

Erno Airola

MAANTIETUNNELEIDEN ILMANVAIHTO

Opinnäytetyö
Talotekniikka


Toukokuu 2012




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

 <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p>	Opinnäytetyön päivämäärä		
Tekijä(t) Erno Airola	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Talotekniikka		
Nimeke Maantietunneleiden ilmanvaihto			
Tiivistelmä <p>Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena oli kerätä tietoa maantietunneleiden ilmanvaihdosta, sitä koskevista määräyksistä ja ilmanvaihdon mitoituksesta. Tavoitteena oli maantietunnelitietopaketti, joka oli hyödyksi suunnittelutoimistolle. Työ sisälsi myös mallisuunnitelman kuvitellun maantietunnelin ilmanvaihdosta.</p> <p>Suomen liikennevirasto on tunnelien hallintoviranomainen, joka antaa tunnelia koskevat määräykset ja ohjeet. Tuoreimmat määräykset ovat vuodelta 2008 ja suunnitteluohjeiden luonnos vuodelta 2005, jonka jälkeen ei ole julkaistu tarkempia suunnitteluohjeita.</p> <p>Tunnelin ilmanvaihto voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Pitkittäisessä järjestelmässä ei ole kanavia vaan ilma kulkee tunnelissa puhaltimien avulla koko pinta-alalla. Poikittaisessa järjestelmässä ilma tuodaan kanavistoissa, minkä vuoksi ilmanvaihtoon ei vaikuta muut tunnelissa esiintyvät ilmavirrat. Savunpoistoa varten tehdään joko omat kanavat savupelteineen tai savu kuljetetaan puhaltimien avulla toisesta tunneliaukosta ulos.</p> <p>Ilmanvaihto mitoitetaan tunnelissa syntyvien päästöjen perusteella. Päästöihin lukeutuvat typpidioksidi, hiilimonoksidi sekä pakokaasujen hiukkaset. Nykyään hiilimonoksidin pitoisuus jää normaalia pienemmäksi tunneleissa, koska ajoneuvot ovat kehittyneitä päästöjen osalta. Päästöjen avulla lasketaan tunneliin tarvittava ilmavirta eri tilanteita varten.</p> <p>Maantietunneleihin rakennetaan ilmanvaihto laimentamaan haitallisia liikenteen päästöjä ja poistamaan tulipalossa syntyvä savu tunnelista. Suomessa uusia maantietunneleita rakennetaan harvoin, minkä vuoksi tunnelit suunnitellaan usein tapauskohtaisesti. Tämä opinnäytetyö antaa perusohjeita maantietunneleiden ilmanvaihdon suunnitteluun.</p>			
Asiasanat (avainsanat) Maanalaiset tilat, tunnelit, alikulut, tunnelinrakennus, ilmanvaihto, ilmanvaihtojärjestelmät			
Sivumäärä 24+7	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Kieli Suomi</td> <td style="width: 33%;">URN</td> </tr> </table>	Kieli Suomi	URN
Kieli Suomi	URN		
Huomautus (huomautukset liitteistä)			
Ohjaavan opettajan nimi Martti Veuro	Opinnäytetyön toimeksiantaja Etteplan Design Center Oy		

DESCRIPTION

 <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Date of the bachelor's thesis	
Author(s) Erno Airola		Degree programme and option Building services	
Name of the bachelor's thesis Ventilation of road tunnels			
<p>Abstract</p> <p>In road tunnels the ventilation is built to reduce the amount of toxic fumes in the tunnel and also to remove smoke if there is a fire. The Finnish Transport Agency sets the regulations and guidelines in Finland. The latest regulations were published in 2008. In Finland road tunnels are occasionally built. That is why every tunnel is designed case by case.</p> <p>There are two ways to execute the ventilation. The longitudinal ventilation utilize the whole tunnel as a duct whereas the transverse ventilation uses fresh air ducts and extraction ducts to move the air. The transverse ventilation is not affected by wind or other environmental factors. For smoke control the tunnel is equipped with motorised dampers which control the smoke out of the tunnel.</p> <p>The dimensioning of ventilation is based on vehicle emissions such as carbon monoxide and nitrogen dioxide. Today vehicles are so far developed that the amount of carbon monoxide is so low it can be ignored in the calculations. The required airflow in the road tunnel is calculated for different circumstances.</p> <p>This bachelor's thesis was made for an HVAC company from Kouvola. They were interested to know more about ventilation of road tunnels. The purpose of this thesis is to give them knowledge to design road tunnel ventilation in the future.</p>			
Subject headings, (keywords) Underground premises, tunnels, underpass, building of tunnels, ventilation, ventilation systems			
Pages 24+7	Language Finnish	URN	
Remarks, notes on appendices			
Tutor Martti Veuro		Bachelor's thesis assigned by Etteplan Design Center Ltd	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	MÄÄRÄYKSET JA OHJEET	1
3	ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT TUNNELEISSA.....	3
3.1	Pitkittäinen järjestelmä	3
3.2	Poikittainen järjestelmä	4
3.3	Puhaltimet	5
3.4	Ilmanvaihdon ohjaus.....	6
3.5	Savunpoisto.....	7
4	MITOITUS.....	9
4.1	Päästöt.....	9
4.2	Pitoisuudet ja mitoittava paloteho	10
5	LASKENTA.....	10
5.1	Päästöjen laskeminen	10
5.2	Ilmavirtojen laskeminen	13
5.3	Impulssipuhaltimen paine-erojen tasapaino ja työntövoima	14
5.4	Puhallintehon laskeminen norjalaisen ohjeen perusteella	17
6	MALLISUUNNITELMA	18
6.1	Mitoitusnopeudella etenevä liikenne	19
6.2	Ruuhkautuva liikenne	20
6.3	Puhallinteho palotilanteessa.....	22
7	JOHTOPÄÄTELMÄT	24
	LÄHTEET	25

LIITTEET

- 1 Jetfoil -puhaltimien tietoja
- 2 Jetfoil -puhaltimien koodit
- 3 Mallisuunnitelma

1 JOHDANTO

Maantietunneleissa on paljon erilaisia järjestelmiä, jotka vaikuttavat liikenteen turvallisuuteen. Maantietunneleihin on kiinnitetty yhä enemmän huomiota liikenneonnettomuuksien jälkeen, joita sattui Ranskan, Sveitsin ja Itävallan maantietunneleissa vuosituhaten vaihteessa [1]. Opinnäytetyössäni käsitellään näistä järjestelmistä maantietunneleiden ilmanvaihtoa. Tutustun ilmanvaihtoa koskeviin määräyksiin, ohjeisiin sekä mitoitukseen. Maanalaisista liikenteelle tarkoitetuista tiloista tutkin ainoastaan maantietunneleita, joten rautatietunnelit ja paikoitustilat jäävät työn ulkopuolelle. Tavoitteena on tehdä suunnittelutoimistolle hyödyksi oleva maantietunnelitietopaketti, joka keskittyy ilmanvaihdon ohjeisiin ja mitoitukseen. Työni sisältää myös mallisuunnitelman, joka on tehty kuvitellulle maantietunnelille. Suunnitelmaan on kerätty tunnelin ilmanvaihdon mitoitukseen tarvittavia tietoja.

2 MÄÄRÄYKSET JA OHJEET

Suomessa käytettävät maantietunneleita koskevat määräykset ja ohjeet on annettu tiehallinnon (nykyinen liikennevirasto) toimesta 1.1.2008. Tämä ”Tietunnelien hallinnointi ja turvallisuutta koskevat määräykset ja ohjeet” julkaisu perustuu paljolti Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiiviin 2004/54/EY ”Euroopan laajuisen tieverkon tunnelien turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista”. Tiehallinnon antamat määräykset ja ohjeet täydentävät vuonna 2005 annettua luonnosta ”Tietunnelin suunnitteluohje”. Kyseisen luonnoksen jälkeen ei ole julkaistu uutta versiota suunnitteluohjeista. Koska uusia tunneleita tehdään Suomessa harvoin, niin ilmanvaihto ja muut tekniset järjestelmät suunnitellaan useimmiten tapauskohtaisesti. Käytännössä tilaaja asettaa tekniset vaatimukset esimerkiksi ilmanvaihdolle ja savunpoistolle, jonka jälkeen alan erikoiskonsultit ja laitetoimittajat tekevät suunnitelmat. Viimeiseksi tilaaja testaa, toteuttaako ratkaisut maantietunneleille asetetut vaatimukset. [2; 3.]

Kansainvälisellä tiejärjestöllä (PIARC = Permanent International Association Of Road Congresses) on olemassa maantietunneleita käsittelevä komitea, joka on laatinut vuosien varrella kansainvälisen tason suosituksia maantietunneleista. Kaikki tekniset raportit tunneleihin liittyen löytyvät tiejärjestön kotisivuilta joko ilmaiseksi ladattuina tai paperiversioina tilattuina. Raportteja on julkaistu vuodesta 1995 saakka ja ne käsittelevät tunnelien geometriaa, huoltoa, järjestelmiä, ympäristöä ja turvallisuutta. Ko-

tisivuilta löytyy myös suoraan internetissä selattava maantietunnelien käsikirja, jossa on käsitelty edellä mainittuja raportteja. [3.]

Liikennevirasto on Suomen tunnelien hallintoviranomainen. Se varmistaa, että tunnelien hallinnoijat, turvallisuusvastaavat sekä tarkastusyksiköt toteuttavat niille määritetyt tehtävät ja toimenpiteet. Jokaisella tunnelilla, joka on suunnitteilla, rakenteilla tai käytössä, on oltava hallinnoija. Tunnelin hallinnoijana on yleensä se Tiehallinnon piiri, jonka alueella tunneli sijaitsee. Hallinnoijan tehtävät voidaan erikseen sopia kolmannen osapuolen, kuten esimerkiksi kunnan vastuulle. Tehtäviin kuuluu esimerkiksi tunnelin turvallisuusasiakirjojen laatiminen ja ajan tasalla pitäminen. Ennen tunnelin rakennustöiden aloittamista tunnelin hallinnoijalla tulee olla määräysten mukaiset suunnitteluvaiheen turvallisuusasiakirjat ja hallinnoijan on kuultava turvallisuusvastaavaa. Tunnelia koskevat suunnitelmat, asiakirjat ja turvallisuusvastaavan sekä tarkastusyksikön lausunnot toimitetaan hallintoviranomaiselle. Hallintoviranomainen hyväksyy suunnitelman, kun se on asianmukaista. [3.]

Turvallisuusasiakirjat sisältävät tarvittavat ennalta ehkäisevät toimenpiteet ja turvallisuustoimet tienkäyttäjien turvallisuuden takaamiseksi. Asiakirjoissa otetaan huomioon liikuntarajoitteiset, tunnelirakenteet, tunnelin ympäristö, liikenteen luonne sekä pelastuspalveluiden toiminta-ala. Turvallisuusasiakirjojen sisältö vaihtelee kolmen vaiheen mukaan: suunnitteluvaihe, käyttöön otettava tunneli ja käytössä oleva tunneli. Suunnitteluvaiheessa tunnelin turvallisuusasiakirjoihin kuuluu kuvaus suunnitellusta tunnelista ja siihen liittyvistä teistä tai kaduista. Lisäksi ovat asiakirjat, joista näkyy tunnelin rakennustapa ja rakenteet sekä se, mitä tunnelin käyttöön liittyviä järjestelyjä suunnitellaan. Mukana on myös liikenne-ennuste, jossa määritetään ja perustellaan vaarallisten aineiden kuljetuksia koskevat edellytykset sekä riskianalyysi. [3.]

Käyttöön otettavan tunnelin turvallisuusasiakirjoissa on edellä mainittujen asiakirjojen lisäksi esimerkiksi luettelo tehdyistä riskianalyyseistä, suunnitelmat kiertoteistä tunnelin ollessa suljettuna ja suunnitelma säännöllisistä harjoituksista. Käytössä olevan tunnelin turvallisuusasiakirjat sisältää kaiken edellä mainitun lisäksi raportit mahdollisista tunnelissa tapahtuneista onnettomuuksista ja vaaratilanteista sekä luettelon suoritettamista turvallisuusharjoituksista. [3.]

Määräykset asettavat erilaisia vaatimuksia koneelliselle ilmanvaihdolle. Sitä tarvitaan, jos liikenne on kaksisuuntainen tai yksisuuntainen ja tunnelin pituus on yli 1000 metriä sekä liikenteen määrä yli 4000 ajoneuvoa/d. Koneellisen ilmanvaihdon tarve voi olla perusteltua myös lyhyemmillä tunneleilla, jos niillä on paljon liikennettä. Pitkittäistä järjestelmää ei saa käyttää kaksisuuntaisissa tunneleissa tai edes yksisuuntaisissa, jos niissä on ruuhkautumisen riski. Nämä vaatimukset voidaan joka tapauksessa ohittaa tekemällä riskianalyysi, joka osoittaa järjestelmävalinnan hyväksyttäväksi. Yli 3000 metrin kaksisuuntaisissa tunneleissa on eri vaatimuksia poikittaiselle järjestelmälle. Kyseiseen tunneliin on laitettava erikseen tai ryhmissä ohjattavat ilman- ja savunpoistopellit sekä ilman virtausnopeutta on seurattava jatkuvasti ja tehtävä tarvittavia muutoksia ohjaukseen säätöpelleillä ja puhaltimilla. [3.]

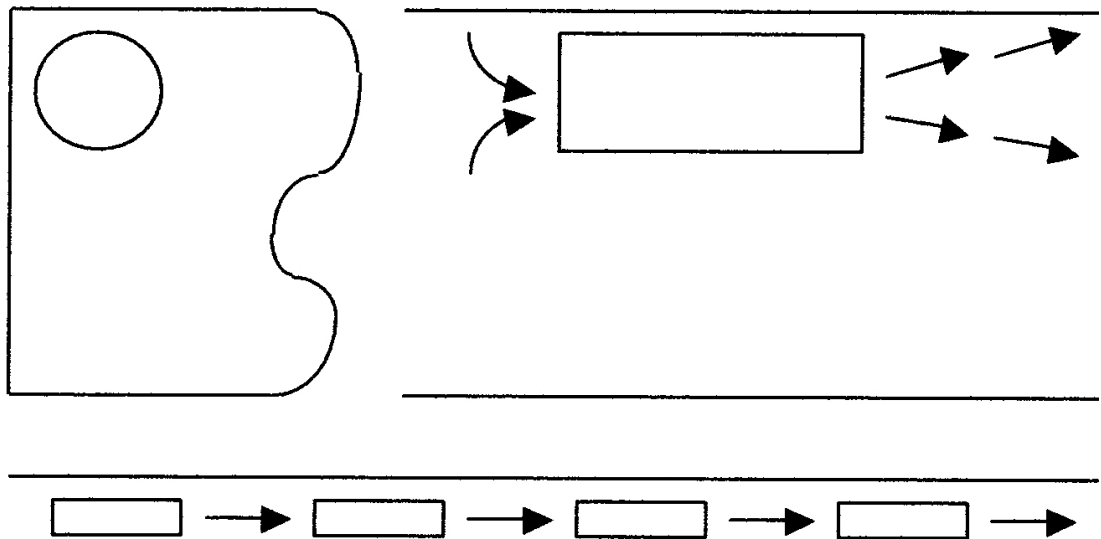
3 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT TUNNELEISSA

Ilmanvaihdolla vähennetään liikenteen epäpuhtauksien määrää ja poistetaan tulipalon sattuessa savu tunnelista. Näin varmistetaan kuljettajien ja pelastushenkilökunnan turvallisuus onnettomuuksien tapahtuessa. Suurimmat liikenteen aiheuttamat epäpuhtaudet ovat hiilimonoksidi (CO), typen oksidit (NO_x) sekä dieselin hiukkaset. Maantietunnelin ilmanvaihtojärjestelmää valittaessa on otettava huomioon useita erilaisia tekijöitä. Näihin kuuluvat esimerkiksi tunnelin pituus, rakennusmenetelmät, vaatimukset tulipalon sattuessa sekä rakennus- ja käyttökustannukset. Kuten kaikki tekniset järjestelmät tunneleissa, ilmanvaihtojärjestelmä joutuu kestävänsä suurta kuormitusta. Tämän vuoksi ilmanvaihtojärjestelmää valittaessa on hyvä ottaa ajoissa huomioon huoltojärjestelmät ja niiden toteuttaminen kyseessä olevaan tunneliin. Tunnelien ilmanvaihtojärjestelmät jakautuvat kahteen päämenetelmään, joista on kerrottu seuraavissa luvuissa. [3; 5.]

3.1 Pitkittäinen järjestelmä

Pitkittäisessä järjestelmässä tuloilma johdetaan tunneliin sen toisesta päästä ja poistoilma ulos joko toisesta päästä tai myös keskeltä tunnelia. Pitkät tunnelit jaetaan osiin varustamalla ne väli-ilmanotoilla ja ilmanpoistoilla, jos laskelmista saadut virtausnopeudet ylittävät yksisuuntaisissa tunneleissa 10 m/s ja kaksisuuntaisissa 7 m/s. Tähän järjestelmään ei käytetä ollenkaan kanavia. Ilmavirta aikaansaadaan puhaltimilla ja usein käytetään impulssipuhaltimia. Lyhyemmissä tunneleissa voidaan myös hyödyn-

tää mäntävaikutusta, jossa ajoneuvo työntää edessään olevaa ilmaa ja samalla vetää takana olevaa ilmaa mukaansa luoden ilmavirtauksen liikenteen suuntaan nähden. Kuvassa 1 on esitetty ilmavirran liikkuminen sekä puhaltimilla että mäntävaikutuksen avulla. Tulipalon sattuessa savu liikkuu ilmavirran suuntaisesti vain toiseen päähän tunnelia. Tämä johtaa siihen, että pitkittäinen järjestelmä on erittäin paloturvallinen, kun kyseessä on yksisuuntainen liikenne. Kaksisuuntaisen liikenteen tunnelissa pitkittäistä järjestelmää voidaan käyttää vain, jos riskianalyysi sen sallii. Todella pitkissä tunneleissa pitkittäisen järjestelmän käyttö ei ole mahdollista, koska sillä ei saavuteta riittävää ilmanvaihtoa. Tämä johtuu ilmavirran nopeuden rajoittamisesta alle 10 m/s turvallisuussyistä. [3; 5; 4]

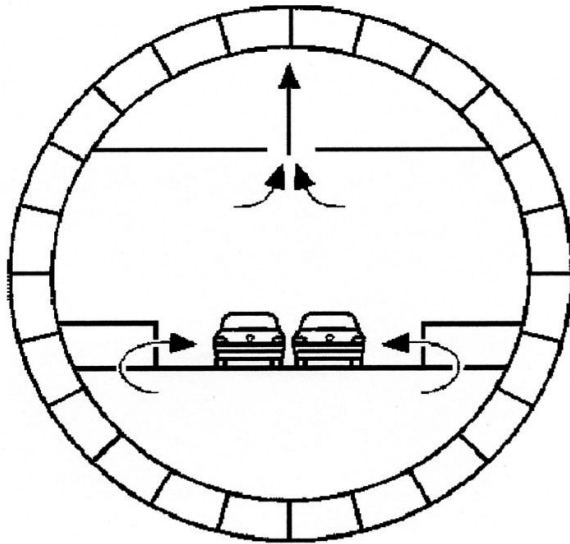


KUVA 1. Ilmavirran liike pitkittäisessä järjestelmässä [5]

3.2 Poikittainen järjestelmä

Poikittainen järjestelmä voidaan tehdä tunneliin joko osittain tai kokonaan. Puolipoikittaisessa järjestelmässä tuloilma tuodaan tunneliin kanavia pitkin koko tunnelin pituudelta ja puhalletaan poikittain lähes tienpinnan tasolle. Poistoilma kulkeutuu mäntävaikutuksen avulla pois. Poikittaisessa järjestelmässä sekä tuloilma että poistoilma liikutetaan kanavia pitkin. Tuloilma puhalletaan alhaalta, jolloin se sekoittuu pakokaasujen kanssa ja johdetaan ylhäällä sijaitsevan poistoilmakanavan kautta ulos. Savunpoiston kannalta täytyisi olla mahdollisuus tehostaa ilmanvaihtoa, jotta savu ei leviä tunnelissa. Savunpoistoa varten on oma savunpoistokanava ja savunpoistopuhaltimet. Eristääkseen savun tulipalon sijaitsevaan tunnelin osaan pidetään viereiset osat yli-

paineisina. Poikittaisen järjestelmän toimivuus ei riipu tuulesta eikä liikenteen aiheuttamasta ilmavirrasta, mikä tekee siitä varmemman ratkaisun liikenteestä riippumatta. Pääasiassa järjestelmää käytetään pitkissä moottoritietunneleissa, joissa on paljon liikennettä. Teknisesti poikittainen järjestelmä on huomattavasti vaativampi ja kalliimpi kuin pitkittäinen järjestelmä, minkä vuoksi pitkittäinen on aina ensisijainen vaihtoehto. [4; 5.]



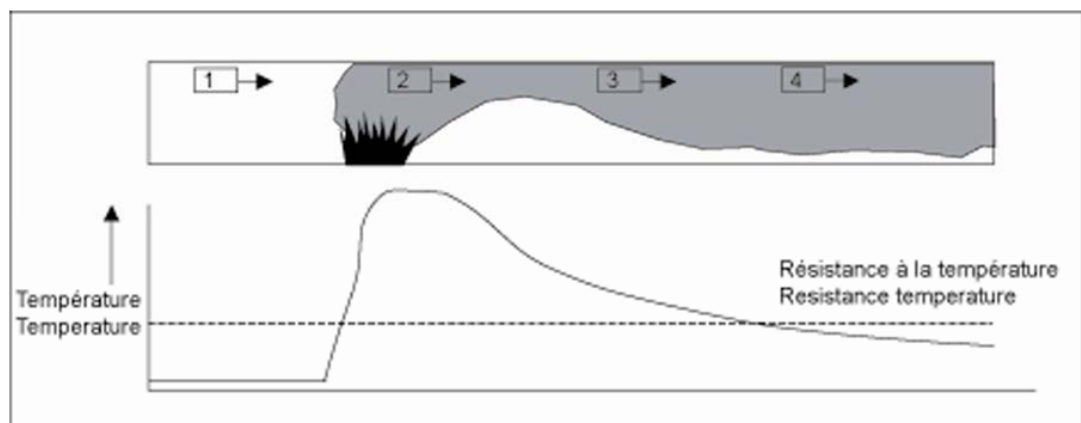
KUVA 2. Tulo- ja poistoilma poikittaisessa järjestelmässä [5]

3.3 Puhaltimet

Maantietunneleissa, joissa on pitkittäinen järjestelmä, käytetään useimmiten suuren työntövoiman omaavia impulssipuhaltimia. Ne ovat puhallussuunnaltaan käännettävissä ja työntövoiman tulee olla yhtä suuri myös toiseen suuntaan. Puhaltimet on varustettu molemmilla puolin äänenvaimentimilla, jotka ovat sylinterimallisia. Puhaltimen aiheuttama äänenpainetaso tunnelissa ei saisi ylittää 85 dBA 1,5 m korkeudella tien pinnasta. Puhaltimet asennetaan lähes poikkeuksetta kattoon, ja niitä voi olla useampia rinnakkain, jos tarvitaan esimerkiksi enemmän työntövoimaa. Yleisimmin puhaltimet sijoitetaan n. 80 m välein toisistaan varmistaen, että ilmavirran nopeus pysyy tasaisena koko tunnelin pituudella. [5.]

Tulipalo vaikuttaa kahdella tapaa impulssipuhaltimiin. Savun korkea lämpötila ja matala tiheys aiheuttavat pienemmän työntövoiman sekä tulen puolella sijaitsevat puhaltimet voivat lakata toimimasta. Kuvassa 3 on esitetty puhaltimien toimivuus tulipalon sattuessa. Puhaltimet 2 ja 3 eivät toimi korkean lämpötilan takia ja puhaltimella 4 on

huomattavasti huonompi työntövoima verrattuna puhaltimeen 1 matalamman tiheyden takia. Puhaltimissa käytetyt lämpötilakestävydet ovat yleensä joko 250 °C tai 400 °C. Esimerkiksi Fläkt Woodsin tunneli-ilmanvaihdolle suosittelemilla puhaltimilla on todettu 400 °C lämpötilakestävyys kahden tunnin ajalle. Näilläkin lämpötilakestävyksillä puhaltimet lakkaavat mitä todennäköisimmin toimimasta, jos tulipalo sijaitsee suoraan puhaltimien alapuolella tai lähietäisyydellä. Paras sijainti puhaltimille on tunnelin suuaukolla, jossa tulen ja kuuman savun aiheuttamat häiriöt ovat kaikista vähäisimmät. Tämä sijainti on kuitenkin mahdollinen vain pienelle osalle kaikista tunnelin puhaltimista. [5; 7.]



KUVA 3. Tulipalon aiheuttaman lämpötilan vaikutus impulssipuhaltimiin [7]

Aksiaalipuhaltimia käytetään poistopiipuissa ja erillisissä raitisilmanotoissa. Tutkimusten mukaan savun ja puhtaan ilman sekoitus siirtää lämpöä kanavaan ennen puhallinta, minkä vuoksi lämpötila puhaltimen luona voi jäädä 200 °C, jos tuli ei sijaitse poiston lähietäisyydessä. Kuitenkin tulipalon sattuessa juuri savunpoistopisteen lähellä, lämpötila voi nousta reilusti yli 200 °C, minkä takia puhaltimien lämpötilakestävyttä on lisätty vuosien aikana. [3; 6; 7.]

3.4 Ilmanvaihdon ohjaus

Ilmanvaihtoa voidaan ohjata tunnelissa kolmella eri tavalla, jotka toimivat kaikki automaattisesti. Pitoisuusohjauksessa tunneliin ja sen suuaukoille sijoitetaan antureita, jotka mittaavat esimerkiksi NO₂-pitoisuutta. Ilmanvaihtoa ohjataan pitoisuuksien ja asetettujen arvojen mukaan. Aikaohjauksessa puhaltimet toimivat haluttuina kellonaikoina kuten ruuhka-aikana. Pitkittäistä järjestelmää käytettäessä voidaan ilman-

vaihtoa ohjata tuuliohjauksella. Ohjaukseen tarvitaan tuulensuunta- ja tuulennopeusantureita. [6.]

Jos tuulen aiheuttama ilman virtausnopeus ylittää tunnelille asetetun raja-arvon, puhaltimet pysähtyvät. Puhaltimien pyörimissuunta vaihtuu, jos tuuli puhaltaa puhallussuuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan. Heti kun tulipalo havaitaan tunnelissa, ilmanvaihdon ohjaus siirtyy suoraan erilliseen palotilanteen ohjaukseen. Savunpoistoa voidaan ohjata valvomosta sekä tunnelin molemmilla suuaukoilla sijaitsevista ohjauskaapeista. Poistumiskäytävät pidetään ylipaineistettuina, jotta ne pysyisivät savuttomina. Jos tunneleita on kaksi, onnettomuustunneli pidetään alipaineisena toiseen tunneliin nähden. Tunneleiden väliset yhdyskäytävät varustetaan puhaltimilla, jotka pitävät käytävät ylipaineisina. [6.]

3.5 Savunpoisto

Tulipalossa syntyvien vaarallisten kaasujen kuten hiilimonoksidin ja syaanivedyn poistaminen maantietunnelista on yksi tärkeimmistä turvallisuustekijöistä. Savunpoistolla varmistetaan liikenteen turvallisuus, suojataan rakenteita ja mahdollistetaan turvallisemmat pelastustoimet. Yleisimmin käytetyssä pitkittäisessä järjestelmässä savunpoisto toimii impulssipuhaltimilla, jotka puhaltavat savun toiselle tunnelin suuaukolle. Sen lisäksi täytyy olla savunpoisto esimerkiksi katossa kanavien kautta, jotta saavutetaan tarpeellinen savunpoisto. [7.]

Puhaltimien ja niiden kiinnitysrakenteiden tulee kestää tulipalon aiheuttama suuri lämpötilan nousu. Tunneleihin voidaan tarvittaessa tehdä myös savunpoistokuiluja, joissa on savunpoistoon soveltuvat puhaltimet. Tärkeintä savunpoistossa on varmistaa ilman virtausnopeuden riittävyys takaisinvirtauksen estämiseksi. Jos tunneli on yhteen suuntaan kalteva ja kaltevuus on yli 3 prosenttia, on selvitettävä, tarvitseeko virtausnopeutta lisätä estämään niin sanottu savupiippuvaikutus. Kaltevan maantietunnelin kohdalla se tarkoittaisi savun liikkuvan ylempänä sijaitsevalle suuaukolle. [7.]

Poikittaisessa järjestelmässä tarkoituksena on pitää savu kuumana kerroksena tunnelin katon alla, josta se voidaan poistaa. Huomiota on kiinnitettävä savun poistoilmavirtaukseen sekä pitkittäisen ilmavirran hallintaan. Maantietunneleissa esimerkiksi autojen liike ja tunnelin päiden välinen paine-ero aiheuttavat pitkittäistä ilmavirtaa, joka häi-

ritsee savun kerrostumista. Tämän vuoksi savun kerrostuminen on hankalaa, ja siihen on syytä kiinnittää huomiota ilmanvaihdossa. Savunpoistopuhaltimilla täytyy varmistaa tarvittava savun poistoilmavirta kaikkialle tunnelissa tulipalon sattuessa. [7.]

Ennen maantietunneleissa oli useita avoimia savunpoistokanavia 10 – 20 m välein. Tämä menettely on kehittynyt korvaamalla pienet aukot suuremmilla palopelleillä varustetuilla kanavilla, jotka on sijoitettu kauemmas toisistaan. Suositeltu etäisyys palopeltien välillä vaihtelee 50 – 100 m. Tunnelleissa käytettyjä palopeltejä ovat liukuvat, laskusiltamalliset ja rinnakkaisilla lavoilla täytetyt palopellit. Palopeltien on kestettävä suuria paineen vaihteluita ollessaan kiinni ja avautua näissä olosuhteissa. Painet voi vaihdella 2000 – 6000 Pascalia riippuen savunpoistokanavan pituudesta. Savunpoiston kannalta tärkeää on keskitetty valvonta ja laitteiston ohjaus. Tulipalon tarkka sijainti on tiedettävä, jotta savunpoisto voidaan keskittää tulialueelle avaamalla oikeat palopellit ja ohjata pitkittäistä ilmavirtaa säilyttääkseen savun kerrostumisen. [7.]

Savun kerrostumisen luonne on vielä paljolti tutkimuksen alla, ja sitä kehitetään jatkuvasti. Yksi päätekijä kerrostumisen säilyttämiselle näyttäisi olevan pitkittäisen ilmavirran nopeuden rajoittaminen. Kerrostuminen säilyy hyvin alle 2,5 – 3,0 m/s nopeuksissa. Nopea ilmavirta lisää turbulenssia ja savukerrosten sekoittumista sekä savun ja seinien välistä lämmönsiirtoa. Katossa sijaitseva kerrostuminen hajoaa ajoneuvojen liikkeen aiheuttamasta vedosta ja kerrostumisen läheisyydessä olevan impulssipuhaltimen aiheuttamasta turbulenssista. [7.]

Pitkittäisen ilmavirran nopeuden hallitsemiseksi suositellaan keskittymistä tuloilmavirtaan ja savun poistoilmavirtaan, mitkä aiheuttavat molemmat mahdollisia ongelmia savun kerrostumiseen. Tuloilman virtaus voi vaikuttaa kerrostumiseen puhaltamalla savukerroksen läpi, minkä takia tuloilmaventtiilit ei saisi sijaita lähellä kattoa. Toisaalta tutkimuksissa on todettu, että vaikka tuloilma tuodaan seinien alapäästä tunneliin, voi se silti aiheuttaa savun kerrostumisen hajoamista. Tämän vuoksi on suositeltavaa käyttää mahdollisimman pieniä virtausnopeuksia tuloilmassa. Luonnollisen ilmanvaihdon aiheuttamat ilmavirran muutokset tulipalon aikana voivat vaikuttaa paljon pitkittäisen ilmavirran nopeuteen. Poikittaisen järjestelmän maantietunneleissa, joissa on suuria ilmanpaineen vaihteluita, voi olla tarvetta asentaa impulssipuhaltimia varmistaa pitkittäisen ilmavirran nopeuden hallinta. [6; 7.]

4 MITOITUS

Maantietunneleiden ilmanvaihtoa mitoittaessa lähdetään liikkeelle keräämällä tarvittavat lähtötiedot liikenteen päästöjen laskentaa varten. Päästöt lasketaan erilaisiin tilanteisiin kuten ruuhkautuvalle, pysähtyneelle ja mitoitusnopeudella etenevälle liikenteelle. Mitoituksessa otetaan huomioon sekä ympäristössä että tunnelissa sallitut pitoisuudet päästöille. Mitoittava paloteho yritetään valita tapauskohtaisesti, minkä mukaan ilmanvaihto ja savunpoisto suunnitellaan. Päästömäärien ja sallittujen pitoisuuksien jälkeen voidaan laskea tarvittavat ilmamäärät.

Raitisilmavirran määrää mitoittaessa keskitytään vaatimuksiin koskien päästöjen laimentamista tunnelissa. Usein ilmanvaihdon suunnitelma on tehty suoraan laskelmista saatujen ilmavirtojen pohjalta ottamatta huomioon mäntävaikutuksen aiheuttamaa ilmavirtausta. [6; 7.]

4.1 Päästöt

Laskelmissa käytettävät päästöt ovat hiilimonoksidi (CO), typpidioksidi (NO₂) ja hiukkaset, jotka vaikuttavat näkyvyyteen. Laskentaa varten tarvittavat lähtötiedot sisältävät ajoneuvojen päästöt, jotka voidaan ilmoittaa ajoneuvoa kohden joko grammoina tunnissa, grammoina kilometrillä tai kuutiota kilometrillä. Sekä kevyiden että raskaiden ajoneuvojen määrät tarvitaan huipputunnin ajalta. Lisäksi tarvitaan liikenteen jakauma liikennesuuntiin huipputunnin aikana. Tunnelin ominaisuuksista on tiedettävä tunnelin pituus (km), pituuskaltevuudet (%). Mitoituksessa tarvitaan alarajat jokaisen päästön pitoisuudelle. Alustavia päästöjä arvioitaessa voidaan käyttää tiettyjä peruspäästöjä, joissa ei ole otettu huomioon katalysaattorien vaikutusta. Katalysaattorit otetaan huomioon laskentakaavoissa kertoimilla. Peruspäästöt on ilmoitettu vaakuoralle tielle ajonopeuden ollessa 60 km/h.

Nykyään ilmanvaihtoa varten ei välttämättä tarvitse laskea kuin typen oksidien päästöt, koska hiilimonoksidin merkitys on vähentynyt katalysaattorien sekä moottoreiden kehityksen takia. Raskaiden ajoneuvojen osuuden liikenteestä ollessa yli 15 % laskeaan myös hiukkasten päästöt. [6; 7.]

4.2 Pitoisuudet ja mitoittava paloteho

Ympäristössä sallittuina pitoisuuksina käytetään aina voimassa olevia Valtioneuvoston asettamia maksimituntiarvoja. Päästölaskennassa saaduille typpioksidien määriille arvioidaan muuttumisprosentti typpidioksidiksi (NO₂). Sitä tarvitaan ilmanvaihdon mitoitusta varten. Jos muuttumisprosentista ei ole tarkempaa tietoa, käytetään silloin tunnelissa 10 prosentin muuntoa. Tunnelissa sallittu NO₂-pitoisuus vaihtelee 400 – 800 µg/m³ välillä riippuen onko kyseessä taajama-alue vai haja-asutusalue. Norjalaisen mitoitusohjeen mukaan sallittu typpidioksidin pitoisuus tunnelissa on 1,5 ppm ja hiilimonoksidin pitoisuus on 200 ppm. Laskennassa on käytetty norjalaisen ohjeen arvoja. Hiukkaspitoisuus saa tunnelissa olla maksimissaan 1,5 mg/m³. Mitoitettavaa palotehoa valittaessa voidaan soveltaa taulukossa 1 esitettyjä arvoja, jos palotehoa varten tehty analyysi ei edellytä korkeampia arvoja. Analyysissä otetaan huomioon liikenteen määrä ja koostumus, vaarallisten aineiden kuljetukset sekä tunnelin ominaisuudet. [8.]

TAULUKKO 1. Mitoittava paloteho eripituisille tunneleille [6]

Tunnelin pituus (m)	Mitoittava paloteho (MW)
500<	20
500 – 1000	30
>1000	50

5 LASKENTA

Tässä luvussa esitetyt kaavat päästöjen, ilmavirtojen ja impulssipuhaltimien laskemiseksi käyvät alustaviin laskelmiin ilmanvaihtosuunnitelmaa varten. Lopulliset laskelmat tehdään aina tarkoituksen mukaisilla laskentaohjelmilla. Ensimmäiset kaavat ovat tunnelissa syntyvien yleisimpien päästöjen laskentaa varten. Näistä kaavoista saaduilla päästöarvoilla saadaan laskettua tarvittavat ilmavirrat.

5.1 Päästöjen laskeminen

Päästöjen laskennassa on monia kertoimia, jotka on huomioitava päästökohtaisesti. Erilaiset korjauskertoimet vaihtelevat tien kaltevuuden tai ajonopeuden mukaan. Kaavassa 1 lasketaan tunnelissa syntyvät typpioksidit. Kaavassa käytettävät NO_x –

peruspäästö ja katalysaattorivaikutuskerroin ovat vakioita. Ajoneuvot määritellään laskuissa erikseen kevyiksi ja raskaiksi ajoneuvoiksi. Kevyisiin ajoneuvoihin lukeutuvat henkilöautot sekä pakettiautot. Loput kuorma-autoa isommat ajoneuvot kuuluvat raskaasiin ajoneuvoihin. Kaavoissa käytetyt korjauskertoimet löytyvät taulukosta 2. Typpioksidit muutetaan typpidioksidiksi käyttämällä muuttumisprosenttia.

$$Q_{NO_x} = q_{NO_x} \times (k_{kat} \times M_l + k_t \times M_t) \times k_s \times L \left[m^3/h \right] \quad (1)$$

q_{NO_x}	NO_x -peruspäästö 0,0013 [m ³ /km/ajon.]
k_{kat}	katalysaattorivaikutuskerroin 0,3
M_l	kevyiden ajoneuvojen määrä [ajon./h]
k_t	korjauskerroin raskaille ajoneuvoille ajonopeuden mukaan
M_t	raskaiden ajoneuvojen määrä [ajon./h]
$k_s (NO_x)$	kaltevuuskorjauskerroin NO_x -päästöille
L	tunnelin pituus [km]

TAULUKKO 2. Korjauskertoimet NO_x -päästöille [6]

Kaltevuus, %	0	2	4	6	8	10
k_s	1,0	1,7	2,2	2,8	3,4	4,0
Ajonopeus, km/h	20	30	40	50	60	>60
k_t	8	7	5	3,5	2,5	2,5

Kaavassa 2 hiilimonoksidipäästöjä laskiessa otetaan aiempien korjauskertoimien lisäksi huomioon vielä korkeuskorjaus- ja nopeuskorjauskertoimet. Kaavassa käytettävä CO -peruspäästö on vakio. Tarvittavat kertoimet löytyvät taulukosta 3.

$$Q_{CO} = q_{CO} \times (k_{kat} \times M_l + M_t) \times k_{hh} \times k_s \times k_f \times L \left[m^3/h \right] \quad (2)$$

q_{CO}	CO -peruspäästö 0,013 [m ³ /km/ajon.]
k_{hh}	korkeuskorjauskerroin
$k_s (Q_{CO})$	kaltevuuskorjauskerroin CO -päästöille
k_f	nopeuskorjauskerroin

TAULUKKO 3. Korjauskertoimet CO -päästöille [6]

Tunnelin korkeus merenpinnasta, m	≥400	≥800						
k_{hh}	1,25	1,60						
Kaltevuus, %	-4	-2	0	2	4	6		
k_s	0,85	0,95	1	1,1	1,2	1,3		
Ajonopeus km/h	5	10	20	30	40	50	60	>60
k_f	6,3	3,5	2,0	1,5	1,2	1,1	1,0	0,9

Kaavassa 3 lasketaan hiukkaspäästöt, jotka otetaan huomioon lähinnä näkyvyyden takia. Kevyen liikenteen osuus hiukkasten esiintymiseen on laskettu olevan 8 prosenttia. Hiukkaspäästöjä varten on myös korkeuskorjauskerroin, mutta eri arvoilla. Kaltevuuskorjauskertoimena käytetään alamässä arvoa $k_s = 0,5$. Muuten kaikki tarvittavat kertoimet löytyvät taulukosta 4. Taulukossa annetut kaltevuuskorjauskertoimet koskevat ylöspäin kaltevia teitä, jolloin nolla tarkoittaa tasaista tietä. [6.]

$$P_{vis} = p_{vis} \times (M_l \times 0,08 + M_t) \times k_{hh} \times k_s \times L \left[\frac{mg}{h} \right] \quad (3)$$

p_{vis} perushiukkaspäästö 750 [mg/km/ajon.]

$k_s (P_{vis})$ kaltevuuskorjauskerroin hiukkaspäästöille

TAULUKKO 4. Korjauskertoimet hiukkaspäästöille [6]

Tunnelin korkeus merenpinnasta, m	500	600	700	800		
k_{hh}	1,12	1,24	1,35	1,47		
Kaltevuus, %	0	2	4	6	8	10
k_s	1,0	1,8	2,7	3,6	4,5	5,2

5.2 Ilmavirtojen laskeminen

NO₂-pitoisuuden mukaan laskettu ilmavirta on laskettu kaavassa 4. Jos kokonaispäästö (Q_{NO2}) on laskettu grammoissa (g), se voidaan muuntaa m³/h-arvoksi jakamalla luvulla 1900.

$$Q_{ilma} = Q_{NO2} \times \frac{10^6}{NO_{2lim}} \left[m^3/h \right] \quad (4)$$

Q_{NO2} NO₂-kokonaispäästö [m³/h]

NO_{2lim} tunnelissa sallittu NO₂-pitoisuus [ppm]

CO -pitoisuuden mukaan laskettu ilmavirta on kaavassa 5.

$$Q_{ilma} = Q_{CO} \times \frac{10^6}{CO_{lim}} \left[m^3/h \right] \quad (5)$$

Q_{CO} CO -kokonaispäästö [m³/h]

CO_{lim} tunnelissa sallittu CO -pitoisuus [ppm]

Näkyvyyden mukaan laskettu ilmavirta on kaavassa 6.

$$Q_{ilma} = \frac{P_{vis}}{C_{vis}} \left[m^3/h \right] \quad (6)$$

P_{vis} kokonaishiukkaspäästö [mg/h]

C_{vis} tunnelissa sallittu hiukkaspitoisuus 1,5 [mg/m³]

Kaikissa edellä olevissa ilmavirran laskentakaavoissa oletuksena on, että ilmanpaine on normaali 101,3 kPa ja ilman lämpötila 0 °C. Kaavassa 7 muutetaan ilmavirran tarve vastaamaan tunnelissa vallitsevaa ilmanpainetta ja lämpötilaa.

$$Q_{ilma} = Q_{ilma} \times \frac{P_0 \times T_t}{P \times T_0} \left[m^3/h \right] \quad (7)$$

P₀ ilmanpaine 101,3 kPa

T_t keskilämpötila tunnelissa

P paine tunnelissa [kPa]

T_0 ilman lämpötila 0 °C

5.3 Impulssipuhaltimen paine-erojen tasapaino ja työntövoima

Maantietunneleissa käytetyille impulssipuhaltimille lasketaan yleensä työntövoima yhtä puhallinta kohden ja puhaltimen aiheuttama paine. Paine-eroille on tasapainokaava, jonka toisella puolella on puhaltimien lukumäärä sekä aiheuttama paine ja toisella puolella kaavaa on liikenteen, tunnelin ominaisuuksien ja meteorologisten vaikutusten aiheuttamat painehäviöt. Kaavalla 8 voidaan laskea esimerkiksi tarvittava puhaltimien määrä painehäviöiden kattamiseksi tai laskea yhdelle puhaltimelle tarvittava paine. [7.]

$$n_j \times \Delta p_j = \Delta p_{veh} + \Delta p_{tu} + \Delta p_{MT} \quad (8)$$

n_j	puhaltimien lukumäärä
Δp_j	yhden puhaltimen aiheuttama paine
Δp_{veh}	liikenteen aiheuttama painehäviö
Δp_{tu}	tunnelin ominaisuuksien aiheuttama painehäviö
Δp_{MT}	meteorologisten vaikutusten aiheuttama painehäviö

Tasapainokaavasta on jätetty pois tulen ja termostaattisten vaikutusten aiheuttamat painehäviöt. Yhden puhaltimen aiheuttama paine saadaan laskettua kaavalla 9, jossa ideaalinen puhaltimen aiheuttama paine kerrotaan sitä heikentävillä hyötysuhteilla. Puhaltimen päässä esiintyvä ilman pyörre ja turbulenssi vaikuttavat puhaltimen hyötysuhteeseen η_1 . Seinän kitkan aiheuttamaan asennushyötysuhteeseen η_2 vaikuttaa puhaltimen etäisyys seinästä halkaisijan mukaan. Mitä lähempänä puhallin on seinää, sitä pienempi hyötysuhde on. Asennushyötysuhteet löytyvät taulukosta 5. Hyötysuhteeseen η_3 vaikuttaa puhaltimien etäisyys toisistaan sekä ohjauslevyjen käyttö, jotka vähentävät tarvittavaa etäisyyttä puhaltimien välillä. [7.]

$$\Delta p_j = \Delta p_{j0} \times \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \quad (9)$$

Δp_{j0}	ideaalinen puhaltimen aiheuttama paine
η_1	puhaltimen hyötysuhde $\eta_1 = 0,9$
η_2	asennushyötysuhde

η_3 etäisyyden hyötysuhde η_3

TAULUKKO 5. Asennushyötysuhde η_2 puhaltimen sijainnin mukaan [7]

Puhaltimen sijainti seinään ja kattoon nähden	η_2
1 puhallin kulmassa, käytännössä seinässä ja katossa kiinni	0,7
1 puhallin, reuna $\frac{1}{2}$ d päässä seinästä ja katosta	0,8
1 puhallin, reuna 1 d päässä seinästä ja katosta	0,9
1 puhallin, kokonaan syvennyksessä	0,8
Useita puhaltimia, kokonaan syvennyksessä	0,7

Ideaalinen puhaltimen aiheuttama paine lasketaan kaavalla 10.

$$\Delta p_{jo} = \rho \times Q_j \times (u_j - u^*) \times \frac{1}{A_T} \quad (10)$$

ρ	ilman tiheys 0 °C [kg/m ³]
Q_j	ilmavirta puhaltimen läpi [m ³ /s]
u_j	puhaltimen puhallusnopeus [m/s]
u^*	ilmavirran nopeus tunnelissa [m/s]
A_T	tunnelin poikkipinta-ala [m ²]

Kaavojen 9 ja 10 avulla saadaan aikaan impulssipuhaltimen työntövoiman laskenta-kaava 11.

$$F_j = \Delta p_j \times A_t = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \rho \times Q_j \times (u_j - u^*) \quad (11)$$

F_j yhden puhaltimen työntövoima [N]

Liikenteen aiheuttaman painehäviön laskeminen on esitetty kaavassa 12. Se ottaa huomioon ajoneuvojen määrän, nopeuden ja poikkipinta-alan. Kaavalla voidaan laskea painehäviöt kaksisuuntaiselle liikenteelle, jolloin liikenne on jaettu kaavassa kulkusuunnassa ilmavirtaan nähden. Erilaisten ajoneuvojen poikkipinta-alat ja vakiot löytyvät taulukosta 6. [6.]

$$\Delta p_{veh} = \left(\frac{i_F \times A_F}{\left(1 - \frac{A_F}{A_T}\right)^2} \right) \times \frac{\rho}{2} \times (N^+ \times (v_t - u)^2 - N^- \times (v_t + u)^2) [N] \quad (12)$$

N^+	liikenteen määrä ilmavirran suuntaan [ajon./h]
N^-	liikenteen määrä ilmavirtaa vastaan [ajon./h]
L	tunnelin pituus [m]
i_F	ajoneuvon vastusvakio
A_F	ajoneuvon poikkipinta-ala [m ²]
v_t	ajoneuvon nopeus [m/s]
u	ilmavirran nopeus [m/s]

Liikenteen ollessa yksisuuntaista voidaan kaava 12 lyhentää muotoon:

$$\Delta p_{veh} = \left(\frac{i_F \times A_F}{\left(1 - \frac{A_F}{A_T}\right)^2} \right) \times \frac{\rho}{2} \times (N^+ \times (v_t - u)^2) [N]$$

TAULUKKO 6. Ajoneuvojen poikkipinta-aloja ja vastusvakioita [7]

Ajoneuvo	Poikkipinta-ala A_F [m ²]	Vastusvakio i_F
henkilöautot	2	0,35
kuorma-autot	3-5	0,8
rekat	7	0,8

Tunnelin ominaisuuksien aiheuttama painehäviö saadaan laskettua kaavalla 13, joka ottaa huomioon tunnelin sisäänkäynnin muodon ja kitkakertoimen. Sisäänkäynnin muodon takia lisätty painehäviö (ζ) voi olla 0,1 (pyöristetty sisäänkäynti) tai 0,5 (normaali teräväreunainen sisäänkäynti). Kitkakerroin (λ) sisältää seinien karheuden ja asennettujen valotaulujen ja kylttien aiheuttaman kitkan. Tunnelin seinän ollessa kauttaaltaan sileää betonia kerroin voi olla 0,025. Karhean ja epätasaisen seinän kanssa kerroin voi olla lähempänä 0,05. Luku 1 kaavassa tarkoittaa vähimmäispainehäviötä, jolla aikaansaadaan tunnelissa ilmavirran nopeuden dynaaminen paine. [7; 8.]

$$\Delta p_{tu} = \left(1 + \zeta + \lambda \frac{L}{D}\right) \times \frac{\rho}{2} \times u^2 \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (13)$$

ζ	tunnelin sisäänkäynnin muodosta johtuva painehäviö
λ	kitkakerroin (0,025 – 0,05)
D	tunnelin hydraulinen halkaisija [m]: $D = \frac{4 \times \text{tunnelin poikkipinta-ala}}{\text{tunnelin poikkipinta-alan piiri}}$
u	tarvittava ilmavirran nopeus [m/s]

5.4 Puhallintehon laskeminen norjalaisen ohjeen perusteella

Norjalaisten 2004 laatimasta maantietunnelien ohjekirjasta löytyy puhallintehon mitoitus, joka perustuu luonnollisten voimien aiheuttamiin painehäviöihin sekä valittuun palotehoon. Ensiksi lasketaan luonnollisten voimien aiheuttama painehäviö. Päätetyn palotehon sekä lasketun luonnollisten voimien aiheuttaman painehäviön avulla valitaan kuvaajasta ilman laskennallinen virtausnopeus sekä laskennallinen paine. Saaduilla arvoilla saadaan laskettua tarvittava työntövoima puhaltimille. Kaavassa 14 lasketaan luonnollisten voimien aiheuttama paine. [8.]

$$\Delta p = \frac{1}{2} \times \rho_{ulko} \times u_x^2 + (\rho_{ulko} - \rho_{sisä}) \times g \times \Delta H \quad (14)$$

Δp	luonnollisten voimien aiheuttama paine [Pa]
ρ_{ulko}	ilman tiheys ulkona [kg/m^3]
$\rho_{sisä}$	ilman tiheys tunnelissa [kg/m^3]
u_x	ulkopuolisen tuulen nopeus [m/s]
g	putoamiskiihtyvyys [m^2/s]
ΔH	korkeusero suuaukkojen välillä [m]

Tarvittava työntövoima saadaan laskettua kaavalla 15, joka huomioi varmuus- ja asennuskertoimet. Kaavassa käytetään varmuuskertoimenä arvoa 1,1; joka oli norjalaisessa ohjeessa.

$$P_V = \frac{n_s}{n_v} \times \Delta P_s \times A_T \quad (15)$$

P_V	Tarvittava työntövoima [N]
η_s	varmuuskerroin
η_v	puhallinasennuksen huomioiva kerroin

ΔP_s kuvaajasta saatu painearvo [Pa]

6 MALLISUUNNITELMA

Mallisuunnitelmaa varten kerätyt lähtötiedot ovat sovittu opinnäytetyön tilaajan kanssa. Kaikki lukuarvot löytyvät taulukosta 7, joka sisältää sallitut päästöjen arvot, ajoneuvojen määrät ja jakauman sekä tunnelin mitat. Tunnelissa päästöjen sallitut pitoisuudet ovat otettu norjalaisesta ohjeesta. Tunnelin ilmanvaihto tehdään pitkittäisellä järjestelmällä, ja savunpoistoa varten tunneli jaetaan kolmeen savuosastoon. Savunpoisto toimii samoilla kattoon asennetuilla puhaltimilla kuin ilmanvaihto. Puhaltimet toimivat palotilanteessa osastoittain. Ne käynnistyvät ja sammuvat pareittain ohjaten savun ulos tunnelista lähimmästä päädyistä.

TAULUKKO 7. Maantietunnelin lähtötiedot suunnitelmaa varten

Tunnelin pituus	L	2000 m
Tunnelin pituuskaltevuus		2 %
Tunnelin poikkipinta-ala	A_T	49,66 m ²
Tunnelin hydraulinen halkaisija	D	7,43 m
Korkeusero suuaukkojen välillä	ΔH	40 m
Mitoittava liikennemäärä, josta		2500 ajon./h
kevyen liikenteen osuus 85 %	M_l	2125 ajon./h
raskaan liikenteen osuus 15 %	M_t	375 ajon./h
Mitoitustilanteen ajonopeus	v	70 km/h \approx 19,44 m/s
Ruuhkautuvan liikenteen ajonopeus	v	20 km/h \approx 5,56 m/s
Tunnelissa sallittu NO ₂ -pitoisuus	NO _{2lim}	200 ppm
Tunnelissa sallittu CO ₂ -pitoisuus	CO _{lim}	1,5 ppm
Typpioksidin muuttumisprosentti typidioksidiksi		10 %
Mitoittava paloteho	P	20 MW
Ilman tiheys ulkona (10 °C)	ρ_{10}	1,29 kg/m ³
Ilman tiheys tunnelissa (0 °C)	ρ_0	1,24 kg/m ³
Ulkopuolisen tuulen nopeus	u_x	5 m/s

Ensimmäisessä tilanteessa lasketaan liikenteen aiheuttamat päästöt mitoitusnopeudella etenevälle liikenteelle ja toisessa tilanteessa ruuhkautuvalle liikenteelle.

6.1 Mitoitusnopeudella etenevä liikenne

Suunnitelmaa varten mitoitusnopeudeksi on valittu 70 km/h. Tässä luvussa on laskettu mitoitustilanteen mukaiset päästöt ja ilmavirrat. Kaavassa 16 lasketaan typpioksidin määrä suunnitellussa tunnelissa.

$$\begin{aligned}
 Q_{NO_x} &= q_{NO_x} \times (k_{kat} \times M_l + k_t \times M_t) \times k_s \times L \\
 &= 0,0013 \text{ m}^3/\text{km}/\text{ajon.} \times \left(0,3 \times 2125 \text{ ajon.}/\text{h} + 2,5 \times 375 \text{ ajon.}/\text{h} \right) \times 1,7 \times 2\text{km} \\
 &= 6,96 \text{ m}^3/\text{h} \tag{16}
 \end{aligned}$$

Typpioksidin muuttaminen typpidioksidiksi on laskettu kaavassa 17.

$$Q_{NO_2} = 0,1 \times Q_{NO_x} = 0,1 \times 6,96 \text{ m}^3/\text{h} = 0,696 \text{ m}^3/\text{h} \tag{17}$$

Hiilimonoksidin määrä tunnelissa lasketaan kaavassa 18.

$$\begin{aligned}
 Q_{CO} &= q_{CO} \times (k_{kat} \times M_l + M_t) \times k_{hh} \times k_s \times k_f \times L = 0,013 \text{ m}^3/\text{km}/\text{ajon.} \times \\
 &(0,3 \times 2125 + 375) \times 1 \times 1,1 \times 0,9 \times 2\text{km} = 26,06 \text{ m}^3/\text{h} \tag{18}
 \end{aligned}$$

Tunnelissa syntyvät hiukkaspäästöt lasketaan kaavassa 19.

$$\begin{aligned}
 P_{vis} &= p_{vis} \times (M_l \times 0,08 + M_t) \times k_{hh} \times k_s \times L \left[\frac{\text{mg}}{\text{h}} \right] = 750 \text{ mg}/\text{km}/\text{ajon.} \times \\
 &(2125 \times 0,08 + 375) \times 1,8 \times 2\text{km} = 1471500 \text{ mg}/\text{h} \tag{19}
 \end{aligned}$$

Edellä laskettujen päästöjen avulla saadaan nyt laskettua jokaista päästöä laimentamaan tarvittava ilmavirta. Kaavassa 20 lasketaan ilmavirta typpidioksidin pitoisuuden laimentamista varten.

$$Q_{ilma} = Q_{NO_2} \times \frac{10^6}{NO_{2lim}} = 0,696 \text{ m}^3/h \times \frac{10^6}{1,5 \text{ ppm}} = 464000 \text{ m}^3/h$$

$$= 128,89 \text{ m}^3/s \quad (20)$$

Hiilimonoksidin määräämä ilmavirran tarve saadaan laskettua kaavalla 21.

$$Q_{ilma} = Q_{CO} \times \frac{10^6}{CO_{lim}} = 26,06 \text{ m}^3/h \times \frac{10^6}{200 \text{ ppm}} = 130300 \text{ m}^3/h$$

$$= 36,19 \text{ m}^3/s \quad (21)$$

Kaavassa 22 lasketaan näkyvyyden takia tarvittava ilmavirta.

$$Q_{ilma} = \frac{P_{vis}}{C_{vis}} = \frac{1471500 \text{ mg}/h}{1,5 \text{ mg}/\text{m}^3} = 981000 \text{ m}^3/h$$

$$= 272,5 \text{ m}^3/s \quad (22)$$

Ilmavirrat vaihtelevat paljon laskettaessa niitä eri päästöille. Näkyvyyden mukaan laskettu ilmavirta on selvästi suurin.

6.2 Ruuhkautuva liikenne

Onnettomuuksien sattua liikenne voi ruuhkautua tunnelissa, mikä vaikuttaa päästöjen pitoisuuksiin. Seuraavaksi lasketaan ruuhkautuneen liikenteen mukaiset päästöt ja ilmavirrat. Kaavassa 23 lasketaan typpioksidin määrä suunnitellussa tunnelissa.

$$Q_{NO_x} = q_{NO_x} \times (k_{kat} \times M_l + k_t \times M_t) \times k_s \times L$$

$$\begin{aligned}
&= 0,0013 \text{ m}^3/\text{km}/\text{ajon.} \times \left(0,3 \times 2125 \text{ ajon.}/\text{h} + 8 \times 375 \text{ ajon.}/\text{h} \right) \times 1,7 \times 2\text{km} \\
&= 16,08 \text{ m}^3/\text{h}
\end{aligned} \tag{23}$$

Typpioksidin muuttaminen typpidioksidiksi on laskettu kaavassa 24.

$$Q_{NO_2} = 0,1 \times Q_{NO_x} = 0,1 \times 16,08 \text{ m}^3/\text{h} = 1,608 \text{ m}^3/\text{h} \tag{24}$$

Hiilimonoksidin määrä tunnelissa lasketaan kaavassa 25.

$$\begin{aligned}
Q_{CO} &= q_{CO} \times (k_{kat} \times M_l + M_t) \times k_{hh} \times k_s \times k_f \times L = 0,013 \text{ m}^3/\text{km}/\text{ajon.} \times \\
&(0,3 \times 2125 + 375) \times 1 \times 1,1 \times 2 \times 2\text{km} = 57,92 \text{ m}^3/\text{h}
\end{aligned} \tag{25}$$

Hiukkaspäästöjen kaavassa ei ole otettu huomioon liikenteen ajonopeutta, joten hiukkaspäästöjen määrä on sama kuin mitoitustilanteessa. Hiilimonoksidi- ja typpidioksidipäästöjen avulla saadaan nyt laskettua päästöjä laimentamaan tarvittavat ilmavirrat. Kaavassa 26 lasketaan ilmavirta typpidioksidin pitoisuuden laimentamista varten.

$$\begin{aligned}
Q_{ilma} &= Q_{NO_2} \times \frac{10^6}{NO_{2lim}} = 1,608 \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{10^6}{1,5\text{ppm}} = 1072000 \text{ m}^3/\text{h} \\
&= 297,78 \text{ m}^3/\text{s}
\end{aligned} \tag{26}$$

Hiilidioksidin määräämä ilmavirran tarve saadaan laskettua kaavalla 27.

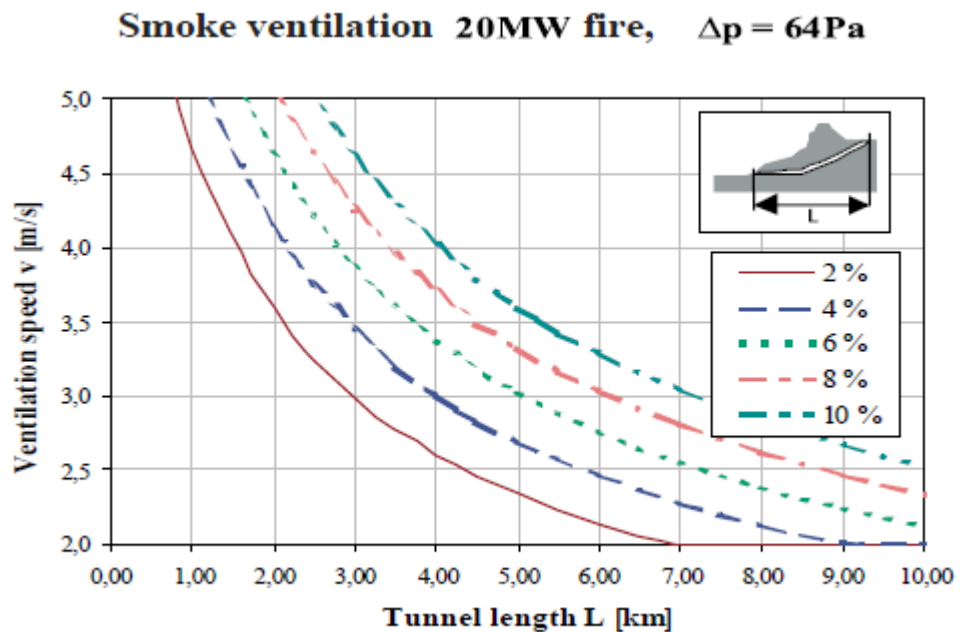
$$\begin{aligned}
Q_{ilma} &= Q_{CO} \times \frac{10^6}{CO_{lim}} = 57,92 \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{10^6}{200\text{ppm}} = 289600 \text{ m}^3/\text{h} \\
&= 80,44 \text{ m}^3/\text{s}
\end{aligned} \tag{27}$$

6.3 Puhallinteho palotilanteessa

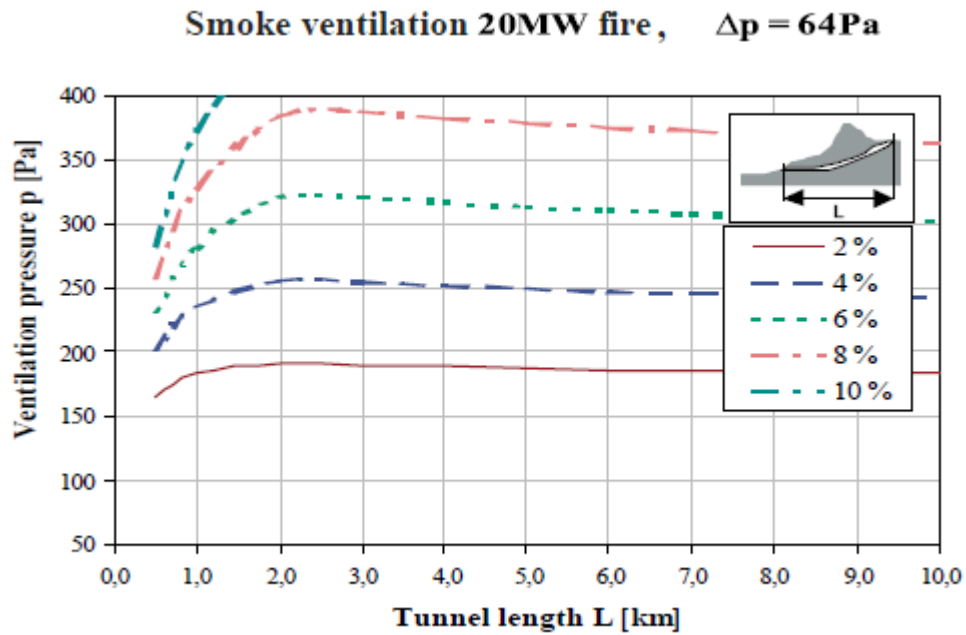
Seuraavaksi on laskettu puhallintehon tarve Norjalaisten ohjeiden mukaisesti. Kaavassa 28 on laskettu luonnollisten voimien aiheuttamat painehäviöt. Oletuksena on, että ilman lämpötila on ulkona 10 °C ja tunnelin sisällä 0 °C.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \times \rho_{ulko} \times u_x^2 + (\rho_{ulko} - \rho_{sisä}) \times g \times \Delta H = \frac{1}{2} \times 1,29 \frac{kg}{m^3} \times (5 \frac{m}{s})^2 + \left(1,29 \frac{kg}{m^3} - 1,24 \frac{kg}{m^3} \right) \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 40m = 35,75 Pa \quad (28)$$

Lasketun painehäviön, tunnelin profiilin ja mitoitus palotehon perusteella valitaan käytettävät kuvaajat.



KUVAAJA 4. Laskennallinen virtausnopeus tunnelin pituuden funktiona [8]



KUVAAJA 5. Laskennallinen paine tunnelin pituuden funktiona [8]

Kuvaajasta 4 saadaan laskennallinen virtausnopeus 3,6 m/s ja kuvaajasta 5 saadaan laskennallinen paine 190 Pa. Näillä arvoilla voidaan laskea puhaltimien työntövoima (kaava 29).

$$P_V = \frac{n_s}{n_v} \times \Delta P_s \times A_T = \frac{1,1}{0,8} \times 190 \text{ Pa} \times 49,66 \text{ m}^2 = 12973,68 \text{ N} \quad (29)$$

Tunneliin on tarkoitus asentaa puhaltimia 100 metrin välein ja pareittain. Kahden kilometrin pituiselle tunnelille mahtuu tällöin yhteensä 38 puhallinta. Ensin lasketaan yhdelle puhaltimelle tarvittava työntövoima (kaava 30), jolla saavutetaan norjalaisen ohjeen mukaan laskettu kokonaistyöntövoima tunneliin. Puhaltimen työntövoima saadaan jakamalla kokonaistyöntövoima suunnitellulla puhaltimien määrällä.

$$\begin{aligned} \text{Puhaltimelle tarvittava työntövoima} &= \frac{12973,68 \text{ N}}{38 \text{ pu}} \\ &= 341,41 \text{ N/pu} \end{aligned} \quad (30)$$

Yhdeltä puhaltimelta vaaditaan hieman yli 340 N työntövoimaa. Seuraavaksi valitaan valmistajan tuoteluettelosta puhallin, joka vastaa parhaiten saatua arvoa. Tähän suunnitelmaan valitaan Fläkt Woodsin tunneli-ilmanvaihtoon tarkoitettuja Jetfoil -puhaltimia. Valittu puhallin on malliltaan 80JMTS/40/4/9/40/, joka tuottaa 374 N.

Tarkemmat puhallintiedot löytyvät liitteestä 1. Nyt saadaan laskettua puhaltimien tuottama työntövoima.

$$P_{38} = 38pu \times 374N = 14212N \quad (31)$$

Valitut puhaltimet tuottavat yhdessä reilusti enemmän työntövoimaa, mitä on alustavasti tarvittu. Tarvittava työntövoima voi kuitenkin olla paljon suurempi isoissa tulipaloissa, joten työntövoimaa ei ole liikaa.

7 JOHTOPÄÄTELMÄT

Maantietunneleissa käytettyjen ilmanvaihtojärjestelmien ominaisuudet vaihtelevat paljon, ja kumpikaan järjestelmä ei ole selkeästi toista parempi vaihtoehto. Tunnelin pituus, kaltevuus ja mitoittavat liikennemäärät määräävät paljolti, mikä järjestelmä aikaansaa paremman ilmanvaihdon. Pitkittäinen järjestelmä esiintyy tunneleissa useammin edullisempien kustannuksien vuoksi. Ilmanvaihtoa ei kuitenkaan voida aina toteuttaa pitkittäisellä järjestelmällä turvallisuussyistä.

Suomessa ei ole tarkkoja suunnitteluohjeita maantietunneleiden ilmanvaihdolla vaan ne tehdään aina tapauskohtaisesti tilaajan vaatimusten mukaisesti. Liikennevirastolta on julkaistu tietunnelien hallinnointia ja turvallisuutta koskevat määräykset ja ohjeet, mutta ne eivät ole yksityiskohtaisia ilmanvaihdon osalta. Kansainvälisen tiejärjestön kokoamat tekniset raportit sekä Norjan ohjeet maantietunneleista sisältävät paljon tietoa tunnelien ilmanvaihdon mitoituksesta ja toteutuksesta.

LÄHTEET

- [1] Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi Euroopan laajuisen maantieverkon tunnelien turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista. Www-dokumentti.
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52002PC0769:FI:HT>
HT. Päivitetty. Luettu 5.4.2012.
- [2] Velhonoja, Pauli. Sähköpostikeskustelu. 23.1.2012. Liikennevirasto. Apulaisjohtaja.
- [3] Tiehallinto. Tietunnelien hallinnointi ja turvallisuutta koskevat määräykset ja ohjeet. WWW-dokumentti.
http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/tietunneli_maaraykset_2008.pdf. Julkaistu 31.12.2007. Luettu 15.3.2012.
- [4] Andersson Johnny. Ventilation of Road Tunnels. Helsinki: Painatuskeskus Oy. 1995
- [5] Fläkt woods. Maantietunneleiden ilmanvaihto. WWW-dokumentti.
<http://www.flaktwoods.fi/yriyksesemme/asiakaslehti/1cc2d2fd-5a65-474e-8f57-eceb736fbb>. Päivitetty 3.11.2005. Luettu 15.3.2012
- [6] Tiehallinto. Tietunnelin suunnitteluohje luonnosversio. WWW-dokumentti.
http://projektit.maajavesi.fi/kehaIIjatke/lahtotiedot/Suunnitteluohjeet%5CTietunnelien%20suunnitteluohje_v092_12012005.pdf. Julkaistu 12.1.2005. Luettu 24.3.2012.
- [7] PIARC Technical Committee 5 Road Tunnels. Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels. PDF-dokumentti. <http://www.piarc.org/>. Päivitetty 1.2.2007. Luettu 18.3.2012
- [8] NPRA Norwegian Public Roads Administration. Road Tunnels. WWW-dokumentti. http://www.vegvesen.no/_attachment/61416/binary/14123. Päivitetty 5.1.2005. Luettu 16.4.2012.

50Hz Truly Reversible Range 300/2H

Fan type	Motor Pole Speed	Blade angle	Thrust N	Outlet Velocity m/s	Absorbed Power kW	Motor Power kW	Nominal Current A	Sound power LwA	Sound Pressure in forward direction in free field, 45°, 10m dB(A)
56JMTS	2	22	133	21.2	3.3	3.6	6.93	94	63
	2	30	211	26.7	6.4	6.6	12.3	95	64
	2	35	260	29.7	8.8	9	16.4	97	66
	2	40	304	32.1	12.2	12.65	23.3	101	70
63JMTS	2	20	177	21.8	4.4	4.6	9.3	93	62
	2	24	229	24.8	6.5	6.6	12.3	95	64
	2	28	290	27.8	8.8	9	16.4	96	65
	2	32	354	30.8	11.9	12.65	23.3	98	67
	2	37	425	33.7	17.2	18	32.6	99	68
71JMTS	2	40	466	35.3	20.7	22.2	40.4	100	69
	2	20	320	25.9	8.1	8.25	15.5	100	69
	2	24	415	29.5	12.1	12.65	23.3	100	69
	2	28	516	32.9	17.4	18	32.6	101	70
80JMTS	2	33	660	37.3	26.3	27	49.8	103	72
	2	35	698	38.3	30.9	33	58.8	104	73
	4	30	259	20.7	4.6	4.8	9.2	90	59
	4	35	324	23.2	6.6	6.6	12.6	92	61
90JMTS	4	40	374	24.9	8.9	9	17	94	63
	4	44	395	25.6	10.8	11.04	21	95	64
	4	35	534	26.4	12.4	13.2	25.4	90	59
	4	40	617	28.4	17.0	17.3	33.1	92	61
100JMTS	4	43	648	29.1	19.6	20.35	39.5	93	62
	4	29	566	24.5	12.1	13.2	25.4	100	69
	4	34	704	27.3	17.1	17.3	33.1	101	70
	4	39	896	30.8	26.1	27	49.8	104	73
112JMTS	4	44	1011	32.8	31.1	33	65	106	75
	4	30	1023	29.4	25.4	27	49.8	97	66
	4	33	1180	31.6	32.0	33	65	98	67
	4	37	1356	33.9	42.6	44.4	79.3	100	69
	4	41	1495	35.6	53.7	54	95.1	102	71
125JMTS	4	44	1551	36.2	61.2	63.3	110	103	72
	4	25	1074	27	26.4	27	49.8	101	70
	4	28	1300	29.7	33.9	34.5	63.8	102	71
	4	31	1546	32.4	43.9	44.4	79.3	104	73
	4	33	1715	34.1	52.1	54	95.1	104	73
	4	36	1960	36.5	65.7	66	115	105	74
140JMTS	4	40	2251	39.1	83.6	86.3	154	107	76
	6	32	1186	25.3	25.7	26.4	49.7	99	68
	6	36	1393	27.5	34.4	36	66.2	100	69
	6	40	1555	29	44.1	44.4	79.9	102	71
160JMTS	6	43	1631	29.7	50.9	51.8	92.3	103	72
	6	23	1234	22.6	25.3	26.4	49.7	100	69
	6	27	1571	25.5	34.7	36	66.2	101	70
	6	30	1856	27.7	43.3	44.4	79.9	101	70
6	32	2048	29.1	50.0	51.8	92.3	102	71	

Fan Codes

112 JMTS/40/4/9/32

Fan diameter

56 = 560 mm 100 = 1000 mm
 63 = 630 mm 112 = 1120 mm
 71 = 710 mm 125 = 1250 mm
 80 = 800 mm 140 = 1400 mm
 90 = 900 mm 160 = 1600 mm

Fan type

JMTS = Truly Symmetrical Jet Fan
 JMG = Uni-Directional Jet Fan

Hub diameter

20 = 200 mm 40 = 400 mm
 25 = 250 mm 50 = 500 mm
 31 = 315 mm 63 = 630 mm

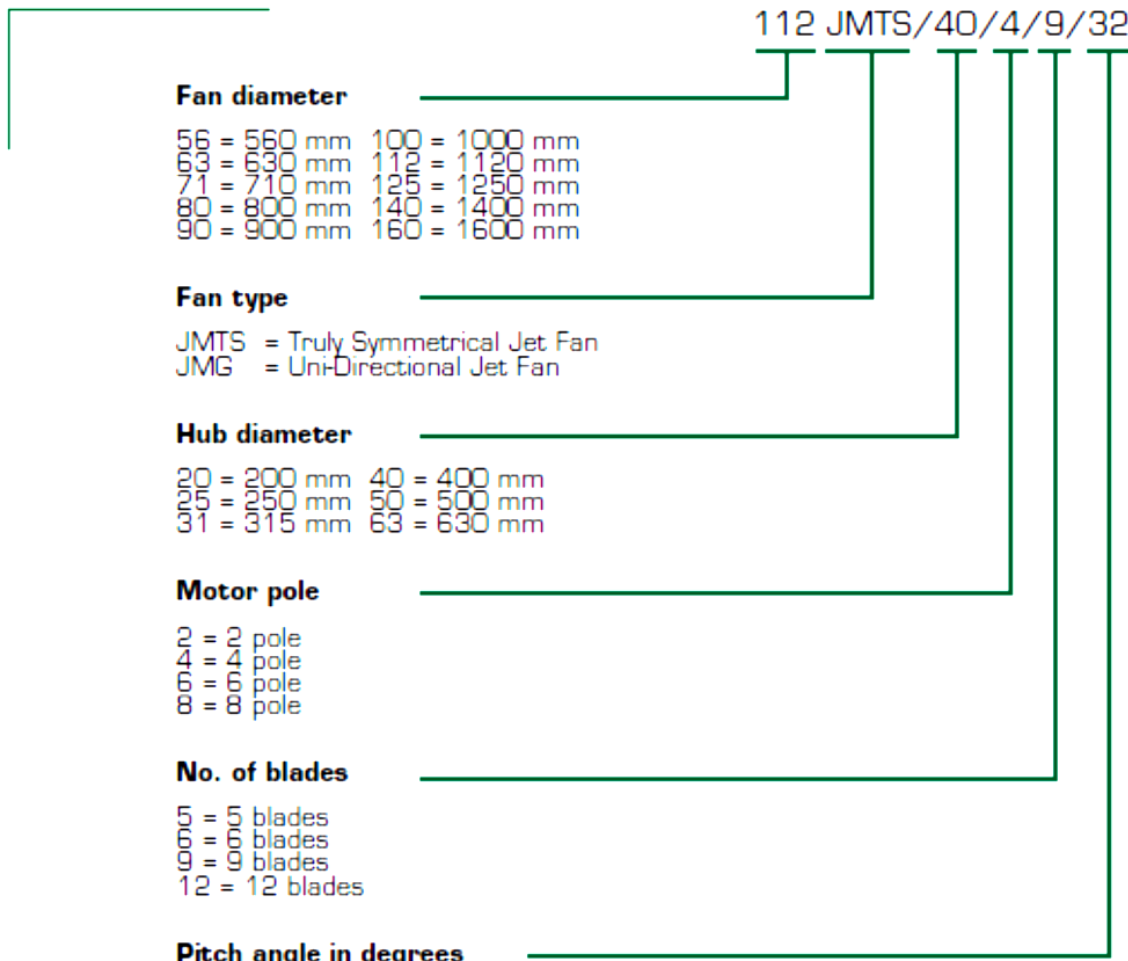
Motor pole

2 = 2 pole
 4 = 4 pole
 6 = 6 pole
 8 = 8 pole

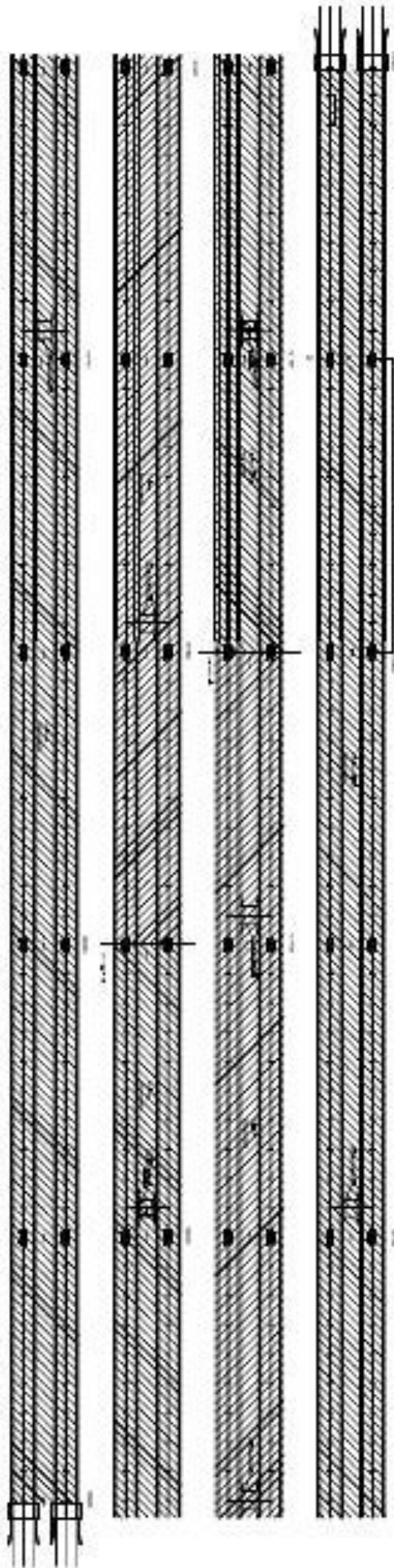
No. of blades

5 = 5 blades
 6 = 6 blades
 9 = 9 blades
 12 = 12 blades

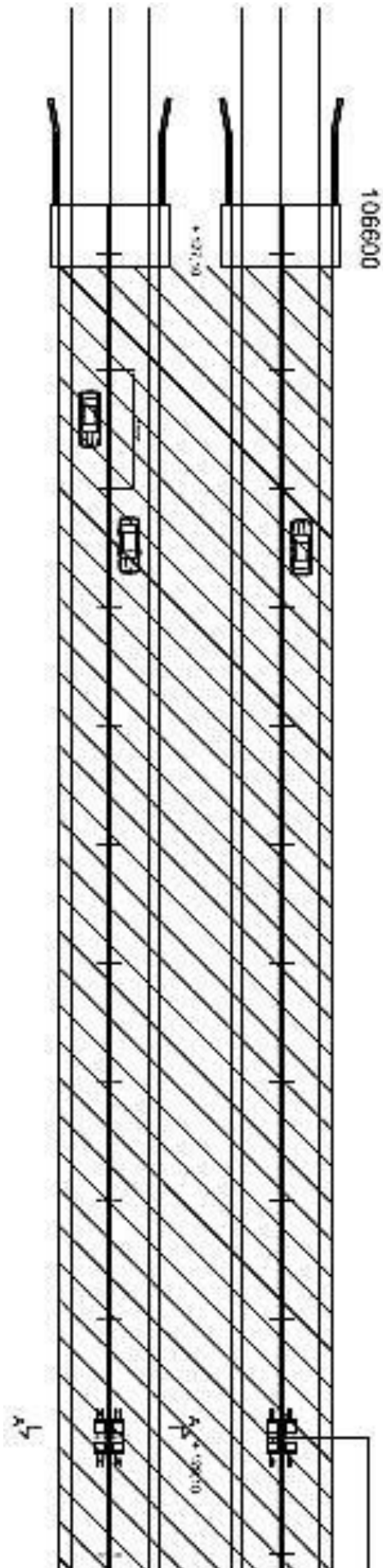
Pitch angle in degrees



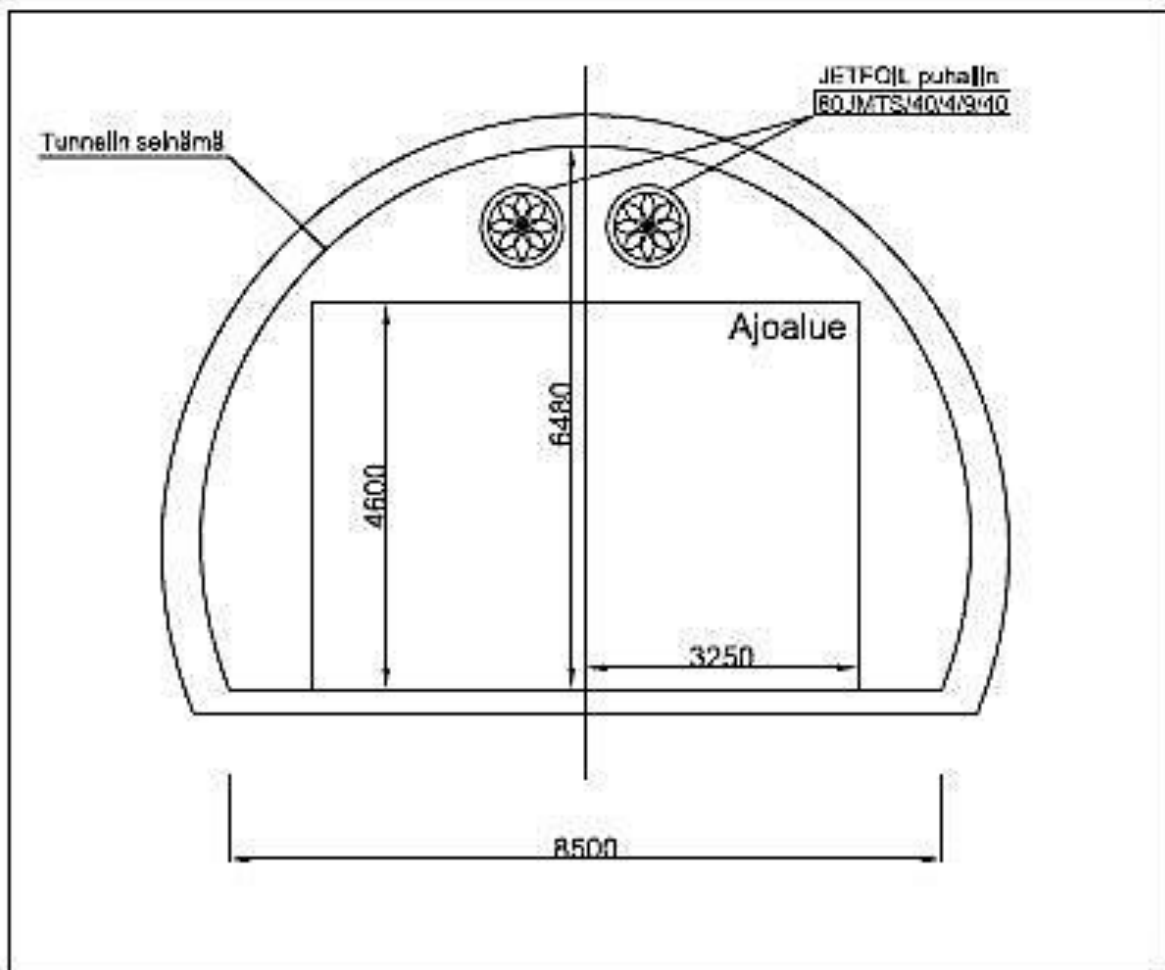
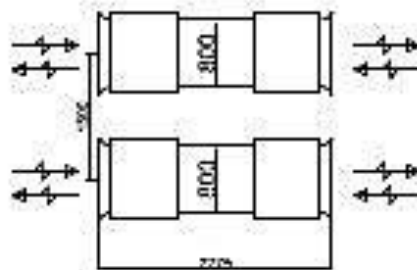
LIITE 3 (1).
Mallisuunnitelma



LIITE 3 (2).
Mallisuunnitelma

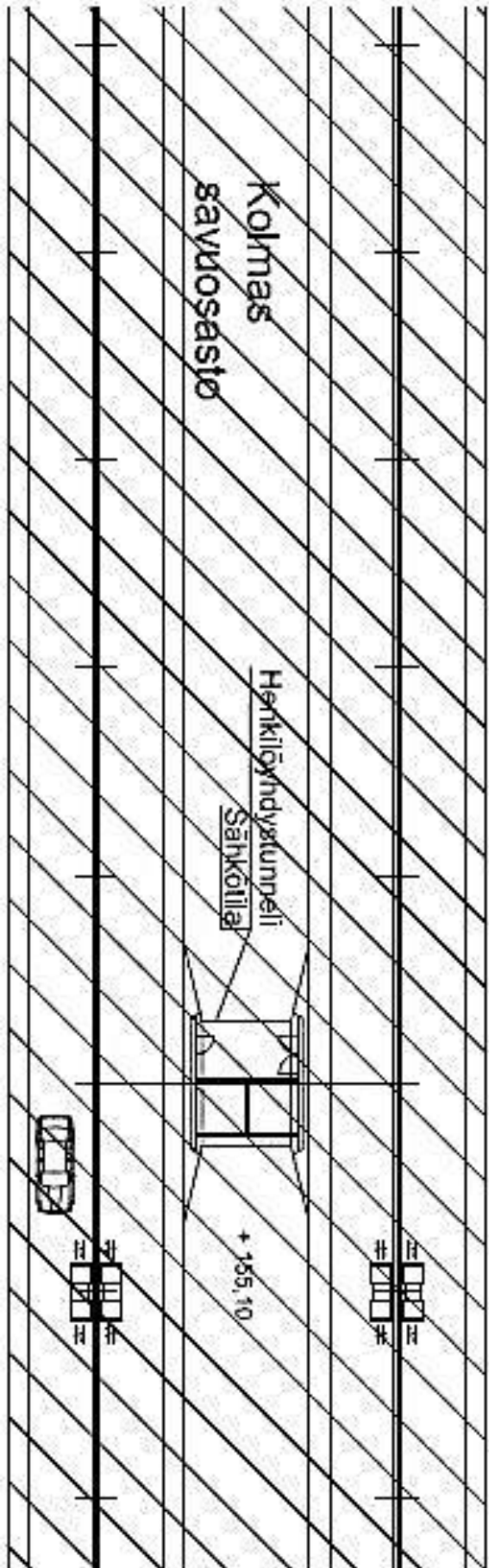


JETFOIL puhallin
80JMTS/40/4/9/40



Leikkaus A - A

LIITE 3 (4).
Mallisuunnitelma



LIITE 3 (5).
Mallisuunnitelma

