

**RÄJÄYTYSKAASUJEN REAALIAIKAINEN MÄÄRITYS
MIEHITTÄMÄTTÖMÄLLÄ LENNOKILLA**

Soile Sääski

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

2019

Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Soile Sääsä	Vuosi	2019
Ohjaaja	Ins. (AMK) Antti Niemelä		
Toimeksiantaja	Orica Finland Oy		
Työn nimi	Räjätyskaasujen reaaliaikainen määrittäminen miehittämättömällä lennokilla		
Sivu- ja liitesivumäärä	58 + 40		

Työn tavoitteena oli tutkia käyttökelpoisuutta lennätettävälle kaasumittaukselle, jonka mittaustulos saadaan reaaliajassa räjäytystyön aikana työskentelevälle henkilöstölle. Menetelmän eduksi ajateltiin räjäytyksen jälkeen saavutettavaa aikasäästöä kaasupitoisuuksien arvioinnissa ja saadun tiedon käyttämistä työskentelyturvallisuuden arviointiin avolouhoksessa.

Työn käytännön osuudessa suoritettiin koelennätyksiä miehittämättömällä nelikopterilla, johon oli kiinnitetty 3G-yhteydellä mittaustietoa siirtävä kaasumittari. Kaasumittariksi valittiin nelikaasumittarilla varustettu henkilökohtainen suojalaitte. Lennätysten aikaisia kaasupitoisuuksia tarkkailtiin tabletilla selainsovelluksesta. Kaasumittauksen onnistumista arvioitiin kertyneen mittaustiedon jälkianalyysillä.

Kaasumittaus toimi lennätysten aikana hyvin ja tieto pitoisuuksista saatiin päätelaitteelle seurattavaksi lennätettäessä. Kaasumittaria kuljettanut lennokki oli mittarin koon vuoksi suorituskykynsä ääri rajoilla, jonka vuoksi onnistuneita lennätyskertoja kertyi liian vähän. Lennättämisestä kertyneiden kokemusten perusteella menetelmän haasteita päästiin selvittämään kattavasti.

Kaasumittaus oli laadultaan luotettavaa räjäytystyöskentelyn jälkeisiin vaatimuksiin, vaikka käytetty mittari ei ollut analytiikkaan tarkoitettu. Pienikokoisen nelikopterin käyttö havaittiin ongelmalliseksi itseensä nähden varsin raskasta mittalaitetta kantamaan. Suuri osa lennätysistä jouduttiin keskeyttämään lennokin hallinnan menettämisen vuoksi. Myös käytännön osuuden sijoittuminen osittain syksyn ja alkutalven ajalle vähensivät osaltaan onnistuneita lennätyskertoja. Vähäisten lennätyskertojen vuoksi ei voitu kerätä kokemuksia räjäytystyönvalvojilta etäluettavan kaasumittauksen hyödyntämisestä.

Opinnäytetyön jäi alkuperäiseen tavoiteasetteluunsa nähden vaillinaiseksi, koska aineistoa ei saatu kerättyä riittävästi menetelmän arviointiin. Kaasumittauksen laatu lennätettäessä pystyttiin toteamaan, mutta menetelmän käyttöä räjäytystyötä tehostavana työkaluna ei päästy arvioimaan.

Avainsanat

miehittämätön lennokki, kaasumittaus, räjäytyskaasut

Technology, Communication and Transport
Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Soile Sääsäki	Year	2019
Supervisor	Antti Niemelä, B.Eng.		
Commissioned by	Orica Finland Oy		
Subject of thesis	Real-Time Measurement of Explosion Gases		
Number of pages	58 + 40		

The aim of this thesis was to examine the viability of an aerial gas measurement method, the results of which are gained in real time to be used by blast personnel. The benefits of this method were assumed to be seen as time savings in gathering information of blast gas concentrations after a blast, and to utilise the information in evaluating work safety conditions in an open pit mine.

The practical part of thesis consists of test flights with an unmanned quadcopter, on which a quad gas monitor transmitting data via 3G connection was attached. The gas concentrations during the flights were examined real-time on a browser application with a tablet. The validation of the gas measurement was determined by post-analytics of the measurement data.

The gas measurement was successfully obtained in real-time onto a tablet during flights. The weight of the gas monitor compared to the capability of the quadcopter resulted to inadequate flight performance to gather decent amount of flight sessions. The experience gained from aerial gas measurements allowed to explore the practical challenges of the method examined in this thesis.

Despite the unanalytical nature of the gas monitor used, the gas measurement was found to be valid for use in immediate post-blast working. Several flight sessions had to be aborted because of the loss of manoeuvrability of the quadcopter, which was caused by the excess load. The conditions of late autumn and early winter also impaired the performance of the quadcopter. Therefore, the blast operators were not able to evaluate the usability of this method and no information on this was gained.

Considering the original set of aims, this thesis was left unfinished in evaluating the utilisability of the method examined. Not enough of practical experience of the method was gained, although the validity of the gas measurement could be stated.

Key words unmanned aerial vehicle, gas measurement, explosion gases

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Tavoite ja toteutus	7
1.2	Kevitsan kaivos	8
2	RÄJÄYTYSTYÖSKENTELEY	11
2.1	Räjähdystapahtuma porausreiässä ja kallion lohkaroituminen	15
2.2	Räjähdyskaasut	17
3	MIEHITTÄMÄTTÖMÄT LENNOKIT	20
3.1	Kevyisiin miehittämättömiin lennokkeihin liittyvä sääntely	20
3.2	Sovellukset kaivosalalla	21
3.3	Miehittämättömillä lennokeilla käytetyt menetelmät	22
4	LIIKUTELTAVA KAASUMITTAUS JA LAITTEISTOT	25
4.1	Haasteet miehittämättömien lennokkien käytössä kaasumittauksiin	26
4.2	Mittausanturit	26
4.3	Laitteiston rakenne ja roottoreiden vaikutus kaasumittaukseen	28
5	KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO	29
6	LENNÄTYKSET	33
7	KAASUMITTAUSTIETOJEN KÄSITTELY	36
7.1	Räjätyskenttä C1138R014	37
7.2	Räjätyskenttä C1126R001	40
7.3	Räjätyskenttä B1030M002	42
7.4	Kaasupitoisuuksien esiintymiskorkeus	46
7.5	Räjätyskaasujen syrjäyttämä ilman happi	47
8	POHDINTA	49
	LÄHTEET	56
	LIITTEET	58

ALKUSANAT

Osoitan kiitokseni Orica Finland Oy:n Hannu Ryynäselle, joka antoi minun toteuttaa opinnäytetyöideani sekä Jari Näsille, joka tarjosi korvaamattoman asiantuntemuksensa opinnäytetyöni ohjaajana. Lisäksi Kevitsan toimipisteen koko henkilöstö ansaitsee kiitokseni avustaan opinnäytetyön käytännön osuuden toteuttamisesta.

Kiitokseni osoitan myös yhteistyökumppani Boliden Kevitsa Oy:lle. Heidän työntekijöidensä kanssa käydyissä keskusteluissa nousi esiin arvokkaita kysymyksiä, ideoita ja huomioita, jotka täydensivät opinnäytetyöni kokonaisuutta. Erityiskiitokseni heistä osoitan Mikko Kaaretkoskelle avusta ja opastuksesta miehittämättömän lennokin lennättämisessä.

Mitä suurimman kiitoksen haluan osoittaa avopuolisolleni hänen osoittamastaan tuesta kesyittäessäni villinä vellovia muistiinpanopinoja valmiiksi opinnäytetyöksi asti.

Sodankylässä 4. huhtikuuta 2019,

Soile Sääsä

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

EMEA	Europe, Middle East and Africa
IMU	Inertial Measurement Unit, inertiamittausyksikkö, mittaa kappaleen asentoa ja liiketilaa (Huttunen 2017, 7)
LEL	Lower Explosive Limit, alempi räjähdysraja (palaville kaasuille)
LiDAR	Light Detection and Ranging, optinen skannausmenetelmä
GPS	Global Positioning System, maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä
ppm	parts per million, miljoonasosa

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön ideaa olin pyöritellyt jo jonkin aikaa tutustuttuani miehittämättömien lennokkien sovellusalueisiin aiemmassa koulutyössä. Ennen harjoittelujakson aloittamista vierailin Pohjoinen Teollisuus 2018 -messuilla, jossa kyselin langattoman kaasumittaustekniikan mahdollisuuksia lennätettävässä menetelmässä käytettäväksi. Lopulta työharjoitteluun mentyäni esittelin ideani opinnäytetyön aiheeksi harjoittelupaikassani ja ilahduin lopulta saadessani alkaa toteuttaa ideaani.

1.1 Tavoite ja toteutus

Opinnäytetyössä tutkitaan räjäytyksessä syntyvien kaasujen mittaamista reaaliaikaisesti lennättämällä kaasumittaria miehittämättömällä lennokilla räjäytysalueella. Miehittämättömät lennokit ovat jo löytäneet tiensä yrityksiin valtaosin kuvauskäyttöön, mutta kaasumittaussovelluksista on julkaisuja varsinkaan suomenkielisinä erittäin vähän. Työssä tutkitaan käyttökelpoisuutta menetelmälle, jossa kaasumittautieto saadaan etäyhteydellä reaaliaikaisesti räjäytysten aikana työskentelevälle henkilöstölle.

Mittaukseen käytetään henkilökohtaiseksi suojalaitteeksi tarkoitettua kaasumittaria, joka kiinnitetään miehittämättömään lennokkiin. Kaasumittauksen onnistuminen mittalaitteella, jota analytiikkaan ei ole tarkoitettu, kertoo menetelmän yleisestä käyttökelpoisuudesta hyvin. Mikäli opinnäytetyössä käytetyllä laitteistolla saavutetaan luotettavia tuloksia mittausteknisistä virhelähteistä huolimatta, teknisesti edistyneempien kaasumittaustekniikoiden voidaan olettaa myös olevan käyttökelpoisia.

Tavallisesti räjäytyksen jälkeen räjäytystyöntekijöiden tulee odottaa vähintään suoja-ajan verran ennen siirtymistään avolouhokseen tarkastamaan räjäytyksen onnistuminen ja arvioimaan työskentelyn turvallisuus. Miehittämätön lennokki voidaan lennättää alueelle jo ennen tämän suoja-ajan päättymistä ja kaasumittauksella saatua tietoa työskentelyturvallisuudesta voidaan saada näin aikaisemmin. Menetelmä mahdollistaa työskentelyturvallisuuden tehostamisen sekä

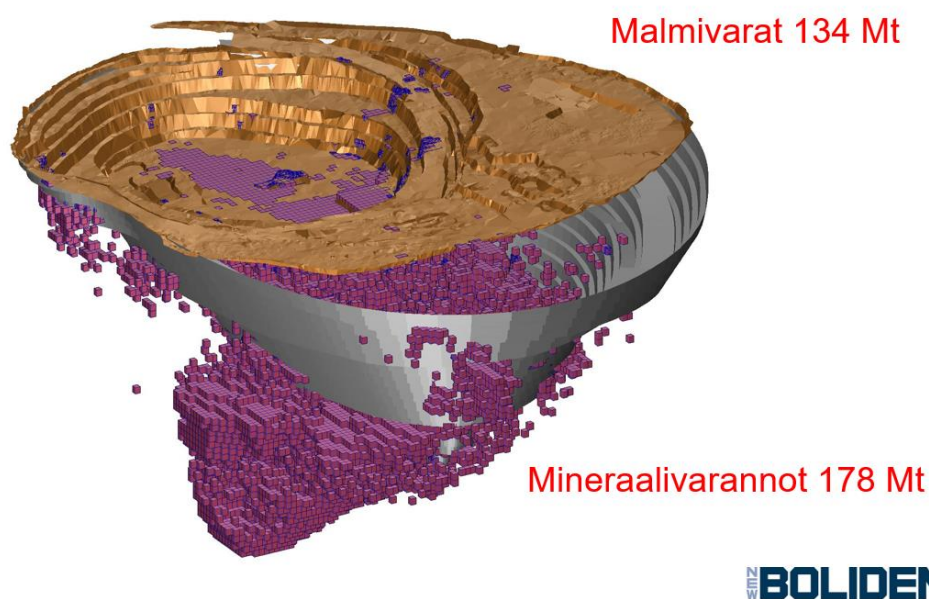
mahdollisen aikasäästön tuotannon uudelleenkäynnistämisessä räjäytyksen jälkeen.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Orica Finland Oy ja työn käytännön osuus suoritettiin Kevitsan kaivoksella Petkulassa. Työ tehdään läheisessä yhteistyössä Boliden Kevitsa Mining Oy:n kanssa. Sekä toimeksiantaja että yhteistyökumppani ovat kiinnostuneet tutkittavan menetelmän käyttökelpoisuudesta räjäytystyöskentelyä tehostavana työkaluna.

1.2 Kevitsan kaivos

Kevitsan kaivos sijaitsee Sodankylän Petkulassa. First Quantum Minerals Ltd teki päätöksen kaivoksen rakentamisesta vuonna 2009 ja tuotanto kaivoksella aloitettiin 2012. Kesäkuussa 2016 Boliden osti kaivoksen 650 miljoonan euron hintaan. Vuodesta 2015 alkaen Kevitsan kaivos on louhintamäärältään ollut Suomen suurin kaivos 40 – 50 miljoonan tonnin kokonaislouhinnalla. Malmia kaivoksesta louhitaan 7 – 8 miljoonaa tonnia vuodesta ja tuotannon nostamista 9,5 miljoonaan tonniin tavoitellaan vuoteen 2020 mennessä. (Brusila 2018.)

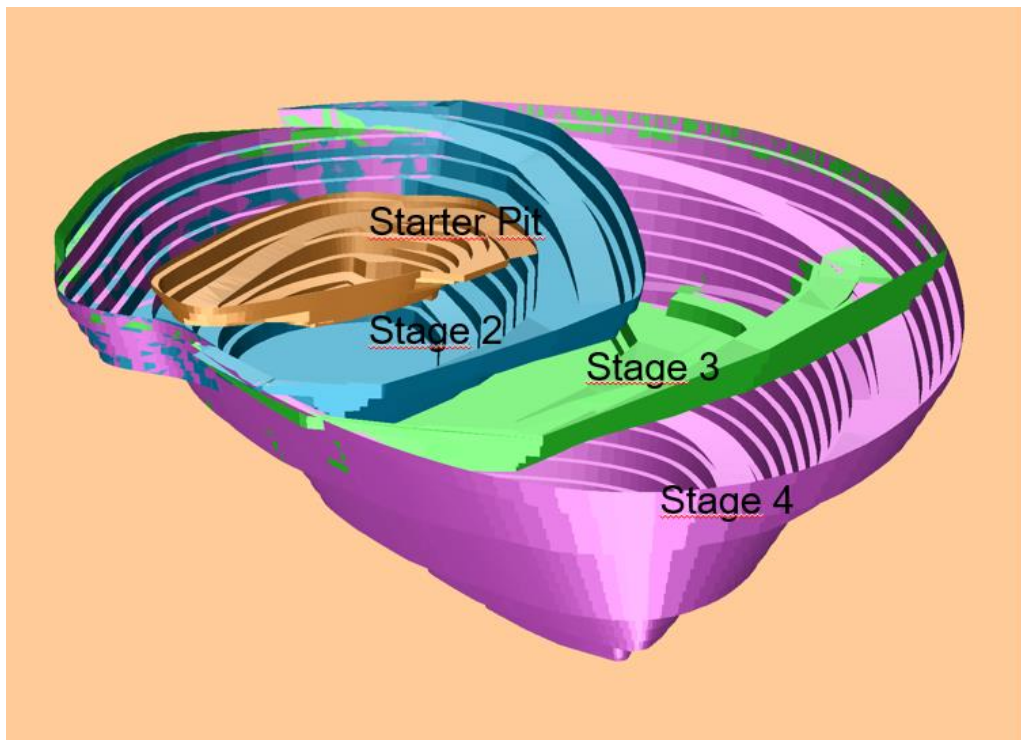
Malmi, nykyinen louhos ja lopullinen louhos



Kuva 1. Kevitsan kaivoksen malmivarat ja mineraalivarannot (Brusila 2018).

Todettuja ja todennettuja malmivaroja kaivoksella on tällä hetkellä noin 134 miljoonaa tonnia ja mineraalivarantoja 178 miljoonaa tonnia (Kuva 1). Kaivos tuottaa nikkeli-platinaryhmän rikastetta sekä kupari-kultarikastetta vuosittain yhteensä noin 250 000 tonnia. Nikkeliä rikasteista saadaan vuosittain noin 10 000–15 000 tonnia ja kuparia 20 000–30 000 tonnia. Rikasteet kuljetetaan kumipyörin Kemiin, josta ne jatkavat matkaansa laivalla tai junalla Harjavallan tai Skellefteån sulatoille. (Brusila 2018.)

Tällä hetkellä avolouhos on siirtymässä Stage 4 -vaiheen louhintaan (Kuva 2). Tällä hetkellä louhoksen syvin kohta on noin 200 metriä maan pinnan alapuolella Stage 2 -vaiheen pohjalla. Loppusyvyys on noin 500 metriä maan pinnasta Stage 4:n louhinnan loputtua, mutta mikäli laajennus Stage 5 -vaiheeseen toteutuu, loppulouhoksen koko kasvaa vielä tästäkin. (Brusila 2018.)



Kuva 2. Kevitsan kaivoksen avolouhoksen vaiheet (Brusila 2018).

Boliden Kevitsa Mining Oy on osa New Boliden -konsernia. Boliden sopi Kevitsan kaivoksen ostamisesta First Quantum Mineralsilta 10.3.2016 ja kauppa toteutui 650 miljoonan euron hintaan 1.6.2016. Omia työntekijöitä kaivoksella työskentelee noin 460 ja näiden lisäksi urakoitsijoiden työntekijöitä vuonna 2017 oli noin 300. (Brusila 2018.)

Panostus- ja räjäytyspalvelut sekä räjähdysaineiden myynnin Kevitsan kaivokselle tarjoaa Orica Finland Oy, joka on osa maailmanlaajuista Orican-konsernia. Kevitsassa Orica vastaa porausreikien panostuksesta ja räjäyttämisestä sekä tarjoaa teknistä asiantuntijapalvelua louhinnan optimointiin. Lisäksi Orican Kevitsan-asemalta tehdään panostus- ja räjäytyspalvelujen ulosmyyntiä, esimerkiksi vuoden 2018 aikana Nellimin tienrakennusprojektiin.

Orican emulsioasema sijaitsee kaivosalueella noin puolen kilometrin päässä kaivosyhtiön rakennuksista. Vuoden 2018 aikana Kevitsan emulsioasemalta pumpattiin 16 000 tonnia ammoniumnitraattiemulsiota. Kevitsassa panostajat työskentelevät vuoroviikoin 12-tuntisia työpäiviä tehden ja he huolehtivat reikien panostamisesta ja räjäytyksistä.

2 RÄJÄYTYSTYÖSKENTELEY

Suurten tuotantokenttien irrottaminen on kustannustehokkainta räjäyttämällä. Räjähdyksessä vapautuu energiaa erittäin nopeassa kemiallisessa reaktiossa ja sekä reaktiotuotteena syntyvien kaasujen laajeneminen että räjähdyksen synnyttämät paine- ja jännitysvaikutukset rikkovat kalliota.

Panostus sisältää paljon jalan tehtävää työtä, joten työskentelyn turvallisuus avolouhosympäristössä korostuu. Panostajat liikkuvat kentillä jalan kantaen räjähteitä ja nalleja sekä siirtäen pumppausletkua. Lohkareinen maasto lisää kompastumisen riskiä ja talvella kentät ovat liukkaita ja lumen peitossa. Kevitsassa panostajat tekevätkin henkilökohtaisen riskiarvion aina ennen kuin menevät työskentelemään uudelle porakentälle tai kun olosuhteet muuttuvat niin, että henkilökohtaisen riskiarvion uusiminen koetaan tarpeelliseksi. (Nieminen 2018.)

Kevitsassa tuotantoreiät panostetaan emulsioräjähdyksineellä, joka pumpataan suoraan porareikiin. Emulsiomatriisissa öljyfaasi ja ammoniumnitraattinen vesifaasi sekoitetaan toisiinsa erittäin pieninä pisaroina, jolloin faasien välille syntyvä reaktiopinta-ala on suuri (kuva 3). Itse matriisi ei ole räjähtävää ennen kuin se herkistetään. Panostusauton prosessissa matriisiin sekoitetaan kaasutusainetta, joka herkistää matriisin räjähtäväksi emulsioräjähdyksineeksi. Herkistetty emulsio kuitenkin ei ole nalliherkkä räjähdde, vaan sen räjäyttämiseen vaaditaan nalliherkkä aloitepanos. Emulsioräjähdyksineet ovatkin turvallisempia työstettäviä kuin esimerkiksi dynamiitit.

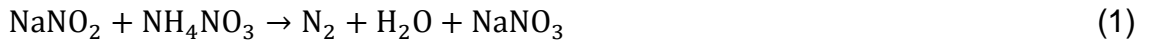


Kuva 3. Mikroskooppikuva emulsion matriisista. Kuplan läpimitta on keskimäärin 1 mikrometri. (Dibley 2018.)

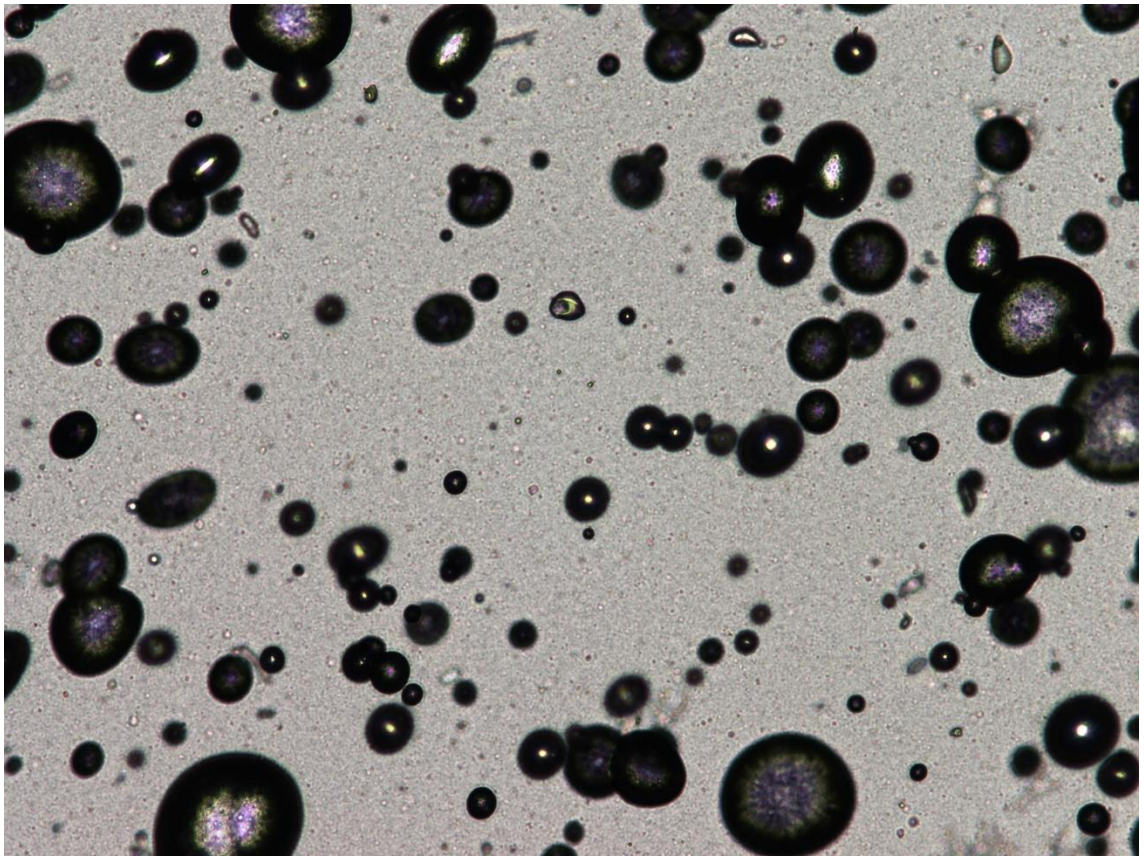
Räjähdystapahtumassa emulsion hapetin luovuttaa hapen polttoaineen palamiselle. Nopeasti tapahtuvassa reaktiossa vapautuu suuri tilavuus kaasumaisia reaktiotuotteita, jotka pyrkivät laajenemaan normaali-ilmanpaineeseen. Erittäin suuri reaktionopeus synnyttää ympäröivään kalliioon shokki- ja paineaallon, jonka muodostamat monimutkaiset jännitys- ja leikkausvoimakentät sekä laajenevat räjähdyskaasut tekevät työtä rikkoen kiveä.

Herkistämättömässä emulsiomatriisissa räjähdysreaktio ei etene. Matriisi voidaan herkistää fysikaalisesti sekoittamalla siihen joko onttoja mikrokuulia tai kemiallisesti lisäämällä matriisiin kaasukuplia muodostavaa herkistintä (Zhang 2016, 181). Kemiallisena herkistimenä voidaan käyttää nitriittejä, heikkoja happoja, hydratsiineja sekä peroksiedeja (Vattipalli, Gajelli, Subramanian, Nayak & Sinha 2000). Kevitsassa herkistämiseen käytetään natriumnitriitti–natriumtiosyanaattiliuosta, joka sekoitetaan matriisiin panostusauton prosessissa. Natriumnitriitti reagoi matriisin ammoniumnitraatin kanssa synnyttäen emul-

siopatsaaseen pieniä typpikaasukuplia tiosyanaatin katalysoidessa reaktiota (Kaava 1).



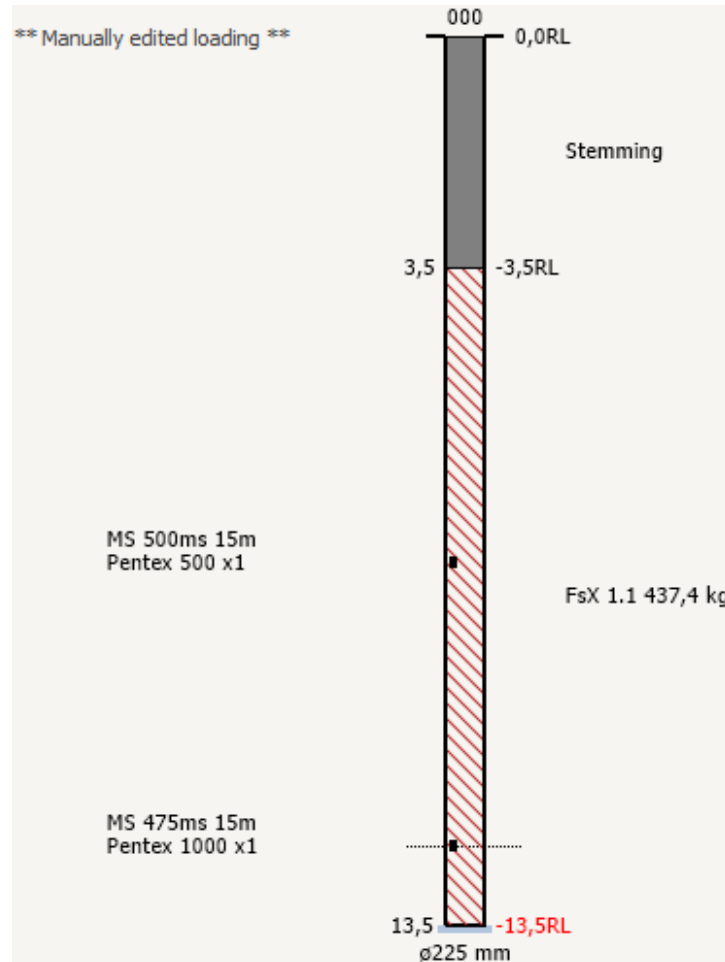
Herkistymisen yhteydessä syntyvä natriumnitraatti toimii räjähdysreaktiossa hapettimena ammoniumnitraatin rinnalla. Syntyvät kuplat turvottavat emulsiota porausreiässä herkistäen sen räjähtäväksi (kuva 4). Panostustyöskentelyn onnistumista ja laatua voidaankin tarkkailla seuraamalla emulsion turpoamista.



Kuva 4. Kaasukuplia herkistetyssä emulsioräjähdysaineessa. Kaasukuplan halkaisija on tavallisesti noin 0,1 mm. (Dibley 2018.)

Ennen kuin emulsio pumpataan varsipanokseksi porausreikiin, niihin asetetaan pohjapanos (Kuvio 1). Tuotantoreikien pohjapanoksena käytetään Pentex-aloitepanoksia, joihin nalli voidaan asentaa ilman työkaluja ja joiden kestävä ulkokuori helpottaa pohjaustyöskentelyä. Aluksi porareikään lasketaan pohjapanos nallijohtimen varassa ja tämän jälkeen reikään lasketaan pintapanos. Pohjauksen jälkeen reikiin pumpataan emulsioräjähdysaine. Panostusauton prosessissa matriisiin sekoitetaan tarkka määrä kaasutusainetta, joka kemialli-

sesti herkistää matriisin räjähtäväksi emulsioräjähdyksaineeksi porareissä. Herkistettyä emulsioräjähdyksainetta ei siis esiinny muualla kuin panostetuissa rei'issä, mikä lisää räjäytystyöskentelyn turvallisuutta. (Nieminen 2018.)



Kuvio 1. Tuotantoreiän panostus.

Pumppauksen aikana pohjapanosta nostetaan nallijohtimesta ohiporauksen yläpuolelle niin, että aloitepanos sijaitsee varmasti emulsiopatsaassa eikä esimerkiksi pohjalle varisseessa irtonaisessa kiviaineessa. Samalla panos nousee porauskentän suunnitellun pohjatason korkeudelle, jotta räjähdysten tekemä työ kohdistuisi mahdollisimman paljon itse irrotettavaan tasoon eikä tarpeettomasti rikkoisi alapuolisen tason kantta. Pumppauksen jälkeen reikiin lisätään etutäytteeksi sepeliä ja lopuksi panostettu kenttä kytketään suunnitellun mukaisesti riippuen siitä, onko pohjauksessa käytetty impulssiletkunalleja vai elektronisia nalleja. (Nieminen 2018.)

2.1 Räjähdystapahtuma porausreiässä ja kallion lohkaroituminen

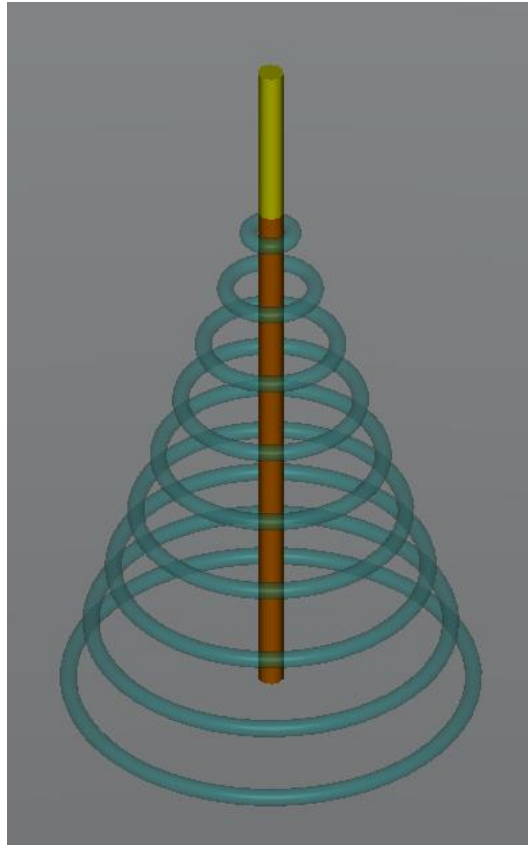
Räjähdystapahtumassa nalli sytyttää aloitepanoksen, jonka räjähdys on riittävän voimakas räjäyttämään varsipanokseksi pumpatun emulsion. Aloitepanoksen räjähdys luo detonaatorintaman, joka edetessään litistää herkistyneen emulsioräjähdysaineen kaasukuplia. Litistyessään kaasukuplien tilavuus pienenee aikaansaaden niiden lämpötilan nousemisen, jolloin ne ovat tarpeeksi kuumia käynnistämään reaktion varsipanoksessa. Kaasukuplat toimivat kuumina pesäkkeinä, jotka aloittavat räjähdysreaktion kemiallisen reaktion ympärillään. Näin räjähdysreaktio etenee rintamana kuumentuen ja litistäen aina edellään olevia kaasukuplia ja sytyttäen etupuolellaan olevan räjähteen kulkien läpi koko varsipanoksen. (Persson, Holmberg & Lee 1994, 179; Zhang 2016, 181.)

Emulsioräjähdysaineen palamisessa ammoniumnitraatti hajoaa hapettaen polttoaineena toimivan hiilivedyn, esimerkiksi polttoöljyn. Ammoniumnitraatti hajoaa tarjoten hapen polttoaineen palamiselle (kaavat 2 ja 3). Itse emulsioräjähdysaineelle tasapainotettua reaktioyhtälöä ei ole hyödyllistä esittää, koska polttoaineessa esiintyy tavallisesti useanlaisia hiilivetymolekyylejä, eikä ammoniumnitraatti- ja öljyfaasien suhdetta ei edes yritetä täsmätä aivan täysin kohdilleen. Käytössä olevan emulsioräjähdysaineen happitasapaino pyritään pitämään lievästi positiivisena häkäkaasun muodostumisen minimoimiseksi. (Näsi 2018.)



Suurella nopeudella tapahtuva räjähdys synnyttää ympäröivään kallioon monimutkaisen puristus-, veto- ja leikkausjännityskentän. Pohjalta pintaan päin palaavan emulsiopatsaan synnyttämät räjähdyskaasut laajenevat nopeasti synnyttämien ympäröivään kallioon porareistä radiaalisesti etenevän shokkirintaman, joka liikkuu kalliossa nopeasti (Kuva 5). Shokkiaallon vaikutusaika kalliossa on noin 0,2 μs ja sen vaikutusvyöhyke on noin 1 cm (Vuolio & Halonen 2012, 299). Kiven vetolujuus on huomattavasti puristuslujuutta pienempi ja heikoimmillaan se on kivessä luonnollisesti esiintyvillä liitoskohdilla ja kiderajoilla. Shokkirintaman synnyttämän jännityskentän synnyttäessä riittävän suuren vetojännityksen liitoskohdan kohdalla tämä liitoskohta halkeaa auki. Jännityskentän monimutkai-

suus ja jännitysrintamien heijastuminen kiven vapaista rajapinnoista aiheuttavat sen, että halkeamien suunta ei ole yksiselitteisesti radiaalinen halkeama porausreiän keskipisteestä katsoen. (Persson ym. 1994, 237, 240; Zhang 2016, 240.)



Kuva 5. Yksinkertaistettu esitys shokkiaallon etenemisestä kalliossa. Ei mittakaavassa.

Laajenevat kaasut etenevät huomattavasti räjähdysten synnyttämiä jännitysrintamia hitaammin, noin 160–240 m/s (Zhang 2016, 225). Laajetessaan kaasu etenee seismisten jännitysten aikaansaamiin rakoihin liikutellen lohkaraita irti toisistaan. Samalla kaasut jäähtyvät voimakkaasti niiden tilavuuden kasvaessa. Porausreiän syyttäminen pohjalta lisää sitä aikaa, jona kaasu tunkeutuu kiveen eikä vapaudu vapaaseen ilmaan etutäyteen irtoamisen vuoksi. Näin räjähdysaineen teho saadaan käytettyä tehokkaammin kallion lohkaroitumiseen. Syytys pohjalta vähentää myös merkittävästi kentän pinnalta sinkoilevan irtokiven määrää ja pienentää riskiä, että räjähdys puristaisi itsensä kuoliaaksi edetessään pohjaa kohti. Pumpattava emulsioräjähdysaine täyttää koko porausreiän, jolloin

räjähdyksreaktion energia saadaan siirtymään suoraan irrotettavaan kallioon. Mikäli räjähteen halkaisija on porausreiän halkaisijaa pienempi, syntyvät räjähdyskaasut ensin täyttävät tyhjän tilan porausreiässä ennen kuin shokkirintaman vaikutus siirtyy kallioon. (Persson ym. 1994, 180, 234; Näsi 2019.)

2.2 Räjähdykskaasut

Stoikiometrisesti räjähdysaine palaessaan synnyttää kaasumaisina reaktiotuotteina typpeä, hiilidioksidia ja vettä (Kaavat 2 ja 3). Luonnollisissa olosuhteissa palaminen ei kuitenkaan koskaan tapahdu täydellisesti reaktioyhtälön mukaisesti. Räjähdyksaineille tehdyt laboratoriomittakaavan kokeet eivät kykene jäljittelemään olosuhteita suurikokoisissa porausrei'issä eivätkä tietokonemallinnukset huomioi esimerkiksi reaktiokinetiikkaa tai reaktioon kuluva aikka aina kovin hyvin. Kaupalliset räjähdysaineet valmistetaan happitasapainotetuiksi, jolloin räjähdysaine itsessään sisältää hapen, jonka se palamiseen tarvitsee. (Persson ym. 1994, 110, 389.)

Räjähdyksaineen happitasapaino on positiivinen, kun sen koostumuksessa on happea enemmän kuin stoikiometrinen palaminen vaatii, ja vastaavasti negatiivinen, kun happea on tarvetta vähemmän. Positiivinen happitasapaino aikaansaa typen oksidien ja negatiivinen häkäkaasujen muodostumista räjähdyksessä. Haitallisten kaasujen muodostumiseen vaikuttavat myös käytettävä räjähdysaine ja sen homogeenisyys, veden vaikutus räjähdysaineeseen, räjähdysnopeus, panoksen halkaisija ja tiheys, käytettävä sytytysmenetelmä, räjähdysaineen kääremateriaali ja kuinka tiiviisti räjähdysaine saadaan suljettua panostettavaan tilaan. Räjähdyksaine voi myös reagoida kalliossa esimerkiksi sulfidien kanssa. (Persson ym. 1994, 110, 387.)

Emulsioräjähdyksaineita pidetään kaasuntuotannoltaan parhaimpina ja puhdaimmin palavina. Erittäin pieni pisarakoko saa aikaan suuren reaktiopinta-alan reagoivien faasien välille ja palaminen on puhdasta ja nopeaa. Emulsiot myös kestävät veden läsnäoloa porausreiässä erinomaisesti. Pumpattavana räjähdysaineena emulsio kuitenkin tunkeutuu porareistä kallion rakoihin, jotka voivat olla niin ahtaita, ettei räjähdysaineen kriittinen halkaisija ylitä. Tämä johtaa ahtaissa kallionraoissa räjähdysaineen deflagraatioon ja räjähtämättä jäänee-

seen emulsioon. Mikäli pumppauksen aikana panostaja havaitsee, että emulsiopatsaan korkeus porareissä ei nouse normaalisti ja emulsio mahdollisesti tunkeutuu kallion rakoihin, pumppaus keskeytetään ja reikä jätetään myös ilman etutäytettä. Aloitepanokset jätetään kuitenkin paikalleen ja ne räjäytetään suunnitelman mukaisesti. (Nieminen 2018; Näsi 2019.)

Räjähdyksikaasujen tekemä kiveä irrottava työ on merkittävä, joten niiden karkaamista pyritään hidastamaan. Räjähdyksen aikana kaasut laajetessaan karkaavat lohkaroituvan kallion lävitse ja porausreiän suun kautta vapaaseen ilma-kehään. Kaasut ovat kuumia, joten aluksi ne nousevat ylöspäin, josta lopulta laimenevat ympäröivään ilmaan. Vesihöyry tiivistyy nestefaasiin jäähtyessään ympäristön lämpötilaan. Kaasujen karkaamista porausreiän suulta hidastetaan etutäytteellä, joka tavallisesti on sepeliä. Etutäytteen lisäämisen myötä räjähdyskaasut pysyvät porareissä pitempään ja räjähdysaineen teho saadaan paremmin hyödynnettyä. Etutäyte myös heijastaa takaisin kallioon osan shokkiaallosta tehostaen kiven hajoamista. Lisäksi etutäyte vähentää vaarallista kivien sinkoilua. Ilman etutäytettä jopa 50 % räjähdyskaasujen tehosta voi karata vapaaseen ilmaan, mikä merkittävästi heikentää räjäytystyöskentelyn kustannustehokkuutta. (Zhang 2016, 231–232.)

Merkittävimmät epätäydellisestä palamisesta johtuvat haitalliset räjähdyskaasut ovat häkä CO ja typen oksidit NO ja NO₂. Räjähdyksen jälkeen työskentelyn turvallisuus alueella varmistetaan kantamalla matkassa kaasumittaria, jonka luke-
maa työntekijän tulee seurata ja pitoisuuksien ylittyessä työntekijä ei alueella saa työskennellä. Sosiaali- ja terveysministeriön asettamat haitallisiksi tunnettujen pitoisuudet on esitetty taulukossa 1. Työskenneltäessä 12 tunnin työvuoroissa HTP-arvo voidaan korjata vastaamaan työvuoron pituutta laskemalla korjauskerroin työvuorojen välisen lepoajan huomioivalla kaavalla

$$K = \frac{8h}{xh} \cdot HTP_{8h}. \quad (4)$$

Myös 12 tunnin pituiselle työvuorolle korjatut arvot on kirjattu taulukkoon 1. Mikäli aineen puoliintumisaika elimistössä on alle 3 tuntia tai yli 400 tuntia, korjausta ei tarvitse tehdä. Häkäkaasulle puoliintumisaika on 2–5 tuntia. (Työterveyslaitos 2015; HTP-arvot 2018, 65.)

Taulukko 1. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet (HTP-arvot 2018, 34).

	8 h		15 min		korjattu 12 h	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
hiilimonoksidi CO	20	23	75	87	10	12
typpidioksidi NO ₂	0,5	0,96	1	1,9		
* poikkeus koskien maanalaista kaivos- ja tunnelityötä	1	1,9	2	3,8		
typpioksidi NO	2	2,5				
* poikkeus koskien maanalaista kaivos- ja tunnelityötä	2	2,5				

Typen oksideja muodostuu sitä enemmän mitä positiivisempi räjähdysaineen happitasapaino on. Sekä häkäkaasun että erityisesti typen oksidien muodostumista vähentää etutäyteen lisääminen ja täten estämällä räjähdyskaasujen liian aikainen pakeneminen vapaaseen ilmaan (Persson ym. 1994, 393). Typpioksidi NO on väritön ja hengitettynä myrkyllinen kaasu, joka ärsyttää ihoa ja limakalvoja voimakkaasti. Ilman hapen vaikutuksesta typpioksidi hapettuu nopeasti typpidioksidiksi NO₂, joka on hengitettynä tappava kaasu ja vaurioittaa silmiä sekä syövyttää ihoa. Typpidioksidin punaruskean värin voi erottaa, kun sen pitoisuus ylittää 30 ppm. (HTP-arvot 2018, 52–53.)

Hiilimonoksidi eli häkä on hajuton, mauton ja väritön kaasu, ja tämän vuoksi sitä on vaikea havaita ilman mittalaitteita. Se muodostaa ilman kanssa erittäin helposti syttyvän kaasuseoksen, mikäli pitoisuudet ovat riittävän suuria. Häkä sitoutuu veren punasolujen hemoglobiiniin noin 200 kertaa happea tehokkaammin, jolloin hapensaanti kudoksissa heikkenee. Herkimmin hapen puutteesta kärsivät aivot ja sydän. Häkä myös voimistaa melun synnyttämiä haitallisia kuulo vaikutuksia. Häkämyrkytyksen jälkitiloina voi aiheutua pitkäaikaisia tai pysyviä hermostollisia vaurioita. Toistuva altistuminen voi pahentaa sydänsairauksien oireita, koska hapen kulku sydänlihakseen toistuvasti heikkenee. (Työterveyslaitos 2015; HTP-arvot 2018, 32.)

3 MIEHITTÄMÄTTÖMÄT LENNOKIT

Miehittämättömissä lennokeissa sen toiminnan aikana ei ole kyydissä matkustavaa ohjaajaa, vaan lennokkia lennätetään joko kauko-ohjauksella tai ennalta suunnitellulla GPS-paikkatietoon perustuvalla lennätysreitillä. Miehittämättömiä lennokkien kokoluokka on laaja suurista sotilas- ja tutkimuslennokeista mikrokokoiisiin lennokkeihin. Tässä työssä keskitytään kevyisiin UAV-laitteisiin, joiden lentoonlähtömassa on alle 25 kg. Lennokit käyttävät tavallisesti voimanlähteenään poltto- tai sähkömoottoria, joskin kehitteillä on esimerkiksi aurinkoenergiaa hyödyntäviäkin laitteita. Lennokki voi olla kiinteäsiipinen tai multikopteri, joista kummallakin on omat etunsa. Kiinteäsiipinen lennokki tarvitsee kiitoradan nousuun ja laskuun, kun taas multikopteria voidaan lennättää pieneltä lähtöalustalta. Multikopteri kykenee leijuttamaan ilmassa paikallaan, kun taas kiinteäsiipinen alus kulkee tasaisesti suunniteltua lentoreittiä pitkin.

3.1 Kevyisiin miehittämättömiin lennokkeihin liittyvä sääntely

Kevyitä miehittämättömiä lennokkeja ei tarvitse rekisteröidä, mutta sen voi halutessaan tehdä. Vapautus rekisteröinnistä koskee lentoonlähtömassaltaan alle 150 kg:n painoisia Suomen ilmatilassa lennätettäviä miehittämättömiä lennokkeja. Tunnistetiedot eli käyttäjän nimi ja yhteystiedot on kuitenkin laitteeseen merkittävä. (Huttunen 2017, 28; Liikenteen turvallisuusvirasto 2017, 3.)

Lennättäjän tulee hallita lennokkia näköyhteyteen perustuen. Lennättäjän apuna saa olla tähyistäjä, johon tulee olla luotettava viestintäyhteys, ellei puheyhteys riitä. Lennokin ohjaamista videolinkin avulla ei lasketa näköyhteydellä lennättämiseksi. Myös lennätysssä on huomioitava: sade, sumu ja pimeä voivat haitata näköyhteyttä, jolloin lennokkia ei saa lennättää. Lennokin tulee olla koko ajan kauko-ohjaajan ohjattavissa, jotta väistöliikkeet ja vaaratilanteiden välttäminen onnistuvat. Alle 25 kg painoisilla lennokeilla lennätyskorkeus saa olla enintään 150 m alla olevan maan tai veden pinnasta. Mikäli lennätetään tilanteessa, joka edellyttää poikkeamista sääntelystä, tulee tehdä ilmatilavaraus tai hankkia muu poikkeuslupa Liikenteen turvallisuusvirastolta (Trafi). (Huttunen 2017, 59; Liikenteen turvallisuusvirasto 2017, 3–4.)

3.2 Sovellukset kaivosalalla

Miehittämättömien ilma-alusten käyttö koetaan hankinta-, huolto- ja käyttökustannuksiltaan huokeaksi vaihtoehdoksi, kun huomioidaan laitteiston laaja sovel-lusalue. Ilma-alukseen voidaan kiinnittää tarpeen mukaan useita erilaisia mitta-laitteita ja riippuen aluksen kantokyvystä samalla lennätyksellä voidaan kerätä mittausaineistoa usealla menetelmällä yhtä aikaa. Itse ilma-aluksen lennättämi-nen ei vaadi laajaa koulutusta. Mittauslaitteiden tekniikka on kehittynyt niin, että saatavilla oleva menetelmien kirjo on jo laaja ja tulokset ovat luotettavia ja erit-täin kilpailukykyisiä esimerkiksi jalan tehtäviin mittauksiin verrattuna. (Karinen 2017, 9.)

Perinteistä jalan tehtävää tiedonkeruuta voidaan korvata miehittämättömien il-ma-alusten käytöllä varsinkin kohteissa, joissa työskenteleminen olisi vaarallis-ta. Lennokilla voidaan saavuttaa muun muassa seinämien vierustoja, läjitysalu-eiden reunoja tai muita alueita, joilla jalan liikkuminen loisi suuren työturvalli-suusriskin. Lisäksi miehittämättömällä lennokilla voidaan nopeasti kerätä mitta-usaineistoa suurelta alueelta. Vähäinen kaluston ja miehistön siirtelyn tarve se-kä menetelmien nopeus tekevät miehittämättömän ilma-aluksen käytöstä ympä-ristöystävällisen työkalun kaivokselle. (Karinen 2017, 9; Frantz & Jefferys 2018, 5.)

Tietoa voidaan helposti kerätä sekä suunnittelun, kunnossapidon että sijoittajien tarpeisiin ja lennätyksin sen päivittäminen on helppoa ja nopeaa. Läjitysalueista saadaan lyhyessä ajassa tilavuustietoa, joka palvelee paitsi suunnittelua, myös sijoittajia arvioitaessa sivukivi- ja varastoläjitysalueiden tilavuuksia. Kunnossapi-to saa helposti tietoa vaikeasti saavutettavista kohteista korkearesoluutisten kuvien tai videoiden avulla. Näin työntekijän ei tarvitse esimerkiksi kiivetä kor-keisiin kohteisiin, vaan kuvauksen perusteella voidaan arvioida tarve työntekijän lähettämisestä alueelle. Vaaratilanteiden yhteydessä miehittämättömällä lenno-killä voidaan vaara-alueen ulkopuolelle striimata reaaliaikaista tietoa videolinkin avulla. Ilmakuvaus on käytetyin ja teknisesti helpoin sovel-lusalue, kun taas geo-fysiikan menetelmien tarjonta on niukkaa, vaikka kysyntää sille olisi. Tässä työssä keskitytään kaasujen määrittämiseen, josta toistaiseksi suomenkielisiä

julkaisuja on vähänlaisesti. (Konnunaho, Karinen & Salmirinne 2017, 19; Frantz & Jefferys 2018, 6, 9.)

Haasteelliset sääolosuhteet vaikeuttavat lennättämistä, jolloin rutiininomaisia lennätyksiä voi joutua jättämään toteuttamatta huonolla säällä. Suomen olosuhteissa talvi lumisateineen ja pakkasineen vaikeuttaa paitsi lennättämistä, voi myös haitata mittalaitteiden toimintaa ja jopa vaurioittaa niitä. Lennätysajat ovat verrattain lyhyitä varsinkin hyötykuorman kasvaessa ja pakkasen heikentäessä akkukestoja. Kaikissa mittausmenetelmissä, erityisesti geofysiikan sovelluksissa, ei päästä samaan mittatarkkuuteen kuin maastotyöskentelyssä. Myös luonnonsuojelulliset seikat voivat rajoittaa miehittämättömän lennokin hyödyntämistä, esimerkiksi lintujen pesintäaikana. (Konnunaho ym. 2017, 18.)

3.3 Miehittämättömillä lennokeilla käytetyt menetelmät

Pelkästään kuvien ja videoinnin perusteella saadaan helposti tietoa lintuperpektiivistä kaivoksen toiminnoista, ajoväylien kunnosta ja muista tarkkailua vaativista kohteista. Rikastamoalueella kuvaus palvelee kunnonvalvontatiedon keruussa, kun esimerkiksi kuljettimet ja korkealla sijaitsevat tukirakenteet voidaan alustavasti tarkastaa kuvien tai videolinkin avulla. Suurten kiviautojen lavojen kuntoa on helppo arvioida lennättämällä ilma-alusta niiden päällä, jolloin työntekijän ei tarvitse sinne kiivetä. Räjätyskentillä lennokin kameran avulla voidaan visuaalisesti tarkastaa työskentelyalueita sekä ennen että jälkeen räjäytyksen. Erityisesti vaikeasti saavutettavien räjäytyskenttien osien tarkastamista räjäytyksen jälkeen voidaan tehdä kameratiedon avulla. Kameratiedon avulla voidaan arvioida myös räjäytetyn kentän partikkelijakaumaa. (Frantz & Jefferys 2018, 8.)

Hyperspektrikuvauksessa mitataan eri aallonpituusalueiden intensiteettiä ja tuloksena saadaan kymmenien tai satojen kapeiden aallonpituuskanavien intensiteettitieto. Hyperspektrikuvista voidaan saada selville tietoa, joka tavalliseen kameraan ei tallennu. Esimerkiksi vesialueiden värin muutokset eivät tavanomaisista kuvista erotu, mutta lehtivihreän määrä voidaan arvioida sopivan aallonpituuskanavan intensiteettien perusteella. Hyperspektrikuvauksella on mah-

dollista optisesti erotella kivilaatuja, joiden erottaminen toisistaan paljaalla silmällä ei ole riittävän varmaa. (Salmirinne & projektiryhmä 2017, 12.)

Lämpökuvauksessa mitataan pitkäaaltoisen infrapunasäteilyn intensiteettiä, jolloin kuvasta voidaan nähdä sekä lämpötilajakauma että itse lämpötila. Sen avulla voidaan etsiä lämpövuotoja tai epänormaaleja lämpötiloja. Rakenteiden lämpövuotojen lisäksi voidaan etsiä tavanomaista lämpimämpiä kohteita kuten kuljettimien laakereita tai liikkuvan kaluston renkaiden napoja. Vaurioitunut sähkölaite voi kuvasta löytyä joko ylikuormittuessaan epänormaalisti lämmenneenä tai kylmänä kohteena, koska laite ei ole toiminnassa. (Salmirinne & projektiryhmä 2017, 13.)

LiDAR-laserkeilauksella saadaan kolmiulotteista mittatarkkaa tietoa maanpinnasta ja muista rakenteista. Tieto saadaan sidottua koordinaatistoon, jolloin se voidaan yhdistää muuhun suunnittelutietoon. Miehitämättömällä ilma-aluksella tietojen päivittäminen on nopeaa, koska keilaus on nopeaa ja sen tarkkuus on hyvä. Keilauksen avulla voidaan kerätä tietoa siirtymistä seinämillä tai patoaltaila, jolloin niihin voidaan reagoida hyvissä ajoin ja mahdolliseen turvallisuusrisikkiin voidaan reagoida ajoissa ennen kuin se on välttämättä edes silmin havaittavissa. Keilauksella voidaan kerätä myös sivukivi- ja varastokasojen tilavuuksista tarkkaa volumetristä tietoa palvelemaan sekä suunnittelua että sijoittajille raportointia. Keilaus- ja kuvausaineisto voidaan yhdistää verrattain helposti päivitettäväksi kolmiulotteiseksi malliksi koko kaivosalueesta. (Salmirinne & projektiryhmä 2017, 12; Frantz & Jefferys 2018, 7–8.)

Miehitämättömille ilma-aluksille soveltuvilla menetelmillä on kysyntää, mutta tarjontaa on toistaiseksi vähän. Mittalaitteet ovat usein painavia ja ilma-alusten hyötykuormat pieniä, mutta mittaustekniikan kehittyessä myös geofysikaalisten menetelmien tarjonta ja tarkkuus paranevat. Kuvaukseen verrattuna geofysikaaliset menetelmät ovat paljon herkempiä häiriöille, eikä niillä aina saavuteta samaa mittatarkkuutta kuin perinteisillä maastomittauksilla. Erityisesti malminetsinnässä sovellusalue kuitenkin näille menetelmille on laaja. (Salmirinne & projektiryhmä 2017, 14.)

Maan magneettikentän suunnan ja voimakkuuden muutoksia mitataan magnetometreillä, jotka perinteisesti ovat suurikokoisia ja varsin herkkiä sähkömag-

neettisille häiriöille. Mittauksen häiriöitä voidaan vähentää sijoittamalla mittauslaitteisto etäälle häiriölähteistä. Gravimetrisillä menetelmillä määritetään maan painovoimakentän muutoksia, jolloin saadaan epäsuorasti tietoa maa- ja kallio-
perän tiheyden vaihteluista. Menetelmät ovat herkkä häiriökiihtyvyyksille eikä niillä päästä samaan tarkkuuteen kuin maastomittauksissa. Monet malmimineeraalit ovat ympäröivää kalliota tiheämpiä ja ne vaikuttavat magneettikenttään, joten gravimetristen menetelmien kehittyminen tuo potentiaalia tehokkaampaan miehittämättömien ilma-alusten hyödyntämiseen malminetsinnässä. (Salmirinne & projektiryhmä 2017, 14, 16.)

Radiometrisissä menetelmissä määritetään radioaktiivisten aineiden hajoamista gammaspektrometrein. Radioaktiivisen hajoamisen yhteydessä syntyy γ -pulsseja, joiden energia selvittämällä tunnistetaan alkuaine ja tämän jälkeen pulssien määrästä voidaan määrittää pitoisuus. Hyvä esimerkki gammaspektrometrin hyödyntämisestä on uraanin etsintä. Sähkömagneettisia menetelmiä on tarjolla lukuisia erilaisia, joskin jokainen niistä perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Muutoksen maan magneettikentässä indusoivat muutoksia, jotka lopulta voidaan havaita sähkömagneettisena sekundäärkenttänä ja sen muutoksina. (Salmirinne & projektiryhmä 2017, 15.)

4 LIIKUTELTAVA KAASUMITTAUS JA LAITTEISTOT

Räjähdyksen jälkeen työntekijät kantavat henkilökohtaista kaasumittaria mukanaan, jotta työskentelyn turvallisuutta voidaan arvioida. Henkilökohtainen mittari antaa kantajalleen välittömän ilmoituksen hälyttämällä liian suurista pitoisuuksista. Tieto työskentely-ympäristön turvallisuudesta saadaan reaaliajassa ja ilman tiedonsiirtokatkoksia.

Ilman laatua voidaan määrittää myös radioyhteydellä viestivän kiinteän kaasumittauspisteiden verkoston avulla. Kiinteät asennukset palvelevatkin tarkoitustaan hyvin alueilla, joilla ympäristö ei muutu ja toimintojen paikat ovat pysyviä. Siirreltävillä ja langattomasti viestivillä kaasumittauspisteillä voidaan myös rakentaa senhetkisiä tarpeita vastaava mittausverkosto, jota voidaan valvoa keskitetysti ja josta tieto jaetaan edelleen työntekijöille tilanteen mukaan. Avolouhoksella siirreltävä langaton kaasumittausverkosto ei kuitenkaan ole järkevä ratkaisu, koska toimintojen sijainti muuttuu jatkuvasti, työntekijät liikkuvat useiden työkohteiden välillä ja räjäytysten yhteydessä turva-alueen sisäpuolelle jäävä mittalaitteverkosto on suuressa vaarassa vaurioitua. Verkosto vaatisi myös henkilöstöä ylläpitoon ja laitteiden siirtelyyn. Myös kokonaisen verkoston vaatiman laitteiston hankinta on kalliimpaa kuin mukana kannettavien mittareiden hankkiminen.

Miehittämättömällä lennokilla kaasumittari voidaan joustavasti viedä kohteisiin, joiden saavuttaminen ajoneuvolla tai jalan on haasteellista. Lennokkia voidaan lennättää myös olosuhteissa, joissa työntekijöille asetetut työhygieeniset rajat ylittyvät. Lennokkia voidaan lennättää ja kaasupitoisuuksia seurata turvallisen matkan päästä jo paljonkin ennen kuin työntekijöiden on turvallista saapua alueelle. Saatavilla olevien miehittämättömien lennokkien valikoima on laaja ja kaasumittareiden tiedonsiirto-ominaisuudet ovat kehittyneet niin, että luotettava etämittausta voidaan tehdä jo kohtuullisin kustannuksin. Mobiiliverkkoa hyödyntävä tiedonsiirto ei vaadi radiolinkkien rakentamista ja tiedonsiirtoyhteyden hyppyyttämistä linkiltä toiselle.

4.1 Haasteet miehittämättömien lennokkien käytössä kaasumittauksiin

Mikäli laitteistoa ei ole helppo ottaa käyttöön räjäytystyöskentelyn yhteyteen ja sen operointi on työlästä, kynnys sen hyödyntämiselle kasvaa. Laitteiden käynnistämisen ja operoinnin tulee olla selkeää sekä käytön aikaisen tiedon seuraamisen vaivatonta. Lennokki täytyy saada helposti ilmaan räjäytyksenaikaiselta työskentelypaikalta ja näkymän lennätettävälle alueelle on oltava esteetön.

Miehittämättömien lennokkien lennätysaika on varsin lyhyt, koska laitteiden akunkesto on yleensä joitakin kymmeniä minuutteja. Lennokkiin asetettava lisäkuorma vaikeuttaa sen hallitsemista ja lyhentää lennätysaikaa, olivatpa ne integroituja tai lennokista irrotettavia. Kehnot sääolosuhteet vaikeuttavat lennättämistä ja voivat haitata kaasumittaustakin. Kylmä ilma lyhentää lennätysaikaa ja saattaa jopa kerryttää jäätä siipiin ja potkureihin, jolloin laitteen hallittavuus heikkenee. Myös kaasujen mittauslaitteet voivat toimia esimerkiksi sateella tai pakkasella epävarmemmin ja jäätyvä kosteus voi jopa vaurioittaa mittausantureita. (Rojas 2014, 5; Alvarado, Gonzales, Fletcher & Doshi 2015, 21–22.)

Riippuen siitä, mihin lennättämällä kerättyä tietoa kaasupitoisuuksista käytetään, kaasumittauksen laadulle on erilaisia vaatimuksia. Jos tarvitaan tarkkaa tietoa pitoisuuksista, lennätettävän kaasumittarin tarkkuus ja mittauksen luotettavuus eivät välttämättä riitä. Pienikokoisen siirreltävän laitteen määritysrajat jäävät korkeammiksi kuin vakaisissa laboratorioissa käytettävien mittalaitteiden, eikä lennätykseen voi helposti yhdistää laadunvalvontanäytteiden mittaamista. Yhteyksien tulee olla riittävän hyvät, jotta mittaustulos päivittyy laitteelle, jolta lennätystä seurataan. Tiedonsiirtoviive ei saa kasvaa liian suureksi, jotta lennätettävää kaasumittausta olisi mielekästä hyödyntää. (Rojas 2014, 21–22; Alvarado ym. 2015, 5.)

4.2 Mittausanturit

Kannettavissa mittareissa käytetään monenlaisia ratkaisuja pitoisuuksien määrittämiseen. Yleisimmin käytetyt anturit ovat termisiä, massa- ja optisia sensoreja sekä sähkökemiallisia, potentiometrisia, amperometrisia ja konduktometrisia sensoreita (Villa, Salimi, Morton, Morawska & Gonzales 2016, 3). Miehittämät-

tömiin lennokkeihin liitettävien anturitekniikoiden on tärkeää olla ennen kaikkea pienikokoisia, kevyitä ja niiden käyttövoiman tarpeen tulee olla vähäistä. Mittari voidaan varustaa imupumpulla, joka syöttää anturille näytettä. Tällöin anturi stabiloituu nopeammin vallitsevaan kaasupitoisuuteen ja mittaustuloskin saadaan nopeammin. Passiivinen mittari vaatii hieman enemmän aikaa määrittääkseen ympäristössä vallitsevan pitoisuuden, koska kaasun kulkeutuminen anturille perustuu diffuusioon.

Sähkökemiallisella anturilla kaasun pitoisuuden määrittäminen perustuu kemialliseen reaktioon anturin elektrolyytissä, joka yhdistää anodin ja katodin. Elektrolyytillä tapahtuva selektiivinen hapettumis-pelkistymisreaktio saa aikaan ionien liikettä elektrolyytissä. Positiiviset ionit kulkeutuvat anodille, jolla tapahtuu hapettuminen. Katodille, jossa pelkistyminen tapahtuu, kulkeutuvat puolestaan negatiiviset ionit. Tämä ionien liike saa aikaan sähkövirtaa, jonka määrä riippuu elektrolyytille saapuvan määritettävän kaasun pitoisuudesta. Lopulta pitoisuus määritetään sähkövirran, jännitteen tai kapasitanssin muutoksen perusteella. Usein kaasujen määrittämiseen tarkoitetuissa antureissa on kaasua läpäisevä membraani, joka suojaa anturia epäpuhtauksilta. Useita epäorgaanisia kaasuja voidaan määrittää sähkökemiallisella anturilla. Hiilimonoksidi hapettuu luonnostaan helposti hiilidioksidiksi, joten anturille ei tarvitse erikseen tuoda energiaa kemiallisen reaktion käynnistämiseksi tai sen ylläpitämiseksi. (Capone ym. 2003, 1344.)

Orgaanisten kaasujen, esimerkiksi metaanin, määrittämiseen hyödynnetään yleensä infrapunasäteilyn absorptio mittaamista. Infrapunavalon säteily saattaa molekyylin atomien väliset sidokset värähtelemään, heilumaan ja kääntyilemään. Kullakin atomien välisellä sidostyypillä on tyypillinen aallonpituus, joka saattaa sidoksen tietynlaiseen värähtelyliikkeeseen. Orgaanisilla yhdisteillä on täten tunnusomainen infrapunasäteilyn absorptio profiili. Tämän tietynlaisen profiilin mukaista absorboitumisen intensiteettiä mittaamalla voidaan määrittää kaasun pitoisuus. (Henderson 2014.)

4.3 Laitteiston rakenne ja roottoreiden vaikutus kaasumittaukseen

Lennätettäessä multikopterin roottorit sekoittavat ilmaa ympärillään, jolloin kaasujen määrittämiseen voi ilmaantua epäluotettavuutta. Villa ym. (2016) tutkivat kaasumittauslaitteiston sijoittelua miehittämättömään lennokkiin ja roottoreiden aiheuttaman ilman sekoittumisen vaikutusta mitattavien kaasujen pitoisuuteen. Tutkimuksessa käytettiin kuusiroottorista kopteria, joka voi kantaa nelikopteria suuremman hyötykuorman ja jonka hallittavuus lennätettäessä on parempi. Koekäytön aikana laitteistoa ei lennätetty, vaan se kiinnitettiin kiinteästi ja sen ympäristössä mitattiin ilman virtausnopeuksia ja kaasujen pitoisuuksia. Määritettävät kaasut olivat hiilimonoksidi, hiilidioksidi, typpioksidi ja typpidioksidi, jotka tuotettiin koetilanteessa johtamalla dieselauton pakokaasua kiinteästä pisteestä lennokin läheisyyteen. (Villa ym. 2016, 2–3, 7.)

Kuusikopterin havaittiin sekoittavan ilmaa pystysuunnassa roottoreiden kattamalta alueelta huomattavasti enemmän kuin liikuttamalla sitä sivuille. Roottoreiden korkeudella sivusuuntaan 700 mm etäisyydellä ilmavirtauksen nopeus oli jo alle 1 m/s, kun taas suoraan lennokin alapuolella vielä 1200 mm etäisyydellä ilmavirtauksen nopeus oli 6,5 /ms. (Villa ym. 2016, 8–9.)

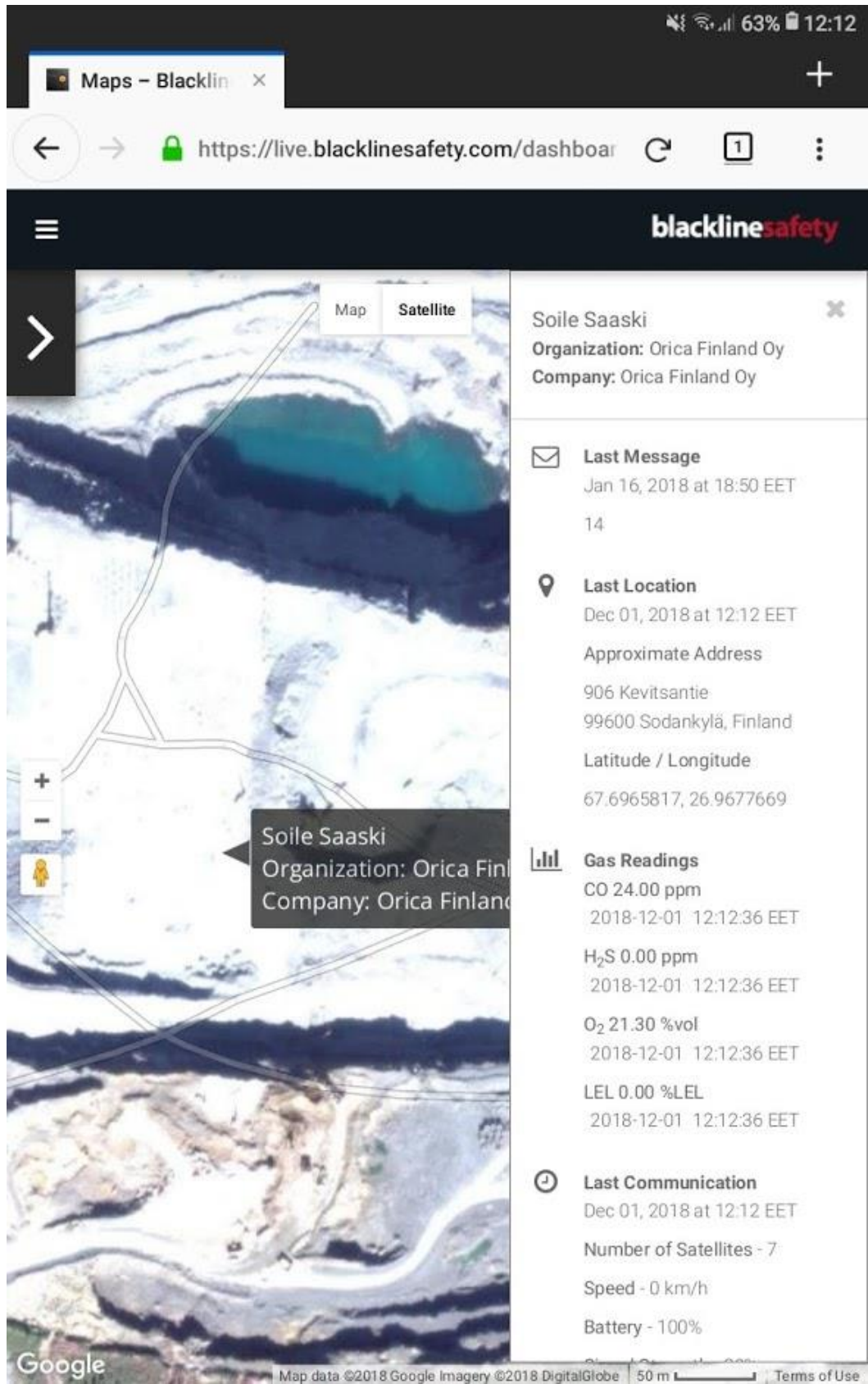
Lennokin roottorien ollessa pois päältä mitatut kaasupitoisuudet olivat huomattavasti suurempia kuin roottorien pyöriessä. Ilmavirtaus siis laimensi kaasunäytettä huomattavasti. Roottoreiden aikaansaama ilman liike kuitenkin auttoi passiivisia kaasuantureita antamaan mittausvasteen nopeammin sekoittamalla ilmaa. Roottorit saavat aikaan dispersiovaikutuksen, jolloin kaasujen pitoisuudet suoraan lennokin alta mitattuina olivat pienemmät kuin näytteenoton sijaitessa noin metrin päässä lennokin keskikohdasta. Lennokin omien dimensioiden ulkopuolelle rakennettavat näytteenottolaitteiden kiinnitykset kuitenkin heikentävät lennokin hallintaa. (Villa ym. 2016, 12–14.)

5 KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO

Tässä työssä käytetty lennokki on DJI:n valmistama Phantom 4 Pro -nelikopteri, jossa on kiinteästi asennettu korkearesoluutioinen kamera. Nelikopteria ohjataan kauko-ohjaimella sekä siihen liitetyn tabletin sovelluksen avulla. Nelikopterin massa akkuineen ja roottoreineen on 1388 g ja sille luvataan lennätysaikaa pisimmillään 28 minuuttia. Käyttölämpötila-alueeksi annetaan 0 – 40 °C ja sitä voidaan lennättää, kun tuulen nopeus on alle 10 m/s. Laitte paikantaa itsensä GPS-yhteydellä, jonka lisäksi se seuraa lennätyskorkeuttaan ja etäisyyttä ympärillään olevista kohteista kaikuluotaamalla 10 ja 20 Hz:n taajuudella. (DJI 2017, 62.)

Kaasut määritetään Blackline Safety G7c -laitteella, joka on pääasiassa tarkoitettu henkilökohtaiseksi suojalaitteeksi. Laitteessa on nelikaasumittari, jossa on anturit hiilimonoksidille, hapelle, rikkivedylle ja palaville kaasuille. G7c sisältää GPS-paikantimen ja se siirtää tietoa 3G-yhteydellä Blacklinen palveluun, jota käytetään selainpohjaisen sovelluksen kautta. (Blackline Safety 2017.)

Palavien kaasujen anturi on dispersiivinen infrapuna-anturi, ja hiilimonoksidi-, happi- ja rikkivetyanturit ovat elektrokemiallisia antureita. Havaittuja kaasupitoisuuksia voidaan seurata reaaliaikaisesti selainsovelluksesta (Kuva 6), jossa muukin laitteen hallinta tehdään ja josta laitteen keräämiä tietoja voidaan ladata csv-tiedostoina. Selainsovellus ilmoittaa laitteiden antamista hälytyksistä, jolloin hälyttävään laitteeseen voidaan ottaa yhteys, tarkastaa tilanne ja lähettää apua kohteeseen. (Blackline Safety 2017.)



Kuva 6. Tabletilta otettu kuvankaappaus Blacklinen selainsovelluksesta, jossa laitteen tietoja voidaan seurata.

Kaasumittaustiedon kerääminen edellyttää, että selainsovelluksesta jatkuva tiedonkeruu asetetaan päälle. Muutoin henkilökohtaiseksi suojalaitteeksi suunniteltu kaasumittari päivittää sijaintitiedon palvelimelle viiden minuutin välein tai jos laite havaitsee jonkin muun aiheen hälytyksen antamiselle palvelimelle. Jos jatkuva tiedonkeruu olisi koko ajan päällä, kasvaisivat palvelimelle tallentuvat lokitiedostot pian tarpeettoman suurikokoisiksi.

Kaasujen määrittämisen tekniset vaatimukset täyttyivät käytetyssä laitteistossa hyvin. Työssä käytetyn Blackline Safetyn G7c -henkilökohtaisen suojaimen mittausresoluutio on riittävä tarkoitettua tehtävää ajatellen. Hiilimonoksidia määrittäessä mittausarkkuus on 1 ppm ja määrittämisalueen yläraja on 500 ppm. Kaasumittarin anturit kalibroidaan 180 vuorokauden välein syöttämällä kalibrointikaasua oman syöttölaitteistolla mittausantureille.

Kaikkien kaasujen osalta mittausmenetelmän selektiivisyys on riittävä. Sähkökemialliset anturit määrittävät mittausolosuhteissa vain haluttua kaasua selektiivisen kemiallisen reaktion myötä ja infrapunadetektorin toiminta on sidottu tiettyyn kalibrointikaasun mukaiseen absorptioprofiiliin. Mittauksen vakauteen vaikuttavat sääolosuhteet. Pakkanen vaikuttaa kemiallisen reaktion nopeuteen anturin elektrolyyttisillassa, jolloin nollassa voi vaeltaa ja lineaarisen alueen kulmakerroin muuttua lämpötilan muutoksen myötä. Työssä käytetty mittalaite määrittää nollassa käynnistettäessä, joten laite tulisi käynnistää käyttölämpötilassa.

Henkilökohtaiseksi suojaimeksi tarkoitettussa laitteessa ei ole imupumppua näytteenoton edustavuutta parantamassa, joten luotettavan mittaus tuloksen saamiseksi antureiden tulee antaa stabiloitua mittaus tilanteessa riittävän ajan. Lennokin roottoreiden aiheuttama kaasujen liike jopa hieman nopeuttaa antureiden stabiloitumista, joten tälle opinnäytetyölle imupumputon vaihtoehto on riittävä, koska kyseessä ei ole näytteenotto analyysia varten. Näytteen edustavuus siis on riittävän hyvä, kun ajatellaan kaasupitoisuuksien määrittämistä räjäytystyöskentelyn tarpeisiin.

Luonnollisissa olosuhteissa suoritettavaan kaasumittaukseen on vaikea lisätä laadunvalvontanäytettä. Työssä käytetylle mittarille ohjelmoidaan tietty aikaväli, valmistajan asettamana 30 vuorokautta, antureiden bump test -tarkistukselle.

Tässä bump testissä kaasuantureille syötetään kalibrintikaasua ja testin mennessä hyväksytysti läpi tulokset ovat luotettavia seuraavaan bump testiin asti. Mikäli bump test ei onnistu, syytä voidaan etsiä esimerkiksi kuluneesta tai vioittuneesta kaasuanturista.

6 LENNÄTYKSET

Kaasumittari kiinnitetään lennokkiin niin, että se pysyy lennätysten ajan siinä tukevasti kiinni. Kiinnityksen täytyy kuitenkin olla helposti purettava, jotta mittaria voidaan lennätysten jälkeen kantaa henkilökohtaisena suojalaitteena. Kiinnitys rakennettiin 50 mm leveästä nailonremmistä, hakaneuloista ja nippusiteistä, joita kaikkia on helposti saatavilla (Kuva 7). Phantom-nelikopterin jalkojen muotoilu mahdollistaa erilaisten kuormien kiinnittämisen laitteeseen helposti. Kaasumittauksen ajaksi tihennetty tiedonkeruu piti laittaa päälle selainsovelluksesta erikseen. Tällöin laitteen tiedot päivittyivät sovellukseen noin 3–5 sekunnin välein.



Kuva 7. Mittarin kiinnitys lennokkiin ensimmäisen koelennätysten aikana.

Syksyn ja alkutalven säät verottivat paljon lennätyskertoja, koska pienikokoisena laitteena ja kokoonsa nähden suurta kuormaa kantaessaan Phantom 4 reagoi herkästi olosuhteisiin. Opinnäytetyössä hyödynnetyt mittauskerrat on kirjattu taulukkoon 2. Jokaisen käyttökerran jälkeen kaasumittarin hälytykset kuitattiin selainsovelluksesta. Kaasumittari on ollut panostajien käytössä henkilökohtaisena suojalaitteena myös muina räjäytyskertoina, mutta näiden käyttökertojen mittaustiedolla ei ole merkitystä tälle opinnäytetyölle.

Taulukko 2. Yhteenveto opinnäytetyössä käytetyistä mittauskerroista.

Päivämäärä	Havainnot ja huomiot
20.9.2018 ja 22.9.2018	Kaasumittarin järjestelmään tutustuminen. Selainsovellukseen tutustuminen ja sen käytön haltuunotto tulevia lennätyskertoja varten. Mittari panostajalla henkilökohtaisena suojavälineenä, reaaliaikainen tiedon seuraaminen kannettavalla tietokoneella autosta.
25.9.2018	Koelennätys mittarin kanssa asema-alueella. Mittarin kiinnityksen testaaminen ja lennätysten hallinnan ja vakauden toteaminen. Lennätysaika 13 minuuttia, akkua ei käytetty kovin loppuun. Lennätettäessä tehtiin nopeita ja karkeita ohjausliikkeitä, jotta yhdistelmän hallittavuus voitiin todeta.
27.9.2018	Lentoonlähtöyritys avolouhoksen näköalapaikalta. Tuuli oli liian kova lennätukseen, joten kiinnitys purettiin ja mittari annettiin panostajalle henkilökohtaiseksi suojavälineeksi. Nopeasti purettava kiinnitys todettiin toimivaksi.
4.10.2018	Lennätys räjäytyksen jälkeen louhekanan läheisyydestä. Virheilmoitus "Ultrasound sensor error: land immediately." Lennätysaika 4 minuuttia. Kaasumittari sijaitsi lennokin korkeusantureiden edessä ja antaessaan hälytysääntä se häiritsi lennokin lennätyskorkeuden määrittystä.
10.10.2018	Multikopterin kalibrointi: IMU, Forwardvision, kompassi.
15.10.2018	Lennätys räjäytyksen jälkeen louhekanan läheisyydestä kahdella eri räjäytyskentällä. Puuskittainen tuuli teki lennätyksestä hieman epävakaata, mutta laitteisto pysyi kuitenkin koko ajan hyvin hallittavissa. Havaittiin mittaustuloksen päivittymisen viiveeksi selainsovellukseen noin yksi minuutti.
23.10.2018	Lennätys räjäytetyn kentän vieressä. Lennätysaikaa kertyi yhteensä noin 35 minuuttia yhdellä akunvaihdolla. Lennätöksessä ja kaasumittauksen tiedon päivittämisessä ei häiriöitä.
30.10.2018	Lennätys näköalapaikalta räjäytyskentän päälle. Hyvä sää, ei juuri tuulta. Lennätys vakaata. Multikopterin kompassin se-

	<p>koaminen keskeytti lennätysten. Lennätysreitillä ylitettiin voimalinja, joka synnytti sähkömagneettisen häiriön lennokkiin eikä kaasumittausdataa saatu kerättyä. Myös kaasumittarin tiedonsiirtoyhteydessä oli ongelmia.</p>
20.12.2018	<p>Lennätys näköalapaikalta. Heikkoa tuulta, lämpötila noin $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lennätys epävakaata, virheilmoitus kauko-ohjaimen ja multikopterin välisestä heikosta yhteydestä. Avolouhoksen pohjois-seinämää pitkin nouseva eteläkaakkoinen tuuli mahdollisesti vaikutti multikopterin heikkoon hallittavuuteen. Tämän lennätysten aikana oli tarkoitus samanaikaisesti mitata kaasupitoisuuksia ja tarkastella ammuttua kenttää videolinkin välityksellä, mutta olosuhteiden vuoksi lennätys keskeytettiin. Kaasumittauksen tietojen päivittämisessä ei häiriöitä.</p>

7 KAASUMITTAUSTIETOJEN KÄSITTELY

Lennätettävän kaasumittauksen kelpoisuutta arvioitiin lennätystilanteissa kertyneiden kokemusten, työntekijöiden kanssa käytyjen keskusteluiden sekä mittausaineiston jälkianalyysin pohjalta. Tutkimalla kaasumittarin raporteja etsittiin sekä menetelmän etuja että haittoja. Kaasumittarin keräämä tieto voidaan ladata Blacklinen selainsovelluksesta csv- tai xlsx-tiedostoina ja niihin kertyy tietoa laitteen toiminnasta, sen antamista hälytyksistä, kuin myös aikaleimattu paikkatieto ja kaasupitoisuus.

Lennätyksissä kertynyt kaasumittausaineisto jouduttiin yhdistämään paikkatietoon kahdesta eri raporttiedostosta Excelin Powerquery-työkalulla aikaleiman perusteella. Aivan loppuvuodesta selainsovellukseen tuli mahdollisuus ladata raportti, jossa kaikki laitteen tiedot on kerätty yhteen tiedostoon. Tämä tieto on ladattavissa seitsemän vuorokauden ajan, jonka jälkeen kaasupitoisuuden sitominen paikkatietoon täytyy tehdä jälleen erikseen. Mittausaineistosta poistettiin Powerqueryllä duplikaattirivit ja ne järjestettiin aikaleiman perusteella kasvavaan järjestykseen.

Tässä työssä tarkasteltiin vain hiilimonoksidista saatuja mittaustuloksia, koska käytössä olleessa kaasuanturivalikoimassa muut mitatut kaasut olivat räjäytystyöskentelyn turvallisuuden arvioinnin kannalta jokseenkin merkityksettömiä. Työssä suoritettujen lennätysten aikana ei havaittu räjäytyskenttien yllä palavien kaasujen pitoisuuksia tai rikkivetyä. Suomalaisessa kallioperässä metallimalmia louhittaessa orgaanisten kaasujen esiintyminen onkin erittäin epätodennäköistä. Sulfidisen malmin myötä rikkivedyn hajua esiintyy erittäin harvoin ja lyhyitä aikoja, mutta pitoisuuksia, saati rikkivedyn tunnusomaista hajuakaan, ei työn aikana havaittu edes niinä kertoina, kun mittaria käytettiin henkilökohtaisena suojalaitteena.

Taulukkolaskennassa kunkin mittaussarjan aikaleima muutettiin sarjan ensimmäisestä mittaustuloksesta kuluneeksi ajaksi. Hiilimonoksidipitoisuuksista koostettiin kuvaajia SigmaPlot-ohjelmalla. Kuvaajilla havainnollistetaan sekä kaasupitoisuusjakamaa paikkatietoon nähden sekä kaasupitoisuutta ajan funktiona. Lisäksi muodostettiin kuvaajat kaasupitoisuudesta lennätyskorkeuden funktiona.

Käsiteltävää mittaustietoa kertyi kolmesta räjäytyskentästä. Kenttiin pumpatun emulsioräjähteen määrästä voidaan arvioida räjähdyksessä syntyneen kaasun tilavuus. Suuntaa antavana nyrkkisääntönä räjähdysaineiden kaasunmuodostukselle on ”kuutio per kilo”. Kevitsassa käytetty Fortis-emulsioräjähdysaine vapauttaa stoikiometrisessa reaktiossa kilogrammaa kohden noin 900 litraa räjäytyskaasuja. Reaktiossa syntyneen veden tiivistyttyä kokonaan kaasuja jää jäljelle noin 440 litraa räjähdysainekilogrammaa kohti. Suurpiirteiset arviot räjäytyksessä syntyneistä kaasutilavuuksista on kirjattu taulukkoon 3. Luonnollisissa olosuhteissa tarkkoja kaasutilavuuksia tuotantokentän räjäytyksestä ei voida selvittää, eikä se tässä työssä ole tarpeellistakaan.

Taulukko 3. Räjäytyksissä muodostuneiden kaasujen tilavuudet

Räjäytyskenttä	Räjäytyskaasut ennen veden tiivistymistä	Räjäytyskaasut veden tiivistyttyä
C1138R014	157 000 m ³	69 000 m ³
C1126R001	131 000 m ³	58 000 m ³
B1030M002	19 000 m ³	8 000 m ³

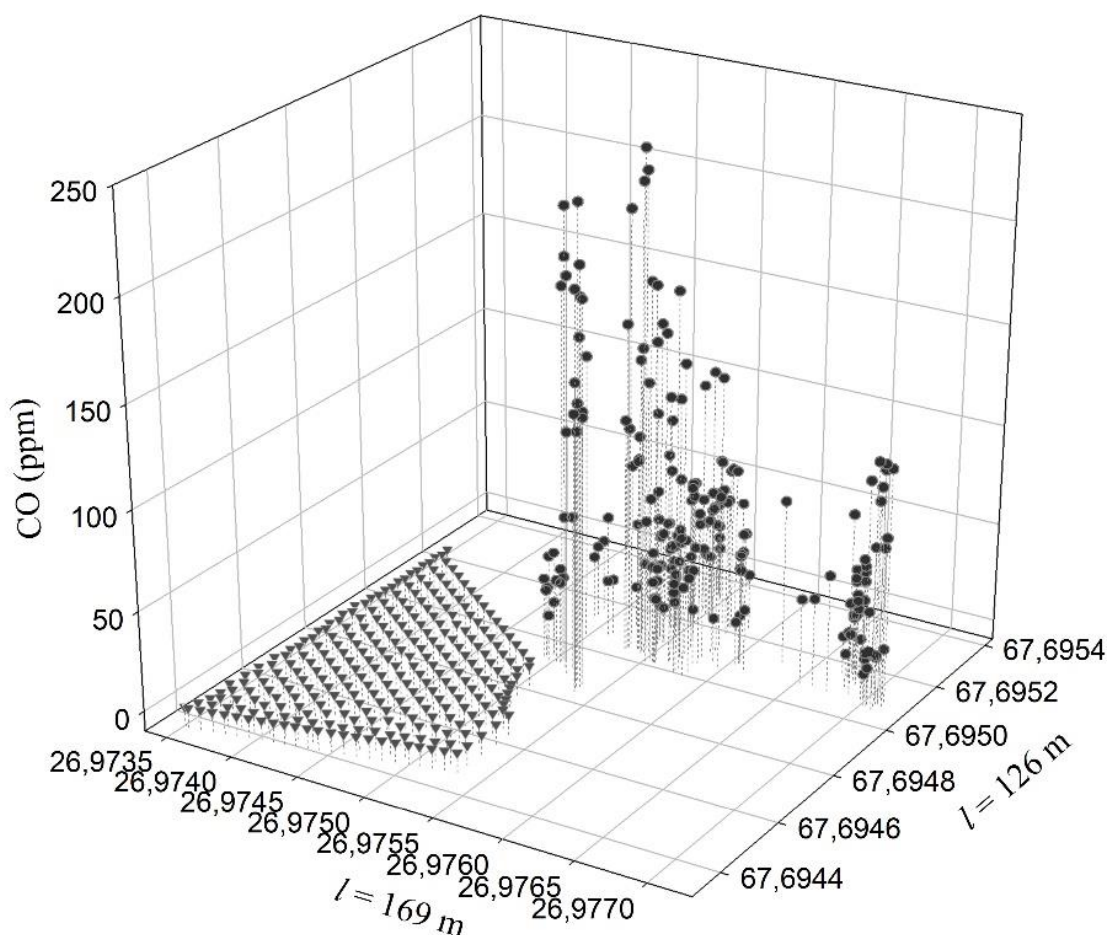
Kaasut laimenevat luonnollisissa olosuhteissa joka tapauksissa kaoottisesti, joten yksioikoisesti läheskään kaikista kuvaajista ei voida tulkita selkeää trendiä. Menetelmän toimivuutta ei voida tulkita yksittäisten omia tavoitteita tukevien kuvaajien perusteella. Tähän käsittelyosuuteen on valittu osa mittaustiedoista koostetuista kuvaajista, mutta liitteistä löytyvät kuitenkin kaikki kuvaajat aineiston edustavuuden takaamiseksi.

7.1 Räjäytyskenttä C1138R014

Kenttä räjäytettiin 15.10.2018 klo 12.00. Samana päivänä oli myös kentän C1126R001 räjäytys. Lennätys kentän läheisyydessä aloitettiin noin 30 minuuttia räjäytyksen jälkeen. Vähäinen etelätuuli oli avolouhoksen etelälaidalla hie-man puuskittainen ja pyörittävä, mikä hankaloitti nelikopterin hallintaa. Lennätysaikaa tällä kentällä kertyi viitisentoista minuuttia. Kaikki kuvaajat tältä kentältä kertyneestä kaasumittaustiedosta löytyvät liitteestä 1.

Kuvan 8 x- ja y-akselin lukemat vastaavat sekä porareikien että mittaustulosten paikkatietoa. Hiilimonoksidipitoisuus kuvataan z-akselilla. Räjähdyksikaasut olivat puolen tunnin aikana ehtineet laimentua suurimpien pitoisuuksien ollessa noin 250 ppm:n tuntumassa. Korkeimmat pitoisuudet olivat louhekasen päällä, joskin kovin kauas kentän takaosaa kohti ei lennätetty tuulenpuuskien vuoksi. Kenttä sijaitsi Stage 3 -alueen eteläosassa lähellä avolouhoksen seinämää ja oli tuulelta hieman suojaisemmassa paikassa kuin samana päivänä myöhemmin lennätetty C1126R001. Lennätyksen aikana mittaustuloksia kerättiin vain lennätyspaikkaan nähden louhekasen etureunan läheisyydestä, johon oli selvä näkyvyys, koska louhekasen yläreuna oli lennätyspaikkaa korkeammalla.

C1138R014



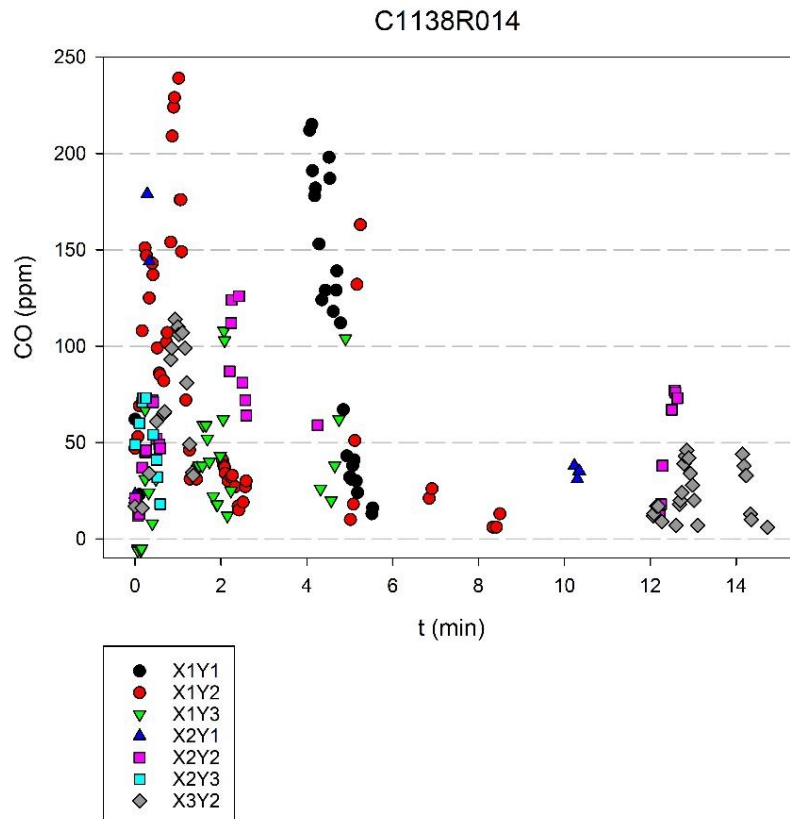
Kuva 8. Porareikien sijainti ja lennätyksen aikana mitatut hiilimonoksidipitoisuudet.

Mittausaineisto jaettiin koordinaattien perusteella 3 x 3 -kokoiseksi ruudukoksi taulukon 4 mukaisesti. Jakamalla kaasumittaus tieto pienempiin alueisiin voidaan kuvaajista etsiä muutosta, jolla voidaan arvioida mittauksen validiutta. Yksi pienempi osaruutu X2Y1 jätettiin tarkastelusta pois, koska mittausdataa oli liian vähän.

Taulukko 4. Kentän C1138R014 jako pienempiin alueisiin.

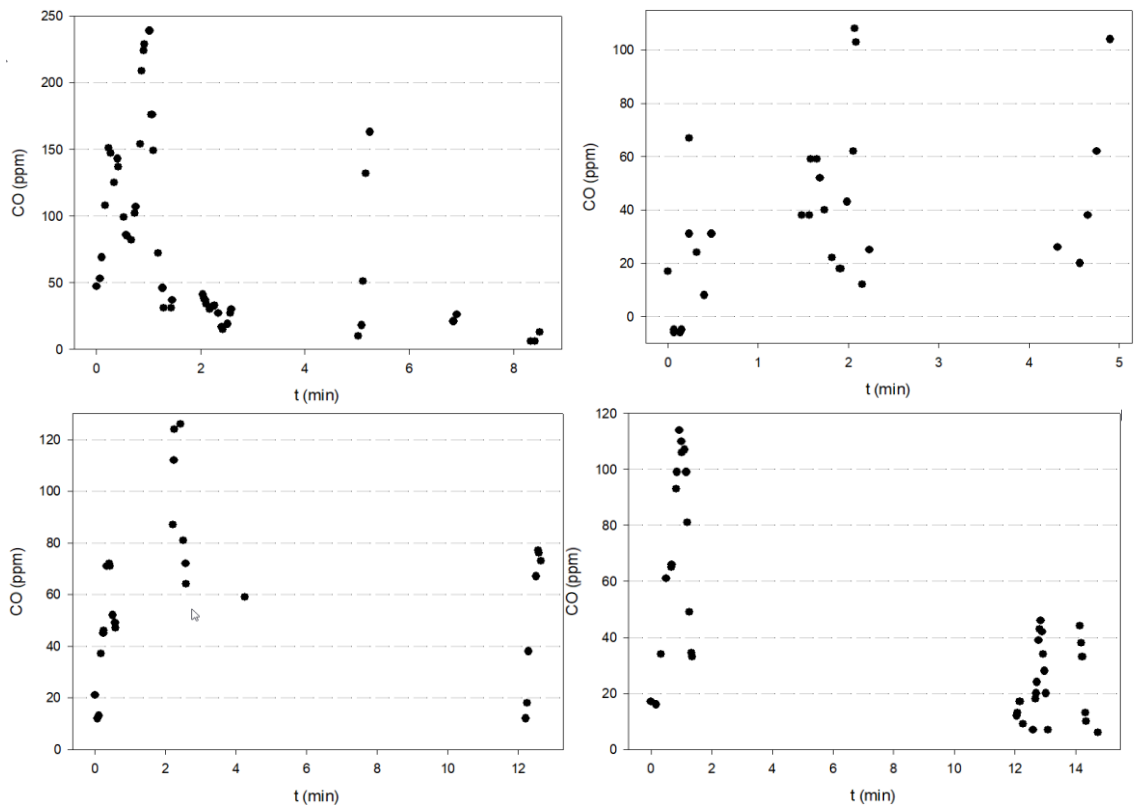
3	n = 32	n = 11	n = 0
2	n = 54	n = 29	n = 41
1	n = 30	n = 8	n = 0
y/x	1	2	3

Näistä koostettiin kuvaaja pitoisuudesta ajan funktiona (Kuvio 2). Mikäli menetelmällä havaitaan muutos, mittauksen voidaan olettaa onnistuneen. Kaasupitoisuudet selvästi laskevat lennätysajan loppua kohti. Erityisen hyvin tämän näkee sarjoista X1Y2 ja X2Y2, joissa aluksi on korkeita pitoisuuksia, mutta ajan myötä pitoisuudet ovat matalampia.



Kuvio 2. Hiilimonoksidipitoisuus ajan funktiona kentällä C1138R014.

Kuviossa 3 on esitetty osa pienemmiksi osiksi lohkotuista tuloksista. Kolmessa kuvaajassa näkyy kaasupitoisuuksien laimeneminen ajan myötä. Kuitenkin alueella X1Y3 pitoisuudet hieman nousevat ajan kuluessa. Tässä voidaan ajatella kaasujen kulkeutuvan etelästä käyneen tuulen mukana pohjoiseen päin, mutta yksittäisen lennätyksen ja siitä tehdyn yksittäisen osakuvaajan perusteella tätä ei voida tästä aineistosta tilastollisesti luotettavalla tavalla havaita. Joka tapauksessa kaasupitoisuuksien yleinen laimeneminen ajan myötä voidaan havaita ja mittauksen voidaan olettaa onnistuneen.



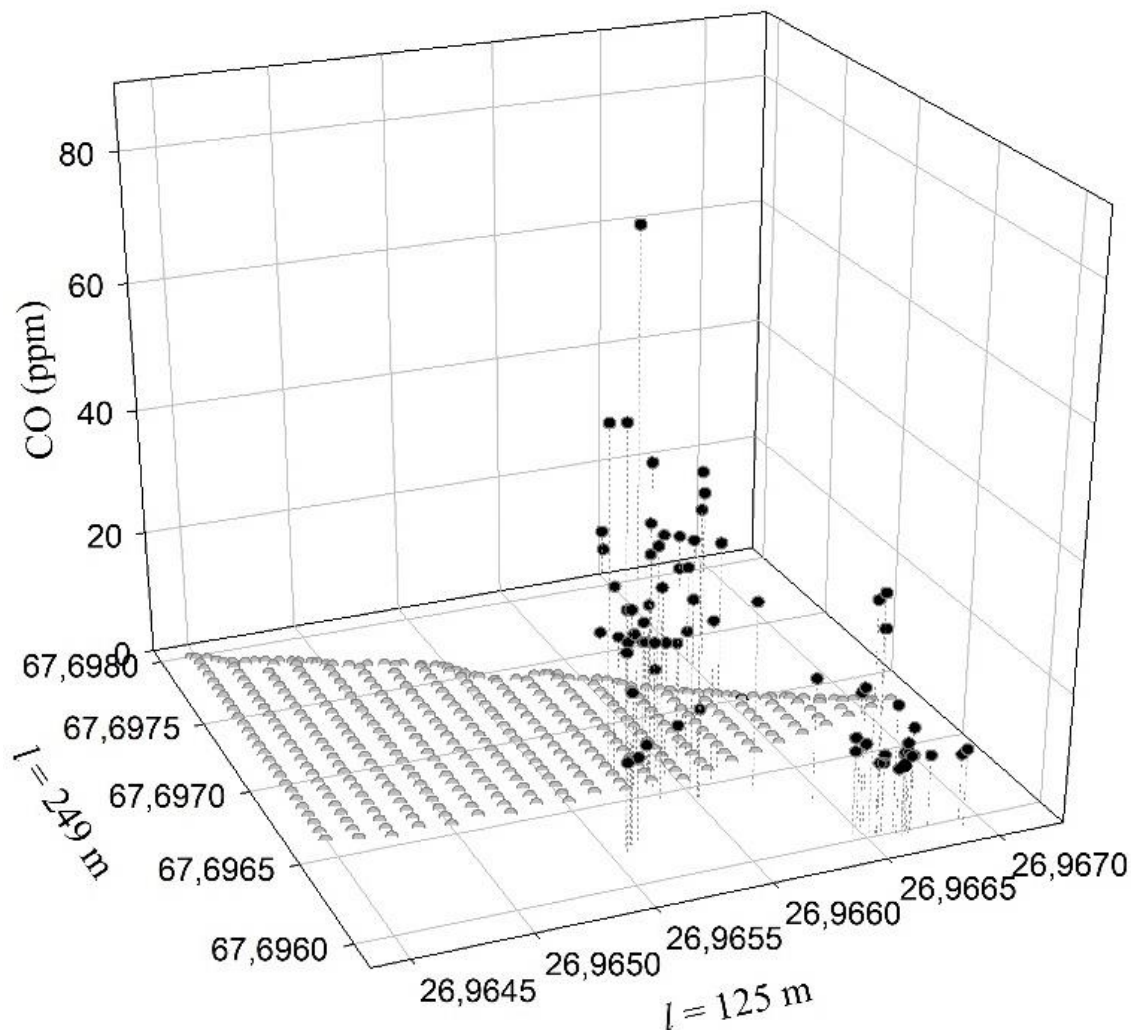
Kuvio 3. Yksittäisten osa-alueiden hiilimonoksidipitoisuuksia ajan funktiona kentältä C1138R014. Ylävasemmalla X1Y2, yläoikealla X1Y3, alavasemmalla X2Y2 ja alaoikealla X3Y2.

7.2 Räjätyskenttä C1126R001

Samana päivänä C1138R014:n kanssa räjäytettiin myös kenttä C1126R001, jolla laitteistoa lennätettiin noin 25 minuutin ajan. Ensimmäinen mittaustulos tämän kentän yltä on mitattu hieman reilun tunnin päästä räjäytyksestä. Kuvaajat tämän lennätyksen kaasupitoisuuksista ovat liitteessä 2. Räjäytyksestä kulu-

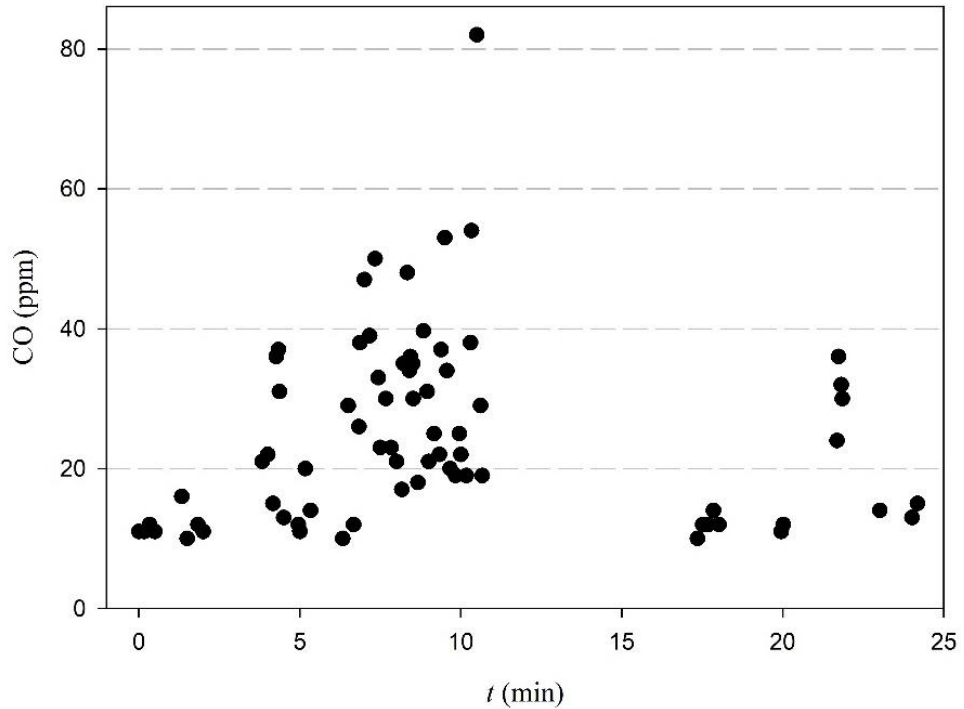
nut pitempi aika näkyy yleisesti pienempinä hiilimonoksidipitoisuuksina. Kenttä sijaitsi myös avoimemmalla paikalla kuin aiemmin lennätetty C1138R014, joten räjäytyskaasut tuulettiivat tehokkaammin. Lennätyksestä saatuja kaasupitoisuuksia on havainnollistettu kuvassa 9.

C1126R001



Kuva 9. Porareikien sijainti ja kaasupitoisuudet kentällä C1126R001.

Myös tällä kentällä havaitaan pitoisuuksien pieneneminen, kun piirretään kuvaaja kaasupitoisuudesta ajan funktiona (Kuvio 4). Tuuli ei ollut kova, mutta se kuitenkin nopeutti kaasujen laimenemista.



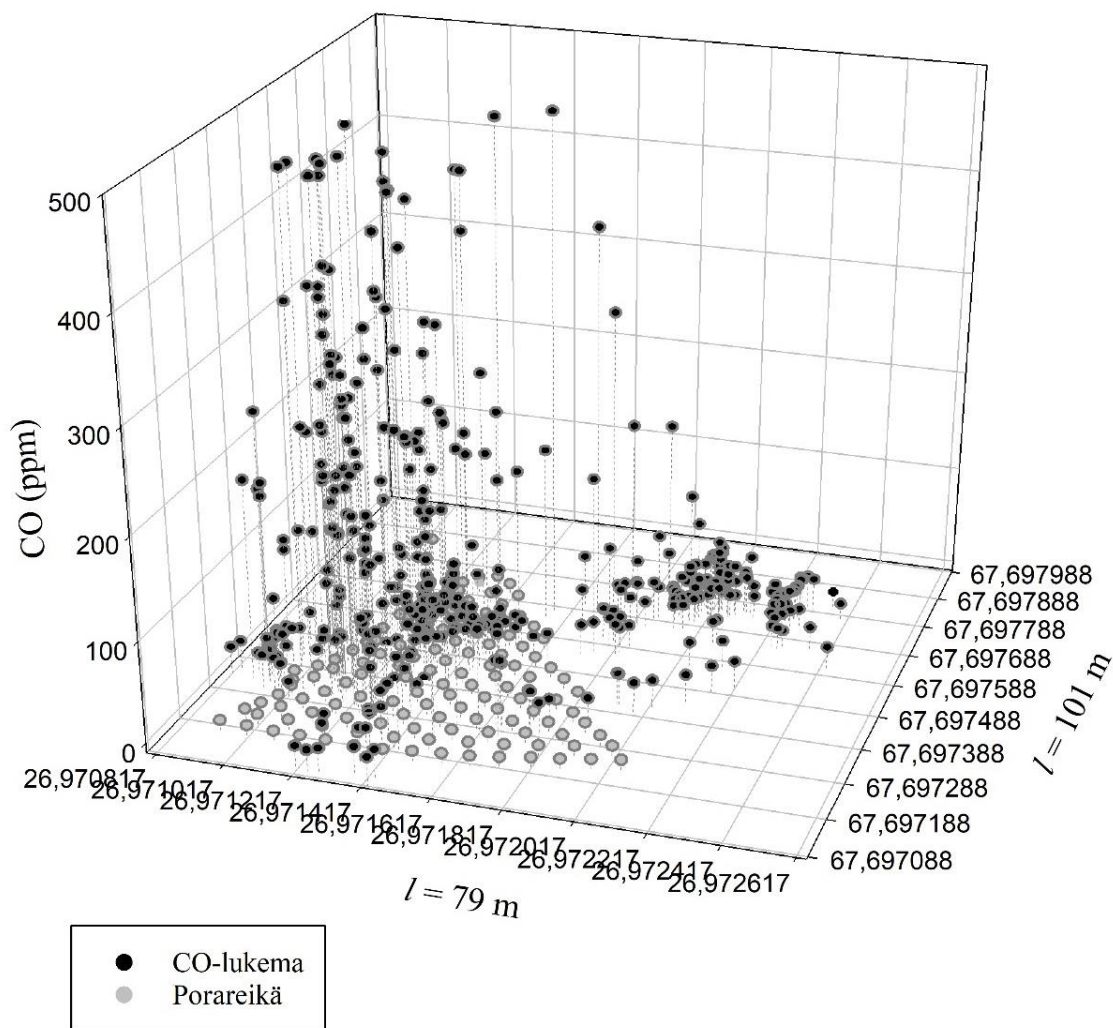
Kuvio 4. Kaasupitoisuus ajan funktiona kentällä C1126R001.

On mielenkiintoista havaita, että vaikka kenttä sijaitsi avoimella paikalla, työhygieenisiä raja-arvoja ylittäviä pitoisuuksia kasan päältä mitattiin reilusti yli tunnin päästä räjäytyksestä.

7.3 Räjäytyskenttä B1030M002

Räjäytyskenttä B1030M002 sijaitsi avolouhoksen pohjalla stage 2:lla suojaissessa paikassa. Kenttä oli pienikokoinen trimmikenttä ja syntyneet kokonaiskaasutilavuudet olivat huomattavasti pienempiä kuin tavanomaisen tuotantoräjäytyskentän. Sää oli selkeä eikä avolouhoksen pohjalla tuullut ollenkaan. Lennätys aloitettiin noin 10 minuuttia räjäytyksen jälkeen ja lennätysaikaa kertyi hieman yli 30 minuuttia. Nelikopterin akku vaihdettiin kerran lennätysten puolivälissä, jolloin yhdellä akulla työskentelyaikaa kertyi siis hieman vajaa varttitunti.

Tällä kentällä hiilimonoksidipitoisuudet olivat huomattavasti suurempia kuin avoimemmalla paikalla sijaitsevilla Stage 3 -vaiheen kentillä (Kuva 10). Mittarin määritysalueen yläraja 500 ppm ylittyi useita kertoja lennätysten aikana. Kuvassa yläoikealla näkyy lennätyspaikan läheinen alue, jolla luonnollisesti pitoisuudet olivat matalammat kuin kasan yllä.



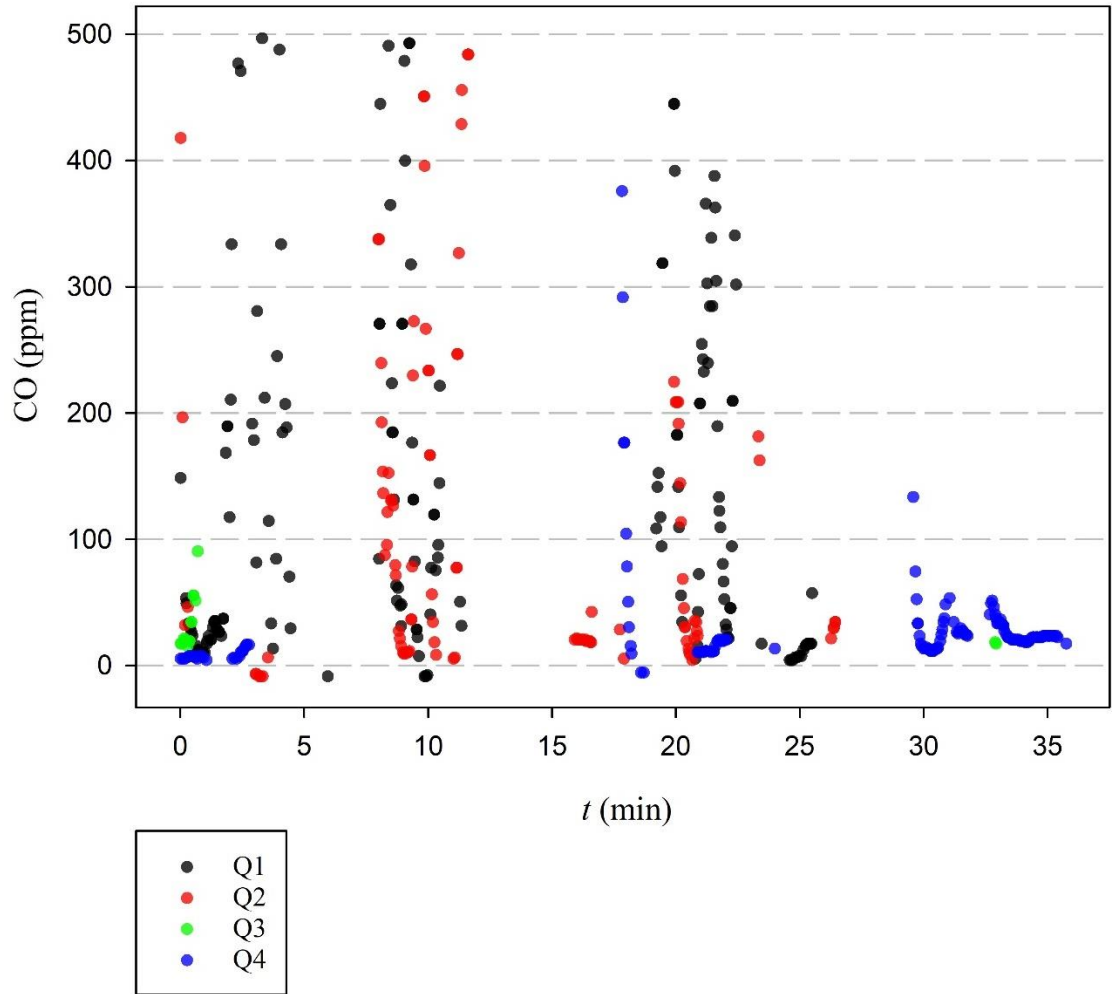
Kuva 10. Porareikien sijainti ja kaasupitoisuudet kentällä B1030M002.

Tämänkin lennätyksen mittausdata jaettiin pienempiin osa-alueisiin 8 x 8 -ruudukoksi (Taulukko 5). Tämän lisäksi mittaustietoja tarkkailtiin nelikenttänä, jossa mittaustulokset saadaan esiintymään edustavammin. Tiheimmästä ruutu-jaosta jätettiin tarkastelun ulkopuolelle ruudut, joissa oli alle 10 mittaustulosta tai joiden mittaustulokset olivat kertyneet liian lyhyeltä ajalta. Jokaisesta osa-alueesta piirrettiin xyz-kuvaaja kaasupitoisuudesta paikkatiedon funktiona sekä kuvaaja kaasupitoisuudesta ajan funktiona. Kaikki kuvaajat löytyvät liitteestä 3.

Taulukko 5. Kentän B1030M002 tulosten jako pienempiin alueisiin. Punaisella yllirastitetut osat jätettiin tarkastelematta. Värit edustavat alueen mittausaineiston jakoa neljään osaan.

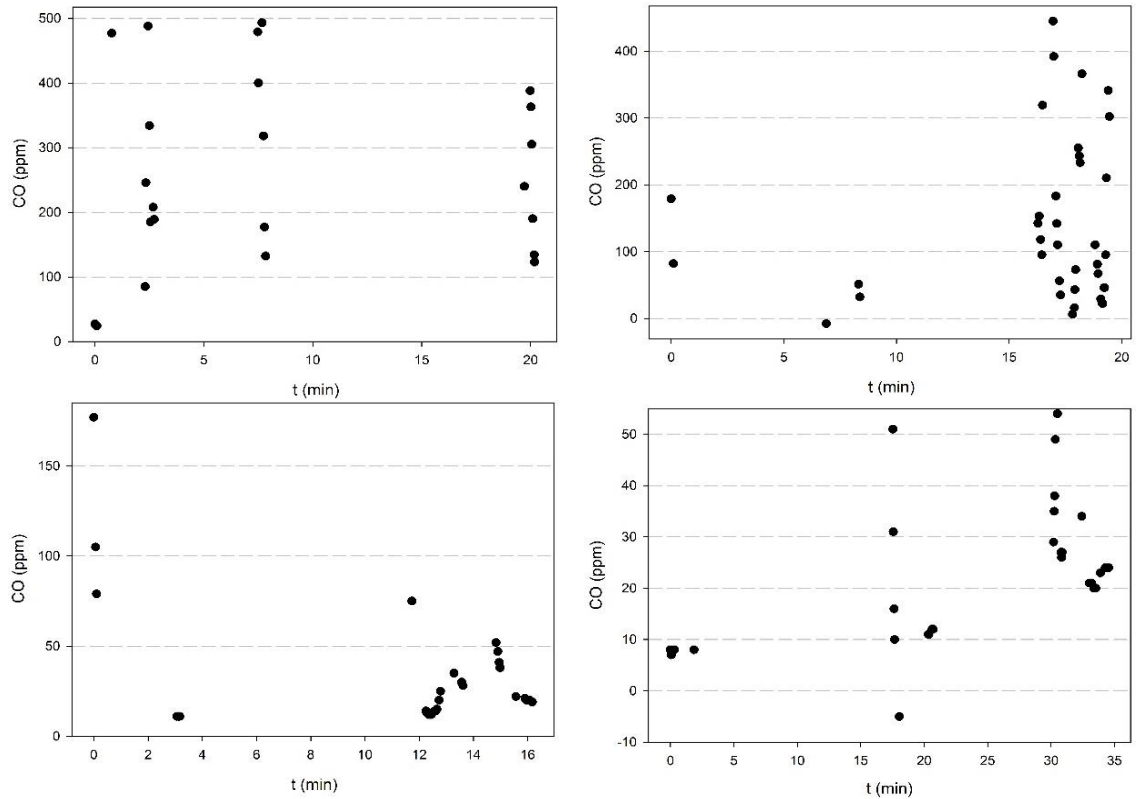
8	n = 0	n = 0	n = 0	n = 0	n = 0	n = 12	n = 21	n = 5
7	n = 0	n = 0	n = 0	n = 0	n = 5	n = 31	n = 39	n = 21
6	n = 0	n = 0	n = 0	n = 3	n = 10	n = 12	n = 3	n = 5
5	n = 12	n = 19	n = 41	n = 35	n = 4	n = 3	n = 4	n = 1
4	n = 13	n = 27	n = 51	n = 7	n = 0	n = 2	n = 2	n = 2
3	n = 36	n = 32	n = 26	n = 1	n = 13	n = 1	n = 0	n = 0
2	n = 0	n = 5	n = 12	n = 0	n = 4	n = 0	n = 0	n = 0
1	n = 0	n = 1	n = 13	n = 0	n = 1	n = 0	n = 0	n = 0
y/x	1	2	3	4	5	6	7	8
	Q1, n = 171		Q2, n = 106		Q3, n = 16		Q4, n = 149	

Kuviossa 5 on havainnollistettu hiilimonoksidipitoisuus mittauksen aikana. Suojaisen sijaintinsa ja tuulettoman sään vuoksi pitoisuudet ovat huomattavasti korkeammat ja laimenevat hitaammin kuin ylempänä sijainneilla Stage 3:n räjäytyskentillä. Kuvaajan sarja Q4 sijaitsee lennätysalueella, jolla aluksi pitoisuudet olivat matalia, mutta kaasujen levitessä räjäytyskentältä lähiympäristöön ne alkoivat nousta. Kokonaispitoisuudet 20 minuutin lennätysten jälkeen, eli puoli tuntia räjäytyksestä, olivat vielä paljon suuremmat kuin kentällä C1138R014, jolla lennätys aloitettiin puoli tuntia räjäytyksen jälkeen ja suurimmat pitoisuudet olivat 250 ppm:n luokkaa. Kentän sijainti ja tuuliolosuhteet vaikuttavat siis suuresti siihen, kuinka kauan kasasta räjäytyskaasu vapautuu ja niiden pitoisuudet laskevat työturvallisten raja-arvojen alle.



Kuvio 5. Kaasupitoisuus ajan funktiona kentällä B1030M002.

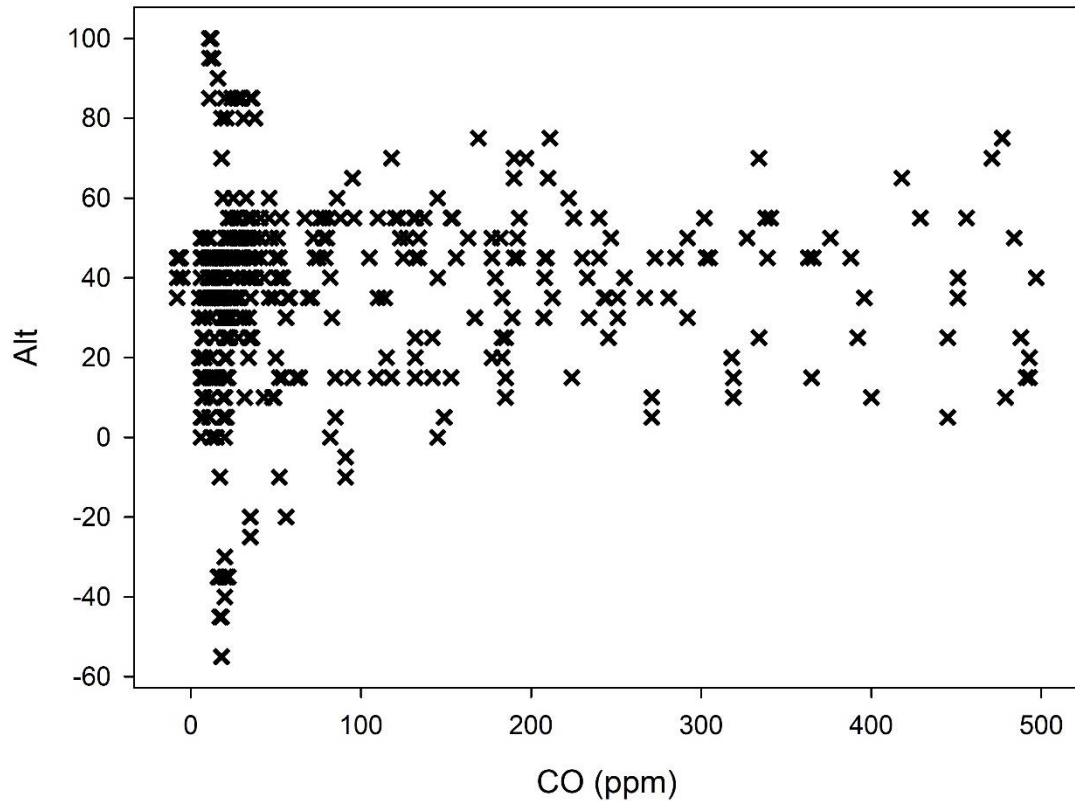
Kuviossa 6 on esitetty mittaustuloksia osasta pienintä ruutujakoa. Ylävasemalla sijaitsevasta kuvaajasta näkyy kaasupitoisuuksien väheneminen ajan myötä kaasujen liikuessa hiljalleen pois päin takana olleesta avolouhoksen seinämästä. Ylävasemmalla on kuvaaja kasan yltä ja siitä nähdään kaasujen vapautuminen kasasta pitkän aikaa räjäytyksen jälkeen. Alarivin kuvaajat ovat läheltä lennätyspaikkaa, jolla hiilimonoksidipitoisuudet olivat lennätysten alussa matalat, mutta ajan kuluessa ne alkoivat nousta.



Kuvio 6. Yksittäisten osa-alueiden hiilimonoksidipitoisuuksia ajan funktiona kentältä B1030M002. Ylhäällä vasemmalla X2Y3, ylhäällä oikealla X3Y4, alhaalla vasemmalla X6Y7 ja alhaalla oikealla X7Y7.

7.4 Kaasupitoisuuksien esiintymiskorkeus

Työn yhteydessä oli mahdollisuus myös tutkia, miten korkea muodostuva räjäytyskaasupatja voi räjäytetyn kentän ja sen läheisyydessä olla. Kultakin lennätetyltä kentältä koostettiin kuvaaja lennätyskorkeudesta hiilimonoksidipitoisuuden funktiona. Kuvaajan tarkkuus on suurpiirteinen, koska kaasumittarin korkeustiedon tarkkuus on noin 5 metriä ja se määritetään gps-tiedon pohjalta. Kuviossa 7 esitetään hiilimonoksidipitoisuuksien esiintymiskorkeus. Kaikki korkeustietokuvaajat löytyvät liitteestä 4.

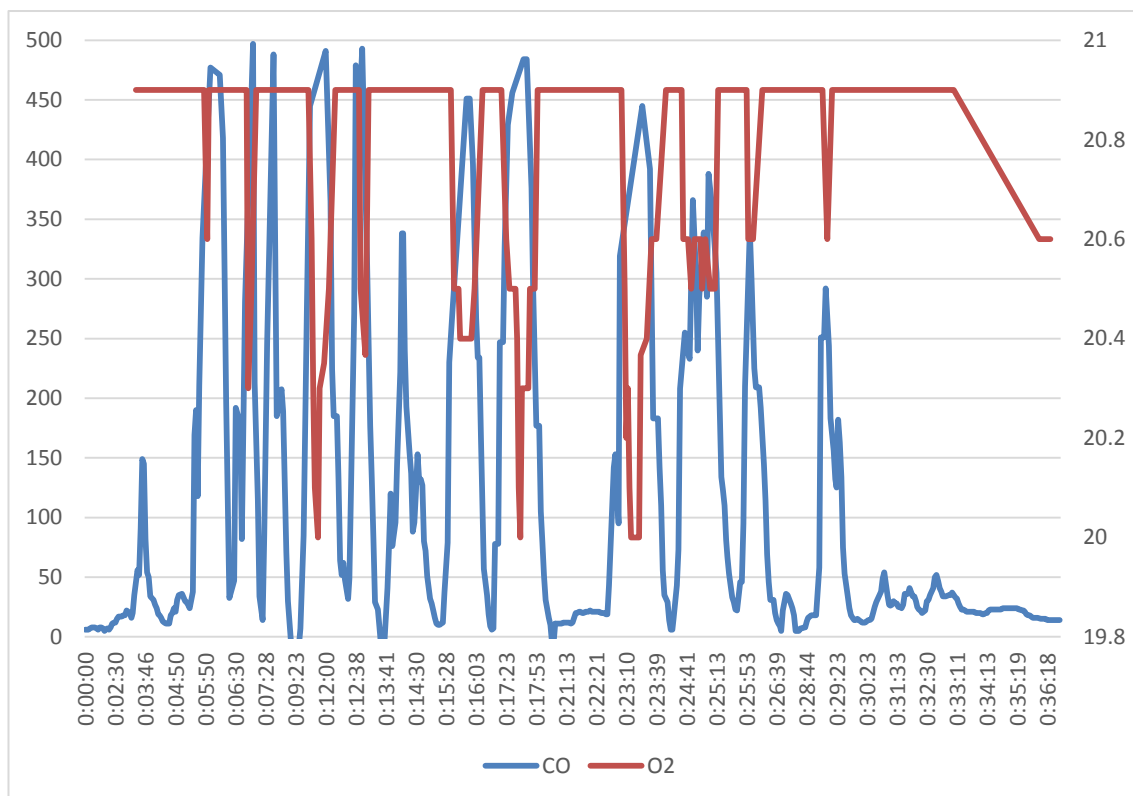


Kuvio 7. Kaasumittaustuloksen mittauskorkeus hiilimonoksidipitoisuuden funktiona kentällä B1030M002.

Suurimmat hiilimonoksidipitoisuudet nousivat sitä korkeammalle, mitä tuulettomampi sää oli. Työhygieenisiiä raja-arvoja ylittäviä pitoisuuksia löytyi noin 30 – 50 metrin korkuisen patjana kasan yltä ja ympäristöstä. Räjähdyksen aikana kaasut ovat kuumia ja ne lähtevät nousemaan ylöspäin, kunnes jäähtyvät ympäristön lämpötilaan. Tämän jälkeen kaasut laimenevat sekoittumalla ympäristöönsä kulloistenkin tuuliolosuhteiden niihin vaikuttaen.

7.5 Räjähdyksikaasujen syrjäyttämä ilman happi

Kaasumittaustiedon ollessa saatavilla tutkittiin samalla, missä määrin räjähdyskaasut syrjäyttävät happea. Itse räjähdysaineet ovat happitasapainotettuja niin, että ne eivät palamisessaan tarvitse ympäristön happea. Suuret räjähdyskaasumäärät syrjäyttävät kuitenkin ympäristönsä muita kaasuja. Kentältä B1030M002 saadusta mittausaineistosta piirrettiin kuvaaja hapen ja hiilimonoksidin pitoisuuksista ajan funktiona (Kuvio 8).



Kuvio 8. Räjätyskaasujen syrjäyttämä ilman happi.

Korkeat hiilimonoksidipitoisuudet leikkaavat selvästi happipitoisuutta ilmaisevia piikkejä. Hiilimonoksidipitoisuudet ovat näissä tilanteissa kuitenkin niin korkeat, että työhygieeniset raja-arvot ylittyvät joka tapauksessa ennen kuin hapen määrä ilmassa vähenee. Hiilimonoksidin affiniteetti hapettumiselle hiilidioksidiksi on niin korkea, että tämän reaktion luonnollinen tapahtuminen osaltaan vähentää happipitoisuutta, mutta työssä havaituilla pitoisuuksilla hiilimonoksidin hapettumisen vaikutus happipitoisuuteen on merkityksetön. Ennen kaikkea voidaan olettaa, että korkeat hiilimonoksidipitoisuudet tarkoittavat mittauskohteessa muidenkin räjäytyskaasujen suuria konsentraatioita, jotka happea syrjäyttävät.

8 POHDINTA

Räjähätyksen jälkeen kulkuyhteys jonnekin voi katketa, mutta miehittämättömällä lennokilla alue voidaan saavuttaa helposti ja nopeasti. Lennättämällä kaasumittari alueelle voidaan arvioida, onko sieltä liikkumassa työturvallisuutta haittaavia korkeita kaasupitoisuuksia muille alueilla. Vaikka alueelle kulkuyhteys säilyisi-kin, voivat esimerkiksi putoavat kivet seinämiltä estää jalan työskentelyn alueella. Tällöinkin lennätettävä mittausta antaa tietoa alueen työhygieenisistä olosuh-teista.

Lennättämällä kaasumittaus nopeasti linnuntietä voidaan tavoitella aikasäästö-jä, kun jo ennen avolouhokseen siirtymistä voidaan arvioida eri alueiden hengi-tysilman laatua. Henkilöstön ja suurikokoisten tuotantolaitteiden palauttamiseksi työkohteeseen räjäähätyksen jälkeen kuluttaa aikaa, joten kumulatiivinen ai-kasäästö tuotannon käynnistymisestä muutamia minuuotteja aiemmin vähentää taloudellisesti tuottamatonta joutokäyntiaikaa.

Miehittämätön lennokka oli nopea ottaa käyttöön eikä vaatinut monimutkaisia esivalmisteluja. Lennättäminen oli verrattain helppo oppia ja tuntuman lennokin käyttäytymiseen sai varsin nopeasti. Koska miehittämättömän lennokin lennät-täminen ei vaadi erikseen vaativaa koulutusta, olisi lennättäjän tehtävää voitu kierrättää. Tässä työssä lennätyskerrat jäivät kuitenkin valitettavan vähäisiksi, joten tämä mahdollisuus jäi kokeilematta. Työssä kertyi kuitenkin kokemusta kaasumittauksesta, joka on yksi mahdollisuus parantaa olemassa olevan laite-kannan käyttöastetta.

Räjäähätyksikaasujen mittaamisen kannalta oli harmillista, että mahdollisuus typen oksidien määrittämiselle puuttui kokoonpanosta. Typen oksidien muodostumi-nen on kuitenkin mahdollista räjäähätyksissä, ja sekä opinnäytetyön toimeksianta-ja Orica Finland Oy että yhteistyökumppani Boliden Kevitsa Oy olisivat molem-mat olleet kiinnostuneita typen oksidien pitoisuuksista. Työn kannalta onkin harmillista, että typen oksideja määrittävät anturit eivät ehtineet tulla valmistajan valikoimaan opinnäytetyön tekemisen aikana. Joka tapauksessa pelkästään hiilimonoksidin pitoisuuksien mittaamisella päästiin arvioimaan hyvin menetel-män käyttökelpoisuutta.

Tässä työssä kaasumittarin kiinnittämiseen käytettiin nailonremmiä, nippusiteitä ja hakaneuloja. Kiinnitys oli riittävän tukeva eikä kuorma liikkunut kiinnityksensä. Yhdellä akulla saavutettiin noin 10–15 minuutin lennätysaika olosuhteista riippuen. Ohjausliikkeiden rauhallisuudella lennätysaikaa saatiin hieman pidentettyä, mutta kova tuuli lyhensi sitä varsinkin kuorman kanssa lennätettäessä. Erityisesti puuskittaisessa tuulessa lennokki korjasi asentoaan ja reittiään kuluttaen akkua. Rajallisen lennätysajan myötä onkin tärkeää kehittää hyvä lennätysrutiini, jotta rajallinen aika saadaan käytettyä tehokkaasti. Akun vaihdon ajaksi lennokki täytyy lennättää takaisin lennätyspaikalle, johon kuluu aina jonkin verran aikaa.

Vaihtoehtona olisi ollut tehdä kaasumittarin kiinnitysrakennelma kopterin alapuolelle niin, että kopteri olisi lähetetty lentoon erilliseltä lähtöalustalta. Kaasumittarin kiinnitys nelikopterin alapuolelle olisi pitänyt rakentaa niin, että lentoonlähdössä ja laskeutuessa kaasumittarin anturit eivät pääse likaantumaan joutuessaan kosketuksiin maanpinnan kanssa. Tämä kiinnitysrevisio jäi valitettavasti kokeilematta lennätyskäiden loputtua. Toinen vaihtoehto olisi ollut rakentaa kiinnityspuomi, jonka toisessa päässä olisi sijainnut kaasumittari ja toisessa sopiva vastapaino. Tämä yhdistelmä olisi kuitenkin ollut käytössä olleelle lennokille aivan liian raskas.

Avolouhoksessa tuuliolosuhteet saattoivat poiketa paljonkin näköalapaikan olosuhteista. Yhden lennätyksen epäonnistumiseen vaikuttikin avolouhoksen pohjoisseinämän kohdalla äkillinen tuuliolosuhteiden muuttuminen ja sen aiheuttama lennokin hallinnan menettäminen. Käyttöohje suosittelee, että Phantom 4 -nelikopterille suurin tuulennopeus lennätettäessä saisi olla korkeintaan 10 m/s. Kun lennätettiin nelikopterin ja kaasumittarin yhdistelmää, havaittiin herkkyyden tuuliolosuhteille kasvavan huomattavasti. Jo pienikin tuuli heikensi yhdistelmän hallittavuutta ja lennokki korjasi paljon lentoasentoaan ja -reittiään kuluttaen akkua nopeasti.

Henkilökohtaiseksi suojalaitteeksi tarkoitettu monikaasumittari oli dimensioiltaan varsin suuri ja oman akkunsa myötä myös painava. Kiinnitys Phantom 4 -nelikopteriin oli takapainoinen, koska lennokin oma kamera esti kiinnityksen suoraan laitteen alle. Yhdistelmä kaatuikin lentoonlähdössä kahdesti takapai-

noisuuden vuoksi. Ensimmäisen lennätyksen aikana lennokki antoi ultrasound sensor error -virheilmoituksen, joka johtui kaasumittarin kiinnityksestä lennokin korkeutta mittaavien sensorien eteen. Koelennätyksessä tätä ongelmaa ei havaittu, koska mittari ei päästänyt hälytysääntä, mutta räjäytyskentän yllä lennätettäessä hälytysääni häiritsi nelikopterin kaikuluotausta.

Lennättäminen näköyhteydellä voi muodostua haasteelliseksi avolouhoksen koon kasvaessa. Jo tällä hetkellä lennokkia on vaikea erottaa Stage 3 -alueen eteläosasta, joka on kauimpana avolouhoksen näköalapaikalta. Tulevaisuudessa Stage 4 -alueen osat ovat vielä kauempana. Erityisesti talvella valkoisesta maisemasta valkoista lennokkia oli vaikea erottaa. Tällaisessa tilanteessa tähystäjän käyttö olisi tarpeellista, mutta tähystäjää ei välttämättä voida alueelle päästää ennen kuin työskentely alueella on todettu turvalliseksi. Tämä heikentää mahdollisuutta aikasäästöön, joka menetelmällä voitaisiin saavuttaa.

Lennokin kompassi lopetti äkillisesti toimintansa yhden lennätyksen aikana ja lennätys keskeytettiin. Syyksi paljastui varastotasolle kulkeva voimalinja, joka sijaitsi lennätysreitillä. Sähkönjakelu ja muuntajat aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä, joita lennättäjän tulisi osata kiertää. Tässäkin lennättäjän hyvä rutiini korostuu.

Erityisesti lennätettäessä passiivista kaasumittaria lennokkia kannattaa lentää hitaasti ja leijuttaa, jotta kaasuanturit saavat tarpeeksi aikaa stabiloitua ja ne antavat todellisuutta mahdollisimman hyvin vastaavan mittaustuloksen. Tällä kokoonpanolla lennätettäessä täytyy huomioida myös mittausviive, joka enimmillään oli jopa minuutti. Liian nopealla lennätysnopeudella ei voi olla varma, millä kohdalla lennokki oli hetki sitten, kun mittarin selainsovellus alkaa ilmoittaa korkeista pitoisuuksista.

Passiivinen näytteenotto toimi työssä hyvin. Nelikopterin roottorit sekoittivat ilmaa mittarin ympärillä tehostaen kaasujen kulkua detektorille. Imupumpun avulla näytteenoton edustavuutta olisi voitu parantaa tehostamalla näytteen kulkua kaasuanturille, mutta se olisi lisännyt laitteiston massaa niin, ettei sitä olisi voitu enää lennättää käytössä olleella lennokilla. Järeämmällä kopterilla imupumpullisen mittalaitteen lennättäminen kuitenkin onnistuu. Joka tapauksessa passiivi-

sellakin mittarilla saatiin nopeasti tieto kaasupitoisuuksista. Varsinkin jälkianalysoitavaa tiedonkeruuta varten lennätys on nopea ja tehokas työkalu.

Roottorien tuottaman ilmavirran aiheuttamaa kaasujen laimenemista ei havaittu haitaksi. Nelikopteri laimentaa kaasuja eniten siirtyessään jyrkän pitoisuusrajan ylitse, mutta lentäessään keskellä suurta pitoisuutta se vain sekoittaa itse pitoisuuspilveä. Puolenkaan tunnin lennätyksen aikana kaasupitoisuudet eivät laimenneet niin valtavasti, että sen olisi voinut ajatella johtuvan roottoreiden aiheuttamasta kaasujen sekoittumisesta. Räjähdyksen jälkeen kasasta vapautuu kaasuja kuitenkin vielä hyvinkin pitkään, erityisesti kasaa liikuteltaessa lastauksen aikana.

Lennättämällä kaasumittaria voidaan arvioida myös kaasupitoisuuksien laimenemista pystysuunnassa. On mahdollista, että kaasupitoisuudet eivät koho kovinkaan korkealle ylöspäin inversion vuoksi. Avolouhoksen yläpuolella voi maanpinnan tasolla olla lämpimämpi ilmakerros, johon räjäytyskaasut eivät enää nouse jäähtyttyään räjäytysten jälkeen. Tällöin haitallisen korkeita kaasupitoisuuksia voi jäädä asumaan avolouhokseen tavallista pidemmäksi aikaa. Tällaisessa tilanteessa lennokkimittauksella saadaan tietoa siitä, ettei pitoisuuksien laimenemista tapahdu ja tämä voidaan huomioida arvioitaessa työskentelyturvallisuutta alueella.

Monikaasumittaus mahdollistaa muiden kaasujen tunnistamisen korkeiden hiilimonoksidipitoisuuksien keskeltä. Jalan kuljettaessa alueelle ei voida mennä ennen kuin hiilimonoksidipitoisuus on laskenut turvalliselle tasolle. Lennättämällä mittaria keskellä korkeaa pitoisuutta voidaan sieltä kuitenkin jo aiemmin tunnistaa esimerkiksi rikkivetyä ja siihen voidaan reagoida aiemmin.

Vaikka kokoonpanon kaasumittari ei analytiikkaan ole kehitetty, saatiin sillä kerättyä kaasumittausaineistoa, josta pystyttiin tulkitsemaan räjäytyskaasujen käyttäytymistä kasan yllä. Passiivinen näytteenotto ja nelikopterin rottorien vaikutus kaasujen sekoittumiseen luovat mittaukseen paljon virhelähteitä. Jos kuitenkin ei tavoitella analyttistä tarkkuutta, varsinkaan räjäytysten jälkeisessä työskentelyturvallisuuden arvioinnissa, henkilökohtaisen etäluettavan suojalaitteen käyttö kaasupitoisuuksien arviointiin on jo varsin hyvä. Verrattaessa Villan ym. (2016) suorittamiin tutkimuksiin rottoreiden aiheuttamasta kaasujen

laimentumisesta voidaan räjäytyksen jälkeisten kaasupitoisuuksien määrittämistä pitää kohtuullisen luotettavana.

Blacklinen selainsovelluksen käyttö kannettavalla tietokoneella oli kömpelöä lennätysten yhteydessä. Matkapuhelimen näyttö oli liian pieni eivätkä kaikki tiedot näkyneet näytöllä. Tabletin näytössä kaikki laitteen antamat tiedot näkyivät helposti ja se oli riittävän pienikokoinen mukana kuljetettavaksi. Hälytysten kuitaaminen onnistui helposti kaikilla päätelaitteilla.

Riittävä 3G-yhteys on tärkeä työssä käytetyn kaasumittarin tiedonsiirrolle. Avolouhoksessa on paikoittain katvealueita, jolloin selainsovelluksessa havaittiin tiedonsiirtokatkoksia. Koelennätysten aikana tiedon päivittymisviiveeksi päätelaitteelle asti havaittiin noin 30 – 60 sekuntia. Suureen viiveeseen pääsyynä on mittalaitteen tietojen kulkeutuminen palvelimen kautta päätelaitteelle.

Tiedonsiirron nopeuteen saattaa vaikuttaa myös se, että räjäytysten aikana tuotantokoneiden operaattorit voivat pitää taukoja, jolloin heillä on aikaa älypuhelimensa käytölle. On mahdollista, että matkapuhelinverkon tukiasemat ruuhkautuvat käyttäjäpiikin vuoksi, mikä kasvattaa tiedonsiirtoviivettä kaasumittarilta päätelaitteelle asti.

Lennätysten aikana havaittiin haasteelliseksi huomion jakaantuminen kolmeen kohteeseen. Lennättäjän piti tarkkailla samanaikaisesti visuaalisen yhteyden päässä lentävää lennokkia, lennokin kauko-ohjainta ja päätelaitetta, jolta kaasutietoja seurattiin. Kaasumittaustiedon olisi ollut tarkoitus palvella räjäytystyönvalvojaa. Kuitenkaan ei onnistuttu saamaan aikaiseksi lennätyskertaa, jolloin räjäytystyönvalvoja olisi tarkkaillut päätelaitteelta kaasumittaustietoja lennättäjän keskittyessä lennättämiseen. Näin ei myöskään päästy arvioimaan aikasäästöä ja mahdollisen tuotannon käynnistymisen nopeutumista räjäytyksen jälkeen, koska räjäytystyönvalvojaa ei onnistuttu ottamaan mukaan kaasutiedon tarkkailuun.

Lennätettävän kaasumittauksen hyödyntäminen rajoittuu päivänvalon ajalle, jotta ehto visuaalisesta yhteydestä lennokkiin täyttyy. Joka tapauksessa räjäytykset pyritään suorittamaan valoisana aikana, jotta panostushenkilöstöllä on mahdollisuudet seurata ja arvioida räjäytyksen onnistumista. Kokenut panostaja

osaa arvioida jo pelkkää räjähdystapahtumaa katsomalla varsin hyvin, kuinka hyvin räjäytys onnistuu.

Joulu- ja tammikuun aikana pakkaspäivinä huomattiin LEL-anturin ilmoittamia noin 4 – 6 % metaanipitoisuuksia. Nämä lukemat ilmaantuivat sellaisen tilanteen aikana, kun panostaja siirtyi näköalapaikalta avolouhokseen tarkastamaan räjäytyksen onnistumista. Siirtyminen ulkoilmasta ajoneuvoon ja jonkin ajan kulluttua taas takaisin ulkoilmaan todennäköisesti aiheutti kosteuden tiivistymistä infrapunadetektorille, mikä synnytti virheellisen pitoisuuden. Sähkökemiallisilla antureilla ei samoissa tilanteissa vastaavaa ilmiötä havaittu. Esimerkiksi virheellisen LEL-havainnon yhteydessä rikkivetyanturin lukema ei vastaavalla tavalla noussut.

Kaasumittaustiedon jälkianalyysia varten oli erityisen hyvä, että mittalaite keräsi oman paikkatietonsa ja satoi sekä kaasumittaustiedon että paikkatiedon aikaleimoihin. Näiden avulla tiedot voitiin yhdistää ja niitä voitiin analysoida. Mikäli kaasumittari ei omaa paikkatietoa kerää, sen käyttöliittymä olisi hyvä integroida lennokin järjestelmään, jotta paikkatiedon liittäminen kaasumittaustulokseen voidaan tehdä luotettavasti. Lennokit tavallisesti keräävät oman lokitiedostonsa paikkatietoineen, mutta kahden toisistaan erillisen järjestelmän aikaleimat voivat poiketa toisistaan, jolloin tietojen yhdistäminen ei ole enää luotettavaa.

Kaasumittaria käytettiin opinnäytetyön tekemisen aikana tehtäessä myös henkilökohtaisena suojaimena, jona sitä varsinaisesti markkinoidaankin. Henkilökohtaisena suojaimena laite toimi moitteetta, vaikka tiedonsiirtoyhteys palvelimelle olisikin sillä hetkellä ollut heikko. Käyttäjiltä saatu palaute kertoi kaasumittauksen nopeasta mittausvasteesta verrattuna toiseen käytössä olleeseen henkilökohtaiseen kaasumittariin.

Järeämmällä multikopterilla olisi ollut mahdollista onnistua lennättämään kaasumittaria useammin. Käytössä ollut yhdistelmä oli suorituskykynsä rajoilla erityisesti lämpötilan laskiessa ja sen hallittavuus heikkeni huomattavasti kokoonsa nähden suuren kuorman vuoksi. Suurempikokoisella kuusikopterilla olisi ollut mahdollista kantaa suurempaa hyötykuormaa, jolloin työssä käytetty kaasumittari ei olisi niin voimakkaasti vaikuttanut laitteiston hallittavuuteen. Lisäksi kuusikopteri olisi voinut kestää tuuliolosuhteita paremmin kuin työssä käytetty pieni-

kokoinen nelikopteri. Työssä käytetyn laitteiston suorituskyky ei riittänyt myöhäisen syksyn ja alkutalven olosuhteissa ainoakaan onnistuneeseen lennätukseen näköalapaikalta ammutun räjäytyskentän ylle. Valtaosaa miehittämättömistä lennokeista ei tosin ole suunniteltu talvilennätyksiin, joten olosuhteet olisivat vaikuttaneet kaikenlaisiin laitekokoonpanoihin lennokkityyppiin katsomatta.

Joka tapauksessa menetelmän käyttökelpoisuuden arvioimiseksi hyödynnettävää mittaustietoa ja lennätyskokemusta kertyi valitettavan vähäisesti. Koska räjäytystyönvalvojille ei saatu mahdollisuutta tarjota tietoa kaasupitoisuuksista räjäytystyöskentelyn aikana näköalapaikalle, ei opinnäytetyön tavoitetta menetelmän käytöstä räjäytystyöskentelyn tehostamiseksi päästy arvioimaan ollenkaan. Menetelmän käyttökelpoisuuden arviointi olisi perustunut kokemusten keräämiseen räjäytystyönvalvojlta, mutta näiden puuttuessa opinnäytetyössä päästiin arvioimaan vain lennätettävän kaasumittauksen tekninen onnistuminen.

Lennätettäessä kaasumittaria olisi haluttu tutkia samalla mahdollisuutta tarkastaa räjäytettyjä kenttiä lennokin videoyhteyden avulla. Valitettavasti lennätysten epäonnistumisten vuoksi videokuvatarkastusta ei päästy kokeilemaan kaasumittauskerroilla. Lisäksi lennättäminen ja kaasupitoisuuslukeman ja kameran kuvan seuraaminen yhtäaikaaisesti olisi voinut tarpeettoman haastavaa. Kameran käyttö räjäytysten onnistumisen arvioinnissa olisi kuitenkin hyvä jatkotutkimusaihe. Samoin voitaisiin tutkia, kuinka miehittämätöntä lennokkia voidaan hyödyntää paikannustagien paikallistamisessa, vähentäen työntekijöiden tarvetta liikkua jalan kasan yllä.

Miehittämätöntä multikopteria voitaisiin hyödyntää myös maanalaisissa kaivoksissa. Kaivosmittausta palvelevien kiintopisteiden ja navigointiin käytettävien beaconien avulla voitaisiin ohjelmoida reitti, jota lennokki ohjelmoidusti lentäisi. Maanalaisen lennätysten haasteina ovatkin ohjaussignaalin vieminen lennokille kohteisiin, joihin suoraa radioyhteyttä ei ole sekä puuttuva gps-yhteys, jota lennokit tavallisesti paikantamiseen käyttävät. Näiden haasteiden ratkaisemisella miehittämättömien lennokkien käyttöaluetta ja -sovelluksia voitaisiin laajentaa suuresti.

LÄHTEET

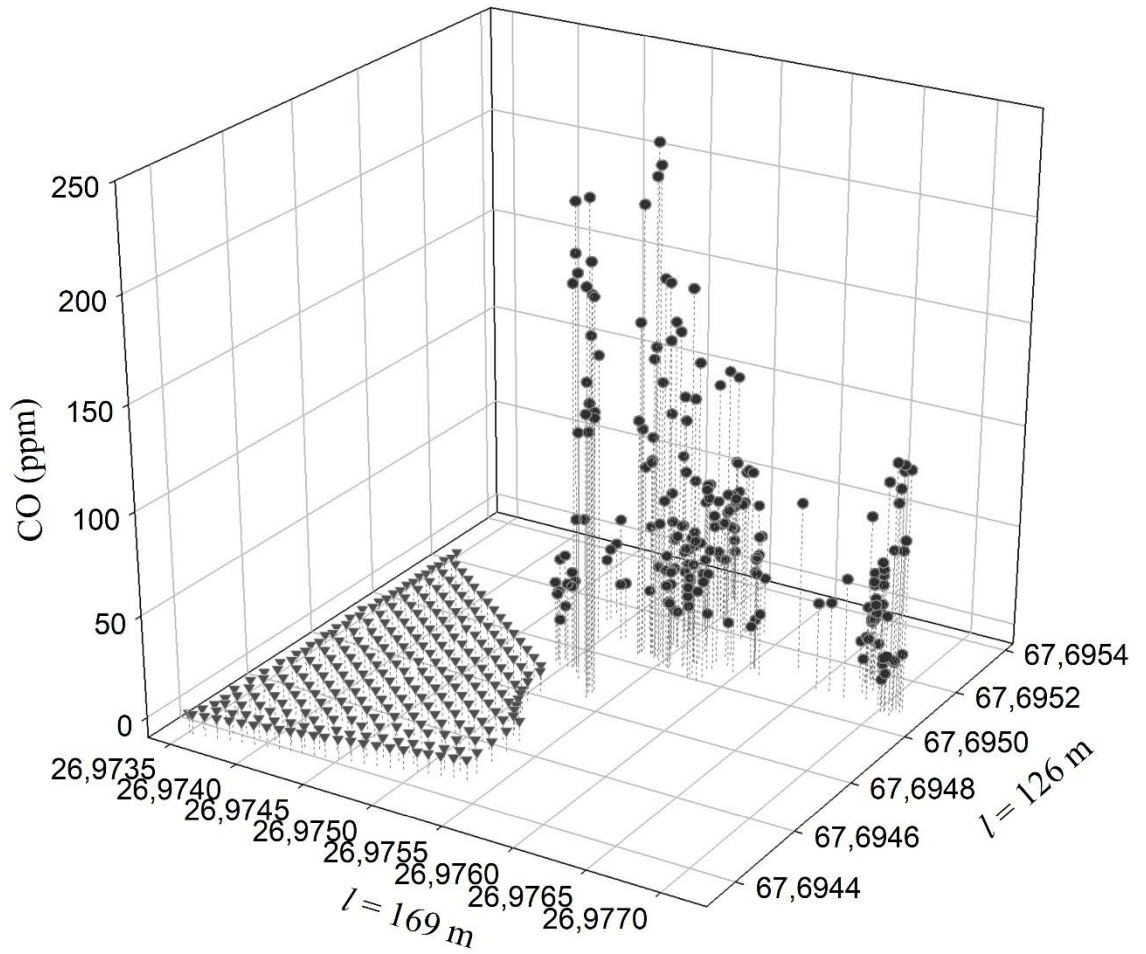
- Alvarado, M., Gonzales, F., Fletcher, A. & Doshi, A. 2015. Towards the Development of a Low Cost Airborne Sensing System to Monitor Dust Particles after Blasting at Open-Pit Mine Sites. *Sensors* 15, 19667-19687. doi:10.3390/s150819667
- Blackline Safety. 2017. G7c Datasheet for resellers.
- Brusila, J. 2018. Kevitsan kaivos: yleisesittely.
- Capone, S., Forleo, A., Fransisco, L., Rella, R., Siciliano, P., Spadavecchia, J., Presicce, D. S. & Taurino, A. M. 2003. Solid State Gas Sensors: State of the Art and Future Activities. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* Vol. 5, 1335 - 1348.
- Dibley, J. 2018. Photo of emulsion. Sähköposti soile.saaski@orica.com 20.12.2018. Tulostettu 15.1.2019.
- DJI. 2017. Phantom 4 Pro/Pro+ User Manual.
- Frantz, E. & Jefferys, S. 2018. Automated Drones - A Giant Step in the Mining Value Chain. *Airobotics*.
- Henderson, R. 2014. How Infrared Sensors Measure LEL Combustible Gas. *Industrial Safety & Health News*. Viitattu 29.11.2018. <https://www.ishn.com/articles/99428-how-infrared-sensors-measure-lel-combustible-gas>
- HTP-arvot 2018: Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. 2018. Helsinki: Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö.
- Huttunen, M. 2017. UAV-MEMO-projekti, osa II. Kevyiden miehittämättömien ilma-alusten käytön sääntely malminetsintä- ja kaivostoiminnassa. Espoo: Geologian tutkimuskeskus.
- Karinen, T. 2017. Johdanto. Teoksessa Salmirinne, H., Hyvönen, E., Karinen, T., Konnunaho, J., Kurimo, M., Middleton, M., Niiranen, T., Panttila, H., Pasanen, A. & Turunen, P. UAV-MEMO-projekti, osa I. Miehittämättömät ilma-alukset malminetsinnässä ja kaivostoiminnassa. Espoo: Geologian tutkimuskeskus, 8 - 11.
- Konnunaho, J., Karinen, T. & Salmirinne, H. 2017. Asiakastarpeet ja mittauspalvelujen tarjonta. Teoksessa Salmirinne, H., Hyvönen, E., Karinen, T., Konnunaho, J., Kurimo, M., Middleton, M., Niiranen, T., Panttila, H., Pasanen, A. & Turunen, P. UAV-MEMO-projekti, osa I. Miehittämättömät ilma-alukset malminetsinnässä ja kaivostoiminnassa. Espoo: Geologian tutkimuskeskus, 17 - 19.
- Liikenteen turvallisuusvirasto. 2017. Määräys OPS M1-32: Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen.

- Nieminen, T. 2018. Orica Finland Oy. Vuoroesimiehen haastattelu 19.12.2018.
- Näsi, J. 2018. Pikaiset kysymykset oppariin. Sähköposti soile.saaski@orica.com 7.12.2018. Tulostettu 7.12.2018.
- Näsi, J. 2019. Opinnäytetyö asiasisällön tarkasteluun. Sähköposti Soile.Saaski2@edu.lapinamk.fi 4.2.2019. Tulostettu 6.2.2019.
- OVA-ohje: Hiilimonoksidi. 2015. Työterveyslaitos. Ladattu 17.12.2018.
- Persson, P.-A., Holmberg, R. & Lee, J. 1994. Rock Blasting and Explosives Engineering. CRC Press LLC.
- Rojas, J. 2014. Development of Gas Sensing Technology for Ground and Airborne Applications Powered by Solar Energy: Methodology and Experimental Results. Queensland University of Technology. Väitöskirjatutkimus.
- Salmirinne, H. & Projektiryhmä. 2017. UAV-alustalle soveltuvista menetelmistä. Teoksessa Salmirinne, H., Hyvönen, E., Karinen, T., Konnunaho, J., Kurimo, M., Middleton, M., Niiranen, T., Panttila, H., Pasanen, A. & Turunen, P. UAV-MEMO-projekti, osa I. Miehittämättömät ilma-alukset malminetsinnässä ja kaivostoiminnassa. Espoo: Geologian tutkimuskeskus, 12 - 17.
- Vattipalli, M., Gajelli, C., Subramanian, K., Nayak, S. & Sinha, R. 2000. Orica Explosives Technology Pty Ltd. Method of Manufacture of Emulsion Explosives. USA US6027588.
- Villa, T., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L. & Gonzales, F. 2016. Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. Sensors 16. doi:10.3390/s16122202
- Vuolio, R. & Halonen, T. 2012. Räjätystyöt. 2. päivitetty painos. Helsinki: Suomen rakennusmedia.
- Zhang, Z.-X. 2016. Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications. Elsevier.

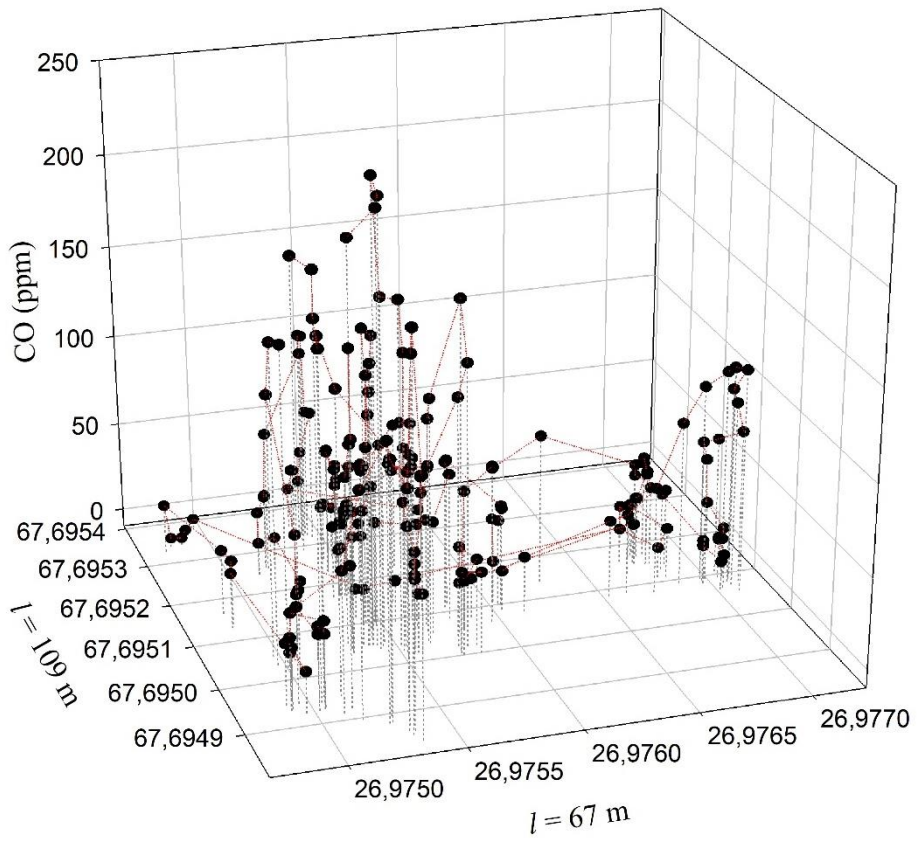
LIITTEET

- Liite 1. Kaasupitoisuuskuvaajat lennätyksestä kentällä C1138R014
- Liite 2. Kaasupitoisuuskuvaajat lennätyksestä kentällä C1126R001
- Liite 3. Kaasupitoisuuskuvaajat lennätyksestä kentällä B1030M002
- Liite 4. Kaasupitoisuuskuvaajat eri lennätyskorkeuksilla

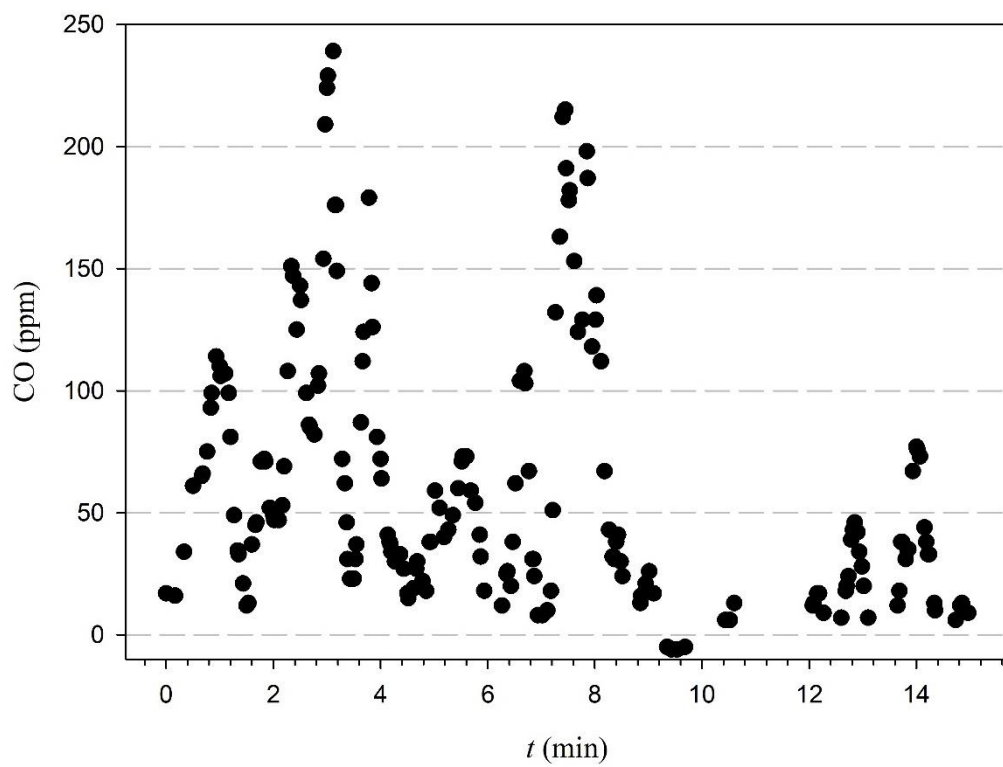
C1138R014

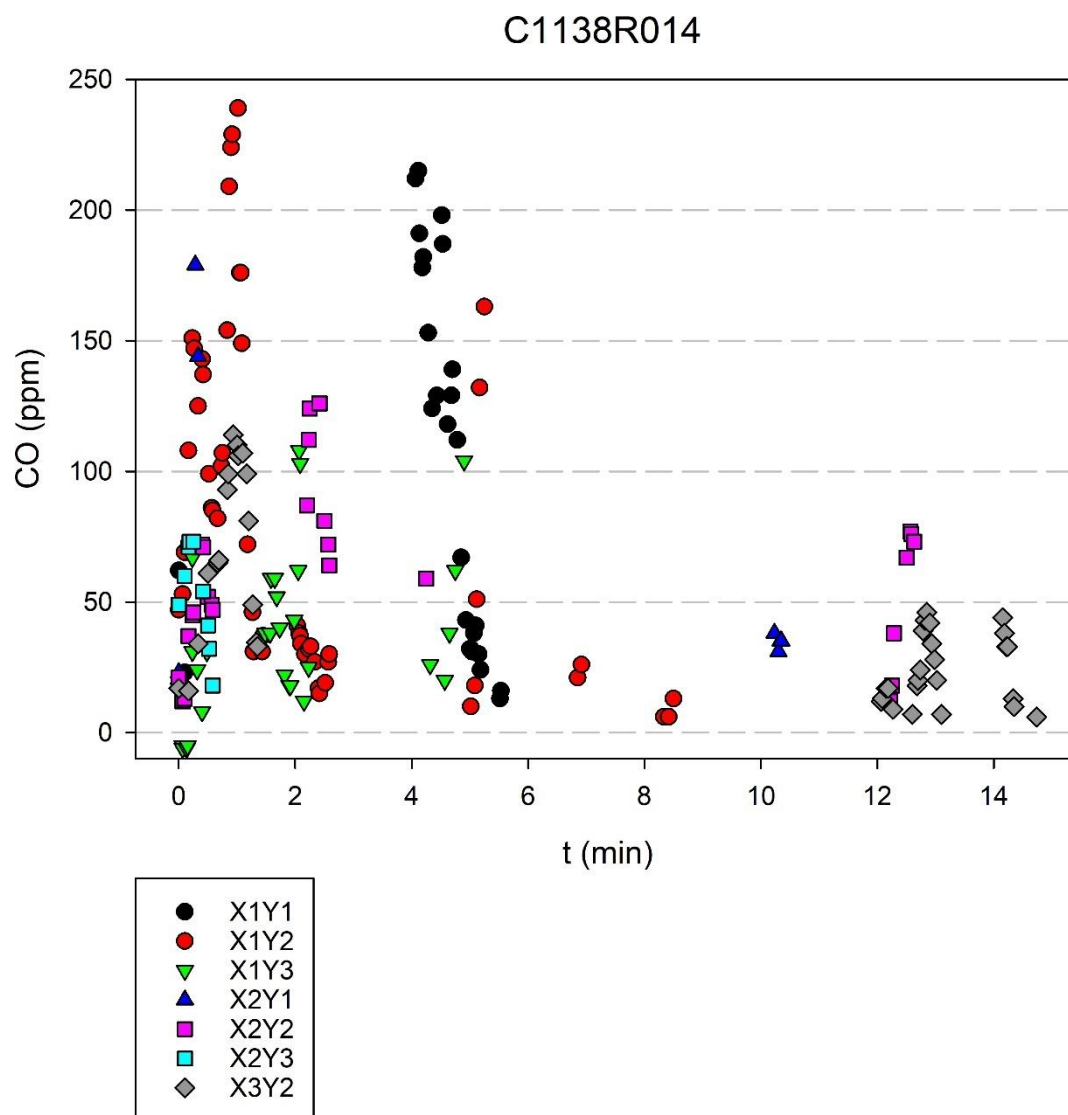


C1138R014

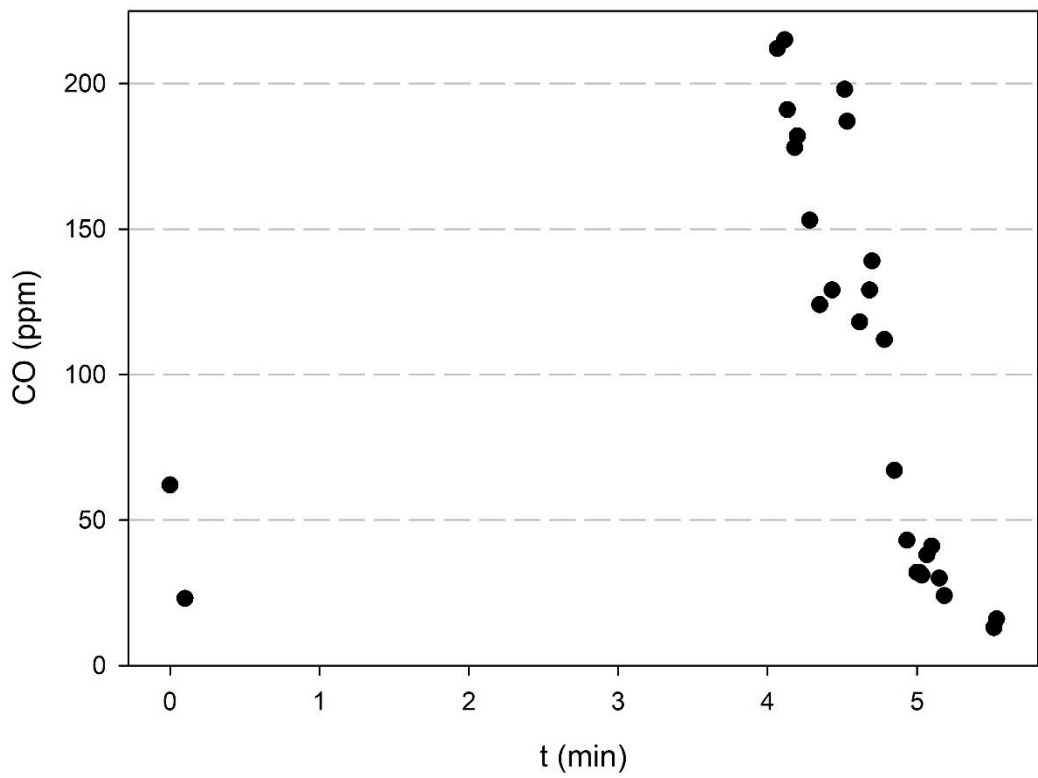
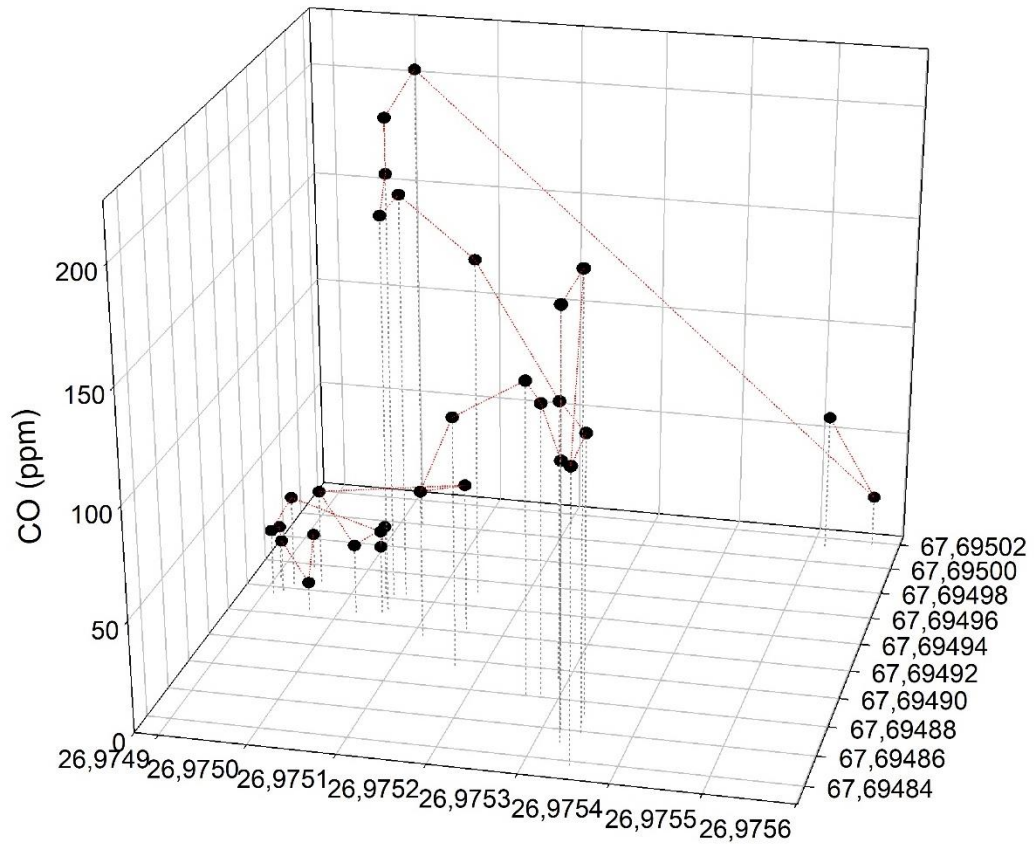


C1138R014

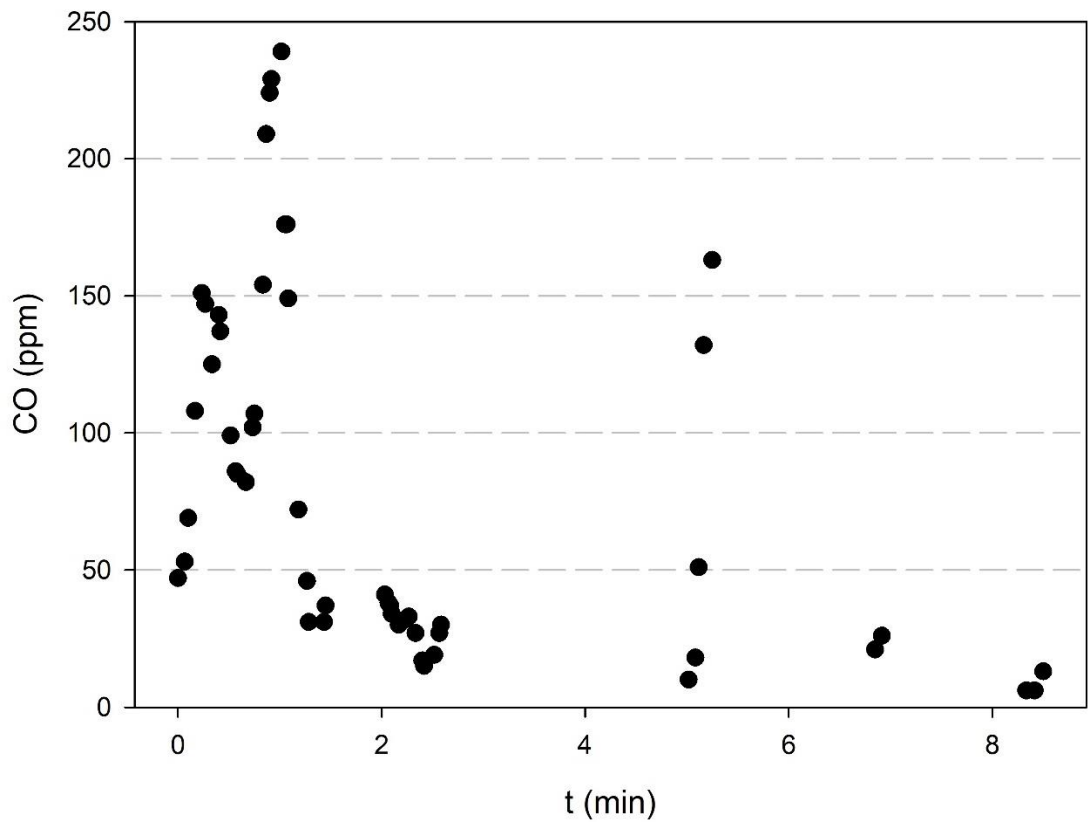
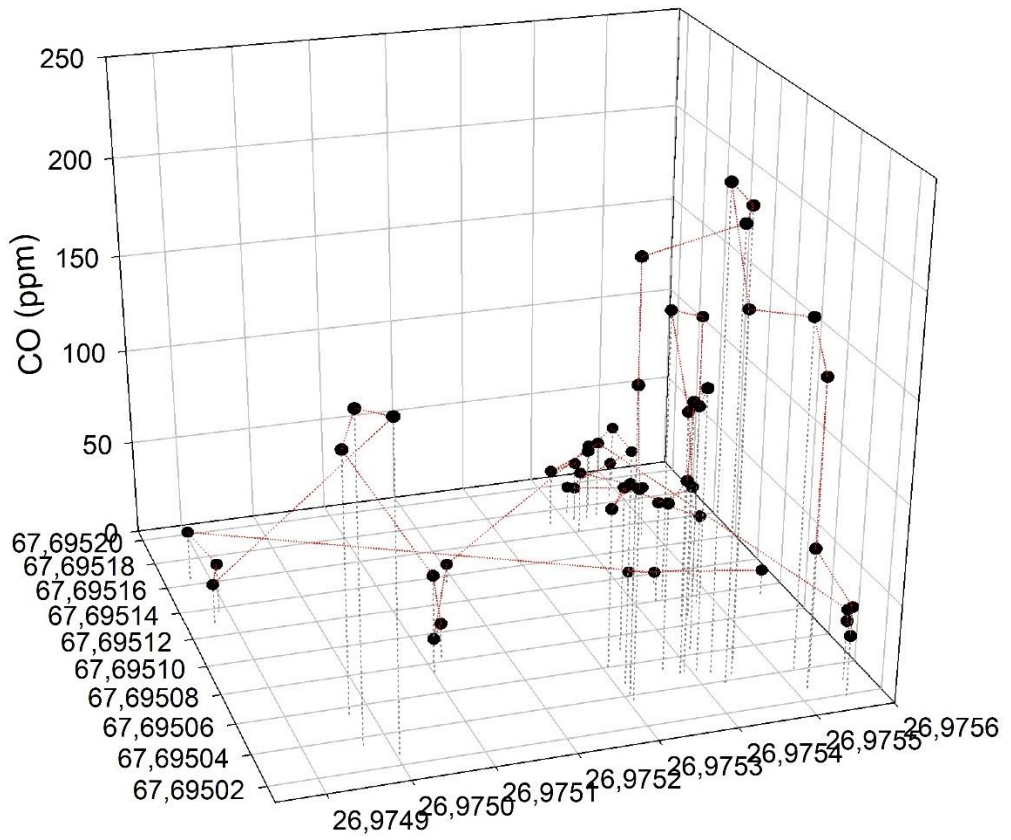




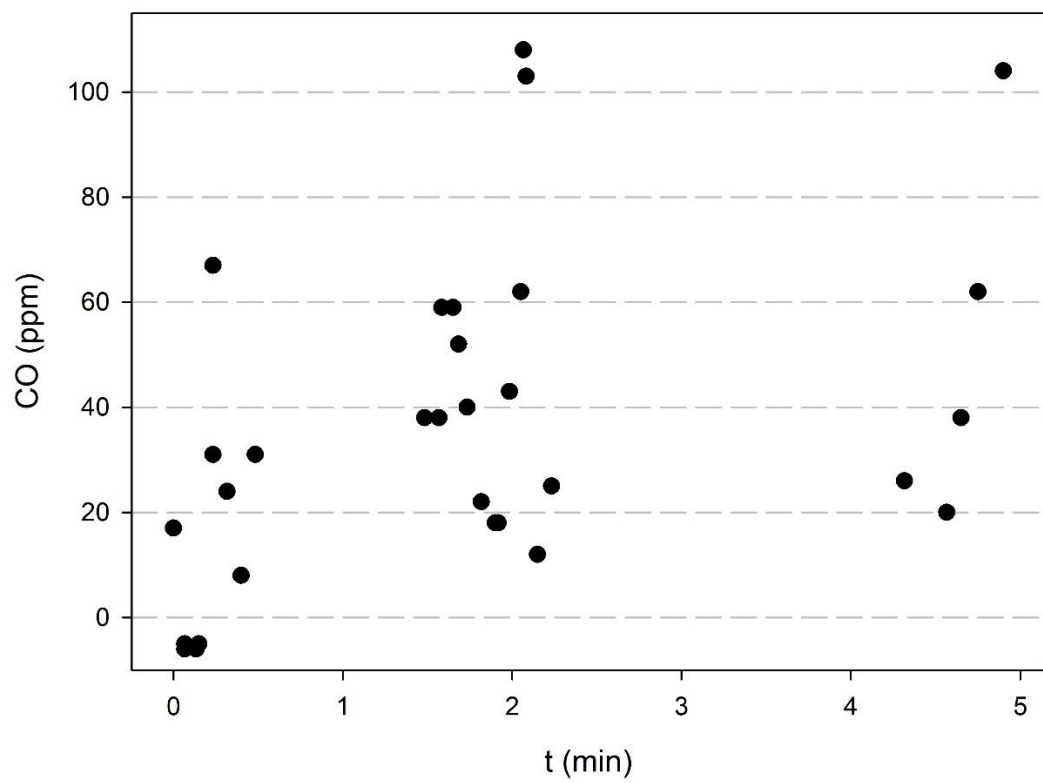
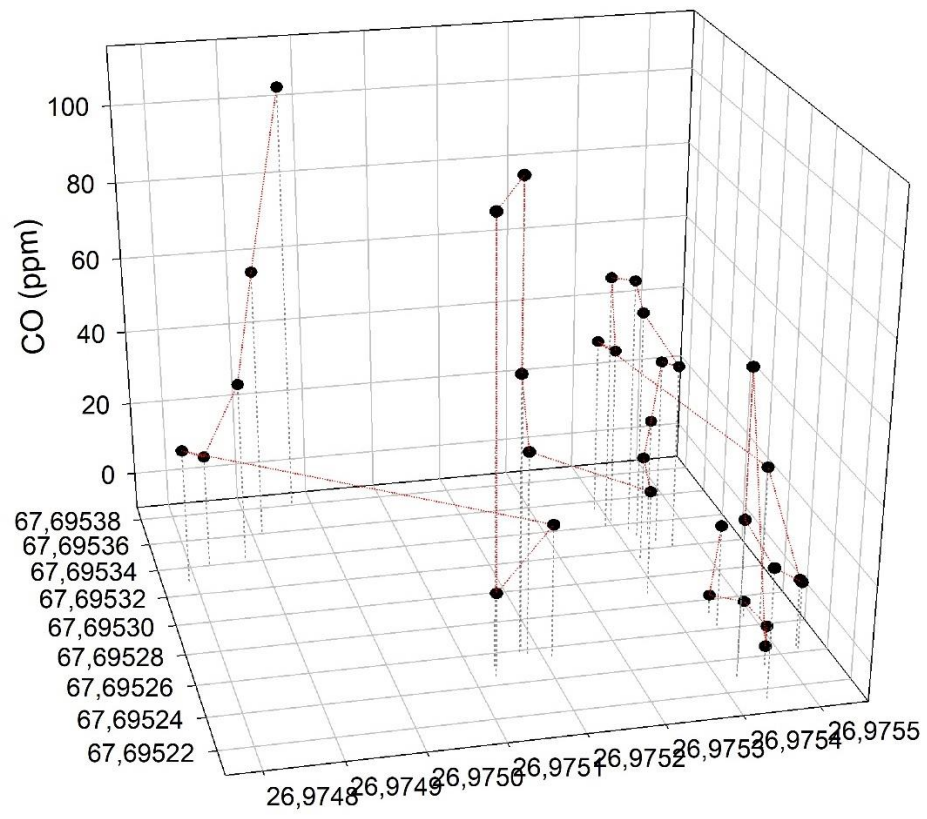
C1138R014 X1Y1



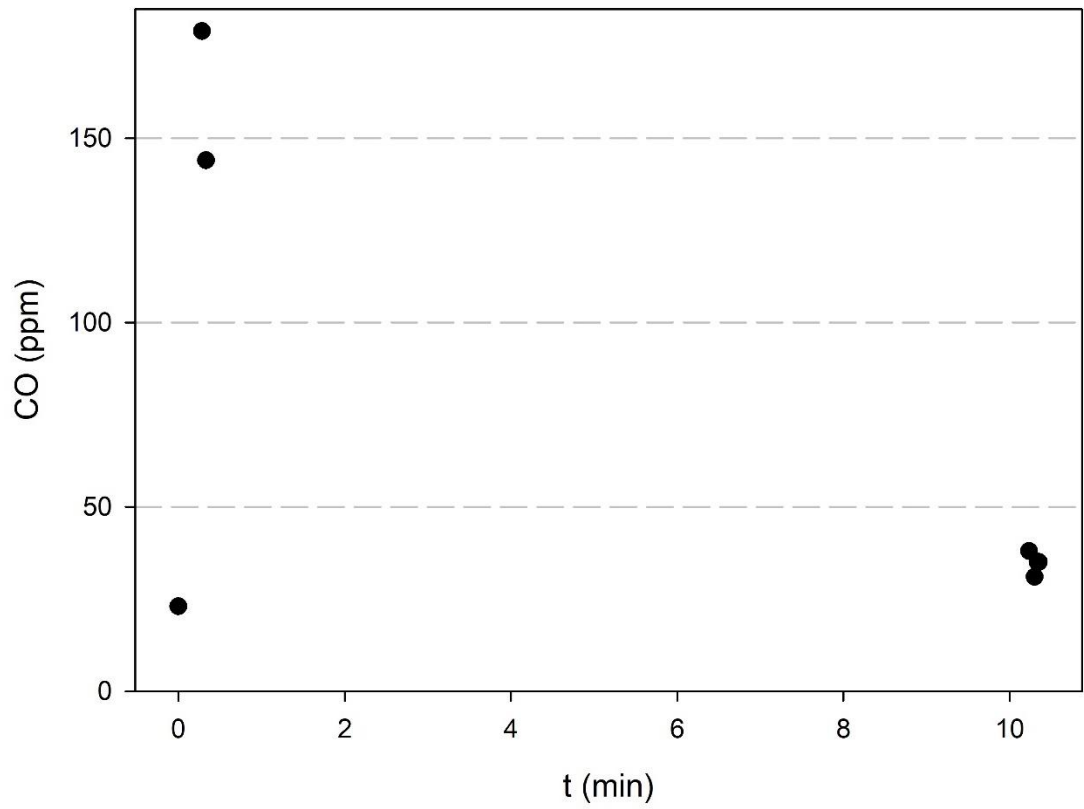
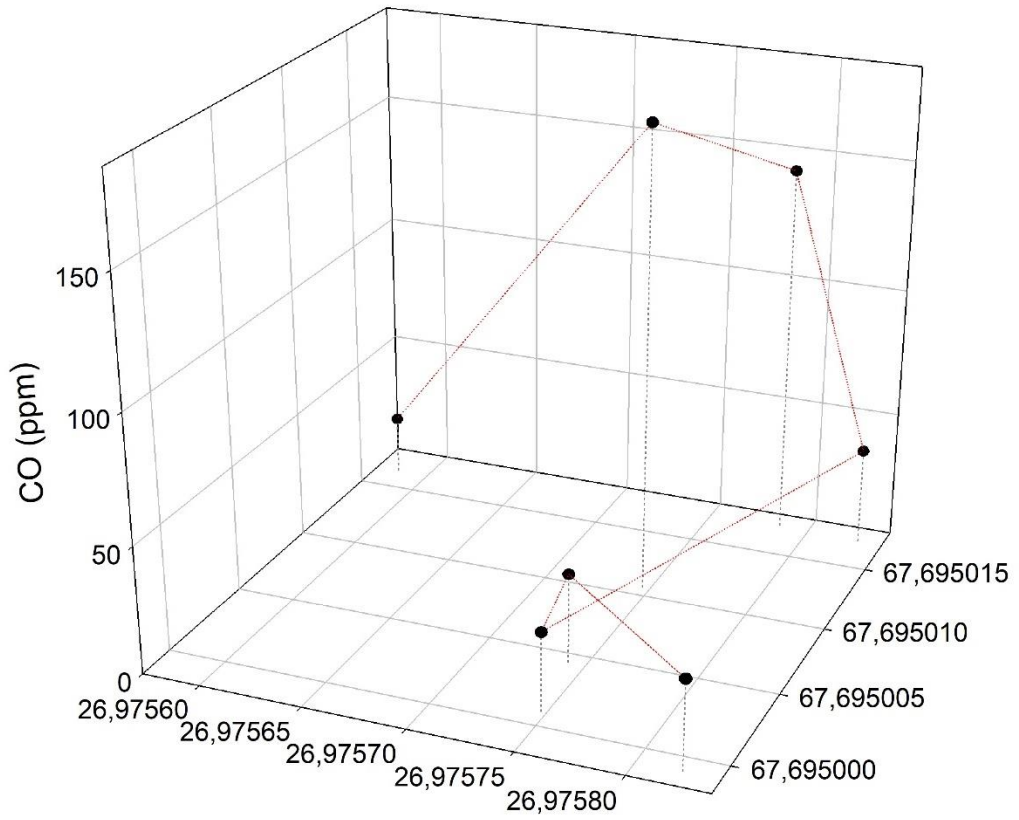
C1138R014 X1Y2



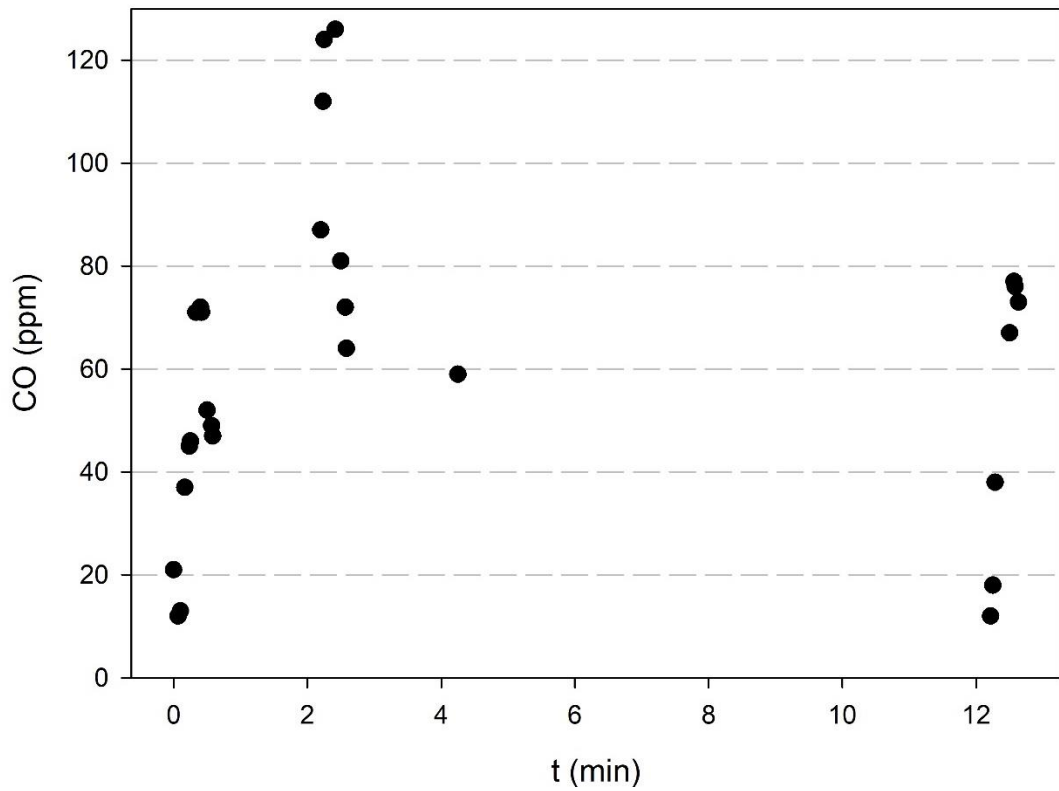
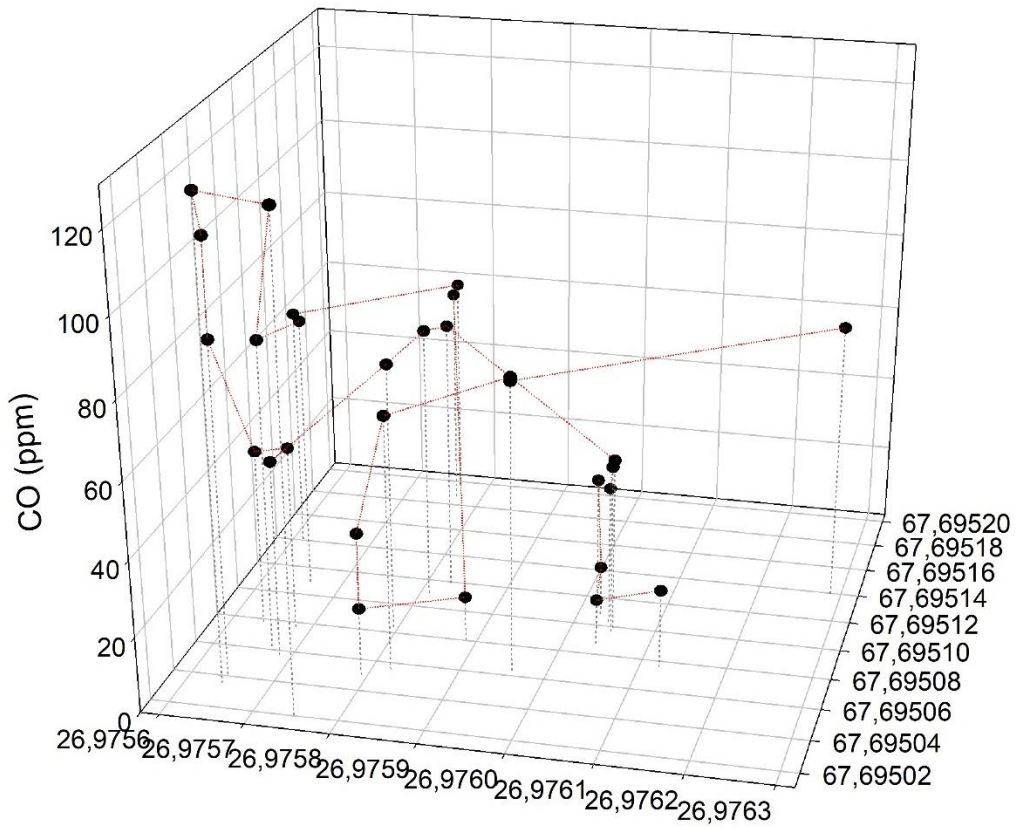
C1138R014 X1Y3



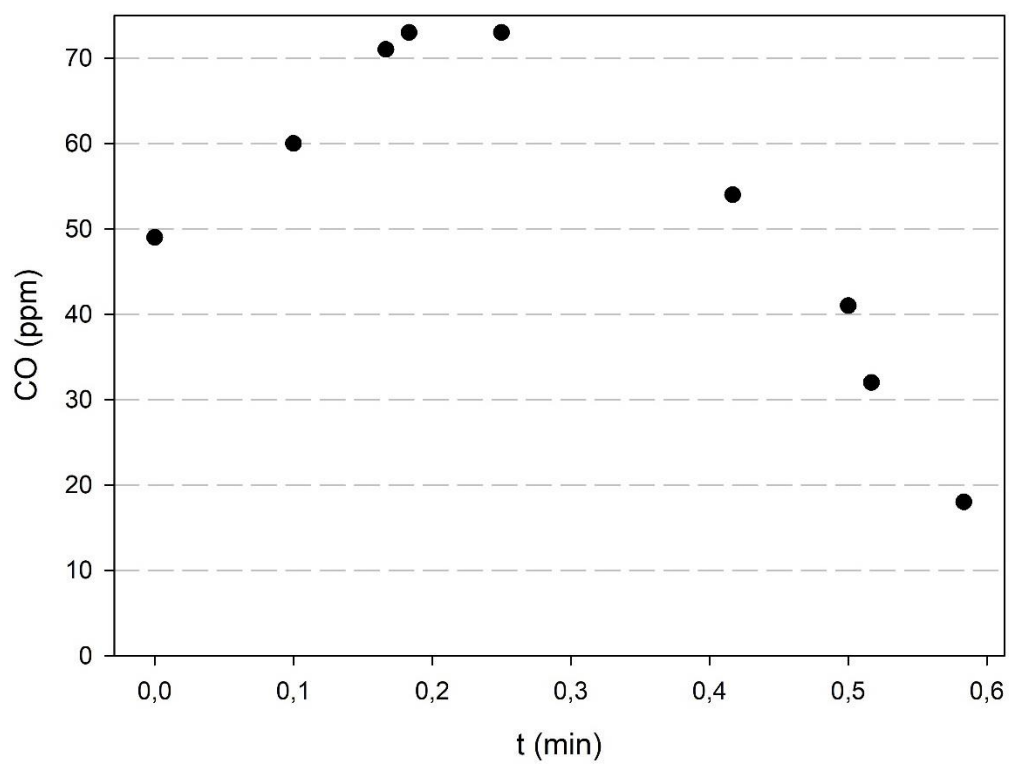
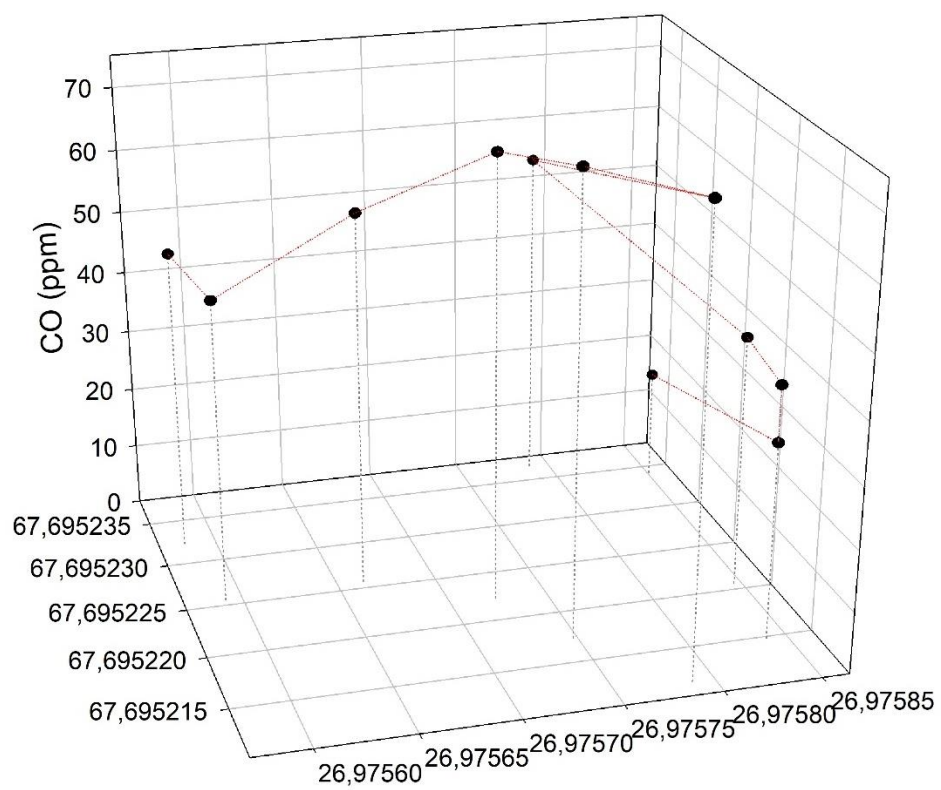
C1138R014 X2Y1



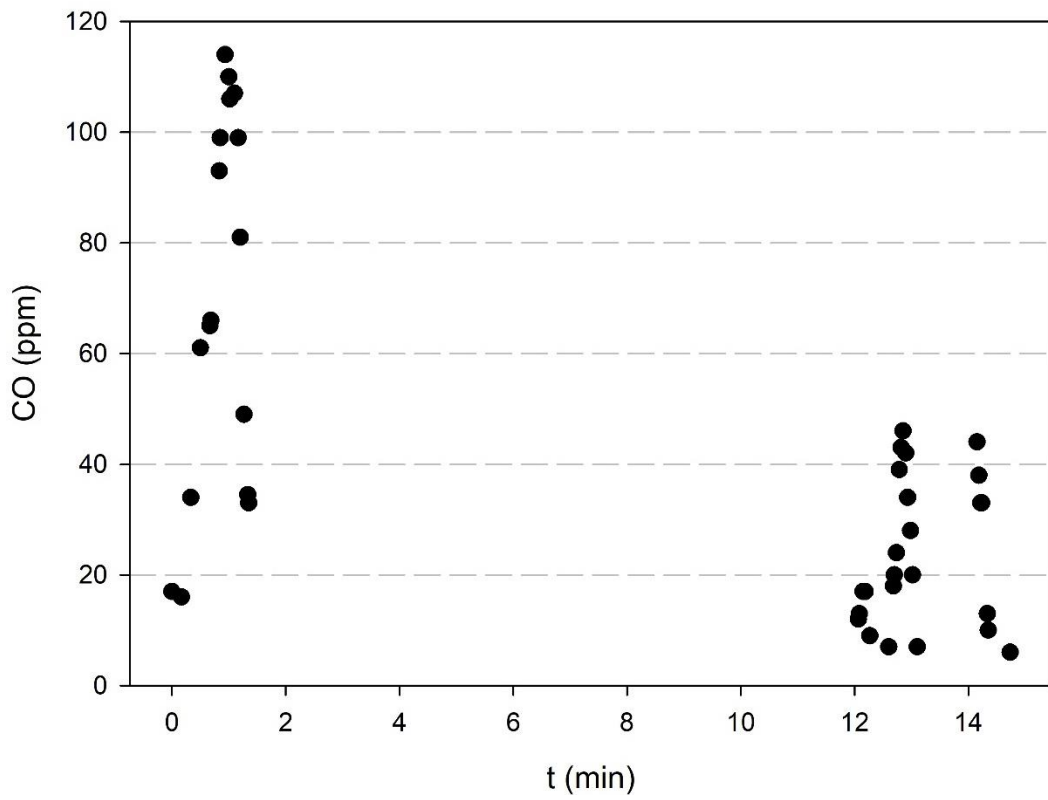
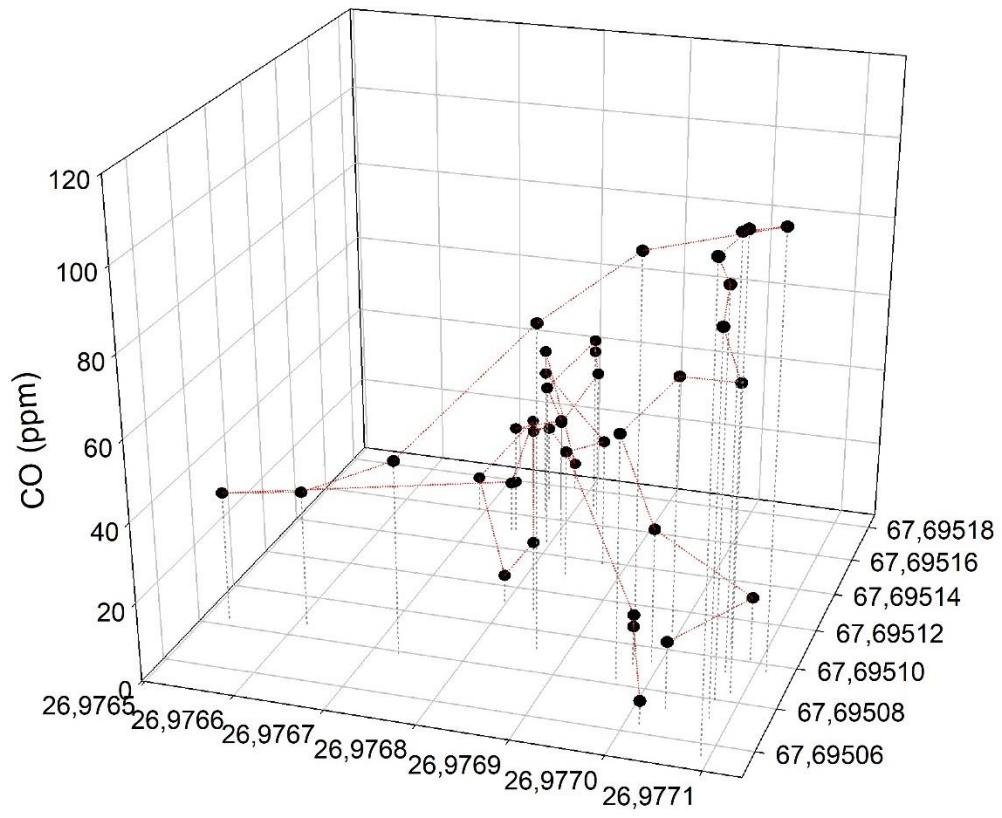
C1138R014 X2Y2



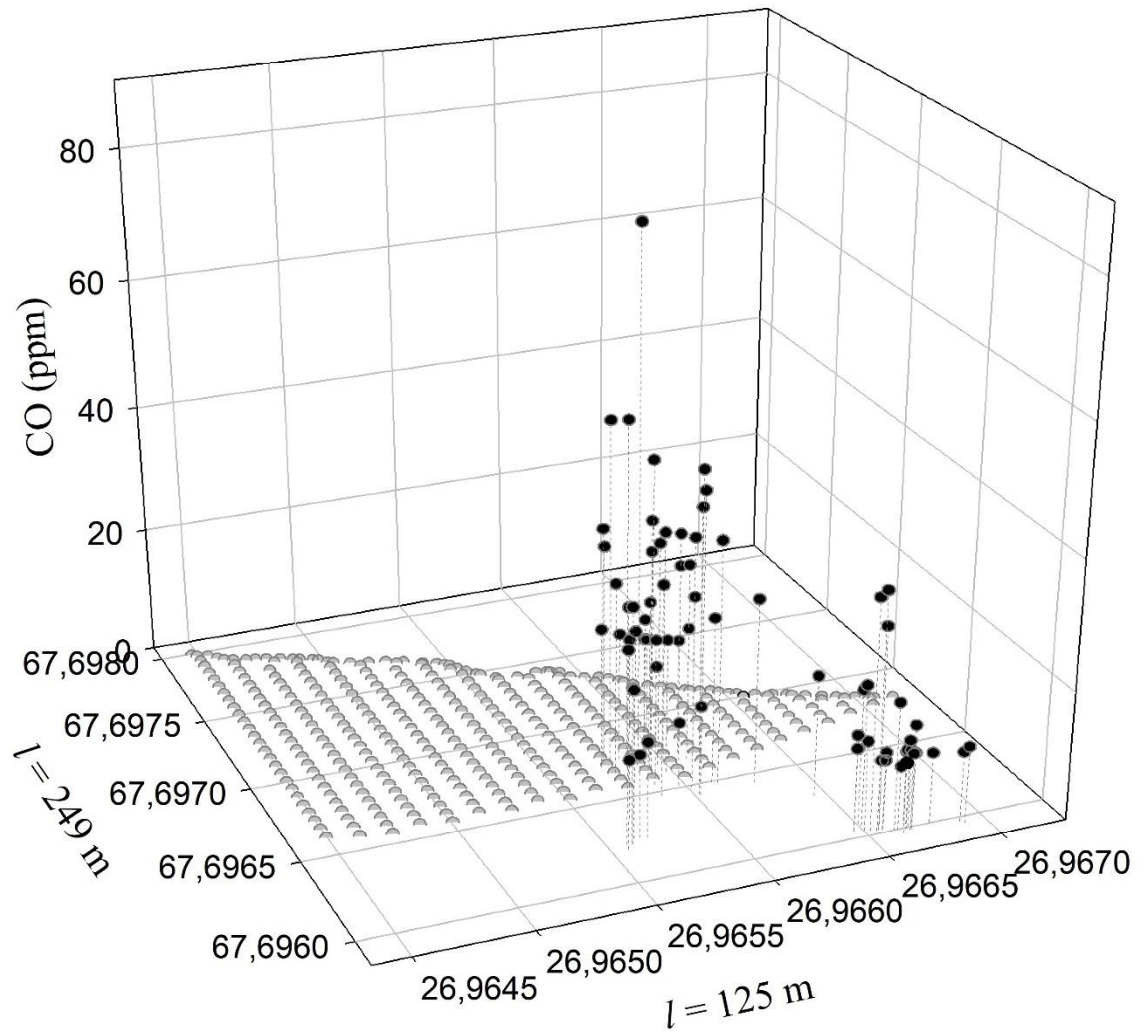
C1138R014 X2Y3



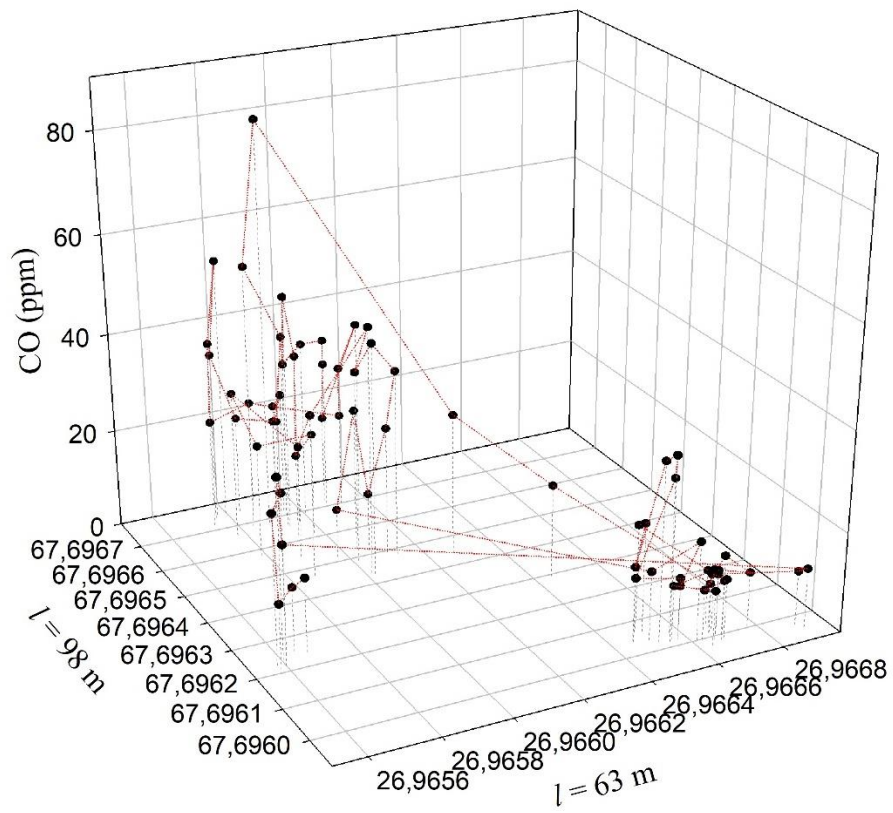
C1136R014 X3Y2



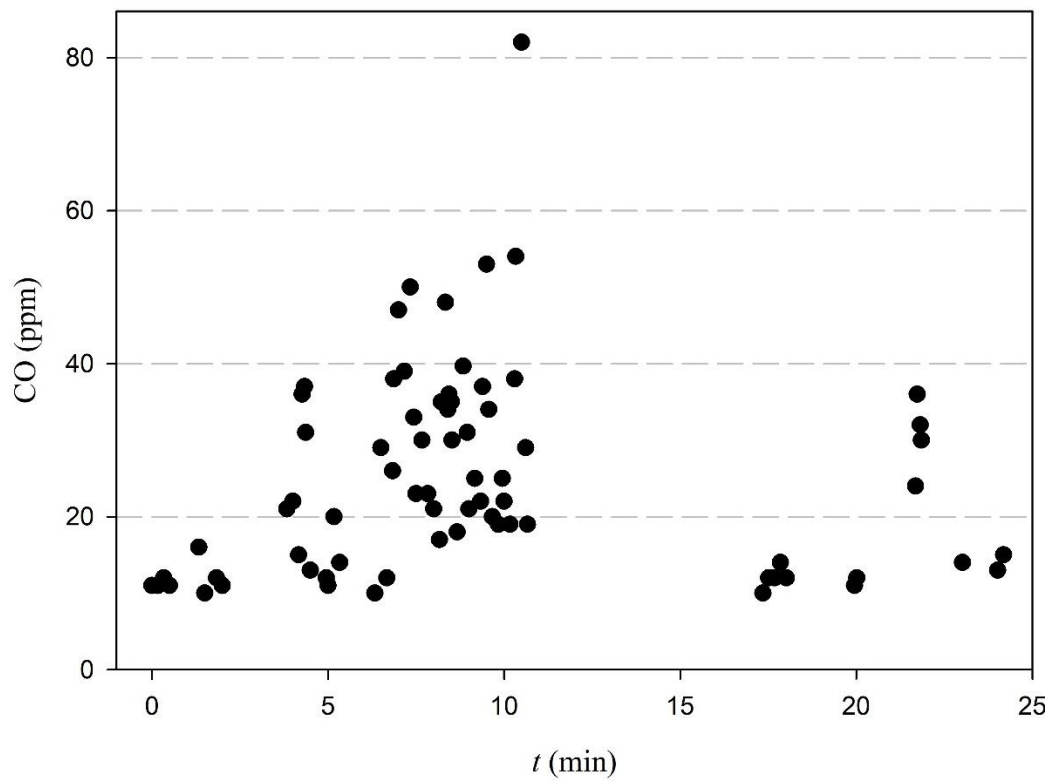
C1126R001



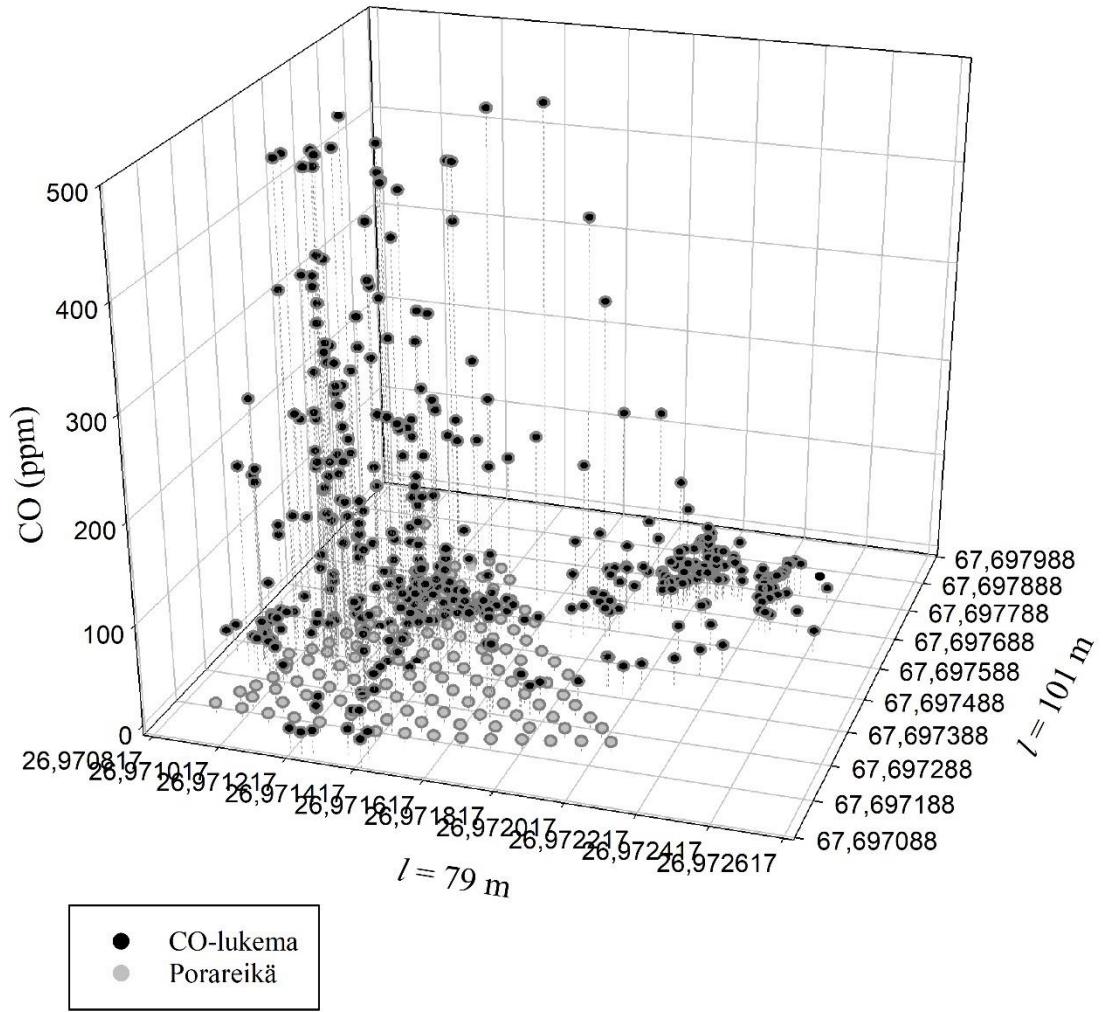
C1126R001



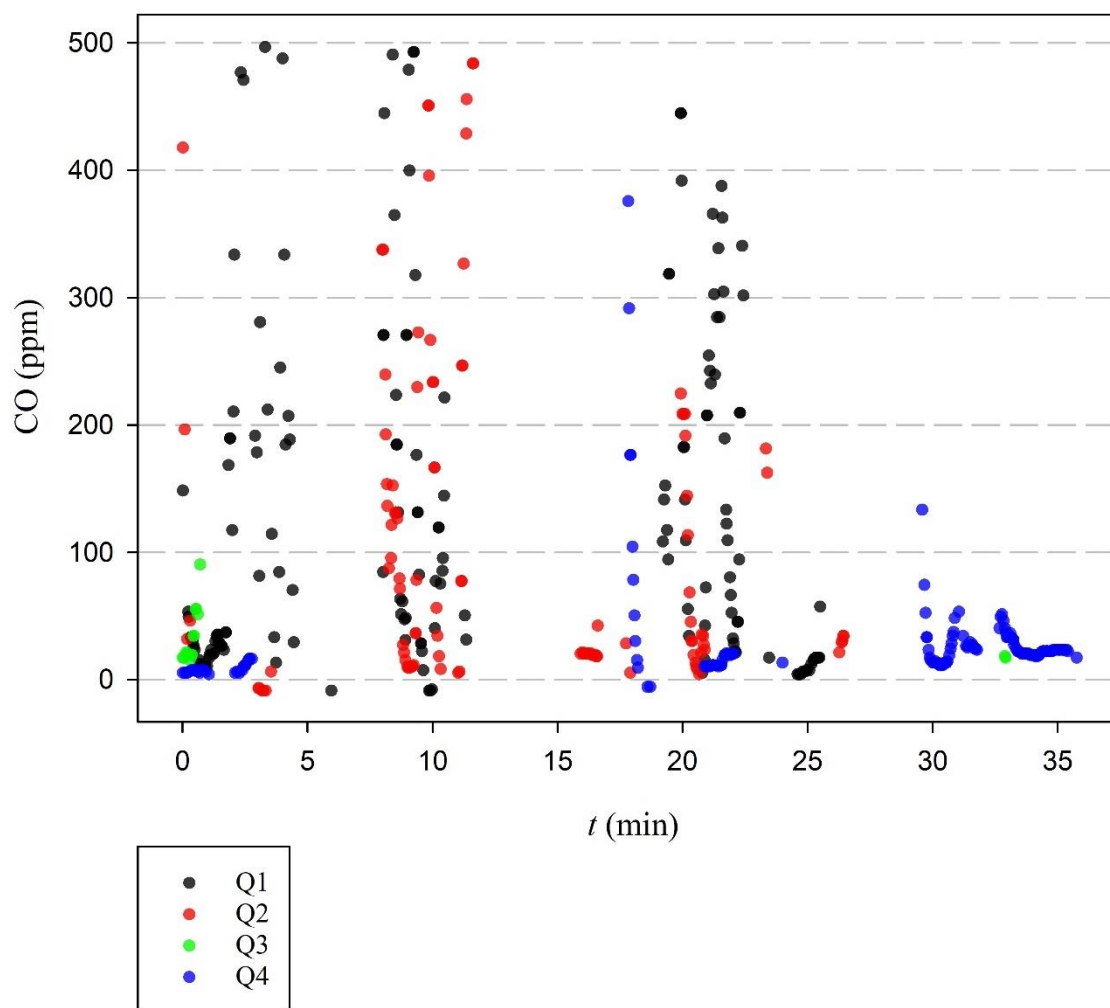
C1126R001



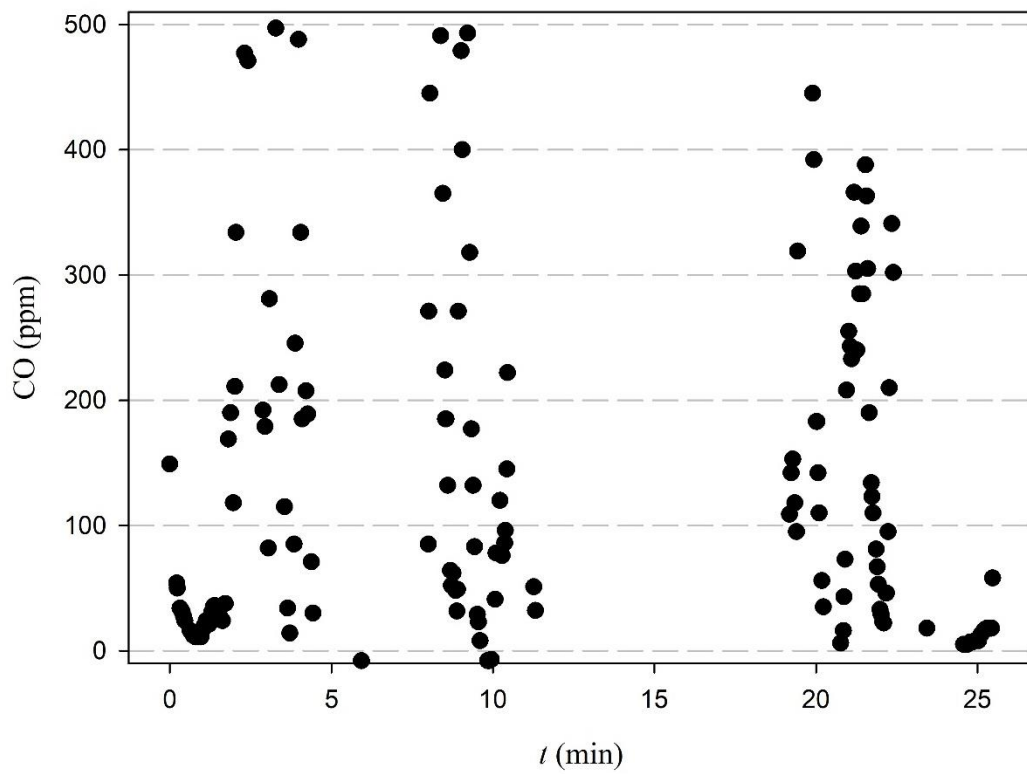
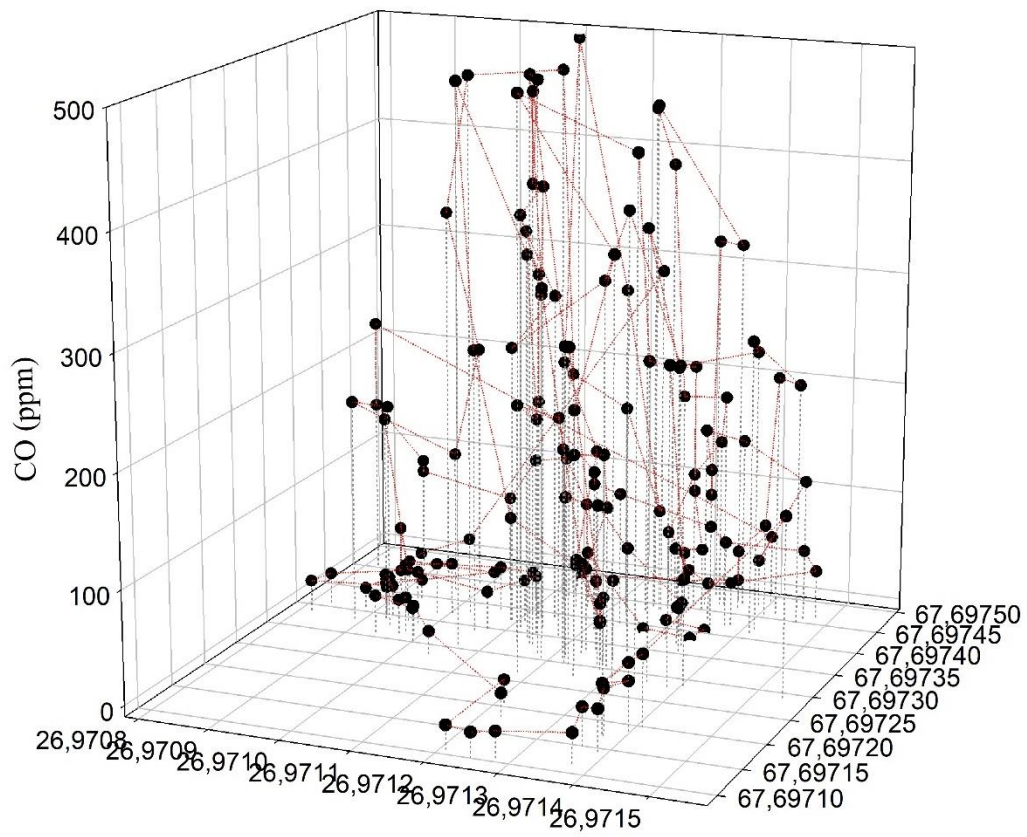
B1030M002



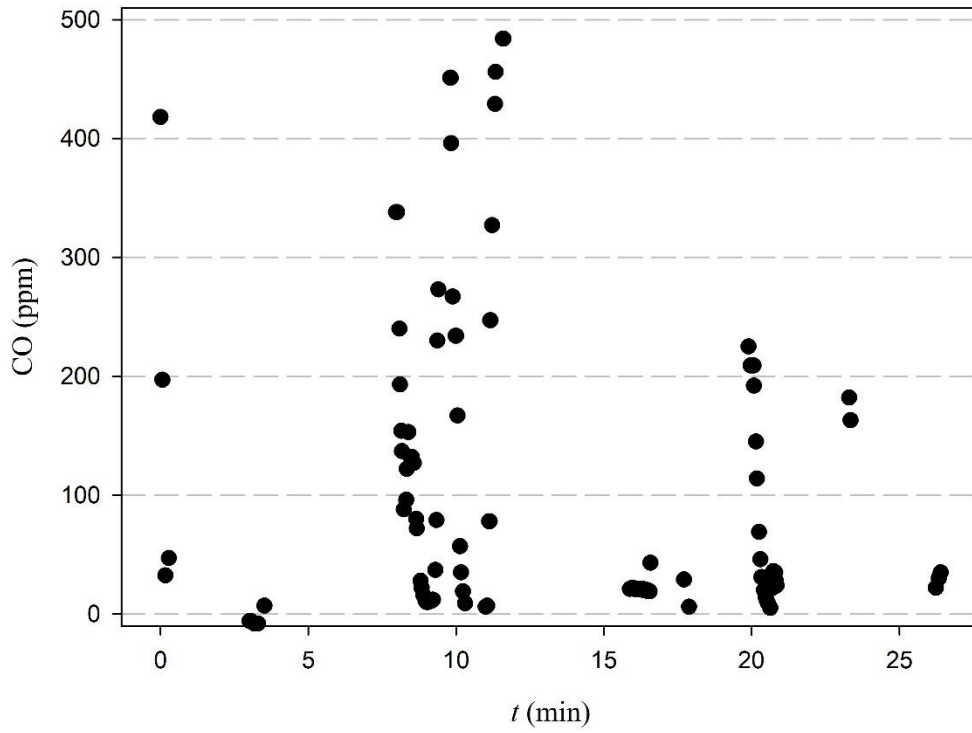
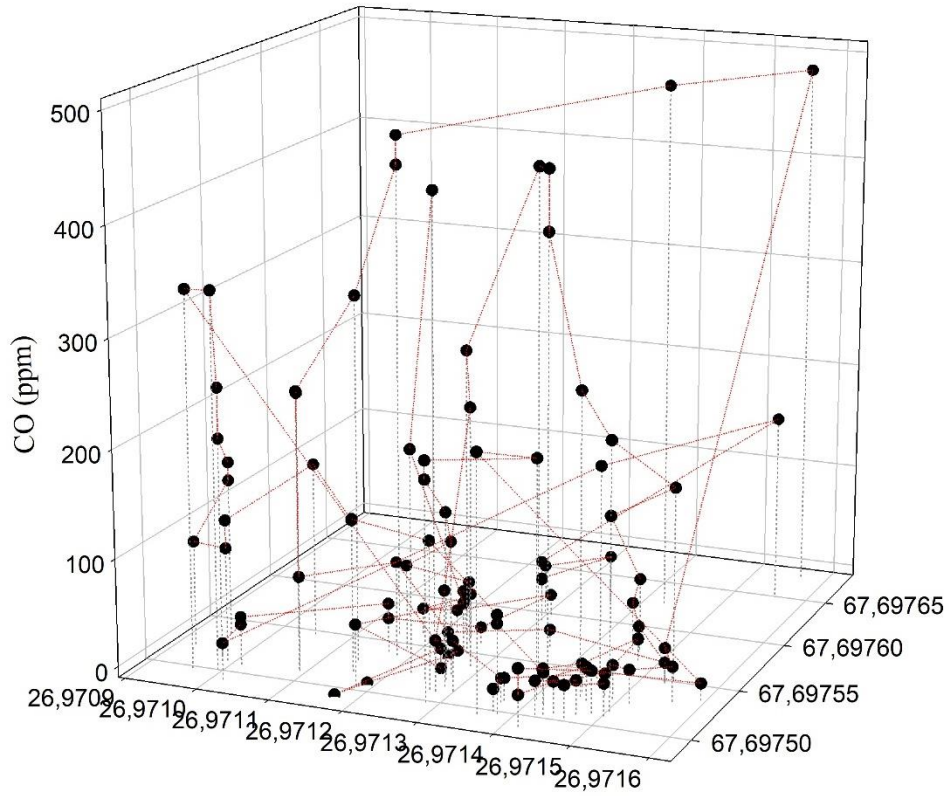
B1030M002



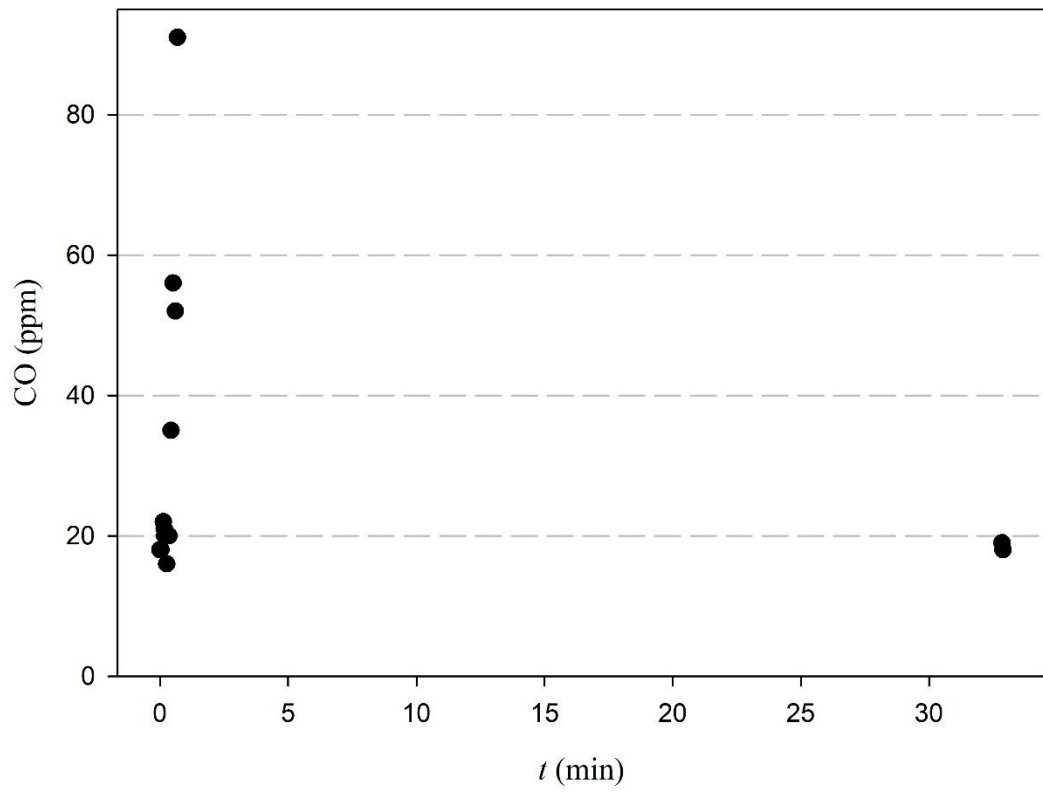
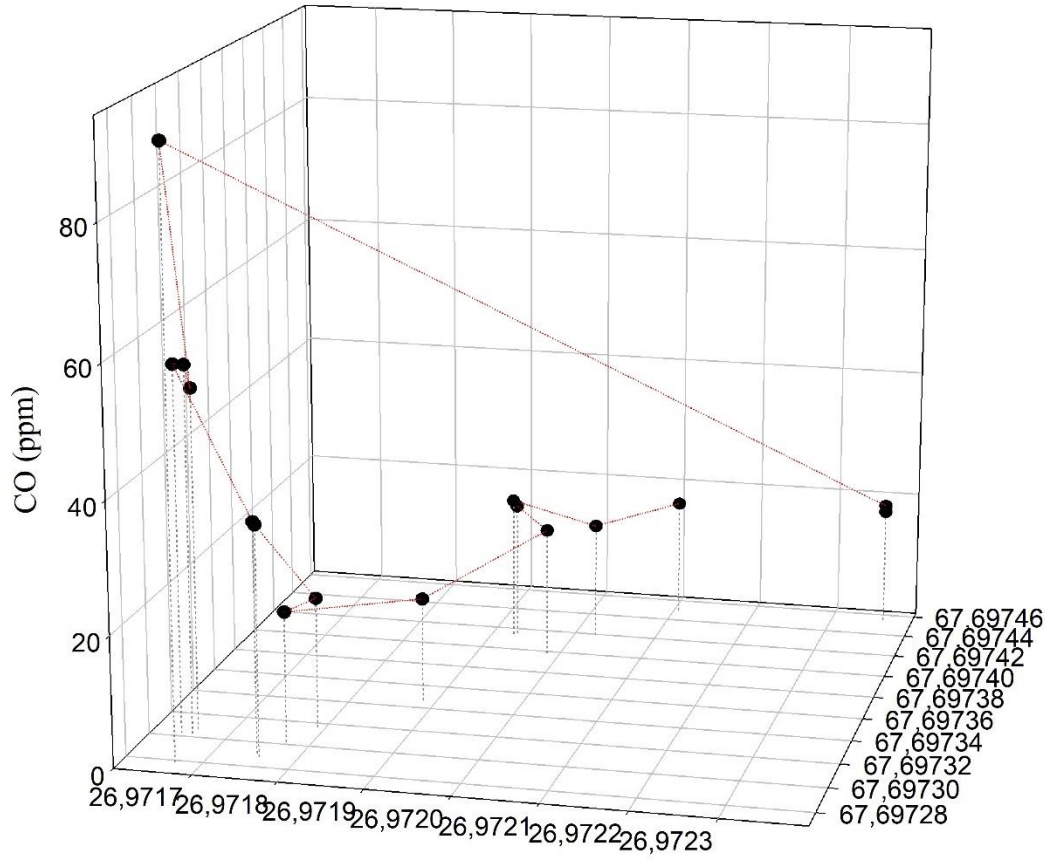
B1030M002 Q1



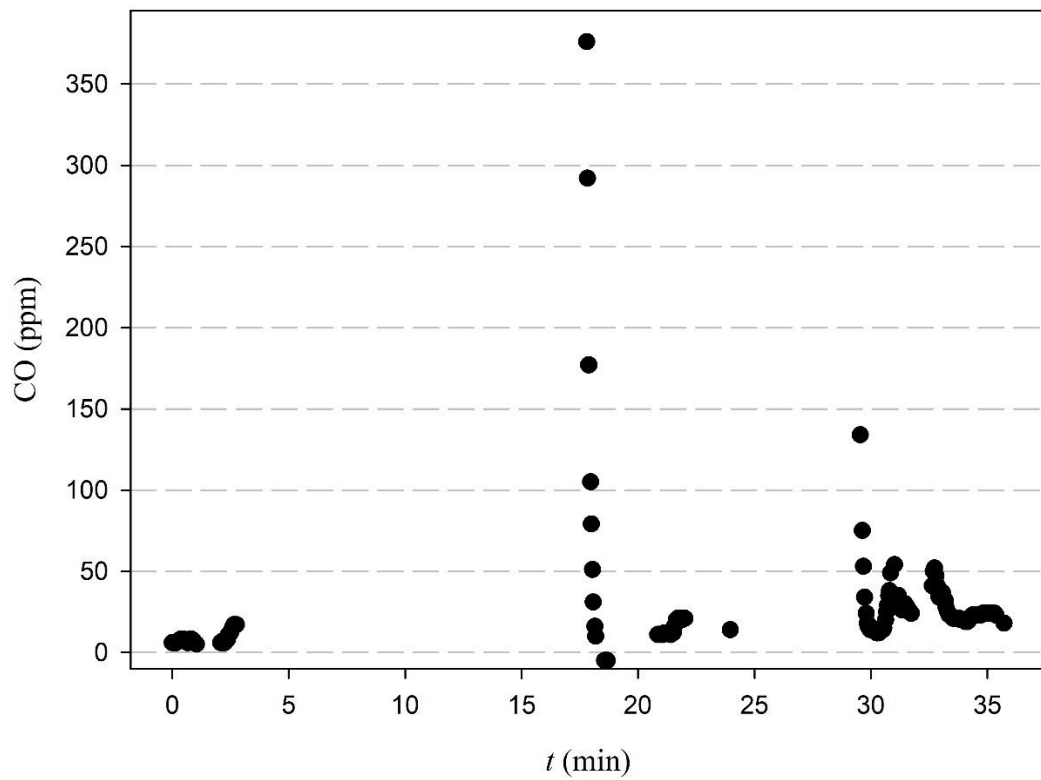
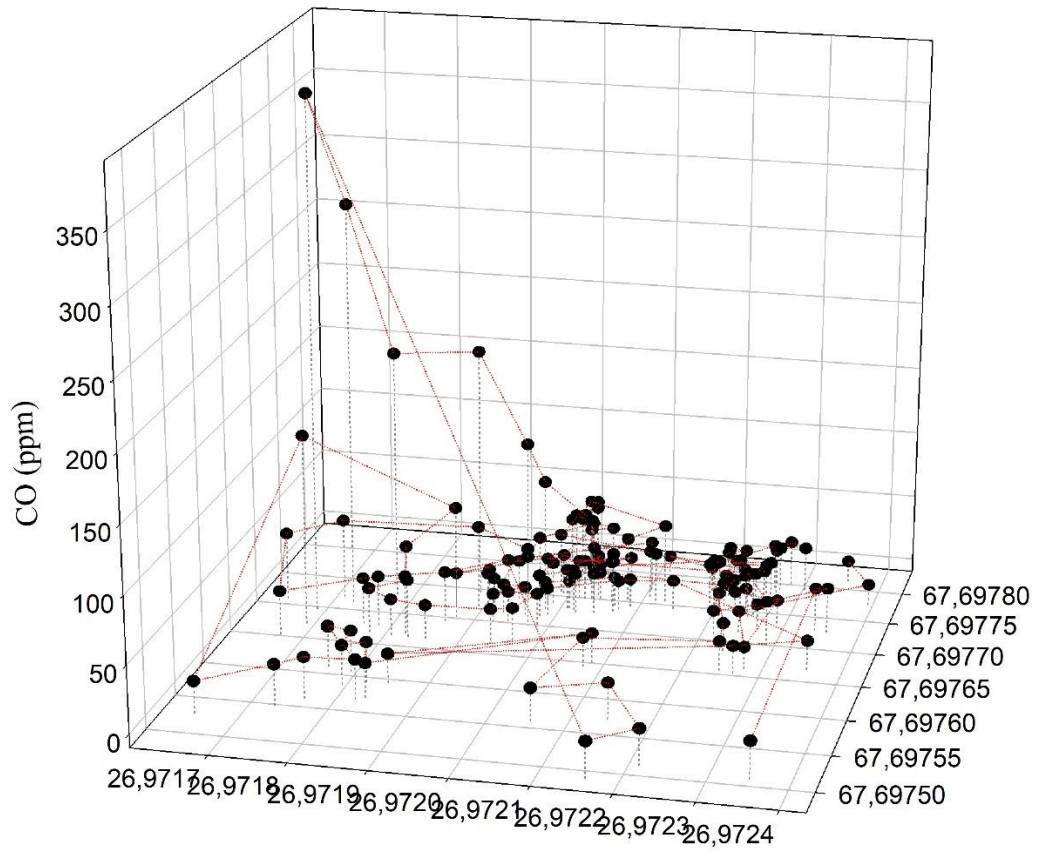
B1030M002 Q2



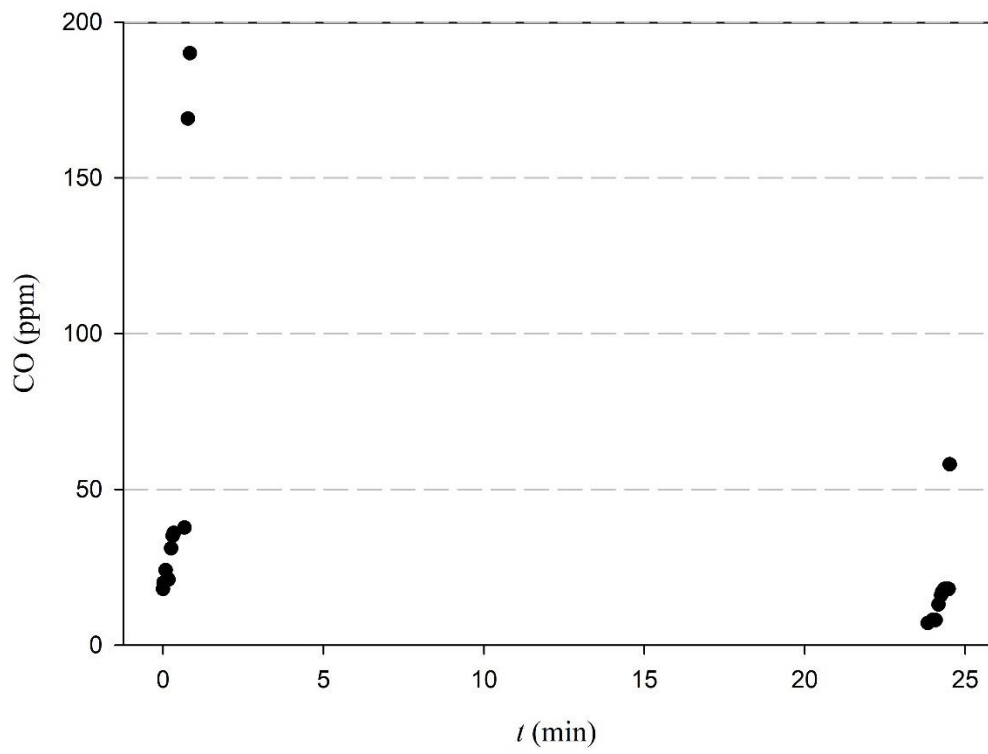
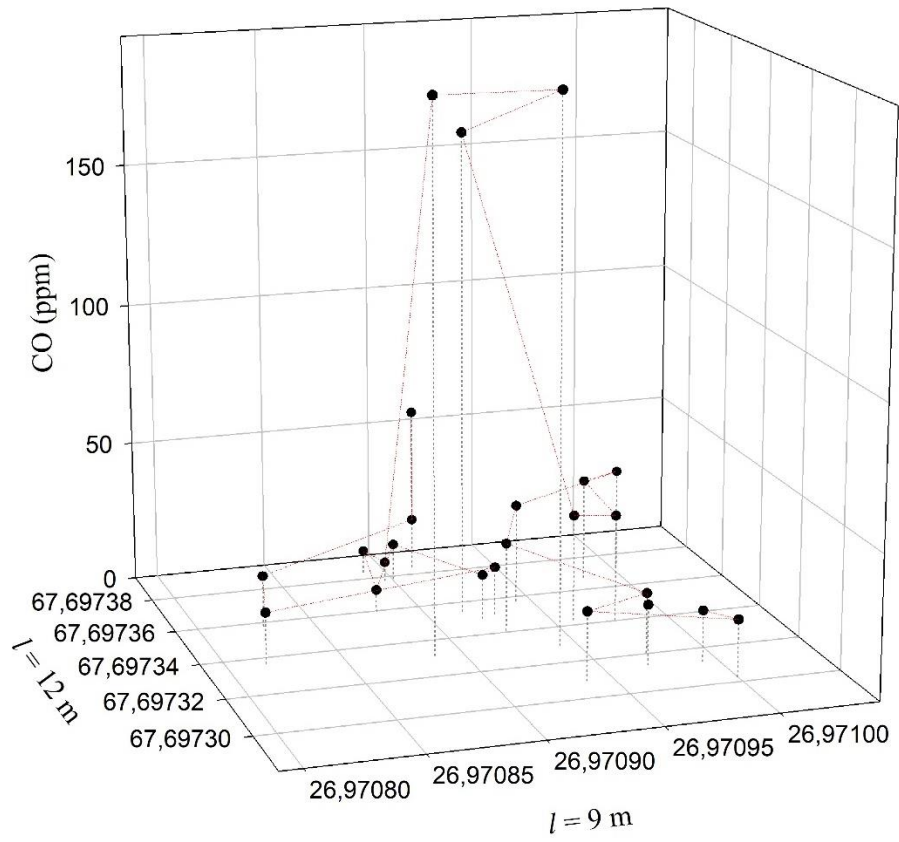
B1030M002 Q3



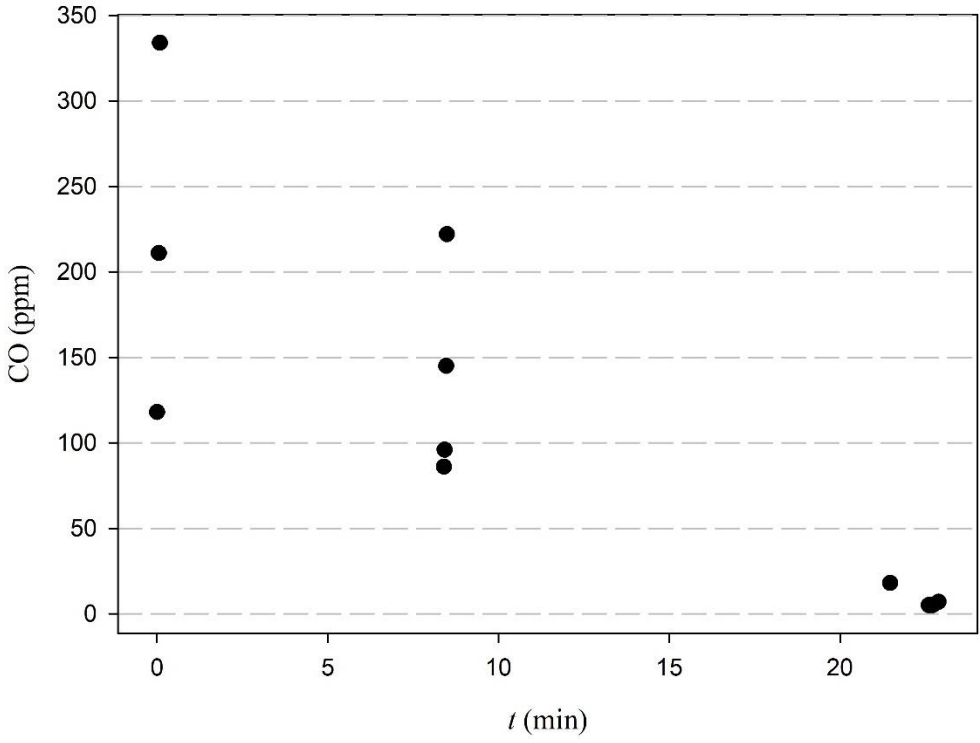
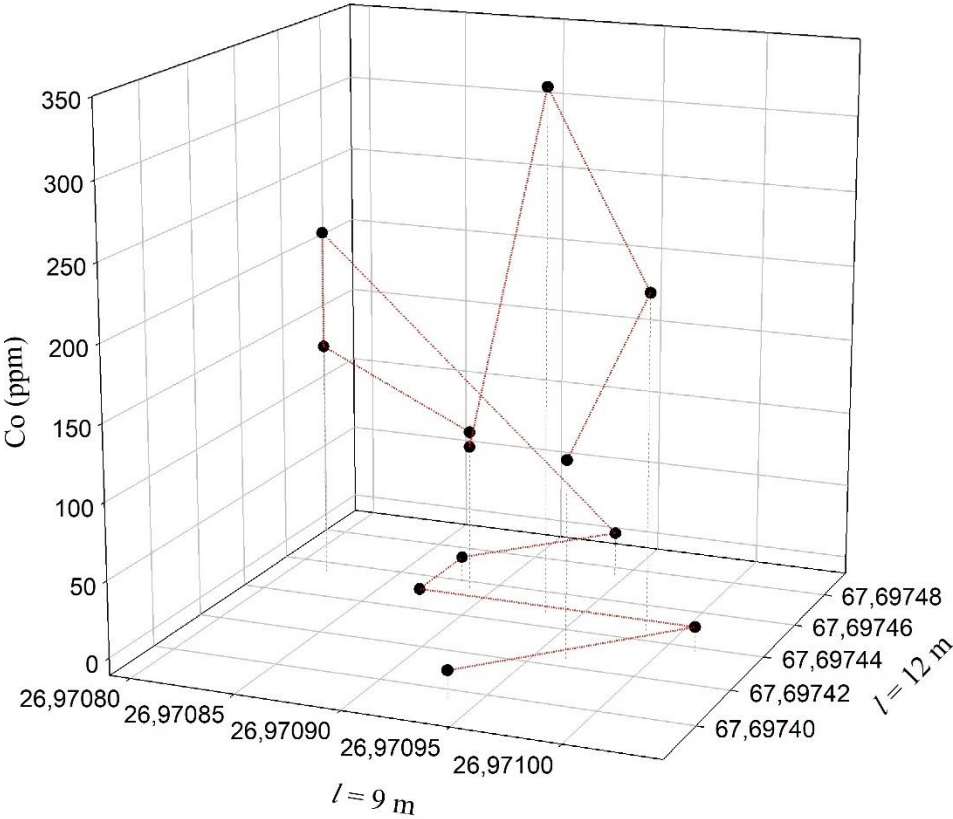
B1030M002 Q4



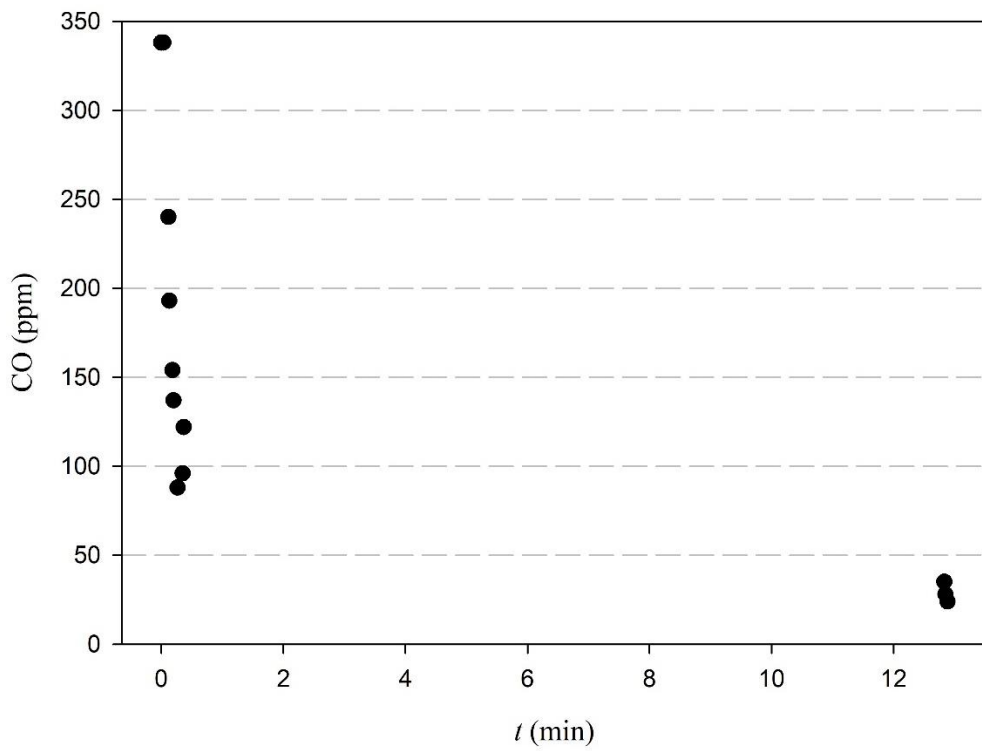
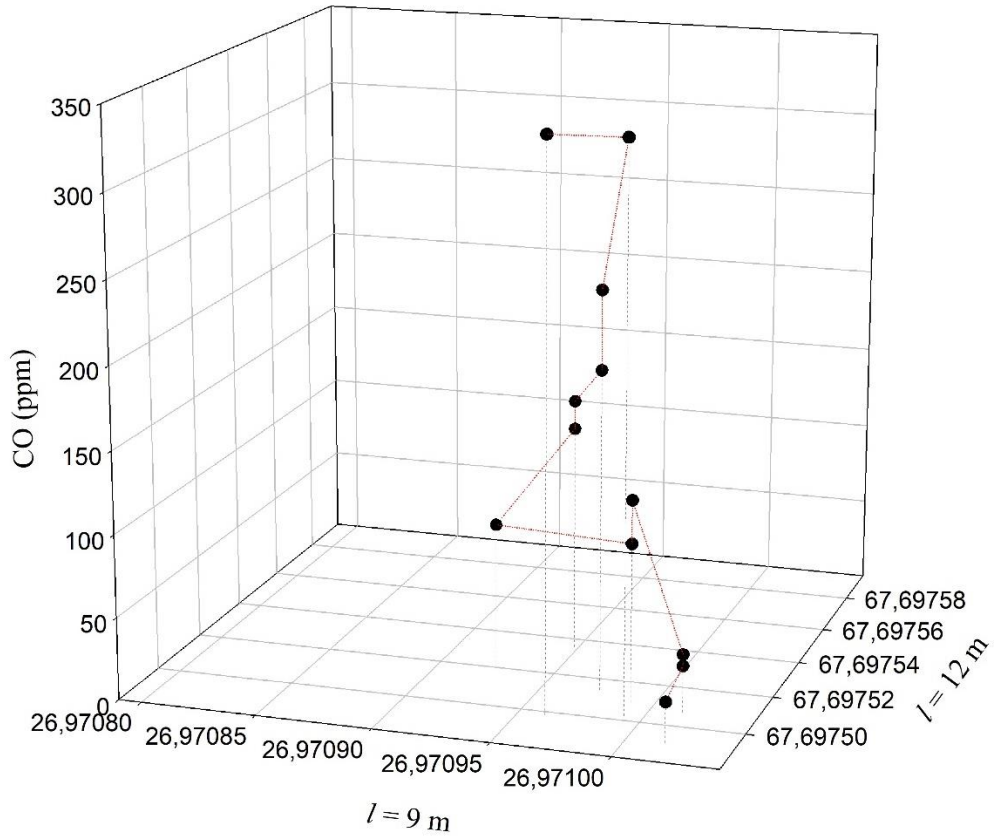
B1030M002 X1Y3



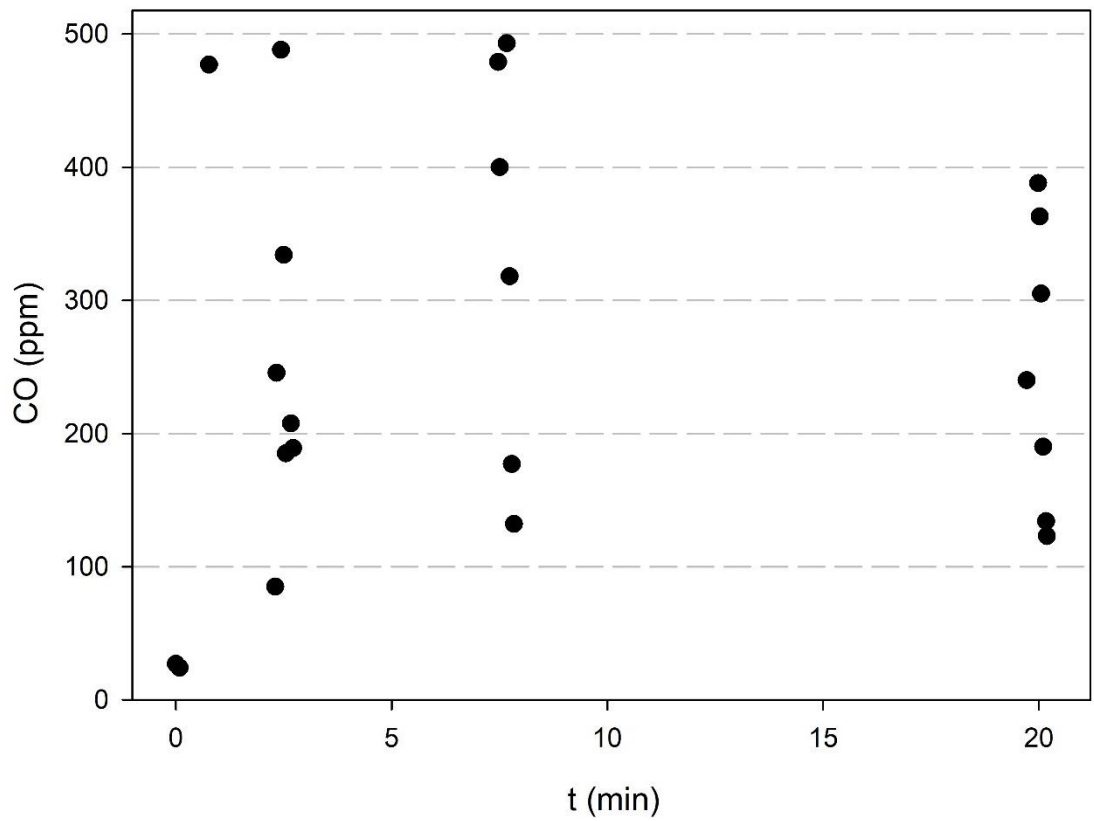
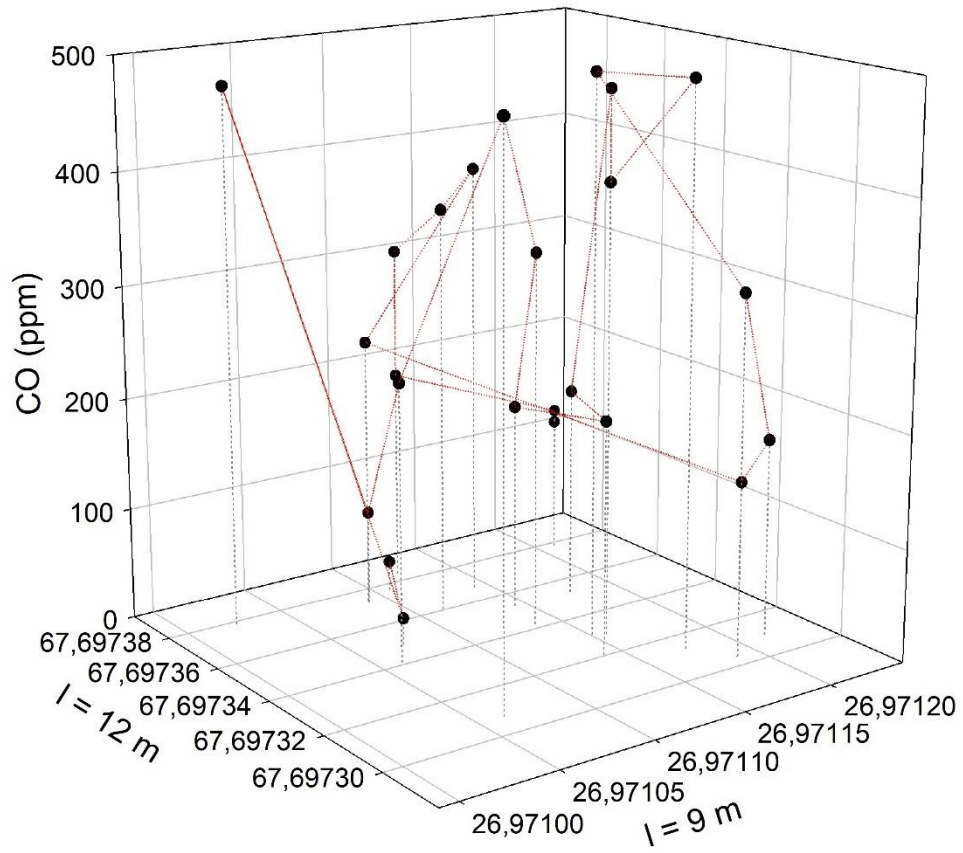
B1030M002 X1Y4



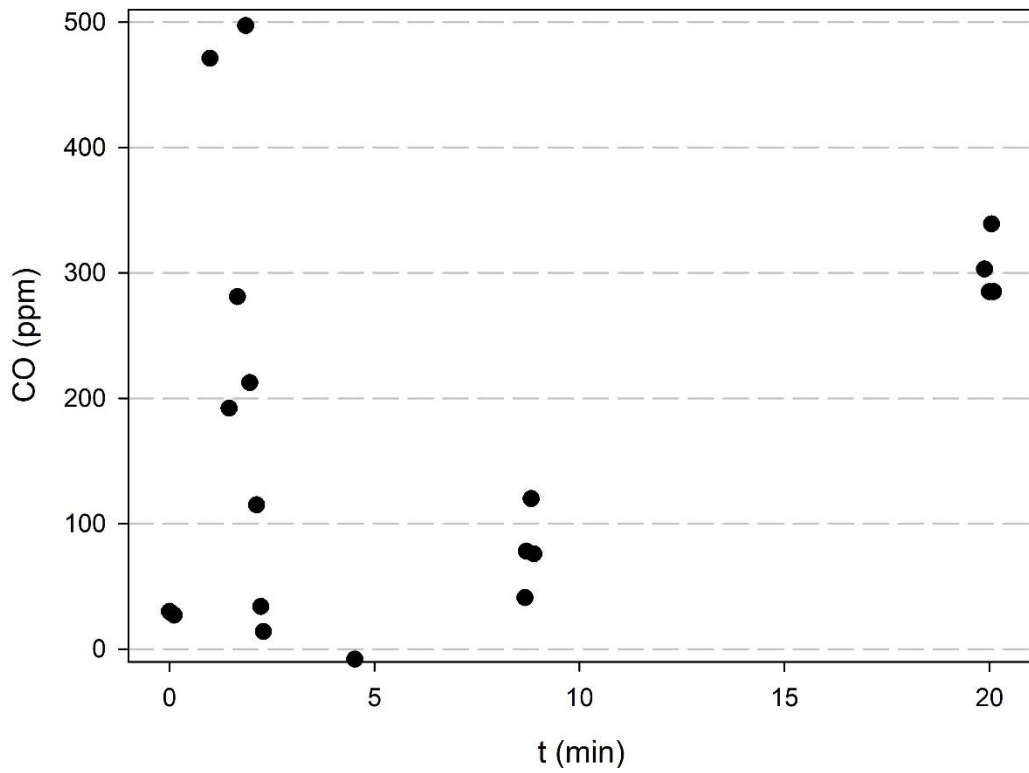
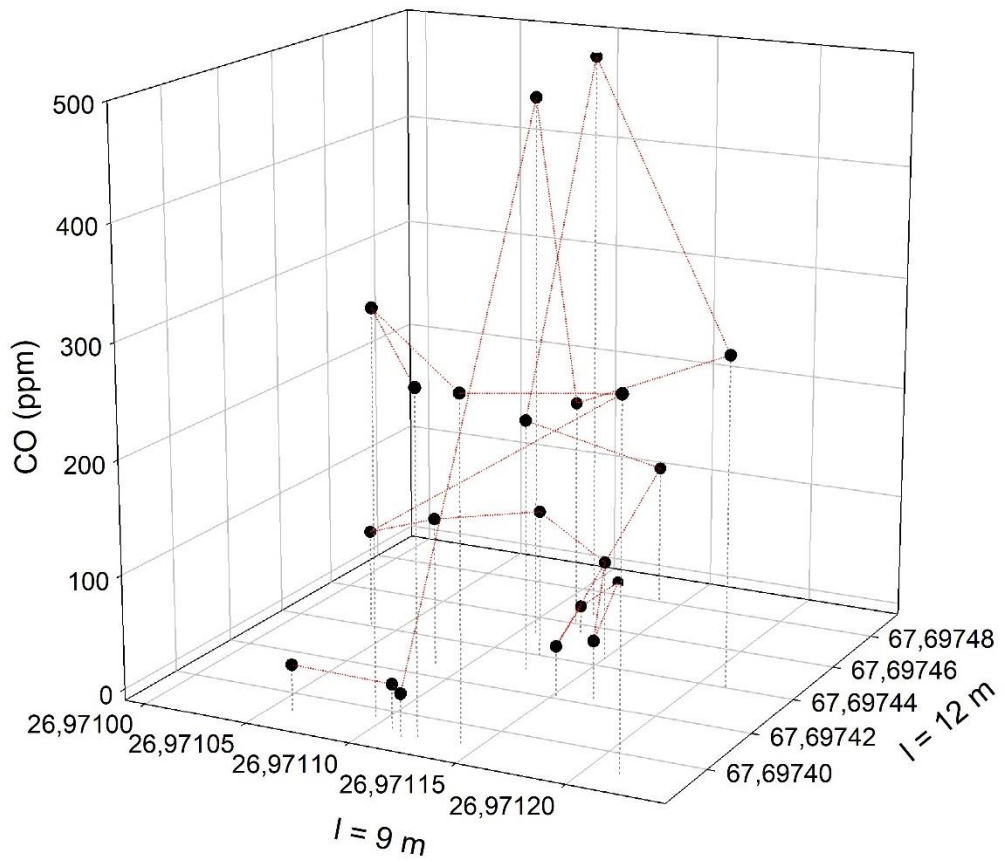
B1030M002 X1Y5



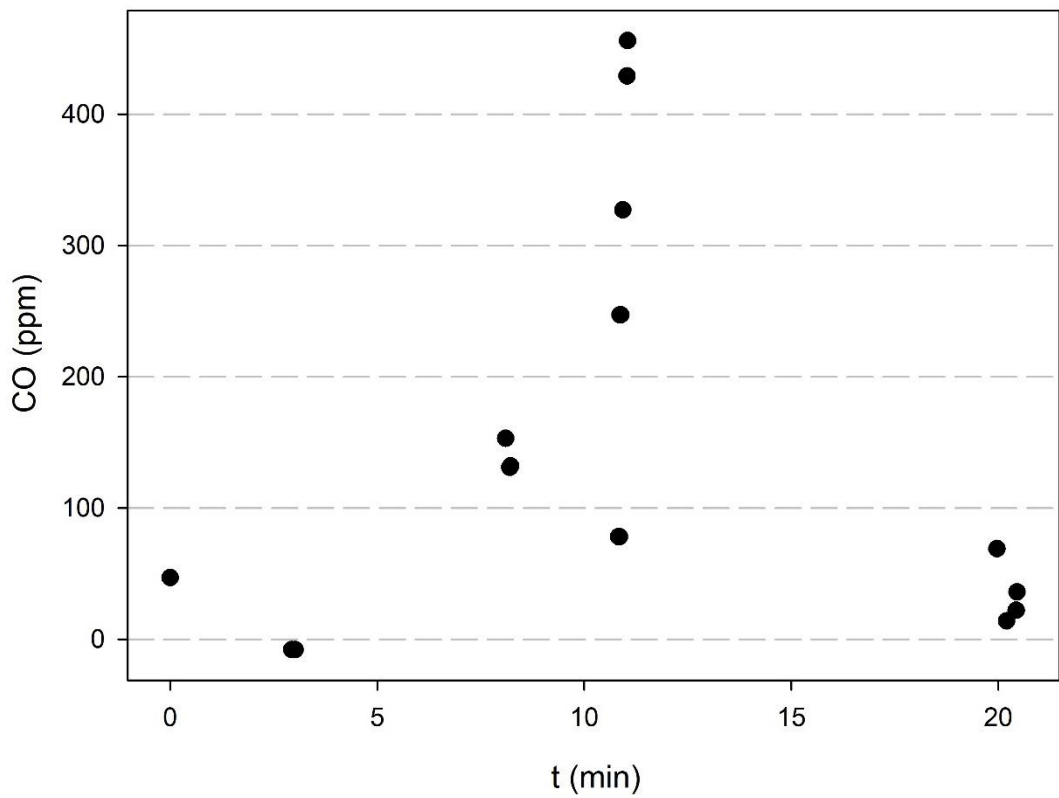
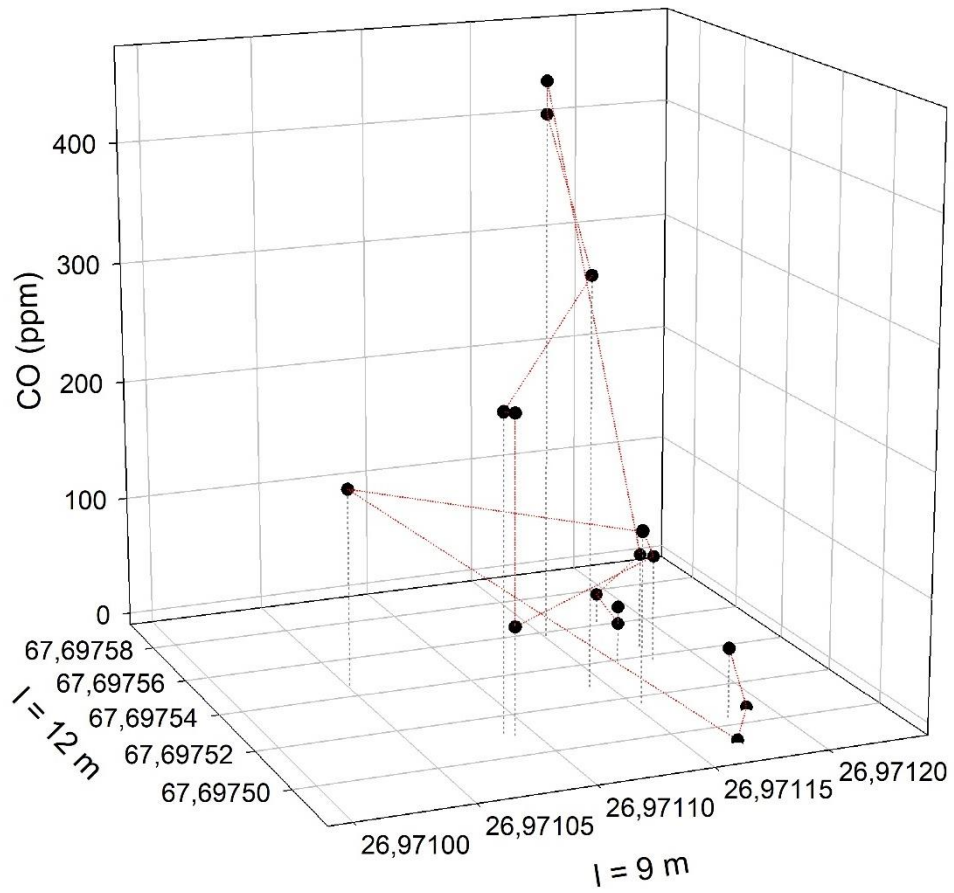
B1030M002 X2Y3



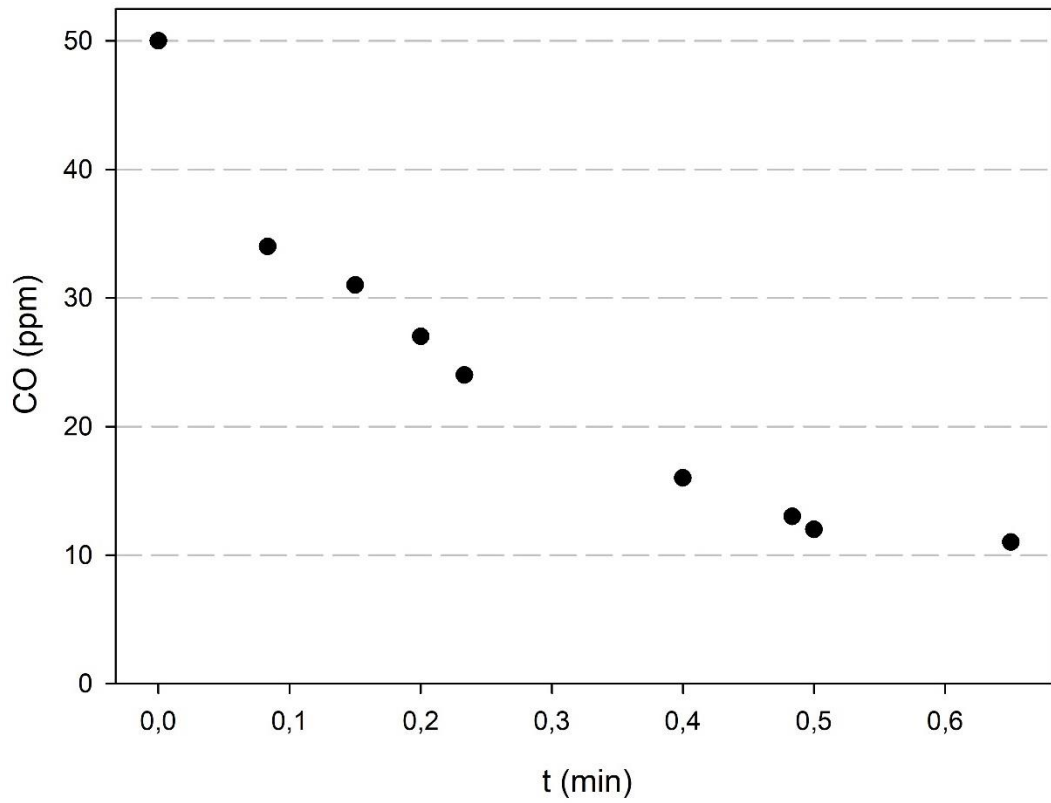
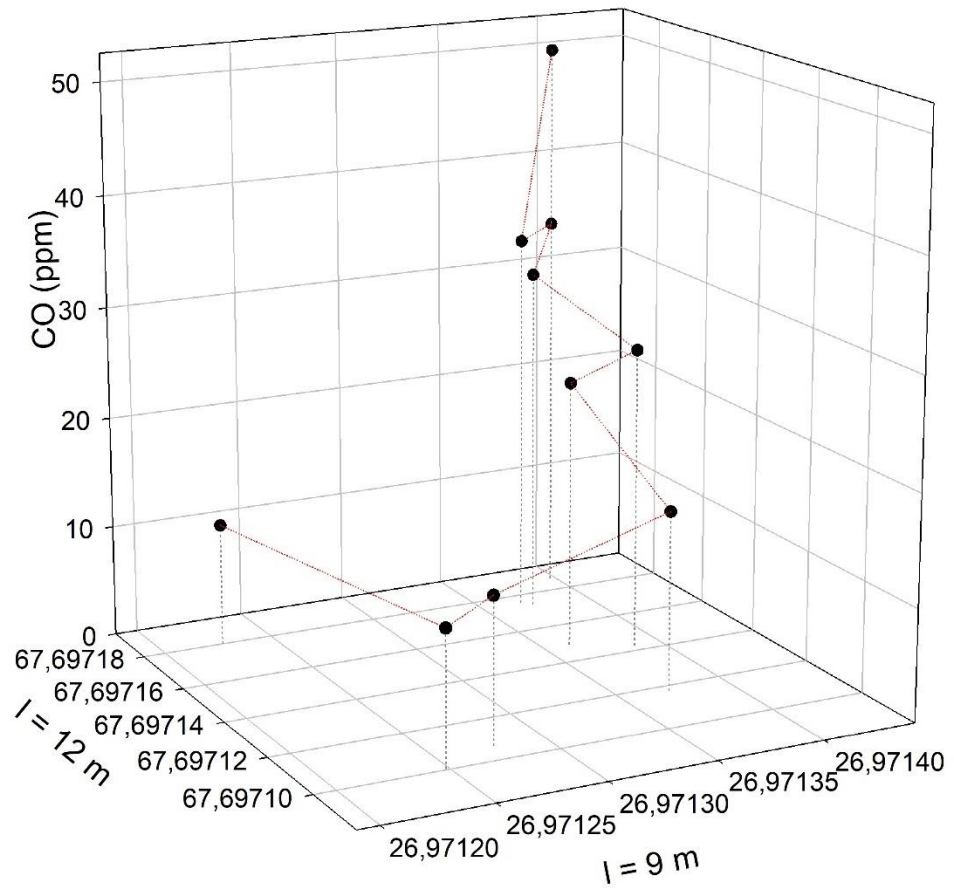
B1030M002 X2Y4



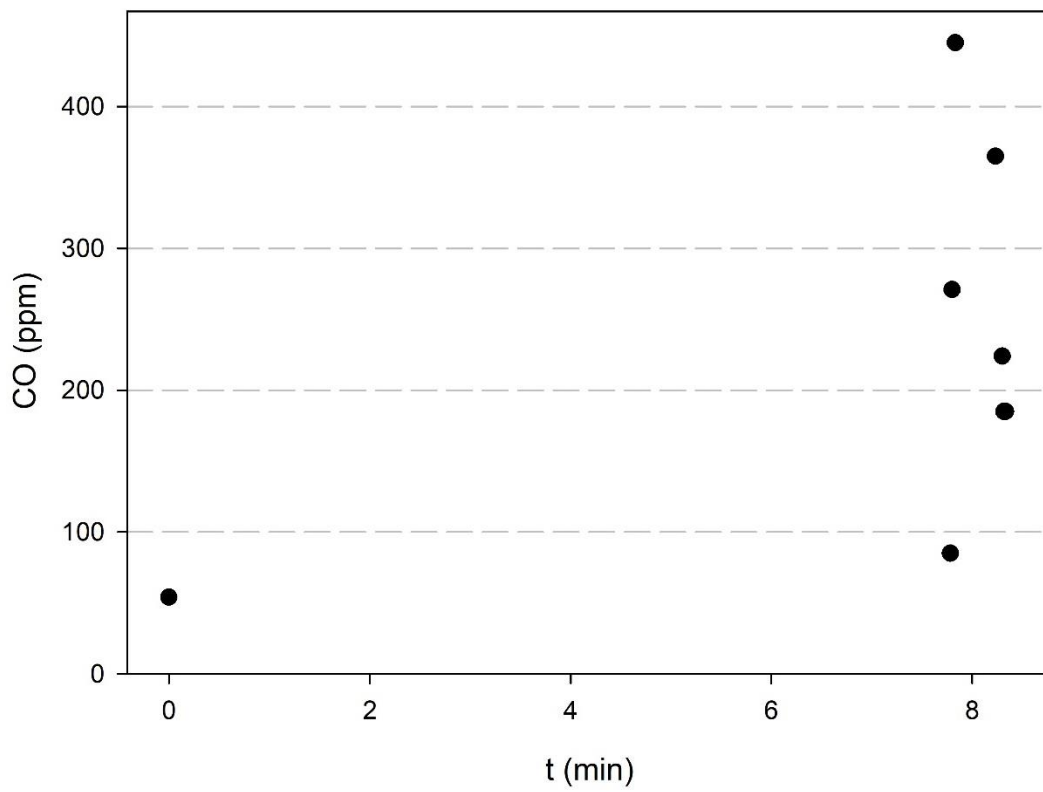
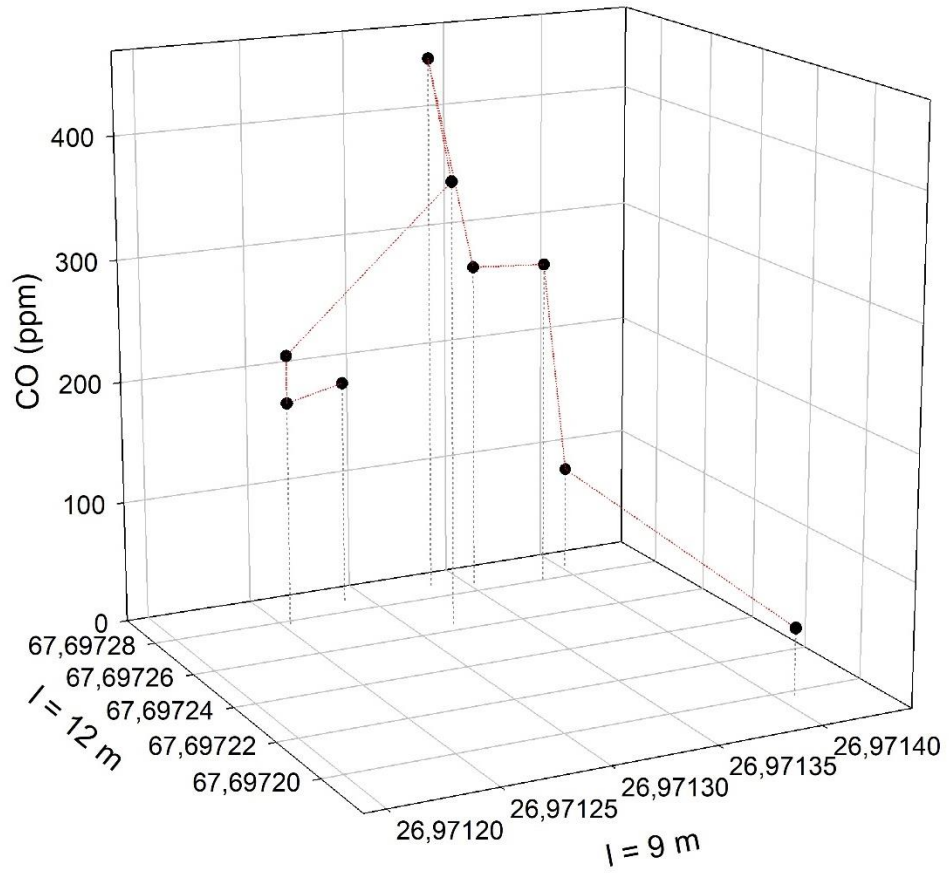
B1030M002 X2Y5



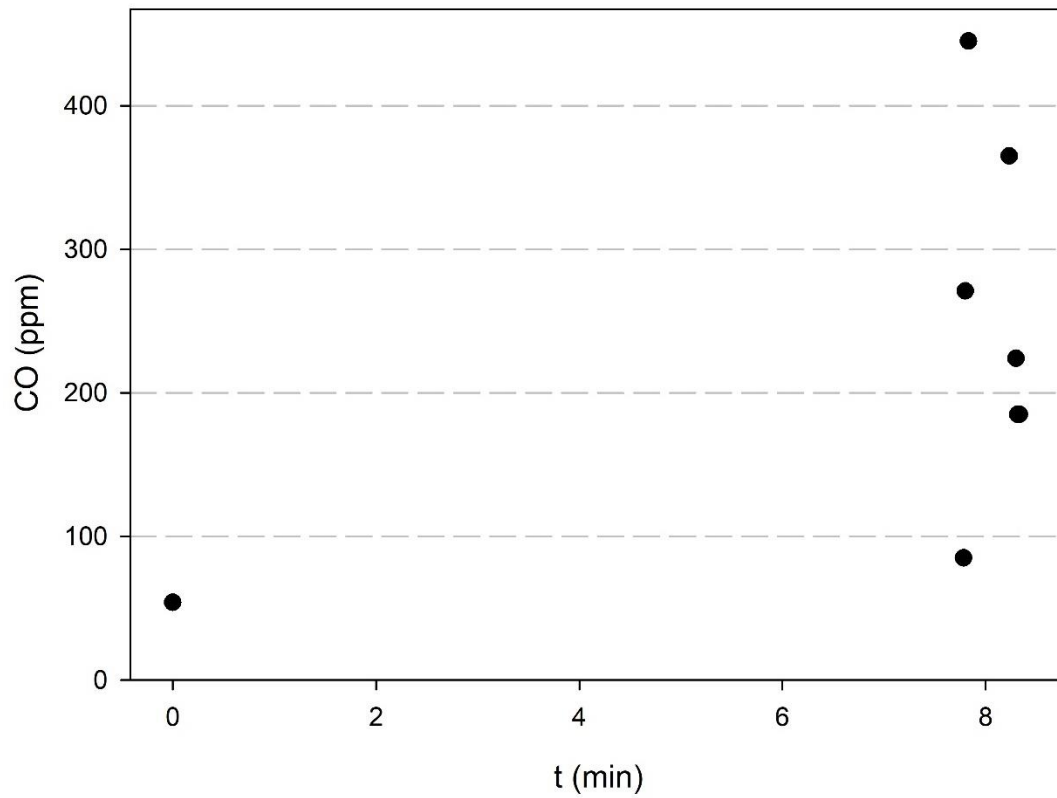
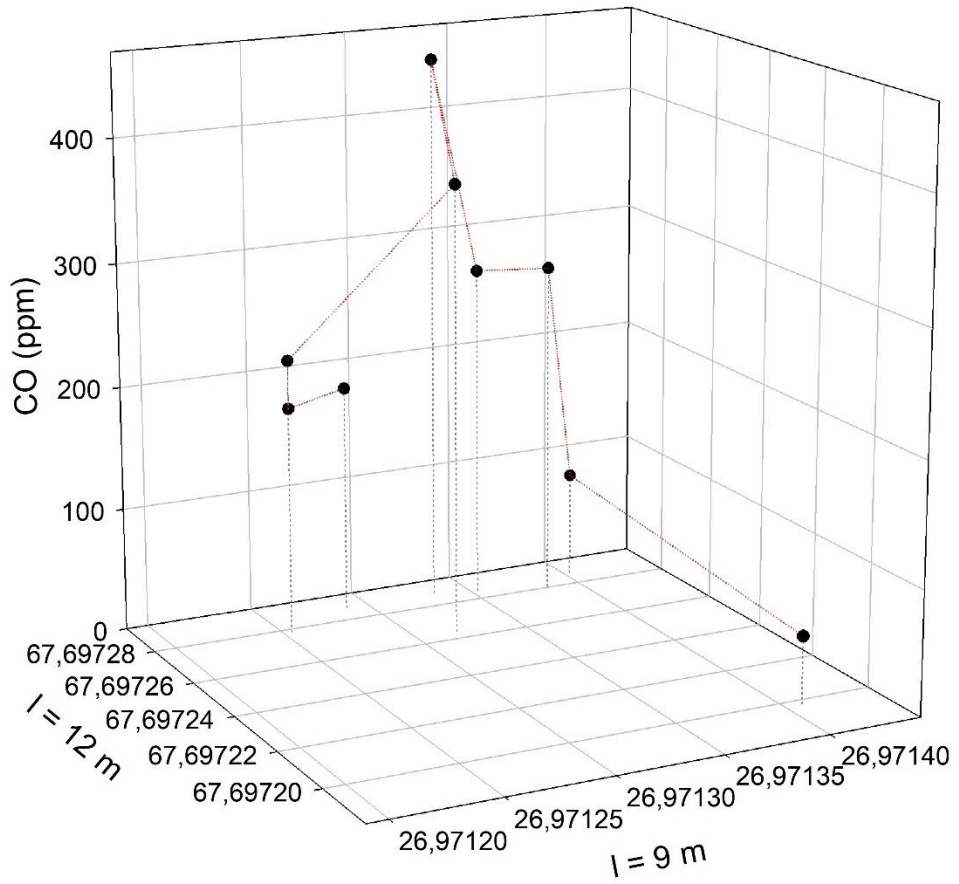
B1030M002 X3Y1



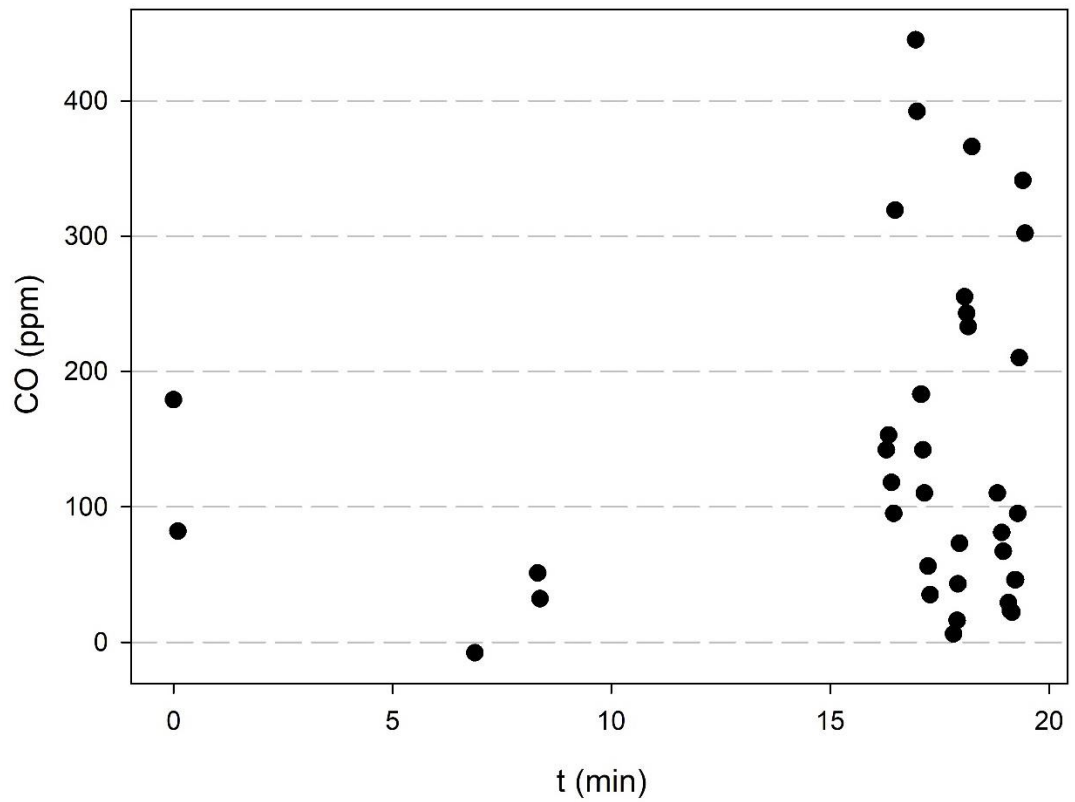
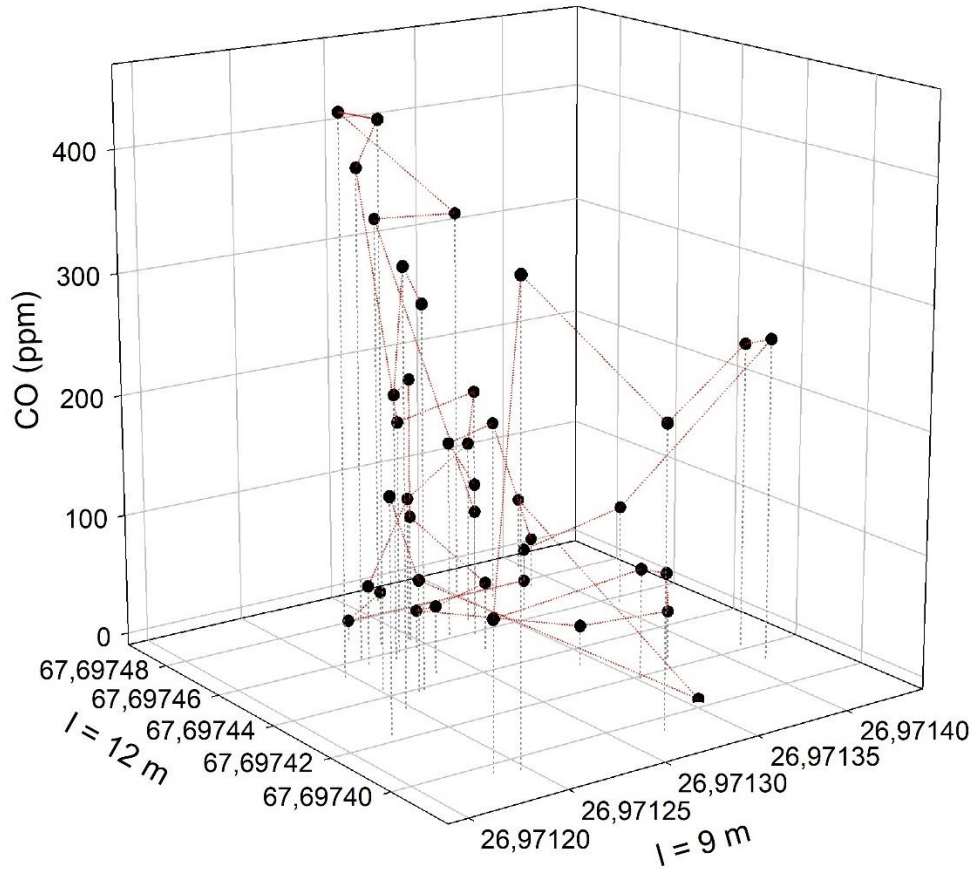
B1030M002 X3Y2



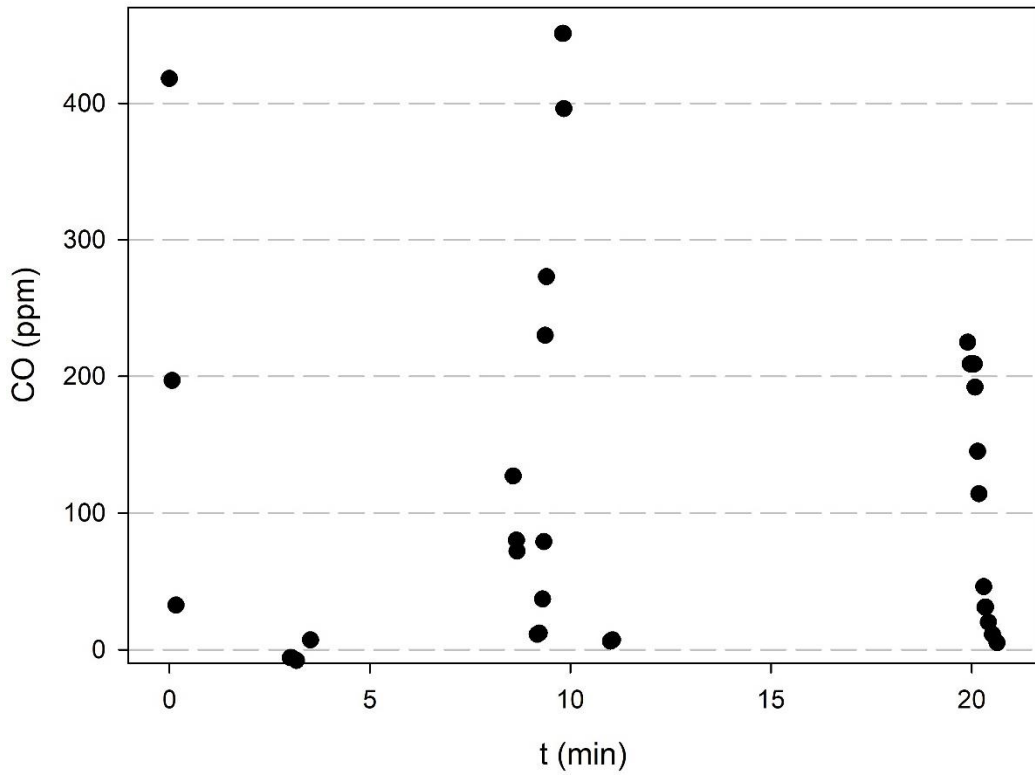
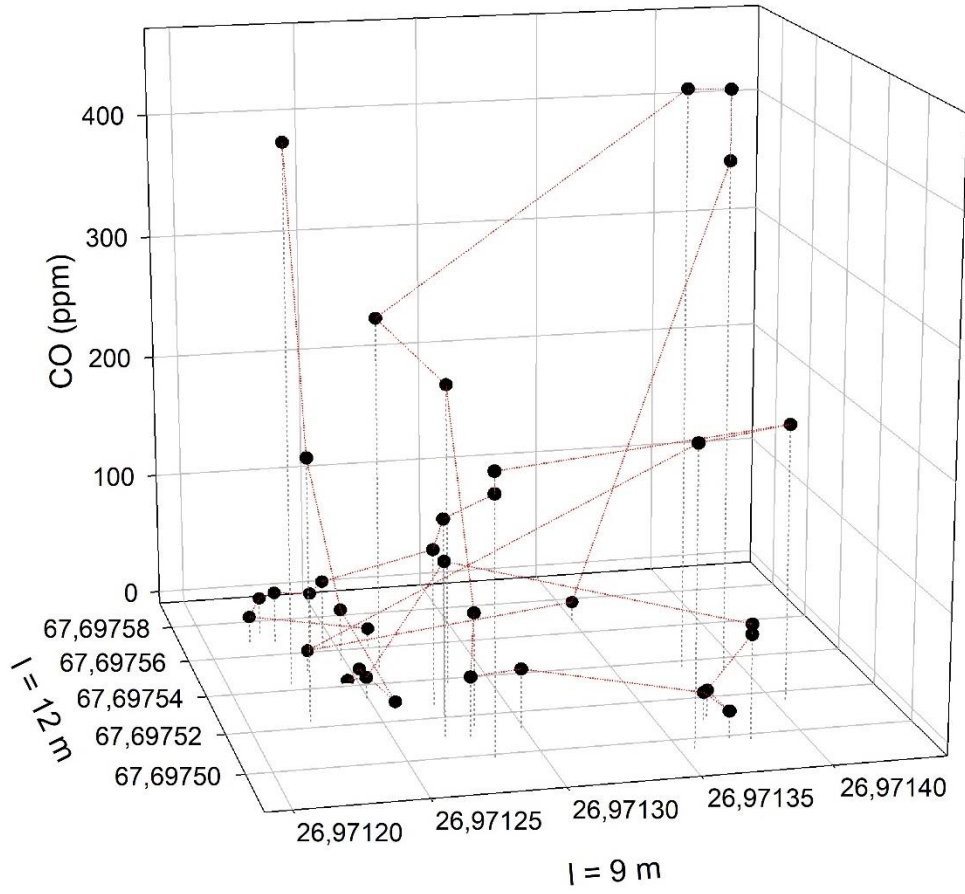
B1030M002 X3Y2



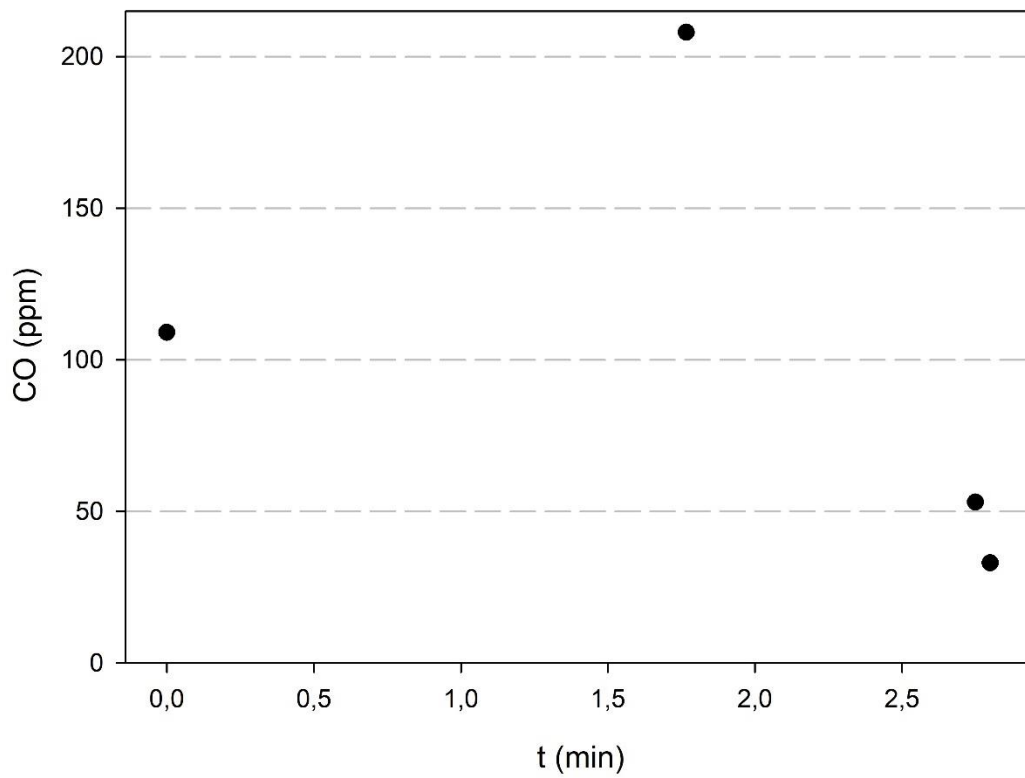
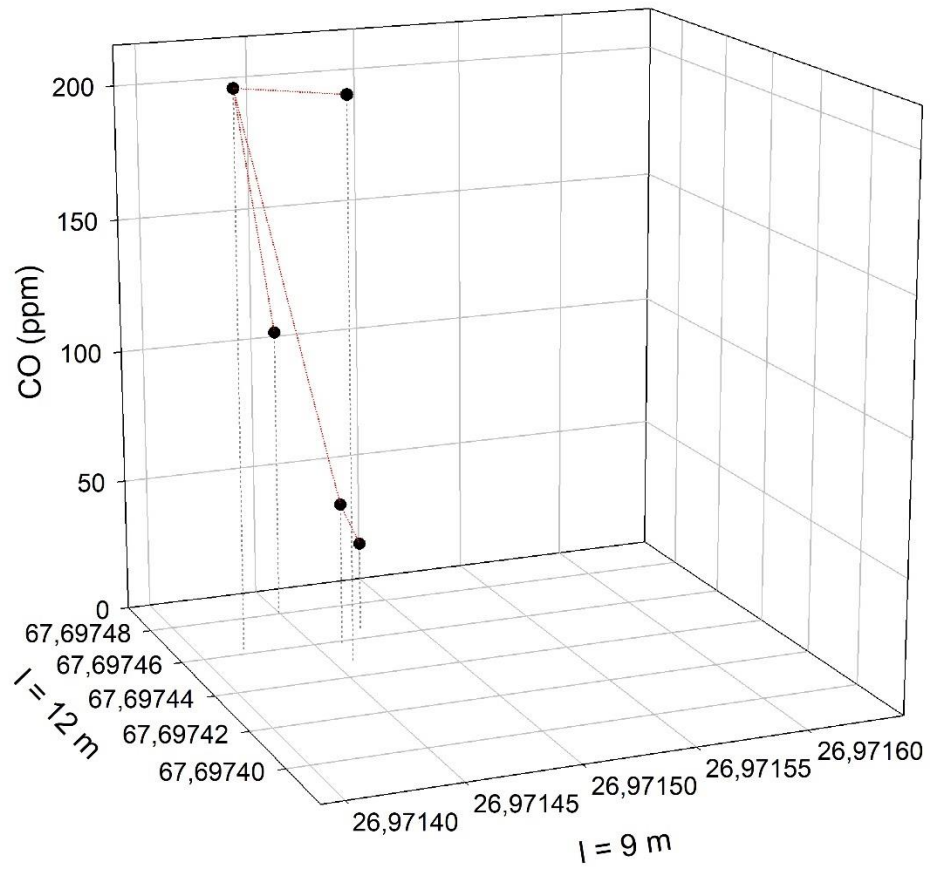
B1030M002 X3Y4



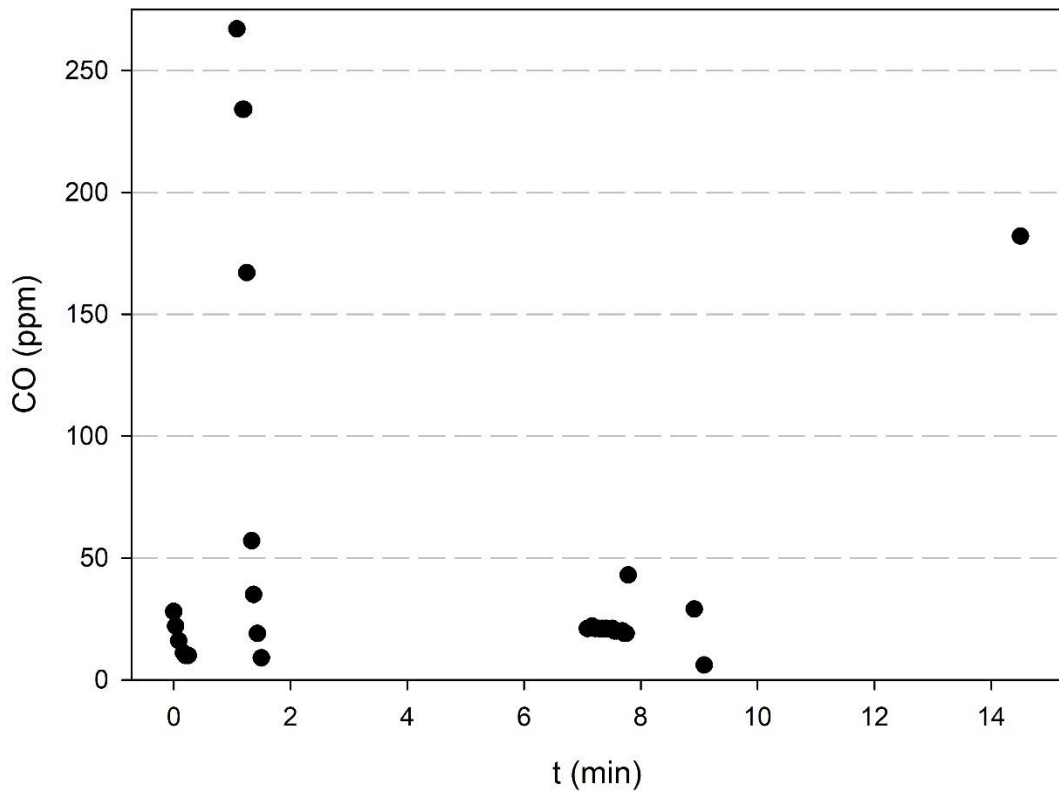
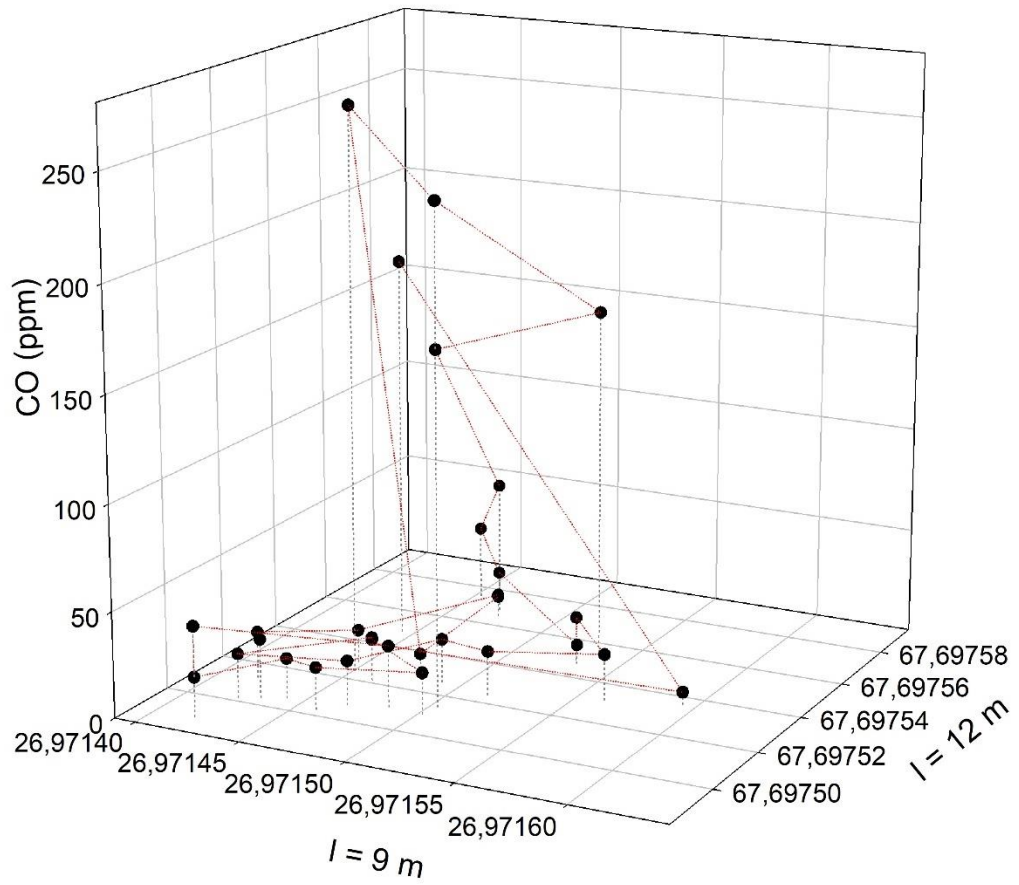
B1030M002 X3Y5



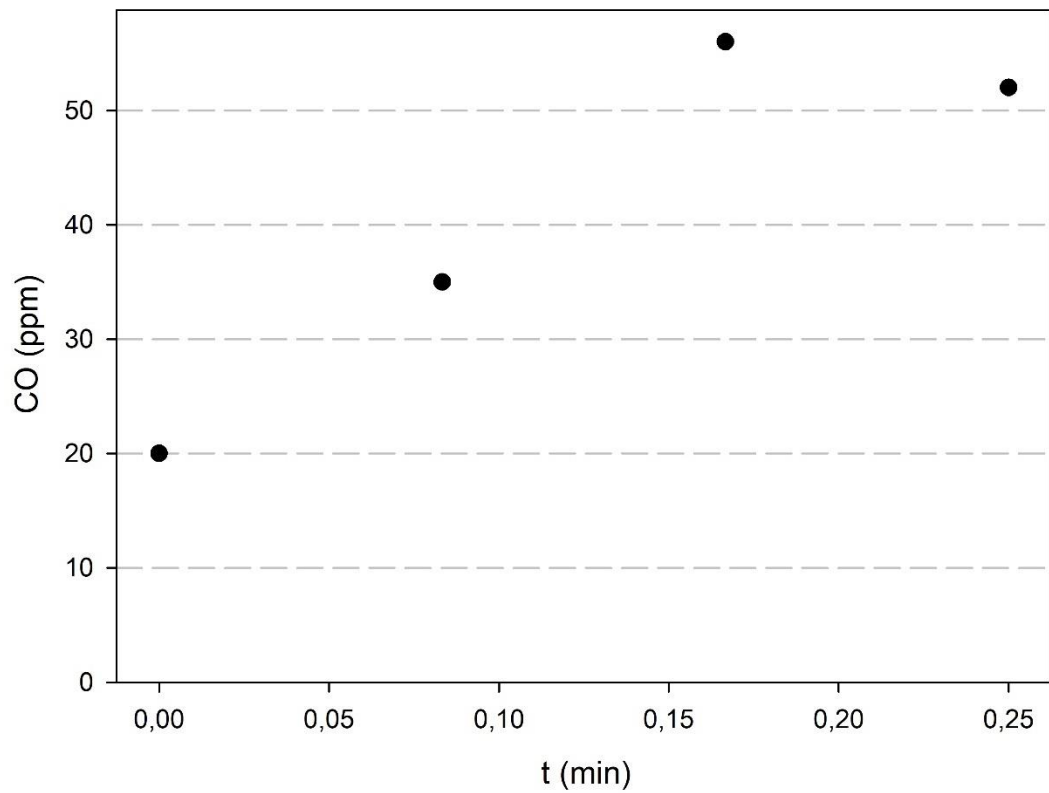
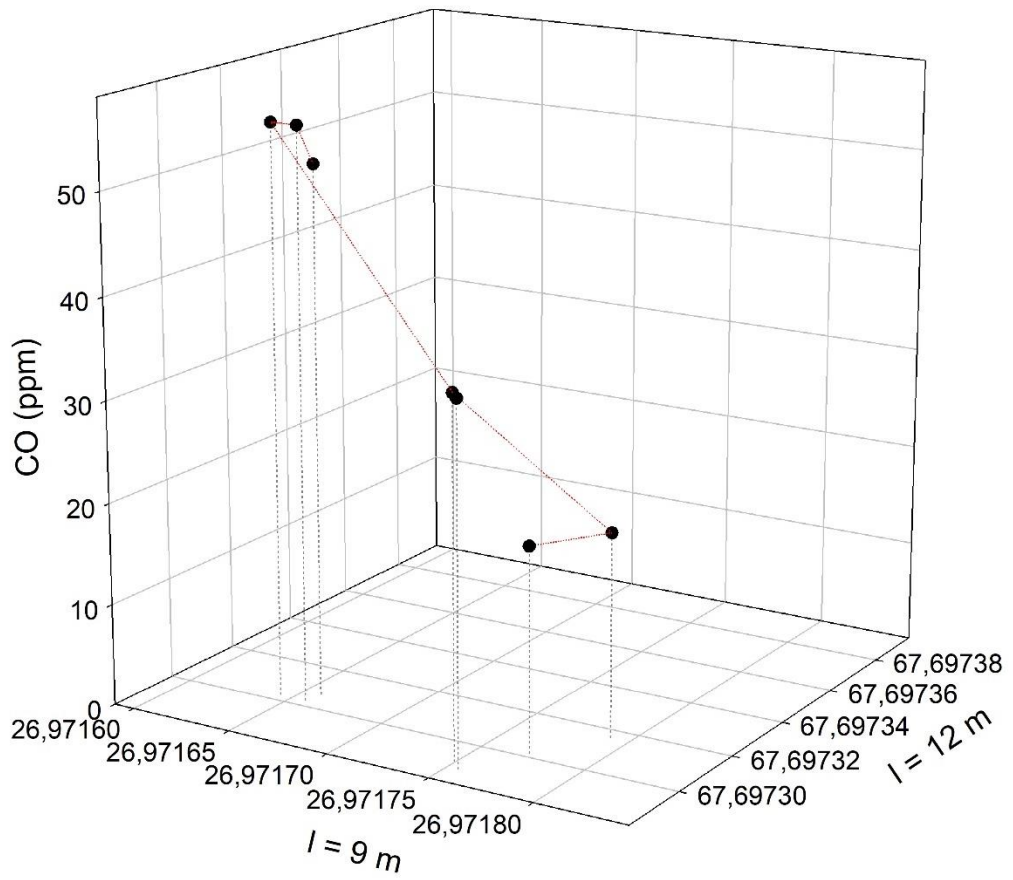
B1030M002 X4Y4



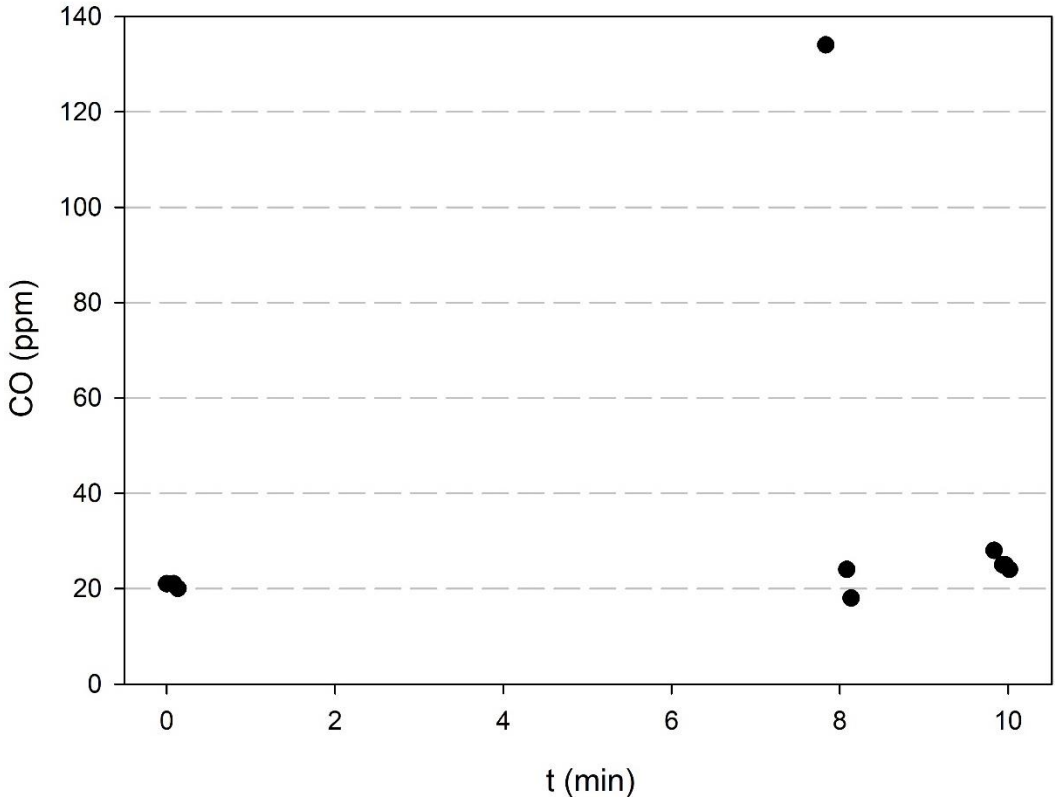
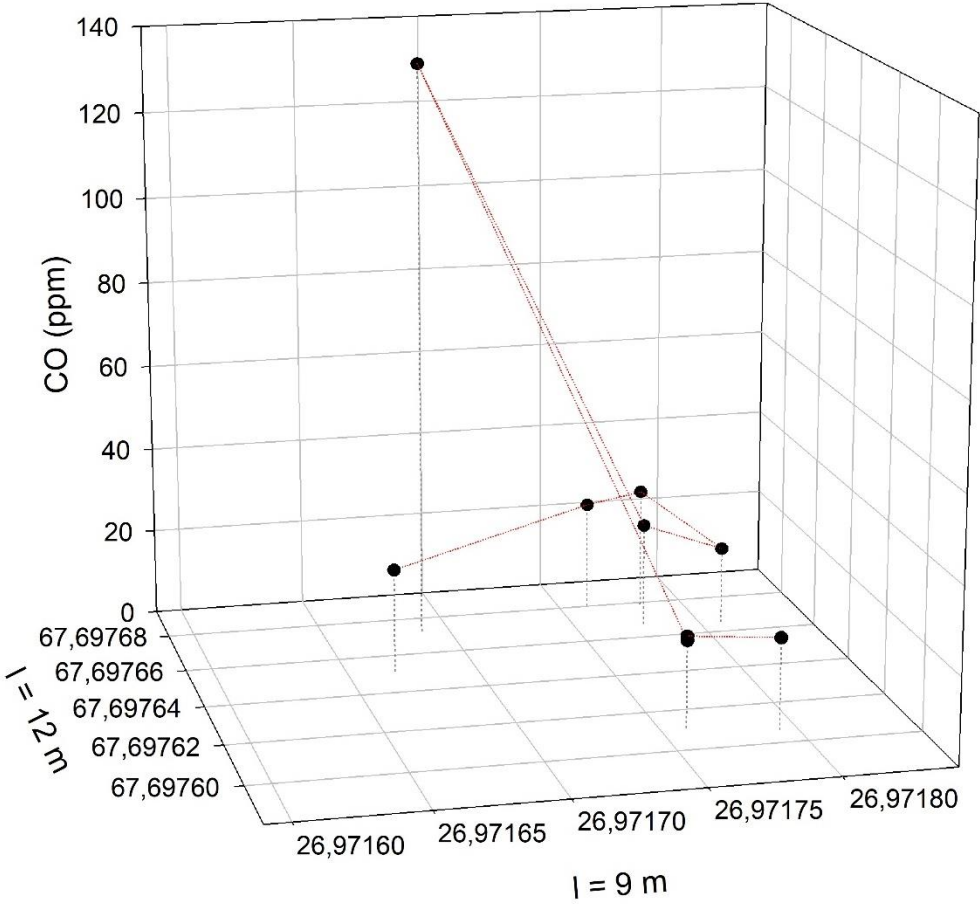
B1030M002 X4Y5



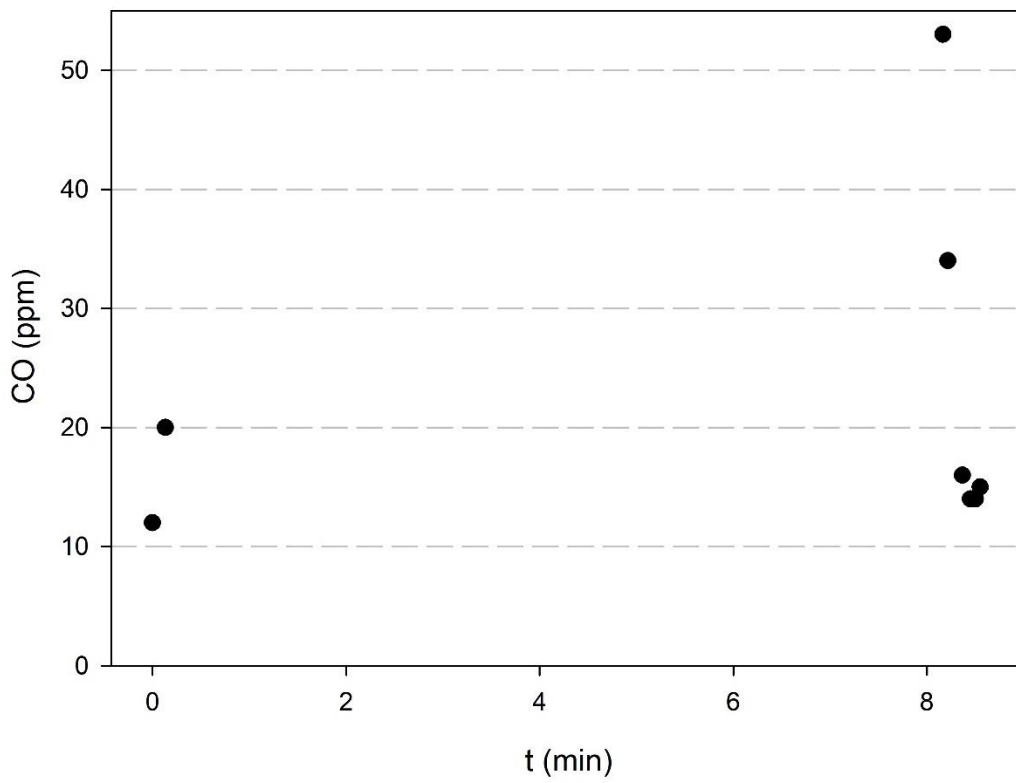
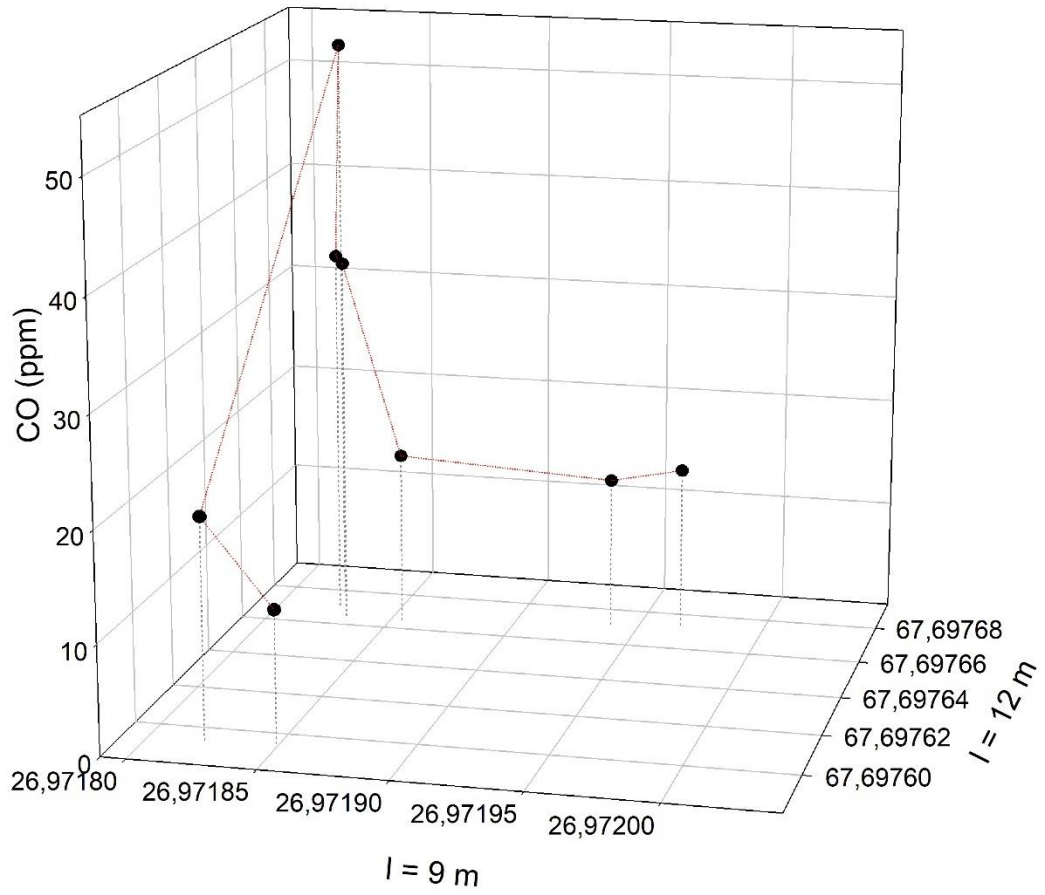
B1030M002 X5Y3



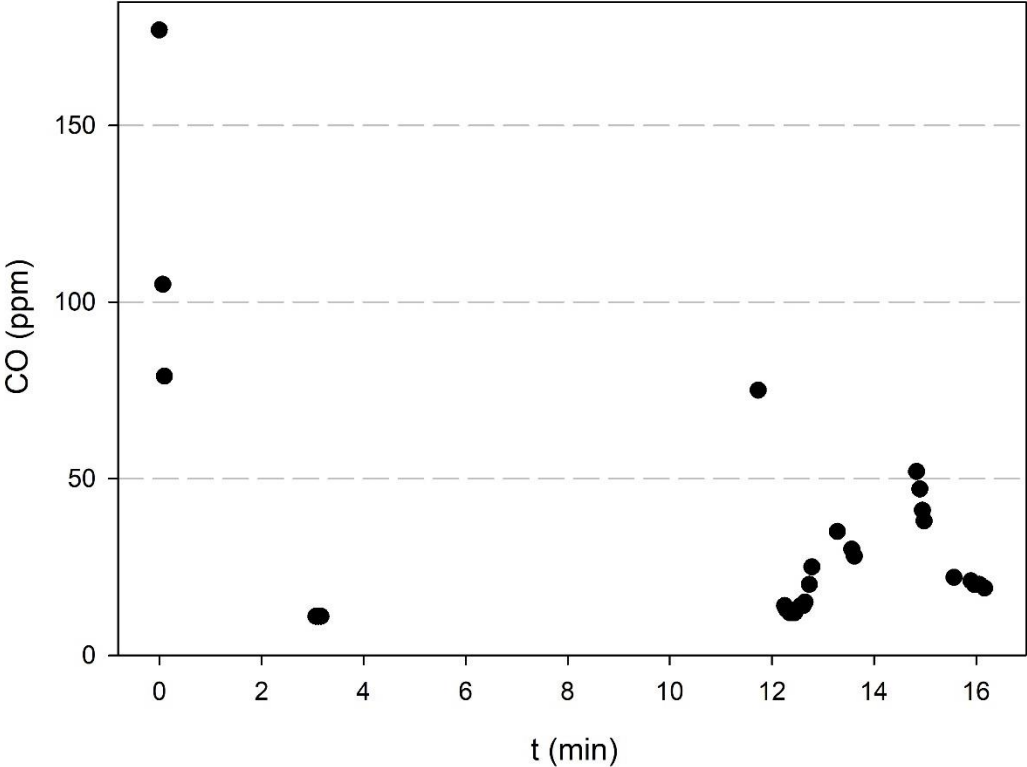
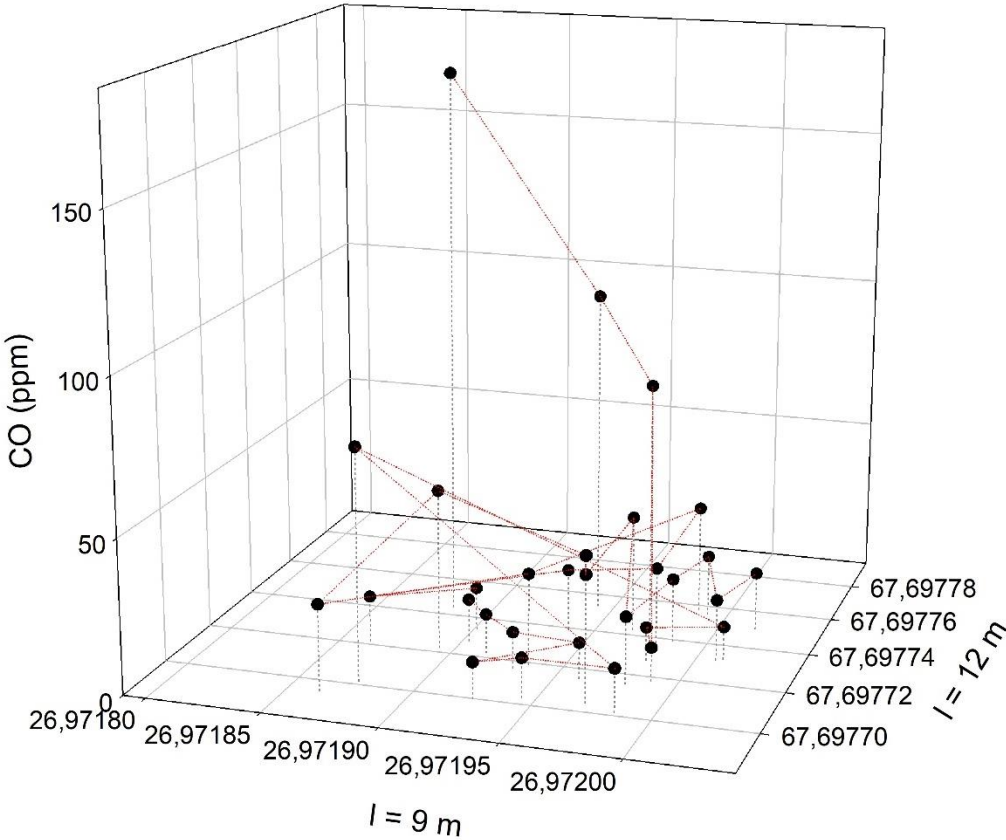
B1030M002 X5Y6



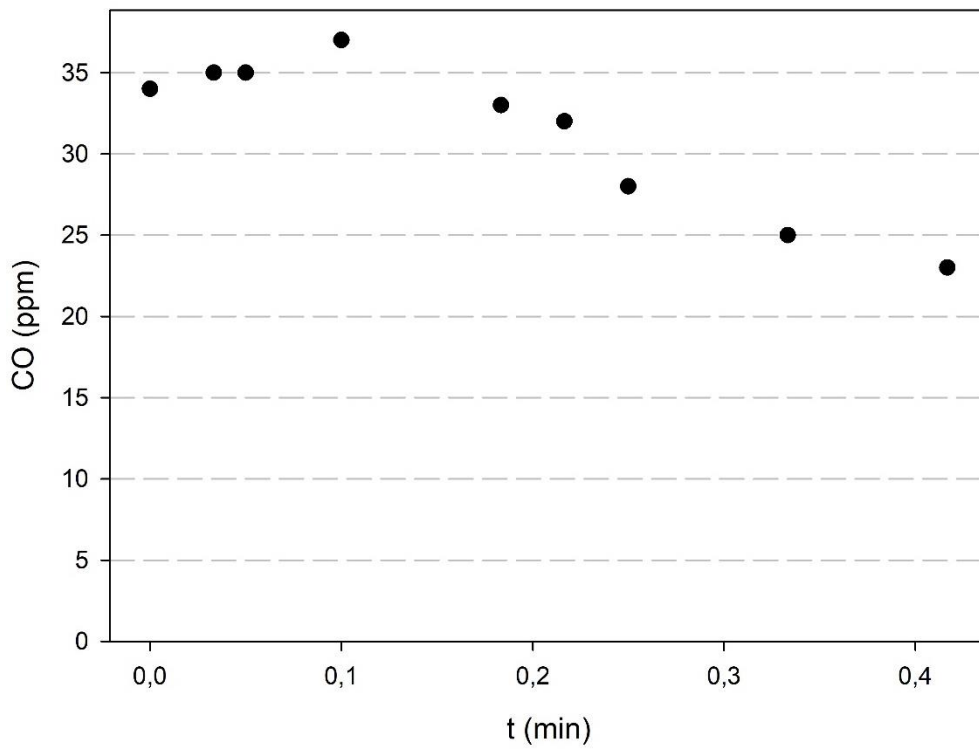
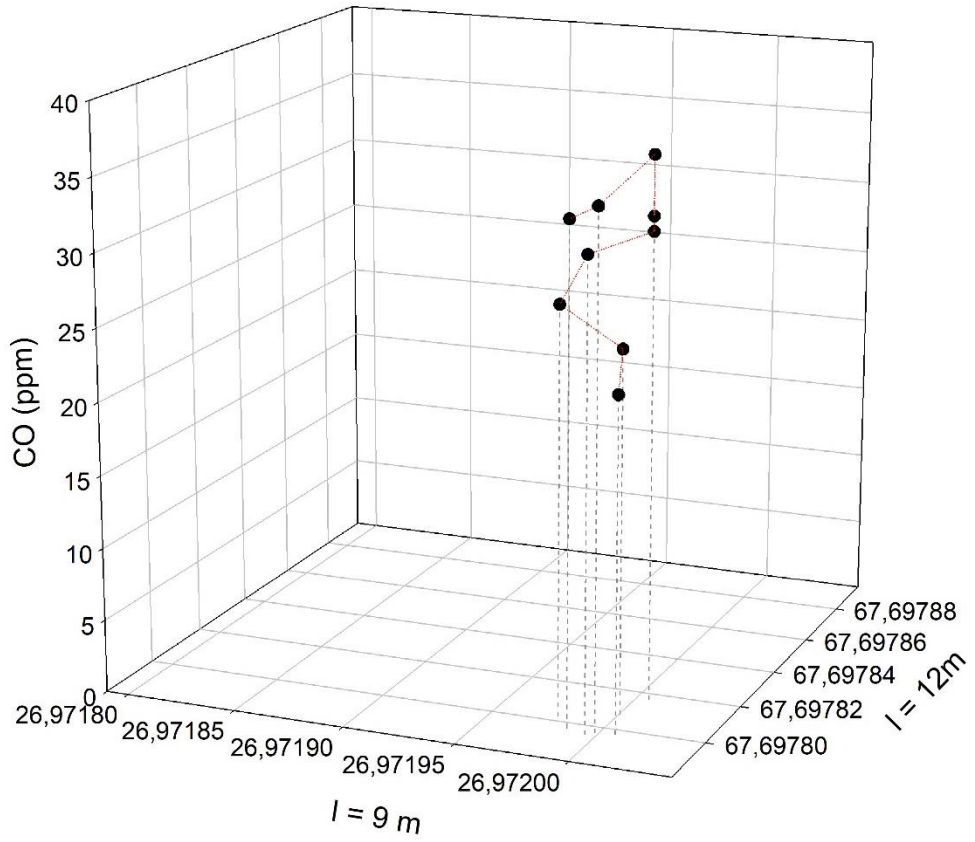
B1030M002 X6Y6



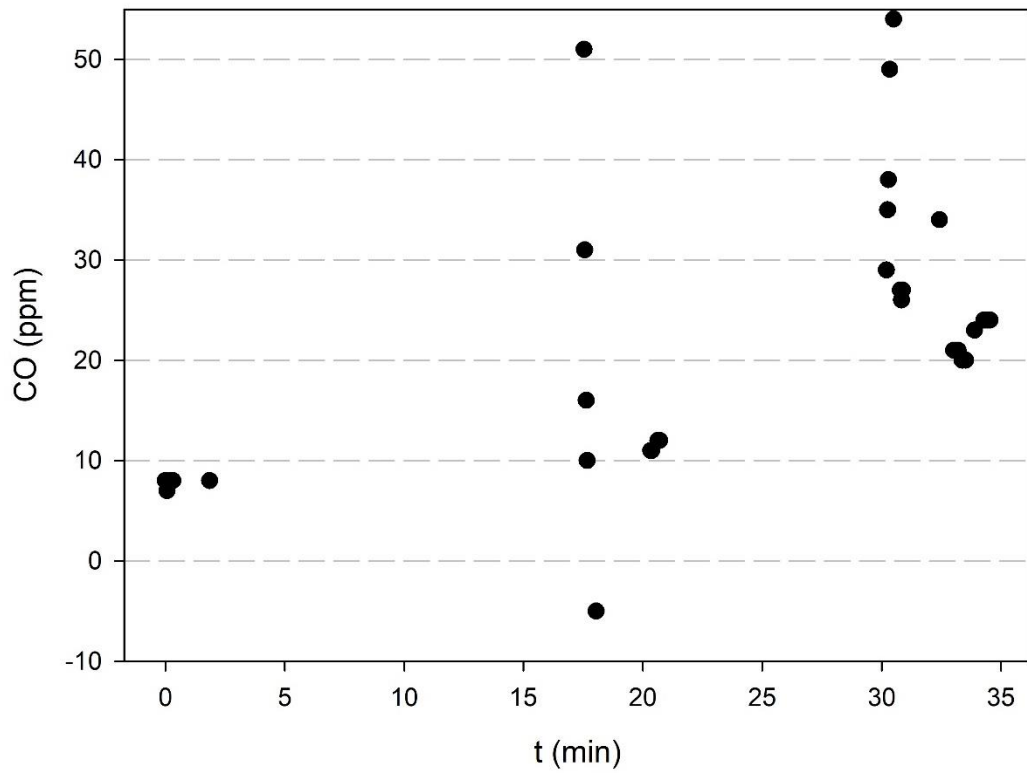
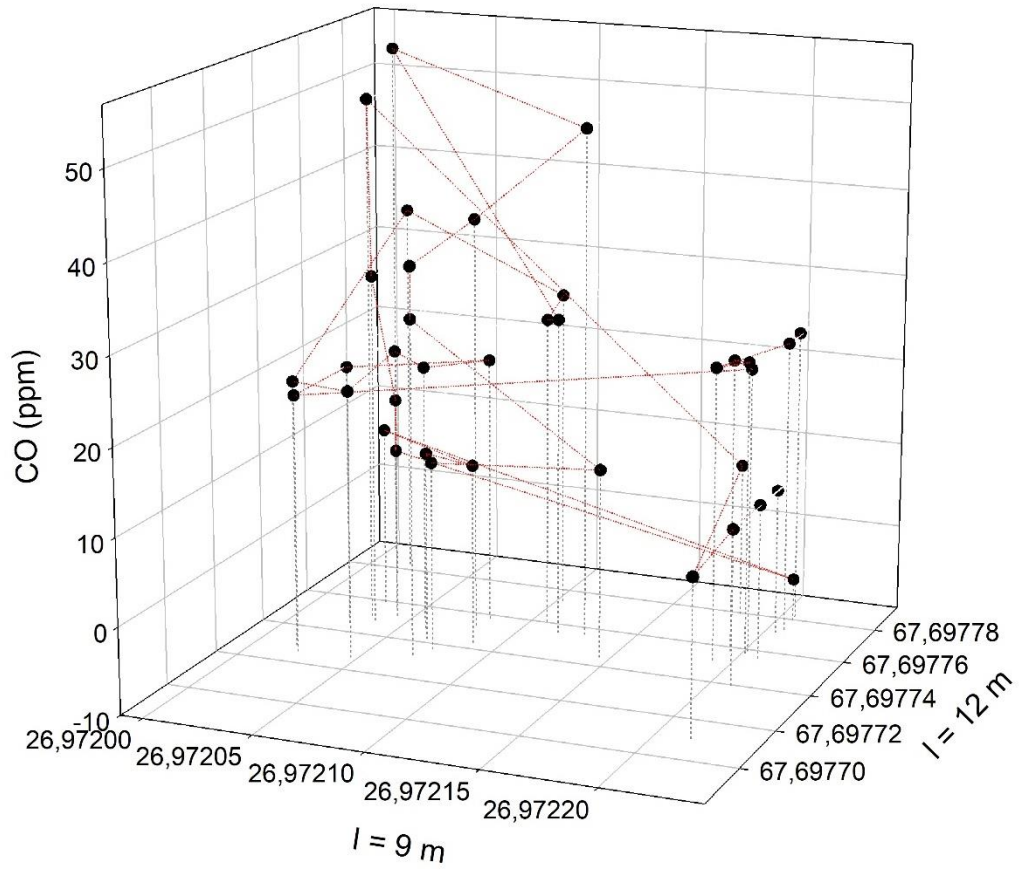
B1030M002 X6Y7



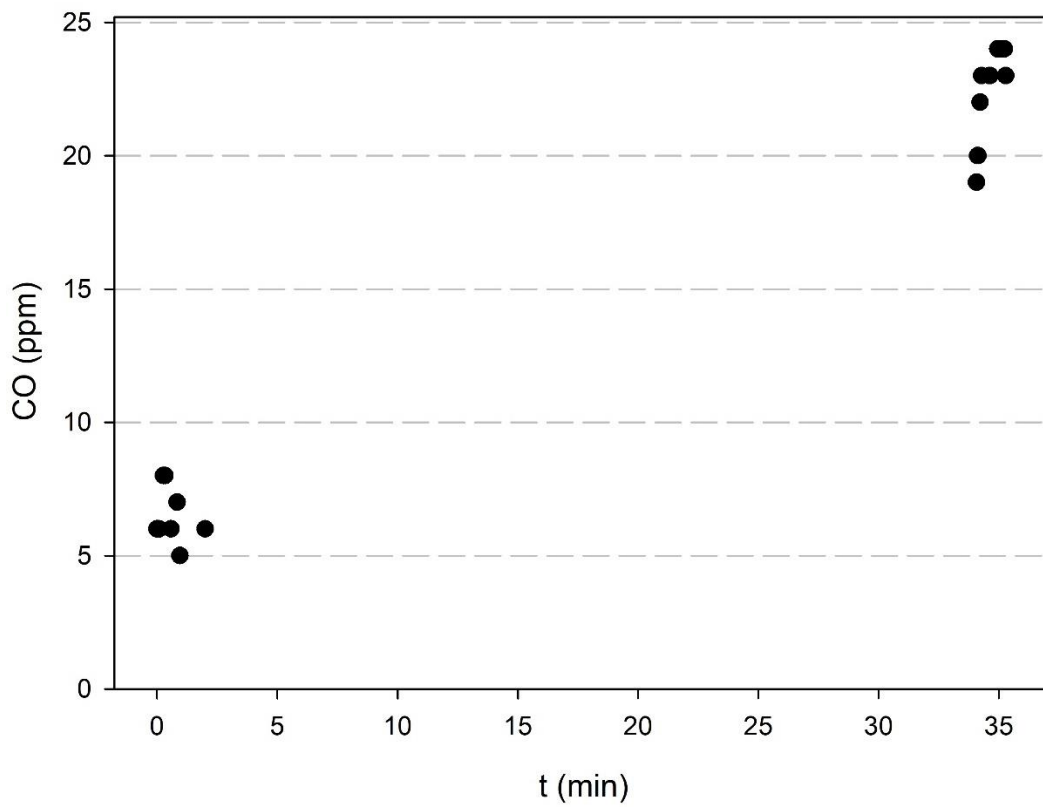
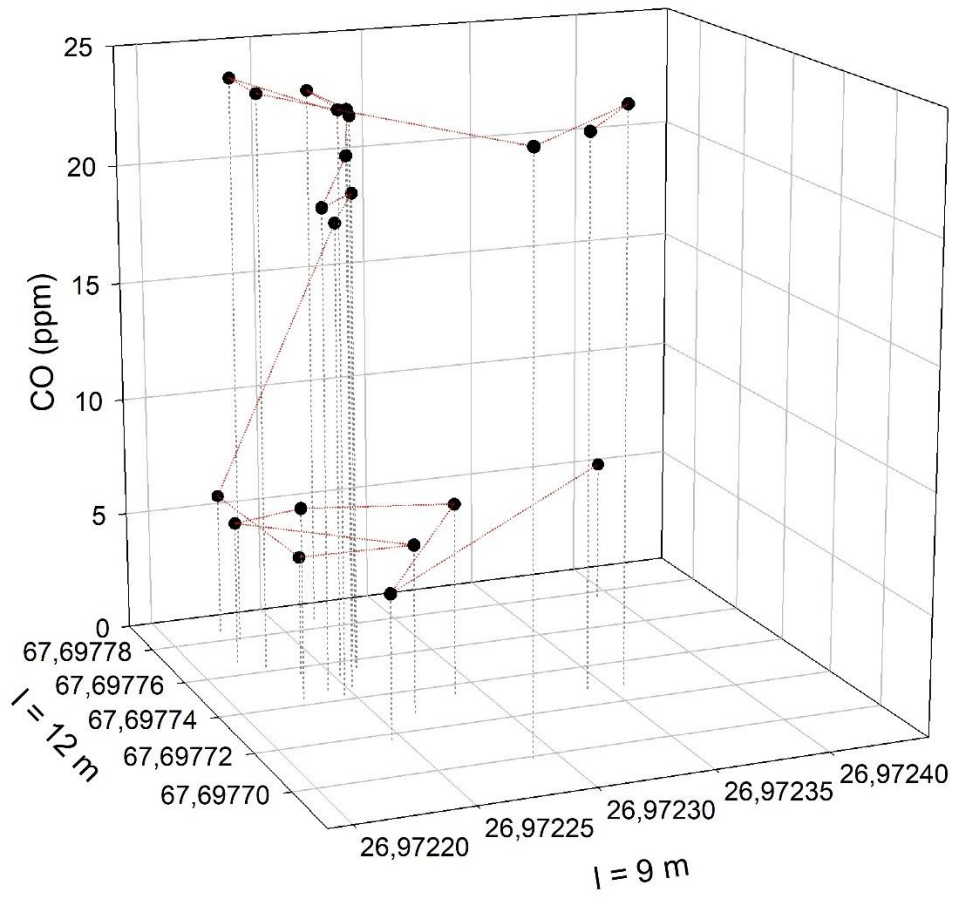
B1030M002 X6Y8



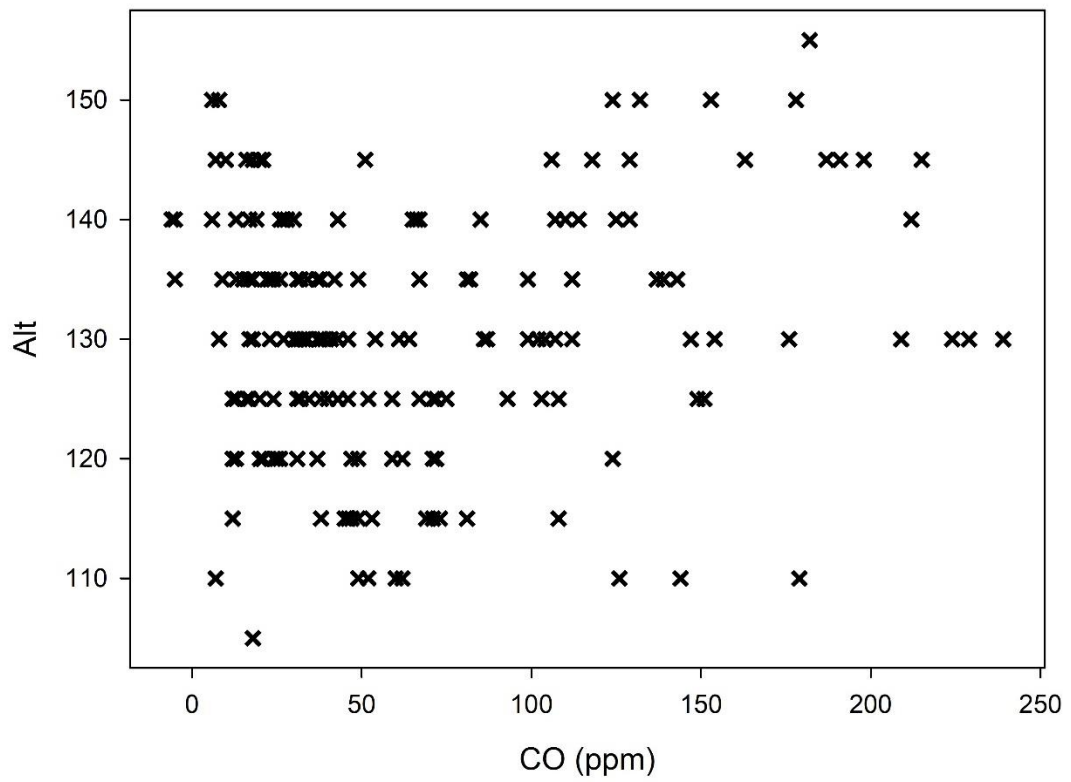
B1030M002 X7Y7



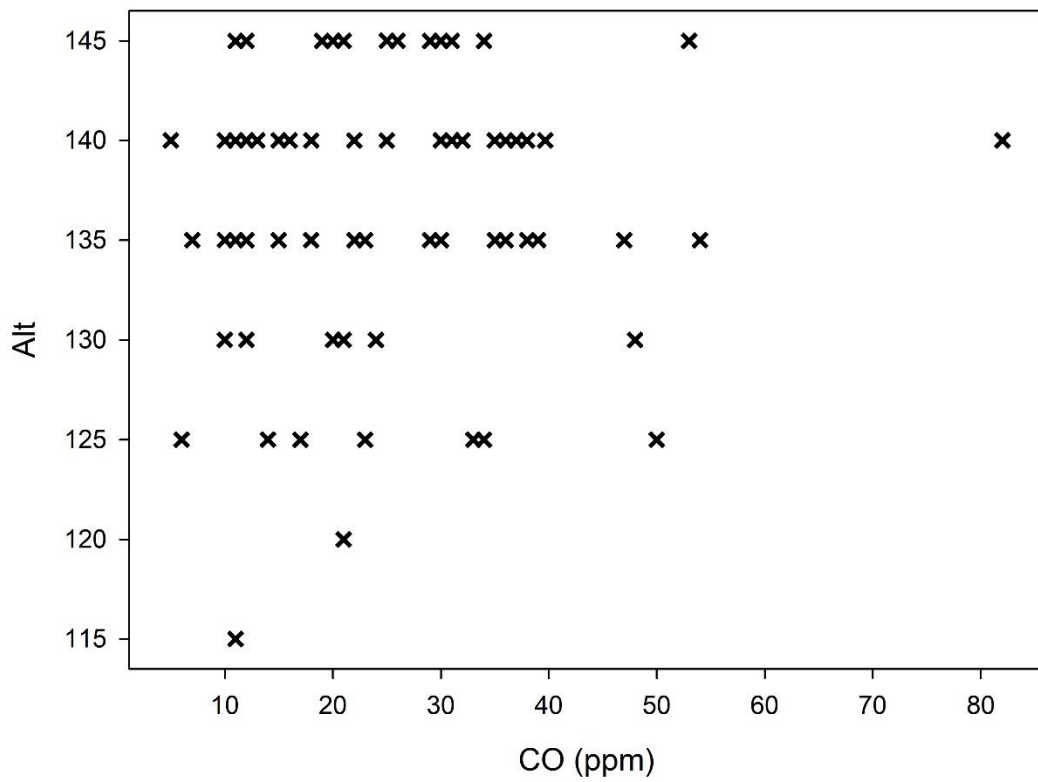
B1030M002 X8Y7



C1126R001



C1138R014



B1030M002

