



TYÖHYVINVOINTIA JA TURVALLISUUTTA ÄLYKKÄÄLLÄ VALAISTUKSELLA -HANKE

Loppuraportti

Henrika Pihlajaniemi, Jussa Liikkanen, Mia Pujol, Henna Junes, Heidi Hintsala, Tiina Ikäheimo ja Jari Joutsenvaara



Työsuojelurahasto
Arbetskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund

FAGERHULT

MINE FOR BUSINESS
CALLIO
PYHÄJÄRVI, FINLAND

The logo of Oulun Yliopisto (University of Oulu) is a stylized blue symbol resembling a cross or a shield with a sunburst above it, followed by the text "OULUN YLIOPISTO" in blue.
OULUN YLIOPISTO

TYÖHYVINVOINTIA JA TURVALLISUUTTA ÄLYKKÄÄLLÄ VALAISTUKSELLA -HANKE

Loppuraportti

Tekijät: Henrika Pihlajaniemi, Jussa Liikkanen, Mia Pujol, Henna Junes, Heidi Hintsala, Tiina Ikäheimo ja Jari Joutsenvaara

Toimittaja: Henrika Pihlajaniemi

Arkkitehtuuri B 36. Oulun yliopisto, 2024.

ISSN: 2489-7825 (verkkajulkaisu)

ISBN: 978-952-62-4209-5 (verkkajulkaisu)

Pihlajaniemi, Henrika; Liikkanen, Jussa; Pujol, Mia; Henna, Junes; Hintsala, Heidi; Ikäheimo, Tiina ja Joutsenvaara, Jari

Työhyvinvointia ja turvallisuutta älykkäällä valaistuksella -hanke

Loppuraportti

Arkkitehtuuri B 36. Oulun yliopisto, 2024.

Oulu

Tiivistelmä

Työhyvinvointia ja turvallisuutta älykkäällä valaistuksella -hankkeen (1.1.2019 – 19.8.2024) tavoitteena oli tutkia ja kehittää keinoja parantaa työhyvinvointia ja turvallisuutta älykkään valaistuksen avulla maanalaisissa työympäristöissä ja muissa tiloissa, joissa on niukasti luonnonvaloa. Tutkimus lähestyi hyvinvointia holistisesti yhdistäen valon fysiologiset vaikutukset näköergonomiaan ja tunnetiloihin liittyviin vaikutuksiin kuten viihtyvyyteen ja turvallisuuden tunteeseen. Hankkeen tapaustutkimukset suoritettiin Pyhäsalmen kaivoksen ja sen maanalaisen tutkimusympäristön Callio Lab:n tiloissa, joihin suunniteltiin ja toteutettiin uudet älykkäät valaistusjärjestelmät. Erilaisten ohjattavien valaistustilanteiden vaikutuksia työhyvinvointiin evaluoitiin useita tutkimusmenetelmiä hyödyntäen: elimistön aktiivisuustasoa ja unirytmää mittaamalla; kyselyillä,

luotaintehtävillä ja semi-strukturoiduilla haastatteluilla; ja valonohjausdataa analysoimalla. Älykkään ja mukautuvan valaistuksen sovellusmahdollisuuksia maanalaisissa työympäristöissä tutkittiin ja kehitettiin skenaariotyöskentelyn ja konseptisuunnittelun avulla. Esiselvityksessä kartoitettiin laajasti työntekijöiden kokemuksia maanalaisessa kaivosympäristössä työskentelystä ja näiden ympäristöjen valaistuksen suunnitteluun liittyvistä tekijöistä, jotka liittyvät työhyvinvointiin ja turvallisuuteen. Menetelmällisesti tutkimus kehitti monimetodista hyvinvoinnin mittaamista, joka yhdistää fysiologisia mittauksia ja laadullista kokemusevaluointia. Tuloksena syntyi testattuja, innovatiivisia valaistuskonsepteja ja valonohjausratkaisuja sekä suunnitteluviitekehys, jotka tukevat hyvinvointia ja turvallisuutta niin maanalaisissa työtiloissa kuin laajemminkin pohjoisissa työympäristöissä. Ratkaisut auttavat parantamaan valaistuksen ekologisuutta energiatehokkaan valonohjauksen ja valaistusteknologian soveltamisen kautta.

Asiasanat: hyvinvointi, turvallisuus, valaistus, suunnittelu, kaivos, maanalainen, työympäristö, älykäs valaistus

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	2
1 Johdanto	3
1.1 Taustaa	3
1.2 Hankkeen tavoitteet ja osapuolet	5
2 Hankkeen toimenpiteet ja tulokset	7
2.1 Taustaselvitys ja kohdeanalyysi	7
2.2 Esihaastattelut, -kyselyt ja -mittaukset	13
2.3 Koeympäristön suunnittelu ja toteutus	16
2.4 Neljän erilaisen valaistusratkaisun testaus työympäristössä kahtena vuodenaikana	23
2.5 Tutkimuksen tulokset	27
3 Loppusanat	35
Lähdeluettelo	36
Kuvaluettelo	38

1 Johdanto

Työhyvinvointia ja turvallisuutta älykkäällä valaistuksella -hankkeen (1.1.2019 – 19.8.2024) tavoitteena oli tutkia ja kehittää keinoja parantaa työhyvinvointia ja turvallisuutta älykkään valaistuksen avulla maanalaisissa työympäristöissä ja muissa tiloissa, joissa on niukasti luonnonvaloa. Tutkimus lähestyi hyvinvointia holistisesti yhdistäen valon fysiologiset vaikutukset näköergonomiaan ja tunnetiloihin liittyviin vaikutuksiin kuten viihtyvyyteen ja turvallisuuden tunteeseen. Hankkeen holistinen tutkimusasetus, joka yhdistää research-by-design tutkimusta todellisissa toimintaympäristössä tehtyyn kokemusten evaluatioon, on perinteisesti laboratorio-olosuhteissa toteutetun valaistuskokemuksen tutkimuksen saralla kansainvälisesti harvinaista.

Hankkeen tapaustutkimukset suoritettiin Pyhäjärvellä sijaitsevan Pyhäsalmen kaivoksen ja sen maanalaisen tutkimusympäristön Callio Lab:n tiloissa, joihin suunniteltiin ja toteutettiin uusia älykkäitä valaistusjärjestelmiä. Pyhäjärven Callio on maailmanlaajuisesti ainutlaatuinen, monialainen toimintaympäristö (www.callio.fi), joka sijoittuu 1445 metriä maan pinnan alapuolelle ulottuvaan Pyhäsalmen kaivokseen ja sitä ympäröiville maa-alueille. Kaivostoiminnan loppuessa Pyhäjärven Callio tarjoaa maanalaista infrastruktuuria niin yrityksille kuin tutkimusyhteisöillekin. Kaivoksen tiloja on käytetty monimuotoiseen tutkimustoimintaan jo yli vuosikymmenen ajan. Hankkeen suunnittelututkimusvaiheen kohteena olivat kaivoksen päätason yhteydessä sijaitsevat henkilöstöravintola Retka (1410 m) ja vanhasta malminetsintätunnelista muokattu tutkimustila Lab 2 (1430 m). Älykkään

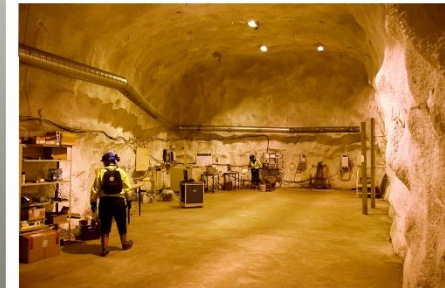
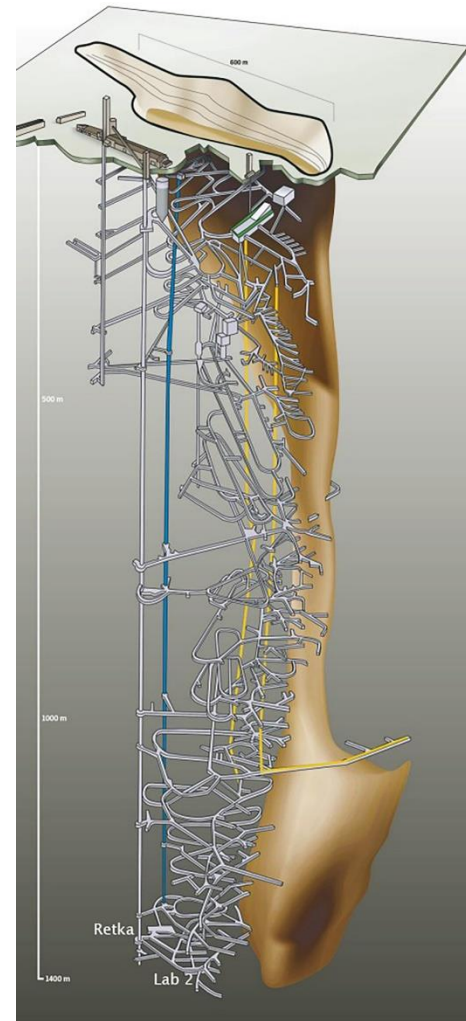
valaistuksen tutkimuspilottiympäristö toteutettiin ravintola Retkan viereiseen toimistohuoneeseen, Pomolaan. Erilaisten ohjattavien valaistustilanteiden vaikutuksia työhyvinvointiin evaluoitiin useita tutkimusmenetelmiä hyödyntäen: elimistön aktiivisuustasoa ja unirytmää mittaamalla; kyselyillä, luotaintehtävillä ja semi-strukturoiduilla haastatteluilla; ja valonohjausdataa analysoimalla. Älykkään ja mukautuvan valaistuksen sovellusmahdollisuuksia maanalaisissa työympäristöissä tutkittiin ja kehitettiin skenaariotyöskentelyn ja konseptisuunnittelun avulla. Esiselvityksessä kartoitettiin laajasti työntekijöiden kokemuksia maanalaisessa kaivosympäristössä työskentelystä ja näiden ympäristöjen valaistuksen suunnitteluun liittyvistä tekijöistä, jotka liittyvät työhyvinvointiin ja turvallisuuteen. Menetelmällisesti tutkimus kehitti monimetodista hyvinvoinnin mittaamista, joka yhdistää fysiologisia mittauksia ja laadullista kokemusevaluointia. Eri menetelmin kerätyn aineiston analyysistä johdettiin suunnitteluviitekehys, joka tukee älykkään valaistuksen suunnittelua hyvinvoinnin ja turvallisuuden näkökulmasta maanalaisiin, erityisesti kaivoksiin sijoittuviin työympäristöihin.

1.1 Taustaa

Kaivostoiminta lisääntyy ja toisaalta toimintansa lopettavien kaivosten maanalaisille tiloille etsitään monenlaisia uusiokäyttöjä (mm. viljely, tutkimustoiminta, elämysmatkailu ja viihde). Myös muissa maanalaisissa

työtiloissa tai ympäristöissä vailla luonnonvaloa työskentelee runsaasti ihmisiä. Näissä tiloissa työskentelevillä luonnonvalon puute voi aiheuttaa häiriötä elimistön sisäiseen kelloon ja sekoittaa normaalin virkeys- ja väsymysjaksojen rytmin tuoden väsymystä työpäivän aikana ja univaikeuksia yöaikaan. Uusi ohjattava LED-valaistusteknologia, jolla voidaan dynaamisesti säätää valaistuksen voimakkuutta ja valkoisen valon värilämpötilaa, antaa mahdollisuuden tukea työntekijöiden vuorokausirytmää maan alla nk. biodynaamisen tai sirkadiaanisen - luonnonvalon rytmiä imitoivan - valaistuksen (Calcagni B. et al., 2001) avulla. Tarvitaan tutkimusta, jotta voidaan määrittää oikeanlaiset valaisu- ja valonohjaustavat, jotka huomioivat myös vuodenkierron vaihtelut. Toisaalta valaistuksen vaikutukset eivät ole pelkästään biologisia, ja valaistukseen liittyy myös muita tarpeita ihmisen valonkokemuksen ollessa moniulotteinen (Pihlajaniemi, 2016). Oikeanlaista valaistusta tarvitaan erilaisten työtehtävien suorittamiseen ja häikäisemätön valaistus tukee näkömukavuutta ja edesauttaa turvallisuutta. Maanalaisessa työympäristöissä, erityisesti kaivoksissa, on tässä omat haasteensa. Kaltevat ja epätasaiset alustat sekä pintojen mahdollinen liukkaus altistavat kaatumisille, jolloin valaistuksen merkitys on suuri. Valaistuksen rajallisuus sekä valaistusvoimakkuuksien suuret kontrastit vaikuttavat työntekijöiden hämäränäköön, jolloin näkökyky voi hetkellisesti huonontua ja onnettomuuksien riski kasvaa. Koska yhteys luonnonvaloon ja luontainen tietoisuus poistumistiestä puuttuu, alitajuinen ja tiedostettu turvallisuuden tunne voivat kärsiä (Lam W.M.C., 1977). Tarvitaan holistista käyttäjätutkimusta, joka huomioi yhtä aikaa valon fysiologiset, toiminnalliset ja psykologiset vaikutukset ja todellisen toimintaympäristön haasteet.

Aihe liittyy useisiin ajankohtaisiin tutkimussuuntiin, joilla on sosiaalista, ekologista ja taloudellista merkitystä: älykäs ja mukautuva valaistus, valaistuksen ei-visuaaliset vaikutukset, työympäristön kehitys ja maanalaisten tilojen uudet käyttökonseptit. Viimeaikaisen valonohjaus- ja sensoriteknologian kehityksen myötä valaistussuunnittelu kohtaa uusia haasteita ja mahdollisuuksia. Älykkäät ja mukautuvat valaistusratkaisut, joissa valaistus mukautuu dynaamisesti ja reaaliaikaisesti tietoon ympäristöstä



Kuva 1. Tutkimuksen kohdeympäristö oli Pyhäsalmen kaivos ja sen tilat henkilöstöravintola Retka, laboratoriotila Lab 2 ja toimistotila Pomola.

ja sen käyttäjistä, yleistyvät sekä energiansäästötavoitteiden että niiden tarjoaman lisäarvon vuoksi. Fyysisellä ympäristöllä, jonka yksi osatekijä

valaistus on, on todettu vaikuttavan työntekijöiden psykologiseen hyvinvointiin (Klitzman S. and Stellman J. M., 1989; Danielsson C. B. and Bodin, L., 2008; Vischer J. C. and Wifi M. 2017). Tunnetasolla työhyvinvoinnin on todettu liittyvän laajaan valikoimaan tunnetiloja (Van Katwyk P. T. et al., 2000). Suhteessa fyysiseen ympäristöön, hyvinvointi liittyy myös ympäristön fysiologisiin vaikutuksiin, jotka kytkeytyvät monin tavoin tunnetiloihin. Valaistuksen osalta puhutaan valaistuksen ei-visuaalisista vaikutuksista, jotka perustuvat ihmissilmän verkkokalvon kolmannen valoreseptorin toimintaan (Brainard G. C. et al., 2001), joka vaikuttaa melatoniinin eritykseen. Reseptorin löytymisen jälkeen valon biologisia ja psyko-fysiologisia vaikutuksia on tutkittu aktiivisesti, esim. (Boyce P.R., 2014; Smolders K. C. and de Kort Y. A., 2014). Työ- ja oppimisympäristöissä valon mukautuvan käyttäytymisen on todettu vaikuttavan positiivisesti biologisiin rytmeihin, aktiivisuustasoihin, käyttäytymiseen ja työntekijöiden ja oppilaiden oppimiskykyyn (Fleischer S. et al., 2001; Knoop M., 2006; Barkmann C. et al., 2012; Slegers P.J.C., et al., 2012). Biodynaamisen valaistuksen on todettu vaikuttavan työntekijöiden sisäiseen kelloon, mm. auttavan vuorotyöläisiä pysymään virkeänä yövuoron aikana ja lepäämään päivällä. Myös pienemmän mittakaavan dynaamisia muutoksia valaistustasoissa ja valon spektrijakaumassa voidaan käyttää normaalissa päivätyössä virkistämään ja rentouttamaan työntekijöitä tarpeen mukaan, vaikuttaen myös työmuistiin, luovuuteen ja suorituskykyyn (Smolders K.C. et al., 2012; Huiberts L.M., et al 2016; Steidle A. and Werth L., 2013). Henkilökohtaisen valonsäätömahdollisuuden on lisäksi todettu vaikuttavan työntekijöiden mielialaan, tyytyväisyyteen ja suorituskykyyn (Veitch J.A. and Gifford R., 1996; Boyce P.R. et al., 2000; Veitch J.A. et al., 2013). Älykkään ja mukautuvan valaistuksen kokemus on moniulotteisen ja suunnittelukohteena se tulee käsittää holistisena ja kontekstisidonnaisena (Pihlajaniemi, 2016). Erityisesti maanalaisissa kontekstissa turvallisuus ja turvallisuuden tunne nousevat tärkeämmiksi kriteereiksi kuin tavanomaisissa toimistotiloissa. Turvallisuuden tunteeseen voidaan vaikuttaa valon näkemistä tukevan funktionaalisuuden

lisäksi valaistuksen tunnelmaa luovilla, viestivillä, merkityksellisillä ja arkkitehtonisilla keinoilla (Pihlajaniemi, 2016).

1.2 Hankkeen tavoitteet ja osapuolet

Seuraavassa on esitetty hankkeelle määritellyt tavoitteet ja niihin liittyvät tutkimuskysymykset sekä hankkeen osapuolet ja yhteistyökumppanit. Seuraavassa luvussa alalukuineen on kuvattu tarkemmin työpaketeittain eriteltynä hankkeen toteutukseen liittyvät toimenpiteet tuloksineen.

Tavoite 1: Tutkia ja kehittää keinoja tukea hyvinvointia ja lisätä turvallisuutta maanalaisissa työympäristöissä älykkään valaistuksen avulla

Tutkimuskysymykset: Miten älykästä valaistusta pitäisi suunnitella maanalaisiin työympäristöihin hyvinvoinnin ja turvallisuuden näkökulmasta? Mitä tekijöitä suunnittelussa tulee huomioida? Minkälaisia dynaamisia valonohjaustilanteita voidaan suunnitella tukemaan työntekijöiden työtilanteita ja biologista vuorokausirytmää. Minkälaisia ohjaustilanteita voidaan suunnitella eri vuodenaikojen näkökulmasta? Minkälaisia suunnittelukriteereitä ja ohjeita voidaan suunnittelulle asettaa?

Tavoite 2: Tutkia älykkäiden valaistusratkaisujen vaikutuksia hyvinvointiin ja turvallisuuteen maanalaisissa työympäristöissä

Tutkimuskysymykset: Miten älykkäästi ohjattu valaistus, jonka voimakkuutta ja värilämpötilaa muutetaan työpäivän aikana, vaikuttaa fysiologisesti työntekijöiden vireystiloihin, stressitasoihin, väsymiseen ja unirytmiiin? Miten älykäs valaistus vaikuttaa turvallisuuteen ja turvallisuuden tunteeseen? Miten älykäs valaistus vaikuttaa tunnetasolla viihtymiseen, työmotivaatioon sekä koettuun väsymykseen ja stressiin maanalaisissa tiloissa? Onko vain valaistuksen dynaamisesti säätyvillä spektrijakaumilla ja voimakkuustasoilla vaikutusta vai onko myös valaisutavalla, valon tilallisilla, esteettisillä ja merkityksillä aspekteilla vaikutuksia?

Työhyvinvointia ja turvallisuutta älykkäällä valaistuksella -hankkeen osapuolet

Rahoittajat:

Työsuojelurahasto
Oulun yliopisto
Fagerhult Oy

Toteuttajat:

Oulun yliopisto, arkkitehtuurin yksikkö
Apulaisprofessori Henrika Pihlajaniemi, hankkeen vastuullinen johtaja
Projektitutkija Mia Pujol
Projektitutkija Jussa Liikkanen

Oulun yliopisto, Ympäristöterveyden ja keuhkosairauksien tutkimuskeskus CERH
Dosentti Tiina Ikäheimo
Tutkijatohtori Heidi Hintsala (palkkaus Arkkitehtuurin yksikkö)
Projektitutkija Henna Junes (palkkaus Arkkitehtuurin yksikkö)

Oulun yliopisto, Kerttu Saalasti -Instituutti
Projektitutkija Jari Joutsenvaara

Yhteistyökumppanit:

Baltic Sea Underground Innovation Network (BSUIN) -hanke, rahoitus Interreg Baltic Sea
Pyhäjärven Callio / Pyhäsalmen Kvanttikiinteistöt Oy
Pyhäsalmen kaivos
WellIT – Intelligent Lighting and Well-being in Northern Learning Environments -hanke,
rahoitus Suomen Akatemia

2 Hankkeen toimenpiteet ja tulokset

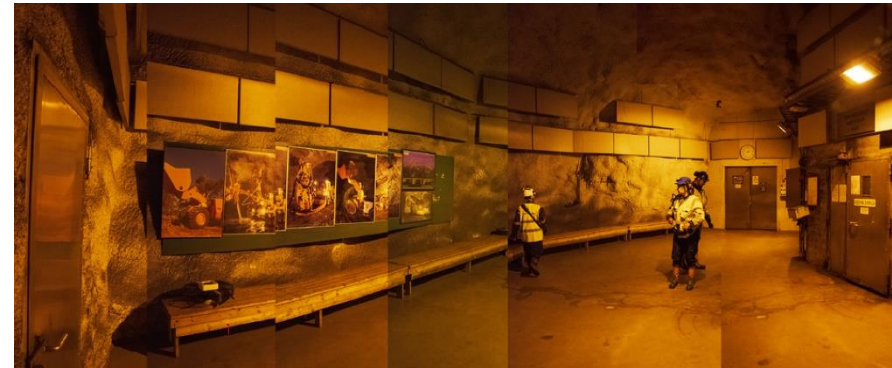
Tässä luvussa alalukuineen käydään läpi hankkeen toimenpiteet ja tulokset työpaketeittain eriteltynä.

2.1 Taustaselvitys ja kohdeanalyysi

Hankkeen alkuvaiheessa keväällä 2019 toteutettiin työpakettiin 1 liittyen **ajankohtaisen tutkimustilanteen kartoitus aiheesta (State-of-the-art) ja tutkimusympäristön tilojen analyysi ja mallinnus** (maalaisen työskentelytilan tilarakenne, kalustus, työvälineet, valaistusmahdollisuudet). Nämä olivat osa Mia Pujolin laatimaa Arkkitehtuurin yksikköön tekemää diplomityötä (*Pujol, M. 2019. Lighting at the End of the Tunnel. The Design of Adaptive and Intelligent Lighting for an Underground Workspace, Master's Thesis, University of Oulu, Oulu School of Architecture*), joka oli pääosin Kerttu Saalasti Instituutin rahoittama ja liittyi myös BSUIN-hankeeseen. Tähän osaan hankkeen tuloksia voi tutustua laajemmin Pujolin diplomityöstä, joka on kokonaisuudessaan ladattavissa Oulun yliopiston tietokannasta:

<https://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201905292233>

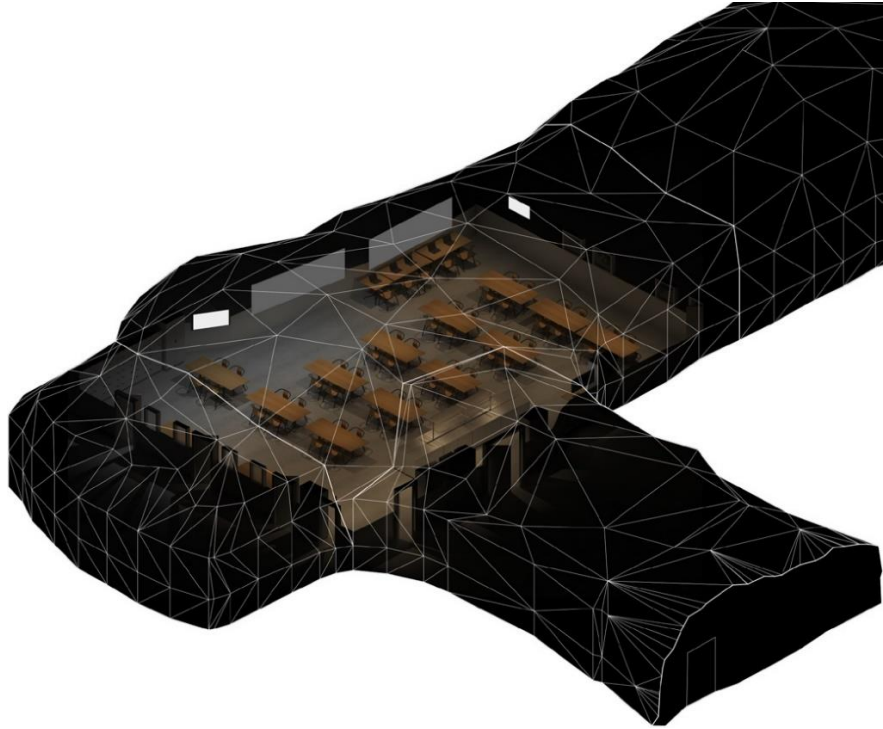
Seuraavassa on esitelty kuvin kaivoksen eri tiloja, jotka liittyvät tutkimukseen. Taustaselvitys koski kaivoksen tiloista erityisesti henkilöstöravintola Retkaa ja laboratoriotila Lab 2:sta, joille Mia Pujol laati älykkään valaistuksen konseptisuunnitelmat, sekä toimistotila Pomolaa, johon tutkimusryhmä suunnitteli ja toteutti älykkään valaistuksen testiympäristön.



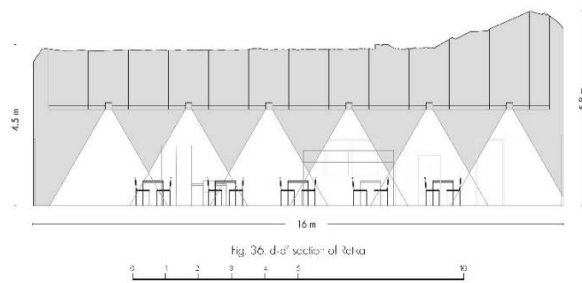
Kuvat 2 ja 3. Saapumisaula hissiltä kaivoksen päätasolle ja päätason tunneleita.



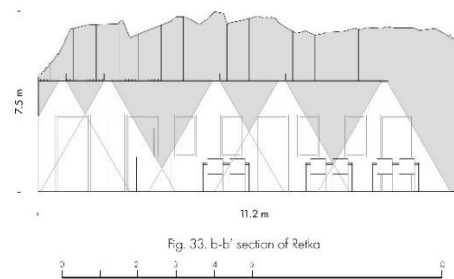
Kuvat 4 ja 5. Henkilöstöravintola Retka.

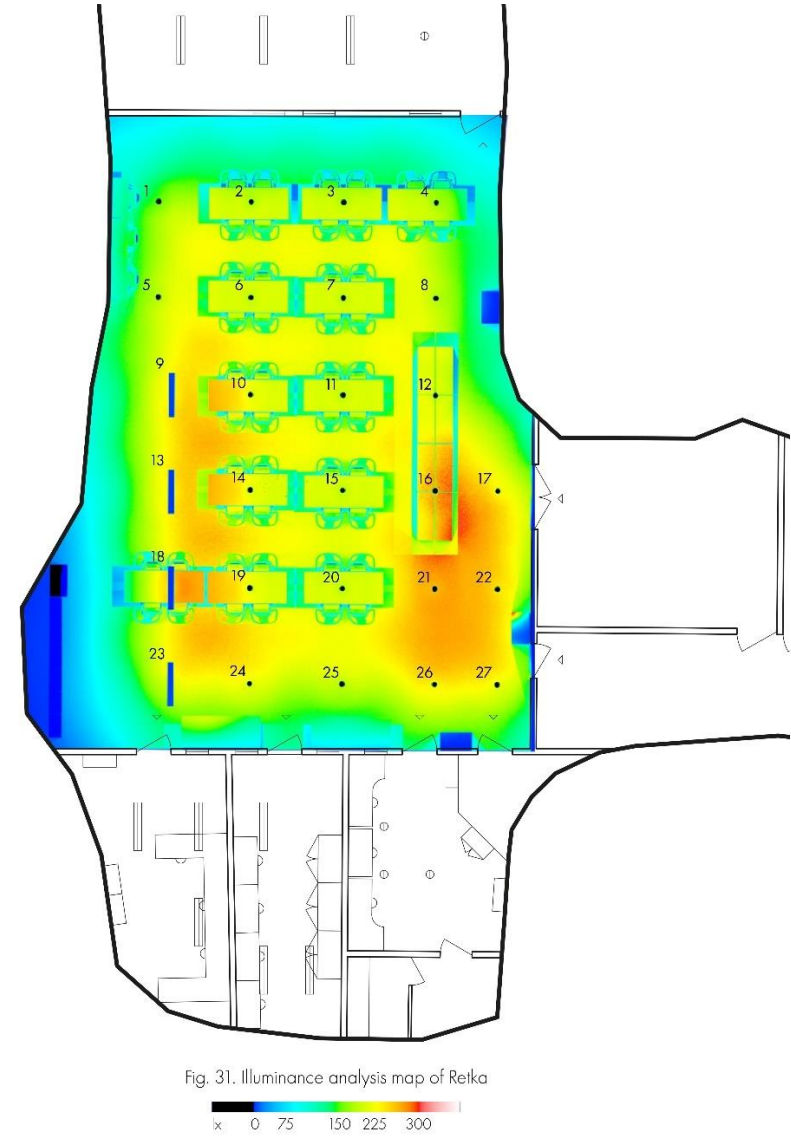
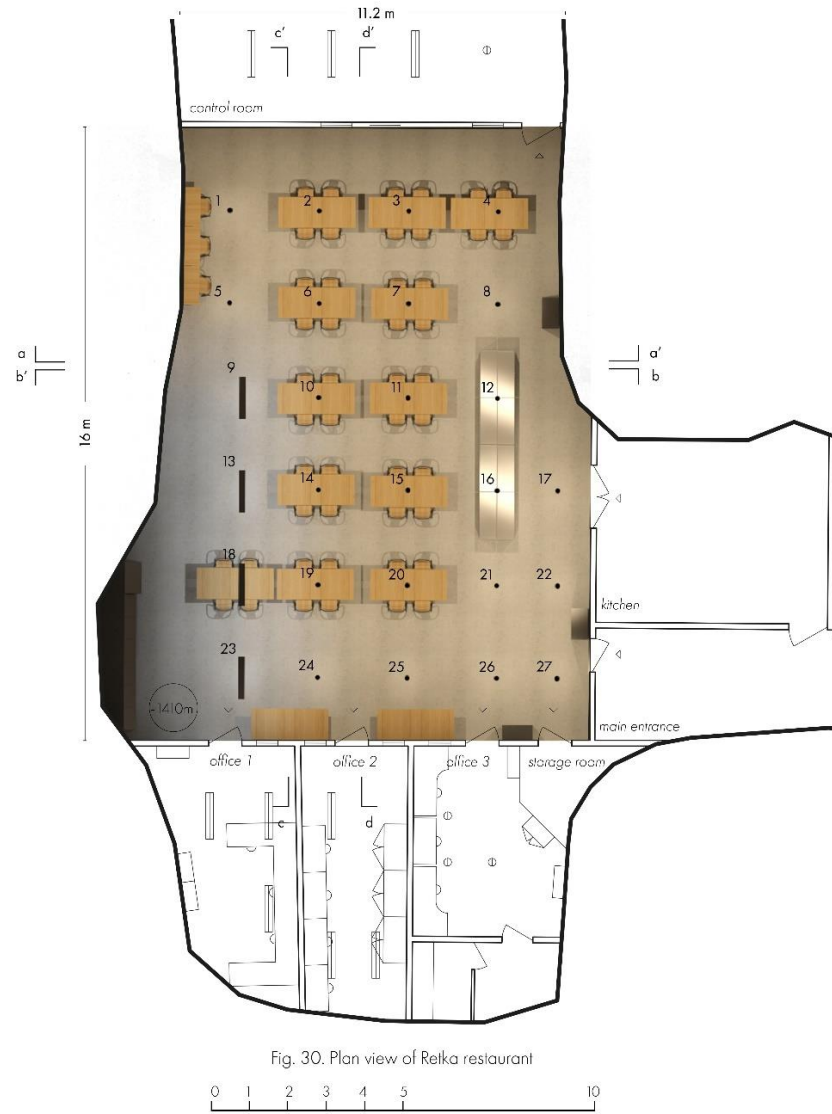


Kuva 6. 3D-malli henkilöstöravintola Retkasta.

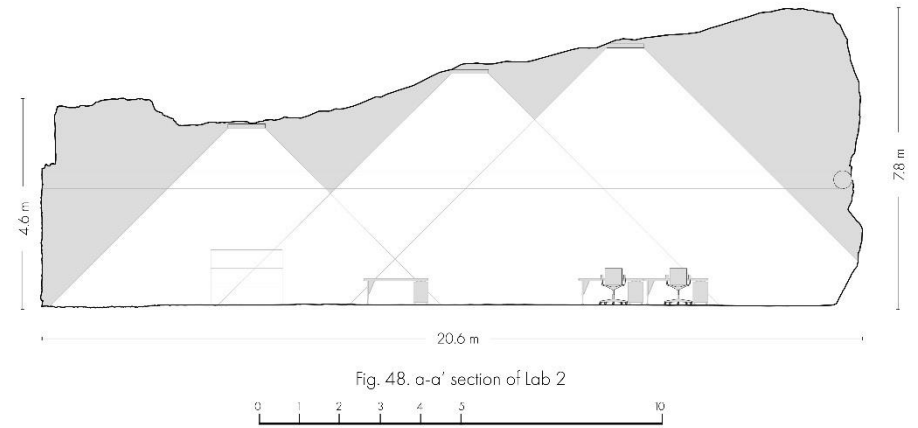
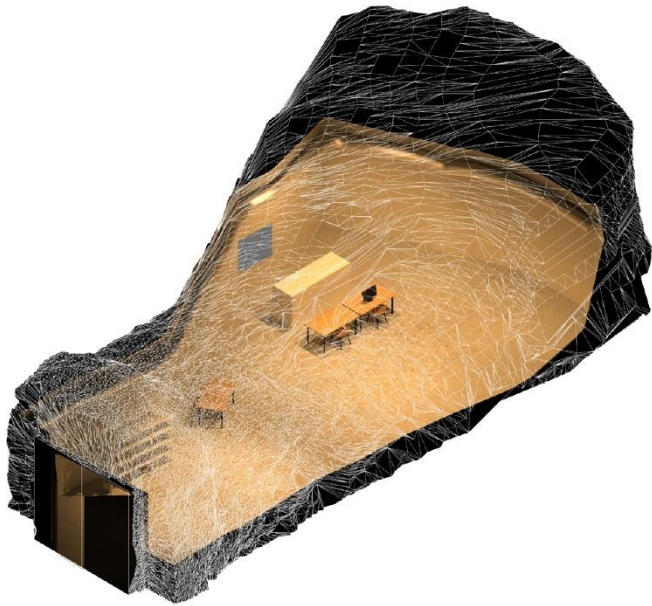
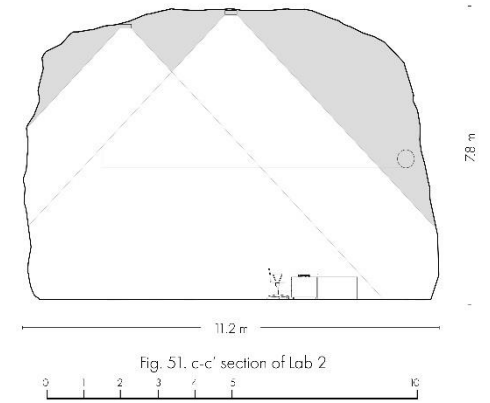


Kuvat 7 ja 8. Leikkauspiirroksia henkilöstöravintola Retkasta.





Kuvat 9 ja 10. Valaistusanalyysit henkilöstöravintola Retkasta.



Kuvat 11- 14. Valokuva, 3D-mallinnus ja leikkauksia Lab 2 -laboratiotilasta.

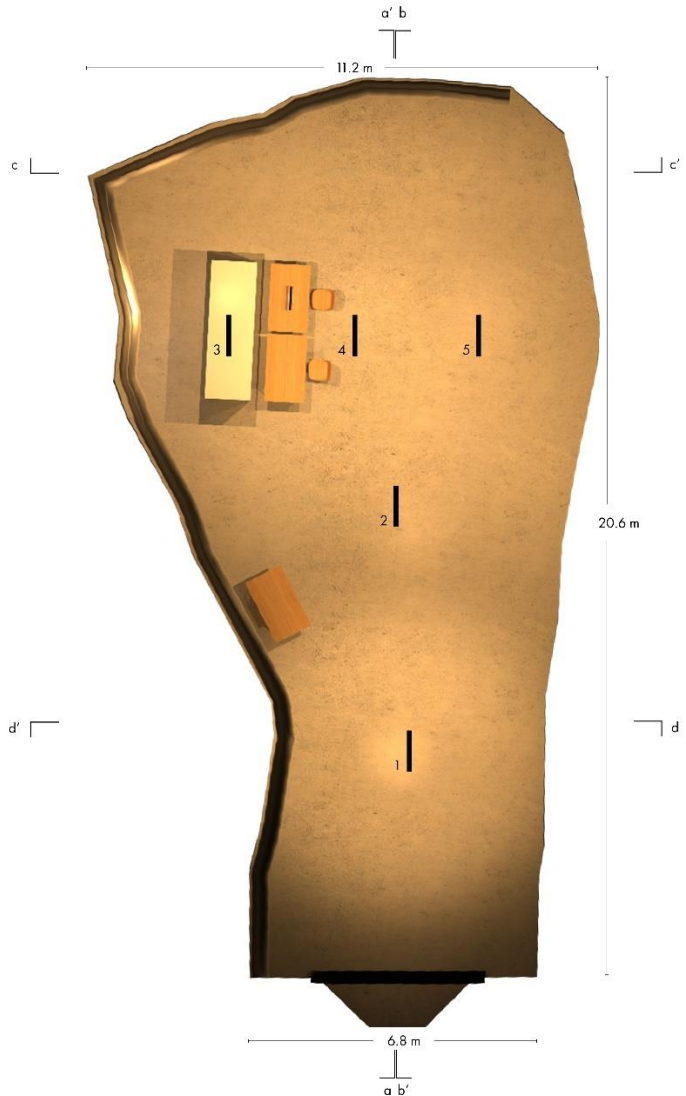


Fig. 46. Plan view of Lab 2

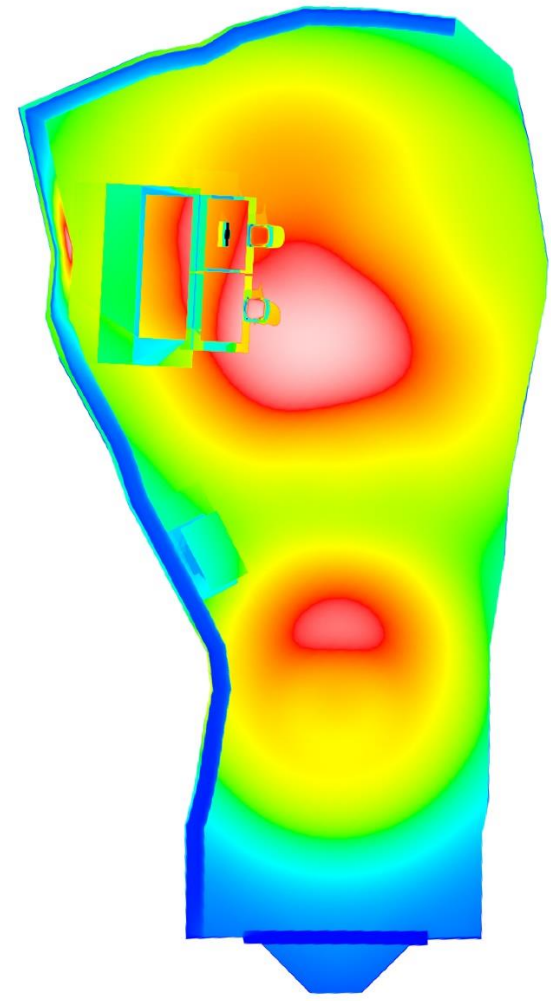
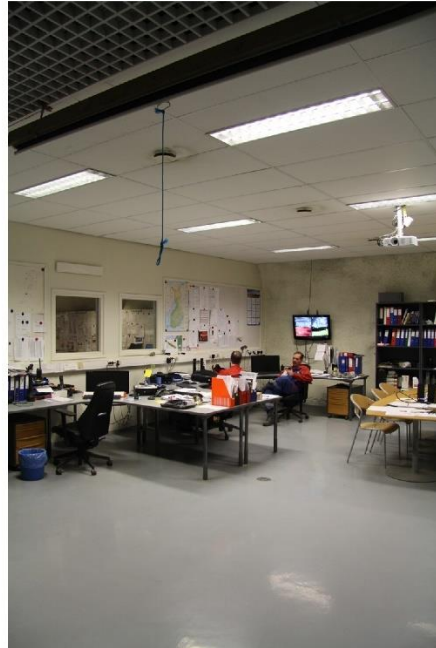


Fig. 47. Illuminance analysis map of Lab 2



Kuvat 15 ja 16. Valaistusanalyysit Lab 2 -laboratoriotilasta.



Kuvat 17-23. Pomola-toimistotila

2.2 Esihaastattelut, -kyselyt ja -mittaukset

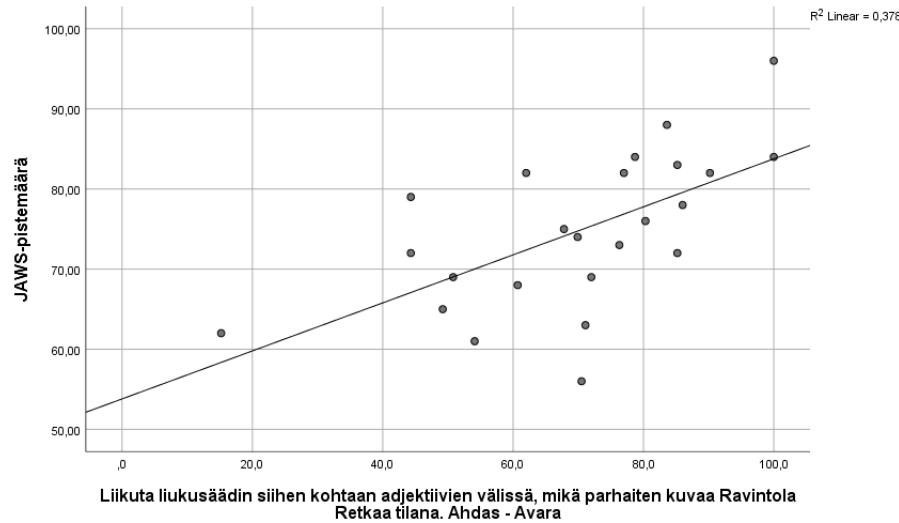
Esitutkimusvaiheessa (TP2) maalisi- ja huhtikuussa 2019 toteutettiin **kysely ja puolistrukturoitu haastattelu** kaivoksen työntekijöille koskien nykyistä työympäristöä ja sen valaistusta, luonnonvalon kaipuuta, valaistuksen kehitystarpeita ja -ideoita sekä kokemuksia maanalaisesta työympäristöstä ja työhyvinvoinnista. Fysiologisia mittauksia varten kerättiin taustatietoja mm. liittyen osallistuen terveydentilaan, fyysiseen aktiivisuuteen ja kronobiologiseen tyyppiin. Kysely toteutettiin sekä sähköisessä että tulostetussa muodossa, ja sen osallistujiksi houkuteltiin mahdollisimman laajasti kaivoksessa erilaisissa tehtävissä työskenteleviä osallistujia. Kyselyn täyttäneet saivat halutessaan ilmoittautua osallistujiksi myös haastatteluun ja/tai fysiologisiin mittauksiin. Esitutkimusta täydennettiin syyskuussa 2019 joidenkin Pomolan työntekijöiden osalta, jotta saatiin selville älyvalaistuspilotin evaluointiin osallistujien lähtötilanne.

Esitutkimuksessa kartoitettiin kaivoksen työntekijöiden työhyvinvointia Job-Affective Well-being Scale (JAWS) -asteikon avulla. Asteikon tarkoituksena on arvioida työntekijöiden emotionaalista suhdetta työhönsä (Van Katwyk & al. 2000). Tutkimuksessa käytetty suppeampi kysymyspatteri sisältää 20 kysymystä, joissa selvitetään, kuinka usein vastaaja on kokenut töissään tiettyä tunnetta viimeisen 30 päivän aikana viisiportaisella asteikolla; *Ei koskaan, Harvoin, Joskus, Melko usein, Hyvin usein*. Kysymyspatterin sisältämät tunteet voidaan jakaa kahtia 10 positiiviseen ja 10 negatiiviseen tunteeseen, sekä vielä edelleen neljään alaluokkaan miellyttävyyden ja vireystilan (arousal) mukaan. Täten vastauksille voidaan antaa kolme eri pistemäärää; yleispistemäärä kaikkien kysymysten perusteella asteikolla 20-100 (korkeampi pistemäärä merkitsee parempaa työhyvinvointia), erilliset pistemäärät positiivisille ja negatiivisille tunteille asteikolla 10-50 (korkeampi pistemäärä merkitsee kyseisten tunteiden yleisempää esiintyvyyttä) sekä erilliset pistemäärät jokaiselle neljästä alaluokasta asteikolla 5-25 (korkeampi pistemäärä merkitsee kyseisten tunteiden yleisempää esiintyvyyttä).

Työntekijöiden kronobiologisen tyyppin selvittämiseen käytettiin viisiosaista reduced morningness-eveningness questionnaire (rMEQ) -kyselyä (Adan & Almirall 1991). Kyselyn tarkoituksena on selvittää viiden kysymyksen avulla vastaajan luonnollista kronobiologista tyyppiä. Kyselyn vastaukset antavat vastaajalle kokonaispistemäärän, josta voidaan päätellä vastaajan kronobiologinen tyyppi. Alhainen pistemäärä kyselyssä viittaa iltavirkkuuteen kun taas korkea vastaavasti aamuvirkkuuteen.

Luonnonvalon kaipauksen osalta sekä työympäristön ja sen valaistuksen arvioinnissa käytettiin kyselyssä jatkuvaa asteikkoa välillä 0-100. Vastaajia pyydettiin piirtämään rasti janalle sen mukaan, miten he arvioivat kysytyä muuttujaa. Valaistuksen osalta vastaajilta kysyttiin valaistukseen liittyvistä häiriötekijöistä, kuten häikäisystä, välkynnästä, epätasaisuudesta, voimakkaista varjoista ja heijastuksista, sekä arviota valaistuksen miellyttävyydestä, valon määrästä ja valaistuksen värisävystä. Mukana oli myös kysymyksiä näkemiseen ja valonsäätämisen tarpeisiin liittyen. Tilakokemuksen osalta puolestaan tarjottiin vertailevia adjektiivipareja, kuten esimerkiksi *epäviihtyisä-viihtyisä, sekava-selkeä, yksityinen-julkinen ja ahdas-avara*. Jatkuvan asteikon käyttö mahdollisti vertailun ja korrelaatioanalyysin tekemisen aiemmin mainittujen pistearvojen, JAWS:in ja rMEQ:n kanssa. Asteikkoarvioinnin lisäksi kyselyssä oli avoimia kysymyksiä mm. liittyen tilojen tunnelmaan, maan alla työskentelyyn, koettuihin vaaratilanteisiin ja maanalaisten tilojen valaistuksen kehittämiseen.

Esikyselyyn vastasi 26 osallistujaa (24 kaivoksen työntekijää ja 2 Callion palveluksessa olevaa henkilöä). Vastaajat saivat arvioida valaistusta ja tilakokemusta niiden tilojen osalta, missä he työskentelivät. Koska jokaisella työntekijällä oli jonkinlainen kokemus henkilöstöravintola Retkassa työskentelystä, valittiin esitutkimusaineiston analysointiin Retkan valaistus- ja tilakokemusta koskevat vastaukset. Vastaajista 7 vastasi valaistus- ja tilakokemuskysymyksiin myös myöhemmin koeympäristönä toimineen Pomolan osalta.



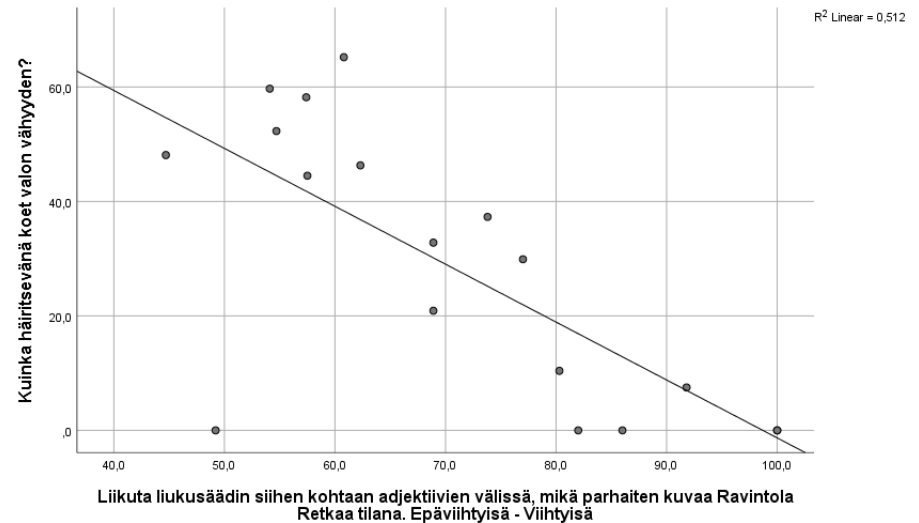
Kuva 24. Työhyvinvoinnin ja positiivisen tilakokemuksen positiivinen korrelaatio (Ahdas - Avara).

Esitutkimusaineistoa tarkastellessa pääasiallisena tarkoituksena on tarkastella korrelaatioita kyselyssä selvitettyjen muuttujien välillä. Koska normaali oletus ei päde aineistoon, käytetään korrelaatioanalyysissä Spearmanin järjestyskorrelaatiokerrointa. Muuttujista erityisesti työhyvinvointi (JAWS-pistemäärä) korreloi positiivisesti usean tilaa koskevaa kokemusta selvittävän kysymyksen kanssa. Työhyvinvointia paremmaksi arvioivat työntekijät kokevat Retkan keskimäärin miellyttävämpänä, viihtyisämpänä, selkeämpänä ja avarampana tilana. Positiivinen korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä samojen muuttujien kohdalla myös vain positiivista JAWS-pistemäärää tarkastellessa. Enemmän negatiivisia tunteita töissään kokevat työntekijät taas pitävät Retkaa keskimäärin sekavampana, ahtaampana ja tunkkaisempana tilana.

Valaistuskokemuksen osalta valon vähyyden häiritsevyys korreloi negatiivisesti JAWS-pistemäärän kanssa, kun taas valaistuksen miellyttävyys korreloi vastaavasti positiivisesti työhyvinvoinnin kanssa. Korrelaatio ei ole

tilastollisesti merkitsevä positiivisten tunteiden kanssa, mutta vahvasti merkitsevä negatiivisten tunteiden kanssa. Enemmän negatiivisia tunteita töissään kokevat työntekijät kokevat siis valon vähyyden merkitsevästi häiritsevämpänä ja valaistuksen miellyttävyuden vähäisempänä kuin vähemmän negatiivisia tunteita töissään kokevat työntekijät.

Valaistus- ja tilakokemuksia vertailtaessa valaistuksen miellyttävyys korreloi merkitsevästi positiivisesti tilan miellyttävyuden, viihtyisyyden, selkeyden sekä avaruuden kanssa. Vastaavasti valon vähyyden kokeminen korreloi merkitsevästi negatiivisesti samojen tilakokemusadjektiivien kanssa (Kuva 1). Lisäksi Retkaa selkeänä tilana pitävät näkevät Retkassa merkitsevästi paremmin ja pitävät valaistusta kirkkaampana. Tilaa sekavana pitävät taas pitävät Retkan valaistusta useammin liian lämpimänä. Tilaa miellyttävänä pitävät kokevat myös tilan valaistuksen värisävyn merkitsevästi miellyttävämpänä.



Kuva 25. Valon vähyyden häiritsevyyden kokemuksen ja tilan viihtyisyyden kokemuksen negatiivinen korrelaatio.

Esitutkimusaineistosta ei löytynyt tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita kronobiologisen tyyppin sekä luonnonvalon kaipauksen ja muiden muuttujien välillä.

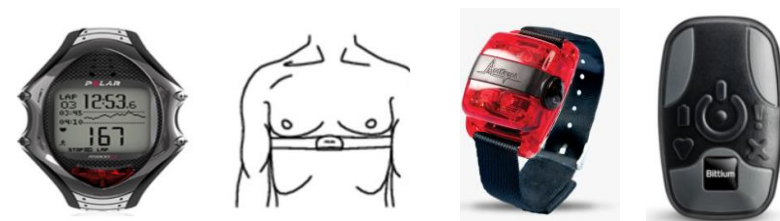
Esihaastatteluun osallistui 17 kaivoksen työntekijää ja kaksi Callion palveluksessa olevaa henkilöä. Puolistrukturoidut haastattelut toteutettiin ravintola Retkan viereen sijoittuvissa pienissä toimistohuoneissa. Haastattelihoita oli yksi ja kukin haastattelu kesti noin 25–45 minuuttia. Haastattelurunko sisälsi kysymyksiä koskien vastaajan kokemuksia maan alla työskentelystä, erityisiä tarpeita, joita maan alla työskentely aiheuttaa valaistukselle, nykyistä valaistusta kaivoksen tiloissa ja ajatuksia valaistuksen kehittämiseksi. Kaivoksen työntekijöiden toimenkuvat olivat seuraavia: sähköasentaja, savusukeltaja, huoltomies, korjausmies, varastomies, kaivosmies, pitkäreikäporari, panostaja, mittamies ja geologi ja järjestelmähuoltaja.

Haastattelut tuottivat laajan, monipuolisen ja syvällisen aineiston liittyen työskentelyyn maan alla ja valaistukselle asetettaviin suunnittelutarpeisiin maanalaisessa kaivosympäristössä. Näitä tuloksia kuvataan tarkemmin alaluvussa 2.5., jossa esitellään tulosten pohjalta laadittu suunnitteluviitekehys. Haastattelut antoivat hyvää taustatietoa suunnittelututkimusprosessissa laadituille skenaarioille ja valaistus-konsepteille sekä tutkimuspilotin implementointisuunnitelmille.

Esitutkimusvaiheessa suunniteltiin ja testattiin **fysiologisten mittausten** mittausprotokolla tutkimuspilotin evaluointijaksoja varten. Nämä esimittaukset toimivat myös osallistujien lähtötasotarkasteluna. Fysiologisten mittausten tarkoituksena oli kartoittaa henkilöiden unta, aktiivisuutta ja viireystilaa seurantajakson aikana.

Sykemittaukset suoritettiin työvuorojen aikana maan alla Pomolan ja Retkan läheisyydessä sijaitsevassa toimistotilassa. Aamuvuorossa olevien mittaukset pyrittiin suorittamaan vuoron alkupuolella ennen lounasta, ja iltavuorossa olevien mittaukset ajoitettiin heti työvuoron alkuun. Kevään esimittauksissa

testattiin kahta eri mittaria. Neljälle osallistujalle tehtiin 24 tunnin EKG-seuranta käyttäen Bittiumin Faros360° -mittalaitetta. Faros360° on kannettava, teipillä rintalastaan kiinnitettävä, pienikokoinen EKG-mittari, joka tallentaa henkilön sydänkäyrää. Viidelle osallistujalle tehtiin 19 tunnin syke seuranta Polarin mittarilla. Käyttökokemusten perusteella päätettiin jatkaa tutkimusta Faroksen mittarilla, joka tarjosi pidemmän keston mittauksille sekä helpon datan keräyksen ja prosessoinnin. Farosta käytettiin syyskuussa tehdyissä Pomolan työntekijöiden esimittauksissa (n= 5). Farosta käytettäessä signaalin purkaminen tapahtuu Faros Manager –ohjelmalla mittausjakson jälkeen. EKG-signaalin analysointi tehdään käyttäen Kubios HRV Standard –ohjelmaa, jolla voidaan analysoida sykevälivaihtelua (Heart Rate Variability, HRV), stressitasoja ja palautumista.



Kuvat 26-29. Saapumisaula hissiltä kaivoksen päätasolle ja päätason tunteita

Sykemittausten aluksi koehenkilöille tehtiin aerobinen kuntotesti Polarin RS800CX –sykemittarin avulla. Tätä varten henkilöitä pyydettiin arvioimaan omaa aktiivisuuttaan kuluneen kolmen kuukauden aikana asteikolla yhdestä (alhainen, 0-1h/viikko) viiteen (korkea, > 5h/viikko). Kuntotesti mittasi henkilön sykevälivaihtelua levon aikana, ja antoi arvion kuntotasosta perustuen lähtötietoihin (ikä, aktiivisuus) ja mittausdataan. Polarin kuntotestin on validoitu mittaavan sykevälivaihtelua ja V02 max -arvoa luotettavasti. (Peltola et al. 2000, Tulppo et al. 2003)

Uni- ja aktiivisuusmittauksia varten koehenkilöt pitivät aktiivisuusranneketta vuorokauden ympäri kahden viikon ajan. Mittalaitteeksi valikoitui tutkimuskäytössä usein käytetty ActiGraph GTX3+, joka käyttää kiihtyvyy- ja

kolmisuuntaista kaltevuusanturia askelien, liikkeen ja asentojen muutoksien havainnointiin. Tämän tyyppisten liikeantureiden on todettu mittaavan luotettavasti aktiivisuutta. (Wood et al. 2008, Imboden et al. 2018) Unen arviointi perustuu kaltevuusanturin mittauksiin yhdistettynä raajan liikkumattomuuteen. Unidatan analysointiin käytettiin aikuisille suosittelua Cole-Kripken algoritmia. (Migueles & al. 2017) Aktiivisuusrannekkeen lisäksi koehenkilöt pitivät unipäiväkirjaa, johon he merkitsivät nukkumaanmeno- ja heräämisajat, työvuorot ja mahdolliset poikkeamat (esim. sairastelut, univaikeudet ym.) mittausjakson aikana.

Esitutkimusvaiheen tulosten pohjalta viimeisteltiin evaluointisuunnitelma ja mittausprotokolla tutkimuspilotin evaluointia varten.

2.3 Koeympäristön suunnittelu ja toteutus





















Suunnittelututkimusvaiheen (TP3) **skenaariotyöskentely ja valaistuskonseptien suunnittelu** toteutettiin osana Mia Pujolin diplomityötä keväällä 2019 (Pujol, 2019). Skenaarioita, konsepteja ja implementointisuunnitelmia tehtiin kahteen kaivoksen Päätasoin tilaan: ravintola Retkaan ja laboriotilaan Lab 2:een. Esihaastattelut tukivat suunnitteluprosessia. Tutkimuksen aikaan ravintola Retka toimi henkilöstön ravintola- ja rentoutumistilana sekä päivittäisen työohjeistuksen paikkana. Tila toimi myös infokeskuksena, jossa kaivoksen ja kaivoksen tulevaa käyttöä kehittävän organisaation, Callion, vierailijoille annettiin tietoa esitysten muodossa. Lab 2 oli maanalaisen fysiikan tutkimuslaboratorio, jonka toiminnan kannalta oli olennaista matala taustasäteilytaso johtuen sijainnista syvällä peruskallion sisällä (Callio Lab, 2019; Joutsenvaara, 2016). Maanalainen kaivostoiminta oli päättymässä vuoden 2021 aikana ja uusia käyttötarkoituksia kaivokselle kehitettiin ja testattiin. Kaivoksessa oli toimivia laboriotiloja ja siellä oli tehty kokeita myös maanalaisen viljelmien parissa hyötyen kaivoksen tasaisesta maanalaisesta lämmöstä ja kosteustasosta. Muita kehitettäviä aktiviteetteja olivat syötävien hyönteisten kasvatusta, kaivos- ja pelastusalan koulutus, seikkailuturismi ja viihde,

geoterminen energia, energiavarasto, datakeskus sekä avaruusasemasimulaattori (www.callio.info.fi).

Skenaarioissa Retka on esitetty kaivostilojen tulevan käytön mukaisesti monikäyttötalana, jossa ravintolatoiminnan ohella korostuu sen rooli vierailija- ja info-keskuksena. Tila tarjoaa monikäyttöistä tilaa Callion erilaisille käyttäjille, ei pelkästään kaivoksen työntekijöille. Lab 2 -visioissa tila tarjoaa laboratorikokeisiin tarkoitettua tilaa ohella tilaa toimistotyöskentelyyn, tapaamisiin, työpajoihin ja rentoutumiseen. Skenaariot ja konseptit hyödynsivät sekä ihmisen fysiologista hyvinvointia tukevan sirkadiaanisen valaistuksen periaatteita että arkkitehtonisen valaistuksen keinoja, jotka liittyvät visuaaliseen ja tilalliseen kokemukseen, toiminnallisuuteen, estetiikkaan ja merkityksiin.

Kuva 30 esittää konseptia sirkadiaanista rytmiä tukevasta maanalaisen tilojen valaistuksesta. Konseptin tarkoituksena on tukea työntekijöiden biologista kelloa ja vähentää psykologisesti negatiivisia tunteita liittyen tiloihin, joista puuttuu päivänvalo ja yhteys ulkomaailmaan. Konseptissa eri valaisinryhmiä on ohjattu dynaamisesti yhtäaikaaisesti kahta periaatetta noudattaen: 1) valaistusvoimakkuus ja valaistuksen värilämpötila noudattavat idealisoitua päivänvalon rytmiä, ja 2) arkkitehtonisen valaistuksen valaistutapa vaihtuu päivän mittaan eli se mitkä tilan osat on korostettu valolla epäsuoraa valoa tuottaen näin muuttaen kokemusta tilasta. Aamulla tilallista, epäsuoraa valaistusta tuodaan tilaan matalalta, imitoiden matalalta vain vähän horisontin yläpuolelta paistavaa valoa. Valo on tällöin lämpimänsävyistä ja valaistusvoimakkuus matala. Päivän aikana valon värilämpötila muuttuu vähitellen neutraaliksi ja sitten viileäksi ja samalla valaistuksen valaistusvoimakkuus kasvaa. Lisäksi tilallisen valaistuksen sijainti tilassa nousee: ensin seiniä korostetaan ja keskipäivällä, kun aurinko on korkeimmillaan, tilan kalliioholvikatto on valaistettu. Iltapäivällä nämä valaistuksessa vähitellen tapahtuvat muutokset ilmenevät päinvastaisessa järjestyksessä seuraten luonnonvalon rytmiä auringonlaskua kohti. (Pujol, 2019). Kuvat 31 ja 32 esittelevät sarjan visualisointikuvia Retkasta ja Lab 2:sta

päivän eri hetkinä. Näkymät yhdistävät sirkadiaanisen valaistuksen piirteitä tilojen eri toimintoja tukeviin valaistusratkaisuihin.

sun height	height	colour temperature	vertical surface light intensity
 sunrise	 wallwash-up	 warm to neutral	 250 lx dim
 morning	 wall wash	 neutral to cool	 250 lx 750 lx brighten up
 noon	 suspended-up	 6500 k cool	 750 lx bright
 afternoon	 wallwash-down	 cool to neutral	 750 lx 250 lx dim down
 sunset	 wallwash-up	 neutral to warm	 250 lx dim

Kuva 30. Sirkadiaanista rytmiä tukeva maanalaisten tilojen valaistus.



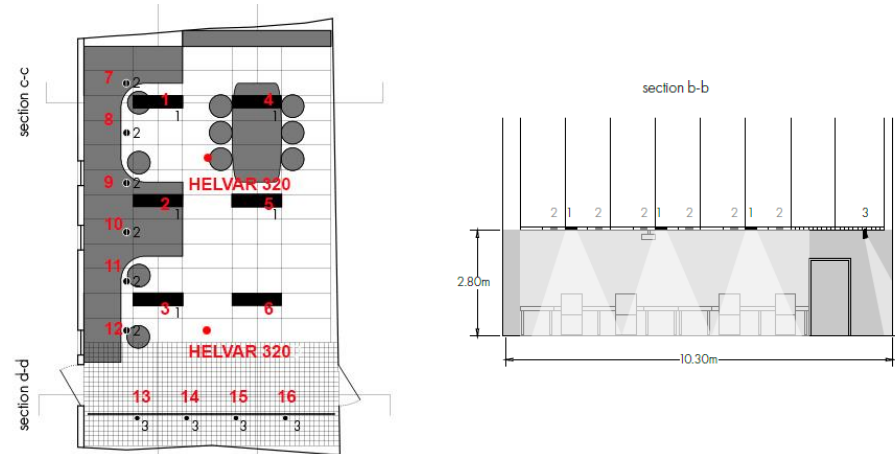
Kuva 31. Visualisointikuvia Retkasta päivän eri hetkinä.



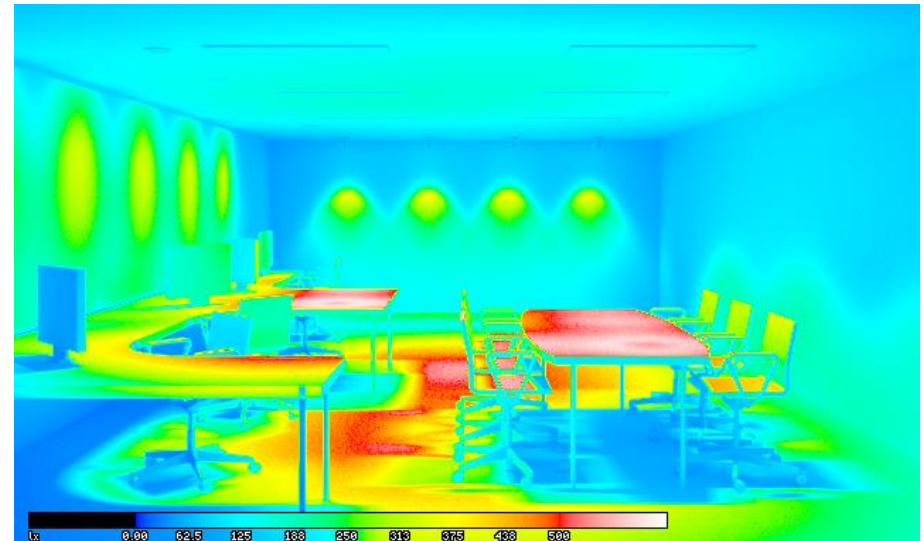
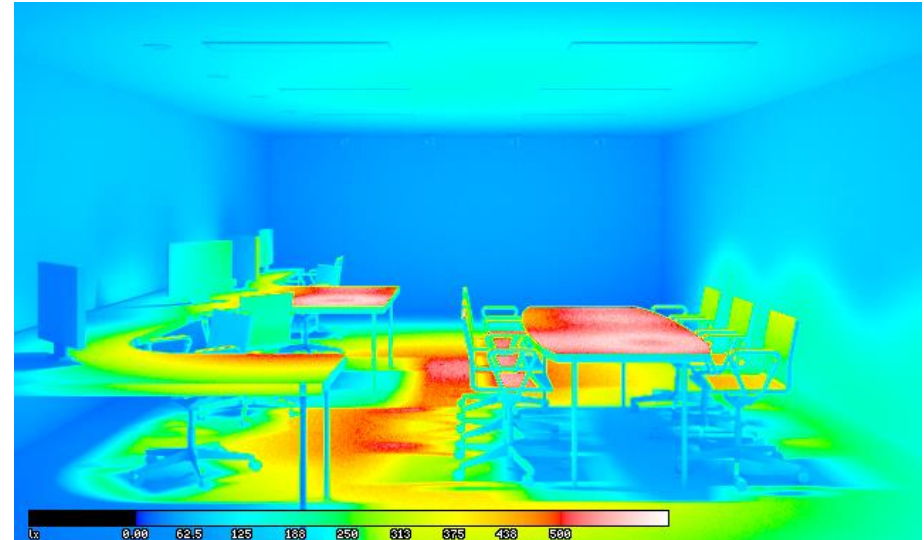
Kuva 32. Visualisointikuvia Lab 2 -tilasta päivän eri hetkinä.

Hankkeen älyvalaistuspilottin toteutussuunnitelmat tehtiin kesällä 2019 soveltaen skenaarioiden ajatuksia. Tilaksi valikoitui kustannussyistä Retkaa pienempi kaivoksen työnjohtajien toimistohuone (noin 3,6 m x 10,2 m) – Pomola – Retkan vierestä. Huonetta käytti kuusi työntekijää. Pomolaa käytetään näyttöpäätteillä tapahtuvan toimistotyön lisäksi kokouksia ja suunnittelutyöpajoja pöydän ympärillä, ja esitysten katsomista ja näyttämistä vierailijoille. Katon olemassa olevat loisteputki- ja pienois-

loisteputkivalaisimet korvattiin DALI-ohjattavilla tunable white LED -valaisimilla, joissa oli sekä valaistusvoimakkuuden että värilämpötilan säätö. Kuusi alakattoon integroitua paneelivalaisinta (Multilume Flat Delta, Fagerhult) tuottivat tilaan yleisvalaistuksen, kuusi integroitua seinänpesijävalaisinta (Pleiad G4, Fagerhult) korostivat pitkää seinää, ja neljä kosketinkiskoon asennettua valonheitintä (Marathon G3, Fagerhult) korostivat huoneen lyhyttä, kalliopintaista seinää. Sopivat valaistusvaikutelmat ja valaistusvoimakkuustasot tarkistettiin valaistuslaskelmin 3DS Max ja V-Ray-visualisointi ja renderointi-ohjelmistoilla (kuvat 35-38). Kaksi PIR (passive infrared) -liiketunnistinta (Helvar 320) asennettiin kattoon. Kuvssa 33 on esitelty valaisinten sijoitukset, liiketunnistimet ja huoneen kalustus. Huoneen Retkaa kohti avautuvat sisäikkunat peitettiin sen värisävyyden (kellertävän valkoinen) maalatuilla levyillä sulkemaan pois Retkasta tuleva erisävyinen valaistus ja näkymä siihen.



Kuvat 33 ja 34. Pomolan älyvalaistuspilottin valaistusratkaisu esitettyä pohjakuvassa ja leikkauspiirroksessa.



Kuvat 35-39. Pomolan älyvalaistuspilotin valaistusratkaisun valaistuslaskelmia.

Neljä testiskenaariota ohjelmoitiin huonetta varten niin, että ne olivat päällä kukin aina kaksi viikkoa peräjälkeen sekä vuoden pimeimpänä ajanjaksona (28.10. – 22.12.2019) että valoisana ajanjakson (27.7. – 27.9.2020, ensimmäinen skenaario päällä kolme viikkoa).

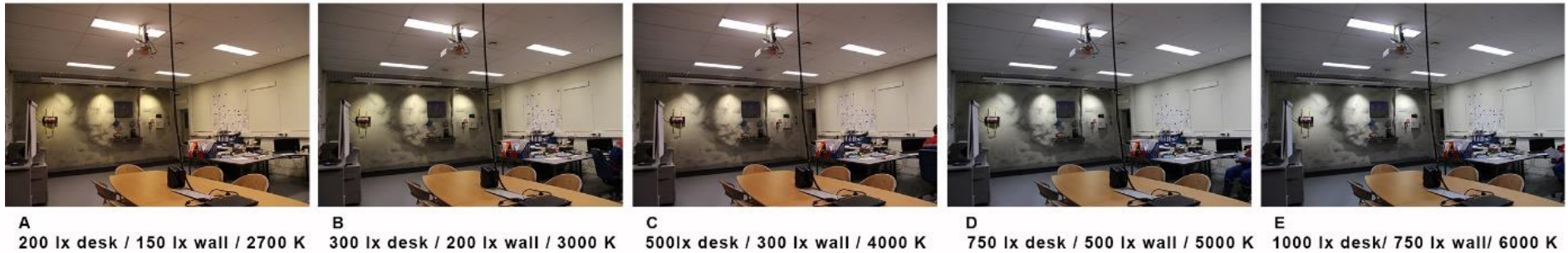
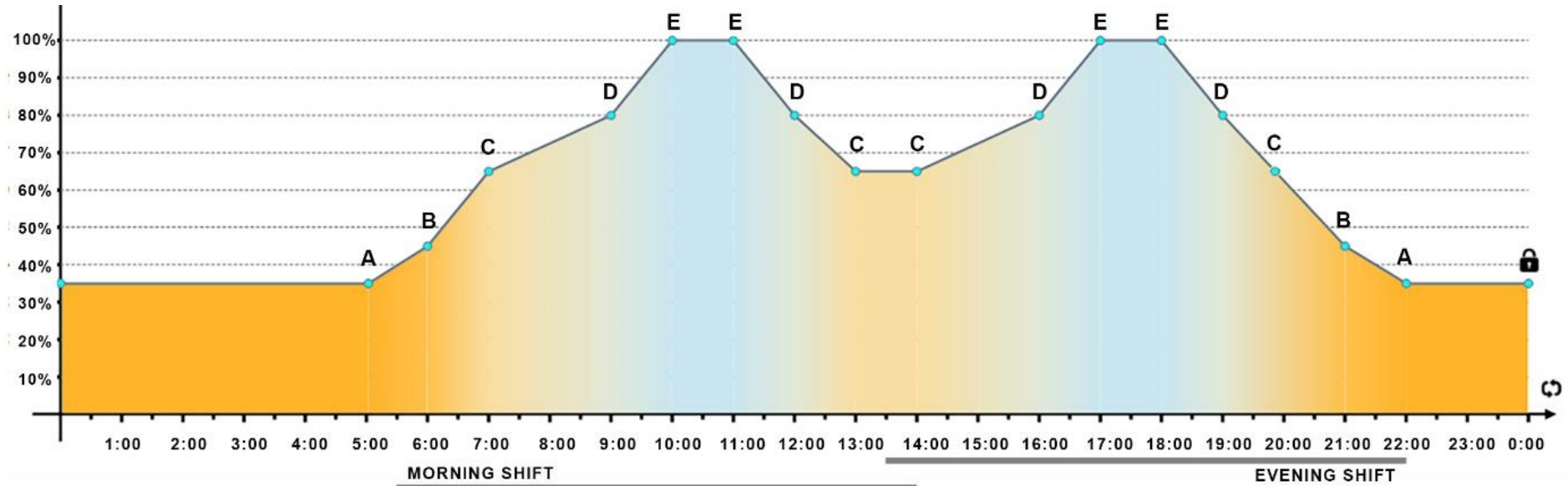


Kuva 40. Testiskenaariot:

- 1) Staattinen standardi toimistovalaistus kattovalaisimilla (300–500 lx pöytät., 4000 K);
- 2) Sirkadiaaninen toimistovalaistus kattovalaisimilla, “kameliprofiili” huomioiduina työvuorot (200–750 lx pöytätasolla, 2700–6000 K);
- 3) Sirkadiaaninen toimistovalaistus kattovalaisimilla ja seinävalaistuksella, “kameliprofiili” huomioiduina työvuorot (200–1000 lx pöytätasolla, 150–750 lx seinällä, 2700–6000 K),
- 4) Staattinen standardi toimistovalaistus kattovalaisimilla ja seinävalaistuksella (300–500 lx pöytätasolla, 300 lx seinällä, 4000 K).

Kuva 41 esittää testiskenaarioissa käytettyä sirkadiaanisen valaistuksen periaatetta. Koska kaivoksessa työskenneltiin kahdessa vuorossa, valonohjauksessa käytettiin ”kameliprofiilia”. Aamuvuoro oli klo 5:30–14:00 ja iltavuoro 13:30–22:00. Kun ensimmäiset työntekijät saapuivat klo 5:00–5:30, valaistus oli säädetty matalalle valaistusvoimakkuustasolle ja värilämpötilalle (A: 200 lx pöytätasolla / 150 lx seinällä, 2700 K) ja alkoi vähitellen kirkastumaan ja muuttumaan viileämmän sävyiseksi siten, että valaistusvoimakkuus ja värilämpötila olivat korkeimmalla tasolla (E: 1000 lx pöytätasolla / 750 lx seinällä, 6000 K) klo 10:00–11:00 lounastauon aikaan. Tämän jälkeen valaistusvoimakkuus ja värilämpötila alkoivat vähitellen laskea siten että klo 13 valaistus oli neutraalinsävyistä ja valaistusvoimakkuustasoltaan standardivalaistusta vastaavaa (C: 500 lx pöytätasolla / 300 lx seinällä, 4000 K). Valaistus pysyi tässä tasossa klo 13:00–14 välillä, mikä oli työvuorojen vaihtumisen aika. Klo 14 kun uudet työntekijät aloittivat työt, valaistus alkoi jälleen vähitellen kirkastumaan ja muuttumaan viileämmäksi saavuttaen korkeimman valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan tason (E) klo 17:00 päivällistauon aikaan. Tästä tasosta valaistusvoimakkuus ja valaistuksen värilämpötila sitten laskivat vähitellen koko loppuyövuoron ajan siten että klo 22:00 kun työvuoro päättyi, valaistus oli matalalla valaistusvoimakkuustasolla ja lämminsävyistä (A) valmistaen työntekijöitä alkavaan lepojakssoon ja uneen.

Työntekijöille oli annettu testijaksojen aikana näiden automaattiseksi ajastettujen skenaarioiden lisäksi mahdollisuus myös ohittaa ajastetut skenaariot laittamalla päälle jompikumpi kahdesta esi-ohjelmoidusta valaistustilanteesta, jotka oli suunniteltu esitystilanteita varten, tai sammuttaa valot kokonaan. Käsikäyttöinen valonohjaus tehtiin kosketuspaneelista, joka oli sijoitettu huoneen oven viereen. Testijaksojen ulkopuolella työntekijöille oli annettu laajemmat valonohjausmahdollisuudet. Eri valaisinryhmien säätämisen ohella työntekijät pystyivät säätämään erikseen heitä itseään lähimpiä kattovalaisimia tilan katossa. Ohjausasteikko oli viisiportainen ulottuen miedosta ja lämminsävyisestä valaistuksesta (esim. 200 lx pöytätasolla, 2700



Kuva 41. Sirkadiaanisen toimistovalaisuuden ohjausperiaate kaksivuorotyössä.

K) kirkaaseen ja viileään valaistukseen (esim. 750 lx pöytätasolla, 6000 K). Työntekijät saattoivat lisäksi laittaa päälle jonkun testiskenaarioista, valita jommankumman esitystilanteista, tai sammuttaa valot. Skenaario 3 oli ohjelmoitu olemaan oletusskenaario, joka tuli pehmeästi päälle, kun henkilö saapui tilaan.

Pilottiasennuksen kyky vaikuttaa vuorokausirytmiiin tarkistettiin mittauksilla ja CIE:n (International Commission on Illumination) kehittämällä työkalulla (CIE S 026, 2018). CIE S 026 -työkalu mahdollistaa mitatun valaistuksen vertailun valaistusvoimakkuudeltaan vastaavaan D65-standardipäivänvaloon (CIE 2018). Pomolaan asennetun älyvalaistuksen säteilytysvoimakkuusmittaukset mitattiin esikonfiguroidun Flame-spektrometrin avulla istuvan työntekijän silmien tasolta valkoista lähiseinää sekä kauempana sijaitsevaa harmahtavaa seinää kohti. Jokainen mittauskerta keräsi dataa kolme kertaa sekunnin ajan. Kyseinen mittauskerta toistettiin kuusi kertaa jokaisen valaistusasetuksen osalta, jonka jälkeen aineistosta laskettiin keskiarvot 1nm välein. Mittaukset toistettiin jokaiselle Pomolassa käytössä olleelle valaistusasetukselle; kaikki valot päällä, kattovalot päällä, valkoista seinää kohti osoittavat seinäpesuvalot päällä sekä harmaata seinää kohti osoittavat spottivalot päällä. Valojen väriämpötila vaihteli 2700 kelviniä 6000 kelviniin, valaistusvoimakkuuden muuttuessa kirkkaammaksi väriämpötilan noustessa. Näin pyrittiin simuloimaan luonnollista biodynaamista valaistusta. Mittauksen jälkeen aineisto lisättiin CIE S 026 työkaluun, joka mahdollistaa ipRGC-vaikutteisiin valovasteisiin liittyvät laskutoimitukset ja muunnokset sekä esimerkiksi valon ei-visuaalisten vaikutusten arvioinnin. Työkalu mahdollistaa mitatun valon vertaamisen valaistusvoimakkuudeltaan vastaavaan D65-päivänvaloon viidellä eri muuttujalla S-tappisoluooppisella, M-tappisoluooppisella, L-tappisoluooppisella, rhodooppisella sekä melanooppisella vaikutusspektrillä: α -ooppinen säteilytysvoimakkuus, α -ooppinen valaistusvoimakkuuden tehokkuus (ELR), α -ooppisen päivänvalon (D65) tehokkuussuhde (DER), α -ooppinen vastaavan päivänvalon (D65) valaistusvoimakkuus (EDI) sekä α -ooppinen logaritminen fotonisäteilytysvoimakkuus. Työkalulla voidaan mitata myös yleinen valaistuksen säteilytysvoimakkuus, valaistusvoimakkuus, sekä logaritminen fotonisäteilytysvoimakkuus.

Kaikkien valojen ollessa päällä 6000 kelviniin väriämpötilassa, valkoista lähiseinää kohti otetut mittaukset osoittavat selkeän $0,7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ huipun noin 457nm kohdalla sekä matalamman $0,37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ huipun 556nm kohdalla.

Valaistuksen valaistusvoimakkuudeksi mitattiin $246,85 \text{ lx}$ (Taulukko 3). Melanooppiseksi säteilytysvoimakkuudeksi mitattiin $283,26 \text{ mW}/\text{m}^2$ kun taas vastaavan päivänvalon melanooppinen säteilytysvoimakkuus on $327,37 \text{ mW}/\text{m}^2$. Laskettu melanooppinen ELR on $1,1475 \text{ mW}/\text{lm}$, kun taas vastaavan D65 päivänvalon ELR on $1,3262 \text{ mW}/\text{lm}$. Mitatun valaistuksen melanooppinen DER on $0,8652$ (Taulukko 2) ja EDI $213,58 \text{ lx}$ verrattuna vastaavan päivänvalon $246,85 \text{ lx}$:iin. Kauempana sijaitsevaa harmahtavaa seinää kohti mitattaessa melanooppinen DER on $0,9258$. On huomioitavaa, että myös korkeimmalla väriämpötilalla melanooppinen päivänvalon tehokkuussuhde on alle 1.

Valo	Vertikaalivalaistusvoimakkuus
Kaikki valot / lähiseinä 2700 K	62,96 lx
Kaikki valot / lähiseinä 3000 K	85,85 lx
Kaikki valot / lähiseinä 4000 K	135,83 lx
Kaikki valot / lähiseinä 5000 K	195,55 lx
Kaikki valot / lähiseinä 6000 K	246,85 lx

Taulukko 1. Mitattu valaistusvoimakkuus lähiseinää kohti mitattuna.

Alhaisemmilla väriämpötiloilla melanooppinen päivänvalon tehokkuussuhde laskee (Taulukko 4). 5000 Kelvinin väriämpötilassa lähempänä sijaitsevaa valkoista seinää kohti mitattaessa melanooppinen DER on $0,7922$. Vastaava tehokkuussuhteen laskeminen tapahtuu myös 4000 ($0,6859$), 3000 ($0,5026$) ja 2700 Kelvinin ($0,4184$) väriämpötiloissa mitattaessa. On kuitenkin

huomioitava myös se, että ohjelmoiduissa dynaamisissa valaistustilanteissa myös valaistusvoimakkuus laskee yhdessä värilämpötilan kanssa suunnitellusti. Esimerkiksi mitattu kokonaisvalaistusvoimakkuus on 62,96 lx värilämpötilan ollessa 2700 K verrattuna 245,95 lx:iin 6000 Kelvinissä. Täten mitattaessa melanooppista säteilytysvoimakkuutta ja vastaavan päivänvalon valaistusvoimakkuutta, ero eri valaistusasetusten välillä on vielä huomattavampi, laskien 283,26 mW/m²:sta ja 213,58lx:sta 6000 Kelvinissä 39 mW/m²:iin ja 26,34 lx:iin 2700 Kelvinissä.

α-ooppinen päivänvalon tehokkuussuhde (DER)	S-tappisoluooppinen	M-tappisoluooppinen	L-tappisoluooppinen	Rhodooppinen	Melanooppinen
Kaikki valot / lähiseinä 2700K	0,237	0,7789	1,0187	0,5051	0,4184
Kaikki valot / lähiseinä 3000K	0,3374	0,8133	1,0139	0,5769	0,5026
Kaikki valot / lähiseinä 4000K	0,5618	0,888	1,0035	0,7339	0,6859
Kaikki valot / lähiseinä 5000K	0,7001	0,9326	0,9967	0,8259	0,7922
Kaikki valot / lähiseinä 6000K	0,8006	0,9633	0,9921	0,8894	0,8652

Taulukko 2. α-ooppinen päivänvalon tehokkuussuhde lähiseinää kohti mitattuna

Mittausten ja työkalun tulosten perusteella voisi olettaa, että valaistusasennuksen valaisimilla aikaansaaduilla valaistusskenaarioilla olisi ei-visuaalisia vaikutuksia ja että ne tukisivat työntekijöiden vuorokausirytmää.

2.4 Neljän erilaisen valaistusratkaisun testaus työympäristössä kahtena vuodenaikana

Maanalaiseen työympäristöön suunniteltuja neljää erilaista valaistusskenaariota testattiin ja niiden vaikutuksia arvioitiin sekä vuoden pimeimpänä ajanjaksona (28.10. – 22.12.2019, TP4) että valoisana ajanjaksona (27.7. – 27.9.2020, TP6). Kukin skenaario oli päällä aina kaksi viikkoa, paitsi jälkimmäisen evaluoinnin ensimmäinen skenaario päällä kolme viikkoa. Skenaariot olivat päällä peräjälkeen. Alun perin valoisan vuodenajan tekstijakso oli tarkoitus toteuttaa huhtikuun puolesta välistä kesäkuun puoleenväliin, mutta koronarajoitukset estivät keväällä 2020 kaivokseen pääsyn ulkopuolisilta. Alkusyksystä 2020 tilanne oli väliaikaisesti rauhallisempi ja evaluointi voitiin toteuttaa, kuitenkin kaivoksen maanpäällisissä tiloissa. Työntekijöiden kokemusten evaluoinnissa menetelminä olivat evaluaatioluotain (Luusua et al., 2015), kyselylomakkeet ja haastattelut. Valaistuksen fysiologisia vaikutuksia mitattiin ActiGraph-rannekkeella ja Oura-sormuksella (unirytmä ja aktiivisuus, lisänä unipäiväkirja) ja Bittium Faros360° EKG-mittarilla (sykevaihtelu). Evaluointijaksojen aikataulu skenaarioineen ja käytettyine menetelmineen on esitetty kuvassa 42.

Fysiologiset mittaukset

Ensimmäisen evaluointijakson aikana työntekijöille tehtiin fysiologiset mittaukset, joiden tarkoituksena oli kartoittaa henkilöiden unta, aktiivisuutta ja vireystilaa seurantajakson aikana. Mittauksiin valikoitua viisi työntekijää (n=5), jotka viettivät eniten aikaa Pomolassa. Alkuperäinen evaluointijakso kesti marraskuusta joulukuulle. Lomien ja sairastumisten vuoksi, seurantajaksojen 2 ja 3 mittaukset jouduttiin toistamaan käänteisessä

Metodi / mittalaite	Marraskuu-19				Joulukuu-19				Tammikuu-20			
	I		II		III		IV		III (*)		II (*)	
	44	45	46	47	48	49	50	51	3	4	5	6
ActiGraph												
Unipäiväkirja												
Luotain & kysely												
EKG-mittaukset		Ti-To		Ti-To		Ti-To		Ti-To		Ti-To		Ti-To
Polar kuntotesti												
Haastattelu												

Metodi / mittalaite	Heinä-elokuu-20				syys.20							
	I		II		III		IV					
	31,32	33	34	35	36	37	38	39				
ActiGraph												
Unipäiväkirja												
Kysely												
EKG-mittaukset		Ti-To		Ti-To		Ti-To		Ti-To				
Polar kuntotesti												
Haastattelu												

Kuva 42. Ensimmäisen ja toisen evaluointijakson aikataulu ja käytetyt menetelmät. (*) Nille henkilöille, jotka eivät osallistuneet ko. skenaariota koskevaan mittaukseen ennen joulua.

järjestyksessä muutamalle koehenkilölle tammikuussa, jolloin luonnonvalon määrä edelleen vastasi marras-joulukuun vaihdetta.

Mittaukset suoritettiin työvuorojen aikana maan alla Pomolan ja Retkan läheisyydessä sijaitsevassa toimistotilassa. Aamuvuorossa olevien mittaukset pyrittiin suorittamaan vuoron alkupuolella ennen lounasta, ja iltavuorossa olevien mittaukset ajoitettiin heti työvuoron alkuun.

Ensimmäisellä ja neljännellä seurantajaksoilla koehenkilöille tehtiin aerobinen kuntotesti Polarin RS800CX –sykemittarin avulla. Tätä varten henkilöitä

pyydettiin arvioimaan omaa aktiivisuuttaan kuluneen kolmen kuukauden aikana asteikolla yhdestä (alhainen, 0-1h/viikko) viiteen (korkea, > 5h/viikko). Kuntotesti mittasi henkilön sykevälivaihtelua levon aikana, ja antoi arvion kuntotasosta perustuen lähtötietoihin (ikä, aktiivisuus) ja mittausdataan. Polarin kuntotestin on validoitu mittaavan sykevälivaihtelua ja V02 max – arvoa luotettavasti. (Peltola et al., 2000, Tulppo et al., 2003)

Uni- ja aktiivisuusmittauksia varten koehenkilöt pitivät aktiivisuusranneketta vuorokauden ympäri, koko evaluointijakson (8 viikkoa) ajan. Mittalaitteeksi valikoitui tutkimuskäytössä usein käytetty ActiGraph GTX3+, joka käyttää kiihtyvyyden ja kolmisuuntaista kaltevuusanturia askelten, liikkeen ja asentojen muutoksien havainnointiin. Tämän tyyppisten liikeantureiden on todettu

mittaavan luotettavasti aktiivisuutta. (Wood et al., 2008, Imboden et al., 2018) Unen arviointi perustuu kaltevuusanturin mittauksiin yhdistettynä raajan liikkumattomuuteen. Unidatan analysointiin käytettiin aikuisille suositeltua Cole-Kripken algoritmia. (Migueles et al., 2017) Aktiivisuusrannekkeen lisäksi koehenkilöt pitivät unipäiväkirjaa, johon he merkitsivät nukkumaanmeno- ja heräämisajat, työvuorot ja mahdolliset poikkeamat (esim. sairastelut, univaikeudet ym.) mittausjakson aikana.

Jokaisen valaistusintervention toisella viikolla, tiistaista torstaihin (> 48h) työntekijöille tehtiin EKG-seuranta käyttäen Bittiumin Faros360° -mittalaitetta. Faros360° on kannettava, teipillä rintalastaan kiinnitettävä, pienikokoinen EKG-mittauslaite, joka tallentaa henkilön sydämen sähköistä aktiivisuutta ja muodostaa sen perusteella erityisen sydänkäyrän. Mittausajankohdaksi valittiin seurantajakson toinen viikko, koska tutkimuksien mukaan ihmiskeholla menee n. 10 vuorokautta sopeutua fysiologisiin muutoksiin, kuten kylmyyteen tai pimeyteen. (Daanen and Marken, 2016, Mäkinen, 2006)

Signaalin purkaminen tapahtui Faros Manager –ohjelmalla mittausjakson jälkeen. EKG-signaalin analysointi tehtiin käyttäen Kubios HRV Standard –ohjelmaa, jolla voidaan analysoida sykevälivaihtelua (Heart Rate Variability, HRV), stressitasoja ja palautumista.

Kaikki fysiologiset mittaukset toteutettiin sokkoutettuna ja testihenkilöt eivät saaneet mittauksista palautetta testijakson aikana. Tällä pyrittiin estämään se, että henkilöt olisivat muuttaneet toimintaansa palautteen perusteella seurantajaksojen aikana.

Fysiologisten mittauksien tueksi koehenkilöitä pyydettiin arvioimaan omaa vireystilaa Luotain-vihkosessa olevan kysymyksen avulla työpäivien aikana. Kysely perustui Karolinska Sleepiness Scale (KSS) arviointitaulukkoon, jota on käytetty mm. arvioimaan vuorotyössä työskentelevien henkilöiden vireystilaa työvuorojen aikana (Åkerstedt et al., 2014). Koehenkilöä pyydettiin

arvioimaan omaa vireystilaa työvuoron alussa, keskellä ja lopussa asteikolla yhdestä (erittäin virkeä) yhdeksään (erittäin väsynyt).

Toisella evaluointijaksolla fysiologisten mittauksien mittausprotokolla pyrittiin toteuttamaan mahdollisimman samanlaisena kuin ensimmäisen evaluointijakson aikanakin. Kevään aikana puhjennut Covid-19 pandemia aiheutti kuitenkin joitakin muutoksia mittausprotokollaan. Alkuperäisen aikataulun mukaan mittaukset oli tarkoitus toteuttaa ennen työntekijöiden kesälomia touko-kesäkuussa 2020. Pandemiasta johtuen mittauksia jouduttiin lykkäämään, ja ensimmäinen mittausjakso päästiin aloittamaan kesälomien jälkeen elokuun alussa. Kaivoksen varotoimista johtuen mittauksia ei voitu suorittaa maan alla samoissa tiloissa kuin talvella. Sen sijaan mittaukset toteutettiin tarkkoja hygieniasäädöksiä noudattaen kaivoksen toimistotiloissa maan päällä. Tästä johtuen mittaukset ajoitettiin työvuorojen vaihteeseen iltapäivälle. Pandemiasta johtuen kaivoksen työvuorot olivat myös muuttuneet hieman talvimittauksista. Iltavuoroa oli myöhästetty tunnilla, jotta pukutilat ja hissi eivät ruuhkautuisi vuorojen vaihteessa.

Uutena lisänä kesämittauksiin otettiin käyttöön Oura-sormus (www.ouraring.com), joka mittaa unta, vireystilaa ja palautumista. Ouran tarkoitus oli toimia vertailukohtana sekä ActiGraph-rannekkeen että Faros360°:n mittausdatalle. Näin ollen Ouraa käytettiin yhtä aikaa EKG-mittalaitteen kanssa, jokaisen seurantajakson toisella viikolla. Oura-sormusta, kuten muitakin mittalaitteita, käytettiin myös sokkoutettuna, eli koehenkilö ei saanut käyttöönsä Ouran mobiiliapplikaatiota. Näin pyrittiin estämään se, että henkilö olisi muuttanut omaa toimintaansa applikaatiosta saadun palautteen perusteella.

Kesälomista johtuen seurantajakso 1 oli päällä yhteensä kolme viikkoa. Osallistujien osalta tuli myös muutoksia. Kevään aikana yksi koehenkilöistä eläköityi, ja jäi näin ollen pois mittauksista. Kesän aikana yksi koehenkilöistä ilmoitti, että ei halunnut enää jatkaa mittauksissa. Lisäksi yhden koehenkilön

työnkuva oli muuttunut kevään aikana niin paljon, että hän ei työskennellyt enää Pomolassa ollenkaan. Hän osallistui aktiivisuus- ja unimittauksiin ensimmäisen seurantajakson ajan, mutta jäi sen jälkeen pois mittauksista. Näin ollen kesämittauksiin osallistui loppuun asti kaksi henkilöä (n=2), joista toinen ei halunnut käyttää aktiivisuusranneketta sen aiheuttaman ihoärsytyksen vuoksi.

Kyselyt ja haastattelut kokemusten ja vaikutusten arvioimiseksi

Ensimmäisellä evaluointijaksolla kyselyihin vastasi kolme työntekijää ja haastatteluihin osallistui viisi työntekijää. Pomolan työntekijöille annettiin kyselylomakkeet, joiden sisältö oli riisuttu versio esitutkimusaineiston kyselylomakkeesta. Evaluointijakson kyselylomakkeissa selvitettiin vastaajien työhyvinvointia JAWS-asteikon avulla, valaistus- sekä tilakokemusta Pomolassa sekä luonnonvalon kaipausta. Vastaajien kronobiologisen tyyppin selvittämisestä rMEQ-asteikon avulla luovuttiin sekä esitutkimusaineiston tulosten perusteella että kyselylomakkeen keventämiseksi. Kyselyt toistettiin kahden viikon välein jokaisen valaistusjakson toisella viikolla eli yhteensä neljä kertaa.

Kyselyiden lisäksi vastaajille annettiin täytettäväksi erillinen luotainvihko jokaisen valaistusjakson ajaksi. Luotainvihko sisälsi avoimia kysymyksiä valaistus- ja tilakokemukseen liittyen, joiden tarkoitus oli kerätä laadullista aineistoa määrällisen aineiston tueksi. Avointen kysymysten lisäksi luotaimeen pyydettiin merkitsemään oman työpisteen sijainti huoneessa sekä kellonajat, jotka vastaaja oli viettänyt Pomolassa. Luotaimen lisäksi vastaajia haastateltiin erikseen toisen ja neljännen valaistusjakson toisella viikolla kaikkiin valaistusjaksoihin liittyen.

Haastattelut toteutettiin puolistrukturoituina haastatteluina. Haastatteluissa kysyttiin ensin avoimia kysymyksiä liittyen luonnonvalon kaipaukseen, työskentelyaikoihin Pomolassa sekä yleiseen päivärytmiin työpäivien aikana. Tämän jälkeen selvitettiin kattavasti työntekijöiden saamaa vaikutusta tilaan asennetuista valaisimista sekä kahdesta eri valaisutavasta mitä kuluvan

kuukauden aikana oli käytetty. Haastateltavia pyydettiin kuvailemaan molempia valaisutapoja ja antamaan palautetta siitä, onko valaisutavoissa parantamisen varaa. Tarkoituksena oli myös selvittää, kuinka hyvin valaistus tilassa täyttää tarkoituksensa ja tukee tilassa toimimista sekä onko valaistuksen suhteen kokemuseroja sen mukaan, onko työntekijä ollut aamu- vai iltavuorossa. Koska kaksi neljästä valaisutavasta oli dynaamisia valaistustapoja, eli niissä valotehokkuus ja värilämpötila vaihtelivat ajan mittaan, pyrittiin haastatteluissa selvittämään kiinnostavtkö tilassa työskentelevät työntekijät huomiota muutokseen. Haastatteluissa kysyttiin myös, ovatko työntekijät käyttäneet valaistuksen ohjauspaneelia ja kuinka usein, sekä mitä mieltä haastateltavat olivat huoneen ikkunoihin kiinnitetystä valkoisista levyistä.

Toisen evaluointijakson kyselyaineisto toteutettiin yhtenevällä kyselylomakkeella ensimmäisen evaluointijakson kanssa, jotta vertailu evaluointijaksojen välisten vastausten välillä olisi mielekästä. Kyselyt toistettiin kahden viikon välein haastatteluiden ja mittauksien yhteydessä kunkin valaistusjakson toisella viikolla. Ensimmäisestä evaluointijaksosta poiketen toisen evaluointijakson kyselyt ja haastattelut toteutettiin maan pinnalla kaivoksen hallintorakennuksen neuvotteluhuoneessa, sillä Covid-19 pandemian johdosta pääsy kaivokseen maan alle evättiin.

Toisen evaluointijakson kyselylomakkeisiin vastasi kaksi Pomolassa työskentelevää työntekijää. Molemmat vastaajat vastasivat jokaiseen neljään lomakkeeseen. Toinen vastaajista oli osallistunut kyselytutkimukseen myös ensimmäisellä evaluointijaksolla. Täten vertailu evaluointijaksojen välillä on mahdollista yhden työntekijän osalta. Kyselyvastauksia tarkastellaan pääasiassa yhdessä haastattelu- ja mittausaineiston kanssa, sillä suppean aineiston takia tilastollisesti merkittävien tulosten etsiminen aineistosta ei ole mahdollista.

Ensimmäisellä evaluointijaksolla käytössä olleista luotainvihkoista luovuttiin sekä vastausten puutteen, että haastatteluista saadun paremman laadullisen aineiston vuoksi. Haastattelut (n=2) suoritettiin tällä kertaa jokaisen

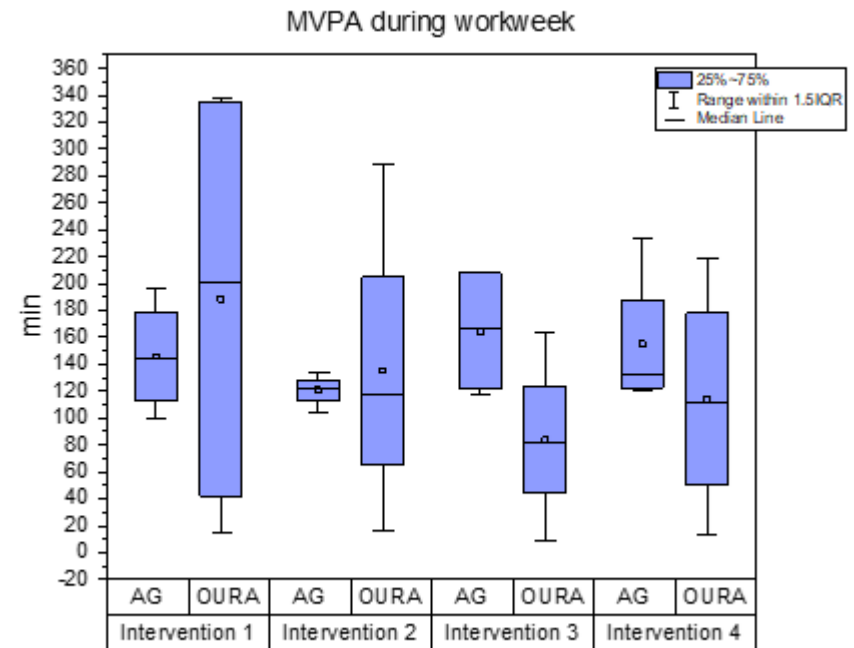
valaistusjakson toisella viikolla fyysisten mittausten suorittamisen ohessa. Näin ollen haastateltavien ei tarvinnut vastata kysymyksiin liittyen edelliseen valaistustilanteeseen, joka oli ollut käytössä viimeksi kaksi viikkoa aikaisemmin. Myös haastattelurunkoa muutettiin hieman ensimmäisen evaluointijakson aikana suoritetuista haastatteluista. Valaistukseen ja tilaan liittyvien kokemusten lisäksi haastatteluissa pyrittiin selvittämään sitä, kuinka vallitseva tilanne covid-19 –pandemian johdosta sekä kaivoksen lähestyvä sulkeminen mahdollisesti vaikutti työhyvinvointiin ja työterveyteen. Pääosin haastattelurunko pidettiin kuitenkin samanlaisena, jotta vertailun tekeminen ensimmäisen evaluointijakson haastatteluiden kanssa olisi mielekästä.

2.5 Tutkimuksen tulokset

Fysiologiset mittaukset

Fysiologisten mittausten osalta tuloksia ei esitellä laajemmin tässä raportissa, koska ne ovat osa hankkeessa projektitutkijana työskennelleen Henna Juneksen myöhemmin julkaistavaa opinnäytetyötä. Ottaen huomioon mittauksiin osallistuneiden henkilöiden vähäisen määrän, tilastollista analyysia ei ollut mahdollista tehdä ja luotettavia tuloksia näiden mittausten perusteella ei voida tehdä. Luotettava tilastollinen analyysi vaatisi suuremman otannan. Näin pienellä osallistujamäärällä sairastumiset tai mittausjaksoille sijoittuvat lomat aiheuttivat haasteita analysoitaessa aineistoa. Alustavat tulokset vaikuttavat kuitenkin mielenkiintoisilta, ja kertovat hyvin suunnitellun tutkimusasetelman mahdollisuuksista ja sovellettavuudesta vastaavissa tutkimuskohteissa suuremmalla osallistujamäärällä.

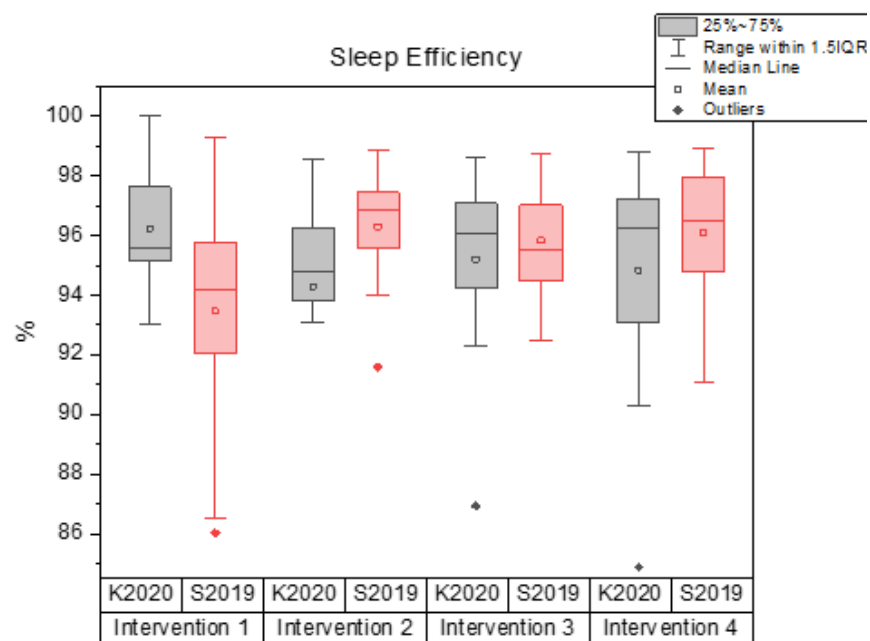
Seuraavassa on kuvattu esimerkinomaisesti mittausdataa ja siitä tulkittavia asioita.



Kuva 43. MVPA (Moderate to Vigorous Physical Activity) työpäivien aikana. ActiGraph ja Oura-sormus, kesämittaukset 2020, yksi henkilö.

Työntekijöiden fyysistä aktiivisuutta mitattiin työssä ja vapaa-ajalla kahdella menetelmällä: ActiGraph-rannekkeella ja Oura-sormuksella. Kuvassa 43 on esitetty yhden testihenkilön aktiivisuus työpäivän aikana (toinen evaluointijakso, valoisan kauden mittaukset). Sekä Oura että ActiGraph -aktiivisuusrannekkeen perusteella testihenkilön aktiivisuus työpäivien aikana on korkea. Mittausdatassa on huomioitu sekä työpäivät että vapaa-aika, koska Oura-sormuksesta ei ollut mahdollista eritellä dataa pelkästään työpäivien osalta. Suurin ero mittaus tuloksissa on nähtävissä seurantajakson 1 aikana. Erot mittausdatassa saattavat selittyä eroissa mittalaitteiden käytössä: Oura-sormusta voi pitää kummassa kädessä vain; aktiivisuusranneketta on pidetty

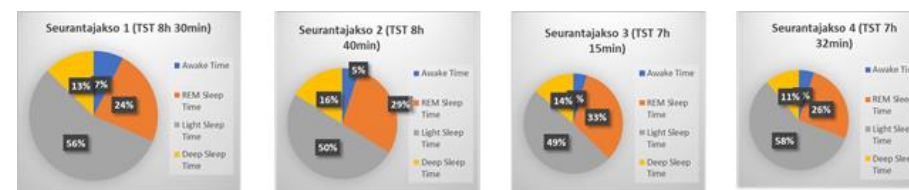
ei-dominantissa kädessä. Erot mittaustekniikassa saattavat myös selittää vaihtelua laitteiden välillä. Ouran perusteella henkilölle tulee päivän aikana askelia 12000-15000, eli n. 10-15km. Työpäivien aikana on datassa nähtävissä toistuvat, tietyt aktiivisuusajankohdat, jotka luultavasti ajoittuvat työkiertojen kohdalle, jolloin henkilöt kiertävät kaivoksen käytävillä. Terveysliikuntaa tulisi THL:n suosituksen mukaan tulla kaksi ja puoli tuntia (180 min) viikossa.



Kuva 44. Unen tehokkuus kaikkien mittausjaksojen ajalta, yksi henkilö.

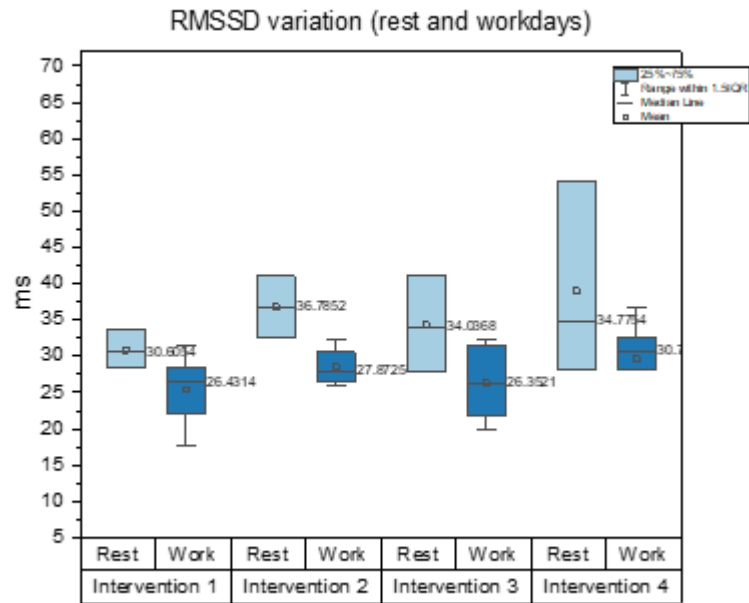
Kuvassa 44 on esitetty yhden henkilön ActiGraph-aktiivisuusrannekkeella mitattu unen tehokkuus molempien evaluointijaksojen aikana. ActiGraphin tietojen mukaan yli 90 %:n unen tehokkuus on erinomainen. Tähän verraten henkilön unen laatu ja määrä ovat erinomaisia kaikkien mittausjaksojen

aikana. Suurin ero talvi- (S2019) ja kesämittauksien (K2020) kohdalla on nähtävissä seurantajakson 1 kohdalla. Tämä saattaa olla selitettävissä sillä, että kesämittauksiin henkilöt tulivat levänneinä ja palautuneina kesälomilta, kun taas talvimittaukset aloitettiin marraskuussa, kun kesälomista oli jo kulunut useampi kuukausi. Talvimittauksien osalta seurantajakset 2,3 ja 4 ovat hyvin lähellä toisiaan. Kesämittauksissa keskiarvot ovat lievästi alempia kuin talvimittauksissa, mutta 2,3 ja 4 myös hyvin lähellä toisiaan. Kaikkein lähimpänä toisiaan mittaustulokset talvi- ja kesämittauksien välillä ovat seurantajakson 3 aikana.



Kuva 45. Unen vaiheet eri seurantajaksojen aikana Oura-sormuksen mittaamana, kesämittaukset, yksi henkilö.

Aktiivisuusrannekkeesta ei ole mahdollista saada tarkempia tietoja unen vaiheista. Oura-sormus sitä vastoin mittaa unen eri vaiheita; hereillä (awake), REM-uni, kevyt uni (light sleep), syvä uni (deep sleep). Kuvassa 45 on esitetty yhden henkilön unen vaiheita toisen evaluointijakson (valoisa kausi) eri seurantajaksoilla (neljä valaistuskenaariota). Vertailemalla Ouran mittaustuloksia nähdään, että REM-unen määrä on ollut korkeimmillaan seurantajakson 3 aikana. Syvän unen määrä on ollut lievästi alhaisempi kuin seurantajaksoissa 2, mutta silti korkeampi kuin seurantajaksoilla 1 ja 4. Unen laatuun vaikuttavat erityisesti REM-unen ja syvän unen määrä. Vireystilaan taas vaikuttavat sekä unen laatu että kesto. Kokonaisunen mediaanit (Total Sleep Time, TST) Ouran mittaamana ovat myös hyvin lähellä ActiGraphin mittaamia tuloksia.



Kuva 46. RMSSD vaihtelu unen ja työpäivien aikana. Talvimittaukset 2019, yksi henkilö.

Sykevaihtelun selvittämiseksi EKG-seuranta tehtiin käyttäen Bittiumin Faros360° -mittalaitetta ja data-analyysi käyttäen Kubios HRV Standard -ohjelmaa. RMSSD on tunnettu sykevaihtelua kuvaava indikaattori. Kuvassa 46 on esitettyä RMSSD vaihtelut yhden talvimittauksiin (ensimmäinen evaluointi) osallistuneen henkilön osalta levossa (R, rest) ja työpäivien aikana (W, work), kaikkien seurantajaksojen ajalta. Mittapisteet on valittu työvuoron ajalta niiltä ajoilta, jolloin testihenkilöt viettivät Pomolassa aikaa: vuoron alku, keskivaiheilla ja työvuoron loppu. Levon osalta mittapisteet on valittu yöllä syvän unen aikaan.

RMSSD:n osalta normaali vaihtelu on 27-72 ms. Mitä korkeampi arvo on, sitä parempi. Alentunut RMSSD-taso (<27ms) kertoo yleensä alentuneesta palautumiskyvystä. Toisaalta, RMSSD alenee iän myötä, ja ottaen huomioon

testihenkilöiden suuren ikähaarukan, henkilöiden tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia keskenään. Muita RMSSD:hen alentavasti vaikuttavia tekijöitä ovat (yli)paino ja elintavat, kuten tupakointi ja runsas alkoholinkäyttö. Yleisesti ottaen on odotettavaa, että RMSSD on korkeampi levossa kuin työpäivien aikana, mikä on hyvä asia. Kuvassa näkyvät kaikki interventiot, joiden välissä ei keskiarvoissa juuri ole eroja yhden henkilön tuloksia tarkasteltaessa.

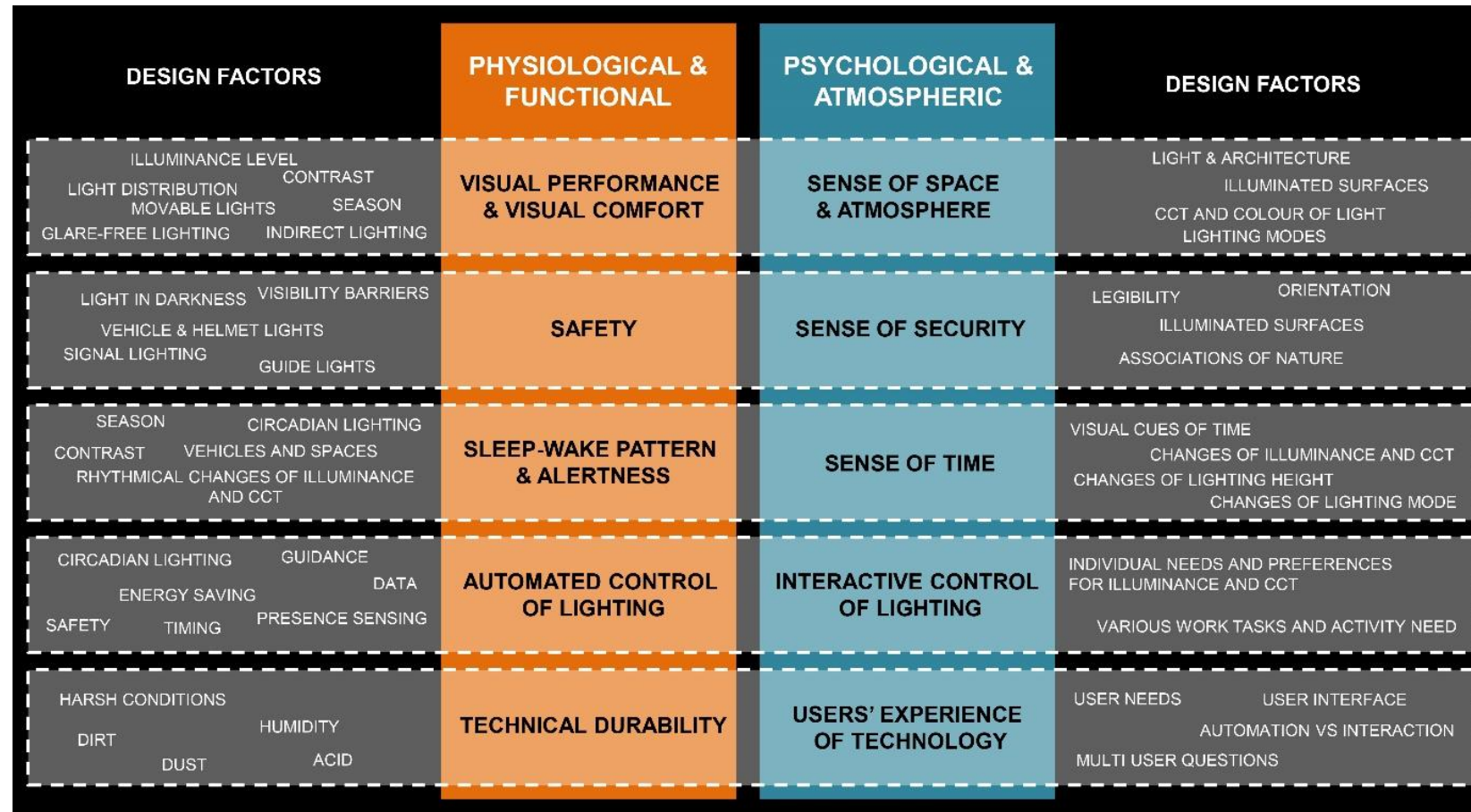
Kyselyt ja haastattelut

Haastattelumenetelmä toimi parhaiten kokemusten kartoittamisessa, koska kyselyn osallistujamäärä oli liian pieni tilastolliseen tarkasteluun. Haastatteluista saadusta syvällisestä palautteesta oli nähtävissä mm. vuodenajan vaikutus kokemukseen ja kaivosympäristölle tyypillisten voimakkaiden valaistuskontrastien mukanaan tuoma herkyys häikäisylle. Talvikaudella säätymätön kattovalaistus, jossa oli standardin mukainen valaistustaso (skenaario 1), koettiin liian voimakkaaksi, erityisesti aamulla ja myös saapuessa tilaan kesken päivän. Kesäkaudella samaa voimakkuutta ei pidetty häiritsevänä. Erityisesti talvikauden evaluoinnissa sirkadianinen valaistus (skenaariot 2 ja 3) nousivat esiin kommentteissa hyvänä ratkaisuna. Valaistus tuntui luonnolliselta ja miellyttävältä. Aamulla ei häikäissyt ja päivällä kirkkaampi valaistus tuntui luontevalta. Sirkadianisen valaistuksen huippuarvo tuntui kuitenkin joistakin haastateltavista liian kirkkaalta sekä talvella että kesällä. Kesäkaudella sirkadianisen valaistuksen aamun mieto valaistus tuntui joistakin haastateltavista liian heikolta. Sirkadianinen valaistus, jossa oli mukana myös seinävalaistus, koettiin parhaaksi (skenaario 3). Työntekijöiden omaa valonsäätömahdollisuutta pidettiin hyvänä. Haastatteliijoilta nousi esiin toive siitä, että valaistus huomioisi saapujan silmien adaptoitumisen matalammalle valaistustasolle kaivoksen heikosti valaistuissa tai pimeissä osissa liikuttaessa. Eli valaistus kirkastuisi sopivan hitaasti saavuttaessa tilaan.

Hyvinvointia ja turvallisuutta maanalaisissa työympäristöissä tukeva suunnitteluviiitekehys

Evaluointihaastattelut sekä laajemmalle kaivoksen työntekijäryhmälle tehdyt esihaastattelut tuottivat rikkaan, monipuolisen ja syvällisen laadullisen tutkimusaineiston, joka käsitteli maanalaista työskentelyä, kokemuksia olemassa olevasta ja pilotoidusta työympäristön valaistuksesta sekä yleisesti maanalaisten kaivosympäristöjen valaistustarpeita. Aineistoa

täydensivät suunnittelu-tutkimusprosessissa laaditut käyttöskenaariot, -konseptit ja implementointisuunnitelmat. Analyysissa tämä aineisto on tematisoitu ja aineistosta nousevien teemojen alle on kerätty olennaisia suunnitteluun liittyviä tekijöitä. Tuloksena on syntynyt suunnitteluviiitekehys, joka tukee valaistussuunnittelua ja älykkään valaistuksen ratkaisujen soveltamista maanalaisissa työympäristöissä ja erityisesti kaivosympäristöissä hyvinvoinnin ja turvallisuuden näkökulmista (kuva 47) (Pihlajaniemi et al., 2021).



Kuva 47. Valaistusta ja työhyvinvointia maanalaisissa tiloissa koskeva suunnitteluviiitekehys

Suunnitteluviitekehys esittelee olennaiset suunnittelunäkökohdat, jotka tulee ottaa huomioon suunniteltaessa maanalaisen tilojen valaistusta työhyvinvoinnin näkökulmasta. Yleiset näkökohdat – **visuaalinen, turvallisuus, aika, ohjaus ja teknologia** – ilmenevät sekä fysiologisella ja toiminnallisella tasolla että psykologisella ja tunnelman tasolla. Nämä ilmentymät voidaan sitten tulkita asiayhteyteen ja kontekstiin liittyviksi suunnittelutekijöiksi – tässä tapauksessa edustamaan kaivosympäristöihin liittyviä erityisiä suunnittelutarpeita. Näitä tekijöitä ja yleisiä suunnittelunäkökohtia käsitellään seuraavassa perustuen haastattelutuloksiin, käyttökäytännöihin, valaistuskonsteihin sekä aikaisempiin tutkimuksiin valosta ja muista ympäristötekijöistä maanalaisissa ympäristöissä.

Fysiologisen ja toiminnallisen kokemuksen näkökulmasta valaistuksen tulee tukea **visuaalista suorituskykyä ja ylläpitää visuaalista mukavuutta**. Kaivosympäristössä ja sen erilaisissa työtehtävissä on monia kriittisiä asioita, jotka tulisi ottaa huomioon. Yksi näkökulma on ympäristöjen väliset suuret valaistuskontrastit: tunnelit ja louhinta-alueet ovat pääosin valaisemattomia ja niihin tuodaan yleensä valoa niissä toimimista varten ajoneuvoihin ja kypäriin integroiduilla valaisimilla. Nämä tuottavat tyypillisesti voimakasta, suoraa valonheitintyyppistä valoa ja aiheuttavat helposti häikäisyä. Epämukavuuden tunnetta, joka syntyy liikuttaessa pimeiden ja kirkkaasti valaistujen tilojen välillä, voitaisiin vähentää älykkäällä valaistuksenohjauksella. Ohjaus joko tarjoaisi välittäviä, keskimääräisiä valaistusvoimakkuustasoja kulkutiloihin tai kirkastaisi työalueiden valaistuksen asteittain visuaalisen tehtävän kannalta optimaaliselle tasolle. Kun valaistus tuodaan tunneleihin ajoneuvoihin integroituna, yksi toimiva ratkaisu on suunnata se ylöspäin kohti tunnelin kattoa siten, että se tuottaa epäsuoraa valoa. Tämä on hyvä ratkaisu kaivostyökoneissa, joita ajetaan kamerakuvan avulla. Haastateltavat ehdottivat liikuteltavia valaistuslaitteita, esimerkiksi tehokkaita valonheittäjiä, tuottamaan yleisvalaistusta louhinta-alueille, joita ei voida valaista ajoneuvojen kautta. Huoltohallien työskentelyn tarpeita tukisi yleisvalaistuksen ja yksilöllisesti säädettävän työvalaistuksen

yhdistelmä – työntekijä voisi itse säätää valaistusvoimakkuutta ja suunnata valaistuksen sopivaan tulokulmaan. Hyvä värintoisto on tärkeää sähköasennustöissä erivärisillä pinnoitteilla varustettujen kaapelien erottamiseksi.

Psykologisen ja tunnelmaan liittyvän kokemuksen tasolla valaistuksella on tärkeä rooli **tilakokemuksen ja tunnelman** luomisessa. Työskentely maan alla ilman yhteyttä päivänvaloon ja ulkomaailmaan voi aiheuttaa kielteisiä psykologisia vaikutuksia. Näitä voidaan vähentää tai ehkäistä suunnittelemalla valon avulla tiloja, joilla on positiivinen tilallinen luonne ja tunnelma. Tästä näkökulmasta katsottuna optimaalinen valaistus tulisi suunnitella ottaen huomioon myös valon ja arkkitehtuurin välinen suhde sekä hyödyntää erilaiset valaistustavat, joita voidaan soveltaa arkkitehtonisessa valaistuksessa. Tärkeä suunnittelun keino on korostaa tilan rajoja valolla, sen sijaan että vain työtehtävä valaistaisiin. Tällä tavalla voidaan tukea tilojen hahmottumista ja synnyttää positiivisia kokemuksia ympäristön ilmapiiristä: kirkas eikä synkkä, avara eikä ahdas, raikas eikä tukkoinen, rentouttava eikä stressaava ja niin edelleen. Haastatteluissa kävi ilmi, että jotkut osallistujat olivat herkempiä kokemaan valon ja tunnelman tilallisia puolia kuin toiset. Nämä osallistujat suhtautuivat myönteisesti skenaarioihin, jotka sisälsivät pystypintojen valaistusta, kun taas toiset haastateltavat eivät aina raportoineet havainneensa muutosta valaistustavassa (alaspäin valaisevat kattovalaisimet vs. kattovalaisimet ja seinälle suunnatut valaisimet). Suosituin skenaario oli numero 3, joka sisälsi molemmat valaisutavat (katto- ja seinävalaistus) ja sirkadiaanisen valaistuksen ohjauksen. Kun tutkimusryhmä keräsi esihaastattelulla suunnitteluideoita tärkeiden tilojen kuten Retkan valaistuksen kehittämiseen, esiin nousi ajatus kallioholvien valaisemisesta tilantunnun ja avaruuden luomiseksi.

Kaivosympäristöissä on monia **turvallisuuteen** liittyviä erityisnäkökohtia ja optimaaliset valaistusratkaisut voivatkin poiketa niistä ratkaisuista, joita käytetään muun tyyppisissä maanalaisissa tiloissa. Haastateltavat korostivat, että turvallisuuden näkökulmasta on tärkeää olla valaisematta kaikkia

tunneleiden osia. Tunnelit tulisi jättää pääosin valaisemattomiksi ja keskittää valaistus tärkeisiin osiin. Jos tunnelit olisivat kokonaan valaistuja, olisi vaikea havaita lähestyviä ajoneuvoja ja koneita, jotka ovat nykyisellään helposti havaittavissa pimeässä näkyvien valaisintensa ja varoitusvalojensa ansiosta. Toisaalta risteysalueita voitaisiin tehdä turvallisemmiksi lisäämällä niihin älykästä valaistusta, joka syttyisi, kun anturit havaitsevat lähestyvän liikenteen. Jos anturitekniikkaa ja älykästä valaistuksen ohjausta käytettäisiin, tekniset häiriöt ja virhetilanteet eivät saisi aiheuttaa vaaraa. Kaivoksessa on alueita, joissa sumu ja pöly heikentävät näkyvyyttä ja lisäävät onnettomuusriskiä. Näillä alueilla tulisi merkitä vaarapaikat kuten kaivaukset vilkkuvilla varoitusvaloilla, ja led-nauhoja voitaisiin käyttää ympäristön muotojen hahmottumista parantamaan. Sumutilanteessa liian tehokkaat ajoneuvovalot saavat aikaan näkemisen kokonaan estävän valkoisen sumuverhon. Vaarojen ja onnettomuuksien sattua hälytysjärjestelmiin yhdistettyä älykkästä ohjattua valaistusta voitaisiin käyttää evakuoinnin apuna poistumisreiteille ohjaavina valoina.

Samat turvallisuusriskiä aiheuttavat kaivoksen ominaisuudet – sumun, pölyn ja pimeyden aiheuttama huono näkyvyys tunneleissa yhdistettynä nopeasti liikkuviin ajoneuvoihin – aiheuttavat stressiä ja epämukavuutta sekä heikentävät **turvallisuuden tunnetta**. Turvallisuuksi lisäävät valaistuksen ominaisuudet voivat lisätä myös turvallisuuden tunnetta. Maanalaisessa kaivostyössä ja -ympäristöissä on myös muita tekijöitä, jotka voivat lisätä stressiä ja heikentää turvallisuuden tunnetta. Valon täydellinen puuttuminen voi aiheuttaa paniikkireaktioita. Puuttuva yhteys ulkomaailmaan, suljetun paikan tunne, kokemus syvällä maan alla olemisesta ja tietoisuus monista mahdollisista työhön liittyvistä riskitekijöistä voivat kaikki kohottaa stressitasoa. Turvallisuuden tunnetta voidaan tukea valaistuksella, joka lisää reittien, tilojen ja tilarakenteiden luettavuutta, tukee orientaatiota ja antaa tietoa poistumisreiteistä. Valaistut pinnat luovat positiivisen avaruuden tunteen ja vähentävät suljetun tilan tuntua. Älykkäällä valaistuksella ja projisoinneilla, jotka hyödyntävät dynaamisesti elävää valoa, valon eri värisävyjä ja kuva-aiheita, voidaan luoda miellejhtymiä luonnosta, jolla on

tutkitusti positiivisia hyvinvointivaikutuksia. Haastatteluissa katon kallioholviin suunnatut taivas- ja pilviprojisoinnit nousivat esiin osana Retkan kehittämisisideoita.

Sirkadiaanista valaistusta voidaan käyttää tukemaan ja ajoittamaan oikein työntekijöiden **uni-valverytmiä ja vireystilaa**. Sirkadiaanisille valaistusjärjestelmille sopivia paikkoja ovat ajoneuvot ja ne valaistut tilat, joissa vietetään pitkiä aikoja, esimerkiksi toimistot, ravintola- ja lepotilat sekä huoltohallit. Valaistuksen ohjausprofiiliin ja sen aikasidonnaisten valaistusvoimakkuuden ja valaistuksen värilämpötilan muutosten tulisi palvella molempia työvuoroja. Osallistujat antoivat positiivista palautetta testatuista sirkadiaanisista valaistusskenaarioista: varsinkin talviarvioinnissa mainittiin positiivisena piirteenä työpäivän aloittaminen pienemmällä valaistusvoimakkuudella ja lämpimämmällä valolla. Skenaario 1:n staattinen standardivalaistus (500 lx pöytätasolla, 4000 K) tuntui aamulla liian kirkaalta. Kesäkaudella tätä ei koettu samalla tavalla ongelmaksi. Tämä tuo esiin tarpeen ottaa vuodenaika yhdeksi lähtökohdaksi ohjausstrategioissa, myös maanalaisissa olosuhteissa. Testatun ohjausprofiilin valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan automaattiset muutokset koettiin yleensä luonnollisina ja päivärytmiin sopivina. Jotkut osallistujista kokivat kuitenkin lounas- ja illallisaikojen "valaistushuipun" voimakkaan ja viileän valaistuksen liian kirkaaksi ja häikäiseväksi sekä ehkä myös liian viileäksi. Varsinkin jos he poistuivat toimistohuoneesta käymään kaivoksen pimeämmissä tiloissa ja palasivat sitten, heillä oli tämä kokemus liiallisesta valaistuksen voimakkuudesta. Yksi haastateltu mainitsi kärsivänsä migreenistä ja kertoi meille olevansa herkkiä kirkaalle valolle tästä syystä. Haastattelujen perusteella vaikutti siltä, että tämä ongelma koski enemmän skenaariota 2, jossa vain kattovalot olivat päällä. Seinien valaiseminen, vaikka se lisäsi valon määrää, tuntui auttavan tilannetta. Tämä kaivostyöläisten herkkyyks valaistuskontrasteille on otettava huomioon, kun suunnitellaan sirkadiaanisia valaistusstrategioita maanalaisissa olosuhteissa. Samat valaistusvoimakkuudet, joita voidaan helposti sietää osana sirkadiaanista valaistusta maanpäällisissä toimistoissa, joissa on näkymiä kirkaaseen

päivänvaloon ja taivaaseen, voivat olla epämiellyttäviä ja häikäiseviä kaivosympäristöissä, joissa silmät ovat adaptoituneet alhaisempaan sopeutumistasoon. Ohjausprofiilia suunniteltaessa tulisi löytää tasapaino ei-visuaalisten vaikutusten ja visuaalisen mukavuuden välillä. Palautteen perusteella testattua valaistuksen ohjausprofiilia (kuva 41) voitaisiin säätää siten, että valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan aleneminen iltavuoron aikana voisi hieman viivästyä niin, että valaistus pysyisi jonkin aikaa normaalitasolla (klo 19:30–20:30). Näin työntekijät pysyisivät virkeämpinä iltavuoron aikana.

Fysiologisen aikasidonnaisen rytmin lisäksi työntekijöiden **ajantajua** maanalaisissa olosuhteissa voidaan tukea sirkadiaanisella valaistuksella, jossa päivänvalorytmiä jäljitteleviä valaistusvoimakkuuden ja valon värilämpötilan muutoksia korostetaan erilaisilla visuaalisilla vihjeillä. Nämä voivat liittyä valaistuksen korkeuteen, valaistustapaan ja säähän assosioituihin projisoituihin kuva-aiheisiin. Kuvien 31 ja 32 visualisoinnit (s. 19 ja 20) havainnollistavat tällaista valaistuskonseptia Retkassa ja Lab 2:ssa: Eri valaisinryhmiä ohjataan dynaamisesti siten, että valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan ohella myös tilavaikutelma ja tunnelma muuttuu idealisoidun päivänvalorytmin mukaisesti. Tämä on saatu aikaan arkkitehtonisen valaistustavan muutoksilla eli vaihdellen ajastetusti sitä, mitkä huoneen pinnoista tai pintojen osista korostetaan valolla tuottaen epäsuoraa, heijastunutta valaistusta. Tämän tilallisen, ”ambientin” valaistuksen sijaintikorkeus jäljittelee auringon korkeutta, joka vaihtelee päivän kuluessa.

Valaistuksen **automaattiselle ohjaukselle** on löydettävissä ainakin kolme hyödyllistä sovellusalaa kaivosympäristöissä. Yksi on sirkadiaaninen valaistus, joka on kuvattu edellä. Lisäksi luontevia ovat erilaiset turvallisuus-, opastus- ja hätäsovellukset, joihin on myös viitattu edellä. Nämä voivat perustua kaivoksen eri valvonta- ja varoitusjärjestelmistä kerättyihin tietoihin sekä työntekijöiden läsnäolotunnistimien ja sijainninseurantalaitteiden käyttöön. Näiden ohella automatisoidulla valaistuksen ohjauksella on monia käyttötapoja, jotka vähentävät valaistuksen energiankulutusta

himentämällä valaistusta, kun tiloja ei käytetä. Vaikka energiansäästö ei ehkä ole ilmeinen työhyvinvointitekijä, se on osa tärkeitä vihreitä arvoja ja voi siten vaikuttaa työntekijöiden imagoon ja minäkuvaan työnantajan edustamien arvojen kautta. Hyvinvoinnin näkökulmasta automatisoidulla valaistuksella pyritään myös vähentämään työntekijöiden kognitiivista kuormitusta luomalla työympäristöjä, jotka palvelevat heidän tarpeitaan optimaalisesti ilman ylimääräisiä ponnisteluja. Tämä on erityisen tärkeää kaivoksissa, joissa ympäristö sisältää useita erilaisia stressitekijöitä, kuten melua, pimeyttä, huonoa näkyvyyttä sekä liikkuvia ajoneuvoja ja koneita.

Useissa kaivoksen osissa on melko vaikeaa tarjota kaivoksen henkilökunnalle käyttöliittymiä **valaistuksen interaktiiviseen ohjaukseen**. Muissa työympäristöissä yleisesti käytetyt älypuhelinsovellukset tai kaukosäätimet eivät ole erityisen käteviä liikaisissa kaivosolosuhteissa, joissa käytetään suojahaalareita. Pomolan työntekijät olivat erittäin tyytyväisiä mahdollisuuden ohittaa toimistotilan automaattinen valaistuksen ohjaus, kun oli tarvetta käyttää tilaa esittelytilana ja katsoa esitystä dataprojektorin avulla, tai kun he joskus halusivat himmentää valaistusta kaikkein kirkkaimmasta tai viileimmästä säätötilanteesta, joka oli osa automatisoitua sirkadiaanista valaistusta. Tämä esitystilanteisiin liittyvä valaistuksen ohjauksen tarve tuli esiin myös kaikissa ravintola Retkaa koskevissa esihaastatteluisissa. Kaikki haastateltavat kommentoivat, että sopivin käyttöliittymä on seinään asennettu ohjauspaneeli erilaisilla ohjausmahdollisuuksilla. Tällainen käyttöliittymä olisi hyödyllinen myös muilla valaistuilla ja pysyvästi käytetyillä kaivoksen alueilla, kuten huoltohalleissa, joissa valaistusolosuhteita voitaisiin tehdä joustavammiksi paremmin tukemaan vaihtuvia visuaalisia tehtäviä. Ohjausvaihtoehdot, jotka tarjottiin testitoimistohuoneessa, todettiin hyviksi ja riittäviksi. Työntekijät toivoivat kuitenkin henkilökohtaisten, itsesäädettävien työvalaisimien lisäämistä tilaan.

Kaivosten ankarat olosuhteet asettavat suuria vaatimuksia valaistuslaitteiden **tekniselle kestävyydelle**. Laitteet peittyvät vähitellen pölyyn ja likaan erityisesti tunneleihin ja louhoksiin liittyvissä tiloissa. Toimisto- ja

ravintolatiloiissa ilma on suodatettua ja puhdasta. Mineraalipöly muodostaa veden kanssa happoa ja syövyttäviä yhdisteitä. Kosteutta esiintyy useissa kaivoksen osissa sekä pinnoille tiivistyvän sumun muodossa että juoksevana vetenä, jota pumpataan jatkuvasti pois kaivoksesta. Siten valaisimet, joilla on oikeanlainen IP-luokitus, tulisi valita sijainnin mukaan. Yleisesti suositellaan laitteiden ja järjestelmien valinnassa suurta kestävyyttä.

Haastateltavat arvostivat erittäin paljon mahdollisuutta ohjata valaistusta pilotin testitoimistohuoneessa ja kehittivät myös uusia ideoita, miten he käyttäisivät laajempia ohjausvaihtoehtoja testijakson jälkeen. Positiivisen **teknologian käyttäjäkokemuksen** kannalta käyttöliittymä ei saa olla liian monimutkainen, mutta sen tulee silti tarjota riittävästi vaihtoehtoja erilaisiin käyttäjien tarpeisiin. Tiloissa, joissa työskentelee useita ihmisiä samanaikaisesti, tulee usean käyttäjän näkökulmat huomioida huolellisesti. Ohjausstrategian tulisi mahdollistaa joidenkin valaistuksen osien personointi yksilöllisiin tarpeisiin kaikkia käyttäjiä ja yhteisiä tarpeita palvelevan valaistuksen puitteissa.

3 Loppusanat

Hanke oli tutkimussuunnitelmaltaan erittäin kunnianhimoinen. Toteutuksen haastavuutta lisäsi holistinen tutkimusasettelu, joka yhdisti research-by-design tutkimusta todellisissa toimintaympäristöissä (real-world) tehtyyn pilotointiin sekä kokemusten ja vaikutusten arviointiin poikkitieteellisesti laadullisilla menetelmillä ja fysiologisilla mittauksilla.

Hankkeelle suunnitellut toimenpiteet saatiin koronapandemiasta huolimatta toteutettua ja hankkeelle määritellyt tavoitteet toteutuivat pääosin erittäin hyvin. Hankkeen kuluessa käytetyt useat tutkimusmenetelmät tuottivat selkeän ja monipuolisen aineiston, joka on analysoitavissa eri tavoin. Hankkeen pilotissa osallistujia oli kuitenkin niin pieni määrä, että fysiologisten mittausten ja palautekyselyiden tuloksista on mahdotonta vetää yleistettäviä johtopäätöksiä. Testattu menetelmä, joka yhdistää sekä laadullisia menetelmiä että fysiologisia mittauksia, vaikuttaa kuitenkin lupaavalta ja sitä on tarkoitus käyttää uudelleen toisessa kaivoskohteessa laajemmalla osallistujaryhmällä. Menetelmä on sovitettavissa myös muunlaisiin real-

world-koeympäristöihin. Hankkeen tuloksena syntyi testattuja, innovatiivisia valaistuskonsepteja ja valonohjausratkaisuja sekä suunnitteluviitekehys, jotka tukevat hyvinvointia ja turvallisuutta niin maanalaisissa työtiloissa kuin laajemminkin pohjoisissa työympäristöissä. Ratkaisut auttavat parantamaan valaistuksen ekologisuutta energiatehokkaan valonohjauksen ja valaistusteknologian soveltamisen kautta.

Lämpimät kiitokset hanketta rahoittaneille tahoille: Työsuojelurahastolle, Fagerhult Oy:lle ja Oulun yliopistolle. Kiitokset myös hankkeen yhteistyökumppaneille, joihin kuuluivat: Baltic Sea Underground Innovation Network (BSUIN) -hanke, rahoitus Interreg Baltic Sea; Pyhäjärven Callio / Pyhäsalmen Kvanttikiinteistöt Oy; Pyhäsalmen kaivos; ja WellLIT – Intelligent Lighting and Well-being in Northern Learning Environments -hanke, rahoitus Suomen Akatemia. Erityiskiitokset tutkimukseen osallistuneille Pyhäsalmen kaivoksen henkilökunnan jäsenille.

Lähdeluettelo

- Barkmann C, Wessolowski N & Schulte-Markwort M (2012) Applicability and efficacy of variable light in schools. *Physiology & behavior* 105(3): 621–627.
- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E & Rollag MD (2001) Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *The Journal of Neuroscience* 21(16): 6405–6412.
- Boyce PR (2014) *Human factors in lighting*. Crc Press.
- Boyce PR, Eklund NH & Simpson SN (2000) Individual lighting control: task performance, mood, and illuminance. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 29(1): 131–142.
- Calcagni B, Ceregioli AP, Filippetti F & Paroncini M (2001) Daylighting Reproduction in Interior Space with SIVRA System. In: *Proceedings of ISES 2001 Solar World Congress*: 401–409.
- Callio Lab (2019) *Current Underground Research Facilities*. URI: <https://calliolab.com/facilities-2/currently-available-facilities/>. Cited 2019/6/28).
- CIE S 026 (2018) *System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*. CIE, Vienna.
- Daanen, HA, & Van Marken Lichtenbelt, WD (2016). Human whole body cold adaptation. *Temperature* 3(1): 104-118.
- Danielsson CB & Bodin, L (2008) Office type in relation to health, well-being, and job satisfaction among employees. *Environment and Behavior* 40(5): 636-668.
- Fleischer S, Krueger H & Schierz C (2001) Effect of brightness distribution and light colours on office staff. In: *The 9th European Lighting Conference Proceeding Book of Lux Europa*: 77-80.
- Huiberts LM, Smolders KC and de Kort YA (2016) Non-image forming effects of illuminance level: Exploring parallel effects on physiological arousal and task performance. *Physiology & Behavior* 107: 7-16.
- Imboden MT, Nelson MB, Kaminsky LA & Montoye AH (2018) Comparison of four Fitbit and Jawbone activity monitors with a research-grade ActiGraph accelerometer for estimating physical activity and energy expenditure. *British Journal of Sports Medicine* Jul, 52(13): 844-50.
- Joutsenvaara, J (2016) *Deeper understanding at Lab 2: the new experimental hall at Callio Lab underground centre for science and R & D in the Pyhäsalmi Mine, Finland*, Master's Thesis, University of Oulu.
- Klitzman S & Stellman JM (1989) The impact of the physical environment on the psychological well-being of office workers. *Social Science & Medicine* 29(6): 733-742.
- Knoop M (2006) *Dynamic lighting for well-being in work places: Addressing the visual, emotional and biological aspects of lighting design*. In: *Proceedings of the 15th international symposium lighting engineering*. Bled, Slovenia, Lighting Engineering Society of Slovenia: 63–74.
- Lam WMC (1977) *Perception and lighting as formgivers for architecture*. Ripman CH (ed) New York, McGraw-Hill.
- Luusua A, Ylipulli J, Jurmu M, Pihlajaniemi H, Markkanen P & Ojala T (2015, April). Evaluation probes. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM: 85-94.
- Migueles J, Cadenas-Sanchez C, Ekelund U, Nystrom C, Mora-Gonzalez J, Lof M, et al. (2017) Accelerometer Data Collection and Processing Criteria to Assess Physical Activity and Other Outcomes: A Systematic Review and Practical Considerations. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)* 47(9): 1821.
- Mäkinen T (2006) Human cold exposure, adaptation and performance in a northern climate. *International Journal of Circumpolar Health* Sep 18, 65(4): 369-70.
- Peltola, K, Hannula, M, Held, T, Kinnunen, H, Nissilä, S, Laukkanen, R & Marti, B (2000) Validity of polar fitness test based on heart rate variability in assessing VO2max in trained individuals. In *Abstract in Proc 5th Annual Congress of ECSS*.
- Pihlajaniemi H (2016) *Designing and experiencing adaptive lighting. Case studies with adaptation, interaction and participation*. Doctoral dissertation. University of Oulu Graduate School; University of Oulu, Oulu School of Architecture, Acta Universitatis Ouluensis H 3.
- Pihlajaniemi H, Pujol M & Liikkanen J (2021) Design framework for lighting and occupational well-being in underground spaces: Case study in Pyhäsalmi mine. In *Proceedings of CIE 2021 Conference, September 27–29 2021, Malaysia*.

- Pujol, M (2019) Lighting at the End of the Tunnel. The Design of Adaptive and Intelligent Lighting for an Underground Workspace, Master's Thesis, University of Oulu, Oulu School of Architecture.
- Slegers PJC, Moolenaar NM, Galetzka M, Pruyn A, Sarroukh BE & van der Zande B (2012) Lighting affects students' concentration positively: findings from three Dutch studies. *Lighting Research and Technology* 2013 45: 159–175.
- Smolders KC & de Kort YA (2014) Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. *Journal of environmental psychology* 39: 77-91.
- Smolders KC, De Kort YA & Cluitmans PJM (2012) A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Physiology & Behavior* 107(1): 7-16.
- Steidle A & Werth L (2013) Freedom from constraints: Darkness and dim illumination promote creativity. *Journal of Environmental Psychology* 35: 67-80.
- Tulppo MP, Hautala AJ, Mäkikallio TH, Laukkanen RT, Nissilä S, Hughson RL et al. Effects of aerobic training on heart rate dynamics in sedentary subjects. *Journal of Applied Physiology*. 2003 Jul 1;95(1):364-72.
- Van Katwyk PT, Fox S, Spector PE & Kelloway EK (2000) Using the Job-Related Affective Well-Being Scale (JAWS) to investigate affective responses to work stressors. *Journal of occupational health psychology*, 5(2), 219.
- Veitch JA & Gifford R (1996) Choice, perceived control, and performance decrements in the physical environment. *Journal of Environmental Psychology* 16(3).
- Veitch JA, Stokkermans MG & Newsham, GR (2013) Linking lighting appraisals to work behaviors. *Environment and Behavior* 45: 198-214.
- Vischer JC. & Wifi M (2017) The Effect of Workplace Design on Quality of Life at Work, in Fleury-Bahi G, Pol E & Navarro O (eds) *Handbook of Environmental Psychology and Quality of Life Research*. Springer International Publishing: 387-400.
- Wood A, Kuntsi J, Asherson P & Saudino K (2008) Actigraph data are reliable, with functional reliability increasing with aggregation. *Behavior Research Methods* Aug;40(3): 873-8.
- Åkerstedt T, Anund A, Axelsson J & Kecklund G (2014) Subjective sleepiness is a sensitive indicator of insufficient sleep and impaired waking function. *Journal of sleep research* 23(3): 242-254.

Kuvaluettelo

Kuva 1. Pyhäsalin Mine Oy ja Mia Pujol

Kuvat 2-23. Mia Pujol

Kuvat 24 ja 25. Jussa Liikkanen

Kuvat 26-29. Laitevalmistajat

Kuvat 30-39. Mia Pujol

Kuva 40 ja kannen kuva. Mia Pujol ja Henrika Pihlajaniemi

Kuva 41. Henrika Pihlajaniemi

Kuvat 42-46. Henna Junes

Kuva 47. Henrika Pihlajaniemi

Arkkitehtuuri B 36. Oulun yliopisto, 2024.

ISSN: 2489-7825 (verkkojulkaisu)

ISBN: 978-952-62-4209-5 (verkkojulkaisu)