

YHTEISKÄYTTÖTUNNELEIDEN RISKIARVIOINTI

Vesa-Matti Matikainen



Julkaisu 91/2007

Helsinki 2007
ISBN 978-952-473-935-1
ISSN 1458-2198

YHTEISKÄYTTÖTUNNELEIDEN RISKIARVIOINTI

Vesa-Matti Matikainen

TIIVISTELMÄ

Helsingin kaupungin alueella on yli 50 kilometriä yhteiskäyttö-, kaukolämpö- ja vesi-johtotunneleita. Tunnelit toimivat kaukolämmön, kaukojäähdytyksen, talousveden ja sähköön pääjakeluverkkoina.

Tulipalot ja tulvat ovat suurimmat yhteiskäyttötunneleihin liittyvät riskit. Tulipalojen syttymissyitä ovat rakennus- ja huoltotyöt, sähköviat ja ilkivalta. Tulipaloissa vaarallisin henkilöturvallisuuteen liittyvä tekijä on savun leviäminen. Savuisessa tilassa näkyvyys heikkenee ja savukaasut voivat olla hengenvaarallisen myrkyllisiä.

Tunneleiden tulvariskejä ovat vesistöjen tulvat, maanpäälliset putkivuodot ja rankkasateet, tunneleiden putkivuodot sekä tunneleihin vuotava pohjavesi. Tulvista vaarallisin on kaukolämpövuoto, missä kuuma kaukolämpövesi höyrystyy. Vesihöyry on tappavan kuumaa ja syrjäyttää tunnelitilan ilman. Tunneliverkostossa on viimeisen 20 vuoden aikana tapahtunut joitakin palo- ja tulvatilanteita, mutta henkilövahingoilta on säästyty.

Työn kokeellisina osina järjestettiin savutuuletuskoe ja poistumiskoe. Savutuuletuskokeen tarkoituksena oli testata tuuletuksen toimivuutta savuostoidussa yhteiskäyttötunnelissa. Savutuuletuksella voidaan poistaa savu tehokkaasti suurestakin tunneliverkosta, mutta savuostoinnista ei kokeen perusteella ole hyötyä savun ohjaamisessa.

Poistumiskokeessa testattiin jalkaisin liikkuvan ihmisen etenemisnopeuksia eri tunneliolosuhteissa. Kokeen perusteella osastoimattomasta tunnelista poistuminen pystykuilun tai ajotunnelin kautta voi olla mahdotonta palo- tai kaukolämpövuototilanteissa. Eteneminen tunnelissa on hyvin hidasta ja eksymisen vaara on suuri, jos näkyvyys on huono savun tai valaistuksen toimimattomuuden johdosta. Kuitenkin jo vähäinen valaistus nopeuttaa poistumista huomattavasti.

Tämän työn tuloksena on esitetty ratkaisumalleja henkilö- ja laiteturvallisuuden parantamiseksi yhteiskäyttötunneleissa.

ABSTRACT

There are over 50 kilometers of utility, district heating and water pipe tunnels in Helsinki city area. Tunnels are main transfer lines for district heating, district cooling, fresh water and electricity.

Fires and floods are the major risks in the utility tunnels. Reasons for fires are construction and maintenance works, electric cable faults and vandalism. In fires the most hazardous risk for personal safety is smoke propagation. In a space where there is a lot of smoke, visibility is reduced and smoke can be fatally poisonous.

Waterway floods, pipe leaks and downpours on the ground, tunnel pipe leaks and groundwater leaking into tunnels cause a flooding risks in the tunnels. The most dangerous flood situation is created by a district heating leakage, where hot district heating water vaporizes. Steam is lethally hot and replaces air in the tunnel. In the past 20 years there have been few fire and flood situations in tunnels, but no casualties.

Experimental parts of this report consisted of a smoke ventilation test and an emergency exit test. The purpose of the smoke ventilation test was to see how ventilation works in utility tunnel network, which is partitioned into smoke departments. By ventilation it is possible to remove smoke efficiently even from a large tunnel network, but the tests show no benefits of smoke compartments to direct smoke.

Purpose of the emergency exit test was to see how the speed of human moving on foot changes in different tunnel situations. According to the test, moving through shafts or driving tunnels with no compartments can be impossible in fire or district heating leakage situations. Moving in tunnels is very slow and danger of getting lost increases, if visibility is low because of smoke or non-functional lighting. Even small light source speeds up moving considerably.

This report represents several solutions to improve personal and equipment safety in utility tunnels.

ALKUSANAT

Yhteiskäyttötunnelit ovat maanalaisina tiloina ainutlaatuisia. Kymmenien kilometrien pituisena verkostona yhteiskäyttötunnelit ulottuvat koko kaupungin alueelle. Toisaalta yhteiskäyttötunneleiden toiminnot ovat pääosin automatisoituja ja kauko-ohjattuja, joten tunneleissa liikutaan harvoin. Näistä syistä muissa maanalaisissa tiloissa käytettäviä turvallisuussäännöksiä ei voida soveltaa suoraan yhteiskäyttötunneleihin. Paras tapa yhteiskäyttötunneleiden turvallisuuden parantamiseen on arvioida tunneliverkoston riskejä ja niihin varautumista.

Suurimmat yhteiskäyttötunneleiden riskit ovat tulvat ja tulipalot. Palojen ja tulvien riskejä kasvattaa se, että vaaratilanteet voivat laajeta yhteiskäyttötunneliverkon kautta muihin maan-alaisiin tiloihin, kuten metroon. Siksi vaaratilanteiden havaitseminen ja nopea tilanteisiin reagointi on erityisen tärkeää. Tässä julkaisussa on pyritty parantamaan myös sitä osa-aluetta riskienhallinnassa.

Tämä työ on osa geoteknisen osaston vuonna 2001 perustaman tunneleiden turvallisuustyöryhmän toimintaa. Työryhmä on kartoittanut Helsingin tunneliverkkoon liittyviä riskejä tavoitteenaan parantaa vaaratilanteiden toimintavalmiutta.

Tämä julkaisu perustuu tekn.yo. Vesa-Matti Matikaisen diplomityöhön, joka on tehty Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla. Merkittävän panoksen työhön ovat antaneet Raimo Viitala ja Pekka Holopainen geotekniseltä osastolta, Pekka Pietilä ja Jorma Vilkmann Helsingin Energiasta, Jouko Mäenpää Helsingin Vedestä, Marko Järvinen Helsingin kaupungin pelastuslaitokselta sekä Pekka Särkkä Teknillisestä korkeakoulusta.

Helsingissä elokuussa 2007

Ilkka Vähäaho
Osastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

NIMIÖLEHTI	1
TIIVISTELMÄ	5
ABSTRACT	6
ALKUSANAT	7
SISÄLLYSLUETTELO	8
1. JOHDANTO	10
1.1 TUTKIMUKSEN TAUSTAA	10
1.2 TUTKIMUSONGELMA	11
1.3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	11
1.4 TUTKIMUKSEN RAJAUS	12
2. TULIPALOT YHTEISKÄYTTÖTUNNELEISSA	13
2.1 YLEISTÄ	13
2.2 TULIPALOJEN SYTTYMISSYYT JA PALAVAT MATERIAALIT	13
2.2.1 Inhimilliset tekijät	13
2.2.2 Ajoneuvopalot	13
2.2.3 Kaapelipalot	14
2.2.4 Putkien eristeet	15
2.3 PALON ETENEMINEN TUNNELITILASSA	16
2.4 SAVUN ETENEMINEN TUNNELITILASSA	17
2.5 TULIPALON VAIKUTUKSET IHMISEEN	18
2.6 TULIPALON VAIKUTUKSET TUNNELIN RAKENTEISIIN	19
2.6.1 Tulipalon vaikutus ruiskubetoniin	19
2.6.2 Tulipalon vaikutus teräspultteihin	21
2.6.3 Tulipalon vaikutus louhittuun kalliopintaan	22
2.7 TUNNELEISSA TEHDYT PALOKOKEET	24
2.7.1 Repparfjordin tunnelikokeet	24
2.7.2 Benelux-tunnelin palokokeet	28
2.7.3 Yhteenveto tunneleiden palokokeista	30
2.8 YHTEISKÄYTTÖTUNNELEISSA TAPAHTUNEET TULIPALOT	31
2.8.1 Työmaavaunupalo Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelissa	31
2.8.2 Kaapelipalo Myllypuro – Alakiventie yhteiskäyttötunnelissa	32
2.8.3 Kamppi – Erottaja – Kruununhaka yhteiskäyttötunnelin työmaapalo ...	32
2.8.4 Vaaratilanne Kruununhaka – Sörnäinen yhteiskäyttötunnelissa	33
2.9 PALOLTA JA SAVULTA SUOJAUTUMINEN	33
2.9.1 Poistumisetäisyydet maanalaisissa tiloissa	33
2.9.2 Palo-osastoivat rakenteet	34
2.9.3 Uloskäytävät	34
2.9.4 Käyttötapaosastointi ja palokatkat	34
2.9.5 Savuosastointi	35
2.9.6 Turvapaikat	36
2.9.7 Vaaratilannehälytykset	36
2.9.8 Henkilökohtaiset pelastautumisvälineet	36

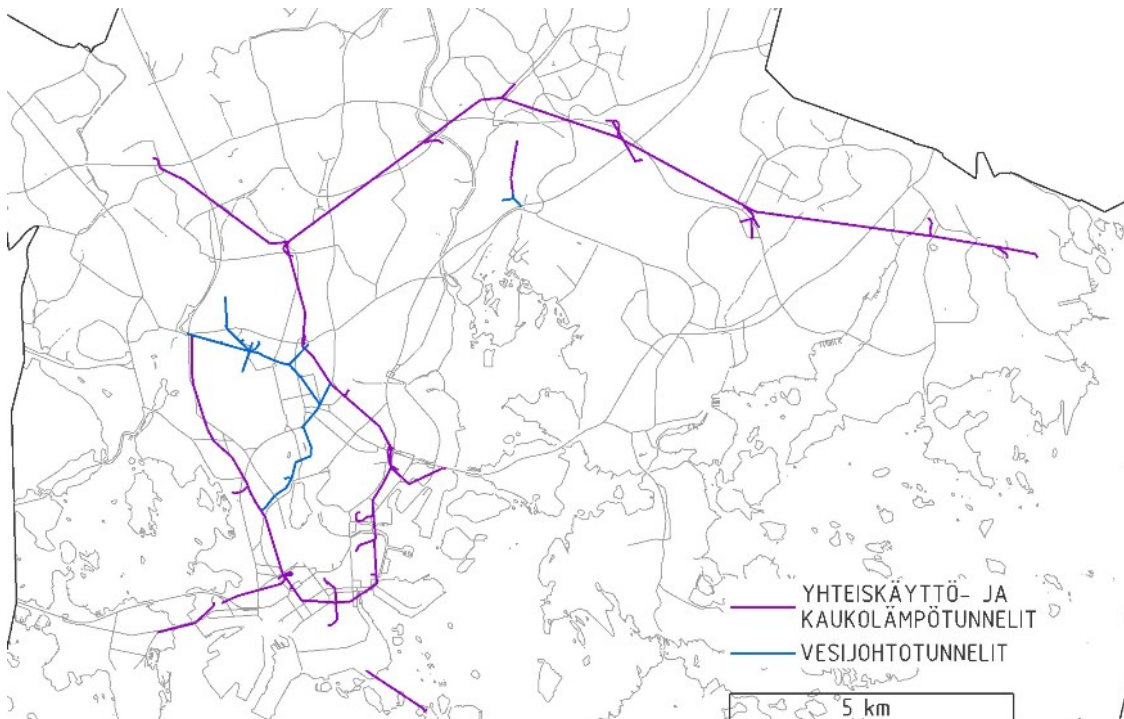
3.	TULVAT YHTEISKÄYTTÖTUNNELEISSA	39
3.1	YLEISTÄ.....	39
3.2	SYYT TUNNELEIDEN TULVIMISEEN.....	39
3.2.1	Maanpäällisten vesistöjen tulvat	39
3.2.2	Rankkasateista tai maanpäällisistä putkivuodoista aiheutuvat tulvat ...	40
3.2.3	Vesijohtovuodot tunneleissa	41
3.2.4	Kaukolämpö- tai kaukojäähdytysvuodot tunneleissa.....	43
3.2.5	Vuotovesistä johtuvat tulvat	44
3.2.6	Viemäritunnelitulvariskit yhteiskäyttötunneleille	44
3.3	TULVAN ETENEMINEN TUNNELITILLOISSA	44
3.3.1	Kylmän veden eteneminen tunnelissa	44
3.3.2	Kaukolämpövuodon vesihöyryn muodostuminen ja eteneminen tunnelissa	45
3.4	YHTEISKÄYTTÖTUNNELEISSA TAPAHTUNEET TULVAT	46
3.4.1	Vesijohtovuoto Pasilan vesijohtotunneleissa	46
3.4.2	Tammikuun 2005 merivesitulvan vaikutukset yhteiskäyttötunneleille...	47
3.4.3	Putkirikko Katri Valan lämpöpumppulaitoksen työmaalla	48
3.5	TULVAN VAIKUTUKSET TUNNELIN RAKENTEISIIN.....	49
3.6	TULVILTA SUOJAUTUMINEN	49
3.6.1	Maanpäällisten rakenteiden suojaukset	49
3.6.2	Putkirikkojen ennaltaehkäisy	49
3.6.3	Putkirikkojen ja tulvien havaitseminen tunnelissa	50
3.6.4	Tulvaosastointi	51
4.	SAVUTUULETUSKOKEET	53
4.1	YLEISTÄ.....	53
4.2	MITTAUSKOHDDE	53
4.3	SAVUSEINÄT	54
4.4	MITTALAITTEET JA ILMAVIRTAUSTEN MITTAAMINEN	55
4.5	NORMAALIAJAN ILMAVIRTAUKSET	56
4.6	KOKEIDEN JÄRJESTELYT.....	57
4.7	KOKEIDEN TULOKSET	60
4.8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSET	60
5.	POISTUMISKOKEET.....	61
5.1	YLEISTÄ.....	61
5.2	KOEALUEET	61
5.3	KOEHENKILÖT	61
5.4	VARUSTUS	62
5.5	KOKEIDEN JÄRJESTELYT.....	63
5.6	KOKEIDEN TULOKSET	64
5.7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSET	66
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	67
6.1	OSASTOINTI	67
6.2	HENKILÖKOHTAISET PELASTAUTUMISVÄLINEET	68
6.3	POISTUMISMERKINNÄT	68
6.4	PELASTUSTOIMINTA	69
7.	YHTEENVETO.....	70
	LÄHDELUETTELO	71

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen taustaa

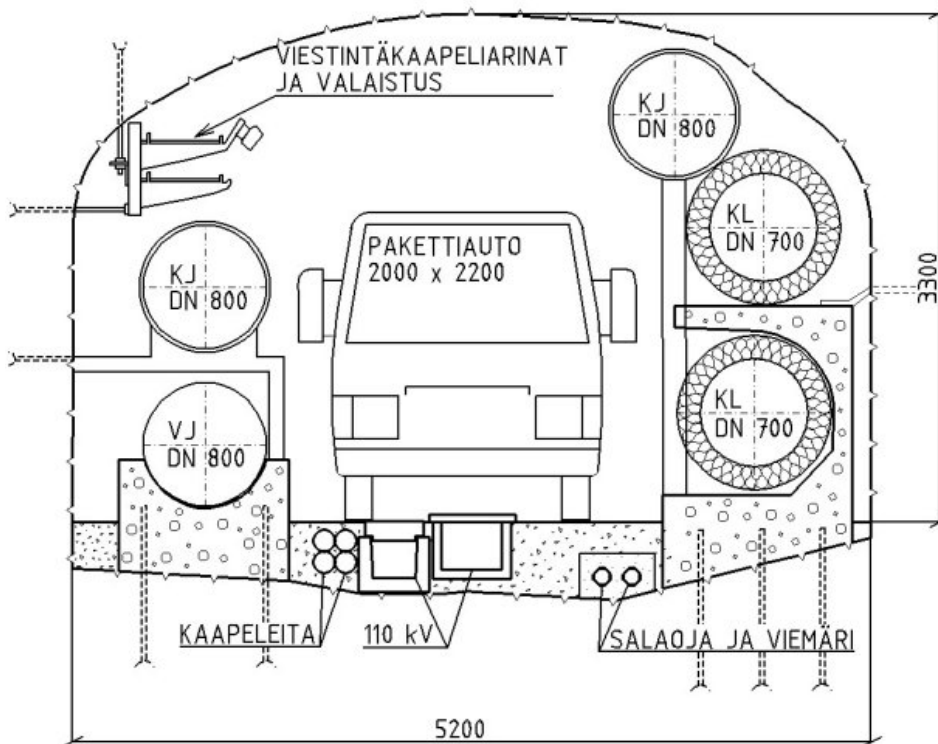
Helsingin kaupungin alueella on yli 50 kilometriä yhteiskäyttö-, kaukolämpö- ja vesijohtotunneleita. Tunneleiden omistajia ovat Helsingin Energia ja Helsingin Vesi. Vanhimmat vesijohtotunnelit on rakennettu 1930-luvun lopulla. Uusimman tunnelin, Munkkisaari – Vanha Kirkkopuisto yhteiskäyttötunnelin, rakentaminen alkoi kesällä 2006.

Yhteiskäyttötunnelien verkko on laajentunut viime vuosina merkittävästi. Kun Kamppi – Erottaja – Kruununhaka yhteiskäyttötunnelin louhinnat valmistuivat vuoden 2006 alussa, yhdistyi kaupungin itäinen ja läntinen tunneliverkko ja lähes koko yhteiskäyttötunneliverkko on nyt yhtenäinen. Vuonna 2007 aloitetaan Tilkka – Pasila – Käpylä yhteiskäyttötunnelin rakennustyöt. Tunneli yhdistää kantakaupungin tunneliverkon yhtenäiseksi renkaaksi. Yleiskuva yhteiskäyttö-, kaukolämpö- ja vesijohtotunneliverkosta on kuvassa 1.



Kuva 1: Yhteiskäyttö-, kaukolämpö- ja vesijohtotunneliverkon yleiskartta

Yhteiskäyttötunneliin on sijoitettu kaupungin kaukolämmön, talousveden, sähkön ja kaukojäähdytyksen runkoverkot. Yhteiskäyttötunnelit ovat ajoneuvoilla ajettavia. Vanhat vesijohtotunnelit ja kaukolämpötunnelit ovat kuitenkin niin pieniä, että niissä liikutaan ainoastaan kävellen tai esimerkiksi mönkijällä. Esimerkki yhteiskäyttötunnelin poikkileikkauksesta on kuvassa 2.



Kuva 2: Yhteiskäyttötunnelin poikkileikkaus

Yhteiskäyttötunnelit liittyvät kiinteästi kaupungin muihin tunnelirakenteisiin. Koska tiiviissä kaupunkirakentamisessa maanpäällisten ajoyhteyksien rakentaminen on hankalaa ja kallista, monia tunneleita on rakennettu samojen ajoyhteyksien kautta. Tästä syystä yhteiskäyttötunneleista on maanalaisia yhteyksiä metrotunneleihin, väestönsuojoihin, viemäritunneleihin, liikennetunneleihin ja muihin maanalaisiin tiloihin.

Vuonna 2006 Helsingin Energian hallinnoimissa yhteiskäyttötunneleissa oli kuuden kuukauden aikana rekisteröity yli 2000 tunnelikäyntiä, joten tunneleissa liikutaan päivittäin. Helsingin Veden tunneleissa kävijöitä on kuitenkin vähemmän. Uusissa tunneleissa on pyritty automatisoimaan tunnelitoimintoja kuten pumppaamoja, sähkökeskuksia, ilmastointia ja kulunvalvontaa. Monia tunneleiden toimintoja voidaan kauko-käyttää Helsingin Energian ja Helsingin Veden valvomoista.

1.2 Tutkimusongelma

Suurimmat yhteiskäyttötunneleihin kohdistuvat riskit ovat tulipalo ja tulvat. Tulipaloriskejä ovat tunneleissa liikkuvat ajoneuvot, sähköviat ja ilkivalta, kuten myös huolto- ja korjaustyöt kalustoineen. Tulvariskejä ovat maanpäällisten vesistöjen tulvat, putki- vuodot, viemäriverkon tulviminen ja pohjavesivuodot. Yhteiskäyttötunneliverkkoa ei ole osastoitu tulipaloja eikä savun leviämistä vastaan. Tulvia vastaan verkko on osastoitu mm. viemäri- ja metrotunneliyhteyksien osalta.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Diplomityön tarkoituksena on kartoittaa yhteiskäyttötunneleihin kohdistuvat riskit sekä toteutuneiden riskien vaikutukset ihmisiin ja tunneliverkon toimintoihin. Työn tavoitteena on esittää ratkaisumalleja henkilö- ja laiteturvallisuuden parantamisesta, erityisesti tulipalo- ja tulvatilanteissa.

1.4 Tutkimuksen rajaus

Diplomityössä käsitellään pääasiassa tunneleissa työskentelevien ihmisten turvallisuutta. Sen lisäksi työ sisältää arvioita tunnelitilojen, rakenteiden ja tunneleihin sijoitettujen laitteiden turvallisuudesta. Työssä käsitellään yhteiskäyttötunneleita, joihin tässä yhteydessä voidaan lukea myös kaukolämpö-, vesijohto- ja kaapelitunnelit. Työ ei sisällä viemäri- ja raakavesitunneleiden eikä muiden maanalaisten tilojen riskejä.

2. TULIPALOT YHTEISKÄYTTÖTUNNELEISSA

2.1 Yleistä

Suurin osa tulipaloista johtuu suoraan ihmisen toiminnasta. Yhteiskäyttötunneleissa tällaisia toimintoja ovat liikkuminen ajoneuvoilla, korjaus-, asennus- ja tulityöt sekä ilkivalta. Ilman ihmisen vaikutusta palo voi syttyä tunnelissa sähkövian seurauksena, mutta silloinkin yleensä syynä ovat virheet asennuksessa tai huollossa. Yhteiskäyttötunneleissa tuli voi levitä muovisia putki- ja kaapelieristeitä pitkin.

Yhteiskäyttötunneleissa on tapahtunut viimeisen 15 vuoden aikana yksi työmaavainnupalo, yksi kaapelipalo sekä kaksi tulitöiden aiheuttamaa työn aikaista paloa.

2.2 Tulipalojen syttymissyöt ja palavat materiaalit

Tärkeimmät tulipalojen syttymissyöt yhteiskäyttötunneleissa ovat tunnelissa tehtävät rakennustyöt ja huoltotyöt, sähköviat ja ilkivalta. Kaikki tähän mennessä tapahtuneet yhteiskäyttötunneleiden palot ja läheltä piti – riskitilanteet ovat johtuneet näistä tekijöistä.

Palavia materiaaleja yhteiskäyttötunneleissa ovat ajoneuvojen polttoaine sekä kumi- ja muoviosat, huoltokalusto, vesijohto-, kaukolämpö- ja kaukojäähdytysputkien eristeet, kaapelieristeet, erilaiset salaoja- ja muut muoviputket sekä valvomotilojen sisustukset.

2.2.1 Inhimilliset tekijät

Yleisesti ottaen suurin osa tulipaloista johtuu ihmisen toiminnasta, näin on tilanne myös tunnelipaloissa. Esimerkiksi ajoneuvo voi syttyä palamaan törmäyksen vaikutuksesta tai sähköasennukset tehdään väärin, jolloin kaapelit ylikuumenevat ja syttyvät palamaan. Myös hitsauskipinä voi sytyttää putkieristeet. Tästä syystä tunnelihenkilöstön koulutus ja oikeanlainen turvavarustus on avainasemassa palojen ehkäisemisessä.

Ilkivalta on ollut myös yhteiskäyttötunneleihin liittyvä ongelma. Luvatonta liikkumista tunneleissa on vaikea vähentää, koska tunneliverkko on laaja ja tunneliyhteyksiä maan päälle on useita kymmeniä.

2.2.2 Ajoneuvopalot

Yhteiskäyttötunneleissa liikutaan pääasiassa ajoneuvoilla. Tunneleiden huoltohenkilökunnalla on käytössä paketti-, kuorma- ja henkilöautoja. Vaatimuksena tunneliajoneuvoille on, että niiden on oltava dieselkäyttöisiä. Lisäksi kaikissa ajoneuvoissa on oltava alkusammutusvälineet.

Tunneliajoneuvojen palokuormat vaihtelevat henkilöauton 5000 MJ:sta pakettiauton tai pienen kuorma-auton 20000 MJ:en, vastaavasti henkilöauton paloteho on 5 – 6 MW ja paketti- tai kuorma-auton 15 – 20 MW. Ajoneuvopalon lämpötila voi olla jopa 1000 °C (Lönnermark 2005).

Ajoneuvopalon kehittyminen riippuu suuresti palon syttymistavasta ja paikasta, mutta useissa palokokeissa on havaittu, että autopalo voi kehittyä täyteen tehoonsa muutamassa minuutissa keskimääräisen syttymisajan ollessa noin 8 – 10 minuuttia. Hen-

kilöauton palaessa täydellä teholla savua syntyy noin 20 – 30 m³ sekunnissa ja pakettiauton palaessa 40 – 60 m³ sekunnissa.

2.2.3 Kaapelipalot

Sähköiskuihin kuolee vuosittain 1-3 ihmistä. Sähkön aiheuttamissa paloissa kuolee vuosittain noin kaksinkertainen määrä ihmisiä sähköiskuihin verrattuna (Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry 2004). Kaapelipalot liittyvät usein virheisiin ja puutteisiin suunnittelussa, asennuksessa, huollossa tai käytössä.

Yhteiskäyttötunneleissa on 110, 20 ja 10 kV suurjännitekaapeleita, pienjännitekaapeleita sekä viesti- ja ohjauskaapeleita. Suurjännitekaapelit on sijoitettu pääosin tunnelin lattiasoran sisään betonisiin kaapelielementteihin, jolloin niiden paloriski on hyvin pieni. Pienjännite-, viesti- ja ohjauskaapelit on sijoitettu avoimille kaapeliarinoille tunnelin seinään. Esimerkki kaapeliarinarakenteesta on kuvassa 3.



Kuva 3: Kaapeliarinoita Ilmala – Alppila vesijohtotunnelissa

Kaapelipalot alkavat usein sähkökeskuksista, kaapelihyllyiltä tai sähkölaitteista eli sieltä, missä on kaapeleiden liitoksia. Väärin asennetut liitokset tai liikaa taivutetut kaapelit kuumenevat ja aiheuttavat syttymisriskin. Kaapelipalot syttyvät usein hitaasti ja aiheuttavat paljon savua. Syntyneet savukaasut ovat myrkyllisiä ja hävittävät tunnelin näkyvyyden lähes kokonaan. Kaapeleiden eristeet koostuvat yleisimmin polyvinyylikloridista (PVC), polyeteenistä (PE, XLPE, PEX), tetrafluorieteenistä (PTFE, Teflon) ja eteenipropreenistä (EPR, EPDM).

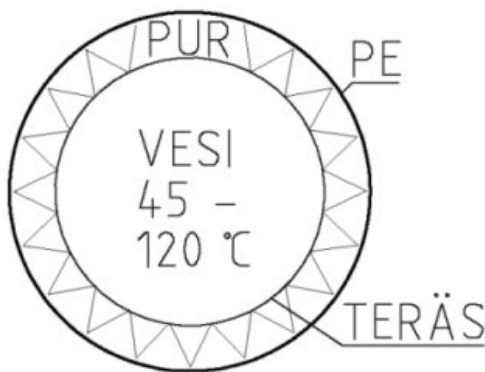
Eniten käytetty kaapelieriste, pehmitetty PVC, on palo-ominaisuuksiltaan kohtalainen. Sillä saadaan toteutettua yksittäisen kaapelin itsestään sammuvuus. PVC:n palaessa savunmuodostus on voimakasta ja savu tummaa. Palamistuotteina syntyy vetykloridia (HCl), minkä vesiliuos on suolahappoa. Kaasuna vetykloridi on myrkyllistä ja vesiliuoksena erittäin syövyttävää jo pieninä pitoisuuksina. Yhden kilon PVC:a palaessa

syntyy noin 2 kg 30 % suolahappoa. Toinen yleinen kaapelieriste PE syttyy helpommin kuin PVC. Sytyttyään se palaa herkästi ja tiputtaa palavia pisaroita, mitkä levittävät paloa edelleen. PE:n palamisesta ei synny vetykloridia.

2.2.4 Putkien eristeet

Vesijohtoputket ovat terästä tai valurautaa ja kaukolämpöputket terästä. Teräksen sulamislämpötila on 1350 °C ja raudan 1530 °C. Vaikka 20 MW tunnelipalo voi kehittää 1000 °C lämpötilan, palo tuskin aiheuttaa putkivuotoriskiä, varsinkin kun putkien sisällä on vettä, joka viilentää putkea.

Kaukolämpöputki muodostuu kolmesta sisäkkäisestä putkesta. Sisimmän teräksisen putken sisällä kulkee vesi, jonka lämpötila kiinteistöihin menevillä osuuksilla on 75 – 120 °C ja paluuosuuksilla 45 – 65 °C. Veden maksimipaine on 1,3 MPa. Kaukolämpöputken lämpöeristeinä toimii ennen vuotta 1990 asennetuissa putkissa menopuolella 120 mm:n ja paluupuolella 80 mm:n kerros mineraalivillaa ja uusimmissa putkissa 80 – 100 mm:n polyuretaanikerros (PUR). Putken uloimpana kerroksena on 10 mm:n polyeteenikerros (PE). Mineraalivillaeristeputkissa uloin kerros voi olla myös peltiä tai PE-solumuovia. Kaukojäähdytysputkissa PE-kuoren paksuus on 10 mm ja PUR-eristeiden 35 – 45 mm. Kuvassa 4 on esitetty polyuretaanieristeisen kaukolämpöputken rakenne.



Kuva 4: Kaukolämpöputken rakenne

Palokuormalla tarkoitetaan kokonaislämpömäärää, joka vapautuu, kun tilassa oleva aine palaa täydellisesti (Hostikka et al. 2005). Siihen luetaan kaikki rakennusosat, myös osastoivat osat sekä tilan irtaimisto. Yleensä palokuorman tiheys määritetään megajouleina neliometriä kohti [MJ/m²], mutta yhteiskäyttötunneleissa on helpompaa käsittää kuorma megajouleina tunnelimetriä kohti [MJ/m]. Palokuorma q_{tot} määritetään

$$q_{tot} = \sum (m_i \cdot H_i) = \sum (\rho_i A_i L \cdot H_i) \quad (\text{Kaava 1})$$

missä m_i = materiaalin massa [kg]
 H_i = materiaalin lämpöarvo [J/kg]
 ρ_i = materiaalin tiheys [kg/m³]
 A_i = kerroksen poikkipinta-ala [m²]
 L = putken pituus [m]

Vastaavasti palotehoksi Q [MW/m] saadaan

$$Q = \dot{m}'' \cdot A_f \cdot H_i \quad (\text{Kaava 2})$$

missä $\dot{m}''$ = materiaalin palamisnopeus pinta-alayksikköä kohden [kg/sm²]
 A_f = palava pinta-ala [m²]

Polyuretaanin lämpöarvo H_{PUR} on 24,3 MJ/kg ja tiheys ρ_{PUR} laadusta riippuen noin on 100 kg/m³. Vastaavasti polyeteenin lämpöarvo H_{PE} on 47,1 MJ/kg ja tiheys ρ_{PE} on 920 kg/m³. Kun 700 mm kaukolämpöputkessa PUR-eristeen paksuus on 85 mm, kaavan 1 perusteella saadaan PUR-eristeen palokuormaksi q_{PUR} 510 MJ/m ja PE-kuoren palokuormaksi q_{PE} 1200 MJ/m eli yhteensä palokuorma q_{tot} on 1710 MJ/m.

Kun polyuretaanin palamisnopeus $\dot{m}''$ on 0,015 kg/sm² ja polyeteenin $\dot{m}''$ on 0,0103 kg/sm² (Hyttinen 1998), kaavan 2 perusteella 700 mm kaukolämpöputken polyuretaanieristeen paloteho Q on 1,0 MW/m ja polyeteenikuoren paloteho Q on 1,4 MW/m. Yhteispaloteho kaukolämpöputken eristeelle on 2,4 MW/m eli noin 6 – 8 metriä putkieristettä vastaa paloteholtaan yhden pakettiauton paloa.

700 mm kaukojäähdytysputken palokuorma q_{tot} on kaavan 1 perusteella 1260 MJ/m ja paloteho Q_{tot} kaavan 2 perusteella 2,1 MJ/m, kun PUR-eristeen paksuus on 35 mm. Koska PE-kuoren vaikutus putkieristeen palotehoon on huomattavasti suurempi kuin PUR-eristeen, kaukojäähdytys- ja kaukolämpöputken palotehot ovat lähes samat.

Mineraalivilla on lähes täysin palamaton materiaali, joka kestää jopa 700 – 1000 °C lämpötiloja syttymättä ja siten toimii hyvänä paloeristeenä putken pinnalla. 1990- ja 2000-luvuilla yhteiskäyttötunneleiden kaukolämpöputkissa on kuitenkin käytetty PUR-eristettä, koska sen vedenimukyky on huomattavasti pienempi kuin mineraalivillalla. Kaukolämpöputkien korroosiota ja siitä aiheutuvaa putkivuotoa pidetään suurempana ja todennäköisempänä riskinä kuin tulipaloa.

Palavaa materiaalia on myös vesijohtoputkien korroosiota eristävässä eristeessä sekä putkiliitosten tiivisteissä. Jos vesijohtoputken liitännän lähellä on tulipalo, tiivisteiden palaessa syntyy putkivuoto.

2.3 Palon eteneminen tunnelitilassa

Palon kehittymiseen ja laajenemiseen tarvitaan aina palavaa materiaalia. Yhteiskäyttötunneleissa palo voi levitä kaapeli- ja putkieristeitä pitkin sekä pumppu- ja tuotantolaitosten rakenteissa. Erityisesti pysty- ja vinokuiluihin sijoitetuissa kaapeleissa ja putkissa palo etenee tehokkaasti.

Putkieristeenä käytettävä polyeteeni palaa herkästi ja tiputtaa palavia pisaroita, jotka levittävät paloa. Kun kaukolämpöputken paloteho voi olla yli 2 MW/m, on täysin mahdollista, että putkieriste palaa täydellisesti palokatkoina toimivien kiinteiden putkikannakkeiden väliltä.

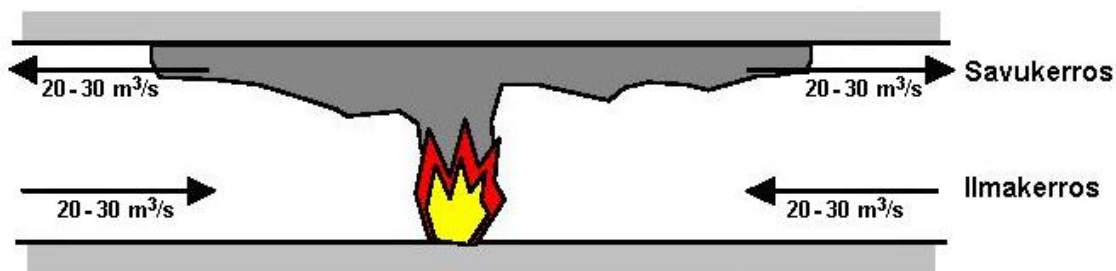
Palon eteneminen kaapeliarinoilla riippuu paljolti kaapelimäärästä ja arinoiden sijoittelusta. Palo leviää helposti päällekkäisissä arinoissa ja putkissa. Vuonna 1988 tapahtuneessa höyryvoimalaitoksen kaapelipalossa useat lähekkäin olevat kaapeliarinat muodostivat hormimaisen tilan, joka kiihdytti palon etenemistä. Palo eteni kaape-

lihyllä parhaimmillaan 20 metriä minuutissa (Suomen sähkö- ja teleurakoitsija-liitto ry 2004). Yhteiskäyttötunneleiden kaapelihihlyissä ei ole palokatkoja.

2.4 Savun eteneminen tunnelitilassa

Savun leviäminen tunnelitilassa riippuu palotehosta ja tunnelitilan koosta. Pakettiautopalossa syntyy 40 – 60 m³ savua sekunnissa täydellisen palon aikana. Tämän perusteella autopalon savu leviää poikkipinta-alaltaan 30 m² tunnelissa nopeudella 0,7 – 1,0 m/s, jos savu leviäisi tunnelissa koko poikkipinta-alan täyttävänä vyöhykkeenä. Tulipalot eivät kuitenkaan toimi näin, koska samalla kun palo tuottaa savua, jota virtaa pois päin palopaikalta, se myös kuluttaa happea, jota virtaa kohti palopaikkaa.

Palosta syntyvät kuumat kaasut ovat ilmaa kevyempiä ja siten nousevat tunnelin kattoon ja kulkeutuvat paremmin ylämäen suuntaan. Jo 1 – 2 % tunnelin kallistuksella ylöspäin nousevan savun aiheuttama savupiippuefekti on hallitseva tekijä savun leviämiseen. Palon aiheuttama paine saa savun liikkumaan pois päin palopaikalta kattoa pitkin. Samalla ilmaa liikkuu lattiaa pitkin kohti paloa. Savu on kerrostunutta, jos kuuman savukerroksen ja kylmän ilman välillä on selkeä raja. Kuvassa 5 on esitetty kerrostuneisuuden periaate.



Kuva 5: Savun kerrostuneisuuden periaate

Paloa kohti liikkuva kylmä ja puhdas ilma antaa hyvän suojan palopaikalta poistuville ihmisille. Kerrostuneisuus kuitenkin rikkoutuu helposti. Tunnelin ilmavaihto ja ilmanvirtaukset rikkovat kerrokset. Jo 2 m/s ilmanvirtaus tai ilman ja savukerroksen välinen kitka voivat aiheuttaa turbulenssia. Toisaalta myös savukaasut jäähtyvät kauempana palopaikasta, jolloin kerrostuneisuus heikkenee eikä savutonta ilmakerrosta enää välttämättä ole (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002).

Jos pakettiautopalossa savu leviää tunnelissa molempiin suuntiin noin 30 m³ sekunnissa ja ilmakerros liikkuu kuvan 5 mukaisesti vastakkaiseen suuntaan kuin savukeros, savu- ja ilmakerroksen välinen nopeusero on vähintään 4 m/s, kun tunnelin vapaa poikkipinta-ala on 30 m². Näin suurella kerroksien nopeuserolla turbulenssia esiintyy ja kerrostuneisuus heikkenee.

Myös paloteholla sekä palon ja savun kehittymisnopeudella on vaikutusta savun kerrostuneisuuteen. Yli 10 MW paloissa savu putoaa nopeasti noin viidessä minuutissa aivan tunnelin lattiaan. Mitä hitaammin palo kehittyy, sitä suurempi ilmakerros jää savukerroksen alle.

2.5 Tulipalon vaikutukset ihmiseen

Tunnelipaloissa ihmisen toimintaan ja pelastautumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat palon kuumuus ja lämpösäteily sekä savun tiheys ja palamisessa syntyvät myrkylliset kaasut.

Kuivan ilman lämpötilan vaikutusta ihmiseen on kuvattu taulukossa 1 (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002). Taulukosta nähdään, että täysin kuivassa ilmassa ihminen kestää lyhyitä aikoja hyvinkin suuria lämpötiloja. 70 °C on kuitenkin raja, missä ihminen voi toimia normaalisti. 150 °C lämpötilassa palovammoja ilmestyy viidessä minuutissa. Jos ilmassa on kosteutta esimerkiksi sprinklerien vaikutuksesta, jo 50 °C lämpötila heikentää lämmön haihtumista iholta ja lisää riskiä veden tiivistymisestä keuhkoihin siten, että olosuhteet ovat hengenvaaralliset.

Taulukko 1: Lämpötilan vaikutus ihmiseen (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002)

Lämpötila (°C)	Vaikutus
127	Vaikea hengittää
140	Sietokyvyn raja 5 minuuttia
149	Vaikea hengittää suun kautta, raja pakenemiselle
160	Sietämätön kipu
182	Palautumattomia vaurioita 30 sekunnissa
200	Hengityselimet painuvat kokoon 4 minuutissa

Tulipalon kuumuuden lisäksi kuuman savukerroksen ja palossa kuumentuneiden tunnelin rakenteiden lämpösäteily vaikeuttaa poistumista. Vaatetuksella voi suojautua lämpösäteilyä vastaan.

Palamisessa syntyy pääasiassa hiilidioksidia ja vettä, mutta jos palon olosuhteet ovat sellaiset, ettei happea ole tarpeeksi palamiseen, syntyy hiilimonoksidia eli häkää. Häkäkaasun myrkyllisyys johtuu siitä, että se imeytyy verenkiertoon 240 kertaa paremmin kuin happi. Häkäpitoisuuden vaikutus ihmiseen on esitetty taulukossa 2. Muita paloissa syntyviä vaarallisia kaasuja ovat vetykloridi HCl ja typen oksidit.

Taulukko 2: Häkäpitoisuuden vaikutus ihmiseen (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002)

CO pitoisuus (ppm)	Vaikutus
1500	Päänsärkyä > 15 min, tajuttomuus > 30 min, kuolema > 60 min
2000	Päänsärkyä > 10 min, tajuttomuus > 20 min, kuolema > 45 min
3000	Turvallinen kestävyys korkeintaan 5 min, tajuttomuus > 10 min
6000	Päänsärkyä ja huimausta 1 - 2 min, kuolema 10 - 15 min
12800	Välitön vaikutus, tajuttomuus 2 - 3 hengenvetoa, kuolema 1 - 3 min

Ihmisen pelastautumismahdollisuuksiin vaikuttaa olennaisesti näkyvyys. Ihmisen etenemisnopeus hidastuu nopeasti näkyvyyden heiketessä. Näkyvyyden heikkeneminen johtuu sekä valon absorboitumisesta ja hajoamisesta sen osuessa savupartikkeleihin että savuhiukkasista ja savukaasuista johtuvasta silmien ärsytyksestä.

Näkyvyyttä savuisessa tilassa kuvataan savun optisella tiheydellä SD (m^{-1}). Optisen tiheyden suhde näkyvyyteen Z (m) on valaiseville kohteille

$$Z = \frac{2,5}{SD} \quad \text{(Kaava 3)}$$

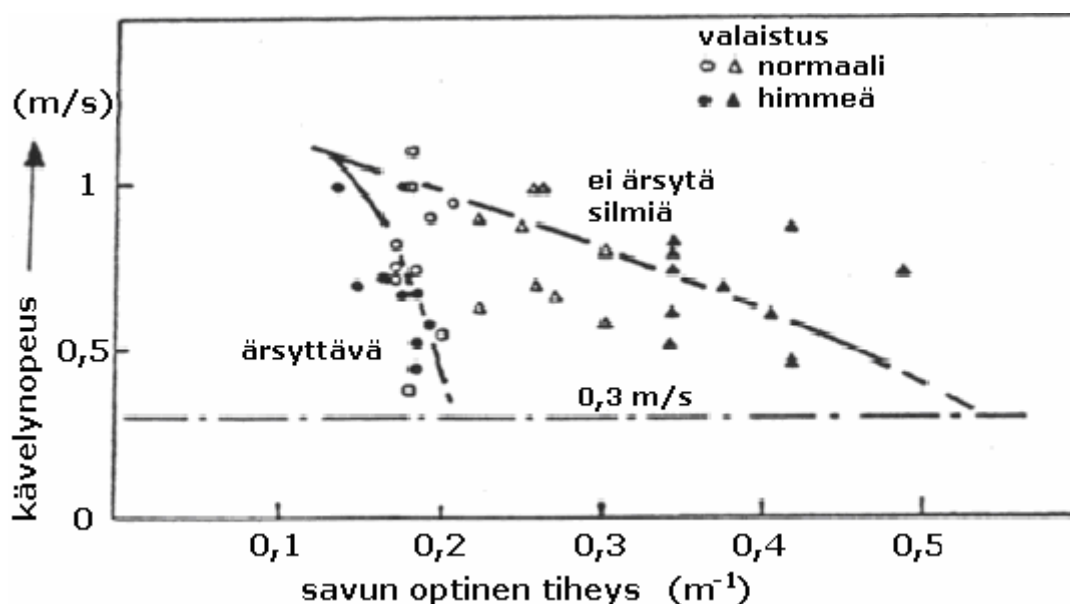
ja valaisemattomille kohteille

$$Z = \frac{1}{SD}$$

(Kaava 4)

Kaavojen 3 ja 4 perusteella valaisevat kohteet näkyvät siis savuisissa olosuhteissa 2,5 kertaa kauemmas kuin valaisemattomat kohteet.

Kuvassa 6 on esitetty savun optisen tiheyden suhdetta kävelynopeuteen. Kuvan perusteella savun ärsyttävyydellä on suuri merkitys etenemisnopeuteen. Kun ihmisen reipas kävelynopeus normaalisti on noin 1,4 m/s (Weckman 2005), ärsyttävässä savussa nopeus putoaa alle 0,3 m/s näkyvyyden ollessa valaisemattomaan kohteeseen 5 metriä, kun ei-ärsyttävässä savussa, vastaavassa tilanteessa nopeus on 1 m/s.



Kuva 6: Savun optisen tiheyden vaikutus ihmisen kävelynopeuteen (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002)

2.6 Tulipalon vaikutukset tunnelin rakenteisiin

Yhteiskäyttötunneleissa louhitun kalliopinnan lujitusmenetelmiä ovat ruiskubetonointi ja kalliopultitus. Ruiskubetonikerroksen paksuus on tavallisesti 40 – 150 mm. Ruiskubetonin lujittamismenetelmänä käytetään teräskuituja tai teräsverkkoa. Vanhoissa yhteiskäyttötunneleissa on käytetty joko teräsverkolla lujitettua tai lujittamatonta ruiskubetonia. Uudemmissa tunneleissa betoni on yleensä aina teräskuiduilla lujitettua. Kalliopultituksessa käytettyjen teräspulttien pituus on vähintään 1,5 metriä. Kuumuudelle alttiita tunnelin rakenteita ovat siis kallion pinnassa oleva ruiskubetonikerros, teräspultit ja ruiskubetonikerroksen alla oleva louhittu kalliopinta.

2.6.1 Tulipalon vaikutus ruiskubetoniin

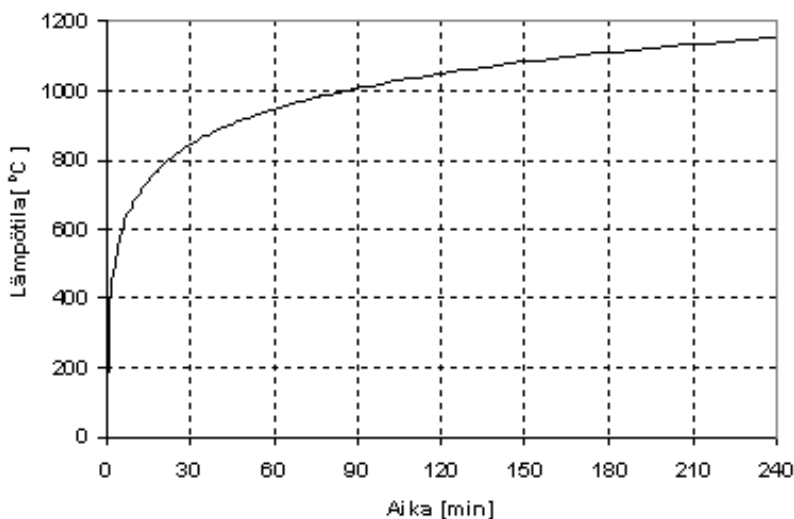
Ruiskubetonikerroksen palonkestävyyteen vaikuttavat kerroksen paksuus, huokoisuus, vesipitoisuus, teräskuitujen määrä, verkotus ja betonin kiinnittyminen kallio-pintaan. Betoni itsessään on syttymätön ja palamaton materiaali. Betonissa tapahtuvia reaktioita eri lämpötiloissa on kuvattu taulukossa 3.

Taulukko 3: Betonissa tapahtuvat reaktiot eri lämpötiloissa (Suomen betoniyhdistys r.y. 2004)

Lämpötila-alue (°C)	Vallitseva reaktio
20...300	Huokosveden poistuminen
300...490	Absorboituneen veden poistuminen
490...540	Kalsiumhydroksidin hajoaminen
573	Kvartsin kiderakenteen muutos
580...750	β -dikalsiumsilikaatin muodostuminen

Taulukon 3 perusteella lämpötilan kasvaessa ensimmäinen muutos betonissa on veden haihtuminen, joka aiheuttaa betonin kutistumista ja halkeilua. Vaarallisin tilanne betonin kuumentumisessa on silloin, kun betonipinta on niin tiivistä, ettei kerroksen sisällä höyrystyvä vesi pääse haihtumaan, vaan laajenee aiheuttaen räjähdysenomaista betonipinnan kuoriotumista. Jännitystilän muutoksia ja halkeilua aiheuttavat myös betonin kiviaineksen ja sementin erilaiset lämpölaajenemiskertoimet.

VTT:n tekemien ruiskubetonin palokokeiden perusteella tärkein ruiskubetonin rikkoutumiseen vaikuttava tekijä oli ruiskubetonin irtoaminen kallion pinnasta (Mangs 1991). Palokokeet suoritettiin laboratorion testiuunissa. Ruiskubetoninäytteet oli valuttu graniittilaatoille, joiden pinta-alat olivat n. 1,2 - 1,5 m². Testeissä koelaatat oli sijoitettu joko uunin kattoon tai seiniin. Lämpötilakehitys uunissa oli kuvan 7 standardin ISO 834 aika-lämpökäyrän mukainen.



Kuva 7: ISO 834 mukaisen standardipalon aika-lämpötilariippuvuus

Palokokeiden tulokset on esitetty taulukossa 4. Kokeista nähdään, että betonin lujittaminen teräsverkolla tai -kuiduilla parantaa betonin palonkestävyyttä. Betoni suojaa myös kallionpintaa lämpötilan nousulta ja siitä johtuvalta rikkoutumiselta.

Taulukko 4: Ruiskubetoninäytteet ja yhteenveto koetuloksista (Mangs 1991)

Nro	Menetelmä	Lujitus	Paksuus (mm)	Ankkurointi graniittiin	Sijoitus	Koeaika	Koetulos
1	kuivaseos	-	20 - 30	-	katto	16 min	Irtosi graniitista ja putosi yhtenä kappaleena 11 min kohdalla. Graniitti halkesi 15 min kohdalla
2	kuivaseos	raudoitettu teräsverkolla	60 - 80	-	seinä	3 h	Ei lohkeilua. Graniitti halkeili 1 h 28 min kohdalla
3	märkäseos	-	60 - 100	+, suojattu	katto	4 h	Lohkeilua aikavälillä 45 min - 1 h.
4	märkäseos	raudoitettu teräsverkolla	50 - 110	+, suojattu	seinä	4 h	Lohkeilua aikavälillä 25 min - 1 h. Graniitti halkesi 3 h 15 min kohdalla.
5	märkäseos	teräskuitu 18 mm	80 - 100	-, reunoista kiinni	seinä	2 h 35 min	Lohkeilua ei havaittu.
6	märkäseos	teräskuitu 25 mm	75 - 115	+, suojaa-maton	katto	53 min	Betoni irtosi graniitista aikavälillä 17 - 23 min. Ankkuripultit katkesivat ja näyte putosi yhtenä kappaleena 53 min kohdalla. Lohkeilua ei havaittu
7	märkäseos	muovikuitu	20 - 60	-, reunoista kiinni	katto	2 h 35 min	Näytteen paksuus vaihteli huomattavasti, ohut osa putosi kokeen aikana, loput roikkuivat uunin aukon reunoista.
8	märkäseos	muovikuitu	40 - 120	+, suojaa-maton	seinä	55 min	Kulmapala lohkesi 21 min kohdalla, kulman reuna heikosti suojattu.

Teräskuitubetonin palonkestävyyttä voidaan parantaa lisäämällä betonimassaan polypropyleenikuituja. Kuidut sulavat noin 160 °C lämpötilassa, jolloin betoniin avautuu kanavia, joihin höyrystyvä vesi laajenee. Tämä vähentää merkittävästi betonikerroksen räjähdysenomaista rikkoutumista (Bekaert Group 2004).

Merkittävä tekijä betonin ja kiviaineksen palonkestävyydessä on se, että massan jäähtyessä tapahtuu kutistumista, joka lisää massan rakoilua ja pienentää lujuutta. Betonirakenteet voivat lohkeilla vaarallisen syvältä varsinkin silloin, kun betonia jäähdytetään nopeasti vesisuihkulla. Tulipalon jälkeen voidaan palonaikeista betonin lämpötilaa päätellä betonin värin perusteella. Yli 300 °C kuumentunut betoni on purnertavaa, yli 600 °C kuumentunut betoni harmahtavaa ja yli 900 °C kuumentunut betoni ruskehtavaa tai kellertävää (Suomen betoniyhdistys r.y. 2004).

2.6.2 Tulipalon vaikutus teräspultteihin

Yhteiskäyttötunneleiden kalliopintojen lujitukseen on käytetty yleisimmin harjateräspultteja, jotka juotetaan sementtipohjaisen juotosmassan avulla kallioon porattuihin reikiin. Pultit tukevat kallion rakoilusta johtuvia irtonaisia lohkeita ja kiinnittävät kalliotilan katossa olevia irtonaisia kerroksia.

Pulttien lujittava vaikutus johtuu pultin, juotosmassan ja kallion välisistä vetojännityksistä ja pultin leikkausjännityksestä. Teräspultit toimivat lämmönjohteina siirtäen lämpövaikutukset syvemmälle kallion sisään, jolloin pultin lujuudessa ja sidoksissa juotosmassan ja kallion välillä voi tapahtua muutoksia, jotka heikentävät kallioseinämien lujuutta.

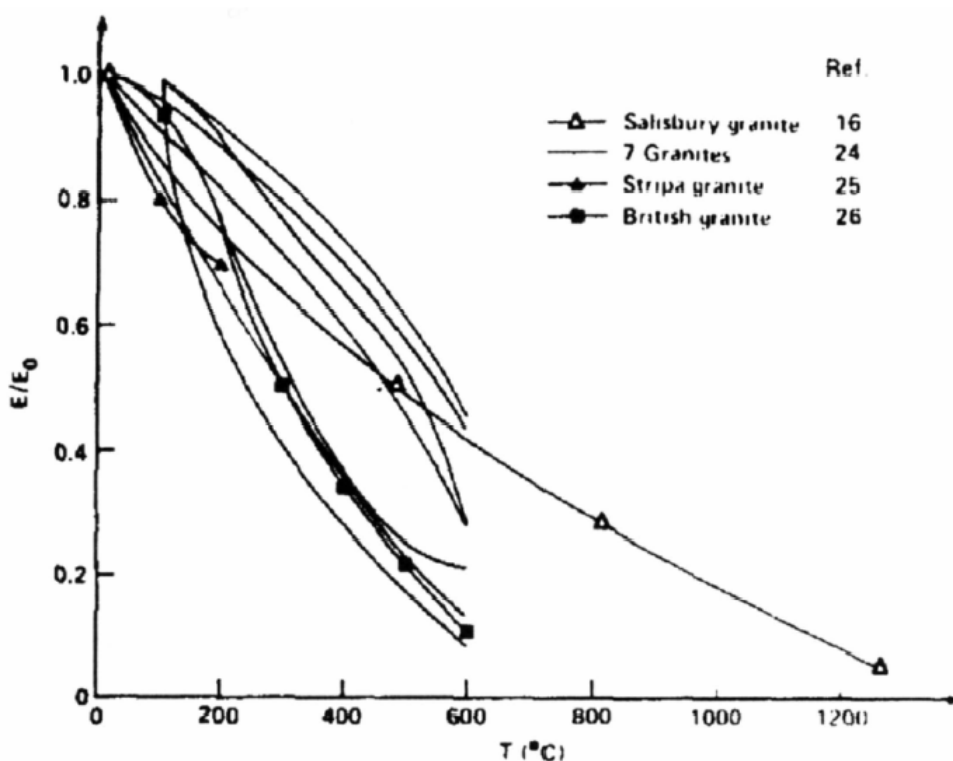
Yhteiskäyttötunneleissa harvoissa erikoiskohteissa kallion lujitukseen on käytetty jännitettyjä pultteja. Jännitetty pultti puristavat kalliossa olevia rakoja kiinni lisäten kalliorakojen normaalijännityksiä ja kitkaa. Jos jännitettyä teräspulttia kuumennetaan 300 °C, se menettää jännityksensä ja lähes koko lujuutensa. (Larsson 2006).

Samalla tavalla kun ruiskubetonipinta suojaa kalliopintaa lämpötilan nousulta, se suoja myös kallio-pulttien päitä.

2.6.3 Tulipalon vaikutus louhittuun kalliopintaan

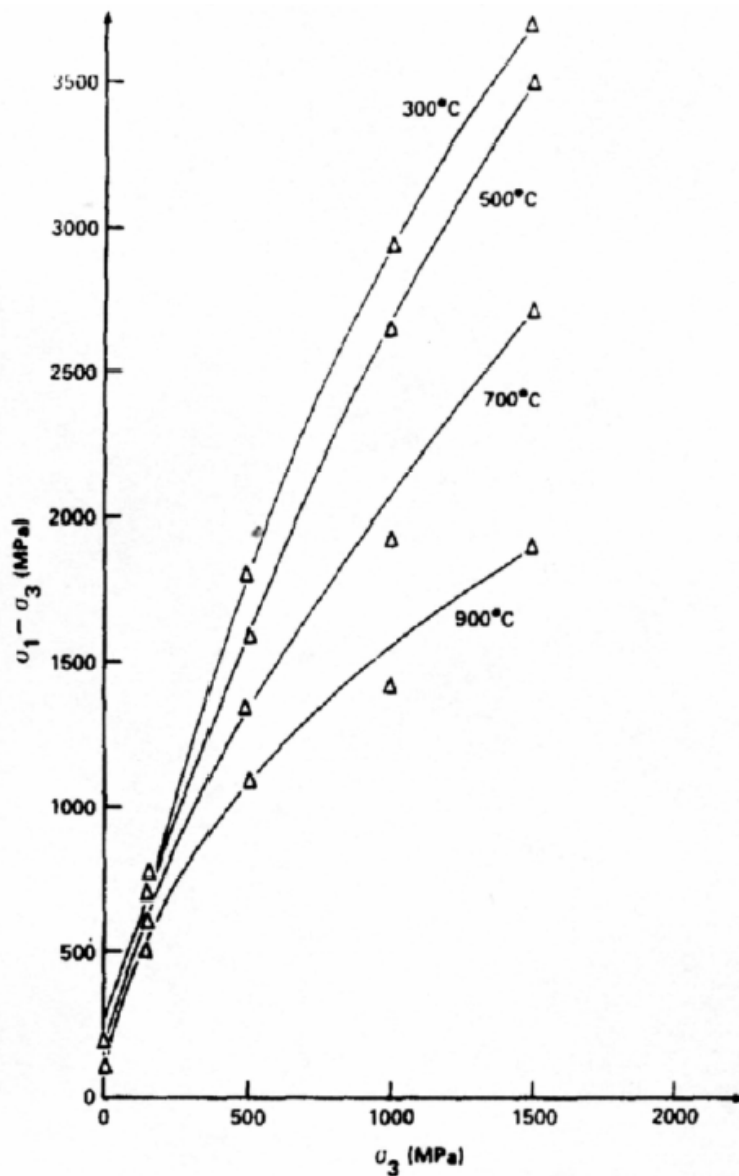
Palon vaikutuksia louhittuun kalliopintaan on tutkittu hyvin vähän. Palokokeissa on usein mainittu palon aiheuttamat vauriot kalliopinnoille, mutta niissä ei ole tutkittu vaurioitten syytä. Esimerkiksi VTT:n Lappeenrannan kalkkikaivoksen tunnelissa suorittamissa palokokeissa lohkeili ruiskubetonimattomasta kalliokatosta noin 0,2 metrin ja seinistä 0,1 metrin kalkkikivikerros (Keski-Rahkonen et al. 1986).

Tärkeimmät kiven ominaisuudet, joihin lämpötilan nousu vaikuttaa, ovat kimmokerroin, puristuslujuus ja lämpölaajeneminen (Larsson 2006). Kimmokertoimeen ja puristuslujuuteen vaikuttavat sekä kiveen kohdistuva lämpötila että paine. Kuvassa 8 on esitetty lämpötilan vaikutus eri graniittilaatujen kimmokertoimiin.



Kuva 8: Lämpötilan vaikutus normaalikimmokertoimeen (Larsson, 2006)

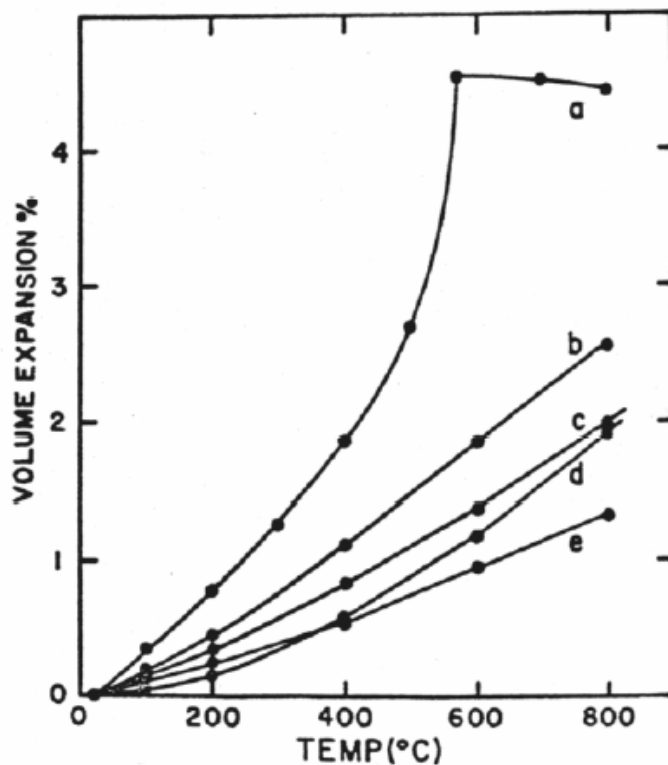
Kuvassa 9 on esitetty lämpötilan vaikutus kiven puristuslujuuteen. Jos ympäröivä jännitys on 1000 MPa, puristuslujuuden ero 300 °C ja 900 °C lämpötilojen välillä on yli 1500 MPa.



Kuva 9: Lämpötilan vaikutus puristuslujuuteen (Larsson, 2006)

Kiven kuumentaminen aiheuttaa lämpölaajenemista, joka voi olla palautuvaa tai pysyvää riippuen lämpötilan kasvunopeudesta ja maksimilämpötilasta. Lämpötilan nousun ollessa alle 2 °C minuutissa ja maksimilämpötilan ollessa alle 250 °C, pysyviä jännitystilanteiden muutoksia ei kivissä esiinny, mutta sitä suuremmilla lämpöarvoilla osa muutoksista on pysyviä.

Kiven lämpölaajeneminen aiheutuu suoraan kiven mineraalikoostumuksesta. Yleisimpien graniittisten mineraalien lämpölaajeneminen on esitetty kuvassa 10. Kuvan perusteella kvartsin lämpölaajenemiskerroin on selvästi muita mineraaleja suurempi, joten kivilajin kvartsipitoisuudella on muita mineraaleja suurempi merkitys kivilajin lämpölaajenemiseen.



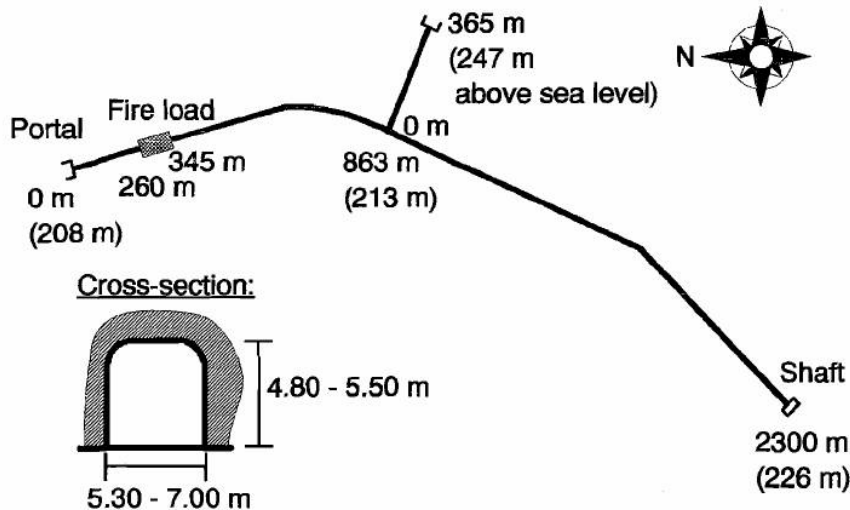
Kuva 10: Eri mineraalien lämpölaajeneminen. Mineraalit ovat a) kvartsi, b) oliiviini, c) pyrokseeni, d) ortoklaasi (kalimaasälpä), e) plagioklaasi (Larsson 2006)

Samoin kun ruiskubetonikerrosta, veden höyrystyminen rikkoo myös kuumuudelle alttiita kallion pintakerroksia. Kallion pinnan kuumetessa tapahtuu lämpölaajenemista, jolloin tangentiaali-jännitys ylittää kuumuudessa laskeneen lujuuden ja kalliopinta voi irrota eli kuoriutua räjähdysnomaisesti.

2.7 Tunnelleissa tehdyt palokokeet

2.7.1 Repparfjordin tunnelikokeet

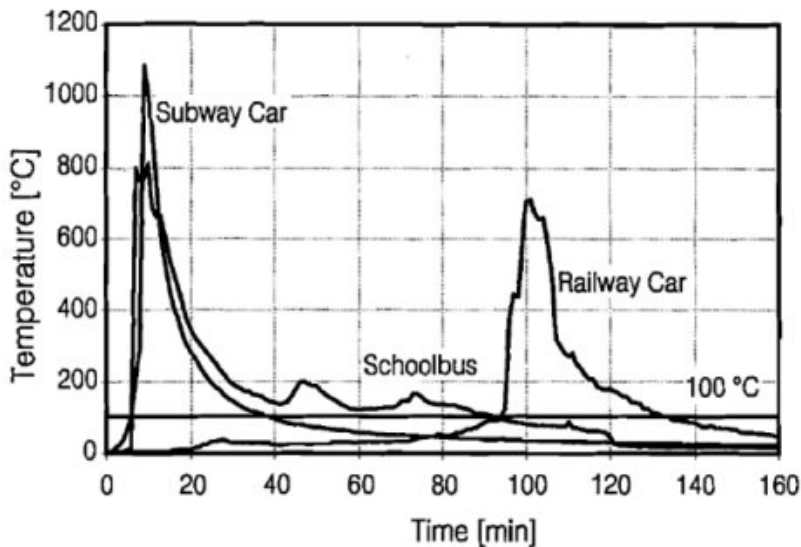
Vuonna 1992 suoritettiin 20 palokoetta Repparfjordin vanhassa kaivostunnelissa Pohjois-Norjassa (Richter & Vauguelin 1994). Tunneli on 2,3 km pitkä ja sen poikkipinta-ala on 25–35 m². Tunnelin pohjoinen suuaukko on 208 metriä meren pinnan yläpuolella. Tunnelin eteläisessä päässä on 90 metriä korkea pinta-alaltaan 9 m² ilmastointikuilu, jonka pohjataso on 226 metriä meren pinnan yläpuolella. Profiililtaan tunneli vastaa hyvin yhteiskäyttötunneleita, sillä tunnelissa ei ole betoniholvausta, vaan poraus- räjäytysmenetelmällä louhittu pinta on ainoastaan ruiskubetonoitu. Palokokeet suoritettiin 300 metrin päässä tunnelin suuaukolta. Yleiskuva ja poikkileikkaus tunnelista ovat kuvassa 11.



Kuva 11: Yleiskuva ja poikkileikkaus Repparfjordin koetunnelista (Richter & Vauguelin 1994)

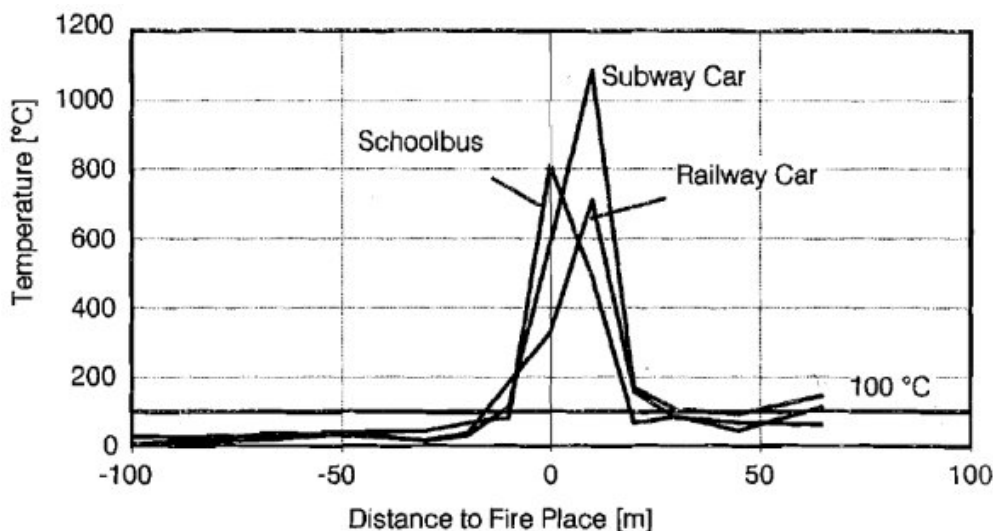
Repparfjordin tunnelikokeissa testattiin sekä maantie- että rautatieliikennetunnelien palotilanteita. Palon lähteenä käytettiin altaita, joissa oli palavaa nestettä, erilaisia liikennevälineitä aina henkilöautosta metrovaunuun sekä tukkeja. Palon ja savun vaikutuksia tunnelissa seurattiin lämpöantureilla, lämpösäteilyn mittalaitteilla, savun optisen tiheyden mittareilla sekä CO, CO₂, O₂, SO₂, C_mH_n ja NO analysaattoreilla. Savun leviämistä kuvattiin video- ja infrapunakameroilla. Lisäksi savun koostumuksesta otettiin näytteitä. Tunnelin ilmanvaihtoa säädeltiin pohjoiselle suuaukolle asennetulla puhaltimella, jolla saatiin jopa 8 m/s ilmavirtaus tunneliin.

Lähimpänä yhteiskäyttötunnelin olosuhteita oltiin koesarjassa, missä tunnelissa poltettiin linja-auto, metrovaunu ja junavaunu (Blume 1994). Linja-auton palokuormaksi arvioitiin 48 000 MJ, metrovaunun 41 000 MJ ja junavaunun 77 000 MJ. Ilmavirtaus linja-autopalon aikana oli 0,3 m/s tunnelin pohjoiselle suuaukolle päin ja vaunupalolen aikana 0,5 m/s kuilulle päin. Noin 9-10 minuuttia palon syttymisen jälkeen linja-autopalon maksimilämpötila oli 800 °C ja metrovaunupalon 1200 °C. Junavaunupalon lämpöhuippu 700 °C saavutettiin noin 100 minuuttia vaunun sytyttämisen jälkeen. Kuvassa 12 on esitetty palokokeiden lämpötilojen kehittyminen. Metrovaunun ja linja-auton palot kehittivät räjähdysnomaisesti, mutta junavaunupalo kehittyi hitaasti vaunun sisällä.



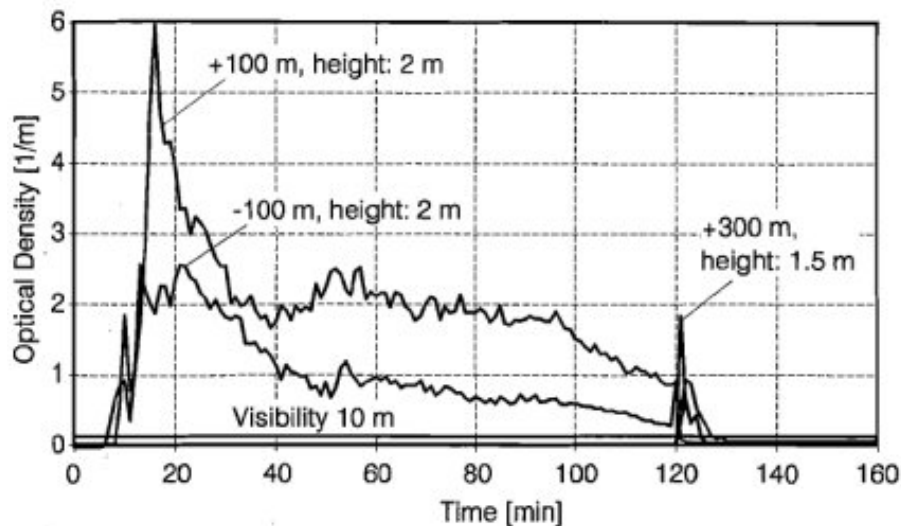
Kuva 12: Lämpötilojen kehittyminen palopaikalla kahden metrin korkeudesta mitattuna (Blume 1994)

Kuvassa 13 on esitetty maksimilämpötilat 150 metrin matkalta palopaikan ympäriltä. Kuvasta voidaan havaita, että kauempana palopaikasta tunnelin lämpötilat laskivat nopeasti. Esimerkiksi metrovaunupalossa 30 metrin päässä palosta tunnelin suuaukolle päin lämpötila oli alle 100 °C koko kokeen ajan.



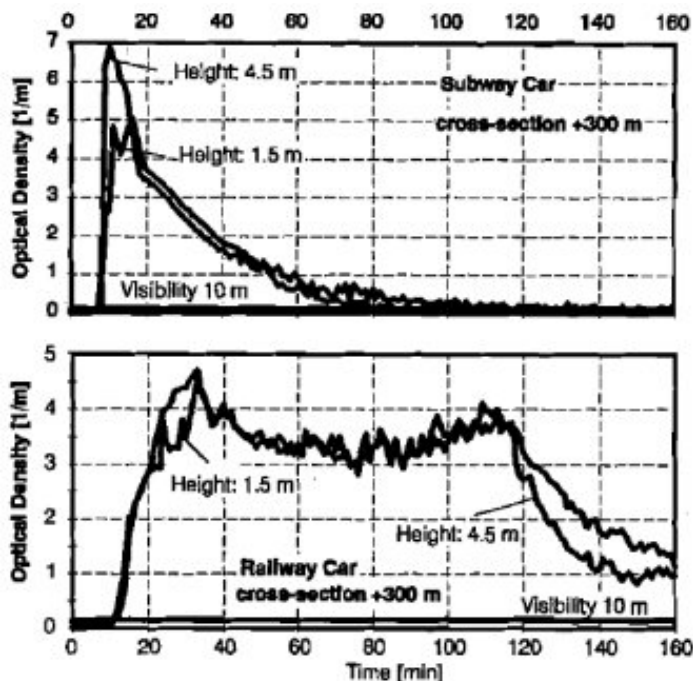
Kuva 13: Kahden metrin korkeudelta mitatut maksimilämpötilat (Blume 1994)

Kuvissa 14 ja 15 on esitetty savun optisen tiheyden arvoja mittauspisteissä ajan suhteen. Kuvien perusteella voidaan päätellä savun leviämisen nopeus palopaikan ja mittauspisteiden välillä. Linja-autopalossa, missä ilmavirtaus oli 0,3 m/s tunnelin pohjoiselle suuaukolle päin, savurintama eteni sadan metrin päähän molempiin suuntiin palopaikalta noin kahdeksassa minuutissa. Tämän jälkeen savun tiheys oli niin suuri, että näkyvyys oli lähes koko kokeen ajan alle kaksi metriä. 0,3 m/s ilmavirta aiheutti kuitenkin sen, että savu ei levinnyt koko 120 minuutin kokeen aikana vastatuuleen 300 metrin päähän palopaikasta. Savun kerrostuneisuudesta ei ollut tietoa. Kuvassa 14 oleva savun tiheyskäyrän piikki 120 minuutin kohdalla johtuu siitä, että silloin laitettiin suurtehopuhaltimet päälle, joilla tyhjennettiin tunneli savusta.



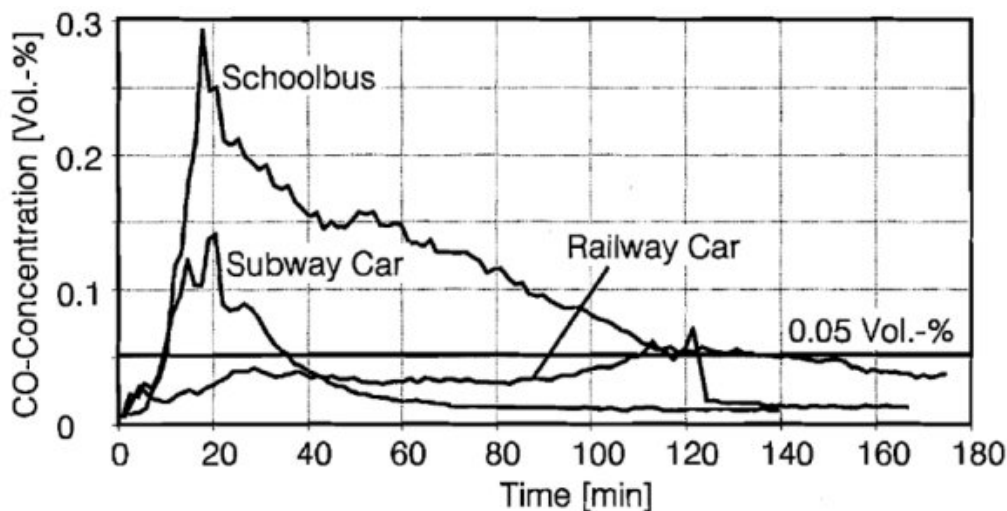
Kuva 14: Savun optisen tiheyden kehitys linja-autopalossa (Blume 1994)

Metrovaunupalossa savu levisi 0,5 m/s myötätuuleen kahdeksassa minuutissa 300 metrin päähän palopaikasta. Junavaunupalossa ensimmäiset savuhavainnot 300 metrin päässä olleessa mittauspisteessä olivat noin 10 – 12 minuutin päästä palon syttymisestä, vaikka junavaunupalo kehittyi hitaammin kuin metrovaunupalo. Vaunupaloissa savun tiheys oli selkeästi suurempi kuin linja-autopalossa näkyvyyden ollessa heikoimmillaan alle 0,2 metriä.



Kuva 15: Savun optisen tiheyden kehitys juna- ja metrovaunupalossa (Blume 1994)

Palon häkäpitoisuutta mitattiin 30 metrin päästä palopaikasta 1,5 - 2 metrin korkeudesta tunnelin lattiasta. Kuvan 16 perusteella maksimipitoisuudet olivat linja-autopalossa 2800 ppm, metrovaunupalossa 1400 ppm ja junavaunupalossa 600 ppm, eli häkäpitoisuudet olivat hengenvaarallisia vain linja-autopalossa. Kuitenkin vaunupaloissa savun tiheydet olivat niin suuret, että eteneminen tunnelissa olisi ollut hyvin hidasta ja altistumisaika myrkyllisille palokaasuille olisi kasvanut.

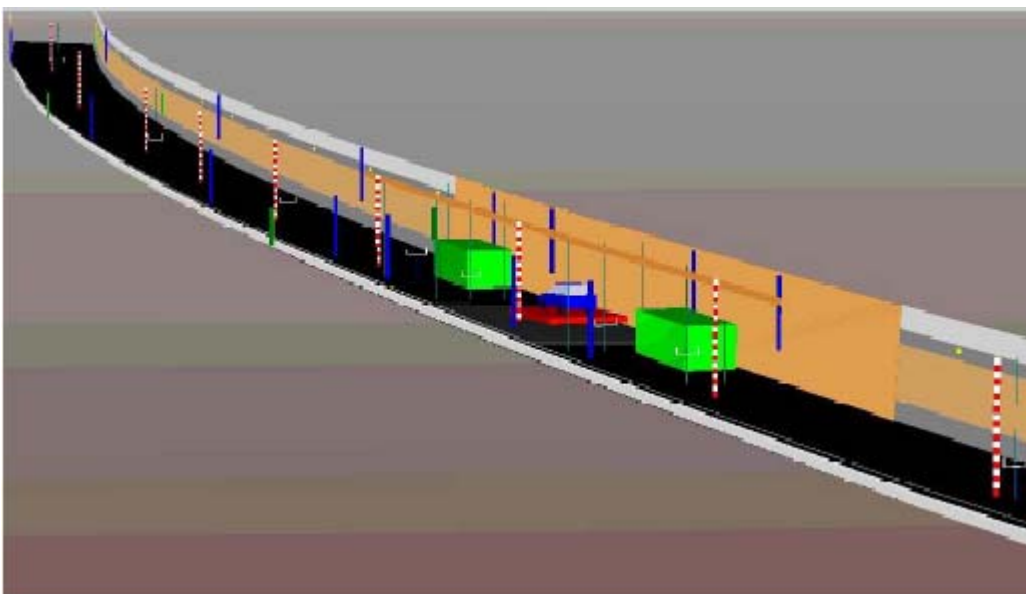


Kuva 16: Häkäpitoisuuden kehitys 30 metriä pystykuilulle päin mitattuna (Blume 1994)

2.7.2 Benelux-tunnelin palokokeet

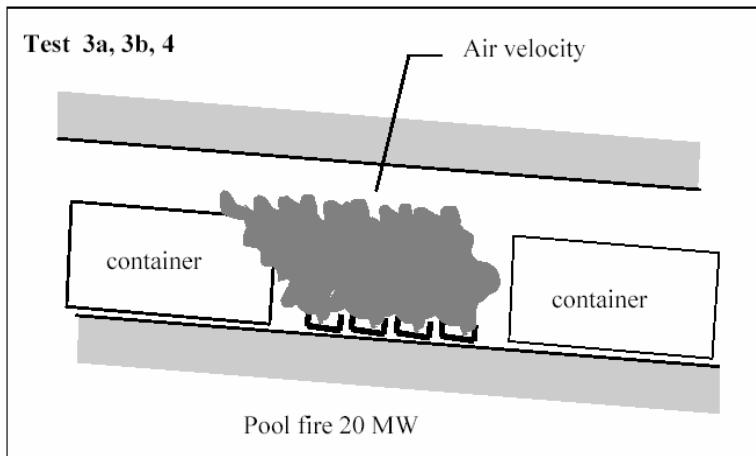
Alankomaiden liikenneministeriö suoritti vuonna 2001 sarjan palokokeita rakenteilla olleessa Benelux-liikennetunnelissa (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002). Kokeiden pääpaino oli tutkia savun ja lämmön leviämistä henkilö- ja kuorma-autoja vastaavien kuormien palaessa sekä testata pitkittäisen tuuletuksen vaikutusta savun ja lämmön etenemiseen.

Koetunnelina toimi kaksikaistainen betonitunneli, jonka pituus on 900 metriä, maksimikorkeus 5,1 metriä ja maksimileveys 9,8 metriä. Tunnelin kallistuskulma on 3,3 – 4,4 % ja se viettää eteläisen suuaukon suuntaan. Palopaikka oli 265 metrin päässä pohjoisesta suuaukosta. Kaikki ilmapirtaukset olivat etelästä pohjoiseen. Palokokeet suoritettiin kahden teräskontin välissä, jotka kuvasivat tunneliin pysähtyneitä ajoneuvoja. Kuvassa 17 on esitetty tunnelin koejärjestelyt. Kuvan pystysuorat palkit esittävät tunnelin mitta-antureita.



Kuva 17: Kaavakuva koetunnelista (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002)

Palokokeessa 3 käytettiin palon lähteenä polttoainealtaita, joiden paloteho oli yhteensä 20 MW. Altaita käytetään yleisesti palokokeissa, koska niillä saadaan aikaiseksi tasaisesti kehittyvä, määrätyn kokoinen ja tehoinen palo. Kokeen aikana tunnelissa ei ollut koneellista ilmanvaihtoa. Luonnollinen ilmanvaihto oli 0 – 1 m/s kohti pohjoista suuaukkoa. Kokeen 3 järjestelyt ovat kuvassa 18.



Kuva 18: Palokokeen 3 järjestelyt (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002)

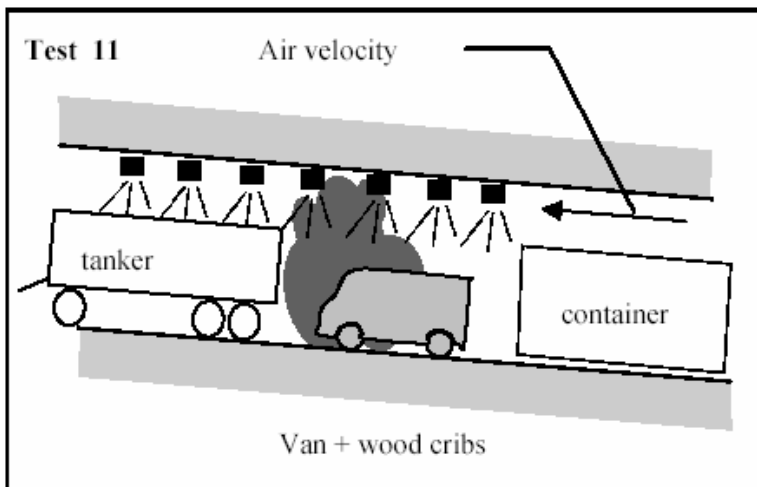
Taulukossa 5 on palokokeen 3 tulokset. Näkyvyys, joka kokeissa mitattiin 1,5 metrin korkeudelta, vaikutti selkeimmin pelastautumismahdollisuuksiin. Tuloksista näkyy, kuinka savu on edennyt tunnelin kattoa pitkin kerroksena, jolloin lähellä lattiaa on ollut yli 1,5 metriä korkea savuton kerros. Vasta kun savu on jäähtynyt kauempana palopaikasta, se on laskeutunut lähemmäksi tunnelin lattiaa. Kokeessa 3 näkyvyys oli 1,5 metrin korkeudella erittäin huono hieman yli kolme minuuttia palon syttymisen jälkeen.

Kokeen 3 perusteella palon aiheuttama kuumuus ei vaikuta palopaikalta poistumiseen. Ainoastaan lämpösäteilyllä voi olla vaikutusta, kun toimitaan lähellä palopaikkaa. Lämpösäteily oli tappavaa yhdeksän minuuttia palon syttymisen jälkeen 10 metrin päässä palopaikasta.

Taulukko 5: Palokokeen 3 tulokset (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002)

Koe 3: 20 MW allaspalo		Aika, jolloin vaikutus saavutti mittauspisteen (minuuttia)				
Raja		Mittauspisteen etäisyys palopaikasta (m)				
Vaikutus	Määrä	10	20	50	100	200
Näkyvyys	Huono	?	11,60	12,18	?	1,85
	Huono	?	19*	18,86	?	1,87
	Erittäin huono	?	21*	24,31	?	3,20
	Eksyminen	?	-	-	?	-
Lämpösäteily	Haitallinen	0,54	9,28	-	-	-
	Tappava	9,03	-	-	-	-
Kuumuus	Haitallinen	11,10	-	-	-	-
	Tappava	-	-	-	-	-
Kokonaistilanne	Haitallinen	0,54	9,28	-	?	1,85
	Tappava	9,03	-	-	?	-
HUOM: *Havainto kumottu videoanalyysin perusteella						

Kokeessa 11 poltettiin pakettiauto, jonka tavaratila oli täytetty puisilla kuormalavoilla. Auton ja lavojen yhteenlaskettu paloteho oli 20 MW. Kokeen aikana tunnelissa oli 1 m/s koneellinen ilmavaihto kohti pohjoista suuaukkoa. Kuvassa 19 on esitetty palokokeen järjestelyt.



Kuva 19: Palokokeen 11 järjestelyt (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002)

Taulukossa 6 on palokokeen 11 tulokset, joista voidaan tehdä samat johtopäätökset kuin kokeen 3 tuloksista, eli savu laskeutuu jäähtyessään lähemmäs lattiatasoa, mikä vaikeuttaa etenemistä tunnelissa. Kokeessa 11 näkyvyys oli 1,5 metrin korkeudella huono alle kolme minuuttia palon syttymisen jälkeen. Autopalossa lämpötilat ja lämpösäteilyarvot olivat pienemmät kuin kokeen 3 allaspalossa.

Taulukko 6: Palokokeen 11 tulokset (Directorate-General for Public Works and Water Management 2002)

Koe 11: Pakettiautopalo		Aika, jolloin vaikutus saavutti mittauspisteen (minuuttia)				
Raja		Mittauspisteen etäisyys palopaikasta (m)				
Vaikutus	Määrä	10	20	50	100	200
Näkyvyys	Huono	13,86	13,39	14,01	15,19	2,57
	Huono	13,89	13,44	14,03	15,25	2,65
	Erittäin huono	13,95	13,52	14,09	15,54	16,20
	Eksyminen	-	13,68	14,68	-	20,96
Lämpösäteily	Haitallinen	10,94	-	-	-	-
	Tappava	-	-	-	-	-
Kuumuus	Haitallinen	-	-	-	-	-
	Tappava	-	-	-	-	-
Kokonaistilanne	Haitallinen	10,94	13,39	14,01	15,19	2,57
	Tappava	-	13,68	14,68	-	20,96
HUOM: Sprinklerit käynnistettiin ajassa 14 minuuttia.						

2.7.3 Yhteenvedo tunnelien palokokeista

Tunneleissa tehtyjen palokokeiden perusteella tärkein henkilöturvallisuuteen liittyvä tekijä tulipalotilanteissa on savu. Suurenkin tunnelipalon kuumuus ja lämpösäteily pienenevät etäisyyden kasvaessa nopeasti, kun taas savukaasut leviävät minuuteissa jopa satojen metrien päähän palopaikalta. Ajoneuvopaloissa savu on niin tiheää, että näkyvyys savuisessa tilassa on erittäin huono ja eksymisen vaara suuri.

Savu ei itsessään ole tappavaa. Esimerkiksi Repparfjordin tunnelikokeissa savun maksimihäkäpitoisuus oli vain linja-autopalossa yli 1500 ppm, jolloin 60 minuutin altistus johtaa kuolemaan. Benelux-tunnelin kokeissa häkäpitoisuudet olivat selvästi pienemmät kuin Repparfjordin kokeissa, esimerkiksi kokeessa 11 maksimihäkäpitoisuus oli 248 ppm sadan metrin päässä palopaikasta. Kuitenkin jo pienet pitoisuudet myrkyllisiä savukaasuja vaikuttavat, kun altistumisaika on pitkä.

Taulukossa 7 on yhteenveto savukokeiden perusteella saaduista savun leviämisnopeuksista. Kokeiden perusteella savun etenemisnopeus voi olla lähes 2 m/s eli savu ohittaa kävellen etenevän ihmisen. Savun etenemisnopeuteen vaikuttavat tunnelin ilmanvaihto, kallistus, palon syttymisnopeus ja teho sekä tunnelin seinämien karkeus.

Taulukko 7: Savun eteneminen palokokeissa

Savukoe	Palo	Ilmavirtaus (m/s)	Kallistus-%	Savun etenemisnopeus (m/s)	Etäisyydellä palosta (m)
Repparfjord	Linja-auto	-0,3	~ 0,6	0,2	0 - 100
	Metrovaunu	0,5	~ 0,6	0,6	0 - 300
	Junavaunu	0,5	~ 0,6	0,4	0 - 300
Benelux	Allaspalo	0 - 1	3,3 - 4,4	1,8	0 - 200
	Pakettiauto	1	3,3 - 4,4	1,3	0 - 200

2.8 Yhteiskäyttötunneleissa tapahtuneet tulipalot

Yhteiskäyttötunneleissa on tapahtunut viimeisen 20 vuoden aikana muutamia tulipaloja. Palojen syttymissytyt ovat olleet ainakin osittain riippuvaisia ihmisen toiminnasta. Kappaleessa esitetyt tilanteet on selvitetty haastattelemalla Helsingin Energian, Helsingin kaupungin geoteknisen osaston ja Helsingin kaupungin pelastuslaitoksen henkilökuntaa.

2.8.1 Työmaavaunupalo Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelissa

1990-luvun alussa paloi rakennustyön aikaisena taukotilana käytetty matkailuvaunu. Vaunu oli pysäköity Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelissa Myllymestarintien lämmönsiirraseman vieressä olevaan tyhjään halliin. Vaunu oli hallissa ilman tunnelin omistajien lupaa. Palon syttymissytyksi on epäilty ilkivaltaa.

Palo havaittiin ainoastaan palopaikan läheisyydessä olevilta suuaukolta ja pystykui-lulta nousevasta savusta. Palon aikana tunnelissa ei ollut henkilöstöä. Kun pelastuslaitoksen miehistö saapui paikalle, palo oli jo sammunut. Miehistö joutui kuitenkin vaaraan, kun palon kuumuus oli rikkonut kalliokattoa ja lohkareita putosi katosta. Hallin kattoa ei ollut ruiskubetonoitu. Palon johdosta tunnelikattoa jouduttiin rusnaamaan palopaikan läheisyydestä. Kuvassa 20 on esitetty savun leviäminen tunnelitilassa.



Kuva 20: Myllypuron vaunupalon savun leviäminen ja palon jälkeen rusnattu alue

2.8.2 Kaapelipalo Myllypuro – Alakiventie yhteiskäyttötunnelissa

Myllypuro – Alakiventie yhteiskäyttötunnelissa paloi kaapeleita Myllypuron lämpöpumppuaseman pystykuilussa. Palon syttymissyynä pidetään keskijännitekaapelin ylikuumenemisesta, mikä on voinut johtua kaapelin liiallisesta taivuttamisesta. Palo levisi pystykuilun kaapeliarinoilla polttaen kaikki kaapelieristeet sekä vaurioittaen kaukolämpöputkieristeitä. Palon lämpötila oli niin suuri, että alumiiniset kaapeliarinat olivat osittain sulaneet. Alumiinin sulamislämpötila on 660 °C.

Kaapelipaloa ei havaittu savunilmaisimilla. Palo sammui itsestään, kun kuilun palava materiaali paloi loppuun. Palo ei levinnyt muualle tunnelitiloihin.

2.8.3 Kamppi – Erottaja – Kruununuhaka yhteiskäyttötunnelin työmaapalo

Syksyllä 2005 paloi räjäytysmattoja Kamppi – Erottaja – Kruununuhaka yhteiskäyttötunnelin pystykuilutyömaalla Katajanokalla. Mattojen syttymissyynä pidetään työmaalla tehtyjä tulitöitä. Räjäytysmatot valmistetaan käytetyistä auton renkaista ja niissä voi olla palavaa kumimateriaalia jopa yli 1000 kg. Kumin palaessa syntyy hyvin mustaa, myrkyllistä savua.

Räjäytysmatot oli sijoitettu avonaisten yhteiskäyttötunnelin pystykuilun ja Kanava-puiston kalliosuojaan johtavan tunnelin läheisyyteen. Palon savut levisivät työmaalta kalliosuojaan. Pelastusmiehistö ryhtyi tyhjentämään kalliosuojaa savusta suurpuhaltimen avulla. Puhdasta ilmaa puhallettaessa palopaikan pohjoispuolella olevasta kalliosuojan suuaukosta, savut tulivat ulos pystykuilun kohdalla olleesta tunnelista. Sieltä savut kulkeutuivat avonaisesta pystykuilusta suoraan 50 metriä maan pinnan alapuolella kulkevaan yhteiskäyttötunneliin. Savu levisi tunneliverkossa siten, että noin 2,5 kilometrin päässä palopaikalta olevan Katri Valan maanalaisen lämpöpumppulaitoksen työmaa jouduttiin tyhjentämään. Noin tunti Katajanokalla tehdyn savutuuletuksen jälkeen kolmen kilometrin päässä palopaikalta olevan Junatien suuaukon kautta tuli paljon savua ulos.

Katri Valan lämpöpumppulaitoksella työskennelleet henkilöt saatiin hälytettyä pois tunnelista eikä savu ehtinyt aiheuttaa haittaa tunnelissa työskenteleville eikä tunnelin

toiminnoille. Kuvassa 21 on esitetty Kanavapuiston kalliosuojaan johtava tunneli. Räjäytysmatoilla peitetty yhteiskäyttötunnelin pystykuilu on tunnelin edessä. Kuva on otettu noin kaksi kuukautta ennen tulipaloa.



Kuva 21: Tunneliyhteys Kanavakadun kalliosuojaan, edessä räjäytysmatoilla peitetty yhteiskäyttötunnelin pystykuilu

2.8.4 Vaaratilanne Kruunuhaka – Sörnäinen yhteiskäyttötunnelissa

Kruunuhaka – Sörnäinen yhteiskäyttötunnelin saneeraustyömaalla syttyi palo kesällä 2006. Palon syttymissyynä oli hitsauskipinä, joka sytytti kaukolämpöputken solumuovisen suojakuoren. Hitsausta suorittanut työntekijä havaitsi palonalun nopeasti ja sammutti palon ajoneuvossa olleen alkusammuttimen avulla. Tunnelissa työskentelemässä olleille ihmisille ja tunnelin rakenteille palo ei ehtinyt aiheuttaa vaaraa.

2.9 Palolta ja savulta suojautuminen

Suomen rakentamismääräyskokoelman E1: Rakennusten paloturvallisuuden mukaan rakennukset on jaettava palo-osastoihin palon ja savun leviämisen rajoittamiseksi, poistumisen turvaamiseksi, pelastus- ja sammutustöiden helpottamiseksi sekä omaisuusvahinkojen turvaamiseksi (Ympäristöministeriö 2002).

Yhteiskäyttötunneleille ei ole vaadittu palo-osastointia. Kuitenkin tunneleihin on sijoitettu paljon palavaa materiaalia, kuten putki- ja kaapelieristeitä. Palotilanteissa osastoimattomista pystykuiluista ja ajotunneleista poistuminen voi olla vaikeaa, jopa mahdotonta kuumen savun nopeasta leviämisestä johtuen.

2.9.1 Poistumisetäisyydet maanalaisissa tiloissa

Maanalaisissa yleisötiloissa, kuten pysäköinti- ja liikuntahalleissa sovelletaan E1:n poistumisetäisyysohjeita, joiden mukaan kulkureitin pituus lähimpään uloskäytävään saa olla korkeintaan 45 metriä, jos rakennuksesta on useita palosuojattuja uloskäytä-

viä (Ympäristöministeriö 2002). Tämän on katsottu olevan maksimietäisyys, minkä ihminen pystyy etenemään täysin savun täyttämässä tilassa altistumatta hengenvaarallisesti savukaasuille.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2004/54/EY Euroopan laajuisen tieverkon tunnelien turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista perusteella kahden varaueloskäynnin välinen etäisyys saa olla enintään 500 metriä, jos tunnelin liikenne on yli 2000 ajoneuvoa päivässä kaistaa kohti.

Suomen rakentamismääräyskokoelman E2: tuotanto- ja varastorakennusten paloturvallisuuden mukaan yhteiskäyttötunnelit voidaan olettaa olevan paloturvallisuusluokkaa 1, johon kuuluvat tilat, joihin liittyy vähäinen tai kohtuullinen palovaara. Yhteiskäyttötunneleiden suojaustaso on alin eli 1 (Ympäristöministeriö 2005). Tilan, jonka paloturvallisuusluokka ja suojaustaso ovat 1, suurin sallittu palo-osaston koko on 6000 m². Tämä tarkoittaa 6 metriä leveässä tunnelissa palo-osaston rajaa 1000 metrin välein. Tällöin pelastautumismatka lähimmälle uloskäytävälle olisi korkeintaan 500 metriä.

2.9.2 Palo-osastoivat rakenteet

E2:n perusteella osastoivat rakenteet ovat luokkaa EI-M 90, eli niiden on eristettävä paloa ja savua sekä oltava palotilanteissa iskunkestäviä 90 minuutin ajan (Ympäristöministeriö 2005).

Osastoivien ovien palonkestävyys on vähintään puolet ympäröivän rakenteen palonkestävyyssajasta. Ovien on oltava itsestään sulkeutuvia tai salpautuvia. Jos ovia pidetään auki normaalikäytössä, ne on varustettava laittein, jotka sulkevat ne palon syttyessä. Osastoivat ovet on aina saatava auki ilman avainta.

Osastoivat rakenteet on tehtävä materiaaleista, jotka eivät myötävaikuta palon kehittymistä. Yhteiskäyttötunneleissa on lisäksi otettava huomioon erityisolosuhteet kuten vähäinen normaaliajan käyttöaste, kosteus ja ilmastoinnin toiminta.

Yhteiskäyttötunneleissa lämmönsiirrin- ja pumppuasemien valvomotilat on palo-osastoitu. Tiloissa on myös automaattisia palonsammutusjärjestelmiä (Helsingin Energia 2005b).

2.9.3 Uloskäytävät

E1:n mukaan uloskäytävä on poistumisalueelta suoraan ulos johtava ovi taikka rakennuksessa tai sen ulkopuolella oleva tila, jonka kautta turvallinen poistuminen on palon sattuessa mahdollista maan pinnalle tai muulle turvalliselle paikalle. Uloskäytävän leveyden on oltava 1200 mm ja vapaan korkeuden 2100 mm (Ympäristöministeriö 2002).

Yhteiskäyttötunneleissa uloskäytäviä ovat ajotunnelit ja pystykuilut, jotka on osastoitava omiksi palo-osastoikseen. Jos pelastautumismatka pystykuilulle tai ajotunnelille on liian suuri poistumisen turvaamiseksi, voidaan päätunnelista osastoida osuus uloskäytäväksi, josta on yhteys toiseen uloskäytävään.

2.9.4 Käyttötapaosastointi ja palokatkot

Käyttötapaosastoinniksi kutsutaan menetelmää, missä käyttötavaltaan tai palokuormaltaan poikkeavat tilat muodostavat eri palo-osastoja (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto 2004). Yhteiskäyttötunneleissa käyttötapaosastointia on käytetty kaapeliarinoiden

osastoinnissa. Palo leviää tehokkaasti päällekkäisissä kaapeliarinoissa ja putkieristeissä. Yksinkertaisimmillaan kaapelipalojen leviäminen estetään sijoittamalla palon kestävä levy kaapeleiden alle, jolloin palavat pisarat eivät levitä paloa. Kaapelit voidaan sijoittaa myös palon kestäviin suojalaatikoihin, jolloin ne on osastoitu muusta tunnelitilasta, kuten kuvan 22 yhteiskäyttötunnelissa. Tällöin ongelmaksi tulee kuitenkin kaapeleiden mahdollinen kuumeneminen.



Kuva 22: Palo-osastoitu kaapeliarina oikealla ja palokatkona toimiva putkikannake vasemmalla (Jarkko Nyman, geotekninen osasto)

Kuvassa 22 on myös kaukolämpöputken kannake, joka toimii palokatkona. Palokatkoksi kutsutaan osastoivan rakenteen läpi kulkevien asennusten tiivistyksiä. Palokatkolta edellytetään samaa paloluokkaa kuin sitä ympäröivältä osastoivalta rakennusosalta (Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry 2004).

Palo-osastoiduissa rakenteissa palokatkon on estettävä palon eteneminen putki- ja kaapelieristeissä, sekä savun, kaasujen ja sammutusaineiden pääsy osastoivan rakenteen lävitse. Palokatkojen tulee olla helppoja asentaa. Lisäksi täytyy ottaa huomioon kaapeleiden ja putkien lisääminen myöhemmin. Palokatko ei saa aiheuttaa kaapeleiden kuumenemista läpivienneissä.

Yhteiskäyttötunneleissa putkikannakkeet eivät ole varsinaisesti palokatkoja, koska ne eivät estä savun leviämistä tunnelitilassa, mutta ne pysäyttävät putkieristeen palon. Kaapelieristeille ei ole rakennettu erillisiä palokatkoja.

2.9.5 Savuosastointi

Savuosastoinnin tarkoitus on rajoittaa savun leviäminen rakennuksessa. Se ei estä palon leviämistä savuosastosta toiseen. Savuosastointia voidaan käyttää rakennuksissa, missä palon leviäminen on estetty muilla kuin osastoivilla menetelmillä, kuten suurissa hallitiloissa, missä palavia materiaaleja on vain tietyillä alueilla.

Toisaalta savuastointi voi olla myös käyttötapaastointia. Savun levittämistä myrkyllisistä ja syövyttävistä aineista on haittaa esim. sähkö- ja tietoliikennelaitteille. Osastoimalla pelkästään nämä laitteet muusta tilasta vähennetään huomattavasti savusta aiheutuvia vahinkoja.

2.9.6 Turvapaikat

Tunnelitiloissa, mistä ei ole mahdollisuutta järjestää poistumista uloskäytävien kautta, on henkilöiden pelastautuminen järjestettävä turvapaikoilla. Tällaisia tiloja voi olla esimerkiksi kaivoksissa, pitkissä yksiputkisissa liikennetunneleissa ja maanalaisten tilojen umpiperissä.

Turvapaikat ovat tunnelista eristettyjä tiloja, jotka suojaavat siellä olevia ihmisiä palolta ja savulta siihen asti, kunnes on turvallista poistua tunnelitiloista (Ranzo & Domenichini 1995). Turvapaikassa on oltava itsenäinen palosuojattu ilmanvaihto- ja valaistusjärjestelmä sekä viestiyhteydet, joilla voidaan tehdä vaaratilanneilmoitus. Lisäksi tiloissa käytetään ylipaineistusta ja tuplapalo-ovia, ettei savua joudu tunnelista tilaan ihmisten mukana.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2004/54/EY Euroopan laajuisen tieverkon tunnelien turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista perusteella liikennetunneleihin ei saa rakentaa turvapaikkoja, joista ei pääse ulos johtavalle poistumistielle. Myös muissa maanalaisissa tiloissa on otettava huomioon, että kaikissa mahdollisissa vaaratilanteissa turvapaikoista on pystyttävä pelastamaan sinne jääneet ihmiset.

2.9.7 Vaaratilannehälytykset

Vaaratilannehälytysjärjestelmät vaihtelevat yhteiskäyttötunneleissa sen mukaan, milloin tunnelit on rakennettu. Tunneleiden pumppuasemilla ja risteyksissä on savunilmaisimia, jotka antavat savusta hälytyksen kaukovalvomoon. Pumppuasemien valvomo- ja sähkötiloissa on automaattisia CO₂- ja halonipalonsammutusjärjestelmiä. Vaaratilannehälyttimet ovat automaattisia. Lisäksi niitä voidaan käyttää kaukovalvomoista.

Yhteiskäyttötunneleihin on asennettu automaattisia hälytyskaiuttimia, jotka antavat hälytysääntä tai joiden kautta voidaan kaukovalvomoista antaa vaaratilanneilmoitus ja toimintaohjeita. Tunneleissa on myös vilkkuvia hälytysvaloja (Helsingin Energia 1997).

Tärkein henkilöturvallisuutta parantanut järjestelmä yhteiskäyttötunneleissa on radiopuhelinverkko, joka toimii jo lähes kaikissa yhteiskäyttötunneleissa. Kaikilla tunneleissa liikkuvilla ryhmillä on oltava mukana ainakin yksi radiopuhelin. Puhelinverkon välityksellä voidaan olla yhteydessä tunnelissa liikkujien, valvomojen ja hätäkeskuksen välillä. Lisäksi radiopuhelinverkkoon voidaan antaa yleinen vaaratilannehälytys ja toimintaohjeita tunnelista poistuville.

2.9.8 Henkilökohtaiset pelastautumisvälineet

Henkilökohtaisia pelastautumisvälineitä käytetään tunnelitiloissa, joissa ei ole mahdollista rakentaa riittävää palo- tai savuastointia. Tällöin voi olla vaara, että joudutaan liikkumaan pitkiäkin aikoja tiloissa, joissa olosuhteet ovat hengenvaaralliset. Henkilökohtaisten pelastautumisvälineiden valinnassa tärkeimmät kriteerit ovat, minälaiset olosuhteet tunnelissa ovat ja kuinka kauan vie aikaa poistua tunnelitiloista.

Laitteet on valmistettu itsesammuvista materiaaleista ja ne kestävät lyhyitä aikoja hyvinkin korkeita lämpötiloja.

Savuhuppu suodattaa tunnelitilan ilmasta myrkyllisiä savukaasuja, kuten häkää ja vetykloridia, ja antaa näin lisää aikaa palopaikalta poistumiseen. Savuhupun käyttöaika on vähintään 15 minuuttia riippuen hengitettävän ilman määrästä ja myrkyllisyydestä. Savuhuput ovat kevyitä, helppokäyttöisiä ja mahtuvat pieneen säilytyskoteloon, jota voi pitää esimerkiksi vyöllä. Rajoituksena hupun käytössä on se, että hengitettävässä ilmassa on oltava riittävästi happea. Esimerkki savuhupusta on kuvassa 23.



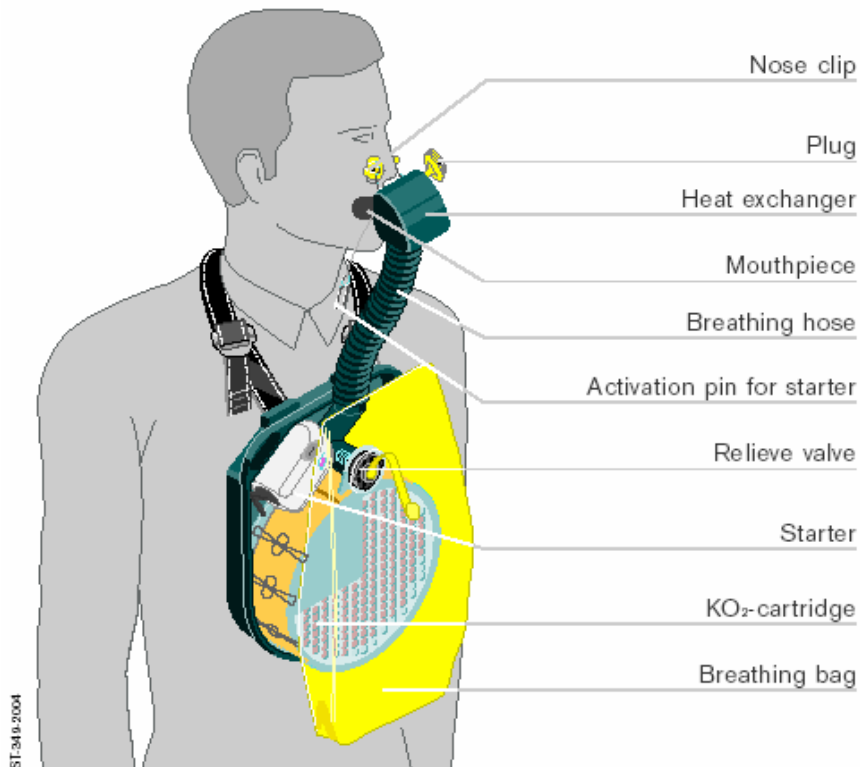
Kuva 23: Savuhuppu (Dräger – tuotteiden esite)

Kuvassa 24 on paineilmalla toimiva pelastautumislaitte, jonka toiminta-aika on noin 10 – 15 minuuttia. Laitteen etu savuhuppuun verrattuna on se, että se toimii myös happeottomissa olosuhteissa. Laitteen mukana kuljettaminen on kuitenkin vaikeampaa, koska se painaa lähes kymmenen kertaa enemmän kuin savuhuppu. Paineilmalaitteen käyttö on tehty kuitenkin yhtä helpoksi kuin savuhupun.



Kuva 24: Paineilmalla toimiva pelastautumislaitte (Dräger – tuotteiden esite)

Savuhuppua ja paineilmapelastautumislaitetta pitkäaikaisempaan suojaan on kehitetty hengityslaitte, jossa hengitettävä ilma regeneroidaan uloshengitysilmastä. Kaliumdioksidin reagoimissa uloshengitysilmassa olevaan hiilidioksidiin syntyy hengityskelpoista ilmaa. Tästä syystä laitetta voidaan käyttää täysin hapettomissa olosuhteissa. Laitteen toiminta-aika on tyypistä riippuen 25 – 60 minuuttia. Kuvassa 25 on esimerkki laitteesta. Laitetta on saatavana myös yhdistettynä suojanaamariin, jolloin se suojaa paremmin kuumuudelta ja savukaasulta. Painoa laitteella on noin 3 kg. Laitteen ongelmana on, että sen käyttö on vaikeampaa kuin savuhupun tai paineilmallä toimivan pelastautumislaitteen, joten laitteeseen täytyy antaa käyttökoulutus.



Kuva 25: Uloshengitettävää ilmaa kierrättävä pelastautumislaitte (Dräger – tuotteiden esite)

3. TULVAT YHTEISKÄYTTÖTUNNELEISSA

3.1 Yleistä

Yhteiskäyttötunneleiden tulvariskejä ovat maanpäällisten vesistöjen tulvat, eli Helsingissä meriveden ja Vantaanjoen tulviminen, maanpäälliset putkivuodot ja rankkasateet, tunneleiden putkivuodot sekä tunneleihin vuotava pohjavesi.

Maanpäälliset tulvat sekä putkivuodot niin maan päällä kuin tunnelissa voivat täyttää tunneliverkon vedellä jopa kilometrien matkalta. Lisäksi tulvat voivat pahimmillaan levitä yhteiskäyttötunneleiden kautta muihin maanalaisiin tiloihin kuten väestönsuojiiin ja metrotunneliin.

Henkilöturvallisuuden kannalta kaikkein vaarallisin tulvatilanne on kaukolämpövuoto, missä kuuma kaukolämpövesi höyrystyy. Vesihöyry on tappavan kuumaa ja syrjäyttää tunnelitilan ilmaa.

Kappaleessa lasketut vuoto- ja tulvamäärät ovat arvioita. Tulviin ja vuotoihin vaikuttavia tekijöitä on niin paljon, että niiden esittäminen matemaattisilla menetelmillä on vaikeata. Esimerkiksi maanpäällisten tulvien vaikutuksen tunneleihin riippuvat suuaukkorakenteista ja maanpinnan muodoista, putkivuodot putkiston pituudesta, materiaaleista, haaroittumisesta ja supistuksista sekä veden valuminen tunnelitilassa tunnelin kallistuksista, nousuista, risteyksistä ja kaarroksista. Kappaleessa esitetyillä tulva-arvioilla on kuitenkin pyritty selvittämään, kuinka suuren mittakaavan riskeistä tunnelitulvissa on kyse.

3.2 Syyt tunneleiden tulvimiseen

3.2.1 Maanpäällisten vesistöjen tulvat

Maa- ja metsätalousministeriön ympäristöoppaan ”Ylimmät vedenkorkeudet ja sortumariskit ranta-alueille rakennettaessa – Suositus alimmasta rakentamiskorkeudesta” mukaan keskimäärin kerran seuraavan 200 vuoden aikana saavutettava meriveden korkeus Helsingissä on +2,3 metriä N60 – korkeusjärjestelmässä. Tähän on sisällytetty ilmaston lämpenemisestä mahdollisesti johtuva noin 1,0 metrin valtamerien vedenpinnan nousu. Kun tulvakorkeuteen +2,3 metriä lisätään vielä 0,3 metrin aaltoiluvara, maa- ja metsätalousministeriö suosittelee alimmaksi rakentamiskorkeudeksi merenranta-alueilla +2,6 metriä (Ollila et al. 2002).

Suurin osa yhteiskäyttötunneleiden suuaukoista on rakennettu siten, että suuaukon ovi on selkeästi ympäröivää maanpintaa alempana, jolloin oven ulkopuolella olevan ajoluiskan yläpää on tunnelin suuaukon tulvakynnys. Kuvassa 26 on esimerkki suuaukosta.



Kuva 26: Yhteiskäyttötunnelin suuaukko

Veden virtausta tulvakynnyksen yli voidaan arvioida Polenin kaavan avulla (Mustonen et al. 1982)

$$Q_t = \frac{2}{3} \cdot C_D \cdot b_t \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Kaava 5})$$

missä Q_t = tulvavirtaama (m^3/s)
 C_b = purkautumiskerroin
 b_t = tulvakynnyksen leveys (m)
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 H = tulvakorkeus kynnyksen harjasta (m)

Purkautumiskerroin C_b vaihtelee 0,49 ja 0,79 välillä riippuen tulvakynnyksen muodosta. Yhteiskäyttötunneliverkon alimman suuaukon tulvakynnys on korkeudella +1,8 metriä. Jos tulva nousee tasolle +2,3 metriä, kaavan 5 perusteella tulvavirtaama Q_t on purkautumiskertoimesta riippuen 4,1 m^3/s ja 6,6 m^3/s välillä eli noin 15000 - 23000 m^3/h , kun ajoluiskan yläpään leveys on kahdeksan metriä.

Vuonna 1956 olleen Vantaanjoen tulvan aikana vesi nousi Pukinmäen ja Oulunkylän alueella yli kaksi metriä senhetkisestä normaalitasostaan. Vantaanjoen tulva-alueille on rakennettu ainoastaan yksi yhteiskäyttötunneliin johtava ilmastointiputki Patolan alueelle sekä tunneleiden vuotovesien poistoputket Patolaan ja Vantaankoskelle, joten suurta riskiä Vantaanjoen tulvimisesta ei yhteiskäyttötunneleille ole.

3.2.2 Rankkasateista tai maanpäällisistä putkivuodoista aiheutuvat tulvat

Maanpäällisten putkivuotojen tai rankkasateiden vaikutusta tunneleihin on vaikea arvioida. Kuinka paljon vettä valuu tunnelin suuaukolle tai kuilulle, riippuu täysin ympäristön maanpinnan muodoista eli siitä, kuinka suurelta alueelta vesi kerääntyy suuaukolle.

Ajoluiskien salaojitukset on tehty siten, että luiskalle valunut vesi valuu yleensä suoraan tunnelin salaojajärjestelmään. Pystykuilut on rakennettu siten, ettei pintavesiä pääse suuria määriä valumaan tunneleihin. Ajotunneleissa valumavesien aiheuttama maa-ainesten kulkeutuminen on pyritty vähentämään betonoimalla tai asfaltoimalla ajotunneleiden lattiaita.

Tiiviissä kaupunkirakentamisessa lähes jokaisen kadun alla kulkee vesijohto-, viemäri- ja kaukolämpöputkia. Maaperässä kulkevat pintaverkon putket joutuvat myös suuremman rasituksen alle kuin tunneliputket. Maanpäällinen liikenne, rakentaminen ja kaivutyöt muuttavat jatkuvasti maaperän kantavuutta, tiiviyyttä ja routimisominaisuuksia. Vesijohtoverkossa havaitaan vuosittain 150 - 200 vuotoa (Helsingin Vesi 2006).

Suurin Suomessa mitattu vuorokauden sademäärä, 198 mm, mitattiin Espoon Lahnuksessa 21.7.1944 (Ilmatieteenlaitos 2006). Sademäärä tarkoittaa 1 m² pinta-alaan astiaan sataneen veden korkeutta, eli 21.7.1944 198 litraa vettä on satanut 1 m² alueelle. Ajotunnelin luiskalle 198 mm sade tarkoittaa 24 m³ vesimäärää, kun luiskan pituus on 20 metriä ja leveys 6 metriä. Toisaalta joidenkin suuaukkojen ympärillä maa viettää siten, että vesi valuu ajoluiskalle suurilta alueilta. Esimerkiksi Mäntymäen ajotunnelin suuaukon ympärillä on karkeasti arvioiden 4500 m² alue, josta vedet valuvat suuaukolle. 21.7.1944 suuruisen rankkasateen sattuessa suuaukolle voi valua lähes 900 m³ vettä. Mäntymäen ajotunnelissa on ollut rankkasadevaurioita.

3.2.3 Vesijohtovuodot tunneleissa

Vesijohtovuotojen syitä ovat putken huono kunto, äkilliset paineiskut esimerkiksi venttiilin liian nopeasta sulkemisesta johtuen, kannakkeen tai kiinnityksen pettäminen, ajoneuvolla putkeen törmäily, tunnelin sortuminen sekä automaatio- tai käyttöviat.

Helsingin vesijohtoverkon pituus on yli 1100 kilometriä (Helsingin Vesi 2004). Osa vesisäiliöiltä kulutuskeskuksiin johtavista päävesijohdoista on sijoitettu kalliotunneleihin. Päävesijohdot ovat läpimitaltaan 600 – 1000 mm.

Helsingissä on käytössä neljä vesisäiliötä, joiden yhteistilavuus on 70000 m³. Vesisäiliöiden vedenpinnan tasot, mitkä ovat +60 ja +88.5 metrin välillä, määräävät vesijohtoverkon painetason. Yhteiskäyttötunneliverkko kulkee keskimäärin noin -30 ja -10 metrin syvyydessä meren pinnasta verkon syvimmän pisteen ollessa tasolla -77 m. Hydrostaattinen paine p (Pa) lasketaan kaavalla

$$p = h\rho g \quad \text{(Kaava 6)}$$

missä h = syvyys nesteen pinnasta (m)
 ρ = nesteen tiheys = 999,699 kg/m³ (lämpötila 10 °C)
 g = 9,81 m/s²

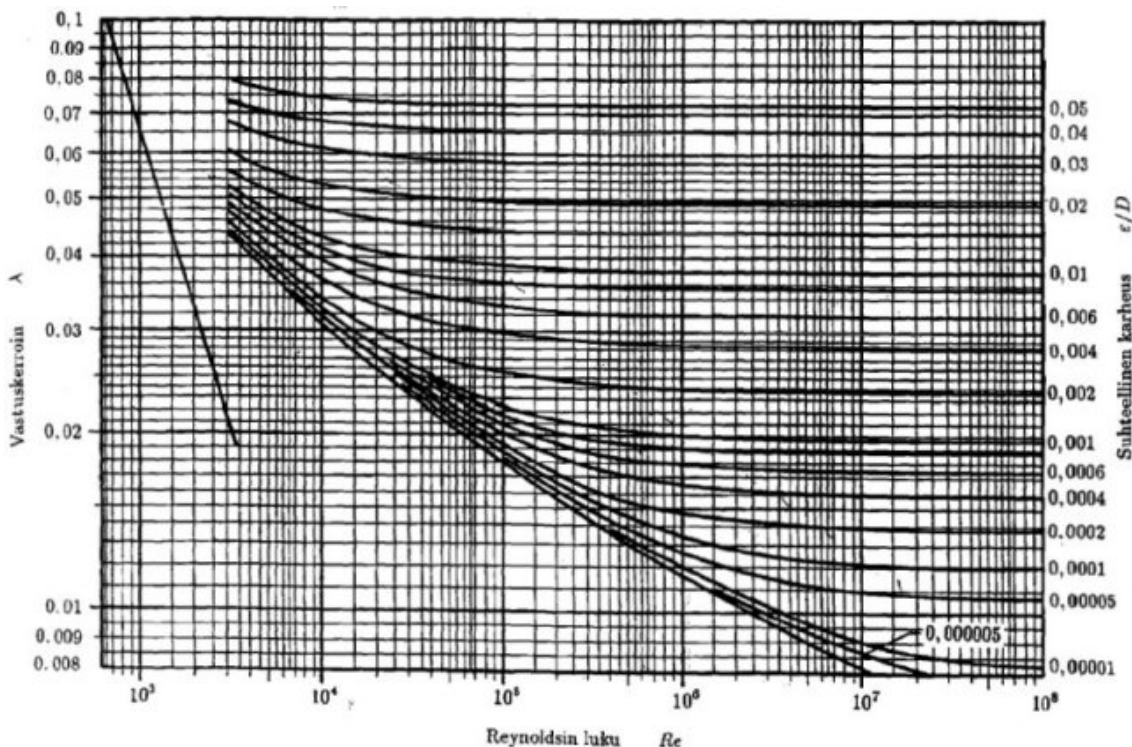
Kaavan 6 perusteella saadaan verkoston keskipaineeksi 0,9 MPa vedenpinnan ollessa +73 m ja tunnelitason -20 m. Teoreettiseksi maksimipaineeksi saadaan 1,6 MPa, kun vedenpinta on +88 m ja tunnelitaso -77 m.

Veden virtausnopeus lasketaan kaavalla (Kaskiala et al. 2005)

$$p - \frac{\lambda l \rho w^2}{2D} = \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (\text{Kaava 7})$$

missä λ = putkivastuskerroin
 l = putken pituus (m)
 w = putkivirtauksen nopeus (m/s)
 D = putken halkaisija (m)

Putkivastuskerroin λ saadaan kuvan 27 Moodyn kaaviosta Reynoldsin luvun Re ja putken karkeusluvun ε / D avulla.



Kuva 27: Moodyn kaavio putkivastuskertoimen laskemiseksi (Kaskiala et al. 2005)

Reynoldsin luku lasketaan kaavan 8 perusteella

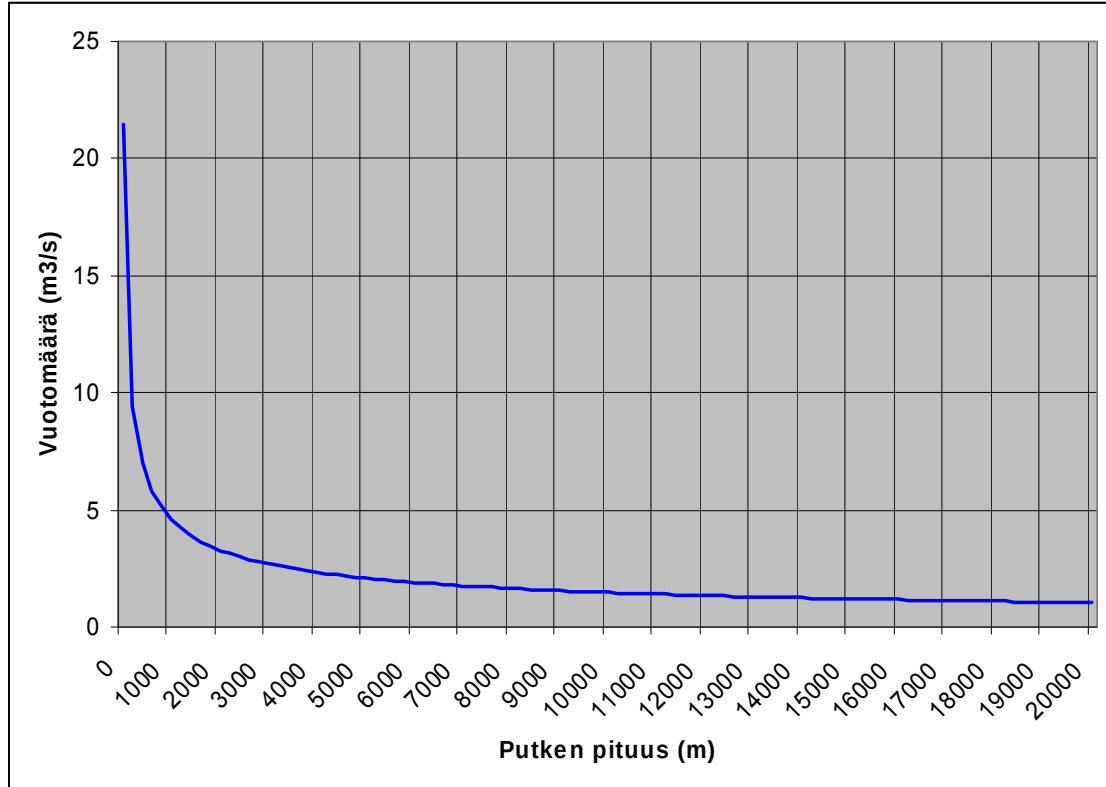
$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \quad (\text{Kaava 8})$$

missä μ = veden viskositeetti (kg/ms)

Kaavan 8 perusteella saadaan Reynoldsin luvuksi n. 1200000, kun normaalivirtausnopeus w on 2 m/s, veden viskositeetti μ 10 °C lämpötilassa $1,3 \cdot 10^{-3}$ kg/ms ja tiheys ρ 999,699 kg/m³ (Perry et al. 1997). Kun valurautaputken karkeus ε on 0,3 mm (Hammill 2001) ja putken halkaisija 800 mm, putkivastuskerroin on 0,0168.

Jos putken pituus on 1 kilometri ja korkeusero vuotokohdan sekä vesitornin pinnan välillä on 93 metriä, kokonaan katkenneesta 800 mm vesijohtoputkesta vuotaa vettä kaavan 7 perusteella 4,6 m³/s.

Putkivuodon suuruuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten putken materiaali sekä putkessa olevat taitokset, supistukset ja laajennukset. Kokonaisvuotomäärää lisää se, että vuodon tapahtuessa molemmista katkenneen putken päistä vuotaa vettä. Suurin vaikutus on putken pituudella. Kuvassa 28 on esitetty 800 mm valurautaputken pituuden vaikutus kaavan 7 perusteella laskettuun rikkoutumiskohdan vuotomäärään, kun putkessa olevan vedenpaine on vakio.



Kuva 28: Putken pituuden vaikutus rikkoutumiskohdan vuotomäärään

3.2.4 Kaukolämpö- tai kaukojäähdytysvuodot tunneleissa

Helsingin kaukolämpöverkon pituus on yli 1200 kilometriä (Helsingin Energia 2006). Yhteiskäyttötunnelit muodostavat kaukolämmön jakelun runkoverkon, jossa putket ovat halkaisijaltaan 400 – 1000 mm. Kaukolämpöverkossa kiertävän veden lämpötila on kiinteistöihin menevällä osuudella 75 °C ja 125 °C välillä ja palaavalla osuudella 45 °C ja 65 °C välillä. Maksimipaine Helsingin pääverkossa on 1,0 MPa ja Myllypuron verkossa 1,3 MPa.

Kaukojäähdytyksen jakelu Helsingin keskustan ja Ruoholahden alueen kiinteistöille aloitettiin kesällä 2006. Täten myös kaukojäähdytysputkia on keskustan ja Ruoholahden alueen yhteiskäyttötunneleissa. Verkon laajennusta on lisäksi suunniteltu mm. Pasilan alueelle. Kaukojäähdytysveden lämpötila on kiinteistöihin menevällä osuudella 8 °C ja palaavalla osuudella 16 °C. Kaukojäähdytysverkon paine tunneleissa on noin 1,0 MPa.

Kaukolämpö- ja kaukojäähdytysvuotojen syyt ovat samat kuin vesijohtovuotojen, eli putken kunto, paineiskut, putken rikkoutuminen törmäyksen tai sortuman johdosta sekä automaatio- ja käyttöviat.

Kaukolämpö- ja kaukojäähdytysvuotojen vesimäärät lasketaan kaavojen 7 ja 8 avulla. Teräsputken karkeus ε on 0,03 mm (Hamill 2001). Veden viskositeetti μ 10 °C lämpötilassa on $1,3 \cdot 10^{-3}$ kg/ms ja 100 °C lämpötilassa $0,28 \cdot 10^{-3}$ kg/ms. Veden tiheys ρ 10 °C lämpötilassa on 999,699 kg/m³ ja 100 °C lämpötilassa 958,365 kg/m³ (Perry et al. 1997). Näiden perusteella pääverkossa 1 kilometrin pituisen 800 mm kaukolämpöputken katketessa vuotomäärä on 6,1 m³/s ja vastaavan kaukojäähdytysputken katketessa 5,7 m³/s, eli vuotomäärään vaikuttaa myös virtaavan veden lämpötila.

3.2.5 Vuotovesistä johtuvat tulvat

Pohjavesivuotorajana yhteiskäyttötunneleissa on pidetty viittä litraa minuutissa sataa tunnelimetriä kohti (Helsingin Energia 2005a). Tunnelin vuotovedet kerätään tunneliverkon alimmissa pisteissä oleviin altaisiin, joista ne pumpataan maanpäälliseen viemäriverkkoon.

Vuotovesialtaita on yhteiskäyttötunneleissa harvassa, yhteen altaaseen voidaan kerätä vuotovedet neljän kilometrin matkalta. Täten vuotovesialtaisiin virtaa pohjavettä jopa 12 m³ tunnissa. Jos vuotoveden pumppausjärjestelmä vioittuu, tunneliin voi kerätyä vettä siten, että liikkuminen tunneleissa estyy.

3.2.6 Viemäritunnelitulvariskit yhteiskäyttötunneleille

Koska Helsingin alueella maanpäällinen tila on rajallinen, on useita eri tunneleita jouduttu rakentamaan samojen ajotunneleiden kautta. Tästä syystä yhteiskäyttötunneleista on useita maanalaisia yhteyksiä viemäritunneleihin. Viemäritunneleita on Helsingin alueella noin 70 kilometriä.

Maanpäällisen tulvan vaikutusta viemäritunneleiden vedenpaineeseen on hyvin vaikea hallita, koska Helsingin keskustan alueella on käytössä ns. sekaviemäröintijärjestelmä, missä sekä yhdyskuntien jätevedet että sadevesiviemäriin valuvat vedet johdetaan samaan viemärijärjestelmään. Jos maanpäällisen tulvan vettä valuu sadevesiviemäriin, voi viemärijärjestelmän painetaso nousta tulvan tasolle. Vaikka yhteiskäyttö- ja viemäritunneleiden väliset yhteydet on tulvaosastoitu paineseinillä ja – ovilla, viemärivettä on tulvinut yhteiskäyttötunneleihin johtuen seinien asennus- tai venttiilivioista.

3.3 Tulvan eteneminen tunnelitiloissa

3.3.1 Kylmän veden eteneminen tunnelissa

Veden etenemistä tunnelitilassa voidaan arvioida siten, että oletetaan yhteiskäyttötunnelin olevan avokanaali, jota rajoittaa alhaalta sorapohja ja sivuilta kaukolämpö- tai vesijohtoputket.

Veden virtausta avokanaalissa kuvataan Manningin yhtälön avulla (Hamill 2001)

$$Q = \left(\frac{A}{n} \right) R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Kaava 9})$$

missä Q = virtaama (m³/s)
 A = virran poikkipinta-ala (m²)
 n = pinnan karkeus (s/m^{1/3})

S_0 = pohjan kallistus

Hydraulinen säde R (m) lasketaan kaavalla

$$R = \frac{A}{P} \quad (\text{Kaava 10})$$

missä P (m) on kanaalin poikkipinta-alasta mitattu veden ja seinämien kontaktipinnan yhteispituus. Suorakulmaisilla kanaaleilla, jossa vesipatjan korkeus on D ja kanaalin leveys B , P on $B + 2D$. Veden virtausnopeus V saadaan jakamalla virtaama Q poikkipinta-alalla A .

Pintojen karkeus n voi vaihdella 0,030 ja 0,080 s/m^{1/3} välillä riippuen pohjasorasta ja tunnelin pinnoista. Oletetaan, että virtaama Q on vesijohtovuodon määrä eli 4,6 m³/s ja virran leveys B 3,0 m. Kun pinnan karkeus n on 0,03 s/m^{1/3} ja kallistus 1/50, virtaavan vesipatjan korkeudeksi D saadaan kaavojen 9 ja 10 perusteella 0,58 m ja veden virtausnopeudeksi V 2,6 m/s. Vastaavasti kallistuksella 1/100 vesipatjan korkeus D on 0,74 m ja virtausnopeus V 2,1 m/s sekä kallistuksella 1/200 D on 0,94 m ja V 1,6 m/s.

Pinnan karkeuden n ollessa 0,080 s/m^{1/3} kallistuksella 1/50 virtaavan vesipatjan korkeus D on 1,2 m ja veden virtausnopeus V 1,3 m/s, kallistuksella 1/100 D on 1,5 m ja V 1,0 m/s sekä kallistuksella 1/200 D on 1,9 m ja V 0,79 m/s.

Suuren putkivuodon tapahtuessa veden virtausnopeus ja vesipatjan korkeus tunnelissa ovat niin suuria, että virta ihmisen mukanaan. Virtaavan veden henkilöturvallisuusriskiä lisää vielä se, että veden mukana kulkeutuu irtainta materiaalia, kuten tunnelin pohjasoraa, joka voi vahingoittaa ihmistä. Tunnelin pintojen karkeudella on suuri merkitys veden virtauksiin. Vielä suurempi merkitys on tunnelin profiililla, eli kallistuksen muutoksilla, risteyksillä, mutkilla ja pumppaamohalleilla, joiden kohtiin veden mukana kulkeutuva materiaali voi patoutua ja aiheuttaa muutoksia veden virtausnopeudessa ja vesipatjan korkeudessa.

3.3.2 Kaukolämpövuodon vesihöyryn muodostuminen ja eteneminen tunnelissa

100 °C veden tiheys on normaalipaineessa 956,365 kg/m³. Vastaavasti samoissa olosuhteissa vesihöyryn tiheys on 0,598 kg/m³ (Perry et al. 1997). Tämän perusteella yhdestä litrasta 100 °C vettä muodostuu noin 1,6 m³ vesihöyryä.

Koska kaukolämpöverkon paine on suuri ja lämpötila korkea, voidaan olettaa, että pienissä vuotoissa kaikki vesi höyrystyy heti vuotokohdassa. Jos ei oteta huomioon tunnelin jäähdyttävien pintojen vaikutusta muodostuneen vesihöyryn tiivistymiseen takaisin vedeksi, voidaan vesihöyryn olettaa etenevän tunnelitilassa sitä mukaa, kun uutta höyryä muodostuu vuotokohdassa. Kriittinen nopeus vesihöyryn etenemiselle on ihmisen kävelynopeus 1,4 m/s. Jos tunnelin vapaa poikkipinta-ala on 30 m², kriittinen molempiin suuntiin etenevän vesihöyryn muodostumismäärä 84 m³/s, joka vastaa 53 litraa sekunnissa vuotavan veden määrää, eli suhteellisen pienikin kaukolämpövuoto tuottaa vesihöyryä niin paljon, että höyry etenee tunnelissa kävelevää ihmistä nopeammin.

Yli 50 °C vesihöyry on ihmiselle hengenvaarallinen, koska höyry vähentää lämmön haihtumista iholta sekä tiivistyy keuhkoihin hengitettäessä. Lisäksi vesihöyry syrjäyttää tunnelitilan ilman, jolloin suodatukseen perustuvasta hengityssuojaimestakaan ei

ole hyötyä vaan tarvitaan joko paineilmalla toimivia tai ulos hengitettävää ilmaa kiertäviä pelastautumislaitteita.

3.4 Yhteiskäyttötunneleissa tapahtuneet tulvat

Yhteiskäyttötunneleissa on ollut viimeisen 20 vuoden aikana muutamia tulvatilanteita. Kappaleessa esitetyt tulvat on selvitetty haastatteleamalla Helsingin Energian, Helsingin Veden, Helsingin kaupungin geoteknisen osaston ja Helsingin kaupungin pelastuslaitoksen henkilökuntaa.

3.4.1 Vesijohtovuoto Pasilan vesijohtotunneleissa

1980-luvun puolivälissä tapahtui tähän mennessä suurin tunnelitulva, kun Pasilan alueen vesijohtotunnelissa vesisäiliöltä tulevasta vesijohtoputkesta irtosi 400 mm haaraputki. Vesisäiliöltä tulevassa putkessa ei ollut kauko-ohjattua sulkua. Vuodon havaitsemiseen sekä vuotokohdan etsimiseen ja sulkemiseen meni aikaa viisi tuntia. Tässä ajassa arvoilta 50 000 m³ vettä valui Ilmalan vesijohtotunneliverkkoon, eli vuotomäärä on ollut keskimäärin 2,7 m³/s.

Ilmalan vesisäiliöiden yhteistilavuus on 41500 m³. Se, miksi tulvamäärä oli säiliöiden tilavuutta suurempi, johtui siitä, että samalla kun säiliöiden veden taso laski vuodosta johtuen, automaattipumput pumppasivat vettä Pitkäkosken vedenpuhdistamolta vesijohtoverkkoon painetason ylläpitämiseksi.

Pasilan vesijohtotunneleiden alimmassa pisteessä oli tulvavedenpoistoluukku, jonka piti johtaa vesi maastoon. Luukku tukkeutui kuitenkin nopeasti, koska tulva toi mukanaan tunnelin pohjalla ollutta soraa. Tunnelin seuraavaksi alin veden purkautumisaukko oli Pasilan vesijohtotunneleiden ja Salmisaari – Kamppi – Ruskeasuo yhteiskäyttötunnelin avoin risteys, jonka kautta vesi pääsi valumaan lähes Kamppiin asti. Noin kolmen kilometrin osuus Salmisaari – Kamppi – Ruskeasuo yhteiskäyttötunnelista täyttyi vedellä. Esimerkki tulvan aiheuttamasta vahingosta on kuvassa 29.



Kuva 29: Tulvan aiheuttamia vahinkoja Salmisaari – Kamppi – Ruskeasuo yhteiskäyttötunnelissa (Jorma Vilkmán, Helsingin Energia)

Kuvasta 29 näkee, että tulva ei aiheuttanut merkittävää vahinkoa tunnelin putkille ja kaapeleille, vaikka tulva vei mukanaan paljon tunnelin pohjasoraa, sillä putkikannakkeet ja kaapeliarinat on ankkuroitu kallioon. Ainoistaan kaukolämpöputkien mineraalivillaeristeitä jouduttiin vaihtamaan kosteusvaurioista johtuen.

Onnettomuuden jälkeen Pasilan vesijohtotunneleiden alimpaan pisteeseen rakennettiin taitto-ovi, joka mahdollistaa tulvavesille noin 1,8 * 1,2 metrin ulostuloaukon. Vesijohtotunnelin ja yhteiskäyttötunnelin risteykseen rakennettiin paineseinä. Myös vesisäiliöistä lähteviin vesijohtoputkiin rakennettiin kauko-ohjattavat sulut, jotta vedentulo putkistoon voidaan sulkea nopeammin. Vesijohtotunnelin ja yhteiskäyttötunnelin välinen paineseinä on kuvassa 30.



Kuva 30: Pasilan vesijohtotunneleiden ja Salmisaari – Kamppi – Ruskeasuo yhteiskäyttötunnelin välinen paineseinä ja henkilöluukku

3.4.2 Tammikuun 2005 merivesitulvan vaikutukset yhteiskäyttötunneleille

Tammikuussa 2005 merivesitulvan aikana vedenpinta nousi korkeimmillaan +1,51 metriin. Yhteiskäyttötunneleiden alin suuaukko on tasolla +1,8 metriä, joten vesi ei tunkeutunut suoraan yhteiskäyttötunneliverkkoon.

Tulvavettä pääsi kuitenkin sadevesiviemäreiden kautta tunneliviemäreihin, jolloin viemärit täyttyivät. Myös viemäriverkoston ylivuotosuojista pääsi vettä viemäriverkkoon, koska niiden tulvaraja on +1,2 metriä. Kun vielä Mäntymäen jätevesipumpapaamon teho laski puoleen, vedenpaine nousi Rajasaaren viemäritunnelissa niin korkeaksi, että viemäritunnelin ja Salmisaari – Kamppi – Ruskeasuo yhteiskäyttötunnelin välisessä paineseinässä oleva työnaikaiseen ilmastointiin tarkoitettu laippa petti ja

viemäriverettä tulvi yhteiskäyttötunneliin. Ilmastointilaippa on kuvassa 31 paineovien yläpuolella.



Kuva 31: Paineovi Salmisaari – Kamppi – Ruskeasuo yhteiskäyttötunnelin ja Raja-saaren viemäritunnelin välillä

Suurtulvan riski oli suuri, koska paineseinän laippaa ei voitu sulkea tulvan aikana. Onneksi Mäntymäen pumppaamo saatiin nopeasti toimimaan täydellä teholla ja viemäritunnelien ylivuotosuojat suljettua, jonka jälkeen vedenpainetaso laski viemäritunneliverkossa.

Viemäriverkoston tulviminen aiheutti myös toisen, huomattavasti vaarallisemman tulvatilanteen, kun Munkkisaari – Mäntymäki viemäritunnelin vesi tulvi poranreiän kautta rakenteilla olleen Kampin kaukoliikenneterminaalien kellariin. Poranreikä viemäritunneliin oli tehty Kampin keskuksen jätevesien poistamista varten. Reiän yläpäässä oli viemärikaivo, jonka kantta ei ollut vielä pultattu kiinni.

Kun viemärivereden pinnan taso nousi kaukoliikenneterminaalien kellarikerroksessa, vettä rupesi valumaan kellarista avoimen ilmastointikuilun kautta Kampin metroaseman sähkötiloihin johtavaan tunneliin. Vain tehokkaalla pumppauksella ja sähköasematilaan johtavan käytävän säkittämällä saatiin jäteveden määrä pidettyä niin pienennä, ettei sähköasematilan toiminnassa ollut häiriöitä tulvan aikana.

3.4.3 Putkirikko Katri Valan lämpöpumppulaitoksen työmaalla

Kesällä 2005 rikkoutui Katri Valan lämpöpumppulaitoksen työmaalla noin 100 mm työnaikainen vesijohtoputki. Putken rikkoutuminen tapahtui juuri juhannuksen aikaan, joten vuoto havaittiin vasta kolmen vuorokauden kuluttua rikkoutumisesta. Siinä ajassa lämpöpumppulaitoksen ja sen alla olevan Kruununhaka – Sörnäinen yhteiskäyttötunnelin välisen pystykuilun kautta valui noin 10000 m³ vesijohtovettä yhteiskäyttötunneliin.

Kruunuhaka – Sörnäinen yhteiskäyttötunnelin vuotovesialtaassa on tulvahälyttimet, mutta juuri ennen tulvaa hälyttimissä oli ollut toimintahäiriö, joka oli antanut virheellisen tulvahälytyksen. Virrehälytystä ei ollut poistettu valvomon hälytysjärjestelmästä, joten todellista tulvaa ei havaittu valvomossa.

Tulvaveden pumppaamisessa pois yhteiskäyttötunnelista oli suuria vaikeuksia. Korkeusero maanpinnan ja tunnelitason välillä on yli 50 metriä. Pumppaukseen käytetyssä kangasputkessa oli niin suuri virtausvastus, ettei vesi virrannut kangasputkilinjassa riittävän nopeasti. Vasta kun veden pumppaamiseen rakennettiin kovasta muoviputkesta linja, pumppaus saatiin riittävän tehokkaaksi.

3.5 Tulvan vaikutukset tunnelin rakenteisiin

Pasilan vesijohtovuodon ja siitä aiheutuneen tulvan perusteella voidaan olettaa, että virtaava vesi ei tee merkittävää vahinkoa tunnelin kallio- ja betonirakenteille, putkille eikä kaapeleille. Kaukolämpöputkien eristeiden vettyminen on estetty korvaamalla mineraalivillaeriste ja solumuovikuori polyuretaanieristeellä ja polyeteenikuorella.

Pasilan vesijohtovuodossa tunneleiden pohjasora ja salaojaputket siirtyivät kilometrejä virtaavan veden mukana. Jos tunneleissa olisi ollut 110 kV korkeajännitekaapeli, se olisi myös voinut vaurioitua tulvassa. Korkeajännitekaapelit sijoitetaan yhteiskäyttötunneleissa pohjasoran sisään betonisiin kaapelielementteihin. Vaikka elementit on hitsattu kiinni toisiinsa, niitä ei ole ankkuroitu kallioon, joten ne voivat liikkua virtaavan veden mukana ja vaurioittaa elementtien sisällä olevia kaapeleita. Jos 110 kV kaapeli vaurioituu, sähköisku on hengenvaarallinen kymmenien metrien päähän. Lisäksi laajojen sähkökatkojen riski on mahdollinen.

Kaukolämpövuotovesi ja höyry voivat vaurioittaa tunnelirakenteiden muoviosia, kuten putki- ja kaapelieristeitä sekä salaoja- ja eristeputkia. Putki- ja kaapelieristeinä käytetävän polyeteenin sulamislämpötila on 120 - 130 °C. Sen sijaan toinen eristemuovi PVC kestää paremmin kuumuutta. Sen sulamislämpötila on 212 °C.

3.6 Tulvilta suojautuminen

3.6.1 Maanpäällisten rakenteiden suojaukset

Maanpäällisiltä tulvilta suojaudutaan tehokkaimmin rakentamalla yhteiskäyttötunneleiden maanpäälliset yhteydet, eli ajotunnelit, pystykuilut ja poranreiät kestämaan tulvia. Merivesitulvilta suojaudutaan rakentamalla yhteydet veden pitäviksi tasolle + 2,6 metriä asti. Putkivuodoilta ja rankkasateilta suojaudutaan rakentamalla ajoluiskat siten, ettei suuaukkoja ympäröiviltä alueilta pääse vettä valumaan suuaukolle.

3.6.2 Putkirikkojen ennaltaehkäisy

Kaukolämpöverkko on hyvin valvottu ja automatisoitu. Putkiston painetasoa, tunnelin lämpötilaa ja vuotovesimääriä valvotaan. Kaukolämpöverkko on rakennettu myös siten, että pumput sulkeutuvat automaattisesti, jos verkon painetaso laskee liian nopeasti esim. vuodosta johtuen. Täten kaukolämpövuodon maksimimäärän on arvioitu olevan vain muutamia tuhansia kuutioita. Kaukolämpövuoto on siis pääosin paikallinen tulvariski, mutta veden kuumuudesta johtuen henkilöturvallisuusriski on suuri.

Kaukolämpö- ja kaukojäähdytysputkieristeiden kosteus aiheuttaa putkien korroosiota, joka voi pahimmassa tapauksessa rikkoa putken. Putkieristeiden kosteutta mitataan kuvan 32 mukaisilla antureilla, jotka on sijoitettu kiinteästi putkieristeeseen.



Kuva 32: Kaukolämpöputken eristeen kosteusmittari

Vesijohtoverkko on suurelta osin vanhempi kuin kaukolämpöverkko, joten myös sen tekniikka on vanhempaa. Verkostossa ei ole automaattisulkuja. Kauko-ohjattuja sulkuja verkossa on siten, että tunneleihin sijoitetut ja katujen alla kulkevat putket voidaan tarvittaessa erottaa toisistaan.

3.6.3 Putkirikkojen ja tulvien havaitseminen tunnelissa

Putkirikkoja valvotaan putkien painemittauksilla ja niistä saatavilla hälytyksillä. Lisäksi vuodot voidaan havaita vuotovesipumppaamoilla kasvaneesta vesimäärästä kuvan 33 mukaisilla antureilla, jotka lisäävät vuotovesipumppujen tehoa ja tekevät hälytyksen valvomoon, jos ne ovat kosketuksessa altaan vedenpintaan. Myös altaiden vuotovesien lämpötilaa mitataan mahdollisten kaukolämpövuotojen havaitsemiseksi. Vuotovesipumppuja on pumppaamoilla aina kaksi, joten mahdollinen pumpun laiteviika ei aiheuta välitöntä tulvariskiä.



Kuva 33: Vuotovesipumppaamon tulva-anturit

3.6.4 Tulvaosastointi

Tulvaosastointia on rakennettu yhteiskäyttötunneleiden ja viemäritunneleiden välisiin tunneliyhteyksiin, yhteyksiin metron tunneliverkkoon sekä Pasilan vanhoihin vesijohdotunneleihin.

Tulvien varalta osastoitujen seinien ja ovien on kestävä vähintään merivedenpainetta tai painetta, joka kohdistuu osastoiviin rakenteisiin silloin, kun tulvaosasto on täynnä vettä. Kaavalla 11 voidaan määrittellä tunnelissa olevaan osastoivaan seinään kohdistuva paineen aiheuttama voima F [N] (Hamill 2001)

$$F = \rho ghA \quad (\text{Kaava 11})$$

missä h = vedenpinnan ja tunnelin osastoivan seinän korkeusero [m]
 A = pinta-ala, mihin voima kohdistuu [m²]

Kaavan 11 perusteella +2,6 m tasolle nousseen merivesitulvan vaikutus tasolla - 40 m olevaan tulvaseinään on 1,25 MN, kun seinän pinta-ala on 30 m².

Kuten kuvasta 31 voi nähdä, tulvaseinät ja – ovet ovat erittäin raskaita rakenteita. Niiden normaaliajan käyttö on hidasta ja raskasta. Ilmastoinnin varmistaminen tulvaosastosta toiseen vaatisi korkealla paineella toimivia patoluukkuja tai ovia. Pelkästään vuotovesien poiston järjestäminen tulvaseinän läpi on tuottanut ongelmia. Yhteiskäyttö- ja viemäritunneleiden väliset tulvaseinät on sijoitettu siten, että ilman vedenpoistoputkea tunnelin vuotovedet kerääntyisivät seinän yhteiskäyttötunnelin puo-

lelle. Vedenpaineen noustessa viemäritunneleissa vuotovesien poistoputkien takaiskuventtiilit ovat pettäneet muutamia kertoja ja viemärivettä on valunut yhteiskäyttötunneliin. Tulvaseinän läpi menevän vuotovesien poistoputken takaiskuventtiili on kuvassa 34.



Kuva 34: Tulvaseinän läpi menevän vuotovesien poistoputken takaiskuventtiili

4. SAVUTUULETUSKOKEET

4.1 Yleistä

Tunnelipaloissa kaikkein vaarallisin henkilöturvallisuuteen vaikuttava tekijä on savukaasujen leviäminen tunnelitilassa. Savukaasut ovat usein erittäin myrkyllisiä, ne syrjäyttävät tunnelitilan ilman ja heikentävät näkyvyyden tunnelissa täydellisesti. Jotta pelastushenkilöstö voi toimia tunnelissa, pelastaa tunneliin loukkuun jääneitä tai sammuttaa tulipaloja, savun määrää on vähennettävä.

Monissa ulkomaisissa testeissä on osoitettu, että kuuma savu siirtyy ilmavirran mukana haluttuun suuntaan, jos vaakasuoraan tunnelitilaan saadaan yli 2,0 m/s ilmavirtaus. Oikein toimivalla savutuuletuksella saadaan haluttu tunneliosuus pelastushenkilöstön ja palopaikan väliltä puhdistetuksi savusta.

Helsingin kaupungin pelastuslaitos on hankkinut savutuuletusta varten kuvassa 35 olevan suurtehopuhaltimen, jolla voidaan puhalttaa tunnelin suuaukolta ilmaa sisään tunneliin ja siten saada riittävä ilmavirtaus savun poistoon.



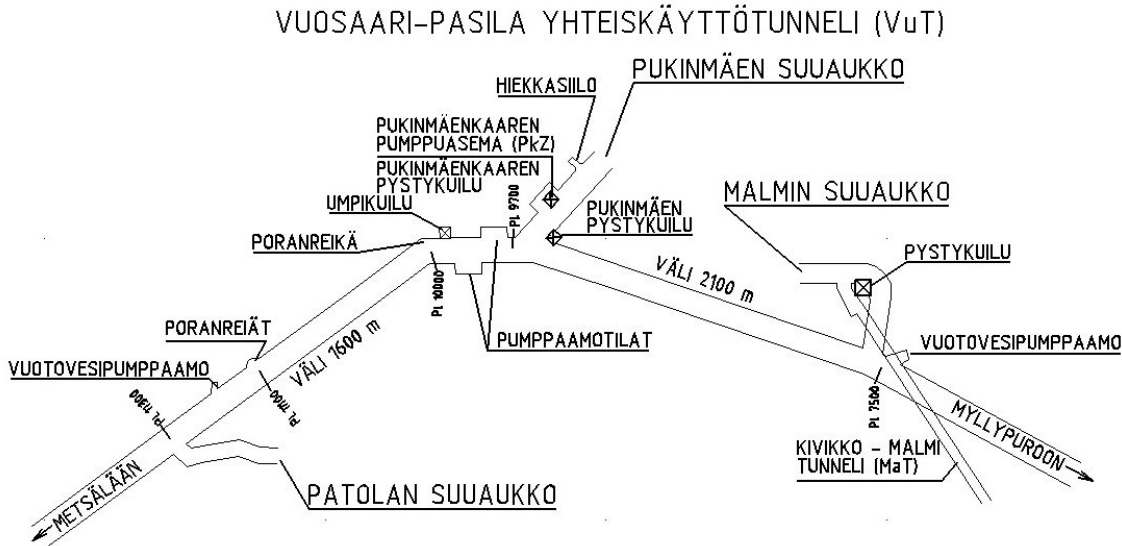
Kuva 35: Helsingin kaupungin pelastuslaitoksen suurtehopuhaltimen toiminnassa kuljetusauton lavalla (Marko Järvinen, Helsingin kaupungin pelastuslaitos)

4.2 Mittauskohde

Savutuuletuskokeiden kohteeksi valittiin noin neljän kilometrin osuus Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelista Malmin ja Patolan väliltä. Kohde valittiin siksi, että kyseisessä tunnelissa ei ollut menossa kokeiden aikaan rakennus- eikä saneeraustöitä. Myöskään Kamppi – Erottaja – Kruununuhaka yhteiskäyttötunnelin rakennustöiden eikä muiden keskustan louhintojen katsottu enää vaikuttavan tuuletuskoealueen ilmavirtauksiin.

Koealueella on kolme ajotunnelia, kolme pystykuilua, kaukolämmön pumppuasema sekä kaksi tyhjää pumppaamotilaa. Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelin vapaa poikkipinta-ala, eli ala, jonka läpi ilma virtaa, on kiinteiden putkikannakkeiden kohdal-

la noin 25 m^2 . Vastaavasti Malmin ajotunnelin vapaa poikkipinta-ala on ennen Kivikko – Malmi kaukolämpötunnelin risteystä 17 m^2 ja risteuksen jälkeen 18 m^2 , Pukinmäen ajotunnelin ennen Pukinmäenkaaren pumppuasemaa 18 m^2 ja pumppuaseman jälkeen 15 m^2 sekä Patolan ajotunnelin 18 m^2 . Malmin suuaukon koko on 4×4 metriä, Pukinmäen suuaukon koko $3,6 \times 3,6$ metriä ja Patolan suuaukon koko: leveys $3,2 \times$ korkeus $3,65$ metriä. Koealueen yleiskartta on kuvassa 36.



Kuva 36: Mittausalueen yleiskartta

Malmin pystykuilu sijaitsee Malmin ajotunnelissa kohdassa Ma PI -14. Kuilu toimii Kivikko – Malmi kaukolämpötunnelin tuloilmakuiluna. Kuilun yläpäässä ja alapäässä on noin $0,8 \text{ m}^2$ ilmastointireiät. Lisäksi kuilun alapäästä lähtee Kivikko – Malmi tunneliin noin $0,8 \text{ m}^2$ tuloilmaputki.

Pukinmäen pystykuilun yläpäässä on $2,9 \times 1,4 \text{ m}$ aukko, jossa on metallisäleikkö, mikä pienentää kuilun aukon kokoa noin puolella. Näin ollen kuilun yläpään vapaan ilma-aukon koko on noin 2 m^2 . Itse kuilussa ei ole rakenteita.

Pukinmäenkaaren pystykuilussa on 800 mm tuloilmaputki, kierreportaat, kaapeleita sekä 800 mm kaukolämpöputket. Kuilun yläpäässä ei ole tuloilmaputken ilmanotto-aukon lisäksi kuin noin $0,4 \text{ m}^2$ ilmanvaihtoaukko.

4.3 Savuseinät

Yhteiskäyttötunneleihin on suunniteltu savuosastointia, jotta palotilanteissa savun leviämistä voidaan rajoittaa ja pelastumisehtäisyyksiä lyhentää. Tunnelin koeosaan rakennettiin kolme vaneriseinää, joilla kuvattiin savuosastojen rajoja. Seinien paikat ja tiedot ovat taulukossa 8.

Taulukko 8: Savuseinien tiedot

Savuseinä	Sijainti	Ajoneuvo-oven koko	
	Paaluluku	korkeus (mm)	leveys (mm)
1	7341	2900	2950
2	Pu PI 310	2660	2730
3	9866	3350	3100

Yhteiskäyttötunneleiden savuseiniin on suunniteltu ajoneuvo-ovia, jotka sulkeutuvat automaattisesti palohälytyksestä. Täten myös kokeen savuseiniin rakennettiin ajoneuvo-ovet, jotka voitiin sulkea tiiviisti pressun avulla. Paalulle 7341 rakennettu savuseinä on kuvassa 37.



Kuva 37: Savuseinä 1 Myllypuron ja Malmin välillä

4.4 Mittalaitteet ja ilmapvirtausten mittaaminen

Ilmavirtauksia mitattiin kuvan 38 kaltaisella anemometrillä. Laite pystyi mittaamaan yli 0,2 m/s ilmavirtauksia viiden prosentin tarkkuudella. Ilmavirtausmittaukset tehtiin tunnelissa noin 0,5 ja 2,0 metrin korkeudesta tunnelin lattiasta. Pystykuilujen ilmavirtaukset mitattiin kuilujen yläpäiden ulkopuolelta mahdollisimman läheltä ilmanvaihtoritilää.

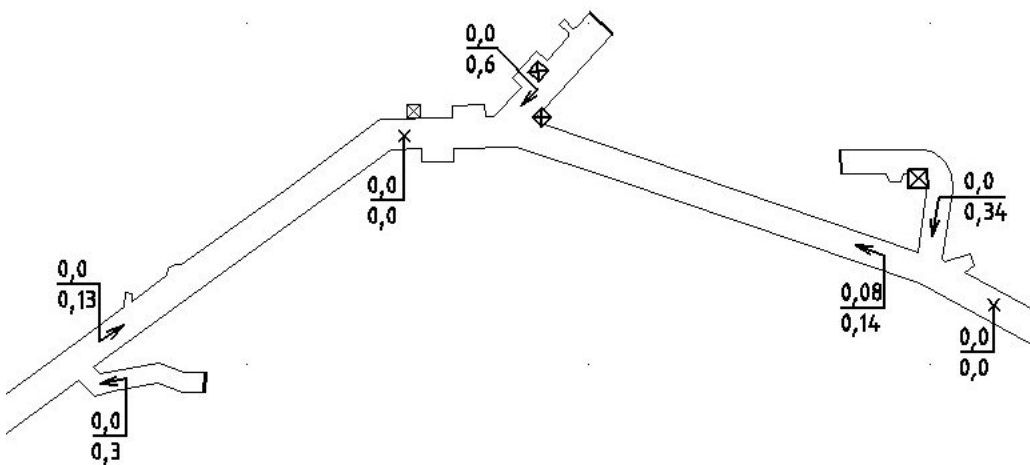


Kuva 38: Tuuletuskokeen ilmapvirtauksien mittaukseen käytetty anemometri

4.5 Normaalialajan ilmapvirtaukset

Savutuuletuskokeen aikana pidettiin tunnelin normaali-ilmanvaihto päällä. Tunnelin ilmapvaihto mitattiin kokeen jälkeen, jotta voitiin tutkia, oliko normaali-ilmanvaihdolla vaikutusta tuuletuskokeen tuloksiin. Myös ennen kokeita tehtiin erillisiä ilmanvaihtomittauksia, mutta mukana olleilla mittalaitteilla ei saatu ilmapvirtaustuloksia tunnelista. Syy tähän oli se, että Vuosaari-Pasila yhteiskäyttötunnelin ilmapvirtaukset koealueella olivat hyvin pieniä. Kokeen jälkeen mitattu maksimi-ilmapvirtaus päätunnelissa oli 0,14 m/s ja ajotunneleissa 0,6 m/s. Hitaisiin nopeuksiin osasyynä oli varmasti +25 °C lämmin ulkoilma, jolloin kylmempi tunneli-ilma ei noussut ajotunneleita ja kuiluja pitkin ulos.

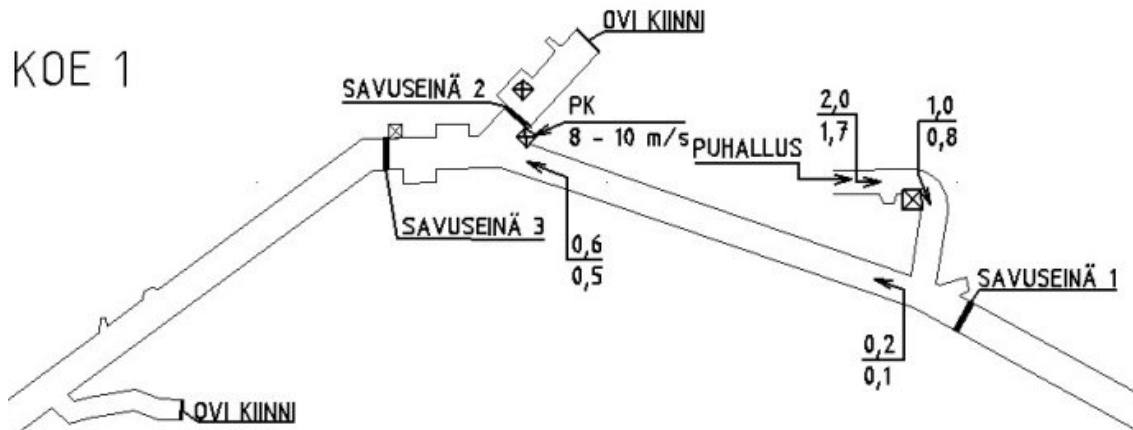
Erikoista yhteiskäyttötunneleiden ilmapvirtauksissa oli, että ilma kulki parhaiten lähellä tunnelin lattiaa ja hidastui siten, että jo kahden metrin korkeudessa tunnelin lattiasta ilma ei liikkunut juuri ollenkaan. Kuvassa 39 on esitetty normaalialajan ilmapvirtausmittausten tulokset. Kuvan ylemmät luvut on mitattuja ilmapvirtausnopeuksia noin 2,0 metrin korkeudesta ja alemmat luvut 0,5 metrin korkeudesta.



Kuva 39: Savutuuletuskokeiden yhteydessä mitatut normaalialajan ilmapvirtaukset mitausalueella

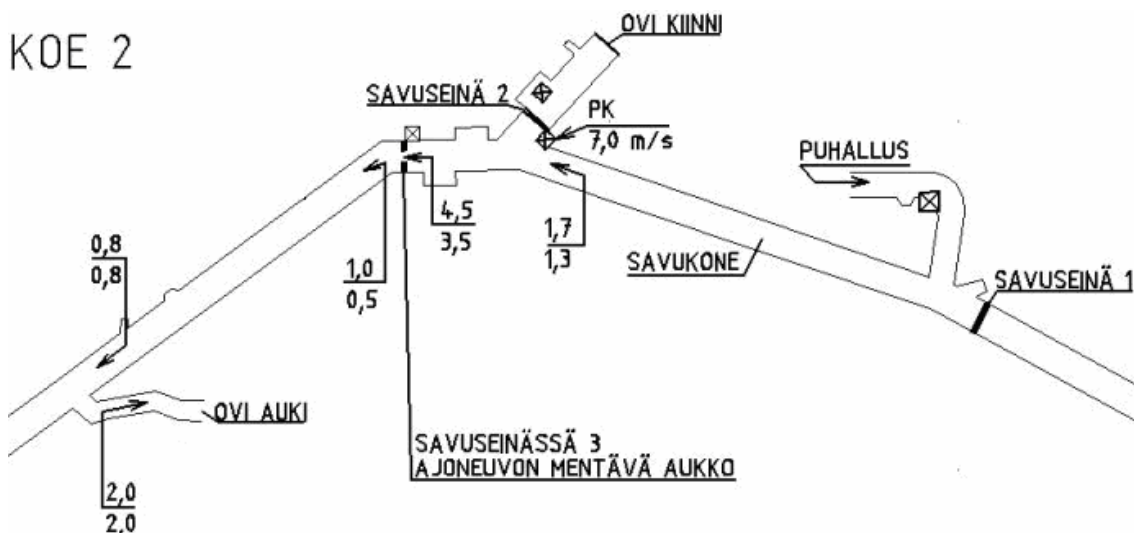
4.6 Kokeiden järjestelyt

Kokeessa 1 (kuva 40) testattiin pystykuilun toimivuutta savutuuletuksessa. Yhteiskäyttötunneleiden päätykuiluihin on suunniteltu rakennettavaksi 6 m² savunpoistoluukkuja. Testikuiluna olleessa Pukinmäen pystykuilussa yläpään ilmanvaihtoaukon koko on noin 2 m². Vaikka kuilun yläpäässä mitattiin jopa 10 m/s ilmavirtauksia, ilman virtausnopeus päätunnelissa jäi 0,6 m/s. Kokeessa havaittiin myös se, että Malmin pystykuilun 0,8 m² tuuletusreiästä karkasi ilmaa niin paljon, että ilman nopeus Malmin ajotunnelissa laski puoleen kuilun alapuolisella osuudella. Tunnelissa havaittiin myös selkeää turbulenssia aiheutuvaa ilman pumppausilmiötä, jossa ilman nopeus tunnelissa vaihtelee nopeassa tahdissa.



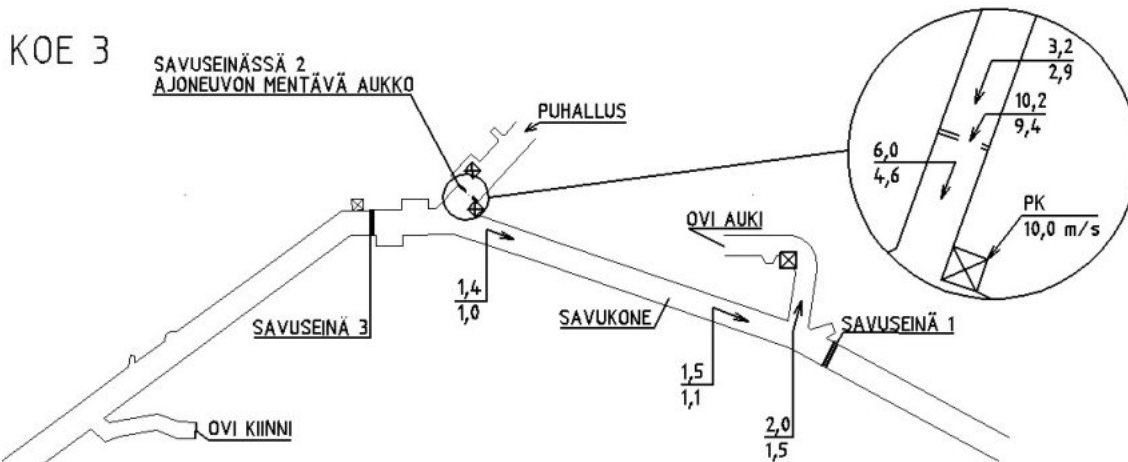
Kuva 40: Kokeen 1 järjestely ja mittaustulokset

Kokeessa 2 (kuva 41) testattiin savutuuleutusta savuseinässä 3 olevan ajoneuvoaukon läpi. Ajoneuvoaukollinen savuseinä supisti tunnelin vapaata poikkipinta-alaa noin 60 %. Kokeessa ilman nopeus laski selvästi savuseinän jälkeen. Osittain tämä voidaan selittää sillä, että ilmaa virtasi Pukinmäen pystykuilusta ulos. Sekä ennen savuseinää että seinän jälkeen tunnelin ilmavirtauksissa havaittiin sama pumppausilmiö kuin kokeessa 1.



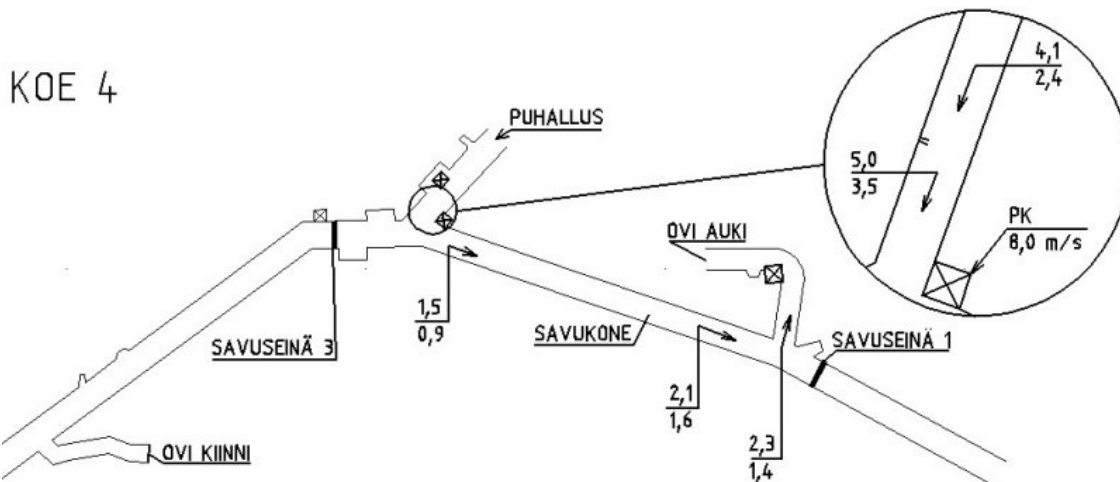
Kuva 41: Kokeen 2 järjestely ja mittaustulokset

Kokeiden 3 ja 4 (Kuvat 42 ja 43) savupuhallus ja mittaukset suoritettiin samalla tavalla samoista pisteistä. Ainoana erona kokeissa oli, että kokeessa 3 Pukinmäen ajotunnelissa olevassa savuseinässä 2 oli 7,3 m² ajoneuvoluukku auki ja kokeessa 4 savuseinä purettiin siten, että ajotunnelin vapaa poikkipinta-ala oli savuseinän kohdalla 13 m².



Kuva 42: Kokeen 3 järjestely ja mittaustulokset

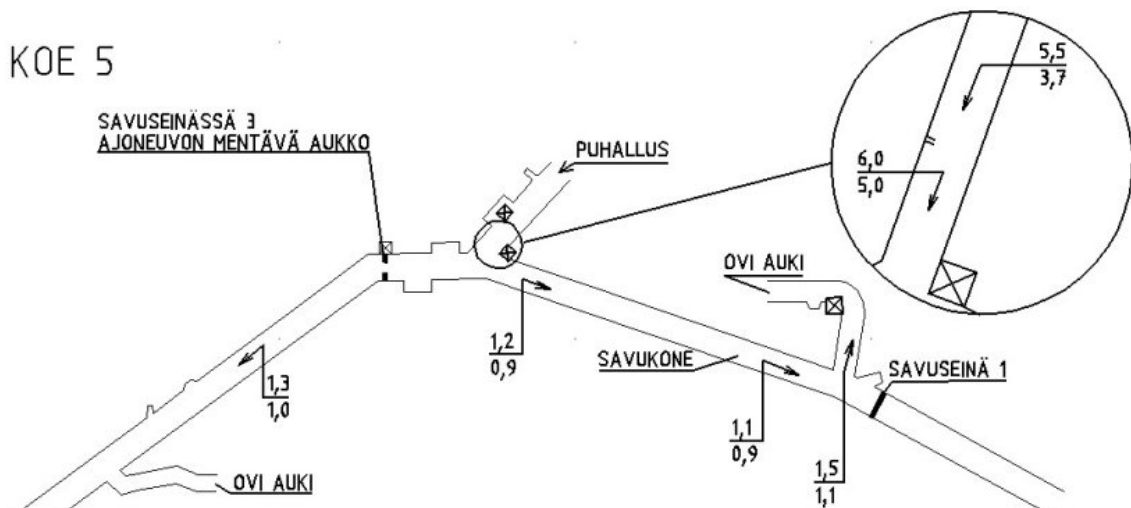
Savuseinän 2 purkaminen johti siihen, että kokeessa 4 ilmanvirtaukset olivat suuremmat kuin kokeessa 3. Ainoastaan savuseinän 2 alapuolella mitatut ilmanvirtaukset olivat kokeessa 3 paremmat. Tämä ilmiö oli havaittavissa muissakin kokeissa savuseinien lähellä mitattaessa. Savuseinän edessä ilmavirtaukset hidastuivat turbulenssista johtuen. Noin 20 metrin matkalta seinän jälkeen nopeudet olivat selvästi suuremmat kuin muualla tunnelissa mutta hidastuivat kauempana seinästä alle nopeuden, jolla ilma liikkui savuseinän etupuolella. Ilman pumppausilmiötä ei enää kokeessa 4 havaittu.



Kuva 43: Kokeen 4 järjestely ja mittaustulokset

Kokeessa 5 (kuva 44) puhallettiin ilmaa Pukinmäen suuaukosta. Tunneliin puhallettu ilma poistettiin Patolasta ja Malmilta. Ilman nopeus Pukinmäen ajotunnelissa kasvoi kokeeseen 4 nähden mutta ilman nopeus päätunnelissa välillä Malmi - Pukinmäki ja Pukinmäki - Patola oli noin puolet pienempi verrattuna siihen, että ilma olisi poistettu vain yhden suuaukon kautta.

KOE 5



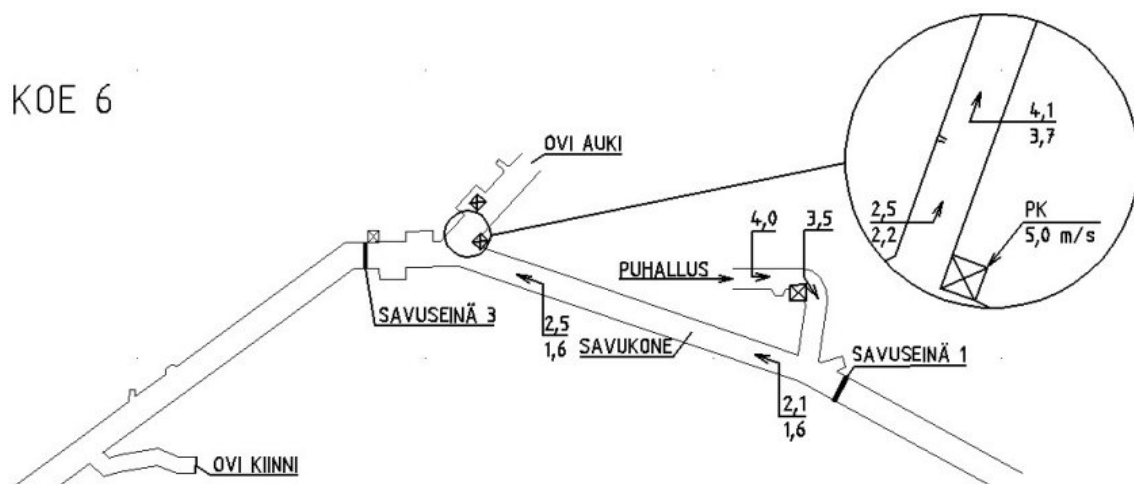
Kuva 44: Kokeen 5 järjestely ja mittau tulokset

Koe 6 (kuva 45) oli samantyyppinen kuin koe 4, mutta ilman virtaussuunta oli vastakkainen eli puhallus tapahtui Malmin suuaukosta ja ilmanpoisto Pukinmäestä. Ilman nopeudet kokeessa 6 olivat tunnelin päälinjalla suuremmat kuin kokeessa 4 ja nyt päästiin 2,0 metrin korkeudesta mitattaessa ensimmäistä kertaa koko koealueella ilman nopeuteen, joka ylitti vaaditun 2,0 m/s nopeuden.

Se, että ilma virtasi nopeammin Malmilta Pukinmäkeen, johtui siitä, että Malmin ajo-tunnelissa olevassa pystykuilussa poistoilma-aukko on pienempi kuin Pukinmäen pystykuilussa. Siten Malmin pystykuilun kautta ilmaa karkasi vähemmän. Muutenkaan ilmaa ei karannut pystykuilujen kautta niin paljon kuin kokeissa 1 - 3, koska tässä kokeessa ilmalla oli selkeä vapaa ulostuloreitti Pukinmäen suuaukolla.

Yksi syy ilman nopeuden kasvuun oli se, että Malmin suuaukko on suurempi kuin Pukinmäen. Näin suurempi osa puhaltimen tehosta kohdistui suuaukosta sisään eikä suuaukon ulkopuolisiin rakenteisiin. Pukinmäen suuaukolla puhallin jouduttiin laske-maan alas kuljetusalustaltaan, koska liian suuri osa puhalletusta ilmasta suuntautui suuaukon yläpuolelle eikä suuaukosta sisään tunneliin.

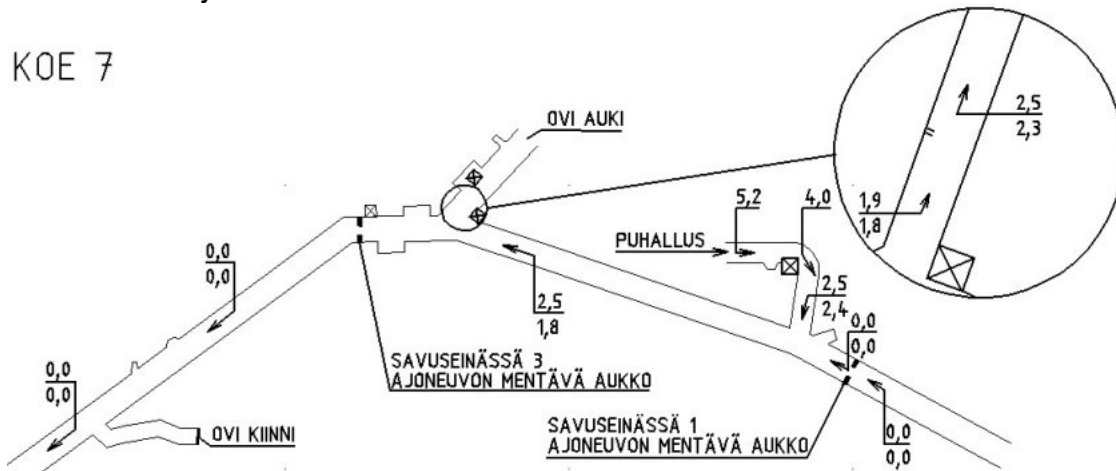
KOE 6



Kuva 45: Kokeen 6 järjestely ja mittau tulokset

Kokeessa 7 (kuva 46) puhallettiin ilmaa Malmilta Pukinmäkeen siten, että savuseini- en 1 ja 3 ajoneuvoaukot olivat auki. Ilman nopeus parani sekä Malmin ajotunnelissa että päätunnelissa Malmin ja Pukinmäen välillä, mutta Pukinmäen ajotunnelissa ilman nopeus laski verrattuna kokeeseen 6. Merkittävää oli kuitenkin se, että mittaus- ten perusteella ilmaa ei karannut Myllypuron eikä Patolan suuntaan, vaikka kaikki savuseinien ajoneuvoaukot olivat auki.

KOE 7



Kuva 46: Kokeen 7 järjestely ja mittaustulokset

4.7 Kokeiden tulokset

Savutuuletuskokeet osoittivat, että savuseiniä ei tarvita savun ohjaamiseen tunneli- verkossa, jos ilmalla on riittävän suuri ulosmenoaukko. Jos ulosmenoaukko on pie- nempi kuin sisäänmenoaukko, kuten kokeessa 1, ilma karkaa myös muihin tunnelin haaroihin.

Jos savutuuletus tapahtuu savuseinän läpi, kuten kokeissa 2 ja 3, tunnelissa oleva vapaata poikkipinta-alaa supistava ajoneuvoaukko hidastaa ilmanvirtausnopeutta ja aiheuttaa ilman pumppaantumista koko tuuletusalueella.

4.8 Johtopäätökset ja jatkotutkimukset

Savuosastoinnilla voidaan rajoittaa tunnelipalon savukaasujen leviämistä. Osastointi lyhentää myös tunnelissa toimivien henkilöiden pelastautumisetäisyyksiä ja helpottaa pelastushenkilökunnan pääsyä lähemmäksi palopaikkaa.

Toisaalta savuosastointi hidastaa savutuuletustilanteessa ilmanvirtausnopeutta ja aiheuttaa ilman nopeuden vaihteluita siten, että kuuma savukaasu ei välttämättä poistu ilmapirtauksen mukana. Oikein suunnitellulla savutuuletuksella voidaan savua ohjata maanalaisissa tiloissa tehokkaasti myös ilman savuosastointia.

Savuosastoinnin tarpeellisuutta on tutkittava lisää. On selvitettävä, mitä haittaa savu- kaasujen leviämisellä on yhteiskäyttötunneleiden rakenteille ja toiminnoille sekä mit- kä ovat tulipalon tai kaukolämpövuodon aikana tunnelissa olevien henkilöiden pelas- tautumismahdollisuudet niin osastoidussa kuin osastoimattomassa tunnelissa. Lisäk- si on tutkittava, mitkä ovat pelastushenkilökunnan todelliset mahdollisuudet sammut- taa tunnelipaloja, eli päästäänkö tehokkaalla savutuuletuksella palopaikan sammu- tusetäisyydelle, vai onko pelastushenkilökunnan mahdollista vain rajoittaa savun ja palon etenemistä tunnelissa.

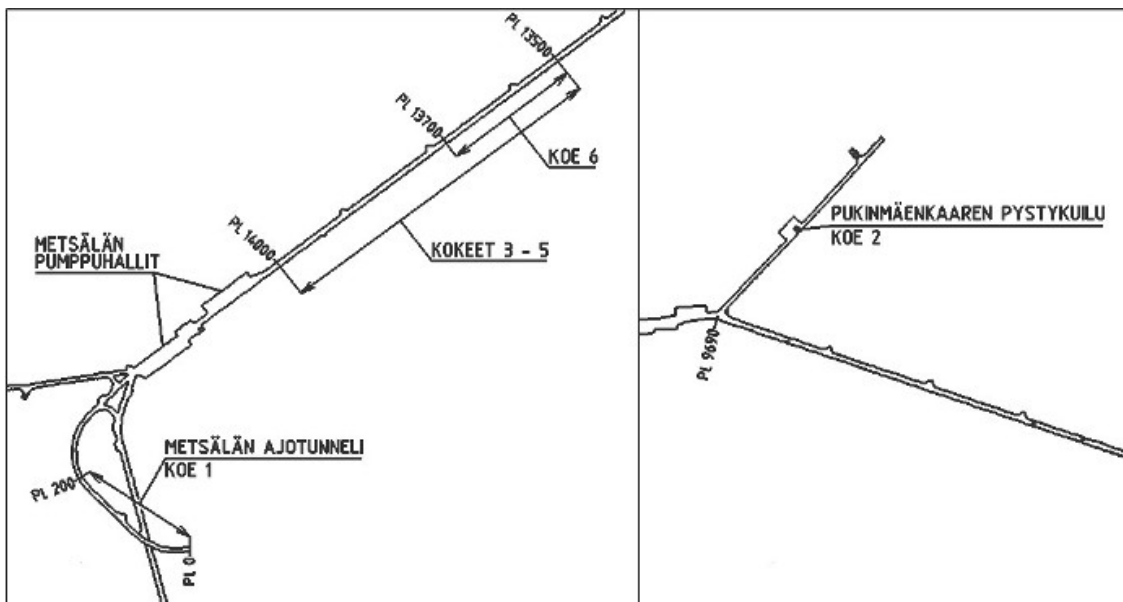
5. POISTUMISKOKEET

5.1 Yleistä

Poistumiskokeiden tarkoituksena oli selvittää, mitkä ovat yhteiskäyttötunneleissa työskentelevien ihmisten poistumisnopeudet erilaisissa tunnelitilanteissa. Ihmisten pelastautumismahdollisuudet tunneleista riippuvat täysin savun, vesihöyryn tai tulva-veden etenemisnopeuden suhteesta ihmisten poistumisnopeuksiin tunnelitiloissa.

5.2 Koealueet

Kokeet suoritettiin Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelissa Metsälän ja Pukinmäen alueilla. Näillä alueilla on poistumiskokeisiin hyvin soveltuva ajotunneli ja pystykuilu, jossa on kierreportaan. Ajotunnelin pituus on 377 metriä ja pystykuilun nousukorkeus 35,4 metriä. Kuvassa 47 on esitetty alueet, joissa kokeet suoritettiin.



Kuva 47: Metsälän ja Pukinmäen koealueet Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelissa

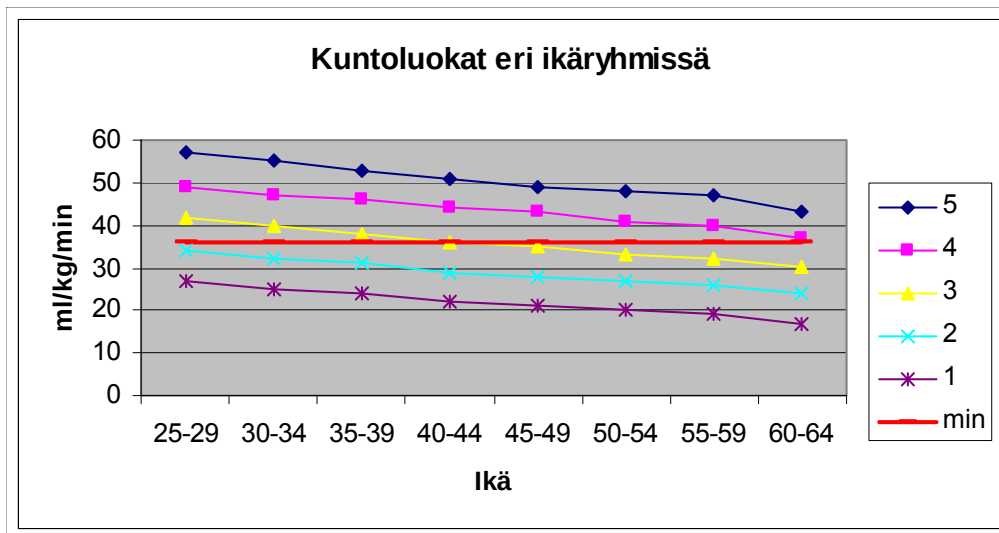
5.3 Koehenkilöt

Koehenkilöitä oli kaksi. Koehenkilö 1 ei ole käynyt kuin kerran yhteiskäyttötunnelissa, eikä hänellä ole kuin perustiedot tunneleista ja niiden toiminnasta. Koehenkilö 2 on liikkunut tunneleissa paljon sekä tuntee tunneleiden toiminnat ja riskit.

Koehenkilö 1 on 29 vuotias mieshenkilö ja koehenkilö 2 26 vuotias mieshenkilö. Jotta saatiin selville koehenkilöiden fyysisen kunnon vaikutus koetuloksiin, henkilöt suorittivat kuntotestin. Testinä käytettiin sykemittareita valmistavan yrityksen suunnittelema leposyketesti. Ihmisen leposyke riippuu suoraan kuntotasosta. Testin tuloksena koehenkilöt saivat arvion kuntoluokastaan ja hapenottokyvystään.

Molemmilla koehenkilöillä hapenottokyky oli 39 ml/kg/min, kun keskiarvo 25 – 29 vuotiailla mieshenkilöillä on 43 – 48 ml/kg/min. Koehenkilöt olivat siis ikäluokkaansa nähden hieman huonommassa fyysisessä kunnossa kuntoluokan ollessa välttävä.

Kuvasta 48 näkee kuinka ihmisen hapenottokyky laskee iän myötä. Kuvan perusteella koehenkilöiden tulokset olisivat 50 vuotiaalle mieshenkilölle jo keskimääräistä selkeästi paremmat. Kuvan punainen vaakaviiva on Helsingin kaupungin pelastuslaitoksen palomiehiltään vaatima minimihapenottokyky.



Kuva 48: Kuntoluokat eri ikäryhmissä (Marko Järvinen, Helsingin kaupungin pelastuslaitos)

5.4 Varustus

Koehenkilöiden varusteet olivat samat kuin tunneleiden huoltohenkilöstön käyttämät, eli työhaalarit, turvakengät, käsivalaisin ja TETRA-puhelin sekä henkilökohtaisia tavaroita, kuten matkapuhelin ja lompakko. Turvallisuuksyistä koehenkilöillä oli myös kypärät lukuun ottamatta koetta, jossa liikuttiin savuhuppu päässä. Kuvan 49 mukaisista savuhuppuja käytettiin kokeessa 5. Savuhuput olivat mallia, joka on esitelty kappaleessa 2.9



Kuva 49: Koehenkilö 2 pukeutuneena savuhuppuun

Koehenkilö 2 käytti sykemittaria, jotta nähtiin, mikä oli koehenkilön väsymyksen vaikutus poistumisaikoihin.

5.5 Kokeiden järjestelyt

Kummatkin koehenkilöt suorittivat kokeet kerran onnistuneesti. Ainoastaan pystykuilusta poistuminen jouduttiin uusimaan koehenkilölle 1, koska ensimmäisellä yrityksellä hän ei saanut kuilun yläpään viallista lukkoa auki. Koehenkilöltä 2 rekisteröitiin syke ennen ja jälkeen koesuoritusten.

Kokeessa 1 edettiin valaistua, kallistukseltaan 1:7, ajotunnelia ylöspäin kohti tunnelin suuaukkoa. Ajotunneliin merkittiin 200 metriä pitkä rata, joka päättyi ajotunnelin ovi-aukole. Ajanotto pysäytettiin, kun koehenkilö oli suuaukon ulkopuolella. Suurimassa osassa suuaukkoja on ajoneuvo-ovien lisäksi henkilöovi, joiden kautta poistuminen tapahtuu. Kokeessa suuaukon ajoneuvo-ovet olivat kuitenkin auki, koska henkilöoven lukon sinettiä ei haluttu rikkoa.

Kokeessa 2 noustiin kierreportaita valaistussa pystykuilussa kohti kuilun oviaukkoa. Kierreportaiden halkaisija on 1,6 metriä ja pystykuilun korkeus tunnelitasolta maanpinnalle 37 metriä. Ajanotto pysäytettiin, kun koehenkilö oli oviaukon ulkopuolella. Kuvassa 50 on koehenkilö 1 poistumassa Pukinmäenkaaren pystykuilun kautta.



Kuva 50: Koehenkilö 1 poistumassa Pukinmäenkaaren pystykuilun kautta

Kokeessa 3 edettiin vaakasuoraa valaistua tunnelia, johon oli merkitty 500 metriä pitkä suora rata, jonka välillä ei ollut pumppuasemia eikä risteyksiä.

Koe 4 suoritettiin samalla radalla kuin koe 3. Koehenkilöt etenivät radan pelkän käsi-valaisimen valossa.

Myös koe 5 suoritetaan samalla radalla kuin koe 3. Koehenkilöt etenivät valaistussa tunnelissa savuhuppu kasvoillaan. Kokeen etenemisaikaan on otettu huomioon myös aika, joka menee savuhupun käyttökuntoon laittamiseen ja pukemiseen.

Kokeessa 6 edettiin vaakasuoraa täysin valaisematonta tunnelia, johon oli merkitty 200 metrin suora rata. Tunneliin merkityllä radalle ei ollut pumppuhalleja eikä risteyksiä. Koehenkilöt etenivät tunnelissa radan siten, ettei mitään valoja ollut päällä kokeen aikana.

5.6 Kokeiden tulokset

Koehenkilöiden poistumis- ja etenemisnopeudet on esitetty taulukossa 9. Taulukossa 10 on esitetty koehenkilö 2 syke ennen ja jälkeen kokeiden. Teoreettinen maksimisyke ihmisellä on 220 lyöntiä minuutissa, josta vähennetään henkilön ikä. Tämän perusteella koehenkilö 2 suoritti kokeet 1 – 4 lähellä teoreettista maksimitehoaan.

Taulukko 9: Poistumiskokeiden tulokset ja koehenkilöiden liikkumisnopeudet eri olosuhteissa

Koe	Eteneminen	Koehenkilö	Reitin pituus (m)	Aika	Keskinopeus (m/s)	Keskinopeus (km/h)
1	ajotunnelissa	1	200	1 min 15 s	2,7	9,6
		2	200	1 min 11 s	2,8	10,1
2	pystykuilussa	1	37	3 min 22 s 1)	0,18	0,66
		1	37	2 min 37 s	0,24	0,85
		2	37	2 min 6 s	0,29	1,1
3	valaistussa tunnelissa	1	500	2 min 18 s	3,6	13,0
		2	500	2 min 19 s	3,6	13,0
4	käsivalaisimen valossa	1	500	2 min 21 s	3,6	12,8
		2	500	2 min 22 s	3,5	12,7
5	savuhuppu päässä	1	500	3 min 23 s 2)	2,5	8,9
		2	500	3 min 22 s	2,5	8,9
6	pimeässä tunnelissa	1	200	3 min 44 s	0,9	3,2
		2	200	3 min 42 s	0,9	3,2

1) Koehenkilö 1 ei saanut pystykuilun yläpään ovea auki, koska lukko oli viallinen. Pystykuilun ulkopuolella ollut avustaja avasi oven.

2) Koehenkilö 1 ei saanut riittävästi hapetta savuhupun suodattimen kautta, joten hän riisui savuhupun ja eteni reitin viimeiset 100 metriä ilman huppua

Taulukko 10: Koehenkilön 2 syke ennen ja jälkeen koesuoritusten

Koe	Eteneminen	Syke ennen koetta	Syke kokeen jälkeen
1	ajotunnelissa	110	191
2	pystykuilussa	115	185
3	valaistussa tunnelissa	119	190
4	käsivalaisimen valossa	125	194
5	savuhuppu päässä	120	180
6	pimeässä tunnelissa	125	133

Koehenkilöiden etenemisnopeudet, eli tässä tapauksessa juoksunopeudet, tasaisessa tunnelissa olivat noin 3,6 m/s. 1:7 kallistettu ajotunneli hidasti etenemistä noin 25 % verrattuna tasaisessa tunnelissa etenemiseen.

Pystykuilussa etenemisnopeus oli noin 0,25 – 0,3 nousumetriä sekunnissa. Koehenkilö 1 ei saanut ensimmäisellä suorituskerralla kuilun yläpään ovea auki, koska lukko oli jäykistynyt. Kuilun ulkopuolella ollut avustaja joutui auttamaan koehenkilön 1 ulos. Koehenkilö 2 oli nähnyt kuilun yläpään ja oven avausmekanismin kerran aiemmin. Hän sai myös radiopuhelimella tiedon, että oven avaamisessa oli ongelmia, joten hän sai oven auki varsin nopeasti.

Käsivalaisimen valossa eteneminen tunnelissa ei hidastanut koehenkilöiden etenemistä verrattuna valaistussa tunnelissa etenemiseen. Syynä tähän saattoi olla se, että koehenkilöillä oli käytössä erittäin tehokkaat halogeenivalaisimet. Tunnelissa työskentelevällä huoltohenkilökunnalla on yleensä käytössään huomattavasti pienempitehoisia ns. kynävalaisimia.

Savuhuppu hidasti etenemistä 32 % verrattuna ilman huppua etenemiseen. Savuhuppu päässä etenemiseen vaikuttivat ongelmat hapen saannissa sekä hupun sisäosan huuruistuminen. Hupun pukemisessa ei kummallakaan koehenkilöllä ollut ongelmia, vaikka he ehtivät tutustua hupun käyttöohjeisiin vain muutaman minuutin ennen koetta. Hapen saannin ongelmat johtuivat siitä, että suodatinlaitteen läpi ei tullut riittävästi ilmaa rasiituksen aiheuttamaan tarpeeseen nähden. Kun ihminen ei saa hengitysilmassa tarpeeksi happea, keuhkot rupeavat täyttymään hiilidioksidilla, mikä aiheuttaa hengästymistä, hangenahdistusta ja jopa tajuttomuutta. Hengenahdistuksesta johtuen koehenkilö 1 joutui riisumaan savuhupun noin 100 metriä ennen etenemisreitintä päättymistä ja koehenkilö 2 käveli noin puolet kokeen reitistä. Savuhupun käytössä tärkeintä on siis se, että käyttäjä pysyy rauhallisena, jotta hapen saanti suodattimen läpi on riittävää.

Täysin pimeä tunneli hidasti etenemistä 75 % verrattuna valaistussa tunnelissa etenemiseen. Pimeässä tunnelissa eteneminen on kuitenkin varsin helppoa, jos voi edetä kaukolämpöputkia tunnustelemalla.

5.7 Johtopäätökset ja jatkotutkimukset

Poistumiskokeiden perusteella pelastautumiseen vaikuttavat tekijät ovat tunnelin valaistuksen toimiminen, pystykuilujen ja ajotunneleiden pituudet ja ovien toiminta sekä hengityssuojainten käyttö. Näiden lisäksi pelastautuvan henkilön fyysinen kunto vaikuttaa, koska pelastautumismatkat yhteiskäyttötunneleissa ovat pitkät. Maanpäälle johtavien yhteyksien väli voi olla yli kaksi kilometriä. Ajotunneleiden pituudet ovat noin 400 metriä ja kallistuskulmat 1:7. Pystykuilujen nousukorkeudet vaihtelevat 30 ja 60 metrin välillä.

Poistumiskokeiden perusteella osastoimattomista pystykuiluista ja ajotunneleista pelastautuminen on hyvin vaikeaa, jos tunnelissa on paljon savua tai vesihöyryä. Kuumen savun tai vesihöyryn leviämisenopeus on suurempi kuin ihmisen poistumisnopeus, varsinkin jos näkyvyys tunnelissa on huono.

Ihminen etenee yhtä nopeasti käsivalaisimen valossa kuin täysin valaistussa tunnelissa. Sen sijaan savuhuppu hidastaa ja hankaloittaa poistumista, mutta se mahdollistaa kuitenkin riittävän tehokkaan etenemisen tunneleissa. Savuhuppua on helppo käyttää.

Jotta voidaan tarkasti tietää, kuinka kauan yhteiskäyttötunneleista poistuminen kestää eri tilanteissa, on otettava huomioon tunnelissa työskentelevien henkilöiden kuntotaso. Myös poistumismerkintöjen ja opasteiden vaikutusta poistumisnopeuksiin on tutkittava.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Osastointi

Yhteiskäyttötunneleiden poistumiskokeet osoittivat, että osastoimattomia pystykuiluja ei voida käyttää palo- ja kaukolämpövuototilanteiden pelastautumiseen. Myös osastoimattomien ajotunneleiden käyttö jalan liikkuvan ihmisen pelastautumiseen voi olla mahdotonta, koska kuuma savu ja vesihöyry leviävät ylöspäin nopeammin kuin taisaisessa tunnelissa. Palo-osastointi on tehtävä siten, että se estää tulipalon, savun ja kaukolämpövuodon kuumen vesihöyryn leviämisen osastosta toiseen.

Yhteiskäyttötunneleissa työskenteleville on suunniteltu jaettavaksi palotilanteiden poistumista suojaamaan savuhuppua, joita testattiin myös poistumiskokeessa. Savuhuput ovat helppoja käyttää ja niiden avulla voidaan edetä tunnelissa varsin tehokkaasti. Savuhuppujen toiminta-aika on myrkyllisessä savussa vähintään 15 minuuttia. Poistumiskokeiden perusteella valaistuissa olosuhteissa 400 metriä pitkistä ajotunnelista poistumiseen savuhuppu päässä kuluu aikaa 3 min 20 s. Vastaavasti 50 metriä korkean pystykuilun nousuun aikaa menee 4 min 30 s. Jos palon havaitsemiseen, sammutusyritykseen ja varusteiden keräämiseen menee aikaa noin kaksi minuuttia, ajotunnelista poistuvalla ihmiselle tunnelissa liikkumiseen aikaa jää 9 min 40 s. Siinä ajassa ihminen etenee valaistussa tunnelissa 1450 metriä. Pystykuilusta poistuvalla ihmiselle tunnelissa liikkumiseen aikaa jää 8 min 30 s, missä ajassa ihminen etenee 1275 metriä. Tämän perusteella riittäisi, että pystykuiluja tai ajotunneleita olisi sijoitettu noin 2,5 kilometrin välein.

Ihminen ei kuitenkaan missään tapauksessa etene noin nopeasti savuisessa tunnelissa, koska kattoa pitkin leviävä savu pimentää tunnelin katossa olevat valot, vaikka tunnelivalaistus toimisi. Poistumiskokeiden perusteella täysin pimeässä tunnelissa eteneminen on neljä kertaa hitaampaa kuin valaistussa tunnelissa. Tämän perusteella 400 metriä pitkistä ajotunnelista poistumiseen aikaa menee 13 min 20 s ja 50 metriä korkean pystykuilun nousuun 18 minuuttia.

Jos yhteiskäyttötunnelin pystykuilut ja ajotunnelit on osastoitu, täytyy palopaikalta poistuvan henkilön päästä kaikissa olosuhteissa osastoivalle ovelle. Jos henkilöllä on savuhuppu, tämä tarkoittaa, että osastoivalle ovelle on päästävä 15 minuutissa palon syttymisestä. Jos palopaikalta lähteminen kestää kaksi minuuttia ja henkilön poistumisnopeus pimeässä tunnelissa on 0,63 m/s, henkilö etenee 490 metriä. Tällöin kahden osastoivan oven välinen etäisyys on 980 metriä. Kuitenkin jos risteykset, pumpuasemat, ajotunnelit ja pystykuilut ovat huonosti merkitty, etenemisnopeus laskee ja eksymisen vaara kasvaa. Jos etenemisnopeus laskee kappaleessa 2.5 esitettyyn 0,3 m/s, henkilö etenee 13 minuutissa 230 metriä. Tällöin kahden osastoivan ovien väli olisi 460 metriä. Koska täysin pimeässä ihminen pystyy etenemään ainoastaan pitämällä kiinni esim. tunnelin seinästä tai putkesta, poistumisetäisyydet osastoiville ovil-le on laskettava pimeässä mahdollisesti kuljettavia reittejä pitkin.

Niissä yhteiskäyttötunneleissa, joissa ei ole pystykuiluja tai ajotunneleita riittävän tiheästi, pelastautumisetäisyyksiä voidaan lyhentää osastoimalla tunneliosuuksia savuseinillä. Palo-osastointia tunneliosuuksille ei välttämättä tarvita, koska henkilöturvallisuuden kannalta savun leviäminen on huomattavasti vaarallisempi riski kuin palon leviäminen. Savuseinien rakentamisessa ongelmana on normaaliajan ilmanvaihto ja liikkuminen osastosta toiseen, sekä palotilanteiden riittävän tehokkaan savutuule-

tuksen järjestäminen. Savutuuletuskokeiden perusteella savuseinät heikentävät tuuletuksen tehoa.

Tulvaosastointia ei voida rakentaa yhteyksiin tai risteysalueille, joiden kautta ihminen poistuu tulvatilanteissa, koska tulvaosastoivat ovet ovat raskaita ja hitaita käyttää. Varsinkin ovien sulkeminen on mahdotonta, jos tunnelissa virtaa vettä. Tulvaosastointi vaikeuttaa myös normaaliajan liikkumista ja ilmanvaihtoa. Palo-osastointi on suunniteltava siten, että osastojen läpi voidaan kulkea myös tulvatilanteissa.

6.2 Henkilökohtaiset pelastautumisvälineet

Poistumiskokeiden perusteella savuhuput eivät hidasta merkittävästi etenemistä tunneleissa, joten ne parantavat ihmisten pelastautumismahdollisuuksia palotilanteissa ja vähentävät palo- ja savuosastoinnin tarvetta.

Niissä tunneleissa, joissa etäisyydet uloskäytävien välillä ovat yli 460 metriä, osastointia halvempi menetelmä voi olla varustaa tunneleissa liikkuvat henkilöt hengityslaitteilla, joilla pystyy selviämään vaaratilanteissa pitempiä aikoja kuin savuhupulla. Esimerkiksi ulos hengitettävää ilmaa kierrättävän pelastautumislaitteen toiminta-aika on laitteesta riippuen 25 - 60 minuuttia. Nopeudella 0,3 m/s etenevä ihminen pääsee 25 minuutissa yli 400 metrin päähän palopaikasta, eli kahden osastoivan oven välimatka olisi silloin 800 metriä. Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelissa ajotunneleiden ja pystykuilujen välinen etäisyys on jopa yli kaksi kilometriä, eli poistumisetäisyys lähimmälle uloskäytävälle voi olla yli kilometrin. 0,3 m/s nopeudella etenevällä ihmisellä menee kilometrin matkaan aikaa 56 minuuttia.

Jos kaukolämpövuotoa pidetään mahdollisena tunnelissa tapahtuvana riskinä, pelastautumisvälineiden valinnassa on huomioitava kaukolämpövuototilanne, missä jopa yli 100 °C vesihöyry on syrjäyttänyt tunnelitilan ilman. Tällöin toimivat ainoastaan paineilmalla toimivat ja ulos hengitettävää ilmaa kierrättävät laitteet. Hengityslaitteiden ja työvarustuksen on myös suojattava ihmistä polttavalta vesihöyrystä.

6.3 Poistumismerkinnät

Jos tunnelin valaistus ei toimi tai näkyvyys on heikentynyt savusta johtuen, uloskäytävien löytäminen on vaikeaa. Jo pelkästään eteneminen pimeässä tunnelissa, missä on pumppuhalleja ja risteyksiä, on hidasta ja eksymisen vaara on suuri. Tästä syystä poistumismerkintöjä on lisättävä. Varsinkin uloskäytävät on merkittävä valaisevilla opasteilla, sillä jälkiheijastavat opasteet eivät välttämättä näy, jos tunnelissa on ollut pitkään pimeää.

Yhteiskäyttötunneleihin ollaan asentamassa jälkiheijastavia paikkakylttejä, joista tietää missä kohdassa tunnelia on, sekä opastekylttejä, joista näkee etäisyydet kahteen lähimpään uloskäytävään. Näissä tapauksissa jälkiheijastavat kyltit ovat riittävän tehokkaita tukemaan pimeässä tunnelissa etenemistä.

6.4 Pelastustoiminta

Syksyllä 2006 järjestettiin Vuosaari – Pasila yhteiskäyttötunnelissa Helsingin Energian ja Helsingin kaupungin pelastuslaitoksen yhteinen pelastusharjoitus. Tunneliin savusukeltaneet palomiehet raportoivat, että he eivät päässeet kuin muutamia kymmeniä metrejä ajotunnelin alapäästä eteenpäin, ennen kun oli käännettävä takaisin, koska paineilmalaitteista oli ilma loppumassa. Tämän perusteella on aivan selvää, että ilman tehokasta savutuuletusta pelastusmiehistö ei voi toimia yhteiskäyttötunnelissa, missä on paljon savua. Etäisyydet ovat liian pitkiä.

Savutuuletuskokeet osoittivat, että suurtehopuhaltimella voidaan hallita tunnelin ilmanvirtauksia useiden kilometrien mittaisilta tunneliosuuksilta. Tehokkaimmin savu saadaan ulos silloin, kun puhaltimen ja palopaikan väliltä suljetaan kaikki suuaukot ja pystykuilut, joiden kautta tuuletettua ilmaa voi karata ulos tunneliverkosta. Taas palopaikan jälkeen kaikki mahdolliset savun ulosmenoaukot on avattava, jos se vain on henkilö- ja laiteturvallisuuden kannalta mahdollista. Siten saadaan ilmavirtausnopeus puhaltimen ja palopaikan välillä mahdollisimman suureksi.

Vaikka pelastusmiehistö pääsisi yhteiskäyttötunnelissa palopaikalle, sammutuksessa tulee ongelmia. Sammutusvesilinjoista tulee pitkiä, jos vesi joudutaan johtamaan maan päältä tunneliin. Tunnelin katto estää veden ruiskuttamisen kaukaa palavaan kohteeseen. Myös palon vaikutuksesta lohkeileva ja irtoava kalliokatto aiheuttaa riskin pelastusmiehistölle. Jos tunnelissa ei ole ihmisiä hengenvaarassa, on jopa harkittava ennemmin antaa tunnelipalon sammua itsestään kuin lähettää pelastushenkilöstöä sammuttamaan tunnelipaloa.

7. YHTEENVETO

Yhteiskäyttötunneleiden tulipaloissa suurin henkilöriski on savun leviäminen. Savu estää näkyvyyden tehokkaasti hidastaen tunnelissa etenemistä ja altistaa myrkyllisille savukaasuille. Tunnelin laitteille ja toiminnoille paloriskit ovat kaapeli- ja putkieristeiden palaminen, jotka aiheuttavat viestiliikenteen, käyttösähkön ja valaistuksen rikkoutumisen. Putkieristeiden palaminen ei todennäköisesti vaikuta kaukolämmön-, kaukojäähdytyksen eikä talousveden jakeluun. Palo ei myöskään vaikuta kaapelielementeissä oleviin korkeajännitekaapeleihin.

Palotilanteiden poistumisturvallisuutta voidaan parantaa palo-osastoimalla pystykuilu- ja ajotunneleita, lisäämällä jälkiheijastavia ja valaisevia poistumismerkintöjä ja opasteita sekä varustaa tunnelihenkilöstö riittävillä hengityssuojaimilla, käsivalaisimilla ja käsisammuttimilla. Tärkein henkilöturvallisuutta parantava tekijä on tunnelihenkilöstön vaaratilannekoulutus.

Yhteiskäyttötunneleiden tulvista henkilöturvallisuuden kannalta vaarallisin on kaukolämpövuoto, josta syntyvä vesihöyry on tappavan kuumaa ja syrjäyttää tunnelitilan hapen. Kuuma kaukolämpövesi voi myös sulattaa kaapeli- ja putkieristeiden muoviosia sekä salaojaputkia.

Myös vesistöjen tulviminen tunneliverkkoon sekä vesijohto- ja kaukojäähdytysvuodot voivat olla henkilöturvallisuusriski. Suurissa vuodoissa virtaus voi olla niin suuri, että se vie ihmisen mukanaan. Lisäksi virtaavan veden mukana kulkeutuva irtain materiaali voi vahingoittaa ihmistä. Tunnelissa virtaava vesi ei ole tähän mennessä tehnyt muuta vahinkoa kuin vienyt pohjasoria mukanaan. Kuitenkin soran sisällä olevat kaapelielementit, kaapelit ja salaojat voivat vaurioitua.

Tulvatilanteiden poistumisturvallisuutta ei voi parantaa tulvaosastoinnilla, koska sen kautta poistuminen voi olla liian hidasta. Tehokkaimmat tulvatorjunnan menetelmät ovat tulvien ennaltaehkäiseminen ja tulvamäärien rajoittaminen. Tulvia voidaan ehkäistä estämällä vesistöjen tulviminen tunneleihin jo suuaukoilla, tarkkailemalla putkien kuntoa ja uusimalla vanhoja putkia ja laitteita. Putkivuotoja voidaan rajoittaa uusimalla ja kehittämällä sulkujärjestelmiä ja veden pumppausta.

LÄHDELUETTELO

Bekaert Group. Duomix® Fire (M6) polypropylene fibres to increase fire resistance of concrete. Tuote-esite. 2004. 6 s.

Blume, G. Smoke and Heat Production in Tunnel Fires – Smoke and Hot Gas Hazard. Teoksessa: Ivarsson, E. Proceedings of the International Conference of Fires in Tunnels. Borås, Sweden. October 10-11, 1994. Borås, Sweden. SP-Swedish National Testing and Research Institute, 1994. s. 138-146. ISBN 91-7847-513-4

Directorate-General for Public Works and Water Management. Project 'Safety Test' Report on Fire Tests. Utrecht, Netherlands. 2002

DrägerSafety. Pelastautumisväline-esitteet. http://www.draeger.com/STms/internet/site/MS/internet/FI-en/ms/Products/Protection/Escape/escape_escape_equipment.jsp

Euroopan parlamentti ja neuvosto. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/54/EY Euroopan laajuisen tieverkon tunnelien turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista. Bryssel, Belgia. 2004. 20 s. + liitt. 34 s. PE-CONS 3669/04

Hamill, L. Understanding Hydraulics. Second edition. Hampshire, UK. Palgrave. 2001. 552 s. + liitt. 52 s. ISBN 0-333-77906-1

Helsingin Energia. Vaaratilanneohjeet yhteiskäyttötunneleissa. Turvallisuussäännös 2.17. Helsinki. 1997. 7 s.

Helsingin Energia. Tunneleiden tulva- ja hätäpumppaustyöryhmän loppuraportti. Helsinki. 2005a. 7 s.

Helsingin Energia. Yhteiskäyttötunnelien turvallisuus- ja pelastussuunnitelma. Helsinki. 2005b.

Helsingin Energia. Vuosikertomus 2005. Yhteiskuntavastuun raportti. Helsinki. Edita Prima Oy. 2006. 44 s.

Helsingin Vesi. Nauti vedestä! Helsinki. 2004. 16 s.

Helsingin Vesi. Vuosikertomus 2005. Helsinki. 2006. 28 s.

Hostikka, S.; Mikkola, E.; Rinne, T.; Tillander, K.; Weckman, H. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä. Espoo. Valtion tekninen tutkimuskeskus (VTT). 2005. 143 s. + liitt. 9 s. (VTT Tiedotteita – Research notes 2318.) ISBN 951-38-6755-2

Hyttinen, V. Palofysiikka. Kuopio. Suomen Pelastusalan keskusjärjestö. 1998. 289 s. ISBN 951-797-057-9

Ilmatieteenlaitos. Sadetilastoja ja ennätyksiä. Helsinki. 2006. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_8.html#2

Kaskiala, M.; Kaskiala, T. Virtaustekniikka prosessiteollisuudessa - Kurssimateriaali vuosilta 1990–2005. Espoo. Teknillinen korkeakoulu. Materiaalitekniikan osasto. Ma-

- teraaalien valmistustekniikka ja jauhemetallurgian laboratorio. 2005. 161 s. (TKK-MK-169). ISBN 951-22-7875-1
- Keski-Rahkonen, O.; Holmlund, C.; Loikkanen, P.; Ludvigsen, H.; Mikkola, E. Two full scale pilot fire experiments in a tunnel. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 1986. 73 s. + liitt. 76 s. (VTT tutkimuksia 453). ISBN 951-38-2684-8
- Larsson, K. Fires in tunnels and their effect on rock – a review. Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Luleå, Sweden. 2006. 56 s. + liitt. 4 s. ISSN 1402-1528
- Lönnermark, A. On the Characteristics of Fires in Tunnels. Doctoral Thesis. Department of Fire Safety Engineering. Lund University. Lund. 2005. 108 s.
- Mangs, J. Ruiskubetonin palonkestävyys. Teoksessa: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL. Ruiskubetonin mahdollisuudet. 15-16.10.1991. RIL K144 – 1991. 1991. s. 93-101.
- Mustonen, S. (toim.). RIL141 Yleinen vesitekniikka. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. 1982. 433 s. ISBN 951-758024-x
- Ollila, M. (toim.). Ylimmät vedenkorkeudet ja sortumariskit ranta-alueille rakennettaessa – Suositus alimmasta rakentamiskorkeudesta. 2. painos. Helsinki. Suomen ympäristökeskus, ympäristöministeriö, maa- ja metsätalousministeriö. 2002. 39 s. + liitt. 10 s. (Ympäristöopas 52). ISBN 952-11-1263-9
- Perry, R.; Green, D.; Maloney, J. (toim.). Perry's Chemical Engineers' Handbook. Seventh edition. New York. USA. McGraw-Hill Companies. 1997. ISBN 0-07-049841-5
- Ranzo, A.; Domenichini, L.; Rescue facilities inside tunnels. Teoksessa: Vardy A. (toim). Safety in Road and Rail Tunnels. Secong International Conference. Granada, Spain, 3rd – 6th April 1995. Granada, Spain. University of Dundee and Independent Technical Conferences Ltd. 1995. s 535-542. ISBN 0 9520083 2 7
- Richter, E.; Vauquelin, O. Description of Measurements Techniques used in EUREKA-Project. Teoksessa: Ivarsson, E. Proceedings of the International Conference of Fires in Tunnels. Borås, Sweden. October 10-11, 1994. Borås, Sweden. SP-Swedish National Testing and Research Institute. 1994. s. 20-35. ISBN 91-7847-513-4
- Suomen betoniyhdistys r.y. Betonitekniikan oppikirja 2004. BY 201. Viides, uudistettu painos. Helsinki. Suomen betonitieto Oy. 2004. 570 s. ISBN 952-5075-61-3
- Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry. Kaapeleiden paloturvallisuus. Espoo. 2004. 80 s. ISBN 952-5382-60-5
- Weckman, H. Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä. Tehtävä B: Poistumisturvallisuus. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 2005. 93 s. + liitt. 13 s. (VTT Tiedotteita – Reseach notes 2319). ISBN 951-38-6758-9

Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto. Suomen rakennusmääräyskokoelma E1: Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. Helsinki. 2002.

Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto. Suomen rakennusmääräyskokoelma E2: Tuotanto- ja varastorakennusten paloturvallisuus. Ohjeet 2005. Helsinki. 2005.

Julkaisija HELSINGIN KAUPUNKI KIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO PL 2202 00099 HELSINGIN KAUPUNKI PUHELIN (09) 310 1671, FAX (09) 310 37840 http://www.hel.fi/kv/geo	Julkaisusarja, numero ja julkaisu-aika Geoteknisen osaston julkaisu 91 /2007 Elokuu 2007	
Tekijä(t) Vesa-Matti Matikainen	Projektinnumero(t) 6600	
Julkaisija HELSINGIN KAUPUNKI KIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO		
Nimike Yhteiskäyttötunneleiden riskiarviointi		
Tiivistelmä		
Helsingin kaupungin alueella on yli 50 kilometriä yhteiskäyttö-, kaukolämpö- ja vesijohtotunneleita. Tunnelit toimivat kaukolämmön, kaukojäähdytyksen, talousveden ja sähkön pääjakeluverkkoina. Tulipalot ja tulvat ovat suurimmat yhteiskäyttötunneleihin liittyvät riskit. Tulipalojen syttymissyitä ovat rakennus- ja huoltotyöt, sähköviat ja ilkivalta. Tulipaloissa vaarallisin henkiloturvallisuuteen liittyvä tekijä on savun leviäminen. Savuisessa tilassa näkyvyys heikkenee ja savukaasut voivat olla hengenvaarallisen myrkyllisiä. Tunneleiden tulvariskejä ovat vesistöjen tulvat, maanpäälliset putkivuodot ja rankkasateet, tunneleiden putkivuodot sekä tunneleihin vuotava pohjavesi. Tulvista vaarallisin on kaukolämpövuoto, missä kuuma kaukolämpövesi höyrystyy. Vesihöyry on tappavan kuumaa ja syrjäyttää tunnelitilan ilman. Tunneliverkostossa on viimeisen 20 vuoden aikana tapahtunut joitakin palo- ja tulvatilanteita, mutta henkilövahingoilta on säästyttävä. Työn kokeellisina osina järjestettiin savutuuletuskoe ja poistumiskoe. Savutuuletuskokeen tarkoituksena oli testata tuuletuksen toimivuutta savuastoidussa yhteiskäyttötunnelissa. Savutuuletuksella voidaan poistaa savu tehokkaasti suurestakin tunneliverkosta, mutta savuastoinnista ei kokeen perusteella ole hyötyä savun ohjaamisessa. Poistumiskokeessa testattiin jalkaisin liikkuvan ihmisen etenemisnopeuksia eri tunneliolosuhteissa. Kokeen perusteella osastoimattomasta tunnelista poistuminen pystykuilun tai ajotunnelin kautta voi olla mahdotonta palo- tai kaukolämpövuototilanteissa. Eteneminen tunnelissa on hyvin hidasta ja eksymisen vaara on suuri, jos näkyvyys on huono savun tai valaistuksen toimimattomuuden johdosta. Kuitenkin jo vähäinen valaistus nopeuttaa poistumista huomattavasti. Tämän työn tuloksena on esitetty ratkaisumalleja henkilö- ja laiteturvallisuuden parantamiseksi yhteiskäyttötunneleissa.		
Avainsanat Yhteiskäyttötunneli, paloturvallisuus, tulvantorjunta		
ISSN 978-952-473-935-1	ISBN 1458-2198	Luokitus (UDK) 624.19
Kieli suomi, engl. tiivistelmä	Sivuja 73 s.	

Published by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION P.O Box 2202 00099 THE CITY OF HELSINKI FINLAND PHONE +358-9-310 1671, FAX +358-9-310 37840 http://www.hel.fi/kv/geo	Series title, number and date Geotechnical Division, publications 91 /2007 August 2007	
Author(s) Vesa-Matti Matikainen	Project number(s) 6600 Commissioned by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION	
Title Utility tunnel risk analysis		
Abstract There are over 50 kilometers of utility, district heating and water pipe tunnels in Helsinki city area. Tunnels are main transfer lines for district heating, district cooling, fresh water and electricity. Fires and floods are the major risks in the utility tunnels. Reasons for fires are construction and maintenance works, electric cable faults and vandalism. In fires the most hazardous risk for personal safety is smoke propagation. In a space where there is a lot of smoke, visibility is reduced and smoke can be fatally poisonous. Waterway floods, pipe leaks and downpours on the ground, tunnel pipe leaks and groundwater leaking into tunnels cause a flooding risks in the tunnels. The most dangerous flood situation is created by a district heating leakage, where hot district heating water vaporizes. Steam is lethally hot and replaces air in the tunnel. In the past 20 years there have been few fire and flood situations in tunnels, but no casualties. Experimental parts of this report consisted of a smoke ventilation test and an emergency exit test. The purpose of the smoke ventilation test was to see how ventilation works in utility tunnel network, which is partitioned into smoke departments. By ventilation it is possible to remove smoke efficiently even from a large tunnel network, but the tests show no benefits of smoke compartments to direct smoke. Purpose of the emergency exit test was to see how the speed of human moving on foot changes in different tunnel situations. According to the test, moving through shafts or driving tunnels with no compartments can be impossible in fire or district heating leakage situations. Moving in tunnels is very slow and danger of getting lost increases, if visibility is low because of smoke or non-functional lighting. Even small light source speeds up moving considerably. This report represents several solutions to improve personal and equipment safety in utility tunnels.		
Keywords Utility tunnel, fire safety, flood prevention		
ISSN 978-952-473-935-1	ISBN 1458-2198	Class (UDC) 624.19
Language Finnish, Engl. Abstr.	Pages 73 p.	