

TERVEYS-, TURVALLISUUS- JA YMPÄRISTÖNÄKÖKOHDAT HPE-RÄJÄHTEIDEN KÄYTÖSSÄ

Timo Halme
Oy Forcit Ab, Finland

TIIVISTELMÄ: Vetyperoksidi (HP) on viimeaikaisessa louhintaräjähteiden kehityksessä noussut tärkeimmäksi työturvallisuudelle vaihtoehdoksi ammoniumnitraatille (AN). HP:n käyttö bulk-räjähteiden raaka-aineena kaivos- ja louhintateollisuudessa tuo uusia haasteita työturvallisuuden, työterveyden ja ympäristön kannalta. HP on tunnettu teollisuuskemikaali, mutta panostustyössä työntekijöiden altistuminen HP:lle eroaa merkittävästi perinteisiin teollisiin prosessilaitoksiin verrattuna. Ympäristön näkökulmasta HP:n käyttö räjähdysaineena on uutta: vaikka HP hajoaa vedeksi ja hapeksi, se on haitallista vesieliöille, joten päästöt ympäristöön on otettava huomioon. HP on erittäin reaktiivinen kemikaali, ja sen reagoidessa mineraalien kanssa syntyy reaktiotuotteita, joiden vaikutukset on tutkittava. Nämä riskit on tunnistettava ja hallittava ennen HP-pohjaisten räjähteiden laajamittaista käyttöönottoa. Tässä esityksessä tiivistämme kokeelliset havaintomme, jotka vastaavat näihin riskeihin, sekä tarkastelemme kirjallisuudesta löytyneitä tietoja.

1. VETYPEROKSIDI (HP) JA VETYPEROKSIDIEMULSIO (HPE)

HP on voimakas hapetin, jota käytetään laajasti prosessiteollisuudessa. Teknisen laadun HP:tä on saatavilla liuoksina aina 60 paino-%:iin asti, ja vesipohjaisten HP-liuosten ominaisuudet tunnetaan hyvin. HP on huomattavasti reaktiivisempi kuin AN: kontaminaatio johtaa yleensä nopeaan eksotermiseen hajoamiseen, jossa vapautuu suuria määriä happikaasua ja höyrystynyttä vettä. Tämä voi aiheuttaa paineen nousun tai jopa räjähdysen. On syytä huomauttaa, että termiä happipitoinen vesi käytetään toisinaan virheellisesti HP:n synonyymina. Tämä on vakava virhe: HP on kemiallinen yhdiste, kun taas happipitoinen vesi on hapen ja veden seos. Näillä on täysin erilaiset kemialliset ominaisuudet ja riskit.

HP-pohjaisia räjähdeseoksia voidaan valmistaa useilla tavoilla. Tässä tarkastellaan seoksia, joissa on polttoaineita; molekyyli-räjähteet eivät kuulu tämän tutkimuksen piiriin. Polttoaineseosten päätyypit ovat imeytetty kiinteään materiaaliin, vesigeeli ja vesi-öljyssä-emulsio. Näistä emulsio (HPE) on ilmeisin vaihtoehto, sillä jatkuva polttoainefaasi antaa jonkinasteisen suojan HP-pisaroiden kontaminaatiolta.

HPE:n käyttökelpoisuus ja suorituskyky ovat verrattavissa nykyisiin ANE-tuotteisiin joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta. HPE:n viskositeettia ja pumpattavuutta voidaan säätää niin, että standardi ANE-panostustekniikka voidaan muuntaa HPE:lle. Muunnos edellyttää luonnollisesti yksityiskohtaista riskianalyysiä. HPE:n energian tuotto on verrannollinen ANE-tuotteisiin. Polttoaineseoksen hiilivedyt hapettuvat HP:stä vapautuvan hapen avulla. Tämän periaatteen perusteella voidaan määrittää suhde HP:n pitoisuuden ja HPE:n ihanteellisen energian tuoton välillä. Esimerkiksi happitasapainotetun HPE:n energia 50 % HP-liuoksella on noin 2,4 MJ/kg ja 60 % HP-liuoksella noin 3,7 MJ/kg (laskettu Explor 5.0 -ohjelmistolla). Vertailun vuoksi normaali ANE-räjähdysaine, kuten Forcitin Kemiitti 810, tuottaa energiaa 2,9 MJ/kg. FORCIT on testannut Kemiitti HPE:n suorituskykyä koeräjäytyksissä. Lohkaroituminen ja etenemä olivat vähintään yhtä hyviä kuin ANE:llä, ja mitattu VOD oli 4400–5300 m/s (ø51 mm vaakarei'issä). Testissä käytetty HP:n pitoisuus oli 56 %.

Tekniset erot ANE:hen verrattuna johtuvat pääasiassa HPE:n alemmasta tiheysalueesta. Kaasuttamattoman HPE:n tiheys on 1,15–1,20 g/cm³ riippuen HP-pitoisuudesta. Kaasutetun HPE:n tyypillinen tiheysalue on 0,8–1,0 g/cm³. Vettä sisältävissä pystysuorissa porarei'issä on siten riski, että osa räjähdepatsaasta irtoaa ja nousee kellumaan reiän yläosaan. Alempi tiheysalue voi myös rajoittaa reiän suurinta sallittua syvyyttä. Kaasutettuna tuote puristuu suurempaan tiheyteen reiän pohjalla, ja jos tiheys kasvaa liikaa, aloiteherkkyys todennäköisesti menetetään. Teoreettinen arvio kriittisestä patsaan korkeudesta on noin 20 metriä, mutta arvio on vahvistettava kokeellisesti VOD-mittauksilla.

2. TYÖTERVEYS

ECHA:n (Euroopan kemikaalivirasto) mukaan HP:n pitkäaikaisen (8 h) altistuksen raja-arvo on 1 ppm ja lyhytaikaisen (15 min) altistuksen raja-arvo 2 ppm. Ensimmäiset altistumisen oireet HP-höyrylle ovat kutina ja polttava tunne iholla, hengitysteissä ja silmissä sekä myöhemmin huimaus. Toistuva pitkäaikainen altistuminen voi johtaa pysyvään keuhkovaurioon. Tutkimukset osoittavat, että hienojakoisen pölyn avulla HP voi tunkeutua syvemmälle keuhkoihin aiheuttaen vakavampaa vahinkoa, mikä voi olla merkittävä tekijä kaivosympäristössä.

Pilot- ja kenttäkokeidemme aikana HP:n pitoisuutta ilmassa on seurattu jatkuvatoimisesti. Mittalaite pystyy mittaamaan HP-pitoisuuksia jopa 20 ppm:iin asti. Mittaukset ylittivät toistuvasti 2 ppm raja-arvon aina, kun HP:tä tai HPE:tä käsiteltiin. Emme ole havainneet eroja HP:n pitoisuudessa 50 % ja 60 % liuosten välillä. Mitatut arvot on esitetty taulukossa 1.

Mittauspiste	HP pitoisuus ilmassa, ppm
Panostuslaitteen tankin täyttäminen, luukku auki, 1 m säde	10-15
Panostuslaitteen tankin täyttäminen, luukku auki, 5 m säde	1-2
Tunnelin peräpanostuksen alussa	0-0,3
Kesken peräpanostuksen, noin 30 min kohdalla	1,0-1,5ppm
Malmin kanssa reagoivasta HPE:stä nousevasta höyrypilvestä	>20

Taulukko 1. Mitatut HP-pitoisuudet työpaikan ilmassa.

Olemme havainneet, että reaktiivisuus kehittyy ja leviää erittäin nopeasti koko HPE-massan läpi. Ensimmäisten kaasukuplien ilmaannuttua reaktiivisuus leviää koko massaansa muutamassa minuutissa. Todennäköisesti tämä johtuu jyrkästä lämpötilan noususta (jopa noin 100 °C), voimakkaasta konvektiosta ja kemiallisesti aggressiivisista radikaaleista, jotka vapautuvat HP:n hajotessa. HP:n korkea pitoisuus höyryssä johtuu HP:n kohonneesta höyrynpaineesta kiehuvaan HPE:ssä sekä voimakkaasta hapen ja höyrystyneen veden konvektiosta, joka kuljettaa HP:tä aerosolina. Lukemat hyppäävät välittömästi yli asteikon, kun HP:n mittauslaite tuodaan lähelle höyrypilveä. Lisäksi joidenkin aineiden kanssa reagoidessa HP:n hajoamistuotteina muodostuvassa höyryssä oleva happi saattaa olla virittyneessä molekyylitilassa, niin sanotussa singlet-tilassa. Singlet-happi luokitellaan reaktiiviseksi happilajiksi, joka voi vahingoittaa DNA:ta ja osoittaa karsinogeenisiä vaikutuksia.

Kontaminaatio on jokapäiväinen riski bulkkituotteiden panostuksessa. Sekä ANE että HPE ovat koostumukseltaan rasvaisia ja tahmeita. Pitkästä kokemuksesta ANE-tuotteiden käytöstä teollisuudessa tiedämme, kuinka helposti emulsioiden tahrat leviävät kaikkialle. ANE-kontaminaatiolla ei ole kovin vakavia seurauksia. HPE:n tapauksessa kontaminaatio ja leviäminen tapahtuvat samalla tavalla, mutta seuraukset voivat olla vakavampia. Lievin seuraus ihokosketuksesta on kutina ja pistely tai polttava kipu. Myöhemmin vaurioituneelle ihoalueelle voi tulla infektio. Vakavammassa tapauksessa HPE:tä voi joutua silmiin, mikä voi aiheuttaa pysyvän vaurion. Kontaminoituneet työvaatteet ja muut palavat materiaalit voivat syttyä itsestään. Olemme havainneet HPE:n leviävän esimerkiksi auton istuimille ja nallilaatikoihin. Vuosien kokeellisen HPE-työmme aikana meillä on ollut kaksi tapausta, joissa palava materiaali, joita käytettiin HP/HPE-tahrojen puhdistamiseen, on syttynyt itsestään palamaan.

FORCITin ratkaisu edellä mainittuihin haasteisiin tässä kehitysvaiheessa on asianmukainen turvavaatetus (PPE), erittäin huolelliset työmenetelmät ja volyymien pitäminen hallittavalla tasolla. Avainkohtia ovat hengityksen suojaaminen, ihokosketuksen estäminen ja HPE:n leviämisen välttäminen. Riittäväksi työvaatetuksesi katsotaan moottoroitu kokokasvonaamari sopivalla kaasusuodattimella, kemikaalinkestävät suojahaalarit, pitkähihaiset kemikaalinkestävät käsineet ja kumisaappaat (lahkeet saappaiden päällä).

FORCIT on järjestänyt kolme mittaussessiota Kemiitti HPE -tuotteen räjäytyskaasujen mittaamiseksi: kaksi niistä 35 m³ räjäytyskammiossa 1 kg panoksilla ja yksi maanalaisessa kaivoksessa. Testit vahvistivat ilmeisen tuloksen, että NO_x-yhdisteitä ei ole räjäytyskaasuissa. Työterveyden näkökulmasta CO-pitoisuus on ollut verrattavissa ANE-tuotteesta saatuihin tasoihin. Myös pieniä HP-pitoisuuksia havaittiin. Tämä tarkoittaa, että asianmukainen tuuletus HPE-räjäytyksen jälkeen on yhtä tärkeää kuin ANE:n tapauksessa. HPE:n reseptiä voidaan kuitenkin optimoida niin, että CO-tuotanto on minimaalista, mikä on yksi tulevan kehitystyön tavoitteista.

Räjäytyskammion tulokset esiteltiin EFEE 2023 -konferenssissa Dublinissa LTU:n (Luleå Technical University) toimesta. Täysimittainen testi maanalaisessa kaivoksessa tehtiin yhteistyössä VTT:n (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy) kanssa vuonna 2024, ja tulokset esiteltiin EFEE 2025 -konferenssissa VTT:n toimesta.

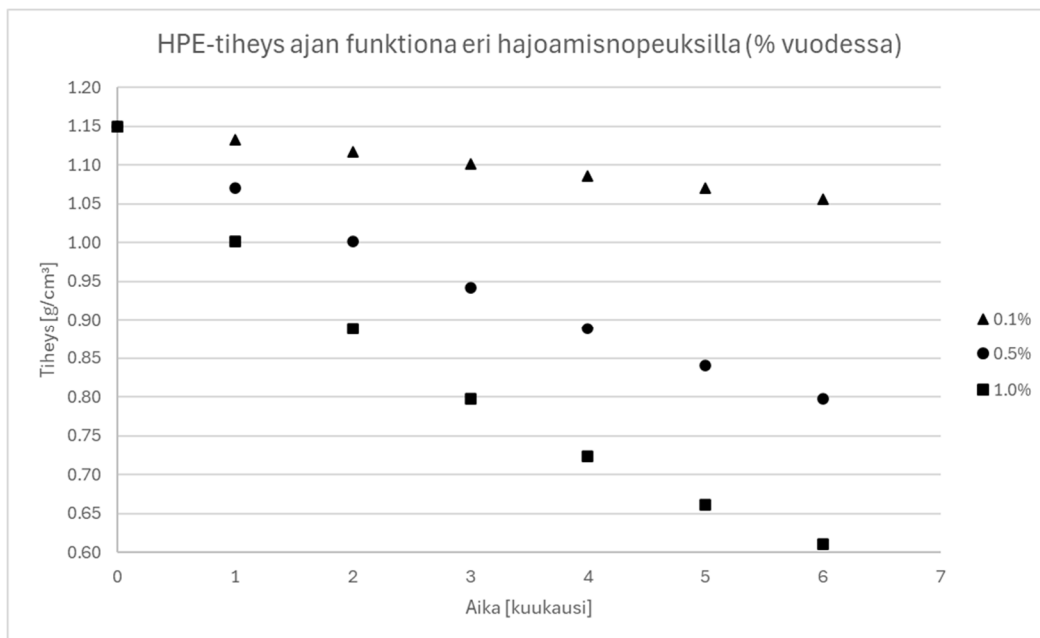
3. TURVALLISUUS

HPE sisältää yli 90 paino-% HP-liuosta, joten sen reaktiivisuuspotentiaali on käytännössä sama kuin HP:llä. Vesi-öljyssä-emulsiorakenne hidastaa reaktiivisuutta jatkuvan vettähyllivän polttoainefaasin ansiosta, mutta kuten aiemmin todettiin, emulsiorakenne ei poista reaktiivisuutta. Reaktiossa muodostuu suuri määrä happikaasua ja vesihöyryä, ja samalla vapautuu runsaasti energiaa, mikä kuumentaa HPE:tä ja kiihdyttää reaktiota edelleen. Havaintojemme mukaan HPE muuttuu reagoidessaan erittäin liukkaaksi, jolloin se voi valua ulos alaspäin kallistetuista rei'istä hyvin helposti. Tämä lisää vakavan kontaminaation riskiä työntekijöille ja ympäristölle sekä heikentää räjäytystulosta. Yläkätiset reiät ovat tässä suhteessa erityisen kriittisiä.

Yhteensopivuus muiden räjähdekomponenttien kanssa edellyttää riskinarviointia ja testausta. Teollisuus on tottunut tavallisten materiaalien ja komponenttien yhteensopivuuteen ANE:n kanssa, mutta HPE:n kemia on erilainen. Erityisesti lämpökarkaamisreaktioissa on kriittistä tietää, ovatko yleisesti käytetyt nallit ja aloitepanokset yhteensopivia HP:n kanssa. Pahimmassa tapauksessa HPE:n reaktiivisuus yhdessä muiden komponenttien kanssa voi johtaa ennenaikaiseen räjähdykseen. Erityinen haaste on HP:n kyky muodostaa aloiteräjähdysaineita tiettyjen kemikaalien kanssa. Reaktio asetonin tai heksamiinin kanssa tapahtuu helposti, ja reaktiotuotteet ovat erittäin voimakkaita ja herkkiä yhdisteitä. Riskianalyysin tulee kattaa myös tämänkaltaiset tekijät. Reaktioiden seuraukset voivat olla vakavia, eikä yhteensopivuustietoja ole toistaiseksi saatavilla, joten asiat on varmistettava kokeellisesti.

Toinen riskienhallinnan näkökulma liittyy HPE:n luokitukseen. Saattaa olla houkuttelevaa verrata HPE:tä ANE:hen, mutta määritelmän mukaan UN3375 ei ole käyttökelpoinen HPE:lle. UN Manual of Tests and Criteria -ohjeen kohdan 20.2.1b mukaan hapettavia aineita sisältävät seokset, joissa on 5 % tai enemmän palavia orgaanisia aineita, on luokiteltava itsereaktiivisiksi aineiksi. Tulevaisuudessa täytyy testauksen ja analysoinnin kautta selvittää HPE:n mahdollisuus saavuttaa ADR-kehys. Tämä kuitenkin edellyttää, että HPE ei muutu kuljetuksen tai varastoinnin aikana. ADR:ssa vaaditaan tuuletetut pakkaukset ja säiliöt HP:lle, koska se hajoaa spontaanisti ja happikaasu on vapautettava ilman paineen nousua. HP-liuoksen tapauksessa happikuplat voivat poistua nesteestä, mutta viskoosissa HPE:ssä happikuplat eivät pääse poistumaan, mikä voi johtaa siihen, että HPE muuttuu spontaanisti räjähtäväksi. HPE voidaan mahdollisesti aluksi luokitella ei-räjähtäväksi, mutta tietyn ajan kuluttua se voi herkistyä. Muutokseen kuluva aika riippuu

lämpötilasta, koostumuksesta ja mahdollisesta kontaminaatiosta. Joissakin varhaisissa testeissä käytimme tätä ilmiötä näytteiden valmistamiseen kaasutetusta HPE:stä VOD-mittauksia varten. HPE-näytteiden valmistamiseen muoviputkissa käytettiin HP:tä ilman erityisiä stabilisaattoreita. Putket täytettiin tuoreella HPE:llä ja tiheyttä seurattiin päivittäin. Kolmen päivän kuluttua HPE oli nalliherkkää. Parannetuilla stabilisaattoreilla HP:ssä tätä prosessia voidaan hidastaa merkittävästi. Spontaania kaasun muodostumista on havaittu ja raportoitu myös muualla; esimerkiksi australialaisissa testeissä havaittiin räjähdysherkkyyttä 29 päivän kuluttua. Kuljetus- ja varastointilämpötilan rajoittaminen sekä erien ikäkontrolli voivat periaatteessa auttaa hallitsemaan ongelmaa. ANE:n käsittelykokemusten perusteella tiedämme kuitenkin, että säiliöiden seinämissä, kulmissa ja putkissa on aina kerrostuneena vanhempaa materiaalia. Tämän vuoksi HPE-järjestelmässä on aina riski vanhemman, mahdollisesti herkistyneen materiaalin esiintymisestä. Yleisesti arvioituna HP:n hajoamisprosentti on alle yksi vuodessa. Kuvassa 1 on esitetty arvioituja tiheyksiä ajan funktiona eri HP:n hajoamisnopeuksilla. Tiheydellä alle 1,05 g/cm³ HPE on varmasti räjähtävä. Luokituksen ja riskienhallinnan hallitsemiseksi toimittajan tulisi toimittaa testidata, joka osoittaa, ettei spontaania herkistymistä tapahdu, jos HPE:tä kuljetetaan tai varastoidaan ei-räjähtävänä materiaalina.



Kuva 1. Arvioitu HPE:n tiheys eri vuotuisilla hajoamisnopeuksilla.

Lopuksi on kysymys HPE-jätteestä. Kokemuksesta tiedämme, että bulkkisemulsiójärjestelmässä on erittäin vaikeaa välttää jätettä kokonaan. Kaivosolosuhteissa mineraalipölyä on kaikkialla, joten myös kontaminaation välttäminen on haastavaa. Kontaminoitunut HPE voi aloittaa lämpökarkaamisreaktion milloin tahansa. Tämä tarkoittaa, että ensisijaisesti HPE-jätteen syntymistä on vältettävä, ja jos jätettä syntyy, se on muutettava turvalliseen (ei-reaktiiviseen) muotoon välittömästi. HPE-jätettä ei saa varastoida. Tähän ongelmaan ei ole yksinkertaista ratkaisua, mutta se on tunnistettava ja ymmärrettävä ennen panostuksen aloittamista käytännössä. Emulsion hajotus voi olla ensimmäinen askel riskitason vähentämiseksi, sillä silloin polttoaine ja hapetin erotetaan. Silti väkevä HP-liuos jää jäljelle, ja vesipitoisena nesteenä se on vielä reaktiivisempi epäpuhtauksien kanssa.

4. YMPÄRISTÖVAIKUTUS

HP:a markkinoidaan usein vihreänä kemikaalina, koska sen hajoamistuotteet ovat happea ja vettä. Kun HP:ta käytetään bulkkiräjähteiden raaka-aineena, päästöskenaario on kuitenkin arvioitava uudelleen. W/O-emulsion muodossa HP on jossain määrin suojattu ulkoisilta tekijöiltä, mutta monet tutkimukset osoittavat, että 5–20 % käytetyistä bulkkiräjähteistä jää räjäytyksen jälkeen reagoimatta louheen sekaan. Tämä muodostaa merkittävän HP-lähteen ympäristöön. Riippuen kiven ja kaivosveden jatkokäsittelystä vaihtelevia määriä HP:tä voi päätyä ympäröiviin vesistöihin. Viimeaikaiset tutkimukset osoittavat, että HP on myrkyllistä vesieliöille. Tällä hetkellä ei ole tuloksia, jotka osoittaisivat HPE:n laajamittaisen käytön seuraukset vesistöille, joten lisätutkimuksia tarvitaan negatiivisten yllätyksien välttämiseksi.

Kun HP/HPE reagoi mineraalien kanssa, voidaan joidenkin reaktiotuotteina syntyvien metallien odottaa esiintyvän vesiliukoisessa muodossa. Taulukossa 2 on esitetty kahden testin analyysitulokset: toinen näyte oli porausjätteitä pyriittimineraalista (Py) ja toinen graniittipohjaisesta mineraalista (Gr). Py-0 tarkoittaa pyriittinäytettä, joka on pesty vedellä, Py-HPE näytettä, joka on reagoanut HPE:n kanssa ja pesty vedellä. Gr-0 ja Gr-HPE vastaavat graniittinäytteitä. Pyriittinäyte oli erittäin reaktiivinen ja reagoi kiivaasti HPE:n kanssa; vain muutaman minuutin kosketuksen jälkeen tapahtui voimakas, nopeasti etenevä HPE:n hajoaminen. Graniitin reaktio oli vastakohtaisesti hyvin hidas ja havaittavissa vasta voimakkaan sekoituksen jälkeen. Pyriittinäytteen tapauksessa suodatettu vesi oli sinivihreää, kun näyte ei ollut kosketuksessa HPE:n kanssa, ja syvän ruskeaa, kun näyte oli reagoanut HPE:n kanssa. Tämä voi johtua raudan eri hapetusasteista. Metallianalyysi tehtiin ICP:llä, joten se ei erota hapetusasteita. Testin tavoitteena oli nähdä, ilmestyykö reaktiossa HPE:n kanssa uusia metalleja. Tulokset osoittivat, että vain graniitin tapauksessa nikkeli ilmestyi analyysiin reaktion jälkeen. Kaikki muut metallit olivat vesiliukoisessa muodossa jo ennen reaktiota. Testijärjestely ei ollut kovin tarkka, joten lisää tutkimuksia tarvitaan todellisen metallipäästöpotentialin arvioimiseksi.

Näyte	Al	Ca	Cd	Co	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	S	Zn
Py-0	452	516	9	4	1363	1147		1253	103	4	1	52	5528	3360
Py-HPE	539	538	6	4	1472	3955		926	73	3	1	56	6506	2388
Gr-0		468					71	50		1335			122	
Gr-HPE		196					39	21		514	1		56	

Taulukko 2. Melallipitoisuudet vedessä (ppm).

Koska HP on voimakas hapetin, se pystyy muuttamaan metallien hapetusasteita. Erityisen huolenaihe on kromi. Lievästi emäksisessä ympäristössä HP voi hapettaa vaarattoman Cr(III):n erittäin myrkylliseksi Cr(VI):ksi. Ruiskubetoni ja täyteaineet, joita käytetään maanalaisissa tuotantoalueissa, sekä kalkkikivi luovat tämän tyyppisen emäksisen ympäristön. Testitulokset puuttuvat, mutta kromaatit ovat niin myrkyllisiä aineita, että tämä aihe on tutkittava perusteellisesti ennen HPE:n laajamittaista käyttöä, erityisesti alueilla, joilla esiintyy kromia sisältäviä mineraaleja.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

HPE on osoittanut lupaavia tuloksia kenttäkokeissa räjäytysteknisestä näkökulmasta. Suurin haaste liittyy turvallisuuteen. Tarvitaan uusi taso henkilösuojauksessa, ja työmenetelmiä on kehitettävä leviämisen ja kontaminaation estämiseksi. Lopullinen ratkaisu tulee olemaan etäoperoitu mekanisoitu panostus, jossa panostaja valvoo panostusprosessia turvallisessa paikassa, kuten panostuslaitteen hytissä.

Materiaaliturvallisuuden näkökulmasta HP/HPE:n reaktiivisuus ja sen seuraukset sekä HPE:n spontaani herkistyminen ovat suurimmat haasteet. Yksi ratkaisu kuljetus- ja varastointiriskeihin on paikan päällä tapahtuva tuotanto, joka on integroitu panostuslaitteeseen.

Ympäristökysymykset vaativat lisää tutkimuksia ennen HPE:n laajamittaista käyttöä. Riskit liittyvät mahdollisiin päästöihin ja HP:n myrkyllisiin vaikutuksiin vesistöissä sekä HP:n reaktiotuotteisiin mineraalien ja maan kanssa, erityisesti mahdolliseen vaarattoman kromin (III) hapettumiseen erittäin myrkylliseksi Cr(VI):ksi.

VIIITTEET

Agnez-Lima, L.F., Melo, J.T.A., Silva, A.E., Oliveira, A.H.S., Timoteo, A.R.S., Lima-Bessa, K.M., Martinez, G.M., Medeiros, M.H.G., Di Mascio, P., Galhardo, R.S., Menck, C.F.M., DNA damage by singlet oxygen and cellular protective mechanisms, *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, Vol 751, Issue 1, Jul-Sep 2012, pp. 15-28

Araos, M., Onederra I., Development of Ammonium Nitrate-Free Mining Explosives, *Proceedings of the 43rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique*, Orlando, Fla., USA, Jan. 29 – Feb. 1, 2017

Araos, M., Onederra I., Detonation characteristics of alternative mining explosives based on hydrogen peroxide, 2013,

https://www.researchgate.net/publication/316862205_Detonation_characteristics_of_alternative_mining_explosives_based_on_hydrogen_peroxide

Bailey, V., Characterisation of hydrogen peroxide based explosives and ventilation modelling to quantify re-entry times in underground development blasting, 2017, BEng Thesis Mining, The University Of Queensland, Australia

Fang, J., Samuelsen O.B., Strand, Ø., Jansen, H., Acute toxic effects of hydrogen peroxide, used for salmon lice treatment, on the survival of polychaetes *Capitella* sp. and *Ophryotrocha* spp.

https://www.researchgate.net/publication/325468686_Acute_toxic_effects_of_hydrogen_peroxide_used_for_salmon_lice_treatment_on_the_survival_of_polychaetes_Capitella_sp_and_Ophryotrocha_spp

Hydrogen Peroxide Safety & Handling, Solvay Chemicals, Inc.
<https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend616/files/2019-10/H2O2%20Safety%20and%20Handling%20of%20Hydrogen%20Peroxide.pdf>

Kettle, A.J., Sellers, E., A Novel Chemically-Stabilised Hydrogen Peroxide/Hydrotreated Oil-Based Emulsion-Type Explosive With Competent Blasting Characteristics For A Nitrogen-Free Mining Legacy: Results Of United Nations Classification Tests Of Explosives For Authorisation Submission, 12-ISEE22-Full-paper-Emulsion-type-hydrogen-peroxide-explosives-for-nitrate-free-mining-legacy-AJK01.pdf

Liang, J., Huang, X., Yan, J., Li, Y., Zhao, Z., Liu, Y., Ye, J., Wei, Y., A review of the formation of Cr(VI) via Cr(III) oxidation in soils and groundwater, *Science of the Total environment* 774 (2021) 145762

Manfra, A., Sharma, J., Kilburn, J., Inhalation Pneumonitis Caused by Nebulized Hydrogen Peroxide, https://www.researchgate.net/publication/370284455_Inhalation_Pneumonitis_Caused_by_Nebulized_Hydrogen_Peroxide

Morio, L.A., Hooper, K.A., Brittingham, J., Li, T-H., Gordon, R.E., Turpin, B.J., Laskin, D.L., Tissue Injury Following Inhalation of Fine Particulate Matter and Hydrogen Peroxide Is Associated with Altered Production of Inflammatory Mediators and Antioxidants by Alveolar Macrophages, *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol 177, Issue 3, 15 December 2001, Pages 188-199

Roseth, R., Olsen, R.C.J., Sverdrup, E.M., Pedersen R., Bergheim, H., Gulyaeva, K., Roaldkvam, E., Harstad, A.O., Tunneling med HYPEXBIO. Pilotstudie av utvasking av hydrogenperoksid fra sprengstein og tunnel, Nibio rapport, ol. 11, Nr. 72, 2025 (Norjankielinen)

Schumb, W. C., Satterfield, C. N., Wentworth, R. L., Hydrogen peroxide, A. C. S. Monograph No.128, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1955