



Typpipäästöjen hallinta louhin- tatyömaalla

Miikka Ala-Hiiri

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2025

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Infrarakentaminen

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Infrarakentaminen

ALA-HIIRO, MIIKKA:
Typpipäästöjen hallinta louhintatyömaalla

Opinnäytetyö 54 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Huhtikuu 2025

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin vesiliukoisia typpipäästöjä ja niiden esiintymistä työmaan purkuvesissä, kun käytössä on patruroidut räjähdysaineet. Vastaavaa tutkimusta ei ole aiemmin tehty työmaaolosuhteissa, mikä teki tutkimusaiheesta tarpeellisen. Työssä selvitettiin myös teoreettisesti erilaisia typenhallintamenetelmiä. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Destia Oy.

Opinnäytetyön tavoitteena on antaa realistinen kuva ja mittausdata valituista hallintatoimenpiteistä ja niiden vaikutuksista veden typpipitoisuuksiin. Työssä verrattiin saatuja tutkimustuloksia vastaavanlaisiin tutkimuksiin, jotka käsittelevät irtoräjähdysaineiden typpipäästöjä. Tutkimustulosten perusteella voidaan arvioida patruonoitujen räjähdysaineiden tuomaa etua vesiliukoisten typpipäästöjen määrään louhintatyömailla.

Lopputuloksena on louhintatyömaan typpipäästöjen hallintaan keskittyvä opinnäytetyö. Työssä on esitelty patruonoitujen räjähdysaineiden vesiliukoiset typpipäästöt työmaaolosuhteissa. Työn tarkemmat tulokset ovat salassa pidettäviä. Lisäksi työssä avataan erilaisia typenhallintamenetelmiä. Työn toimeksiantaja pystyy hyödyntämään tutkimuksessa saatuja tuloksia tulevaisuudessa vastaavanlaisissa hankkeissa sekä jatkotutkimaan hallintamenetelmien toimivuutta käytännössä.

Asiasanat: typpi, typpipäästöjen hallinta, maanrakennus, louhintatyömaa

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Civil Engineering

ALA-HIIRO, MIIKKA:
Management of Nitrogen Emissions at the Mining Site

Bachelor's thesis 54 pages, appendices 2 pages
April 2025

This thesis investigated water-soluble nitrogen emissions and their occurrence in construction site discharge waters when using cartridge explosives. There was a limited amount of research available on the topic. The thesis also theoretically examined various nitrogen management methods. The thesis was commissioned by Destia Oy.

The aim of the thesis was to obtain a realistic picture and measurement data of the selected management measures and their effects on nitrogen concentrations in water. The study compared the obtained research results with similar studies that deal with nitrogen emissions from loose explosives. Based on the study results, the advantage of cartridge explosives can be assessed in terms of the amount of water-soluble nitrogen emissions at excavation sites.

The result was a thesis focused on the management of nitrogen emissions at excavation sites. The thesis highlights the water-soluble nitrogen emissions of cartridge explosives in construction site conditions. The results of this study are confidential. Additionally, the thesis theoretically explored various nitrogen management methods. The commissioning party was able to utilise the results obtained from the study in future similar projects and further investigate the effectiveness of management methods in practice.

Key words: nitrogen, management of nitrogen, earthworks, mining site

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	TAUSTA.....	8
	2.1 Typpi	8
	2.2 Typpi räjähdysaineissa.....	9
	2.3 Typpipitoisuuksien tutkinta louhoksilla ja kaivoksissa irtoräjähdysaineilla louhittaessa	11
	2.3.1 Patrunoituja räjähdysaineita käytettäessä vastaavaa tutkimusta ei ole tehty	11
	2.3.2 Hallintamenetelmistä ja tekniikoista työmaaolosuhteissa ei ole tutkimustietoja	12
	2.4 Työmaa, jolla tutkimus suoritetaan.....	12
3	TAVOITE JA TUTKIMUSSUUNNITELMA	14
	3.1 Tavoitteena on saada realistinen kuva ja mittausdata valituista hallintatoimenpiteistä.....	14
	3.2 Tutkimussuunnitelma	14
4	SUUNNITELLUT HALLINTATOIMENPITEET	17
	4.1 Louhintatekniikan optimointi.....	17
	4.1.1 Räjähdysaineiden hallinta.....	17
	4.1.2 Louheen jalostaminen murskeeksi	18
	4.1.3 Räjähdysaineet.....	18
	4.2 Biohakereaktori	19
	4.3 Biohiilisuodatin	20
	4.3.1 Biohiili	21
	4.3.2 Suodattimen rakenne	22
	4.4 Typpipitoisten vesien ohjaaminen jätevesiviemäriin ja sitä kautta käsittelyyn jätevedenpuhdistamoon	23
5	KONGREETTISET TOIMENPITEET TYÖMAALLA JA NIIDEN TOTEUTUS	26
	5.1 Viivytyksaltaat ja suotopadot.....	26
	5.2 Saostuslavat	30
	5.3 Jätevesiviemärin purkulinja	34
6	MITTAUSMENETELMÄT JA MENETTELYT	38
	6.1 Sertifioitu näytteen ottaja.....	38
	6.2 Hach Lange pikamääritysmenetelmä	38
	6.3 Masinotekin mittakaivo.....	41
7	MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI	45
	7.1 Kerätty data.....	45

7.1.1 Hach Lange pikamääritysmenetelmä	45
7.1.2 Hallintamenetelmien tulokset.....	47
7.2 Vertailukohteet	47
7.2.1 Metsätutkimuslaitos, Kaira-hanke.....	47
7.2.2 Infra ry, Selvitys kiviainesalueiden tyyppipäästöistä	48
7.2.3 Työmaa, jolla tutkimus suoritettiin.....	48
7.3 Yhteenveto.....	48
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	49
9 MAHDOLLISET JATKOTOIMENPITEET	50
10 POHDINTA	51
LÄHTEET	52
LIITTEET	54
Liite 1. Kolmen kuukauden ajalta kerätyt mittaustulokset.....	54

LYHENTEET JA TERMIT

HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut
Rehevöityminen	Vesistön laadun heikkeneminen, joka johtuu ylimääräisten ravinteiden, kuten typen ja fosforin, aiheuttamasta planktonlevien kasvusta
Kokonaistyyppi	veden kokonaistyyppipitoisuus, joka sisältää ammoniumin, ammoniakkin, nitriitin, nitraatin ja vapaan typen
Denitrifikaatio	Prosessi, jossa bakteerit pelkistävät nitraatin kaasumaiseksi, haihtuvaksi typeksi
Nitrifikaatio	Prosessi, jossa ammonium hapettuu nitriitiksi ja edelleen nitraatiksi
Patrunoitu räjähdysaine	Räjähdysaine, joka on pakattu patruunaan, mikä suojaa sitä ympäristövaikutuksilta
Irtoräjähdysaine	Räjähdysaine, joka ei ole pakattu patruunaan ja on alttiimpi ympäristövaikutuksille
Viivytyksallas	Altaat, jotka viivyttävät veden virtausta ja laskeuttavat kiintoainetta
Suotopato	Rakennelma, joka viivyttää veden virtausta ja sitoo kiintoainetta
Saostuslava	Teräksinen lava, jossa vesi saostuu ja kiintoaine laskeutuu pohjalle
Spektrofotometri	Laite, joka mittaa näyteliuoksen valo absorptiota eri aallonpituuksilla ja määrittää aineiden pitoisuuksia
Pikamääritysmenetelmä	Nopea menetelmä, jolla mitataan aineiden pitoisuuksia näytteestä
Hallintamenetelmä	Menetelmä, jolla pyritään vähentämään tai hallitsemaan ympäristöön kohdistuvia päästöjä

1 JOHDANTO

Typpi on välttämätön alkuaine kaikelle elämälle maapallolla, ja sitä esiintyy ilmakehässä, maaperässä, vesistöissä ja eliöissä. Typen eri yhdisteet, kuten ammonium, ammoniakki, nitriitti, nitraatti ja vapaa typpi, muodostavat veden kokonaistyyppipitoisuuden. Suuret typpimäärät vedessä voivat aiheuttaa vesistöjen rehevöitymistä, mikä johtaa planktonlevien kasvuun, veden sameutumiseen ja happikatoon, vaikuttaen kalakantoihin negatiivisesti.

Louhinnasta aiheutuvat vesiliukoiset typpipäästöt ovat peräisin räjähdysaineista, kuten ammoniumnitraatista. Räjähdyksen yhteydessä typpi vapautuu ympäristöön, mutta osa räjähdysaineen tuestä voi jäädä reagoimatta ja muuttua vesiliukoiseksi typpipäästökseksi. Vesistöihin päätyvän typen määrää on vaikea arvioida ennakkoon, koska siihen vaikuttavia tekijöitä on paljon, kuten louhintatekniikka ja vesiolosuhteet.

Patrunoitujen räjähdysaineiden typpipäästöistä työmaaolosuhteissa ei ole aiempaa tutkimusdataa, mikä synnytti idean tähän opinnäytetyöhön. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää louhinnasta syntyvien typpipäästöjen määrä työmaavesissä, kun käytetään patruonoituja räjähdysaineita, sekä tutkia erilaisia hallintamenetelmiä, joilla voidaan alentaa kokonaistypen määrää työmaavesissä.

Tutkimus suoritettiin yhteistyössä Destia Oy:n kanssa heidän maanrakennustyömaallaan Kirkkonummella. Tarkoitus oli saada realistinen kuva ja mittausdata työmaavesien typpipitoisuuksista ja hallintamenetelmien vaikutuksista. Työssä käydään läpi myös konkreettisia toimintatapoja ja menetelmiä työmaavesien hallinnasta ja sitä pystytään hyödyntämään tulevaisuudessa vastaavanlaisissa projekteissa. Opinnäytetyö toimii hyvänä pohjana laajemmalle jatkotutkimukselle sekä tarjoaa lukijalle mahdollisuuden tutustua aiheeseen.

2 TAUSTA

2.1 Typpi

Typpi on alkuaine, jota esiintyy ilmakehässä, maaperässä, vesistöissä ja kaikissa eliöissä. Kyseinen alkuaine on välttämätön kaikelle elämällä maapallolla. Typeä esiintyy myös erilaisina yhdisteinä, kuten aminohappoina ja nitraatteina. Kokonaistyyppi viittaa veden kokonaistyyppipitoisuuksiin, joihin kuuluvat yhdisteet ovat ammonium (NH_4^+), ammoniakki (NH_3), nitriitti (NO_2), nitraatti (NO_3) ja vapaa typpi (N_2) (Kontolampi 2005, 15). Veteen liuenneista yhdisteistä kokonaistyyppipitoisuudessa on eniten nitraattia (75–99 %). Ammoniumia (0,5–24 %) ja nitriittiä (0–6 %) on seuraavaksi eniten, mutta vesistöön päästessään näiden osuus laskee. Vedessä ammonium hapettuu nitriitiksi ja bakteeritoiminnan avulla nitraatiksi (Laurila, Uimarihuhta, Savolainen, Reijula, Rearinne & Mutila 2022, 13).

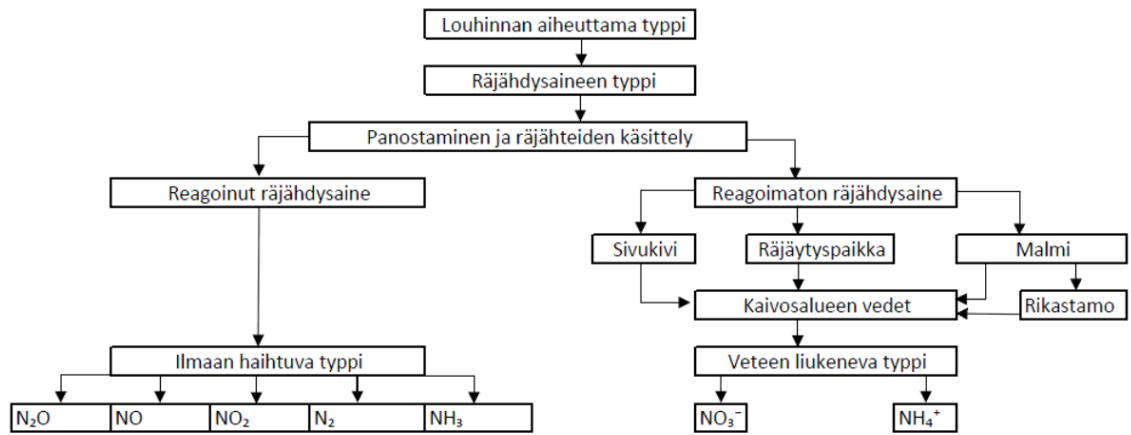
Vesientuotannon ja rehevöitymisen kannalta suurimmat ravinnekuormitukset tulevat typen ja fosforin yhteisvaikutuksesta. Suuret typpimäärät vedessä rajoittavat mikro- ja makrolevien perustuotantoa, mikä aiheuttaa vesistöjen rehevöitymistä. Vesistöjen rehevöityminen on vesistön laadun kannalta haitallinen prosessi. Planktonlevien kasvu nopeutuu ylimääräisen ravinnon ansiosta, kun vedessä on korkeat typpi-arvot. Planktonlevien kasvun seurauksena vesi samenee, veden kasvillisuus lisääntyy (kuva 1), leväesiintymät yleistyvät ja talvisin voi esiintyä happikatoa, mikä vaikuttaa kalakantoihin negatiivisesti (Kontolampi 2005, 17).



KUVA 1. Kuvassa rehevöitynyt vesistö. (Anneli Alfthan, WWF).

2.2 Typpi räjähdysaineissa

”Louhinnasta aiheutuvat vesiliukoiset typpipäästöt on peräisin räjähdysaineen pääraaka-aineena käytettävästä ammoniumnitraatista (NH_4NO_3) sekä räjähteestä riippuen natriumnitraatista ($NaNO_3$) ja kalsiumnitraatista ($CaNO_3$)” (Partamies 2017, 7). Räjähdysaineen räjäytyksen yhteydessä typpi vapautuu ympäristöön typpikaasuna ja typen oksideina, eikä näin ollen suoraan aiheuta vesiliukoisia typpipäästöjä. Ongelma tyypestä tulee siinä vaiheessa, kun osa räjähdysaineen sisältämästä tyypestä ei reagoi räjähdyksessä ja jää räjähtämättä. Kun räjähtämättä jäänyt typpi pääsee kosketukseen veden kanssa, se muuttuu vesiliukoiseksi typpipäästökseksi ja voi tätä reittiä pitkin päätyä luonnon vesistöihin haitallisena typpipäästönä. Kuvassa (2) on esitetty louhinnasta aiheutuvan typen kulkeutumiskaavio.



KUVA 2. Louhinnasta aiheutuvan typen kulkeutumiskaavio. (Partanen, 2017).

Vesistöihin päätyvän typen määrää on vaikea arvioida ennakkoon, koska siihen vaikuttavia tekijöitä on paljon. Louhintatekniikan optimoinnilla on suuri vaikutus, kuten esimerkiksi käytettävä räjähdysaine, sen käsittely ennen ja jälkeen räjähdysten sekä louhinta-alueella vallitsevat vesiolosuhteet. Infra ry (2022) tekemässä selvityksessä kiviainesalueiden typpipäästöistä sekä lasketusaltaiden toiminnasta ja mitoituksista kerrotaan, että Ruotsissa tehdyn selvityksen mukaan avolouhinnassa reagoimatonta räjähdysainetta jäi keksimäärin 5–10 %, kun taas maanalaisessa louhinnassa 10–20 % (Laurila ym. 2022, 13). Tutkimus suoritettiin irtoräjähteillä, joten siitä saatuja tuloksia ei voi suoraan verrata patruunoituja räjähteitä käytettäessä.

Useimmiten syynä räjähtämättömälle räjähdysaineelle on viereisessä reiässä tapahtunut räjähdys muutama millisekunti aiemmin. Aikaisempi räjähdys on saattanut repiä vielä räjähtämättömien panostettujen reikien osia, mikä voi estää täydellisen räjähdysaineen räjähdysten. Tällaisissa tapauksissa pääasiallisia syitä ovat kallion epäjatkuvuudet tai porauksen epätarkkuudesta johtuvat virheet porauskaaviossa. Osassa tapauksissa ongelman aiheuttaja voi olla myös vesi, sillä kaikki räjähdysaineet eivät ole vedenkestäviä.

2.3 Typpipitoisuuksien tutkinta louhoksilla ja kaivoksissa irtoräjähdyksineillä louhittaessa

Louhos ja kaivosalueilla on tehty useita tutkimuksia. Ympäristönäkökulmat ovat olleet jatkuvassa kasvutrendissä viime vuosien aikoina ja typen aiheuttamiin ympäristöhaittoihin kiinnitetään enemmän huomiota (Heikkinen 2018, 7). Diplomityössä Roope Partamies (2018) tutki Kittilän kaivoksella maanalaisesta tuotantolouhinnasta aiheutuvia malmiin jääneitä typpipäästöjä. Tutkimuksen mukaan keskimäärin noin 30 % räjähdysaineesta jäi reagoimatta. Tutkimustuloksissa analysoitiin, onko nousun tyypillä ja panostussukan käytöllä vaikutuksia typpipäästöihin. Tulosten mukaan kiertoporattuja avausreikiä hyödyntävällä nousun tyypillä saavutettiin alhaisemmat typpipäästöt kuin tavanomaisella pitkäreikänousulla. Panostussukan vaikutuksesta typpipäästöihin ei saatu riittävän selkeitä tuloksia, jotta sen merkityksestä voisi tehdä johtopäätöksiä (Partamies 2018, 2).

Kaivoksilla ja louhoksilla on tutkittu eri menetelmiä, joilla typpipäästöjä saataisiin hallittua. Tuija Heikkinen (2018) selvitti opinnäytetyössään ammoniumpäästöjen vähentämistä vermikuliitin ja zeoliitin avulla. Selvityksessä käy ilmi, että edellä mainitut mineraalit absorboivat ammoniumia, ja näin ollen vähensivät kokonaisympäristön määrää vedessä (Heikkinen 2018, 14–15). Suomen ympäristö keskus on julkaissut oppaan parhaista ympäristökäytännöistä metallimalmikaivostoiminnassa. Julkaisussa on avattu parhaita ympäristökäytäntöjä, lainsäädäntöä ja hallintamenettelyjä, joiden avulla ja yhdistämisellä voidaan ehkäistä ympäristön pilaantumista tarkoituksen mukaisesti ja kustannustehokkaasti.

2.3.1 Patrunoituja räjähdysaineita käytettäessä vastaavaa tutkimusta ei ole tehty

Patrunoitujen räjähdysaineiden typpipäästöistä työmaaolosuhteissa ei ole aiempaa tutkimusdataa, jonka johdosta syntyi idea tähän opinnäytetyöhön. Typpipäästöt voivat vaikuttaa haitallisesti ilmanlaatuun, vesistöihin ja maaperään, mikä puolestaan voi johtaa ekosysteemien häiriintymiseen ja biodiversiteetin väheneemiseen. Ilman tutkimusdataa on vaikea arvioida näiden päästöjen laajuutta ja vai-

kutuksia ympäristöön. Työmaaolosuhteet ovat usein monimutkaisia ja vaihtelevia, mikä tekee patrunoitujen räjähdysaineiden käytön ympäristövaikutusten enustamisesta haastavaa. Patrunoitujen räjähdysaineiden tyyppipäästöjen tutkiminen työmaaolosuhteissa voi jatkossa auttaa kehittämään tehokkaita toimintatapoja päästöjen hallitsemiseksi ja minimoimiseksi. Tämä tutkimus on tarpeellinen ympäristönsuojelun kannalta, jotta voidaan varmistaa, että työmaatoiminta ei aiheuta tarpeetonta haittaa luonnolle ja ekosysteemeille.

2.3.2 Hallintamenetelmistä ja tekniikoista työmaaolosuhteissa ei ole tutkimustietoja

Typenhallintamenetelmiä on tutkittu aiemmin erinäisissä ympäristöolosuhteissa ja niistä löytyy tutkimusdataa erinäisissä ympäristöissä ja olosuhteissa toteutettuina. Nicolas Peart (2022) tutki Alavudella biohakereaktorin toimintaa Alavudenjärven kunnostuksessa. Biohakereaktorin tärkein tehtävä oli vähentää ravinteiden kulkeutumista järveen. Tomi Kirjokivi (2018) on tutkinut biohiiltä ja sen ominaisuuksia hulevesien käsittelyssä. Selvitys oli kirjallinen ja sisälsi haastatteluita sekä taustaselvityksiä eri biohiiltien ominaisuuksista. Myös Janne Ramstadius (2023) tutki biohiiltä opinnäytetyössään. Hänen aiheensa oli biohiilen absorptiokäyttäytyminen lietelannassa, eli tutkia biohiilen kyky sitoa typpeä naudun lietelannassa. Lisäksi Tuija Heikkinen (2018) tutki opinnäytetyössään vermikuliitin ja zeoliitin soveltuvuutta ammoniumin poistoon kaivosvedestä. Ammoniumin määrä veteen liuenneesta kokonaistypessä on noin 0,5–24 %. Aiempien esimerkkien kautta voidaan todeta, että eri hallintamenetelmiä on tutkittu, mutta mitään niistä ei ole tutkittu työmaaolosuhteissa.

2.4 Työmaa, jolla tutkimus suoritetaan

Opinnäytetyössä oleva tutkimus suoritetaan yhteistyössä Destia Oy:n kanssa heidän maanrakennustyömaallaan Kirkkonummella. Tarkkoja tietoja työmaan sijainnista, työmaalla tapahtuvasta työstä tai tilaajasta ei avata tässä opinnäytetyössä salassapitovelvollisuuden takia. Näillä tiedoilla ei kuitenkaan opinnäyte-

työn kannalta ole oleellista merkitystä tutkimuksen suorittamisen tai tutkimustulosten kannalta. Destia Oy tekee työmaalla maanrakennustöitä, joihin kuuluu myös kallion avolouhintaa.

Työmaa soveltuu tähän opinnäytetyötutkimukseen koska, työmaalla käytetään avolouhinnassa patruonoituja räjähdysaineita, minkä johdosta pääsemme keräämään arvokasta dataa vesiliukoisten typpipäästöjen määrästä ja vertailemaan saatua dataa vastaavan kaltaisiin tutkimuksiin, joissa on käytetty irtoräjähteitä. Lisäksi opinnäytetyössä huomioidaan tilaajan kanssa yhdessä sovitusta lupaehdoista sekä HSY:n laatimaan työmaavesiohjeeseen. Työmaalta purettavalle vedelle on asetettu tiettyjä raja-arvoja, jotka tulee täyttyä ennen kuin sitä voidaan purkaa ekologiselle alueelle. Kokonaistypen osalta raja-arvo on erittäin tiukka, 2,5 mg/l. Tutkimuksen aikana pystytään seuraamaan louhinnan vaikutusta kokonaistypen määrään työmaavesissä ja sen vaikutuksesta työmaavesien purkuehdoille. Tarkoituksena on myös tutkia erilaisia typenhallintamenetelmiä, joilla voimme mahdollisesti laskea kokonaistypen määrää alle 2,5 mg/l työmaan purkuvesissä.

3 TAVOITE JA TUTKIMUSSUUNNITELMA

3.1 Tavoitteena on saada realistinen kuva ja mittausdata valituista hallintatoimenpiteistä

Tutkimustyön tavoitteena on selvittää louhinnasta syntyvien typpipäästöjen määrä työmaavesissä, kun louhinnassa käytetään patruonoituja räjähdysaineita. Lisäksi tarkoitus on tutkia erilaisia hallintamenetelmiä, joilla voidaan alentaa kokonaistypen määrää työmaavesissä. Tavoitteena on saada realistinen kuva ja mittausdata valituista hallintatoimenpiteistä ja niiden vaikutuksista veden typpi-
pitoisuuksiin. Eri menetelmien nopeutta ja tehokkuutta tutkitaan, ja saadun datan perusteella niitä pystytään vertailemaan keskenään. Opinnäytetyön lopussa tavoitteena on olla selvä kuva eri hallintatoimenpiteiden vaikutuksista kokonaistypen määrään. Lisäksi saamme arvokasta dataa, jonka perusteella voimme tulevaisuudessa arvioida eri työmailla hallintamenetelmien tarpeellisuutta.

3.2 Tutkimussuunnitelma

Opinnäytetyössä on tarkoitus tutkia ja selvittää kokonaistypen esiintymistä ja sen määrää avolouhintatyömaan työmaavesissä. Työmaalla käytettävät räjähdysaineet ovat patruonoituja. Työmaalla tutkitaan myös erilaisia typpenhallintamenetelmiä. Tutkittavia asioita hallintamenetelmissä ovat niiden tehokkuus kokonaistypipitoisuuksien alentamisessa työmaavedestä, menetelmien nopeus ja käytännöllisyys. Menetelmien tuloksia verrataan keskenään ja lopputuloksien pohjalta pystytään perustelemaan, mikä menetelmistä osoittautuu parhaaksi. Tutkimustulokset antavat myös vastauksia siihen, onko työmailla järkevämpää keskittyä vain työmaavesien purkuun jätevesiviemäriin, vai onko hallintamenetelmien rakentamisella ympäristöllisen hyödyn lisäksi myös muita hyötyjä.

Työmaan purkuvesistä otetaan vesinäyte päivittäin ja se analysoidaan työmaalla. Päivittäisessä mittaamisessa käytetään Hach Lange pikamääritysmenetelmää. Tämä mittausmenetelmä perustuu spektrofotometriseen mittalaitteeseen ja lait-

teen valmistajan omiin reagenssiputkiin, joihin lisätään tutkittava näyte sekä mitauksissa käytettäviä reagensseja. Tätä mittaussuomenetelmää käyttämällä pystymme itse määrittämään näytteenottopisteet ja määrät. Työmaavesiä näytteistetään myös samanaikaisesti sertifioitun vesinäytteenottajan toimesta ja vesinäytteet analysoidaan laboratoriossa. Laboratoriossa mitattujen näytteen avulla pystymme vertailemaan pikamääritysmenetelmän tarkkuutta.

Tutkittavia hallintatoimenpiteitä ovat louhintatekniikan optimointi, biohakereaktori, biohiilisuodatin, sekä typpipitoisten vesien ohjaaminen jätevesiviemäriin ja sitä kautta jätevedenpuhdistamoon. Tutkimuksella haluamme saada vastauksen seuraaviin kysymyksiin:

1. Kuinka paljon vesiliukoisia typpipäästöjä esiintyy avolouhintatyömaan työmaavesissä, kun räjähdysaineina käytetään patruunoituja räjähteitä?
2. Pystytäänkö typpihallintamenetelmillä vaikuttamaan vesiliukoisiin typpipäästöihin työmaaolosuhteissa?
3. Mikä tutkittavista hallintamenetelmistä toimii parhaiten työmaaolosuhteissa?
4. Kannattaako tulevaisuudessa panostaa työmaalla typpihallintamenetelmiin, vai onko järkevämpää purkaa työmaavedet suoraan jätevesiviemäriin?

Ensimmäisellä tutkimuskysymyksellä halutaan selvittää vesiliukoisten typpipäästöjen ero patruunoiduilla räjähdysaineilla ja irtoräjähdysaineilla louhittaessa.

Toisen tutkimuskysymyksen tarkoitus on saada selville se, että pystytäänkö eri hallintatoimenpiteillä työmaaolosuhteissa ja verrattain lyhyessä ajassa vaikuttamaan vesiliukoisiin typpipäästöihin alenevasti?

Kolmannella tutkimuskysymyksellä pyritään selvittämään eri hallintamenetelmien tehokkuus ja niiden paremmuus järjestys.

Neljännellä tutkimuskysymyksellä tarkoitetaan saada realistinen kuva hallintamenetelmistä, ja siitä kannattaako niiden rakentamiseen panostaa tulevaisuudessa vastaavan kaltaisilla työmailla?

Opinnäytetyö on aloitettu loppuvuodesta 2024 aloittamalla työskentely työmaalla, lähtötietojen keruulla ja tutustumisella aiheeseen, teoria-aineiston keräämisellä sekä teoriaosion kirjoittamisella. Vesinäytteiden analysointi ja tulosten kerääminen on aloitettu tammikuussa 2025, ja tuloksia kerätään maaliskuun 2025 loppuun asti. Tavoitteena on saada tulosten analysointi valmiiksi huhtikuussa 2025 ja opinnäytetyö valmiiksi huhtikuussa 2025.

4 SUUNNITELLUT HALLINTATOIMENPITEET

4.1 Louhintatekniikan optimointi

Louhintatekniikan optimoimisessa suuri vaikutus tällä työmaalla tulee räjähdysaineen valinnasta ja sen oikeanlaisesta hallinnasta. Työmaalla on käytössä patruunoidut räjähdysaineet. Avolouhinnassa käytetään normaalisti irtoräjähdysaineita. Patruunoitujen räjähdysaineiden etu on, että typpipitoinen räjähdysaine on patruunakalvon sisässä suojassa mahdollisilta ympäristövaikutuksilta aina tehtaalta lähtemisestä ja kuljetuksesta työmaalle, panostetaan porareikään ja räjäytetään. Toimintaketjussa on monta vaihetta, joissa räjäytysaine voi päästä kosketuksiin veden kanssa. Patruunointi lisää todennäköisyyttä sille, että kaikki käytössä oleva räjähdysaine reagoi räjäytyksessä, mikä vähentää typen joutumista veden kanssa kosketuksiin.

4.1.1 Räjähdysaineiden hallinta

Räjähdysaineiden oikeanlaisella hallinnalla pystytään vaikuttamaan merkittävästi räjähdystehokkuuteen. Räjähdeiden huolellinen käsittely työmaalla ennen panostusta ja panostuksen aikana on yksi suurimmista tekijöistä, joka vaikuttaa räjähteiden päätymiseen vesiin. Lisäksi oikealla panostustekniikalla, kuten työmaalla käytössä olevalla tuplanallien käytöllä, voidaan varmistaa kaikkien räjähdysaineiden räjähtäminen. Porareikien kuivaaminen puhaltamalla ennen panostusta voi auttaa myös estämään räjähdysaineen ennenaikaista liukenemistä veteen.

Räjähdeiden oikeanlaisella säilytyksellä voidaan vaikuttaa siihen, päätyykö räjähdysaineita vesiin ennen räjäytystä. Räjäytysaineet säilytetään kuivassa ja lämpimässä, sateelta suojassa olevassa paikassa. Työmaalle tuodaan päivittäin vain tarvittava määrä räjähteitä päivän räjäytyksiin, eikä niitä säilötä yön yli. Mikäli räjähteitä jostain syystä jäisi ylimääräiseksi, mikä on epätodennäköistä, ne kuljetaan räjähteiden toimittajan toimesta pois työmaalta.

4.1.2 Louheen jalostaminen murskeeksi

Työmaalla louhittu kallio hyödynnetään murskaamalla se työmaalle sijoitetulla murskaimella. Näin louheesta saadaan työmaalle käyttöön tarpeellista KaM 0/90 mursketta, eikä sitä tarvitse kuljettaa valtavia määriä pois työmaalta. Mursketta käytetään työmaalla täyttötöihin, työmaateihin, meluvalleihin sekä altaiden eroosiosuojauksiin. Louheen murskaaminen pidentää typen liukoisuusaikaa sadeveesiin ja vähentää typen liukenemisaikaa työmaavesiin. Murskeen etu on myös siinä, että vesi ei pääse suoraan valumaan murskeen läpi, vaan se lammikoituu murskerakenteen pinnalle tai valuu murskeen pintaa pitkin.

Louheen murskaaminen lisää myös huomattavasti rakenteissa käytettävän kiviaineksen pinta-alaa, mikä samassa suhteessa alentaa typpipitoisen kivipinta-alan määrää. Typpi pääsee liukenemaan veteen ainoastaan murskerakenteen pinnasta.

4.1.3 Räjähdysaineet

Työmaalla käytettäväksi valikoidut patruroidut räjähdysaineet ovat kaikki joko täysin vedenkestäviä tai niillä on hyvä vedenkestävyys. Valitut räjähteet ovat Forcitin valmistama Fordyn-dynamiitti sekä saman valmistajan Kemix A MP. Lisäksi käytössä on Orican valmistamaa Senatel™ Powerfrag™ -emulsioräjähdeainetta, ja Cordtex™ N räjähtävä tulilanka.

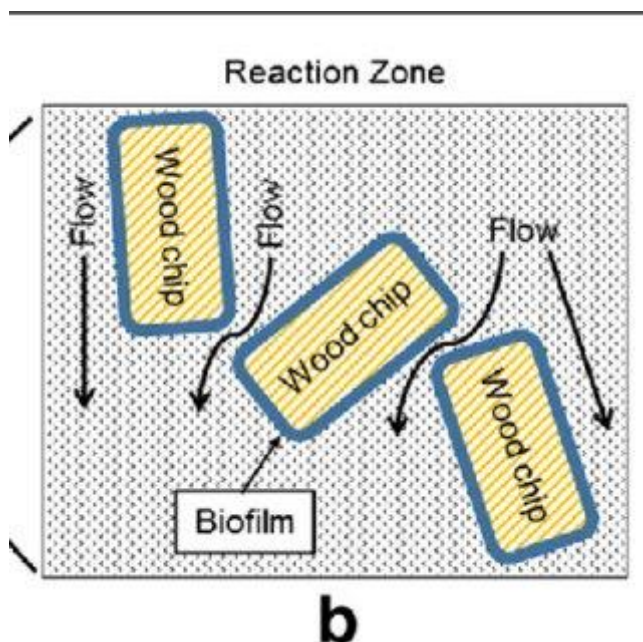
Fordyn-dynamiitti on gelatiiniräjähde, jonka raaka-aineina on mm. nitroglykoli ja ammoniumnitraatti. Se soveltuu monenlaiseen räjäytystyöhön normaaleissa olosuhteissa, ja sen ominaisuuksien sekä hyvän vedenkeston takia sitä käytetään erityisesti vedenalaisessa louhinnassa. Patruoitu emulsioräjähdeaine Kemix A MP sopii myös ominaisuuksiensa puolesta kaikenlaisiin louhintatöihin. Sillä on erinomainen vedenkesto, koska se on veteen liukenematon, toimii luotettavasti myös märissä räjäytysreioissa sekä se on ympäristöystävällinen (Forcit 2024).

Myös Senatelin™ Powerfrag™ -emulsioräjähdeaine on vedenkestävä patruoitu räjähdysaine. Se on erittäin voimakas ja nalliherkkä räjähdysaine, joka soveltuu

muiden tavoin kaikenlaiseen louhintaan. Cordtex™ N on PVC-muovilla päällystetty räjähtävä tulilanka. Sen ominaisuuksiin kuuluu erinomainen vedon, hankauksen ja kosteuden kestävyys. Mikäli tulilankaa tulee leikata, pitää varmistaa päiden huolellinen teippaus, jotta vedenkestävyys pysyy ennallaan (Orica 2025).

4.2 Biohakereaktori

Biohakereaktori on yksi tapa vähentää veden typpipitoisuuksia. Sen toimintaperiaate perustuu biologiseen suodatukseen. Suodattimena käytettävän materiaalin päälle muodostuu biofilmi, eli bakteerikanta, joka voi käyttää vedessä olevia ravinteita ravintonaan, kuten esimerkiksi typpeä. Typpi liukenee veteen yleisimmin nitraattina NO_3^- . ”Biofilmissä tapahtuva denitrifikaatio, toisin sanoen typen poisto, on reaktio, jossa bakteerit pelkistävät nitraatin NO_3^- kaasumaiseksi, haihtuvaksi typeksi N_2 ” (Peart 2022, 17). Tämän reaktion avulla biohakereaktori vähentää veden typpipitoisuutta. Kuvassa (3) puuhakepartikkeleita, joiden pinnalla biofilmi muodostuu.



KUVA 3. Puuhake, jonka pinnassa biofilmi (E. V. Lopez-Ponnada, Journal of Biological Engineering).

Perusidea biohakereaktorissa on ohjata purkuvesi reaktorin läpi, jolloin vesi suodattuu ja puhdistuu. Veden viivytysaika tulisi olla parhaan suodatustuloksen saamiseksi vähintään 15 tuntia. Biohakereaktori rakennetaan ojaan tai sitä varten rakennetulle suodatuskentälle, johon purkuvedet ohjataan. Kaivinkoneella kaivettavaan ojaan tai kuoppaan asennetaan pohjalle muovisuoja, joka estää veden pääsyn maaperään. Tämän jälkeen suodatinmateriaalilla täytetään oja tai kuoppa, ja materiaalin päälle levitetään multaa tai kiviainesta noin puolen metrin paksuinen kerros. Suodatinmateriaaleina käytetään luonnollisia materiaaleja kuten pajun oksia, puun runkoja tai puuhaketta. Puuhake on edullinen vaihtoehto, jolla on suodatuksen jälkeen myös jatkokäyttömahdollisuuksia. Sitä voidaan kylästyneenä käyttää maanparannusaineena viljelysmailla lannoitteen sijasta.

Nicolas Peart (2022) tutki opinnäytetyössään Alavudenjärven kunnostusta hakebioreaktoreilla. Opinnäytetyössään hän kertoo tutkimuksista, joita on suoritettu Pohjois-Amerikassa ja Suomessa. Näissä tutkimuksissa kävi ilmi, että biohakereaktori voi optimaalisissa olosuhteissa vähentää typen määrää jopa 70–80 %. Suurin puhdistustehokkuus tapahtuu ensimmäisen vuoden aikana, ja tämän jälkeen tehokkuus laskee jyrkästi jopa alle 10 %. Keskiarvallisesti kuitenkin usean vuoden ajalta mitattuna puhdistusteho oli noin 37 %. Veden viipymällä on suuri merkitys puhdistustehokkuuteen. Mitä pitempään vesi biohakereaktorissa lepää, sitä tehokkaampaa puhdistus on (Peart 2022, 14–16).

4.3 Biohiilisuodatin

Biohiilisuodatin on luonnonmukainen suodatusmenetelmä, jossa perusideana on ohjata työmaan purkuvedet biohiilisuodatusjärjestelmän läpi. Tällöin purkuvedessä tapahtuu suodattumista ja aineiden pidättymistä biologisten, kemiallisten ja mekaanisten prosessien kautta. Tämän prosessin seurauksena vedestä saadaan poistettua kiintoainesta, metalleja, typpeä, fosforia sekä öljyjä ja PAH yhdisteitä.

Biohiilisuodatusjärjestelmä sisältää eri materiaaleista koostuvia rakennekerroksia, joiden läpi purkuvesi ohjataan. Samalla tapahtuu suodatuksen vaatima viivytys. Biohiiltä voidaan käyttää suodatinkerroksessa, jotta saadaan optimaalinen veden läpäisevyys ja bioaktiivisten epäpuhtauksien suodatus.

4.3.1 Biohiili

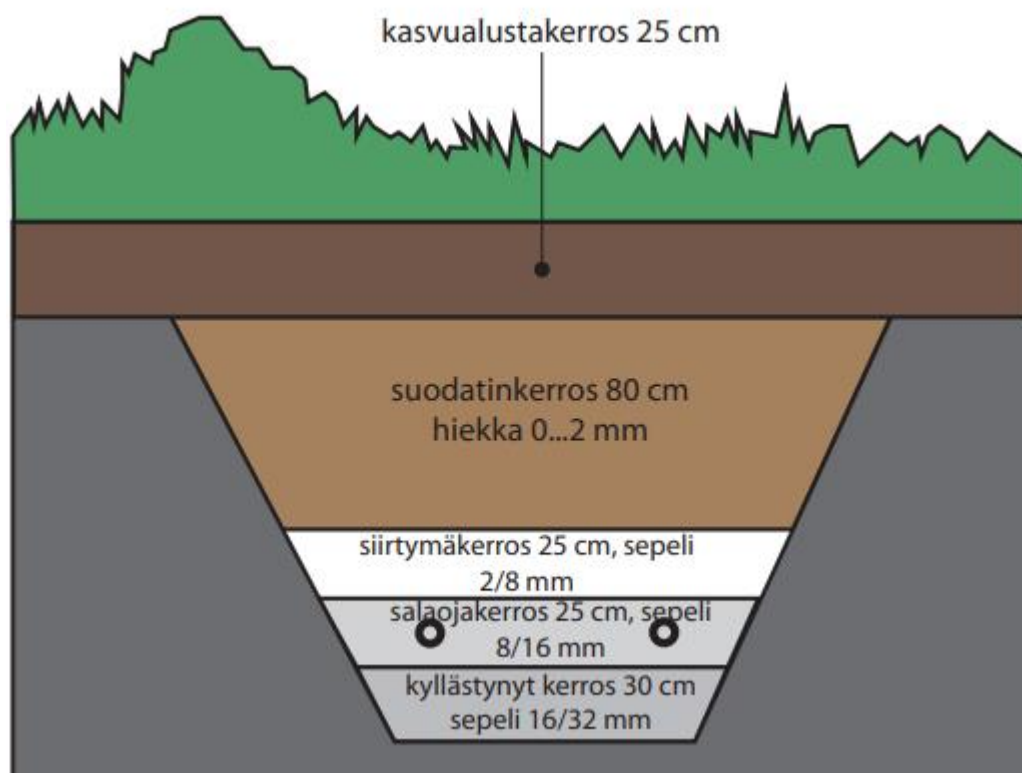
Biohiili valmistetaan biomassasta pyrolyysiprosessilla eli kuivatislauksella, jossa hiiltoprosessi tapahtuu hapettomassa tai lähes hapettomassa olosuhteessa ilman liekkiä (Kirjokivi 2018, 29). Biomassan raaka-aineena voidaan käyttää lähes mitä tahansa eloperäistä ainetta, kuten pajua, olkia tai biojätettä. Biohiili on rakenteeltaan huokoinen ja muistuttaa huomattavan paljon normaalia hiiltä, jota voitaisiin käyttää esimerkiksi hiiligrillissä. Eron kuitenkin huomaa yksittäisten hiilinokareiden koossa. Biohiili on kooltaan huomattavasti pienempirakenteista ja hienojakoisempaa kuin isohkot, kuution muotoiset grillihiilet. Biohiilen ulkonäkö myös vaihtelee sen perusteella, mistä materiaalista sen biomassasta on tehty. Biohiiltä käytetään maaperän parannukseen ja hulevesien käsittelyyn. Kuvassa (4) on kasa biohiiltä.



KUVA 4. Biohiiltä. (Outi Tehomaa, Metsään-lehti).

4.3.2 Suodattimen rakenne

Rakennekerrokset biohiilisuodattimessa ovat orgaanien kerros, suodatinkerros, siirtymäkerros, salaojakerros ja kyllästynyt kerros. Orgaanisen kerroksen tehtävä on pidättää purkuvedessä olevia ravinteita ja raskasmetalleja. Tämän kerroksen tulee kestää erilaisia olosuhteita ja sen veden läpäisevyyden tulee olla korkea. Suodatinkerroksen materiaalin valinnassa tärkein tekijä on hydraulinen johtavuus, eli nopeus, jolla vesi liikkuu maaperässä. Jos vesi liikkuu tämän kerroksen läpi liian nopeasti, ei vaadittavaa suodattumista kerkeä tapahtumaan. Suositeltu viipymä tulisi olla vähintään 1,3 cm/h ja enintään 10 cm/h (Kirjokivi 2018 ,23). Näissä kahdessa ensimmäisessä kerroksessa tapahtuu purkuvesien varsinainen suodattuminen ja pidättyminen.

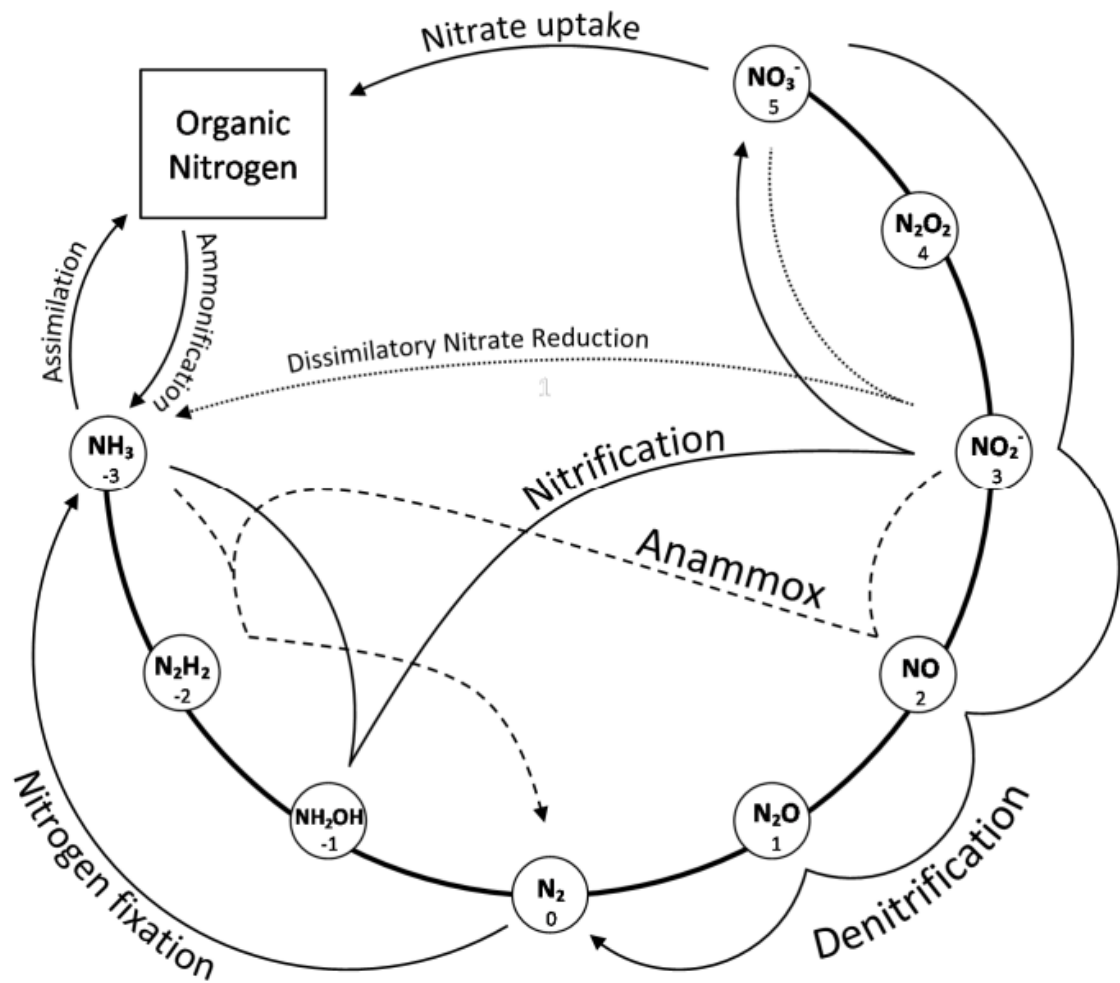


KUVA 5. Suodatusrakenteen yleiskuva, jossa siirtymäkerros on laitettu suodatin-
kankaan tilalle. (Hulevesiopas, Kuntaliitto).

Siirtymä- ja salaojakerroksen päätehtävä on puhdistetun veden varastoiminen. Materiaalin tulee olla huokoista maa-ainesta, joka on hyvin vettä johtavaa. Kylästynyt kerros on kaikkein tärkein kerros typen poiston kannalta. Tässä kerroksessa tapahtuu denitrifikaatio ja nitrifikaatio, biologiset prosessit, jotka poistavat typpeä vedestä. Kyllästyneen kerroksen materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi sepeliä, jonka raekoko on 16–32 mm (Kirjokivi 2018, 26). Typen määrää on saatu vähennettyä keskimäärin tällä menetelmällä 25–40 %. Kuvassa (5) on havainnollistettu rakenteen poikkileikkaus ja rakennekerrosten suositellut paksuudet.

4.4 Typpipitoisten vesien ohjaaminen jätevesiviemäriin ja sitä kautta käsittelyyn jätevedenpuhdistamoon

Varmin tapa hallita työmaalla syntyviä typpipitoisia työmaavesiä on purkaa ne jätevesiviemäriin, ja sitä kautta jätevedenpuhdistamolle. Jätevedenpuhdistamossa vesi käsitellään niin, että siitä saadaan poistettua typpiyhdisteet. ”Typpiyhdisteet voidaan poistaa jätevesistä fysikaalisilla, kemiallisilla että biologisilla menetelmillä” (Simpanen 2006, 4.). Suomessa yleisimpiä poistomenetelmiä ovat biologiseen menetelmään perustuvat nitrifikaatio ja denitrifikaatio. Kuvassa (6) typen kiertokaavio, jossa kuvattuna nitrifikaatio ja denitrifikaatio.



KUVA 6. Tyypin kiertokaavio. (Jermakka, ym. 2015).

Kirkkonummen avolouhintatyömaalla työmaavesille on osoitettu yksi purkupiste. Tästä purkupisteestä typpipitoiset työmaavedet voidaan ohjata kahteen purkulinjaan. Toinen linjoista purkaa ekologiselle alueelle, ja toinen kunnan jätevesiviemäriin. Molemmille purkulinjoille on asetettu tietyt raja-arvot, jotka tulee täyttyä, jotta vettä voidaan purkaa.

Ekologiselle alueelle vettä purettaessa, tulee veden laadun täyttää seuraavat kriteerit: kokonaistyyppi tulee olla alle 2,5 mg/l, kiintoainesta saa olla maksimissaan 100 mg/l, ja veden pH-arvo pitää olla välillä 6–9.

Jätevesiviemäriin purettaessa raja-arvot ovat hieman erilaiset. Kokonaistypelle ei ole asetettu raja-arvoja, kiintoainesta saa olla maksimissaan 300 g/l, ja veden pH-arvo pitää olla välillä 6–11. Jätevesiviemäriin purkulinja on rakennettu niin, että purettava työmaavesi pumpataan ensiksi laskeutuslavoille. Lavojen tehtävä

on poistaa vedestä kiintoainesta. Lavoilta vesi etenee purkulinjaan, jossa se kulkee mittakaivon läpi kohti pumppukaivoa. Pumppukaivosta vesi johdetaan kunnan jätevesiviemäriinjastoon. Talviolosuhteet on otettu huomioon purkulinjassa, ja käytössä onkin eristetty ja lämmitetty painevesiputkilinja, joka estää veden jäätyksen linjassa.

5 KONGREETTISET TOIMENPITEET TYÖMAALLA JA NIIDEN TOTEUTUS

5.1 Viivytytsaltaat ja suotopadot

Työmaalle on rakennettu useita viivytytsaltaita sekä suotopatoja veden viivyttämisestä, varastoinnista ja kiintoaineen laskeuttamista varten. Viivytytsaltaiden koko vaihtelee työmaalla, mutta pääsääntöisesti työmaalla olevien altaiden tilavuus on ollut noin 450–900 kuutiota (m³). Suurimmat viivytytsaltaat on rakennettu työmaa-vesien purkulinjan läheisyyteen, koska työmaalla on vain yksi purkupiste. Eri puolille työmaata kertyviä vesiä pumpataan letkulinjoja pitkin altaisiin, joiden kautta ne lopulta pumpataan jätevesiviemäriin. Altaiden pohjarakenteena on käytetty luonnon savea, jonka päälle on levitetty suodatinkangas, sekä murskepatja suojaamaan allasta eroosiolta. Kuvassa (7) valmis viivytytsallas. Osassa altaiden sijaintia kalliopinta on ollut lähellä maanpintaa. Näissä kohdissa altaan vedenpitävyys on varmistettu asentamalla HDPE-kalvo, jotta voidaan varmistua veden pysyminen altaassa.



KUVA 7. Valmis viivytytsallas, jonka viivytytskapasiteetistä käytössä noin 30 % (Ala-Hiiri).

Altaiden väliin on rakennettu suotopatoja, joista osa on rakennettu dolomiittikalkkikivestä. Suotopatojen tehtävä on viivyttaa veden virtaamaa ja sitoa kiintoainetta. Sulamisvesien johdosta veden pH-arvo laski alle 6, mikä alitti raja-arvon 6–9 joka oli asetettu lupaehdoissa. Tilanteen korjaamiseksi käytettiin dolomiittikalkkikiveä, joka nosti pH-arvon takaisin turvalliselle tasolle. Kalkkikiven ansiosta pH-arvo on pysynyt tasaisena 7–8 välillä, eikä kalkki nostanut arvoa liikaa yli 9, joten se on ollut toimiva ja tehokas ratkaisu. Kuvassa (8) olevaan altaaseen on levitetty kalkkikiveä kauttaaltaan, sekä altaassa oleva pumppukaivo on ympäröity kalkkikivellä. Kalkkikiven erottaa murskeesta sen vaaleanharmaa väri.



KUVA 8. Pieni viivytsallas pumppukaivolla sekä kalkkikivellä (Ala-Hiiri).

Viivytsaltaisiin pumpattavalle vedelle rakennettiin murskeesta kouru, jota pitkin vesi valuu vapaasti viivytsaltaaseen. Kourun varrella on useita sorasta tehtyjä suotopatoja, joiden läpi vesi joutuu kulkemaan ennen päätymistä viivytsaltaaseen. Kuvassa (9) koururakennelma suotopatoineen. Altaassa vesi viipyy, jonka aikana kiintoaine laskeutuu altaan pohjalle. Veden pinnan noustessa tarpeeksi

korkealle, se alkaa valua altaan vastakkaisesta päästä padon läpi seuraavaan viivytysaltaaseen, jossa sama laskeutumisprosessi toistuu.



KUVA 9. Koururakennelma, jota pitkin vesi valuu viivytysaltaaseen suotopatojen läpi (Ala-Hiiri).

Tästä altaasta vesi pumpataan pumppauskaivosta saostuslavoille. Pumppukaino toimii muoviset rumpuputket, jotka on upotettu murskeen sisään. Pumpaus tehdään uppopumppuilla ja muoviletkuilla. Mikäli uppopumppu asennettaisiin suoraan altaanpohjalle, sekoittaisi se pohjalle valuneen kiintoaineen takaisin veden sekaan. Rumpuputkien ympärille on myös levitetty kalkkikiveä, jotta voimme varmistaa pH-arvon pysymisen raja-arvojen sisässä. Kuvassa (10) valmis pumppukaivo. Kuvassa (11) näkyy pumppukaivon sisäpuoli. Kaikki pumpattava vesi

kulkeutuu murskeen läpi, joten isommat kiintoaineet suodattuvat myös tässä vaiheessa vedestä pois.



KUVA 10. Pumppukaivo, josta vesi pumpataan letkua pitkin saostuslavalle (Ala-Hiiri).



KUVA 11. Pumppukaivon sisäpuoli ilman uppopumppua ja letkua (Ala-Hiiri).

5.2 Saostuslavat

Saostuslavojen tehtävä on vähentää veden kiintoainepitoisuutta. Saostuslava on rakenteeltaan kuorma-auton vaihtolavan kaltainen ja tehty teräksestä. Saostuslava on päältä avonainen ja sen sisäosa on jaettu väliseinillä kolmeen allasosastoon, joissa saostuminen tapahtuu painovoimaisesti. Väliseinien yläpäässä on reikä, josta vesi etenee allasosastosta seuraavaan samalla kun kiintoainetta jää edellisen allasosaston pohjalle. Kuvassa (12) näkyy, kuinka lavan kauempan päähän puretaan vettä toisesta lavasta putkilinjaa pitkin, kuinka se kulkeutuu allasosastojen välillä väliseinien reikien kautta, ja lopulta purkautuu viettoviemäriin. Kuvassa (13) näkyy tarkemmin saostuslavan sisäisten väliseinien rakenne.



KUVA 12. Saostuslavarajan viimeinen lava (Ala-Hiiri).



KUVA 7. Väliseinät jakavat saostuslavan kolmeen allasosastoon, jotka keräävät vedestä kiintoainetta (Ala-Hiiri).

Altaan toisessa päässä on kaksi tuloyhdettä, joihin letkut saadaan kiinnitettyä suoraan kynsiliittimillä. Toisessa päässä on kaksi 110 mm poistoaukkoa. Saostuslavoja voidaan tarvittaessa liittää useampi sarjaan, jolloin voidaan tehostaa kiintoaineen poistoa vedestä. Mikäli lavoja laitetaan useampi peräkkäin, tulee niiden tarvitsema korkeusero ottaa huomioon, jotta painovoimainen veden virtaaminen onnistuu ja vesi poistuu oikeasta päästä lavaa. Lavan pituussuuntainen kallistuma tulisi olla 5 % luokkaa. Kahden lavan välille tulee pohjankorotusta olla lavasta riippuen 30–50 cm. Mikäli lavoja olisi esimerkiksi viisi kappaletta sarjassa, on ensimmäisen lavan ja viimeisen lavan pohjankorkeusero kahden metrin luokkaa. Lavoille onkin tällaisessa tilanteessa järkevää valita sijainti niin, että ne olisivat loivassa rinteessä. Kuvassa (14) yhdeksän saostuslavaa on asennettu sarjaan.



KUVA 14. Saostuslavojen välillä tulee olla tarpeeksi korkoa ja oikeat kallistukset jotta vesi kulkeutuu painovoiman avulla lavasta toiseen (Markus Loima, muokattu).

Talvikeleillä tulee huomioida veden mahdollinen jäätyminen saostuslavoissa, varsinkin jos virtaus ei ole kokoaikaista sään ollessa lähellä tai alle 0 °C. Veden pinta jääty nopeasti ja pahimmillaan jäämassan kasvaessa ja laajentuessa se voi tehdä reikiä lavojen seinämiin ja pohjaan. Havaitsimme että jäätymistä tapahtui, vaikka lavoissa oli koko ajan veden virtaus käynnissä. Ratkaisuksi asensimme lavojen sisäpuolelle veden sekaan lämmityskaapeleita ja peitimme lavat pressuilla (kts. kuva 15). Näillä toimenpiteillä saatiin estettyä veden jäätyminen ja varmistimme että purettava vesi päättyy häiriöttä purkulinjan kautta jätevesiviemäriin.



KUVA 15. Pressuilla peiteltyt saostuslavat (Ala-Hiiri).

5.3 Jätevesiviemärin purkulinja

Purkulinja työmaalta jätevesiviemäriin tehtiin yhtenäisellä eristetyllä Uponorin DN63 Eco Flex-paineputkella, joka on varustettu kiinteällä lämmityskaapelilla (kts. kuva 16). Matka työmaan purkupisteeltä jätevesiviemäriin oli pitkä, noin 350 metriä. Maaston muodot olivat myös haasteelliset painovoimaisen linjan rakentamiselle, joten linja oli tehtävä paineputkesta.



KUVA 16. Uponor Ecoflex Supra Standard DN63 (Uponor kuvasto).

Putki saapui rullana, jolloin se oli helppo levittää maastoon. Kuvassa (17) näkyy levitetty paineputki ja sen vieressä väliaikainen purkulinja, joka toteutettiin paineletkuilla. Pakkanen oli ongelmallinen paineletkuille niiden huonon lämmöneristävyyden takia. Veden pumppauksen lopetettua paineletku tuli käsin tyhjentää vedestä, sillä muuten sen sisään jäänyt vesi jäättyi ja tukki linjan. Putkessa oleva kiinteä vakiovastuskaapeli varmisti näin ollen putken pysymisen sulana. Putkeen asennettiin erillinen termostaattiyksikkö, jolla voidaan ohjata lämmityskaapelin toimintaa.



KUVA 17. Eristetty painelinja ja aiemmin käytössä ollut letkulinja (Markus Loima).

Paineputkeen työmaavedet pumpattiin erillisestä pumppukaivosta. Kaivon halkaisija on 800 mm ja siellä olevan pumpun teho 750W (kts. kuva 18). Pumppukaivon maksimipumppausteho on 366 l/min, mutta todellinen saavutettu teho oli keskimäärin noin 33–83 l/min. Pumppuun liitettiin myös erillinen pintavahti, jotta

voitiin varmistaa se, että pumppu ei käy tyhjänä ja näin ollen mahdollisesti rikkoutu. Pumppukaivoon työmaavedet valuivat painovoimaisesti viettoviemäriin- jaapitkin saostuslavoilta.



KUVA 18. Pumppukaivo, 400 mm viettoviemäriinja ja uppopumppu pintavahdilla (Ala-Hiiro).

6 MITTAUSMENETELMÄT JA MENETTELYT

6.1 Sertifioitu näytteenottaja

Työmaalla on käytössä kolme erilaista mittausmenetelmää. Ensimmäinen on lupaehtoisissa vaadittu sertifioitun näytteenottajan mittaus, joka suoritetaan HSY:n työmaavesiohjeen mukaisesti. HSY:n työmaavesiohje ohjaa meitä ottamaan vesinäytteen työmaalta purettavista vesistä kolmena kertamittauksena viikossa aina samoilta päiviltä. Mittauksen suorittaa alihankintana sertifioitu mittausyritys. Vedestä mitataan joka mittauksessa kiintoainek, sameus, pH, sekä vähintään kerran viikossa kokonaistyyppi. Mikäli työmaalta ei pureta viikon aikana ollenkaan työmaavesiä jätevesiviemäriin tai ekolokiselle alueelle, sertifioitua näytteen ottoa ei tarvita. Sama näytteenottaja ottaa myös tietyn aikavälin välein työmaalta ja sen lähiympäristöstä pinta- ja pohjavesinäytteitä.

6.2 Hach Lange pikamääritysmenetelmä

Toinen mittausmenetelmä on Destian tai urakoitsijan suorittama oma valvonta ja päivittäinen mittaus työmaan purkuvedestä, jossa mitattavana pitoisuutena on kokonaistyyppi. Päivittäinen mittaus työmaalla tehdään Hach Langen pikamääritysmenetelmällä, joka mittaa vedestä kokonaistyyppien määrän yksiköllä mg/l. Käytössämme on Hach Lange DR 3900 spektrofotometri sekä saman valmistajan kyvettitestimenetelmä LCK 138. Kuvassa (1) on mittalaite, kuvassa (3) kyvettitestipakkaus. Spektrofotometrin toimintaperiaate perustuu näyteliuoksen valaisuun eri aallonpituuksilla, jolloin pystytään mittaamaan kuinka paljon valosta imeytyy liuokseen. Tätä menetelmää käytetään eri aineiden pitoisuuksien määrittelemiseen.



KUVA 19. Työmaalla mittauksissa käytetty Hach Lange spektrofotometri DR 3900 (Ala-Hiiri)

Mittaus aloitetaan keräämällä työmaalta vesinäyte. Näytettä pipetoidaan 1,3 ml punakorkkiseen keittoastiaan. Tämän jälkeen lisätään sinikorkkisesta pullosta 1,3 ml reagenssi A:ta sekä valkokorkkisesta putkilosta reagenssi tabletti B. Keittoastia laitetaan tämän jälkeen saman valmistajan lämpöhauteeseen LT 200, jossa se lämmitetään 120 °C ja annetaan keittyä 30 minuuttia. Lämpöhauteeseen on säädetty keitto-ohjelma valmiiksi, ja sen kesto on kokonaisuudessaan 42 minuuttia. Kuvassa (2) lämpöhaude.



KUVA 20. Hach Lange lämpöhaude LT 200 (Ala-Hiiri).

Keittämisen jälkeen näyte annetaan jäähtyä huoneenlämpöiseksi ja sitä käännetään ylösalaisin muutaman kerran, jotta mahdolliset kiintoaineet irtoavat pohjasta ja sekoittuvat liuokseen. Seuraavaksi näytteestä pipetoidaan 0,5 ml näytettä viivakoodilla varustetun vihreäkorkkisen kyvetin sekaan, jossa on jo valmiiksi oikea määrä reagenssiainetta. Kyvetin sekaan lisätään myös 0,2 ml reagenssi D:tä vihreäkorkkisestä pullosta. Kyvetin korkki suljetaan, ja kyvettiä käännellään muutama kerta ympäri, jonka jälkeen sen annetaan olla 15 minuuttia paikoillaan. Lopuksi kyvetin pinta puhdistetaan epäpuhtauksista, ennen kuin se laitetaan mittalaitteeseen. Laite suorittaa mittauksen automaattisesti ja ilmoittaa lopuksi näytöllä kokonaistypen määrän. Koko mittausprosessin suorittamiseen menee aikaa reilu tunti.



KUVA 21. Hach Lange LCK 138 kyvettitestimenetelmä paketti, joka sisältää kaiken tarvittavan mittauksen suorittamiseen, sekä yksinkertaisen ohjeen (Ala-Hiiri)

6.3 Masinotekin mittakaivo

Kolmantena mittausmenetelmänä työmaalla toimii Masinotek Oy:ltä hankittu jatkuvatoiminen mittausasema työmaalta purettavien hulevesien laadun mittaukseen. Mittakaivo sijaitsee jätevesiviemäriin vievässä purkulinjassa laskeutuslavojen ja pumppauskaivon välissä. Kuvassa (4) mittakaivo. Mittakaivossa on V-patoaukko, jonka kautta purettavan veden virtausmäärää voidaan mitata laskennallisesti. Mittakaivo sisältää myös tallentavan ja lähettävän GSM-dataloggerin, johon on kytketty paine-, pH-, lämpötila- ja sameusanturi. Kuvassa (5) mittakaivo sisältä päin.



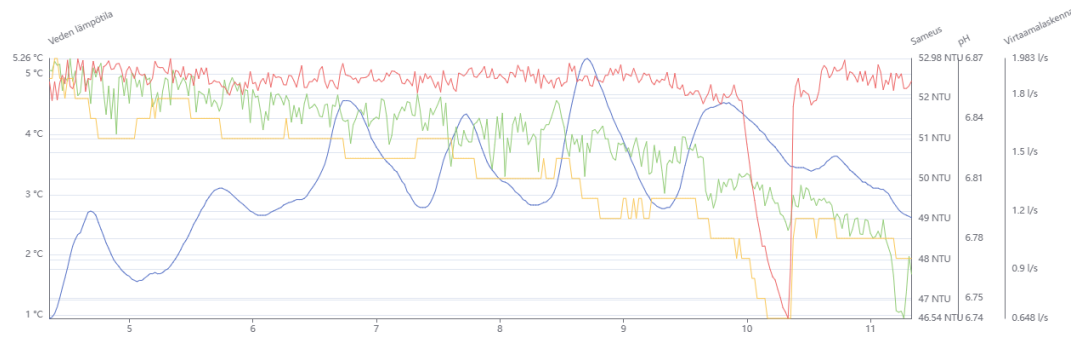
KUVA 22. Mittakaivo asennettuna jätevedenpurkulinjaan (Ala-Hiiri).

Dataloggerin lähettää mittausdatan langattomasti Masinotekin internet-pohjaiseen EMMI-järjestelmään, joka muuttaa raakadatan laskentakaavojen avulla johdetuiksi tuloksiksi, kuten veden virtaamaksi. Mittaus suoritetaan kaivossa puolen tunnin välein ja se lähetetään EMMI-järjestelmään tunnin välein. Järjestelmä pystymme seuraamaan reaaliaikaisesti esimerkiksi virtaamaa kuutioissa tunti-kohtaisesti tai litroissa sekunnissa. Järjestelmä piirtää valmiita kuvaajia halutusta datasta ja suorittaa määritellyjä laskentoja automaattisesti. Voimme katsoa viikon keskiarvoja mitattaville arvoille tai päiväkohtaisia summia. Pääsääntöisesti meitä kiinnostaa tietää vuorokusikohtaisesti puretun veden kuutiomäärä, veden pH-arvo sekä sameus.



KUVA 23. Sisäpuolinen kuva mittakaivosta (Ala-Hiiri).

Järjestelmän avulla pystymme havaitsemaan myös mahdollisia ongelmatilanteita tai häiriöitä etänä. Mikäli virtaus loppuu tai alenee huomattavasti, tai muissa raja-arvoissa tapahtuu merkittäviä muutoksia, voimme reagoida siihen nopeasti. Lisäksi EMMI-järjestelmä tallentaa kaiken mittausdatan, mikä helpottaa raportointia ja seurantaan pitkällä aikavälillä. Näin voimme varmistaa, että työmaan vesienhallinta on jatkuvasti valvottua ja säädösten mukaista. Kuvassa (x) olevat käyrät kertovat mittausdataa 30 minuutin välein kuvaajalle piirrettynä. Sininen käyrä on veden lämpötila, keltainen käyrä veden pH-arvo, vihreä käyrä veden sameuden sekä punainen käyrä veden virtaaman l/s.



KUVA 24. Kuvassa mittaustulokset viikon ajalta (Masinotek, EMMI-järjestelmä).

7 MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

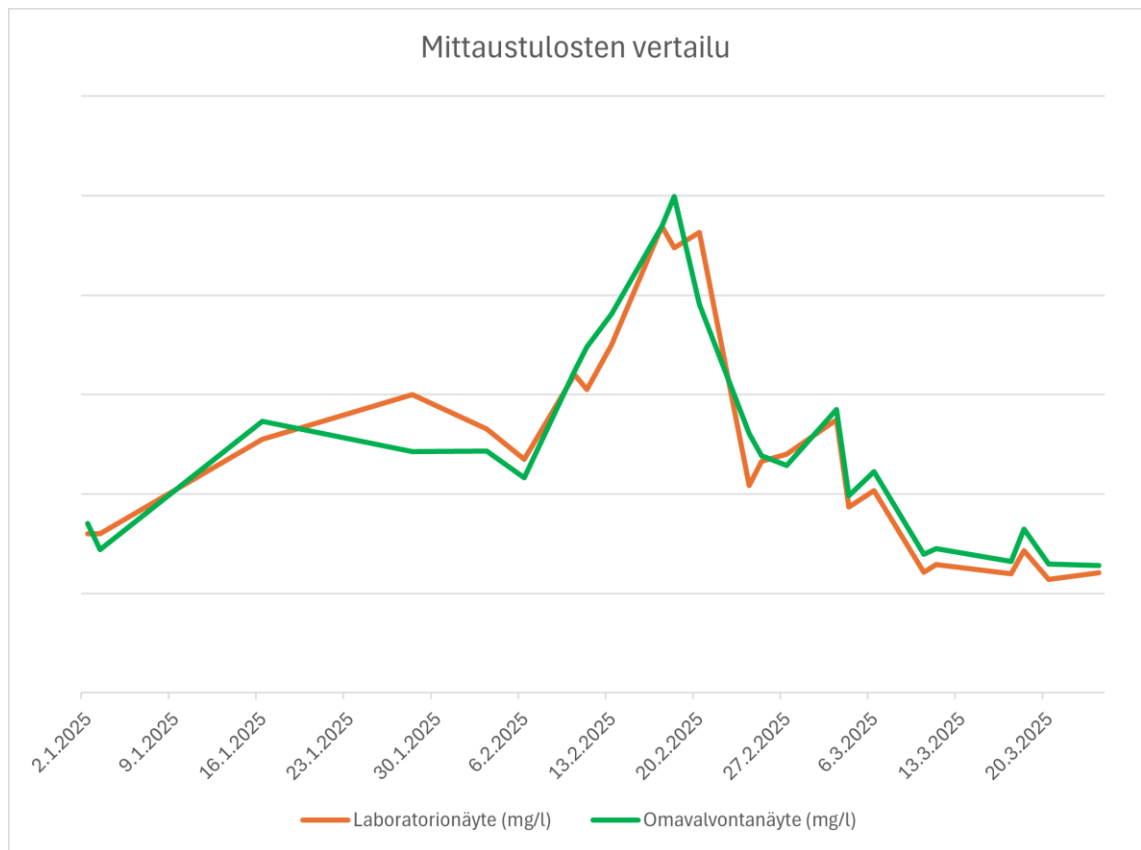
7.1 Kerätty data

Mittaustuloksia analysoitiin tammi-, helmi- ja maaliskuun ajalta. Ensimmäinen analysoitava näyte on otettu 2.1.2025 ja viimeinen 31.3.2025. Tänä aikana oma-valvontanäytteitä otettiin viisi kertaa viikossa, yhteensä 61 kpl. Sertifioidun näytteenottajan toimesta näytteitä otettiin yhdestä kolmeen kappaletta viikossa, riippuen siitä oliko työmaalla vesien purku käynnissä vai ei. Näitä sertifioidussa laboratoriossa tutkittuja näytteitä kertyi 24 kpl.

Kaikki mittaustulokset taulukoitiin vertailun helpottamiseksi. Tuloksista laskettiin keskiarvot, erikseen sertifioidun laboratorionäytteen ja Hach Lange pikamääritysmenetelmän tuloksista. Molempia näytteitä myös verrattiin keskenään ja laskettiin tulosten välinen ero, eli mittausvirhe yksiköllä mg/l ja sen prosentuaalinen arvo. Mittausvirheestä määriteltiin myös keskiarvo. Tarkemmat tulosten analysoinnit esitetään kappaleessa johtopäätökset, sekä lukuarvot esitetään liitteessä (1). Johtopäätökset kappale sekä liitteet 1 ovat salassa pidettäviä ja ne on poistettu julkaistavasta versiosta.

7.1.1 Hach Lange pikamääritysmenetelmä

Mittaustulosten perusteella pystyimme myös arvioimaan spektrofotometrin tarkkuuden sertifioituihin laboratorionäytteisiin verrattuna. Tulokset osoittavat, että spektrofotometrin tulokset ovat pääsääntöisesti linjassa laboratorionäytteiden kanssa (kts. kuvio 1). Näytteiden mittausvirheen suuruus keskiarvollisesti oli 0,45 mg/l. Pienimmillään ero oli vain 0,01 mg/l ja suurimmillaan 1,45 mg/l. Keskenään vertailtavista 24 kpl näytteestä spektrofotometrin tulos oli seitsemän kertaa laboratorionäytettä suurempi ja 17 kertaa pienempi.



KUVIO 1. Laboratorionäytteiden ja spektrofotometrinäytteiden tulokset kokonaistypen osalta.

Tulokset olivat pääsääntöisesti tasaisia kolmen kuukauden tarkastelujaksolla. Kuviosta (1) voimme kuitenkin nähdä tulosten nousun helmikuun puolesta välistä helmikuun loppuun. Tälle nousulle on myös looginen syy. Helmikuun alussa saimme valmiiksi virallisen purkulinjan jätevesiviemäriin ja pystyimme aloittamaan työmaavesien purun. Helmikuun puolessa välissä aloitimme vesien purun alueelta, jossa louhinta pääsääntöisesti tapahtui. Näissä vesissä kokonaistypen määrä oli ymmärrettävästi korkeampaa kuin muissa osissa työmaata. Tuloksissa myös näkyy selvää laskua maaliskuun loppupuolella, joka selittyy sillä, että vesiä ei tuossa vaiheessa enää tarvinnut purkaa louhittavalta alueelta, vaan sitä purettiin viivytysaltaista, joissa työmaavesi oli viipynyt jo pitkään ja näin ollen päässyt laimenemaan.

7.1.2 Hallintamenetelmien tulokset

Tarkoituksena oli tutkia useampaa eri tyyppistä hallintamenetelmää kuten opinnäytetyön tutkimussuunnitelmassa kerrotaan ja sisällyttää niiden tulokset tähän opinnäytetyöhön. Työn aikana kuitenkin kävi ilmi, että muita menetelmiä kuin louhintatekniikan optimointi, ei keretä suorittamaan työlle annetun aikarajan puitteissa. Näitä menetelmiä tullaan kuitenkin tutkimaan työmaalla edetessä, vaikka niitä ei saatu sisällytettyä tähän opinnäytetyöhön.

7.2 Vertailukohteet

Tutkimuksia ja selvityksiä löytyi jonkun verran Suomesta ja ulkomailta. Kaikkia tutkimuksia ja selvityksiä ei voitu käyttää vertailukohteina, sillä niissä tutkittiin kokonaistypen määrää erilaisessa muodossa kuin vesiliukoisena. Metsätutkimuslaitos on julkaissut Kaira-hankkeen loppuraportin, jossa tuodaan ilmi kolmen Suomessa olevan kaivoksen kaivosveden vesiliukoisten typpipäästöjen määrää yksiköllä mg/l. Tutkimushankkeen tavoitteena oli kehittää biologinen käsittelyprosessi kaivoksen jätevedelle, jolla saataisiin poistettua kokonaistyppeä.

7.2.1 Metsätutkimuslaitos, Kaira-hanke

Hankkeessa mukana olleet malmikaivokset sijaitsivat Kemissä, Siilinjärvellä ja Paahtavaarassa, ja niissä suoritettu louhinta tehtiin käyttämällä irtoräjähdyksineiteitä. Kemin kaivoksen kaivosvedestä mitatussa näytteessä kokonaistyppeä oli näistä kolmesta paikasta vähiten, 25,31 mg/l. Paahtavaaran kaivoksella näytteen kokonaistyyppipitoisuus oli 32,00 mg/l, ja suurin kokonaistyyppipitoisuus mitattiin Siilinjärven kaivoksella, jossa kokonaistypen määrä näytteessä oli 68,8 mg/l (Mattila, Zaitsev & Langwaldt 2007, 27).

7.2.2 Infra ry, Selvitys kiviainesalueiden typpipäästöistä

Infra ry (2022) tekemässä selvityksessä kiviainesalueiden typpipäästöistä sekä lasketusaltaiden toiminnasta ja mitoituksesta kerrotaan, että selvitykseen osallistuneiden kiviainesalueiden eri toimipaikkojen allasvesien tai purkuvesien vesiliukoiset kokonaistypen pitoisuudet vaihtelivat välillä 0,4–20,5 mg/l (Laurila ym. 2022, 15).

7.2.3 Työmaa, jolla tutkimus suoritettiin

Ennen hankkeen alkua työmaalle on lupahakemusvaiheessa tehty tarkennettu typpipitoisten vesien hallintasuunnitelma, joka sisälsi arviolaskelman hankkeen aiheuttamista typpipäästöistä louhinnan aikana. Arvion tekemisessä käytettiin perustana Ilmatieteenlaitoksen keskimääräistä vuosisadantatilastoa, louhinta määrää, ominaispanostuksen määrää, pois ajettavan kiviaineksen määrää, käytettävän räjähdysaineen typpipitoisuutta sekä veden sekaan päätyvän räjähdysaineen määrää, joka tässä tapauksessa on arvioitu 2 % räjähteen typpipitoisuudesta.

Näiden laskelmien tulokseksi saatiin työmaan vesiliukoisten kokonaistyppipitoisuuksien keskiarvoksi 17,29 mg/l. Työmaan eri alueille tehtiin omat laskelmat ja ne vaihtelivat 13,12–24,67 mg/l välillä. Odotettavissa oli siis suhteellisen suuret vesiliukoiset typpipäästöt, kun ottaa huomioon työmaalle asetetun kokonaistypen raja-arvon 2,5 mg/l mikäli työmaavesiä purettaisiin ekologiselle alueelle.

7.3 Yhteenveto

Tulosten perusteella saimme arvokasta dataa vesiliukoisista typpipäästöistä työmaaolosuhteissa, kun louhinnassa käytetään patruunoituja räjähdysaineita. Spektrofotometrin tulokset olivat pääosin linjassa laboratorio näytteiden kanssa, lukuun ottamatta muutamia poikkeuksia. Vertailukohteiden tuloksiin nähden tutkimuksemme tulokset olivat positiivisia ja kannustavat jatkamaan aiheeseen liittyvää tutkimusta. Kolmen kuukauden ajalta kerätyistä tuloksista voimme havaita työmaan muuttuneet olosuhteet ja niiden vaikutukset kokonaistypen määrään.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Poistettu julkaistavasta versiosta.

9 MAHDOLLISET JATKOTOIMENPITEET

Typen hallintamenetelmiä ja niiden toimivuutta on tarkoitus tutkia hallituissa olosuhteissa. Menetelmiä ei rakennettaisi työmaalle kuten tässä työssä on esitetty, vaan tutkimus suoritettaisiin hallintamenetelmien materiaaleille saostuslavoilla. Tutkittavia materiaaleja olisivat puuhake, puunrungot, biohiili ja vermikuliitti. Tulokset eivät olisi suoraan verrattavissa oikein toteutettujen menetelmien tuloksiin, mutta ne olisivat tarpeeksi suuntaa antavia, jotta saisimme käsityksen eri menetelmien toimivuudesta.

Saostuslavoilla tutkimus olisi helppo suorittaa hallitusti. Jokaiselle tutkittavalle materiaalille olisi oma saostuslava, joka täytettäisiin typpipitoisella vedellä. Veden typpipitoisuus mitattaisiin ennen materiaalien lisäämistä. Yhteensä lavoja olisi neljä kappaletta, yksi kutakin tutkittavaa materiaalia varten. Veden typpipitoisuutta seurattaisiin tietyn aikajakson välein, jolloin saisimme selville, kuinka nopeasti materiaalit alkavat vaikuttaa kokonaistypen määrään alentavasti. Spektrofotometrin avulla voisimme määrittellä mittausvälit ja määrät halutun mukaiseksi. Mittausten perusteella selviäisi myös eri materiaalien kyky alentaa kokonaistypen määrää vedessä, ja niitä olisi helppo vertailla keskenään.

Idea tutkimuksen suorittamisesta saostuslavoilla syntyi työmaalla jo käytössä olevista saostuslavoista. Niiden kapasiteetti on tarpeeksi suuri, jotta saisimme relevanttia tutkimusdataa. Kokeilun loputtua vesi ja käytetyt materiaalit on helppo kerätä lavoilta ja kuljettaa jatkokäsittelypaikkaan. Saostuslavoilla emme myöskään häiritsisi työmaan alati muuttuvia olosuhteita, ja kustannukset pysyisivät maltillisina.

10 POHDINTA

Tutkimuksessa havaittiin, että patruonoitujen räjähdysaineiden käyttö avolouhintatyömaalla vähensi merkittävästi vesiliukoisten typpipäästöjen määrää. Työmaa-
vesissä mitatut kokonaistyppipitoisuudet olivat huomattavasti alhaisempia kuin
kaivoksissa, joissa käytettiin irtoräjähdysaineita. Tämä osoittaa, että patruonoitu-
jen räjähdysaineiden käyttö on tehokas menetelmä typen hallintaan työmaaolo-
suhteissa.

Työn luotettavuus ja eettiset näkökohdat ovat keskeisiä arviointikriteereitä. Tutki-
muksessa käytetyt menetelmät, kuten Hach Lange pikamääritysmenetelmä ja
sertifioidun näytteenottajan mittaukset, osoittautuivat luotettaviksi ja tarkkuudel-
taan riittäviksi. Eettisesti tutkimus toteutettiin huolellisesti, noudattaen kaikkia ym-
päristönsuojeluun liittyviä säädöksiä ja ohjeita.

Työn onnistumista voidaan arvioida positiivisesti, sillä tutkimuksen tulokset olivat
linjassa odotusten kanssa ja tarjoavat arvokasta tietoa patruonoitujen räjähdysai-
neiden käytön vaikutuksista vesiliukoisiin typpipäästöihin. Työn perusteella voi-
daan suositella patruonoitujen räjähdysaineiden käyttöä vastaavissa projekteissa,
joissa työmaalta purettavalle vedelle on asetettu tiukat raja-arvot. Lisäksi voidaan
harkita jatkotutkimusta eri hallintamenetelmien, kuten biohakereaktorin ja biohii-
lisuodattimen, tehokkuudesta ja käytännöllisyydestä työmaaolosuhteissa.

Mahdollisia jatkotutkimusaiheita voisivat olla eri hallintamenetelmien testaaminen
ja vertaileminen työmaaolosuhteissa. Tämä auttaisi syventämään ymmärrystä
menetelmien toimivuudesta ja kustannustehokkuudesta. Lisäksi tutkimus voisi
tarkastella, onko järkevämpää purkaa työmaavedet suoraan jätevesiviemäriin vai
panostaa hallintamenetelmien rakentamiseen.

Kaiken kaikkiaan tämä opinnäytetyö tarjoaa arvokasta tietoa typen hallinnasta
louhintatyömailla ja korostaa patruonoitujen räjähdysaineiden käyttöä tehokkaana
menetelmänä vesiliukoisten typpipäästöjen vähentämiseksi. Tutkimuksen tulok-
set voivat toimia perustana tuleville tutkimuksille ja käytännön toimintatavoille,
jotka pyrkivät parantamaan ympäristönsuojelua ja vesistöjen laatua.

LÄHTEET

- Heikkinen, T. 2018. Kaivosten vesien ammoniumpäästöjen vähentäminen vermikuliitin ja zeoliitin avulla. Savonia-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 6.2.2025. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201802082176>
- Jermakka, J., Wendling, L., Sohlberg, E., Heinonen, H., Merta, E., Laine-Yijoki, J., Kaartinen, T. & Mroueh, U-M. 2015. Nitrogen compounds at mines and quarries. VTT Technical Research Center of Finland Ltd. Tutkimus. Espoo. Viitattu 27.2.2025. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2015/T226.pdf>
- Kauppila, P., Räisänen, M. & Myllyoja, S. 2011. Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristökeskus. E-kirja. Helsinki. Viitattu 6.2.2025. <http://hdl.handle.net/10138/37056>
- Kirjalainen, V. 2018. Typen analysointi prosessijätevesistä. Energia- ja ympäristötekniikka. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 24.2.2025. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201805229509>
- Kirjokivi, T. 2018. Biohiilisuodatin hulevesien käsittelyssä. Case Espoo Otso-lahti. Ympäristötekniikka. Lahden ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 6.2.2025. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201805147991>
- Kontolampi, K. 2005. Jätevesien inhihoiva vaikutus nitrifikaatioon. Kemiantekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 6.2.2025. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201003063403>
- Mattila, K., Zaitsev, G. & Langwaldt, J. 2007. Biological removal of nutrients from mine waters: Final report. Finnish Forest Research Institute. Loppuraportti. Rovaniemi. Viitattu 8.4.2025. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2060-5>
- Partamies, R. 2017. Poraus- ja panostussuunnittelun merkitys louhinnan aiheuttamien typpipäästöjen vähentämiseksi Kittilän kaivoksella. Aalto-yliopisto. Diplomityö. Viitattu 6.2.2025. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201711277751>
- Peart, N. 2022. Alavuden kunnostus hakebioreaktorilla: lähtötilanteen kartoitus valuma-alueelle. Ympäristötekniikka. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 6.2.2025. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2022061718176>
- Ramstadius, J. 2023. Biohiilen absorptiokäyttäytyminen lietalannassa. Bio- ja elintarviketekniikka. Hämeen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 21.2.2025. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202304185498>
- Senatel™Powerfrag™. 2025. Orica mining services. Verkkosivu. Viitattu 26.2.2025. https://www.oricaminingsservices.com/fi/fi/product/products_and_services/packaged_explosives/page_packaged_explosives/senatel_powerfrag/1095

Simpanen, M. 2006. Typpeä sisältävien jätevesien käsittely 2-N-PRO-menetelmällä. Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö. Viitattu 10.2.2025. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200811212105>

Tuoteluettelo louhintaräjähteet. 2025. FORCIT Explosives. Verkkosivu. Viitattu 26.2.2021. <https://forcitexplosives.fi/tuotteet/>

LIITTEET

Liite 1. Kolmen kuukauden ajalta kerätyt mittaustulokset

Liite on salainen.