenneindeksillä 0–3 (RUMA)*.

Esimerkiksi säröindeksi on seuraavanlainen:

- 0, mikrohalkeamia on vain satunnaisesti.
- 1, mikrohalkeamia on koko näytteen alueella.
- 2, mikrohalkeamia on koko näytteen alueella ja paikoin erityisen tiheästi.
- 3, mikrohalkeamia on erityisen tiheästi ja ne ovat tavallista leveämpiä.

Betonin tiivistyneisyyttä määritettäessä otetaan huomioon tiivistyshuokosten koko, muoto, määrä, jakauma, sekä sijainti matriisissa/runkoainerakeiden tartuntapinnoilla tai isojen kivirakeiden kiilautumissa sekä ruiskutuksen aiheuttamina huokoslamelleina.

Homogeenisuudella tarkoitetaan runkoaineen ja sideaineen keskinäistä jakautumista ja rakennetta sekä sideainematriisin infrastruktuurin tasalaatuisuutta.

Halkeilua ja säröilyä määritettäessä indeksi 0 osoittaa, että betonissa ei ole halkeamia lainkaan tai että niitä on erittäin vähän ja ne ovat pieniä, lyhyitä säröjä. Indeksi 3 osoittaa, että betoni on erittäin voimakkaasti säröillyttä tai halkeillutta tai että halkeamat ovat pitkiä ja leikkaavia. Säröindeksi on tehty arvioimaan betonin tilaa säilyvyysrasituksen, esimerkiksi toistuvan jäätyämisen ja sulamisen jälkeen. Indeksi 3 tarkoittaa, että betoni ei ole kestänyt kyseisissä olosuhteissa.

Vesi-sementtisuhteella on keskeinen merkitys betonin lujuuteen ja myös tiiviyteen eli mitä pienempi vesi-sementtisuhte, sitä suuremmat lujuusominaisuudet ja pienempi läpäisevyys betonilla on. Vesi-sementtisuhteen kohdalla laadittiin tätä selvitystä varten oma asteikko, jossa indeksi 0 kuvaa enintään 0,40:n vesi-sementtisuhdetta indeksin 3 kuvatessa 0,50:n vesi-sementtisuhdetta. Vesi-sementtisuhteet määritettiin suuruusluokatasolla, koska käytettävissä oli ainoastaan rakennebetonin määrittämisessä käytettäviä referenssiyhdistä. Tämän vuoksi myös sementti- ja vesimääriä tulee tarkastella suunnitelmallisina, vaikka ne taulukoissa onkin ilmoitettu laskennallisista syistä tarkkoina.

Sementin hydratoitumisella tarkoitetaan sen kemiallista reagoimista veden kanssa. Hydratoituminen etenee alkuvaiheessa nopeasti hidastuen ensimmäisten vuorokausien jälkeen jatkuen kuitenkin useita vuosia tai vuosikymmeniä.

Karbonatisoitumisella tarkoitetaan ilman hiilidioksidin (CO₂) reagoimista sementin ja veden reaktiotuotteen kalsiumhydroksidin (CaOH₂) kanssa, jonka tuloksena muodostuu kalsiumkarbonaattia (CaCO₃). Suuri karbonatisoitumissyvyys osoittaa betonin olevan läpäisevää (ikä huomioon ottaen). Epätasainen karbonatisoituminen osoittaa betonin olevan epähomogeenista, halkeillutta tai säröilyttä.

Taulukko 6. Ohuthieistä point count -menetelmällä lasketut runkoaine, sementtipasta ja huokososuudet tilavuusprosentteina.

Näyte	Näytteen syvyys pinnasta (mm)	Runkoaineen osuus %	Sementtipastan osuus %	Huokokset %
1. Kluuvin p-laitos	0–50	47	44	9
2. Yliopiston kirjavarasto	0–50	48	47	5
3. Marian sairaala	0–20 25–50	57 51	40 40	4 9
4. Leppävaaran p-laitos	0–50	46	44	10
5. Mellunmäen p-laitos	0–50	54	42	4
6. Hartwall Arena	0–50	52	43	4
7. Salmisaari –Lauttasaari	0–50	57	38	5
8. Vuosaari–Pasila UO5	0–50	45	50	5
9. Agrokseenmäen varasto	0–50	60	36	3
10. Herttoniemen p-laitos	0–50	54	44	2
11. Pasilan p-laitos	0–50	51	42	7
12. PLM 1/181	0–50	60	37	3
13. PLM 1/300	0–50	55	42	3

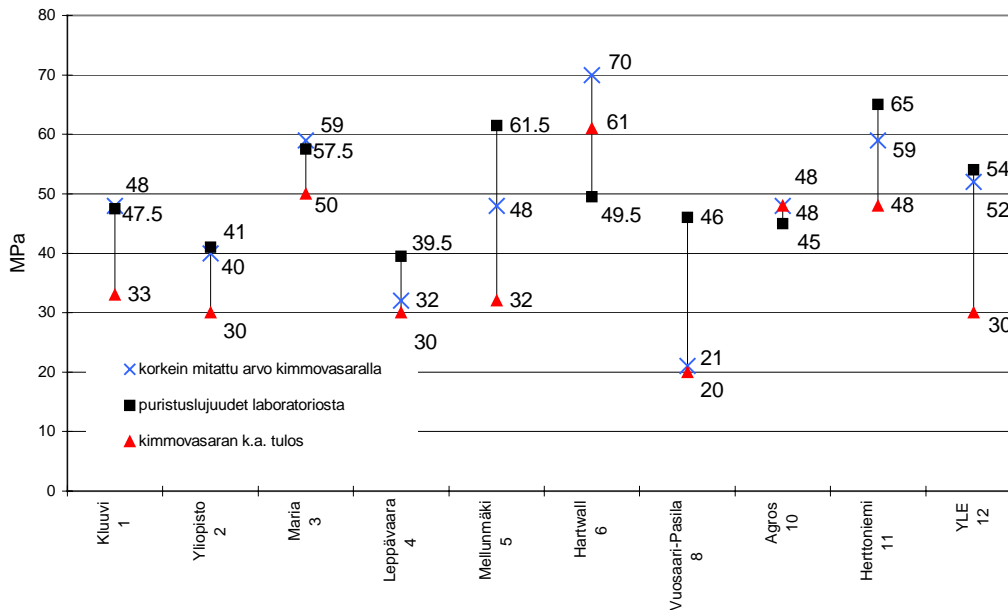
Taulukko 7. Ohuthieanalyysissa määritetyt runkoaine-, sementti- ja vesimäärät.

Näyte	Runkoaine kg/m ³	Sementti kg/m ³	Vesi l/m ³	Vesi- sementtisuhte (vaihteluväli)
1. Kluuvin p-laitos	1 250	660	230	Noin 0,35
2. Yliopiston kirjavarasto	1 290	710	250	Noin 0,35
3. Marian sairaala	1 510 1 870	600 620	210 220	Noin 0,35
4. Leppävaaran p-laitos	1 240	540	270	Noin 0,5
5. Mellunmäen p-laitos	1 430	520	260	Noin 0,5
6. Hartwall Areena	1 400	650	230	Noin 0,35
7. Salmisaari–Lauttasaari	1 520	490	220	Noin 0,45 0,4–0,7
8. Vuosaari–Pasila UO5	1 210	610	310	Noin 0,5
9. Agroksenmäen varasto	1 610	450	220	Noin 0,5
10. Herttoniemen p-laitos	1 430	540	270	Noin 0,5 0,4–0,7
11. Pasilan p-laitos	1 360	630	220	Noin 0,35
12. PLM 1/181	1 600	455	225	Noin 0,5
13. PLM 1/300	1 470	585	235	≥ 0,4

3.2.3.2 Puristuslujuus

Kuvassa 31 on esitetty vuotopisteessä mitattu kimmovasaran kimmoarvo sekä laboratorioissa pisteen alueelta otetusta betoninäytteestä määritetty puristuslujuus. Arvoja tarkasteltaessa korkein mitattu kimmovasaratulos näyttäisi asettuvan yleisesti lähelle laboratorioarvoa, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Korkein arvo oletettavasti kuvaa betonin puristuslujuutta todellisimmin, alhaiset arvot voivat johtua ruiskubetonipinnan epätasaisuudesta.

Puristuslujuuden hajonta tutkimuspisteessä



Kuva 31. Kimmovasaralla mitatut ja laboratoriossa määritetyt puristuslujuudet vuoto-pisteissä.

Mittaustulokset rohkaisevat käyttämään kimmovasaraa suuntaa-antavana mittarina puristuslujuuden määrittämisessä, kunhan mitattava kohta tasoitetaan huolellisesti ja irtoaines poistetaan vesihuuhTELulla.

PLM:n kohteista 181 ja 300 määritettiin ruiskubetonin puristuslujuudet ainoastaan laboratoriossa:

Näyte 2/181

Puristuslujuus 73 Mpa

Näyte 2–3/300

Puristuslujuus 106 Mpa

Kohteen 300 korkea puristuslujuus selittyy korkealla sementtipitoisuudella, kummasakin kohteessa ruiskubetonin puristuslujuus on kehittynyt 20–30 vuotta.

3.2.3.3 Ruiskubetonitutkimusten yhteenveto

Termillä "vesitiivis" betoni tarkoitetaan, että betoni täyttää standardin SFS 4476 vaatimukset (Betoni. Vedenpitävyys). Nimestään huolimatta vesitiivis betoni ei tarkoita, ettei sen läpi kulkisi vettä.

Taulukkoon 8 on koottu yhteenvetona mikrorakennetutkimuksien tulokset vesitiiviyden kannalta merkittävimmistä betonin ominaisuuksista, arvioinnin perustuessa ns. *mikrorakennesindeksiin 0–3 (RUMA)*.

Taulukko 8. Yhteenvedo ja pisteytys mikrorakenneindeksiä käyttäen. Mitä pienempi yhteispistemäärä sen parempi on ruiskubetonin vesitiiviys.

Näyte	Tiivistyneisyys (0–3)	Homogeenisuus (0–3)	Halkeamat & säröt (0–3)	Vesi-sementti-suhde (0–3)	Yhteensä (0–12)
1. Kluuvin p-laitos	3	0	1	0	4
2. Yliopiston kirjavarasto	2	0	2	0	4
3. Marian sairaala	3	3	1	0	7
4. Leppävaaran p-laitos	3	3	1	3	10
5. Mellunmäen p-laitos	1	1	1	3	6
6. Hartwall Arena	1	0	1	0	2
7. Salmisaari–Lauttasaari	2	2	2-3	3	10
8. Vuosaari–Pasila UO5	1	3	0	3	7
9. Agrokseenmäen varasto	0	3	0	3	6
10. Herttoniemen p-laitos	0	3	1	3	7
11. Pasilan p-laitos	3	0	1	0	4
12. PLM 1/181	1	2	1	3	7
13. PLM 1/300	1	0	0	1	2

Vesivuotojen keskeiset betonitekniset syyt ovat korkea vesi-sementtisuhde, huono tiivistyneisyys, säröilyverkosto ja halkeamat. Halkeamien syntymekanismia on kuvattu tarkemmin tutkimukseen liittyvässä diplomityössä (Laamanen 2000).

Mikrorakennetutkimusten tulosten ja havaittujen vesivuotojen perusteella näyttäisi siltä, että vähäinenkin koko betonipaksuuden alueella oleva säröilyverkosto riittää veden kulkeutumiseen. Tämä merkitsisi sitä, että vesivuotojen estämiseksi säröindeksin tulisi olla 0 asteikolla 0–3.

Taulukon 8 kohteista pienimmät pisteet on kirjattu Hartwall Areenan harjoitusjäähallille ja PLM:n kohteelle 1/300. Näissä kummassakin kohteessa betoniteknisesti ruiskubetoni olisi melko vesitiivistä, huokoisuus ei ole merkittävää ja betoni on homogeenistä. Kenttähavaintojenkin perusteella 1/300 on kuiva, kuivuus voi kylläkin myös johtua tilaan kohdistuvan hydrostaattisen paineen pienuudesta ja ehjästä kivistä. Jäähallissa taas esiintyy paljon vuotoja, vaikka betoniteknisesti vesitiiviyteen on edellytyksiä. Kohteen vuotojen merkittävin syy (52 %) on betonirakenteen halkeaminen (Laamanen 2000). Halkeaminen voi johtua kallion liikkeistä (pieni kattopaksuus, suuri jänneväli) tai puutteellisen jälkihoidon aiheuttamasta betonin kuivumiskutistumisesta. Ei siis riitä, että betonimassa on riittävän vesitiivis, vaan samalla betonirakenteen rikkoutuminen halkeilemalla on estettävä.

Koosteen omaisesti voidaan todeta, että noin 0,50 vesi-sementtisuhteen betoneissa ei havaittu juurikaan mikrosäröilyä, mutta korkean vesi-sementtisuhteensa vuoksi nämä betonit läpäisevät vettä. Noin 0,35 vesi-sementtisuhteen betoneissa havaittiin selvä mikrosäröilyverkosto, joka näyttäisi tekevän betoneista vettä läpäiseviä. Syyt todettuun mikrosäröilyyn kyseisissä kohteissa ovat epäselvät. Lisäksi muutamassa näytteessä havaittiin harvatiiloja, jotka niin ikään mahdollistavat veden läpimenon. Normaalissa valubetonissa ei näin alhaisilla vesi-sementtisuhteilla esiinny säröilyverkostoa.

Ruiskubetonoinnissa kuivamenetelmällä on mahdollista saada alhaisempi vesi-sementtisuhte kuin märkämenetelmällä, mutta käytännössä tämän tutkimuksen tulokset eivät sitä tue. Ainoastaan yhdessä kuivamenetelmällä tehdyssä tilassa oli vesi-sementtisuhte 0,35 muiden ollessa n. 0,5. Mikäli vesi-sementtisuhte saataisiin pysymään 0,35:ssä ja samalla estettäisiin mikrosäröilyn synty, niin 70 mm:n paksuinen ruiskubetoni voisi jo olla vesitiivis. Tehokkaalla jälkihoidolla estetään betonin kuivumisesta johtuvat halkeamat. Jälkihoidon tarpeeseen vaikuttaa kuivumisolosuhteiden lisäksi käytetyn kiihdyttimen määrä, joka nostaa betonin lämpötilaa ja nopeuttaa betonissa olevan veden haihtumista. Jälkihoitoaineilla estetään veden haihtuminen ruiskubetonista, mutta vesitiiviyden kannalta lopputulos ei välttämättä ole vastaava kuin riittävällä vesikastelulla suoritettulla jälkihoidolla. Epätasaiseen ruiskubetonipintaan on vaikea levittää yhtenäisen haihtumista estävä kerros jälkihoitoainetta, myös jälkihoitoaineen ruiskutus voi tapahtua pitkällä viiveellä ruiskubetonoinnin jälkeen, jolloin merkittävää veden haihtumista on voinut jo tapahtua.

Näytteiden 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11 ja 1/181 betonit ovat hydratoituneet erittäin hyvin. Näytteissä 4 ja 10 on paikoin hydratoitumatonta sementtiä ja näytteen 1/300 hydrataatioaste on alhainen. Näytteen 1/300 pinnalla havaittiin silikaattigeeliä, joka voi olla jälkihoitoainetta.

3.2.4 Yhteenveto vuotojen syistä

Vuotojen ilmentymät

Kohteessa vuotojen syiden tarkastelu kohdentui vuotojen ilmentymiin tilan seinillä ja holvissa. Vuoto voi olla laadullisesti eri asteinen: aikaisemmin vuotanut mutta nykyisin kuiva, kostea, tippuva tai jatkuva vuoto. Vesivuotojen laatuun vaikuttaa ensisijassa tilaa ympäröivän kallion vedenjohtavuus ja siinä liikkuvan veden määrä ja hydrostaattinen paine (pohjavesitaso). Toissijaisesti vaikuttaa tilan eristysrakenteen ja sen toimivuus estämään vedentulo tilaan.

Tutkimukset

Tutkimuksissa lähdettiin liikkeelle itse tilasta. Ensin suoritettiin kohteissa vuotopisteiden kohdalla tutkimuksia, joilla pyrittiin selvittämään miksi ja miten vesi kulkeutuu lujitus- ja eristerakenteen läpi tilaan. *Kenttämittauksilla* ja havainnoilla saatuja tuloksia voitiin tarkastella myöhemmin *kohteen toteuma-aineiston* kanssa ja saada yhteistulkinnalla selvyyttä myös kallioympäristöön liittyvien tekijöiden vaikutuksista vesivuotoihin.

Kohdetutkimustulokset

Kohteissa tutkittiin 240 vuotopistettä. Kohteittaiset syyjakaumat on esitetty kohdekohteissa (Laamanen 2000). Kaikkien kohteiden vuotojen syyt jaettiin neljään ryhmään:

- halkeamat ruiskubetonissa (34 %), 82 pistettä
- työnlaatuun liittyvät syyt (31 %), 75 pistettä
- huokoinen ruiskubetoni (30 %), 72 pistettä
- muut syyt (5 %), 11 pistettä.

Halkeamat voivat johtua joko sisäsyntyisistä 76 % (kuivuminen, kutistuma) tai ulkoisista tekijöistä 24 % (louhintatärinät, kallion jännitystilamuutokset). Halkeamat, jotka sijaitsevat alle 10 m:n päässä tilan ympärillä tehdystä myöhemmästä louhinnasta, on kirjattu louhintatärinän aiheuttamiksi. Salaojien kohdalla sijaitsee 23 % halkeamista.

Työnlaatu jakaantui eri työsuorituksiin ja rakenteisiin. Ruiskubetonoinnin epätasaisuus 40 %, louhintajälki 33 %, salaojan toimimattomuus 16 % ja kannakkeet ja pultit 11 % vuodoista.

Huokoinen ruiskubetoni ilmenee kapillaarisena vuotona ja alhaisena puristuslujuutena. Nämä tekijät johtuvat ruiskubetonin korkeasta vesi-sementtisuhteesta, suuresta huokos-tilavuudesta, epähomogeenisuudesta ja mahdollisesti sisäsyntyisestä mikrosäröilystä (osittain kuivuminen).

Muut syyt sisältävät paikattuja tai muuten epäselviä vuotoja.

Ruiskubetonointimenetelmien syyjakaumat ovat erilaiset, käsin ruiskutuksessa halkeamat esiintyvät pääsyynä 58 %:ssa, kun taas koneellisessa jakauma on tasainen halkeamien ollessa syynä n. 30 % pisteistä. Käsin ruiskutuksella epätasaisen betonointi oli syynä 6 % pisteissä, koneellisessa 14 %:ssa. Verieristerakenteena kumpikaan ei osoittautunut tutkimuksessa vedenpitäväksi, eikä niitä ole syytä verrata vesieristeinä toisiinsa, sillä tutkimuskohteet sijaitsevat pohjavesitasoon nähden erilaisilla alueilla.

Kenttähavainnot

Rakennerratkaisuiden ja työmenetelmien vaikutusta vesivuotoihin tarkastellaan yhdessä kalliorakenteeseen ja kallioympäristöön liittyvien tekijöiden kanssa. Vesivuotoja aiheuttavat tekijät kohdentuvat kalliorakenteeseen, eri rakenteiden materiaaleihin, niiden laatuun ja toimivuuteen sekä työsuoritukseen.

Kalliolaatu on ensisijainen tekijä vesivuotojen kannalta. Kallion ollessa ehjä ei kovan kiven kalliossa esiinny vettä. Vesi liittyy aina kallion rikkonaiseen rakenteeseen ja rakojen vedenjohtavuuteen. Kallioluokitukset eivät kuvaa kallion vedenjohtavuutta, erikseen suoritettavat mittaukset, vesimenekkiprobeja ja videokuvaukset selvittävät rakenteiden vedenjohtavuutta, kairanäytteestä saadaan vain todiste siitä, onko vesi esiintynyt raossa. Tutkimuksissa kartoituksen mukaan rikkonaisinta kalliota esiintyi Vuosaari–Pasila tunneliosuudella UO5, jossa myös havaittiin eniten vuotoja.

Injektointia ei ollut suoritettu n. 78 %:ssa tutkitun vuotopisteen läheisyydessä. Olisiko näiden pisteiden vuotoja estetty injektoinnilla, jää selvittämättä. Esi-injektointi on todettu tehokkaimmaksi keinoksi estää vuodot, aina sekään ei onnistu johtuen injektointipaineen alhaisuudesta, injektointiaineen huonosta tunkeutuvuudesta rakoon tai korkeasta hydrostaattisesta paineesta. Esi-injektointi tulee kuitenkin olemaan merkittävin vesieristerratkaisu, koska sillä varmistetaan kalliorakenteen tiiviys ja saavutetaan sekä kalliotilan ympäristön että kalliotilan sisäiset vesitiiveysvaatimukset.

Louhinnan vaikutus vesivuotoihin ilmenee kalliotilan holvin profiilin muodossa sekä räjäytyksen aiheuttamana kallion rikkonaisuutena tilaa ympäröivässä kalliossa. Poikkeamat suunnitellusta louhintaprofiilista muodostavat kalliopiikkejä, "mahoja" sekä liikalouhintaryöstöjä, jotka ohjaavat kallioista tulevaa vettä niin, ettei se pääse salaojiin tai tilan reunoille. Räjäytyksen vaikutusta vesivuotoihin ei tutkittu tässä yhteydessä.

Salaojitukseen liittyvät vuotojen syyt kohdistuvat salaojien asennusajankohtaan, sijoitukseen, asennukseen ja ruiskubetonointiin salaojan kohdalla. Ruiskubetonin halkeilu salaojien kohdalla liittyy niiden raudoitusrakenteeseen. Salaojien toimivuudessa havaittiin puutteita, kuten tukkeumat ja asennus väärään viettoon. Salaojatiheyden todettiin vaihtelevan paljon, vaikkakin 77 % vuodoista oli alle kahden metrin etäisyydellä salaojasta. Salaojitusajankohdan siirtämisellä ensimmäisen tai/ja toisen ruiskubetonoinnin jälkeen saadaan vuodot estettyä tehokkaammin. Salaojien alapäiden johtamisella suoraan runkoverkkoon ja asentamalla huuhteluliitokset taataan salaojien toimivuus ja huollettavuus.

Lujitusrakenne vaikuttaa osaltaan vesitiivyyteen. Pulttireiät yhdistävät kalliorakoja ja toimivat siten vettä johtavina, mikäli niiden juottaminen tai injektointi epäonnistuu. Verkon korvanneet kuidut toimivat myös ruiskubetonia lujittavana rakenteena ja estävät sen halkeilua lisäten myötölujuutta. Ruiskubetonin paksuus määräytyy yleensä lujitus-

vaatimusten mukaan. Vesitiiveysvaatimukset huomioidaan lisäämällä betonikerroksen paksuutta. Ruiskubetoni ei käytännössä kuitenkaan ole vedenpitävä rakenne.

Pinnoitteiden vaikutus tulee esiin ruiskubetonissa, kun huokoinen pinnoitekerros imee itseensä betonin läpi tulevan veden. Sopivan ilmanvaihdon avulla vesi ehtii haihtua pinnalta ja vähentää näin tippuvuodon riskiä. Mm. uusia materiaaliratkaisuja on tulossa markkinoille.

Jälkikorjaukset ovat usein väliaikaisia korjaustoimenpiteitä, joiden varaan vesivuotojen korjaamista ei tulisi laskea vaan pyrkiä jo kalliotilan suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa pysyviin vesieristeratkaisuihin.

Ruiskubetonitutkimukset

Vesivuotojen betonitekniset syyt mikrorakenneanalyysin perusteella ovat korkea vesi-sementtisuhte, huono tiivistyneisyys, mikrosäröilyverkosto ja halkeamat. 0,50 vesi-sementtisuhteen betoneissa ei havaittu mikrosäröilyä, mutta korkean vesi-sementtisuhteensa vuoksi ne läpäisevät vettä. Noin 0,35 vesisementtisuhteen betoneissa oli selvä mikrosäröilyverkosto. Syyt todettuun mikrosäröilyyn ovat epäselvät. Normaalisissa valubetonissa ei alhaisilla vesi-sementtisuhteilla esiinny säröilyverkostoa. Kuivamenetelmällä on mahdollista saada alhaisempi vesi-sementtisuhte. Märkämenetelmässä tiivistyneisyyttä parannetaan käyttämällä korkeampia ruiskutuspaineita. Suhteuttamalla ruiskubetonin vesi-sementtisuhte lähelle 0,35:tä ja estämällä riittävällä jälkihoidolla kutistumishalkeamien syntyminen voidaan 70 mm:n paksuista ruiskubetonia pitää jo melko vesitiiviinä rakenteena. Suosittelemalla ruiskubetonirakenteen kokonaispaksuudeksi vähintään 100 mm varmistetaan vesitiiviyyden kannalta riittävän ruiskubetonipaksuuden toteutuminen kautaltaan kalliotilassa.

3.3 Seurantakohtetutkimukset

Seurantakohtetutkimusten tavoitteena oli seurata rakennusvaiheessa olevia kohteita ja selvittää rakennusaikana ilmeneviä tilan vesitiiviyyteen vaikuttavia tekijöitä. Kohteita seurattiin vuoden 2001 syksyyn asti, tällöin kaikkien seurattujen kohteiden louhintaurakat olivat päättyneet.

3.3.1 Kohteet ja seuranta

Seurantakohteiksi valittiin rakennusvaiheessa olevia, vesitiiviyyden kannalta kiinnostavia hankkeita. Kohteiden rakennusvaiheiden tuli myös ajoittua niin, että kohteissa voitiin tehdä kallio- ja vuotovesikartoitus ennen kalliopinnan verhoamista ruiskubetonilla tai muulla vesieristerakenteella.

Seuraavat kolme kohdetta valittiin seurantaan:

1. Viikin jätevesipuhdistamon typenpoiston ja laajennuksen tilat (Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Kalliosuunnittelu Oy, YIT-Rakennus Oy)
2. Isonkylän tunneli (FUNDUS Oy, Kalliorakennus Vyyryläinen & Co Oy)
3. Merihaan monitoimitila/väestönsuoja (Saanio & Riekkola Oy, Rakennus Oy Lemminkäinen).

Viikinmäessä ja Isonkylän tunnelissa seurantaa suoritettiin louhintaurakan aikana. Merihaassa louhinta- ja lujitustyöt olivat pääosiltaan päättyneet jo ennen seurantatutkimusten aloitusta, joten kohteessa ei suoritettu seurantaa, vaan ainoastaan selvitettiin vesitiivyyteen liittyviä asioita haastattelemalla tilan suunnittelijaa, rakennuttajaa ja urakoitsijaa louhintatöiden päätyttyä. Seuratuissa kohteissa suoritettiin vastaavat haastattelut kohteiden tarkastelukäyntien lisäksi.

Käytännössä seurantaa suoritettiin Viikinmäessä ja Isonkylän tunnelissa kahdella tutkimuskäynnillä, joilla pyrittiin selvittämään vuotojen laatua/kallion rakennetta, vuotojen muutoksia sijainnin, määrän ja olosuhteiden mukaan. Kummastakin kohteesta määritettiin tutkimusalueet, joissa suoritettiin vuotojen kartoitus ja kalliopintojen valokuvaus käyntien aikana.

Viikinmäessä seurantaa suoritettiin tutkimusalueella ilmastushalli 9:ssä. Halli louhittiin osissa, ensin kattoperä pilottilevennyslouhintana, lopuksi pohja nostolouhintana, ks. (Kuva 32). Hallin leveys 19 m ja korkeus 11 m. Ensimmäinen käynti 27.4.2001 ajoittui siihen, kun hallin kattoperälouhinta oli suoritettu. Ruiskubetonisalojien asennus oli suoritettu halli 9:n holviosuudelle ja se oli käynnissä muualla kohteessa (Kuva 32). Halli 9 oli vielä ruiskuttamatta lukuun ottamatta hallin itäpään suppea-alaista työnaikaista ruiskubetonilujitusta. Käynnin aikana halli 9:n paaluvälit 9165–9215 ja 9225–9250 valokuvattiin digitaalikameralla. Kuvien laatu ei ollut hyvä johtuen ilman pölyisyydestä ja kosteudesta sekä heikosta valaistuksesta. Seuraava käynti 23.1.2002 ajoittui louhintaurakan loppuvaiheille, kun halli 9 oli kokonaisuudessaan louhittu ja ruiskutettu. Tällöin tutkimusaluetta ei systemaattisesti kuvattu, mikä johtui pitkistä kuvausetäisyyksistä (> 10 m) holviin, sekä huonosta näkyvyydestä ja valaistuksesta.

Salon Isonkylän moottoritietunneli koostuu kahdesta kaksikaistaisesta tunnelista, joista pohjoista tunnelia ajetaan länteen ja eteläistä itään (Kuva 33). Kumpikin tunneli on n. 450 m pitkä, 14 m leveä ja n. 6 m korkea. Tutkimukset suoritettiin ensin valmiiksi louhitussa pohjoisessa tunnelissa paaluvälillä 93955–93995. Ensimmäinen tutkimuskäynti 17.11.2000 ajoittui vaiheeseen, jossa suunniteltiin pohjoisen tunnelin holvin lujittamista 40 mm:n ruiskubetonikerroksella 8 m:n leveydeltä työmaa-ajon varten. Rakennusgeologinen kartoitus suoritettiin kummassakin tunnelissa 22.–23.11.2000. Seuraava tutkimuskäynti ajoittui louhintaurakan jälkeen 18.9.2001, pohjoisen tunnelin holviin oli

asennettu vuotoalueille salaojat, jotka oli holvin lisäksi ruiskubetonoitu 40 mm:n kerrospaksuudella. Tuolloin ei vielä ollut päätetty tunnelien lopullista verhousrakennetta, se varmistui vuoden 2001 lopulla Norjassa kehitetyksi koko profiilin kattavaksi Kombihvelvet eristerakenteeksi (ks. kappale 2.3.4).



Kuva 32. Nostolouhinta käynnissä Viikinmäen halli 9:ssä; holviprofiilissa havaittavissa piston aiheuttamaa porrastusta sekä seinälle päättyvä salaoja.



Kuva 33. Isonkylän moottoritietunneleiden itäpään suuaukkojen betonivalumuottien rakentaminen käynnissä.

Merihaan monitoimitilassa suoritettiin tutustumiskäynti 6.10.2000, jolloin vielä vii-
meisteltiin louhintaurakkaan kuuluvia ruiskubetonointeja ja lisäsalaojituksia.

3.3.2 Tutkimustulokset

Viikinmäen jätevesipuhdistamon typenpoiston ja laajennuksen tilat

Viikinmäen jätevesipuhdistamon laajennus on esimerkki kaupunkirakentamisesta, jossa samanaikaisesti rakennetaan maan alla ja päällä. Jätevesialtaiden yläpuolelle rakennetaan uutta asuinalueita tuhansille ihmisille. Maanalainen rakentaminen käynnistyi aikaisemmin, hallien kattoperät oli käytännössä louhittu ennen kuin maanpäällisten talojen perustuksia alettiin louhia.

Maanpäällisen ja maanalaisen rakentamisen sovittaminen yhtäaikaan tapahtuvaksi vaatii louhintojen osalta turvaetäisyyksien ja -aikojen sopimista. Betonivaluille ja ruiskubetonoinneille oli sovittu varmuusajat ja -etäisyydet riittävän betonin sitoutumisen varmistamiseksi. Maanpäällisillä louhinnoilla etäisyys oli 15 m, kun taas maanalaisilla louhinnoilla 50 m. Etäisyyksien erisuuruutta perustellaan maanpäällisen louhinnan vähäisyydellä, talojen pohjia ja kaivantoja piti louhia vain pienellä neliölouhinnalla.

Käytännössä maanpäällinen louhinta häiritsi maanalaista rakentamista, sillä talon pohjia louhittiin jopa 6–7 metrin kaivannoilla eikä turva-aikoja noudatettu, koska louhintaurakoitsijalla ei edes ollut tietoa maanalaisen tilan rakentamisesta. Ongelmat liittyivät tiedonkulkuun. Häiriönä on kirjattu epäily paikallisesta ruiskubetonin puutteellisesta kontaktista kallioon. Raju louhinta on oletettavasti lisännyt kallion lohkaroitumista, mutta sitä ei ole havaittu rakoilun lisääntymisenä tilan kalliopinnoilla.

Hallien holviosuudet louhittiin pilottilevennyslouhintana, reunareivät jälkilouhintana ja pohjaosuudet nostolouhintana (Kuva 32).

Esi-injektointia suoritettiin ruhjealueilla ennakkosuunnitelmien mukaisesti yht. 2,5 km injektointireikää. Injektointiaineena käytettiin Injekteringsement 30:tä ja paremman tunkeutuvuuden omaavaa Ultra finiä. Jälki-injektointia suoritettu paikallisesti vuotojen tiivistämiseen.

Ruiskubetonisalaajat (Paajanti-putkella) asennettiin joko työnaikaisen ruiskubetonikerroksen pinnalle tai suoraan kallion pintaan (Kuvat 34 ja 35). Jos salaajat asennettiin työnaikaisen ruiskubetonin pinnalle, porattiin salaajan paikalle ruiskubetoniin metrin välein \varnothing 20 mm 150 mm syviä reikiä varmistamaan veden kulkeutuminen ruiskubetonin läpi salaajaan. Salaajat ruiskubetonointiin min. 60 mm 2 ruiskutuskerroksella, työnaikaista ruiskutusta ei huomioitu kokonaispaksuudessa.

Pääsääntöisesti salaajat päätettiin tasolle +3, josta salaajaputki myöhemmin ohjattiin ruiskubetonin läpi purkamaan vedet jätevesialtaisiin, (Kuva 36). Muutamien kohdoin salaajia jatkettiin lattiarakenteisiin asti, jolloin vedet purkautuvat lattiasalaajituksen kautta pumppaamoon.



Kuva 34. Salaojien asennusta Viikinmäen jäteveden puhdistamon suodatushallissa.



Kuva 35. Salaojien liitoskohtaan liittyy usein vuotoja, koska liitoksia ei saada tiiviiksi. Huolellisella ruiskubetonoinnilla salaojat tiivistetään toisiaan ja kalliota vasten.



Kuva 36. Viikinmäen hallin 9 holvin ruiskubetonisalaojista johdetaan vesi ulos tasolla n. +3 ruiskubetonin läpi johdetusta salaojaputkesta. Vesi valuu ruiskubetonin pinnalla alapuoliseen vesialtaaseen. Kustannussyistä salaojavesiä ei haluta johtaa lattiarakenteisiin ja sieltä pumppaamoon.

Isonkylän tunneli

Turku–Helsinki moottoritie tulee leikkaamaan monia kulttuurihistoriallisesti ja maisemallisesti arvokkaita alueita. Eräs vaihtoehto säilyttää näitä maisemia on sijoittaa tie kulkemaan maan alle tunneleihin. Tunneliratkaisu poistaa korkeiden kalliomäkien avo-leikkaukset ja luo eläimille kulun ja ihmisille virkistyskäyttöön vihersillan tien yli. Isonkylän tunneli sijoittuu Paimio–Muurla moottoritieosuudelle ja on ensimmäinen moottoritietunneli Suomessa. Tunnelin ensikertaisuus asettaa erityisen huomion tunnelin eristysrakenteen valinnalle, sillä Turku–Helsinki moottoritielelle on suunniteltu vielä ainakin 6 muuta tunnelia, joiden eristysrakenteiden suunnittelussa tullaan seuraamaan Isonkylän tunnelia ja sen rakenteiden toimivuutta.

Isonkylän tunnelit sijaitsevat keski-karkearakeisessa ($V_r = 1..20$) migmatiittisessa graniittigneississä, paikoin esiintyy myös runsaasti granaattia. Päämineraalit ovat maasälvät, kiilteet ja kvartsi. Mineraalien perusteella kivi on haurasta, paikoin runsaasta kiilteiden määrästä johtuen pehmeää. Kallio on pääosin kiinteää, tihein rakoilu on harva- tai vähärakoista (Rk1-2). Kallion jakavat lohkoihin selväpiirteiset rikkonaisen kallion vyöhykkeet (RiI-IV), joissa tavataan runsaasti rapautunutta kiveä (Rp2) ja savimineraaleja (Rinne 2000).

Pohjoistunnelin vesivuodot keskittyvät pääosin rikkonaisen kallion heikkousvyöhykkeisiin, (Kuva 37), sekä tunnelia leikkaaviin pystyasentoiisiin kivilajikontakteihin, (Kuva 38).



Kuva 37. Isonkylän pohjoistunnelin tutkimusalueen paaluväliä 93950-975 hallitsee loiva-asentoinen koko tunnelia leikkaava kloriitista ja savimaisista kerroksista koostuva 0,2–1 m rikkonainen vyöhyke (RiIII-IV). Kosteutta esiintyy koko vyöhykkeen pituudelta.



Kuva 38. Pohjoistunnelissa havaittavan pystyasentoisien punertavan graniittipegmattijuoenen keskellä sijaitsevaan kvartsitäytteeseen hiertosaumaan liittyy vettä vuotava (0.5–1 l/min) halkeama.

Pohjoistunnelin holvi lujitettiin työnaikaisesti 40 mm:n ruiskubetonilla työmaa-ajoa varten. Ennen ruiskutusta vuotavimmat paikat salaojitettiin putkisalaojilla. Salaojat verhoiltiin ruiskubetonilla. Ruiskubetonikerroksen ohuuden takia sitä ei ole syytä tarkastella vesitiiviyyden kannalta, myöskään salaojitusta ei ole asennettu lopullista vesitiivyyttä silmällä pitäen.

Kohteen seurannassa pyrittiinkin vesieristerakenteiden arvioinnin sijasta kiinnittämään huomiota vesivuotojen määrän ja sijainnin vaihteluun ajan suhteen. Vuotovesimäärän muuttumista seurannan aikana on vaikea arvioida, sillä tunneliin ei päätetty rakentaa tutkimusta varten mittapatoja. Kahden käynnin perusteella voidaan ainoastaan havaita, että vuodot sijaitsevat samoissa heikkourakenteissa ja ilmenevät ruiskubetonoinnista ja salaojituksesta huolimatta samoilla alueilla tunneliprofiililla. Vuotovesien määrän uskotaan olevan suoraan riippuvainen sadannasta, sillä kohteessa ympäristön pohjavedenpinta on holvitason alapuolella ja tunneliin virtaa ainoastaan sen yläpuolisen paljaan kallion ja ohuen maapeitteen läpi suotautuva vajovesi.

Kuvan 39 tunnelin suuaukkojen ruiskubetonin voimakas halkeilu voi johtua rikkonaisesta pintakalliosta, puutteellisesta jälkihoidosta tai pakkasvauriosta. Pakkasvaurio on hyvin oletettava eristämättömässä rakenteessa.

Kuvassa 40 on esitetty kalliorakenne, joka aiheuttaa vesitiiviyyden kannalta ongelmia missä tahansa rakennuskohteessa. Jos rakoilusta on tutkimusten perusteella havaintoja, on kallion esi-injektointi varteenotettavin vesieristysratkaisu. Kuvan tilanteessa vuotoja voidaan hallita asentamalla keskeiselle kohdalle hyvin lujitettu salaoja ja ruiskuttamalla 3–4 kerrosta ruiskubetonilla >100 mm rakennekerroksena.



Kuva 39. Pohjoistunnelin länsipään suuaukon rikkonainen kallio on johtanut epätasaiseen louhintajälkeen ja aiheuttanut runsaita vesivuotoja. Kuvan yläaidassa suuaukon kauluksen betonirakenteita.



Kuva 40. Isonkylän kallion loiva-asentoiseen rakoiluun liittyvää vuotoa. Vuodot erottuvat hyvin työnaikaisen lujituksen ruiskubetonissa. Monia vuotoja on hankala salaojittaa, paksu ruiskubetonointi yhdellä keskeisellä salaojalla voisi olla vesitiiviyyden hallinnan kannalta toimiva ratkaisu.



Kuva 41. Yleinen ilmiö ruiskubetonin salaojituksessa. Salaojan kohta on kuiva ja vesi purkautuu salaojan sivuilta. Tässä tapauksessa vuotoihin osaltaan vaikuttaa työnaikaisen ruiskubetonin puuttuminen salaojan sivuilta, toisaalta salaoja ei myöskään toimi suunnitellusti.

Merihaan monitoimitila

Merihaan monitoimitilassa vesitiiviysvaatimukset ovat erityisen tiukat johtuen alueen herkistä pohjavesiolosuhteista ja rakennusten perustamistavasta. Hakaniemen torin ympäristössä on rakennuksia perustettu savipehmeiköille käyttäen myös puupaaluja, jolloin pohjaveden taso ei saa rakentamistoimenpiteiden takia alentua. Pohjaveden taso voitiin ylläpitää ainoastaan tiivistämällä kallio esi-injektointilla. Esi-injektointia suoritettiin ennen ajotunnelin louhintaa injektoimalla riskisuuntaan kallioinjektointiseinä ja tunnelinajon yhteydessä suoritettiin systemaattista esi-injektointia.

Hallien louhinta suoritettiin täysprofiililouhintana. Urakoitsija vastasi ruiskubetonirakenteen vesitiivyydestä (urakkasopimuksessa 5 vuoden vesitiiviystakuu), ja myös salaojien paikkojen määräyksestä. Urakoitsija katsoi vesitiivyyden saavutettavan ruiskuttamalla tilaan neljällä ruiskutuskerroksella n. 150 mm:n ruiskubetonirakenteen ja asentamalla vuotopaikkoihin riittävästi salaojia. Vesitiivyyden hallinnassa näytetään onnistuneen, sillä keskimääräinen vuoto koko tilaan 35 l/min alittaa vaaditun vuotovesimäärän. Tilan vuotoja seurataan myös paikallisesti tilan ollessa jaettuna eri seurantaosiin. Missään seurantaosassa ei vuotomäärissä ole ylitetty vesitiiviysvaatimuksia.

3.3.3 Yhteenveto seurantatutkimuksista

Seurantakohdetutkimuksien tavoite oli seurata vuotovesikartoituksilla vuotojen käyttäytymistä ajan suhteen ja selvittää vuotoihin vaikuttavia syitä. Tilan vuotojen seuranta varten tarvittiin lähtöaineistona yksityiskohtainen rakennusgeologinen kartoitus yhdistettynä vuotokartoitukseen, tarkka dokumentointi tilan rakenteista ja tapahtumista, jotka voisivat vaikuttaa pohjavesien virtaukseen kalliossa ja vuotovesien esiintymiseen tilassa.

Isonkylän tietunnelin ja Viikinmäen laajennuksen tutkimuksen aikaisen seuranta tapahtui kahdella noin vuoden välein suoritetulla kohdekäynnillä. Vuotojen seuranta paikan päällä huonoissa valaistus- ja näkyvyysolosuhteissa, rakennusgeologisen kartoituksen tietojen ja vuotojen tarkka paikantaminen mittamalla ja digitaalikuvarastelussa osoittautui mahdottomaksi käytettävissä oleviin resursseihin nähden. Syy-seurausilmiöiden havaitseminen olisi vaatinut tarkan paikantamisen lisäksi tapahtumien jatkuvaa kirjaamista ja muutosten seuranta kohteissa. Alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen kohdekäynneillä pyrittiinkin yksittäisten vuotopisteiden seuraamisen sijasta saamaan yleiskuva kohteen vesitiivyydestä ja tiiviyteen vaikuttavista tekijöistä.

Kohteiden seuranta antoi myös tutkijalle mahdollisuuden konkreettisesti havaita niitä vaikeuksia, joita esiintyy vesitiivyyden hallinnassa tilan rakentamisen aikana. Seuranta-kohteiden suurin anti tutkimusta ajatellen oli kohteiden rakentamisen loppuvaiheilla suoritettujen työmaapäälliköiden ja vastaavien mestareiden haastattelut. Haastattelujen yhteydessä kirjattiin monta parannusehdotusta, joilla vesitiivyyttä voidaan parantaa maanalaisessa rakentamisessa. Nämä ehdotukset huomioitiin laadittaessa luvussa 5 esitettyjä toimenpide-ehdotuksia.

4. Vesitiiviyyden hallinta-analyysi

4.1 Hallinta-analyysi

Tutkimustuloksien ja kenttähavaintojen ollessa selvillä on tarpeen kehittää välineitä maanalaisten tilojen vesivuotojen syy-yhteyksien selvittämiseen ja vesitiiviyyden hallintaan yleisellä tasolla. Hallinta-analyysissa arvioidaan systemaattisesti eri vesitiiviyteen vaikuttavien tekijöiden vuorovaikutuksia, jolloin analyysin tuloksena voidaan osoittaa ne tekijät, joihin kalliorakennusalalla tulee ensisijaisesti kohdentaa ne toimenpiteet, joilla nopealla aikataululla ja rajatuilla resursseilla hallitaan kalliotilojen vesitiiviyttä sekä estetään vesivuodot. Vesitiiveyden hallintaa on tarkasteltu sekä tilan tiiveyden että ympäristön hallinnan kannalta.

Kalliotilojen vesivuotoihin vaikuttaa useita tekijöitä, joiden painoarvo on vaikeasti määritettävissä. VTT:n Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka on yhdessä BBK Rock Design Oy:n kanssa soveltanut RES-menetelmää analysoidessaan vesitiiveyteen vaikuttavia tekijöitä. Analyysi kattaa koko kalliorakentamisen tuotantoketjun tilauksesta käyttöönottoon.

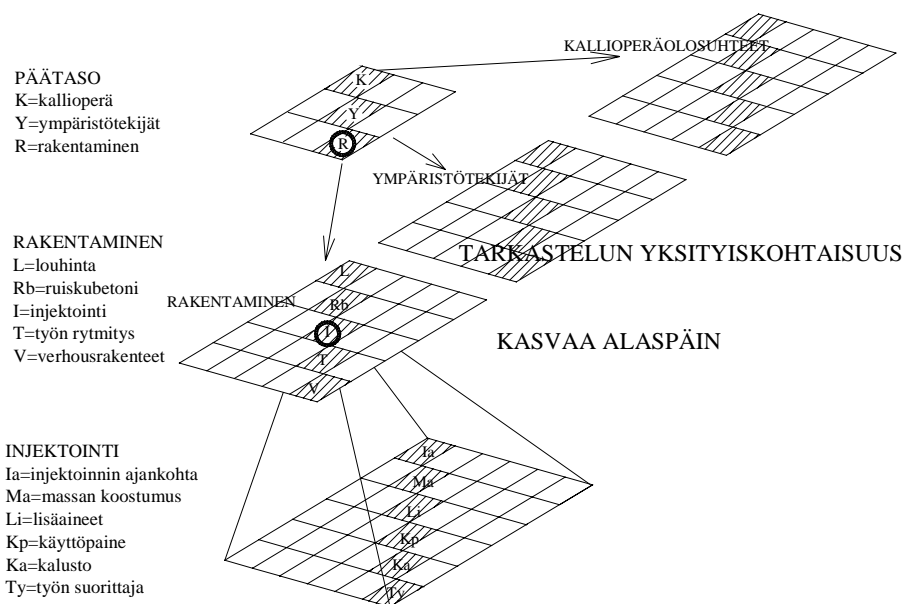
Analyysia on sovellettu yleistapaukselle ja testattu toteutuneella kohteella, Leppävaaran kalliopysäköintilaitoksella. Testaukseen osallistui tilan suunnittelija Matti Kokko Insinööri-toimisto Saanio & Riekkola Oy:stä.

Hallinta-analyysista on tehty erillinen VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkimusraportti n:o RTE 1856/02, jossa RES-analyysin rakenne, vuorovaikutusmatriisit, -diagrammit ja tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti. Tässä julkaisussa kuvataan vain pääpiirteittäin analyysin rakenne ja sen soveltaminen kalliotilojen vesitiiviyyden hallintaan. Analyysin käytettiin eräänä työkaluna määritettäessä luvussa 5. esitettyjä toimenpide-ehdotuksia.

4.2 RES-analyysi

4.2.1 RES-analyysin soveltaminen

RES (Rock Engineering System) on englantilaisen professori John Hudsonin kehittämä apuväline monimutkaisten kallioteknisten ilmiöiden analysointiin (Hudson 1992). RES-analyysissä tutkittavaa ilmiötä lähestytään ylhäältä alaspäin. Tutkittavaan ilmiöön vaikuttavien tekijöiden tarkastelu aloitetaan laajoista asiakokonaisuuksista, joiden vuorovaikutuksia selvitetään yleisellä tasolla. Yleiseltä tasolta siirrytään yhä yksityiskohtaisempien tekijöiden merkitysten ja vuorovaikutusten arviointiin, (Kuva 42).



Kuva 42. RES-analyysin tarkentuminen yleispiirteisestä tarkastelusta yksityiskohtaiseen tarkasteluun.

Menetelmällä pyritään selvittämään, mitkä tekijät ohjaavat systeemiä (prosessia, ilmiötä) ja mihin systeemin osatekijöihin voidaan vaikuttaa. RES-analyysi auttaa monimutkaisten syy-seuraussuhteiden tutkimista. Analyysi on ohjattu ja dokumentoitu tapa selvittää tilan vesitiivyyteen vaikuttavien tekijöiden vuorovaikutuksia. Analyysi mahdollistaa tekijöiden numeerisen arvioinnin ja keskinäisen vertailun ja erottaa vesitiivyyden kannalta merkittävät ja kriittiset tekijät vähemmän merkittävistä.

Kuvassa 43 on esitetty pisteytetty matriisi neljän tekijän vuorovaikutuksista kuvitteellisissa kallio-olosuhteissa. RES-analyysissä tutkittavaan ilmiöön vaikuttavat tekijät sijoitetaan matriisiin (Kuva 43a) ja kunkin tekijän vaikutus jokaiseen muuhun tekijään arvioidaan (Kuva 43b). Arvio on kaksisuuntainen. Esimerkiksi ensin arvioidaan kallion rakenteen vaikutus vallitsevaan jännitystilaan, toisen suuntaan arvioidaan jännitysten vaikutus kallion rakenteeseen. Arviointi on subjektiivinen ja se perustuu tekijän asiantuntemukseen kallio-tilojen vesitiivyyteen vaikuttavista tekijöistä.

Vuorovaikutusmatriiseissa esitettyihin tekijöihin voidaan liittää arviointia helpottavia kuvaelmia, joista käy ilmi, miten tekijän katsotaan liittyvän ja vaikuttavan tilan vesitiivyyteen (Kuva 43a).

KALLIOPERÄOLOSUHTEIDEN JA LOUHINNAN VUOROVAIKUTUS MATRIISI					
<u>Kallion rakenne</u> P1	Ruhjeet muuttavat jännitysten suuntaa ja suuruutta	Rakosysteemi vaikuttaa kallioieran vedenjohtavuuteen	Rakosuunta voi vaikuttaa kallioieran suuntaukseen tai kokoon		
Kalliojännitys voi avata, sulkea tai synnyttää uusia rakoja	<u>Jänn. tila</u> P2	Korkea normaalijännitys pienentää vedenjohtavuutta	Korkea jännitystila voi aiheuttaa ongelmia louhinnalle		
Veden virtaus huuhtoo rakotäyteitä/ muuttaa raon ominaisuuksia	Vesipaine pienentää rakojen norm. jännitystä	<u>Veden johtav.</u> P3	Suuret vesivuodot vaikeuttavat louhintaa => injektointi		
Louhinta aiheuttaa rakoilua / avaa vahvoja rakoja	Louhos muuttaa pääjännitysten suuntaa ja suuruutta	Pohjaveden pinnan alainen louhinta muuttaa virtausolosuhteita	<u>Louhinta</u> P4		

PISTEYTETTY VUOROVAIKUTUS-MATRIISI					
<u>Kallion rakenne</u> P1	3	4 kriittinen	3		10
1	<u>Jänn. tila</u> P2	1	2		4
1	1	<u>Veden johtav.</u> P3	3		5
2	4 kriittinen	3	<u>Louhinta</u> P4		9
	Σ 4	Σ 8	Σ 8	Σ 8	

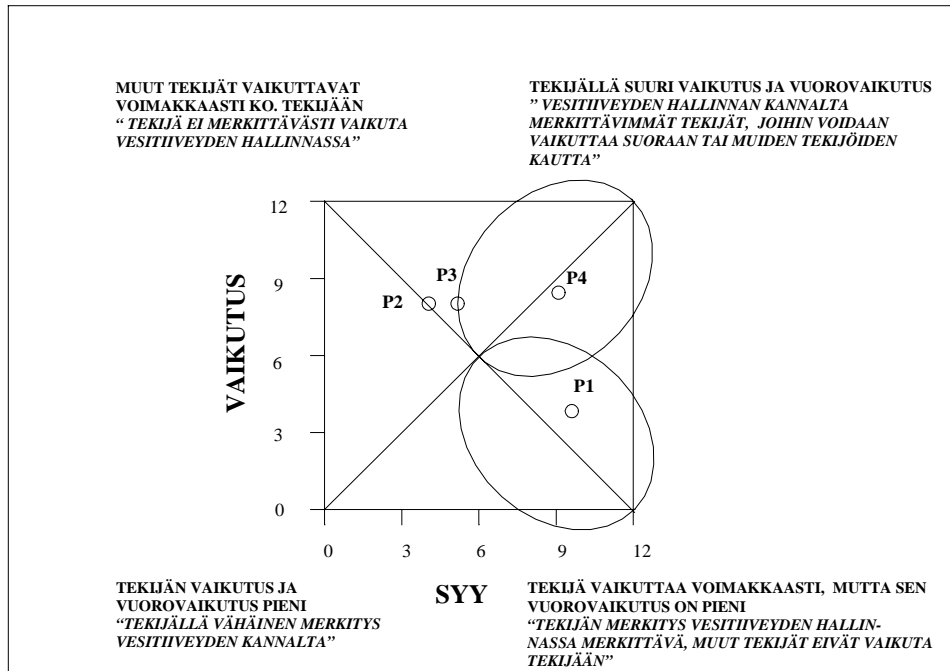
Kuva 43. Vasemmalla 4 x 4 RES-vuorovaikutusmatriisi (a), oikealla tekijöiden pisteytys tietyissä kalliorakennusolosuhteissa (b).

Vuorovaikutuksen suuruutta voidaan kuvata usealla tavalla. Yksinkertaisimmillaan vuorovaikutus analysoidaan 0/1 asteikolla; tekijöillä ei vuorovaikutusta / tekijät vuorovaikutuksessa keskenään.

Esimerkissä ja tämän tutkimuksen yhteydessä käytettiin arvioinnissa seuraavaa asteikkoa:

- 0 Ei vaikutusta tai vaikutus merkityksetön
- 1 Heikko vaikutus
- 2 Kohtalainen vaikutus
- 3 Voimakas vaikutus
- 4 Kriittinen vaikutus.

Jokaiselle tekijälle määritetään koordinaatti summaamalla kuvan 43b matriisin vaaka- ja pystysarakkeen arvot, minkä jälkeen kunkin parametrin koordinaattipari siirretään vuorovaikutusdiagrammiin (Kuva 44). Diagrammia tulkittaessa tulee kiinnittää huomiota vesitiiviyden hallinnan kannalta merkittäviin tekijöihin, ts. tekijöihin, jotka ovat syynä vuotoihin joko itsenäisinä (oikea alakulma) tai vuorovaikutuksessa muiden tekijöiden kanssa (oikea yläkulma). Kyseisiä alueita kuvataan diagrammissa syy-vaikutus-ellipseillä.

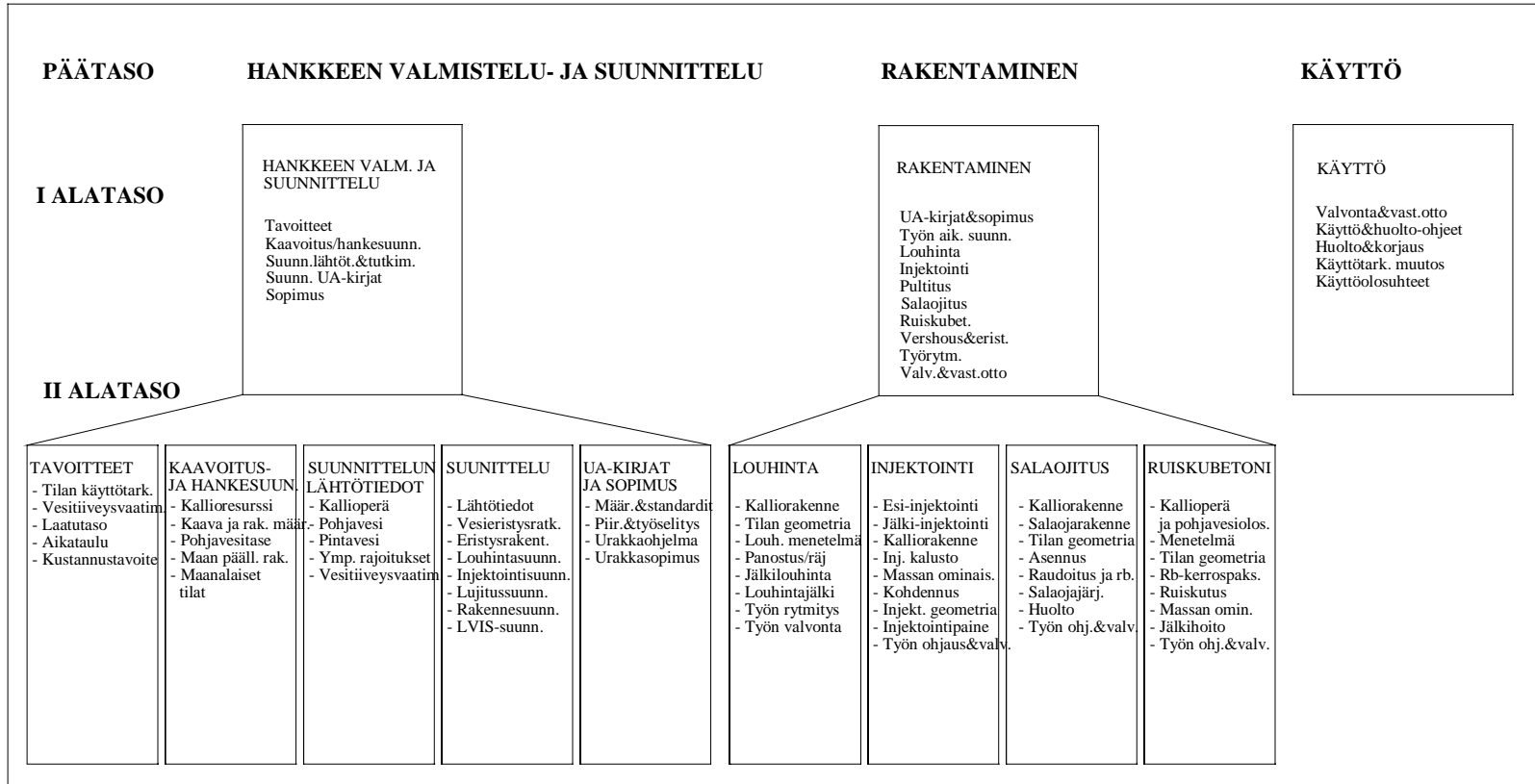


Kuva 44. Vuorovaikutusdiagrammi ja sen tulkinta.

Kuvasta 44 näemme, että kuvitteellisessa esimerkkitapauksessa louhinta (P4) on eniten vuorovaikutuksessa kallio-olosuhteita kuvaavassa systeemissä. Kallion rakenne (P1) vaikuttaa eniten muihin tekijöihin, toisaalta muiden tekijöiden vaikutus kallion rakenteeseen on vähäinen. Jännitystilän (P2) ja kalliooperän vedenjohtavuus (P3) ovat muita tekijöitä herkempiä kallio-olosuhteissa tapahtuville muutoksille.

4.2.2 Analysoitavat prosessit ja vuorovaikutusmatriisit

Maanalaisen tilan vesitiiveyteen vaikuttavien tekijöiden arviointi on tehty yleiselle tapaukselle. Analysointi aloitettiin arvioimalla hankesuunnittelun, rakentamisen ja käytön vaikutusta tilan vesitiiveyteen muodostamalla kyseisistä hankevaiheista koostuva päämatriisi (1. taso). Hankevaiheita tarkasteltiin yksityiskohtaisemmin omilla vuorovaikutusmatriiseilla (2. taso). Näiden vaiheiden osatekijöitä analysoitiin yksityiskohtaisemmin vielä alemman tason matriiseilla (3. taso) (Kuva 45).



Kuva 45. Kalliotilan vesitiiviyyden hallintaan vaikuttavien tekijöiden matriisihierarkia.

Kuvassa 45 on esitetty alimmalla II tasolla kaikkien niiden I tason osatekijöiden alamatriisit, joista voidaan muodostaa omat vuorovaikutusmatriisit. Ne tekijät, joista matriiseja ei ole muodostettu, voivat silti yksittäisinä vaikuttaa merkittävästi vesitiivyyteen olematta vuorovaikutuksessa muihin tekijöihin. Nämä vesitiivyyteen vaikuttavat tekijät huomioidaan laadittaessa toimenpide-ehdotuksia, vaikka niitä ei ole RES-analyysin vuorovaikutusmatriiseissa arvioitu.

4.2.3 RES-analyysin tulokset

RES-analyysin perusteella etenkin vesitiiveystavoitteen asettamisen merkitys korostuu kalliotilan vesitiiveyden hallinnassa. Tämä ei liene kovin yllättävä tulos, vaikkakin tarkojen vesitiiveystavoitteiden asettaminen hankkeen varhaisessa suunnitteluvaiheessa on harvinaista. Vaikka tiivystaso määritetään joko käyttö- tai ympäristövaatimusten tai näiden molempien perusteella, on vesitiivystavoitteisiin yltäminen vaikeaa vaatien suunnittelulta hyvää tietämystä vesieristerakenteista sekä urakoitsijalta laadukasta työn suoritusta. Pääasia tavoitteiden määrittämisessä on, että suunnittelija ja tilaaja tiedostavat vesitiivyyteen liittyvät asiat, jotta hankkeen aikataulussa ja kustannuksissa varaudutaan riittävästi hallitsemaan tilan vesitiiviyttä.

RES-analyysi on laadittu yleiselle tapaukselle, ts. tarkastelemaan maanalaisessa rakentamisessa yleisesti havaittavia tilan vesitiivyyteen vaikuttavia tekijöitä. Yleistapauksessa tekijöiden vuorovaikutusten arviointia vaikeutti kuvitteellisen kohteen yleisluonteisuus, tekijän arvioidaan helposti vaikuttavan vesitiivyyteen sekä vuorovaikuttavan muihin tekijöihin ääritapausten puuttuessa.

Yleisen tapauksen matriiseja voi soveltaen käyttää tiettyyn hankkeeseen ja arvioida hankkeen herkkyys eri tekijöille. Analyysi antaa rajattoman mahdollisuuden laajentaa matriisihierarkiaa yhä yksityiskohtaisempien tekijöiden keskinäiseen arviointiin. Mitä yksityiskohtaisemmin hanke ja siihen vaikuttavat tekijät tunnetaan, sen luotettavampia johtopäätöksiä voidaan analyysin avulla tehdä.

RES-analyysin tulokset yleistapaukselle ja Espoon Leppävaaran pysäköintilaitokselle esitetään VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkimusselostuksessa nro RTE1856/02.

5. Toimenpide-ehdotukset vesitiiviyyden parantamiseksi

5.1 Toimenpide-ehdotusten perusteet

Tässä tutkimuksessa esitettävät kalliotilojen ja tunneleiden vesitiiviyyden parantamiseen tähtäävät toimenpide-ehdotukset perustuvat seuraavaan tutkimusaineistoon:

- kohdetutkimuksiin vesivuotojen syistä (11 kohdetta)
- vesitiiviyyden hallinta-analyysin (Rock Engineering System, RES-analyysi) tuloksiin
- rakentamisen aikaisiin seurantatutkimuksiin (3 seurantakohdetta)
- projektin johtoryhmän ja seurantaryhmän asiantuntijaohjaukseen
- projektin aikana haastateltujen suunnittelijoiden, urakoitsijoiden, rakennuttajien ja muiden asiantuntijoiden kokemuksiin
- muiden pohjoismaiden sekä myös kansainväliseen käytäntöön vesitiiviyyden hallinnassa.

Toimenpide-ehdotukset luetellaan seuraavissa kappaleissa aihepiireittäin. Toimenpide-ehdotukset on numeroitu, jotta niihin voidaan helposti viitata esim. suoritettaessa ehdotusten priorisointia kappaleessa 6. Numerosarjan alku viittaa toimenpide-ehdotusta käsittelevään kappaleeseen ja lopun väliviivalla erotettu luku juoksevaan järjestysnumeroon.

5.2 Kalliorakentamisen toimintaprosesseihin liittyvät toimenpide-ehdotukset

5.2.1 Vesitiiviystason määrittäminen

Vesitiiviystaso tai vesitiiviysvaatimukset sekä keinot, joilla tiiviystaso saavutetaan, voivat jäädä määrittämättä hankkeen valmisteluvaiheessa. Tämä voi tapahtua usein varsinkin maanalaisten tilojen kertarakennuttajien kohdalla. Kalliotilojen rakennuttamiseen tottumaton rakennuttaja olettaa saavansa kuivan kalliotilan, asennetaanhan sinne paljon salaojaputkia ja jopa mahdollisesti tiivistetään kalliota. Suunnittelijat puolestaan ovat olettaneet vanhojen ratkaisujen toimivan ja jos vähän vesivuotoja on esiintynyt, on asennoiduttu niin, etteivät ne ole olleet mitenkään poikkeuksellisia kalliotiloissa. Suunnittelussa on helposti paneuduttu esim. tilasuunnitteluun, louhintaan ja lujitukseen ja jätetty vesitiiviyyden kokonaisvaltainen suunnittelu vähäisemmälle.

Vesitiiviysvaatimuksia tulisi tarkastella kahdesta näkökulmasta, ts. vaaditaanko vesitiiviyttä ympäristövaatimuksien vai tilan käytön ja toiminnan perusteella. Jako perustuu siihen, että esim. tiukat ympäristövaatimukset täytetään ainoastaan injektoimalla vettä johtava kallio tai mitoittamalla kalliotilan/tunnelin vesieristys täydelle pohjavedenpaineelle kun taas käyttöä varten tiiviys voidaan saavuttaa usealla tavalla, esim. injektoinilla, eri vesieristerakenteilla sekä salaojituksella. Salaojitetussa ratkaisussa vesieristerakenteet eivät välttämättä täytä ympäristön asettamia vaatimuksia, sillä ratkaisussa vaikutetaan aina ympäristön pohjavesiolosuhteisiin sallimalla veden kulkeutua tilan kivi- ja maajärjestelmään kalliotilan toimiessa eräänlaisena suurena salaojana. Muuttuvaa pohjavesitasetta voidaan normalisoida korvaavalla toimenpiteellä esim. imeyttämällä, mutta se ei ole kustannustehokas eikä kestävä ratkaisu.

Suunnittelijalla on keskeinen rooli vesitiiviysvaatimusten määrittämisessä tilaajan tai rakennuttajan kanssa. Suunnittelijan tulee tietää rakenneratkaisut, joilla vaatimukset täytetään, sekä tietää niiden vaikutukset rakentamisaikatauluun ja kustannustasoon. Suunnittelijan on perusteltava tilaajalle tai rakennuttajalle tarvittavat vesieristeratkaisut, jotta ne voidaan sisällyttää täysimääräisinä suunnitelmiin ja hankkeen kustannusarvioon.

Toimenpide-ehdotus:

5.2.1 – 1 Kalliorakentamiseen tulee kehittää vesitiiviysluokitus, joka sisältää valintakriteerit ja sellaiset vesieristysratkaisujen rakenneluokat, joilla saavutetaan vaadittava tilan käyttötarkoituksen ja ympäristöolosuhteet huomioon otettava vesitiiviystaso. Valintakriteereissä voidaan arvioida myös eri rakenneluokkien vaikutuksia hankkeen rakennusaikatauluun ja -kustannuksiin. Luokituksen pohjalta voidaan valita olosuhteisiin nähden kustannuksiltaan optimaalisin rakennustapa halutulle/vaaditulle tiiviystasolle.

5.2.2 Vesitiiviysvaatimusten vaikutus rakennusaikatauluun ja kustannuksiin

Suunnittelija määrittelee vesieristysrakenteet ja samalla esittää tilaajalle niiden vaikutukset toteutusaikatauluun ja kustannuksiin. Suunnittelijan on kyettävä mitoittamaan rakenteet sovitun vesitiiviyyden mukaisiksi aikataulu- ja kustannusraamin täyttäen. Vesieristysratkaisujen, esimerkiksi injektoinnin, kustannus- ja aikatauluvaikutuksia ei riittävästi huomioida hankkeen suunnittelussa ja hankkeen toteutusvaiheessa se on myöhäistä tai ne aiheuttavat suuria ongelmia hankkeen toteutukseen. Aikataulu- ja kustannussyistä tilaaja tai rakennuttaja usein tinkii vesieristysratkaisuista, elleivät ne sisälly urakka-asiakirjoihin.

Rakentamisen aikana urakoitsijalla ei käytännössä ole enää mahdollisuuksia vaikuttaa vesitiiviysrakenteisiin kuin siinä määrin, että tilanteen salliessa jossain kohdin vähennetään ja toisaalla lisätään vesieristerakenteita kokonaismäärien pysyessä melko muuttamattomina. Urakoitsijan vastuulla on rakentaa vesieristeet suunnitelmien mukaan aikataulun ja kustannustason mukaisesti.

Injektointi

Kallion onnistunut tiivistäminen vaatii esi-injektointia, joka suoritetaan integroituna tunneliporaukseen. Peränajon yhteydessä suoritetaan tunnusteluporausta, joka ulottuu vähintään 14 m (kaksi katkoa) tunnelin perän edelle. Tunnustelurei'issä suoritetaan vesimenekikokeet, joiden tuloksien perusteella päätetään esi-injektoidaanko edessä oleva kallio. Jos päätetään automaattisesti injektoida koko tunneli esim. vakioviuhkalla, puhutaan systemaattisesta esi-injektoinnista. Tällöin vesimenekikokeet ovat tarpeettomia. Injektoinnin kokonaiskustannukset eivät varmasti paljoakaan kasva systemaattisella injektoinnilla verrattuna siihen, mitä ne olisivat injektoidaessa tunnusteluporauksien ja vesimenekikokeiden perusteella, varsinkin jos kallion oletetaan olevan vaihtelevan rikkonaista. Ehjässä kalliossa systemaattinen injektointi tulee kyseeseen vain vuotoja varmistavana toimenpiteenä vaadittaessa tunnelilta täyttä vesitiiviyttä herkällä pohjavesialueella.

Jälki-injektointia suositellaan ainoastaan yksittäisten vuotojen tiivistämiseen, ts. parannetaan esi-injektoinnin jälkeen edelleen vuotavan kallion tiiviyttä. Tunnelin tiivistäminen pelkästään jälki-injektointina ei ole kustannustehokasta, eikä paikoitellen tehtynä johda onnistuneeseen tulokseen vuotojen siirtyessä injektioimattomalle alueelle.

Esi-injektointi rytmitetään yhdeksi tuotantovaiheeksi tunnelilouhinnan lomaan, joten sillä on hyvin kriittinen vaikutus louhinnan aikatauluun. Jälki-injektointi ei ole sidottu muuhun louhintaan, sitä voidaan suorittaa, kun mestaa on vapaana, mutta viimeistään ennen lopullista lujitusta.

Vaikka injektointiin liittyvät työ- ja kalustokustannukset olisivat melko tarkasti määritettävissä, epävarmuus kokonaiskustannuksista liittyy sementtimenekin vaihteluista kallion rakoilusta johtuen. Pyrittäessä tiivistämään pienetkin raot mikrosementeillä voivat sementin kustannusvaikutukset olla hyvinkin suuret.

Toimenpide-ehdotus:

5.2.2 – 2 Kallion tiivistämiseen tähtäävä injektointisuunnitelma tulee laatia riittävän ajoissa ja riittävän yksityiskohtaisesti samanaikaisesti louhintasuunnittelun kanssa, jotta injektoinnin aikataulu- ja kustannusvaikutukset sekä louhinta- ja injektointitöiden rytmitys voidaan suunnitella ja toteuttaa hallitusti ja kustannustehokkaasti aiheuttamatta odottamattomia ja kalliita yllätyksiä peränaioon.

Louhinta

Pyrittäessä tunnelilouhinnassa varovaiseen louhintaan, esimerkiksi ruhjeen kohdalla, keinoina käytetään lyhyttä katkoa ja pientä momentaanista räjähdysainemäärää. Varovainen louhinta johtaa tuotannon hidastumiseen ja rakennusajan pidentymiseen. Tällä on aina vaikutusta myös kustannuksiin. Tilaaja ilmoittaa jo tarjouspyynnössä sidotut määrät lyhyellä katkolla ja pienellä momentaanisella räjähdysainemäärällä suoritettavalle louhinnalle. Toteutuman mukaan urakoitsijaa hyvitetään tai veloitetaan urakoitsijan ilmoittaman yksikköhinnan mukaan. Usein esiintyy tarve suorittaa kyseistä louhintaa suunniteltua enemmän, mutta kustannusvaikutusten takia tilaaja ei suostu kalliimpaan louhintaan, vaan louhintaa suoritetaan pidemmällä katkolla ja suuremmalla momentaanisella räjähdysainemäärällä. Tästä seuraa rikkonaisella kallio-osuudella epätasainen louhintajälki ja rikkonaisempi mahdollisesti vuotava kallio.

Ehjässä kivessä tunnelilouhintaa on kustannustehokkainta suorittaa täysprofiililla, tällöin myös esi-injektointi voidaan tehdä kerralla koko profiilille peränaioon rytmittynä. Tasaisin louhintajälki saavutetaan louhimalla reunareivät jälkilouhintana, mutta se hidastaa tuotantoa ja lisää louhintakustannuksia.

Ruiskubetoni

Ruiskubetoni ei ole nykyisillä rakennepaksuuksilla vesitiivis rakenne, vaan sillä on ainoastaan vettä pidättävä ominaisuus. Ruiskubetonin suunniteltua rakennepaksuutta lisäämällä vähennetään kuitenkin ruiskubetoniin liittyviä kosteusongelmia. Ruiskubetonoinnissa eniten maksaa työ, jolloin tarkoituksen mukaista olisi ruiskuttaa kerralla paksumpia kerroksia. Ruiskubetonoinnin reaalihintana on alentunut 30 vuoden aikana niin, että 1960–70-luvulla käytettyä 60–70 mm:n rakennepaksuutta vastaavalla hinnalla voidaan nykyisin ruiskuttaa kymmenkertainen rakennepaksuus. Nykyään voidaan lisäaineita käyttämällä tarvittaessa saavuttaa kerralla jopa useiden satojen mm:ien ruiskutuspaksumuksia, mutta kerralla ruiskutettavan betonikerroksen liiallisessa kasvattamisessa esiintyy vaara, että paksut kerrokset irtoavat ruiskutus pohjasta, jolloin kerrosten väliin jää onkaloita. Hyvä kontakti ruiskutus pohjaan saavutetaan esim. 30–40 mm:n kerros-

paksuudella, jolloin kolmella ruiskutuskerralla voidaan ruiskuttaa vähintään 100 mm:n ruiskubetonirakenne, jota voidaan pitää riittävänä rakennepaksuutena pyrittäessä ruiskubetonilla hallitsemaan tilan vesitiivyyttä. Ruiskubetonin kerrospaksuuden lisäyksellä on vain vähäinen vaikutus rakennuskustannuksiin lähinnä betonimenekin lisäyksen kautta. Nykyisin käytettävällä märkaseosmenetelmällä ja keskimäärin 70 mm:n rakennepaksuudella ruiskubetonin kustannusjakauma materiaali-/työosuus on noin 30/70 %. Jos kerrospaksuutta lisätään esimerkiksi 70 mm:stä 100 mm:iin kasvaa materiaalimenekki noin 40–50 %, mutta ruiskutustyön osuus huomattavasti vähemmän. Jos ruiskutettavien kerrosten määrä pysyy entisellään ja lisätään ainoastaan ruiskutettavien kerrosten paksuutta siten, että saavutetaan vähintään 100 mm:n rakennepaksuus, ruiskubetonoinnin kokonaiskustannus kasvaa noin 20–30 %.

Ennen louhinta ja lujitus olivat erillisiä urakoita ja niihin oli varattu riittävästi aikaa. Nykyisin kummatkin kuuluvat samaan urakkaan ja ne tehdään peräkkäin toisiinsa kiinteästi liittyen tiukalla aikataululla, ts. louhinnan jälkeinen kallion deformaatio (jota pultitus ei estä) ei enää tapahtua siinä laajuudessa, että merkittävät raot olisivat muodostuneet ja jo olemassa olevat raot olisivat avautuneet ennen tilan lujituksen viimeistelyä ruiskubetonilla. Tämä johtaa ruiskubetonin halkeiluun kallion deformaation takia.

Salaojitus

Salaojitusta lisäämällä voidaan parantaa tilan vuodottomuutta, varsinkin kun salaojat asennetaan toimiviksi. Salaojaa ei pidä asentaa, jos sitä ei saada toimivaksi kallion pintageometriasta johtuen. Tällöin vuotoa pitää rajoittaa injektoinnilla ja paksuntamalla ruiskubetonilla. Jos salaojitusta tihennetään, se johtaa myös ruiskubetonointityön kasvuun. Salaojitus on toistaiseksi hyvin pitkälti käsityötä, joka sitoo kaksi miestä asennukseen.

Eristysrakenteet, pinnoitteet

Eri vesieristerakenteet (verhoukset, komposiittirakenteet, pinnoitteet) ovat vaihtelevan hintaisia, riippuen rakenteen koostumuksesta ja sille asetetuista muista vaatimuksista (lämmöneristävyys, lujitus, paloturvallisuus, jne.). Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että mitä vesitiiviimpi eristerakenne, sitä kalliimpi se on.

5.2.3 Vesitiiviyyden varmistus ja laadunvalvonta

Työnaikaisen suunnittelun ja asiantuntijavalvonnan lisääminen vesitiiviysratkaisuisissa

Työnaikaisen suunnittelun ja asiantuntijavalvonnan merkitys on suuri maanalaisessa rakentamisessa, jossa vesitiiviyteen liittyvät tekijät eivät ole välttämättä tarkasti tiedossa suunnitteluvaiheessa, vaan ne tarkentuvat vasta rakentamisen aikana.

Tilat voidaan suunnitella vedenpitäviksi valitsemalla jo suunnitteluvaiheessa täysin vedenpitävät rakenneratkaisut, mutta tähän tilaaja ei yleensä suostu kustannuksiin vedoten. Tilaaja haluaa kevennettyjä ratkaisuja, kuitenkin vesitiiviyydestä tinkimättä.

Tavallisesti vesitiiviyttä lähdetään tavoittelemaan perinteisin keinoin: kallion vedenjoh-tavuuden perusteella suunnitellaan joillekin osuuksille esi-injektointia ja kasvatetaan mahdollisesti ruiskubetonipaksuutta. Lisäsalaojia voidaan asentaa yksikköhintaan vuo-tavimmille osuuksille.

Käytännössä olosuhteet ovat usein lähtötietoja huonommat ja rakentamisessa päädytään tilanteeseen, jossa suunnittelija joutuu sidotuilla määrillä ja kustannuksilla optimoi-maan ne käytettävissä olevat vaihtoehdot, joilla kustannustehokkaasti voidaan saavuttaa tilaajan odotukset vesitiiviyydestä. Tämä vaatii suunnittelijalta jatkuvaa tilanteen seu-rantaa ja osallistumista työn valvontaan sekä tarvittaessa välitöntä työnaikaista suunnit-telua. Vesitiiviyyden saavuttaminen sovitulla kustannustasolla saattaa olla mahdotonta, rakenneratkaisut olisi pitänyt alun alkaen suunnitella toisin ja eri budjetilla.

Nykyisin KAT85 (kalliorakentamisen tehtäväluettelo) opastaa sopimustekniikassa sisäl-lyttämään suunnitteluun työnaikaista työpanosta määrätty määrä, joka katsotaan riittä-väksi suunnitelmien tarkistamiseen ja suunnittelijan osallistumiseen työnaikaiseen val-vontaan. Lisätöistä sovitaan suunnittelijalle maksettavaksi erillinen palkkio. Palkkion suuruus tuottaa usein kiistaa, sillä tilaaja mieltää työn sisältyvän suunnittelusopimuk-seen. Sopimustekniikassa tulisikin tarkasti rajata ja erottaa sopimukseen kuuluvat ja lisäpalkkioon oikeuttavat työt, tai varata jo suunnittelusopimuksessa riittävästi työ-panosta työnaikaiseen suunnitteluun ja asiantuntijavalvontaan.

Toimenpide-ehdotus:

**5.2.3 – 3 Työnaikaista suunnittelua ja asiantuntijavalvontaa tulee lisätä erityi-
sesti vaativan vesitiiviytason rakenteissa, jotka määrittellään vesitiiv-
iysluokituksessa. Suunnittelijan tulee hallita keinot, miten tällaisis-
sa tapauksissa vesitiiviyys saavutetaan. Rakennuttaja voi käyttää**

suunnitteluvaiheessa myös ulkopuolista laadunvalvojaa valvomaan suunnittelutyötä suoraan rakennuttajan alaisuudessa.

5.2.3 – 4 Ylimääräinen työaikainen suunnittelu ja asiantuntija-valvonta tulee sisällyttää suunnittelusopimukseen ja niiden tulee olla tiedossa myös urakkasopimusvaiheessa.

5.2.3 – 5 Kehitetään vesitiiviuden varmistus- ja laadunvalvontaohje, joka ohjaa ja tukee suunnittelijaa, urakoitsijaa ja työmaan paikallisvalvojaa tilan rakentamiseen liittyvien vesitiiviystekijöiden hallinnassa.

Työsuorituksen mittaus- ja laadunvalvontamenetelmien kehittäminen

Toteutuneiden yksikkömäärien (maksuperusteisen) kirjaamisen lisäksi on vaadittava työsuorituksen arviointia, jossa kuvataan miten hyvin ja millä keinoin asetetut tavoitteet on saavutettu. Ammattitaitoiset suunnittelijat valvovat tehokkaasti ja urakoitsijat pyrkivät kehittämään omaa laadunvalvontaansa, mutta silti edelleen tarvitaan työsuoritusten onnistumisen mittaamiseen ja laadunvalvontaan uusia menetelmiä, jotka erityisesti kohdennetaan vesitiiviuden hallintaan.

Toimenpide-ehdotus:

5.2.3 – 6 Uuden maankäyttö- ja rakennuslain mukaan työsuorittajalla on velvollisuus pitää yllä työsuoritusten valvontaa ja siihen liittyvää dokumentointia. Vesitiiviuden kannalta kriittisten työsuoritusten laadunvalvonta voidaan sisällyttää ja sen taso todentaa työmaan laadunvarmistussuunnitelmasta jo ennen työsuorituksen toteutusta.

5.2.3 - 7 Laaditaan laadunvarmistussuunnitelmaan sisältyväksi vesitiiviuden kannalta merkittävien työsuorituksen arviointiin ja laadunvalvontaan apuvälineeksi hankekohtaiset laadunvalvontakortit, joissa kuvataan injektoinnin, louhinnan, pultituksen, salaojituksen, ruisku-betonoinnin, vesieristeiden ja jälkikorjausten vesitiivyyteen liittyviä asioita. Laadunvalvontakortit allekirjoittaa sekä urakoitsija, että rakennuttajan paikallisvalvoja. Laadunvalvontakortit voisivat sisältyä liitteinä vesitiiviuden varmistus- ja laadunvalvontaohjeeseen.

5.2.3 – 8 Kehitetään laadunvalvontaan käytettäviä mittaus- ja todentamismenetelmiä, joilla ohjataan työsuorituksen toteutusta ja mitataan toteutunutta (esim. lasermittaus, vesimenekkikoe, paikallinen vuotovesimittaus jne.).

- 5.2.3 – 9 Tilan kokonaisvuotovesimäärää mittaamalla seurataan ympäristövaatimusten perusteella asetettuja tilan vesitiiviysvaatimusten toteutumista. Vuotovesimäärän mittaus ja seuranta on suunniteltava erikseen työn- ja käytönaikaiseksi.**

5.3 Tuotantoprosesseihin liittyvät toimenpide-ehdotukset

5.3.1 Hankkeen valmistelu ja suunnittelu

5.3.1.1 Tavoitteet

Maanalaisen rakennushankkeen valmistelussa tulisi suunnittelijan olla riittävän varhaisessa vaiheessa mukana ja yhdessä rakennuttajan tai tilaajan kanssa määrittellä maanalaiselle kohteelle asetettavat realistiset suunnittelu- ja rakentamistavoitteet. Tällaisia ovat mm. käyttötarkoituksen tai ympäristöolosuhteiden määrittelemä vesitiiviystavoite, joka puolestaan vaikuttaa mm. hankkeen kustannustavoitteeseen ja aikataulutavoitteeseen.

Vesieristysratkaisujen osuus kalliorakennushankkeen kokonaiskustannuksista vaihtelee muutamasta prosentista jopa 25 %:iin, joten oikean vesitiiviystason valinnalla hankkeen alkuvaiheessa saattaa olla erittäin suuri merkitys koko hankkeen kustannustasoon ja toteutusaikatauluun.

5.3.1.2 Kaavoitus- ja hankesuunnittelu

Kaavoitus, rakennuslupa ja rakennusvalvonta ohjaavat rakentamista, joten tehokkaimmin rakentamista koskevat määräykset ja rajoitukset toteutuvat, jos ne on esitetty kaavamääräyksinä.

Pohjavesiolosuhteiden säilyttämisvelvoite kuuluisi sisällyttää kaavamääräyksiin, jolloin ne olisi johdettavissa rakenteiden vesitiiviysvaatimuksiksi.

Toimenpide-ehdotus:

- 5.3.1.2 – 10 Maanalaisten tilojen ja tunneleiden asettamat yläpuolista rakentamista koskevat rajoitukset ja kallion vesitiivyyteen liittyvät vaatimukset tulee esittää maanpäällisessä kaavoituksessa, jolloin ne siirtyvät rakennuslupaehtoihin ja sitä kautta rakennusvalvontaan.**

Tällaisia rajoituksia ovat mm. louhintaa koskevat maanalaisten tilojen suojaetäisyydet sekä pintavesien kuivatus ja imeytys yläpuolisissa perustusrakenteissa.

5.3.1.3 Suunnittelun lähtötiedot

Suunnittelua varten ei yleensä ole käytettävissä liikaa tietoa, jonkinlainen minimitaso tietomäärällä kuitenkin pitää olla, jotta esim. tilaan kohdistetut tiiviysvaatimukset tulee täytettyä jo suunnittelussa.

Tilan vesieristysratkaisujen suunnittelua varten tarvitaan riittävät tiedot kallion rakenteesta ja vedenjohtavuudesta sekä ympäristön pohjavesiolosuhteista ja pohjaveteen kohdistuvista vaatimuksista. Suunnittelun asiantuntijoiden tulee tietää eri tilanteisiin soveltuvat ja tarvittavat tutkimusmenetelmät, sekä osattava mitoittaa tutkimusten laajuus tilanteen mukaisesti.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.1.3 – 11 Suunnittelun lähtötietojen minimitaso ja niiden selvittämiseen sovellettavat pohjatutkimusmenetelmät voidaan sisällyttää tilojen vesitiivysratkaisuja käsittelevään luokitukseen (ks. 5.2.1 Vesitiiviystason määrittäminen).

5.3.1.4 Suunnittelu

Toimenpide-ehdotus:

5.3.1.4 – 12 Suuret jännevälit johtavat laajoihin holvipintoihin, jotka lisäävät riskiä vuotoihin (väärä salaojanvietto, pitkät siirtomatkat, kallion deformaatio). Vesitiiviyyden kannalta suositeltavampaa olisi rakentaa kapea ja tarvittaessa korkea tila. Suuren jännevälillä tilojen holvialueiden vedenpoistoa tehostetaan lisäämällä tilojen nuolikorkeutta.

5.3.1.4 – 13 Kalliokaton ohentaminen lisää riskiä holvin vuotoihin. Tästä syystä holvin vesitiiviystasoa tulee nostaa esim. injektointia ja ruiskubetonipaksuutta lisäämällä.

5.3.1.5 Urakointiin liittyvät tekijät

Urakkamuoto

Urakkamuodoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi siihen, miten ja mitkä mahdollisuudet rakentamisessa on saavuttaa vesitiiviitä tiloja.

Normaalisti käytetään suoritusurakointia, jossa suunnittelu ja urakointi on jaettu erilleen. Suunnittelija vastaa tilan vesieristerakenteiden valinnasta ja niiden toimivuudesta vastaamaan tilan tiiviysvaatimuksia. Urakoitsijan vastuulla on toteuttaa rakenteet suunnitelmien mukaisesti huolellista rakentamistapaa noudattaen. Urakointitapa on suositeltava silloin, kun rakennuttajan käytettävissä on asiantuntevaa suunnittelua ja se haluaa säilyttää riskin hallinnan itsellään. Seurauksena alhaisemmat urakkatarjoukset, kun urakoitsijan ei tarvitse sisällyttää riskiä tarjoukseensa. Suoritusurakoinnissa rakennuttajan riskinä on suunnittelun puutteellisuus, sillä urakoitsija ei vastaa suunnitteluvirheistä.

Kokonaisvastuu-urakassa (KVR) vesitiiviyys siirtyy urakoitsijan vastuulle, jolloin urakoitsija vastaa vesieristerakenteiden suunnittelusta, ja tämä antaa urakoitsijalle syyn kehittää toimintaprosessia ja vastata suorittamastaan työstä tunnontarkasti saavuttaakseen sovitun vesitiiviuden. Maanalaisessa rakentamisessa asiantunteva tilaaja/rakennuttaja voi esisuunnitella tilan pääpiirteittäin ja päättää mahdollisesti myös vesieristeratkaisuista, jolloin vastuu vesitiiviydestä jää tilaajalle. Tällöin urakkamuotona voidaan käyttää myös KVR:ää, mutta rakennuttajan määrätessä suunnittelun päälinjat jää urakoitsijalle käytännössä vähäiset mahdollisuudet vaikuttaa suunnitteluun. Urakoitsijalle voidaan antaa mahdollisuus esittää vaihtoehtoisia vesieristerakenteita tai työmenetelmiä, mutta tällöin vastuu tilan vesitiiviydestä siirtyy urakoitsijalle. Urakoitsijalle ei ole tarkoituksenmukaista siirtää vastuuta niissä asioissa, joissa urakoitsijalla on vähäiset mahdollisuudet pienentää riskejä.

Tilaaja voi turvautua ulkopuoliseen rakennuttajakonsulttiin, jolla on kokemusta kalliorakennushankkeista. KVR-urakka on suositeltava, kun tilaajana on kokematon kertarakennuttaja, joka ei halua kantaa vastuuta. Tällöin tilaajan on varmistettava, että valitulla urakoitsijalla on asiantuntemusta vesitiiviuden hallinnasta. KVR-urakasta voi muodostua hintavampi kuin suoritusurakasta, sillä KVR-urakoitsija sisällyttää riskin tarjoukseensa.

Rakennuttajalle on määrättyissä tapauksissa edullisempaa rakennuttaa tila KVR-urakana, kuin kilpailuttaa suunnittelu, joka johtaa useisiin suunnitteluvaihtoehtoihin ja aikaa vievään valintaprosessiin. Varsinkin tilaratkaisut, joissa urakoitsijan uskotaan omaavan riittävää suunnittelukokemusta ja tietoa millä laitteistolla ja rakenteilla tila voidaan op-

timaalisesti toteuttaa vesitiiviysvaatimukset huomioiden, on KVR-urakointi varteen-otettava vaihtoehto.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.1.5 – 14 Kalliorakentamiseen tulee kehittää uusia nykyistä monipuolisempia hankintamenettelyjä ja tuotantomalleja, mm. kalliorakentamisen design-build kokonaistuotantomalli, joka mahdollistaa suunnittelun ja rakentajan kokemuksen ja resurssien yhteensovittamisen ja vastuuttamisen lopputulokseen jo suunnittelun alkuvaiheessa.

Tällöin voidaan käyttää tapauskohtaisesti vaihtelevia urakointimuotoja. Esim. jokin osaurakka tai työvaihe voidaan tilata KVR-rakentamisena, ts. rakentaja vastaa vesitiivyydestä suunnittelemalla rakenteen ja pyrkimällä rakentamaan sen mahdollisimman onnistuneesti. Tällöin hyödynnetään ammattitaitoisen urakoitsijan kokemusta ja tietoa toimivista rakenneratkaisuista ja varmistetaan niiden käyttäminen vesitiiviiden rakenteiden toteutuksessa.

Urakkasopimus

Urakkasopimuksessa ja -ohjelmassa voidaan vaatia vuodottomuutta tai sopia vuodoille sanktio, mutta tällöin rakennuttaja on jo hyväksynyt mahdollisuuden vuotoihin. Urakkasopimuksessa tulisikin sopia hankkeen aikataulu niin, että vuotoihin olennaisesti vaikuttaville työsuorituksille (injektointi, louhinta, salaojitus, ruiskubetonointi) varataan riittävästi aikaa työn suorittamiseksi kunnolla.

Tuotteen tekniset tms. ominaisuudet, materiaali- ja työtapoja koskevat vaatimukset kuvataan teknisissä asiakirjoissa, työselityksissä ja piirustuksissa. Työsuorituksen arviointia ja laadunvarmistusta varten tarvitaan edellä mainitut työmaan laatusuunnitelmaan sisältyvät laadunvalvontaan liittyvät ohjeet ja dokumentit. Suunnittelun täytyy sisällyttää teknisiin asiakirjoihin ne vesieristysratkaisut, joilla voidaan päästä urakkasopimuksessa esitettyihin tiiviysvaatimuksiin.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.1.5 – 15 Urakkasopimuksessa hankkeen aikataulu tulee sovittaa niin, että vuotoihin olennaisesti vaikuttaville työvaiheille varataan riittävästi aikaa työn suorittamiseksi huolella oikein.

Vastuu virheistä takuuajana

YSE 98:n mukaisesti urakoitsija vastaa suorituksensa sopimuksenmukaisuudesta takuuajan. Urakoitsija vastaa takuuajan jälkeenkin sellaisista virheistä, joiden tilaaja näyttää aiheutuneen urakoitsijan törkeästä laiminlyönnistä, täyttämättä jääneestä suorituksesta tai olevan seurausta sovitun laadunvarmistuksen olennaisesta laiminlyönnistä ja joita tilaaja ei ole kohtuuden mukaan voinut havaita vastaanottotarkastuksessa eikä takuuajana.

Norjassa urakoitsijalla ei ole virhevastuuta takuuajan jälkeen. Takuuajan virhevastuu ulottuu 3 vuoteen.

5.3.2 Rakentaminen

Seuraavissa kappaleissa käsitellään RES-analyysia laajemmin maanalaisen rakentamisen eri tuotantovaiheiden vesitiiviyteen vaikuttavia tekijöitä. Tarkasteltavina tekijöinä ovat myös RES-analyysin ulkopuolelle jääneet yksittäiset tekijät, jotka eivät ole vuorovaikutuksessa muihin tekijöihin.

Jokaisen tuotantovaiheen osalta kuvataan nykykäytäntöä, vesitiiveyteen vaikuttavia tekijöitä ja näihin liittyvää ongelmatiikkaa. Muutoksia rakenteisiin ja työsuoritukseen tehdään tapauskohtaisesti työnaikaisen suunnittelun ja asiantuntijavalvonnan pohjalta, jolloin suunnittelijan, urakoitsijan ja työmaavalvojan suorittama rakentamisen jatkuva seuranta ja valvonta ovat merkittäviä tekijöitä pyrittäessä vesitiiviyteen kalliotiloissa. Onko nykykäytäntö riittävä, vai tarvitaanko rakentamisen osa-alueisiin yleisiä muutoksia, selviää seuraavissa tuotantovaiheiden tarkasteluissa. Tarkastelun lopuksi esitetään toimenpide-ehdotukset, joilla saavutetaan kalliotilojen vesitiiviyden ja ympäristön asettamat vesitiiviytsvaatimukset.

5.3.2.1 Louhinta

Maanpäällinen louhinta, louhintaa kalliotilojen päällä

Maanpäällisessä rakentamisessa unohdetaan helposti tai yksinkertaisesti ei tiedosteta louhinnan vaikutuksia alapuolisille kalliotiloille. Toisinpäin asia on yleensä kunnossa, sillä useimmiten maanalainen tilan rakentaminen tapahtuu maanpäällisen rakentamisen jälkeen ja tilan suunnittelussa joudutaan hyvinkin tarkkaan ottamaan huomioon rakennettu ympäristö.

Louhintatärinä aiheuttaa kalliorakoihin muutoksia, avaukset muuttuvat, rakotäytteet liikkuvat ja syntyy uusia rakoja. Tärinä voi aiheuttaa tilan ruiskubetoniin halkeamia ja jopa

irrottaa ruiskubetonin kallion pinnasta. Tärinän raoista irrottamat hienoainekset voivat tukkia ruiskubetonisaloajat.

Usein maanpäällistä louhintaa (esim. kanaalilouhinta) suorittavat urakoitsijat eivät edes tiedä alapuolisesta tilasta, joten louhinnassa ei välttämättä tiedetä noudattaa varovaisuutta. Rakennettaessa tietoisesti samanaikaisesti maan päällä ja alla louhinnat yleensä huomioivat toisensa varmuusetäisyyksineen ja -aikoineen, jotka määritetään tapauskohtaisesti asiantuntijan toimesta. Jokaisen alalla toimivan urakoitsijan on tunnettava lakiin perustuvat louhintamääräykset, mutta paikallisten louhintaan liittyvien erityisohjeiden välittäminen urakoitsijalle ja niiden noudattamisen valvonta kuuluvat rakennusvalvonnalle, ts. valvonnan on tiedettävä louhintaan liittyvät vaatimukset sekä maan päällä että alla.

Louhittaessa maanpäällisen rakennuksen perustuksia kallioon joudutaan usein poistamaan maata ennen louhintaa. Poistettaessa vettäeristävä hienoaineskerros aiheutetaan hienoaineskerroksen yläpuolisten pinta- ja orsivesien kulkeutuminen louhittuun peruskaivantoon. Kun pohjaveden pinta on kaivannon pohjatason yläpuolella, tai kaivantoon kulkeutuu sadevesiä, toimii kaivanto jatkuvasti eräänlaisena kaivona, joka syöttää pohja/sadevettä louhinnan aiheuttamien ja avaamien kalliorakojen kautta alapuoliseen kalliotilaan. Avolouhinnan pystyreikien raju pohjapanostus saattaa rikkoa kalliota huomattavan syvälle. Pohjan varovaisempi louhinta on mahdollista matalla penkereenä, pienellä panostuksella.

Toimenpide-ehdotus:

- 5.3.2.1 – 16 Rakennusvalvonnalla tulee olla tiedot maanalaisiin tiloihin ja eri louhintoihin liittyvistä vaatimuksista ja rajoituksista. Varmimmin nämä tiedot siirtyvät rakennusvalvontaan kaavoituksen ja rakennuslupamenettelyn kautta (ks. 5.3.1.2 Kaavoitus- ja hankesuunnittelu).**
- 5.3.2.1 – 17 Asiantuntija määrittää tapauskohtaisesti avo- ja tunnelilouhinnalle varmuusetäisyydet, -ajat ja tärinärajat sekä muut louhinnassa huomioitavat asiat, joita urakoitsijat noudattavat valvotusti.**
- 5.3.2.1 – 18 Jos maanpäällisen rakennuksen alapuolella sijaitsee maanalainen tila, on rakennuksen kuivatusjärjestelmä suunniteltava johtamaan perusvedet tehokkaasti pois louhitusta peruskaivannosta tai kaivannon pohja on eristettävä.**

Maanalainen louhinta

Louhinnan vaikutus vesivuotoihin ilmenee lähinnä kalliotilan/tunnelin holvin profiilin muodossa. Kohdetutkimuksissa havaittiin useita karkeaan louhintaan liittyviä ongelmia, jotka johtivat kalliotilan vuotoihin. Nämä ongelmat tulevat esiin salaojien asennuksessa ja oikeassa vietossa sekä ruiskubetonoinnissa salaojien kohdilla. Epätasainen kalliopinta muodostaa onkaloita ja ryöstöjä sekä piikkejä ja mahoja, joiden salaojittaminen on usein mahdotonta ja joihin tasaisen ja riittävän paksun ruiskubetonin ruiskuttaminen on vaikeaa.

Louhittua kallion pintaa kuvataan termillä louhintajälki. Se ei ole yksinään riippuva louhinnasta, vaan kallion laadulla ja erityisesti rakoilun suunnalla ja tiheydellä on merkittävä vaikutus louhintajälkeen. Nykyisin tarkkuuslouhintaa (tiheä poraus, kevyt panostus) suoritetaan peränajossa reunarei'issä, silti kallion rakenne (rakoilu, kivilaji) voi aiheuttaa tarkkuuslouhinnallakin ryöstöjä ja kovia. Pitkillä katkoilla poraustarkkuus heikkenee porakankien taipuman takia, tarkkuutta parannetaan käyttämällä suurempaa porareikää (esim. Ø 54 mm). Porakoneesta johtuvat reunareikien pistot (porareiän pohjan etäisyys suunnitellun tunnelin seinälinjasta) aiheuttavat tunnelin profiiliin systemaattista hammastusta, hammastuksen ollessa sitä tiheämpää ja kulmaltaan jyrkempää mitä lyhyempi katko on. Parannusta ei tapahdu lyhentämällä katkoa, sillä nykyisellä tunneliporauska-lustolla piston suuruuteen ei voida oleellisesti vaikuttaa. Louhintajälki paranee lisää-mällä poraustiheyttä ja parantamalla poraustarkkuutta, sekä kehittämällä sytytysmene-telmiä ja räjähdysaineita.

Louhintamenetelmällä voidaan myös vaikuttaa louhintajälkeen. Täysprofiililouhinnalla saadaan tasaisempaa louhintajälkeä verrattuna avaus-avarruslouhintaan. Täysprofiililouhinnassa voi ilmetä epätasaisuutta nallien syttymisen hajonnan takia, vaikkakin käytetään millisekuntinalleja. Epätasaisuutta voi aiheuttaa myös kenttäreikien liian suuri pa-nostus tai väärä sytytysaika, joka voi aiheuttaa reunareikien syttymättömyyttä ja kenttä-reikien lohkaroitumisvyöhykkeen ulottumisen reunareikien lohkaroitumisvyöhykkeen ulkopuolelle. Tasaisin jälki, ei kuitenkaan kustannustehokkain, saadaan louhimalla kenttäreiät täysprofiilina ja reunareiät jälkilouhintana, jolloin reunareikien nallien ha-jonnan vaikutus voidaan poistaa. Kovien jälkilouhinnalla aiheutetaan pääsääntöisesti liikalouhintaa, joka johtaa ruiskubetonitäyttöihin. Tavoite on siis asetettava niin, että louhitaan kerralla valmista pintaa.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.1 – 19 Peränajossa saavutetaan tasainen ja vesitiivis louhintajälki opti-moimalla louhinta. Louhintatulokseen vaikuttavat mm. seuraavat te-kijät: kalliolaatu, lohkaroituminen, katkon pituus, momentaaninen räjähdysainemäärä, sytytys, porareiän halkaisija, profiili, pisto, lou-

hintamenetelmä ym. Näiden eri tekijöiden yhteisvaikutusta louhintajälkeen ja kohteessa saavutettavaan vesitiivyyteen ei nykyisin riittävästi tunneta, vaan asia vaatii lisätutkimuksia.

- 5.3.2.1 – 20** Louhintajälki on pitkillä katkoilla tasaisempaa, kun käytetään riittävän tiheää porausta ja reikien taipumisen välttämiseksi suuria porareikiä (esim. Ø 54 mm). Tällöin pohjapanoksia on harvemmin, piston aiheuttamaa porrastusta esiintyy harvemmin ja porauskulma on loivempaa kuin lyhyillä katkoilla.
- 5.3.2.1 – 21** Täysprofiililouhinta pitkillä katkoilla (5–6m) on kustannustehokasta, tärinäihin pitää kuitenkin varautua. Täysprofiilista voidaan esi-injektoida koko tunnelin perä kerralla. Reunojen jälkilouhinta parantaa louhintajälkeä ja lisää kustannuksia.
- 5.3.2.1 – 22** Lyhyttä katkoa voidaan käyttää, jos räjäytyspaine ja tärinät asettavat tiukat vaatimukset louhinnalle. Näitä vaatimuksia voi esiintyä suuaukoilla ja heikon kiven alueella. Tasainen louhintajälki voidaan tällöinkin saavuttaa louhimalla reunat täysimittaisina.
- 5.3.2.1 – 23** Tunnelilouhinnan aiheuttaman kallion lohkaroitumisvyöhykkeen etenemistä tunnelin ympärillä rajoitetaan mitoittamalla oikein kenttä- ja reunareikiä panostus ja sytytys. Louhimalla reunat alas jälkilouhinnalla vältetään nallien hajonta (räjäytys esim. tulilangalla).

5.3.2.2 Injektointi

Injektoinnilla vaikutetaan tehokkaasti kalliotilan vesitiivyyteen. Tiukat ympäristön tai rakennusten asettamat rajoitukset tilan vuotovesimäärille johtavat väistämättä kallion tiivistämiseen injektoinnilla.

Kohdetutkimuksissa injektoinnin onnistumisen arviointi oli vaikeaa, sillä käytössä ei ollut tietoa injektoidun alueen vuotovesimääristä ennen injektointia eikä sen jälkeen. Jos vuotovesimääriä on esitetty, niin ne kuvaavat tunnelijakson kokonaisvuotomäärää (l/min, 100 m), sisältäen myös lattiaosuuden vuodot. Esitettyjä määriä ei siis voida kohdentaa halutuille injektoiduille seinä- tai holviosuuksille. Tutkituista pisteistä n. 78 % sijoittuivat injektioimattomille osuuksille, mutta kysymys, oliko injektioinneilla vähennetty vuotoja näissä pisteissä, jää tutkimuksessa selvittämättä. Injektoiduille osuuksille sijoituvissa vuotopisteissä vuotoja on luultavasti saatu vähennettyä, sillä injektointia on nimenomaan tehty osuuksilla, joissa kallion vedenjohtavuus on ollut suuri.

Injektointia suoritetaan louhinnan suhteen esi- ja jälki-injektointina. Yleisesti esi-injektoinnilla tiivistetään kalliota kustannustehokkaammin kuin jälki-injektoinnilla. Esi-injektoinnilla saavutetaan laajan kalliomassan tiivistämisessä myös parempi lopputulos. Jälki-injektointia suoritetaan tavallisesti vain esi-injektoinnin jälkeen esiintyvien vuotokohtien tiivistämiseen (esim. pultit, yksittäiset raot). Injektoinnin onnistumiseen, ts. vettäjohtavan kallion tiivistämiseen, vaikuttaa moni tekijä, joista useat ovat vielä toisistaan riippuvia. Näitä tekijöitä ja niiden yhteisvaikutuksia tutkitaan laajalla rintamalla Pohjoismaissa, Ruotsissa ja Norjassa. Ruotsissa on keskitytty mm. tutkimaan injektoinnin vaikutuksia käytettäessä erityyppisiä injektointimassoja eri olosuhteissa.

Suomessa injektoinnin tutkiminen on ollut vähäistä, pääosin menetelmien kehittämiseen liittyvää. Injektointiin liittyvää tutkimustietoa on saatu mm. Ruotsista. Urakoitsijat ovat kehittäneet injektointiosaamistaan pääosin käytännössä saatujen kokemusten perusteella.

Suomessa tunnelin injektointi suoritetaan pääasiassa systemaattisesti, ei välttämättä koko tilaa tai tunnelia koskien, vaan määrättyä vettäjohtavaa kallio-osuutta koskien. Tunnusteluporausta vesimenekikokeineen käytetään jonkin verran injektointitarpeen selvittämiseen, mutta käytännössä vesimenekikokeiden tulokset ovat harvoin johtaneet esi-injektoinnin suoritukseen. Onko injektointikriteerit liian suuria (0.5–1.0 Lugeonia), sillä vuotoja esiintyy edelleen injektioimattomissa tiloissa? Tunnusteluporausta voidaan suorittaa ilman vesimenekikokeita, tällöin poraustietoina tarkkaillaan poraussoijan väriä, josta voidaan päätellä kivilaji ja rakotäyte, sekä havaintoja kallion heikkousrakenteista (lustista), jotka otetaan huomioon lujitusta ja louhintaa suunniteltaessa. Nykyaikaiset porausjumbot tallentavat porauksen yhteydessä pyöritys- ja syöttö- ja huuhtelupainetta, mutta näitä ei erityisemmin huomioida kallion rakenteen arvioimisessa. Harvoin suoritetaan kontrolliporausta, jossa injektointiviuhkan sisälle rajautuvissa porareissä suoritettavien vesimenekikokeiden perusteella selvitetään injektointimassan levinneisyyttä ja tiivistämisen onnistumista. Injektointiviuhkan vielä vuotavien reikien väliin porataan uudet reiät, jotka injektoidaan.

Seuraavia ohjeita voidaan soveltaa injektoinnissa:

- Injektoinnilla tulisi pyrkiä saavuttamaan kallion vedenjohtavuudeksi $0,5 \times 10E-8$ m/s, jotta tunneli olisi kuiva. Tavoite johtaa siihen, että 0,05–0,1 mm raot on injektoitava, tämä onnistuu käytettäessä mikrosementtejä, joiden maksimi raekoko on 0,016–0,03 mm.
- Räjätysvaikutusten ja jännitystilän muutosten avaamien rakojen takia esi-injektoitu vyöhyke on ulotettava tunnelin holvin säteen tai vähintään 5 m:n etäisyydelle tilasta.

- Injektointia suoritetaan yleensä n. 18–20 m Ø 64 mm porareiällä viuhkaan viistosti tunneliperän edelle. Esimerkiksi n. 20 m² tunneliprofililla voidaan tällöin yhdellä injektointiviuhkalla louhia jopa 3 katkoa ennen seuraavaa viuhkaa.
- Injektoituun perään ei saa mennä poraamaan ennen massan sitoutumista. Sitoutuminen riippuu massan ominaisuuksista ja alkaa vaihdellen 0,5 h–8 h injektoinnin jälkeen. Kuppikoe osoittaa laastin sitoutumisen käynnistymisen huoneilmassa, kallioympäristön kosteus ja alhainen lämpötila pidentävät sitoutumisen käynnistymistä, joten koe on suuntaa-antava ja odotusaikaa on pidennettävä varmuuden vuoksi muutamalla tunnilla.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.2 – 24 Suomessa tulee toteuttaa injektointisuunnitteluun, työn suoritukseen, injektointiaineisiin ja lopputuloksen laadunvalvontaan liittyvä tutkimus- ja kehityshanke, jolla oleellisesti voidaan kohottaa osamisen tasoa ja parantaa injektoinnin käytettävyyttä kalliotilojen vesitiivyyden ja ympäristön pohjavesihallintaan. Tutkimuksessa tulee hyödyntää muissa Pohjoismaissa tehdyt tutkimukset, saadut kokemukset sekä tutkimustulokset, joita voidaan soveltaen käyttää myös suomalaisissa olosuhteissa. Injektointitutkimus on kallista, kalustoa, materiaalia ja aikaa sitovaa. Tutkimukset on kohdennettava harmitusti niihin injektoinnin osa-alueisiin, joilla saavutetaan vesitiivyyden kannalta merkittävää käytännön hyötyä.

5.3.2.2 – 25 Vesimenekikokeilla ohjataan injektointia. Kokeiden perusteella päätetään reikien injektointijärjestys ja optimoidaan niissä käytettävät injektointimassat (voivat vaihdella vesimenekin mukaan).

5.3.2.2 – 26 Injektointityön suorittaminen vaatii ammattitaitoa, joten koulutukseen on panostettava. Esiin voi nousta tarve kouluttaa injektointityön suorittajia ammattitutkinnon kautta.

5.3.2.2 – 27 Kontrolliporauksella ja vesimenekikokeilla varmistetaan esi-injektoinnin onnistuminen.

5.3.2.3 Pultitus

Yksittäisen pultin asentamisen onnistuminen riippuu ensisijaisesti pultin juottamisesta. Hyvä juotos muodostaa pultin, juotosmassan ja kallion välille riittävän tartunnan. Tartuntalujuuden lisäksi juotosmassalta vaaditaan vesitiiveyttä, johon vaikuttaa juotosmas-

san koostumuksen lisäksi juotostapa. Vesireikään pulttista ei saa tehdä ilman, että reikä injektoidaan ja porataan auki uudelleen pulttia varten. On esitetty jopa veden johtamista viereen porattavaan apureikään, jolloin pultti voidaan asentaa kuivaan reikää. Injektoidaanko vuotava apureikä, vai onko lujitustarkoitus ajanut vesitiiviiden ohi?

Pultituksella voidaan läpäistä esi-injektoitu kallio, jolloin pultin epäonnistunut juotos mahdollistaa vesivuodot tilaan. Tärkeää olisikin tiedostaa injektointivyöhykkeen laajuus suunniteltaessa pulttista, ettei pultituksella lisätä riskiä vuotoihin injektoidussa kalliiossa.

Pultin viimeistelyssä kannat jäävät usein reilusti esille kalliopinnasta, jolloin niitä ei aina saada täysin peitettyä ruiskubetonilla, vaan pultin kohdalle jää puutteellinen vettäläpäisevä ruiskubetonikerros. Pultin juotos ei välttämättä vuoda, vaan kalliopinnasta esiintulevaan pulttiin ohjautuu vesiä ympäristöstä.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.3 – 28 Injektoitua kalliovyöhykettä ei saa harkitsematta läpäistä pulteilla, jos läpäistään, niin pultin alue on jälki-injektoitava.

5.3.2.3 – 29 Vesireikä on aina injektointava ja porattava auki pulttia asennettaessa.

5.3.2.3 – 30 Pulttien kannat on viimeisteltävä (katkaistava) kallion pintaan.

5.3.2.3 – 31 Ylimääräiset reiät on paikattava umpeen (ennen ruiskubetonointia). Vuotavat reiät on jälki-injektoitava ennen paikkausta.

5.3.2.4 Salaojitus

Salaojajärjestelmä

Suomessa käytetään ruiskubetonisalaorakenteina pääsääntöisesti putki- ja Paajanti-salaojaa sekä lattiasalaojina normaaleja putkisalaojia. Salaojitukseen pyritään keskittämään kalliosta tilaan virtaava vapaa vesi ja vähentämään ruiskubetonikerrokseen ja lattiarakenteeseen kohdistuvaa vesipainetta. Ruiskubetonisalaojista vedet purkautuvat lattiarakenteeseen ja lattiasalaojiin, josta ne johdetaan kokoojakaivon kautta pumppaamoon. Oikein toimiessaan salaojituksella hallitaan ja estetään vuotoja, mutta kohdetutkimuksien perusteella nykyisellään salaojitukseen liittyy useita tekijöitä, jotka johtavat vesivuotoihin.

Ruiskubetonisalaaja, asennus

Ruiskubetonisalaajan asentamisella on merkittävin vaikutus pyrittäessä salaojilla saavuttamaan vesitiivis tila. Tiheä salaojitus voisi teoriassa johtaa kuiviin kalliotiloihin, mutta jo kustannussyistä tämä ei ole mahdollista, ja toisaalta kohdetutkimuksien perusteella itse salaoja muodostaa riskin vuotoihin, joten ratkaisujen täytyy löytyä siitä, että tarvittavat salaojat asennetaan oikeille paikoille, oikeaan viettoon huolellisesti.

Salaojat on yleensä suunnittelijan määrälaskennassa ajateltu asennettavaksi keskimäärin 3–5 metrin välein. Salaojan tarkan sijoituspaikan määrittää pääsääntöisesti suunnittelija paikanpäällä. Jos urakoitsijalla on vastuu vesitiiviydestä, voi urakoitsija omatoimisesti asentaa salaojia tarvittaviin paikkoihin.

Salaojan, vuotopaikan määrittäminen voi olla hankalaa monestakin syystä:

- louhinnan jälkeen räjähdysvaikutus on voinut sulkea rakoja ja paineen vaikutuksesta vedenvirtaus raoissa on hetkellisesti muuttunut
- tilan vuodot vaihtelevat suurmittakaavaisesti vuodenaikojen, hetkellisesti jopa säätilojen mukaan
- tiiviit raot voivat kallioliikuntojen takia avautua, rakotäytteet voivat ajan myötä liueta/varista
- louhinnan jälkeen pintojen pölyisyys, kosteus (kallionpinta voi olla kostea sisäilman kosteuden kondensoitumisesta kylmään kivipintaan, laajasta vuodosta tai pinnan vesipesusta) ja puutteellinen valaistus hankaloittavat vuotojen kartoitusta
- korkeat halliprofiilit hankaloittavat holvissa esiintyvien vuotojen havaitsemista ja paikantamista lattiatasolta katsottuna
- asennettaessa salaojaa holviin on asentajan vaikea erottaa holvitasolla ollessaan pinnan viettosuuntia määrittääkseen salaojalle oikeaa kulkua, tilanne ei ole yhtään parempi lattiatasolta tarkasteltuna
- laajoilla halliprofiileilla holvissa kalliopinta ei välttämättä vietä edes seinälle päin, jolloin salaojakaan ei kuljeta vettä pois holvista vaan aluksi varastoi vettä ja purkaa ylivuotoja ruiskubetoniin ja sen läpi tilaan.

Kohdetutkimuksissa havaittiin tilanteita, joissa holviosuudella esiintyy lukuisia vuotoja, joita ei ole mielekästä yksittäin johtaa seinäsalaojaa pitkin lattiarakenteeseen. Tällöin yhteen seinäsalaojaan yhdistetään ”haaroina” holvisalaojia. Salaojien liitännäkohdassa salaojat limitetään toistensa päälle, jolloin liitännä muodostaa aina riskin vesien ohjautumiseen ulos salaojarakenteesta. Vastaava ongelma esiintyy, kun liki vaakasuuntaisilla salaojilla pyritään ohjaamaan geometrialtaan epäedullisten pintojen vuotovesiä. Salaojaa on mahdoton asentaa tiiviisti epätasaiseen kallion pintaan, jolloin vesi virtaa läpi sala-

ojarakenteen. Jos ruiskubetonilla on riittävä vesitiiviys, niin tilanne on hallinnassa vesien ohjautuessa takaisin salaojaan. Kysymys onkin siitä, aiheutetaanko salaojituksilla riskejä vuotojen syntymiselle, vaikka asian pitäisi olla juuri toisinpäin?

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.4 – 32 Salaojia on suunniteltava asennettavaksi keskimäärin 3 - 5 metrin välein. Salaojan pääpiirteinen paikan määrittäminen tapahtuu ammattitaitoisen suunnittelijan toimesta, ammattitaitoinen urakoitsija vastaa yksityiskohtaisesta asentamisesta kalliopinnan profiili huomioiden.

5.3.2.4 – 33 Salaojien paikan määrittäminen on suoritettava sulan maan aikana, jos mahdollista sateisena vuodenaikana (loppukevät, kesä tai syksy). Kallion pinta on puhdistettava vedellä vähintään vuorokausi ennen paikan määrittämistä, joka suoritetaan riittävässä valaistuksessa maalaamalla salaojan kulku kallion pintaan.

5.3.2.4 – 34 Ruiskubetonisalaojien paikan määrittäminen ja asennus helpottuvat, kun tila ruiskubetonoidaan esim. työnaikaisena lujituksena yhdellä keskimäärin 20–30 mm:n vahvuisella, paikoin paksummalla ruiskubetonikerroksella, jolla tasoitetaan epätasaista louhintajälkeä. Ajan kuluessa riskipaikkoihin mahdollisesti ilmaantuu ruiskubetonissa helposti havaittavia vuotoja, joihin salaojat sijoitetaan. Runsaat vuodot voivat aiheuttaa ruiskubetonin kostumista laajalta alueelta vaikeuttaen salaojan paikan määrittämistä. Jatkuvat vuodot on injektoitava tai salaojitettava ennen ruiskubetonointia. Vähäisemmät vuodot saadaan kiinni käyttämällä kiihdyttimiä ruiskutusbetonissa.

Kyseistä ruiskutuskerrosta ei huomioida lopullisessa lujituksessa, jos sitä ei ole siihen suunniteltu.

5.3.2.4 – 35 Salaoja asennetaan oikeaan viettoon (väh. 1 cm/m), apuna voidaan käyttää vesivaakaa. Salaojia ei pidä asentaa niin, ettei kaato ole jatkuva.

5.3.2.4 – 36 Jälkilouhinnalla ja ruiskubetonitöillä voidaan pohjustaa ja varmistaa salaojan asennus riittävään viettoon.

5.3.2.4 – 37 Salaojat suositellaan kiinnitettäväksi väh. 300 mm:n pituisilla Ø 6 mm harjaterästangoilla 300–500 mm välein lomittain salaojan mo-

lemmin puolin. Samoilla terästangoilla tai niihin kiristetyillä sidelan-
goilla kiinnitetään myös salaojaraudoitus (ks. ruiskubetonin halkea-
mat salaojien kohdalla) .

5.3.2.4 – 38 Nykyisten ruiskubetonisalojien (putki ja Paajanti) asentaminen epä-
tasaiseen kalliopintaan on vaikeaa. Uusia salaojarakenteita olisi ke-
hitettävä. Parannuskriteereinä olisi asennus epätasaiseen pintaan,
mahdollisuus liitoksiin, hyvä kontakti kallioon ja huollettavuus. Tar-
ve olisi myös ratkaista lujitusrakenteen kuivatus olosuhteissa, jois-
sa salaojituksen tarvitsemää viettoa ei ole tai se on jopa väärään
suuntaan esim. holvin keskelle.

5.3.2.4 – 39 Nykyisten ruiskubetonisalojien solumuovit eivät kestä ruiskubeto-
nointia, varsinkaan korkeilla paineilla. Solumuovin tiheyttä on lisät-
tävä tai solumuovi on suojattava kestävämmällä pinnoitteella

Ruiskubetonin halkeamat salaojien kohdalla

Kalliossa esiintyvät vuodot paikantuvat usein kallion heikkousvyöhykkeisiin tai rakoi-
hin, jotka mahdollistavat myös kalliomassan liikkumisen jännitystilän muutoksissa. Kun
näihin liikuntakohtiin asennetaan salaojat, kohdistuu kallion pinnasta irti olevaan ruis-
kubetoniin suuret vetojännitykset, jotka ylittäessään ruiskubetonin vetolujuuden halkai-
sevat betonin salaojan kohdalta. Halkeama voi johtaa vuotoihin, mutta riski vuotoihin
lisääntyy salaojan toiminnan häiriintyessä esim. tukkeuman takia.

Vastaavasti halkeamat voivat johtua myös ruiskubetonin kuivumiskutistumasta, sillä sa-
laojan kohdalla betonin kuivuminen on nopeampaa kuin muualla (kts. ruiskubetonin jäl-
kihoito).

Kohdetutkimuksissa 23 % vuotavista ruiskubetonin halkeamista sijoittui salaojien koh-
dalle.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.4 – 40 Salaojien kohdalle syntyvät halkeamat estetään paksulla ruiskubeto-
nirakenteella (> 100 mm), joka tehdään 3–4 ruiskutuskerroksella. Ruiskubetonin vetolujuutta parannetaan kuiduilla ja kaksinkertaisella
raudoituksella. Ensin 1 m levyisellä Ø 3,4 mm # 100 mm hehkutetulla
teräsverkolla tuetaan ja varmistetaan salaojarakenteen kiinnitys, sa-
laojaraudoitusta vahvistetaan asentamalla vähintään 1 m:n pituisia Ø
6 mm harjaterästankoja vaakatasoon verkon päälle kiinnityksen ta-

pahtuessa sidelangoilla. Verkko kiinnitetään vastaavilla harjateräs-tangoilla kuin salaojat, tarpeen vaatiessa asennetaan lisätankoja, varsinkin verkon reunojen kiinnittämiseksi.

Salaojan toiminta, tukkeutuminen

Salaojien toimivuus voi vaarantua, jos täytteisistä kallioraoista irtoavat hienoainekset tai pohjaveteen liuenneet aineet (rauta, mangaani, jne.) hapettuessaan muodostavat saostumia salaojiin. Tukkeumia voi syntyä jo ruiskubetonoidessa salaojia, sillä ruiskubetonoinnin irrottamaan tai asennuksen jälkeen kalliopinnasta irralleen jääneeseen salaojarakenteeseen kulkeutuu ruiskubetonia helman alta. Myös salaojan alaosat voidaan ruiskuttaa umpeen tai ne voidaan rikkoa koneilla työn aikana. Lattiarakennusurakassa ei välttämättä enää kiinnitetä huomioita ruiskubetonisalojien toimivuuteen, vaan ne voidaan epähuomiossa betonoida umpeen lattian valun yhteydessä. Lattiaurakassa asiaan joudutaan kiinnittämään erityistä huomiota, jos ruiskubetonisalojat tullaan liittämään lattiasalaojiin. Lattiasalojien ja salaojakerroksen toimivuutta voi heikentää louhintaurakassa tilan pohjalle jätetty tasoitekerros tai salaojakerroksen sisältämä hienoaines, joka tukkii salaojia ja padottaa vettä lattian salaojakerroksessa.

Toimenpide-ehdotus:

- 5.3.2.4 – 41 Louhintaurakassa louhinnan aikainen tasoitekerros on poistettava louhitun kallion pinnalta suunniteltuun tasoon, jotta seulottu salaojasorakerros voidaan rakentaa täysimääräisenä.**
- 5.3.2.4 – 42 Ruiskubetonirakenne salaojituksineen on jatkettava lattialaatan alapuolelle lattian salaojasorakerrokseen. Ruiskubetonoinnin hukkaroiske on poistettava vapaan salaojan päältä jokaisen ruiskutuskerroksen jälkeen. Suositeltavaa on suojata paljaat salaojan päät soralla/hiekalla.**
- 5.3.2.4 – 43 Valmiiden ruiskubetonisalojien alaosat on louhintaurakassa työn-aikaisesti merkittävä ja suojattava koneilta, ja putkisalaojat suositellaan myöhemmin lattiaurakassa liitettävän lattian salaojiin.**

Salaojan huolto, tukkeutumien poisto

Ruiskubetonisalojarakenteen toimivuuden tarkastus ja tutkiminen ja mahdollinen huolto on nykyisin mahdotonta, sillä ruiskubetonisalojien alapäät on johdettu lattiaraken-

teen salaojakerrokseen. Joissain tunneleissa arviointi ja huolto voisivat tulla jo nykyisin kyseeseen, sillä salaojien alaosat on jätetty näkyviin lattian yläpuolelle.

Toimenpide-ehdotus:

- 5.3.2.4 – 44** Liitetään putkisalaojat kalliotilan lattian putkisalaojiin, jotka johdetaan määrävälein tarkastuskaivoihin. Tarkastuskaivoista voidaan tarvittaessa suorittaa lattiasalaojien tarkistus kuvaamalla ja huolto esim. painehuuhtelulla. Seinien putkisalaojiin voidaan tehdä lattiatason yläpuolelle seuranta- ja huolto varten niin ikään T- liitoksella tarkastusaukko, jonka kansi on löydettävissä ruiskubetonoinnin jälkeenkin.
- 5.3.2.4 – 45** Lattiaosuudella voidaan käyttää tuplaputkistoa, jossa vedet johdetaan tarkistuskaivoista umpiputkessa joko tilan/tunnelin keskellä tai jommalla kummalla reunalla sijaitsevaan kokoomakaivoon, umpiputken rinnalle asennetaan normaalisti lattian vuotoja varten salaojaputket. Kokoomakaivosta kaikki vuotovedet johdetaan umpiputkessa pumppaamoon tai purkuputkeen. Umpiputkia käyttämällä vältetään salaojaputkistoon kohdistuva tulvimisvaara.

5.3.2.5 Ruiskubetonointi

Ruiskubetonointimenetelmä

Kohdetutkimuksien perusteella kuivamenetelmällä (käsini ruiskutus) saavutetaan tasaisempi ruiskutustyö kuin märkämenetelmällä (koneellinen ruiskutus). Toisaalta kuivamenetelmän yleisesti alhaisempi vesi-sementtisuhde lisää riskiä betonin halkeiluun ja korostaa tarvetta betonin kostutukseen jälkihoidolla. Halkeilua lisää myös se, ettei kohteiden betonissa ole käytetty kuituja lisäämään betonin vetolujuutta. Betonin suuri huokoisuus, joka näyttää olevan erityisesti märkämenetelmään liittyvä ongelma, johtaa helposti kapillaariseen vuotoon ruiskubetonin läpi. Kapillaarista vuotoa on vaikea estää, kasvatamalla ruiskubetonin paksuutta voidaan vuotoa hallita (ks. ruiskubetonikerros).

Salaojien ruiskubetonointi

Salaojien alueet on ruiskutettava erityisen varovasti ja huolellisesti. On sääli pilata hyvin asennettu salaoja ronskilla ruiskutuksella, joka irrottaa salaojan ja tukkii sen ja mahdollisesti myös irrottaa lujitusverkonkin. Kohdetutkimuksissa 77 % vuodoista sijaitsi 0–2 metrin etäisyydellä ruiskubetonisalaojasta, joten salaojan lähiympäristön ruiskubetonin

hyvä tiiviys ja salaojan moitteeton toiminta ovat ensisijaisen tärkeitä pyrittäessä vuodottomampiin tiloihin.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.5 – 46 Ruiskutus aloitetaan salaojalinjan keskeltä levittäen massaa salaojan molemmin puolin niin, että salaoja ja teräsverkko peittyvät ruiskubetoniin. Muut ruiskubetonikerrokset tehdään normaalista kahdesta suunnasta kokonaispaksuuden ollessa salaoja-raudoituksen takia ympäristöä hieman suurempi.

Ruiskubetonikerros, vuodot ruiskubetonin läpi

Kohdetutkimuksissa tuli selkeästi esille vuotojen sijoittuminen epätasaisen, puutteellisen ruiskubetonikerroksen alueelle (työn laatu 31 % vuotopisteistä). Merkittävin puutteellisuuteen johtava syy on ohut ruiskubetonikerros, joka johtaa siihen, ettei määrättyllä pohjaveden paineella ruiskubetonin läpäisevä kosteusmäärä haihdu ruiskubetonin pinnalta vaan pinnalle muodostuu vesipisaroita. Tutkituissa holvialueen vuotopisteissä yli puolessa (54 %) alitettiin ruiskubetonin suunniteltu tavoitepaksuus (70–140 mm), alitus oli keskimäärin 30 mm huomioitaessa kaikki alittavat vuotopisteet. Kun mitoitetaan pienillä kerrospaksuuksilla (70 mm), niin muutaman kymmenen millimetrin alitukset muodostavat jo riskin lujituksen osalta. Tietenkin ylityksiäkin tapahtuu (keskimääräinen ylitys 45 mm), jolloin keskimääräinen massamenekki on suunnitellulla tasolla, mutta riskien kannalta minimipaksuudet ovat määrääviä.

Tulos yllättää tarkasteltaessa suunnitelmia, joissa ruiskutusbetonin tavoitepaksuus on määrätty saavutettavaksi 3 tai jopa 4 ruiskutuskerralla. Märkämenetelmällä ruiskutuskerrokseksi muodostuu vähintään 20 mm, ohuempi kerros on vaikea toteuttaa ja se on pelkkä pyyhkäisy, jolla ei saavuteta tasaista, jatkuvaa ruiskutusjälkeä. Jos ruiskubetonin paksuus jää alle 60 mm, herää väistämättä epäily, onko ruiskutuskertoja ollut suunniteltu määrä?

Paljon on puhuttu ruiskubetonin vuotojen johtuvan myös ruiskubetonikerroksen rei'istä, jotka ovat syntyneet pohjavesien tunkeutumisesta kovettumattoman ruiskubetonin läpi. Kohdetutkimuksissa havaittiin ruiskubetonissa muutamia reikiä, jotka olivat selkeästi veden auki syövyttämiä. Kaikista tutkituista vuotopisteistä 30 %:ssa vuotojen havaittiin johtuvan betonin huokoisuudesta, joka havaittiin ehjän betonin kapillaarisena vuotona. Kapillaarisiksi vuodoiksi kirjatuissa pisteissä 60 %:ssa havaittiin kimmovasaralla alhainen puristuslujuus (< 35 Mpa), jonka tiedetään korreloivan huokoisuuden kanssa. Kapillaarinen vuoto voi johtua betonin sisäsyntyisestä huokoisuudesta tai huokoisuudesta, joka syntyy pitkän ajan kuluessa kovettuneeseen betoniin veden liuottaessa kalsiumhyd-

roksidia ja muita sementin yhdisteitä. Sisäsyntyiseen huokoisuuteen (tiivistyshuokoisuuteen) voidaan vaikuttaa pienentämällä vesisementtisuuhdetta ja parantamalla tiivistyneisyyttä käyttämällä korkeampia ruiskutuspaineita, joka taas lisää hukkaroisetta.

Tarkemmissa ruiskubetonitutkimuksissa neljän kohteen ruiskubetoni oli selkeästi huokoinen, ja kun kapillaarisiakin vuotohavaintoja oli näissä kohteissa useita, voitiin kohteiden vallitsevana vuotojen syynä pitää betonin huokoisuutta.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.5 – 47 Jatkuva vesivuoto aiheuttaa veden tunkeutumisen kovettumattoman ruiskubetonin läpi. Vuoto on injektoitava tai salaojitettava ennen ruiskubetonointia tai ruiskubetonissa on käytettävä ruiskubetonin lujuudenkehitystä nopeuttavia kiihdyttimiä (natriumsilikaatteja).

5.3.2.5 – 48 Holvialueen ruiskutukseen on paneuduttava, sillä holvi edustaa aluetta, johon todennäköisimmin ilmaantuu haitallisia vuotoja jo sen suuren pinta-alankin perusteella. Holviin on vaikea ruiskuttaa tasaista kerrosta betonia, ja vajavaisuuksien havaitseminen vaatii ruiskuttajalta erityistä huolellisuutta. Tavoitteellisesti kahdesta eri suunnasta suoritetuilla 3–4 ruiskutuskerroksella saavutetaan tasainen ruiskutusjälki ja estetään koko rakennetta läpäisevien kutistumishalkeamien muodostuminen. Nykyisillä märkäruiskutuslaitteilla voidaan ruiskuttaa normaalilla massalla 30–40 mm kerrospaksuuksia, kiihdyttimiä lisäämällä voidaan saavuttaa huomattavasti paksumpiakin kerroksia.

5.3.2.5 – 49 Kasvattamalla ruiskubetonin kokonaispaksuus vähintään 100 mm saavutetaan lujitusmitoituspaksuudet kauttaaltaan koko tilassa. Paksumpi ruiskubetonikerros mahdollistaa kapillaarisen vuodon laajenemisen suurempaan betonitilavuuteen ja lopulta haihtumisen sisäilmaan suuremmalta betonin pinta-alalta.

5.3.2.5 – 50 Käytettäessä kuitubetonia on kuidut peitettävä kuiduttomalla 25–40 mm suojabetonilla, joka suojaa salaojaraudoitusta ja kuituja korroosiolta sekä peittää terävät kuidut.

5.3.2.5 – 51 Ruiskubetonin rakennepaksuutta määritettäessä pitää kuidullisen ja kuiduttoman betonikerroksen paksuus mitata erikseen. Ennen viimeisen kerroksen (suojabetonin) ruiskutusta mittausreiät on paikatava.

5.3.2.5 – 52 Kehitetään ruiskubetonin laadunvalvontaan mittausmenetelmiä, mm. ainetta rikkomaton ruiskubetonin paksuuden mittausmenetelmä.

5.3.2.5 – 53 Ruiskubetonin vesitiiviysominaisuuksia on tutkittava ja kehitettävä. Huokoisuuteen ja mikrosäröilyverkoston syntymiseen liittyvät tekijät sekä lisäaineiden vaikutukset vesitiiviyteen on erityisesti selvitettävä, jotta ruiskubetonin koostumus, ruiskutus ja jälkihoito voidaan optimoida tavoitteena mahdollisimman tiivis ruiskubetoni.

Ruiskubetonin jälkihoito

Ruiskubetonin jälkihoito on ensisijaisen tärkeää estettäessä vuotojen syntyminen betoniin. Jälkihoidolla, betonin vesikostutuksella, pyritään estämään liiallinen betonin kuivumiskutistuma ja halkeamien muodostuminen. Kutistumaan vaikuttaa betonin kuivumisen lisäksi sementin reagoiminen, joka aiheuttaa betonin sisäistä kuivumista, ns. autogeenistä kutistumaa. Pääasiallinen syy kutistumiin on betonin kuivuminen veden haihtuttua, koska veden poistuminen aina pienentää betonin tilavuutta.

Betonin kutistumaa tapahtuu kahdessa eri vaiheessa: varhaisvaiheessa ja myöhäisvaiheessa. Varhaisvaihe kestää ruiskutushetkestä ensimmäisen vuorokauden loppuun. Tällöin kutistuma on suuruudeltaan jopa kymmenkertainen myöhäisvaiheen kutistumaan verrattuna. Myöhäisvaiheen kutistuma jatkuu yhden vuorokauden iästä eteenpäin jopa vuosia, kutistumaa kutsutaan ”normaaliksi” kutistumaksi. Kutistuma on sitä hitaampaa ja pienempää, mitä paksumpi ruiskubetonirakenne on.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.5 – 54 Ruiskubetonikerroksen jälkihoito aloitetaan muutaman tunnin sisällä betonin ruiskutuksesta sumumaisella vesikastelulla, tai vaihtoehtoisesti käytetään ruiskubetonin sisäisiä tai ulkoisia jälkihoitoaineita.

5.3.2.5 – 55 Ruiskubetonipinnat pidetään kosteina vähintään 7 vrk, erikoisen vetoisissa paikoissa jopa 14 vrk viimeisen ruiskutuskerroksen jälkeen. Noin viikon aikana ruiskubetonit ovat keskimäärin saavuttaneet 80 % nimellislujuudestaan, joka on ruiskubetoni-ohjeiden by29 (1993) mukaan vaatimuksena ruiskubetonin vedenpitävyydelle.

5.3.2.5 – 56 Estämällä ruiskubetonoinnin jälkeen ilmavirtaus tilassa vähennetään veden haihtumista ruiskubetonista. Liiallinen lämmitys lisää betonin kuivumiskutistumaa.

5.3.2.6 Pinnoitteet

Maalit

Yleisen käytännön mukaisesti ruiskubetonoidut kalliotilat pinnoitetaan sementtipohjaisella Murtet- tai Aquella-maalilla. Maalin on suunniteltu toimivan eristävänä pinnoitteena heikon vedenläpäisevyytensä takia. Pinnoitteen toimiessa oikein ruiskubetonin läpi kapillaarisesti suotautuva vesi ei läpäise pinnoitetta, vaan kulkeutuu ruiskubetonisalaajiin.

Kovettuessaan maali muodostaa plastisen kerroksen ruiskubetonin pintaan, joka halkeaa helposti ruiskubetonin liikkeiden vaikutuksesta. Ruiskubetonin halkeaminen aiheuttaa aina pinnoitekerroksen halkeamisen. Pinnoitteessa vuodot kohdistuvat juuri halkeamien tai muutoin vaillinaisen pinnoitteen alueelle.

Tilanteen korjaamiseksi on Leppävaaran pysäköintilaitoksessa etsitty korvaavia maali-pinnoitteita (suullinen tieto Matti Kokko, 2001). Kohteessa testattiin n. kymmentä eri maalia ruiskubetonin pinnoitteena, joukossa mm. Murtet ja Aquella, toisiaan vastaavissa olosuhteissa. Tulos oli yksiselitteinen: huokoinen orgaaninen sementtipinnoite esim. Tikkurila Paints Oy:n Finnseco S pysyi testijakson ajan kuivana, ts. tippuvuotoja ei esiintynyt. Huokoinen pinnoite läpäisee ruiskubetonista tulevan kosteuden. Kosteus leviää pinnoitteessa laajalle alueelle, jolloin haihdutuspinna kasvaa ja ilmanvaihto poistaa kosteutta pienentäen tippavuodon riskiä. Jos vesi tulee ruiskubetonin halkeamasta, ei huokoinenkaan pinnoite estä vuotoja. Vastaavasti huokoiseen pinnoitteeseen ei myöskään kondensoidu sisäilman kosteutta, vaan pinta pysyy kuivana korkeillakin sisäilman kosteuspitoisuuksilla. Huokoisen pinnoitteen haittapuolena voidaan pitää huokoisuuden pienenemistä ajan myötä hienoaineksen tukkiessa huokosia.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.6 – 57 Ruiskubetonin eri pinnoitteita tulee tutkia. Huokoisten pinnoitteiden käyttöä eristävien pinnoitteiden sijasta voidaan varauksella suositella. Huokoisen pinnan puhtaanapito voi muodostua sen käyttöä rajoittavaksi tekijäksi.

5.3.2.6 – 58 Käytön aikainen tilan ilmastoinnin riittävyys kosteudenpoistoon on varmistettava tai käytettävä ilmankuivausjärjestelmiä.

Ruiskutettavat vesieristeet

Ruiskutettavia vesieristeitä on harvemmin käytetty Suomessa maanalaisessa rakentamisessa. Ruiskutettavat vesieristeet ovat muoveja, joiden ruiskuttaminen on helppoa myös

epätasaisille pinnoille. Tunneleiden kosteuseristeenä on käytetty lasikuituvahvisteista polyesterihartsia, Paraisten koetunnelissa (Heino, 1998) on tutkittu Mine Guard polyuretaanipohjaista massaa ja Helsingin Energian monikäyttötunnelissa Vuosaari–Pasila jaksolla on testattu vesipohjaista dispersiota Masterseal vesieristemembraania.

Masterseal 340 F on käytetty Keski-Euroopassa esim. kerrosruiskubetonirakenteessa, jossa kahden ruiskubetonikerroksen väliin ruiskutetaan vettä eristävä muovipinnoite, ulomman vähintään 50 mm ruiskubetonikerroksen toimiessa palosuojana (paloturvallisuus saavutetaan lisäaineilla).

Ruiskutettaville vesieristeille on yhteistä, että ne tarttuvat hyvin kuivaan puhtaaseen kallioon tai ruiskubetonin pintaan, kun taas aivan märässä pinnassa tartunta on huono. Muovipinnoitteet ovat elastisia ja antavat hieman periksi kallion ja ruiskubetonin liikkeille. Näin ollen tilanne on parempi verrattuna plastisiin maaleihin. Muovipinnoitteiden paloturvallisuus on huono, ne vaativat usein palosuojauksen esim. ruiskubetonista.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.6 – 59 Kehitetään ja tutkitaan ruiskutettavien vesieristeiden käyttöä osana verhourakennetta. Eristemateriaalien toimivuus ja paloturvallisuus sekä ympäristövaikutukset on selvitettävä.

5.3.2.7 Jälkikorjaukset/-asennukset

Jälkikorjaustoimenpiteinä esiin nousee yksittäisten vesivuotojen tiivistäminen erilaisilla nopeasti kovettuvilla massoilla. Joissakin kohteissa on suoritettu vuotojen jälki-injektointia prässikalustolla käyttämällä kemiallista injektointiainetta (esim. polyuretaania, hartsia ja hiekkaa tai pelkkää hartsia).

Kohdetutkimusten perusteella nykyiset vesivuotojen pintapaikkaukset sementtipitoisilla massoilla eivät poista vuotoa, vaan vuodot ilmaantuvat ajan myötä uudelleen paikkaukohdan alueelle. Kemiallisella injektoinnilla tilanne on parempi, mutta yleisesti jälkiinjektoinnin oletetaan ohjaavan kalliossa vuodot vain toiseen paikkaan.

Jälkikorjauksissa vuotovedet on pyrittävä injektoinnilla ohjaamaan salaojituksiin tai vaihtoehtoisesti annettava veden tulla ruiskubetonirakenteeseen, josta se pyritään ohjaamaan salaojaan tai pienten vuotojen annetaan haihtua ruiskubetonin pinnalta.

Betonin korjaukset ja uusien ruiskubetonisalaojien asennukset ovat hankalia toteuttaa tiloissa joissa toiminnan pitää jatkua ilman keskeytyksiä. Tällöin pyritäänkin pienillä toimenpiteillä tilanteen mukaan (pistemäinen injektointi, tunneliverhoukset, haihdutuslautat).

set, vesikourut, jne.) tukkimaan vuodot tai estämään tippavuotojen haitat kallioiloissa. Ratkaisut ovat epäesteettisiä ja usein vain väliaikaisia vuotojen hallintakeinoja. Se on varmaa, että olemassa olevia maanalaisia kallioiloja tullaan peruskorjaamaan enenevässä määrin, ensimmäiset ruiskubetonit ovat jo 40 vuotta vanhoja, jolloin erilaisia saneerausmenetelmiä tulisi pikaisesti kehittää.

Toimenpide-ehdotus:

5.3.2.7 – 60 Vuotojen paikkausmenetelmiä ja -aineita tulisi tutkia ja kehittää.

5.3.2.7 – 61 Saneerausta varten olisi syytä kehittää erillinen kevyt jälkiasennus-salaoja, joka asennettaisiin melko huomaamattomasti vuotokohtaan vanhan ruiskubetonin päälle ja peitettäisiin pinnoitteella yhtymään ympäröivään ruiskubetoniin. Salaojat on syytä johtaa lattian aluskenteeseen tai ainakin mahdollistaa vesien purkautuminen lattiarakenteeseen.

5.3.2.7 – 62 Ruiskubetonisalaojen vesitiivyyttä voidaan varmistaa ruiskutettavalla vesieristemembraanilla, joka peitetään kuiduttomalla ruiskubetonikerroksella ja/tai pinnoitemaalilla.

5.3.2.7 – 63 Saneerattaessa perusteellisesti ruiskubetonoituja tiloja betonirakenteita ei voi korjata asentamalla vuotokohtaan vain uutta massaa vanhan päälle, vaan vaurioitunut betoni tulee poistaa ennen uudelleenbetonointia. Kyseeseen voisikin tulla vettäläpäisevän (huokoinen rb, halkeama, vajaa kerros, jne.) ruiskubetonirakenteen piikkaus kallion pintaan asti ja täsmäruiskutus korjauskohtaan hieman aikaisempaa paksumpana kerroksena ulottaen ruiskutuksen osittain korjausalueen ulkopuolelle vanhan ruiskubetonikerroksen päälle.

5.3.2.7 – 64 Saneeraustarpeen selvitystä varten tarvitaan erilaisia kuntoarviointimenetelmiä.

5.3.3 Tilan vastaanotto ja käyttö

Tilan vastaanottoa ja käyttöä varten tarvitaan erilaiset dokumentit tilan laitteistoja ja rakenteita koskien.

Vastaanottoa varten rakentamiseen liittyvistä puutteista ja virheistä on käytössä puutelistat ja tarkastuspöytäkirjat. Aikaisemmin laadunvalvonnan yhteydessä toimenpide-eh-

dotuksena esitetyt laadunvalvontakortit kuvaavat tarkemmin eri työvaiheiden sisältöä, työn suoritusta sekä havaittuja puutteita ja työnaikaisia korjaustoimenpiteitä. Kun sopimusasiakirjojen perusteella työsuoritukset voidaan katsoa hyväksyttävästi suoritetuiksi, voidaan tila vastaanottaa urakoitsijalta. Laitteistojen toimivuudesta laitteistoasentajat esittävät dokumenttina esim. toimintakoe-, koekäyttö-, mittaus- ja asennuspöytäkirjat sekä laitteistovalmistajien takuutodistukset.

Käyttöä varten tarvitaan huolto- ja käyttöohjeet. Eräs tärkeimmistä käytön aikaisista ohjeistuksista, jolla vaikutetaan tilan kosteuden hallintaan, on ilmastoinnin käyttöön ja säätämiseen liittyvät ohjeet. Ilmastoinnilla on merkittävä vaikutus ruiskubetonin läpi kapillaarisesti tulevan veden poistamisessa ruiskubetonin/pinnoitteen pinnalta. Ilmastoinnilla estetään myös kondenssivesien muodostumista rakenteiden pinnalle.

Viranomaiset voivat edellyttää tilan vuotovesien käytönaikaista seuranta. Tällöin voidaan jopa seurata tilan eri osien vuotovesiä erottamalla tilat toisistaan esim. mittapadoilla tai johtamalla vedet eri pumppaamoihin. Seuranta varten laaditaan vuotovesien seurantaohjelma.

Toimenpide-ehdotus

5.3.3 – 65 Kalliotilan/tunnelin vastaanottajalle/käyttäjälle laaditaan kohdekohtainen kalliotilan huoltokirja, jossa esitetään myös vesitiiviyyden kannalta keskeiset tilan käyttöön ja huoltoon liittyvät asiat, kuten ilmastoinnin käyttötarve ja salaojien toimivuuden tarkastus- ja huoltotarve.

6. Toimenpide-ehdotusten priorisointi ja toteutus

Luvussa 5 esitetyt toimenpide-ehdotuksia analysoidaan pisteyttämällä (Taulukko 9). Analysoinnissa arvioidaan aluksi ehdotetun toimenpiteen vaikutusta kallioiden vesitiiviyyden hallinnassa, sen toteutettavuutta resurssivaatimusten pohjalta ja päädytään lopuksi toimenpide-ehdotusten keskinäiseen priorisointiin.

Kaikilla toimenpide-ehdotuksilla pyritään vesitiiviyyden parantamiseen, mutta yksittäisen ehdotuksen merkitys tilan vesitiiviyyden hallinnassa vaihtelee. Toimenpide-ehdotuksen vaikutuksen ollessa erittäin merkittävä ovat vuodot ilman toimenpiteitä erittäin todennäköisiä, kun taas vähäisessä vaikutuksessa toimenpiteellä ei yksin vaikuteta vuotoihin, vaan sillä täydennetään kokonaishallintaa ja mahdollistetaan muiden toimenpiteiden toteuttaminen ja tehokas käyttö.

Arvioitaessa toimenpide-ehdotuksen toteutettavuutta otetaan huomioon parannusehdotuksen vaatimat resurssit (työ, aika ja kustannukset) ja arvioidaan miten nopealla aikajänteellä toimenpide voi realisoitua.

Analyysin tuloksena toimenpide-ehdotukset priorisoidaan, ts. suositellaan toimenpide-ehdotuksille toteuttamisjärjestys korostaen niitä asioita, joilla kustannustehokkaasti ja lyhyellä aikavälillä merkittävästi vähennetään tai estetään vesivuotojen syntymistä ja hallitaan kallioiden vesitiiviyttä.

Taulukko 9. Toimenpide-ehdotusten arvioinnissa käytetty pisteytys.

Piste	Vaikutus vesitiiviyyteen	Toteutettavuus	Priorisointi
1	vähäinen toimenpiteellä ei yksin hallita vesitiiviyttä tukee muita toimenpiteitä	vaikkeasti toteutettavissa vaatii paljon resursseja T&K-hanke, toteuttaminen voi olla käytännössä vaikeaa	vähäinen merkitys ei välitön toimenpide vaatii jatkoselvityksiä ja -tutkimuksia
2	kohtalainen yleinen vesitiiviyyden hallinta	kohtalaisesti toteutettavissa vaatii resursseja, ehkä tuotekehitystä	kohtalainen merkitys merkitystä arvioitava tapauskohtaisesti ei yleistettävä
3	merkittävä tapauskohtainen vesitiiviyyden hallinta laadunvarmistus- ja valvonta	helposti toteutettavissa vaatii vähän resursseja kehitetään toimintatapaa sovelletaan eri tekniikoita	tärkeä toimenpiteeseen ryhdyttävä olemassa olevien resurssien mukaan asia/ongelma/puute huomioitava
4	erittäin merkittävä toimenpiteellä rajoitetaan ja estetään vuodot, työn laadunvalvonta	toteutettavissa välittömästi sovelletaan heti rakentamiskäytännössä	erittäin tärkeä välitön toimenpide otettava käyttöön rakentamisessa tai vaatii T&K:ta

Toimenpide-ehdotukset, jotka priorisoidaan erittäin tärkeiksi ja välittömiä toimenpiteitä vaativiksi (4), eritellään heti rakentamisessa käyttöön otettaviksi (käytäntö) tai nopealla aikajänteellä tutkimusta ja tuotekehitystä (t&k) vaativiksi.

Taulukko 10. Toimenpide-ehdotusten arviointi ja priorisointi.

Koodi kappale-nro	Toimenpide-ehdotus	vesitiivisyysvaikutus	toteutettavuus	priorisointi
5.2.1 – 1	Vesitiivisyysluokitus	3	2	4 t&k
5.2.2 – 2	Injektointisuunnitelma; injektoinnin rytmittäminen louhintaan	3	4	3
5.2.3 – 3	Työnaikaisen suunnittelun lisääminen ja valvonta	3	4	4 käytäntö
5.2.3 – 4	Työnaikaisen suunnittelun huomiointi suunnittelu-	3	4	4 käytäntö
	sopimuksessa			
5.2.3 – 5	Vesitiivyyden varmistus- ja laadunvalvontaohje	3	2	4 t&k
5.2.3 – 6	Vesitiivisyysasiat työmaan laadunvarmistussuunnitelmaan	3	3	3
5.2.3 – 7	Laadunvalvontakortit (check-list, työsuorituksen dokumentointi)	2	2	2
5.2.3 – 8	Injektoinnin laadunvalvonnan kehittäminen	4	3	4 käytäntö
5.2.3 – 9	Vuotovesimäärän mittaus työn- ja käytönaikaisesti	1	2	4 käytäntö
5.3.1.2 – 10	Rajoitukset ja vaatimukset maanpäälliseen kaavaan	4	3	4 t&k
5.3.1.3 – 11	Pohjatutkimustietojen minimitaso vesitiivisyysluokituksen mukaan	1	2	2
5.3.1.4 – 12	Suurten jänneväljen halleissa nuolikorkeuden nosto	3	2	2
5.3.1.4 – 13	Ohuiden kalliokattojen tiivistäminen, eristäminen	3	2	2
5.3.1.5 – 14	Uusia hankintamenettelyjä ja tuotantomalleja	1	4	4 käytäntö
5.3.1.5 – 15	Rakennusaikataulun väljentäminen, aikaa tiivyyden hallinnalle	3	2	3
5.3.2.1 – 16	Rakennusvalvonta tietoinen rajoituksista ja vaatimuksista	3	3	4 käytäntö
5.3.2.1 – 17	Asiantuntijavalvonta maanpäällisen louhinnan toteuttamisessa	4	3	3
5.3.2.1 – 18	Rakennusten perusvesien hallinta peruskavannossa	4	3	4 käytäntö
5.3.2.1 – 19	Louhinnan optimointi vesitiivyyden kannalta	4	3	4 t&k
5.3.2.1 – 20	Pistoja ja pohjapanoksia harvemmin pidemmällä katkoilla	2	3	3
5.3.2.1 – 21	Täysprofiililouhinta, perän injektointi kerralla	3	3	3
5.3.2.1 – 22	Lyhyt katko, tärinöiden ja paineen hallinta riskialueilla	2	4	2
5.3.2.1 – 23	Kenttä- ja reunareikien panostuksen ja sytytyksen mitoitus	4	4	4 käytäntö
5.3.2.2 – 24	Injektointiin liittyvä tutkimus ja tuotekehitys	4	1	4 t&k
5.3.2.2 – 25	Tunnustelureikien vesimenekikokeet	3	3	3
5.3.2.2 – 26	Kontrolliporaus injektoinnin laadunvarmistamiseksi	3	2	2
5.3.2.2 – 27	Injektointityön koulutus; asiantuntevuus ja kokemus	3	1	1
5.3.2.2 – 28	Injektointivyöhykkeen läpäisevän pultin jälki-injektointi	3	2	4 käytäntö
5.3.2.3 – 29	Vesireiän oikea pultitus	4	4	4 käytäntö
5.3.2.3 – 30	Pultin kantojen katkaisu/viimeistely	4	4	4 käytäntö
5.3.2.3 – 31	Ylimääräisten reikien täyttö	4	4	4 käytäntö
5.3.2.3 – 32	Salaojen paikan määrittäminen asiantuntijan toimesta	3	4	4 käytäntö
5.3.2.4 – 33	Salaojan paikantaminen optimiolosuhteissa	3	1	3
5.3.2.4 – 34	Salaojan paikantaminen ja asennus ruiskubetonoinnin jälkeen	3	4	3
5.3.2.4 – 35	Salaojan oikea vietto, vieton varmistaminen	4	2	4 käytäntö
5.3.2.4 – 36	Salaojan pohjustaminen, vieton varmistaminen	4	3	4 käytäntö
5.3.2.4 – 37	Salaojan kiinnitys	4	4	4 käytäntö
5.3.2.4 – 38	Uusia helposti asennettavia ja huollettavia salaojarakenteita	4	2	3
5.3.2.4 – 39	Salaojen solumuovien kestävyysparantaminen	3	2	3

Koodi kappale-nro	Toimenpide-ehdotus	vesitiiviys vaikutus	toteutet- tavuus	priorisointi
5.3.2.4 – 40	Salaojien raudoitus, halkeamien estäminen	4	4	4 käytäntö
5.3.2.4 – 41	Salaojasorakerroksen toimivuuden varmistaminen	3	4	4 käytäntö
5.3.2.4 – 42	Ruiskubetonisalaojien suojaus ja oikea päättymistaso	3	4	4 käytäntö
5.3.2.4 – 43	Ruiskubetonisalaojien liittäminen lattiasalaojajärjestelmään	2	3	2
5.3.2.4 – 44	Salaojien tarkistus ja huolto	3	2	3
5.3.2.4 – 45	Lattiasalaojaputkisto, vesien keräys ja siirto	2	4	2
5.3.2.5 – 46	Salaojan huolellinen ruiskubetonointi	4	4	4 käytäntö
5.3.2.5 – 47	Jatkuvan vesivuodon tiivistäminen ja ruiskubetonointi	4	4	4 käytäntö
5.3.2.5 – 48	Holvin ruiskubetonointi useilla paksuilla kerroksilla	4	4	4 käytäntö
5.3.2.5 – 49	Ruiskubetonirakenteen paksuuden kasvattaminen	4	4	4 käytäntö
5.3.2.5 – 50	Kuiduton suojabetonikerros	2	4	2
5.3.2.5 – 51	Ruiskubetonikerrosten (kuitu/kuiduton) paksuuden mittaus	3	4	3
5.3.2.5 – 52	Ruiskubetonin laadunvalvontamenetelmien kehittäminen	3	2	4 t&k
5.3.2.5 – 53	Ruiskubetonin vesitiiviysominaisuuksien kehittäminen	4	2	4 t&k
5.3.2.5 – 54	Jälkihoitoaineen vaikutusten selvittäminen	2	2	3
5.3.2.5 – 55	Ruiskubetonin riittävä jälkihoito vesikastelulla	4	4	4 käytäntö
5.3.2.5 – 56	Jälkihoito-olosuhteiden optimointi	3	4	4 käytäntö
5.3.2.5 – 57	Ruiskubetonin pinnoitteiden tutkiminen	4	3	4 t&k
5.3.2.6 – 58	Ilmastoinnin mitoitus käytön aikaiseen kosteudenpoistoon	2	4	2
5.3.2.6 – 59	Ruiskutettavien komposiittieristerakenteiden kehittäminen	4	2	4 t&k
5.3.2.6 – 60	Vuotojen paikkausmenetelmien ja -aineiden tutkiminen	4	2	3
5.3.2.7 – 61	Saneeraus-/lisäsalaojan kehittäminen	3	2	1
5.3.2.7 – 62	Ruiskubetonisalaojan vesitiiviyyden varmistaminen	2	3	1
5.3.2.7 – 63	Ruiskubetonirakenteiden saneerausmenetelmien kehittäminen	3	3	3
5.3.2.7 – 64	Kuntoarviointimenetelmien kehittäminen	1	3	3
5.3.2.7 – 65	Kalliotilan huoltokirja	1	3	3

Taulukossa 10 tummennettuina esitetyistä erittäin tärkeiksi priorisoiduista (priorisointiaste 4) toimenpide-ehdotuksista suositellaan välittömästi rakentamisessa käyttöön otettavaksi 25 kpl (38 %), ja 9 kpl (14 %) vaativat välittömästi tutkimus- ja tuotekehityshankkeiden (t&k) käynnistämistä. Muut toimenpide-ehdotukset, n. 50 %, on huomioitava ja tarvittaessa toteutettava rakennushankekohtaisesti käytössä olevien resurssien (aika, kustannukset, tekijä) mukaan.

Tutkimus- ja tuotekehityshankkeita ehdotetaan seuraavista aiheista:

- kalliotilojen vesitiiviyden luokitus
- vesitiiviyyden varmistus- ja laadunvalvontaohje
- kalliotilojen vesitiivyyttä varmentavat kaavamääräykset
- louhinnan optimointi vesitiiviyyden kannalta
- injektoinnin ja sen laadunvalvonnan kehittäminen
- ruiskubetonirakenteen vesitiiviyyden kehittäminen
- ruiskubetonin laadunvalvontamenetelmien kehittäminen
- ruiskubetonin pinnoitteiden tutkiminen vesitiiviyyden kannalta
- ruiskutettavien vesitiiviiden komposiittieristerakenteiden kehittäminen.

7. Jatkokehitystarpeet

Vesitiiviuden parantamiseen liittyvistä toimenpide-ehdotuksista osa on sellaisia, joiden toteuttaminen edellyttää joko teknistä ohjeistusta tai tutkimus- ja tuotekehitystyötä ennen toimenpiteen käyttöönottoa. Esimerkiksi injektoinnin käytön vähäisyyden vesitiiviuden hallinnassa voidaan katsoa osaltaan johtuvan ohjeistuksen puutteesta. Tutkimus- ja tuotekehitystarpeita kohdistuu ennen kaikkea toimivien vesieristysratkaisujen ja -rakenteiden kehittämiseen sekä kalliotilojen käyttötarkoituksenmukaisten laatuvaatimusten ohjeistamiseen. Muut toimenpide-ehdotukset ovat välittömästi käyttöönotettavia huomioimalla ne suunnittelussa tai rakentamisessa.

Seuraavassa esitetään tärkeitä tekniseen ohjeistukseen ja tutkimus- ja tuotekehityshankkeisiin liittyviä aihekokonaisuuksia, jotka sisältävät edellä käsiteltyjä yksittäisiä toimenpide-ehdotuksia. Ohjeistuksen tarkentamista vaaditaan varsinkin injektoinnille, ruiskubetonoinnille ja pultitukselle vastaamaan tämän päivän tietoa ja osaamista kalliotilojen vesitiiviysvaatimukset huomioiden. Näistä varsinkin injektoinnin ja ruiskubetonoinnin ohjeistuksen rinnalla tulee suorittaa myös menetelmiin, materiaaleihin ja rakenteisiin liittyvää tutkimus- ja tuotekehitystä. Muita tärkeitä tutkimusta ja tuotekehitystä vaativia aihepiirejä ovat kalliotilojen vesitiiviysluokitus, kalliotilan salaojitus- ja eristerakenteet sekä louhintasuunnittelun kehittäminen huomioimaan vesitiiviysvaatimukset.

7.1 Tekninen ohjeistus

7.1.1 Injektointi

Kallion tiivistäminen injektoimalla edellyttää työn suunnittelun, suorituksen sekä laadunvalvonnan ohjeistamista, ennen kuin injektointia voidaan hallitusti ja kustannustehokkaasti käyttää osana vesitiiviysratkaisuja.

7.1.2 Salaojitus- ja kuivatusrakenteet

Salaojituksen toteuttaminen suuren jäännevälin kallioiloissa on erittäin vaativa toimenpide, joka vaatii huolellista suunnittelua, toteutusta ja myös teknistä laadunvalvontaa, vrt. myös kohta 7.2.2. Salaojituksessa on otettu käyttöön erilaisia rakenneratkaisuja, jotka esimerkiksi ruiskubetonoidessa käyttäytyvät eri tavoin. Osa käytetyistä salaojarakenteista voi jopa vaurioitua tai tukkeutua ruiskubetonoinnin seurauksena, eikä kaikissa ratkaisuissa ole huuhtelu- tai muuta huoltomahdollisuutta

Salaojarakenteiden suunnittelu, toteutus ja laadunvalvonta tulisi myös ohjeistaa, jotta näissä rakenteissa syntyvät käytönaikaisia vesivuotoja aiheuttavat virheet saataisiin minimoiduksi.

7.1.3 Ruiskubetonointi

Ruiskubetonoinnissa Suomessa siirryttiin 1990-luvun alussa mekanisoituun märkäruihkutukseen, joka vähitellen syrjäytti käsityönä tehtävän kuivaruiskutuksen käytön tehokkaampana ja myös turvallisempaan työmenetelmänä. Ruiskubetoniohjeistus laadittiin 1990-luvun alussa koskemaan myös märkäreosmenetelmää. Tämän jälkeen on tehty paljon tutkimus- ja kehitystyötä, jonka seurauksena osaaminen ja menetelmät ovat kehittyneet. Tämän päivän osaaminen ja kehittyneet työmenetelmät tulisi päivittää myös ruiskubetoniohjeistukseen, jossa ruiskubetonirakenteen laatuvaatimukset tulisi määrittellä mm. lujuuden, vesitiiviyyden, pakkasenkestävyyden ja korroosionkestävyyden osalta.

7.1.4 Pultitus ja tartuntarakenteet

Suomessa käytettävät kallion pultitusohjeet ovat yli 25 vuotta vanhat. Tämän jälkeen pultituksessa käytettävät poraustekniikat, pulttimateriaalit sekä juotosmateriaalit ovat kehittyneet ja monipuolistuneet, ja uudet mahdollisuudet pultitustyön suorituksessa ja laadunvalvonnassa tulisi myös ohjeistaa. Jos esi-injektoinnin käyttö kallion tiivistämisessä yleistyy, tämä on entistäkin tärkeämpää, sillä esimerkiksi kalliotilojen holviosuuk-silla voidaan pitkällä pulteilla joutua läpäisemään injektointia kalliotilan katto-osuutta. Tällöin vesitiiviin pultituksen suoritus- ja laadunvalvontaohjeet ovat tilan vesitiiviyyden kannalta erittäin tärkeitä. Kohdetutkimuksissa yksi vesivuotoja aiheuttava tekijä olivat vuotavat pultinreiät. Yksi tärkeä pultitukseen liittyvä seikka on teräskorroosio ja sen huomioonottaminen lujituksen käyttöikänsä perustuvassa mitoituksessa ja pultitustyön toteutuksessa.

7.2 Tutkimus- ja tuotekehitys

7.2.1 Vesitiiviysluokitus

Kalliotiloissa eri käyttötarkoituksen omaaville tiloille ja tunneleille voidaan sallia erilainen vesitiiviysvaatimus. Vesitiiviysvaatimus voi olla erilainen jopa samankin kalliotilan eri osissa, jos kalliotilan eri osilla on erilaiset käyttötarkoitukset. Käytännössä on usein todettu, että vesitiiviysvaatimuksista tilaajalla ja suunnittelijalla/rakentajalla on ollut

lähtötilanteessa eri käsitykset, joita ei ole voitu määrittellä mitattavilla suureilla. Vesitiiviyden parantamisen kannalta on todettu tärkeäksi kehittää kalliotiloille käyttötarkoituksen mukaiset tekniset ja toiminnalliset laatuvaatimukset täyttävä vesitiiviysluokitus, jota myöskin rakentamisen tilaus- ja hankintamenettelyjen muuttuminen kokonaisvaltaisempaan suuntaan edellyttää. Luokiteltaessa kalliotiloja täytyy huomioida myös ympäristövaatimukset, jotka voivat vaatia tilalta erityistä vesitiiviyttä vaikka tilan käyttötarkoitus ei sitä vaatisikaan.

7.2.2 Salaojitus- ja eristysrakenteet

Käytössä olevien salaojarakenteiden hyväksyttävä asennus epätasaiseen kalliopintaan erityisesti laakeilla katto-osuuksilla riittävällä vietolla on usein mahdotonta. Tulisi kehittää uusia salaojitus- ja kuivatusrakenteita, jotka yhdistettynä muihin eristerakenteisiin (routra-, vesieristys- ja paloeristysrakenteet) toimisivat kalliotilan komposiittisena eristys- ja sisäverhousrakenteena, jonka ominaisuudet on mitoitettavissa suunnitteluvaiheessa. Salaojituksen kehittäminen tulee tapahtua yhdessä ruiskubetonin ja ruiskubetonirakenteen kehittämisen kanssa.

7.2.3 Louhinnan optimointi vesitiiviyden kannalta

Louhintaa voidaan pitää eräänä tärkeimpänä tuotantovaiheena, kun tarkastellaan rakennettavan kalliotilan vesitiiviyttä. Tasainen louhintajälki luo hyvän pohjan salaojituksen asennukselle oikeaan viettoon sekä tasalaatuiselle ruiskubetonoinnille. Hyvä louhintajälki kuvastaa porauksen, panostuksen ja sytytyksen onnistumista. Karkea louhintajälki johtaa räjäytyksen aiheuttaman paineen ja lohkaroitumisvyöhykkeen ulottumiseen pitkälle tilaa ympäröivään kallioon, mikä puolestaan heikentää kallion lujuutta ja vesitiiviyttä. Louhintakatkon pituuden kasvattaminen 4,5 metristä jopa yli 6 metriin ei vesitiiviyden kannalta ole välttämättä hyvä kehityksen suunta, koska tällöin katkon irrottamiseen käytettävät poraus- ja panostusmenetelmät saattavat muuttua tilan vesitiiviyden kannalta epäedulliseen suuntaan. Louhintatapa vaikuttaa louhittavan kalliotilan vesitiiviyteen mm. seuraavien seikkojen kautta: kalliolaatu ja rakoilu, louhintaprofiili, katkon pituus, pisto, porareian halkaisija, panostus, sytytys ja momentaaninen räjähdysainemäärä. Näiden eri tekijöiden yhteisvaikutusta louhintajälkeen ja louhittavan tilan vesitiiviyteen ei nykyisin riittävästi tunneta tai oteta huomioon. Näiden eri tekijöiden erillis- ja yhteisvaikutus kallion ja kalliotilan vesitiiviyteen tulisi selvittää ja pyrkiä optimoimaan louhintamenetelmä vesitiiviyden kannalta eikä pelkästään louhintatehokkuuden kannalta, kuten tänä päivänä helposti tehdään.

Louhintasuunnittelussa ja louhinnan toteutuksessa olisi mahdollista käyttää myös dataporauksessa kerättävää yksityiskohtaisempaa, reaaliaikaista kallioperätietoa, jonka perusteella olisi mahdollista tehdä kalliolaadun muutoksesta johtuvat korjaukset louhintasuunnitelmaan lähes reaaliaikaisesti. Nykyiset dataohjausvalmiudet poraus- ja panostussuunnittelussa antavat siihen joustavat mahdollisuudet. Louhintasuunnittelussa tulee nykyistä tarkemmin ottaa huomioon tilojen vesitiiviyysvaatimus, koska vesitiiviydeltään vaativissa tiloissa se johtaa automaattisesti nykyistä tarkempaan ja varovaisempaan louhintaan.

7.3 Koerakentaminen ja rakenteiden tuotehyväksyntämenettely, auditointi

Kehitettävät uudet rakenneratkaisut erityisesti eristysrakenteet (vesieristys, routaeristys, paloeristys) tulee koerakentaa ja tuotehyväksyttää ennen laajamittaista käyttöönottoa. Tällä menettelyllä varmistetaan rakenteiden toimivuus eri mitoitus- ja käyttöolosuhteissa sekä estetään mahdollisten virheellisten tai puutteellisten rakenneratkaisujen käyttöönotto. Uusien materiaalien ja rakenteiden tuotehyväksyntämenettely sekä auditointi nopeuttavat uusien toimivien ratkaisujen käyttöönottoa sekä pienentävät uusiin rakenneratkaisuihin liittyvää tilaajan ja rakentajan riskiä.

7.3.1 Vesitiivyyden hallintamenetelmien toteutus vaativan mallikohteen suunnittelussa ja rakentamisessa

Vesitiivyyden hallintaan yleistapaukselle kehitetty RES-analyysi on mahdollista tarkentaa suhteellisen pienellä työmäärällä kohdekohtaiseksi analyysiksi. Tällöin toteutettavan kohteen vesitiivyyteen vaikuttavat olosuhteet ja erityispiirteet tulevat riittävän ajoissa esille ja ne voidaan ottaa tarkemmin huomioon kohteen suunnittelussa, rakentamisessa ja työn suorituksen valvonnassa. Vesitiivyyden saavuttamisen edellytykset ja tarvittavat toimenpiteet voidaan myös perustella luotettavammin kohdekohtaisella RES-analyysillä. Tällöin mm. vesitiivyyseratkaisujen kustannuksiin osataan paremmin varautua.

Kalliotilan vesitiivyyden saavuttamiseksi tarvittavat menetelmät, toimenpiteet ja rakenneratkaisut sekä niiden toimivuus tulisi testata vaativassa mallikohteessa suoritettavalla koeohjelmalla.

7.3.2 Mallikohde-ehdotus ja sen valintakriteerit

Kalliotilojen vesitiiviiden parantamiseksi tähtäviä toimenpide-ehdotuksia on syytä koeluonteisesti soveltaa käytännössä. Parhaiten tämä onnistuu koerakennuskohteessa, jonka tiukat vesitiiviysvaatimukset määräävät rakentamisessa käytettäväksi yleisesti havaittuja onnistuneita rakenneratkaisuja ja laadukasta työn suoritusta.

Tilan valinnassa voidaan käyttää seuraavia kriteereitä:

- hankesuunnitteluvaihe käynnissä
- korkeat vesitiiviysvaatimukset ympäristön ja tilan osalta
- tilan laatutaso korkea
- aikataulussa varauduttava joustoihin tutkimusten takia
- kustannuksissa varauduttava tutkimuksien ja koerakentamisen aiheuttamiin kustannusvaikutuksiin (lisätyöt, aikataulu), lisätyöt voidaan rahoittaa erikseen
- suunnittelua varten suoritettava riittävät kallio- ja pohjavesitutkimukset
- tilan vuotovesimääriä ja ympäristön pohjavesiolosuhteita seurattava tarkasti.

Tilan rakentamisen aikana voidaan käyttää toimenpide-ehdotuksissa esitettyjä laadunvalvontakortteja, joihin kirjataan myös seurannan aikaiset havainnot rakenteen toimivuudesta. Vesitiiviystutkimuksia varten käynnistetään erillinen ohjelma, joka kattaa tilan koko tuotantoprosessin.

8. Yhteenveto

Kalliotiloissa esiintyvät vesivuodot ovat Suomessa pitkään herättäneet keskustelua vuotojen syistä, niiden haitoista ja vaihtoehtoisista vesieristysratkaisuista ja -rakenteista sekä sopivista työmenetelmistä. Kuivatusjärjestelmistä pois johdettava vesi saattaa muuttaa pohjavesitasapainoa ja aiheuttaa haittaa maanpäällisille rakenteille, kasvistolle ja vesistöille kalliotilojen ympäristössä. Tippavuodot kalliotilan sisällä puolestaan aiheuttavat haittaa tilan rakenteille, laitteistoille ja käyttäjille. Sekä kalliorakennusalalla että tilojen käyttäjien keskuudessa on havaittu ongelmaksi varsinkin uusissa kalliotiloissa esiintyvät lukuisat tippavuodot. Tämä ongelma onkin synnyttänyt tarpeen parantaa kalliotilojen vesitiivyyttä ja samalla tilojen laatutasoa.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää kalliotiloissa esiintyvien vesivuotojen todelliset syyt ja niiden merkittävyys syyjakaumien sekä vesitiivyyden hallinta-analyysin perusteella sekä esittää priorisoidut toimenpide-ehdotukset kalliotilojen ja tunneleiden vesitiivyyden hallitsemiseksi ja parantamiseksi lyhyellä ja pitkällä aikavälillä.

Tutkimus koostui kirjallisuusselvityksestä, kohdetutkimuksista (12 kohdetta) seuranta-tutkimuksista (3 kohdetta) sekä tutkimustulosten analysoinnista. Tutkimukseen sisältyi myös tutustuminen Ruotsin ja Norjan kalliotilojen vesitiivyyden hallintaan ja siellä tehviin vesitiivyyteen liittyviin tutkimuksiin.

Suomen, Ruotsin ja Norjan kallioperäolosuhteet sekä käytetyt louhintamenetelmät ovat hyvin samankaltaiset. Vesitiivyyden hallintaan käytetyt menetelmät eroavat seuraavasti: Suomessa ruiskubetoni ja salaojitus ovat pääasiällisin vesieristysratkaisu, Ruotsissa on tutkittu paljon injektointia ja siirrytty sen käyttöön yhdessä ruiskubetonin kanssa ensisijaisena vesieristysmenetelmänä, Norjassa käytetään injektointia ja ruiskubetonia, mutta usein myös erillisiä verhousrakenteita, etenkin liikennetunneleissa.

Kohteissa suoritettujen mittausten ja tulosten analysoinnin perusteella on havaittavissa vesivuotojen syiden kohdistuvan tilan kuivatusjärjestelmään ja vesieristysrakenteeseen. Kohteissa tutkittujen 240 vuotopisteen syyt jaettiin neljään ryhmään: halkeamat ruiskubetonissa (34 %), työnlaatuun liittyvät syyt (31 %), huokoinen ruiskubetoni (30 %) ja muut syyt (5 %). Halkeamat voivat johtua joko sisäsyntyisistä 76 % (kuivuminen, kutistuma) tai ulkoisista tekijöistä 24 % (louhintatärinät, kallion jännitystilamuutokset). Halkeamat, jotka sijaitsevat alle 10 m:n päässä tilan ympärillä tehdystä myöhemmästä louhinnasta, on kirjattu louhintatärinän aiheuttamiksi. Salaojien kohdalla sijaitsee 23 % halkeamista. Työnlaatu jakaantui eri työsuorituksiin ja rakenteisiin. Ruiskubetonoinnin epätasaisuus 40 %, louhintajälki 33 %, salaojan toimimattomuus 16 % ja kannakkeet ja pultit 11 % vuodoista. Huokoinen ruiskubetoni ilmenee kapillaarisena vuotona ja alhaisena puristuslujuutena. Nämä tekijät johtuvat ruiskubetonin korkeasta vesi-sementti-

suhteesta, suuresta huokostilavuudesta, epähomogeenisuudesta ja mahdollisesti sisäsyntyisestä mikrosäröilystä (osittain kuivuminen). Muut syyt sisältävät paikattuja tai muuten epäselviä vuotoja. Vuotojen syyjakaumat on esitetty yksityiskohtaisemmin luvussa 3.2.2.

Kohdetutkimuksien perusteella vuotojen syyjakaumat eri ruiskubetonointimenetelmillä poikkeavat hieman toisistaan, kuivaseosmenetelmässä (käsin ruiskutus) halkeamat esiintyvät pääsyynä 58 %:ssa, kun taas märkäseosmenetelmässä (koneellinen ruiskutus) halkeamat ovat syynä n. 30 %:ssa tutkituista vuotopisteistä. Varsinkin salaojien kohdalla olevien halkeamien osuus oli merkittävä kuivaseoksella ruiskutetuissa kohteissa (27 %). Näissä kohteissa ei ole ruiskubetonissa käytetty kuituja, joten betonin vetolujuus on myös alhaisempi. Huokoisuus on koneellisesti ruiskutettujen kohteiden ongelma, 31 % tutkituista vuotopisteistä viittasi huokoisuuteen, kun taas käsin ruiskutetuissa kohteissa huokoiseksi määritettiin 18 % tutkimuspisteistä. Käsin ruiskutetuissa kohteissa epätasainen betonointi (kolot, katveet, kerrospaksuuden alitus, epätasainen pinta) oli syynä 6 %:ssa pisteitä, koneellisesti ruiskutetuissa 14 %:ssa. Käsin ruiskutuksella saavutetaan tasaisempi ruiskutuskerros. Jos tarkastellaan kummankin menetelmän syyjakaumien tekijöitä (Laamanen 2000), jotka eivät ole menetelmästä riippuvia (louhintajälki, salaojan toimimattomuus, kannakkeet ja pultit), todetaan molemmilla menetelmillä näitä olevan vuodoista n. 20 %. Kallion liikkeiden aiheuttamat ruiskubetonin halkeamat voisivat olla menetelmästä riippumattomia, mutta tutkituissa kohteissa kuiduttomuus on eräs varteenotettava syy kuivaruiskubetonin halkeiluun.

Mikrorakenneanalyysin perusteella vesivuotojen betonitekniset syyt ovat korkea vesi-sementtisuhte, huono tiivistyneisyys, mikrosäröilyverkosto ja halkeamat. 0,50:n vesi-sementtisuhteen betoneissa ei havaittu mikrosäröilyä, mutta korkean vesi-sementtisuhteensa vuoksi ne läpäisevät vettä. Noin 0,35:n vesi-sementtisuhteen betoneissa oli selvä mikrosäröilyverkosto. Syyt todettuun mikrosäröilyyn ovat epäselvät. Normaalissa valubetonissa ei alhaisilla vesi-sementtisuhteilla esiinny säröilyverkostoa. Kuivamenetelmällä on mahdollista saada alhaisempi vesi-sementtisuhte, mutta käytännössä tämän tutkimuksen tulokset eivät sitä tue. Ainoastaan yhdessä tutkimuksen kuivamenetelmällä tehdyssä tilassa oli vesi-sementtisuhte 0,35 muiden ollessa 0,5.

Tutkimusten perusteella kummallakin betonointimenetelmällä on käytännössä vaikea nykyisillä 70–80 mm:n suunnittelupaksuuksilla saavuttaa riittävän vesitiivis ruiskubetonirakenne, mikä johtuu betonin laatuvaihteluista, kallion pinnan epätasaisuudesta, työteknisistä epätarkkuuksista ja olosuhdevaihteluista työkohteessa.

Seurantakohteissa seurattiin vuotojen käyttäytymistä ajan suhteen ja selvitettiin vuotoihin vaikuttavia syitä ja nykyistä rakentamiskäytäntöä vuotojen tiivistämisessä ja hallinnassa. Yksittäisten vuotopisteiden seuraamisen sijasta pyrittiin muutamalla kohdekäyn-

nillä saamaan yleiskuva kohteen vesitiivyydestä ja tiiviyteen vaikuttavista tekijöistä. Seurantakohdetutkimusten suurin hyöty projektia ajatellen oli kohteiden rakentamisen loppuvaiheilla suoritettujen työmaapäälliköiden ja vastaavien mestareiden haastattelut, joissa kirjattiin monta parannusehdotusta vesitiivyyden saavuttamiseksi maanalaisessa rakentamisessa. Nämä ehdotukset otettiin huomioon laadittaessa luvussa 5 esitetyjä toimenpide-ehdotuksia.

Vesitiivyyden hallinta-analyysi tehtiin koko kalliorakentamisen tuotantoketjulle ja se sisälsi kaikki tuotantoprosessit tilauksesta vastaanottoon. Hallinta-analyysillä pyrittiin löytämään ne tekijät, joihin vaikuttamalla tehokkaimmin voidaan parantaa rakennettavien tilojen vesitiivyyttä sekä estää vesivuotojen syntyminen. Vesivuotojen syiden ja niiden merkittävyyden analysoinnissa käytettiin apuna soveltaen kalliorakentamisessa jonkin verran käytettyä Rock Engineering System (RES) -analyysiä.

Tutkimuksen tuloksena laadittiin toimenpide-ehdotukset, joiden avulla kalliotilojen ja tunneleiden vesitiiviyys saadaan nykyistä paremmin hallintaan. Yksittäisiä toimenpide-ehdotuksia tehtiin kaikkiaan 65 kpl ja ne priorisoitiin kustannustehokkuuden, aikataulun, tutkimustarpeen ym. tekijöiden mukaan välittömästi toteutettaviksi tai myöhemmin pitemmällä aikajänteellä toteutettaviksi. Toimenpide-ehdotusten analysointi ja priorisointi on esitetty luvun 6 taulukossa 10.

Erittäin tärkeiksi priorisoiduista toimenpide-ehdotuksista suositellaan välittömästi rakentamisessa käyttöön otettavaksi 25 kpl (38 %) ja 9 kpl (14 %) vaativat välittömästi tutkimus- ja tuotekehityshankkeiden käynnistämistä tai teknisen ohjeistuksen tarkentamista. Tarpeet kohdistuvat ennen kaikkea toimivien vesieristysratkaisujen ja -rakenteiden kehittämiseen sekä kalliotilojen käyttötarkoituksenmukaisten laatuvaatimusten ohjeistamiseen. Muut toimenpide-ehdotukset 31 kpl (n. 50 %) on huomioitava ja tarvittaessa toteutettava rakennushankekohtaisesti käytössä olevien resurssien (aika, kustannukset, tekijä) ja esiintyvien tarpeiden mukaan.

Yksittäisistä vesieristysratkaisuihin kohdistuvista toimenpide-ehdotuksista merkittävimpiä ovat esi-injektoinnin lisääminen ja tehokas laadunvalvonta tilaa ympäröivän kallion tiivistämiseksi sekä ruiskubetonin paksuuden lisääminen ja vesitiivyyden parantaminen. Ruiskubetonirakenteeseen, varsinkin laakeissa kattoholveissa, saattaa kohdistua vesipainetta, jota salaojitus ei kykene purkamaan. Tämä asettaa ruiskubetonirakenteelle kohtuuttoman suuret vesitiiviyysvaatimukset, kun otetaan huomioon, että ruiskubetonikerroksen paksuus ja tiiviyys vaihtelevat johtuen mm. epätasaisesta ruiskutusalustasta. Suhteuttamalla ruiskubetonin vesi-sementtisuhde lähelle 0,35:tä ja estämällä mikrosäröily ja kutistumishalkeamien syntyminen riittävällä jälkihoidolla voidaan 70 mm:n paksuista ruiskubetonia pitää jo melko toimivana vesieristerakenteena. Suosittelemalla

ruiskubetonirakenteen kokonaispaksuudeksi vähintään 100 mm varmistetaan vesitiiviyyden kannalta riittävän ruiskubetonipaksuuden toteutuminen kauttaaltaan kalliotilassa.

Vesitiiviyyteen vaikuttavien työmenetelmien ja rakenneratkaisujen osalta todettiin useissa tapauksissa ajan tasalla olevien suunnittelu-, toteutus- ja laadunvalvontaohjeiden puutteellisuus tai jopa puuttuminen. Tällaisia vesitiiviyyteen vaikuttavia työmenetelmiä ovat mm. injektointi ja pultitus, ruiskubetonointi ja salaojitus. Näille työmenetelmille ehdotetaan ohjeistuksen tarkentamista vastaamaan tämän päivän tietoa ja osaamista ottaen huomioon kalliotilojen vesitiiviysvaatimukset. Esimerkiksi injektoinnin käytön vähäisyyden vesitiiviyyden hallinnassa voidaan katsoa osaltaan johtuvan ohjeistuksen puutteesta.

Ohjeistuksen rinnalla tulee suorittaa myös eri tuotantovaiheiden menetelmiin, materiaaleihin ja rakenteisiin liittyvää tutkimus- ja tuotekehitystä. Tärkeitä tutkimusta ja tuotekehitystä vaativia aihepiirejä ovat mm. kalliotilojen vesitiiviysluokitus, kalliotilan salaojitus- ja eristerakenteet sekä louhintasuunnittelun kehittäminen ottaen huomioon kalliotilojen vesitiiviysvaatimukset.

Kalliotiloissa eri käyttötarkoituksen omaaville tiloille ja tunneleille voidaan sallia erilainen vesitiiviysvaatimus. Vesitiiviysvaatimus voi olla erilainen jopa samankin kalliotilan eri osissa, jos kalliotilan eri osilla on erilaiset käyttötarkoitukset. Käytännössä on usein todettu, että tilaajalla ja suunnittelijalla/rakentajalla on ollut vesitiiviysvaatimuksista lähtötilanteessa eri käsitykset, joita ei ole voitu määritellä mitattavilla suureilla. Vesitiiviyyden parantamisen kannalta on todettu tärkeäksi kehittää kalliotiloille käyttötarkoituksen mukaiset tekniset ja toiminnalliset laatuvaatimukset täyttävä vesitiiviysluokitus, jota myös rakentamisen tilaus- ja hankintamenettelyjen muuttuminen kokonaisvaltaisempaan suuntaan edellyttää. Jotta vesitiiveyteen vaikuttavat tekijät tulisivat riittävästi varmistetuiksi kalliorakentamisen eri tuotantoprosesseissa ja työsuoritusten valvonnassa, tulisi kalliotilojen rakentamiselle laatia myös vesitiiviyyttä koskeva laadunvalvontaohje, jolla varmennetaan vesitiiviyyteen vaikuttavien tekijöiden todentaminen ja toteutuminen.

Käytössä olevien salaojarakenteiden hyväksyttävä asennus epätasaiseen kalliopintaan erityisesti katto-osuuksilla minimikaltevuuksilla on usein mahdotonta. Tulisi kehittää uusia salaojitus- ja kuivatusrakenteita, jotka yhdistettynä muihin eristerakenteisiin (routa-, vesieristys-, paloeristysrakenteet) toimisivat kalliotilan komposiittisena eristys- ja sisäverhousrakenteena, jonka ominaisuudet voidaan mitoittaa suunnitteluvaiheessa.

Louhinnassa tulee nykyistä tarkemmin ottaa huomioon tilojen vesitiiviysvaatimukset ja selvittää louhinnan eri tekijöiden vaikutukset louhintajälkeen ja kallion vesitiiviyyteen. Louhinnassa tulee pyrkiä hyödyntämään porauksen aikana saatavaa yksityiskohtaisempaa ja reaaliaikaisempaa kallioperätutkimustietoa, jolloin kalliolaadun muutokset huo-

mioidaan paremmin louhintasuunnittelussa. Nykyiset dataohjausvalmiudet poraus- ja panostussuunnittelussa antavat siihen joustavat mahdollisuudet. Louhintasuunnittelussa tulee nykyistä tarkemmin ottaa huomioon tilojen vesitiivisyysvaatimus, koska vesitiivyydeltään vaativissa tiloissa se johtaa automaattisesti nykyistä tarkempaan ja varovaisempaan louhintaan.

Lähdeluettelo

Andersson, H. 1995. Grouting of rock with chemical compounds. Survey of literature. Göteborg, FoU rapport 9506 Byggmästarföreningen Väst.

Andersson, H. 1998. Chemical Rock Grouting. An Experimental Study on Polyurethane Foams. Göteborg, CTH, Doctoral Thesis.

Andersson, H. 1999. Polyuretän som injekteringsmedel. Stockholm, SveBeFo Rapport 41.

Barton, et al. 1999. Third International Symposium on Sprayed Concrete. Proceedings. Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support. Norway, Gol, 26.–29.09.1999.

Banverket. 1998. Besluts underlag för regeringens ställningstagande till Hallandsåsprojektet (Basis for the government decision on the Hallandsås project). Banverket, Technical report. 8 Dec. 1998.

Brantberger, M., Dalmalm, T., Eriksson, M. & Stille, H. 1998. Styrande faktorer för tätheten kring en förinjekterad tunnel. Stockholm, Kungliga Tekniska Högskolan, Inst. för Anläggning och miljö, Avd för Jord- och Bergmekanik, Rapport 3049.

Brantberger, M. 2000. Metodik vid förinjektering i uppsprucket hårt berg. Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Soil and Rock Mechanics, Licentiate Thesis 2056.

Casale, R., Comin, C. & Focacci, C. R. 1988. Tunnels excavation, by enlarging exploratory boring machine made tunnels, interested by large amount of water inflow: technical and contractual considerations. Tunnels and Water-Proceedings, Madrid 12–15 June 1988, Vol. 3 (Post conference proceedings).

Dalmalm, T., Eriksson, M., Janson, T., Brantberger, M., Slunga, A., Delin, P. & Stille, H. 2000. Injekteringsförsök vid Södra Länkens bergtunnlar. Sammanfattande rapport. Stockholm, Kungliga Tekniska Högskolan, Inst för Anläggning och miljö, Avd för Jord- och Bergmekanik, Rapport 3075.

Eriksson, M., Brantberger, M., Dalmalm, T. & Stille, H. 1999. Separations- och filtreringsstabilitet hos cementbaserade injekteringsmedel -En litteratur- och laboratoriestudie. Stockholm, Kungliga Tekniska Högskolan, Inst för Anläggning och miljö, Avd för Jord- och Bergmekanik, Rapport 3065.

Heino, M. 1998. Liikennetunnelien lämmön- ja vedeneristys. Teknillinen korkeakoulu. Materiaali- ja kalliotekniikan osasto. Kalliotekniikan laboratorio. Diplomityö.

Hudson, J. A. 1992. Rock Engineering Systems –theory and practice. Ellis Horwood series in civil engineering. ISBN 0-13-782624-9.

Hässler, L. 1991. Grouting of Rock – Simulation and classification.

Jansson, G. 1978. Problems associated with heavy water leakage during construction of large area tunnels in granite, limestone and chalk. Tunneling Under Difficult Conditions-Proceedings. Japan, Tokio. May 29–June 2 1978.

Janson, T. 1998. Calculation Models for Estimation of Grout Take in Hard Jointed Rock. Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure and Environmental Engineering, Division of Soil and Rock Mechanics, Doctoral Thesis 1018.

Laamanen, T. 2000. Kalliotilojen vesivuotojen syyt. Teknillinen korkeakoulu. Materiaali- ja kalliotekniikan osasto. Kalliotekniikan laboratorio. Diplomityö.

Liljestränd, B. 2000. Suomalaiset Rakentamisteknologiat pohjoismaisessa projektivienissä. Kalliorakentamisen menestystekijät -seminaari 15.11.2000. VTT. Espoo.

Leino, O. 1996. Hyvä sisäilmasto kalliotilassa. RIL K177-1996. Kilpailukykyinen kalliorakentaminen -seminaari. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y. Helsinki.

Lindblom, U., Albertsson, A. & Sjöholm, A. 1999. Krav på injektering vid tunnelbygande. Göteborg, Institutionen för geoteknik, Rapport B 1999:5.

Riekkola, R., Pöllä, J. & Satola, I. 1996. Injektointimenetelmien kehittäminen. Kalliorakentaminen 2000 Teknologiahanke. RIL, TEKES, Tutkimusraportti, Projekti 2.1. Helsinki.

Rinne, M. 2000. Valtatie 1 rakentaminen moottoritieksi välillä Paimio-Muurla. Isonky-
län tunnelin rakennusgeologinen kartoitus. BBK Rock Desing Oy, 8.12.2000.

Syrjänen, P. & Heikkilä, E. 1996. Ruiskutettava massa kalliotilojen lujittamisessa ja valmiiden betonituotteiden valmistuksessa (RUMA). Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Materiaali- ja kalliotekniikan laitos, Kalliotekniikan laboratorio, Tutkimusraportti A19.

Särkkä, P. & Satola, I. 2000. Suomalaiset materiaaliteknologiat kansainvälisessä vertailussa. Kalliorakentamisen menestystekijät -seminaari 15.11.2000. VTT. Espoo.

VTT Rakennustekniikka. 1999. Syttymisherkkyyden sekä palonlevittämisen ja savunmuodostusominaisuuksien määrittäminen tunnelikankaalle. Tunnelikangas WG 554. Testausseloste nro RTE11682/99.

Muuta kirjallisuutta

Cesano, D. 1999a. Methods for prediction of groundwater flows into underground constructions in hard rocks. A state of the art report. Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Land and Water Resources, Report.

Cesano, D. 1999b. Prediction of groundwater flows into underground constructions in hard rocks. Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Land and Water Resources, Licentiate Thesis.

Chang, Y. 1994. Tunnel Support with Shotcrete in Weak Rock – A Rock Mechanics Study. Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure and Environmental Engineering, Division of Soil and Rock Mechanics, Doctoral Thesis.

Eloranta, P. (toim.). 1998. Nordiskt Symposium I Berginjektering 1998. Föredrag vid det tredje nordiska symposiet i berginjektering, Finland, Esbo, Tekniska Högskolan, TKK-KAL-A-25,18.11.1998.

Eriksson, M. 1999. Model for Prediction of Grouting Results. Spreading, Sealing Efficiency and Inflow. Licentiate Thesis 2046. Stockholm.

Laatuinsinöörit Oy. 1999. HKR:n Kalliosuojien ruiskubetonitutkimus. Tutkimusraportti 30.11.1999.

Leivo, M., Holt, E., Kronlöf, A., Söderlund, K. & Vuorinen, P. 2000. Betonin kutistuma. Betoni 3/2000. Tekninen nurkka. Helsinki.

Malmberg, B. (toim.). 1997. Sprutbetongs beständighet. Sammanfattande diskussionsinlägg, Seminarium för inventering av FoU-behov, februari 1997.

Nordmark, A. & Bergdahl, S. G. 1996. First edition of Underground Construction – Sweden in Focus. BK, Swedish Rock Construction Committee and SveBeFo, Swedish Rock Engineering Research. Jönköping.

Nordmark, A. & Bergdahl, S. G. 1999. Second edition of Underground Construction – Sweden in Focus. BK, Swedish Rock Construction Committee and SveBeFo, Swedish Rock Engineering Research. Jönköping.

Nordström, E. 1996. Sprutbetongs beständighet – Inventering. Stockholm, SveBeFo Rapport 26.

Raivio, P. 2000. Betonitutkimusseminaari 2000, VTT Rakennustekniikka. Betoni 2/2000. Helsinki.

Roinisto, J., Salmelainen, J., Syrjänen, P., Orivuori, E., Lehtinen, T. & Santala, L. 1993. Uuden ruiskubetonisalaajan kehittäminen ja asennuksen mekanisointi. Kalliorakentaminen 2000 Teknologiahanke. RIL, TEKES, Tutkimusraportti, Projekti 2.2. Helsinki

Saari, K., Holopainen, P., Pirhonen, V. & Poikolainen, A. 1984. Kallion hydrauliset ominaisuudet ja niiden mittaus. Helsinki. Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta. Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

SML, Suomen Maarakentajien Keskusliitto r.y. ja Suomen kalliomekaniikkatoimikunta. 2000. VT1:n liikennetunnelit, Kari Sorjonen ja Kari Äikäs. Louhinta- ja kalliotekniikanpäivät 26.-27.10.2000, Vantaa.

Staten vegvesen. 1998. Tunnelkledning. Vann- og frostsikring i vegtunneler. Vegdirektoratet. Vegteknisk avdeling. Oslo.

Sturk, R. 1998. Engineering geological information – its value and impact on tunneling. Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure and Environmental Engineering, Division of Soil and Rock Mechanics Doctoral Thesis 1027.

Suomen Betoniyhdistys r.y. 1988. Betoni. Vedenpitävyys. Standardi SFS 4476. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS.

VTT Rakennustekniikka. 2000. Ruiskubetoninäytteiden tutkimukset. Espoo. Tutkimusselostus nro RTE2640/00.

VTT Rakennustekniikka. 2001. Ruiskubetoninäytteiden tutkimukset. Espoo. Tutkimusselostus nro RTE2780/01.

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Ritola, J., Vuopio, J. & Rinne, M. 2002. Kalliotilojen vesitiiviyyden hallinta. Res-analyysi. Tutkimusselostus nro RTE1856/02.

Ympäristöministeriö. 1993. RakMk osa B4 betonirakenteet. Ohjeet 1993. Helsinki.



Tekijä(t) Ritola, Jouko & Vuopio, Jaakko			
Nimeke Kalliotilojen vesitiiviyyden hallinta			
Tiivistelmä <p>Kalliotiloissa esiintyvät tippavesivuodot aiheuttavat haittaa tilojen rakenteille, laitteistoille ja käyttäjille. Kuivatusjärjestelmistä pois johdettava vesi puolestaan saattaa muuttaa pohjavesitasapainoa ja aiheuttaa haittaa maanpäällisille rakenteille, kasvistolle ja vesistöille kalliotilojen ympäristössä. Viime vuosina rakennetuissa uusissa kalliotiloissa on yhä useammin tullut ongelmaksi lukuisat tippavuodot, joiden syistä ja syntytaivoista vallitsee erilaisia näkemyksiä. Tämä onkin synnyttänyt tarpeen tutkia vuotoilmiöitä ja kehittää vesitiiviyyden hallintamenetelmiä sekä parantaa vesieristysratkaisuja.</p> <p>Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kalliotiloissa esiintyvien vesivuotojen todelliset syyt sekä esittää priorisoidut toimenpide-ehdotukset kalliotilojen vesitiiviyyden hallitsemiseksi ja parantamiseksi. Tutkimus koostui kirjallisuusselvityksestä sekä kohde- ja seurantatutkimuksista. Kohteissa suoritettujen mittausten ja tulosten analysoinnin perusteella havaittiin vesivuotojen syiden kohdistuvan kalliotilan kuivatusjärjestelmään ja vesieristysrakenteisiin injektoinnin puutteellisuuden lisäksi. Tutkimustulokset analysoitiin kalliorakentamiseen sovelletulla RES-menetelmällä (Rock Engineering System).</p> <p>Vesitiiviyyden hallintaan liittyviä toimenpide-ehdotuksia tehtiin kaikkiaan 65 kpl ja ne priorisoitiin kustannustehokkuuden, aikataulun, tutkimustarpeen ym. tekijöiden mukaan joko välittömästi tai myöhemmin pitemmän ajan kuluessa toteutettaviksi. Erittäin tärkeiksi priorisoiduista toimenpide-ehdotuksista suositellaan välittömästi rakentamisessa käyttöön otettavaksi 25 kpl ja 9 kpl katsotaan edellyttävän välittömästi tutkimus- ja tuotekehityshankkeiden käynnistämistä. Muut toimenpide-ehdotukset, noin 50 %, on otettava huomioon ja toteutettava rakennushankekohtaisesti käytössä olevien resurssien (aika, kustannukset, tekijä) puitteissa.</p> <p>Yksittäisistä toimenpide-ehdotuksista tehokkaimmiksi arvioitiin esi-injektoinnin lisääminen tilaa ympäröivän kallion tiivistämiseksi, louhinnan optimointi kallion vesitiiviyyden kannalta, ruiskubetonin paksuuden lisääminen, ruiskubetonirakenteen vesitiiviyyden parantaminen sekä tilan kuivatusjärjestelmien kehittäminen. Koko kalliorakentamisen tuotantoketjua koskien ehdotettiin kalliotiloille käyttötarkoituksenmukaisen vesitiiviyslukuituksen sekä siihen liittyvien toiminnallisten ja teknisten laatuvaatimusten ja laadunvalvonnan kehittämistä.</p>			
Avainsanat rock caverns, underground spaces, groundwater, leakage, drainage, sealing, waterproofing, watertightness			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät, Lämpömiehenkuja 2, PL 1800, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6058-2 (nid.) 951-38-6059-0 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero F0SU00188	
Julkaisu-aika Heinäkuu 2002	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 124 s.	Hinta B
Toimeksiantaja(t) Teknologian tutkimuskeskus (Tekes), VTT, Puolustushallinnon rakennuslaitos, Tiehallinto, Helsingin energia, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Helsingin kaupungin pelastuslaitos, Rakennus Oy Lemminkäinen, YIT Rakennus Oy			
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 4561
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2147
VTT-TIED-2147

Author(s) Ritola, Jouko & Vuopio, Jaakko			
Title Management of watertightness in rock spaces and tunnels			
Abstract <p>Water seepage leakage into rock caverns causes problems for the structures, equipment and users of such facilities. Furthermore, the disposal of water from drainage systems installed in these underground spaces can alter the equilibrium of groundwater conditions, thereby causing damage to surface structures, vegetation and nearby watercourses. Numerous instances of seepage damage have been observed in underground rock facilities built in recent years, and there are a number of differing opinions about the causes and mechanisms involved in this problem. This has given rise to the need to study seepage phenomena, to develop new methods of controlling watertightness, and to improve waterproofing solutions.</p> <p>The aim of this study is to clarify the real causes of water seepage into rock caverns and to present a prioritised list of proposed measures to control and improve the watertightness of such spaces. The research consists of a literature study as well as site and follow-up investigations. Analysis of on-site measurements and results indicates that the causes of the seepages were related to the drainage system and waterproofing structures of the rock caverns and also to deficiencies in the grouting work. The research findings were analysed by applying the RES method (Rock Engineering System).</p> <p>Altogether 65 watertightness control measures were proposed and they were prioritised according to cost effectiveness, scheduling, the need for further research and other factors for implementation either immediately or in the longer term. Of the prioritised proposed measures, twenty-five were considered extremely important and thus recommended for immediate introduction into construction practice, and nine were seen as requiring the immediate start-up of research and product development projects. The remainder of the proposed measures, i.e. about 50 %, should be taken into consideration and implemented site-specifically within the framework of available resources (time, costs, labour, etc).</p> <p>The most effective of the proposed measures were regarded as more pre-grouting to seal the rock surrounding the cavern, optimising the excavation work from the standpoint of watertightness, increasing the thickness of shotcrete, improving the watertightness of the shotcrete structure, and developing the draining systems used in underground rock caverns. It was also proposed that the entire production chain of rock engineering should be covered by a watertightness classification of underground rock facilities designed for different purposes as well as its associated functional and technical standards and quality control.</p>			
Keywords rock caverns, underground spaces, groundwater, leakage, drainage, sealing, waterproofing, watertightness			
Activity unit VTT Building and Transport, Structures and Building Services, Lämpömiehenkuja 2, P.O.Box 1800, FIN-02044 VTT, Finland,			
ISBN 951-38-6058-2 (soft back ed.) 951-38-6059-0 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number F0SU00188	
Date July 2002	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 124 p.	Price B
Commissioned by The National Technology Agency (Tekes), VTT, Puolustushallinnon rakennuslaitos, Tiehallinto, Helsingin energia, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Helsingin kaupungin pelastuslaitos, Rakennus Oy Lemminkäinen, YIT Rakennus Oy			
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka – VTT BYGG OCH TRANSPORT – VTT BUILDING AND TRANSPORT

- 2103 Koivu, Tapio, Mäntylä, Kaj, Loikkanen, Kaisu, Appel, Mikael & Pulakka, Sakari. Innovaatiotoiminnan kehittäminen kiinteistö- ja rakennuskliusterissa. Lähtökohtia ja kokeiluja. 2001. 81 s. + 19 s.
- 2104 Hostikka, Simo, Kokkala, Matti & Vaari, Jukka. Experimental Study of the Localized Room Fires. NFSC2 Test Series. 2001. 49 p. + app. 46 p.
- 2106 Anttila, Virpi & Luoma, Juha. Turvaväiden käyttökokeilu junissa. Käyttö ja matkustajien mielipiteet. 2001. 27 s. + liitt. 9 s.
- 2108 Vares, Sirje. Kerrostalon ympäristövaikutukset. LVIS-2001-tyyppikerrostalo. 2001. 49 s.
- 2109 Ranta-Maunus, Alpo, Fonselius, Mikael, Kurkela, Juha & Toratti, Tomi. Reliability analysis of timber structures. 2001. 102 p. + app. 3 p.
- 2110 Anttila, Virpi. Talvijalankulku, liukastumistapaturmat ja kelitiedottamisen kehittäminen. 2001. 51 s. + liitt. 11 s.
- 2112 Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djebar & Oksanen, Tuuli. Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa. 2001. 53 s. + liitt. 9 s.
- 2113 Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Energiatalous ja tekninen toteutus. Kesäkeli-projekti. 2001. 75 s. + liitt. 15 s.
- 2116 Rynnänen, Tiia, Kallonen, Raija & Ahonen, Eino. Palosuojatut tekstiilit. Ominaisuudet ja käyttö. 2001. 101 s.
- 2118 Kärki, Otto. Alkolukko rattijuopumuksen ehkäisyssä. Esiselvitys. 2001. 85 s. + liitt. 3 s.
- 2119 Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Rakennusten syttymistäajuudet PRONTO-tietokannasta 1996–1999. 2001. 66 s. + liitt. 16 s.
- 2120 Koota, Jaana. Construction site safety. Case United States. 2001. 39 p. + app. 3 p.
- 2121 Tervonen, Juha & Räsänen, Jukka. Environmental assessment of strategic transport actions. SEA in CODE-TEN. 2001. 25 p. + app. 7 p.
- 2123 Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. 2002. 95 s. + liitt. 51 s.
- 2124 Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. 2002. 51 s. + liitt. 13 s.
- 2125 Riihimäki, Markku & Siekkinen, Heidi. Asiakastarpeet kiinteistöliiketoiminnassa. Liike- ja toimistokiinteistöt. 2002. 74 s. + liitt. 10 s.
- 2126 Kauppinen, Anna-Kaisa, Pietilä, Paula, Sundbäck, Liisa & Kaleva, Hanna. Kiinteistöjohtamisen tehostaminen – vaihtoehtona ulkoistaminen. Ulkoistamisen edellytykset ja päätöksenteon mallintaminen. 2002. 73 s. + liitt. 4 s.
- 2128 Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Korhonen, Timo, Siiskonen, Jaakko & Vaari, Jukka. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. 2002. 125 s. + liitt. 63 s.
- 2134 Paiho, Satu, Karjalainen, Sami, Alanne, Kari, Norvasuo, Markku, Eriksson, Lasse, Pöyhönen, Sanna, Kaartinen, Jani & Lehtovaara, Jorma. Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut. 2002. 279 s. + liitt. 9 s.
- 2136 Hietaniemi, Jukka & Baroudi, Djebar. Physical Interpretation of Temperature Data Measured in the SBI Fire Test. Nordtest Technical Report 416. Nordtest Project No. 1381-98. 2002. 47 p. + app. 4 p.
- 2144 Saari, Mikko, Pallari, Marja-Liisa, Salonvaara, Mikael, Kääriäinen, Hannu, Viitanen, Hannu, Humala, Iris, Liski-Markkanen, Sari, Malin, Anne & Laitinen, Kirsi. Terveen saunan tekijät. 2002. 60 s. + liitt. 47 s.
- 2147 Ritola, Jouko & Vuopio, Jaakko. Kalliotilojen vesitiiviiden hallinta. 2002. 124 s.

Projektissa tutkittiin kallioiloissa esiintyvien vesivuotojen todellisia syitä sekä esitettiin vesitiiviyyden parantamiseen liittyvät toimenpide-ehdotukset. Tutkimus koostui kirjallisuusselvityksestä sekä kohdetutkimuksista, jotka kohdistuivat sekä kuiva- että märkäseosmenetelmällä ruiskutettuihin kallioiloihin.

Tutkimustulosten analysoinnin perusteella vesitiiviyyden hallintaan liittyviä toimenpide-ehdotuksia laadittiin yhteensä 65 kpl ja ne priorisoi- tiin kustannustehokkuuden, aikataulun, tutkimustarpeen ym. tekijöiden mukaan joko välittömästi tai myöhemmin pitemmällä aikajänteellä toteu- tettaviksi. Erittäin tärkeiksi priorisoiduista toimenpide-ehdotuksista suosi- teltiin välittömästi rakentamisessa käyttöön otettavaksi 25 kpl ja 9 kpl katsottiin edellyttävän välittömästi tutkimus- ja tuotekehityshankkeiden käynnistämistä.

Toimenpide-ehdotuksista tehokkaimmiksi arvioitiin esi-injektoinnin lisääminen tilaa ympäröivän kallion tiivistämiseksi, louhinnan optimointi kallion vesitiiviyyden kannalta, ruiskubetonin paksuuden lisääminen, ruis- kubetonirakenteen vesitiiviyyden parantaminen sekä tilan kuivatusjärjes- telmien kehittäminen. Koko kalliorakentamisen tuotantoketjua koskien ehdotettiin kallioiloille käyttötarkoituksenmukaisen vesitiiviysluokituk- sen sekä siihen liittyvien toiminnallisten ja teknisten laatuvaatimusten ja laadunvalvonnan kehittämistä.

Julkaisu on saatavilla sähköisessä muodossa osoitteessa <http://www.inf.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2147.pdf>

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374