

Vesienhallinnan tekniset riskit

KaivosVV-hanke

Teollisuustaito Oy

7.1.2015

Sisällys

Vesienhallinnan tekniset riskit	1
Tiivistelmä	4
1. Johdanto	5
2. Riskien arviointi.....	6
3. Kaivosten vesienhallintajärjestelmien riskit	8
3.1. Vesien varastointi	9
3.1.1. Poikkeustilanteiden määrittely	11
3.1.2. Riskin arviointi	15
3.1.3. Riskien ennaltaehkäisy ja varautuminen poikkeustilanteisiin	16
3.2. Vesien siirto	19
3.2.1. Poikkeustilanteiden määrittely	19
3.2.2. Riskin arviointi	23
3.2.3. Riskien ennaltaehkäisy ja varautuminen poikkeustilanteisiin	23
4. Kaivosten vesienkäsittelyprosessien riskit	26
4.1. Sulfaatin poisto kalkkimaitoneutraloinnilla.....	26
4.1.1. Poikkeustilanteiden määrittely	29
4.1.2. Riskin arviointi	30
4.1.3. Riskien ennaltaehkäisy ja varautuminen poikkeustilanteisiin	31
4.2. Metallien (nikkelin) poisto adsorptiolla	33
4.2.1. Poikkeustilanteiden määrittely	37
4.2.2. Riskin arviointi	38
4.2.3. Riskien ennaltaehkäisy ja varautuminen poikkeustilanteisiin	39
4.2.4. Peti- ja kolonniratkaisujen riskien hallinta	40
5. Yhteenveto ja selvityksen hyödyntäminen jatkossa	43
6. Lähdeluettelo	45

Liitteet:

- 1 Vesienhallintajärjestelmien riskinarviointi
- 2 Vesienkäsittelyprosessien riskinarviointi

Tiivistelmä

Tämä selvitys on osa KaivosVV-hanketta, jonka puitteissa kehitetään kokonaisvaltaista riskinarviointimenetelmää (työpaketti 4), ympäristö- ja prosessimonitorointia (työpaketti 3) sekä uutta vedenpuhdistustekniikkaa kaivosteollisuudessa sovellettavaksi (työpaketti 5).

Selvityksen tavoitteena on ollut tunnistaa kaivosten vesienhallintajärjestelmään ja valittuihin vesienkäsittelytekniikkoihin liittyvät poikkeamatilanteet, joiden toteutumisesta voi aiheutua vaikutuksia ympäristön vesistöihin. Vesienhallintajärjestelmän osalta on tarkasteltu patorakenteisiin ja veden siirtoratkaisuihin liittyviä prosessitekniisiä riskejä ja riskien hallintamenetelmiä. Vesienkäsittelytekniikoista tarkasteluun on valittu sulfaatinpoisto kalkkimaitoneutraloinnilla sekä nikkelinpoisto bisfosfonaattiadsorptiolla.

Kaivosten vesienhallintajärjestelmien osalta riskitaso arvioitiin kohtalaiseksi seuraaville poikkeamatilanteille:

- Padon ylivuoto tai rakenteen vahingoittumisesta johtuva vuototilanne sellaisessa tapauksessa, jossa padon tarkkailu ei ole automatisoitua, vuotovesien keruuta ei ole järjestetty ja padossa varastoidaan puhdistettua vettä tai lietettä.
 - *Patorakenteiden vahingoittumisen osalta on tärkeää huomata, että pienikin laatu-poikkeama patorakenteessa tai padon väärä käyttötapa voi ajan kuluessa aiheuttaa laajan rakenneaurion. Koska varastoitavan veden määrä on usein suuri, seuraus voi olla merkittävä poikkeaman toteutuessa.*
 - *Oikea rakennesuunnittelu- ja toteutus, poikkeamien ennaltaehkäisy prosessiautomaation ja online-tarkkailun keinoin sekä poikkeaman toteutumiseen varautuminen varoaltain ja toimintasuunnitelmin ovat keskeisiä riskinhallintamenetelmiä.*
- Käsittelemätöntä kaivosvettä sisältävän putken vuoto tai hapanta kaivosvettä sisältävän kanaalin ylivuoto sellaisissa tapauksissa, joissa vesiliuos pääsee ympäristöön.
 - *Oikea materiaalivalinta, putken asentaminen keruukanaaliin sekä siirtokanaalin oikea merkitseminen ja suojaaminen pienentävät riskitason vähäiseksi.*

Kaivosten vedenkäsittelyprosesseissa tunnistettiin seuraavat kohtalaisen riskitason aiheuttavat poikkeamat:

- Häiriöt sulfaatin poistoprosessin kalkkimaidon syötössä ja neste-kiintoaine-erotuksessa voivat johtaa poistoveden laatu-poikkeamiin sekä sulfaatin että mahdollisten raskasmetallien osalta. Kiintoaineen mukana vesistöön voi päätyä kipsiä sekä raskasmetallihydroksideja.
 - *Prosessin oikealla ajotavalla ja prosessiautomaatiolla voidaan estää valtaosa riskeistä, jotka aiheuttavat sulfaattipäästöjä ympäristön vesiin. Keskeistä on varmistaa oikea kalkkimaidon syöttö ja kipsin saostumisreaktion toimivuus.*
- Poikkeuksellinen syöteveden laatu voi aiheuttaa nikkeliadsorptiossa häiriöitä, mikäli prosessi ei sisällä jatkuvatoimista syöttöveden laadun tarkkailua. Lisäksi itse adsorptioprosessin pH-säätö voi johtaa epätäydelliseen nikkelin puhdistukseen. Jauhemaista adsorbenttia käytettäessä on tärkeää varmistua siitä, että neste-kiintoaine-erotus toimii asianmukaisesti.
 - *Nikkelinpoiston osalta on tärkeää havaita, että myös lyhytkestoinen poikkeamatilanne voi aiheuttaa merkittävää haittaa ympäristön vesistölle metallin myrkyllisyyden vuoksi.*
 - *Poikkeamatilanteita ennaltaehkäistään hyvällä prosessisuunnittelulla sekä prosessin tarkkailulla esimerkiksi jatkuvatoimisin mittauksin, jotka yhdistetään prosessiautomaatioon.*

Lisäksi veden käsittelyprosessien poikkeamiin voidaan varautua puskuriallasjärjestelyin.

1. Johdanto

Suomen lainsäädäntö määrittelee kaivostoimijoille useita riskien arviointiin ja hallintaan liittyviä velvoitteita. Velvoitteita on määritelty muun muassa ympäristönsuojelulaisissa (YSL 2014/527), kemikaaliturvallisuuslaissa (2005/390), työturvallisuuslaissa (2002/738) sekä lukuisissa asetuksissa ja säädöksissä. Kaivoksilla on lakisääteinen selvilläolovelvollisuus (YSL 6 §) ja ennaltavarautumisvelvollisuus (YSL 15 §), joka koskee kaivosten toiminnan ympäristövaikutuksia, ympäristöriskejä ja varautumista onnettomuus- ja poikkeustilanteisiin. Patoturvallisuutta ja patoihin liittyvää onnettomuusriskien arviointia ja varautumista koskevat puolestaan Patoturvallisuuslaki (PTL 2009/494) ja Patoturvallisuusasetus (PTA 319/2010).

Lainsäädännöllisiä velvoitteita on tarkasteltu vuonna 2012 tapahtuneen Talvivaaran kaivoksen kipsisakka-altaan vuodon seurauksena useissa viranomais selvityksissä (mm. Kaivosten ympäristöturvallisuus - Viranomaistyöryhmän raportti 2014) ja vastaavien onnettomuuksien välttämiseksi on valmisteltu useita oppaita (mm. Metallimalmikaivosten parhaat ympäristökäytännöt (Kauppila P. *et al.* 2011)). Myös kaivosalan päätoimijat ovat kehittäneet ympäristövastuuviestintää Kestävän kaivostoiminnan verkoston muodossa (2014).

Kaivosten stressitesteissä (Välisalo T. 2014) haasteellisimmaksi osa-alueeksi on tunnistettu vesienhallinta. Erityisesti poikkeavien sadeolosuhteiden osalta on todettu, että varoallaskapasiteettia tai ylimääräistä vedenkäsittelykapasiteettia ei ole riittävästi, vaan poikkeustilanteessa voidaan joutua käyttämään ylimääräisiä veden juoksutuksia.

Kaivosten toiminnasta johtuvien riskien tunnistamisessa ja niiden pienentämisessä on keskeisessä roolissa prosessitekniisten ratkaisujen toiminnan varmistaminen. Uusien prosessitekniikoiden kehittämistyössä on tärkeää huomioida niiden käytöstä aiheutuvat riskit - ja toisaalta uudet prosessitekniikat voivat tuoda mahdollisuuksia toimintaan liittyvien riskien vaikutusten pienentämiseksi. Uudet mittaustekniikat voivat osaltaan parantaa poikkeustilanteiden havaitsemista ja sitä kautta pienentää riskin vaikutusten suuruutta ja todennäköisyyttä. Riskien vaikutusten arviointi edellyttää esimerkiksi vesistövaikutusten osalta erikoisosaamista mm. mikrobiologian ja vesistöbiologian alueelta.

Tämä selvitys on osa KaivosVV-hanketta, jonka puitteissa kehitetään kokonaisvaltaista riskinarviointimenetelmää (työpaketti 4), ympäristö- ja prosessimonitorointia (työpaketti 3) sekä uutta vedenpuhdistustekniikkaa kaivosteollisuudessa sovellettavaksi (työpaketti 5).

Tämän selvityksen tavoitteena on tuottaa tietoa kaivosten vesienhallintajärjestelmään liittyvien vesistö päästöjen suuruudesta ja todennäköisyydestä. Toisena kokonaisuutena tuotetaan tietoa kaivosten vesienkäsittelyssä käytettävistä prosessitekniikoista ja niiden poikkeamatilanteiden vaikutuksista vesistö päästöihin. Lisäksi esitetään menetelmiä, joilla riskejä voidaan hallita joko poikkeamatilanteiden tapahtumista ennaltaehkäisemällä tai poikkeaman seurauksia rajaamalla. Selvityksessä keskitytään ympäristövesille aiheutuviin riskeihin.

Vesienkäsittelytekniikoiden osalta selvitykseen on valittu kaivoksilla hyvin yleisesti käytössä oleva kalkkimaitoneutralointi. Tässä selvityksessä kalkkimaitoneutralointiatarkastellaan pääasiassa sulfaatinpoistotekniikkana, joskin se on yleinen kaivosten vedenkäsittelymenetelmä raskasmetallien puhdistuksessa. Toisena vesienkäsittelytekniikkana tarkastellaan KaivosVV-hankkeessa kehitettävää bisfosfonaattisorbenttia nikkelin poistossa. Nikkeli on valittu tarkasteluun sen myrkyllisten ja haitallisten ominaisuuksien vuoksi.

2. Riskien arviointi

Riski määritellään yleensä ei-toivotun tapahtuman todennäköisyyden ja seurausten merkittävyyden tulona:

$$R = P \times C \quad [1]$$

Kaavassa R =riski, P = todennäköisyys, C =seurausten merkittävyys.

Riskin arviointi sisältää tyypillisesti seuraavat vaiheet:

1. Tarkasteltavan kohteen rajaaminen ja toimintojen kuvaaminen (esimerkiksi vesivarastopatoon liittyvät riskit)
2. Riskin arvioinnin päätavoite (esimerkiksi vesistö päästön suuruuden arviointi)
3. Poikkeustilanteiden tunnistaminen (esimerkiksi ylivuoto tai padon murtuminen)
4. Poikkeustilanteiden todennäköisyyden arvioiminen (kuinka usein poikkeama toteutuu)
5. Poikkeustilanteen seurausten arvioiminen (kvantitatiivinen arvio)
6. Varotoimenpiteiden lisääminen, mikäli riski katsotaan liian suureksi (esimerkiksi varoaltaat)

Kohdassa 1 kuvataan esimerkiksi patorakenneratkaisu, padossa varastoitavan aineen koostumus ja määrä, padon toiminnan tarkkailu silmämääräisesti ja laiteteknisin ratkaisuin sekä mahdolliset varotoimenpiteet, jotka ovat osa toteutusta.

Kohdassa 2 rajataan usein tarkastelu ympäristövaikutuksiin, terveysvaikutuksiin tai palo- ja räjähdysvaaraan, joista viimeisellä on usein myös ympäristö- ja terveysvaikutuksia. On myös mahdollista arvioida kaikki osa-alueet samassa arvioinnissa.

Kohdassa 3 voidaan käyttää erilaisia vika-, väärinkäyttö- ja onnettomuustilanteiden tunnistamismenetelmiä. Näitä ovat esimerkiksi HAZOP- eli poikkeamatarkastelu ja toimintovirheanalyysi. (Crowl, D. *et al.* 2007)

Todennäköisyyden arvioiminen (kohta 4) voi perustua esimerkiksi tilastotietoon tunnistetuista poikkeustilanteista. Todennäköisyyden arviointi voi perustua myös asiantuntija-arvioon tietyn tapahtuman todennäköisyydestä valitulla teknisellä ratkaisulla. Vaikutuksiltaan merkittävät poikkeamatilanteet - suuronnettomuudet - ovat taajuudeltaan harvinaisia. Sen vuoksi poikkeamia koskevan tilastotiedon määrä ja sen myötä todennäköisyyden arvioinnin luotettavuus laskevat yleensä sen mukaan, mitä merkittävämmästä poikkeustilanteesta on kyse. Tässä selvityksessä on käytetty tausta-aineistona padoilla raportoituja poikkeamatilanteita, ja muilta osin todennäköisyyksien arviot perustuvat asiantuntija-arvioihin.

Todennäköisyydelle valitaan usein jokin numeerinen taulukko, jossa todennäköisyydet on ryhmitelty luokkiin. Luokkien määrä vaihtelee yleensä kolmesta viiteen. Todennäköisyysluokat vaihtelevat hyvinkin paljon. Esimerkiksi seuraavaa, kolmiportaista luokittelua on mahdollista käyttää (Lappalainen, K. 2015, henkilökohtainen tiedonanto):

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| 1. Epätodennäköinen | alle 1 kerta 10 vuoden aikana |
| 2. Mahdollinen | 0-1 kertaa vuoden aikana |
| 3. Todennäköinen | useita kertoja vuodessa |

Poikkeustilanteen seurausten arviointi voidaan luokitella välittömiin ja pitkäaikaisiin seurauksiin. Ympäristövaikutusten osalta tarvitaan usein erikoisasiantuntemusta siitä, miten ympäristöön päässyt haitta-

aine vaikuttaa eliöstöön. Monesti prosessitekniikan riskien arvioinnissa pyritäänkin tuottamaan määrärajo poikkeustilanteesta aiheutuvasta päästöstä, ja käyttämään eri asiantuntijaa arvioimaan sen vaikutukset ympäristössä. Tässä selvityksessä tarkastelu on rajattu päästön suuruuden arviointiin.

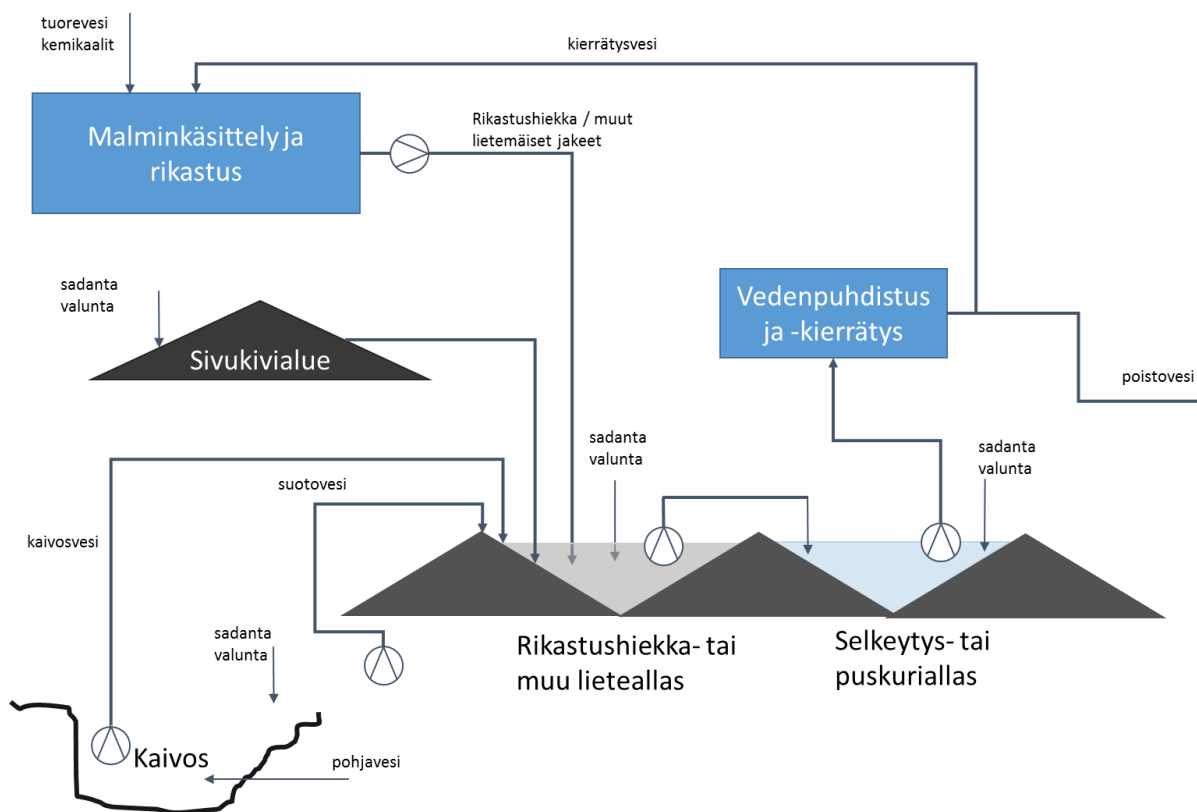
Seurausten suuruuden arvioinnissa hyödynnetään usein saman tyyppistä luokittelua kuin todennäköisyyden arvioinnissa (Lappalainen, K. 2015, henkilökohtainen tiedonanto). Ympäristövaikutusten suuruus riippuu aina paitsi päästön suuruudesta, myös päästön vastaanottavan ympäristön (vesistön) ominaisuuksista. Sen vuoksi ympäristöpäästöjen arviointi tulee aina tehdä paikalliset olosuhteet huomioiden. Tehtäessä riskinarviointia yleisellä tasolla voidaan prosessitekniikan poikkeamien kohdalla käyttää seuraavaa kolmiportaista asteikkoa, jolla arvioidaan ainoastaan päästön suuruutta:

- | | |
|----------------|---|
| 1. Vähäinen | esim. < 20 %:n poikkeama haitallisen komponentin pitoisuudessa |
| 2. Haitallinen | esim. haitallisen komponentin kaksinkertainen kuormitus viikon ajan |
| 3. Vakava | esim. käsittelemättömän vesiliuoksen patovaraston vuoto vesistöön |

Mikäli riskin arvioinnin tuloksena saadaan liian korkea riskitaso tarkastellulle kohteelle, tulee määritellä toimenpiteet, jolla riskin todennäköisyyttä vähennetään. Tämän lisäksi määritellään tarvittaessa toimenpiteet, joilla riskin seurauksia pienennetään. Uusien toimenpiteiden jälkeen arvioidaan jäännösriski ja tarkastetaan, että se on hyväksyttävällä tasolla. Riskitason hyväksyttävyyden arviointi tapaustapaisesti.

3. Kaivosten vesienhallintajärjestelmien riskit

Tässä kappaleessa tarkastellaan kaivosten vesienhallintajärjestelmiin liittyviä riskejä. Vesienhallintajärjestelmällä tarkoitetaan tässä vesien varastointi- ja siirtoratkaisuja eli esimerkiksi patorakenteita, putkistoja ja pumppuja. Kuvassa 1 on esitetty vesivarastojen, vesiliuosten siirtoon tarvittavien putkistojen ja pumppujen sijainteja kaivosalueella. Kuva on esimerkinomainen.



Kuva 1 Kaivoksen vesienhallintaan kuuluvia vesivarastoja ja vesiliuosten siirtoon liittyviä pumppuja ja putkilinjoja.

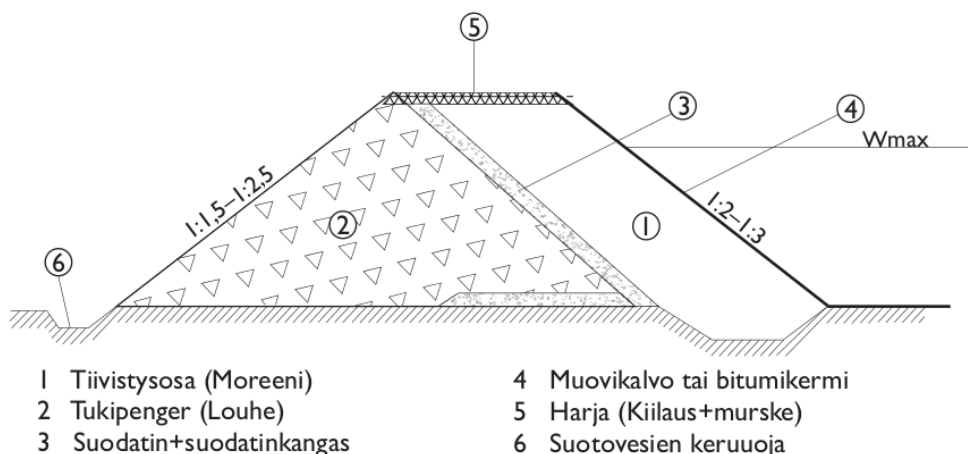
3.1. Vesien varastointi

Kaivosten vesienhallinnan merkittävä osa-alueen muodostavat erilaiset vesiliuosvarastot. Vesien varastoinnille on useita syitä:

- **Rikastushiekka-altailla** kiintoaineksen päällä oleva vesiliuos ennaltaehkäisee pölyhaittoja. Lisäksi se vähentää sulfidipitoisten yhdisteiden hapettumista, joka puolestaan vähentää haponmuodostusta ja metallien liukoisuutta.
- **Laskeutusaltailla** kirkas yliteliuos erottuu lietteen yläpuolelle. Kirkas vesijae johdetaan koostumuksesta riippuen esimerkiksi prosessivedeksi tai vesistöön.
- **Puhdistetun veden varastoaltailla** tasataan vesistöön poistettavan veden virtaamaa, jolle usein on asetettu maksimiarvot ympäristöluvassa. Näillä varastoaltailla voidaan myös estää puhdistusprosessien häiriöistä johtuvan väärän laatuisen veden pääsy vesistöön.
- **Jätevesien keruualtaiden** tarkoitus on tasata puhdistamolle johdettavan veden virtaamavaihteluita. Vedenpuhdistamaa ei yleensä mitoiteta virtaamahuipun mukaan, vaan keskimääräisen virtaaman mukaan.

Kaivoksilla varastoitavien vesiliuosten tilavuudet ovat tyypillisesti niin suuria, että säiliöratkaisuja ei voida käyttää. Vesiliuosten varastointi toteutetaan yleisimmin maavaraisilla patoaltailla. Vesijakeen laadun perusteella valitaan patorakenteen tiiveys: mikäli vesijae sisältää ympäristölle haitallisia komponentteja, patorakenteen ei tulisi päästää lävitseen vettä.

Padot voidaan jakaa rakenteensa mukaisesti homogeenisiin maapatoihin ja vyöhykepatoihin (Opasnet 2012). Homogeenisissa maapadoissa koko rakennemateriaali on veden läpäisyominaisuuksiltaan tasalaatuista, kun taas vyöhykepadossa käytetään veden läpäisevyydeltään erilaisia rakennemateriaaleja (Opasnet 2012). Vyöhykepadon patopenkereen rakenteen osat on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2 Vyöhykepadon patopenkeren rakenne (Opasnet 2012).

Tiivisrakenne voi olla esimerkiksi jokin tai jotkin seuraavista:

- Savi- ja bentoniittikerros
- Turvekerros
- Bitumikermi
- Muovikalvo

Padon eroosion estämiseksi patoihin rakennetaan suodatinkerros, jonka avulla vedet (esim. sadevedet) pyritään ohjaamaan hallitusti pois patorakenteista. Suodatinkerroksen vedenjohtavuudelle suhteessa mitoitusvirtaamaan on annettu ohjearvoja. Mikäli suodatinkerrosta ei ole, vesien virtaus patorakenteissa voi johtaa eroosioon ja padon heikkenemiseen. Veden laadusta riippuen suotovedet johdetaan luontoon tai palautetaan keruujan kautta padon tiivispuolelle.

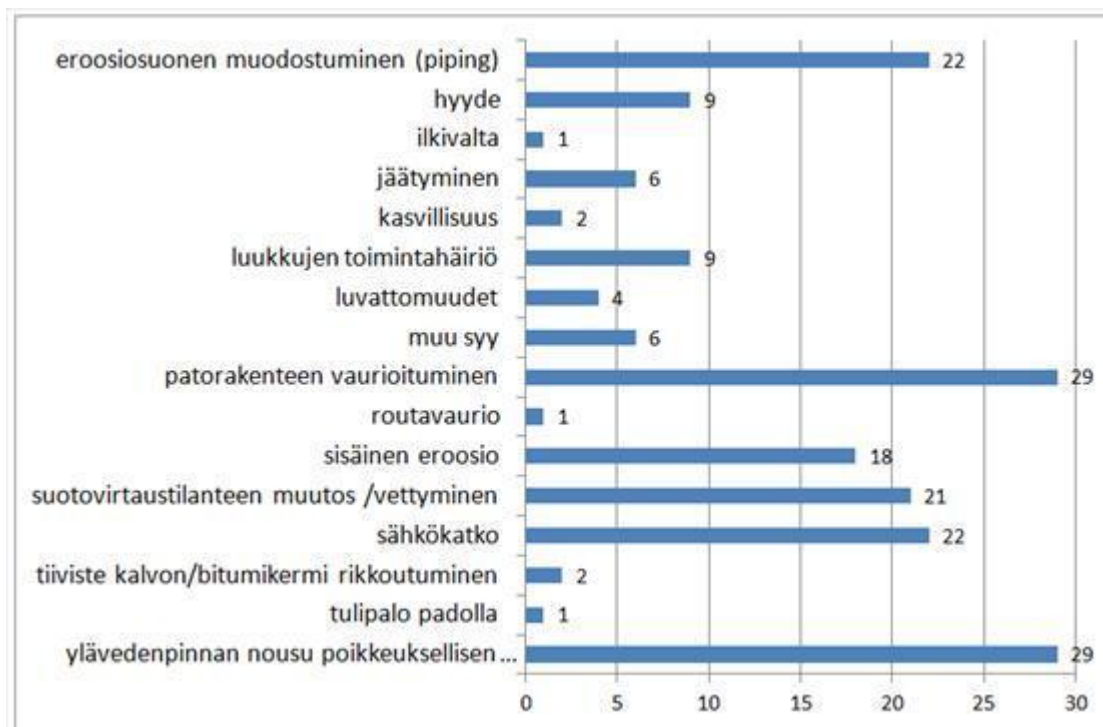
Padon suunnitteluvaiheessa tulee esittää padon suotovirtaus-, vakavuus- sekä painumalaskelmat. Padon vakavuus lasketaan vähintäänkin rakennusaikaisessa tilanteessa, normaalissa käyttötilanteessa sekä nopean vedenpinnan laskun jälkeen. Padon kuivavara määritetään suurimman aallonkorkeuden ja routamitoituksen mukaan. (Opasnet 2012) Lisäksi padon rakentamisessa tulee huomioida paikalliset, maaperään ja pohjavesiesiintymiin liittyvät olosuhteet.

Padon turvalliseen käyttämiseen liittyvät näkökulmat, kuten huoltotiet ja kulkureitit padolle, on huomioitava suunnitteluvaiheessa.

3.1.1. Poikkeustilanteiden määrittely

Padot luokitellaan patoturvallisuuslain mukaan kolmeen luokkaan niiden aiheuttaman vahingonvaaran suuruuden mukaisesti. Luokittelua ei tarvitse tehdä, jos patoturvallisuusviranomaisen katsoo, että padosta ei aiheudu vaaraa. (PTL 2009/494).

Luokiteltujen patojen häiriötilanteita seurataan Patoturvallisuusviranomaisen toimesta. Kuvassa 3 on esitetty vuosina 1984-2014 tapahtuneet, viranomaisten tietoon tulleiden häiriötilanteiden syyt. Kuva sisältää myös muut kuin kaivospadot, ja osa poikkeamatyypeistä, kuten hyyde, ei koske kaivosten vesivarastopatoja. (Ympäristöhallinto, 2015) Kaivospatoihin liittyvien poikkeamatilanteiden osuus kaikista ilmoitetuista patopoikkeamista on 32 % (Regina, T. 2015).



Kuva 3 Viranomaisen tietoon tulleiden häiriötilanteiden syyt (1984-2014) (Ympäristöhallinto 2015).

Patoturvallisuusoppaassa on kuvattu patojen häiriötilanteita seuraavasti (Torkkel, M. 2012):

- ylävedenpinnan nousu huomattavasti normaalin HW-tason yläpuolelle, minkä syynä voi olla juoksutusrakenteiden vika, poikkeuksellinen tulva, jää- tai hyydepato tai rannikolla myrskyn aiheuttama meritulva
- luukkujen tai niitä ohjaavan automatiikan käyttöhäiriö tai sähkökatkos padolla
- patorakenteen vaurioituminen, mikä johtaa pikakorjaukseen tai tarkentaviin tutkimuksiin
- ulkoinen eroosio, sisäinen eroosio, äkilliset muutokset suotovesien määrässä tai laadussa (väri, sameus)
- kuivatusjärjestelmän tukkeutuminen tai routavaurio
- tulipalo tai ilkivalta padolla

Seuraavassa on kuvattu kolme esimerkkitapausta Suomessa sijaitsevien kaivospatojen poikkeamatilanteista:

Vuosi 2015: Agnico Eagle, Kittilän kultakaivos, rikastushiekka-altaan vuoto (Lapin ELY-keskus 2015)

TILANTEEN KUVAUS: Kittilän kaivoksella havaittiin vuoto NP3-rikastushiekka-altaan kaaripadon sisäpuolelta altaan vieressä kulkevan huoltotien länsipuolella kulkevaan ojaan. Ojasta vesi kulkeutui pintavalutuskenttä 4:lle, mitä kautta kaivosyhtiö purkaa NP3-altaan vettä ympäristöluvan mukaisesti Seurujokeen. Vuotoveden virtaama oli alkuvaiheessa 340 m³/h. NP3-altaan vedenpinta oli vuodon havaintohetkellä normaalia korkeammalla tasolla, sillä kaivoksen muita vesivarastoaltaita ei voitu niiden täyttöasteen, valmiusasteen tai tuotannon vuoksi käyttää. Lisäksi ympäristöluva rajoittaa Seurujokeen poistettavan veden virtaamaa.

VUODON SYY: Vuoto on aiheutunut altaan pohjassa olevan bitumigeomembraanin rikkoutumisesta (viisi noin peukalonpään kokoista reikää), jotka havaittiin sukeltamalla. Syitä bitumigeomembraanin rikkoutumille ei ole kyetty selvittämään.

TOIMENPITEET: Takaisinpumppaus altaaseen, moreenin ajaminen ojaan, jotta vesi ei pääsisi kulkeutumaan ojasta ympäristöön. NP3-altaan pinnankorkeutta laskettiin siirtämällä osa vesistä rakenteilla olevaan prosessivesialtaaseen ja lisäämällä juoksutusta Seurujokeen.

VUODON SEURAUKSET: Seurujokeen päätyi lisäjuoksutuksen vuoksi suurempi sulfaatti-, antimoni-, typpi-, arseeni- ja nikkelikuormitus. Kuormitukselle ei kuitenkaan ole asetettu ympäristöluparajoja. Sen sijaan ympäristöluva määrittää pitoisuus- ja virtaamarajat. Pois juoksutettu vesi oli koostumukseltaan ympäristöluvan mukaista. Ylimääräisen juoksutuksen määrä oli yhteensä 270 000 m³ ja juoksutusvirtaama 400 m³/h.

Vuosi 2014: Kaivospato, 2-luokka (Ympäristöhallinto 2015)

TILANTEEN KUVAUS: Liettynyttä vettä havaittiin keräilyjossa.

VUODON SYY: eroosiosuoni.

TOIMENPITEET: Purkuputki suunnattiin uudelleen. Myöhempänä ajankohtana pato kaivettiin auki korjaustarpeiden arvioimiseksi.

VUODON SEURAUKSET: Ei tiedossa.

Vuodet 2012 ja 2013: Talvivaara Sotkamo Oy, Talvivaaran kaivos, kipsisakka-altaan vuoto (Onnettomuustutkintakeskus 2014)

TILANTEEN KUVAUS: Kipsisakka-altaan lohkolla 1 havaittiin vuoto normaalin tarkkailukierroksen yhteydessä. Kipsisakka-altaalle oli varastoituna viisi miljoonaa kuutiota metallipitoista lietettä ja vesiliuosta. Vuotovirtaama oli alkuvaiheessa 5000 - 10 000 m³/h etelän suuntaan ja 1000 m³/h pohjoisen suuntaan. Vuotovedestä osa pääsi pohjoisen suunnassa ympäristöön, kunnes se ohjattiin pohjoisen suunnan turvapadolle. Myös etelän suunnassa vuotovesi ohjattiin turvapadoille. Kipsisakka-altaalle oli vuodon sattua varastoitu paitsi neutralointilietteitä, myös raffinaattiliuosta. Metallipitoisen raffinaattiliuoksen varastoinnin syy kipsisakka-altaalle oli vesivarastojen ja kaivoksen täytyminen ylijäämävesillä, joista jälkimmäinen esti malmintuotannon.

VUODON SYY: Altaan kalvon alainen rakenne ei kestänyt kipsisakan päälle varastoidun veden hydrostaattista painetta, vaan HDPE-kalvo repeytyi ja altaaseen varastoitu vesi pääsi vuotamaan kipsisakka-altaasta.

VÄLITTÖMÄT TOIMENPITEET: Kipsisakka-altaalle tulevan lietteen ja liuoksen pumppaus keskeytettiin pysäyttämällä Metallien talteenottolaitoksen tuotanto. Vuotoveden palautuspumppaukset kipsisakka-altaalle aloitettiin. Vuotavan lohkon vesiliuosta pumpattiin muihin vesivarastoaltaisiin ja louhokseen. Vuotovettä neutraloitiin kalkkimaidolla, natriumhydroksidilla, poltetulla kalkilla ja kalkkivilietteellä, jotta sen metallipitoisuuksia ja happamuutta saatiin pienennettyä. Vuoto pyrittiin tukkimaan. Rakennettiin Kortelammen pato, jonka avulla saatiin estettyä noin 1 miljoonan kuution vesimäärän pääsy ympäristöön.

VUODON SEURAUKSET: Ympäristöön pääsi 240 000 m³ vesiliuosta, joka sisälsi liuenneita epäpuhtauksia: nikkeliä, sinkkiä, urania, kobolttia, kadmiumia, mangaania, rautaa, alumiinia.

Poikkeamatilanteet:

Tässä kappaleessa esitetyn aineiston perusteella on taulukoihin 1 ja 2 kuvattu kaivospatojen tavanomaisia ja harvinaisempia poikkeamatilanteita. Aineiston perusteella melko tavanomaisia poikkeamatilanteita, joiden aiheuttajana ei ole materiaalin rikkoontuminen, ovat padon veden pinnan nousu poikkeuksellisen korkealle tai ylivuotoputken tasolle. Lyhytkestoisia padon vedenpinnan korkeita arvoja ei todennäköisesti ilmoiteta viranomaisille, ja on oletettavaa, että ajoittainen korkea vedenpinta on kaivospadoillakin melko yleinen poikkeustilanne.

Taulukko 1 Kaivospatojen käyttöön liittyviä, tavanomaisia poikkeamatilanteita.

Poikkeama	Selite
Padon vedenpinnan nousu HW-tason yläpuolelle	<p>Padon vedenpinnan pitkäkestoinen nousu yli HW-tason (high water) voi vaurioittaa padon rakenteita.</p> <p>Syitä korkeaan veden pintaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Poistopumppauksen pysähtyminen • Poistoputken tukkeutuminen • Poikkeukselliset sateet • Poikkeuksellisen suuri tulovirtaama
Padon ylivuoto	<p>Padon ylivuoto tarkoittaa vedenpinnan tason nousua niin korkealle, että varastoitua vesiliuosta valuu ylivuotoputken tai -kynnyksen kautta padon ulkopuolelle. Usein tilanne johtaa siihen, että vesiliuosta joutuu myös ympäristöön.</p> <p>Padon ylivuoto voi myös vahingoittaa patorakenteita.</p> <p>Padon ylivuodon syyt ovat samankaltaisia kuin Padon vedenpinnan nousu HW-tason yläpuolelle.</p>

Edellä esitetyistä tilastotiedoista voidaan havaita, että patorakenteen eroosio on mahdollinen, mutta ei kovin todennäköinen poikkeustilanne. Eroosio voi johtua esimerkiksi kalvon tai muun tiivisrakenteen rikkoontumisesta, joka yksistäänkin on poikkeustilanne. Suurimmat vaikutukset ympäristöön todennäköisesti liittyvät tilanteisiin, jossa padon läpi suotautuu merkittävä määrä liuosta, tai joissa patoseinäämä murtuu. Patoseinämän murtuminen taas voi olla seurausta padon sisäisestä tai ulkoisesta eroosiosta.

Taulukko 2 Kaivospatoihin liittyviä harvinaisempia poikkeamatilanteita.

Poikkeama	Selite
Kalvon tai muun tiivisrakenteen rikkoontuminen	<p>Kalvon tai tiivisrakenteen rikkoontuminen johtaa veden suotautumiseen padon kantavaan rakenteeseen, josta vesi voi edelleen kulkeutua ympäristöön.</p> <p>Kalvon tai tiivisrakenteen rikkoontumisesta johtuva vuoto voi myös johtaa kantavan rakenteen heikkenemiseen, jos vuotovesivirta kuljettaa hienoainesta pois kantavasta kerroksesta.</p> <p>Syitä:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mekaaninen rikkoontuminen • Laatuvirhe tiivisrakenteessa (esim. huonolaatuinen sauma tai liian ohut kerros) • Jääkerroksen liikkuminen
Padon eroosio	<p>Padon eroosiolla tarkoitetaan jonkin padon osan kulumista. Pitkään jatkuessaan kulumisen voi johtaa kantavan rakenteen murtumiseen.</p> <p>Syitä kulumiseen voivat olla:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ulkoinen eroosio, esim. tulva-ajan virtaamat patopenkereen ulkopuolella • Altaan sisäinen eroosio, esim. johtuen tulovirtaaman poikkeuksellisesta suuruudesta ja siitä, että tuloputki on suunnattu patorakennetta vasten • Routavaurio • Väärä suunnittelutapa padon suojarakeinteiden osalta, esim. puutteellinen tukipenkereiden suojaus • Padon vedenpinnan pitkäaikainen nousu yli HW-tason (ks. edellinen taulukko)
Kantavan rakenteen murtuminen	<p>Syitä:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kalvon tai muun tiivisrakenteen rikkoontuminen (ks. edellinen kohta) • Liian korkea vedenpinta, joka vahingoittaa patorakennetta • Poikkeuksellisen suuri virtaama • Routavaurio • Padon eroosio <p><i>Kantavan rakenteen murtuminen johtaa altaan nopeaan tyhjenemiseen.</i></p>

3.1.2. Riskin arviointi

Kappaleessa 3.1.1 tunnistettujen riskien todennäköisyys ja seurausten vakavuus on arvioitu liitteenä 1 olevassa taulukossa 1. Arvioinnin kohteeksi on valittu tavanomaista rikastushiekkalietettä ja -vettä sisältävä pato, joka ei sisällä poikkeuksellisen korkeita haitta-ainepitoisuuksia. Pato on rakenteeltaan vyöhykepato, jossa on tiivisrakente. Todennäköisyyden arvioinnissa on taustatietona käytetty kappaleessa 3.1.1 esitettyjä tilastotietoja. Vaikutusten arviointi on tehty perustuen edellä esitettyihin, toteutuneisiin esimerkkitapauksiin sekä Teollisuustaito Oy:n kokemukseen aihepiiristä.

Arvioinnin perusteella ympäristölle aiheutuu kohtalainen riski seuraavista tilanteista:

- Padon ylivuoto
- Kalvon tai muun tiivisrakenteen rikkoontuminen
- Padon eroosio
- Kantavan rakenteen murtuminen

Arvioinnin perusteella ympäristölle aiheutuu vähäinen riski aiheutuu seuraavasta tilanteesta:

- Padon vedenpinnan nousu HW-tason yläpuolelle

On hyvä huomioida, että padotun veden laadulla on suuri merkitys vuodon tai ylivuodon seurausten merkittävyydelle. Hyvin myrkyllisiä vesijakeita ei luonnollisesti tulekaan varastoida rakenteeltaan tavanomaisissa kaivospadoissa. Myrkyllisten vesijakeiden varastointi tulee mahdollisuuksien mukaan toteuttaa säiliössä tai sellaisissa padoissa, joihin vuotovesien keruu on rakennettu suoraan osaksi rakennetta - esimerkiksi sisällyttämällä padon tiivisrakenteeseen kaksi vettä läpäisemätöntä kalvokerrosta.

Kvantitatiivinen riskinarvio ympäristövesiin kulkeutuvasta vuotovesimäärästä on hyvin tapauskohtainen. Kuten kappaleessa 3.1.1 on kuvattu, vuotoveden virtaama voi vaihdella parista sadasta kuutiosta muutamaan tuhanteen kuution tunnissa. Kaikki vuodot todennäköisesti alkavat vielä pienemmällä virtaamalla. Toisaalta kaikki vuotovedet eivät päädy suoraan ympäristön vesiin, vaan useimmiten niistä pääosa saadaan kerättyä talteen tai käsiteltyä ennen luontoon johtamista. Jonkinlaista suuruusluokkaa vuotomäärälle voidaan arvioida seuraavan esimerkkitapauksen kautta:

- Kyseessä on kaivospato, joka tarkastetaan kerran vuorossa tapahtuvalla tarkastuskierroksella. Kierroksella havainnoidaan suotovesiä, vuotovesiä, pumppujen toimintaa ja tulevien ja lähtevien putkien asentoa.
- Tarkasteltavalla padolla ei ole automaattista pinnanmittausta, mikä on tavanomainen tilanne kaivospadoilla. Maavaraiseen, lietettä sisältävään ja ulkona sijaitsevaan altaaseen on joissain tapauksissa vaikea asentaa luotettavasti toimivaa pinnanmittausta. Lisäksi padolla ei ole sellaisia pumppauksia, joiden muutoksista voisi päätellä padon vuotavan.
- Vuoroväli on tyypillisesti 8 h.
- Vuodon alkaessa heti edellisen tarkastuskierroksen jälkeen on mahdollista, että vuotovettä pääsee padon ulkopuolelle koko vuoron ajan.
- Esimerkinomaisella virtaamalla 500 m³/h tämä tarkoittaa 4000 m³ vuotovesimäärää.
- Vuodon tukkiminen tai padon pinnan alentaminen niin, että vuoto loppuu, voi viedä tunneista vuorokausiin. Näin pitkällä aikavälillä ehditään normaalisti käynnistää poikkeustilanteen toimenpiteet (ks. kappale 3.1.3), jolloin kaikki vuotava vesi ei päädy ympäristöön.

3.1.3. Riskien ennaltaehkäisy ja varautuminen poikkeustilanteisiin

Poikkeustilanteiden ennaltaehkäisy:

Liitteen 1 taulukossa 1 on esitetty myös toimenpiteitä, joilla poikkeamatilanteiden todennäköisyyttä voidaan vähentää. Toimenpiteet voidaan jaotella esimerkiksi seuraavasti:

- Padon rakenteen oikea suunnittelu, mitoitus ja rakennustyön valvonta
- Oikeat operointimenetelmät, kuten tulovesiputken oikea sijoitus, vedenpinnan pitäminen oikealla tasolla ja terävien esineiden hallittu käsittely altailla
- Prosessiautomaatio ja -instrumentaatio, kuten suotovesien laadun automaattinen tarkkailu ja poisto-, tulovesi- ja suotovesipumppausten reaaliaikainen tarkkailu
- Tarkkailukierrokset ja näytteenotto

Padon käyttötarkkailuvelvoite ja -ratkaisut

Patoturvallisuuslain mukaan padoilla tulee suorittaa jatkuvaa tarkkailua hyväksytyyn tarkkailuohjelman mukaisesti. Lisäksi pato on pidettävä kunnossa ja turvallisena. Laki velvoittaa myös määräaikaisiin viranomaistarkastuksiin.

Padon tarkkailu on usein järjestetty tarkastuskierrosten avulla. Tarkastuskierrokset voivat sisältää esimerkiksi seuraavia toimenpiteitä:

- havainnoidaan patopenkan kuntoa; näkykö suotovirtaamia tai sortumia
- tarkastetaan suotovesien keruuojien vesimäärä ja suotoveden palautuspumppujen käyntiaste (jos pumppujen käyntitietoja ei nähdä valvomosta)
- otetaan suotovesistä näyte tai näytteitä, joista mitataan kenttämittarilla pH ja sähkönjohtokyky
- otetaan suotovesistä näyte tai näytteitä, joista analysoidaan laboratoriossa olennaiset parametrit
- havainnoidaan ja mitataan veden pinnan korkeus padolla
- tarkastetaan tulevien putkien sijainti; putkesta tuleva vesi- tai lietevirta ei saa kuluttaa patopenkkaa
- tarkastetaan, että huoltotiet ja kulkureitit ovat turvallisessa kunnossa

Patojen tarkkailu on mahdollista järjestää myös osittain automaattiseksi. Tarkkailujärjestelmä voi tällöin sisältää seuraavia ratkaisuja:

- Suotovesipumppujen käyntiasteen jatkuvatoiminen tarkkailu ja tiedonsiirto valvomoon
- Suotovesimäärien mittaaminen ja tiedonsiirto valvomoon
- Tulevien ja lähtevien pumppausten käyntiasteen ja pumppausvirtaaman jatkuvatoiminen tarkkailu ja tiedonsiirto valvomoon
- Suotavaan kerrokseen voidaan asentaa pohjavesiputkia, joiden kautta veden pintaa mitataan
- Padon vesitaseen tarkkailu automaatiojärjestelmään kerättävien virtaamatietojen avulla. Järjestelmän tulisi huomioida myös sadanta ja haihdunta.
- Suotovesien jatkuvatoimiset laatumittaukset ja tiedonsiirto valvomoon

Padon pinnankorkeuden jatkuvatoiminen mittaaminen ei ole vielä yleistynyt, sillä luotettavia mittausteknisiä ratkaisuja ei ole laajasti saatavilla. Lietteen kertyminen altaan pohjalle haittaa esimerkiksi painemittaukseen

perustuvia menetelmiä, ja kaivosten patojen sijaitseminen ulkona, missä häiriötekijöitä (kuten jäätä) on melko usein, häiritsee esimerkiksi pintatutkien toimintaa. Padon muodonmuutoksia on myös mahdollista tarkkailla geoteknisin menetelmin. Tämä tarkkailu ei kuitenkaan ole osa padon käyttötarkkailua, vaan yleensä se kuuluu harvemmin toistuvaan kunnontarkkailuun.

Poikkeustilanteisiin varautuminen:

Patoturvallisuuslaki- ja asetus eivät edellytä padon omistajia tekemään riskianalyysiä. Sen sijaan patoturvallisuuslaki edellyttää padosta aiheutuvan vahingonvaaran selostamista luvanhakuvaiheessa. 1-luokan padoille edellytetään lisäksi vahingonvaaraselvityksen ja padon turvallisuussuunnitelman tekemistä. 1-luokan pato on sellainen, joka onnettomuuden sattuessa aiheuttaa vaaran ihmishengelle ja terveydelle taikka huomattavan vaaran ympäristölle tai omaisuudelle (PTL 2009/494). Vahingonvaaraselvitystä voidaan edellyttää tehtäväksi myös padon oikean luokan määrittelyä varten. Patoturvallisuuslaki edellyttää myös padon omistajaa ryhtymään toimenpiteisiin, joilla pato-onnettomuutta ennaltaehkäistään ja joilla vaikutuksia vähennetään.

Patoturvallisuusasetuksen mukaan vahingonvaaraselvityksessä arvioidaan padotun aineen (veden) leviämisen seuraukset:

- 1) kuvataan veden tai muun padotun aineen leviäminen padon sortuessa kohdista, joissa sortumasta aiheutuu suurin vahingonvaara;
- 2) määritetään padon sortumisesta aiheutuvan tulvan suurin peittävyys (patosortuman tulvavaara);
- 3) selvitetään patosortuman tulvavaaran alueella olevat vahinkokohteet;
- 4) arvioidaan vahinkokohteille veden tai muun padotun aineen virtauksesta, syvyydestä tai aineen laadusta johtuen aiheutuva vahinko.

Jos padon luokan selvittämiseksi tai turvallisuussuunnitelman ja pelastustoimen suunnitelman laatimiseksi on tarpeen, tulva-aallon eteneminen on selvitettävä tarvittavin laskelmin esimerkiksi maastomallin avulla. (Torkkel, M. 2012)

Kaivospatojen tapauksessa tulee lisäksi selvittää haitallisten aineiden kulkeutuminen ja siitä aiheutuva haitta. (Torkkel, M. 2012)

Patojen poikkeamatilanteisiin liittyvät riskit näkyvät ympäristössä vuotovesinä. Siksi patojen poikkeamatilanteiden seurausten pienentämismenetelmät liittyvät näiden vesien keruuseen ja käsittelyyn:

- Varoaltaiden ja patopenkereiden rakentaminen padon ympärille niin, että tilavuus vastaa suurinta padossa varastoitavaa vesi- ja/tai lietemäärää
- Keruujien rakentaminen patopenkereiden ympärille ja palautusputkilinjojen rakentaminen
- Palautuspumppujen saatavuus kaivoksella; joko kiinteinä pumppuasennuksina tai siirrettävinä laitteina
- Vuotovesien käsittelyn suunnittelu: jos normaali vedenpuhdistamo ei kapasiteetin puolesta voi käsitellä poikkeavan suuria vesimääriä, tulee varautua paikallispuhdistuksen järjestämiseen
- Vuotokohdan paikantamiseen ja vuodon tukkimiseen liittyvät järjestelmät ja materiaalit

On hyvä huomioida, että patojen vuototilanteilla voi olla myös välillisiä vaikutuksia ympäristövesistöön. Vaikka vuotovettä ei pääsisikään kaivosalueen ulkopuolelle, on mahdollista, että käsitellyn poistoveden virtaamaa joudutaan kasvattamaan, koska vahingoittunutta patoa ei voida käyttää normaalisti.

Organisaation toiminta poikkeustilanteissa vaatii lisäksi toimintaohjeita, poikkeamatilanteissa toimimisen kouluttamista koko operatiiviselle henkilökunnalle sekä selkeää johtamista poikkeamatilanteessa.

Vuotojen havainnointijärjestelmät

Padon rakennusvaiheessa on mahdollista vaikuttaa vuodon paikantamiseen kuluvaan aikaan ja sen myötä vuotoveden määrään vuodon sattuessa.

- Suotovesirakenteiden suunnittelussa on joissain tapauksissa mahdollista vaikuttaa siihen, sekoittuvatko padon kaikki suotovedet, jolloin kontaminoituneen veden alkuperää on vaikea määrittää, vai onko suotovesien keruu osastoitu, jolloin paikantaminen onnistuu nopeammin.
- Patoon voidaan asentaa valokuitu, jolla on mahdollista havaita padon sisäisiä vuotoja, kun vuotoveden lämpötila poikkeaa ympäristön lämpötilasta.
- Lämpökameraa voidaan pyrkiä käyttämään silloin, kun vuodon lämpötila poikkeaa hyvin selvästi ympäristön lämpötilasta. Lämpökamera on käyttökelpoinen menetelmä lähinnä pienten, louhepenkaltaan ohuiden patojen vuotojen havaitsemisessa.
- Mikäli varastoitava vesi on puhdasta, voidaan käyttää merkkiainejärjestelyä. Järjestelyssä padon suotavaan kerrokseen syötetään kairattavan putken kautta suolaliuosta, jonka suotautumista padossa seurataan pohjavesiputkien veden johtavuutta mittaamalla.

3.2. Vesien siirto

Kaivoksen vesienhallinta edellyttää vesiliuosten siirron mahdollistavaa järjestelmää. Tämä järjestelmä koostuu tavallisesti putkistoista, kanaaleista, ojituksista sekä pumpuista. Putkistoihin ja veden pumppaukseen liittyy tyypillisesti myös erilaisia venttiilejä ja instrumentteja, joiden avulla voidaan tarkkailla veden laatua, valita oikea veden varastointi- tai käsittelypaikka ja säätää veden siirtovirtaamaa.

Vesiliuosten siirtäminen on normaali osa kaivosten vesienhallintaa, koska kaikkia toimintoja ei ole mahdollista sijoittaa samaan paikkaan, jossa vesivirta muodostuu, tai johon se luontaisesti kerääntyy. Esimerkiksi kaivokseen kertyvä vesi on siirrettävä vedenpuhdistamolle tai prosessivesialtaalle.

Toisaalta vesiliuosten siirtäminen tulee usein kyseeseen myös poikkeamatilanteiden toteutuessa - esimerkiksi patoaltaan vuodon tapauksessa tulee varastoitu vesi siirtää vuotavasta altaasta pois. Vesien siirtojärjestelmien suunnittelussa tulisikin huomioida nämä kaksi näkökulmaa, jotka voivat johtaa hyvinkin erisuuruisiin kapasiteettivaatimuksiin.

Kaivosvesien siirtolaitteiden valmistuksessa huomioidaan virtaamakapasiteetin ohella veden koostumus. Happamat vesijakeet edellyttävät rakennemateriaaleilta korroosionkestävyyttä. Hiiliteräkset tai rakenneteräkset eivät yleensä sovellu näille vesijakeille, vaan niiden sijasta valitaan pinnoitettuja rakenteita, haponkestävä teräslaatu tai muovi- tai komposiittimateriaali. Materiaalivaatimus koskee niin putkistoja, niiden osia, kuin pumppujakin. Puhtaiden ja käsiteltyjen vesijakeiden osalta myös hiiliteräkset ja rakenneteräkset voivat soveltua rakennemateriaaliksi.

3.2.1. Poikkeustilanteiden määrittely

Kaivosten vesien siirtoratkaisun valinta putkiston, kanaalin ja ojituksen välillä tehdään pääosin perustuen vesiliuoksen koostumukseen. Tässä selvityksessä kanaalilla tarkoitetaan maavaraista, kalvotettua kanaalia. Ympäristölle haitallisia yhdisteitä sisältävät liuokset siirretään yleensä putkistojen avulla. Mikäli tällaisten vesiliuosten virtaamat ovat hyvin suuria, voidaan joissain tapauksissa harkita kalvotettuja kanaaleja. Puhtaimpien vesien - esimerkiksi sadevesien ja käsiteltyjen jätevesien - siirto voi tapahtua myös ojitusten avulla.

Veden siirtoratkaisujen käyttöön liittyy erilaisia poikkeamatilanteita, jotka on taulukoissa 3 ja 4 jaoteltu todennäköisyytensä mukaan. Taulukkoon 3 on koottu putkistoihin, kanaaleihin ja ojituksiin liittyviä tavanomaisia poikkeamatilanteita ja taulukkoon 4 harvinaisempia poikkeamia. Seliteosassa on myös kuvattu poikkeamasta aiheutuvia välittömiä seurauksia.

Lisätietoja putkistoja - erityisesti kemikaaliputkistoja - koskevista vaaran lähteistä löytyy TUKES:n julkaiseman Kemikaaliputkistojen turvallisuusvaatimukset -oppaan liitteestä 1 (TUKES 2015).

Taulukko 3 Putkistojen, kanaalien ja ojien tavanomaisia poikkeamatilanteita.

Poikkeama	Selite
Putken tukkeentuminen	<ul style="list-style-type: none"> - Jos vesiliuos sisältää kiintoainetta, sitä voi kertyä ajan kuluessa putken pohjalle. - Jos vesiliuos sisältää yhdisteitä, joiden liukoisuus voi siirron aikana laskea, saostuminen voi tapahtua putken pinnoille. - Putken voi joutua jokin poikkeava esine, joka aiheuttaa tukkeutumisen. <p><i>Tukkeentuminen näkyy ensi vaiheessa virtaamakapasiteetin pienenemisenä ja pitkän ajan kuluessa virtauksen pysähtymisenä.</i></p>
Putken jäätyminen (ulkona sijaitsevat putkilinjat)	<ul style="list-style-type: none"> - Eristämättömien, vesiliuosten siirtoon tarkoitettujen putkien jäätyminen talvisaikaan, mikäli siirtonopeus on pieni ja/tai mikäli pumppaus on jaksottaista, ja putkeen jää jaksojen välissä vettä. <p><i>Tukkeentuminen näkyy ensi vaiheessa virtaamakapasiteetin pienenemisenä ja pitkän ajan kuluessa virtauksen pysähtymisenä. Jäätyminen voi johtaa putken rikkoontumiseen.</i></p>
Putken korroosio (metalliputket)	<ul style="list-style-type: none"> - Mikäli vesiliuos sisältää korrodoivia yhdisteitä, joita ei ole huomioitu metalliputken materiaalivalinnassa, putki voi ruostua. <p><i>Korroosio voi johtaa putken rikkoontumiseen.</i></p>
Putken kuluminen (muovi-, komposiitti-, ja pinnoitetut putket)	<ul style="list-style-type: none"> - Mikäli vesiliuos sisältää kiintoaineita, ne voivat ajan kuluessa kuluttaa putken pinnoitetta tai putkea. <p><i>Kuluminen voi johtaa putken rikkoontumiseen tai pinnoituksen tapauksessa siihen, että kantava materiaali korrodoituu.</i></p>
Kanaalin tukkeutuminen	<ul style="list-style-type: none"> - Kanaaliin voi joutua sinne kuulumattomia esineitä.
Kanaalin ylivuoto	<ul style="list-style-type: none"> - Liian suuri virtaama suhteessa kanaalin poikkileikkaukseen ja kallistukseen voi johtaa ylivuotoon. - Kanaalin tukkeutuminen voi aiheuttaa ylivuodon.
Ojan tukkeutuminen	<ul style="list-style-type: none"> - Oja voi tukkeutua vesiliuoksen sisältämästä kiintoaineksestä. - Ojaan voi joutua sinne kuulumattomia esineitä.
Ojan seinämien kuluminen	<ul style="list-style-type: none"> - Voimakas vesivirtaus kuluttaa ajan myötä ojan seinämiä.
Ojan ylivuoto	<ul style="list-style-type: none"> - Liian suuri virtaama suhteessa ojan poikkileikkaukseen ja kallistukseen voi johtaa ylivuotoon. - Ojan tukkeutuminen voi aiheuttaa ylivuodon.

Taulukko 4 Putkistojen, kanaalien ja ojien harvinaisempia poikkeamatilanteita.

Poikkeama	Selite
Putken rikkoontuminen	<p>- Putken rikkoontuminen johtaa yleensä vesiliuoksen vuotoon, ja vuotovesi päättyy joissakin tapauksissa maaperään.</p> <p>- Putken rikkoontumisen syitä voivat olla:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mekaaninen vaurio • Putken korrosio (virheellinen materiaalivalinta) • Putken jäätyminen
Kanaalin kalvotuksen rikkoontuminen	<p>- Kanaalin kalvotuksen rikkoontuminen johtaa yleensä siihen, että vesiliuosta pääsee imeytymään maaperään.</p> <p>- Kanaalin kalvotuksen rikkoontumisen syitä voivat olla:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mekaaninen vaurio • Kalvotuksen kuluminen • Kanaalin kantavan rakenteen rikkoontuminen (ks. seuraava kohta)
Kanaalin kantavan rakenteen rikkoontuminen	<p>- Kanaalin kantava rakenne tehdään maa-aineksesta. Jos kantava rakenne murtuu, yleensä myös kalvo rikkoontuu, jolloin vesiliuosta pääsee maaperään.</p> <p>- Rikkoontumisen syitä voivat olla:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mekaaninen vaurio • Kalvon rikkoontuminen ja sen myötä vesiliuoksen kuluttava vaikutus (ks. edellinen kohta)
Ojan seinämän murtuminen	<p>- Ojan seinämän murtuminen johtaa yleensä siihen, että vesiliuosta pääsee maaperään.</p> <p>- Murtumisen syitä voivat olla:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mekaaninen vaurio • Poikkeuksellisen suuri virtaama suhteessa rakenteen kestävyYTEEN

Vesiliuoksia pyritään mahdollisuuksien mukaan siirtämään painovoimaisesti kaivosalueen eri osien avulla. Käytännössä aina joudutaan kuitenkin joidenkin vesiliuosten siirtoon käyttämään pumppausratkaisua. Taulukkoon 5 on koottu pumppuihin liittyviä tavanomaisia ja harvinaisempia poikkeamatilanteita. Seliteosassa on myös kuvattu poikkeamasta aiheutuvia välittömiä seurauksia.

Taulukko 5 Pumppuihin liittyviä tavanomaisia ja harvinaisempia poikkeamatilanteita.

Poikkeama	Selite
Pumpun kulutusosan rikkoontuminen	- Pumput sisältävä kulutusosa, jotka tulee vaihtaa säännöllisesti. Jos vaihtoväli on liian pitkä, on todennäköistä, että kulutusosa rikkoontuu. Tavanomainen esimerkki on tiivisteen rikkoontuminen. <i>Kulutusosan rikkoontumisesta seuraa useimmiten vuoto ja joissain tapauksissa pumpun toiminnan keskeytyminen.</i>
Pumpun korrodoituminen	- Mikäli vesiliuos sisältää korrodoivia yhdisteitä, joita ei ole huomioitu metalliputken materiaalivalinnassa, pumppu voi ruostua. <i>Korroosio voi johtaa pumpun vuotoon ja pitkään jatkuessaan pumpun toiminnan keskeytymiseen.</i>
Pumpun kuluminen	- Mikäli vesiliuos sisältää kiintoaineita, ne voivat ajan kuluessa kuluttaa pumppua tai sen pinnoitetta. <i>Kuluminen voi johtaa pumpun rikkoontumiseen tai pinnoituksen tapauksessa siihen, että kantava materiaali korrodoituu. Ajan kuluessa seurauksena voi olla vuoto ja pumpun toiminnan keskeytyminen.</i>
Pumpun tukkeutuminen	- Pumppu voi tukkeutua vesiliuoksen kiintoaineen tai saostuvien yhdisteiden vaikutuksesta. <i>Tukkeutuminen yleensä johtaa pumpun toiminnan keskeytymiseen.</i>
Pumpun rikkoontuminen	- Pumpun rikkoontuminen on harvinaisempi poikkeustilanne, jonka syitä voivat olla mm. edellä kuvatut tavanomaisemmat poikkeustilanteet: <ul style="list-style-type: none"> • Mekaaninen vaurio • Korroosio (virheellinen materiaalivalinta) • Kuluminen <i>Pumpun rikkoontuminen johtaa usein vesiliuoksen vuotoon, ja vuotovesi voi joissain tapauksissa päätyä maaperään.</i>

3.2.2. Riskin arviointi

Kappaleessa 3.2.1 tunnistettujen riskien todennäköisyys ja seurausten vakavuus on arvioitu liitteenä 1 olevissa taulukoissa 2 (putkisto), 3 (kanaalit) ja 4 (ojitukset). Arvioinnin lähtökohdaksi on määritelty seuraavat, liuoskoostumusta koskevat oletukset:

- Putkistossa virtaa käsittelemätöntä prosessivettä
- Kanaalissa virtaa lievästi hapanta kaivosvettä
- Ojissa virtaa puhdasta tai puhdistettua vettä

Todennäköisyyden ja vaikutusten arviointi perustuu Teollisuustaito Oy:n kokemukseen aihepiiristä.

Arvioinnin perusteella ympäristölle aiheutuu kohtalainen riski seuraavista tilanteista:

- Putken rikkoontuminen
- Kanaalin ylivuoto

Muista poikkeamista aiheutuvat riskit ovat vähäisiä.

Pumppujen osalta riskin arviointi on esitetty liitteessä 1, taulukossa 5. Pumput on yleensä sijoitettu niin, että niiden vuodoista ei aiheudu suoraa ympäristöpäästön riskiä. Sijoitustapa johtuu siitä, että pumput laitteina tarvitsevat säännöllistä kunnossapitoa ja siitä, että niissä on yleensä tiettyjä kulutusosia, joiden vaihtaminen on osa tavanomaista huoltotoimintaa. Pumppujen poikkeamista aiheutuvien suorien ympäristöriskien on arvioitu olevan vähäisiä, kun kyseessä ovat kaivosvesien siirtoon tarkoitetut pumput.

3.2.3. Riskien ennaltaehkäisy ja varautuminen poikkeustilanteisiin

Kemikaaliputkistojen turvallisuusvaatimuksia koskevat mm. Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuudesta (VNa 2012/856) ja kemikaaliturvallisuuslaki (2005/390). Kaivoksen vesienhallintajärjestelmän putkistoja ei usein luokitella vaarallisia kemikaaleja sisältäviksi. Putkistoon liittyvien riskien hallinnassa voidaan kuitenkin hyvin soveltaa TUKES:n julkaiseman oppaan ”Kemikaaliputkistojen turvallisuusvaatimukset” ohjeistusta putkistoon liittyvien riskien hallinnasta. Oppaan mukaan tulisi soveltaa seuraavaa menettelyä:

(1) vaarojen poistaminen ja pienentäminen

(2) suojaustoimenpiteet niiden vaarojen osalta, joita ei voida poistaa ja

(3) laaditaan käyttäjälle asiakirjat jäljelle jäävistä vaaroista ja turvallisesta käytöstä (käyttöohjeet sekä tarkastus- ja huolto-ohjeet, merkinnät laitteisiin jne.).

Poikkeustilanteiden ennaltaehkäisy:

Liitteen 1 taulukossa 2 on esitetty putkiston poikkeamatilanteiden ennaltaehkäisyn menetelmiä. Menetelmät voidaan ryhmitellä seuraavasti:

- Suunnittelu ja valmistus:
 - Putkiston lujuuden oikea mitoittaminen ja korroosionkestävän materiaalin valitseminen
 - Putkiston sijoitussuunnittelu siten, että mekaaniset vauriot eivät ole mahdollisia
 - Putkiston rakenteen suunnittelu siten, että putkisto ei pääse jäätymään
 - Putkiston laadunvarmistus esimerkiksi saumojen kuvauksella, tiiveyskokeilla ja putkistovalmistajan laaduntarkkailujärjestelmällä
- Havainnointijärjestelmät:
 - Putkiston sijoittaminen niin, että vuodot on helppo havaita
 - Putkiston virtaus- ja painemittaukset, joiden avulla voidaan havaita suuret vuodot
 - Putkiston asentaminen kouruun, kanaaliin tai kaksoisputken käyttäminen, jolloin vuodot voidaan havaita keruujärjestelmän instrumentoinnin avulla
- Kunnan tarkkailu ja ennaltaehkäisevä kunnossapito:
 - Tarkastuskierrokset ja laitteiden kunnossapito

Liitteen 1 taulukoissa 3 ja 4 on esitetty ojiin ja kanaaleihin liittyviä menetelmiä, joilla poikkeustilanteiden todennäköisyyttä voidaan pienentää:

- Keskimääräistä suuremman virtaamapasiteetin (esimerkiksi rankkasateet, sulaminen) huomioiminen kanaalin ja ojan ylivuodon estämiseksi ja ojituksen rakenteen kestävyuden varmistamiseksi
- Kanaalin tai ojan merkitseminen tai suojaaminen niin, että rakennetta ei epähuomiossa vahingoiteta
- Säännöllinen kunnan tarkkailu ja vuotojen havainnointi

Pumppujen osalta on tärkeää

- Huomioida siirrettävän vesiliuoksen laatu laitevalinnoissa
- Huolehtia säännöllisestä kunnossapidosta
- Varustaa pumppu esimerkiksi paine-, virtaus- ja värinämittauksella, jolla oikeaa toimintaa voidaan reaaliaikaisesti seurata

Poikkeustilanteisiin varautuminen:

Tässä riskitarkastelussa on valittu lähtökohdaksi tilanne, jossa putkistossa virtaa koostumukseltaan ympäristölle haitallista vesiliuosta - esimerkiksi nikkeli- tai kupari- vesiliuosta. Vuotoveden pääsy ympäristöön tulisi siis estää vuototilanteen tapahduttua. Vuotojen keruujärjestelmä voi olla esimerkiksi:

- Kouru, kanaali tai kaksoisputki, joka ohjaa vuodon hallitusti turvalliseen keräilyaltaaseen tai -säiliöön
- Keruujärjestelmään asennetaan esimerkiksi veden laadun mittaus tai pinnanmittaus, jolla vuodot voidaan havaita mahdollisimman pian

Mikäli vuodon keruujärjestelmän rakentaminen ei ole mahdollista, onnettomuustilanteeseen pitää varautua muilla menetelmillä. Näitä ovat esimerkiksi

- Vuotojen keruu imuautolla, siirrettävillä pumpuilla ja maata poistamalla
- Vuotojen neutralointi vuotopaikalla

Vaikka siirtojärjestelmän viat eivät sinällään aiheuta suurimpia riskejä kaivoksen ympäristövesille, on hyvä huomioida, että poikkeamatilanteista voi aiheutua välillisiä seurauksia, kuten patojen ylivuotoja.

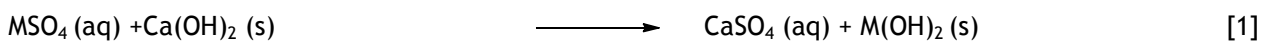
Pumppujen osalta tulee varmistua siitä, että kriittisissä paikoissa toimiville pumpuille on aina varaosia ja parhaassa tapauksessa myös kokonainen varalaitte saatavilla.

4. Kaivosten vesienkäsittelyprosessien riskit

Tässä kappaleessa tarkastellaan kahta vesienkäsittelyprosessia: kalkkimaitoneutralointia sulfaatinpoistotekniikkana ja adsorptiota nikkelinpoistotekniikkana. Kappale sisältää kuvauksen näiden menetelmien puhdistusmekanismista sekä riskien tunnistamis-, arviointi- ja hallintaosuuden.

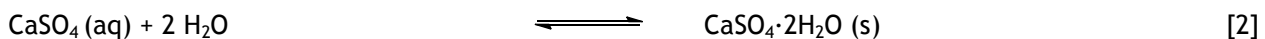
4.1. Sulfaatin poisto kalkkimaitoneutraloinnilla

Kalkkimaitoneutralointi on varsin yleinen kaivosvesien käsittelyprosessi, jota käytetään metallien ja sulfaatin poistamiseen. Kalkkimaito eli veteen sekoitettu kalsiumhydroksidi ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) nostaa veden pH:ta, mikä samalla johtaa metallihydroksidien saostumiseen.

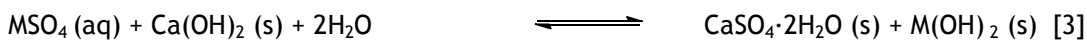


jossa M on jokin metalli, esimerkiksi Zn, Ni, Cu.

Kalkkimaitosaostuksella voidaan poistaa myös sulfaattia, joka saostuu vedestä kipsinä. Mikäli kipsin pitoisuus ylittää kemiallisen tasapainopitoisuuden, tapahtuu kipsin saostumisreaktio (reaktioyhtälö 2). Tässä selvityksessä tarkastellaan kalkkimaitosaostusta etenkin sulfaatinpoistomenetelmänä.

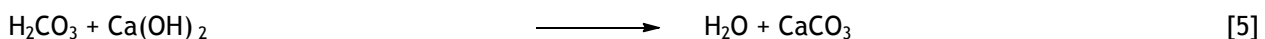
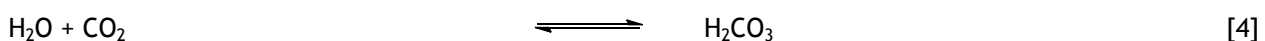


Lähtöliuoksen ollessa kipsikylläinen kirjoitetaan metallin saostusreaktio ja kipsin saostuminen usein samaan reaktioyhtälöön:



Kalsiumsulfaatti eli kipsi on jonkin verran veteen liukoinen suola. Sen liukoisuus veteen on noin 2 g/l, josta kalsiumia on 0,59 g/l ja sulfaattia 1,41 g/l (Adams 2003). Tähän puhdistustulokseen siis päästään, mikäli liuoksessa ei ole muita metallisulfaatteja.

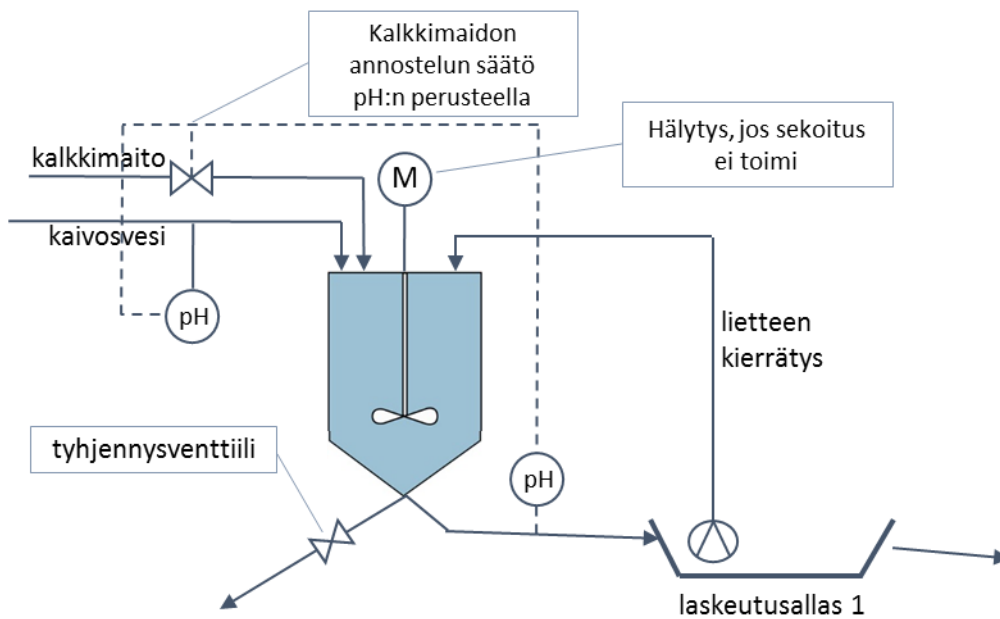
Yleensä kipsisaostuksen pH nostetaan emäksiselle tasolle. Tällöin monet raskasmetallit saostuvat (reaktioyhtälö 3:n mukaan) samanaikaisesti kipsin kanssa. Eräiden metallien sulfaatit ovat kuitenkin myös korkeassa pH:ssa liukoisia, eivätkä saostu, vaan jäävät sulfaattimuodossa liuokseen. Tällaisia metalleja ovat mm. natrium ja kalium. Tyypillisesti myös magnesiumia ja mangaania jää liuokseen, vaikka pH nostettaisiin arvoon 10, joka usein on maksimi-pH luontoon laskettaville vesille. Magnesium ja mangaani on mahdollista saostaa korkeammassa pH:ssa ja käsitellä sen jälkeen liuos karbonoimalla, jolloin pH saadaan laskettua matalammaksi (reaktioyhtälöt 4 ja 5). Natrium- tai kaliumsulfaattia ei saada poistettua tällä menetelmällä.



Juuri kalkkimaitosaostuksen sulfaatinpoisto-ominaisuuksien vuoksi se on lipeää eli natriumhydroksidia suositeltavampi saostuskemikaali. Lipeäsaostuksessa sulfaatti sitoutuu erittäin liukoiseen natriumiin, ja päätyy siten vesistöön. Kalsiumiin sitoutuneena niukkaliukoisena kipsinä sulfaattia saadaan saostettua vedestä. Kalsiumin saostuessa kipsinä liuoksen sulfaattimäärä ja -pitoisuus laskevat, jos vesiliuoksen kalsiumsulfaattipitoisuus olisi ilman saostumista suurempi kuin teoreettinen liukoisuus.

Kalkkimaitosaostuksen toteuttaminen

Kalkkimaitosaostus toteutetaan yleensä saostusreaktorissa (Kuva 4), josta neutralointiliete ohjataan neste-kiintoaine-erotukseen. Kalkkimaitosaostuksen toiminnan kannalta saostumisytimien eli siemenkiteiden kierrättäminen saostusreaktoriin on tärkeä osa prosessia. Kalkkimaidon valmistus- ja annostelulaitteiden kokoonpano riippuu siitä, käytetäänkö kemikaalina poltettua kalkkia vai kuivasammutettua kalkkia. Laitteisto sisältää vähimmillään sekoitetun kalkkimaitosailiön ja annostelupumpun. Kalkkimaitosaostusprosessissa on tukkeumien estämiseksi oltava kupera- tai kartiopohjaiset säiliöt, tehokas sekoitus, jatkuva virtaus sekä mahdollisimman lyhyet putkistolinjat, joissa vältetään virtausvastuksia (esim. jyrkät 90°:een kulmat).



Kuva 4. Kalkkimaitosaostuksen toteuttaminen.

Sulfaatinpoistotehon maksimoimiseksi on huomioitava useampi eri tekijä:

Kalkkineutraloidun veden sulfaattipitoisuuden minimiä määrittävät kemiallisten saostumisreaktioiden etenemisasteet, jotka voidaan arvioida liukoisuustulon perusteella. Mikäli prosessiolosuhteet eivät ole optimaaliset, sulfaattipitoisuus voi jäädä paljon korkeammaksi kuin mitä teoreettinen laskelma osoittaa. Tähän kappaleeseen on koottu tietoja prosessiolosuhteista, joilla sulfaatin pitoisuus saadaan mahdollisimman pieneksi:

- Varmistetaan **riittävä reaktioaika** saostusreaktorissa. Mikäli kipsin saostumisreaktio ei ehdi saavuttaa kemiallista tasapainotilaa reaktorissa, on mahdollista, että liuos jää kipsin suhteen ylikylläiseksi ja saostumista tapahtuu ei-toivotuissa laitteissa, kuten putkistossa tai laskeutusaltaissa. Reaktioajan on oltava riittävä myös niille metalleille, joita käsiteltävästä vedestä halutaan saostaa hydroksideina. Metallien jälkisaostuminen johtaa veden pH:n laskuun laskeutusaltaassa, mikä puolestaan voi aiheuttaa korkeammassa pH:ssa saostuvien metallien pitoisuuden nousua takaisinliukenemisen vuoksi. Yleensä kalkkimaitoneutraloinnille käytetään 30 min - 1 h viivettä mitoituserusteena.
- Varmistetaan **riittävä sekoitus** kipsisaostuksessa. Mikäli kalkkimaito ei sekoitu tasaisesti käsiteltävään veteen, veden puhdistustulos jää huonoksi ja kemikaalia saatetaan annostella riittämätön määrä tai ylimäärä. Riittävä sekoitus aikaansaadaan yleensä sekoittimella. Lisänä voidaan käyttää säiliön reunalle kiinnitettyjä virtaushaittoja. Sekoitusta voidaan parantaa myös kierrättämällä reaktoriin kertaalleen saostettua lietettä.
- Varmistetaan, että **reaktorissa on saostumisytimiä** joiden pinnalle kipsin saostuminen voi tapahtua. Mikäli reaktorissa ei ole saostumisytimiä, liuos jää monesti kipsin suhteen ylikylläiseksi. Ylikylläisyys purkautuu helposti laitteiden ja putkistojen pinnoille aiheuttaen laitteiden tukkeutumista.
- Varmistetaan, että **saostus-pH on mahdollisimman korkea**, ympäristöluaparaja-arvot huomioiden. Näin minimoidaan korkeassa pH:ssa saostuvien mangaanin ja magnesiumin sekä näitä vastaavien sulfaattien pitoisuus neutraloidussa liuoksessa. pH-arvoa säädetään kalkkimäärällä ja pH-säädön tulee perustua online-mittaukseen. pH-mittari sijoitetaan ainakin reaktorin jälkeiseen linjaan, mutta mielellään myös syöttölinjaan, jolloin äkilliset muutokset syöttöveden laadussa voidaan ennakoida (Kuva 4).

4.1.1. Poikkeustilanteiden määrittely

Kalkkimaitosaostuksen poikkeustilanteita ja niiden taustaa on kuvattu taulukossa 6.

Taulukko 6. Kalkkimaitosaostusprosessin poikkeustilanteet

Syy	Selite
Prosessin toimintaan liittyvät tilanteet	
Ongelmia kalkkimaidon syötössä	- Kalkkimaidon syöttö voi häiriintyä eri prosessilaitteiden tukkeutumisen tai rikkoutumisen vuoksi. Tällöin metallien ja sulfaatin saostumista ei tapahdu.
Syöteveden korkea Na- tai K-pitoisuus	- Jos puhdistettavassa vedessä on korkeita pitoisuuksia natriumia tai kaliumia, sulfaatti on sitoutunut niihin, eikä saostu kipsinä.
Epäonnistunut neste-kiintoaine-erotus	- Jos saostuksen jälkeinen neste-kiintoaine-erotusprosessi (yleensä laskeutus) ei toimi, kiintoainetta eli sakkaa ja sen mukana haitta-aineita päätyy puhdistettuun veteen.
Ylikylläinen liuos	- Jos liuos on kipsin suhteen ylikylläinen, sulfaatin ja kalsiumin pitoisuudet ovat korkeammat kuin mitä liukoisuuskäyrä kipsille osoittaa, ja korkeammat, kuin mitä kalkkimaitoneutraloinnille yleensä asetetaan tavoitteeksi. - Ylikylläisessä liuoksessa sulfaatin pitoisuus on korkeampi kuin mitä kipsin liukoisuus osoittaa. - Ylikylläisyys purkautuu aina jossain vaiheessa, ja silloin kipsiä voi saostua odottamattomissa paikoissa.
Laitteiston rikkoontumiseen ja vikatilanteisiin liittyvät tilanteet	
Laitteiston rikkoontuminen	- Laitteiston eri osat voivat rikkoontua, esimerkiksi: <ul style="list-style-type: none"> • Pumpun rikkoontuminen (tiivisteen, pumpun, moottorin vaurio) • Putken rikkoontuminen (mekaaninen vaurio, korrosio) • Sekoittimen häiriöt • Venttiilin rikkoontuminen
Laitteiston tukkeentuminen	- Kalkkimaitosaostuksessa laitteisto voi tukkeentua kalkkimaidon kiintoainepitoisuuden ja kipsin nukkaliukoisuuden vuoksi.
Tarkkailu (jatkovatoimisen mittauksen häiriöt)	- Jatkovatoimisen mittauksen häiriö (etenkin pH-mittaus). Tämä vaikuttaa myös prosessin säätöön, etenkin jos se on automatisoitu toimimaan mittausdatan perusteella.
Tarkkailu (virheet näytteenotossa, analyysissä)	- Kalkkimaitosaostusprosessin tarkkailu myös näytteenottoon perustuen on tärkeää jatkovatoimisen tarkkailun (esim. pH) lisäksi. Näytteenotossa ja näytteiden analysoinnissa voi tapahtua virheitä.

4.1.2. Riskin arviointi

Kappaleessa 4.1.1 tunnistettujen riskien todennäköisyys ja seurausten vakavuus on arvioitu liitteen 2 taulukossa 6 (kalkkimaitosaostus). Todennäköisyyden ja vaikutusten arviointi perustuu Teollisuustaito Oy:n kokemukseen aihepiiristä.

Samassa taulukossa on esitetty toimenpiteitä poikkeaman todennäköisyyden tai vakavuuden pienentämiseksi. Huomioitavaa on, että liitteen 1 riskinarviointitaulukoissa 1-5 (padot, putkistot, pumpput, kanaalit ja ojat) toimenpiteitä on ehdotettu vain riskin todennäköisyyden pienentämiseksi. Kalkkimaitosaostuksessa riskin todennäköisyyden ja seurausten pienentämiseen vaikuttavat osaltaan samat menetelmät, kuten prosessiautomaatio ja online-mittaukset.

Riskinarvioinnin perusteella kalkkimaitosaostusprosessin kohtalaiset riskit liittyvät seuraaviin poikkeamatilanteisiin:

- Ongelmat kalkkimaidon syötössä
- Neste-kiintoaine-erotuksen epäonnistuminen
- Jatkuvat toimisen mittauksen häiriöt

Muut kalkkimaitosaostusprosessin riskit arvioitiin vähäisiksi.

Sulfaatinpoiston osalta riskiksi arvioitiin myös puhdistettavan veden korkeat natrium- tai kaliumpitoisuudet. Tällöin sulfaatti ei saostu kipsinä vaan päätyy poisjohdettavaan veteen. Riskin vakavuus arvioitiin kuitenkin vähäiseksi, koska sulfaatin haittavaikutukset luonnolle tai ihmisen terveydelle esimerkiksi nikkeliin verrattuna ovat pienemmät. Sen sijaan vastaavien prosessiriskien (ongelmat kalkkimaidon syötössä ja epäonnistunut neste-kiintoaine-erotus) vakavuus arvioitiin haitalliseksi, koska näissä poikkeustilanteissa ympäristöön pääsisi myös raskasmetalleja.

Laitteistoon liittyvät riskit jaettiin kahteen osaan: laitteiston rikkoontuminen ja laitteiston tukkeentuminen. Näistä jälkimmäinen on kalkkimaitosaostuksessa hyvin mahdollinen riski kalkkimaidon kiintoainepitoisuudesta ja kipsin niukkaliukoisuudesta johtuen. Sen vakavuus on kuitenkin vähäinen, koska prosessi yleensä vain pysähtyy. Laitteiston rikkoontuminen kalkkimaitosaostuksessa on epätodennäköistä, koska prosessi on tunnettua tekniikkaa. Laiterikko voi kuitenkin välillisesti aiheuttaa haitallisia seurauksia koko kaivoksen vesienhallinnalle.

Kvantitatiivinen riskinarvio siitä, miten prosessin poikkeama vaikuttaa ympäristövesiin kohdistuvaan kuormitukseen, on hyvin tapauskohtainen. Esimerkiksi kipsin ylikylläisyyden vaikutusta sulfaattikuormitukseen voidaan arvioida seuraavan tapauksen avulla:

- Neutraloitavan kaivosveden virtaama on 500 m³/h
- Neutralointireaktorin jälkeen on laskeutusallas, mutta ei puhtaan veden varastoallasta
- Prosessista otetaan näytteitä kerran vuorossa eli 8 h välein ja analyysin valmistuminen kestää näytteenkuljetusmatkat huomioiden 1 h
- Normaalisti neutraloitu kaivosvesi sisältää 2,5 g/l sulfaattia, josta 1,41 g/l on kalsiumin vastaioneina ja loput 1,09 g/l on natriumin vastaioneina
- Oletetaan tilanne, jossa ylikylläisyys muodostuu 2 h edellisen näytteenoton jälkeen. Tällöin ylikylläisyystilanne on voinut kestää 7 h ennen kuin se havaitaan laboratorioanalyysissä. Oletetaan

lisäksi, että ylikylläisyyttä vähentävät toimet kestävät yhtä kauan kuin tilanteen muodostuminen eli 2 h. Tällöin poikkeaman kokonaiskesto on 9 h, minä aikana vettä käsitellään 4500 m³.

- Ylikylläisessä liuksessa kalsiumin pitoisuus voi nousta 0,7 g/l:ssa, jolloin kalsiumia vastaava sulfaattipitoisuus on 1,68 g/l. Tällöin ylikylläisyydestä johtuva sulfaatin lisäkuormitus on 0,27 g/l ja 1200 kg, mikä vastaa noin 11 % lisäystä normaalitilanteeseen.

4.1.3. Riskien ennaltaehkäisy ja varautuminen poikkeustilanteisiin

Poikkeustilanteiden ennaltaehkäisy:

Liitteen 2 taulukossa 6 on esitetty kalkkimaitosaostusprosessin poikkeamatilanteiden ennaltaehkäisyn ja seurausten pienentämisen menetelmiä.

Keskeistä on havaita mahdollinen häiriö mahdollisimman pian. Tällöin prosessin häiriötilanteen kesto on mahdollisimman lyhyt ja siitä seuraava haitta mahdollisimman pieni. Esimerkiksi mitä nopeammin havaitaan ongelmat kalkkimaidon syötössä, sitä nopeammin päästään korjaamaan tilanne ja sitä pienemmiksi haitat jäävät. Tästä syystä prosessi kannattaa automatisoida. Silloin prosessia säädetään automaattisesti mittausdataan perustuen ja mahdolliset häiriöt nähdään valvomossa joko välittöminä hälytyksinä toimimattomuudesta ja vähittäisinä muutoksina normaalitilanteeseen.

Kalkkimaitosaostusprosessin poikkeamatilanteiden riskin pienentämismenetelmät voi jaotella seuraavasti:

- Prosessin suunnittelu, ajo ja mitoitus:
 - Hyvä suunnittelu
 - Oikeat materiaalivalinnat
 - Prosessin oikeaoppinen ajotapa ja laitteiden ennakkoahoito
- Tarkkailu:
 - Jatkuvat toimiset mittaukset
 - Näytteenotto ja analysointi laadunvarmistukseksi
 - Silmämääräinen prosessin tarkkailu
- Prosessiautomaatio:
 - Prosessin automaattinen säätö mittausdatan perusteella
 - Automaattiset hälytykset
 - Laitteiden toiminnan automaattinen seuraaminen (esim. vähittäinen paineenlasku voi kertoa putkikirkosta)

Putkistojen ja pumppujen poikkeustilanteiden ennaltaehkäisystä on tarkemmin kappaleessa 3.2.3.

Sulfaatin analysointimenetelmät

Kalkkimaitoneutraloinnissa etenkin poistoveden sulfaattipitoisuuden analysointi on tärkeä osa poikkeamatilanteiden havainnointia. Sulfaattia voidaan analysoida esimerkiksi seuraavilla menetelmillä:

- XRF (röntgenfluoresenssi)
- ICP (induktiivisesti kytketty plasma-optinen emissiospektrometri)

Näistä analyysimenetelmistä XRF-analyysi on nopeampi. Prosessin ohjauksen ja häiriötilanteiden havaitsemisen kannalta analyysituloksen nopea valmistuminen voi olla merkittävä seikka. Toisaalta silloin, kun analyysipiste sijaitsee kaukana analysaattorista, näytteenottoon ja -kuljetukseen liittyvät viiveet ovat yleensä huomattavasti merkityksellisempiä kuin itse analyysiin kuluva aika.

Poikkeustilanteisiin varautuminen:

Poikkeustilanteisiin varautumisessa tärkeintä on hyvä prosessiautomaatio, jonka avulla estetään veden pääsy ympäristövesiin poikkeamatilanteissa. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että jos reaktorista lähtevässä lietteessä on liian matala pH, syöttöveden pumppaus neutralointireaktoriin loppuu automaattisesti.

Poikkeustilanteiden varalta on suositeltavaa rakentaa riittävän suuri puskuriallas, johon puhdistettavat vedet voidaan koota häiriötilanteiden aikana. Poikkeustilanteisiin kannattaa varautua myös rakentamalla riittävästi varastotilaa puhdistetulle vedelle. Väärän laatuinen vesi voidaan tarvittaessa ohjata puhdasvesialtaasta takaisin vedenkäsittelyyn. Varoallaskapasiteettien on oltava riittäviä (korkea virtaama, pitkä korjausaika, sadanta varoaltaaseen).

Jos puhdistamatonta, voimakkaasti haitta-ainepitoista vettä pääsee huomattavia määriä ympäristöön, voi kyseeseen tulla kalkin levittäminen suoraan luontoon metalleja saostamaan, tai vahingon jälkien korjaaminen esimerkiksi sopivalla järvenkunnostusmenetelmällä. Tämä on kuitenkin hyvin epätodennäköistä kalkkimaitosaostusprosessissa, jos prosessin ajo sekä tarkkailu hoidetaan asianmukaisesti.

Putkistojen ja pumppujen poikkeustilanteisiin varautumista on käsitelty kappaleessa 3.2.3.

4.2. Metallien (nikkelin) poisto adsorptiolla

Adsorptiossa atomi, ioni tai molekyyli kaasusta tai nesteestä kiinnittyy jonkin adsorbenttiin pintaan. Tunnetuin adsorbentti on aktiivihiihluodatin, jossa kaasusta tai nesteestä poistettavat haitta-aineet adsorboituvat aktiivihiihluon pintaan. Aktiivihiihluodatusta käytetään esimerkiksi vesilaitoksilla, jossa pintavedestä puhdistetaan talousvettä. Erilaisia adsorptiomateriaaleja on lukuisia, ja niiden ominaisuudet vaihtelevat. Kuhunkin vesienpuhdistusprosessiin tulee valita sopivin adsorbentti puhdistettavan veden haitta-ainepitoisuuksista sekä halutusta puhdistustuloksesta riippuen. Adsorptio voi soveltua esimerkiksi metallien poistamiseen kaivosvesistä (Turhanen et al. 2015).

Käytettäessä adsorptiota vesiliuoksen puhdistamiseen laiteratkaisuna voidaan käyttää jatkuvatoimista petiä tai kolonnia, jossa vesi ajetaan jatkuvatoimisesti adsorbenttikerroksen läpi, tai panostoimista prosessia, jossa adsorbentti sekoitetaan veteen ja erotetaan erillisessä altaassa tai suodattimessa. Teollisuussmittakaavassa jatkuvatoiminen prosessi on yleisin, koska sen käyttö on yksinkertaisempaa ja varmempaa. Peti- ja kolonniratkaisuja ja niihin liittyvää riskienhallintaa on tarkasteltu kappaleessa 4.2.4. Bisfosfonaattiadsorbenttien toimintaa on tutkittu panosprosessissa (Pehkonen et al. 2015, suullinen tiedonanto).

Kullakin adsorbentilla on tietty maksimikyky adsorboida eri haitta-aineita. Kun tämä kapasiteetti täyttyy, adsorptiota ei enää tapahdu. Adsorbenttien adsorbointikyky voidaan palauttaa regeneroimalla, eli liuottamalla haitta-aineet adsorbenttien pinnasta esimerkiksi vahvaan suola- tai rikkihappoon. Regenerointi on käytännössä ioninvaihtoprosessi, jossa hapon vetyioni vaihtaa paikkaa adsorbenttiin adsorboituneen haitta-aineen (esim. raskasmetalli) kanssa.

Adsorptio sopii sellaisiin vesienpuhdistusprosesseihin, joissa käsitellään suhteellisen laimeita liuoksia. Käsiteltävän liuoksen rauta- ja kiintoainepitoisuuksien tulee kuitenkin olla alhaisia, koska ne häiritsevät adsorptiota (Pehkonen et al. 2015, suullinen tiedonanto). Huomioitavaa on myös, että humushapot toimivat voimakkaina metallikompleksien muodostajina (Pehkonen et al. 2015, suullinen tiedonanto). Jos käsiteltävässä vedessä on humushappoja, voi se häiritä adsorptiota, mutta humushappojen kompleksinmuodostusaktiivisuus voi myös vähentää metallien haitallisia vaikutuksia vastaanottavassa vesistössä (Ryabova 2008 & Mantoura 1978).

Adsorptiokykyyn vaikuttaa valitun adsorbenttien lisäksi mm. puhdistettavan veden pH, lämpötila, liuoskoostumus sekä prosessin ohjaus. Adsorptiossa adsorbenttien vetyioni vaihtaa paikkaa metalli-ionin, esimerkiksi Cr^{3+} tai Ni^{2+} , kanssa. Koska kyseessä on nimenomaan vetyionin ioninvaihto, liuoksen pH:lla suuri merkitys. Alhaisessa pH:ssa liuoksessa on paljon vapaita vetyioneja. Tällöin ioninvaihtoa ei tapahdu, koska liuoksen vetyionikonsentraatio on jo suuri. Prosessia suunniteltaessa on tärkeää tutkia adsorbenttien adsorbointikyky pH:n funktiona poistettaville yhdisteille. Juuri adsorption vetyioninvaihto-ominaisuudesta johtuen liuoksen pH laskee adsorption aikana. Jos pH pääsee laskemaan liikaa, puhdistusteho voi heikentyä.

Adsorption osalta tarkasteltavaksi valittiin nikkeli, koska sillä tiedetään olevan ympäristöön ja terveyteen haitallisia vaikutuksia. Nikkeli adsorboituu bisfosfonaattiin pH:ssa 5-7, ja panosprosessina toteutettavan adsorption vaatima reaktioaika on noin 30 minuuttia. (Pehkonen et al. 2015, suullinen tiedonanto).

Adsorptioprosessin suunnittelun voi jakaa kolmeen vaiheeseen (LeVan & Carta 2007, 16 - 5-8):

1. Sorptiotasapainon määrittäminen
2. Prosessin tyyppi (kolonni, peti, panosprosessi)
3. Käytännön näkökohdat

Ensimmäisessä vaiheessa määritetään sorptiotasapaino, jonka perusteella pystytään laskemaan tarvittava adsorbenttien määrä. Tasapainoa kuvaa adsorptioisotermi, joka kuvaa yhteyden adsorboituneen epäpuhtauden määrän ja veden epäpuhtauspitoisuuden välillä tasapainotilassa. Esimerkiksi Freundlichin adsorptioisotermi:

$$w = kC^{1/n} \quad [2]$$

missä w = adsorboituneen epäpuhtauden määrä
 C = epäpuhtauden konsentraatio liuoksessa
 k, n = kokeellisia vakioita ($n > 1$) (Habashi 1999)

Toisessa vaiheessa määritellään prosessin tyyppi: kolonni, peti- tai panosprosessina sekoitus ja neste-kiintoaine-erotus.

Kolmannessa vaiheessa huomioidaan vielä useampi käytännön näkökohta. Esimerkiksi:

1. Kuinka regenerointi tapahtuu ja mistä tiedetään regeneroinnin onnistuneen
2. Mitä regenerointijäteneesteelle tehdään
3. Tarvitaanko puhdistettavalle vedelle jotain esikäsitelyä (esim. pH:n säätö tai suodattaminen)
4. Miten tarkkaillaan adsorptioprosessin toimivuutta
5. Millainen adsorbenttien koostumus on (granuli, liete) ja kuinka se vaikuttaa prosessin toimivuuteen ja työturvallisuuteen

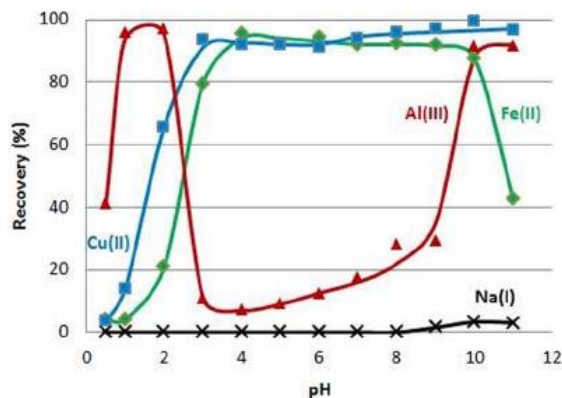
Seuraavassa on tarkasteltu adsorptioon liittyviä käytännön näkökohtia tarkemmin:

1. Regeneroinnin suunnittelussa keskeisintä on suunnitella, missä ja kuinka regenerointi tapahtuu. Panosprosessissa adsorbenttien regenerointiyksikkö on erillinen.

Regenerointineste on vahvaa happoa. Laboratoriokokein on hyvä selvittää tarvittava regenerointinesteen määrä suuntaa-antavasti. Regeneroinnin aikana pH:n muutokset voivat indikoida adsorbenttien reaktiivisuuden palautumista, mikäli adsorbentista vapautuva metallimäärä on riittävän suuri. Kun pH:n nousua ei enää tapahdu, adsorbentti on jälleen reaktiivinen. Regeneroinnin toteutuminen kannattaa varmistaa metallipitoisuusmittauksin.

Bisfosfonaatin regeneroitavuus on hyvä. Sen voi regeneroida jopa kaksikymmentä kertaa siten, että lopussa on jäljellä 70 % alkuperäisestä adsorptiokapasiteetista. Regeneroinnin jälkeen adsorbenttia ei tarvitse kuivata tai huuhdella vedellä, vaan se on heti valmista käytettäväksi. Regeneroinnissa on testattu etenkin 0,1 M suolahapolla, mutta myös rikkihappoa voidaan käyttää. Regeneroinnin etenemistä seurataan laskemalla poistettavan metallin massatasetta. Tällöin analysoidaan siis regenerointiliuoksen nikkelimäärä ja verrataan sitä puhdistettavasta vedestä poistettuun nikkelimäärään. (Pehkonen *et al.* 2015, suullinen tiedonanto)

- Regenerointijäteneste on hapanta ja raskasmetallipitoista. Kaivosvesien tapauksessa pyritään kierrättämään jäteneste takaisin prosessin, jos se vain on mahdollista. Toinen vaihtoehto on myydä nikkelpitoinen neste toiselle talteenottolaitokselle. Nikkelin tapauksessa myynti voi kannattaa jo viiden massaprosentin pitoisuuksilla (Pehkonen *et al.* 2015, suullinen tiedonanto). Jos prosessiin takaisin kierrättäminen ei ole mahdollista, regenerointineste neutraloidaan ja neutralointisakka erotetaan vesijakeesta, tai vaihtoehtoisesti regenerointineste toimitetaan jätteenkäsittelylaitokselle.
- Adsorptioon tulevan veden pH on säädettävä adsorbenttien ja adsorboitavien haitta-aineiden mukaan. Sopiva pH-alue määritetään laboratoriotestein. Esimerkiksi bisfosfonaatti-adsorbenttien adsorptio-ominaisuudet eri metalleille vaihtelevat huomattavasti pH:n funktiona (Kuva 5). pH:n osalta on huomioitava, että liuoksen pH laskee adsorption aikana.



Kuva 5. Adsorption tehokkuus pH:n funktiona eri metalleille (adsorbenttina bisfosfonaatti). (Turhanen *et al.* 2015)

Adsorptio ei siedä kiintoainetta, koska se täyttää adsorbenttien pinnan estäen haitta-aineiden pääsyn kontaktiin adsorbenttien kanssa. Jos käsiteltävät vedet ovat kovin kiintoainepitoisia, tulee kiintoainetta poistaa vedestä ennen adsorptioprosessia. Muita adsorptiota häiritseviä ioneja tai anioneita voi päätyä liuokseen pH:n säädössä. Regenerointi pääsääntöisesti poistaa adsorboituneet, ei-toivotut ionit.

Voimakas pH:n nousu, esim. emäksen (NaOH) yliannosteluna, ei kovin helposti häiritse adsorptiota. Jos pH nousee hyvin korkeaksi (11-12), bisfosfonaatit voivat alkaa liueta. (Pehkonen *et al.* 2015, suullinen tiedonanto)

- Adsorptioprosessin toimivuuden tarkkailussa kiinnitetään huomio siihen, ettei haitta-aineita pääse adsorptioprosessin läpi. Näin voi käydä, jos adsorbentti on saavuttanut kyllästymispisteensä eli ei enää pysty adsorboimaan haitta-aineita. Jatkuvatomimisella puhdistetun veden pH-mittauksella voidaan seurata adsorption toimivuutta, jos metallipitoisuuden muutos adsorptiossa on riittävän suuri.

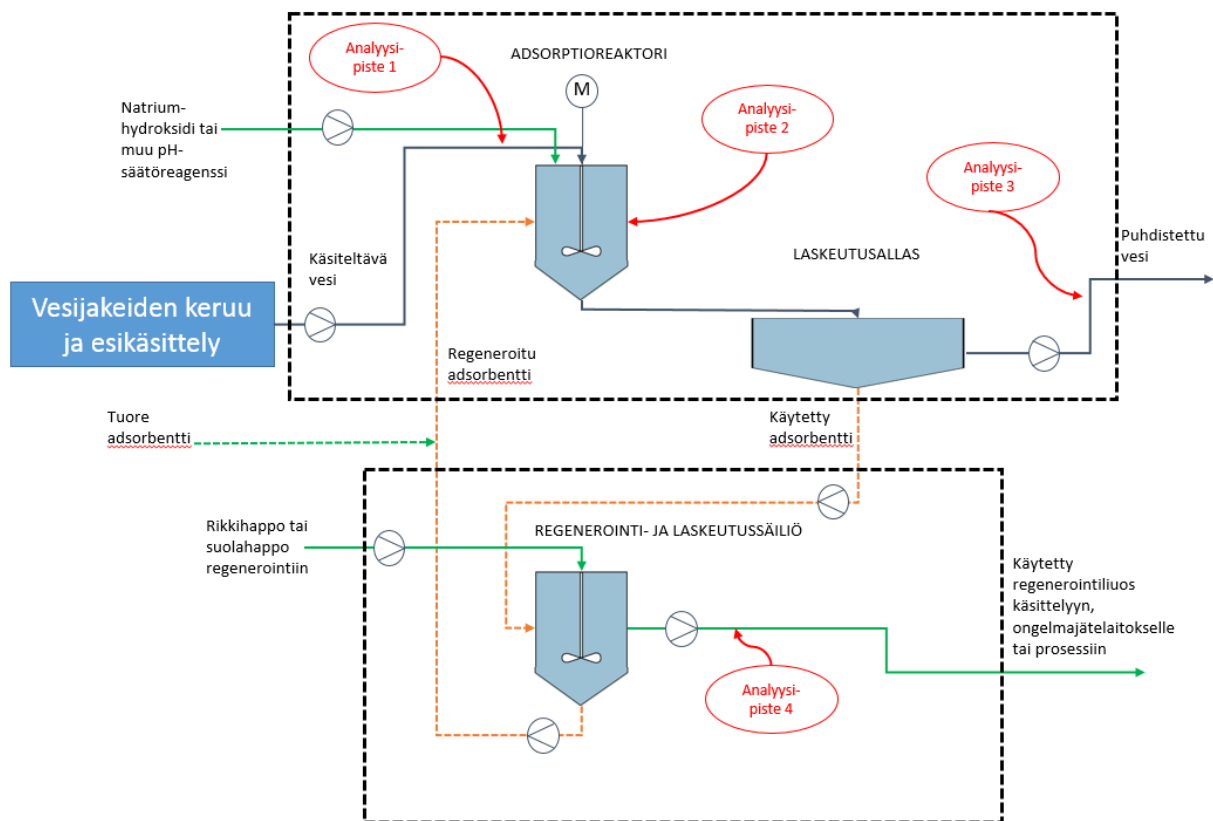
Prosessin käyttöönotossa ja muutosvaiheissa adsorptioon syötettävästä ja lähtevästä vedestä tehdään laboratorioanalyysyjä, joilla seurataan adsorption saantia. Adsorption toimivuus eri metalleille pH:n funktiona vaihtelee huomattavasti (Kuva 5).

- Adsorbenttien raekoko voi vaihdella hyvin hienosta (liete) suurehkoon (granuli). Etenkin hienojakoista adsorbenttia käsitellessä tulee työntekijöiden suojautua pölyltä. Raekoko vaikuttaa

adsorptiopotentiaaliin, koska adsorptio tapahtuu materiaalin pinnalle. Mitä suurempi pinta-ala, sitä enemmän materiaali voi adsorboida haitta-ainetta. Hienojakoinen adsorbentti ei kuitenkaan välttämättä prosessin toimivuuden kannalta ole paras. Se voi kulkeutua puhdistetun veden mukana seuraaviin prosessivaiheisiin tai ympäristövesiin, jos adsorptioprosessia seuraava neste-kiintoaine-erotus ei toimi oikealla tavalla.

Panostyyppisen prosessin mitoituksessa on huomioitava paitsi käsittelyvirtaama, myös viiveajat panos-, laskeutus-, ja regenerointivaiheissa. Panoksen suuruus ja laitemitoitus määräytyvät siis kokonaisviiveen perusteella.

Bisfosfonaatin tapauksessa adsorbentti on jauhemaista, hienojakoista ainetta. Partikkelit ovat suomumaisia, ja niiden partikkelikoko on 2-50 µm. Bisfosfonaatin ollessa adsorbenttina käytetään panosprosessia. Siinä bisfosfonaatti sekoitetaan veteen ja laskeutetaan. Laskeutuksen viive on noin 30 min. (Pehkonen *et al.* 2015, suullinen tiedonanto). Panosprosessina toteutettavan adsorption prosessikaavio voi olla esimerkiksi alla esitetyn mukainen (Kuva 6).



Kuva 6. Prosessikaavio adsorptiosta panosprosessina sisältäen adsorbentin regeneroinnin. Analyysipisteissä mitataan ainakin pH:ta ja metallipitoisuutta sekä virtamaa nikkelitaseen laskemiseksi. Lisäksi voidaan mitata sameutta kiintoaineen havaitsemiseksi.

4.2.1. Poikkeustilanteiden määrittely

Adsorption poikkeustilanteet tai riskit liittyvät etenkin siihen, että adsorbenttien adsorbenttisyys on jostain syystä heikentynyt. Alla olevassa taulukossa on kuvattu prosessin poikkeamatilanteita (Taulukko 7).

Taulukko 7. Adsorptioprosessiin liittyvät poikkeamatilanteet.

Syy	Selite
Prosessin toimintaan liittyvät tilanteet	
Epäoptimaalinen syöteliuoksen pH	- Puhdistettavan liuoksen pH tulee säätää adsorbenttien ominaisuuksien ja puhdistettavien haitta-aineiden mukaan. Jos pH:n säätöä ei tehdä, adsorptiota ei välttämättä tapahdu - pH-arvon voimakas poikkeama mitoitustarvosta voi vaikuttaa adsorption toimivuuteen
Kiintoainepitoinen syöteliuos	- Kiintoaine häiritsee adsorptioprosessia
Rautapitoinen syöteliuos	- Rauta voi häiritä adsorptioprosessia
Humuspitoinen syöteliuos	- Humushapot voivat häiritä adsorptioprosessia
Adsorptioprosessin pH:n häiriö	- Etenkin tilanteissa, joissa ei ole syöteveden pH:n säätöä, prosessi on häiriöaltis jos syöteveden pH:n vaihtelee. pH vaikuttaa eri metallien adsorboitumiseen.
Epäonnistunut regenerointi	- Regenerointi ei ole onnistunut ja vesi ei siksi puhdistu
Epäonnistunut neste-kiintoaine-erotus	- Neste-kiintoaine-erotuksen onnistuminen on keskeistä. Jos kiintoainetta ei saada erotettua, voi haitta-aineita voi päästä ympäristöön sen mukana.
Laitteiston rikkoontumiseen ja vikatilanteisiin liittyvät tilanteet	
Laitteiston rikkoontuminen	- Laitteiston eri osat voivat rikkoontua, esimerkiksi: <ul style="list-style-type: none"> • Pumpun rikkoontuminen • Putken rikkoontuminen (mekaaninen vaurio, korrosio) • Sekoittimen häiriöt • Venttiilin rikkoontuminen
Tarkkailu (jatkuvoimisen mittauksen häiriöt)	- Adsorptioprosessissa adsorption etenemisen tarkkailu on prosessin ajon kannalta keskeistä. Sen perusteella tiedetään milloin adsorbenttien adsorbenttisyys on loppumassa ja milloin regenerointi on riittävä. - Mahdolliset häiriöt jatkuvoimisen pH-mittauksessa voivat vaikuttaa prosessin ajoon (ei esim. huomata adsorptiokapasiteetin huononemista tai säädetään pH systemaattisesti väärin) ja sitä kautta haitta-ainepitoisen veden pääsyyn prosessin läpi.
Tarkkailu (virheet näytteenotossa, analyysissä)	- Adsorptioprosessin tarkkailu myös näytteenottoon perustuen on tärkeää jatkuvoimisen tarkkailun (esim. pH) lisäksi. Näytteenotossa ja näytteiden analysoinnissa voi tapahtua virheitä.

4.2.2. Riskin arviointi

Kappaleessa 4.2.1 tunnistettujen adsorptioprosessin poikkeamien todennäköisyys ja seurausten vakavuus on arvioitu liitteen 2 taulukossa 7 (adsorptio). Todennäköisyyden ja vaikutusten arviointi perustuu Teollisuustaito Oy:n kokemukseen vedenpuhdistustekniikoista sekä bisfosfonaattiadsorption ominaispiirteisiin liittyviin tausta-aineistoihin ja keskusteluihin Itä-Suomen Yliopiston edustajien kanssa.

Samassa taulukossa on esitetty toimenpiteitä poikkeaman todennäköisyyden tai vakavuuden pienentämiseksi. Huomioitavaa on, että liitteen 1 riskinarviointitaulukoissa 1-5 (padot, putkistot, pumpput, kanaalit ja ojat) toimenpiteitä on ehdotettu vain riskin todennäköisyyden pienentämiseksi. Samaten kuin kalkkimaitosaostuksessa, myös adsorptioprosessissa riskin todennäköisyyden ja seurausten pienentämiseen vaikuttavat osaltaan samat menetelmät, kuten prosessiautomaatio ja online-mittaukset.

Riskinarvioinnin perusteella adsorptioprosessiin liittyy seuraavia kohtalaisia riskejä:

- Syöteliuksen eli puhdistettavan veden ominaisuudet ja niiden ennakoimaton vaihtelu
- Neste-kiintoaine-erotuksen epäonnistuminen
- Jatkuvat toimisen mittauksen häiriöt

Syöteveden ominaisuudet vaikuttavat adsorptioprosessin toimintaan. Ennakoimaton laadun muuttuminen voi aiheuttaa prosessihäiriöitä, joiden aikana adsorptiota ei tapahdu ja haitta-ainepitoista vettä pääsee luontoon. Nikkelin ollessa kyseessä vaikutus voi olla pienilläkin virtaama-arvoilla merkittävä, sillä metalli on myrkyllinen eliöstölle. Vastaavasti epäonnistuneessa neste-kiintoaine-erotuksessa nikkelpitoista adsorbenttia voi päätyä luontoon.

Sen sijaan esimerkiksi regeneroinnin epäonnistuminen johtaa vain regenerointivälien tihentymiseen, minkä vuoksi riskin vakavuus arvioitiin vähäiseksi. Muita vähäiseksi arvioituja riskejä olivat humuspitoinen syötevesi, koska kaivosvesien humuspitoisuus on harvinaista. Laitteiston rikkoontumisen todennäköisyys arvioitiin pieneksi ja manuaalisen tarkkailun vakavuus vähäiseksi, koska se ei johda välittömiin vakaviin seurauksiin.

Seurausten merkittävyyden arvioinnissa on tarpeen huomioida päästön vastaanottavan vesistön ominaisuudet. Esimerkiksi järviveden humuspitoisuus voi vähentää nikkelin haittavaikutuksia, sillä humus sitoo nikkeliä kompleksimuodostustaipumuksensa vuoksi. (Ryabova 2008 & Mantoura 1978)

4.2.3. Riskien ennaltaehkäisy ja varautuminen poikkeustilanteisiin

Poikkeustilanteiden ennaltaehkäisy:

Liitteen 2 taulukossa 7 on esitetty adsorptioprosessin poikkeamatilanteiden ennaltaehkäisyn menetelmiä. Adsorptioprosessissa voidaan vaikuttaa sekä riskin todennäköisyyteen että sen vakavuuteen.

Keskeistä on havaita mahdollinen häiriö mahdollisimman pian. Tällöin adsorptioprosessin häiriötilanteen kesto on mahdollisimman lyhyt ja siitä seuraava haitta mahdollisimman pieni. Esimerkiksi mitä nopeammin havaitaan adsorptioprosessin epäoptimaalinen pH-arvo, sitä nopeammin päästään korjaamaan tilanne ja sitä vähemmän haitta-ainepitoista vettä on päässyt prosessin läpi. Tästä syystä prosessi kannattaa automatisoida. Silloin prosessia säädetään automaattisesti mittausdataan perustuen ja mahdolliset häiriöt nähdään valvomossa joko välittöminä hälytyksinä toimimattomuudesta ja vähittäisinä muutoksina normaalitilanteeseen.

Adsorptioprosessin poikkeamatilanteiden riskin pienentämismenetelmät voi jaotella seuraavasti:

- Prosessin suunnittelu ja mitoitus:
 - Adsorptioon optimiolosuhteiden määrittäminen
 - Prosessisuunnittelu optimiolosuhteiden mukaisesti (pH, reaktioaika, reaktioaltaan koko)
 - Syöteveden esikäsitteily, esimerkiksi pH:n säätö tai kiintoaineen poisto
 - Regeneroinnin optimointi ja mitoitus (regenerointiliuos, reaktioaika, adsorbenttien regenerointikapasiteetti)
 - Neste-kiintoaine-erotuksen optimointi ja mitoitus
- Tarkkailu:
 - Jatkuva toimiva pH-, sameus- / sähkönjohtokyky mittaus tai metallipitoisuuksien online-mittaus ja prosessin automaattinen säätö mittausdatan perusteella
 - Näytteenotto ja analysointi laadunvarmistukseksi
 - Silmämääräinen prosessin tarkkailu

Teollisuusmittakaavaisessa adsorptioprosessissa adsorptiolinjoja kannattaa aina rakentaa vähintään kaksi. Käytännössä panosprosessissa olisi siis kaksi erillistä panosprosessisäiliötä rinnakkain tai sarjassa. Näin vähintään yksi linja on aina käytössä, kun toisen adsorbenttia regeneroidaan tai prosessia muuten huolletaan. Se parantaa adsorptioprosessin käytettävyyttä sekä pienentää poikkeamatilanteiden riskiluokkaa.

Putkistojen ja pumppujen poikkeustilanteiden ennaltaehkäisy on käsitelty kappaleessa 3.2.3.

Nikkeliadsorptioprosessin metallianalytiikka

Nikkelinpoistoprosessin optimaalinen ajotapa edellyttää tietoa nikkelin pitoisuudesta syöteliuoksessa, poistettavassa vedessä, sekä käytetyssä regenerointiliuoksessa. Analytiikka voidaan toteuttaa esimerkiksi ICP- tai XRF-analyysinä, kun kyseessä on liukoisen metallin analysointi. Liukoiselle nikkelle on kehitetty myös online-analysaattoreita, joiden analyysimenetelmänä on käytetty voltamometristä menetelmää (Ferancova A *et al.* 2015).

Poikkeustilanteisiin varautuminen:

Poikkeustilanteisiin voidaan varautua tekemällä prosessiin kaksi rinnakkaista linjaa. Tällöin toista linjaa voi huoltaa toisen linjan toimiessa normaalisti.

Lisäksi tai vaihtoehtoisesti poikkeustilanteisiin kannattaa varautua rakentamalla riittävästi varastotilaa puhdistettavalle vedelle. Prosessihäiriön tilanteessa puhdistettavan veden voi ohjata varoaltaaseen häiriön korjaamisen ajaksi. Varoallaskapasiteetin on oltava riittävä (korkea virtaama, pitkä korjausaika, sadanta varoaltaaseen). Myös puhdistetulle vedelle voidaan rakentaa keräilyallas, josta on mahdollista palauttaa väärän laatuinen vesi takaisin puhdistusprosessiin.

Jos puhdistamatonta, nikkelpitoista vettä pääsee huomattavia määriä ympäristöön, voi kyseeseen tulla kalkin levittäminen suoraan luontoon metalleja saostamaan, tai kyseeseen voi tulla vahingon jälkien korjaaminen esimerkiksi sopivalla järvenkunnostusmenetelmällä. Tämä on kuitenkin hyvin epätodennäköistä adsorptioprosessissa, jos prosessin ajo ja tarkkailu perustuvat jatkuvatoimisiin online-mittauksiin.

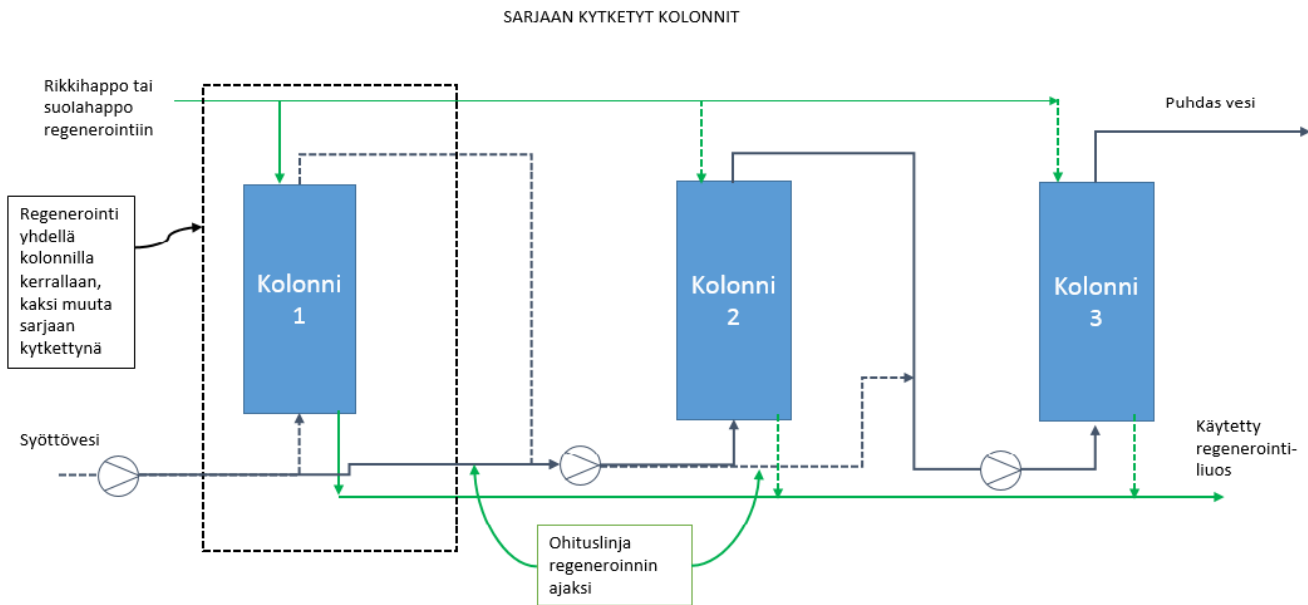
Putkistojen ja pumppujen poikkeustilanteisiin varautumista on käsitelty kappaleessa 3.2.3.

4.2.4. Peti- ja kolonniratkaisujen riskien hallinta

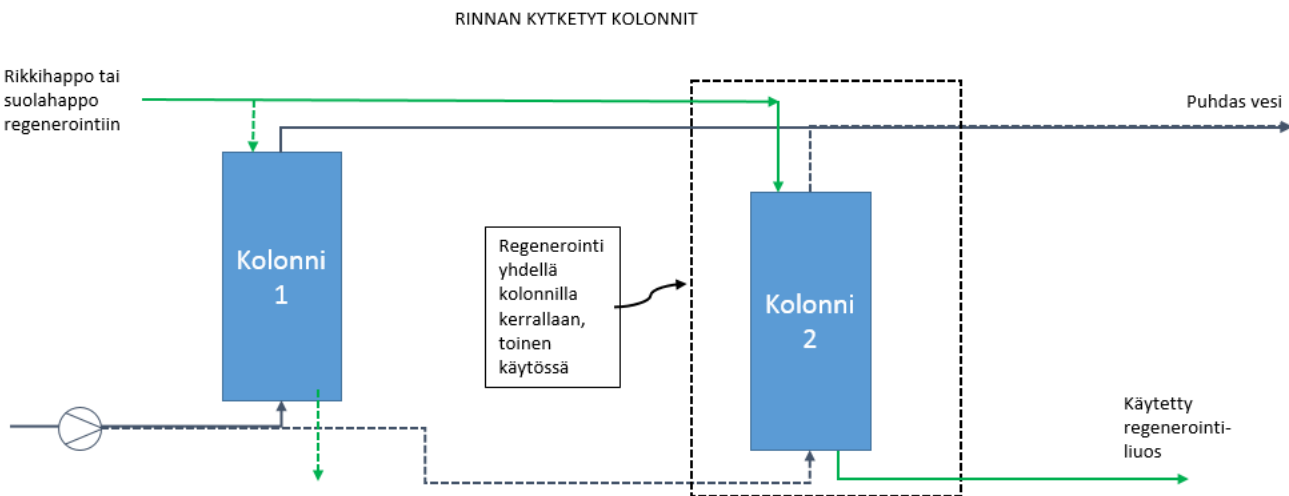
Laiteratkaisun kuvaus

Adsorptio voidaan toteuttaa myös jatkuvatoimisena prosessina, jossa laiteratkaisuna on joko peti- tai kolonnilaitteisto. Pedissä puhdistettava vesi syötetään pedin pinnalle, josta se painovoiman vaikutuksesta virtaa adsorboivan pedin läpi. Kolonni on suljettu säiliö, joka on täytetty granulimaisella adsorbentilla. Kolonnissa neste voidaan johtaa joko ylhäältä alaspäin painovoimaa hyödyntäen tai pumppaamalla alhaalta ylöspäin. Alhaalta ylöspäin pumpattaessa neste täyttää adsorboivan materiaalin huokokset hyvin, mutta prosessin käyttökustannukset ovat pumppaamisen vuoksi painovoimaista siirtoa suuremmat.

Adsorptiossa kolonneja, petejä tai panosprosessin sekoitussäiliöitä kannattaa yleensä olla useampi kuin yksi. Tämä parantaa prosessin toimintavarmuutta ja mahdollistaa regeneroinnin ilman prosessin keskeyttämistä. Lisäksi sarjaan asennetut kolonnit mahdollistavat sen, että koko adsorbenttikapasiteetti voidaan käyttää ennen regenerointia, sillä seuraava kolonni poistaa pienet metallijäämät liuksesta. Havainnekuviin on piirretty kolonnit sijoiteltuna sarjaan (Kuva 7) ja rinnan (Kuva 8).



Kuva 7. Sarjaan kytketyt kolonnit, joista 1. kolonne on regeneroinnissa.



Kuva 8. Rinnan kytketyt kolonnit, joista 2. kolonne on regeneroinnissa.

Regenerointijärjestely peti- ja kolonnityyppisessä ratkaisussa

Kun kyseessä on jatkuvatoiminen peti- tai kolonniprosessi, regenerointi suoritetaan usein paikallaan vastavirtahuuhteluna. Tämä on esitetty havainnekuissa, kun kolonnit on kytketty sarjaan (Kuva 7) tai rinnan (Kuva 8).

Peti- ja kolonnityyppisessä adsorptioprosessissa huomioitavia seikkoja

Etenkin petiratkaisussa vesi voi kanavoitua kulkemaan tiettyjä reittejä pitkin, jolloin koko adsorptiopinta-ala ei ole käytössä. On siis varmistettava, että vesi jakaantuu mahdollisimman tasaisesti adsorbentin huokosiin. Jos puhdistettava vesi lähtee kanavoitumaan, adsorptioteho heikkenee oleellisesti. Kanavoitumista voi estää sillä, että peti on kokonaisuudessaan veden peittämä sekä siten, että adsorbenttia sekoitetaan aika ajoin. Lisäksi kanavoitumista voidaan ennaltaehkäistä täyttämällä peti oikealla tavalla.

Peti- ja kolonniratkaisuun liittyvien riskien hallinta

Edellä kuvatut panostoimisten adsorptioprosessien häiriötilanteet koskevat monelta osin myös jatkuvatoimisia peti- ja kolonniratkaisuja. Koska jatkuvatoiminen prosessi ei sisällä neste-kiintoaine-erotusta, kyseiseen prosessivaiheeseen liittyvät toimintahäiriöt eivät liity tähän laiteratkaisuun. Toisaalta taas kanavoituminen on poikkeama, jota ei esiinny lietetyyppisessä adsorptioprosessissa.

Kanavoitumisen riskit

Kanavoitumisen seurauksena petiratkaisun adsorptiokapasiteetti jää pienemmäksi kuin mitoituksessa käytetty kapasiteetti. Kanavoitumisen riski on liitteen 1 taulukossa 6 arvioitu vähäiseksi, koska se vähentää adsorbentin adsorptiokapasiteettia ja siten lisää regenerointitarvetta. Kun prosessin tarkkailu on kunnossa, kanavoituminen ei lisää haitta-ainepitoisen veden pääsyä luontoon. Taulukossa on esitetty ennaltaehkäisykeinoja ja keinoja poikkeamatilanteen vaikutusten pienentämiseksi. On kuitenkin hyvä huomioida, että kanavoitumisen seurauksena haitta-aineita voi päästä prosessin läpi, jos mitoitus ja prosessin ajokin perustuvat pelkästään isotermin-laskelmaan, eikä prosessissa ole jatkuvatoimista tai säännöllistä tarkkailua.

5. Yhteenveto ja selvityksen hyödyntäminen jatkossa

Yhteenveto

Tässä selvityksessä on arvioitu kaivoksen vesienhallintajärjestelmän sekä kahden vedenpuhdistusprosessin toimintaan liittyviä riskejä, joista voi aiheutua haitallisia vaikutuksia ympäristövesiin. Selvityksessä on esitetty menetelmiä, joilla poikkeaman todennäköisyyttä voidaan pienentää sekä menetelmiä, joilla voidaan vähentää ympäristövesiin aiheutuvaa kuormitusta tilanteessa, jossa poikkeama toteutuu.

Poikkeaman todennäköisyys ja seurausten vaikutus on arvioitu kolmiportaisella asteikolla. Riskin suuruus määräytyy todennäköisyyden ja seurausten tulona. Selvityksessä on käytetty viisiportaista asteikkoa, jonka riskitasot ovat merkityksetön, vähäinen, kohtalainen, merkittävä ja sietämätön.

Kaivosten vesienhallintajärjestelmän osalta suurimmat riskit liittyvät vesiliuosten varastoinnissa käytettävien patorakenteiden vahingoittumisesta ja padon vedenpinnan ylivuodosta johtuviin vuototilanteisiin. Patorakenne voi vahingoittua monenlaisista syistä, ja yhden rakenneseosan - esimerkiksi tiivisrakenteen - rikkoutuminen voi johtaa laajempiin vahinkoihin - esimerkiksi padon kantavan rakenteen eroosioon. Perimmäistä syytä on usein vaikea selvittää. Patojen vuoto- ja ylivuotoriskit on arvioitu kohtalaisiksi, kun huomioidaan poikkeaman todennäköisyys ja sen seurausten suuruus.

Patovuotojen ennaltaehkäisyssä tärkeimmiksi menetelmiksi on tunnistettu laadukas suunnittelu- ja rakennustyö sekä prosessiautomaation ja mittauksen hyödyntäminen padon käyttötarkkailussa. Vuototilanteisiin voidaan varautua esimerkiksi varoaltaiden, palautuspumppausten sekä ylimääräisen vedenpuhdistuskapasiteetin avulla. Varotoimenpiteiden toteuttamisen jälkeen padon ylivuodon ja rakenteen vahingoittumisesta johtuvat vuotoriskit on arvioitu vähäiseksi. Kantavan rakenteen murtumisesta aiheutuu kuitenkin varotoimenpiteiden toteuttamisen jälkeenkin kohtalainen riski.

Myös veden siirtoratkaisuihin voi liittyä kohtalaisia riskejä, kun putkessa siirretään raskasmetallipitoista kaivosvettä, ja kun avokanaalissa siirretään lievästi hapanta kaivosvettä. Putken rikkoontumisesta voi aiheutua merkittävä vuoto, josta voi ympäristön vesille aiheutua kohtalainen riski, mikäli mitään varotoimenpiteitä ei ole käytössä. Putkiston vuototilanteita ennaltaehkäistään esimerkiksi oikealla rakennemateriaalilla ja hyvällä putkistosuunnittelulla. Vuodot voidaan havaita esimerkiksi asentamalla putki kanaaliin, joka varustetaan pintakytkimillä. Putkistokanaali toimii samalla vuotojen keruujärjestelmänä. Avokanaalin tapauksessa ylivuoto voi aiheutua esimerkiksi tilanteessa, jossa kanaaliin päätyy sinne kuulumatonta ainesta, tai tilanteessa, jossa kanaaliin ohjautuu ylimääräisiä vesiä. Ennaltaehkäisymenetelmiä ovat kanaalin merkitseminen ja suojaaminen. Parannustoimenpiteiden jälkeen sekä putkistovuodosta että avokanaalin ylivuodosta aiheutuva riskitaso laskee vähäiseksi.

Kaivosten vedenpuhdistusprosessien osalta on tarkasteltu sulfaatin poistamista kalkkimaitosaostuksella ja nikkelin poistamista bisfosfonaattiadsorbentin avulla. Kalkkimaitosaostuksen riskinarvioinnissa on lisäksi huomioitu se, että prosessissa poistetaan käytännössä aina myös raskasmetalleja.

Kalkkimaitosaostus on hyvin tunnettua tekniikkaa, minkä vuoksi siihen liittyvät poikkeamatilanteet tunnetaan varsin hyvin. Poikkeamatilanteista kalkkimaidon syötön häiriöiden ja neste-kiintoaine-erotuksen häiriöiden on arvioitu muodostavan kohtalaisen riskitason ympäristövesille. Kalkkimaidon syötön häiriöt voivat johtua esimerkiksi kiintoainepitoisen kemikaalin aiheuttamista putkistotukkeumista, kalkkimaidon syöttöpumpun häiriöistä tai kemikaalin manuaalisesta syötön säädöstä. Häiriöitä voidaan ennaltaehkäistä automatisoimalla kalkkimaidon annostelu ja suunnittelemalla kalkkimaidon annostelulaitteisto kiintoainepitoiselle lietteelle

soveltuvaksi. Neste-kiintoaine-erotuksessa häiriöitä voi aiheutua esimerkiksi kiintoainepartikkelien laskeutumisoimaisuuksien muuttuessa ja tilanteissa, joissa virtaama on poikkeuksellisen suuri. Häiriöitä voidaan ennaltaehkäistä oikealla prosessin ajotavalla ja automaattisilla sameusmittauksilla, jotka kytketään prosessiautomaatiojärjestelmään.

Adsorbenttien käyttö kaivosvesien puhdistuksessa on uutta tekniikkaa. Menetelmän käyttökokemuksia kaivosten olosuhteista on sen vuoksi rajallisesti, ja erityisesti poikkeamatilanteiden todennäköisyyden arviointi on siksi alustavalla tasolla. Tässä selvityksessä on tarkasteltu jauhemaisen bisfosfonaattiadsorbentin käyttöä nikkelin poistossa. Nikkeli on ympäristövesille myrkyllinen ja haitallinen metalli, minkä vuoksi poikkeamiin liittyvät seuraukset on arvioitu useimmiten haitallisiksi (taso 2 asteikolla 1-3).

Nikkeliadsorptioprosessin riskitaso on arvioitu kohtalaiseksi seuraavissa poikkeamatilanteissa: puhdistettavan veden laadun poikkeama suunnitteluarvosta (pH, kiintoaine, rauta), adsorptioprosessin pH-säädön häiriö, jauhemaisen adsorbentin neste-kiintoaine-erotuksen häiriö sekä jatkuvatoimimisen mittauksen systemaattinen vika, joka johtaa esimerkiksi pH-säädön häiriöön. Syöttöveden laadun vaihtelua ei kokonaan voida poistaa, mutta adsorptioprosessille aiheutuvia häiriöitä voidaan vähentää jatkuvatoimimisten mittausten avulla sekä järjestämällä vedelle asianmukainen esikäsitteily. pH-säätö voidaan automatisoida ja pH-mittaus kahdentaa. Jauhemaisen adsorbentin asemesta voidaan harkita peti- tai kolonniratkaisujen käyttöä sekä sameusmittauksia. Näiden toimenpiteiden jälkeen riskitaso laskee vähäiseksi.

Kaikissa vedenpuhdistusprosesseissa on suositeltavaa varautua poikkeamatilanteisiin puskurialtaiden avulla. Puskurialtaat voidaan rakentaa sekä syöttövedelle että puhdistetulle vedelle. Syöttövesiallas toimii vesien keruualtaan silloin, kun puhdistusprosessia huolletaan tai korjataan. Puhdistetun veden allas taas estää väärän laatuisen veden pääsyn ympäristöön silloin, kun prosessissa on ollut häiriötilanne.

Riskin arvioinnin luotettavuus ja tulosten hyödyntäminen

Tässä selvityksessä on pyritty tunnistamaan kaivosten vesienhallintaan liittyviä poikkeamatilanteita ja kahteen vesienkäsittelyprosessiin liittyviä poikkeamia, joista voi aiheutua haitallisia vaikutuksia ympäristövesiin. Selvityksessä on hyödynnetty patoturvallisuusviranomaiselle raportoituja poikkeamatilastoja, Teollisuustaito Oy:n aiempaa kokemusta kaivosten vesienhallinnasta ja -käsittelystä sekä Itä-Suomen Yliopiston asiantuntemusta vesienkäsittelytekniikoiden osalta.

Riskitarkastelu on kuitenkin tehty yleistasolla, eikä esimerkiksi poikkeamista aiheutuvien päästöjen vastaanottavien vesistöjen ominaisuuksia ole määritelty selvitystä varten. Siksi arvioituja riskitasoja ei voida suoraan soveltaa tiettyyn kohteeseen, vaan riskinarviointi tulee tehdä paikallinen tekninen toteutus ja ympäristövesien ominaisuudet huomioiden.

Riskinarvioinnin tuloksia voidaan hyödyntää Kaivosvesiverkosto-hankkeen useissa työpaketeissa:

- kaivosveden puhdistusprosessin poikkeamatilanteita voidaan vähentää oikealla prosessiteknisellä suunnittelulla (työpaketti 5)
- kaivosveden käsittelyprosessin automatisoinnissa ja vesienhallintajärjestelmien poikkeamatilanteiden havaitsemisessa keskeistä on luotettavan mittaustekniikan saatavuus (työpaketti 3)
- kaivosten vesienhallinta ja -käsittelyjärjestelmien poikkeamatilanteista aiheutuvien päästöjen merkittävyys voi toimia taustatietona kokonaisvaltaiselle riskinarvioinnille (työpaketti 5)

6. Lähdeluettelo

Adams, J. F., *et al.*, Gypsum fouling in neutralization reactors and aqueous streams, Hydrometallurgy 2003: Fifth International Conference in Honor of Professor Ian Ritchie - Volume 2: Electrometallurgy and Environmental Hydrometallurgy.

Crowl, D. *et al.* (2007) Process Safety. Teoksessa: Green D & Perry R (toim.), Perry's chemical engineers' handbook, 8. painos, New York, McGraw-Hill Companies, osa 23. ISBN 978-0-07-142294-9.

Ferancova, A. *et al.*, Electrochemical Monitoring of Nickel(II) in Mine Water, Mine Water and the Environment (2015) pp 1-6. Saatavissa: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10230-015-0357-1> [Viitattu 29.12.2015].

Finlex, Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta 390/2005 [Ajantasainen lainsäädäntö], 2005. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2005/20050390> [Viitattu 3.12.2015].

Finlex, Patoturvallisuuslaki 2009/494 [Ajantasainen lainsäädäntö], 2009. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2009/20090494> [Viitattu 3.12.2015].

Finlex, Työturvallisuuslaki 2002/738 [Ajantasainen lainsäädäntö], 2002. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20020738> [Viitattu 3.12.2015].

Finlex, Valtioneuvoston asetus patoturvallisuudesta 319/2010 [Ajantasainen lainsäädäntö]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20100319> [Viitattu 4.12.2015].

Finlex, Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista 856/2012 [Ajantasainen lainsäädäntö]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120856> [Viitattu 9.12.2015].

Finlex, Ympäristönsuojelulaki 2014/527 [Ajantasainen lainsäädäntö]. Saatavissa: <http://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527> [Viitattu 3.12.2015].

Habashi F (1999) Textbook of hydrometallurgy, 2. painos, Quebec, Metallurgie Extractive Quebec. ISBN 2-980-3247-7-9.

Kauppila P., Räisänen M.-L., Myllyoja S. (toim.), Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt, Suomen Ympäristökeskus, 2011. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37056/SY_29_2011.pdf?sequence= [Viitattu 29.12.2018].

Kestävän kaivostoiminnan verkosto, Kaivostoiminnan yhteiskuntavastuu 2014: Suomessa toimivien kaivosten ja malminetsijöiden yhteiskuntavastuuraportti, 2015. Saatavissa: http://www.kaivosvastuu.fi/wp-content/uploads/2015/09/Korjattu_yhteiskuntavastuuraportti_verkko_kevyt_22-09-15.pdf Viitattu 3.12.2015].

Lappalainen, K. 2015. Toimialajohtaja. Teollisuustaito Oy. Haastattelu 15.12.2015.

Lapin ELY-keskus, Päätös LAPELY/2302/2015 [Ympäristöviranomaisen päätös], 2015. https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/270339/LAPPI_Tiedote_liite_Patos_poikkeusilmoitus_Kittilan_kaivos_23102015.pdf/c63bc2f0-dcd0-4bc0-9e39-a4c78fb64048 [Viitattu 3.12.2015].

LeVan M & Carta G (2007) Adsorption and ion exchange. Teoksessa: Green D & Perry R (toim.), Perry's chemical engineers' handbook, 8. painos, New York, McGraw-Hill Companies, osa 16. ISBN 978-0-07-142294-9.

Mantoura, R. F. C., Dickson, A., Riley, J.P., The Complexation of Metals with Humic Materials in Natural Waters. *Estuarine and Coastal Marine Science* (1978) 6, pp. 387-408.

Onnettomuustutkintakeskus, Ympäristöonnettomuus Talvivaaran kaivoksella marraskuussa 2012 [Tutkintaselostus], 2014. Saatavissa:

http://www.turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muotonnettomuudet/2012/k2wFN7MMJ/Y2012-03_Tutkintaselostus.pdf [Viitattu 3.12.2015].

Opasnet, Metallimalmikaivostoiminnan ympäristöselvitykset: Kaivospatorakenteet ja niihin liittyvät selvitykset [Verkkosivusto], sivustoa päivitetty 2012. Saatavissa:

http://fi.opasnet.org/fi/Metallimalmikaivostoiminnan_ymp%C3%A4rist%C3%B6selvitykset#Kaivospatorakenteet_ja_niihin_liittyv.C3.A4t_selvitykset [Viitattu 3.12.2015].

Pehkonen, S., Raatikainen, M., Vepsäläinen, J., Makkonen, S., Hämäläinen, A., Projektitapaaminen. 7.12.2015

Regina, T., Patoturvallisuus-luento Vesienhallinta kaivoksessa -koulutuksessa, Aikuiskoulutuspalvelut AIKOPA, Kajaani 1.6.2015.

Ryabova, I. N., Nickel(II) and Copper(II) Complexes with Humic Acid Anions and Their Derivatives. *Russian Journal of Applied Chemistry* (2008), Vol. 81, No. 1, pp. 71-73.

Torkkel, M. (toim.), Isomajjala, E., Majjala, T., Sulkakoski, M. Patoturvallisuusopas [Hämeen ELY-keskuksen julkaisu], 2012. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B9F52CD1B-9BC4-47CF-B883-E8C2A35AA4FB%7D/108552> [Viitattu 3.12.2015].

TUKES, Kemikaaliputkistojen turvallisuusvaatimukset [Viranomaisen julkaisema ohje], julkaisupäivä ei tiedossa. Saatavissa:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/kemikaalit_kaasu/Kemikaaliputkistojen_turvallisuusvaatimukset.pdf Viitattu 9.12.2015].

Turhanen, P., Vepsäläinen, J., Peräniemi, S. Advanced material and approach for metal ions removal from aqueous solutions. *Scientific reports* (5 : 8992). Julkaistu 11.3.2015.

Välisalo, T. (toim.), Kaivosten stressitestit 2013 [Ympäristöministeriön raportti], 2014. Saatavissa:

www.ymparisto.fi/download/noname/%7BEA9A5106-A68B-4D07-9702-26AFBE01694B%7D/96608 [Viitattu 3.12.2015].

Wikipedia (2015a) Adsorption [Verkojulkaisu]. Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption> [Viitattu 2.12.2015].

Ympäristöhallinnon verkkopalvelu, Häiriötilanteet padoilla [Verkkosivusto], julkaistu 2015. Saatavissa:

http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesien_kaytto/Padot_ja_patoturvallisuus/Vahingonvaaratietoa_Suomen_padoista/Hairiotilanteet_padoilla%2832560%29[Viitattu 3.12.2015].

Ympäristöhallinnon verkkopalvelu, Häiriötilanteet padoilla vuonna 2014 [Verkkosivusto], julkaistu 2015.

Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesien_kaytto/Padot_ja_patoturvallisuus/Vahingonvaaratietoa_Suomen_padoista/Hairiotilanteet_padoilla_vuonna_2014%2835412%29

[Viitattu 3.12.2015].

Ympäristöministeriö, Kaivosten ympäristöturvallisuus [Ympäristöministeriön raportti], 2014. Saatavissa:

<http://hdl.handle.net/10138/42781>[Viitattu 3.12.2015].