

KALLIOTILOJEN PYSTYKUILUJEN SUUNNITTELURATKAISUT



Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Rakentamisen koulutus

Visamäki, kevät 2017

Erik Eklund

Rakentamisen koulutus
Visamäki

Tekijä	Erik Eklund	Vuosi 2017
Työn nimi	Kalliotilojen pystykuilujen suunnitteluratkaisut	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyö tehtiin Pöyry Finland Oy:lle. Useassa kärkihankkeessa Suomessa on käyty paljon keskustelua eri suunnittelualojen välillä siitä miten kalliotilan pystykuilu tulee suunnitella rakennusfysikaalisesti (ovatko kuilut lämmöneristettävä vai ei). Kalliokuiluja halutaan joka tapauksessa suojata pakkasrapautumiselta. Tämä on suunniteltava yhteistyössä kallio-, rakenne- ja taloteknisten suunnittelijoiden kesken.

Tutkimuksen ensimmäinen osuus suoritettiin kirjallisuustutkimuksena. Kirjallisuustutkimuksessa selvitettiin kalliorakentamisen erityispiirteitä rakennusfysikaalisen toimivuuden näkökulmasta. Kirjallisuustutkimuksessa kuvattiin myös alkalikiviainesreaktiota ilmiönä. Tätä alkalikiviainesreaktioiden teoriataustaa ei sovellettu seuraavassa tutkimusvaiheessa.

Toinen tutkimusvaihe toteutettiin kvalitatiivisena tutkimuksena haastatteleamalla alan asiantuntijoita (teemahaastattelu). Lisäksi suoritettiin rakennusfysikaalisia laskelmia kalliokuilujen rakenneratkaisujen osalta.

Kirjallisuustutkimuksen tuloksena saatiin selville kalliotilojen kosteuslähteitä, kalliotiloihin sopivat lämmöneristeet ja tiivis informatiivinen paketti alkalikiviainesreaktiosta ilmiönä. Toisessa tutkimusvaiheessa selvitettiin rakennusfysikaalisesti toimivat ratkaisut kalliotilan tuloilmakuilua varten. Lisäksi opinnäytetyössä on kuvattu kuinka eri ilmanvaihto- ja lämmitysvaihtoehdot vaikuttavat kalliotilan pystykuilun suunnitteluun.

Avainsanat Kalliotila, pystykuilu, rakennusfysiikka.

Sivut 51 sivua.

Degree Program in Construction and Environmental Engineering
Visamäki

Author	Erik Eklund	Year 2017
Subject	Design solutions for vertical shafts in rock spaces	

ABSTRACT

This thesis was done for Pöyry Finland Oy. In many big projects in Finland there has been a lot of discussion between different design areas on the correct building physics design basis for vertical shafts in rock spaces, and in particular to possible need for thermal insulation. One thing is clear: it is necessary to prevent frost cracking in the shaft. Design to achieve this must be done as teamwork between the structural engineers, rock engineers and heat engineers.

The first phase of the research was done as a literature survey. The literature survey identified special features of rock spaces from point of view building physics. In the literature survey also revealed alkali aggregate reaction as phenomenon.

The second phase of the research was done as qualitative research by interviewing experts in the field (interview with theme). Building physics calculations for the structural solutions were also made in the second phase of the research.

The literature survey identified moisture sources in rock spaces, thermal insulations that are suitable in rock spaces and information about alkali aggregate reaction as phenomenon. In the second phase of the research solutions for vertical shafts in rock spaces were clarified. In the thesis is also described how different ventilation and heating solutions effect on structural design of vertical shaft in rock spaces.

Keywords Rock space, vertical shaft, structural physics.

Pages 51 pages.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen taustaa	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	1
1.3	Tutkimuksessa käytettävät menetelmät	1
1.4	Tutkimuksen tuotokset	2
2	KALLIOTILOJEN PYSTYKUILUT	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Käyttötarkoitus	3
2.3	Sijainti	6
3	SUUNNITTELUN HAASTEET	7
3.1	Olevien maanpäällisten rakennusten aiheuttamat haasteet	8
3.2	Alkalikiviainesreaktiot	9
3.3	Kosteuslähteiden aiheuttamat haasteet	12
3.3.1	Kosteuslähteet kallioiloissa	12
3.3.2	Suunnitteluratkaisuja kalliotilan vedeneristämiseen	15
4	TULOILMAKUILUN HAASTEET	19
4.1	Kuilun eristäminen	19
4.2	Kuilun jäätyminen	24
4.3	Maanpäällisen rakennuksen jäätyminen	24
5	SUUNNITTELUN RATKAISUT	25
5.1	Rakennusfysikaalinen toimintaperiaate	25
5.2	Sprefix	27
5.3	Ruiskubetoni ja polyeteeni	30
5.4	ÖS Kombi (verhousrakenne)	33
5.5	Paroc-elementtiratkaisut	34
5.6	Teräsbetoninen sandwich-elementti	37
5.7	Tekninen tila maanpinnan läheisyydessä	40
5.8	Itäkeskuksen uimahallin tuloilmakuilu	43
5.9	Maunulan urheiluhallin tuloilmakuilu	46
6	YHTEENVETO	48
6.1	Yleistä	48
6.2	Johtopäätökset	49
6.3	Kehitysehdotukset	49
	LÄHTEET	50

1 JOHDANTO

Ensimmäiseen lukuun on koottu tutkimuksen taustaa ja tavoitteita. Miksi kalliotilojen pystykuilujen tutkiminen kiinnostaa? Lisäksi johdannossa on kuvattu käytetyt menetelmät ja tuotokset.

1.1 Tutkimuksen taustaa

Tämä opinnäytetyö tehdään Pöyry Finland Oy:lle. Pöyry on kansainvälinen konsultointi- ja suunnittelu-yritys, joka suunnittelee ja toteuttaa parhaat energia-, teollisuus- ja infrastruktuuritoimialojen hankkeet Suomessa. Yritys on perustettu vuonna 1958 ja siihen aikaan Pöyryn erikoisosaminen oli sellutehtaiden suunnittelussa. Tällä hetkellä yrityksen palveluksessa on noin 6000 asiantuntijaa 50 massa.

Kalliotilojen pystykuilujen suunnitteluratkaisut ovat herättäneet keskustelua useassa kärkihankkeessa Suomessa – kuinka ne tulee suunnitella? Tämä opinnäytetyön tarkoituksena on kuvata pystykuilujen erityispiirteitä kokonaisuuden kannalta niin, että tilaaja ymmärtää eri suunnitteluvaihtoehtojen merkityksen.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tämän tutkimuksen tavoitteena on lisätä eri suunnittelualojen tietämystä kalliokuilujen erityispiirteistä. Lisäksi kalliotilan tilaajan on hyvä ymmärtää eri suunnitteluratkaisujen merkitys kokonaisuuden kannalta. Tämä opinnäytetyö on rajattu käsittelemään kalliotilojen tuloilmakuiluja.

1.3 Tutkimuksessa käytettävät menetelmät

Tutkimuksen ensimmäinen osa on suoritettu kirjallisuustutkimuksena. Lähdemateriaalia on löytynyt VTT:n tutkimusraporttien ja kalliotilan suunnitteluohjeiden muodoissa. Teoriataustaa on täydentänyt opinnäytetyön ohjaajan (Tapio Korkeamäen) laskentaesimerkit. Lisäksi lähdemateriaalina on käytetty kahta rakennusfysiikan oppikirjaa: Lämpö ja Kosteus sekä Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset (RIL 255-1-2014).

Tutkimuksen toinen osuus suoritettiin haastattelemalla alan asiantuntijoita. Asiantuntijaryhmään kuului kalliotilojen pääsuunnittelija, kalliotilojen vastaavia rakennesuunnittelijoita ja kalliotilan kalliotekninen asiantuntija. Tutkimusosuuteen kuului myös rakennusfysiikan toiminnan kuvaaminen rakennusfysiikan kaavoilla.

1.4 Tutkimuksen tuotokset

Tutkimuksen tuotoksena on tiivis paketti kalliotilan erityispiirteistä ja materiaalien ominaisuuksista. Teoriaosuudessa on kuvattu myös alkaliviainesreaktion ilmiötä. Tätä ei kuitenkaan sovellettu kenttätutkimuksissa. Tutkimusten tuloksena on sen sijaan erihintaisia suunnitteluratkaisuja erilaisia kalliotilojen pystykuiluja varten.

2 KALLIOTILOJEN PYSTYKUILUT

Kalliotilojen rakentamisessa on tiettyjä erityispiirteitä maanpäällisiin rakennuksiin verrattuna. Seuraavissa luvuissa 2.1-2.3 on tuotu esille se, mitä kalliotilan rakentaminen on. Kalliotilan rakentamisen aikana suurena haasteena ovat toimiva logistiikka ja toteutettavuus.

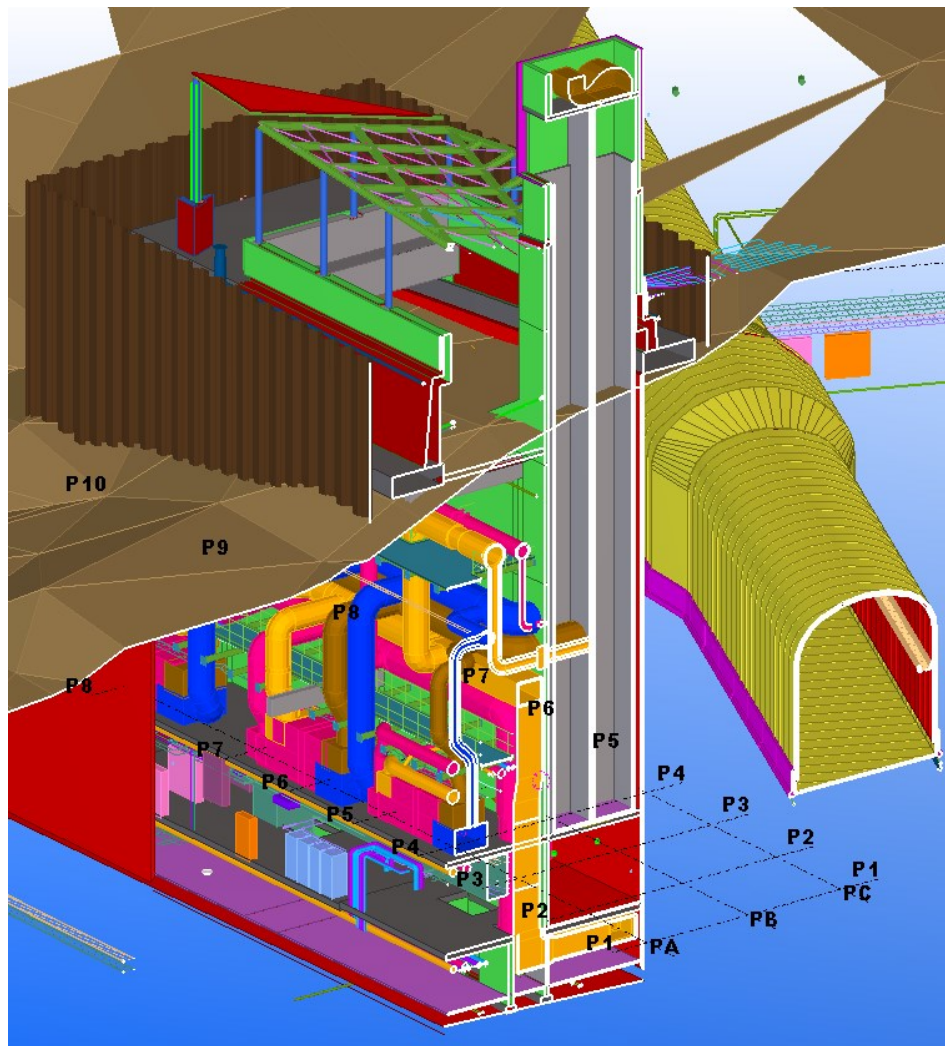
2.1 Yleistä

Kalliorakentaminen on kallista. On kuitenkin rakenteita jotka on hyvä sijoittaa maan alle, kuten esimerkiksi väestönsuojat ja pysäköintilaitokset. Helsingin alueella oleskelee ja liikkuu paljon ihmisiä ja kaupunki on velvollinen rakentamaan heille tarpeelliset väestönsuojat. Väestön ja laitteiston suoja on Helsingin alueelle rakennettu paljon ja varsinkin laajemmille hallimaisille tiloille on pyritty kehittämään normaaliajan käyttötarkoitus, kuten esimerkiksi liikuntatiloja. (Kivilaakso, Narvi, Neuvonen, Siivola & Kolu 2009, 5-8.)

Tällä hetkellä Helsinkiin on rakennettu yli 400 maanalaista tilaa ja tunnelia (valtion ylläpitämät, ei julkiset tilat, eivät kuulu edellä mainitun lukuarvoon). Lisäksi kaupungilla on pitkällä tähtäimellä yli 200 uutta varausta. Teknisen huollon tunnelleita on kertynyt yhteensä noin 200 km. Kokonaisuuden hallitsemiseksi Helsingin kaupunki on ylläpitänyt 1980-luvulta asti maanalaisten toimintojen tilavaraussuunnitelmaa. Myöhemmin tämä tilavaraussuunnitelma päivitettiin Helsingin maanalaiseksi yleiskaavaksi. Muilla kaupungeilla ei vastaavanlaista yleiskaava ole. Maanalaisella yleiskaavalla halutaan ohjata ja sovittaa yhteen kalliotiloja ja liikennetunnelleita. Edellä mainitulla yleiskaavalla halutaan myös parantaa suunnitelmallisuutta, tiedonvaihtoa ja laatua. (Kivilaakso, Narvi, Neuvonen, Siivola & Kolu 2009, 5-8.)

Kallioon rakentaminen on ainutlaatuista ja käyttötarkoituksen muuttaminen on kallista ja osittain mahdotonta. Maanalaiseen yleiskaavaan teon yhteydessä on tästä syystä kartoitettu toteutettavia kallioalueita tulevaisuuden hankkeita ajatellen. Helsingin kaupungin geotekninen osasto on

kartoittanut etenkin laajempien hallimaisten kalliotilojen rakennettavuutta Helsingin alueella. Kallioresurssitutkimuksesta on lisää kohdassa 2.3. Näitä kallioresursseja kaupunki haluaa käyttää harkiten. Alla kuvassa yksi on esitetty Pissaradan Paavo Nurmen sisäänkäynnin kulkuyhteys Töölön aseman junapysäkille. Vilkasliikenteiset tiet kuilun läheisyydessä tuovat lisää haastetta suunnittelulle (sisäänkäynti sijaitsee Runeberginkadun ja Mannerheimintien risteyksessä). Pissararata on yksi vaihtoehto purkaa ruuhkaa Helsingin päärautatieasemalta. (Kivilaakso, Narvi, Neuvonen, Siivola & Kolu 2009, 5-8.)



Kuva 1. Pissararata, Paavo Nurmen sisäänkäynti, tekninen kuilu ja kulkuyhteys Töölön asemalle (juna-asemalle)

2.2 Käyttötarkoitus

Kalliotilat voidaan jakaa viiteen eri ryhmään käyttötarkoituksen mukaan:

- Yleisötilat
- Pysäköintilaitokset
- Liikennetunnelit

- Tekniset tilat ja
- Varastotilat.

Lähes jokaisesta edellä mainitusta tilasta on oltava yhteys maan pinnalle ja tästä seuraa aika usein, että on järjestettävä pystykuiluyhteys maanpinnalle, katso kuva 2 alla. Yleisötilat ja osa teknisistä tiloista asettavat kovimmat vaatimukset kosteuden ja vuotovesien osalta. Liikennetunnelin ei toisin sanoen tarvitse aina olla vuotovesien osalta yhtä hyvin hallinnassa kuin esimerkiksi sähkötilan. (Ritola & Vuopio 2002, 15.)

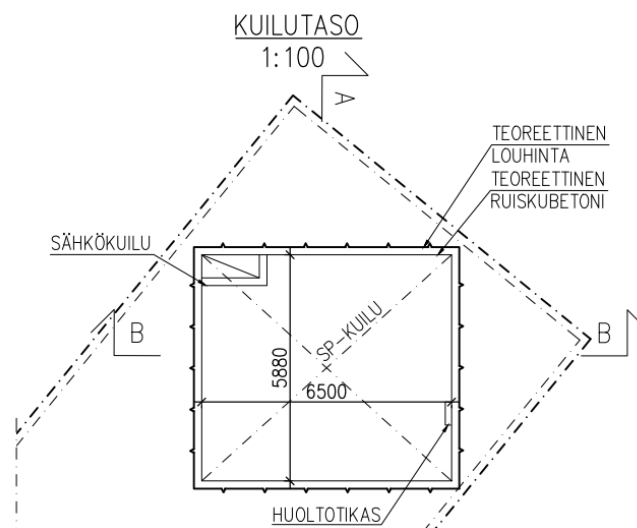


Kuva 2. Yhteys pintaan (Kivilaakso, Narvi, Neuvonen, Siivola & Kolu, 2009, 24).

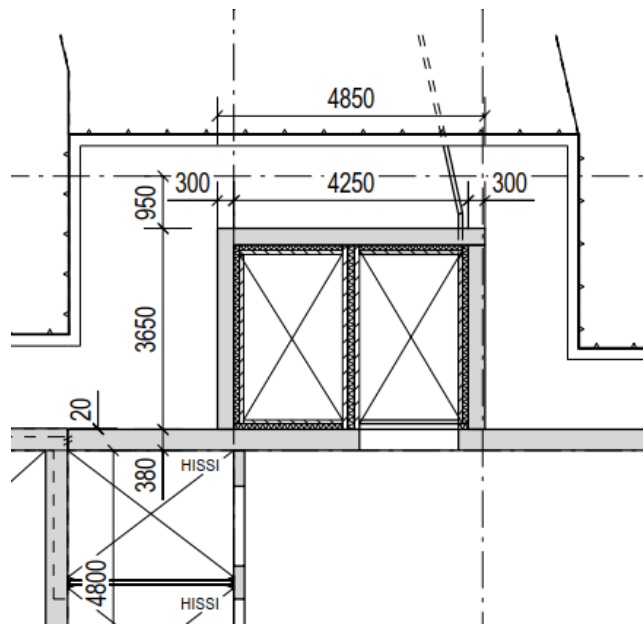
Tärkeimmät kalliotilojen pystykuilurakenteet ovat tekniset kuilut, kulku-tunnelit sekä porras- ja hissiyhteydet. Pystykuilurakenteet luovat haasteita esimerkiksi ilmanvaihdon osalta. Ilmanvaihto toteutetaan aina koneellisesti. Poisto- ja tuloilmalle on varattavat omat kuilut ulkoilmaan. Savunpoisto järjestetään joko omana reittinä tai yhdistettynä ilmanvaihtokanaviin. Tuloilma on talvella pitkiä ajanjaksoja pakkasen puolella ja on varmistuttava siitä, etteivät kalliokuilun seinämät pääse jäätymään. Tämän päivän projekteissa haasteena on ollut myös se, että energiaa on haluttu ottaa talteen poistoilmakanavasta, jolloin ilma kuilussa menee pakkasen

puolelle. (Leino & Tyni 1996, 5. ja Kivilaakso, Narvi, Neuvonen, Siivola & Kolu, 2009, 6 ja 28-29.)

Ilmanvaihtokanavat, ilmavirtausten tasauskuilujen (esimerkiksi Kehärata) ja savunpoistokuilujen pinta-alat ovat niin suuria, ettei rautakaupasta löydy vakiotuotteita ilmanvaihtokanavia varten. Tästä syystä on kuilut usein toteutettu kalliopintaisina joissa on lujituspultit ja ruiskubetoni. Toteutuneissa projekteissa on kuitenkin havaittu, että ruiskubetonipinta on ajan myötä rapautunut. Eri kanavat on osastoitu esimerkiksi paikalla valettavilla teräsbetoniseinillä, katso kuva 3 alla. Toinen, kalliimpi, vaihtoehto on rakentaa ilmanvaihtokanavat rakennusaineisena erillisillä kanavarakaisilla, katso kuva 4 alla. Uutena kysymyksenä on noussut esille se, että onko kalliolujituksille järjestettävä huoltotilavaraus sen lisäksi, että kalliotilan pystykuilu on saatu pysymään $>+0^{\circ}\text{C}$? Kuvassa 4 on jätetty tilaa ruiskubetonin huolto varten. Sama 1500 mm tilavaraus on varattu myös paikalla valettavan teräsbetoniseinän muottia varten.



Kuva 3. Pesararadan Töölön aseman paineentasaus- ja savunpoistokuilu. Kuilua ei ole lämmöneristetty.



Kuva 4. Ilmanvaihtokuilu jossa kallioseinän ja ilmanvaihtokuilun väliin on jätetty huoltotila. Pisararadan Töölöntorin lippuhallin ilmanvaihtokuilu.

2.3 Sijainti

Kalliotiloja rakennetaan usein alueille, joissa maanpäällinen osa on jo rakennettu tiiviisti. Yksi esimerkki siitä on kalliotiloihin toteutettu pysäköintilaitos ja oleviin rakennuksiin rakennetaan uusia hissi ja porrasyhteyksiä henkilöliikennettä varten. Toinen haaste kalliotilojen rakentamisessa on maan omistaminen.

Maanalaisten tilojen maata on vaikea omistaa. Lain mukaan kiinteistön omistaja maan pinnalla omistaa myös kiinteistön maanpinnan alapuolisia osia. Tätä lakia on tulkittu siten, että alapinta on arvioitu teknisen hyödyntämiskelpoisuuden mukaan. Jotta maanalaista tilaa voi rakentaa, on rakentajalla oltava rakennuspaikkaan käyttöoikeus sopimusteitse. Rakennusluvan hakijalla on hallittava rakennuspaikkaa, jotta rakennuslupa voidaan myöntää. Yksi erikoinen seikka maanalaisessa rakentamisessa on myös se, että esimerkiksi maanalaisen tilan panttauskelpoisuuden osoittaminen voi osoittautua ongelmalliseksi. (Kivilaakso, Narvi, Neuvonen, Siivola & Kolu 2009, 11.)

Kolmas sijaintiin vaikuttava asia on se, että kallioita joihin voi rakentaa kalliotilan, on rajallinen määrä. Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston tekemässä selvityksessä käytettiin mitoitusluolastoa, jonka mitat olivat: leveys 50 m, pituus 150 m ja korkeus 12 m. Lähtötietoina geoteknisellä osastolla oli kantakarttojen tieto avokallioista ja maanpinnan korkeustasoista sekä tieto pistemäisistä kallioeräkairauksista. Selvityksessä huomioitiin suuret ja erittäin suuret tiedossa olevat heikkousvyöhykkeet. Lisäksi selvityksessä huomioitiin olevat julkiset

maalaiset tilat. Tuloksena syntyi Kallioresurssialueiden inventointi 1/2008. Alla kuvassa 5 on geoteknisen osaston lopputulos kallioresurssista. Tutkimus painottui Helsingin kantakaupungin ulkopuoliselle alueelle, sillä kantakaupungin kallioresurssikartta valmistui vuonna 1992. Selvityksen lähtökohtia olivat (Kallioresurssialueiden inventointi 1/2008):

- Kallioalueen geologinen soveltuvuus
- Hyvät liikenneyhteydet
- Nykyinen maankäyttö
- Kelvolliset yhteydet kalliotilasta maanpinnalle ja
- Maanomistuksen tilanne.

(Kivilaakso, Narvi, Neuvonen, Siivola & Kolu 2009, 11-12.)



Kuva 5. Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston lopputulos kallioresurssista, joihin voi rakentaa laajemman hallimaisen kalliotilan (Kivilaakso, Narvi, Neuvonen, Siivola & Kolu, 2009, 12).

3 SUUNNITTELUN HAASTEET

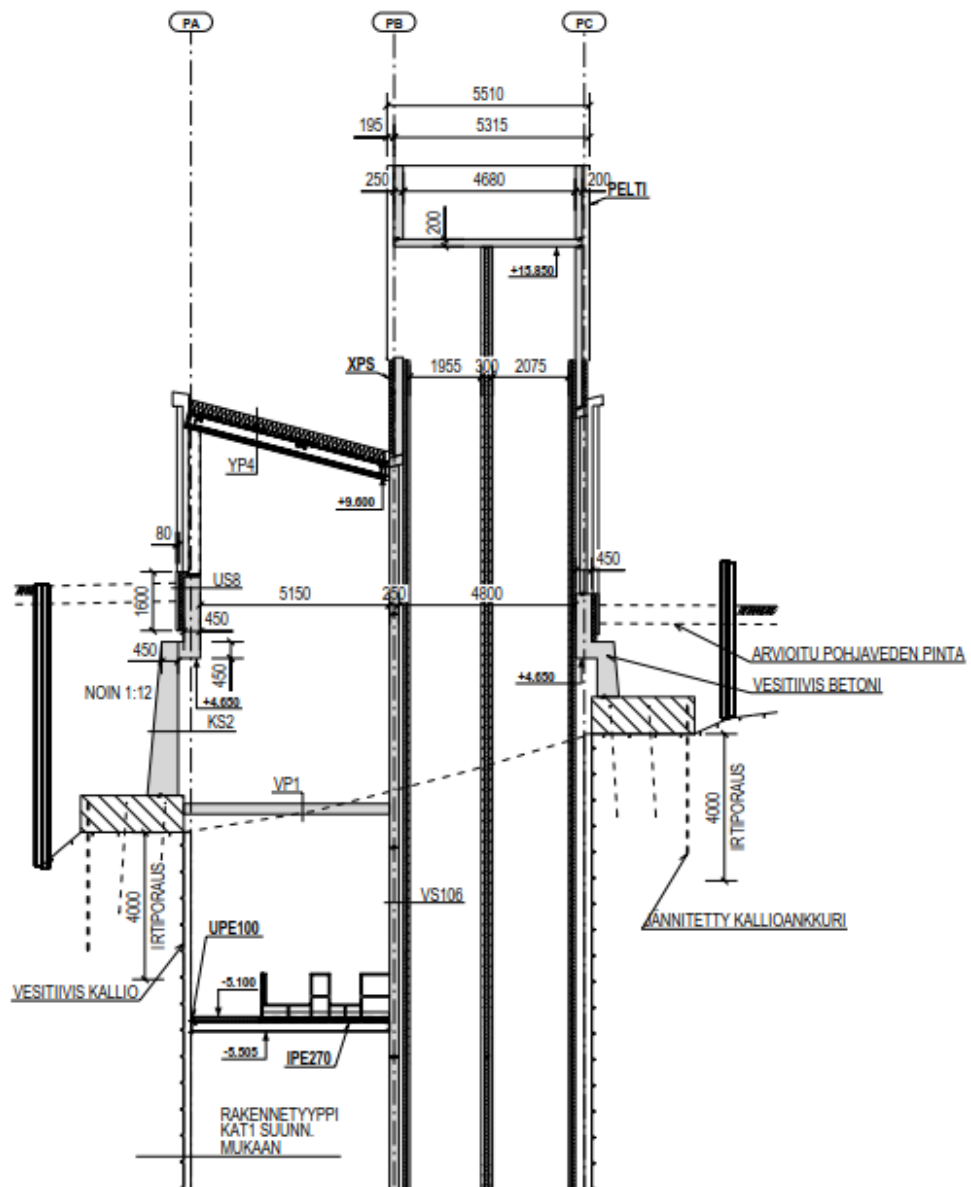
Tuloilmakuilun haasteita rakennesuunnittelun näkökulmasta on useita. Tässä opinnäytetyössä keskitytään liittymiseen rakennettuun ympäristöön, kuilun kosteuden hallintaan ja tutkitaan onko alkalikiviainesreaktio mahdollinen tuloilmakuilussa. Tätä työtä tehdessä ei opinnäytetyöntekijällä ollut tiedossa, että onko alkalikiviainesreaktioita tutkittu tuloilmakuiluissa. Olosuhteet alkalikiviainesreaktioille ovat mahdolliset kesällä.

3.1 Olevien maanpäällisten rakennusten aiheuttamat haasteet

Tiiviisti rakennettuun kaupunkiympäristöön uuden kalliotilan pystykuilun rakentaminen tuo seuraavia haasteita rakennesuunnittelulle:

- Liikennekuormat
- Maan- ja vedenpaine
- Pelastusajoneuvon tukijalan kuorma
- Liittyminen olevaan rakennukseen ja
- Laitteiden vaatimat erikoisrakenteet ja tuet.

Helsingin kaupunki on julkaissut hyvän suunnitteluohjeen, jota voi soveltaa yleisten alueiden alle tehtävien rakenteiden suunnitteluun (yleisten alueiden alle tehtävien rakenteiden suunnitteluohje). Ohjeesta löytyy niin kuormat kuin kuormitusyhdistelmät. Liikennevirasto on julkaissut eurokoodien omat kansalliset liitteet liikennehankkeita varten. Liittyminen olevaan rakenteeseen tai rakennukseen on aina tutkittava tapauskohtaisesti. Joissain projekteissa on jouduttu miettimään vaihteistusta pidemmälle tulevaisuuteen huomioimalla tulevaisuudessa tapahtuva käyttötarkoituksen muutos. Lisäksi olevien rakennusten ympäröivät vilkasliikenteiset tiet tuovat rakentamiselle haastetta. Kuvissa 1 ja 6 on kohde, jossa suunnittelun haasteena ovat olleet maan- ja vedenpaine, liikennekuorma, pelastusajoneuvon tukijalan kuorma sekä vilkasliikenteiset tiet ympärillä (Pisarrarata, Töölön asema, Paavo Nurmen sisäänkäynti).



Kuva 6. Pisaratara, Töölön asema, Paavo Nurmen sisäänkäynnin, poikkileikkaus.

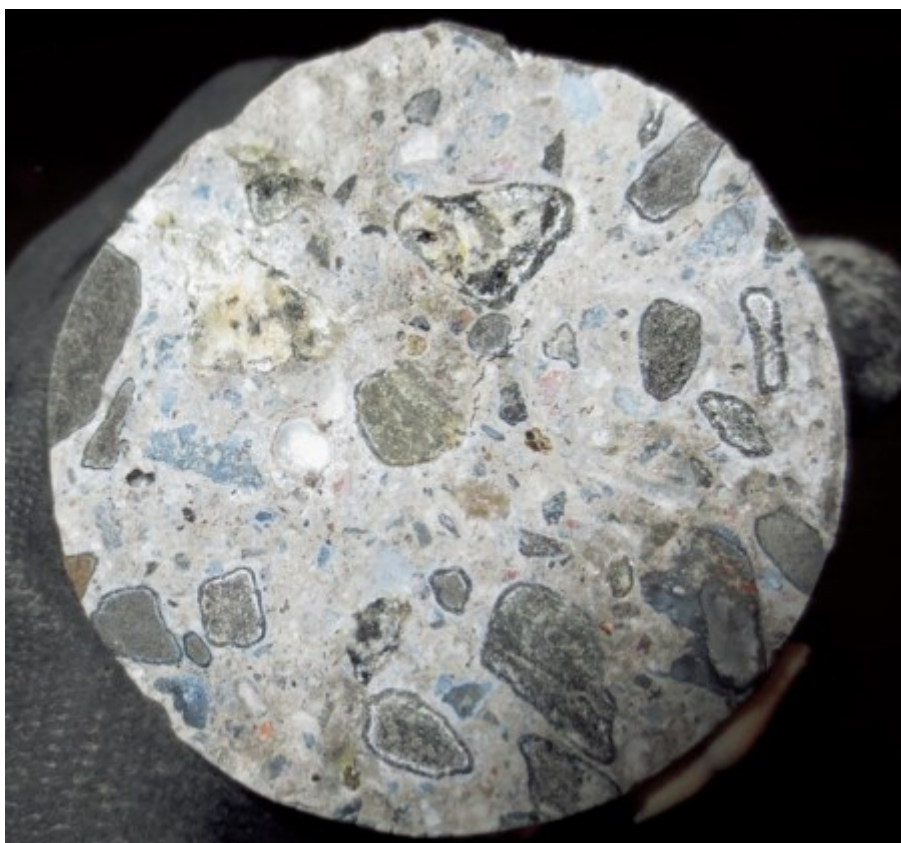
3.2 Alkalikiviainesreaktiot

Alkalikiviainesreaktio on kiviaineksen kemiallinen rapautumisreaktio, joka saa betonin rapautumaan. Suomessa ei reaktioon ole reagoitu, sillä on uskottu, että Suomalainen kiviaines on mekaanisesti luja ja kemiallisesti kestävä. Reaktion edellytyksenä on se, että kolme seuraavaa ehtoa toteutuu yhtä aikaa:

- Betonissa on reaktiivista piidioksidia (kiviainesta)
- Kosteus on korkea ($RH > 80\%$) ja
- Alkaleja on runsaasti (Na_2O ja K_2O).

Yleisin alkalikiviainesreaktio on muotoa alkalipiidioksidireaktio (alkali silica reaction). Edellä mainitussa reaktiossa kiviaineksen reaktion aikaansaa

piidioksidin eri kiteytymisastetta olevat muodot. Nämä kiviaineksen mineraalit kestävät siis huonosti alkalista ympäristöä ja betonin huokosve-
teen on sekoittuneena natrium- ja kaliumoksidia (Na_2O ja K_2O). Reaktios-
sa syntyy geeliä joka imee itseensä nestettä. Tämän seurauksena geelin
tilavuus kasvaa ja kun betonin vetolujuus ylittyy, syntyy betonin sisällä
pieniä halkeamia ja betonin huokoisuusrakenne vaurioituu. Ajan myötä
geeli valuu ulos rakenteesta. Tämän jälkeen muut teräsbetonirakenteen
vaurioitumismekanismit pääset valloilleen, kuten esimerkiksi raudoituk-
sen korrosio. Alla kuvassa 7 on alkalipiidioksidireaktion vaurioittamaa
kiviainesta Tampereen uima-altaan peruskorjauksen betonissa. Kiviainek-
sen ympärillä on vaaleampi reuna kiviainesten ympärillä.



Kuva 7. Alkalipiidioksidireaktion vaurioittamaa kiviainesta betonissa (Aromaa & Lahdensivu 2014, 46).

Toinen alkalikiviainesreaktio tunnetaan nimellä alkalisilikaattireaktio (alkali silicate reaktion). Reaktio on samankaltainen kuin ylempänä kuvattu alkalipiidioksidireaktio. Fysikaaliset ja kemialliset reaktiot tapahtuvat kuitenkin hitaammin.

Kolmas harvinaisempi alkalikiviainesreaktio on alkalikarbonaattireaktio (alkali carbonate reaktion). Tässä reaktiossa reagoiva kiviaines on savipi-
toinen dolomiittinen kalkkikivi. Tässä reaktiossa ei synny geeliä vaan sa-
ven mineraalien imiessä vettä saven tilavuus kasvaa voimakkaasti ja aihe-
uttaa halkeilua.

Alkalikiviainesreaktion tehokkain ehkäisemiskeino on valita runkoaines sen mukaan, ettei reaktiota pääse syntymään. Mikäli reaktio on kuitenkin päässyt syntymään, on reaktioita pyrittävä hidastamaan. Hidastustoimenpiteitä ovat:

- Vedenpoiston tehostaminen
- Pinnoitteiden käyttäminen märillä alueilla
- Halkeamien injektointi
- Estetään suolojen (alkalien) pääsy betoniin.

Riskiryhmään kuuluvat rakenteet (korkean kosteuspitoisuuden vuoksi) ovat:

- Sillat
- Padot
- Pysäköintitilat
- Perustukset ja
- Maanalaiset tilat (esimerkiksi raitisilmakuilu kesällä, RH > 80 %).

Korkeat lämpötilat kiihdyttävät reaktiota ja sen seurauksena Suomessa uima-altaissa reaktio on edennyt suhteellisen nopeasti, noin 20 vuodessa. Norjassa on huomattu, että kuluu noin 15 – 30 vuotta ennen kuin rakenteissa esiintyy alkalikiviainesreaktioon viittaavia vaurioita. Ensimmäisiä vaurioita (jotka näkyvät ulospäin) ovat epäsäännölliset tai verkkomaiset halkeilut betonin pinnalla. Tällöin rapautuminen rakenteen sisällä on ollut jo voimakasta.

Betonin runkoaine, joka aikaansaa alkalikiviainesreaktion, ei ole sidottu maantieteelliseen paikkaan vaan reagointiherkyys riippuu kivilajista. Seuraavissa kivilajeissa on tavattu alkalikiviainesreaktioherkkyttä:

- Kiillepitoiset, kvartsirikkaat liuskeet
- Vahvasti metamorfoituneet kvartsiittiset liuskeet
- Ruhjeiset kvartsiittiset liuskeet tai
- Kvartsirikkaat liuskeet.

Uuden materiaalin alkalireaktiivisuutta pystyy tutkimaan esimerkiksi seuraavilla menetelmillä:

- Kiviainesten petrograafinen analyysi (esimerkiksi SFS-EN 932-3)
- Nopeutettu laastiprismatesti (14 vuorokauden testi, esimerkiksi RILEM AAR-2 tai ASTM C1260)
- 1 vuoden betoniprismatesti (esimerkiksi RILEM AAR3 tai ASTM C1293).

Suomessa olevissa teräsbetonirakenteissa on käytetty paljon Portlandsementtiä. Sementin alkalipitoisuus lasketaan kaavalla:

$$NA_2O_{EQ} = NA_2O \% + 6,658 K_2O \%$$

Suomessa käytetyn Portland-sementin alkalipitoisuus, NA_2O_{EQ} , on 0,8-0,95 % välillä. Ulkomaisissa ohjeissa pidetään sementin alkalisuuden ylärajana 0,6 %, jotta alkalikiviainesreaktiolta voidaan välttyä. Lisäksi Suomessa on huomattu, että seossementtien alkalipitoisuudet ovat olleet alemmalla tasolla kuin olisi käytetty ainoastaan Portland-sementtiä.

(Aromaa & Lahdensivu 2014, 46-50 ja Pyy 2010, 46-48).

3.3 Kosteuslähteiden aiheuttamat haasteet

Luvuissa 3.3.1 ja 3.3.2 käydään läpi kalliotilan kosteuslähteitä ja kirjallisuustutkimuksissa esille tulleita suunnitteluratkaisuja, joilla vesivuodot saadaan halutulle tasolle. Ennen kuin suunnittelu voidaan aloittaa, on määritettävä kalliotilojen toimivuusominaisuudet ja laatuluokat. Kalliotilojen suunnittelua varten VTT on julkaissut ohjeen, Kalliotilojen ja tunnelien toimivuusominaisuudet ja latuluokitusperiaatteet, tätä edellä mainittua käyttötarkoitusta varten. Tällöin päästään usein haluttuun lopputulokseen vuotovesien hallinnan osalta. (Ritola 2005, 19.)

Suomessa ei tällä hetkellä ole vesitiiveysvaatimuksia kalliotiloja varten. Vesitiiveysvaatimukset määritellään projektikohtaisesti rakennusviranomaisten ja suunnittelijoiden kanssa yhteistyössä. Vesivuotojen tiiveysvaatimukset voidaan määrittä esimerkiksi seuraavalla tavalla:

- l/min 100 m
- l/min
- m³/h
- kpl/100 m²
- kpl/m³

Edellä mainittujen yksiköiden lisäksi on määritettävä vesivuodon laatu. Vesivuodon laatuja ovat kostea ja tippuvat. Tekniset tilat tai yleisötilat voivat olla määritelty siten, ettei tippavuotoja sallita ollenkaan. (Ritola & Vuopio 2002, 15.)

3.3.1 Kosteuslähteet kalliotiloissa

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan rakenteita, jotka sijaitsevat pohjaveden pinnan alapuolella. Tämä tuo kahdella eri tapaa haasteita kalliotilan suunnittelua ajatellen:

- Veden tiiveysvaatimukset kalliotilan sisällä
- Kalliotilan ulkoiset vaatimukset.

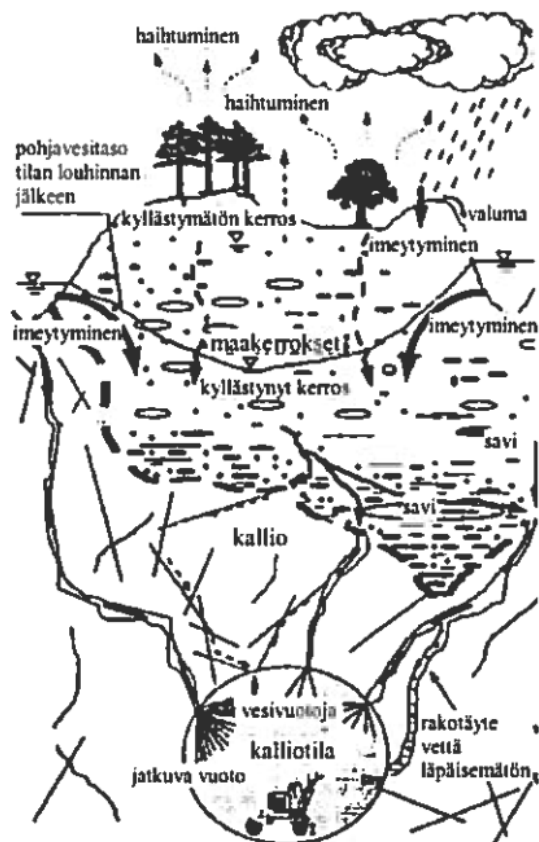
Kalliotilan ulkoisilla vaatimuksilla tarkoitetaan esimerkiksi sitä, ettei pohjaveden pintaa saa laskea pysyvästi kun rakennetaan uusi kalliotila. Lisäksi on huomioitava se, ettei pohjaveden virtauksia muuteta kalliotilan yläpuolisessa maaperässä tai kalliossa. Alla kuvissa 8-10 on kuvattu vesieristämättömän kalliotilan vesien mallinnusprosessia ennen kuin kalliotilaa on ryhdytty louhimaan. Laadullisilla menetelmillä selvitetään pohjaveden virtausten reittejä. Määrällisillä tarkasteluilla tutkitaan ne maa- ja kallioalueet, jotka johtavat vettä muuta ympäristöä paremmin. Yhdistämällä nämä kaksi edellistä menetelmää, saadaan arvio vesieristämättömän kalliotilan vuotovesimääristä. (Ritola 2002, 14-15; Laamanen 2000, 10-12.)



Kuva 8. Pohjaveden virtaamisen laadullinen tarkastaminen (Laamanen 2000, 12.)



Kuva 9. Pohjaveden virtaamisen mallintaminen määrällisiä menetelmiä käyttäen (Laamanen 2000, 12.)



Kuva 10. Pohjaveden laadullisen ja määrällisen virtaaminen yhdistettynä samaan tarkasteluun (Laamanen 2000, 13.)

Suomessa kalliotilat usein vedeneristetään. Luvussa 3.3.2 on kerrottu tarkemmin kalliotilan vedeneristysratkaisusta. Kalliotilan kosteuslähteitä ovat toimimaton vedeneristys, jotka ovat:

- Kallion injektointi on epäonnistunut
- Ruiskubetonin salaojat eivät toimi
- Yhtenäiset rakosysteemit tuovat vettä kuiluun
- Rikkonaisuusvyöhykkeet. (Ritola & Vuopio 2002, 16-18.)

3.3.2 Suunnitteluratkaisuja kalliotilan vedeneristämiseen

Kalliotilan vedeneristäminen ovat kallion tiivistäminen, salaojitus ja erilaiset sisäkattoratkaisut. Norjassa on käytetty lisäksi erikoisrakennetta, jossa vettä eristävä kalvo kiertää koko kalliotilan ympäri. Kalvo sijaitsee ruiskubetonikerroksen ja paikalla valetun betonikerroksen välissä. Tämä ratkaisu on kalliimpi ratkaisu kuin Suomessa käytetyt sisäkattotyypiset verhourakenteet.

Kallion tiivistäminen

Kallion tiivistäminen jaetaan kahteen osaan: esi-injektointi ja jälkinjektointi. Esi-injektoinnin tarkoituksena on saada kalliotilaa ympäröivä kalliorakenne niin tiiviiksi ja yhtenäiseksi massaksi, ettei vesi pääse kalliotilaan. Esi-injektointi suoritetaan joko maan pinnalta tai louhittavasta perästä. Lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä ovat: kallion rakominaisuudet, geohydrologia, injektointireikien geometria, injektointipaine sekä injektointiaine ja sen koostumus. Suomessa ei injektoida kalliota yhtä paljon kuin muualla Pohjoismaissa. Jälkinjektoinnilla injektoidaan yksittäisiä vuotopisteitä jo louhityksessa kalliotilassa. Tämä menetelmä ei ole yhtä tehokas kuin esi-injektointi sillä vuotokohta siirtyy usein toiseen paikkaan. (Ritola & Vuopio 2002, 16-17.)

Suomessa käytetyin injektointiaine on ollut Rapid-sementti. Rapid-sementin alkalipitoisuus, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{EQ}}$, on 1,35, joka tarkoittaa sitä, että alkali-kiviainesreaktio on mahdollinen (Pyy, Holt & Ferreira 2012, 13). Suomessa on viimeaikoina otettu käyttöön erilaisia mikrosementtejä. Näitä mikrosementtejä ovat esimerkiksi Injektering-, Ultrafin tai Rheocementit. Esimerkiksi Injektering 30 ja Ultrafin 12 täyttävät vähäalkalisen sementin määrityksen $\text{Na}_2\text{O}_{\text{EQ}} \leq 0,6$ (Injektering 30 –esite 2014, 3; Ultrafin 12 -esite, 3). Kun tiiveysvaatimukset edelleen kasvavat, on mikrosementtien rinnalle kehitetty kemiallisia aineita. Näiden kemiallisten injektointiaineiden tunkeutuvuus on usein parempi kuin sementtipohjaisten injektointiaineiden. (Ritola & Vuopio 2002, 16.)

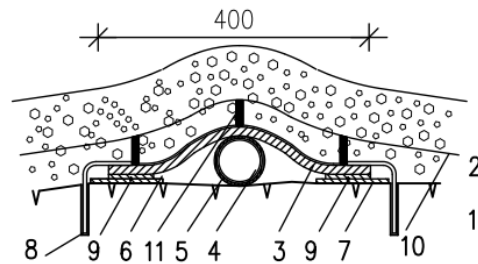
Salaojitus

Kalliotilojen salaojien tukkeutuminen tuo usein vuotokohtia kalliotilaan. Tästä syystä on erittäin tärkeä toteuttaa huollettavat salaojajärjestelmät. Kalliotiloissa on kolme erityyppistä salaojaratkaisua, jotka ovat:

- Kallion sisäinen salaojitus
- Ruiskubetonisalaojitus
- Lattiasalaojitus.

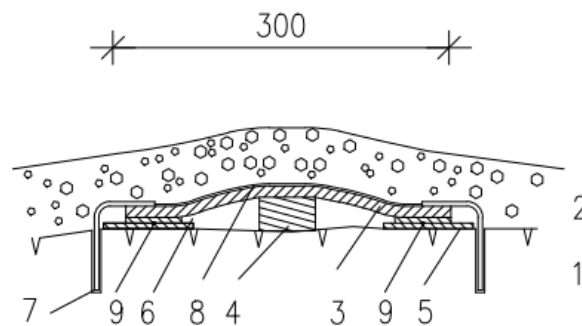
Kallion sisäisellä salaojituksella tarkoitetaan sitä, että kallioon porataan reikiä ohjaamaan vettä. Vedenohjaukset voivat olla työnaikaisia, jotta esimerkiksi pulttien onnistunut juotos saadaan toteutettua. Nämä työnaikaiset kuivatusreiät injektoidaan jälkikäteen. Porareikäkuivatuksella voi myös kuivata esimerkiksi raitisilmakuilun. Mikäli raitisilmakuilun kalliota ei saada kuivaksi vaurioittaa kylmä ilma talvella kalliota ja kallion ruiskubetonirakenteita (pakkasrapautuminen). Kuilun alaosassa nämä kallion sisäiset porareivät yhdistetään kalliotilan kuivatusvesijärjestelmiin. Tätä edellä kuvattua kuivatusmenetelmää on kuitenkin vaikea käyttää laske-matta pohjaveden pintaa. (Ritola & Vuopio 2002, 18.)

Ruiskubetonisalaojilla otetaan pistemäiset vesivuodot haltuun. Suomessa ruiskubetonisalaojia asennetaan ennaltaehkäisevästi kalliorakenteen muutoskohtiin: kivilajin muutos, kalliorakoon, kallioruhjeen kohdalle ja niin edelleen. Kun salaoja asennetaan esimerkiksi kallioraon kohdalle vähentää se ruiskubetonin ja kallion välistä tartuntapinta-alaa. Tämä on huono asia, sillä juuri kallion muutoskohdissa tulisi olla hyvä tartunta kalliolujituksia ajatellen. Kuvissa 11 ja 12 on esimerkkejä Suomessa käytetyistä salaojaratkaisuista. Kuvan 11 salaojaputken voi vaihtaa umpiputkeksi vesien kuljettamista varten. Toinen vaihtoehto on ruiskuttaa ohut ruiskubetonikerros (esimerkiksi 20 – 40 mm) ja seurata muutaman päivän ajan mistä kohtaa esiintyy vuotoja. Näihin vuotokohtiin asennetaan salaojat ja ruiskutetaan uusi ruiskubetonikerros. Tämä toimenpide toistetaan niin monta kertaa, ettei vuotoja enää synny. Esimerkiksi Ruotsissa on siirrytty tähän menetelmään. Menetelmä on hitaampi kuin Suomessa käytetty menetelmä. Toimintavarmuutta parantavana ratkaisuna on pohdit-tu saattolämmitettyjä salaojia. (Ritola & Vuopio 2002, 18.)



- 1 Kallio
- 2 Ruiskubetoni 90 mm (10–15 mm ilman kuituja, 45–50 mm (2 ruiskutuskertaa) kuiduilla ja päällä 30 mm suojakerros ilman kuituja)
- 3 Selkälevy umpisolumuovi 40 kg/m³
- 4 Salaojaputki (d 50 mm)
- 5 PE tukirengas
- 6 Virtauskouru
- 7 Reunapalkki
- 8 Kiinnitysnaula
- 9 Hehkutettu teräslanka d 3 mm
- 10 Rauditusverkko (d 3.4 mm # 100 mm) välikkeillä (11) selkälevyn päällä, leveys 800 mm. Välikkeet eivät saa lävistää selkälevyä. Rauditusverkon ja selkälevyn välissä 30 mm ruiskubetonia niin, että selkälevyn päällä on 10–15 mm kerros ilman kuituja ja loput kuidullista ruiskubetonia.

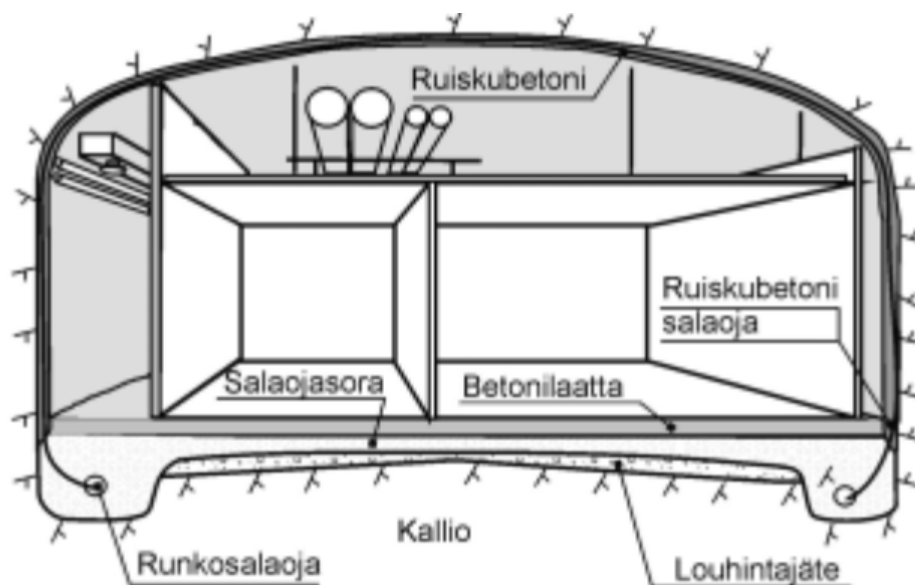
Kuva 11. Suomessa käytetty ruiskubetonisalaoja



- 1 Kallio
- 2 Ruiskubetoni 50 mm salaojan kohdalla, muuten 40 mm
- 3 Selkälevy umpisolumuovi 40 kg/m³
- 4 Keskipalkki PE
- 5 Reunapalkki
- 6 Virtauskouru
- 7 Kiinnitysnaula
- 8 Tiheäsilmäinen ruiskubetonin tartuntaverkotus
- 9 Hehkutettu teräslanka d 4 mm

Kuva 12. Suomessa käytetty vaihtoehtoinen ruiskubetonisalaojaratkaisu

Kalliotilan lattiasalaojat ottavat lattiarakenteiden vesien lisäksi ruiskubetonisalojilta tulevan veden, josta ne johdetaan eteenpäin kokoomakaivoon. Lattiasalaojat sijaitsevat tyypillisesti lattian reuna-alueille. Pienemmän jännevälin kallioiloissa salaojat voivat sijaita kalliotilan lattian alla keskellä tai ainoastaan toisessa reunassa. Kuvassa 13 on esitetty kalliotilan tyypillinen kuivatusjärjestelmä. (Ritola & Vuopio 2002, 19.)

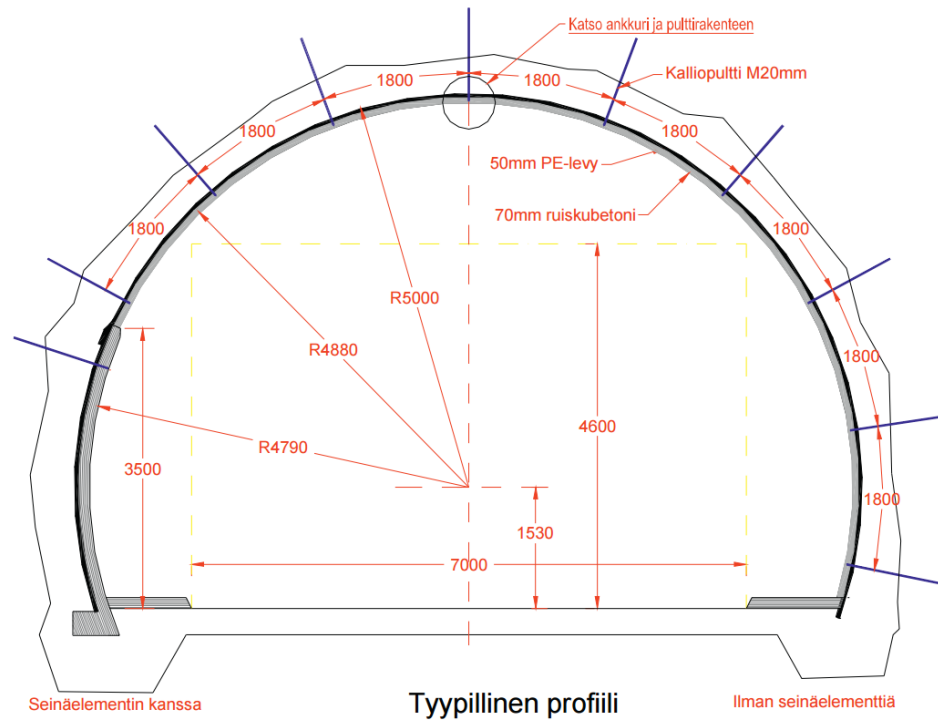


Kuva 13. Kalliotilan tyypillinen salaojajärjestelmä (Ritola & Vuopio 2002, 20).

Sisäkatot

Sisäkattoratkaisuilla otetaan erityisesti tippavesivuodot haltuun. Sisäkattorakenteita on kehitetty eri käyttötarkoitusta varten. Yleisötiloissa ja sähkökeskuksissa on käytetty erilaisia PVC-pintaisia polyesterikankaita.

Liikennetunneleissa on käytetty niin kutsuttua verhousrakennetta joka koostuu lämmöneristeestä ja ruiskubetonikerroksesta. Lisäksi ”Kalliorakentaminen 2000” –teknologiahankkeessa osaprojektissa ”Kalliotilojen veden- ja lämmöneristysrakenteet” projektin tuotoksena on esitetty, että lämmöneristeen päälle asennettaisiin vedeneristys. Lämmöneristeen tarkoituksena on suojata kalliota jäätymiseltä. Talvella pakkasella ajoneuvot tuovat jatkuvasti kylmää pakkasilmaa kalliotunneliin ja ilman lämmöneristettä kallio ja ruiskubetoni pakkasrapautuvat. Ruiskubetoni toimii verhousrakenteen kantavana runkona ja lämmöneristeen paloeristeenä, katso kuva 14.



Kuva 14. Tyypillinen verhousrakente liikennetunnelissa (ÖS-Kombi-verhous –esite, 2)

(Einsalo 2016.)

4 TULOILMAKUILUN HAASTEET

Tuloilmakuilun haasteita ovat kylmä ilma talvella (pakkasrapautuminen), kosteus kesällä ja haasteellinen sijainti. Talvella raitisilma on pitkiä ajanjaksoja pakkasella ja kun ruiskubetonikerroksessa tai kallion raoissa on vettä seuraa ajan myötä pakkasrapautumista. Lisäksi on varmistuttava siitä, ettei kylmä ilma jäädytä olevia rakennuksia tai salaajajärjestelmiä. Kesällä kosteus voi olla pitkiä ajanjaksoja $RH > 80\%$ kun kuiluun otetaan lämmintä ilmaa sisään. Kalliokuilussa tuloilman lämpötila laskee ja tästä seuraa, että vesi tiivistyy kylmille ruiskubetonipinnoille. Tämä kosteus mahdollistaa olosuhteet esimerkiksi alkalikiviainesreaktioille.

4.1 Kuilun eristäminen

Tuloilmakuilun lämmöneristämiseen löytyy erityyppisiä lämmöneristeitä joita tässä luvussa käydään tarkemmin läpi. Eri materiaaleilla on hieman erilaisia ominaisuuksia josta seuraa, ettei sama lämmöneriste sovellu jokaiseen kuilurakenteeseen suoraan. Kaikissa tuloilmakuiluissa on yksi yhteinen tekijä – ei haluta, että lämmöneriste palaa kuilussa. Palavia lämmöneristeitä käytetään toki mutta nämä on palosuojattava erikseen esimerkiksi ruiskubetonilla. Toinen huomioon otettava seikka lämmöneris-

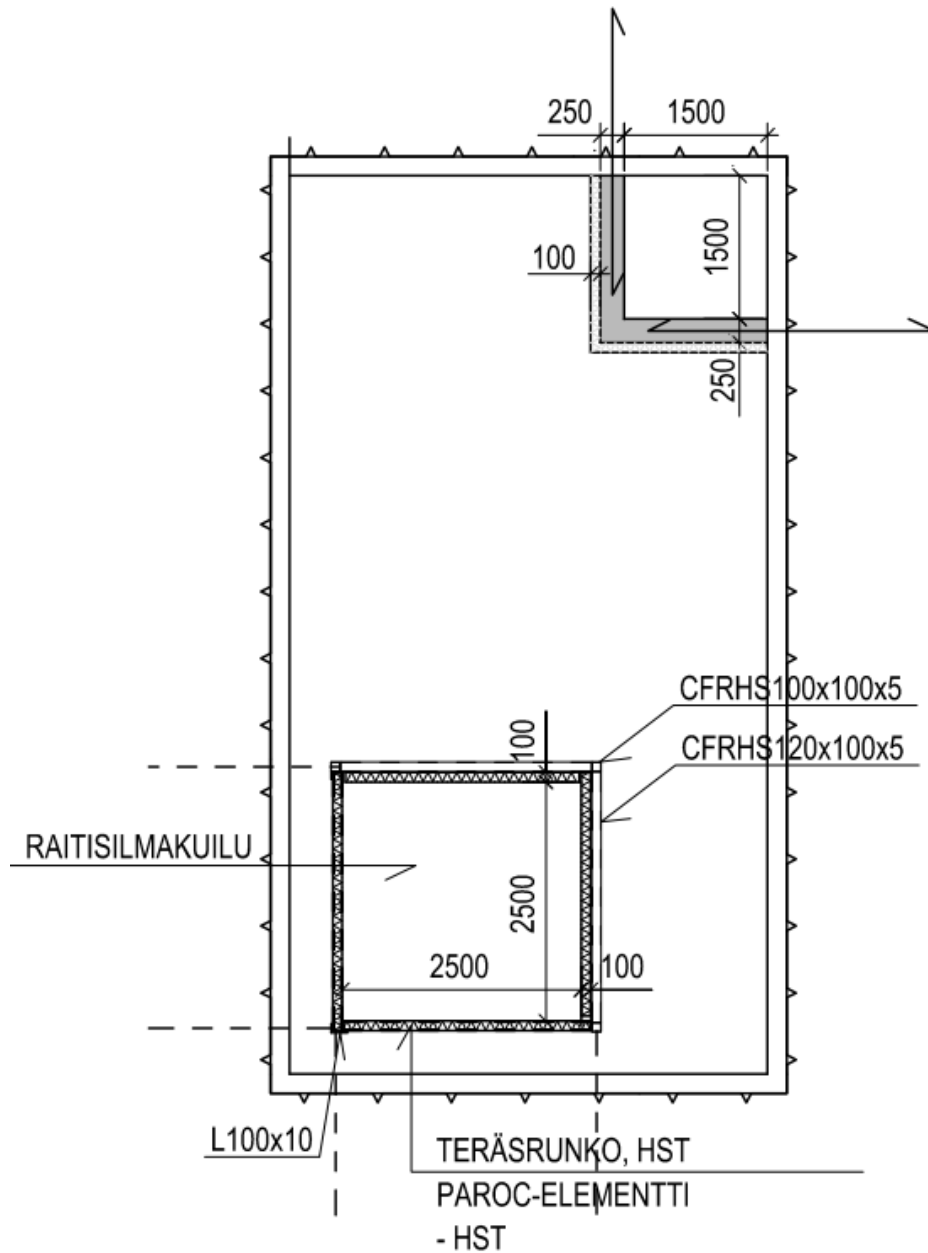
tettä suunniteltaessa on se, että on saavutettava hygieniapinta kuilun tai tuloilmakanavan sisäpinnoille (nykyään ilmanvaihtosuunnittelijat vaativat tuloilmakuiluun puhdistettavissa olevan hygieniapinnan kuilun sisäpinnaksi).

PAROC-elementtiratkaisu

PAROC-elementti koostuu kivivillaytimestä (mineraalivillasta) ja pintamateriaalina ovat teräsohutlevyt. Mineraalivillojen lämmönjohtavuus λ vaihtelee 0,031 ja 0,041 W/(mK) välillä, kun kyseessä on levymainen eristerakenne. PAROC-elementtien valmistajan suunnitteluohjeesta löytyvät elementtien tekniset ominaisuudet suoraan taulukkomuodossa. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi U-arvo, palonkesto, paino ja paksuus. Raitisilmakuiluissa on kesällä todella kova kosteusrasitus ja suolarasitus saattaa myös olla suuri, joten toteutuneissa projekteissa PAROC-elementtien ohutlevyt ovat saattaneet ruostua puhki. Edellä mainittujen elementtien suunnitteluohjeesta löytyy kuitenkin vaihtoehto, jossa ohutlevyjen pintamateriaalina käytetään haponkestävää terästä (AISI 316, EN 1.4404). Tämän materiaaliratkaisun kalliimpi hinta nostaa kustannuksia. Jos kuitenkin halutaan käyttää halvempia PAROC-elementtejä ja teräsrakenteita on kuilun kosteus saatava hallintaan riittävällä ilmanvaihdolla. Lisäksi elementtirakenne vaatii aina erillisen kannatusrungon joka usein muodostuu teräspilareista ja teräspalkeista. Aikaisemmassa tutkimuksessa (Kalliotilojen veden- ja lämmöneristysrakenteet) on suositeltu, että rakenteen saumojen kosteustekninen toimivuus varmistetaan pellityksellä tai erillisellä eristysrakenteella. Kuvassa 16 on kuvitteellinen suunnitteluratkaisu raitisilmakuilun toteutuksesta PAROC-elementtiratkaisulla. Ulkokulmien eristäminen voi osoittautua vaikeaksi tässä suunnitteluratkaisussa. Kuvassa 15 on esitetty maanpäällisen rakennuksen ulkoseinän ulkonurkkaliitos. PAROC-elementtien ja pilarin välissä on tiiviste, joka toimii höyrynsulkuna. Samaa tiivistysperiaatetta käytetään ulkonurkan kulmappellin ja PAROC-elementtien välissä. (Paroc-elementtiratkaisu suunnitteluohje 2016, 4-6; Kivikoski, Pöyhönen, Riekkola, Sorjonen & Viitala 1996, 145-146; Vinha 2014, 261.)



Kuva 15. PAROC-elementin maanpäällisen ulkoseinän ulkonurkkaliitos (Paroc-elementtiratkaisut suunnitteluohje 2016, 8.)



Kuva 16. Esimerkki kuvitteellisesta raitisilmakuilusta joka on toteutettu PAROC-elementtirakenteella

Sprexif ruikutettava lämmöneriste

Sprexif ruikutettava eriste on Ranskassa kehitetty ja patentoitu tuote joka on ratkaisu palon, lämmön ja ääneneristykseen. Lisäksi menetelmällä voi ratkaista haastavia kondensoitumisongelmia. Ruikutustyön saa suorittaa ainoastaan lisenssin omaavat yritykset. Eriste on joko lasivillapohjainen tai vuorivillapohjainen. Sprexif eristeen lämmönjohtavuuskerroin λ on 0,033 tai 0,039 W/(mK), riippuen eristevaihtoehdosta. Sprexif ruikutettava eristejärjestelmän etuja ovat:

- Työn nopea suoritus (esimerkiksi vaikeapääsyiset tilat)
- Materiaali täyttää hyvin raot
- Sprefixillä voi pinnoittaa kaarevia, epäsäännöllisiä ja sileitä pintoja
- Eristeellä saadaan yhtenäisiä pintoja ilman saumoja ja väliskeitä
- Eriste ei halkeile tai kutistu kuivuttuaan
- Eristeen päälle voi maalata tai päällystää esimerkiksi lasikuitukan-
kaalla iskunkestävyyden parantamiseksi
- Mikäli Sprefixillä eristetyllä pinnalla ilmenee vaurioita, on se hel-
posti korjattavissa.

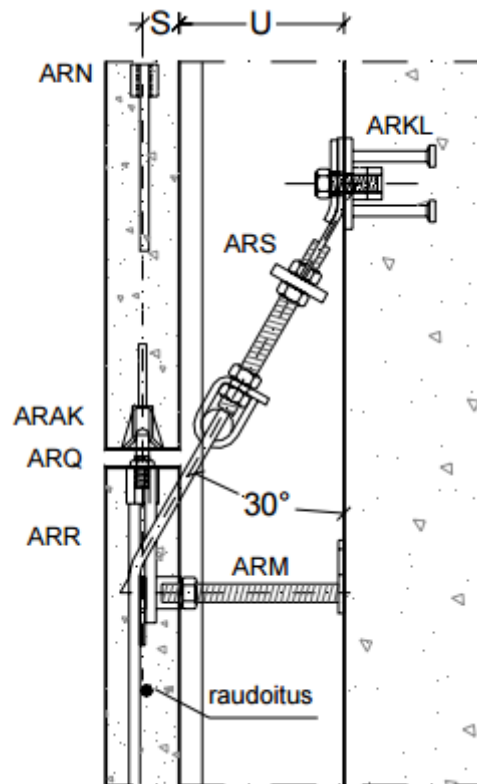
Yllä listatut ominaisuudet soveltuvat loistavasti suoraan esimerkiksi junan vaunujen, rakennusten tai laivojen eristämiseen, joissa rakenteiden liikkeet on suunniteltu tarkoin ja saatu haltuun. Mikäli eristettä sovelletaan suoraan tuloilmakuilun ruiskubetonipinnalle, huolettua opinnäytetyön tekijää kallion liikkeet. Kallio saattaa liikkua usean senttimetrin ja tästä kohtaa eriste saattaa revetä paikallisesti. Samaan uuteen halkeamaan saattaa työntäytyä vettä. Mikäli näitä paikallisia vuotoja sallitaan ja tuloilmakuilun käyttökotkoja sallitaan (korjaustyön aikana) voidaan eristejärjestelmää käyttää suoraan kallion lujittamista varten tarkoitetun ruiskubetonikerroksen päälle. (SpreFix –esite 2005, 1-3.)

Toinen vaihtoehto on rakentaa väliseinä esimerkiksi teräsbetonista ja ruiskuttaa Sprefix eristettä kuilun sisäpinnalle. Tällöin ruiskubetonipinta saa vuotaa ja rapautua omaa vauhtia. Uutena haasteena väliseinällä on se, että se on tiellä, jos kalliolujituksia halutaan saneerata. Käynnissä olevissa projekteissa on noussut esille se, että kuinka suuren huoltotilan kalliokuilun saneeraus tarvitsee.

Polyeteeni lämmöneriste

Polyeteeni on joustava materiaali jolla on eristetty liikennetunneleita Norjassa, Suomessa ja Ruotsissa, katso kuva 14. Eristeen lämmönjohtavuus, λ , on 0,040 W/(mK). Polyeteeni kuuluu samaan eristeryhmään kuin alempana kuvatut polystyreeni ja polyuretaani – solumuovilämmöneristeet. Koska molemmat eristeet ovat palavia materiaaleja, ovat ne palonsuojattu esimerkiksi teräsbetonilla. Polyeteenilevyjä on palonsuojattu paljon ruiskubetonilla. ”Kalliotilojen veden- ja lämmöneristysrakenteet” – tutkimusprojektin tuotoksena esitettiin, että edellä kuvattu verhousrakennetta voi soveltaa myös tuloilmakuilussa. Mikäli kuilu on hyvin korkea, tulee opinnäytetyöntekijällä mieleen se tosiasia, että rakenne tarvitsee erillisen pystykannakoinnin vinositeillä. Kuvassa 17 on esitetty maanpäällisen rakennuksen julkisivun ripustamisratkaisu. Kierretanko ARM toimii puristussauvana ja kierretanko ARS toimii vetosauvana. Opinnäytetyöntekijän mielestä pystykannakointiratkaisua tulisi kehittää kalliokuiluun sopivaksi (esimerkiksi 30° kulmassa olevilla harjaterästangoilla). Toinen vaihtoehto on ajatella ruiskubetonikerrosta kantavana väliseinä. Usein tuloilmakuilun alapää on suurempi kuin itse kuilu. Tällöin eivät pysty-

kuormat välity alas perustuksille asti. Lisäksi veden tiiveyteen tulee kiinnittää erityistä huomiota limittämällä lämmöneristeet riittävästi tai erillisellä vedeneristeellä. (Vinha 2014, 264; Kivikoski, Pöyhönen, Riekkola, Sorjonen & Viitala 1996, 146.)



Kuva 17. Maanpäällisen rakennuksen julkisivun ripustusliitoksen toimintaperiaate (AR ripustusjärjestelmä –käyttöohje 2013, 4).

Polyuretaani lämmöneriste

Tavallisen polyuretaanieristeen (PUR/PIR) lämmönjohtavuus, λ , on välillä 0,024-0,027 W/(mK). Markkinoilla on lisäksi diffuusiotiiviillä pinnoitteilla varustettuja polyuretaanieristeitä joiden lämmönjohtavuus, λ , on välillä 0,022-0,023 W/(mK). Ruiskutettavan polyuretaanin lämmönjohtavuus, λ , vaihtelee 0,025-0,027 W/(mK) välillä. Polyuretaanit toimivat höyrinsulkuna. Ruiskutettavaa polyuretaania tulee olla > 35 mm paksu kerros, jotta voidaan olettaa sen toimivan höyrinsulkuna. Pinnoitettujen polyuretaanilevyjen vesihöyrynläpäisyys δ_v on 0,005-0,01·10⁻⁶ m²/s välillä kun pinnoittamattomien PUR/PIR-eristelevyjen vesihöyrynläpäisyys δ_v on 0,01-0,2·10⁻⁶ m²/s välillä. Käyttökohteet tuloilmakuiluissa, katso kohta polystyreeni lämmöneristeet alempana. (Vinha 2014, 266-267.)

Polystyreeni lämmöneristeet

Polystyreenit jaetaan kahteen eri ryhmään: paisutetut polystyreenit (EPS) ja suulakepuristetut polystyreenit (XPS). Molempien eristeiden lämmön-

johtavuus, λ , vaihtelee välillä 0,033 – 0,039 W/(mK). Lisäksi EPS-eristeellä päästään lämmönjohtavuuden, λ , osalta arvoon 0,030-0,031 W/(mK) kun polystyreeniin lisätään lämpösäteilyä absorboivia lisäaineita. Suurin ero EPS ja XPS -eristeiden välillä on se, että XPS-eristeen voidaan olettaa toimivan höyrynsulkuna. XPS-eristeen vesihöyryn läpäisevyys δ_v on noin $0,1-0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. EPS-eristeen vastaava vesihöyryn läpäisevyys δ_v on noin $0,2-1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, joka ei ole riittävän hyvä toimiakseen höyrynsulkuna. XPS-lämmöneristeen tavanomaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi perustusten routaeristykset ja käännetyt kattorakenteet hyvän puristuskestävyyden ansiosta. (Vinha 2014, 264-266.)

Kalliotilan tuloilmakuilussa EPS, XPS ja PUR/PIR -eristeitä voi käyttää esimerkiksi betonisandwich-elementtirakenteena. Elementit voivat koostua yksittäisistä seinäelementeistä tai erikoisemmista rengaselementeistä. Toinen betonikuori toimii kantavana rakenteena ja toinen kuori toimii palosuojauksena. Elementtien etuna on se, ettei seinärakenteen ja kallion väliin tarvitse jättää niin paljoa tilaa kuin muottikalusto vaatisi esimerkiksi paikalla valetussa suunnitteluratkaisussa. Haasteena on kuitenkin kalliokuilun saneeraus kun seinäelementit ovat tiellä. Lisäksi ruiskutettavaa PUR/PIR eristettä voi ruiskutettu suoraan kalliokuilun lujiteruiskubetonin päälle. Tällöin palonsuojaus on hoidettava erillisellä rakenneratkaisulla tai pinnoitteella (jos tuloilmakuiluun ei sallita palavia materiaaleja).

4.2 Kuilun jäätyminen

Tuloilmakuilun kallioseinämän on pysyttävä $> +0 \text{ }^\circ\text{C}$, sillä jäätyminen seurauksena kallio ja kallion lujiteruiskubetoni pakkasrapautuvat. Tämän takia kuilun kallioseinän tulee olla mahdollisimman vesitiivis. Kun vettä ei kallioraoissa ole, ei pakkasrapautumista pääse syntymään. Kirjallisuustutkimuksen mukaan tehokkain keino tähän on esi-injektoimalla suoritettu kallion tiivistäminen. Kalliosalaojat eivät ole ratkaisu ainakaan Helsingin alueella, sillä pohjaveden pintaa ei saa laskea. Tippavuodot kannattaa kuitenkin johtaa hallitusti ruiskubetonisalojissa. Ruiskubetonisalojien saattolämmitystä tulee harkita.

4.3 Maanpäällisen rakennuksen jäätyminen

On varmistuttava siitä, etteivät maanpäälliset rakennukset tai niiden salaojat pääse jäätymään. Näiden edellä mainittujen haasteiden lisäksi on varmistuttava siitä, etteivät maanalaiset rakenteet ja kunnallistekniikka pääse jäätymään. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kuilun maanalainen osuus on lämmöneristettävä riittävästi.

5 SUUNNITTELUN RATKAISUT

Luvussa 5 käydään läpi eri vaihtoehtoja kuinka raitisilmakuilu saadaan toimimaan rakennusfysikaalisesti oikein. Ratkaisujen lähtökohdaksi on asetettu se, että ilman lämpötila kallioseinän lujituspulttien ruiskubetonikerroksen näkyvällä pinnalla on $> +0$ °C. Ensiksi käydään läpi fysiikan kaavat. Kaavat ovat pääsääntöisesti opinnäytetyön ohjaajan, Tapio Korkeamäen, Ylemmän Ammattikorkeakoulun rakennusfysiikan kurssin esimerkkilaskelmista otettuja. Tämän jälkeen esitellään erilaisia suunnitteluratkaisuja, joilla lämpötila saadaan pysymään $> +0$ °C. Tutkimusosuuden viimeisessä osuudessa tutkitaan kahden olevan kalliotilan tuloilmakuilun toimivuutta.

5.1 Rakennusfysikaalinen toimintaperiaate

Tässä opinnäytetyössä rakennusfysikaalinen toimivuus perustuu siihen, että kallion lämpöenergia on suurempi kuin lämmöneristekerroksen läpi siirtyvä lämpövirta tarkasteltavana ajanjaksona. Lämmöneristeiden toimivuutta tutkitaan siten, että tarkastellaan kuinka paljon lämpövirtaa siirtyy eristerakenteen läpi tietyllä ajanjaksolla. Tässä opinnäytetyössä pakkasmäärä rajataan arvoon F50 (tilastollisesti yhden kerran 50 vuodessa toistuva pakkasmäärä). Alla on laskentakaava lämpövirran siirtymiseen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona:

$$\Phi_1 = A_1 \cdot U_1 \cdot K_d$$

A_1 on tarkasteltava pinta-ala ja U_1 on U-arvo. U-arvoa laskettaessa ovat pintavastukset $R_{si} = 0.13$ ja $R_{se} = 0.04$. Tämä arvo 0.13 vastaa hyvin tilanetta, jossa ilma ei vaihdu ilmaraossa (esimerkiksi ratatunnelin verhousterakenteen osalta on edellä kuvattu tilanne, katso kuva 14). Ilma ei siis vaihdu eristerakenteen ja kallion välitilassa. Tekniikkakulussa, jossa on rakennusaineinen tuloilmakuilu, on järjestettävä koneellinen ilmanvaihto. Tämä edellä mainittu koneellinen ilmanvaihto heikentää U-arvoa. Toisaalta kun kallion lämpöenergiaa hyödynnetään 5.2 metrin päästä, on pinta-ala todellisuudessa suurempi kuin 1 m^2 , joten laskelma on varmalla puolella. K_d on pakkasmäärä. Alla on laskentakaava kallion lämpöenergian tarkastamista varten. Kuvassa 18 on esitetty lähtötietoja piirustusmuodossa kallion lämpöenergiaan liittyen. Eri lähteissä on hieman poikkeavia arvoja kallion ominaislämpökapasiteettiarvolle.

$$h_{\text{kallio}} := 5.2 \cdot \text{m}$$

$$A_1 = 1 \text{ m}^2$$

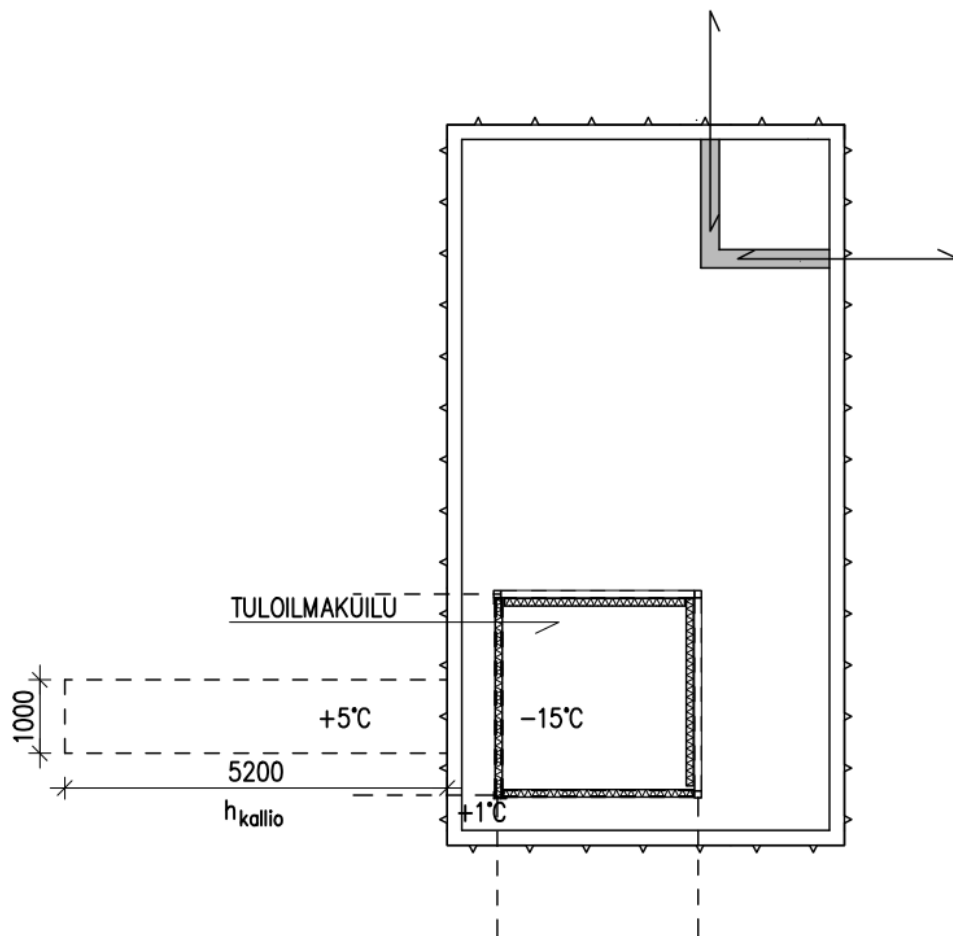
$$\gamma_{\text{kallio}} := 2700 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{\text{kallio}} := h_{\text{kallio}} \cdot A_1 \cdot \gamma_{\text{kallio}} = 1.404 \times 10^4 \cdot \text{kg}$$

$$c_1 := 840 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \quad (\text{kallion ominaislämpökapasiteetti})$$

$$\Delta T_2 := 4 \cdot \text{C}$$

$$\Phi_k := m_{\text{kallio}} \cdot c_1 \cdot \Delta T_2 = 13.104 \cdot \text{kW} \cdot \text{hr}$$



Kuva 18. Tuloilmakuilun lämpöenergian lähtötietoja kallion lämpöenergian laskemista varten.

Seuraavissa luvuissa tarkastellaan eri lämmöneristysratkaisuja. Aluksi tutkitaan, että lämmöneristeen läpi siirtyvä lämpövirta on pienempi kuin tässä luvussa ylempänä laskettu kallion lämpöenergia. Tämän jälkeen pohditaan eristeratkaisun eri ominaisuuksien soveltuvuutta kalliotilan tuloilmakuiluun.

5.2 Sprefix

Sprefix-lämmöneristeen tekniset ominaisuudet ovat kerrottu kirjallisuustutkimuksen kohdassa 4.1. Tutkitaan kuinka paksu kerros lämmöneristettä on ruiskutettava, jotta eristerakoksen läpi siirtyvä lämpövirta on vähemmän kuin kallion lämpöenergia.

Lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona (F50):

$$A_1 := 1.0 \cdot \text{m}^2 \quad (\text{tarkasteltava pinta-ala})$$

$$d_1 := 85 \cdot \text{mm} \quad (\text{lämmöneristeen paksuus})$$

$$\lambda_1 := 0.033 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{lämmöneristeen lämmönjohtavuus})$$

$$R_1 := 0.2 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}} + \frac{d_1}{\lambda_1} = 2.776 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$U_1 := \frac{1}{R_1} = 0.36 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \quad (\text{U-arvo})$$

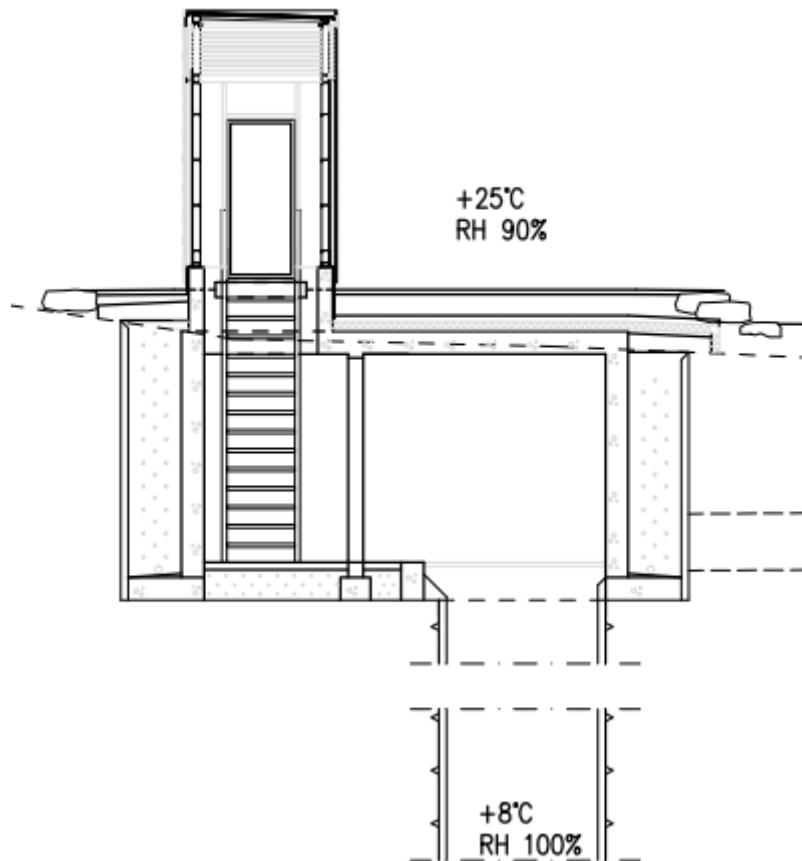
$$\Delta T_1 := 20 \cdot \text{C} \quad (\text{lämpötilaero})$$

$$t_1 := 1750 \cdot \text{hr} \quad (\text{tarkasteltavan ajanjakson pituus})$$

$$K_d := \Delta T_1 \cdot t_1 = 3.5 \times 10^4 \cdot \text{C} \cdot \text{hr} \quad (\text{pakkasmäärä vastaa Etelä-Suomen arvoa F50})$$

$$\Phi_1 := A_1 \cdot U_1 \cdot K_d = 12.609 \cdot \text{kW} \cdot \text{hr} \quad (\text{lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona})$$

Yllä olevan laskelman mukaan Sprefix-lämmöneristettä riittää 85 mm paksu kerros. Opinnäytetyön tekijän mielestä haasteena Sprefix-lämmöneristeellä on veden tiivistyminen eristeen pintaan kesällä kun kalliokuiluun tuodaan lämmintä ilmaa. Ilma jäähtyy kalliokuilussa matkalla alas kalliotilaan ja vesi tiivistyy eristeen pinnalle. Lämmöneriste on pinnoitettava vedenpitävällä pinnoitteella. Lasketaan kuinka paljon vettä tiivistyy kuvitteellisen tuloilmakuilun seinämiin kesällä. Alla kuvassa 19 on esitetty lähtötiedot piirustusmuodossa. Eli tutkitaan kuinka paljon kosteutta tiivistyy kalliotilan seinille tunnin aikana. Esimerkiksi Itäkeskuksen uimahallin ilmanvaihtokoneet ottavat 25,5 m³/s ilmaa tuloilmakuilun kautta.



Kuva 19. Ulkoilman ja tuloilmakuilun lämpötilat ja kosteuspitoisuudet kesällä.

Lasketaan kuvitteellisen tuloilmakuilun kosteuden tuotto kesällä tuntia kohden. Ilmamääränä käytetään Itäkeskuksen uimahallin tuloilmakuilun arvoa.

$$RH_1 := 65\% \quad (\text{kosteuspitoisuus ulkona kesällä})$$

$$\nu_1 := 23 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (\text{kyllästysvesihöyrypitoisuus +25 C})$$

$$RH_2 := 100\% \quad (\text{kosteuspitoisuus tuloilmakuilussa kesällä})$$

$$\nu_2 := 8.32 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (\text{kyllästysvesihöyrypitoisuus +8 C})$$

$$\nu_u := RH_1 \cdot \nu_1 - RH_2 \cdot \nu_2 = 6.63 \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$nV_1 := 25.5 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Itäkeskuksen uimahallin tuloilmakuilun ilmamäärä})$$

$$G_1 := \nu_u \cdot nV_1 = 6.086 \times 10^5 \cdot \frac{\text{g}}{\text{hr}} \quad (\text{kosteuden tuotto tuntia kohden tuloilmakuilussa})$$

Tuloilmakuilun laskelma osoittaa, että kesällä helteisenä päivänä korkean tuloilmakuilun seinämille voi kertyä 601 litraa vettä tunnissa. Tämä kuitenkin edellyttää korkeaa kuilua, jossa ilma ehtii jäähtyä +8 °C:n. Kalliokuilun ovat tyypillisesti 15 metristä 50 metriin korkeita. Tehdään toinen laskelma, jossa lämpötila laskee ainoastaan 8 asteen verran jolloin lämpötila tuloilmakuilussa on +17 °C.

$$RH_1 := 65\% \quad (\text{kosteuspitoisuus ulkona kesällä})$$

$$\nu_1 := 23 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (\text{kyllästysvesihöyrypitoisuus +25 C})$$

$$RH_2 := 100\% \quad (\text{kosteuspitoisuus tuloilmakuilussa kesällä})$$

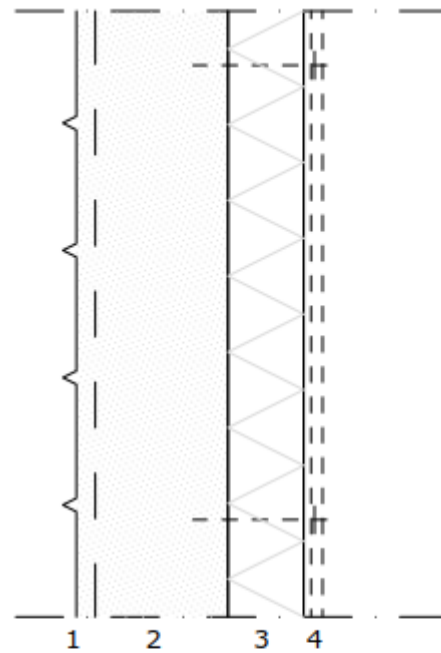
$$\nu_2 := 14.49 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (\text{kyllästysvesihöyrypitoisuus +17 C})$$

$$\nu_u := RH_1 \cdot \nu_1 - RH_2 \cdot \nu_2 = 0.46 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$nV_1 := 25.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Itäkeskuksen uimahallin tuloilmakuilun ilmamäärä})$$

$$G_1 := \nu_u \cdot nV_1 = 4.223 \times 10^4 \frac{\text{g}}{\text{hr}} \quad (\text{kosteuden tuotto tuntia kohden tuloilmakuilussa})$$

Toinen laskelma osoittaa, että kosteuden tuotto on näillä uusilla lähtötiedoilla 42 litraa tunnissa. Alla kuvassa 20 on esitetty rakennetyyppiehdotus Sprefix lämmöneristystä käytettäessä kalliotilan ulkoilmaan rajoituvassa tuloilmakuilussa. Opinnäytetyöntekijän mielestä vedeneristys tulee kiinnittää mekaanisesti ruiskubetoniin tai kallioon. Toinen vaihtoehto on rakentaa väliseinä esimerkiksi teräsbetonista tai valuharkoista ja ruiskuttaa väliseinän kuilun puoleinen pinta Sprefix-lämmöneristeellä. Väliseinä on kuitenkin tiellä jos kalliokuilun kallioseinää on jostain syystä saneerattava.



1 Louhittu kallio

Salaojitus kalliorakennesuunnitelmien mukaan

2 Ruiskubetoni kalliorakennesuunnitelmien mukaan

85 mm

3 Ruiskutettava Sprefix-lämmöneriste

4 Vedeneristys

Kuva 20. Rakennetyyppiehdotus tuloilmakuiluun Sprefix-lämmöneristettä käytettäessä.

5.3 Ruiskubetoni ja polyeteeni

Ruiskubetonin osalta tutkitaan kahta eri vaihtoehtoa. Toisessa vaihtoehdossa ei ole lämmöneristys lainkaan ja toisessa vaihtoehdossa on polyeteeni lämmöneristyskerros suoraan ruiskubetonin pinnassa kiinni. Olevat kalliokuilut ovat usein ilman lämmöneristystä. Hyviä puolia niissä on se, että vuotokohdat on hyvin havaittavissa ja vuotokohtiin voi asentaa jälkikäteen uusia kuivatusjärjestelmiä. Yksi korjausvaihtoehto on esimerkiksi pintaan näkyville asennetut kuivatusputket havaittuihin vuotokohtiin. Lisäksi kallion lujitukseen tarkoitetun ruiskubetonin kunto on helposti tarkastettavissa kun lämmöneristys ei ole tiellä.

Lasketaan kuinka paksu kerros polyeteeni lämmöneristystä on asennettava jotta kalliopinta pysyy $> 0^{\circ}\text{C}$. Seuraavassa luvussa, 5.4, on esitetty Örs-ta Combi – verhourakenne. Verhourakenteessa käytetään vastaavan-

laista lämmöneristystä kuin tämä ruiskubetonipinnalle asennettu polyeteeni lämmöneristys joten alla suoritettu laskelmaa voi käyttää myös sen tutkimista varten.

Lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona (F50):

$$A_1 := 1.0 \cdot \text{m}^2 \quad (\text{tarkasteltava pinta-ala})$$

$$d_1 := 100 \cdot \text{mm} \quad (\text{lämmöneristeen paksuus})$$

$$\lambda_1 := 0.04 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{lämmöneristeen lämmönjohtavuus})$$

$$R_1 := 0.2 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}} + \frac{d_1}{\lambda_1} = 2.7 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$U_1 := \frac{1}{R_1} = 0.37 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \quad (\text{U-arvo})$$

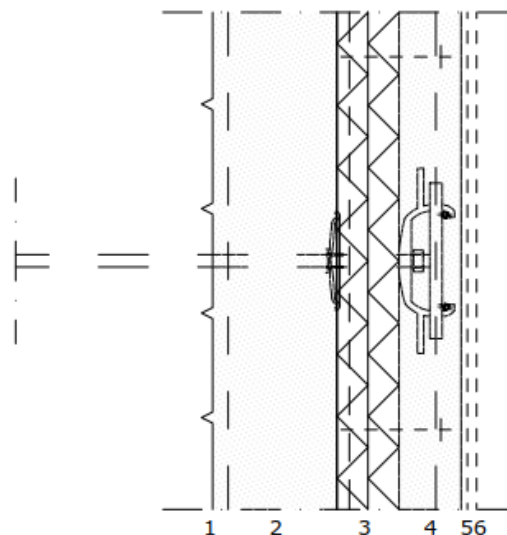
$$\Delta T_1 := 20 \cdot \text{C} \quad (\text{lämpötilaero})$$

$$t_1 := 1750 \cdot \text{hr} \quad (\text{tarkasteltavan ajanjakson pituus})$$

$$K_d := \Delta T_1 \cdot t_1 = 3.5 \times 10^4 \cdot \text{C} \cdot \text{hr} \quad (\text{pakkasmäärä vastaa Etelä-Suomen arvoa F50})$$

$$\Phi_1 := A_1 \cdot U_1 \cdot K_d = 12.963 \cdot \text{kW} \cdot \text{hr} \quad (\text{lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona})$$

Yllä oleva laskelma osoittaa, että 100 mm paksu lämmöneristyskerros polyeteeni lämmöneristystä riittää pitämään kalliopinnan $> +0$ °C. Opinnäytetyöntekijän mielestä lämmöneriste tulee olla uritettu, jotta mahdolliset vuotovedet kulkeutuvat lämmöneristyskerroksen ja ruiskubetonipinnan välissä alas maanvaraisen lattian salaojajärjestelmään. Kuvassa 13 on havainnollinen esitys siitä, miten seinän pystysalaojat liittyvät maanvaraisen laatan kuivatusjärjestelmään. Lisäksi lämmöneristeiden tulee olla limitettyjä riittävästi (esimerkiksi 200 mm) jotta vesi ei kulkeudu kalliokuilun näkyvälle puolelle. Alla kuvassa 21 on rakennetyyppiehdotus polyeteeni lämmöneristyksellä toteutetusta kalliotilan tuloilmakuilusta.



1 Louhittu kallio

Salaojitus kalliorakennesuunnitelmien mukaan

2 Ruiskubetoni kalliorakennesuunnitelmien mukaan

50+50 mm

3 Polyeteenilevy

- Urat
- Pystylimitys $\geq 200\text{mm}$

100 mm

4 Ankkuroitu ja raudoitettu ruiskubetoni

- Rauditusverkko B500K #8-150 keskeisesti
- Kiinnitys PE-levyihin asennusvälikkeillä K/K600
- Väliketyyppi "Screw Fast"
- Ankkurointi kallioon ÖS-Kombi D25-kiinnikkeillä K1350
- Kiinnikkeet kuumasinkittyjä ja epoksinnoitettuja
- Vinositeet rakennesuunnitelmien mukaan

5 Sementtipohjainen laasti (Solbruk T)

2 kertaa

6 Silikaattimaali (täyttää M1-puhtausluokan vaatimukset), esim. Keim Purkristallat

Kuva 21. Tuloilmakuilun rakennetyyppiehdotus polyeteen lämmöneristystä käytettäessä.

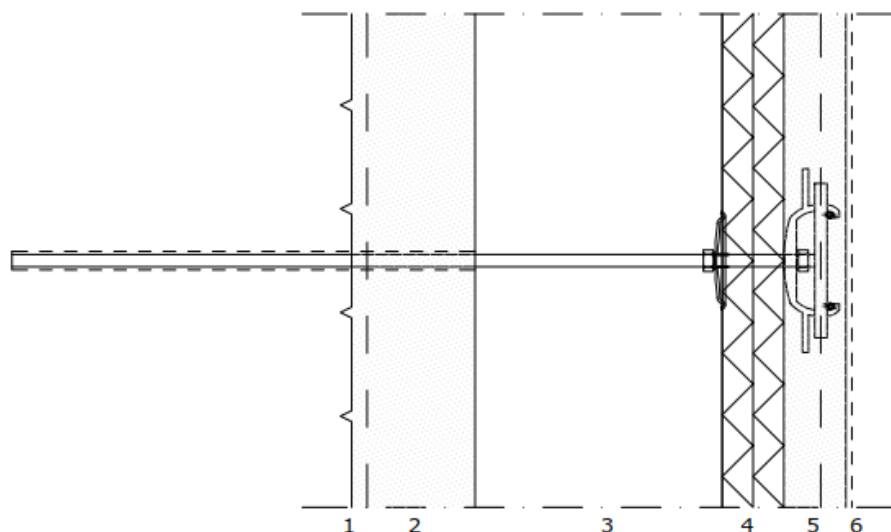
Kuvassa 21 vinositeillä tarkoitetaan ratkaisua rakenteen pystykuormia varten, jotka ovat ankkuroitava kallioon. Tämä sama ilmiö on havainnollisesti esitetty kuvassa 17, jossa on kuvattu maanpäällisen rakennuksen julkisivun ripustamista. Opinnäytetyön tekijän mielestä tätä tarkoitusta varten tulee kehittää vastaavanlainen ankkurointikappale kuin kuvassa 21 esitetty vaakakuormia varten suunniteltu osa. Edellä mainittu osa on alun perin suunniteltu verhousrakenteen pystykuormia varten, eikä tämän seurauksena sovi suoraan tätä käyttötarkoitusta varten. Kuvassa 14 on esitys verhousrakenteesta. Kuvasta käy hyvin ilmi, että rakennemallin geometria poikkeaa aika paljon kuvan 21 rakennemallin geometriasta (kierretangon rakennemalli on uloke, joka ei siis toimi).

Lisäksi kuvan 21 ruiskubetonikerros toimii paloeristeenä, mikäli tuloilmakuilun pystypinnoilla ei saa olla palavaa materiaalia, on eriste palosuojat-

tu. Rakennetyypin sementtipohjaisella laastilla saadaan tasoitettua ruiskubetonipintaa. Silikaattimaalilla saadaan helpommin puhdistettavissa oleva pinta.

5.4 ÖS Kombi (verhousrakenne)

ÖS Kombi –verhousrakenne on kehitetty tunneleiden veden- ja lämmöneristystä varten. Lämmöneristeenä käytetään samaa polyeteeni lämmöneristystä, joka on laskettu kohdassa 5.3 (lämpövirran osalta). Tämän ÖS Kombi verhousrakenteen ja kohdassa 5.3 esitellyn eristeratkaisun suurin ero on se, että ÖS Kombi –järjestelmässä on välitila eristeen ja kallion välillä. Tämän välitilan hyviä puolia ovat ne, että verhousrakenteeseen voidaan tehdä tarkastusluukkuja ja voidaan varmistaa, että vuotovedet valuvat eristeen takana alas. Näistä tarkistusluukuista voi tarkastella kallion ruiskubetonipintoja. Huonona puolena tässä rakennejärjestelmässä on se, että verhousrakenteen ripustaminen vaatii järeämmät tukirakenteet kuin kohdassa 5.3 esitetty versio. Lisäksi rakenne tarvitsee vähintään välitilan verran suuremman tilavarauksen. Kuvassa 22 on esitetty rakennetyyppiehdotus ÖS Kombi verhousrakennejärjestelmästä.



1 Louhittu kallio

Salaojitus kalliorakennesuunnitelmien mukaan

2 Ruiskubetoni kalliorakennesuunnitelmien mukaan

≥400 mm **3 Ilmarako, ÖS-Kombi kiinnityspultit K1000/1500 mm
- Vinositeet rakennesuunnitelmien mukaan**

50+50 mm **4 PE-levyt 30 kg/m³**

95 mm **5 Ruiskubetoni K35-2, F>1,5, vesitiivis, suojahuokossuhde 0,25
Ruiskubetonissa polypropeenikuituja 2 kg/m³
Raudoitusverkko B500K #8-150 keskeisesti
Raudoitusverkon kiinnitys PE-levyihin asennus välikkeillä #600,
tyyppi "Screw Fast"**

6 Pintamateriaali ja -käsittely rakennusselostuksen mukaan

Kuva 22. Tuloilmakuilun rakennetyyppiehdotus ÖS Kombi verhourakennjärjestelmää käytettäessä.

5.5 Paroc-elementtiratkaisut

Toteutuneissa projekteissa on Paroc-elementtiratkaisussa huolettanut ohutseinäisen teräksen korroosiokestävyys kesällä kun kosteusrasitus kalliotilan tuloilmakuilussa on suuri. Kesän kova kosteusrasitus on kuvattu kohdassa 5.2, jossa on myös tutkittu Sprefix-lämmöneristyksen toimivuutta. Opinnäytetyöntekijän mielestä ongelman voi ratkaista yhdellä sululla ja riittävällä ilmanvaihdolla. Tämä sulku tarkoittaa sitä, ettei ulkoilma pääse tuloilmakuilun kallio-osuudelle ja, että kondensoitua kosteusta otetaan haltuun hallitulla vedenohjauksella. Lisäksi kalliotilan tuloilmakuilun sisäpintaan voi asentaa vedeneristyksen. Tästä on kerrottu lisää alempana. Ensiksi tutkitaan lämmöneristeen toimivuus. Alla on laskelma Paroc-elementtiratkaisun lämmöneristeen toimivuudesta.

Lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona (F50):

$$A_1 := 1.0 \cdot \text{m}^2 \quad (\text{tarkasteltava pinta-ala})$$

$$d_1 := 100 \cdot \text{mm} \quad (\text{lämmöneristeen paksuus})$$

$$\lambda_1 := 0.038 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{lämmöneristeen lämmönjohtavuus})$$

$$R_1 := 0.2 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}} + \frac{d_1}{\lambda_1} = 2.832 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$U_1 := \frac{1}{R_1} = 0.353 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \quad (\text{U-arvo})$$

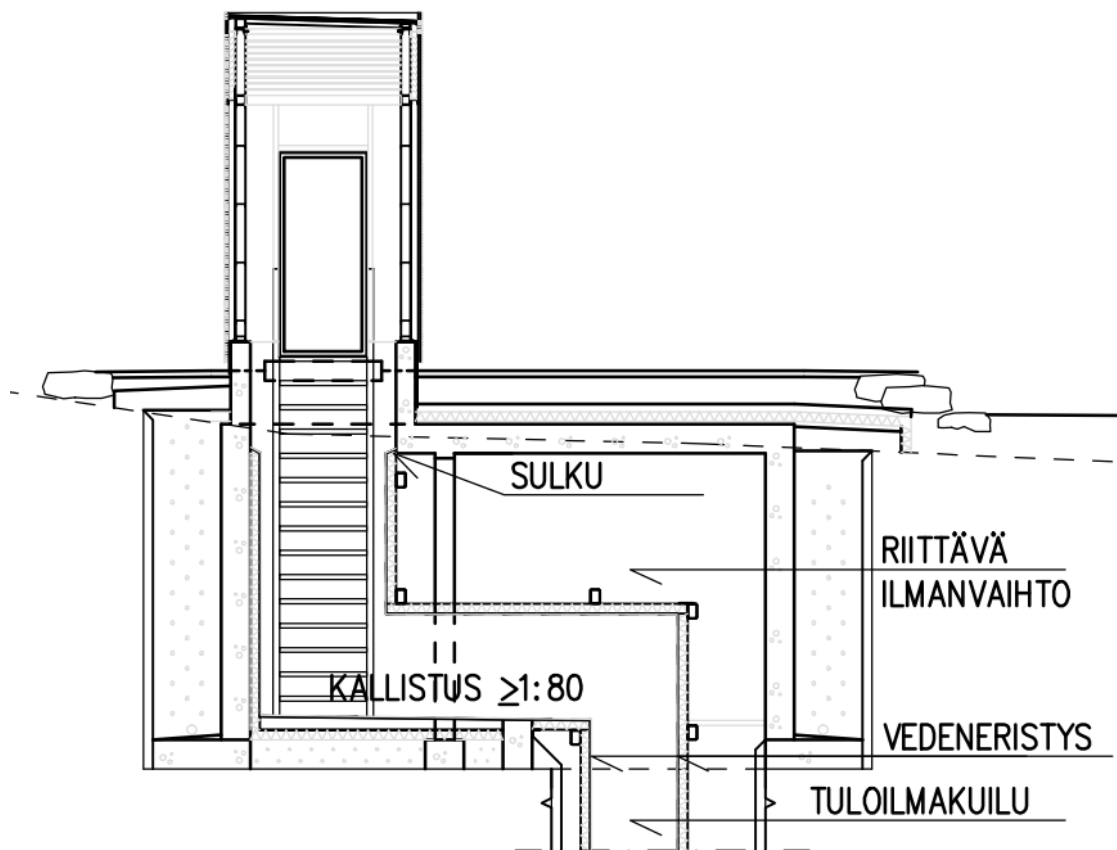
$$\Delta T_1 := 20 \cdot \text{C} \quad (\text{lämpötilaero})$$

$$t_1 := 1750 \cdot \text{hr} \quad (\text{tarkasteltavan ajanjakson pituus})$$

$$K_d := \Delta T_1 \cdot t_1 = 3.5 \times 10^4 \cdot \text{C} \cdot \text{hr} \quad (\text{pakkasmäärä vastaa Etelä-Suomen arvoa F50})$$

$$\Phi_1 := A_1 \cdot U_1 \cdot K_d = 12.361 \cdot \text{kW} \cdot \text{hr} \quad (\text{lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona})$$

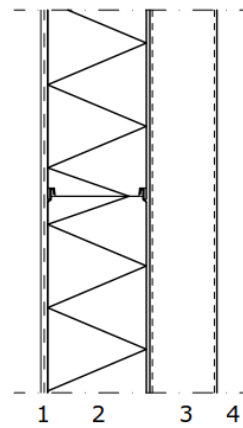
Yllä oleva laskelma osoittaa, että on käytettävä vähintään 100 mm paksua Paroc-elementtirakennetta. Lisäksi Paroc-elementtejä varten on rakennettava tukirunko, joka on usein toteutettu teräsrakenteisena. Teräsrungon korroosiokestävyys on myös varmistettava riittävällä ilmanvaihdolla, jos haponkestävä teräsrunko ei ole vaihtoehto. On kuitenkin muistettava ettei huoltomaalaus myöskään ihan helppoa ole. Alla kuvassa 23 on esitetty periaateratkaisu Paroc-elementtiratkaisusta.



Kuva 23. Tuloilmakuilu Paroc-elementtirakenteella lämmöneristettynä

Kuten kuvasta 23 voi huomata, on kalliokuilussa oltava tuloilman lisäksi jokin toinen käyttötarkoitus, sillä tuloilmakuilun ympärillä on oltava riittävästi tilaa jotta voidaan varmistua siitä, että ilma vaihtuu. Samasta pystykuilusta voi tuoda esimerkiksi sähkökaapeleita ja muita talotekniikkaan liittyviä järjestelmiä kuten radonputket.

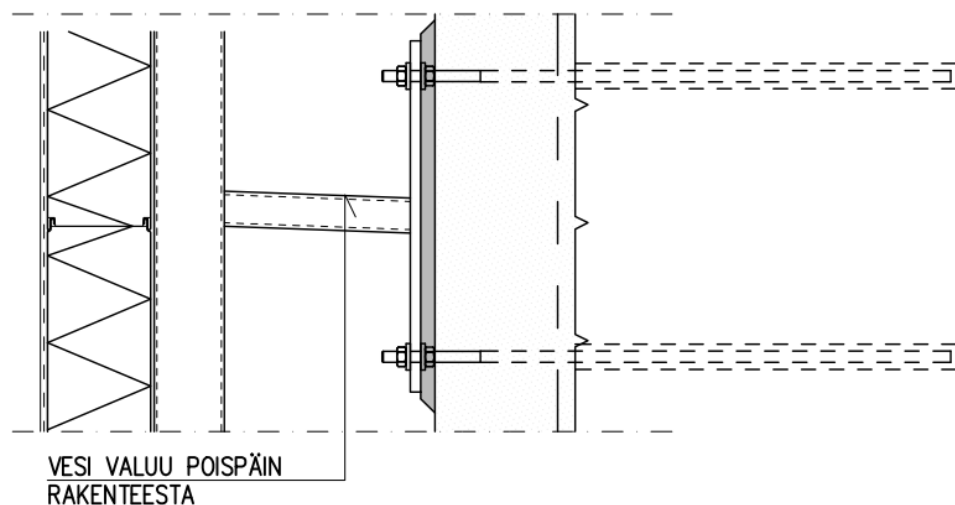
Alla kuvassa 24 on rakennetyyppiehdotus Paroc-elementtiratkaisulle. Tässä rakennetyypissä, kuten myös muissa rakennetyypeissä, ratkaisee tuloilmakuilun rakennusfysikaalinen toiminta kokonaisuutena. Jos kuilussa on huono ilmanvaihto, turmeltuu teräsrunko (ellei haponkestävä teräs ole vaihtoehto kustannussyistä). Lisäksi on pidettävä mielessä, että kallioperästä saattaa tulla suolarasitusta. Kalliotilan tuloilman ilmanlaatuun vaikuttaa myös rakennettu ympäristö. Jos kalliotila sijaitsee teollisuusalueen välittömässä läheisyydessä tai esimerkiksi meren lähellä, on todennäköistä, että ilma pitää suoloja sisällään.



- 100 mm
- 1 Vedeneristys
 - 2 Sandwich paneeli elementti
Teräsohutlevypintainen ja mineraalivillaytiminen tuote
Ruukki sandwich panel SPA S tyyppituote
 - 3 Kantava runko
Runkojako tarkistettava kuormituksen ja sandwichin mukaan
 - 4 Pintamateriaali ja -käsittely rakennusselostuksen mukaan

Kuva 24. Tuloilmakuilun rakennetyyppiehdotus Paroc-elementtiratkaisua käytettäessä.

Paroc-elementtijärjestelmän kantava teräsrunko vaatii kalliotuennan (vaakajäykistys). Nämä tuet on hyvä kallistaa poispäin rakenteesta kalliota kohti. Alla kuvassa 25 on tästä esitys. Tilanne on sama kuin maanpäällisen rungon julkisivussa. Kaikki vaakarakenteet on kallistettava ulospäin rakennuksesta.



Kuva 25. Paroc-elementtirakenteen vaakatuet suunnitellaan siten, että vesi valuu poispäin väliseinärakenteesta.

5.6 Teräsbetoninen sandwich-elementti

Teräsbetonista valmistettu sandwich elementti koostuu kantavasta rakenteesta, lämmöneristyksestä ja sääsuojasta. Kalliokuilun osalta tämä sääsuoja toimii paloeristykseenä. Tämän elementtirakenteen etu on se, ettei rakenne turmellu ajan kuluessa (käyttöikä on esimerkiksi 100 vuotta), jos rakenne on suunniteltu huolellisesti (raudoitusmateriaalit, betonin suojaetäisyydet jne.). Huonona puoleena on se, että elementit ovat tiellä jos kalliokuilua on saneerattava. Elementit voivat olla esimerkiksi tavallisia seinäelementtejä tai u:n muotoisia elementtejä.

Aloitetaan elementtirakenteen tutkiminen lämmöneristyksestä. Lämmöneristeenä voi käyttää esimerkiksi polyuretaania (PUR) tai polystyreeniä (XPS). Nämä molemmat edellä mainitut paloeristeet ovat palavia, joten ne on paloeristettävä. Jätetään mineraalivilla pois tästä tutkimuksesta, sillä lämmöneristeen kuivumisesta ei voi varmistua. Paroc-elementtirakenteessa mineraalivillaydin on kahden tiiviin pinnan välissä ja lisäksi se on vedeneristetty tuloilmakuilun puolelta. Kallioseinän puolella Paroc-elementtirakenteen toimivuus on varmistettu riittävällä ilmanvaihdolla. Lasketaan teräsbetonisen sandwich elementtirakenteen lämmöneristeen toimivuus. Aloitetaan rakenteesta, jossa käytetään polyuretaania. Oletetaan tässä rakennelaskelmassa, että kantava teräsbetonikuori on 250 mm paksu ja, että palosuojaava teräsbetonikuori on 80 mm paksu.

Lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona (F50):

$$A_1 := 1.0 \cdot \text{m}^2 \quad (\text{tarkasteltava pinta-ala})$$

$$d_1 := 50 \cdot \text{mm} \quad (\text{lämmöneristeen paksuus})$$

$$\lambda_1 := 0.022 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{lämmöneristeen lämmönjohtavuus})$$

$$R_1 := 0.2 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}} + \frac{d_1}{\lambda_1} = 2.473 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$d_2 := 250 \cdot \text{mm} \quad (\text{kantavan kuoren paksuus})$$

$$\lambda_2 := 1.5 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{teräsbetonin lämmönjohtavuus})$$

$$R_2 := \frac{d_2}{\lambda_2} = 0.167 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$d_3 := 80 \cdot \text{mm} \quad (\text{palosuojaavan kuoren paksuus})$$

$$\lambda_3 := 1.5 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{teräsbetonin lämmönjohtavuus})$$

$$R_3 := \frac{d_3}{\lambda_3} = 0.053 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$U_1 := \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = 0.371 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \quad (\text{U-arvo})$$

$$\Delta T_1 := 20 \cdot \text{C} \quad (\text{lämpötilaero})$$

$$t_1 := 1750 \cdot \text{hr} \quad (\text{tarkasteltavan ajanjakson pituus})$$

$$K_d := \Delta T_1 \cdot t_1 = 3.5 \times 10^4 \cdot \text{C} \cdot \text{hr} \quad (\text{pakkasmäärä vastaa Etelä-Suomen arvoa F50})$$

$$\Phi_1 := A_1 \cdot U_1 \cdot K_d = 12.998 \cdot \text{kW} \cdot \text{hr} \quad (\text{lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona})$$

Jos lämmöneristeen ohut kerrospaksuus on tärkein muuttuja päästään polyuretaanilla hyviin tuloksiin, kuten laskelmasta yläpuolella voidaan todeta. Teräsbetonisen sandwich – elementtirakenteen sisä- ja ulkokuori on huomioitu laskelmassa U-arvoa määriteltäessä. Lasketaan toinen eristevaihtoehto. Tarkastellaan kuinka paksu kerros polystyreeniä tarvitaan, jotta päästään samoihin tuloksiin.

Lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona (F50):

$$A_1 := 1.0 \cdot \text{m}^2 \quad (\text{tarkasteltava pinta-ala})$$

$$d_1 := 80 \cdot \text{mm} \quad (\text{lämmöneristeen paksuus})$$

$$\lambda_1 := 0.033 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{lämmöneristeen lämmönjohtavuus})$$

$$R_1 := 0.2 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}} + \frac{d_1}{\lambda_1} = 2.624 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$d_2 := 250 \cdot \text{mm} \quad (\text{kantavan kuoren paksuus})$$

$$\lambda_2 := 1.5 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{teräsbetonin lämmönjohtavuus})$$

$$R_2 := \frac{d_2}{\lambda_2} = 0.167 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$d_3 := 80 \cdot \text{mm} \quad (\text{palosuojaavan kuoren paksuus})$$

$$\lambda_3 := 1.5 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad (\text{teräsbetonin lämmönjohtavuus})$$

$$R_3 := \frac{d_3}{\lambda_3} = 0.053 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

$$U_1 := \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = 0.352 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \quad (\text{U-arvo})$$

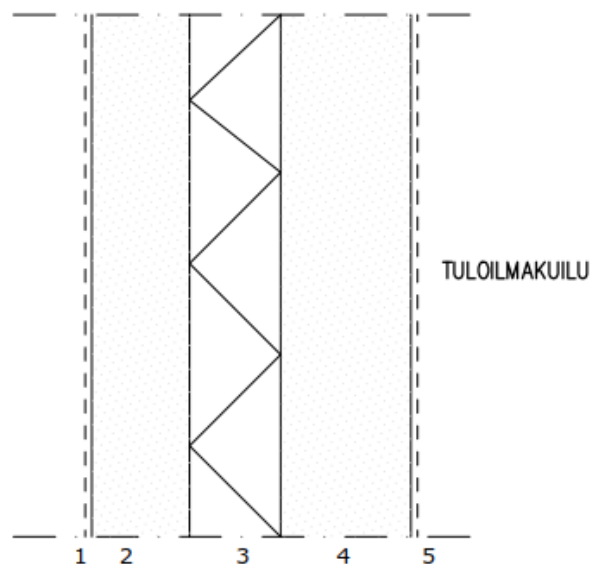
$$\Delta T_1 := 20 \cdot \text{C} \quad (\text{lämpötilaero})$$

$$t_1 := 1750 \cdot \text{hr} \quad (\text{tarkasteltavan ajanjakson pituus})$$

$$K_d := \Delta T_1 \cdot t_1 = 3.5 \times 10^4 \cdot \text{C} \cdot \text{hr} \quad (\text{pakkasmäärä vastaa Etelä-Suomen arvoa F50})$$

$$\Phi_1 = A_1 \cdot U_1 \cdot K_d = 12.306 \text{ kW} \cdot \text{hr} \quad (\text{lämpövirran siirtyminen eristerakenteen läpi tarkasteltavana ajanjaksona})$$

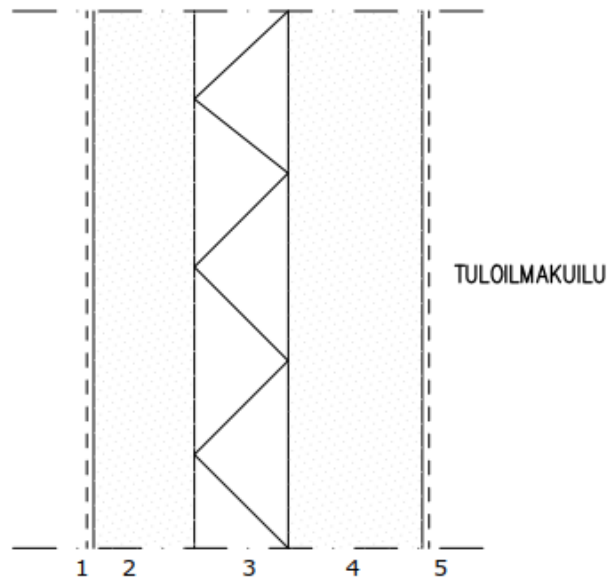
Toinen laskelma teräsbetonisesta sandwich –elementtirakenteesta osoittaa, että jos käytetään polystyreeniä (XPS), on eristepaksuutta kasvatettava 30 mm. Opinnäytetyöntekijän mielestä EPS-lämmöneristettä tulee myös harkita, sillä höyrynsulkua rakenteeseen ei välttämättä tarvitse asentaa. Alla kuvissa 26 ja 27 ovat rakennetyyppiehdotukset teräsbetonisia sandwich – elementtirakenteita varten. Tilavarauksia silmällä pitäen pystytään elementtiratkaisulla rakentamaan lähemmäksi kalliokuilun kalliouseinä, jos verrataan esimerkiksi paikalla valettavaan ratkaisuun, jossa paikalla valettavan seinän muottikalustoa varten on varattava oma tilavaus (esimerkiksi 1000 mm -1500 mm). Jos tuloilmakuiluun päästään pudottamaan elementtejä suoraan alaspäin, on tilantarve huomattavasti pienempi. Saumauksia varten on kuitenkin varattava tilaa tai mietittävä kuinka saumat ovat ratkaistavissa.



- | | |
|--------|---|
| | 1 Pintamateriaali ja -käsittely rakennusselostuksen mukaan |
| 80 mm | 2 Sandwich-elementin ulkokuori rakennesuunnitelmien mukaan |
| 50 mm | 3 Lämmöneriste, polyuretaani, $\lambda_e \leq 0,022 \text{ W/mK}$
Pistoansaat, RST, rakennesuunnitelmien mukaan. |
| 250 mm | 5 Teräsbetoninen kantava sisäkuori rakennesuunnitelmien mukaan |
| | 6 Pintamateriaali ja -käsittely rakennusselostuksen mukaan |
| | Palonkestoluokka: REI60 (osastoiva, kantava rakenne) |

$$U\text{-arvo} \leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kuva 26. Tuloilmakuilun rakennetyyppiehdotus teräsbetonista sandwich – elementtiratkaisua käytettäessä polyuretaani lämmöneristysellä.



- | | | |
|--------|---|--|
| | 1 | Pintamateriaali ja -käsittely rakennusselostuksen mukaan |
| 80 mm | 2 | Sandwich-elementin ulkokuori rakennesuunnitelmien mukaan |
| 80 mm | 3 | Lämmöneriste, polystyreeni , $\lambda_s \leq 0,033$ W/mK
Pistoansaat, RST, rakennesuunnitelmien mukaan. |
| 250 mm | 5 | Teräsbetoninen kantava sisäkuori rakennesuunnitelmien mukaan |
| | 6 | Pintamateriaali ja -käsittely rakennusselostuksen mukaan |
| | | Palonkestoluokka: REI60 (osastoiva, kantava rakenne) |
| | | U-arvo $\leq 0,36$ W/m ² K |

Kuva 27. Tuloilmakuilun rakennetyyppiehdotus teräsbetonista sandwich – elementtiratkaisua käytettäessä polystyreeni lämmöneristyskellä.

Rakennetyyppiehdotuksista yllä (katso kuvat 26 ja 27) voi huomata, että paloluokka on REI 60. Mikäli luokkaa halutaan nostaa arvoon REI 120, on paloeristävän kuoren paksuus kasvatettava 80 mm -> 120 mm. Kokonaisuus ratkaisee sen, että kannattaako kantava kuori suunnitella tuloilmakuilun puolelle vai kallioseinän puolelle.

5.7 Tekninen tila maanpinnan läheisyydessä

Yksi vaihtoehto saada kalliotilan tuloilmakuilun pakkasrapautuminen kuriin, on rakentaa tekninen tila maanpinnan läheisyyteen. Kesällä tuloilma jäädytetään ja kosteus saadaan pois tuloilmasta. Tämän jälkeen ilma lämmitetään uudelleen ja johdetaan tuloilmakuilua pitkin kalliotilaan. Nyt tuloilmakuilun kallio-osuudella on lämmintä (esimerkiksi + 8 °C) ilmaa ja kosteuspitoisuus on hallittavissa. Ilman jäädyttämistä varten voi käyttää

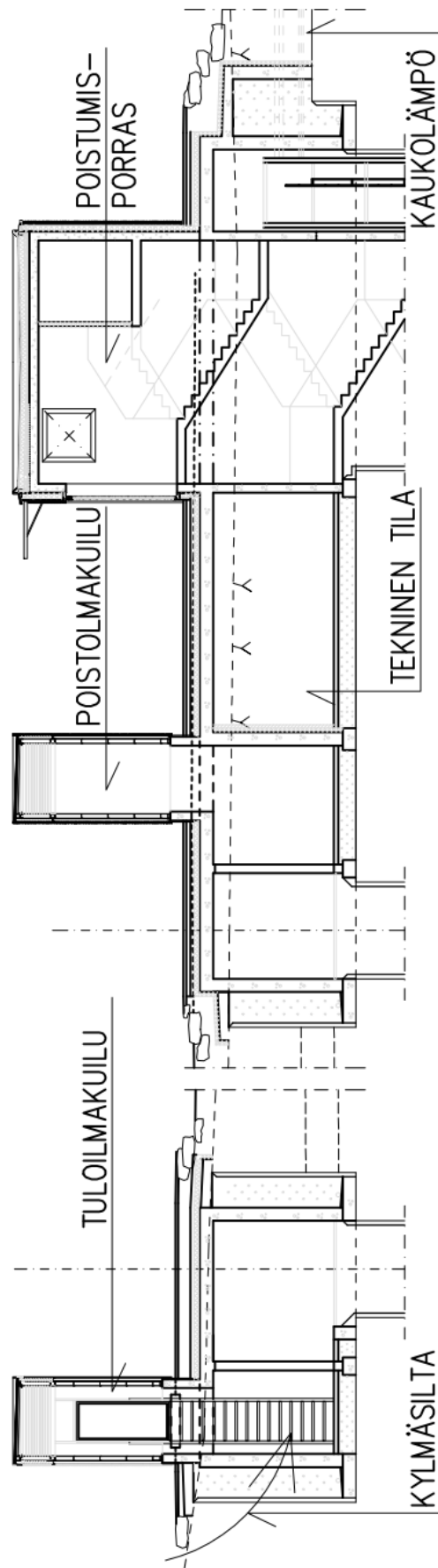
esimerkiksi kaukokylmää ja ilman voi lämmittää haluttuun lämpötilaan kaukolämmöllä. Talvella tuloilma on lämmitettävä haluttuun lämpötilaan esimerkiksi kaukolämmöllä. Yksi hyvä puoli tällä ratkaisulla (lämmönjakohuone maanpinnan läheisyydessä) on se, että jos kalliokuilu on saneerattava, eivät lämmöneristeet ole tiellä.

Lämmönjakohuoneen sijoittaminen maanpinnan läheisyyteen asettaa myös haasteita. Kalliotiloja sijoitetaan usein tiiviisti rakennettuun ympäristöön ja tämän ratkaisun tilavaraus on vähän suurempi, jos vertaa yleisimpiin kalliotiloihin joissa tekninen tila on alhaalla kalliotilassa.

Lisäksi, kun lämmönjakohuoneen sijoittaa maanpinnan läheisyyteen, on tulo- ja poistoilmakanavan väliin rakennettava putkiyhteys. Näin voidaan lämmintä ilmaa ottaa talteen poistoilmakanavasta. Usein tämä putkiyhetyden tekeminen tarkoittaa vaakaporaamista kalliosta, katso kuva 28 alla. Toinen vaihtoehto on kalliokanaali, johon putkiyhteys sijoitetaan. Poistoilmakanava ja tuloilmakanava eivät voi sijaita vierekkäin, sillä poistoilma kulkeutuisi uudelleen tuloilmakuiluun (ilmamäärät ovat suuria tuloilmakuilussa). Kuvasta 28 käy myös ilmi se, että tulo- ja poistoilmakuilut ovat rakennettu avokalliolle. Tämä tarkoittaa myös sitä, että talvella kylmäsilta kalliokuiluihin on suuri. Parempi vaihtoehto on rakentaa kuilut siten, että ne ovat esimerkiksi 2 metriä maan alla. Näin maa toimii lämmöneristeinä ja kylmäsillan muodostumista voi estää muutamalla lämmöneristelevyllä.

Kevyempi vaihtoehto lämmönjakohuoneelle on sijoittaa ainoastaan lämmityslaitteet tuloilmakuiluun. Tällä ratkaisulla kylmä pakkasilma on lämmitettävissä haluttuun lämpötilaan ennen kuin ilma kulkeutuu tuloilmakuilun kallio-osuudelle. Tämä ei poista kosteusongelmaa kesällä. Kosteuden muodostumiseen suuruusluokka on kuvattu aikaisemmin kohdassa 5.2, jossa Sprex-lämmöneristyksen toimivuutta on arvioitu.

(Långstedt & Merikukka 2017; Kivistö 2017.)



Kuva 28. Lämmönjakuhuone sijaitsee maanpinnan läheisyydessä.

5.8 Itäkeskuksen uimahallin tuloilmakuilu

Opinnäytetyön tutkimusosuudessa opinnäytetyöntekijä tutustui kahteen olevaan kalliotilaan ja luvuissa 5.8 ja 5.9 on kerrottu niistä tarkemmin. Molemmissa kohteissa tutustuttiin tuloilmakuiluun. Suurin ero näiden kalliotilojen välillä oli se, että Itäkeskuksen uimahallin yleisötiloissa ei ollut lainkaan vesivuotoja kalliossa, kun Maunulan urheiluhallin kalliokatos oli useassa kohdassa vesivuotoja. Alla kuvassa 29 on Itäkeskuksen uimahallin yleisötila.



Kuva 29. Itäkeskuksen uimahallin yleisötila.

Itäkeskuksen uimahalli on otettu käyttöön vuonna 1993, joten se on jo yli 20 vuotta vanha kalliotila. Kalliotilan seinät ovat valaistu epäsuoralla valolla, katso kuva 29 edellisellä sivulla. Alla kuvassa 30 on poistoilmakuilu. Poistoilmakuilu oli todella siistissä kunnossa.



Kuva 30. Itäkeskuksen uimahallin poistoilmakuilu.

Alla kuvassa 31 on Itäkeskuksen uimahallin tuloilmakuilu. Kuvasta voi huomata, että kuilussa on yksi vesivuoto, muutoin tuloilmakuilu on hyvässä kunnossa. Tuloilmakuilun ilmamäärä on 25,5 m³/s, joka on kosteuden kehityksen kannalta aika paljon (kesällä). Tästä on kerrottu enemmän kohdassa 5.2.



Kuva 31. Itäkeskuksen uimahallin tuloilmakuilu

5.9 Maunulan urheiluhallin tuloilmakuilu

Maunulan urheiluhalli on nimensä mukaan urheilukäytössä rauhan aikana. Kalliotila on tarjonnut liikuntapalveluja vuodesta 1998 lähtien. Urheiluhalli jakaantuu 5 liikuntatilaan. Liikuntatilat ovat jaettu urheilulajien mukaan. Esimerkiksi salissa 1 voi harrastaa lento- ja koripalloa sekä voimistelua. Alla kuvassa 32 voi nähdä, että pistemäisiä vuotoja on vajaan 20 vuoden aikana otettu paljon haltuun. Vastaavanlaisia vesien haihdutuslautasia on lähes joka puolella ympäri urheiluhallia.



Kuva 32. Maunulan urheiluhalli.

Maunulan urheiluhallin tuloilmakuilussa oli myös pistemäisiä vuotokohtia, kuten kuvasta 33 voi nähdä. Ruiskubetoni ei ole kuitenkaan tippunut alas. Kuvassa 34 voi huomata, että kosteusrasitus tuloilmakuilussa on suuri (peltiosien turmeltuminen, ruostuminen). Tästä voi päätellä, että ruiskubetonin lisäksi on huomioitava myös muiden rakenteiden turmeltuminen. Esimerkiksi Itäkeskuksen tuloilmakuilun huolto-ovi oli ruostunut puhki 20 vuoden aikana.



Kuva 33. Maunulan urheiluhallin tuloilmakuilu.



Kuva 34. Maunulan urheiluhallin tuloilmakuilun ohutpeltiset osat ovat kovalla kosteusrasituksella.

6 YHTEENVETO

6.1 Yleistä

Opinnäytetyön aihealue on kalliosuunnittelun ja rakennesuunnittelun rajapinnassa. Teoriaosuudessa selvitettiin kosteuslähteitä kalliotiloissa, jotka ovat paremmin kalliosuunnittelijoilla hallussa. Kokonaisuuden kannalta on rakennesuunnittelijan ymmärrettävä kosteuslähteet ja periaatteet kallioilmoitteista, jotta kokonaisuuden kannalta järkevä ratkaisu rakennusfysikaalisesti on suunniteltavissa. Teoriaosuuteen kuului myös rakennusmateriaalien ominaisuuksien listaaminen. Rakennusmateriaalien ominaisuudet ovat enemmän rakennesuunnittelun osaamista kuin kalliosuunnittelijan osaamista.

Teoriaosuuden jälkeen kehiteltiin rakennusfysikaalisesti toimivia ratkaisuja kalliotilan tuloilmakuiluja varten. Osa ratkaisusta löytyi toteutuneista projekteista. Suunnitteluratkaisuja löytyi myös lähdemateriaalista. Näitä edellä mainittuja suunnitteluratkaisuja kehitettiin edelleen ja arvioitiin niiden rakennusfysikaalinen toiminta.

Kvalitatiivinen tutkimusosuus toteutettiin haastatteleamalla alan asiantuntijoita (teemahaastattelu). Tämä tutkimusmenetelmä on sidottu aina aikaan ja paikkaan, joten jos tutkimus toistetaan saattaa käydä niin, että tutkimustulokset olisivat erilaisia. Lisäksi kvalitatiivisen tutkimuksen tuloksiin vaikuttaa se, miten tutkija tulkitsee haastatteluiden tuloksia. (Hirsjärvi ym. 2004, 152.)

6.2 Johtopäätökset

Kalliotilan tuloilmakuilun rakennusfysikaaliseen toimintaan vaikuttaa monta tekijää. Ensimmäiseksi tulee tietenkin tilan tarve. Miksi kalliotila rakennetaan? Mitä muita toimintoja tuloilmakuiluun voi liittää? Minkälaisella ilmanvaihtojärjestelmällä ja minkälaisilla lämmityspeeriaatteilla kalliotila suunnitellaan. Toisin sanoen: kalliotilan lämmityksen ja ilmanvaihdon periaatteet sekä kalliotilan kustannustehokas rakentaminen koko elinkaaren ajalta vaikuttavat suunnitteluratkaisuihin. Tässä opinnäytetyössä on tuotu erilaisia periaateratkaisuja kalliotilan tuloilmakuilun suunnittelun pohjaksi. Kun periaatteet on selvitetty tai tutkittu alustavasti, on suunnitteluratkaisujen toteuttaminen rakenne-, kallio- ja talotekni- sen suunnittelun yhteistyön tuotoksia.

6.3 Kehitysehdotukset

Opinnäytetyön ohjaaja ehdotti alkalikiviainesreaktioiden tutkimisen kalliotilan pystykuiluissa. Tässä opinnäytetyössä on koottu tiivis teoriapaketti alkalikiviainesreaktiosta. Alkalikiviainesreaktioiden tutkiminen edellyttää ohuthietutkimuksia ruiskubetonirakenteesta. Opinnäytetyöntekijän mielestä kalliotilan pystykuilun ruiskubetonin turmeltumista voisi tutkia tulevaisuudessa ohuthietutkimuksilla.

LÄHTEET

Aromaa, J & Lahdensivu, J. (2014). *Betoni 2/2014*. Haettu 21.1.2017 osoitteesta:

http://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1402_46-52.pdf

AR ripustusjärjestelmä –käyttöohje (2013). AR ripustusjärjestelmä. Haettu 4.2.2017 osoitteesta:

http://www.anstar.fi/wp-content/uploads/2013/02/AR_kayttoohje_2013.pdf

Einsalo, K. (2016). Teemahaastattelu, kalliotilan kosteuslähteitä. Vantaa.

Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. (2004). Tutki ja kirjoita. Helsinki: Tammi.

Injektering 30 -esite (2014). *Injektering 30*. Haettu 25.1.2017 osoitteesta:

<http://www.suomentpp.fi/wp-content/uploads/2014/05/Injektering-30.pdf>

Kivikoski, H, Pöyhönen, R, Riekkola, R, Sorjonen, K & Viitala, R. (1996). Kalliotilojen veden- ja lämmöneristysrakenteet. Helsinki.

Kivilaakso, E, Narvi, S, Neuvonen, S, Siivola, M & Kolu, S. (2009). *Helsingin maanalainen yleiskaava*. Haettu 18.1.2017 osoitteesta:

http://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/maanalainen/Maanalaisen_yleiskaa_van_selostus.pdf

Kivistö, M. (2017). Teemahaastattelu, suunnitteluratkaisut. Vantaa.

Laamanen, T. (2000). *Kalliotilojen vesivuotojen syyt*. Diplomityö. Materiaali- ja kalliotekniikan osasto. Teknillinen korkeakoulu.

Merikukka, H & Långstedt, M. (2017). Teemahaastattelu, suunnitteluratkaisut. Vantaa.

Paroc-elementtiratkaisut –suunnitteluohje. (2016). *Suunnitteluohje: PAROC-elementtiratkaisut*. Haettu 2.2.2017 osoitteesta:

<http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/ratkaisut/sandwichelementit/suunnitteluohjeet>

Pyy, H. (2010). *Betoni 4/2010*. Haettu 21.1.2017 osoitteesta:

https://www.researchgate.net/publication/48330714_Onko_Suomessa_ongelmaa_nimelta_alkali-kiviainesreaktio

Pyy, H, Holt, E & Ferreira, M. (2012). *Esitutkimus alkalikiviainesreaktiosta ja sen esiintymisestä Suomessa*. Haettu 23.1.2017 osoitteesta: http://www2.liikennevirasto.fi/sillat/bts2011_akr_report_fin.pdf

Ritola, J. & Vuopio, J. (2002). *Kalliotilojen vesitiiveyden hallinta*. Espoo: Otamedia Oy.

Ritola, J. (2005). *Kalliotilojen ja tunneleiden toimivuusominaisuudet ja laatuluokitusperusteet*. Espoo: MTR – Publications

Spreffix –esite (2005). *Spreffix*.

Ultrafin 12 -esite. *Ultrafin 12*. Haettu 25.1.2017 osoitteesta: http://www.suomentpp.fi/wp-content/uploads/Ultrafin_12.pdf

Vinha, J. (2014). *RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

ÖS-Kombi-verhous -esite. *ÖS-Kombi-verhous*. Haettu 25.1.2017 osoitteesta: http://www.saferoad.fi/images/pdf/saferoad_s-kombi.pdf